



Vlaanderen
is milieu

Opstellen van richtlijnen voor het meten van de infiltratiecapaciteit en het modelmatig onderbouwen voor de dimensionering van infiltratievoorzieningen

VLAAMSE
MILIEUMAATSCHAPPIJ



Inhoudstafel

1. INLEIDING	1
1.1 DE OPDRACHT	1
1.2 DOEL VAN DE STUDIE	1
1.3 OVERZICHT VAN DE STUDIE	2
1.4 OPBOUW VAN HET RAPPORT	2
2. LITERATUURSTUDIE	3
2.1 INLEIDING, FUNDAMENTELE BEGRIPPEN IN HET KENNISDOMEIN	3
2.1.1 <i>Doorlatendheid</i>	4
2.1.2 <i>Context</i>	11
2.1.3 <i>Textuurindeling</i>	14
2.1.4 <i>Beproevingsmethodes en kwaliteitskenmerken</i>	29
2.2 INVENTARISATIE	33
2.2.1 <i>In situ methodes</i>	36
2.2.2 <i>Laboratoriummethodes</i>	129
2.2.3 <i>Pedotransferfuncties</i>	149
2.3 RICHTLIJNEN BUURLANDEN/GEWESTEN	159
2.3.1 <i>Interviews</i>	159
2.3.2 <i>Richtlijnen buurlanden/gewesten</i>	178
2.4 SELECTIE VAN RELEVANTE TESTEN VOOR HET MEETPROGRAMMA	188
2.4.1 <i>Ongestoorde staalname, gevolgd door een bepaling in het labo a.d.h.v. een opstelling met opwaartse stroming</i>	189
2.4.2 <i>Enkele ring methode</i>	189
2.4.3 <i>Open end methode</i>	189
2.4.4 <i>Methode Porchet (met constant head)</i>	190
2.4.5 <i>Hooghoudt of Soakaway Test</i>	190
2.4.6 <i>PTF</i>	190
2.4.7 <i>Andere</i>	190
3. INFILTRATIE TESTEN	191
3.1 INLEIDING, VASTSTELLING VAN HET PROGRAMMA	191
3.1.1 <i>Grondsoorten</i>	191
3.1.2 <i>Testen</i>	192
3.2 VOORONDERZOEK	193
3.2.1 <i>Opzoeken en inventarisatie gronden</i>	193
3.2.2 <i>Terrein-voorstudie</i>	193
3.2.3 <i>Selectie voor het meetprogramma</i>	199
3.3 TESTPROGRAMMA	200

3.3.1	<i>Lay-out, proefopzet</i>	200
3.3.2	<i>Vorbereiding</i>	201
3.3.3	<i>Opmaak werkvoorschriften en opleiding</i>	202
3.4	DATAVERWERKING MEETPROGRAMMA	202
3.4.1	<i>Normaliteit van de dataset</i>	204
3.4.2	<i>Analyse van de gemiddelde Log K per meetmethode per site</i>	207
3.4.3	<i>Multivariate ANOVA analyse op de standaarddeviatie van de log K per meetmethode per site</i>	217
3.4.4	<i>Onderlinge relatie tussen de in situ meetmethodes</i>	223
3.4.5	<i>K bepaling in het laboratorium</i>	223
3.4.6	<i>Standaarddeviatie in functie van het aantal herhalingen</i>	228
3.5	RICHTWAARDEN VOOR INFILTRATIE AFGELEID VAN HET PRAKTIJKONDERZOEK	230
3.6	EVALUATIE VAN DE METHODES	232
3.6.1	<i>Samenvatting van het onderzoek</i>	232
3.6.2	<i>Evaluatie van de meetmethodes</i>	233
4.	MODELLERING	235
4.1	MODELGEBIED	235
4.2	CONCEPTUELE MODELLERING HYDRODYNAMICA	236
4.2.1	<i>Conceptuele modellering rioolstelstel</i>	236
4.2.2	<i>Conceptuele modellering rivierstelsel</i>	261
4.2.3	<i>Conceptuele modellering riool-rivierstelsel</i>	265
4.3	CONCEPTUELE MODELLERING HYDROLOGIE	266
4.3.1	<i>iFramework</i>	266
4.3.2	<i>Hydrologische modellering</i>	266
4.3.3	<i>Bronmaatregelen</i>	268
4.3.4	<i>Autonome ontwikkeling</i>	274
4.4	SCENARIO'S	279
4.4.1	<i>Inleiding</i>	279
4.4.2	<i>Resultaten</i>	282
4.5	CONCLUSIES	331
5.	AANZET TOT RICHTLIJNEN	333
5.1	INFILTRATIEPROEVEN	333
5.2	ONTWERP BRONMAATREGELLEN	335
6.	REFERENTIES	336
6.1	LITERATUUR EN INFILTRATIE TESTEN	336
6.2	MODELLERING	343

Bijlagen

BIJLAGE A	WERKVOORSCHRIFTEN MEETMETHODEN.....	344
BIJLAGE B	CONTACTEN BUURLANDEN/GEWESTEN VOOR INTERVIEWS...	345
BIJLAGE C	OVERZICHT MEETMETHODEN TOEGEPAST IN VLAANDEREN..	346
BIJLAGE D	KALIBRATIEPARAMETERS CONCEPTUEEL RIOOLSTELSEL	347
D.1	ZUIVERINGSGEBIED EDEGEM.....	348
D.2	ZUIVERINGSGEBIED AARTSELAAR	351

Lijst van tabellen

TABEL 2-1: TEMPERATUURSAFHANKELIJKHEID VAN DE KINEMATISCHE VISCOSITEIT VAN ZUIVER WATER (BRON: WWW.ENGINEERINGTOOLBOX.COM)	6
TABEL 2-2: GEMIDDELDE BODEMTEMPERATUREN (°C) TIJDENS HET JAAR.....	8
TABEL 2-3: BEREKENING VAN HET AANDEEL IN SPECIFIEKE WARMTECAPACITEIT BIJ METING IN EEN DROGE EN IN EEN NATTE BODEM.	9
TABEL 2-4: CORRECTIE VOOR DE FACTOR TEMPERATUUR BIJ DE DOORLATENDHEIDSMETING NAAR DE DOORLATENDHEID BIJ 10°C.	10
TABEL 2-5: GRANULOMETRISCHE INDELING VAN MATERIALEN IN SITU VOLGENS DE ISO.	15
TABEL 2-6: FRACTIES IN DE KORRELVERDELING VAN EEN CONSISTENTE GROND (GRONDMECHANICA, BELGIË).	16
TABEL 2-7: BASISINDELING IN GRANULOMETRISCHE FRACTIES IN DE PEDOLOGIE EN BENAMING IN BELGIË, FRANKRIJK, NEDERLAND EN DE USA.	16
TABEL 2-8: SUBFRACTIES, GEDEFINIEERD BINNEN DE BELGISCHE BODEMKARTERING (AMERYCKX ET.AL., 1995).	17
TABEL 2-9: GRONDSOORTEN STANDAARDBESTEK 250 EN BENADERING IN DE OVEREENKOMST IN DE TEXTUURKLASSEN VAN DE BELGISCHE BODEMKARTERING.....	22
TABEL 2-10: BENADERING IN OVEREENKOMSTEN IN GRONDSOORTINDELINGEN IN BELGIË EN IN NEDERLAND.	25
TABEL 2-11: TOEPASBAARHEID VAN PRESTATIEKENMERKEN.	33
TABEL 2-12: FORMULES VOOR DE BEREKENING VAN DE SHAPE FACTOR (C). (ZANG ET AL., 1998; OPERATING INSTRUCTIONS GUELPH PERMEAMETER EIJKELKAMP)	43
TABEL 2-13: BEREKENING VAN Q EN K_{FS} . (ZANG ET AL., 1998; OPERATING INSTRUCTIONS GUELPH PERMEAMETER EIJKELKAMP).....	44
TABEL 2-14: GUELPH METHODE; STERKTE/ZWAKTE-ANALYSE.	45
TABEL 2-15: AMOOZEMETER; STERKTE/ZWAKTE-ANALYSE.	54
TABEL 2-16: GESUGGEREERDE A* WAARDES (BRON: REYNOLDS, 1993).	56
TABEL 2-17: ETC PASK CONSTANT HEAD PERMEAMETER; STERKTE/ZWAKTE-ANALYSE.	60
TABEL 2-18: CONSTANT HEAD PERMEAMETER; STERKTE/ZWAKTE-ANALYSE.	62
TABEL 2-19: BEOORDELING IN KADER VAN WATERDOORLATENDE VERHARDING (BRON: PERSOONLIJKE COMMUNICATIE ANNE BEELDENS, OCW):	67
TABEL 2-20: OPEN-END-TEST; STERKTE/ZWAKTE-ANALYSE.....	68
TABEL 2-21: NASBERG (LEFRANC) METHODE; STERKTE/ZWAKTE-ANALYSE.....	73
TABEL 2-22: REFERENTIEWAARDEN VOOR PORCHET DOORLATENDHEIDSMETINGEN IKV IRRIGATIE EN INFILTRATIETERRASSEN. (ROEDERER, 1987).....	79
TABEL 2-23: REFERENTIEWAARDEN VOOR PORCHET DOORLATENDHEIDSMETINGEN IKV INFILTRATIEVOORZIENINGEN (LACHÈRE, 2012).....	79
TABEL 2-24: MÉTHODE PORCHET; STERKTE/ZWAKTE-ANALYSE.....	80
TABEL 2-25: OMGEKEERDE BOORGAT METHODE; STERKTE/ZWAKTE-ANALYSE.....	87
TABEL 2-26: BEPALING VAN DE INFILTRATIECAPACITEIT OP BASIS VAN DE INFILTRATIE-TEST.....	89

TABEL 2-27: DOORLATENDHEIDSBEPALING UIT WATERWEGWIJZER VOOR ARCHITECTEN; STERKTE/ZWAKTE-ANALYSE.....	90
TABEL 2-28: SOAKAWAY/SOAKAGE TEST; STERKTE/ZWAKTE-ANALYSE.	94
TABEL 2-29: CORRECTIEFACTOR TE GEBRUIKEN BIJ HET ONTWERP VAN INFILTRATIESTRUCTUREN BIJ IN SITU METINGEN VAN DE HYDRAULISCHE CONDUCTIVITEIT (BRON: STORMWATER MANAGEMENT MANUAL FOR WESTERN WASHINGTON)	96
TABEL 2-30: PILOT INFILTRATION TEST (PIT); STERKTE/ZWAKTE-ANALYSE.	97
TABEL 2-31: TWO-STAGE BOREHOLE TEST; STERKTE/ZWAKTE-ANALYSE.	103
TABEL 2-32: TENSIOINFILTROMETER; STERKTE/ZWAKTE-ANALYSE.	107
TABEL 2-33: BOUWER'S AIR-ENTRY PERMEAMETER; STERKTE/ZWAKTE-ANALYSE.....	110
TABEL 2-34: ENKELE RING METHODE; STERKTE/ZWAKTE-ANALYSE.....	115
TABEL 2-35: DUBBELE RING METHODE STERKTE/ZWAKTE-ANALYSE.....	121
TABEL 2-36: SCHATTING VAN A* (ELRICK & REYNOLDS, 1992).....	126
TABEL 2-37: SIMPLIFIED FALLING HEAD TECHNIQUE; STERKTE/ZWAKTE-ANALYSE.	128
TABEL 2-38: LABORATORIUMMETHODE: VARYING MOMENT PERMEAMETER STERKTE/ZWAKTE-ANALYSE.....	132
TABEL 2-39: LABORATORIUMMETHODE: ICW PERMEAMETER STERKTE/ZWAKTE-ANALYSE.	138
TABEL 2-40: LABORATORIUMMETHODE: OEDOMETER STERKTE/ZWAKTE-ANALYSE.	140
TABEL 2-41: CORRECTIEFACTOR PER TEMPERATUUR VAN HET WATER OM NAAR EEN REFERENTIETEMPERATUUR VAN 10°C OM TE REKENEN	142
TABEL 2-42: LABORATORIUMMETHODE: DE HAUBEN WATER PERMEAMETER STERKTE/ZWAKTE-ANALYSE.....	144
TABEL 2-43: LABORATORIUMMETHODE: OSCILLERENDE PERMEAMETER STERKTE/ZWAKTE- ANALYSE.....	148
TABEL 2-44: RICHTWAARDEN VOOR HORIZONTALE DOORLATENDHEID VOOR VERSCHILLENDE BODEMTYPES OPGESTELD DOOR OVAM (2002).....	149
TABEL 2-45: RICHTWAARDEN VOOR DOORLATENDHEID VOOR VERSCHILLENDE BODEMTYPES.....	150
TABEL 2-46: RUWE INSCHATTING VAN DE INFILTRATIECAPACITEIT VAN VERSCHILLENDE GRONDSOORTEN.....	153
TABEL 2-47: ENKELE WAARDEN VAN DE DOORLAATENDHEIDSCOËFFICIËNT K BEPAALD OP ENKELE TYPISCHE GRONDMONSTERS IN HET LABORATORIUM.....	154
TABEL 2-48: DOORLATENDHEDEN VOOR DE GRONDSOORTEN VOLGENS DE STARINGREEKS, MET BENADERENDE EQUIVALENTEN IN DE BELGISCHE INDELING.....	155
TABEL 2-49: KENWAARDEN VERZADIGDE DOORLATENDHEID MDDEFD	156
TABEL 2-50: SPECIFIEKE VOORWAARDEN WAARONDER DE GRANULOMETRIEBENADERING NIET GELDT (NSSH, USDA).....	158
TABEL 2-51: TTOEPASSINGSDOMEIN EN PRINCIPES VAN VEELGEBRUIKTE METHODES OM DE DOORLATENDHEID VAN DE BODEM TE TESTEN (CEREMA).....	183
TABEL 2-52: EISEN VOOR HET AFKOPPELEN VAN HEMELWATER OP PARTICULIER EN OPENBAAR TERREIN IN NIJMEGEN MET VERWIJZING NAAR HOOFSTUKKEN VAN DE NOTA 'AFKOPPELEN EN INFILTREREN HEMELWATER' (ZUURMAN EN NEIENHUIJSEN, 2010).....	184

TABEL 3-1: SITES TEN BEHOEVE VAN HET VOORONDERZOEK EN HET MEETPROGRAMMA DOORLATENDHEIDSTESTEN	196
TABEL 3-2: UITRUSTING VOOR DE MEETMETHODES OPGENOMEN HET MEETPROGRAMMA.....	201
TABEL 3-3: AANTAL SITES PER TEXTUURKLASSE ZOALS VASTGELEGD VOLGENS DE VERSCHILLENDE METHODES OM TEXTUUR TE BEOORDELEN.....	202
TABEL 3-4: DATA VERWIJDERD UIT DE DATASET WAARMEE EEN ANOVA ANALYSE WERD UITGEVOERD TER STUDIE VAN DE INVLOED VAN DE MEETMETHODE OP DE LOG K. DE DATA WERDEN VERWIJDERD DERHALVE GEEN HOMOGENE VARIANTIES TE BEKOMEN VOLGENS DE LEVENE TEST.....	208
TABEL 3-5: P WAARDES BEREKEND DOOR MIDDEL VAN DE KRUSKAL-WALLIS TEST WAARBIJ DE INDIVIDUELE TEXTUUR GROEPEN, BEOORDEELD VOLGENS GRANULOMETRIE, MET ELKAAR WORDEN VERGELEKEN.....	210
TABEL 3-6: P WAARDES BEREKEND VIA EEN POST HOC TUKEY TEST WAARBIJ PER TEXTUURKLASSE, ZOALS BEOORDEELD DOOR PALPATIE IN HET LABO, HET VERSCHIL IN LOG K WERD ONDERZOCHT.	211
TABEL 3-7: SIGNIFICANTIE VAN DE PARAMETERS NA EEN MULTIFACTORIËLE ANOVA ANALYSE MET ALS AFHANKELIJKE VARIABLE DE LOG K EN ALS CATEGORISCHE VARIABLEN DE TEXTUURBEOORDELING VIA PALPATIE IN HET LABO, DE TEXTUURBEOORDELING VIA PALPATIE OP HET TERREIN EN DE TEXTUUR AANGEDUID OP DE BODEMKAART.....	212
TABEL 3-8: P WAARDES BEREKEND VIA EEN POST HOC TUKEY TEST WAARBIJ PER TEXTUURKLASSE, ZOALS BEOORDEELD DOOR PALPATIE OP HET TERREIN, HET VERSCHIL IN LOG K WERD ONDERZOCHT.	213
TABEL 3-9: P WAARDES BEREKEND VIA EEN POST HOC TUKEY TEST WAARBIJ PER TEXTUURKLASSE, ZOALS AANGEDUID DOOR DE BODEMKAART, HET VERSCHIL IN LOG K WERD ONDERZOCHT.....	214
TABEL 3-10: P WAARDES BEREKEND DOOR MIDDEL VAN DE KRUSKAL-WALLIS TEST WAARBIJ DE LOG K VAN DE INDIVIDUELE SITES BINNEN TEXTUURKLASSE E MET ELKAAR WORDEN VERGELEKEN.	216
TABEL 3-11: P WAARDES BEREKEND DOOR MIDDEL VAN DE KRUSKAL-WALLIS TEST WAARBIJ DE LOG K VAN DE INDIVIDUELE SITES BINNEN TEXTUURKLASSE ZG MET ELKAAR WORDEN VERGELEKEN.....	216
TABEL 3-12: VERTALING VAN CONTINUE NAAR CATEGORISCHE VARIABLEN TER STUDIE VAN DE INVLOED VAN DEZE PARAMETERS OP DE GEMIDDELDE LOG K	217
TABEL 3-13: EXTREME OBSERVATIES VOLGENS DE VIER TESTMETHODES IN DE ZEVEN TEXTUURKLASSES	220
TABEL 3-14: P WAARDES BEREKEND VIA EEN POST HOC TUKEY TEST WAARBIJ PER TEXTUURKLASSE, ZOALS BEPAALD VIA GRANULOMETRIE, HET VERSCHIL IN STANDAARDDEVIATIE VAN DE LOG K WERD ONDERZOCHT.	222
TABEL 3-15: P WAARDES BEREKEND VIA EEN POST HOC TUKEY TEST WAARBIJ PER TEXTUURKLASSE, ZOALS BEPAALD VIA PALPATIE IN HET LABORATORIUM, HET VERSCHIL IN STANDAARDDEVIATIE VAN DE LOG K WERD ONDERZOCHT.	222
TABEL 3-16: SIGNIFICANTIE VAN DE PARAMETERS NA EEN MULTIFACTORIËLE ANOVA ANALYSE MET ALS AFHANKELIJKE VARIABLE DE STANDAARDDEVIATIE VAN DE LOG K EN ALS CATEGORISCHE VARIABLEN DE TEXTUURBEOORDELING VIA GRANULOMETRIE, TEXTUURBEOORDELING VIA PALPATIE IN HET LABO, DE TEXTUURBEOORDELING VIA PALPATIE OP HET TERREIN EN DE TEXTUUR AANGEDUID OP DE BODEMKAART.	222

TABEL 3-17: PEARSON CORRELATIE (R) TUSSEN DE VERSCHILLENDE IN SITU MEETMETHODES. * DUIDT SIGNIFICANTE CORRELATIES AAN VOLGENS $P < 0.05$.	223
TABEL 3-18: P WAARDES BEREKEND DOOR MIDDEL VAN DE KRUSKAL-WALLIS TEST WAARBIJ DE GEMIDDELDE LOG K VAN DE BEPALING HET LABORATORIUM (LABO) WORDEN VERGELEKEN MET DE VIER IN SITU METHODES.	224
TABEL 3-19: PEARSON CORRELATIE (R) TUSSEN DE LOG K BEPALING IN HET LABORATORIUM EN K BEPALING IN SITU VOLGENS DE VERSCHILLENDE MEETMETHODES. * DUIDT SIGNIFICANTE CORRELATIES AAN VOLGENS $P < 0.05$.	225
TABEL 3-20: P WAARDES BEREKEND VIA EEN POST HOC TUKEY TEST WAARBIJ DE LOG K BEPAALD IN HET LABORATORIUM, WERD VERGELEKEN TUSSEN DE VERSCHILLENDE TEXTUURGROEPEN. HET ONDERSCHIED TUSSEN DE TEXTUURGROEPEN WERD GEMAAKT DOOR GRANULOMETRIE.	227
TABEL 3-21: P WAARDES BEREKEND VIA EEN POST HOC TUKEY TEST WAARBIJ DE LOG K BEPAALD IN HET LABORATORIUM, WERD VERGELEKEN TUSSEN DE VERSCHILLENDE TEXTUURGROEPEN. HET ONDERSCHIED TUSSEN DE TEXTUURGROEPEN WERD GEMAAKT PALPATIE IN HET LABORATORIUM.	228
TABEL 3-22: REFERENTIETABEL OP BASIS VAN DE IN SITU BEPALINGEN UITGEVOERD OP 38 SITES IN HET PRAKTIJKONDERZOEK.	230
TABEL 3-23: K WAARDES GEOBSERVEERD IN SITU TIJDENS HET PRAKTIJKONDERZOEK VERGELEKEN MET K WAARDES GERAPPORTEERD VOLGENS OVAM (2002); VLARIO (2005) EN DE STARINGREEKS (WÖSTEN ET AL., 2002)	231
TABEL 3-24: VERGELIJKING VAN DE VERSCHILLENDE INSITU METHODES	234
TABEL 4-1: OVERZICHT VAN DE EVENTS VOOR DE KALIBRATIE VAN HET RIOOLSTELSEL	238
TABEL 4-2: OVERZICHT VAN DE KENMERKEN VAN DE BAKELEMENTEN VAN HET ZUIVERINGSGBIED EDEGEM	241
TABEL 4-3: OVERZICHT VAN WATERSTANDEN, DEBIETEN EN VOLUMES VAN BAKELEMENTEN IN HET ZUIVERINGSGBIED EDEGEM VOOR EEN EVENT MET EEN TERUGKEERPERIODE VAN 0.5 JAAR (F02)	244
TABEL 4-4: OVERZICHT VAN DE KENMERKEN VAN DE BAKELEMENTEN IN HET ZUIVERINGSGBIED AARTSELAAR	250
TABEL 4-5: OVERZICHT VAN WATERSTANDEN, DEBIETEN EN VOLUMES VAN BAKELEMENTEN IN HET ZUIVERINGSGBIED AARTSELAAR VOOR EEN EVENT MET EEN TERUGKEERPERIODE VAN 0.5 JAAR (F02)	258
TABEL 4-6: OVERZICHT VAN DE EVENTS VOOR DE KALIBRATIE VAN HET RIOOLSTELSEL	263
TABEL 4-7: OVERZICHT VAN DE BELANGRIJKSTE KENMERKEN VAN DE MUSKINGUM ELEMENTEN IN HET CONCEPTUEEL RIVIERMODEL	263
TABEL 4-8: DE INFILTRATIECAPACITEITEN BESCHOUWD IN HET OPTIMALISATIE SCENARIO EN DE GEANALYSEERDE VERHOUDINGEN VAN INFILTREREN EN BUFFEREN	282
TABEL 4-9: OVERZICHT VAN DE LOCATIES BINNEN HET MODELGEBIED WEERHOUDEN VOOR DE BEOORDELING VAN DE IMPACT VAN BRONMAATREGELLEN EN AUTONOME ONTWIKKELING	284

Lijst van figuren

FIGUUR 2-1: EVOLUTIE VAN DE NATUURLIJKE BODEMTEMPERATUUR (LEMMENS ET AL., 2007).....	8
FIGUUR 2-2: VERSCHILLENDE SOORTEN INFILTRATIEVOORZIENINGEN MET HET INFILTRATIEOPPERVLAKTE OP AANGEDUID. (BRON: CODE VAN GOEDE PRAKTIJK VOOR HET ONTWERP, DE AANLEG EN HET ONDERHOUD VAN RIOLERINGSSYSTEMEN (VERSIE 2015-12-10))	13
FIGUUR 2-3: ONDERVERDELING IN GRONDSOORT VOOR NIET-VENIGE GRONDEN MET EEN GEHALTE < 5 % AAN GROVE ELEMENTEN (>2 MM) VOLGENS HET CENTRUM VOOR BODEMKARTERING, BELGIË.....	18
FIGUUR 2-4: ONDERVERDELING IN TEXTUURKLASSEN VOOR NIET-VENIGE GRONDEN MET EEN GEHALTE < 5 % AAN GROVE ELEMENTEN (>2 MM), BELGIË OPGESTELD DOOR HET CENTRUM VAN BODEMKARTERING, MET DE AFBAKENING VAN DE TEXTUURKLASSEN IN GEBRUIK BIJ DE NATIONALE BODEMKARTERING.(BRON: VAN RANST & SYS, 2000).....	19
FIGUUR 2-5: ONDERVERDELING IN GRONDSOORTEN VOLGENS DE BODEMKUNDIGE DIENST VAN BELGIË (BDB) IN FUNCTIE VAN BEMEX, MET IN DE TABEL EVENEENS DE OVEREENKOMSTIGE TEXTUURKLASSE VOLGENS DE BODEMKAART VAN BELGIË.	21
FIGUUR 2-6: TEXTUURDRIEHOEK VOOR NIET-EOLISCHE AFZETTINGEN, NL.....	23
FIGUUR 2-7: TEXTUURDRIEHOEK VOOR EOLISCHE AFZETTINGEN EN ANDERE LUTUMARME AFZETTINGEN, NL.....	24
FIGUUR 2-8: FRANSE TEXTUURINDELING VOLGENS GEPPA.....	26
FIGUUR 2-9: FRANSE TEXTUURINDELING VOLGENS JAMAGNE.....	27
FIGUUR 2-10: TEXTUURINDELING USDA, MET SILTFRACTIE: 2 µM - 50 µM.....	27
FIGUUR 2-11: TOETSING VAN DE BELGISCHE INDELING (A) IN GRONDSOORTEN AAN DE FAO-INDELING (B) (DONDEYNE ET AL., 2014).	28
FIGUUR 2-12: DIAGRAMMA GRONDSOORTEN VOLGENS DE DUITSE INDELING.	29
FIGUUR 2-13: GUELPH PERMEAMETER (SOIL MOISTURE EQUIPMENT CORP.).	42
FIGUUR 2-14: COMPACT CONSTANT HEAD PERMEAMETER (CCHP) OF AMOOZEMETER (BRON: EIJKELKAMP).	47
FIGUUR 2-15: SCHEMATISCHE VOORSTELLING VAN EEN CONSTANT HEAD PERMEAMETER WAARBIJ EEN CONSTATE HOOGTE VAN DE WATERKOLOM (H) OP DE BODEM VAN DE BOORPUT MET EEN STRAAL R BEHOUDEN BLIJFT (BRON: AMOOZEGAR ET AL., 2002).....	48
FIGUUR 2-16: COMPACT CONSTANT HEAD PERMEAMETER (CCHP) OF AMOOZEMETER (BRON: USER'S MANUAL EIJKELKAMP, 2004).	51
FIGUUR 2-17: GEBRUIK VAN DE AMOOZEMETER OP VERSCHILLENDE DIEPTES (BRON: USERS MANUAL EIJKELKAMP, 2004).	53
FIGUUR 2-18: PASK IN SITU PERMEAMETER	56
FIGUUR 2-19: BEPALING VAN DE C WAARDE (ELRICK & REYNOLDS, 1986; MOOERS ET AL., 1993). (MET A = R = RADIUS VAN HET BOORGAT).....	57
FIGUUR 2-20: PASK IN SITU PERMEAMETER	58
FIGUUR 2-21: CONSTANT HEAD PERMEAMETER (BRON: HTTP://WWW.SEWAGESOLUTIONS.COM/PERMEAMETERS.HTM).....	61

FIGUUR 2-22: OPEN-END TEST MET CONSTATE DUKHOOGTE H DOOR A) CONSTATE AANVULLING VAN WATERKOLOM OF B) CREËREN VAN CONSTATE DUK D.M.V. EEN POMP (COPYRIGHT 2000 SPEKTRUM AKADEMISCHER VERLAG, HEIDELBERG)	64
FIGUUR 2-23: GEAUTOMATISEERDE OPEN-END TEST MET CONSTATE WATERKOLOM (BRON: OCW).....	65
FIGUUR 2-24: OPEN-END TEST ONDER INVLOED VAN ZWAARTEKRACHT (WATERKOLOM) EN GECREËERDE DUK. (BRON: NRCS, NATIONAL ENGINEERING HANDBOOK PART 631 GEOLOGY, CHAPTER 5 ENGINEERING GEOLOGY LOGGING, SAMPLING, AND TESTING).....	67
FIGUUR 2-25: PRAKTISCHE UITVOERING VAN DE NASBERG/LEFRANC METHODE (BRON: NF P 94-132)	72
FIGUUR 2-26: METHODE PORCHET FALLING HEAD, SCHEMATISCH, (ROEDERER, 1987).	77
FIGUUR 2-27: METHODE PORCHET CONSTANT HEAD, SCHEMATISCH, VLGNS. LACHÈRE, 2012.	78
FIGUUR 2-28: INFILTRATIEPROCES ONDER EEN CILINDERINFILTROMETER (BRON: OOSTERBAAN& NIJLAND, 1994).....	82
FIGUUR 2-29: INFILTRATIE VAN EEN MET WATER GEVULD BOORGAT (OMGEKEERDE BOORGAT METHODE) (BRON: OOSTERBAAN & NIJLAND, 1994)	82
FIGUUR 2-30: METINGEN VOOR DE OMGEKEERDE BOORGATMETHODE (BRON: OOSTERBAAN & NIJLAND, 1994)	84
FIGUUR 2-31: DE OMGEKEERDE BOORGATMETHODE. (BRON: HANDLEIDING HOOGHOUDTMETHODE EIJKELKAMP).....	85
FIGUUR 2-32: SOAKAWAY METHODE	92
FIGUUR 2-33: VERSCHILLENDE FASES VAN EEN TWO STAGE BOREHOLE TEST. (BRON: TRAUTWEIN & BOUTWELL, 1994)	101
FIGUUR 2-34: TWO STAGE BOREHOLE TEST. (BRON: BENSON ET AL. 1997).....	102
FIGUUR 2-35: TENSIO-INFILTROMETER	105
FIGUUR 2-36: AIR-ENTRY PERMEAMETER (BRON: MULLINS & SMITH (1991)).	109
FIGUUR 2-37: (A) SCHEMATISCHE VOORSTELLING VAN EEN RING INFILTROMETER. (B) COMPONENTEN VAN DE HYDRAULISCHE GRADIËNT. (BRON:GYONNET ET AL., 2000).	112
FIGUUR 2-38: ENKELE-RING INFILTROMETERS LINKS: FALLING HEAD, RECHTS: CONSTANT HEAD. (GREEN ET AL. 2008).....	114
FIGUUR 2-39: INFILTRATIE VAN WATER ONDER EEN DUBBELE RING. (BRON: HTTP://AGRONOMIE.SDEC-FRANCE.COM).....	117
FIGUUR 2-40: 3 MEETSETS VOOR DE DUBBELE RING METHODE (BRON: HTTPS://WWW.EIJKELKAMP.COM).....	118
FIGUUR 2-41: VARYING MOMENT PERMEAMETER. (YOUNGS, 1968).....	131
FIGUUR 2-42: SCHEMATISCHE VOORSTELLING VAN EEN ICW PERMEAMETER (BRON: EIJKELKAMP, 2013)	137
FIGUUR 2-43: SCHEMATISCHE VOORSTELLING VAN DE HAUBEN WATER PERMEAMETER (BRON: EIJKELKAMP).....	143
FIGUUR 2-44: OSCILLATING PERMEAMETER (BRON: CHILDS & POULOVASSILIS, 1960).....	146
FIGUUR 2-45: OSCILLATING PERMEAMETER (BRON: COOPER, 2016).....	146

FIGUUR 2-46: BENADERING VAN DE DOORLATENDHEID OP BASIS VAN GRANULOMETRIE EN SCHIJNBARE DICHTHEID (NSSH, USDA)	157
FIGUUR 2-47: SCHEMA VAN HET VERLOOP VAN EEN BODEMSTUDIE VOOR HET AANLEGGEN VAN REGENWATER BEKKENS VOLGENS CEREMA.	182
FIGUUR 3-1: SITES OP KAART, FINAAL VASTGELEGD VOOR HET MEETPROGRAMMA. DE NR AANGEDUID OP KAART STEM T OVEREEN MET DE SITE NR ZOALS AANGEDUID IN TABEL 3-1.	199
FIGUUR 3-2: SCHEMATISCH OVERZICHT VAN DE LAY-OUT VOOR HET MEETPROGRAMMA PER SITE.	200
FIGUUR 3-3: SCHEMATISCH, ZIJAAZICHT VAN MEETHOOGTES T.O.V. EEN WERKVLAK IN EEN SLEUF VOOR DE VERSCHILLENDE METHODES.	201
FIGUUR 3-4: HISTOGRAM VAN DE LOG K OVER DE GANSE DATASET.	204
FIGUUR 3-5: PP PLOT VAN DE LOG K OVER DE GANSE DATASET.	205
FIGUUR 3-6: LOG K VAN SITE 58 (TEXTUUR E) EN SITE 84 (TEXTUUR Zg)	205
FIGUUR 3-7: HISTOGRAM VAN DE LOG K GEMIDDELDE PER MEETMETHODE PER SITE.	206
FIGUUR 3-8: PP PLOT VAN DE LOG K GEMIDDELDE PER MEETMETHODE PER SITE.	206
FIGUUR 3-9: LOG K WAARDES GEMETEN VIA DE VIER METHODES OP SITE 27 (TEXTUUR LEEM).	207
FIGUUR 3-10: GEMIDDELDE LOG K VAN DE VIER MEETMETHODES MET DAARBIJ DE 95 % BETROUWBAARHEIDSINTERVALLEN.	209
FIGUUR 3-11: BOX PLOT DIE DE GEMIDDELDE LOG K MET DE SPREIDING AANDUIDT VOOR DE VERSCHILLENDE TEXTUURKLASSES, ZOALS BEPAALD DOOR GRANULOMETRIE, OVER DE GANSE DATASET.	210
FIGUUR 3-12: GEMIDDELDE LOG K PER BODEMTEXTUUR BEOORDEELD VIA PALPATIE IN HET LABO EN DE 95 % BETROUWBAARHEIDSINTERVALLEN.	211
FIGUUR 3-13: GEMIDDELDE LOG K PER BODEMTEXTUUR BEOORDEELD VIA PALPATIE OP HET TERREIN EN DE 95 % BETROUWBAARHEIDSINTERVALLEN.	213
FIGUUR 3-14: GEMIDDELDE LOG K PER BODEMTEXTUUR ZOALS AANGEDUID OP DE BODEMKAART EN DE 95 % BETROUWBAARHEIDSINTERVALLEN.	214
FIGUUR 3-15: BOX PLOT DIE DE GEMIDDELDE LOG K MET DE SPREIDING AANDUIDT VOOR DE VERSCHILLENDE SITES BINNEN TEXTUURKLASSE E.	215
FIGUUR 3-16: BOX PLOT DIE DE GEMIDDELDE LOG K MET DE SPREIDING AANDUIDT VOOR DE VERSCHILLENDE SITES BINNEN TEXTUURKLASSE Zg.	216
FIGUUR 3-17: HISTOGRAM VAN DE LOG VAN DE STANDAARDDEVIATIE BEREKEND OVER DE VIER HERHALINGEN VAN ELKE MEETMETHODE UITGEVOERD PER SITE.	218
FIGUUR 3-18: STANDAARDDEVIATIE BEREKEND OVER DE LOG K VAN DE VIER HERHALINGEN VAN ÉÉN MEETMETHODE PER SITE, IN FUNCTIE VAN DE MEETMETHODE MET DAARBIJ DE 95 % BETROUWBAARHEIDSINTERVALLEN.	219
FIGUUR 3-19: STANDAARDDEVIATIE BEREKEND OVER DE LOG K VAN DE VIER HERHALINGEN VAN ÉÉN MEETMETHODE PER SITE, IN FUNCTIE VAN DE BODEMTEXTUUR BEPAALD VIA GRANULOMETRIE MET DAARBIJ DE 95 % BETROUWBAARHEIDSINTERVALLEN.	221
FIGUUR 3-20: STANDAARDDEVIATIE BEREKEND OVER DE LOG K VAN DE VIER HERHALINGEN VAN ÉÉN MEETMETHODE PER SITE, IN FUNCTIE VAN DE BODEMTEXTUUR BEPAALD VIA PALPATIE IN HET LABORATORIUM MET DAARBIJ DE 95 % BETROUWBAARHEIDSINTERVALLEN.	221

FIGUUR 3-21: PP PLOT EN HISTOGRAM VAN ZOWEL DE IN SITU, ALS DE IN HET LABO BEPAALDE, LOG K WAARDES UITGEMIDDELD PER SITE EN PER MEETMETHODE.	224
FIGUUR 3-22: BOX PLOT VAN ZOWEL DE IN SITU, ALS DE IN HET LABO BEPAALDE, GEMIDDELTE LOG K WAARDES	225
FIGUUR 3-23: SCATTERPLOT DIE RELATIE WEERGEEFT TUSSEN DE LOG K BEPAALD IN HET LABORATORIUM EN DE LOG K BEPAALD IN SITU VIA DE OPEN END (OE) METHODE EN DE ENKELE RING (ER) METHODE. IN DE ANALYSE WERDEN ALLE DATA BESCHOUWD.	226
FIGUUR 3-24: PP PLOT VAN DE GEMIDDELTE LOG K PER SITE ZOALS BEPAALD IN HET LABORATORIUM.	226
FIGUUR 3-25: STANDAARDDEVIATIE BEREKEND OVER DE LOG K BEPAALD IN HET LABORATORIUM, UITGEMIDDELD PER SITE, IN FUNCTIE VAN DE BODEMTEXTUUR BEPAALD VIA PALPATIE IN HET LABORATORIUM MET DAARBIJ DE 95 % BETROUWBAARHEIDSINTERVALLEN. LINKS WORDT DE INDELING IN BODEMTEXTUUR GEMAAKT ZOALS BEPAALD VOLGENS GRANULOMETRIE, RECHTS WORDT DE INDELING IN BODEMTEXTUUR GEMAAKT ZOALS BEPAALD VIA PALPATIE IN HET LABORATORIUM.	227
FIGUUR 3-26: 95 % BETROUWBAARHEIDSINTERVAL EN STANDAARDDEVIATIE IN FUNCTIE VAN HET AANTAL HERHALINGEN VOOR EEN STEEKPROEF VAN 25 LOG K OBSERVATIES VOOR SITE 18 (TEXTUUR Z), SITE 17 (TEXTUUR L) EN SITE 54 (TEXTUUR A) EN DE STANDAARDDEVIATIE NODIG OM DEZE BETROUWBAARHEIDSINTERVALLEN TE BEREKENEN (HET 95 % BETROUWBAARHEIDSINTERVAL WERD BEREKEND TUSSEN - 1.96STDEV EN +1.96STDEV).	229
FIGUUR 3-27: HISTOGRAM VAN DE LOG VAN DE STANDAARDDEVIATIE BEREKEND OVER DE VIER HERHALINGEN VAN ELKE MEETMETHODE UITGEVOERD PER SITE.....	230
FIGUUR 4-1: HET MODELGEBIED VAN DE BENEDENVLIET (BRON VMM).....	236
FIGUUR 4-2: SCHEMATISCHE VOORSTELLING VAN EEN BAKELEMENT UIT DE CONCEPTUELE MODELLERING VAN EEN RIOOLSTELSEL	237
FIGUUR 4-3: OVERZICHT RIOOLSTELSEL MET OPDELING IN DEELSTELSELS	239
FIGUUR 4-4: SCHEMATISCHE WEERGAVE VAN HET RIOLERINGSSTELSEL VAN ZUIVERINGSGBIED EDEGEM	240
FIGUUR 4-5: WATERSTANDSVERLOOP VAN EEN BAKELEMENT (ID: 43_KT62) IN HET VOLLEDIG HYDRODYNAMISCH (FULL), HET NIET-GEKALIBREERDE CONCEPTUEEL (CONC.) EN HET GEKALIBREERD CONCEPTUEEL (KALIBRATIE CONC.) MODEL VAN HET ZUIVERINGSGBIED EDEGEM BIJ EEN EVENT MET TERUGKEERPERIODE VAN 0.5 JAAR.....	242
FIGUUR 4-6: DOORVOERDEBIET VAN EEN BAKELEMENT (ID: 43_KT62.1) IN HET VOLLEDIG HYDRODYNAMISCH (FULL), HET NIET-GEKALIBREERDE CONCEPTUEEL (CONC.) EN HET GEKALIBREERD CONCEPTUEEL (KALIBRATIE CONC.) MODEL VAN HET ZUIVERINGSGBIED EDEGEM BIJ EEN EVENT MET TERUGKEERPERIODE VAN 0.5 JAAR.....	243
FIGUUR 4-7: OVERSTORTDEBIET VAN EEN BAKELEMENT (ID: 43_KT57.4) IN HET VOLLEDIG HYDRODYNAMISCH (FULL), HET NIET-GEKALIBREERDE CONCEPTUEEL (CONC.) EN HET GEKALIBREERD (KALIBRATIE CONC) CONCEPTUEEL MODEL VAN HET ZUIVERINGSGBIED EDEGEM BIJ EEN EVENT MET TERUGKEERPERIODE VAN 0.5 JAAR.....	243
FIGUUR 4-8: SCHEMATISCHE WEERGAVE VAN HET RIOLERINGSSTELSEL VAN DEELGEBIED SCHELLE, IN ZUIVERINGSGBIED VAN AARTSELAAR	246
FIGUUR 4-9: SCHEMATISCHE WEERGAVE VAN HET RIOLERINGSSTELSEL VAN DEELGEBIED HEMIKSEM, IN ZUIVERINGSGBIED VAN AARTSELAAR.....	247
FIGUUR 4-10: SCHEMATISCHE WEERGAVE VAN HET RIOLERINGSSTELSEL VAN DEELGEBIED EDEGEM-NOORD/WILRIJK/AARTSELAAR, IN ZUIVERINGSGBIED VAN AARTSELAAR.....	248

FIGUUR 4-11: SCHEMATISCHE WEERGAVE VAN HET RIOLERINGSTELSEL VAN DEELGEBIED WILRIJK EN AARTSELAAR, IN ZUIVERINGSGBIED VAN AARTSELAAR.....	249
FIGUUR 4-12: WATERSTANDSVERLOOP VAN EEN BAKELEMENT (ID: 46_21350) IN HET OPWAARTS DEEL VAN HET VOLLEDIG HYDRODYNAMISCH (FULL), HET NIET- GEKALIBREERDE CONCEPTUEEL (CONC.) EN HET GEKALIBREERD (KALIBRATIE CONC.) CONCEPTUEEL MODEL VAN HET ZUIVERINGSGBIED AARTSELAAR BIJ EEN EVENT MET TERUGKEERPERIODE VAN 0.5 JAAR	254
FIGUUR 4-13: DOORVOERDEBIET VAN EEN BAKELEMENT (ID: 46_21350.2) IN HET OPWAARTS DEEL VAN HET VOLLEDIG HYDRODYNAMISCH (FULL), HET NIET- GEKALIBREERDE CONCEPTUEEL (CONC.) EN HET GEKALIBREERD (KALIBRATIE CONC.) CONCEPTUEEL MODEL VAN HET ZUIVERINGSGBIED VAN AARTSELAAR BIJ EEN EVENT MET TERUGKEERPERIODE VAN 0.5 JAAR	255
FIGUUR 4-14: OVERSTORTDEBIET VAN EEN BAKELEMENT (ID: 46_21350.1) IN HET OPWAARTS DEEL VAN HET VOLLEDIG HYDRODYNAMISCH (FULL), HET NIET- GEKALIBREERDE CONCEPTUEEL (CONC.) EN HET GEKALIBREERD CONCEPTUEEL (KALIBRATIE CONC.) MODEL VAN HET ZUIVERINGSGBIED VAN AARTSELAAR BIJ EEN EVENT MET TERUGKEERPERIODE VAN 0.5 JAAR.....	255
FIGUUR 4-15: WATERSTANDSVERLOOP VAN EEN BAKELEMENT (ID: 46_AQU004) IN HET AFWAARTS DEEL VAN HET VOLLEDIG HYDRODYNAMISCH (FULL), HET NIET- GEKALIBREERDE CONCEPTUEEL (CONC.) EN HET GEKALIBREERD CONCEPTUEEL (KALIBRATIE CONC.) MODEL VAN HET ZUIVERINGSGBIED VAN AARTSELAAR BIJ EEN EVENT MET TERUGKEERPERIODE VAN 0.5 JAAR.....	256
FIGUUR 4-16: DOORVOERDEBIET VAN EEN BAKELEMENT (ID: 46_AQU004.2) IN HET AFWAARTS DEEL VAN HET VOLLEDIG HYDRODYNAMISCH (FULL), HET NIET- GEKALIBREERDE CONCEPTUEEL (CONC.) EN HET GEKALIBREERD CONCEPTUEEL (KALIBRATIE CONC.) MODEL VAN HET ZUIVERINGSGBIED VAN AARTSELAAR BIJ EEN EVENT MET TERUGKEERPERIODE VAN 0.5 JAAR.....	256
FIGUUR 4-17: OVERSTORTDEBIET VAN EEN BAKELEMENT (ID: 46_AQU004.1) IN HET AFWAARTS DEEL VAN HET VOLLEDIG HYDRODYNAMISCH (FULL), HET NIET- GEKALIBREERDE CONCEPTUEEL (CONC.) EN HET GEKALIBREERD CONCEPTUEEL (KALIBRATIE CONC.) MODEL VAN HET ZUIVERINGSGBIED VAN AARTSELAAR BIJ EEN EVENT MET TERUGKEERPERIODE VAN 0.5 JAAR.....	257
FIGUUR 4-18: OVERZICHT VAN DE WATERPEILLEN IN DE BENEDENVLIET TER HOOGTE VAN DE CLEYDAELLAAN TE AARTSELAAR IN HET VOLLEDIG HYDRODYNAMISCH EN HET CONCEPTUEEL WATERLOOPMODEL VOOR EEN PERIODE IN OKTOBER 1998 MET EEN TERUGKEERPERIODE VAN 1 JAAR.....	264
FIGUUR 4-19: OVERZICHT VAN DE WATERPEILLEN IN DE BENEDENVLIET TER HOOGTE VAN DE CLEYDAELLAAN TE AARTSELAAR IN HET VOLLEDIG HYDRODYNAMISCH EN HET CONCEPTUEEL WATERLOOPMODEL VOOR EEN PERIODE IN NOVEMBER 2010 MET EEN TERUGKEERPERIODE VAN 25 JAAR.....	264
FIGUUR 4-20: OVERZICHT VAN DE WATERPEILLEN IN DE BENEDENVLIET TER HOOGTE VAN DE CLEYDAELLAAN TE AARTSELAAR IN HET VOLLEDIG HYDRODYNAMISCH EN HET CONCEPTUEEL WATERLOOPMODEL VOOR EEN PERIODE IN AUGUSTUS 1996 MET EEN TERUGKEERPERIODE VAN 50 JAAR.....	265
FIGUUR 4-21: OVERZICHT VAN DE WATERPEILLEN IN DE BENEDENVLIET TER HOOGTE VAN DE CLEYDAELLAAN TE AARTSELAAR IN HET VOLLEDIG HYDRODYNAMISCH EN HET CONCEPTUEEL WATERLOOPMODEL VOOR EEN PERIODE IN SEPTEMBER 1998 MET EEN TERUGKEERPERIODE VAN 100 JAAR	265

FIGUUR 4-22: OVERZICHT VAN HET CONCEPTUEEL WALLINGFORD MODEL DAT DE INPUT VOOR HET RIOOLGEDEELTE VAN HET CONCEPTUEEL RIOOLMODEL LEVERT (BRON: ICM HANDLEIDING)	267
FIGUUR 4-23: WEERGAVE VAN DE CONCEPTUELE BENADERING VAN HET INFILTRATIEPROCES	270
FIGUUR 4-24: OVERZICHT VAN DE REGENERATIECURVE VAN HET HORTON MODEL (BRON: (HORTON, 1939))	273
FIGUUR 4-25: OVERZICHT VAN DE GEMIDDELDE MAANDELIJKE NEERSLAGTOTALEN IN HET HUIDIG KLIMAAT (NOCC) EN HET HOOG KLIMAATSCENARIO IN 2050 (HCC) VOOR DE PERIODE 1977-1988	275
FIGUUR 4-26: WATERSTANDEN OP DE SCHELDE ONDER INVLOED VAN ZEESPIEGELSTIJGING BIJ HET HOOG KLIMAATSCENARIO IN 2050	275
FIGUUR 4-27: VOORBEELD VAN DE LATIS LUC (LAND USE CHANGE; VITO GEGEVENS) LANDGEBRUIKKAARTEN IN 2010 EN 2050. RESIDENTIËLE GEBIEDEN WORDEN ROOD WEERGEGEVEN	276
FIGUUR 4-28: VOORBEELD VAN DE VITO KAARTEN MET DE WOONDICHTHEID (ROZE) IN 2010 EN 2050	276
FIGUUR 4-29: OVERZICHT EVOLUTIE WEGENIS OPPERVLAKE IN RIOOL CATCHMENTS ONDER INVLOED VAN AUTONOME ONTWIKKELING IN 2050 OP BASIS VAN DE VITO LANDGEBRUIKKAARTEN	277
FIGUUR 4-30: OVERZICHT EVOLUTIE DAKOPPERVLAKTE IN RIOOL CATCHMENTS ONDER INVLOED VAN AUTONOME ONTWIKKELING IN 2050 OP BASIS VAN DE VITO LANDGEBRUIKKAARTEN	278
FIGUUR 4-31: OVERZICHT EVOLUTIE I.E.'S IN RIOOL CATCHMENTS ONDER INVLOED VAN AUTONOME ONTWIKKELING IN 2050 OP BASIS VAN DE VITO LANDGEBRUIKKAARTEN	278
FIGUUR 4-32: SCHEMATISCHE WEERGAVE VAN DE BESCHOUWDE SCENARIO'S	280
FIGUUR 4-33: SITUERING VAN DE LOCATIES (ROOD) BINNEN HET MODELGEBIED VAN DE BENEDENVLIET DIE WEERHOUDEN ZIJN VOOR DE BEOORDELING VAN DE IMPACT VAN BRONMAATREGELEN EN AUTONOME ONTWIKKELING IN 2050	283
FIGUUR 4-34: PUNTENWOLK VAN DE OVERSTORTPIEKDEBIETEN (OVERSTORT ST43_KT950.2) LANGS DE MANDOEERSEBEEK IN HET BASISSCENARIO (S_0) TEGENOVER HET OPTIMALISATIESCENARIO ($S_{OPT,I-J}$) MET 8 INFILTRATIECAPACITEITEN ($i=1-8$; 22.00-0.01 10^{-6} M/S), VERSCHILLENDE VERHOUDINGEN VAN INFILTREREN (J ; 100%, 50%, 25%) IN COMBINATIE MET BUFFEREN EN VARIANTEN MET ENKEL BUFFEREN ($S_{OPT,BUF}$) EN ENKEL HEMELWATERHERGEBRUIK ($S_{OPT,HER}$)	286
FIGUUR 4-35: QQ PLOT VAN DE OVERSTORTVOLUMES LANGSHEEN DE MANDOEERSEBEEK (OVERSTORT ST43_KT950.2) IN HET BASISSCENARIO (S_0) TEGENOVER HET OPTIMALISATIESCENARIO ($S_{OPT,I-J}$) MET 8 INFILTRATIECAPACITEITEN ($i=1-8$; 22.00-0.01 10^{-6} M/S), VERSCHILLENDE VERHOUDINGEN VAN INFILTREREN (J ; 100%, 50%, 25%) IN COMBINATIE MET BUFFEREN EN VARIANTEN MET ENKEL BUFFEREN ($S_{OPT,BUF}$) EN ENKEL HEMELWATERHERGEBRUIK ($S_{OPT,HER}$)	286
FIGUUR 4-36: QQ PLOT VAN DE JAARLIJKE OVERSTORTFREQUENTIE LANGS DE MANDOEERSEBEEK (OVERSTORT: ST43_KT950.2) IN HET BASISSCENARIO (S_0) TEGENOVER HET OPTIMALISATIESCENARIO ($S_{OPT,I-J}$) MET 8 INFILTRATIECAPACITEITEN ($i=1-8$; 22.00-0.01 10^{-6} M/S), VERSCHILLENDE VERHOUDINGEN VAN INFILTREREN (J ; 100%, 50%, 25%) IN COMBINATIE MET BUFFEREN EN VARIANTEN MET ENKEL BUFFEREN ($S_{OPT,BUF}$) EN ENKEL HEMELWATERHERGEBRUIK ($S_{OPT,HER}$)	287

FIGUUR 4-37: QQ PLOT VAN DE PIEKDEBIETEN OP DE MANDOEERSEBEEK (KNOOPPUNT: MAN048) IN HET BASISSCENARIO (S_0) TEGENOVER HET OPTIMALISATIESCENARIO ($S_{OPT,I-J}$) MET 8 INFILTRATIECAPACITEITEN ($i=1-8$; 22.00-0.01 10^{-6} M/S), VERSCHILLENDE VERHOUDINGEN VAN INFILTREREN (J; 100%, 50%, 25%) IN COMBINATIE MET BUFFEREN EN VARIANTEN MET ENKEL BUFFEREN ($S_{OPT,BUF}$) EN ENKEL HEMELWATERHERGEBRUIK ($S_{OPT,HER}$).....	287
FIGUUR 4-38: PUNTENWOLK VAN DE PIEKDEBIETEN OP DE MANDOEERSEBEEK (KNOOPPUNT: MAN079) IN HET BASISSCENARIO (S_0) TEGENOVER HET OPTIMALISATIESCENARIO ($S_{OPT,I-J}$) MET 8 INFILTRATIECAPACITEITEN ($i=1-8$; 22.00-0.01 10^{-6} M/S), VERSCHILLENDE VERHOUDINGEN VAN INFILTREREN (J; 100%, 50%, 25%) IN COMBINATIE MET BUFFEREN EN VARIANTEN MET ENKEL BUFFEREN ($S_{OPT,BUF}$) EN ENKEL HEMELWATERHERGEBRUIK ($S_{OPT,HER}$).....	288
FIGUUR 4-39: PUNTENWOLK VAN HET JAARLIJKS OVERSTROOMD VOLUME LANGSHEEN DE MANDOEERSEBEEK (STORAGE AREA: L_MAN040R) IN HET BASISSCENARIO (S_0) TEGENOVER HET OPTIMALISATIESCENARIO ($S_{OPT,I-J}$) MET 8 INFILTRATIECAPACITEITEN ($i=1-8$; 22.00-0.01 10^{-6} M/S), VERSCHILLENDE VERHOUDINGEN VAN INFILTREREN (J; 100%, 50%, 25%) IN COMBINATIE MET BUFFEREN EN VARIANTEN MET ENKEL BUFFEREN ($S_{OPT,BUF}$) EN ENKEL HEMELWATERHERGEBRUIK ($S_{OPT,HER}$)	288
FIGUUR 4-40: QQ PLOT VAN HET JAARLIJKSE OVERSTROOMD VOLUME LANGSHEEN DE MANDOEERSEBEEK (STORAGE AREA: L_MAN074R) IN HET BASISSCENARIO (S_0) TEGENOVER HET OPTIMALISATIESCENARIO ($S_{OPT,I-J}$) MET 8 INFILTRATIECAPACITEITEN ($i=1-8$; 22.00-0.01 10^{-6} M/S), VERSCHILLENDE VERHOUDINGEN VAN INFILTREREN (J; 100%, 50%, 25%) IN COMBINATIE MET BUFFEREN EN VARIANTEN MET ENKEL BUFFEREN ($S_{OPT,BUF}$) EN ENKEL HEMELWATERHERGEBRUIK ($S_{OPT,HER}$)	289
FIGUUR 4-41: PUNTENWOLK VAN DE OVERSTORT PIEKDEBIETEN LANGSHEEN DE EDEGEMSEBEEK (OVERSTORT ST43_14.2) IN HET BASISSCENARIO (S_0) TEGENOVER HET OPTIMALISATIESCENARIO ($S_{OPT,I-J}$) MET 8 INFILTRATIECAPACITEITEN ($i=1-8$; 22.00-0.01 10^{-6} M/S), VERSCHILLENDE VERHOUDINGEN VAN INFILTREREN (J; 100%, 50%, 25%) IN COMBINATIE MET BUFFEREN EN VARIANTEN MET ENKEL BUFFEREN ($S_{OPT,BUF}$) EN ENKEL HEMELWATERHERGEBRUIK ($S_{OPT,HER}$)	291
FIGUUR 4-42: QQ PLOT VAN DE JAARLIJKSE OVERSTORTVOLUMES LANGSHEEN DE EDEGEMSEBEEK (OVERSTORT ST43_14.2) IN HET BASISSCENARIO (S_0) TEGENOVER HET OPTIMALISATIESCENARIO ($S_{OPT,I-J}$) MET 8 INFILTRATIECAPACITEITEN ($i=1-8$; 22.00-0.01 10^{-6} M/S), VERSCHILLENDE VERHOUDINGEN VAN INFILTREREN (J; 100%, 50%, 25%) IN COMBINATIE MET BUFFEREN EN VARIANTEN MET ENKEL BUFFEREN ($S_{OPT,BUF}$) EN ENKEL HEMELWATERHERGEBRUIK ($S_{OPT,HER}$)	291
FIGUUR 4-43: QQ PLOT VAN DE JAARLIJKSE OVERSTORTFREQUENTIE LANGSHEEN DE EDEGEMSEBEEK (OVERSTORT ST43_200.2) IN HET BASISSCENARIO (S_0) TEGENOVER HET OPTIMALISATIESCENARIO ($S_{OPT,I-J}$) MET 8 INFILTRATIECAPACITEITEN ($i=1-8$; 22.00-0.01 10^{-6} M/S), VERSCHILLENDE VERHOUDINGEN VAN INFILTREREN (J; 100%, 50%, 25%) IN COMBINATIE MET BUFFEREN EN VARIANTEN MET ENKEL BUFFEREN ($S_{OPT,BUF}$) EN ENKEL HEMELWATERHERGEBRUIK ($S_{OPT,HER}$)	292
FIGUUR 4-44: PUNTENWOLK VAN DE JAARLIJKSE AFVOERVOLUMES NAAR HET RWZI VAN EDEGEM IN HET BASISSCENARIO (S_0) TEGENOVER HET OPTIMALISATIESCENARIO ($S_{OPT,I-J}$) MET 8 INFILTRATIECAPACITEITEN ($i=1-8$; 22.00-0.01 10^{-6} M/S), VERSCHILLENDE VERHOUDINGEN VAN INFILTREREN (J; 100%, 50%, 25%) IN COMBINATIE MET BUFFEREN EN VARIANTEN MET ENKEL BUFFEREN ($S_{OPT,BUF}$) EN ENKEL HEMELWATERHERGEBRUIK ($S_{OPT,HER}$).....	292
FIGUUR 4-45: PUNTENWOLK VAN DE PIEKDEBIETEN OP DE EDEGEMSEBEEK (KNOOPPUNT EDB009) IN HET BASISSCENARIO (S_0) TEGENOVER HET OPTIMALISATIESCENARIO ($S_{OPT,I-J}$) MET 8 INFILTRATIECAPACITEITEN ($i=1-8$; 22.00-0.01 10^{-6} M/S),	

VERSCHILLENDE VERHOUDINGEN VAN INFILTREREN (J; 100%, 50%, 25%) IN COMBINATIE MET BUFFEREN EN VARIANTEN MET ENKEL BUFFEREN ($S_{OPT,BUF}$) EN ENKEL HEMELWATERHERGEBRUIK ($S_{OPT,HER}$).....	293
FIGUUR 4-46: QQ PLOT VAN HET JAARLIJKS OVERSTROOMD VOLUME LANGSHEEN DE EDEGEMSEBEEK (STORAGE AREA L_EDB019R) IN HET BASISSCENARIO (S_0) TEGENOVER HET OPTIMALISATIESCENARIO ($S_{OPT,I-J}$) MET 8 INFILTRATIECAPACITEITEN ($i=1-8$; 22.00-0.01 10^{-6} M/s), VERSCHILLENDE VERHOUDINGEN VAN INFILTREREN (J; 100%, 50%, 25%) IN COMBINATIE MET BUFFEREN EN VARIANTEN MET ENKEL BUFFEREN ($S_{OPT,BUF}$) EN ENKEL HEMELWATERHERGEBRUIK ($S_{OPT,HER}$)	293
FIGUUR 4-47: QQ PLOT VAN DE PIEKDEBIETEN VAN EEN OVERSTORT LANGS DE KLEINE STRUISBEEK (OVERSTORT ST46_AQU002.1) IN HET BASISSCENARIO (S_0) TEGENOVER HET OPTIMALISATIESCENARIO ($S_{OPT,I-J}$) MET 8 INFILTRATIECAPACITEITEN ($i=1-8$; 22.00-0.01 10^{-6} M/s), VERSCHILLENDE VERHOUDINGEN VAN INFILTREREN (J; 100%, 50%, 25%) IN COMBINATIE MET BUFFEREN EN VARIANTEN MET ENKEL BUFFEREN ($S_{OPT,BUF}$) EN ENKEL HEMELWATERHERGEBRUIK ($S_{OPT,HER}$)	295
FIGUUR 4-48: QQ PLOT VAN DE OVERSTORTVOLUMES LANGSHEEN DE KLEINE STRUISBEEK (OVERSTORT ST46_AQU002.1) IN HET BASISSCENARIO (S_0) TEGENOVER HET OPTIMALISATIESCENARIO ($S_{OPT,I-J}$) MET 8 INFILTRATIECAPACITEITEN ($i=1-8$; 22.00- 0.01 10^{-6} M/s), VERSCHILLENDE VERHOUDINGEN VAN INFILTREREN (J; 100%, 50%, 25%) IN COMBINATIE MET BUFFEREN EN VARIANTEN MET ENKEL BUFFEREN ($S_{OPT,BUF}$) EN ENKEL HEMELWATERHERGEBRUIK ($S_{OPT,HER}$)	295
FIGUUR 4-49: QQ PLOT VAN DE OVERSTORTFREQUENTIE LANGSHEEN DE KLEINE STRUISBEEK (OVERSTORT ST46_AQU002.1) IN HET BASISSCENARIO (S_0) TEGENOVER HET OPTIMALISATIESCENARIO ($S_{OPT,I-J}$) MET 8 INFILTRATIECAPACITEITEN ($i=1-8$; 22.00-0.01 10^{-6} M/s), VERSCHILLENDE VERHOUDINGEN VAN INFILTREREN (J; 100%, 50%, 25%) IN COMBINATIE MET BUFFEREN EN VARIANTEN MET ENKEL BUFFEREN ($S_{OPT,BUF}$) EN ENKEL HEMELWATERHERGEBRUIK ($S_{OPT,HER}$)	296
FIGUUR 4-50: QQ PLOT VAN DE PIEKDEBIETEN OP DE KLEINE STRUISBEEK (KNOOPPUNT KST005) IN HET BASISSCENARIO (S_0) TEGENOVER HET OPTIMALISATIESCENARIO ($S_{OPT,I-J}$) MET 8 INFILTRATIECAPACITEITEN ($i=1-8$; 22.00-0.01 10^{-6} M/s), VERSCHILLENDE VERHOUDINGEN VAN INFILTREREN (J; 100%, 50%, 25%) IN COMBINATIE MET BUFFEREN EN VARIANTEN MET ENKEL BUFFEREN ($S_{OPT,BUF}$) EN ENKEL HEMELWATERHERGEBRUIK ($S_{OPT,HER}$).....	296
FIGUUR 4-51: PUNTENWOLK VAN DE JAARLIJKSE OVERSTROOMDE VOLUMES LANGSHEEN DE KLEINE STRUISBEEK (STORAGE AREA L_KST019R) IN HET BASISSCENARIO (S_0) TEGENOVER HET OPTIMALISATIESCENARIO ($S_{OPT,I-J}$) MET 8 INFILTRATIECAPACITEITEN ($i=1-8$; 22.00-0.01 10^{-6} M/s), VERSCHILLENDE VERHOUDINGEN VAN INFILTREREN (J; 100%, 50%, 25%) IN COMBINATIE MET BUFFEREN EN VARIANTEN MET ENKEL BUFFEREN ($S_{OPT,BUF}$) EN ENKEL HEMELWATERHERGEBRUIK ($S_{OPT,HER}$)	297
FIGUUR 4-52: QQ PLOT VAN DE PIEKDEBIETEN VAN DE OVERSTORTEN LANGSHEEN DE BENEDENVLIET (OVERSTORT ST46_HEM21298.3) IN HET BASISSCENARIO (S_0) TEGENOVER HET OPTIMALISATIESCENARIO ($S_{OPT,I-J}$) MET 8 INFILTRATIECAPACITEITEN ($i=1-8$; 22.00-0.01 10^{-6} M/s), VERSCHILLENDE VERHOUDINGEN VAN INFILTREREN (J; 100%, 50%, 25%) IN COMBINATIE MET BUFFEREN EN VARIANTEN MET ENKEL BUFFEREN ($S_{OPT,BUF}$) EN ENKEL HEMELWATERHERGEBRUIK ($S_{OPT,HER}$)	299
FIGUUR 4-53: PUNTENWOLK VAN DE PIEKDEBIETEN VAN DE OVERSTORTEN LANGSHEEN DE BENEDENVLIET (OVERSTORT 46_D21643C.2) IN HET BASISSCENARIO (S_0) TEGENOVER HET OPTIMALISATIESCENARIO ($S_{OPT,I-J}$) MET 8 INFILTRATIECAPACITEITEN ($i=1-8$; 22.00-0.01 10^{-6} M/s), VERSCHILLENDE VERHOUDINGEN VAN INFILTREREN (J; 100%, 50%, 25%) IN COMBINATIE MET BUFFEREN EN VARIANTEN MET ENKEL BUFFEREN ($S_{OPT,BUF}$) EN ENKEL HEMELWATERHERGEBRUIK ($S_{OPT,HER}$)	299

FIGUUR 4-54: PUNTENWOLK VAN DE JAARLIJKSE OVERSTORTVOLUMES OP DE OVERSTORTEN LANGSHEEN DE BENEDENVLIET (OVERSTORT ST46_HEM21298.3) IN HET BASISSCENARIO (S_0) TEGENOVER HET OPTIMALISATIESCENARIO ($S_{OPT,I-J}$) MET 8 INFILTRATIECAPACITEITEN ($I=1-8$; 22.00-0.01 10^{-6} M/S), VERSCHILLENDE VERHOUDINGEN VAN INFILTREREN (J ; 100%, 50%, 25%) IN COMBINATIE MET BUFFEREN EN VARIANTEN MET ENKEL BUFFEREN ($S_{OPT,BUF}$) EN ENKEL HEMELWATERHERGEBRUIK ($S_{OPT,HER}$).....	300
FIGUUR 4-55: PUNTENWOLK VAN DE JAARLIJKSE OVERSTORTVOLUMES OP DE OVERSTORTEN LANGSHEEN DE BENEDENVLIET (OVERSTORT 46_D21643C.2) IN HET BASISSCENARIO (S_0) TEGENOVER HET OPTIMALISATIESCENARIO ($S_{OPT,I-J}$) MET 8 INFILTRATIECAPACITEITEN ($I=1-8$; 22.00-0.01 10^{-6} M/S), VERSCHILLENDE VERHOUDINGEN VAN INFILTREREN (J ; 100%, 50%, 25%) IN COMBINATIE MET BUFFEREN EN VARIANTEN MET ENKEL BUFFEREN ($S_{OPT,BUF}$) EN ENKEL HEMELWATERHERGEBRUIK ($S_{OPT,HER}$).....	300
FIGUUR 4-56: QQ PLOT VAN DE OVERSTORTFREQUENTIE OP DE OVERSTORTEN LANGSHEEN DE BENEDENVLIET (OVERSTORT ST46_HEM21298.3) IN HET BASISSCENARIO (S_0) TEGENOVER HET OPTIMALISATIESCENARIO ($S_{OPT,I-J}$) MET 8 INFILTRATIECAPACITEITEN ($I=1-8$; 22.00-0.01 10^{-6} M/S), VERSCHILLENDE VERHOUDINGEN VAN INFILTREREN (J ; 100%, 50%, 25%) IN COMBINATIE MET BUFFEREN EN VARIANTEN MET ENKEL BUFFEREN ($S_{OPT,BUF}$) EN ENKEL HEMELWATERHERGEBRUIK ($S_{OPT,HER}$).....	301
FIGUUR 4-57: QQ PLOT VAN DE OVERSTORTFREQUENTIE OP DE OVERSTORTEN LANGSHEEN DE BENEDENVLIET (OVERSTORT 46_D21643C.2) IN HET BASISSCENARIO (S_0) TEGENOVER HET OPTIMALISATIESCENARIO ($S_{OPT,I-J}$) MET 8 INFILTRATIECAPACITEITEN ($I=1-8$; 22.00-0.01 10^{-6} M/S), VERSCHILLENDE VERHOUDINGEN VAN INFILTREREN (J ; 100%, 50%, 25%) IN COMBINATIE MET BUFFEREN EN VARIANTEN MET ENKEL BUFFEREN ($S_{OPT,BUF}$) EN ENKEL HEMELWATERHERGEBRUIK ($S_{OPT,HER}$).....	301
FIGUUR 4-58: PUNTENWOLK VAN DE JAARLIJKSE AFVOERVOLUMES NAAR HET RWZI VAN AARTSELAAR IN HET BASISSCENARIO (S_0) TEGENOVER HET OPTIMALISATIESCENARIO ($S_{OPT,I-J}$) MET 8 INFILTRATIECAPACITEITEN ($I=1-8$; 22.00-0.01 10^{-6} M/S), VERSCHILLENDE VERHOUDINGEN VAN INFILTREREN (J ; 100%, 50%, 25%) IN COMBINATIE MET BUFFEREN EN VARIANTEN MET ENKEL BUFFEREN ($S_{OPT,BUF}$) EN ENKEL HEMELWATERHERGEBRUIK ($S_{OPT,HER}$).....	302
FIGUUR 4-59: PUNTENWOLK VAN DE PIEKDEBIETEN OP DE BENEDENVLIET (KNOOPPUNT BV072) IN HET BASISSCENARIO (S_0) TEGENOVER HET OPTIMALISATIESCENARIO ($S_{OPT,I-J}$) MET 8 INFILTRATIECAPACITEITEN ($I=1-8$; 22.00-0.01 10^{-6} M/S), VERSCHILLENDE VERHOUDINGEN VAN INFILTREREN (J ; 100%, 50%, 25%) IN COMBINATIE MET BUFFEREN EN VARIANTEN MET ENKEL BUFFEREN ($S_{OPT,BUF}$) EN ENKEL HEMELWATERHERGEBRUIK ($S_{OPT,HER}$).....	302
FIGUUR 4-60: QQ PLOT VAN DE PIEKDEBIETEN OP DE BENEDENVLIET (KNOOPPUNT BV123) IN HET BASISSCENARIO (S_0) TEGENOVER HET OPTIMALISATIESCENARIO ($S_{OPT,I-J}$) MET 8 INFILTRATIECAPACITEITEN ($I=1-8$; 22.00-0.01 10^{-6} M/S), VERSCHILLENDE VERHOUDINGEN VAN INFILTREREN (J ; 100%, 50%, 25%) IN COMBINATIE MET BUFFEREN EN VARIANTEN MET ENKEL BUFFEREN ($S_{OPT,BUF}$) EN ENKEL HEMELWATERHERGEBRUIK ($S_{OPT,HER}$).....	303
FIGUUR 4-61: PUNTENWOLK VAN HET JAARLIJKS OVERSTROOMD VOLUME LANGSHEEN DE BENEDENVLIET (STORAGE AREA L_BV077R) IN HET BASISSCENARIO (S_0) TEGENOVER HET OPTIMALISATIESCENARIO ($S_{OPT,I-J}$) MET 8 INFILTRATIECAPACITEITEN ($I=1-8$; 22.00- 0.01 10^{-6} M/S), VERSCHILLENDE VERHOUDINGEN VAN INFILTREREN (J ; 100%, 50%, 25%) IN COMBINATIE MET BUFFEREN EN VARIANTEN MET ENKEL BUFFEREN ($S_{OPT,BUF}$) EN ENKEL HEMELWATERHERGEBRUIK ($S_{OPT,HER}$)	303

FIGUUR 4-62: PUNTENWOLK VAN HET JAARLIJKS OVERSTROOMD VOLUME LANGSHEEN DE BENEDENVLIET (STORAGE AREA L_BV120R) IN HET BASISSCENARIO (S_0) TEGENOVER HET OPTIMALISATIESCENARIO ($S_{OPT,I-J}$) MET 8 INFILTRATIECAPACITEITEN ($i=1-8$; 22.00-0.01 10^{-6} M/S), VERSCHILLENDE VERHOUDINGEN VAN INFILTREREN (J ; 100%, 50%, 25%) IN COMBINATIE MET BUFFEREN EN VARIANTEN MET ENKEL BUFFEREN ($S_{OPT,BUF}$) EN ENKEL HEMELWATERHERGEBRUIK ($S_{OPT,HER}$)	304
FIGUUR 4-63: PUNTENWOLK VAN DE PIEKDEBIETEN OP OVERSTORT ST43_KT950.2 LANGS DE MANDOEERSEBEEK IN HET BASISSCENARIO (S_0) IN 2010 TEGENOVER HET BASISSCENARIO ($S_{0,2050}$) EN HET MAXIMAAL SCENARIO ($S_{MAX,2050}$) NA AUTONOME ONTWIKKELING IN 2050	305
FIGUUR 4-64: QQ PLOT VAN DE OVERSTORTVOLUMES OP DE MANDOEERSEBEEK (OVERSTORT ST43_KT950.2) IN HET BASISSCENARIO (S_0) IN 2010 TEGENOVER HET BASISSCENARIO ($S_{0,2050}$) EN HET MAXIMAAL SCENARIO ($S_{MAX,2050}$) NA AUTONOME ONTWIKKELING IN 2050	306
FIGUUR 4-65: QQ PLOT VAN DE JAARLIJKSE OVERSTORTFREQUENTIE LANGSHEEN DE MANDOEERSEBEEK (OVERSTORT: ST43_KT950.2) IN HET BASISSCENARIO (S_0) IN 2010 TEGENOVER HET BASISSCENARIO ($S_{0,2050}$) EN HET MAXIMAAL SCENARIO ($S_{MAX,2050}$) NA AUTONOME ONTWIKKELING IN 2050	306
FIGUUR 4-66: QQ PLOT VAN DE PIEKDEBIETEN OP DE MANDOEERSEBEEK (KNOOPPUNT: MAN059) IN HET BASISSCENARIO (S_0) IN 2010 TEGENOVER HET BASISSCENARIO ($S_{0,2050}$) EN HET MAXIMAAL SCENARIO ($S_{MAX,2050}$) NA AUTONOME ONTWIKKELING IN 2050	307
FIGUUR 4-67: PUNTENWOLK VAN DE PIEKDEBIETEN OP DE MANDOEERSEBEEK (KNOOPPUNT: MAN079) IN HET BASISSCENARIO (S_0) IN 2010 TEGENOVER HET BASISSCENARIO ($S_{0,2050}$) EN HET MAXIMAAL SCENARIO ($S_{MAX,2050}$) NA AUTONOME ONTWIKKELING IN 2050	307
FIGUUR 4-68: PUNTENWOLK VAN HET JAARLIJKS OVERSTROOMD VOLUME LANGSHEEN DE MANDOEERSEBEEK (STORAGE AREA: L_MAN068R') IN HET BASISSCENARIO (S_0) IN 2010 TEGENOVER HET BASISSCENARIO ($S_{0,2050}$) EN HET MAXIMAAL SCENARIO ($S_{MAX,2050}$) NA AUTONOME ONTWIKKELING IN 2050	308
FIGUUR 4-69: QQ PLOT VAN HET JAARLIJKSE OVERSTROOMD VOLUME LANGSHEEN DE MANDOEERSEBEEK (STORAGE AREA: L_MAN068R) IN HET BASISSCENARIO (S_0) IN 2010 TEGENOVER HET BASISSCENARIO ($S_{0,2050}$) EN HET MAXIMAAL SCENARIO ($S_{MAX,2050}$) NA AUTONOME ONTWIKKELING IN 2050	308
FIGUUR 4-70: QQ PLOT VAN DE OVERSTORT PIEKDEBIETEN LANGSHEEN DE EDEGEMSEBEEK (OVERSTORT ST43_14.2) IN HET BASISSCENARIO (S_0) IN 2010 TEGENOVER HET BASISSCENARIO ($S_{0,2050}$) EN HET MAXIMAAL SCENARIO ($S_{MAX,2050}$) NA AUTONOME ONTWIKKELING IN 2050	309
FIGUUR 4-71: QQ PLOT VAN DE JAARLIJKSE OVERSTORTVOLUMES LANGSHEEN DE EDEGEMSEBEEK (OVERSTORT ST43_14.2) IN HET BASISSCENARIO (S_0) IN 2010 TEGENOVER HET BASISSCENARIO ($S_{0,2050}$) EN HET MAXIMAAL SCENARIO ($S_{MAX,2050}$) NA AUTONOME ONTWIKKELING IN 2050	310
FIGUUR 4-72: PUNTENWOLK VAN DE JAARLIJKSE OVERSTORTFREQUENTIE LANGSHEEN DE EDEGEMSEBEEK (OVERSTORT ST43_14.2) IN HET BASISSCENARIO (S_0) IN 2010 TEGENOVER HET BASISSCENARIO ($S_{0,2050}$) EN HET MAXIMAAL SCENARIO ($S_{MAX,2050}$) NA AUTONOME ONTWIKKELING IN 2050	310
FIGUUR 4-73: PUNTENWOLK VAN DE JAARLIJKSE AFVOERVOLUMES NAAR DE RWZI VAN EDEGEM IN HET BASISSCENARIO (S_0) IN 2010 TEGENOVER HET BASISSCENARIO ($S_{0,2050}$) EN HET MAXIMAAL SCENARIO ($S_{MAX,2050}$) NA AUTONOME ONTWIKKELING IN 2050	311

FIGUUR 4-74: PUNTENWOLK VAN DE PIEKDEBIETEN OP DE EDEGEMSEBEEK (KNOOPPUNT EDB009) IN HET BASISSCENARIO (S_0) IN 2010 TEGENOVER HET BASISSCENARIO ($S_{0,2050}$) EN HET MAXIMAAL SCENARIO ($S_{MAX,2050}$) NA AUTONOME ONTWIKKELING IN 2050	311
FIGUUR 4-75: PUNTENWOLK VAN HET JAARLIJKS OVERSTROOMD VOLUME LANGSHEEN DE EDEGEMSEBEEK (STORAGE AREA R_EDB019R) IN HET BASISSCENARIO (S_0) IN 2010 TEGENOVER HET BASISSCENARIO ($S_{0,2050}$) EN HET MAXIMAAL SCENARIO ($S_{MAX,2050}$) NA AUTONOME ONTWIKKELING IN 2050	312
FIGUUR 4-76: QQ PLOT VAN DE PIEKDEBIETEN VAN EEN OVERSTORT LANGS DE KLEINE STRUISBEEK (OVERSTORT ST46_AQU002.1) IN HET BASISSCENARIO (S_0) IN 2010 TEGENOVER HET BASISSCENARIO ($S_{0,2050}$) EN HET MAXIMAAL SCENARIO ($S_{MAX,2050}$) NA AUTONOME ONTWIKKELING IN 2050	313
FIGUUR 4-77: PUNTENWOLK VAN DE OVERSTORTFREQUENTIE LANGSHEEN DE KLEINE STRUISBEEK (OVERSTORT ST46_AQU002.1) IN HET BASISSCENARIO (S_0) IN 2010 TEGENOVER HET BASISSCENARIO ($S_{0,2050}$) EN HET MAXIMAAL SCENARIO ($S_{MAX,2050}$) NA AUTONOME ONTWIKKELING IN 2050	314
FIGUUR 4-78: QQ PLOT VAN DE PIEKDEBIETEN OP DE KLEINE STRUISBEEK (KNOOPPUNT KST005) IN HET BASISSCENARIO (S_0) IN 2010 TEGENOVER HET BASISSCENARIO ($S_{0,2050}$) EN HET MAXIMAAL SCENARIO ($S_{MAX,2050}$) NA AUTONOME ONTWIKKELING IN 2050	314
FIGUUR 4-79: QQ PLOT VAN DE JAARLIJKSE OVERSTROOMDE VOLUMES LANGS DE KLEINE STRUISBEEK (STORAGE AREA R_KST030R) IN HET BASISSCENARIO (S_0) IN 2010 TEGENOVER HET BASISSCENARIO ($S_{0,2050}$) EN HET MAXIMAAL SCENARIO ($S_{MAX,2050}$) NA AUTONOME ONTWIKKELING IN 2050	315
FIGUUR 4-80: QQ PLOT VAN DE PIEKDEBIETEN VAN DE OVERSTORTEN LANGS DE BENEDENVLIET (OVERSTORT ST46_HEM21298.3) IN HET BASISSCENARIO (S_0) IN 2010 TEGENOVER HET BASISSCENARIO ($S_{0,2050}$) EN HET MAXIMAAL SCENARIO ($S_{MAX,2050}$) NA AUTONOME ONTWIKKELING IN 2050	316
FIGUUR 4-81: PUNTENWOLK VAN DE PIEKDEBIETEN OP DE OVERSTORTEN LANGS DE BENEDENVLIET (OVERSTORT 46_D21643C.2) IN HET BASISSCENARIO (S_0) IN 2010 TEGENOVER HET BASISSCENARIO ($S_{0,2050}$) EN HET MAXIMAAL SCENARIO ($S_{MAX,2050}$) NA AUTONOME ONTWIKKELING IN 2050	317
FIGUUR 4-82: QQ PLOT VAN DE OVERSTORTFREQUENTIE OP DE OVERSTORTEN LANGS DE BENEDENVLIET (OVERSTORT ST46_HEM21298.3) IN HET BASISSCENARIO (S_0) IN 2010 TEGENOVER HET BASISSCENARIO ($S_{0,2050}$) EN HET MAXIMAAL SCENARIO ($S_{MAX,2050}$) NA AUTONOME ONTWIKKELING IN 2050	317
FIGUUR 4-83: QQ PLOT VAN DE OVERSTORTFREQUENTIE OP DE OVERSTORTEN LANGS DE BENEDENVLIET (OVERSTORT 46_D21643C.2) IN HET BASISSCENARIO (S_0) IN 2010 TEGENOVER HET BASISSCENARIO ($S_{0,2050}$) EN HET MAXIMAAL SCENARIO ($S_{MAX,2050}$) NA AUTONOME ONTWIKKELING IN 2050	318
FIGUUR 4-84: PUNTENWOLK VAN DE JAARLIJKSE OVERSTORTVOLUMES OP DE OVERSTORTEN LANGS DE BENEDENVLIET (OVERSTORT ST46_HEM21298.3) IN HET BASISSCENARIO (S_0) IN 2010 TEGENOVER HET BASISSCENARIO ($S_{0,2050}$) EN HET MAXIMAAL SCENARIO ($S_{MAX,2050}$) NA AUTONOME ONTWIKKELING IN 2050	318
FIGUUR 4-85: PUNTENWOLK VAN DE JAARLIJKSE OVERSTORTVOLUMES OP DE OVERSTORTEN LANGS DE BENEDENVLIET (OVERSTORT 46_D21643C.2) IN HET BASISSCENARIO (S_0) IN 2010 TEGENOVER HET BASISSCENARIO ($S_{0,2050}$) EN HET MAXIMAAL SCENARIO ($S_{MAX,2050}$) NA AUTONOME ONTWIKKELING IN 2050	319

FIGUUR 4-86: PUNTENWOLK VAN DE JAARLIJKSE AFVOERVOLUMES NAAR DE RWZI VAN AARTSELAAR IN HET BASISSCENARIO (S_0) IN 2010 TEGENOVER HET BASISSCENARIO ($S_{0,2050}$) EN HET MAXIMAAL SCENARIO ($S_{MAX,2050}$) NA AUTONOME ONTWIKKELING IN 2050	319
FIGUUR 4-87: PUNTENWOLK VAN DE PIEKDEBIETEN OP DE BENEDENVLIET (KNOOPPUNT BV072) IN HET BASISSCENARIO (S_0) IN 2010 TEGENOVER HET BASISSCENARIO ($S_{0,2050}$) EN HET MAXIMAAL SCENARIO ($S_{MAX,2050}$) NA AUTONOME ONTWIKKELING IN 2050	320
FIGUUR 4-88: QQ PLOT VAN DE PIEKDEBIETEN OP DE BENEDENVLIET (KNOOPPUNT BV132) IN HET BASISSCENARIO (S_0) IN 2010 TEGENOVER HET BASISSCENARIO ($S_{0,2050}$) EN HET MAXIMAAL SCENARIO ($S_{MAX,2050}$) NA AUTONOME ONTWIKKELING IN 2050	320
FIGUUR 4-89: PUNTENWOLK VAN HET JAARLIJKS OVERSTROOMD VOLUME LANGS DE BENEDENVLIET (STORAGE AREA L_BV077R) IN HET BASISSCENARIO (S_0) IN 2010 TEGENOVER HET BASISSCENARIO ($S_{0,2050}$) EN HET MAXIMAAL SCENARIO ($S_{MAX,2050}$) NA AUTONOME ONTWIKKELING IN 2050	321
FIGUUR 4-90: PUNTENWOLK VAN HET JAARLIJKS OVERSTROOMD VOLUME LANGS DE BENEDENVLIET (STORAGE AREA L_BV120R) IN HET BASISSCENARIO (S_0) IN 2010 TEGENOVER HET BASISSCENARIO ($S_{0,2050}$) EN HET MAXIMAAL SCENARIO ($S_{MAX,2050}$) NA AUTONOME ONTWIKKELING IN 2050	321
FIGUUR 4-91: WEERGAVE VAN DE SCORES PER MAAND VAN DE INFILTRATIE VOOR HET OPTIMALISATIESCENARIO ($S_{OPT,I-J}$) MET 8 INFILTRATIECAPACITEITEN ($I=1-8$; 22.00-0.01 10^{-6} M/S), VERSCHILLENDE VERHOUDINGEN VAN INFILTREREN (J ; 100%, 50%, 25%) IN COMBINATIE MET BUFFEREN EN VARIANTEN MET ENKEL BUFFEREN ($S_{OPT,BUF}$) EN ENKEL HEMELWATERHERGEBRUIK ($S_{OPT,HER}$)	325
FIGUUR 4-92: WEERGAVE VAN DE SCORES PER JAAR VAN DE JAARLIJKSE INFILTRATIE ($V_{I(T)}$) VOOR HET OPTIMALISATIESCENARIO ($S_{OPT,I-J}$) MET 8 INFILTRATIECAPACITEITEN ($I=1-8$; 22.00-0.01 10^{-6} M/S), VERSCHILLENDE VERHOUDINGEN VAN INFILTREREN (J ; 100%, 50%, 25%) IN COMBINATIE MET BUFFEREN EN VARIANTEN MET ENKEL BUFFEREN ($S_{OPT,BUF}$) EN ENKEL HEMELWATERHERGEBRUIK ($S_{OPT,HER}$)	325
FIGUUR 4-93: HET AANDEEL DROOGWEERAFVOER (DWA) EN REGENWATERAFVOER (RWA) IN DE TOTALE HYDROLOGISCHE AFVOER NAAR HET RIOOLSTELSEL VOOR HET BASISSCENARIO (S_0), OPTIMALISATIESCENARIO ($S_{OPT,I-J}$) MET 8 INFILTRATIECAPACITEITEN ($I=1-8$; 22.00-0.01 10^{-6} M/S), VERSCHILLENDE VERHOUDINGEN VAN INFILTREREN (J ; 100%, 50%, 25%) IN COMBINATIE MET BUFFEREN EN VARIANTEN MET ENKEL BUFFEREN ($S_{OPT,BUF}$) EN ENKEL HEMELWATERHERGEBRUIK ($S_{OPT,HER}$)	326
FIGUUR 4-94: WEERGAVE VAN DE SCORES PER JAAR VAN HET OPTIMALISATIESCENARIO ($S_{OPT,I-J}$) MET 8 INFILTRATIECAPACITEITEN ($I=1-8$; 22.00-0.01 10^{-6} M/S), VERSCHILLENDE VERHOUDINGEN VAN INFILTREREN (J ; 100%, 50%, 25%) IN COMBINATIE MET BUFFEREN EN VARIANTEN MET ENKEL BUFFEREN ($S_{OPT,BUF}$) EN ENKEL HEMELWATERHERGEBRUIK ($S_{OPT,HER}$) OP HET KWALITEIT-CRITERIUM VAN DE MULTI-CRITERIA ANALYSE	328
FIGUUR 4-95: WEERGAVE VAN DE SCORES PER JAAR VAN HET OPTIMALISATIESCENARIO ($S_{OPT,I-J}$) MET 8 INFILTRATIECAPACITEITEN ($I=1-8$; 22.00-0.01 10^{-6} M/S), VERSCHILLENDE VERHOUDINGEN VAN INFILTREREN (J ; 100%, 50%, 25%) IN COMBINATIE MET BUFFEREN EN VARIANTEN MET ENKEL BUFFEREN ($S_{OPT,BUF}$) EN ENKEL HEMELWATERHERGEBRUIK ($S_{OPT,HER}$) OP HET KWANTITEIT-CRITERIUM VAN DE MULTI-CRITERIA ANALYSE	328
FIGUUR 4-96: PUNTENWOLK VAN DE SCORES PER JAAR VAN HET KWANTITEITS-TEGENOVER HET KWALITEITSCRITERIUM VAN HET OPTIMALISATIESCENARIO ($S_{OPT,I-J}$)	

MET 8 INFILTRATIECAPACITEITEN ($i=1-8$; $22.00-0.01 \cdot 10^{-6} \text{M/s}$), VERSCHILLENDE VERHOUDINGEN VAN INFILTREREN (J ; 100%, 50%, 25%) IN COMBINATIE MET BUFFEREN EN VARIANTEN MET ENKEL BUFFEREN ($S_{\text{OPT,BUF}}$) EN ENKEL HEMELWATERHERGEBRUIK ($S_{\text{OPT,HER}}$).....	330
--	-----

Lijst van symbolen en afkortingen

afkorting	
A, a, S	oppervlakte (m ²)
a _{p50}	de oppervlakte van de testput als hij voor 50 % gevuld zou zijn, inclusief de basis.
A	leem (bodemtextuur volgens Bodemkaart van België)
α*	capillariteits factor of 'sorptive number'
B	Diameter van het boorgat
b	een constante = 0,55 (White and Sully, 1987)
b _c	bias
BEMEX	bekalking- en bemestingsadvisering
C	dimensieloze proportionele parameter afhankelijk van H/r
C _p	specifieke warmte (kJ/kg.K)
C _{ref}	ware waarde of de als werkelijk aangenomen waarde van de te bepalen grootheid
C _U	Uniformiteitscoëfficiënt: d ₆₀ /d ₁₀ . D.i. een maat voor de spreiding in voorkomende korreldiameters
C _v	correctiefactor temperatuur bij de doorlatendheidsmeting naar de doorlatendheid bij 10°C. (berekend volgens de Vogel-Tamman-Fulcher-benadering)
c _v	coëfficiënt of consolidation
CCHP	Compact Constant Head permeameter
CF	Correction factor
CMA	Compendium voor Monsterneming en Analyse, onderdelen vastgesteld bij verschillende Ministerieel Besluiten
D'	de diepte van het boorgat onder de referentiehoogte
d	diepte
d ₁₀	10 ^{de} percentiel van de korrelgrootteverdeling.
d ₆₀	60 ^{ste} percentiel van de korrelgrootteverdeling
e	poriëngetal
E	klei (bodemtextuur volgens Bodemkaart van België)
FAO	Food and Agriculture Organization of the United Nations
g	valversnelling (m/s ²)
G	stenige gronden (bodemtextuur volgens Bodemkaart van België)
G	geometrische constante
h, H	hydraulische hoogte (m)
H _{start}	de hoogte van het waterniveau bij het begin van de test

afkorting

H_w	de hoogte van het waterniveau op een bepaald ogenblik
Δh	de daling van het waterpeil over Δt .
η	viscositeit van het permeant (kg/m/s); viscositeit is synoniem voor absolute viscositeit of voor dynamische viscositeit
i	hydraulisch potentiaalverschil, gradiënt, verhang (m/m)
i_p	Plasticiteitsindex, het verschil in watergehalte tussen de vloeigrens en de uitrolgrens. De vloeigrens is het watergehalte van het materiaal bij de overgang van plastische naar vloeibare toestand. De uitrolgrens is het watergehalte van het materiaal bij de overgang van (half)vaste naar plastische toestand.
K	hydraulische conductiviteit of permeabiliteit of doorlatendheidscoëfficiënt (m^3/s)
$K'(p)$	hydraulische conductiviteit in functie van de water pressure head (drukhoogte) (p)
k	hydraulische conductiviteit of permeabiliteit of doorlatendheidscoëfficiënt (m/s)
k_s	hydraulische conductiviteit in een waterverzadigde bodem (m/s), expliciet in tegenstelling tot:
k_{fs}	field-saturated hydraulic conductivity. Hydraulische conductiviteit in een in situ waterverzadigde bodem (m/s): wanneer in situ de bodem met water verzadigd wordt, zal er bij een verzadiging in het veld lucht ingesloten worden en dus geen volledige saturatie optreden. Ook is de begrenzing van de verzadigde zone in een van nature waterverzadigde bodem niet zo strikt omschreven als in het labo
k_i	intrinsieke permeabiliteit van een poreus medium (m^2)
k_h	hydraulische conductiviteit in het horizontaal vlak (m/s)
k_v	hydraulische conductiviteit in het verticaal vlak (m/s)
L	zandleem (bodemtextuur volgens Bodemkaart van België)
L	lengte
$L_f(t)$	de dikte van het infiltratiefront = de elevation head
M	moment van het water in de bodem
m_v	one-dimensional compliance
MDDEFP	Ministère du Développement Durable, de l'Environnement, de la Faune et des Parcs, Canada, 2014
m-mv	meter ten opzichte van het maaiveld
n	aantal metingen
n	(totale) porositeit (% of m^3/m^3)
n_e	effectieve porositeit (% of m^3/m^3)
NSSH	National Soil Survey Handbook
ν	kinematische viscositeit (m^2/s)
ν_w	kinematische viscositeit van water (m^2/s)

afkorting

θ_{fs}	Field-saturated vochtgehalte (water content)
θ_i	Initial vochtgehalte (water content)
$\Delta\theta$	$\theta_i - \theta_{fs}$
p	Drukhoogte (pressure head)
P	Licht zandleem (bodemtextuur volgens Bodemkaart van België)
p_a	de minimum druk die bereikt wordt in de infiltratiecilinder na afsluiting
q	specifiek debiet (m/s)
Q	debiet (m ³ /s)
r, R	radius (m)
R	steady-state daling van de waterkolom in het reservoir (cm/s)
R_T	viscositeitsfactor (water bij 20°C) (ASTM D5084)
R_R	de straal van het waterreservoir
R_C	de straal van de infiltratiecilinder
r_i	Interne straal van bv. buis
r	herhaalbaarheid
RE	Reynolds en Elrick
RSD_r	herhaalbaarheidsvariatiecoëfficiënt
RSD_R	variatiecoëfficiënt
S	lemig zand (bodemtextuur volgens Bodemkaart van België)
S, A, a	Infiltrerende oppervlak
S_H	soil sorptivity for a constant head ($L T^{-1/2}$)
s_r/s_R	standaardafwijking, in eenheid van meetresultaat
$\sin h^{-1}$	Omgekeerde hyperbolische sinus functie
ρ	specifiek volumegewicht van het permeant (kg/m ³)
t	tijd (s)
t_{p75-25}	de tijd die de waterkolom nodig heeft om te zakken van 75 % tot 25 % effectieve diepte
T_k	absolute temperatuur (K)
T_R	relatieve temperatuur (K)
T_{ref}	referentie temperatuur in labo-omstandigheden
T_p	projecttemperatuur op terrein
U	zwarte klei (bodemtextuur volgens Bodemkaart van België)
UNESCO	United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization
USDA	U.S. Department of Agriculture

afkorting

V	veen (bodemtextuur volgens Bodemkaart van België)
V	volume
V_{p75-25}	het effectieve bergingsvolume van water in de testput tussen 75 % en 25 % van de diepte
v	stroomsnelheid (m/s)
X	duinen (bodemtextuur volgens Bodemkaart van België)
X_{gem}	gemiddelde waarde
x_i	i-de analyseresultaat
$\bar{x}$	gemiddelde van n analyseresultaten
γ_w	volumegewicht water
Z	zand (bodemtextuur volgens Bodemkaart van België)
z	afstand tot oppervlakte
z	diepte van de transmissiezone onder de infiltrometer (I)
ϕ_m / φ	matrix potentiaal/flux (m ² /s)
ψ_f	de negatieve 'wetting front potential' die van kracht is op het infiltratiefront

1. INLEIDING

1.1 DE OPDRACHT

De voorliggende tekst is het eindrapport van de studie over het opstellen van richtlijnen voor het meten van de infiltratiecapaciteit en het modelmatig onderbouwen voor de dimensionering van infiltratievoorzieningen. Deze opdracht werd uitgeschreven door de Vlaamse Milieumaatschappij, afdeling Operationeel Waterbeheer in het bestek WT 2014 B 0002. De opdracht werd gegund aan International Marine and Dredging Consultants NV op 15 januari 2015.

1.2 DOEL VAN DE STUDIE

Door de actualisatie van de code van goede praktijk voor het ontwerp, de aanleg en het onderhoud van rioleringsystemen (verder code van goede praktijk) en de hemelwaterverordening, groeit het belang van de toepassing van infiltratie bij ontwerpen. Het finale doel van deze studie is het uitwerken van een aanzet tot richtlijnen voor infiltratie, die niet alleen bruikbaar moeten zijn voor de watertoets, maar ook andere afdelingen van de VMM die betrokken zijn bij de beoordeling van rioleringsprojecten.

Rekening houdend met bovenvermelde nieuwe regelgeving en de bevindingen uit de praktijk, dient de studie onder meer de volgende vragen te beantwoorden:

- Welke infiltratietesten zijn bruikbaar voor de dimensionering van infiltratievoorzieningen? Moet de keuze van de test afgestemd worden op het soort infiltratievoorziening, het bodemtype of eventuele andere factoren?
- Hoe moeten de resultaten van de verschillende infiltratietesten geïnterpreteerd worden en wat zijn verklaringen voor afwijkende resultaten?
- Kunnen de dimensioneringscriteria van de huidige hemelwaterverordening in specifieke gebieden aangepast worden om infiltratie te verhogen zonder de veiligheid in het gedrang te brengen?
- Wat is het effect van infiltratievoorzieningen op het afwaartse rioolstelsel, de waterloop en het grondwater zowel voor wat betreft de kwantiteit als de kwaliteit?

Een belangrijk doel van de studie is het formuleren van concrete richtlijnen voor het bepalen van de infiltratiecapaciteit en dit rekening houdend met de vooropgestelde infiltratievoorzieningen en een onderbouwing voor de gebieden waar afwijkende ontwerpcriteria van toepassing kunnen zijn (gecombineerde buffer-/infiltratievoorziening, strengere of minder strenge eisen).

1.3 OVERZICHT VAN DE STUDIE

Dit rapport beschrijft de volledige studie over het opstellen van richtlijnen voor het meten van de infiltratiecapaciteit en het modelmatig onderbouwen voor de dimensionering van infiltratievoorzieningen.

1.4 OPBOUW VAN HET RAPPORT

Het rapport is onderverdeeld in de volgende drie hoofdstukken:

- Hoofdstuk 2: Literatuurstudie;
- Hoofdstuk 3: Infiltratietesten;
- Hoofdstuk 4: Modellerings;
- Hoofdstuk 5: Aanzet tot richtlijnen.

2. LITERATUURSTUDIE

2.1 INLEIDING, FUNDAMENTELE BEGRIPPEN IN HET KENNISDOMEIN

Voorafgaand aan de inventarisatie van beschikbare infiltratietesten, achten we een inleiding gepast waarin kort de fundamentele concepten worden hernomen i.v.m. de kwantificering van de waterbeweging door een bodemmatrix:

- De bodem beschouwd als een continuüm;
- Heterogeniteit van de matrix en validiteit van, en schaal waarop metingen relevant zijn; onderscheid tussen stochastische en deterministische heterogeniteit;
- Notie van de equivalente hydraulische conductiviteit of infiltratiesnelheid;
- De tijdsfactor in de bodemmatrix, artefacten.

De meting van de hydraulische conductiviteit en infiltratiesnelheid in een verzadigde bodem boven de watertafel berust steeds op de interpretatie van de infiltratietheorie. De meeste meetmethodes baseren zich op algoritmes die een experimentele basis hebben (bv. op basis van nomogrammen) en/of een explicatieve basis doch na doorgedreven abstracties, vereenvoudigingen van de theorie en bijgevolg na stellen van randvoorwaarden in de afleiding. Het is in die zin reeds aangetoond, door meerdere auteurs, dat het meetresultaat in belangrijke mate kan samenhangen met de testmethode. In die zin maken testmethodes in een aantal gevallen deel uit van een protocol met een bepaalde finaliteit. Dit protocol betreft doorgaans een dimensionering, een ontwerp waarbinnen het meetresultaat doorwerkt, bv. een specifieke bouwhandleiding, een ontwerp voor droogzuiging, een drainageontwerp, enz. Het verband tussen testmethode en finaliteit is dan ook in vele gevallen groot, waarbij de ervaring – het succesvolle ontwerp - naast inzicht, een belangrijke rol heeft gespeeld.

Bovenstaande beschouwingen en fundamentele concepten worden verder toegelicht, en waar nuttig, aan de hand van typesituaties, cases of voorbeelden in Vlaamse bodems.

Het belang van de bovenstaande beschouwingen ligt in de uiteindelijke keuze van de test(en), het inzicht in de noodzakelijke randvoorwaarden, de onderbouwing en het gewicht van de detaillering in de werkvoorschriften, het belang van auditing van de uitvoering, het inzicht in de meetresultaten en de interpretatie in functie van de mogelijke of geplande infiltratievoorziening.

2.1.1 Doorlatendheid

Permeabiliteit of doorlatendheid vormt een maat voor de mogelijke snelheid waarmee gasen of vloeistoffen door een grondlaag stromen. In het ontwerp van CMA/7/A.2 wordt de waterdoorlatendheid als volgt beschreven:

‘De waterdoorlatendheid of “permeabiliteit” is het vermogen van de grond om water door te laten. De waterdoorlatendheidscoëfficiënt (K-factor) is een maat voor de waterdoorlatendheid en wordt bepaald door enerzijds de geometrie van het poriënstelsel, afhankelijk van de textuur en structuur van de bodem, en anderzijds door intrinsieke eigenschappen van de bodemoplossing (viscositeit en dichtheid). De doorlatendheid wordt bovendien beïnvloed door het bodemvochtgehalte. Bij een verzadigde grond spreekt men over de verzadigde doorlatendheid.’

In de volgende paragrafen wordt eerst het verschil tussen doorlatendheid, stroomsnelheid en infiltratiecapaciteit uitgelegd en hun afhankelijkheid van het bodemvochtgehalte en de hydraulische gradiënt.

Variabelen zoals temperatuur, luchtdruk in de bodem en watereigenschappen kunnen zeer bepalend zijn in de meetgrootte van de doorlatendheid (Brandt, 2015). Deze variabelen worden toegelicht in hetgeen volgt.

2.1.1.1 Verschil doorlatendheid, stroomsnelheid en infiltratiecapaciteit

Omdat doorlatendheid (k) in dezelfde eenheid (m/s) worden uitgedrukt als stroomsnelheden (v), worden deze begrippen vaak met elkaar verward. De verzadigde doorlatendheid (k_{SAT}) is echter onafhankelijk van de hydraulische gradiënt, terwijl de stroomsnelheid wel afhankelijk is van de gradiënt. Dit kan gezien worden in de wet van Darcy die de stroming van water in bodem beschrijft:

$$v = -ki$$

Met	v	: stroomsnelheid (m/s)
	k	: doorlatendheidscoëfficiënt
	i	: hydraulisch potentiaal gradiënt = $\frac{dH}{dL}$ (dimensieloos)
	H	: Hydraulische hoogte (m)
	L	: lengte (m)

Wat ook vaak voor verwarring zorgt, is de afhankelijkheid van k van het bodemvochtgehalte. k is kleiner bij lagere bodemvochtgehaltes, wat niet betekent dat infiltratie op een droge grond trager zou verlopen. Integendeel, infiltratiecapaciteit van droge grond is juist groter.

2.1.1.2 Intrinsieke permeabiliteit en temperatuursafhankelijkheid van de doorlatendheid

Darcy definieerde de doorlatendheid k (m/s) op basis van een proefopzet met water als permeant door een bodemsegment (Darcy, 1858). De doorlatendheid is echter essentieel afhankelijk van de vloeistof die door de matrix, de bodem, wordt gedreven.

Een vloeistof is gekenmerkt door een soortelijk gewicht en een viscositeit; beide eigenschappen zijn temperatuursafhankelijk. Daarom wordt een intrinsieke permeabiliteit bepaald die een uitsluitende materiaaleigenschap vormt en niet langer afhankelijk is van het permeant, de vloeistof waarmee de eigenschap kan worden bepaald. De intrinsieke permeabiliteit bepaalt de doorlatendheid k als volgt (OVAM, 2002):

$$k = k_i \rho g / \eta$$

met k_i : intrinsieke permeabiliteit van een poreus medium (m²)
 ρ : specifiek volumegewicht van het permeant (kg/m³)
 g : valversnelling (m/s²)
 η : viscositeit van het permeant (kg/m/s)¹

De viscositeit en het specifiek volumegewicht van vloeistoffen zijn temperatuursafhankelijk².

Omwille van metrologische redenen wordt veelal de kinematische viscositeit (ν) bepaald; hierbij dient rekening gehouden te worden met het specifiek volumegewicht als volgt:

$$\nu = \eta / \rho$$

met ν : kinematische viscositeit in m²/s.

De doorlatendheid kan dan als volgt worden geformuleerd:

$$k = k_i g / \nu$$

De kinematische viscositeit verrekent op deze wijze de volledige temperatuursfactor van een vloeistof in de doorlatendheid. Voor zuiver water is dit verband (Chenlo et al., 2004):

$$\nu_w = 0,09607 \times 10^{-6} \exp(2,90 / T_R^3)$$

met T_R : de relatieve temperatuur = $T_k / 273,15$ (K)

Voor zuiver water wordt dit in Tabel 2-1 geïllustreerd.

¹ Viscositeit is ook synoniem voor absolute of dynamische viscositeit.

² Het specifiek volumegewicht van water is temperatuursafhankelijk, doch de variatie binnen de gestelde omgevingstemperatuurgrenzen is weinig betekenisvol in deze context. In die zin nemen meerdere auteurs reeds genoeg met een temperatuurscorrectie enkel gebaseerd op de viscositeit.

Tabel 2-1: Temperatuursafhankelijkheid van de kinematische viscositeit van zuiver water
(bron: www.engineeringtoolbox.com)

Temperatuur -T- (°C)	Kinematische viscositeit -v _w - (m ² /s) x 10 ⁻⁶
0	1,787
5	1,519
10	1,307
20	1,004
30	0,801

Dit betekent dat bij de vermelding van een doorlatendheid in principe de temperatuursomstandigheden dienen aangegeven te worden, naargelang de beoogde nauwkeurigheid, of in de mate dat de temperatuur een variabele kan zijn. In die zin wordt

- bij ex situmethodes, laboratoriumbepalingen, de temperatuur steeds vermeld, of gestandaardiseerd (bv. op 20 °C);
- bij opgave van de doorlatendheid van geologische strata, de temperatuurreferentie veelal weggelaten, gezien de temperatuur van de strata vrij onveranderlijk is.

De meting van de doorlatendheid gebeurt aldus bij een vastgestelde temperatuur in situ of in het labo bij een gegeven temperatuur (T_{ref}). De realisatie, de infiltratievoorziening, dient anderzijds te functioneren bij een projecttemperatuur (T_p), een ontwerp temperatuur.

De gemeten doorlatendheid ($k(T_{ref})$) dient dan ook herrekend te worden met een factor in functie van de projectomstandigheden.

$$k(T_p) = k(T_{ref}) \frac{v(T_{ref})}{v(T_p)}$$

Dorsey (1968) berekende deze factor voor zuiver water:

$$\frac{v(T_{ref})}{v(T_p)} = 10^{\frac{1,37023(T_p - T_{ref}) + 0,000836(T_p - T_{ref})^2}{109 + T_p}}$$

Een algemeen toegepaste benadering is ook de VTF-relatie (Vogel-Tamman-Fulcher); toegepast voor zuiver water wordt deze (Chapuis, 2012):

$$\frac{v(T_{ref})}{v(T_p)} = e^{\left(\frac{509,53}{T_{ref} + 123,15} - \frac{509,53}{T_p + 123,15}\right)}$$

De bovenstaande benaderingen gelden voor zuiver water. In de praktijk, en doorgaans in testen in situ, wordt leidingwater of gecapteerd regenwater gebruikt. Deze waters hebben een gehalte aan zouten in grootteorde tussen 0,1 à 0,5 g/l (of verder, in grootteorde EC= 0,1 à 0,7 mS/cm, 20°C, of nog 1 à 7 mmol NaCl/l).

Ook het grondwater bevat componenten in oplossing; de EC is er doorgaans lager dan of in grootteorde 1 mS/cm, 20°C. Theoretisch neemt de kinematische viscositeit van water vrijwel kwadratisch toe in verhouding tot het zoutgehalte van het water (Kestin et.al., 1981). Men kan berekenen dat een concentratie van 7 mmol NaCl/l, onder atmosferische luchtdruk en bij 20°C, de kinematische viscositeit doet toenemen tot $1,0039 \text{ m}^2/\text{s} \times 10^{-6}$ t.o.v. van $1,0037 \text{ m}^2/\text{s} \times 10^{-6}$, zuiver water. Verder wordt dan ook in deze context de factor zoutgehalte verwaarloosbaar geacht. Zelfs het gebruik van water afkomstig van helder oppervlaktewater³, met doorgaans EC-waarden niet hoger dan 2 mS/cm, 20°C, hebben in testen in situ geen betekenisvol effect op de kinematische viscositeit.

2.1.1.2.1 Betekenis in het kader van de bepaling van de doorlatendheid van de bodem; temperatuurcorrecties in de praktijk:

Metingen van de doorlatendheid in het laboratorium gebeuren standaard onder gecontroleerde of gegeven temperatuursomstandigheden. In sommige referentiekaders dient een gemeten doorlatendheid genormaliseerd te worden naar 20 °C (bv. AFNOR X30-441.2003). Chapuis (2012) geeft uitdrukkelijk aan dat een benadering voor de doorlatendheid gebaseerd op de korrelgrootteverdeling steeds dient gecorrigeerd te worden naar de effectieve grondwatertemperatuur.

In de voorschriften en literatuur m.b.t. metingen in situ wordt haast nooit de temperatuursfactor of door te voeren correcties vermeld. Er zijn ons slechts enkele vermeldingen of randvoorwaarden bekend in werkvoorschriften waarbij in situ gemeten doorlatendheden worden genormaliseerd, bv. naar 10 °C. (bv. Amoozemeter (Eijkelkamp)).

Evenmin vindt men richtlijnen m.b.t. de dimensionering van infiltratiestructuren, m.u.v. algemene veiligheidsfactoren voor overdimensionering.

Ook Winger (1960) stelt dat de meting in situ (op basis van een variante van de methode Porchet, met constant head) dient te gebeuren bij gekende temperatuur: wanneer de temperatuur van het toegevoegde water meer dan 2 °C afwijkt van de voorheen gemeten watertemperatuur, dient gecorrigeerd te worden voor de veranderde viscositeit.

Zoals hoger aangegeven, heeft de temperatuur van het water een significante invloed op de absolute waarde van de doorlatendheid. In een koude matrix en water met lage temperatuur kan de gemeten doorlatendheid tot 50 % lager liggen dan in een bodemmatrix bij hogere temperatuur.

Een gemeten doorlatendheid dient dan ook beschreven te worden met temperatuursomstandigheden. In die zin zou ook een normalisatie van de doorlatendheid op basis van een referentietemperatuur op zijn plaats zijn.

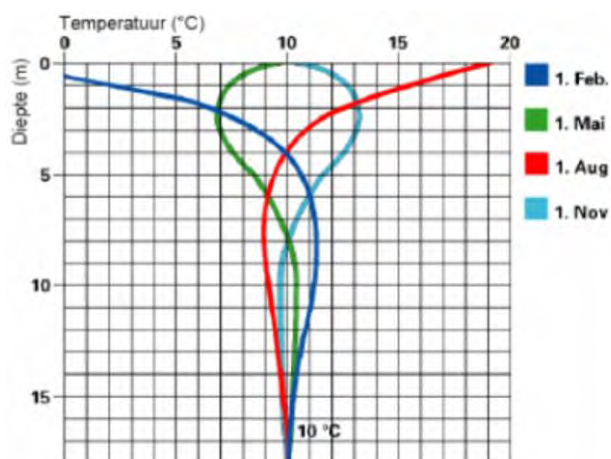
Mogelijkheden zijn de volgende:

Men kan aansluiten bij een geologische benadering waarbij de temperatuur van de diepere strata rond 10 °C wordt verondersteld, en waarbij de meetwaarden ook kunnen getoetst worden aan de kenwaarden voor doorlatendheid van geologische lagen.

Anderzijds dient een infiltratiesysteem ook te functioneren tijdens de winter. Een herrekening van de meetwaarde naar winteromstandigheden is dan te verkiezen.

³ Het gebruikte water dient steeds een zwevendestofgehalte te hebben van minder dan enkele ppm (NRCS, n.d.)

De gemiddelde luchttemperatuur schommelt tussen 3,3 °C in januari en 18,4 °C in juli (KMI). De gemiddelde temperatuur van de oppervlakte van de bodem hangt vanzelfsprekend zeer samen met de bodemtextuur, waterhuishouding en vegetatie. Een grootteorde in de schommeling aan de bodemoppervlakte is te verwachten tussen 0 en 20°C (Hiemstra et al., 1994). Deze schommeling wordt gedempt in de diepte. De dempingsdiepte wordt gedefinieerd als de diepte waarop het verschil tussen minimum en maximumtemperatuur 1/3 bedraagt van het verschil aan de oppervlakte. De dempingsdiepte voor de jaarlijkse schommeling ligt rond 2,5 m. Eveneens ijlt de afkoeling of opwarming na in de diepte. De fasevertraging op 2,5 m-mv is nagenoeg 2 maanden. Minstens 3 maal de dempingsdiepte wordt doorgaans genomen als de diepte waar de temperatuurgolf van de oppervlakte is gedempt.



Figuur 2-1: Evolutie van de natuurlijke bodemtemperatuur (Lemmens et al., 2007).

Tabel 2-2: Gemiddelde bodemtemperaturen (°C) tijdens het jaar

	Diepte (m-mv) 0	0,5	1,0
febr.	0	2	3
mei	10	8	7
aug.	20	17	15
nov.	10	12	13

De temperatuur van het water waarmee de meting wordt uitgevoerd zal eveneens variëren naargelang de bron en het seizoen.

2.1.1.2.2 Naar een praktische benadering, vuistregel:

Op een bodemdiepte van ca. 0,5 m-mv waarop de doorlatendheid wordt bepaald kan men uitgaan van een bodemtemperatuur in het najaar in grootteorde van 15 °C, in het voorjaar met percolerend neerslagoverschot rond 5 °C.

De temperatuur van de waterverzadigde bodem bij de meting van de doorlatendheid wordt bepaald door de temperatuur van het bij de meting gebruikte water, en door de temperatuur van de onverzadigde bodem vóór de meting.

De temperatuur van de waterverzadigde bodem bij de meting kan theoretisch berekend worden op basis van de specifieke warmte van het water en van de onverzadigde bodem.

De specifieke warmte (of soortelijke warmte) (C_p) van water hangt in principe af van de temperatuur kJ/kg.K:

$$C_p(T) = 28,07 - 0,2817T + 1,25 \times 10^{-3}T^2 - 2,48 \times 10^{-6}T^3 + 1,857 \times 10^{-9}T^4$$

Met T : temperatuur (Kelvin)
 C_p : specifieke warmte (kJ/kg.K)

In het praktische meetbereik (5 – 30 °C) varieert C_p tussen 4,205 en 4,18 kJ/kg.K, te vereenvoudigen als gemiddelde waarde van 4,19 kJ/kg.K.

De specifieke warmte van droog bodemmateriaal (zand, klei,...) bedraagt minder dan 1 MJ/m³.K. Het is dan ook duidelijk dat het watergehalte van de bodem voorafgaand aan de meting samen met het bij de meting gebruikte water, de temperatuur zal bepalen waarbij de doorlatendheid wordt bepaald. Het watergehalte van de bodem kan aanzienlijk verschillen volgens de locatie en volgens het seizoen.

Tabel 2-3: Berekening van het aandeel in specifieke warmtecapaciteit bij meting in een droge en in een natte bodem.

	Soortelijke warmte (*)	Soortelijk gewicht (*)	Fractie, bij vochttoestand van de grond op veldcapaciteit	
	(J /kg.K)	(kg/m³)	(winter)	(zomer)
			(m³/m³)	(m³/m³)
Grondsamenstelling: Kleifractie	920	2800	0.15	0.15
Zandfractie	830	2650	0.40	0.40
Waterfractie (10°C)	4193	1000	0.30	0.10
Totaal, winter	1418		0.85	
Totaal, zomer	1067			0.65
Water infiltrerend bij de test	4193		0.15	0.35

(*) Ref. materiaaleigenschappen: www.engineeringtoolbox.com.

	J/m³(water en bodem).K	aandeel
winter		
Totaal, natte bodem	2524100	80%
Gebruikte water	628950	20%
Water en bodem	3153050	100%
zomer		
Totaal, drogere bodem	1685500	53%
Gebruikte water	1467550	47%
Water en bodem	3153050	100%

In Tabel 2-3 wordt aan de hand van een type-grond met schijnbare dichtheid van 1,48 ton/m³, berekend welk het aandeel is van de vochtige bodem en welk het aandeel is van het gebruikte water in de specifieke warmte van de met water gevulde grond tijdens het meetproces. Er wordt bovendien een wintersituatie beschouwd (natte bodem) naast een zomersituatie (droge bodem).

In een natte bodem overweegt de specifieke warmtecapaciteit van de bodem, en zou men kunnen overwegen enkel de bodemtemperatuur te beschouwen als T_{ref} . In een droge bodem ligt de onderzochte verhouding tussen bodem en gebruikte water ongeveer op 50/50.

Bovenstaande is echter een statische benadering. De infiltratiemeting is daarentegen een proces: de temperatuur aan het meetvlak bij de verschillende in situ meetmethodes zal zeer snel de temperatuur van het gebruikte water aannemen. In principe is de infiltratiesnelheid een vector die geformuleerd wordt loodrecht op een sectie, i.c. het meetvlak, in een proces met een bepaalde temperatuur. In die zin kan men stellen dat de infiltratiesnelheid bepaald wordt door dit vlak. Op deze basis kan men voorstellen om de temperatuur van het gebruikte water te registreren en deze als T_{ref} te beschouwen in de herrekening van de gemeten doorlatendheid naar een project- of ontwerp temperatuur.

Aansluitend bij een gemiddelde bodemtemperatuur van 10 °C (zie Tabel 2-2), kan voorgesteld worden om meetgrootheden van doorlatendheid standaard te herrekenen naar een projecttemperatuur van het water van 10 °C als volgt:

$$k(T_{10^\circ}) = k(T_{meting}) C_v$$

Met C_v : correctiefactor (berekend volgens de Vogel-Tamman-Fulcher-Benadering, Garca-Coln et al., 1989) als in

Tabel 2-4: Correctie voor de factor temperatuur bij de doorlatendheidsmeting naar de doorlatendheid bij 10°C.

Temperatuur van het water bij de meting (°C)	Correctiefactor naar een ontwerp temperatuur van 10°C C_v	Temperatuur van het water bij de meting (°C)	Correctiefactor naar een ontwerp temperatuur van 10°C C_v
5	1,16	18	0,81
6	1,13	19	0,78
7	1,09	20	0,77
8	1,06	21	0,75
9	1,03	22	0,73
10	1,00	23	0,71
11	0,97	24	0,69
12	0,94	25	0,68
13	0,92	26	0,66
14	0,89	27	0,65
15	0,87	28	0,63
16	0,85	29	0,62
17	0,83	30	0,61

2.1.1.3 In water opgeloste lucht

Mogelijks kan het effect van de temperatuur op de opgeloste lucht of zuurstof in het water belangrijk zijn. Bij temperatuursverandering kunnen gasbelletjes in het water ontstaan. Deze gasbelletjes kunnen de poriën afdichten en dus de doorlatendheid beïnvloeden (Youngs, 1972 (2); Hillel, 1982).

Bij toepassing van laboratoriummethodes raadt Tan et al. (2007) om deze reden dan ook het gebruik van ontlucht water aan. Hiervoor wordt de verzadiging vaak uitgevoerd onder vacuüm omstandigheden (exsiccator) om de ingesloten lucht uit het bodemstaal te verwijderen.

Anderzijds, in geval van de bepaling van doorlatendheid in situ, kan men stellen dat van deze factor wel abstractie kan gemaakt worden: het regenwater dat uiteindelijk dient te infiltreren zal of kan eveneens opgeloste lucht bevatten. De meting met niet ontlucht water sluit dan ook mogelijk beter aan bij de uiteindelijke projectomstandigheden.

2.1.1.4 Luchtdruk

De beschreven in situ methodes veronderstellen dat de luchtdruk in de grond dezelfde is als de atmosferische druk. Dit is echter niet steeds het geval. In het bijzonder na hevige neerslag kan percolerend water de luchtdruk in de grond doen toenemen doordat de lucht dieper in de grond afgesloten is van de atmosfeer door een waterverzadigd percolerend front in de grond. Het fenomeen is gekend onder de naam Lisse-effect (Thal Larsen, 1931). Metingen in dergelijke omstandigheden kunnen tot onderschatte doorlatendheden leiden. Ook indien het waterfront zich bevindt ter hoogte van de uitgevoerde proef in een boorgat, kan de waterkolom aangevuld worden met het dalende water in plaats van dat het water uit het boorgat in de bodem infiltreert. In dergelijke omstandigheden kunnen geen doorlaatbaarheidsproeven uitgevoerd worden.

2.1.2 Context

Steeds dient het belang benadrukt te worden van een vooronderzoek naar een totaalbeeld van de waterhuishouding in de ondergrond van de site, voorafgaand aan het ontwerp van infiltratiestructuren (MDDEFP, 2014; Dubé & Barabé voor de EAT Environment, 1991; Williams, 2010; Craul, 2015). Een vooronderzoek kan niet beperkt worden tot een meting of metingen van een doorlatendheid op vooraf bepaalde punten zonder een elementaire onderzoekstrategie, zonder dat een profielonderzoek wordt uitgevoerd:

Het nodige profielonderzoek:

- welke grondlaag zal/kan deelnemen aan het infiltratieproces, en welke grondlaag dient dus bemeten te worden?
 - o het aantal nodige herhalingen
 - o i.f.v. verwachte en vastgestelde heterogeniteit,
- i.f.v. de geplande infrastructuur,
- vanzelfsprekend de hoogte t.o.v. het grondwaterpeil.

Ook is een beslissingsboom nodig i.f.v. de verdeling (gemiddelde/mediaan of laagste waarde) en de variatie in de meetwaarden (ev. noodzaak van bijkomende herhalingen).

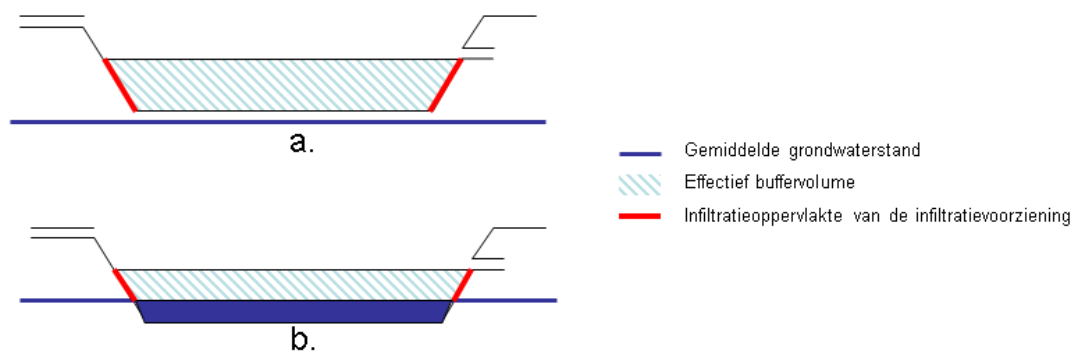
De absolute randvoorwaarden voor aanleg van infiltratiestructuren blijven (zie Waterwegwijzer bouwen en verbouwen, 2012 en Code van goede praktijk voor het ontwerp, de aanleg en het onderhoud van rioleringssystemen (*versie 2015-12-10*)):

- uitsluiten van verstoring, compactie, van de betrokken grondlagen na het vooronderzoek;
- vermijden van dichtslibben van de aangelegde infiltratievoorziening, bv. door afspoeling of inspoeling tijdens of bij einde van de werf.

Bovendien kan, ingeval van alsnog compactie, het breken van de grond de doorlatendheid slechts onder zeer specifieke voorwaarden herstellen. In vochtige omstandigheden zal door de bewerking van het breken, de compactie van de grond vrijwel steeds toenemen doordat de doorgang van het werktuig de omliggende grond (deels) niet omhoog duwt maar samendrukt. Hier zal de doorlatendheid verder verlagen.

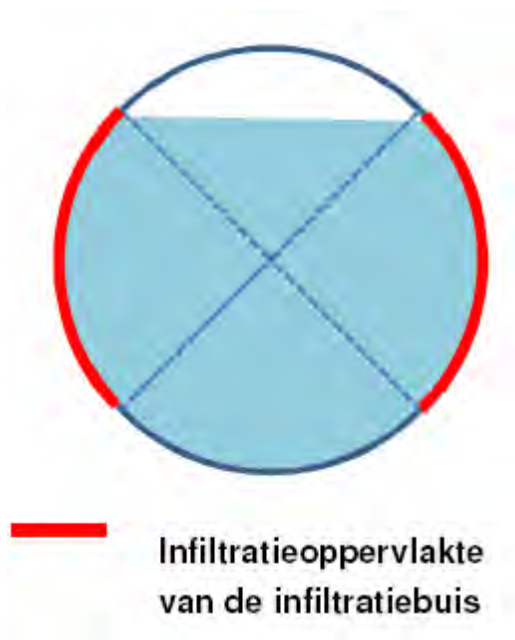
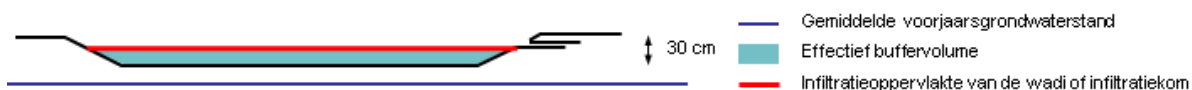
Bijzondere aandacht moet ook gaan naar mechanische bewerking van glauconiethoudende zanden die de eigenschappen van deze grond kunnen veranderen van zandig in uitgesproken kleiig (Van Alboom et al. 2012).

Ook is van belang om te bekijken in welke richting het water voornamelijk zal infiltreren in functie van de geplande infiltratievoorziening: horizontaal, verticaal of beide. De horizontale doorlatendheid is de belangrijkste factor in de meeste geotechnische ontwerpen (Tan et al., 2007). Daarom werden ettelijke methodes ontwikkeld waarbij deze doorlatendheid met een voldoende nauwkeurigheid kan worden bepaald in functie van het ontwerp. In kader van infiltratievoorzieningen geldt dit echter enkel voor bovengrondse infiltratievoorzieningen dieper dan 30 cm of waar geen vegetatie op groeit (deel boven de grondwatertafel en onder de overloop) en ondergrondse voorzieningen. Hierbij wordt bij het berekenen van de infiltratieoppervlakte enkel de verticale of schuine wanden in rekening gebracht die zich boven de grondwatertafel bevinden. Bij een infiltratiebuis komt dit neer op de 2 zijkwarten van de buis. Dit omdat ervanuit gegaan wordt dat de onderkant van de voorzieningen na verloop van tijd zal dichtslibben en dus niet meer functioneel zal zijn. Bij infiltratievoorzieningen met een diepte van minder dan 30 cm of waar er continu vegetatie op kan groeien door bijna continue droogstand (infiltratiekom/infiltratieveld) (zie Figuur 2-2) wordt bij het bepalen van de infiltratieoppervlakte, de volledige oppervlakte van de infiltratiekom of infiltratieveld in rekening gebracht omdat er hier van uitgegaan wordt dat de horizontale oppervlakte niet toeslibt. Bij deze structuren is dus de verticale doorlatendheid de bepalende factor. (Code van goede praktijk voor het ontwerp, de aanleg en het onderhoud van rioleringsystemen (*versie 2015-12-10*)).



Figuur a: Aanleg van een infiltratiebekken boven de grondwatertafel

Figuur b: Aanleg van een infiltratiebekken dat zich gedeeltelijk onder de grondwatertafel bevindt, waardoor het effectief buffervolume kleiner is



Figuur 2-2: Verschillende soorten infiltratievoorzieningen met het infiltratieoppervlakte op aangeduid. (bron: Code van goede praktijk voor het ontwerp, de aanleg en het onderhoud van rioleringssystemen (versie 2015-12-10))

2.1.3 Textuurindeling

Fysische eigenschappen van een grond worden in hoofdzaak bepaald door de afmetingen van de korrels waaruit de grond bestaat en door de wijze waarop deze korrels gestapeld zijn. Het kenmerk van de granulometrie, de verdeling in de afmetingen van de korrels, wordt *textuur* genoemd. De wijze waarop de korrels gestapeld zijn, wordt de *structuur* genoemd.

In hetgeen volgt wordt enkel ingegaan op de textuur, en zijn benamingen en classificatiesystemen, kwestie van benamingen in het kader van in het verdere onderzoek geciteerde referentiekaders duidelijk te definiëren. Vrijwel steeds heeft verwarring in naamgeving te maken met de regio of met het vakgebied waarin gewerkt wordt: geologie, pedologie, bouwkunde,...

In algemene richtlijnen zoals de Waterwegwijzer voor Architecten en code goede praktijk rioleringsystemen (tabel 3.7), wordt veelal verwezen naar grondsoorten met benamingen die ofwel in de Belgische classificatie ofwel in de Nederlandse classificatie voorkomen, ofwel in beide zonder dat zij daarom dezelfde betekenis hebben. Daarom wordt verder in deze paragraaf ingegaan op beide classificaties. Daarnaast worden ook andere classificatiesystemen vermeld, specifiek in het licht van verder besproken testmethodes.

In de meeste gronden komen fracties voor met uiteenlopende korrelafmetingen. De granulometrie van een grond geeft aan in welke mate, in welke fracties de verschillende korrelafmetingen voorkomen.

De uiteindelijke textuurbenaming voor een grond, de grondsoort, wordt bepaald door de verhoudingen tussen de verschillende fracties.

2.1.3.1 Granulometrie

2.1.3.1.1 ISO

Volgens de ISO (ISO 14688-1) worden materialen in situ granulometrisch beschreven en benoemd op basis van een logaritmische schaal in de korrelverdeling:

Tabel 2-5: Granulometrische indeling van materialen in situ volgens de ISO.

Fractie	Klasse	Onderverdeling	Korrelgrootte
	keien		> 63 mm
Grove fractie	grind	grof grind	63 mm – 20 mm
		medium grind	20 mm – 6,3 mm
		fijn grind	6,3 mm – 2 mm
	zand	grof zand	2 mm – 0,63 mm
		medium zand	0,63 mm – 0,20 mm
		fijn zand	0,20 mm – 0,063 mm
Fijne fractie	silt	grof silt	63 µm – 20 µm
		medium silt	20 µm – 6,3 µm
		fijn silt	6,3 µm – 2 µm
	klei	klei	< 2 µm

In bouwtechnische en geologische context, in België en ook elders, is het gebruikelijk de 63 Xm-grenzen uit de ISO te vereenvoudigen tot 60 Xm-grenzen (De Smedt, 2013).

De ISO-indeling volgens Tabel 2-5 wordt wel strikt gevolgd in Duitsland en door de FAO.

2.1.3.1.2 Standaardbestek 250 voor de Wegenbouw

In een bouwtechnische omgeving wordt in het Standaardbestek 250 voor de Wegenbouw (versie 3.1, 2014, hoofdstuk 3) ingegaan op materialen. Hierbinnen wordt 'Consistente grond'⁴ met een verwaarloosbaar gehalte aan kalkachtige stoffen (< 25 %) en organische stoffen (<3 %) verder beschreven. Het is deze grond die in de huidige studie in hoofdzaak relevant is. In de verdere definitie worden hier volgende granulometrische fracties onderscheiden:

⁴ Grond wordt gedefinieerd als het geheel van vaste deeltjes die bepaalde volumes van de aardkorst uitmaken, rotsvolumes uitgezonderd. Grond die gereinigd is wordt als grond beschouwd. Consistente grond is 'min of meer samenhangende grond'. Niet-consistente grond is 'fijne natte grond die uit de hand loopt'.

Tabel 2-6: Fracties in de korrelverdeling van een consistente grond (grondmechanica, België).

			fractie I	<	0,002	mm
0,002	mm	≤	fractie II	<	0,060	mm
0,002	mm	≤	fractie IIa	<	0,020	mm
0,060	mm	≤	fractie III	<	0,200	mm
0,200	mm	≤	fractie IV	<	2	mm
2	mm	≤	fractie V	<	20	mm
20	mm	≤	fractie VI	<	125	mm
20	mm	≤	fractie VIa	<	80	mm

2.1.3.1.3 In bodemkundige context

In de pedologische traditie in België, Frankrijk, Nederland en in de USA worden deels andere grenzen en/of andere benamingen gedefinieerd; de indeling is in 3 hoofdfracties als volgt:

Tabel 2-7: Basisindeling in granulometrische fracties in de pedologie en benaming in België, Frankrijk, Nederland en de USA.

Korrelgrootte, diameter	Belgische indeling	Franse indeling	USDA indeling	Nederlandse indeling	
< 2 µm	klei	argile	clay	lutum	leem
2 – 50 µm	leem	limon	silt	silt	
50 – 2000 µm	zand	sable	sand	zand	

Ref.: Steur et al., 1987; Marechal et al., 1974; Deckers, 1996; Baize et al., 2011, NSSHandbook, n.d..

In België wordt de fractie 2 - 50 µm als leem benoemd. De benaming silt bestaat er niet in pedologische context.

De Nederlandse classificatie sluit deels aan bij de Angelsaksische benaming: de fractie 2 - 50 µm wordt als silt benoemd, en leem omvat de fracties lutum en silt. De zandfracties worden verder gekarakteriseerd op basis van de grofte. Voorheen werd ook het “afslibbaar gedeelte” of de “afslibbaarheid” bepaald. Het is de fijne fractie (< 16 µm) waarvan verondersteld wordt dat deze voedingsstoffen voor plantaardige productie vasthoudt.

De klei-, leem- en zandfracties worden in België nog verder onderverdeeld in subfracties als volgt.

Tabel 2-8: Subfracties, gedefinieerd binnen de Belgische Bodemkartering (Ameryckx et.al., 1995).

Fractie	Onderverdeling	Korrelgrootte
grind		> 2 mm
zand	zeer grof zand	2 mm – 1 mm
	grof zand	1 mm – 0,500 mm
	middelmatig zand	0,500 mm – 0,200 mm
	fijn zand	0,200 mm – 0,100 mm
	zeer fijn zand	0,100 mm – 0,050 mm
leem	grof silt	50 µm – 20 µm
	middelmatig leem	20 µm – 10 µm
	fijne leem	10 µm – 2 µm
klei	grove klei	2 µm - 0,2 µm
	fijne klei	< 0,2 µm

2.1.3.1 Grondsoort of textuurbenaming

De invalshoek in de huidige studie wordt impliciet gevormd door de informatie die de Bodemkaart van België zou kunnen aanleveren m.b.t. de grondsoortbepaling voor een te onderzoeken site.

De benaming van een grond, de grondsoort of de textuurbenaming, wordt meestal bepaald door de verhoudingen tussen de verschillende fracties. Andere criteria kunnen zijn de oorsprong of eigenschappen van de grond.

Binnen de bodemkunde, de pedologie, bestaan ettelijke classificatiesystemen voor grondsoorten: de Belgische met 16 klassen, de Nederlandse met 17 klassen, de Food and Agriculture Organization of the United Nations - United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization (FAO-UNESCO) benadering (3 klassen), de FAO- en de U.S. Department of Agriculture (USDA)-indeling met 12 klassen, een Franse indeling met 14 tot 17 klassen, de Zwitserse met 11, enz.. Enkele worden hierna toegelicht.

Verder wordt de indeling ook gegeven volgens

- het BEMEX-expertsysteem van de Bodemkundige Dienst van België omwille van de beschikbaarheid van gegevens;
- het Standaardbestek 250 voor de Wegenbouw (België) omwille van de bouwkundige context.

2.1.3.1.1 De Belgische bodemkundige indeling

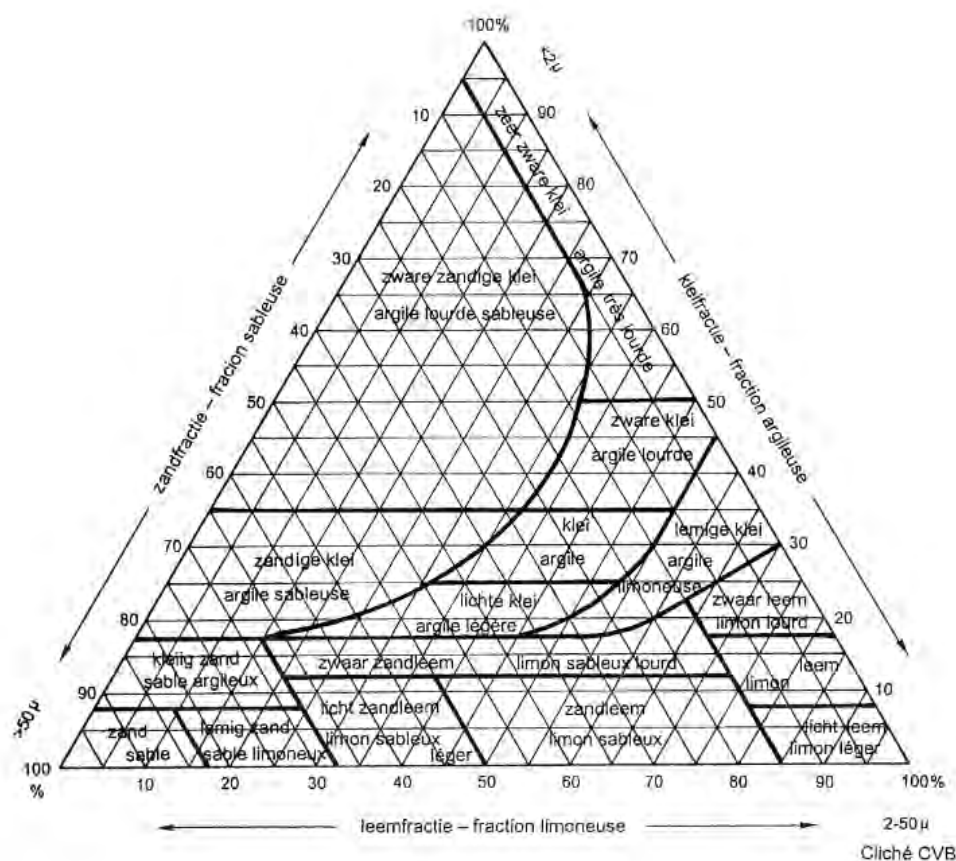
Tenzij anders vermeld, worden de Belgische pedologische definities verder in dit onderzoek aangehouden. Deze definities sluiten (per definitie) aan bij de Bodemkaart van België. Deze kaart geeft informatie tot 1,25 à 1,5 m-mv.

In de pedologische context worden in de Belgische indeling 3 grote groepen onderscheiden:

- Gronden op weinig materiaal met een oppervlakkige horizont van minstens 40 cm dikte met een organische stofgehalte hoger dan 30 %;
- Gronden op losse sedimenten met een gehalte aan grove elementen (korreldiameter > 2 mm) kleiner dan 5 %; deze groep is dominant in Vlaanderen.
- Licht zandleemgronden tot zware klei met een gehalte aan grove elementen groter dan 5 %. Deze groep is voornamelijk aanwezig in Wallonië.

M.b.t. de 1^{ste} groep is er geen informatie m.b.t. de textuur van de minerale fractie. Deze bodems worden op de bodemkaart weergegeven door het symbool V.

In de Belgische classificatie wordt de 2^{de} groep ingedeeld in 16 grondsoorten zoals weergegeven op de volgende textuurdriehoek (Deckers J., 1996) (Figuur 2-3).



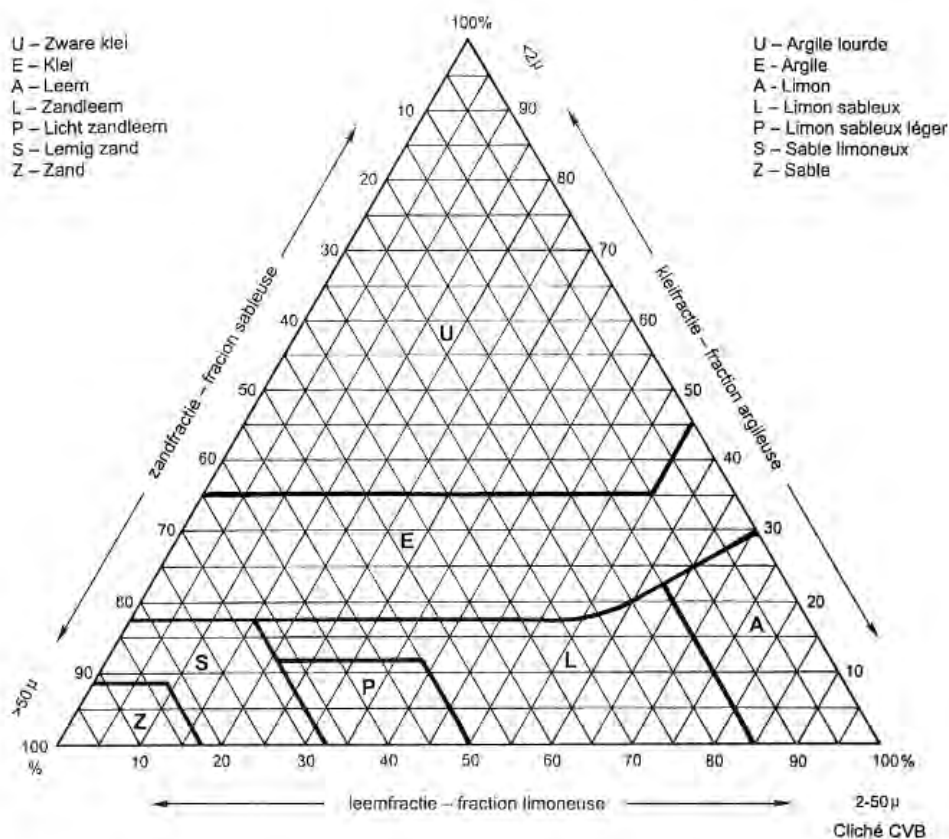
Figuur 2-3: Onderverdeling in grondsoort voor niet-venige gronden met een gehalte < 5 % aan grove elementen (>2 mm) volgens het Centrum voor Bodemkartering, België.

In de Belgische benadering wordt geen indeling gemaakt op basis van de oorsprong van het materiaal:

- De leemfractie kan uit löss, uit ander sediment of uit in situverweringsmateriaal bestaan.
- Holocene mariene afzettingen (polders) worden slechts onderscheiden vanaf de indeling in bodemseries.

Een benaming 'zavel' wordt soms gebruikt voor veelal Tertiaire (zeer) fijne zanden met zekere fracties leem of klei; er bestaat in België evenwel geen duidelijke definitie van zavel.

Ten behoeve van de Belgische bodemkartering werden de 16 grondsoorten vereenvoudigd tot 7 textuurklassen:



Figuur 2-4: Onderverdeling in textuurklassen voor niet-venige gronden met een gehalte < 5 % aan grove elementen (>2 mm), België opgesteld door het Centrum van Bodemkartering, met de afbakening van de textuurklassen in gebruik bij de nationale bodemkartering. (bron: Van Ranst & Sys, 2000)

M.b.t. de 3^{de} groep in de Belgische classificatie: bodems op losse sedimenten met een gehalte aan grove elementen (> 2 mm) van meer dan 5 %, en waarvan de textuur A, L, E of P is, worden beschouwd als stenige gronden en krijgen het symbool G.

Bodems op losse sedimenten met een gehalte aan grove elementen (> 2 mm) van meer dan 5 %, en van Z-, S- of U-textuur, komen weinig voor; ze krijgen geen afzonderlijk symbool. De aard van de stenigheid wordt dan wel vermeld als variante op het moedermateriaal (= textuurklasse).

Op de bodemkaart wordt in de kernserie (bodemserie, 3-delige karteringseenheid, die enkel bepaald wordt door de aard van het moedermateriaal, draineringsklasse en profielontwikkeling) in principe de textuurklasse van de bovenste bodemlaag weergegeven. De klassen van de aard van het moedermateriaal zijn deze van Figuur 2-4. Bijkomend bij de kernserie kan informatie toegevoegd zijn m.b.t. diepere bodemlagen, bv. indien de textuur fijner of lichter wordt onder de bouwlaag, of m.b.t. de aard en diepte van een substraat waarvan de samenstelling afwijkt van deze van de bovenste bodemlaag.

Naast bovenstaande symbolen worden ook enkele andere toegekend, waarvan X te vermelden is voor 'duinen'; het gaat hier eerder over een landschappelijke eenheid waarbij de bodemsamenstelling complex of niet duidelijk gespecificeerd is.

Opmerkelijk is dat in de Belgische indeling geen enkele auteur de noodzaak vermeldt om binnen de grondsoort zand (Z) een verdere indeling te definiëren volgens de grofte van de zandfractie. In het kader van het verdere onderzoek is het aangewezen om wel degelijk een dergelijke verdere indeling in grondsoort te definiëren. Er wordt voorgesteld om de grondsoort zand verder in 'grof zand' en 'fijn zand' in te delen als volgt:

- | | |
|------------|--|
| Grof zand: | zand (Z) waarbij de zandfractie > 90 %, de kleifracie < 8 %, en de mediaan in de zandfractie > 200 μm . |
| Fijn zand: | zand (Z), ander dan grof zand. |

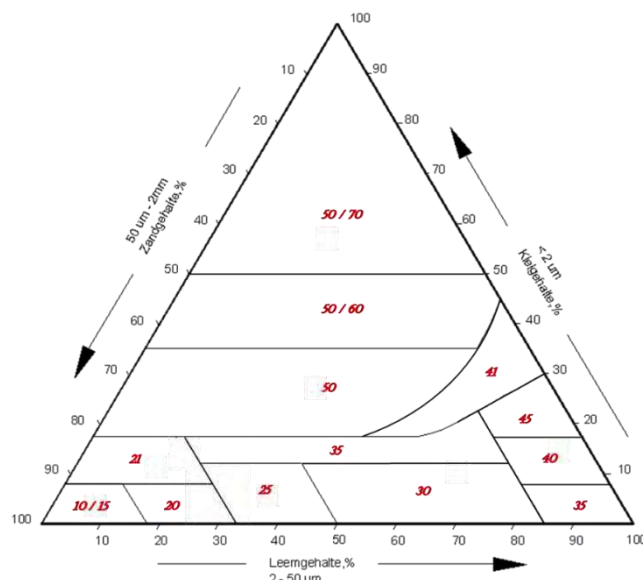
Hierbij is de grens m.b.t. de mediaan in de zandfractie consistent gekozen met een grens in de subfracties, gedefinieerd binnen de ISO en binnen de Belgische Bodemkartering (Ameryckx et.al., 1995).

2.1.3.1.2 De grondsoortindeling van de Bodemkundige Dienst van België

De indeling in grondsoorten zoals ze doorgevoerd werd door de Bodemkundige Dienst van België heeft een goed omschreven doelstelling, metname de groepering in grondsoorten die op eenzelfde wijze behandeld dienen te worden in de chemische bodemvruchtbaarheidsanalyse en de hierop gebaseerde bekalking- en bemestingsadvisering (BEMEX). De finaliteit verschilt duidelijk van deze van de huidige studie, doch de indeling wordt hier wel besproken: ze vormt een bijkomende referentie en gebeurt standaard bij de bepaling van de granulometrie: de bepalingen zijn beschikbaar.

De grondsoortbepaling gebeurt in het laboratorium met de palpatiemethode⁵. De grenzen tussen de grondsoorten zijn overgenomen van deze van de Belgische Bodemkartering. Grondsoorten worden aangeduid met een naam en een code.

Code	Grondsoort BDB	Textuurklasse volgens de Bodemkaart
10	Grof zand	Z
11	Kleihoudend grof zand	Z
15	Zand	Z
20	Lemig zand	S
21	Kleihoudend lemig zand	S
25	Licht zandleem	P
30	Zandleem	L
35	Licht leem of zwaar zandleem	L of A
40	Leem	A
41	Lemige klei	E
45	Zwaar leem	A
50	Klei	E of U
60	Lichte polder	- ⁶
70	Polder	-



Figuur 2-5: Onderverdeling in grondsoorten volgens de Bodemkundige Dienst van België (BDB) in functie van BEMEX, met in de tabel eveneens de overeenkomstige textuurklasse volgens de Bodemkaart van België.

Merk op:

In de textuurdriehoek wordt geen onderscheid gemaakt tussen Zand en Grof zand. Dit onderscheid wordt bepaald op basis van expertkennis (palpatie). In de praktijk blijkt dat dit onderscheid niet steeds overeenkomt met een definitie zoals ze in vorige paragraaf werd gedefinieerd: In de palpatie worden ook zanden met mediaanwaarden < 200 µm als 'Grof zand' beoordeeld.

⁵ Grondsoortbepaling door palpatie is een expertbepaling. De bepaling gebeurt door gedroogde, gezeefde grond (over een zeef van 2 mm) aan te voelen tussen de vingers, zo nodig met gebruik van hulpmiddelen als water, HCl en referentiemonsters. (Ref.: Methode voor manuele textuurbepaling – Universiteit Gent, Fac.Bio-ingenieurswetenschappen – Vakgroep Bodembeheer). Jaarlijks organiseert het VITO i.o.v. de ALBON hiertoe een proef 'Manuele textuurbepaling'. Meerdere medewerkers van de Bodemkundige Dienst van België nemen hieraan deel en zijn 'geaccrediteerde uitvoerder'.

⁶ M.b.t. de polders worden geen textuurklassen met lettercode in de Belgische kartering opgenomen; de wijze van kartering verschilt er van deze van de rest van het land.

2.1.3.1.3 De Belgische indeling volgens het Standaardbestek 250 voor de Wegenbouw (v3.1, 2014)

In het Standaardbestek 250 voor de Wegenbouw wordt 'consistente grond' in de grondmechanica verder geclassificeerd volgens zijn plasticiteitsindex (i_p)⁷ en zijn korrelverdeling (zie Tabel 2-6)⁸; de grondsoort klei wordt gedefinieerd enkel op basis van de plasticiteitsindex.

De parameter plasticiteitsindex voegt een dimensie toe in de classificatie. Het is niet mogelijk een eenduidige vergelijking te maken in de benamingen (zand, klei, leem) tussen de indeling volgens het Standaardbestek en deze van de Belgische bodemkartering gezien de parameter plasticiteitsindex, en gezien ook verschillen in grenzen in de fractie-indelingen. In onderstaande Tabel 2-9 werd toch getracht om een praktische benadering te geven op basis van enig inzicht in de plasticiteitsindex.

Tabel 2-9: Grondsoorten Standaardbestek 250 en benadering in de overeenkomst in de textuurklassen van de Belgische bodemkartering.

Standaardbestek 250 voor de Wegenbouw			Equivalente textuurklassen volgens de Bodemkaart van België (benaderend)
Grondsoort	Plasticiteitsindex	en granulometrie	
Klei	$25 \leq i_p$		U (E)
Zandhoudende klei	$15 \leq i_p \leq 25$	fracties III + IV + V ≥ 50 %	E (U)
Leemhoudende klei	$5 \leq i_p \leq 25$	fracties III + IV + V < 50 % en fractie II < 50 %	E (U)
Leem	$15 \leq i_p \leq 25$ of $5 \leq i_p \leq 15$	fractie II ≥ 50 % fracties III + IV + V < 50 %	A, L, E
Kleihoudend zand	$5 \leq i_p \leq 15$	fracties III + IV + V ≥ 50 % en fractie I $\geq$ fractie IIa	S, E
Leemhoudend zand	$5 \leq i_p \leq 15$	fracties III + IV + V ≥ 50 % en fractie I $<$ fractie IIa	S, P
Weinig-kleihoudend zand	$i_p < 5$	fractie I $\geq$ fractie IIa	Z (S)
Weinig-leemhoudend zand	$i_p < 5$	fractie I $<$ fractie IIa	Z (S)
Fijn-zandhoudende grond	niet plastisch	fractie III ≥ 50 %	Z
Middelmatig-zandhoudende grond	niet plastisch	fracties III + IV ≥ 50 % en fractie III < 50 % en fractie IV < 50 %	Z
Grof-zandhoudende grond	niet plastisch	fractie IV ≥ 50 %	Z
Fijn-rolgrindhoudende grond of fijne-steenhoudende grond	niet plastisch	fractie V ≥ 50 %	aard van de stenigheid wordt vermeld als variante (zeldzaam)
Middelgrof-rolgrindhoudende grond of middelgrove-steenhoudende grond	niet plastisch	fractie VIa ≥ 50 %	aard van de stenigheid wordt vermeld als variante (zeldzaam)
Grof-rolgrindhoudende grond of grove-steenhoudende grond	niet plastisch	fractie VIa < 50 % en fractie VI ≥ 50 %	aard van de stenigheid wordt vermeld als variante (zeldzaam)

⁷ De plasticiteitsindex is vrij goed gecorreleerd met het kleigehalte en met de aard van de klei. De index geeft informatie over de bouwtechnische verwerkbaarheid van een grond in functie van de vochttoestand (verdichtingsmogelijkheid, draagkracht,...).

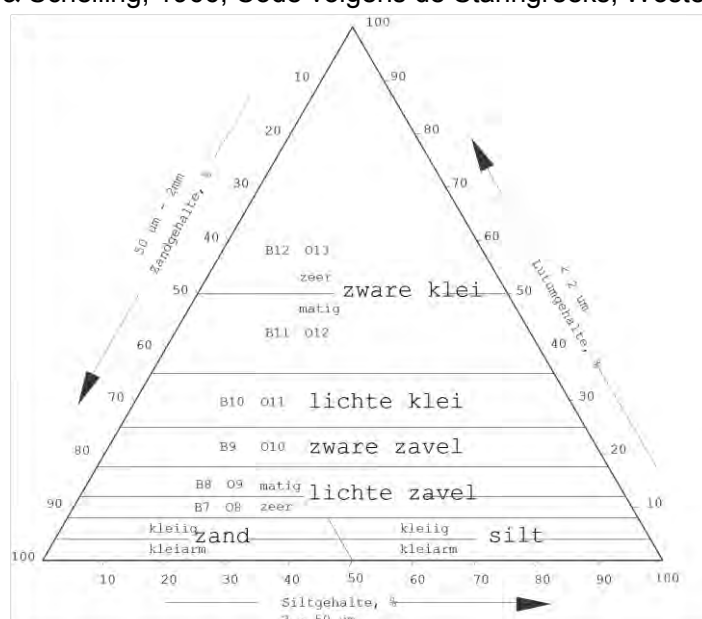
⁸ Een 3^{de} parameter is de oorsprong van het materiaal, doch deze is verder niet relevant in deze studie.

2.1.3.1.4 De Nederlandse indeling

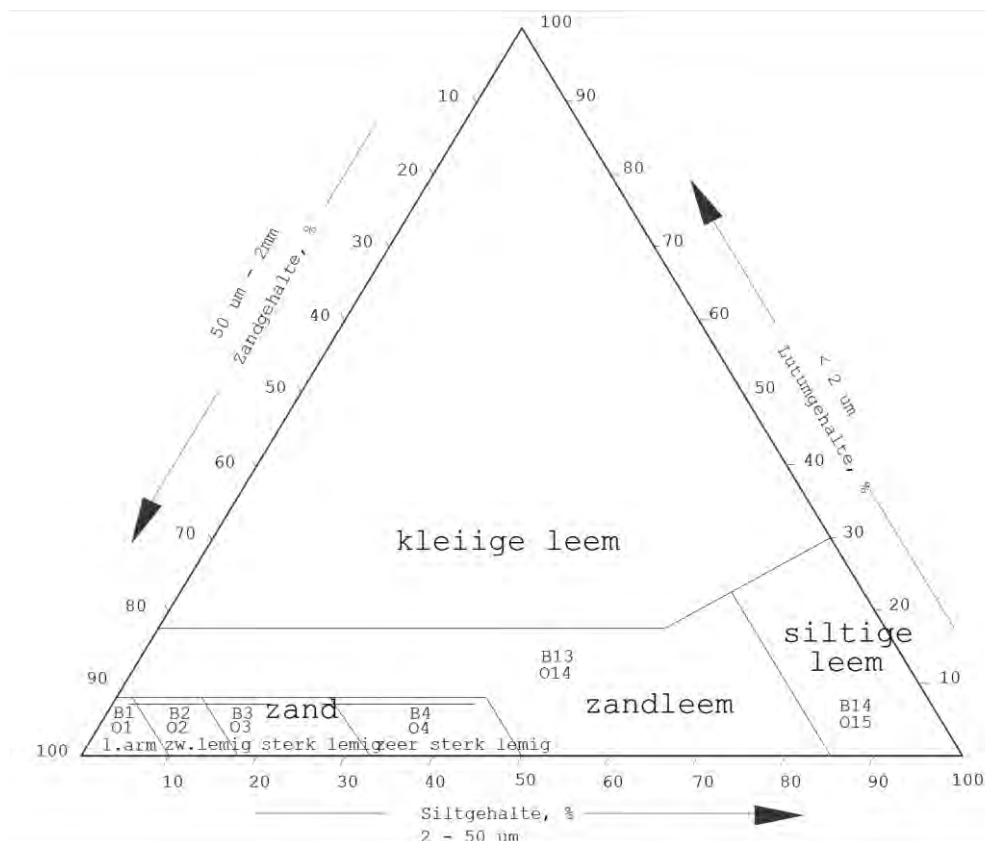
In de Nederlandse indeling wordt het materiaal ingedeeld in moerig (venig) en mineraal. De verdere opdeling van het minerale materiaal is gebaseerd op de oorsprong van het moedermateriaal:

- Minerale niet-eolische afzettingen worden benoemd op basis van het kleigehalte (lutumgehalte). 'Zavel' als materiaal behoort tot de niet-eolische afzettingen: het betreft zanden met toenemend kleigehalte.
- Minerale eolische afzettingen en grondsoorten met een betrekkelijk laag kleigehalte worden ingedeeld naar het leemgehalte (siltgehalte).

In de Nederlandse classificatie gelden de volgende textuurindelingen voor niet-eolische of voor eolische afzettingen (Figuur 2-6 en Figuur 2-7), telkens voor niet-moerig materiaal (naar de Bakker & Schelling, 1966; Code volgens de Staringreeks, Wösten, 2001).



Figuur 2-6: Textuurdriehoek voor niet-eolische afzettingen, NI.



Figuur 2-7: Textuurdriehoek voor eolische afzettingen en andere lutumarme afzettingen, NI.

Aan elke grondsoort wordt een code toegekend naargelang de grond een bovengrond (B), dan wel een ondergrond (O) vormt (Staringreeks). In volgende tabel wordt getracht de code in de Staringreeks voor ondergronden op basis van deze indelingen te toetsen aan de textuurbenamingen in de Belgische classificatie.

**Tabel 2-10: Benadering in overeenkomsten in grondsoortindelingen
in België en in Nederland.**

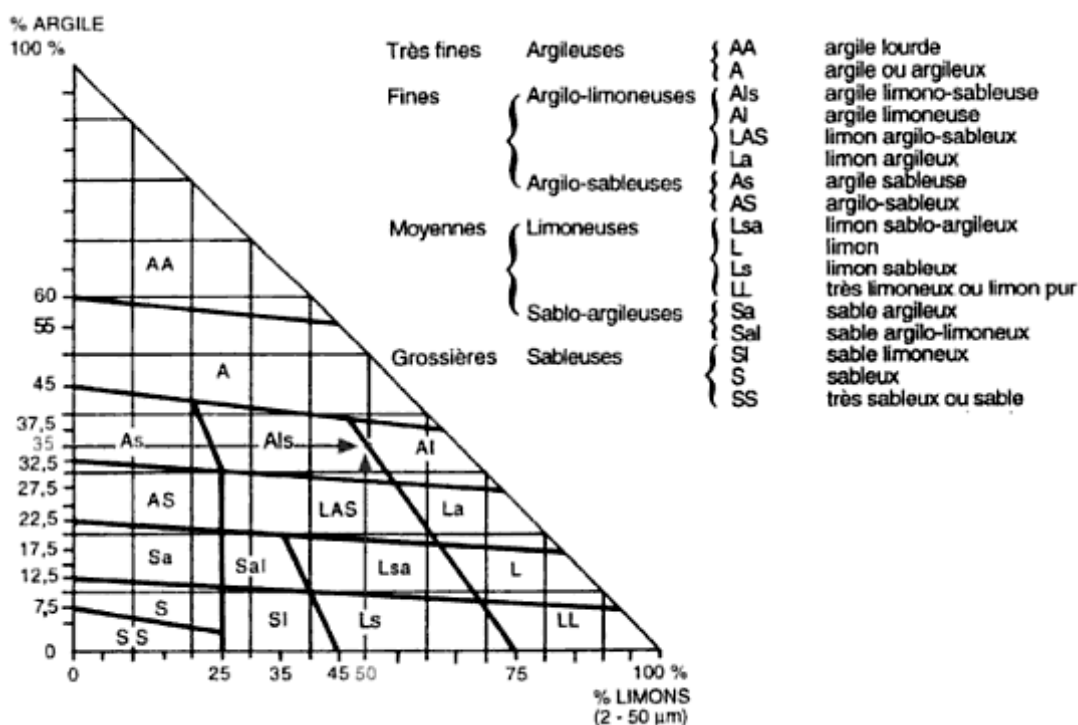
Grondsoort volgens de Nederlandse indeling	Korrelgrootteverdeling (Z:zand; K:klei; L:leem)	Humusgehalte %	Starings-Code	Oorsprong	Grondsoort volgens de Belgische indeling
leemarm, zeer fijn tot matig fijn zand	>90 % Z en < 8 % K	0 – 3	O1		zand
zwak lemig, zeer fijn tot matig fijn zand	82–90 % Z en < 8 % K	0 – 3	O2		zand
sterk lemig zeer fijn tot matig fijn zand	67-82 % Z en < 8 % K	0 – 3	O3		lemig zand
zeer sterk lemig zeer fijn tot matig fijn zand	50-67 % Z en < 8 % K	0 – 3	O4		licht zandleem
grof zand	>90 % Z, <8 % K en $M_{50} > 210\mu$	0 – 3	O5		zand
keileem	>60 % Z	1 – 7	O6	morenen	grintheadend, grove fractie > 5 %
beekleem	35 % < K+L < 45 %	1 – 3	O7	alluviaal	zandige klei tot licht zandleem
zeer lichte zavel	8-12 % K	0 – 3	O8	niet-eolisch	kleiig zand, licht zandleem tot zandleem
matig lichte zavel	12-18 % K	0 – 3	O9	niet-eolisch	kleiig zand tot zwaar zandleem
zware zavel	18-25 % K	0 – 3	O10	niet-eolisch	zandige tot lichte klei
lichte klei	25-35 % K	0 – 3	O11	niet-eolisch	zandige klei tot klei
matig zware klei	35-50 % K	0 – 3	O12	niet-eolisch	zware zandige klei tot zware klei
zeer zware klei	> 50 % K	0 – 3	O13		zware zandige klei tot zeer zware klei
zandige leem	<18 % K en 15-50 % Z, of 8-18 % K en >15 % Z	0 – 3	O14		zwaar zandleem tot zandleem
siltige leem	< 15 % Z en < 80 % K	0 – 3	O15		licht leem, leem of zwaar leem
oligotroof veen	> 15 % organische stof bij 0 % K, tot >30 % organische stof bij 100 % K in de minerale fractie	O16	niet-eolisch	bodems op weinig materiaal	
mesotroof en eutroof veen	> 15 % organische stof bij 0 % K, tot >30 % organische stof bij 100 % K in de minerale fractie		O17	niet-eolisch	bodems op weinig materiaal
moerige tussenlaag			O18	niet-eolisch	bodems op weinig materiaal

Men merkt volgende:

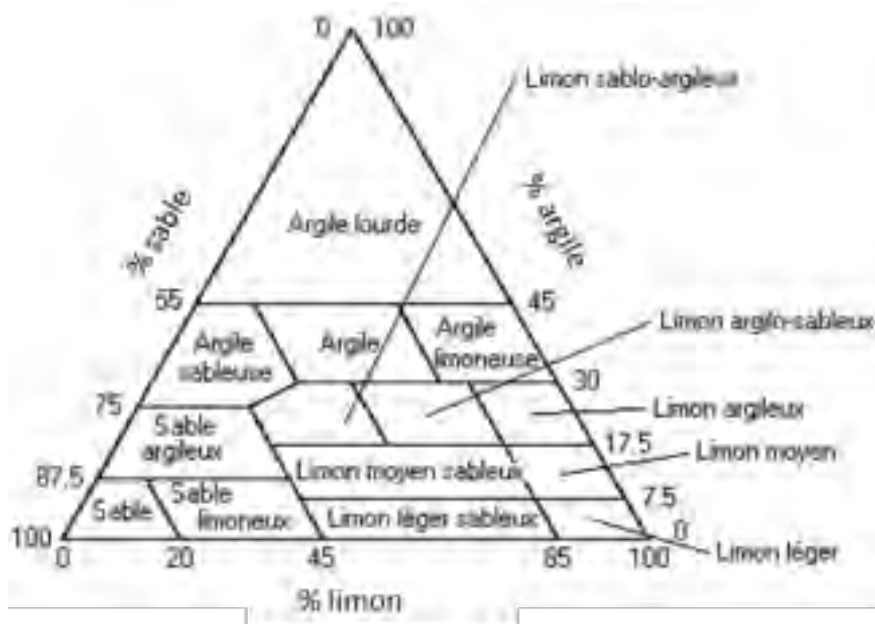
- Binnen de groep van de eolische zandafzettingen is de overeenkomst in definities van grondsoorten zeer sluitend, zij het deels onder andere benamingen.
- De grondsoort zand (Z) in de Belgische classificatie wordt in de Nederlandse benadering nog verder opgedeeld in grof zand, in leemarm fijn zand en zwak lemig fijn zand.
- Grof zand wordt niet op de textuurdriehoek aangegeven. In de Nederlandse benadering wordt grof zand gekenmerkt door M50 (de mediaan in de zandfractie) > 210 μ . In België slaat het predicaat "grof" enkel op de fractie 500 μ - 1000 μ .
- Binnen de groep van niet-eolische grondsoorten (Figuur 2-6) is de overeenkomst in de definities slechts gedeeltelijk. De Belgische classificatie voorziet ook voor niet-eolische grondsoorten, naast het kleigehalte, verdergaand in een opdeling op basis van leem- en zandgehalte.
- In Nederland worden bodems op weinig materiaal verder ingedeeld naargelang trofiegraad of voorkomen van een venige horizont in het profiel.

2.1.3.1.5 Indelingen in Frankrijk

In Frankrijk wordt algemeen het diagramma van Jamagne toegepast (Mathieu et al., 1998), naast deze van GEPPA (Groupe d'Etude pour les Problèmes de Pédologie Appliquée) (Baize et al., 2011). Beide indelingen komen verregaand overeen. De granulometrische indeling in de 3 hoofdfracties is hierbij dezelfde als in België en Nederland.



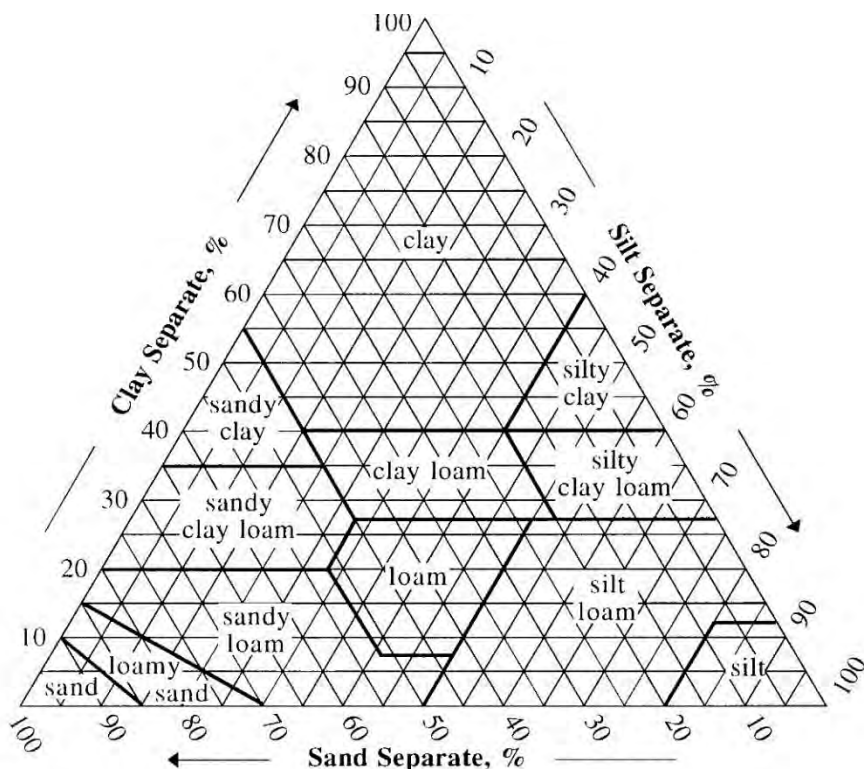
Figuur 2-8: Franse textuurindeling volgens GEPPA



Figuur 2-9: Franse textuurindeling volgens Jamagne

2.1.3.1.6 Angelsaksische indelingen

In de Angelsaksische traditie werden eveneens ettelijke benaderingen ontwikkeld. De USDA-indeling heeft ruime toepassing (National Soil Survey Handbook (NSSH), n.d.). De granulometrische grenzen voor de fracties clay, silt en sand zijn dezelfde als degene die in België worden aangehouden (2 μ m, 50 μ m, 2 mm).

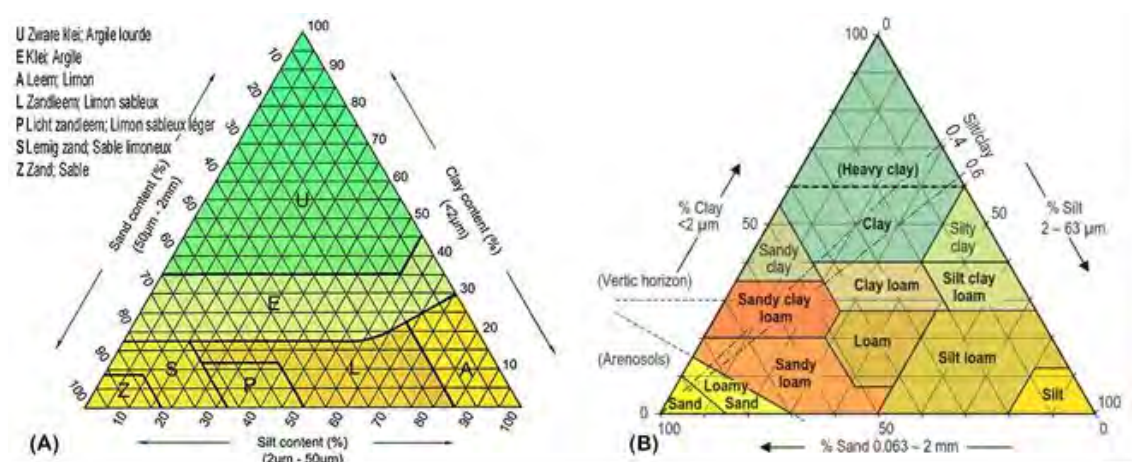


Figuur 2-10: Textuurindeling USDA, met siltfractie: 2 μ m - 50 μ m.

De Canadese indeling is als deze van het USDA, doch ze onderscheidt verder *heavy clay* (kleifractie > 60 %).

De FAO volgt dezelfde naamgeving als deze van het USDA, doch de indeling volgt de korrelgrootteverdeling volgens de ISO (ISO 14688-1): de siltfractie wordt volgens de FAO gedefinieerd met grenzen 2 µm – 63 µm, en de sand-fractie tussen de grenzen 63 µm – 2 mm (zie Figuur 2-11).

Een vertaling van de grondsoorten van de Bodemkaart van België naar een meer internationale benadering zoals deze volgens de FAO, de World Reference Base for Soil Resources, is niet voor de hand liggend, zowel omwille van de naamgeving en als omwille van de granulometrische grenzen (Dondeyne et al., 2014).



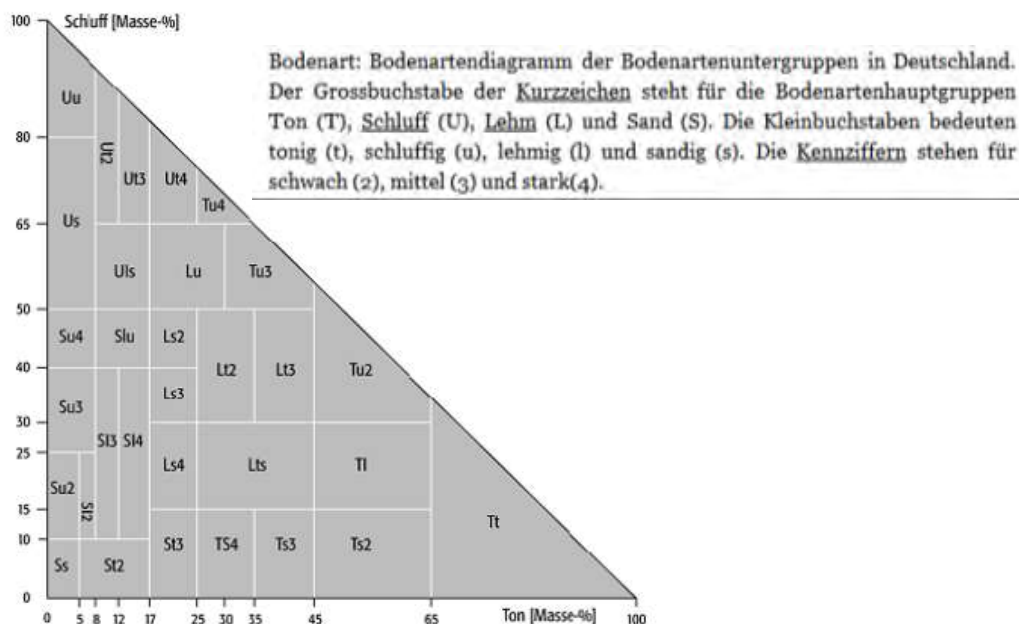
Figuur 2-11: Toetsing van de Belgische indeling (A) in grondsoorten aan de FAO-indeling (B) (Dondeyne et al., 2014).

2.1.3.1.7 Duitse indeling

De Duitse indeling van grondsoorten werd vastgelegd in overleg tussen geologen en pedologen (Bodenkundliche Kartieranleitung, 2005). De indeling in korrelverdeling volgt ISO (ISO 14688-1), met fracties klei ('Ton') < 2 µm, silt ('Schluff') 2 - 63 µm, en zand (Sand) 63 µm - 2 mm.

De indeling voorziet in 4 grondsoorthoofdgroepen: 'Ton', 'Schluff', 'Lehm' en 'Sand'.

'Lehm' heeft enkel als grondsoort betekenis, m.n. een samenstelling van klei, silt en zand, en volgt in die zin de Angelsaksische benaming 'loam'.



Figuur 2-12: Diagramma grondsoorten volgens de Duitse indeling.

2.1.4 Beproevingsmethodes en kwaliteitskenmerken

Een meting volgt steeds een methode, al dan niet expliciet, waardoor men de reële waarde, de grootte van een eigenschap wenst te kennen. Een meetmethode wordt in de ISO 17025-norm (5.4.) ook beproevingsmethode genoemd.

Naargelang de methode, en de doelstelling ervan, kan het belangrijk zijn te weten in welke mate de meetwaarde kan afwijken van de reële waarde. De prestatiekenmerken van een meetmethode kwantificeren de mate waarin en de wijze waarop de meetresultaten van deze methode kunnen afwijken van de ware waarde.

In hetgeen volgt worden de prestatiekenmerken van een beproevingsmethode in principe en kort beschreven. Referenties hierbij vormen ISO 17025:2005, CMA6/A, CMA/6/B⁹.

Vervolgens wordt nagegaan of en in welke mate ze van toepassing kunnen zijn of relevant zijn in de bespreking van de methodes voor de bepaling van de infiltratiecapaciteit.

Het betreft deels een theoretische oefening, gezien allerm minst alle prestatiekenmerken in dit onderzoek kunnen bepaald worden. Anderzijds vormen ze wel kenmerken en definities die informatie geven over de realiteit van de beproevingsmethodes.

⁹ Compendium voor Monsterneming en Analyse, onderdelen vastgesteld bij verschillende Ministerieel Besluiten.

2.1.4.1 Prestatiekenmerken

2.1.4.1.1 Werkgebied

De lineariteit van een meetmethode is de eigenschap dat binnen vastgelegde grenzen er een rechtlijnig verband bestaat tussen de meetwaarde en reële waarde van de te bepalen grootte. Het lineaire gebied is het overeenkomstige werkgebied. Onder de algemene voorwaarden valt dat de correlatiecoëfficiënt minimaal 0,995 moet bedragen ($r \geq 0,995$, indien mogelijk $r \geq 0,998$).

2.1.4.1.2 Juistheid

De mate van overeenstemming tussen de gemiddelde waarde (X_{gem}) verkregen uit een reeks metingen en de ware waarde (C_{ref}) of de als werkelijk aangenomen waarde van de te bepalen grootte. Als maat voor de juistheid wordt gewoonlijk niet de overeenstemming maar het verschil beschouwd, nl. de systematische afwijking (bias = juistheid-100 %).

De bias (b_c) wordt gegeven door:

$$b_c = \frac{X_{gem} - C_{ref}}{C_{ref}} 100$$

$$juistheid = 100 + b_c$$

2.1.4.1.3 Selectiviteit

Het is de eigenschap van een beproevingsmethode om een bepaalde groep van componenten te onderscheiden van alle andere groepen van componenten in het beproevingsobject. Concreet dient een gemeten doorlatendheid een maat te zijn voor de doorlatendheid van de grond, onafgezien van bv. de textuur zelf, indien de textuur als belangrijkste karakteristiek voor een grondsoort wordt gekozen.

2.1.4.1.4 Aantoonbaarheidsgrens

De aantoonbaarheidsgrens is de laagste waarde van de parameter die met een bepaalde (en redelijke) statistische waarschijnlijkheid met de methode aangetoond kan worden.

De aantoonbaarheidsgrens wordt bepaald als 3 keer de standaardafwijking onder reproduceerbaarheidscondities.

2.1.4.1.5 Bepaalbaarheidsgrens

De bepaalbaarheidsgrens is de laagste waarde van de parameter die met een bepaalde (en redelijke) precisie en juistheid met de analysemethode gekwantificeerd kan worden.

De bepaalbaarheidsgrens is per definitie 2 maal de aantoonbaarheidsgrens.

2.1.4.1.6 Herhaalbaarheid

De herhaalbaarheid is de mate van overeenstemming tussen opeenvolgende resultaten die worden verkregen met dezelfde methode bij identiek materiaal en onder dezelfde omstandigheden: uitvoering door dezelfde persoon, met dezelfde apparatuur in hetzelfde labo of locatie, op hetzelfde tijdstip of met een zeer korte tussentijd, bv. dag.

De herhaalbaarheid is een spreidingsmaat die als standaarddeviatie of als variatiecoëfficiënt wordt berekend.

Volgens CMA/6/A dienen minstens 5 metingen uitgevoerd te worden op hetzelfde materiaal onder herhaalbaarheidscondities d.w.z. onder volledige dezelfde omstandigheden (zelfde dag, zelfde analist, ...).

Hieruit wordt de standaardafwijking s_r bepaald:

$$s_r = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}}$$

s_r = standaardafwijking, in eenheid van meetresultaat
 n = aantal metingen, $n \geq 5$
 x_i = i-de analyseresultaat
 $\bar{x}$ = gemiddelde van n analyseresultaten

Herhaalbaarheid:

$$r = 2,8 s_r$$

Herhaalbaarheidsvariatiecoëfficiënt:.

$$RSD_r = \frac{s_r}{\bar{x}} 100$$

2.1.4.1.7 Reproduceerbaarheid

Maat voor de spreiding tussen meetwaarden verkregen met dezelfde methode, zelfde uitrusting, op hetzelfde materiaal, maar onder verschillende omstandigheden, bv. weersomstandigheden, luchtdruk, operator of techniker, ...

Volgens CMA/6/A dienen minstens 5 metingen uitgevoerd te worden op hetzelfde monster onder reproduceerbaarheidscondities d.w.z. onder verschillende omstandigheden

Hieruit wordt de standaardafwijking s_R bepaald

$$s_R = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}}$$

s_R = standaardafwijking, in eenheid van analyseresultaat
 n = aantal analyses, $n \geq 5$
 x_i = i-de analyseresultaat
 $\bar{x}$ = gemiddelde van n analyseresultaten

en de variatiecoëfficiënt:

$$RSD_R = \frac{s_R}{\bar{x}} 100$$

De enkelvoudige metingen worden uitgevoerd waarbij mogelijke parameters op verschillende niveaus worden gekozen, bv. de hoogte van een opgebrachte waterkolom. Om de RSD_R te bepalen worden de resultaten *gepooled* (dit wordt verkozen boven het nemen van de 'root mean square' aangezien bij gepoolde resultaten het aantal vrijheidsgraden mee wordt in rekening gebracht).

$$RSD_{R(gepooled)} = \sqrt{\frac{\sum (n_i - 1) RSD_{Ri}^2}{\sum (n_i - 1)}}$$

2.1.4.1.8 Robuustheid

De ongevoeligheid van het meetresultaat voor kleine variaties in uitvoering, omstandigheden en hoedanigheid van materialen, zoals deze in de praktijk kunnen voorkomen. De robuustheid is impliciet begrepen in de reproduceerbaarheid.

De verhouding tussen reproduceerbaarheid en herhaalbaarheid kan worden gehanteerd als een maat voor (het gebrek aan) robuustheid. In het ideale geval zou deze verhouding 1 moeten bedragen, maar in praktijk zijn verhoudingen tot 1,5 tot 2 niet ongewoon.

2.1.4.1.9 Meetonzekerheid of nauwkeurigheid

De meetonzekerheid karakteriseert de spreiding van de waarden, die redelijkerwijs aan de meetgrootte kunnen worden toegekend. De meetonzekerheid is typisch een combinatie van de bias en de reproduceerbaarheid. Factoren betreffen dan ook:

- representativiteit van het (deel)monster;
- meting in situ of monstername;
- monsterbewaring, -transport, -voorbehandeling;
- de eigenlijke meting (bijv. kalibratie, interferenties, ...) en de berekening van het meetresultaat (bijv. correcties, ...).

2.1.4.2 Toepasbaarheid, relevantie

Zonder af te doen aan de andere kenmerken, vormen de juistheid en de reproduceerbaarheid, de robuustheid, de belangrijkste prestatiekenmerken van een beproevingsmethode.

Eerder werd reeds beschreven dat in de materialen in situ betekenisvolle heterogeniteit kan voorkomen in doorlatendheid. Gezien het ontbreken van standaarden voor in situmaterialen, met per definitie eenduidig gekende waarden van de doorlatendheid, is het theoretisch niet mogelijk om kenmerken zoals werkgebied, de bias, juistheid en bijgevolg de meetonzekerheid van een in situmethode correct te bepalen.

Tabel 2-11: Toepasbaarheid van prestatiekenmerken.

Prestatiekenmerken		Kennis van de reële waarde is noodzakelijk	Toepasbaarheid m.b.t. in-situmethodes
Werkgebied		X	-
Juistheid, bias		X	-
Selectiviteit		X	-
Aantoonbaarheidsgrens		-	X
Bepaalbaarheidsgrens		-	X
Herhaalbaarheid		-	X
Reproduceerbaarheid		-	X
Robuustheid		-	X
Meetonzekerheid, nauwkeurigheid		X	-

Voor beproevingsmethodes in het labo zouden wel alle prestatiekenmerken kunnen bepaald worden, naargelang de eisen die aan de juistheid van een voorhanden zijnde standaard worden gesteld.

In de praktijk kan men wel uitspraken doen m.b.t. de reproduceerbaarheid, de robuustheid van een in situ methode, en kan men in het kader van het huidige onderzoek ook pragmatisch omgaan met de juistheid: men kan de juistheid relatief beschouwen, ten opzichte van bv. het meetresultaat van een andere methode.

2.2 INVENTARISATIE

De beschikbare en gebruikte testmethodes in Vlaanderen en in de ruimere regio worden geïnventariseerd. Naast de tests uit de praktijkervaring wordt ook teruggegrepen naar methodes beschreven in de wetenschappelijke literatuur en meer operationele publicaties (gids, richtlijn,...). De meeste tests vormen grotendeels varianten op enkele methodeprincipes: correlatiemethodes of metingen onder constante of veranderende hydraulische potentiaal (constant of falling head). Verdere indeling betreft de schaal of het volume waarop de meting plaatsgrijpt en het onderscheid in situ – ex situ.

Belangrijk onderscheid wordt gemaakt naar de fysische grootte van het gesampelde volume of oppervlak, zowel in- als ex situ, en de relatie tot de grondmatrix en voorkomende heterogeniteit of anisotropie in de matrix.

Er werd gerekend op grootteorde van minstens 15 tests of varianten. Uiteindelijk werden 18 in situ methodes, 6 laboratoriummethodes en 8 pedotransferfuncties geïnventariseerd.

Deze worden zo beschreven in de mate dat de informatie kan worden gevonden:

- Het principe en de werking van de test;
- De randvoorwaarden en/of nodige, o.m. klimatologische omstandigheden voor het bekomen van een bruikbaar resultaat;
- De variabele die wordt gemeten;
- De voor- en nadelen van de test;
- Relevantie van de test i.k.v. de aanleg en dimensionering van infiltratievoorzieningen;
- Bruikbaarheid van de test i.k.v. de aanleg en dimensionering van infiltratievoorzieningen, en afweging t.o.v. kwalificatie van de uitvoerder, de verwachte tijdsbesteding, en grotendeels hiermee samenhangend, de kostprijs.
- Toelichting m.b.t. de oorsprong en toepassingsgebieden van de test;
- In de beschrijvingen van verschillende tests of in de toepassingen worden door de auteurs eveneens referentiekaders naar voor geschoven. De genoemde tabel 3.7 (Code van goede praktijk voor het ontwerp, de aanleg en het onderhoud van rioleringsystemen, deel 3 bronmaatregelen) is een dergelijk referentiekader. De infiltratiesnelheid of vork van snelheden, voor eenzelfde textuur, kan naargelang het referentiekader aanzienlijk verschillen. Deze verschillen kunnen zowel een regionale oorsprong hebben, de geologie en de nomenclatuur, de testmethode zelf, of de doelstelling, het ontwerp van infrastructuur. In die zin zal in de mate van het mogelijke gedocumenteerd worden welke de oorsprong is van het referentiekader dat bij de test hoort. Tevens wordt de variabiliteit van de infiltratiesnelheid en/of conductiviteit van verschillende grondtypes gedocumenteerd;
- Gegevens of richtlijnen m.b.t. de herhaalbaarheid van de test, en m.b.t. het aantal vereiste herhalingen in functie van de aard van de bodemmatrix waarop de test wordt uitgevoerd, en in functie van de schaal van het project;
- Onder de randvoorwaarden is het van belang de praktische toepasbaarheid te documenteren (snelheid van uitvoering; thematiek van luchtinclusies, verslumping e.a. artefacten,...);
- Aandacht gaat ook naar de relatie tussen de test en het bodemtype: de betekenis van de bekomen meetwaarde in functie van het bodemtype. Zeer kenmerkend is hier de wijze waarop de waterflux in de matrix plaatsgrijpt: vooral in de zwaardere texturen kan de rijpingsgraad (opzwellen van klei) van de horizont of de grondlaag zeer bepalend zijn in de meetwaarde. Bepaalde tests kunnen in zware bodems tot een zeer hoge meetwaarde in conductiviteit leiden, waar deze in de bodemmatrix zelf niet bestaat of als gevolg van de aanleg van infiltratiestructuren drastisch verminderd wordt.

In het algemeen dient gesteld te worden dat in vele gevallen, in de meeste tests een relatie bestaat, een protocol ontwikkeld werd waarbij

<test – referentiekader – doelstelling, ontwerpmethodologie voor infiltratiestructuur of voor toepassing>

in enige of verregaande mate inherent verbonden zijn.

M.a.w. dat een test ontwikkeld werd ten behoeve van een specifieke finaliteit, en eventueel binnen een min of meer omschreven regio (met specifieke geologie), waarbij empirisch gebleken is dat de uitvoering van de specifieke test leidde tot succesvolle ontwerpen.

In de mate dat de informatie nog beschikbaar is, zal nagegaan worden in welke mate de test binnen dergelijke protocol tot stand is gekomen, en in welke mate een referentiekader specifiek voor de test en ontwerpmethodologie en/of voor een regio is tot stand gekomen. In het bijzonder m.b.t. de tabel (Waterwegwijzer bouwen en verbouwen, VMM, 2010; Code goede praktijk rioleringssystemen) die aan bodemtypes een maat voor infiltratiecapaciteit toekent wordt in dit kader getoetst: de grondsoorten worden omschreven in termen van granulometrie, classificatie en pedogenese zodat overeenkomsten en verschillen met andere nomenclatuur (bv. deze van de Belgische bodemkartering) bij de aanvang duidelijk zijn.

Bij de verschillende testen wordt steeds het werkvoorschrift vermeld. Deze zijn in veel gevallen overgenomen van de fabrikanten of ontwikkelaars van de proeven. Er zijn echter verschillende aandachtspunten die vermeld staan bij een bepaalde methode die bij andere methoden ook nuttig zouden zijn (bv. bodem van het boorgat bedekken met laag grind om verstoring van de bodem door gevolg van ingieten water en dus dichtslemping van de bodem te voorkomen). Deze aandachtspunten werden alleen toegevoegd in de werkvoorschriften van de methodes die weerhouden werden voor de effectieve uitvoering op het terrein.

Er moet opgemerkt worden dat er aan de ene kant verschillende meetmethodes bestaan voor het uitvoeren van de meting op het terrein en aan de andere kant ook verschillende methodes voor berekening van de doorlatendheid. Hiervan kunnen verschillende combinaties gemaakt worden (cfr. Verbiest et al. 2010). In deze oplijsting van methodes wordt steeds de oorspronkelijke of meest courante berekeningsmethode geven bij elke meetmethode.

Naast de genoemde tabel (Waterwegwijzer bouwen en verbouwen) zijn er uit de wetenschappelijke literatuur en in meer operationele publicaties tabellen met richtwaarden gekend die afwijken van deze in tabel 3.7. Waar dit zinnig is, zullen dergelijke tabellen, gedocumenteerd, verder in het onderzoek als referenties worden meegenomen.

2.2.1 In situ methodes

In onderstaande tabel wordt een overzicht gegeven van alle geïnventariseerde in situ methodes en hun belangrijkste kenmerken.

Daarna wordt er een gedetailleerde beschrijving gegeven per methode.

methode	drukhoogte			meetoppervlak		richting gemeten doorlatendheid		norm en regelgeving	meetbereik	getest bodemvolume	tijdbesteding	aangeraden aantal herhalingen	meest voorkomende berekening	opmerking
	constant head	falling head	ander	horizontaal	verticaal	k_v	k_h							
Guelph methode	X			boorgat		X	X	-	10^{-4} tot 10^{-7} m/s		1 meting op ½ à 2 u tot een paar dagen		Richards vergelijking	α^* moet op voorhand ingeschat worden. capillariteit in rekening: houdt ook rekening met de stroming in het onverzadigde deel en stroom door zwaartekracht verwaarloost
Amoozemeter of Compact Constant Head permeameter (CCHP)	X			boorgat		X	X	-	universeel ook lage waardes $10^{-9} - 10^{-8}$ cm/s		Per meting 30 min tot een paar dagen		Glover vergelijking	houdt enkel rekening met stroming door het verzadigde deel van de bodem
Pask Constant Head Permeameter	X			boorgat		X	X	Geïntegreerd in CSA B65-12	$4,0 \times 10^{-9}$ m/s tot $8,0 \times 10^{-4}$ m/s	diepte meting van 0,20 tot 0,5 m-mv			Richards vergelijking	α^* moet op voorhand ingeschat worden. capillariteit in rekening: houdt ook rekening met de stroming in het onverzadigde deel en stroom door zwaartekracht verwaarloost
Constant head permeameter (CSSi)	X			boorgat		X	X	-			In zandleem en leem: 15 - 20 min. per test	6 à 7	Richards vergelijking	α^* moet op voorhand ingeschat worden. capillariteit in rekening: houdt ook rekening met de stroming in het onverzadigde deel en stroom door zwaartekracht verwaarloost
open-end-test	X			X		X		BMVBS (2008), 'Regenwasserbewirtschaftung' van de Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit		klein (diameter meetoppervlak = 10 cm)	1 u + graven put	min. 2 à 3	empirische formule obv elektrisch analoog	
Nasberg (Lefranc) methode falling head		X		boorgat		X	X	-	weinig permeabele bodem		als kleistop, eerst uitdrogen		afgeleid door Nasberg	
Nasberg (Lefranc) methode constant head	X			boorgat		X	X		goed permeabele bodem				afgeleid door Nasberg	
Essai Porchet constant head	X			boorgat		X	X	XP.P 16-603 Août 1998, XP DTU 64.1P1-1 Mars 2007-annexe C, Circulaire du Ministère de l'Environnement N° 97-49 du 22 mai 1997: annexe III			4 u verzadiging + 1 u meting	min. 3		
Essai Porchet falling head		X		boorgat		X	X				4 u verzadiging + 30 min. meting	min. 3		
Omgekeerde boorgatmethode (Hooghoudtmethode)		X		boorgat		X	X	-			45 min. , indien lage doorlatendheid langer	3 à 5	Hooghoudt vergelijking	
Infiltratiecapaciteit test ('waterwegwijzer voor architecten' 2000)		X		boorgat		X	X	-			tussen 2 en 28 u	1		
Soakaway/soakage Test		X		boorgat		X	X	BRE Digest 151 (UK), BRE Digest 365 (UK), CIRIA 156 (CIRIA, 1996) (UK)			maximum 6 u	2 x op zelfde dag		
Pilot infiltration test (PIT)		X		boorgat		X	X	Stormwater Management Manual for Western Washington						
Two-stage Borehole test		X		X	X	X	X	ASTM D6391 - 11	1×10^{-7} m/s tot 1×10^{-11} m/s		Sterk afhankelijk van doorlatendheid. In klei: enkele dagen tot weken tot instroom constant wordt ($k < 10^{-7}$ cm/s)		Boutwell en Tsai (1992)	gebaseerd op veranderende geometrie gebruikt samen met de Hvorslev (1951) vergelijking
Porous Probe methode (BAT)				boorgat		X	X	-	10^{-7} m/s of minder					
Tensioinfiltrometer			beperkte negatieve hydraulische potentiaal	X		X		-		klein	zandleem tot leem: ca. 5 min. zware kleigronden: tot 5 u.			
Bouwer's air-entry permeameter	X			X		X		-	Enkel voor goed doorlaatbare bodems.		30 min. per meting		afgeleid van Green and Ampt (1911) vergelijking	ring moet diep genoeg in de grond kunnen gedreven worden (stenen, droogte)
Enkele ring methode constant head	X			X		X	x	-	Universeel toepasbaar MAAR bij lage doorlatendheid opgepast voor verdamping	afhankelijk van grootte van ring. Best groter dan 30 cm diameter	1 meting op ½ à 2 u tot een paar dagen		Reynolds en Elrick (1990) (RE) vergelijking	
Enkele ring methode falling head		X		X		X	x	-						
Dubbele ring methode constant head	X			X		X		ASTM D3385-03		afhankelijk van grootte van ring. Over algemeen groter volume	1 meting op ½ à 2 u tot een paar dagen		Reynolds en Elrick (1990) (RE) vergelijking	
Dubbele ring methode falling head		X		X		X		DIN 19862 blad 7					Green & Ampt (1911) vergelijking	
Simplified Falling Head technique		X		X		X		-		afhankelijk van grootte van ring.	Meting op zich verkort in tijd maar ook labo testen nodig op voorhand.		Bagarello et al. (2004)	α^* moet op voorhand ingeschat worden

2.2.1.1 Guelph methode

Deze methode werd ontwikkeld door Reynolds & Elrick (1983) als de 'Constant head well permeameter' aan de universiteit van Guelph, Canada. Vandaar dat deze methode vaak de naam 'Guelph methode' krijgt. Andere oorspronkelijke namen voor deze methode zijn: shallow well pump-in methode en dry auger hole methode.

2.2.1.1.1 Inleiding

Indeling:

In situ; constant head; Mariotte principe; in boorgat

Principe:

De snelheid van de infiltratie van het water in een boorgat met gekende geometrie, is een maat voor de doorlatendheid van de bodem.

Toepassingsgebied:

In kader van:

- Landbouwkundige toepassingen: irrigatie, drainage
- Bodem- en hydrologische studies en onderzoeken: doorlatendheid van kanalen, reservoirs
- Milieuonderzoek: de verplaatsing van milieuverontreinigende oplossingen, meststoffen of radioactieve afvalstoffen in het grondwater

Verspreiding:

Ontwikkeld in Canada (universiteit van Guelph), wereldwijd gekend

2.2.1.1.2 Theoretische achtergrond

Deze methode gaat uit van een constant debiet en een constant head (drukhoogte) in een cilindrische put in niet verzadigde grond.

Oorspronkelijk werd voor constant head well methodes de Glover vergelijking (Zangar, 1953) gebruikt (Reynolds & Elrick, 1983). Deze wordt afgeleid uit de wet van Darcy waarbij volgende aannames gelden:

- Steady state flow
- Homogeen, isotropisch, rigide en poreus medium
- Semi-oneindig, veld-gesatureerd flow domein
- Stroming veroorzaakt door zwaartekracht (gravity flow) << stroming veroorzaakt door de druk (pressure flow): hierbij werd experimenteel bepaald dat de fout hierdoor kleiner dan 4 % zal zijn voor $H/r > 5$ (H : constante hoogte van waterkolom; r : straal boorgat)

Als we verzadigde doorlatendheid (K_{SAT}) schrijven in functie van het debiet (Q):

$$K_{SAT} = A Q$$

Met K_{sat} : verzadigde doorlatendheid (m/s)
Q : debiet (m³/s)

Dan kan A voor de Glover vergelijking als volgt geschreven worden:

$$A = \frac{\sin h^{-1}(H/r) - \sqrt{1 + r^2/H^2} + (r/H)}{2\pi H^2}$$

Met $\sin h^{-1}$: hyperbolische sinus functie
H : constante hoogte van waterkolom (m)
r : straal boorgat (m)

Een volledige afleiding kan gevonden worden in Reynolds & Elrick (1983) (waarbij $A = \frac{C}{2\pi H^2}$)

Reynolds & Elrick (1983) kwamen echter tot de conclusie dat de resultaten bekomen met de Glover vergelijking een onderschatting zijn in vergelijking met de K-waarden bekomen met andere methoden. Er wordt in deze vergelijking ook enkel rekening gehouden met de gesatureerde stroming (flow). Hierbij wordt er van het 'free-surface' concept (Stephens & Neuman, 1982a) uitgegaan ofwel dat de initiële druk van het porie water nul is (Zangar 1953; Reynolds et al., 1983). De stroming (flow) uit een klein boorgat in onverzadigde bodem is een drie-dimensioneel infiltratieproces. Zoals voorspeld door Philip (1968, 1969) en experimenteel bevestigd door Talsma & Hallam (1980), Reynolds et al. (1983), Stephens et al. (1983 a, b) en Lee (1984), zal de snelheid van deze infiltratie snel constant worden in een eindige vochtige zone. Deze zone bestaat uit een kleine veld-gesatureerde zone rond het boorgat die gelegen is in een grotere onverzadigde zone die de stroming (flow) uit het boorgat beïnvloed door de capillaire krachten (Stephens & Neuman, 1982b,c).

Het constante debiet uit het boorgat is ook afhankelijk van de initiële drukhoogte (pressure head, ψ_i) van de (ongesatureerde) bodem.

De methode voor de constant head well permeameter werd uitgebreid zodat ook de capillariteit in rekening werd gebracht (Reynolds et al., 1985; Reynolds & Elrick, 1985) door middel van de Darcy-Buckingham vergelijking. Hieruit leidt men dan de **Richards vergelijking** af waarbij, naar analogie van de afleiding van de Glover vergelijking uit de wet van Darcy, de stroming veroorzaakt door de zwaartekracht (gravity flow) verwaarloosd wordt (geld indien $H/r < 5$):

$$2\pi H^2 k_{fs} + C\pi r^2 k_{fs} + 2\pi H \phi_m = CQ$$

Met	k_{fs}	: veld gesatureerde hydraulische conductiviteit (m/s)
	ϕ_m	: matrix potentiaal (m^2/s)
	C	: dimensieloze proportionele parameter afhankelijk van H/r
	H	: de hoogte van de waterkolom in het boorgat (m)
	Q	: debiet (m^3/s)
	r	: de straal van het boorgat (m)

Het eerste deel van de vergelijking vertegenwoordigt de hydraulische druk van het water

Het tweede deel vertegenwoordigt de potentiaal van de zwaartekracht van het water op de bodem van het boorgat

Het derde deel is de matrix potentiaal door de capillaire krachten van de omliggende bodem.

Voor vele gronden geldt initieel bij veldcapaciteit of droger dat $\exp(\alpha\psi_i) \ll 1$, waardoor (Reynolds et al., 1985):

$$\phi_m \approx k_{fs}/\alpha^*$$

Met	ϕ_m	: matrix flux (Gardner, 1958)
	α^*	: capillariteits factor of 'sorptive number'

Hierdoor geldt dus:

$$A = \frac{C}{2\pi H^2 + \pi r^2 C + 2\pi H/\alpha^*}$$

Dus:

$$k_{fs} = \frac{CQ}{2\pi H^2 + \pi r^2 C + 2\pi H/\alpha^*}$$

α^* kan ofwel experimenteel bepaald worden (Reynolds et al., 1985) of voorspeld worden gebaseerd op de bodem structuur en textuur (Elrick et al., 1989). In Elrick en coworkers (1989) stelde een tabel op met 4 mogelijke waarden van α^* voor verschillende bodemtypes (zie Tabel 2-12). In de oorspronkelijke publicatie staat echter dat dit slechts richtwaarden zijn en dat er nog verder onderzoek nodig is. Deze waarden worden echter nog steeds gebruikt (Elrick et al. 1989, persoonlijke communicatie met Wim Cornelis).

Doordat een kolom van water gebruikt wordt in een open boorgat, wordt de driedimensionale verspreiding van het water gemeten en dus beide k_h en k_v . maar omdat het oppervlak van de zijwanden groter is dan van het onderste vooral k_h .

2.2.1.1.3 Methode

Werkvoorschrift

Werkvoorschrift volgens Guelph permeameter van Soil moisture Equipment Corp. via Eijkelkamp:

Uitrusting:

- Edelmanboor
- Boorgatborstel
- Guelph permeameter
- Water
- Chronometer
- Notitieblad + pen

Werkwijze:

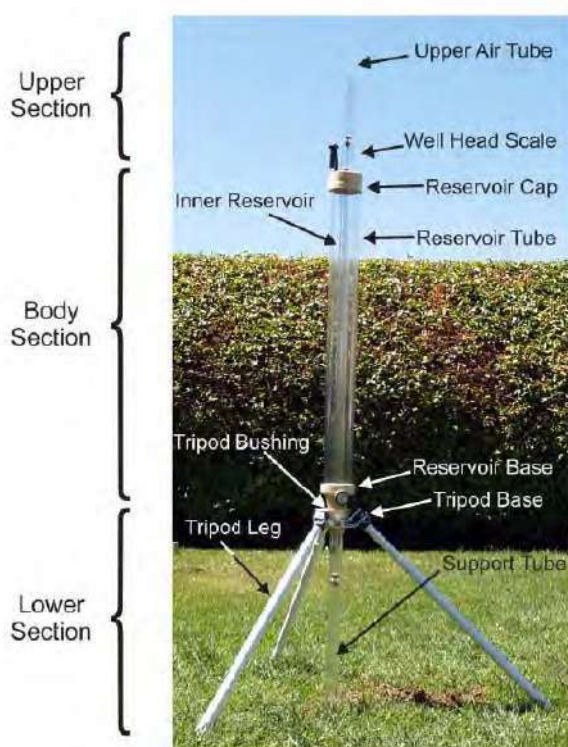
- boor met een edelmanboor een gat tot de gewenste diepte. Verwijder de versmeerde aarde in het boorgat door met de borstel door het gat te gaan.
- Monteer de Guelph permeameter met het luchtinlaatbuisje gesloten en plaats in het boorgat. Voor ondiepe boorgaten kan dit na het vullen gebeuren zodat kan gecontroleerd worden of de sluitingen goed werken.
- Vul het/de reservoir(s). Voor goed permeabele gronden kunnen zowel het buitenste als het binnenste reservoir gebruikt worden, voor slecht permeabele gronden is het voldoende om het binnenste reservoir te gebruiken.
- Trek het luchtinlaatbuisje omhoog zodat het opent en water in het boorgat stroomt. De hoogte van de constant head kan geregeld worden door de hoogte van het luchtinlaatbuisje op de gewenste hoogte (H_1) te verplaatsen (Mariotte principe). Voor permeabele gronden wordt een hoogte van de waterkolom aangeraden tussen 5 en 10 cm en voor slecht doorlatende gronden tussen de 10 en de 25 cm.
- Lees de daling van het water af op de meter met gelijke tussenintervallen in de tijd. Begin met 1 of 2 minuut intervallen. Verkort of verleng het interval naargelang de snelheid van de daling van het water.

- Wanneer er een constante daling van het waterpeil bereikt is (saturated bulb in de grond), kunnen de metingen beginnen. Dit kan berekend worden door de R waarde te berekenen na elk tijdsinterval:

$$R = \frac{\text{hoogte waterkolom begin interval} - \text{hoogte waterkolom einde interval}}{\text{duur interval}}$$

Als er 3 opeenvolgende R waarden gelijk zijn, kunnen de metingen beginnen

- Voor zeer slecht permeabele gronden kan ook het ‘early time’ principe gebruikt worden (Operating instructions Eijkelkamp; Elrick & Reynolds, 2003) waarbij niet moet gewacht worden tot de grond verzadigd is maar er vanuit de niet verzadigde stroom, de gesatureerde doorlatendheid wordt afgeleid.



Figuur 2-13: Guelph permeameter (Soil moisture Equipment Corp.).

- Lees de daling van het waterpeil af met het vooraf bepaalde tijdsinterval en noteer deze waarden.
- Indien een grote nauwkeurigheid gewenst is (groter dan een factor 2), kan een tweede meting gebeuren met een hogere waterkolom H₂. Hiervoor wordt een hoogte aangeraden van 10 tot 20 cm voor goed doorlaatbare gronden en 20 tot 25 cm voor slecht doorlaatbare gronden. (two-head methode)

Op de website www.soilmoisture.com kan een “Guelph Permeameter Calculator” gevonden worden waarmee de k_{fs} en de ϕ_m waarden kunnen berekend worden. (<http://www.soilmoisture.com/resources/Product-Calculators-and-Apps/>)

Manueel kunnen de berekeningen gebeuren met onderstaande tabellen:

Tabel 2-12: Formules voor de berekening van de shape factor (C).
(Zang et al., 1998; Operating instructions Guelph Permeameter Eijkelkamp)

Soil Texture-Structure Category	α^* (cm ⁻¹)	Shape Factor
Compacted, Structure-less, clayey of silty materials such as landfill caps and liners, lacustrine or marine sediments, etc.	0,01	$C_1 = \left(\frac{H_1/r}{2,102 + 0,116 \left(\frac{H_1}{r} \right)} \right)^{0,688}$ $C_2 = \left(\frac{H_2/r}{2,102 + 0,116 \left(\frac{H_2}{r} \right)} \right)^{0,688}$
Soils which are both fine textured (clayey of silty) and unstructured; may also include some fine sands	0,04	$C_1 = \left(\frac{H_1/r}{2,102 + 0,116 \left(\frac{H_1}{r} \right)} \right)^{0,688}$ $C_2 = \left(\frac{H_2/r}{2,102 + 0,116 \left(\frac{H_2}{r} \right)} \right)^{0,688}$
Most structured solil from clays through loams; also includes unstructured medium and fine sands. The category most frequently applicable for agricultural soils	0,12	$C_1 = \left(\frac{H_1/r}{2,102 + 0,116 \left(\frac{H_1}{r} \right)} \right)^{0,784}$ $C_2 = \left(\frac{H_2/r}{2,102 + 0,116 \left(\frac{H_2}{r} \right)} \right)^{0,784}$
Coarse and gravely sands; may also include some highly structured soils with large and/or numerous cracks, macro pores, etc.	0,36	$C_1 = \left(\frac{H_1/r}{2,102 + 0,116 \left(\frac{H_1}{r} \right)} \right)^{0,784}$ $C_2 = \left(\frac{H_2/r}{2,102 + 0,116 \left(\frac{H_2}{r} \right)} \right)^{0,784}$

H₁= de eerste hoogte van de waterkolom, H₂ = de hoogte van de waterkolom bij de tweede meting, r = straal van het boorgat, en α*= microscopische capillaire lengte factor dewelke bepaald wordt aan de hand van de bodem textuur-structuur categorie in de eerste kolom. Voor de one-head methode moet alleen C1 berekend worden. Voor de two-head methode moet ook C2 berekend worden.

Tabel 2-13: Berekening van Q en k_{fs} .
(Zang et al., 1998; Operating instructions Guelph Permeameter Eijkelkamp)

One Head, Combined Reservoir	$Q_1 = 35,22 R_1$	$K_{fs} = \frac{C_2 Q_1}{2\pi H_1^2 + \pi r^2 C_1 + 2\pi \left(\frac{H_1}{\alpha^*}\right)}$
One Head, Inner Reservoir	$Q_1 = 2,16 R_1$	$\phi_m = \frac{C_1 Q_1}{(2\pi H_1^2 + \pi r^2 C_1)\alpha^* + 2\pi H_1}$
Two Head, Combined Reservoir	$Q_1 = 35,22 R_1$ $Q_2 = 35,22 R_2$	$G_1 = \frac{H_2 C_1}{\pi(2H_1 H_2 (H_2 - H_1) + r^2 (H_1 C_2 - H_2 C_1))}$ $G_2 = \frac{H_1 C_2}{\pi(2H_1 H_2 (H_2 - H_1) + r^2 (H_1 C_2 - H_2 C_1))}$ $K_{fs} = G_2 Q_2 - G_1 Q_1$
Two Head, Inner Reservoir	$Q_1 = 2,16 R_1$ $Q_2 = 2,16 R_2$	$G_3 = \frac{(2H_2^2 + r^2 C_2) C_1}{\pi(2H_1 H_2 (H_2 - H_1) + r^2 (H_1 C_2 - H_2 C_1))}$ $G_4 = \frac{(2H_1^2 + r^2 C_1) C_2}{\pi(2H_1 H_2 (H_2 - H_1) + r^2 (H_1 C_2 - H_2 C_1))}$ $\phi_m = G_3 Q_1 - G_4 Q_2$

R = steady-state daling van de water in het reservoir (cm/s); k_{fs} = gesatureerde hydraulische conductiviteit van de bodem; ϕ_m = bodem matric flux potentiaal (cm²/s); H_1 = de eerste hoogte van de waterkolom, H_2 = de hoogte van de waterkolom bij de tweede meting, r = straal van het boorgat, en α^* = microscopische capillaire lengte factor; C is de shape factor.

Fysische randvoorwaarden

Aannames:

- De bodem is homogeen en isotropisch
- De bodem rond de testput is gesatureerd
- Het volume van de waterkolom is onveranderd gedurende de test
- Rond het boorgat is een gesatureerde zone met daarrond een vochtige maar ongesatureerde transmissiezone dewelke naar oneindigheid gaat bij een constant debiet.
- De ongesatureerde flow buiten de gesatureerde zone kan verklaard worden door de matrix flux potentiaal (Gardner, 1958)

$$\Phi = \int_{h_i}^0 k(h) dh$$

En de ongesatureerde hydraulische conductiviteit is gedefinieerd met de empirische formule als $h_i = h = 0$:

$$k(h) = k_{SAT} \exp(rh)$$

Met h : de hoogte van de waterkolom in het boorgat (m)
 Q : debiet
 r : de straal van het boorgat (m)

Indien $H/r > 5$ zijn de fouten door het negeren van de stroming veroorzaakt door de zwaartekracht (gravity flow) kleiner dan 4 %; (Reynolds et al., 1983).

Metingen kunnen uitgevoerd worden op een diepte van 0,15 tot 6 m-mv

2.2.1.1.4 Sterkte/zwakte

Tabel 2-14: Guelph methode; sterkte/zwakte-analyse.

Factor	Sterkte	Zwakte
Variabele:	meting van k_h en k_v (overwegend k_h)	
Schaal: omvang van de matrix, monstergrootte, effect van anisotropie	De hoogte van de waterkolom is in de praktijk beperkt Meting op een diepte van 0,15 tot 6 m-mv	Slechts klein volume van de bodem wordt getest (hoogte waterkolom 5 tot 25 cm)
Relatie van de test tot de matrix	10^{-4} tot 10^{-7} m/sec slecht permeabele grond met early-time measurements	
Nauwkeurigheid, gevoeligheid aan randvoorwaarden	Voldoende voor principebeslissing (aanleg van infiltratiestructuren)	Gezien α^* op voorhand bepaald moet worden aan de hand van bodemstructuur en textuur, mogelijk minder nauwkeurig.
Robuustheid, herhaalbaarheid		Matig gespecialiseerde uitvoering onzekerheid van structuur, bv. in gerijpte klei; wat bij slecht weer ?
Ervaring en verspreiding	Ontwikkeld in Canada, wijdverspreid	
Technische relevantie		
Techniciteit, kwalificatie van de uitvoerder	Matig gespecialiseerd	
Tijdsbesteding, rekening houdend met het aantal vereiste herhalingen en kost	1 meting op ½ à 2 uur tot een paar dagen +/- 2,5 liter water vereist	
Economische haalbaarheid	Aankoop +/- € 4225	

2.2.1.2 Amoozemeter

De amoozemeter of Compact Constant Head permeameter (CCHP) werd rond dezelfde tijd ontwikkeld als de Guelph permeameter. De constant head permeameter methode werd geïntroduceerd rond 1953 (Zangar) en R.E. Glover ontwikkelde een simpele mathematische vergelijking om de k_{SAT} te berekenen met de velddata. Oorspronkelijk werd het veldwerk uitgevoerd in een boorgat met een grote diameter (bv. 20 cm diameter) en werd het constante waterniveau behouden met behulp van een vlotter-systeem. Er werd aangenomen dat de steady-state alleen kon behouden worden als een grote hoeveelheid water gebruikt werd in het boorgat. Daarom werd de techniek aanzien als moeilijk en tijdrovend. In 1992 werd er veldapparatuur ontwikkeld (Compact Constant Head Permeameter; Amoozegar en Guelph Permeameter; Norris and Skaling) waarbij een boorgat werd gebruikt met een kleine diameter (+/- 6 cm). Hierdoor werd het relatief eenvoudig om op grotere dieptes metingen te doen met relatief weinig water. (Amoozegar, 2002)

De techniek die gebruikt wordt is dus dezelfde als bij de Guelph permeameter namelijk de constant-head well permeameter technique, shallow well pump-in technique, borehole permeameter of borehole infiltration test. Wat verschilt, is het materiaal waarmee gemeten wordt waarbij hier niet één lange buis wordt gebruikt als waterreservoir zoals bij de Guelph permeameter, maar verschillende kortere buizen in verbinding met elkaar. Een ander verschil ligt in de berekeningen waarbij de Glover vergelijking gebruikt wordt in plaats van de Richardsvergelijking zoals bij de Guelph permeameter (Amoozegar, 2002).

2.2.1.2.1 Inleiding

Indeling:

in situ; constant head, meting in boorgat

Principe:

Het geïnfiltreerd watervolume in functie van de tijd in een boorput met gekende geometrie, is een maat voor de doorlatendheid van de bodem.

Toepassingsgebied:

In kader van:

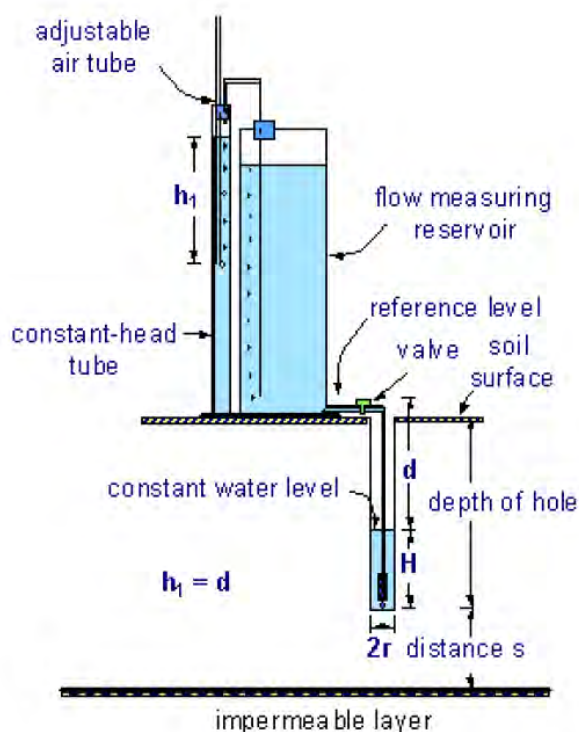
- Ontwerp Infiltratievoorzieningen of bufferbekkens
- Bodem- en hydrologische studies en onderzoeken: waterdoorlatendheidsonderzoek van de toplaag, wortelzone en bodem (< 10 m (met toestel Eijkelkamp tot 2 of 4 m)), terreinophogingen, waterbergingsproblemen
- Landbouwkundige toepassingen: irrigatie, drainage
- Milieuonderzoek: ontwerpen van beerputten.



*Figuur 2-14: Compact Constant Head permeameter (CCHP) of Amoozemeter
(bron: Eijkelkamp).*

2.2.1.2.2 Theoretische achtergrond

In Figuur 2-15 wordt de schematische voorstelling gegeven van een constant head permeameter zoals de Amoozemeter. Hierbij wordt water in het boorgat gelaten met een constante hoogte (H). Zodra er een constante infiltratie van het water per tijdseenheid gemeten wordt, kan het debiet (Q) bepaald worden. Hiermee kan dan met de vergelijking van Glover de k_{SAT} -waarde berekend worden. Een volledige afleiding kan gevonden worden in Reynolds & Elrick (1983) (waarbij $A = C/(2\pi H^2)$)



Figuur 2-15: Schematische voorstelling van een constant head permeameter waarbij een constante hoogte van de waterkolom (H) op de bodem van de boorput met een straal r behouden blijft (Bron: Amoozegar et al., 2002)

Indien de afstand tot een ondoordringbare laag $\geq 2H$:

$$k_{SAT} = AQ$$

$$A = \frac{\sinh^{-1}(H/r) - (1 + r^2/H^2)^{1/2} + (r/H)}{2\pi H^2}$$

Met $\sinh^{-1}$: de omgekeerde hyperbolische sinus functie
 r : straal van het boorgat
 H : hoogte waterkolom (constant head)

Als de afstand van de bodem van het boorgat tot een ondoordringbare laag $< 2H$, kan k_{SAT} berekend worden door:

$$k_{SAT} = BQ$$

Met

$$B = \frac{3 \ln(H/r)}{\pi H(3H + 2s)}$$

De **vergelijking van Glover** houdt enkel rekening met de stroming door het verzadigde deel van de bodem.

De k_{SAT} -waarde kan ook berekend worden met later ontwikkelde formules die ook rekening houden met de stroming in het onverzadigde deel.

- **Reynolds et al. (1985) Richards vergelijking (afleiding zie 2.2.1.1 Guelph-permeameter):**

$$A = C / (2\pi H^2 + \pi r^2 C + \frac{2\pi H}{\alpha^*})$$

- Met
- C : dimensieloze proportionele parameter gerelateerd met r en H. bekomen met grafieken ontworpen voor verschillende bodems (Elrick & Reynolds, 1986) of met vergelijkingen (Radcliffe & West, 2000)
 - α^* : parameter gerelateerd aan de ongesatureerde flow.

α^* kan apart bepaald worden met metingen (Reynolds et al., 1985) of ingeschat met waardes bepaald door Elrick et al. (1989) op basis van bodem textuur en structuur (zie Tabel 2-12 bij Guelph meter).

- **Philip (1985)**

$$A = 1/(r^2 B)$$

Met:

$$B = \left(\frac{H^2}{r^2} - 1 \right)^{1/2} \left\{ \frac{4,117(1 - r^2/H^2)}{\ln[H/r + (H^2/r^2 - 1)^{1/2}] - (1 - r^2/H^2)^{1/2}} - \frac{2(4,028 + 2,517 H/r)}{\alpha r \ln[H/r + (H^2/r^2 - 1)^{1/2}]} \right\}$$

Amoozegar (2002) vergeleek de waardes bekomen met de Glover vergelijking en de vergelijkingen die wel rekening houden met de ongesatureerde flow en vond geen grote verschillen zolang $H/r \geq 5$.

Ook zijn er bijkomende voorwaarden voor de vergelijkingen die rekening houden met de ongesatureerde stroming.

- Voorwaarde 1: Rond het boorgat is een gesatureerde zone met daarrond een vochtige maar ongesatureerde transmissiezone dewelke naar oneindigheid gaat bij een constant debiet.
- Voorwaarde 2: De ongesatureerde flow buiten de gesatureerde zone kan verklaard worden door de matrix flux potentiaal (Gardner, 1958)

$$\Phi = \int_{h_i}^0 K(h) dh$$

En de ongesatureerde hydraulische conductiviteit is gedefinieerd met de empirische formule als $h_i = h = 0$:

$$k(h) = k_{SAT} \exp(\alpha^* h)$$

Met h : de hoogte van de waterkolom in het boorgat (m)
 r : de straal van het boorgat (m)

Indien $H/r > 5$ zijn de fouten door het negeren van de stroming veroorzaakt door de zwaartekracht (gravity flow) kleiner dan 4 % ; (Reynolds et al., 1983).

De voorgenoemde voorwaarden voor de vergelijkingen die rekening houden met de ongesatureerde stroming werden in Amoozegar (2002) ook nagegaan en zij vonden dat voorwaarde 1 ongeldig is voor de meeste bodems en voorwaarde 2 ongeldig is voor de meeste praktische toepassingen.

Ook moet er telkens een inschatting gemaakt worden voor α^* en C .

Om deze redenen besloot Amoozegar dat het beter is om de **Glover vergelijking** te blijven gebruiken.

Met deze methode wordt een combinatie van k_v en k_h , bepaald met overwegend k_h .

2.2.1.2.3 Methode

Werkvoorschrift

Dit werkvoorschrift is gebaseerd op het werkvoorschrift van de Compact Constant Head permeameter (CCHP) of Amoozemeter uit de user's manual Eijkelkamp, 2004

Uitrusting:

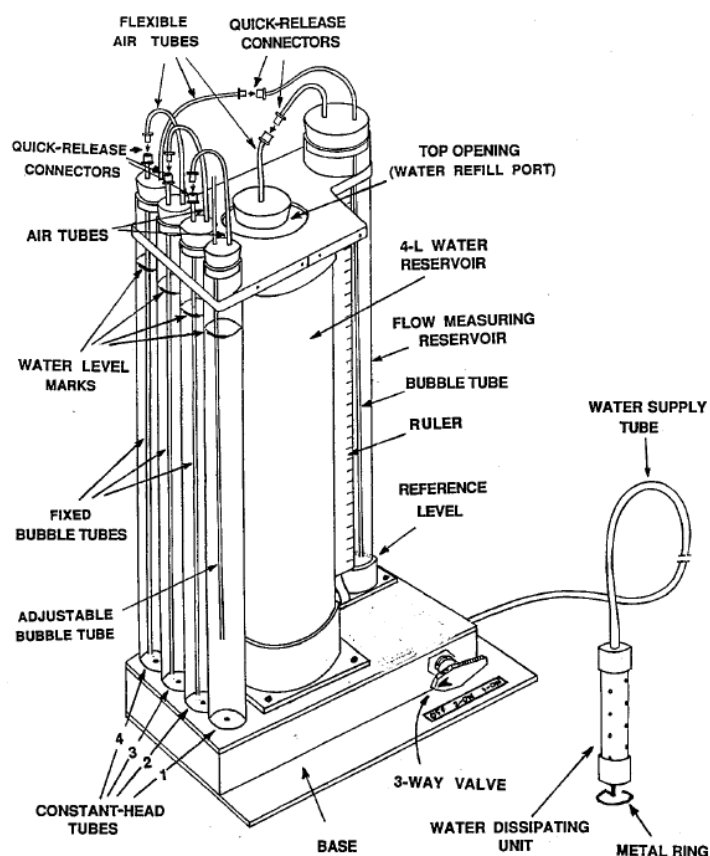
- Grondboor (6 cm diameter).
- Amoozemeter
- Chronometer
- Water
- Meter

Werkwijze:

- Boor een gat met gewenste diepte en zorg dat de bodem een rechte hoek vormt met de zijwand. Indien het gat inzakt kan gebruik gemaakt worden van een casing met gaten.

De amoozemeter bestaat uit

- 4 Constant-head tubes waarvan 1 een verstelbare 'bubble tube' heeft
- Een groot 4 liter reservoir
- Een kleiner gegradueerd meetreservoir (flow measuring reservoir)
- Een waterverdeelunit

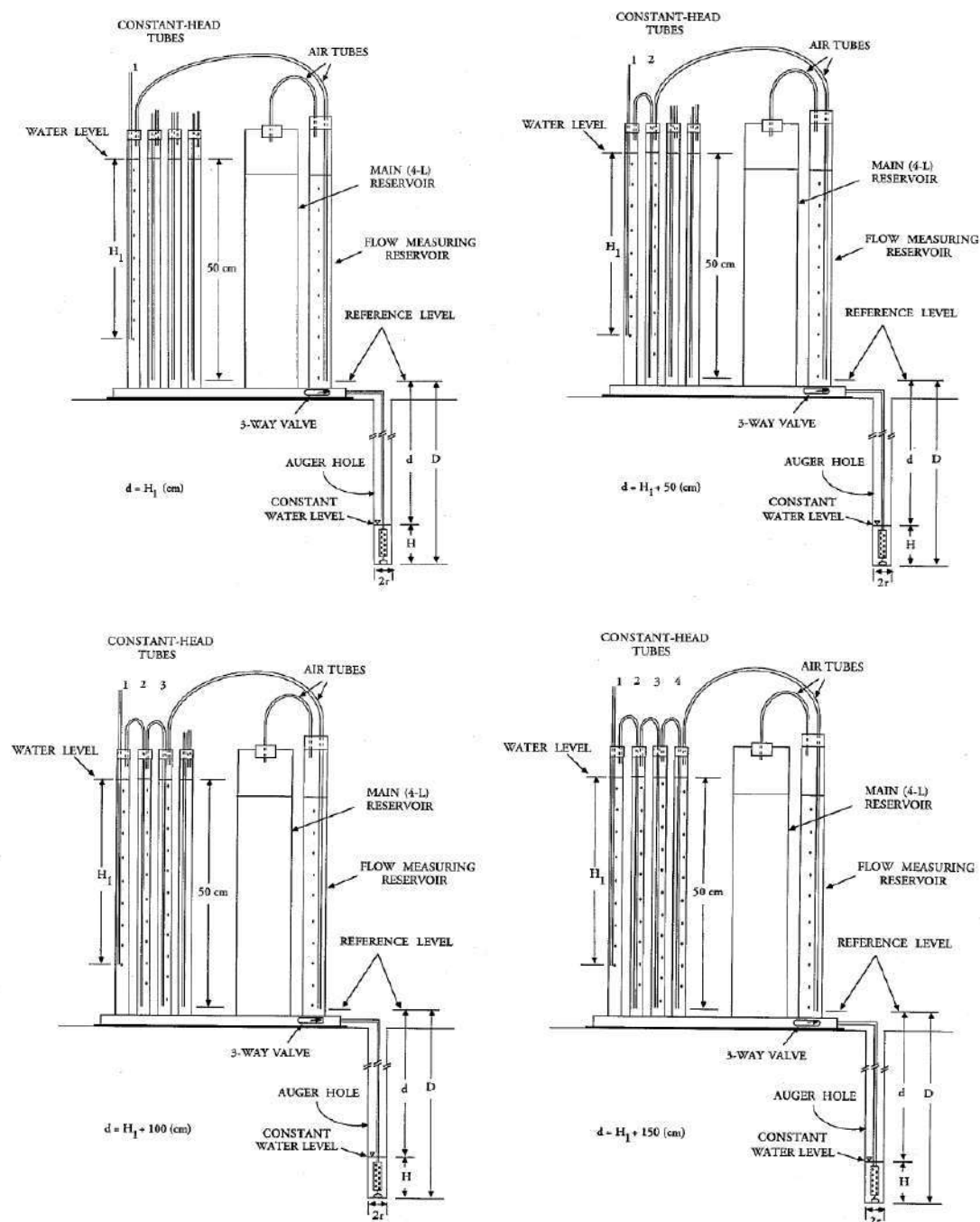


*Figuur 2-16: Compact Constant Head permeameter (CCHP) of Amoozemeter
(bron: user's manual Eijkelkamp, 2004).*

Met een 3 weg klep kan geregeld worden of de opening naar de uitgaande darm

- Gesloten is
- Zowel verbonden is met het grote reservoir als met het meetreservoir
- Enkel verbonden is met het meetreservoir
- Vul alle reservoirs met water. Doordat de Constant-head tubes van elk 50 cm met elkaar verbonden zijn met luchtbuisjes, kan er waterdruk gecreëerd worden van 0 tot 200 cm waterkolom door 1 tot en met 4 constant-head tubes aan elkaar te sluiten. De waterkolom kan fijn gereguleerd worden op de laatste 50 cm door de "bubble tube" van constant-head tube 1 te verplaatsen zoals aangegeven op onderstaande figuren. Uitgaande van een boorgat met een diameter van 6 cm, kan in het boorgat best een waterkolom van +/- 15 cm (H) aangelegd worden.

De grond rond het boorgat moet zolang gesatureerd worden totdat de waterstroomsnelheid constant blijft in de tijd. Nadien kan de meting starten waarbij per tijdseenheid de waterstand kan afgelezen worden op het gegradueerd meetreservoir. Voor de meting kan met de 3-weg klep geregeld worden of het water zowel uit het grote reservoir en het meetreservoir kan stromen (grotere doorlatendheid) of dat het enkel uit het meetreservoir kan stromen (kleinere doorlatendheid).



Figuur 2-17: Gebruik van de Amoozemeter op verschillende dieptes
(bron: users manual Eijkelkamp, 2004).

Fysische randvoorwaarden

Voor deze methode wordt oorspronkelijk de Glover vergelijking gebruikt. In deze vergelijking wordt alleen rekening gehouden met de gesatureerde flow rond het boorgat.

Aannames voor alle methodes:

- De wet van Darcy is geldig
- De bodem is homogeen en isotropisch

Voorwaarde:

- $H/r \geq 5$ (Amoozegar, 1992)

In dit geval heeft feit dat er geen rekening gehouden wordt met de ongesatureerde flow, weinig effect heeft op de berekende k_{SAT} .

2.2.1.2.4 Sterkte/zwakte

Tabel 2-15: Amoozemeter; sterkte/zwakte-analyse.

Factor	Sterkte	Zwakte
Variabele: - welke? - meting of PTF?	meting van k_h en k_v (overwegend k_h)	
Schaal: omvang van de matrix, monstergrootte, effect van anisotropie	Diepte meting met toestel Eijkelkamp tot 2 of 4 m	Relatief kleiner volume grond wordt getest (hoogte waterkolom +/- 15 cm)
Relatie van de test tot de matrix	universeel toepasbaar Kan ook gebruikt worden voor bodems met lage K_{sat} -waardes ($10^{-9} - 10^{-8}$ cm/s)	
Nauwkeurigheid, gevoeligheid aan randvoorwaarden	Hoogte van waterkolom kan gekozen worden	
Robuustheid, herhaalbaarheid		onzekerheid van structuur, bv. in gerijpte klei; wat bij slecht weer? Er wordt aangeraden om een tent over meter te zetten bij regen (extra water toevoer) en felle zon (temperatuur water).
Ervaring en verspreiding	Commercieel verkrijgbaar	
Technische relevantie		
Techniciteit, kwalificatie van de uitvoerder	gespecialiseerd	
Tijdsbesteding, rekening houdend met het aantal vereiste herhalingen en kost	Per meting 30 min tot een paar dagen (slecht permeabele grond)	
Economische haalbaarheid	+/- € 4000	

2.2.1.3 Pask Constant Head Permeameter (Dynamic Monitors, ETC)

Recent werden er goedkopere en eenvoudige alternatieven gezocht voor de Guelph permeameter. De Pask Constant Head Permeameter (<http://dynamicmonitors.com/product/etc-pask-permeameter-kit/>) is een voorbeeld hiervan en werd ontwikkeld door David Pask, voormalig verbonden aan the Nova Scotia Dept. of Environment. De uitrusting is gebaseerd op de Constant Head Well Permeameter methode, beschreven door Reynolds (1993) en Elrick & Reynolds (1986). Deze permeameter werd ontwikkeld in het kader van infiltratie van gezuiverd afvalwater uit IBA's. Dit gebeurt meestal in de meer oppervlakkige grondlagen. Hierdoor heeft deze meter slechts een meetbereik tot +/- 50 cm-mv.

2.2.1.3.1 Inleiding

Indeling:

in situ, constant head, meting in boorgat

Principe

De infiltratie van water in boorgat met gekende geometrie, is een maat voor de doorlatendheid van de bodem.

Toepassingsgebied:

In kader van:

- IBA: Bepalen van geschiktheid van de ondergrond voor aanleg van een put voor infiltratie van (voorbehandeld) huishoudelijk afvalwater.
- Ontwerp van infiltratievoorzieningen of bufferbekkens

Landen

Pask Constant Head Permeameter wordt geproduceerd door **Dynamic Monitors**, (Engineering Technologies Canada Ltd. (ETC)).

Bestaande Normering of opname in regelgeving:

Geïntegreerd in CSA B65-12 *Installation Code for Decentralized Wastewater Systems* en de *New Brunswick Department of Health's Technical Guidelines for On-site Sewage Disposal Systems*



Figuur 2-18: Pask In situ Permeameter

2.2.1.3.2 Theoretische achtergrond

Voor het berekenen van de doorlatendheid bij de Pask Constant Head Permeameter wordt er, zoals bij de Guelph permeameter de **Richards vergelijking** gebruikt. De theoretische afleiding kan gevonden worden onder punt 2.2.1.1. Guelph permeameter. De doorlatendheid (k_{fs}) kan berekend worden met de formule (Reynolds, 1993):

$$k_{fs} = \frac{CQ}{2\pi H^2 + \pi r^2 C + 2\pi H/\alpha^*}$$

Met	C	: vorm factor (Figuur 2-19) (dimensieloos)
	r	: straal van het boorgat (cm)
	α^*	: bodem textuur-structuur parameter (Tabel 2-16) (cm^{-1})
	H	: hoogte van de constant head (cm)
	Q	: debiet (cm^3/s)

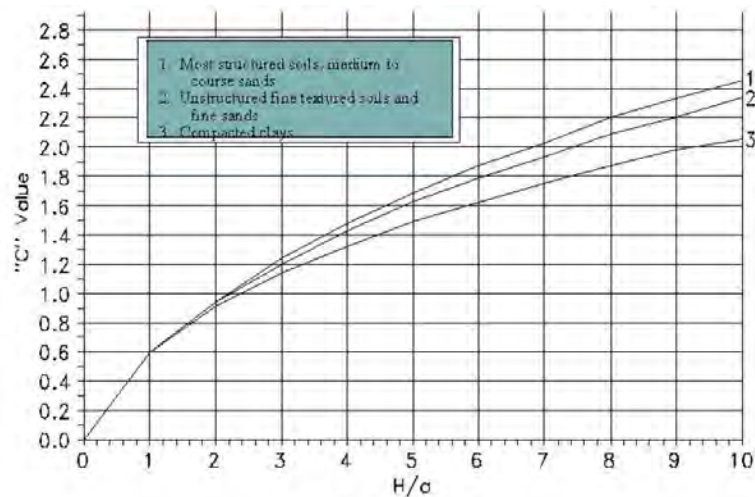
$$Q = RX$$

Met	R	: snelheid van de daling van het waterpeil in het reservoir (cm/s)
	X	: diameter van het reservoir (cm)

Tabel 2-16: Gesuggereerde α^ waarden (bron: Reynolds, 1993).*

α^* (cm^{-1})	Bodem structuur en textuur
0,36	Grof zand en goed gestructureerde bodems
0,12	De meeste gestructureerde en zanden met een middelmatige textuur
0,04	Ongestructureerde bodems met fijne textuur en fijne zanden
0,001	Gecompecteerde klei (bv. kleilagen)

C wordt gesuggereerd om af te leiden uit de C – H/r grafiek opgesteld door Elrick & Reynolds (1986)



Figuur 2-19: bepaling van de C waarde (Elrick & Reynolds, 1986; Mooers et al., 1993).
(met $a = r$ = radius van het boorgat)

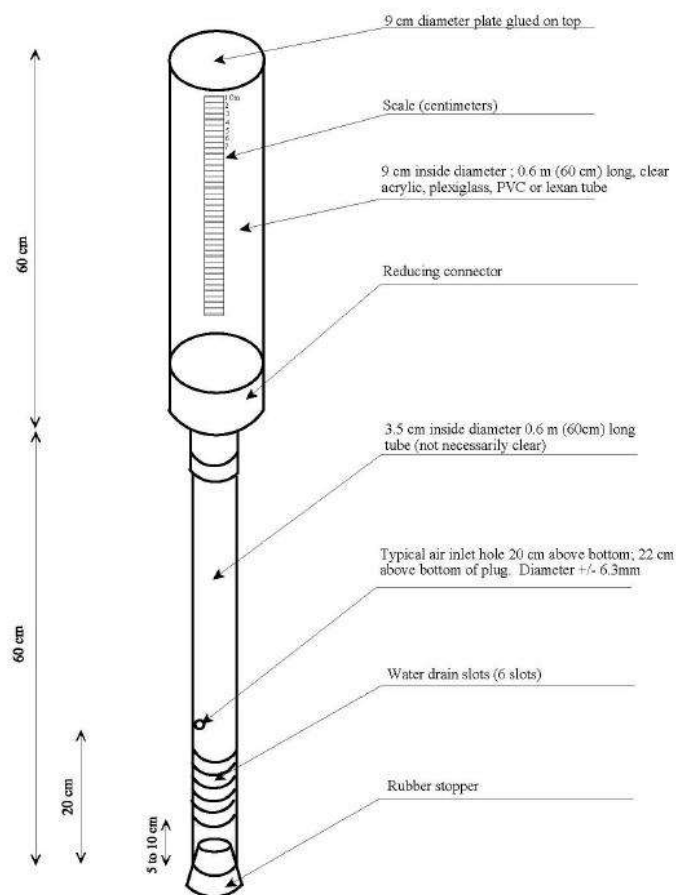
2.2.1.3.3 Methode

Werkvoorschrift

Dit werkvoorschrift is gebaseerd op de user's manual in de appendix C van de On-site Sewage Disposal richtlijnen van het Canadeese schiereiland Nova Scotia (April 2013).

Uitrusting:

- Pask In situ Permeameter
- Riverside boor
- Boorgat borstel
- Chronometer
- Notitieblad + pen



Figuur 2-20: Pask In situ Permeameter

Werkwijze:

- Boor een gat met een diameter van 40 à 50 mm tot op de gewenste diepte (maximum 50 cm-mv)
- Check of er geen onregelmatigheden aanwezig zijn zoals wormgaten, wortels, barsten in de bodem,...
- Borstel de binnenkant van het boorgat indien het boorgat versmeerd werd door het boren.
- Vul het toestel met water tot aan het lucht-inlaatgaatje door het ondersteboven te zetten en plaatst de rubberen stop nadien zorgvuldig terug.
- Draai het toestel snel om en plaats het in het boorgat
- Wacht tot de uitstroom constant in de tijd wordt gedurende minstens 3 opeenvolgende opmetingen. Dit duurt, afhankelijk van het bodemtype meestal 5 tot 30 minuten.
- Bereken aan de hand van dit debiet K_{fs} (zie 2.2.1.3.2)
- Indien nodig kan een water/bodem temperatuur correctie doorgevoerd worden.

Fysische randvoorwaarden

Gezien hier, net als bij de Guelph permeameter ook de Richards vergelijking gebruikt wordt, gelden hier dezelfde randvoorwaarden.

Aannames:

- De bodem is homogeen en isotropisch
- De bodem is gesatureerd
- Het volume van de waterkolom is onveranderd gedurende de test
- Rond het boorgat is een gesatureerde zone met daarrond een vochtige maar ongesatureerde transmissiezone dewelke naar oneindigheid gaat bij een stabiele toestand (Amoozegar 2002).
- De ongesatureerde flow buiten de gesatureerde zone kan verklaard worden door de matrix flux potentiaal (Gardner, 1958)

$$\Phi = \int_{h_i}^0 k(h) dh$$

En de ongesatureerde hydraulische conductiviteit is gedefinieerd met de empirische formule als $h_i = h = 0$:

$$k(h) = k_{SAT} \exp(rh)$$

Met h : de hoogte van de waterkolom in het boorgat (m)
 r : de straal van het boorgat (m)

Indien $H/r > 5$ zijn de fouten door het negeren van de stroming veroorzaakt door de zwaartekracht (gravity flow) kleiner dan 4 %; (Reynolds et al., 1983).

Metingen kunnen uitgevoerd worden op een diepte van 0,20 tot 0,5 m-mv

2.2.1.3.4 Sterkte/zwakte

Tabel 2-17: ETC Pask Constant Head Permeameter; sterkte/zwakte-analyse.

Factor	Sterkte	Zwakte
Variabele:	meting van k_h en k_v (overwegend k_h)	
Schaal: omvang van de matrix, monstergrootte, effect van anisotropie		diepte meting van 0,20 tot 0,5 m-mv
Relatie van de test tot de matrix	universeel toepasbaar $4,0 \times 10^{-9}$ m/sec tot $8,0 \times 10^{-4}$ m/sec	
Nauwkeurigheid, gevoeligheid aan randvoorwaarden		
Robuustheid, herhaalbaarheid		onzekerheid van structuur, bv. in gerijpte klei; wat bij slecht weer ?
Ervaring en verspreiding		
Technische relevantie		
Techniciteit, kwalificatie van de uitvoerder	Niet gespecialiseerd	
Tijdsbesteding, rekening houdend met het aantal vereiste herhalingen en kost		
Economische haalbaarheid	Uitrusting Kit (+ boor en borstel) \$685 permeameter alleen: \$379	

2.2.1.4 Constant head permeameter (CSSi)

Dit toestel werd gebaseerd op de theorie achter de Pask Constant head permeameter (Mooers et al., 1993) (en dus op de Guelph permeameter) en wordt verkocht door Canadian Sewage Solutions inc. (CSSi) (<http://www.sewagesolutions.com/permeameters.htm>)

2.2.1.4.1 Inleiding

Indeling:

in situ, constant head, meting in boorgat

Principe

De infiltratie van water in boorgat met gekende geometrie, is een maat voor de doorlatendheid van de bodem.

Toepassingsgebied:

In kader van:

- IBA: Bepalen van geschiktheid van de ondergrond voor aanleg van een put voor infiltratie van (voorbehandeld) huishoudelijk afvalwater.

Landen

Wordt verkocht in Canada door Canadian Sewage Solutions inc. (CSSi).

2.2.1.4.2 Theoretische achtergrond

Voor de theoretische achtergrond wordt verwezen naar 2.2.1.1 Guelph permeameter en 2.2.1.3 Pask Constant head permeameter.

2.2.1.4.3 Methode

Werkvoorschrift



*Figuur 2-21: Constant head permeameter
(bron: <http://www.sewagesolutions.com/permeameters.htm>)*

De werkwijze voor deze permeameter is zeer gelijkaardig aan deze van de Pask Constant head permeameter. Om deze reden wordt verwezen naar 2.2.4.

Ook voor de Fysische randvoorwaarden wordt naar 2.2.1 en 2.2.4 verwezen

Praktische limitatie van toestel: testen kunnen uitgevoerd worden tussen de 30 en 70 cm-mv.

2.2.1.4.4 Sterkte/zwakte

Tabel 2-18: Constant head permeameter; sterkte/zwakte-analyse.

Factor	Sterkte	Zwakte
Variabele:	meting van k_h en k_v (overwegend k_h)	
Schaal: omvang van de matrix, monstergrootte, effect van anisotropie		Diepte meting tussen de 30 en 70 cm-mv
Relatie van de test tot de matrix	universeel toepasbaar	
Nauwkeurigheid, gevoeligheid aan randvoorwaarden		
Robuustheid, herhaalbaarheid	De firma raadt 6 à 7 herhalingen aan per infiltratie gebied.	onzekerheid van structuur, bv. in gerijpte klei; wat bij slecht weer ?
Ervaring en verspreiding		
Technische relevantie		
Techniciteit, kwalificatie van de uitvoerder	Gemakkelijk uit te voeren	
Tijdsbesteding, rekening houdend met het aantal vereiste herhalingen en kost	In zandleem en leem: 15 - 20 min. per test. 5 to 10 L water per test	
Economische haalbaarheid	Uitrusting: \$589	

2.2.1.5 Open-end-test

Bij de open-end-test wordt een buis met gesloten zijwanden in de bodem gebracht waarin water wordt gelaten om te infiltreren in de grond. Het water kan dus enkel langs het horizontale vlak onderaan de buis in de grond infiltreren. In deze buis wordt een constante druk gecreëerd hetzij door de zwaartekracht en een waterkolom van +/- 1 meter, hetzij door een externe pomp. Het constante waterniveau in de buis kan mechanisch bekomen worden door een vlottersysteem of elektronisch met een sensor die, wanneer het waterniveau daalt, een signaal geeft aan een pomp. De methode kan zowel onder als boven de grondwaterspiegel gebruikt worden. Hier beperken we ons tot de bespreking van de meting boven de grondwaterspiegel.

De methode werd origineel beschreven in: UNITED STATES DEPARTMENT OF THE INTERIOR-BUREAU OF RECLAMATION (1963). "Earth manual-A guide to the use of soils as construction materials for hydraulic structures." Denver, Colorado (U.S.B.R. designation E-18). En is geaccrediteerd in Duitsland.

Deze methode kan geautomatiseerd worden door de sensor aan een sturingseenheid te sluiten dewelke een pomp aanstuurt. Op de sturingseenheid kan dan het resultaat afgelezen worden. Het gevaar hiervan is dat er een 'black box' gecreëerd wordt zodat defecten of foutieve resultaten laat of niet opgemerkt worden. Bij deze, en andere geautomatiseerde systemen, is het dus belangrijk dat er een 'verklik' systeem ingebouwd wordt zodat slecht functioneren vroegtijdig kan opgespoord worden.

Anderzijds kan er een vlottersysteem geïnstalleerd worden in de buis met een waterreservoir en maatcilinder systeem waarop kan afgelezen worden hoeveel water er moet toegevoegd worden om een constant waterniveau te behouden. Deze manier van meten vereist meer specialisatie op het terrein, maar voorkomt onopgemerkte fouten.

2.2.1.5.1 Inleiding

Indeling:

in situ; constant head, meting op een horizontaal oppervlak

Principe:

Het geïnfilterde water in de bodem langs een vlak met gekende diameter in functie van de tijd, is een maat voor de doorlatendheid van de bodem.

Toepassingsgebied:

In kader van:

Ontwerp Infiltratievoorzieningen of bufferbekkens **Landen:**

Standaard toegepaste methode in Duitsland

België (OCW: waterdoorlaatbare verhardingen)

Bestaande Normering of opname in regelgeving:

Duitland: In de 'Regenwasserbewirtschaftung' van de Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit.

<http://www.arbeitshilfen-abwasser.de/html/a5-6openendtest.html>

BMVBS (2008)

2.2.1.5.2 Theoretische achtergrond

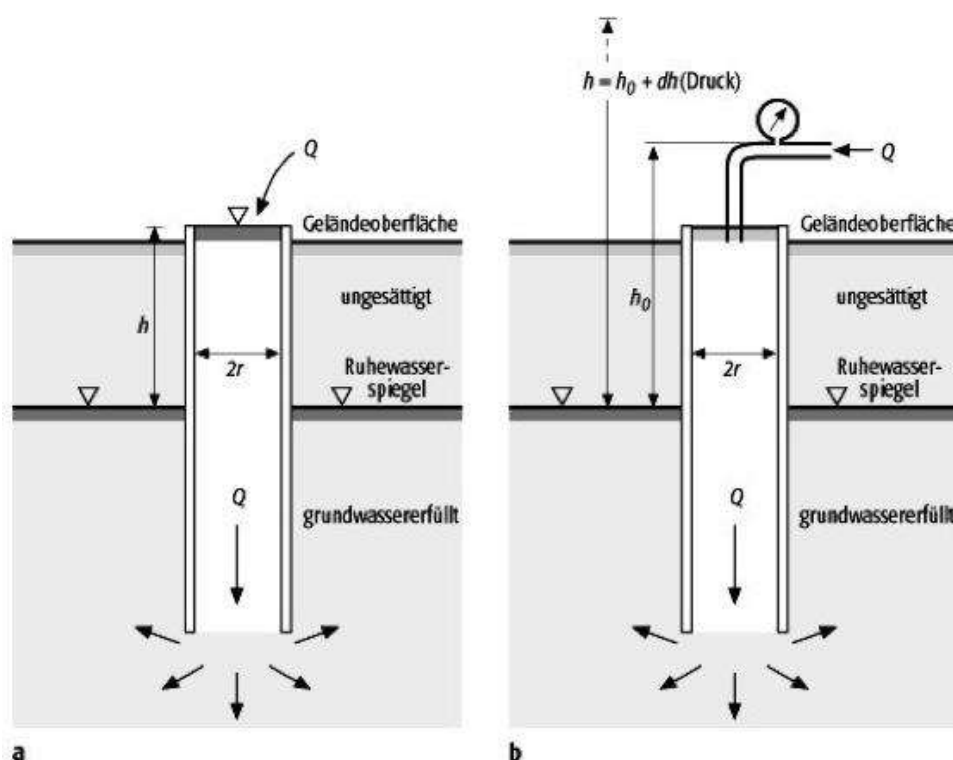
De doorlatendheid wordt berekend op basis van volgende empirische formule op basis van zijn elektrische analoog:

$$k = \frac{Q}{5,5 r H}$$

Met	k	: doorlatendheidscoëfficiënt (m/s)
	Q	: toevoeging van water (debiet) (m ³ /s)
	r	: straal (m)
	H	: constante drukhoogte, hydraulische hoogte (m)

Doordat enkel infiltratie kan plaatsvinden op de bodem van het boorgat, wordt hier overwegend k_h bepaald.

In sommige gevallen wordt met de benaming 'Open-end-Test' ook verwezen naar een methode waarbij het onderste deel van de buis wel verfilterd is. Deze methode zal hier niet behandeld worden. Voor een constant head methode met een gefilterde buis verwijzen we naar de Nasberg methode.



*Figuur 2-22: Open-end test met constante drukhoogte h door a) constante aanvulling van waterkolom of b) creëren van constante druk d.m.v. een pomp
(Copyright 2000 Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg)*

2.2.1.5.3 Methode

Werkvoorschrift

Zoals eerder vermeld zijn er 3 soorten metingen:

- Meting onder invloed van de zwaartekracht met een constante waterkolom:
 - o Geautomatiseerd met sensor-sturingseenheid-pomp systeem
 - o Met vlottersysteem en handmatige aflezing van daling waterniveau in reservoir
- Meting onder gecreëerde druk.



Figuur 2-23: Geautomatiseerde Open-end test met constante waterkolom (bron: OCW)

Hieronder wordt een beknopt werkvoorschrift gegeven. Deze methode werd geselecteerd voor de uitvoering op terrein. Een uitgebreid werkvoorschrift kan u vinden in de werkvoorschriften van de geselecteerde methodes (zie Bijlage A) voor de vergelijkende studie uitgevoerd op terrein.

Uitrusting:

- Buis
- schop
- Klei of zware leemgrond
- Metalen staaf om grond aan te duwen
- Water
- Een handvol grind
- Waterreservoir met aanduiding van meeteenheid
- Extra waterreservoirs
- Mechanisme met ventiel of pomp voor watertoevoer.

Werkwijze:

- Graaf een gat tot op de diepte waar de doorlatendheid gemeten moet worden. De diameter van de put moet breder zijn dan de buis die gebruikt wordt
- Maak een deel van de klei of zware leem vochtig.
- Breng de buis in het boorgat en stort rond de buis in het gat de vochtige klei/leem. Druk deze voorzichtig aan met de metalen staaf. Net genoeg zodat het water niet meer onder de buis door kan. Ook niet te hard zodat de textuur van de grond eronder niet veranderd wordt door samendrukking.
- Giet een handvol grind op de bodem van de buis. Hierdoor wordt de vorming van slib verhinderd bij het vullen van de buis met water.
- Laat water in de buis en satureer de grond. De daling van het water geeft al een eerste idee van de doorlatendheid. Bij goed doorlaatbare grond is een hervulling van de buis noodzakelijk. Indien er water onder de bodem van de buis in het boorgat terecht komt, wil dit zeggen dat de buis niet diep genoeg in de bodem gebracht werd. In dit geval moet men opnieuw beginnen.
- De temperatuur van het gebruikte water is steeds hoger dan dit van de grond, zo niet kunnen luchtballen ontstaan in de poriën waardoor betekenisvolle fouten kunnen ontstaan (NRCS, national engineering Handbook part 631 Geology, Chapter 5 Engineering Geology Logging, Sampling, and Testing).
- Op het moment dat men kan vaststellen dat het water met een constante snelheid daalt, kan men met de eigenlijke meting starten.
- Afhankelijk van het soort systeem kan nu de meting gebeuren door te meten hoeveel water per tijdseenheid er moet bijgevuld worden om een constante waterkolom of waterdruk te behouden.
- Om het veldwerk te versnellen is het zinvol om meerdere buizen ter beschikking te hebben. Hierdoor kan men tijdens de metingen in de ene buis, de grond onder de andere reeds verzadigen. Op deze manier kunnen met 2 personen per dag tot 10 metingen uitgevoerd worden.

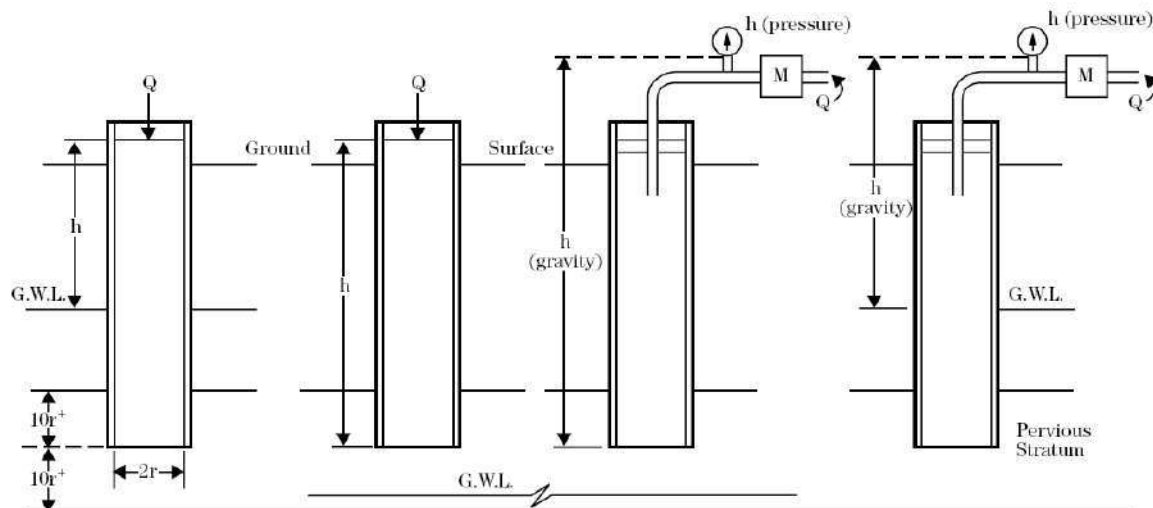
Op de website van de Duitse overheid <http://www.arbeitshilfen-abwasser.de/html/a5-6openendtest.html> kan een voorbeeld van een veldformulier gevonden worden.

Fysische randvoorwaarden

Deze test geeft slechts een indicatieve waarde van de doorlatendheid en geen exacte waarde. Het heeft wel het voordeel van een simpele test te zijn en geeft een goede indicatie van de relatieve doorlatendheid op verschillende dieptes.

Voorwaarden:

- De bemeten laag moet ten minste een dikte hebben van 10 keer de diameter van de testbuis.
- De bodem van de testbuis moet minstens 10 cm van bodem en top van de bodemlaag waarin gemeten wordt verwijderd zijn.



Figuur 2-24: Open-end test onder invloed van zwaartekracht (waterkolom) en gecreëerde druk. (bron: NRCS, national engineering Handbook part 631 Geology, Chapter 5 Engineering Geology Logging, Sampling, and Testing).

Referentiekader voor beoordeling van de meetwaarde

Tabel 2-19: Beoordeling in kader van waterdoorlatende verharding
(bron: persoonlijke communicatie Anne Beeldens, OCW):

K_{SAT}-waarde (m/s)	beoordeling	maatregelen
$> 10^{-4}$	goed infiltreerbaar	geen bijkomende maatregelen
$10^{-4} - 10^{-6}$	matig infiltreerbaar	buffer voorzien door overloop in fundering
$< 10^{-6}$	slecht infiltreerbaar	drainagesysteem voorzien

2.2.1.5.4 Sterkte/zwakte

Tabel 2-20: Open-end-test; sterkte/zwakte-analyse.

Factor	Sterkte	Zwakte
Variabele: - welke? - meting of PTF?	meting van k_v	
Schaal: omvang van de matrix, monstergrootte, effect van anisotropie		Afhankelijk van diameter buis (+/- 10 cm diameter) maar over algemeen kleine bemeten oppervlakte
Relatie van de test tot de matrix	universeel toepasbaar	
Nauwkeurigheid, gevoeligheid aan randvoorwaarden		Resultaat geeft een benadering, geen exact resultaat.
Robuustheid, herhaalbaarheid	Voor alle infiltratievoorzieningen moeten minstens 2 à 3 metingen uitgevoerd worden. Indien er grote verschillen zijn tussen de resultaten, is het aan te raden extra proeven uit te voeren. De verschillen in de resultaten zijn voornamelijk het gevolg van de heterogeniteit van de bodem, minder van de meetmethode.	onzekerheid van structuur, bv. in gerijpte klei; wat bij slecht weer?
Ervaring en verspreiding	Algemeen gebruikt in Duitsland In België gebruikt door OCW	
Technische relevantie		
Techniciteit, kwalificatie van de uitvoerder	Weinig/matig gespecialiseerd	
Tijdsbesteding, rekening houdend met het aantal vereiste herhalingen en kost	+/- 1 uur, zonder graven put	
Economische haalbaarheid	Materiaal handmatige meting relatief goedkoop	Geautomatiseerd toestel duurder in aankoop.

2.2.1.6 Nasberg (Lefranc) methode

De Nasberg methode houdt in dat er een boorgat geboord wordt met hierin een filterelement of grind om te voorkomen dat het boorgat instort. De praktische uitvoering van de Nasberg methode is dezelfde als die van de Lefranc methode. Het enige verschil is dat de Nasberg boven de grondwatertafel wordt gebruikt en de Lefranc methode onder de grondwatertafel. De theoretische achtergrond is echter verschillend tussen de twee methoden.

2.2.1.6.1 Inleiding

Indeling:

In situ; falling (weinig permeabele grond) en constant (goed permeabele grond) head variant, meting in een boorgat

Principe:

De snelheid waarmee het water daalt of infiltreert in een put met gekende dimensies, is een maat voor de hydraulische conductiviteit.

Landen:

Frankrijk, Griekenland

Heel de wereld (SGS)

Bestaande Normering of opname in regelgeving:

Lefranc (onder grondwatertafel!):

Frankrijk: NFP 94-132/Lefranc van oktober 2000

Europa: NEN-EN-ISO 22282-2:2012

Canada: CAN/BNQ 2501-135-M88

Voor de Nasberg test, boven de grondwatertafel bestaat geen normering.

2.2.1.6.2 Theoretische achtergrond

Nasberg toonde aan dat het debiet Q_s dat op elke moment in de grond dringt bij een waterkolom met hoogte H in het boorgat gelijk is aan:

$$Q_s(t) = \frac{\pi k B^2}{8} \left[1 - \sqrt{16 \frac{H(t)}{B} + 1} \right]^2$$

Met	Q	: debiet
	t	: tijd
	k	: doorlatenheid
	B	: diameter van het boorgat
	H	: hydraulische hoogte

$$S \frac{dh}{dt} = Q - Q_s$$

Met	S	: bodem sorptivity
-----	---	--------------------

De differentiële vergelijking kan opgelost worden met volgende variabele:

$$U = 1 - \sqrt{16 \frac{H}{B} + 1} \text{ en } q = \sqrt{\frac{8Q}{\pi k B}}$$

Dus:

$$t - t_0 = \frac{S}{2\pi k B q} \left[q \ln \frac{U_0^2 - q^2}{U^2 - q^2} + \ln \frac{(U - q)(U_0 + q)}{(U + q)(U_0 - q)} \right]$$

Met U_0 : de waarde van U bij de initiële hoogte van H_0 in het boorgat.

Na het stoppen met toevoegen van water wordt de relatie:

$$t - t_0 = \frac{S}{\pi k B} \left[\ln \frac{U_0}{U} + \frac{1}{U_0} - \frac{1}{U} \right]$$

2.2.1.6.3 Methode

Werkvoorschrift

Uitrusting:

- Grondboor
- Peilbuis (bij zeer grove grond)
- Filtergrind
- Bentonietkorrels voor kleistop
- Water
- Chronometer
- Notitieblad + pen

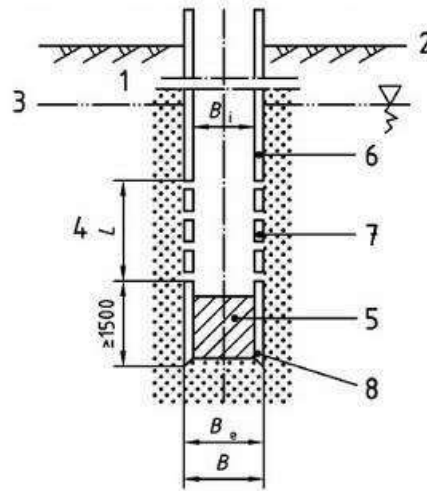
Werkwijze:

- Maak een boorgat met gekende dimensies.

In de Lefranc methode in norm NF P 94-132 worden 3 soorten afwerkingen van het boorgat voorgesteld afhankelijk van de doorlatendheid van de grond.

- Voor zeer grove gronden wordt voorgesteld om een filter te installeren zoals in Figuur 2-25a of om een peilbuis aan te brengen op de diepte van de proef, filtergrind toe te voegen (grover materiaal dan waaruit het terrein samengesteld is) en de peilbuis terug omhoog te trekken voor de lengte waarop de meting wordt gepland (Figuur 2-25b).

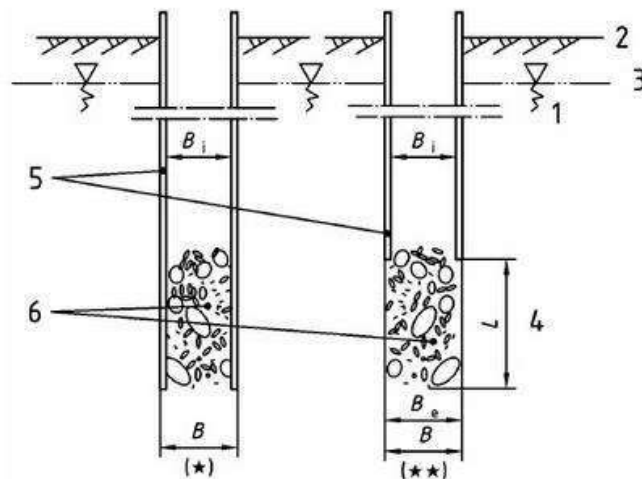
- Voor sterk cohesieve gronden moet geen peilbuis geplaatst worden en kan grind gegoten worden over de geplande lengte van de proef. Daarboven wordt een kleistop gegoten rond een buis voor de toevoer van het water (Figuur 2-25c)



a) Sol pulvérulent

Légende

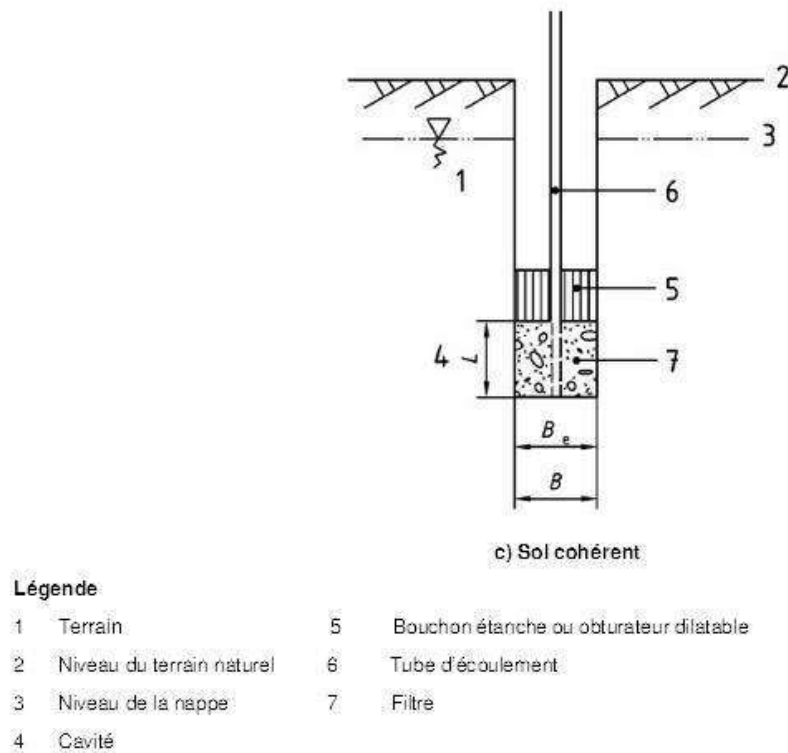
1 Terrain	5 Bouchon étanche ou obturateur dilatable
2 Niveau du terrain naturel	6 Tubage
3 Niveau de la nappe	7 Manchon perforé (Lefranc)
4 Cavit�	8 Sabot



b) Phasage

Légende

1 Terrain	5 Tubage
2 Niveau du terrain naturel	6 Matériau filtre
3 Niveau de la nappe	(*) Tubage puis introduction du matériau filtre
4 Cavit�	(**) Relevage du tubage



Figuur 2-25: Praktische uitvoering van de Nasberg/Lefranc methode (bron: NF P 94-132)

Fysische randvoorwaarden

Aannames:

- De wet van Darcy is van toepassing
- Er is een constante flow
- De bodem is homogeen en isotroop

$$0,5 < \lambda = \frac{L}{B_0} < 2$$

Met L : hoogte waarover water kan infiltreren in de bodem

$$B = \frac{B_0}{2} \sqrt{(1 + 4\lambda)}$$

De waterkolom voor de falling head methode moet bij aanvang minimum 1 m bedragen.

2.2.1.6.4 Sterkte/zwakte

Tabel 2-21: Nasberg (Lefranc) methode; sterkte/zwakte-analyse.

Factor	Sterkte	Zwakte
Variabele:	meting van k_h en k_v (overwegend k_h)	voornamelijk K_h
Schaal: omvang van de matrix, monstergrootte, effect van anisotropie		
Relatie van de test tot de matrix	universeel toepasbaar	
Nauwkeurigheid, gevoeligheid aan randvoorwaarden		
Robuustheid, herhaalbaarheid		onzekerheid van structuur, bv. in gerijpte klei; wat bij slecht weer ?
Ervaring en verspreiding	Normering (alleen voor Lefranc, niet voor Nasberg)	
Technische relevantie		
Techniciteit, kwalificatie van de uitvoerder	Gespecialiseerd	
Tijdsbesteding, rekening houdend met het aantal vereiste herhalingen en kost	Als kleistop moet geïnstalleerd worden, moet deze eerst uitdrogen.	
Economische haalbaarheid		

2.2.1.7 Essai Porchet

Algemene referenties, beschrijvingen:

- Conseil Général Loire en Rhone-Alpes, 2005.
- Lachère, 2012.
- Roederer, 1987.

2.2.1.7.1 Inleiding

Indeling:

in situ, falling of constant head, meting in boorgat

Principe:

De daling van het waterpeil of het geïnfiltreerde watervolume in functie van de tijd in een put met gekende geometrie is een maat voor de doorlatendheid van de bodem.

Parameter:

“doorlatendheid”, k (m/s).

Toepassingsgebied:

In kader van:

- Landbouwkundige toepassingen: irrigatie
- Ontwerp Infiltratievoorzieningen of bufferbekkens
- Erosiebestrijding en waterretentie: bepaling van de bodemdoorlatendheid in onderzoek naar de mogelijkheid van aanleg van infiltratieterassen op een helling.
- IBA: Bepalen van geschiktheid van de ondergrond voor aanleg van een put voor infiltratie van (voorbehandeld) huishoudelijk afvalwater.

Bodemonderzoek op grote schaal (cartografie op schaal $> 1/50.000$). De bekomen k -waarde geeft geen exact resultaat in absolute waarde, maar is in grootteorde zeer betekenisvol, zeer voldoening gevend in verdere toepassingen. De methode is bovendien zeer vlot uitvoerbaar op terrein (Roederer, 1987).

Regio, normering:

Methode toegepast in Frankrijk.

Normering: XP.P 16-603 Août 1998 ;
XP DTU 64.1P1-1 Mars 2007-annexe C

Circulaire du Ministère de l'Environnement N° 97-49 du 22 mai 1997: annexe III

Cartografie op grote schaal (de Beaucorps G, n.d.).

2.2.1.7.2 Theoretische achtergrond

Uitgangspunt vormt de wet van Darcy:

$$Q = -k A i$$

Met	Q	: debiet (m ³ /s)
	k	: doorlatendheid (m/s)
	A	: infiltrerende oppervlakte (m ²)
	i	: verhang = dh / dl (dimensieloos)

In een boorgat vormt A het infiltrerende oppervlakte: de natte wand en bodem van een kolom water in een boorgat.

$$A = 2\pi R h + \pi R^2$$

Met	h	: de hoogte van de waterkolom op tijdstip t. (cm)
	R	: straal (cm)

Gesteld wordt dat het verhang i niet betekenisvol verschilt van 1. Deze aanname is verdedigbaar onder beide varianten.

Variante falling head:

Bij daling van het waterpeil onder invloed van het verhang is het debiet in een tijdspanne δt

$$Q = -\pi R^2 (\delta h / \delta t)$$

en, zie hoger,

$$Q = 2k\pi R (h + R/2)$$

Bijgevolg

$$(2k/R) \delta t = -\delta h / (h + R/2)$$

Na integratie:

$$(2k/R) t = -\ln (h + R/2) + C^{te}$$

en ingeval $t = 0$, dan is $h = h_0$ en is

$$C^{te} = \ln (h_0 + R/2)$$

Onder het 10-talig stelsel:

$$\log (h + R/2) = \log (h_0 + R/2) - 2k/(2,3R) t$$

Log $(h + R/2)$ verloopt lineair t.o.v. de tijd. De doorlatendheid k kan dan ook worden berekend uit de richtingscoëfficiënt $(2k/2,3R)$.

Variante constant head:

In de vereenvoudigde methode wordt de doorlatendheid, k , onmiddellijk berekend uit de totaal waargenomen Q en de geometrie van de put (Conseil Général Loire en Rhone-Alpes, 2005). Er is in deze vereenvoudigde methode geen controle m.b.t. de vereiste evenwichtssituatie.

Een meer nauwkeurige benadering is volgens NF XP.P 16-603 Août 1998 deze waarbij stapsgewijs nagegaan wordt of de gemeten doorlatendheid constant is.

Op basis van een Porchetbuis (zie verder) is het momentele debiet

$$Q = \pi r_i^2 (\Delta h / \Delta t)$$

Met r_i : interne straal van de buis
 Δh : de daling van het waterpeil in de buis over Δt .

Dit is ook het debiet dat door de putwand infiltreert:

$$\pi r_i^2 (\Delta h / \Delta t) = 2k\pi R (H + R/2)$$

Met H : de (constante) hoogte van het waterpeil in de put

Waaruit volgt:

$$k = (\Delta h / \Delta t) r_i^2 / (2RH + R^2)$$

2.2.1.7.3 Methode en referentiekader

Werkvoorschrift falling head

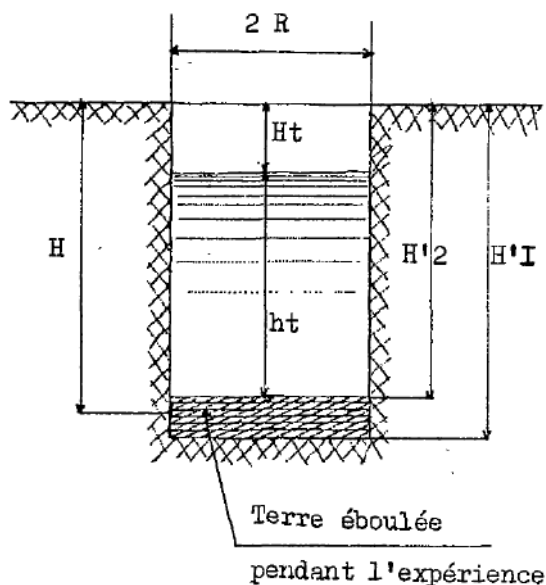
Uitrusting:

- Grondboor of materiaal om een put met gekende geometrie te maken.
- Uitrusting om daling van waterpeil in de put te volgen
- Chronometer

Werkwijze:

- Boor of graaf de put in de bodemlaag die men wenst te onderzoeken, bv. een put met diameter van 10 cm en diepte van 50 cm. Vul de put met water en laat het water infiltreren.
- Meet de diepte van de put (H_1').
- Vul de put nogmaals met water tot maximaal de hoogte van de bodemlaag die men wenst te onderzoeken. Meet onmiddellijk de hoogte van de waterkolom (H_0).
- Meet vervolgens geregeld, bv. op 5 tijdstippen (t), het waterpeil (H_t) en dus de hoogte van de waterkolom.
- Meet op het einde van de proef nogmaals de diepte van de put (H_2'). Veelal is de put minder diep geworden door inkalving. De hoogte van de gemeten waterkolommen wordt aangepast aan de gemiddelde diepte $H = (H_1' + H_2')/2$.
- Zet $\log(h_t + R/2)$ uit t.o.v. t , en leid k af.

Varianten, vereenvoudigde werkwijzen zijn beschreven, doch worden hier niet verder vermeld gezien ze enkel relevantie en nauwkeurigheid hebben voor onderzoek op grotere schaal (cartografie op $> 1:50.000$).



Figuur 2-26: Methode Porchet falling head, schematisch, (Roederer, 1987).

Werkvoorschrift constant head

Hieronder wordt een beknopt werkvoorschrift gegeven. Deze methode werd geselecteerd voor de uitvoering op terrein. Een uitgebreid werkvoorschrift kan u vinden in de werkvoorschriften van de geselecteerde methodes (zie Bijlage A) voor uitvoering op terrein bij de vergelijkende studie.

Uitrusting:

Verscheidene uitrustingen bestaan, veelal op basis van een Marriotte-fles.

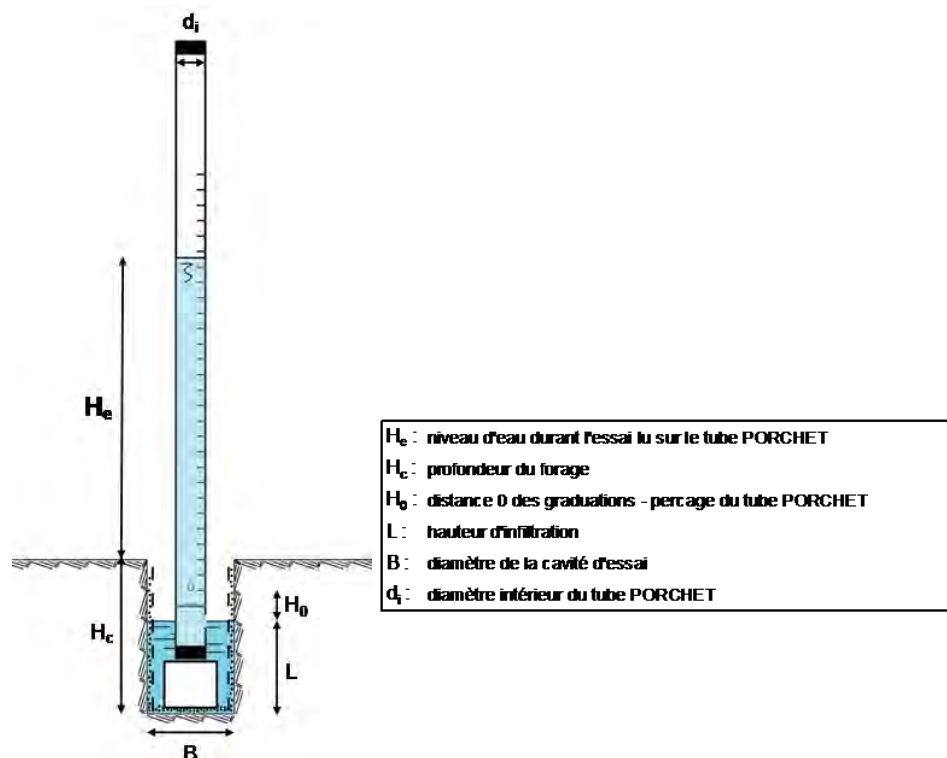
De Franse norm gaat uit van een Porchetbuis ¹⁰.

Verder: grondboor en chronometer.

Werkwijze:

- Maak een boorgat tot minstens 30 cm in de bodemlaag die men wenst te onderzoeken. Doorgaans wordt uitgegaan van een diameter van 15 cm.
- Vul het boorgat met 30 cm waterkolom gedurende minstens 4 h voorafgaand aan de meting.

¹⁰ Porchet-buis: een gegradueerde buis met gekende binnendiameter, aan beide zijden afsluitbaar, onderaan voorzien van een lek-opening.



Figuur 2-27: Methode Porchet constant head, schematisch, vlgn. Lachère, 2012.

- Vul een Porchetbuis en plaats ze in het boorgat op de bodem.
- Boorgat, geometrie en positie van de buis worden opgemeten. De daling van het waterpeil in de buis ($\Delta h/\Delta t$) wordt opgevolgd en genoteerd. Uit de geometrie van buis en put wordt vervolgens k afgeleid.
- De daling van het waterpeil dient betekenisvol te zijn (bv. tenminste 10 cm binnen 10 min), zo niet kan men de doorlatendheid reeds als zeer laag beschouwen.

In een vereenvoudigde methode in het kader van een IBA-installatie kan worden uitgegaan van een geboorde put van 15 cm diameter, met een waterkolom in de put van 15 cm hoogte. Dan wordt

$$k = Q \cdot 67$$

met k in mm/h en Q in l/min.

Randvoorwaarden

In het kader van de aanleg van een IBA, en aanleg van regenwaterinfiltratiesystemen, wordt in de procedure uitdrukkelijk voorzien:

- Minstens 3 oriënterende grondboringen tot minstens 1,50 m-mv waarbij het bodemprofiel beschreven wordt, de opeenvolgende bodemlagen specifiek naar textuur en hydromorfie; belangrijk hierbij is de beweging van het grondwaterpeil, en het voorkomen van ondoordringbare lagen.
- Voorafgaand aan de meting met constant head dient de bodem gedurende minstens 4 h verzadigd te worden.
- De infiltratiemetingen worden in minstens 3 herhalingen uitgevoerd.
- Roederer (1987) (falling head) schrijft uitdrukkelijk voor dat de diepte van de put opgemeten dient te worden vóór en na de meting zodat controle en correctie kan doorgevoerd worden m.b.t. inkalven van de put tijdens de meetprocedure.

Referentiekader voor beoordeling

In het kader van de bepaling van de bodemdoorlatendheid in onderzoek naar de mogelijkheid van irrigatie en aanleg van infiltratieterassen op een helling worden volgende referentiewaarden gehanteerd (Roederer, 1987):

Tabel 2-22: referentiewaarden voor Porchet doorlatendheidsmetingen
ikv irrigatie en infiltratieterassen. (Roederer, 1987)

doorlatendheid	beoordeling
$k < 10^{-6} \text{ m/s}$	niet doorlatend
$10^{-6} < k < 5 \times 10^{-6} \text{ m/s}$	weinig doorlatend (voorzorgen te nemen bij irrigatie)
$5 \times 10^{-6} < k < 5 \times 10^{-5} \text{ m/s}$	doorlatend
$5 \times 10^{-5} \text{ m/s} < k$	zeer doorlatend

Aanleg van een infiltratieteras is mogelijk indien $k \geq 1,2 \times 10^{-5} \text{ m/s}$

In het kader van aanleg van infiltratieputten voor IBA, en infiltratie van regenwater, wordt volgende referentiekader vooropgeschoven (Lachère, 2012):

Tabel 2-23: Referentiewaarden voor Porchet doorlatendheidsmetingen
ikv infiltratievoorzieningen (Lachère, 2012).

Doorlatendheid	Beoordeling	bodemtextuur
$k < 1,7 \times 10^{-6} \text{ m/s}$	ondoorlatend	sol argileux ¹¹
$1,7 \times 10^{-6} < k < 4,2 \times 10^{-6} \text{ m/s}$	zeer weinig doorlatend	sol argilo-limoneux
$4,2 \times 10^{-6} < k < 8,3 \times 10^{-6} \text{ m/s}$	matig doorlatend	sol limoneux
$8,3 \times 10^{-6} < k < 1,4 \times 10^{-5} \text{ m/s}$	doorlatend	sol sablo-limoneux
$1,4 \times 10^{-5} \text{ m/s} < k$	zeer doorlatend	sol dominante sableuse

Indien de doorlatendheid lager ligt dan $1,7 \times 10^{-6} \text{ m/s}$, dienen andere oplossingen dan infiltratie gezocht te worden (Conseil Général Loire en Rhone-Alpes, 2005).

¹¹ De Franse textuurbenamingen wordt vermeld gezien de Franse textuurindeling niet of niet geheel overeenkomt met de Belgische textuurindeling.

2.2.1.7.4 Sterkte/zwakte

Tabel 2-24: Méthode Porchet; sterkte/zwakte-analyse.

Factor	Sterkte	Zwakte
Variabele:	meting van k_h en k_v (overwegend k_h)	
Schaal: omvang van de matrix, monstergrootte, effect van anisotropie	De hoogte van de waterkolom is in de praktijk beperkt. Doorgaans boorgaten met grotere diameter (15 à 40 cm)	
Relatie van de test tot de matrix	Beperkt in meetbereik en aldus in bodemtype ?	
Nauwkeurigheid, gevoeligheid aan randvoorwaarden	Voldoende voor principebeslissingen (aanleg van infiltratiestructuren)	Gezien aanname van het verhang = 1, mogelijk minder nauwkeurig.
Robuustheid, herhaalbaarheid	Eenvoudige uitvoering; zeer eenvoudige uitvoering ingeval van falling head	onzekerheid van structuur, bv. in gerijpte klei; wat bij slecht weer ?
Ervaring en verspreiding	Genormeerd in Frankrijk; overgenomen in overzeese gebieden.	
Technische relevantie		
Techniciteit, kwalificatie van de uitvoerder	Weinig gespecialiseerd; Constant head: matig gespecialiseerd	
Tijdsbesteding, rekening houdend met het aantal vereiste herhalingen en kost	Falling head: 30 min; Constant head: 1 h; Steeds rekening houden met verzadiging van de bodem 4h voordien.	
Economische haalbaarheid	Voor constant head materiaal: +/- € 175	

2.2.1.8 Omgekeerde boorgatmethode (Hooghoudtmethode)

Oorspronkelijk werd de echte boorgatmethode ontwikkeld door Diserens (1934) als een snelle, simpele methode om de doorlatendheid van bodems onder de grondwatertafel te meten in kader van het ontwerp van drainagesystemen. Deze methode werd later verbeterd door Hooghoudt (1936), die de formule van Hooghoudt publiceerde (Hooghoudt, 1940) waaraan de naam, en later nog door Kirkham (1945, 1948), Van Bavel (1948), Ernst (1950), Johnson (1952) en Kirkham (1955). Nadien werd een variant ontwikkeld voor metingen uit te voeren boven de watertafel. Van Hoorn (1979) vergeleek voor bodems zonder microstratificatie de resultaten met deze van een enkele ring methode meting en kwam gelijkaardige resultaten uit. De hierboven omschreven falling head variant van de Porchet methode is een afgeleide van de omgekeerde Hooghoudtmethode.

Bij deze methode wordt de doorlatendheid bepaald door een boorgat te maken en hieraan water toe te voegen. Er kan dus zowel verticaal als horizontaal water in de grond dringen.

2.2.1.8.1 Inleiding

Indeling:

in situ; falling head, meting in een boorgat

Principe:

De geïnfilterde hoeveelheid water in een boorput met gekende geometrie, is een maat voor de doorlatendheid van de bodem.

Toepassingsgebied:

In kader van:

- Landbouwkundige toepassingen: drainage (echte boorgatmethode)
- Ontwerp Infiltratievoorzieningen of bufferbekkens (echte en omgekeerde boorgatmethode)

Landen:

Ontwikkeld in Nederland, België, wereldwijd

2.2.1.8.2 Theoretische achtergrond

Bron afleiding formules: Oosterbaan & Nijland (1994)

De vergelijking voor het berekenen van de doorlatendheid voor de omgekeerde boorgatmethode werd afgeleid van de infiltrometer (Figuur 2-28).

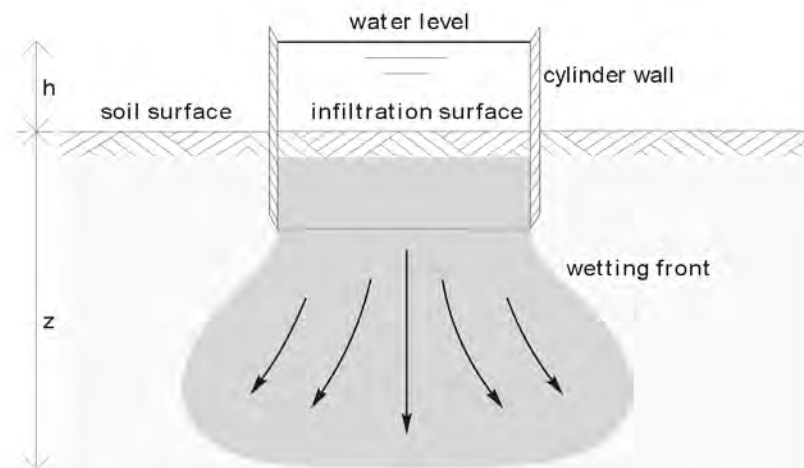
Wanneer men water laat infiltreren uit een stalen cilinder in ongesatureerde bodem, kan men na een tijd vaststellen dat de bodem rond en onder het gebied bijna gesatureerd wordt. Het bevochtigingsfront is eerder scherp afgelijnd tegen de droge bodem (Figuur 2-28).

Als men nu een punt beschouwt net onder het bevochtigingsfront, met een afstand z tot de oppervlakte en de matric head van de bodem op dit punt heeft een (kleine) waarde h_m , is de waterdruk (head) op het bodemoppervlak hier gelijk aan $z + h$ (h = hoogte van het waterniveau in de cilinder). Het verschil in waterdruk (head) tussen het punt op diepte z en een punt aan de oppervlakte $= z + h + |h_m|$.

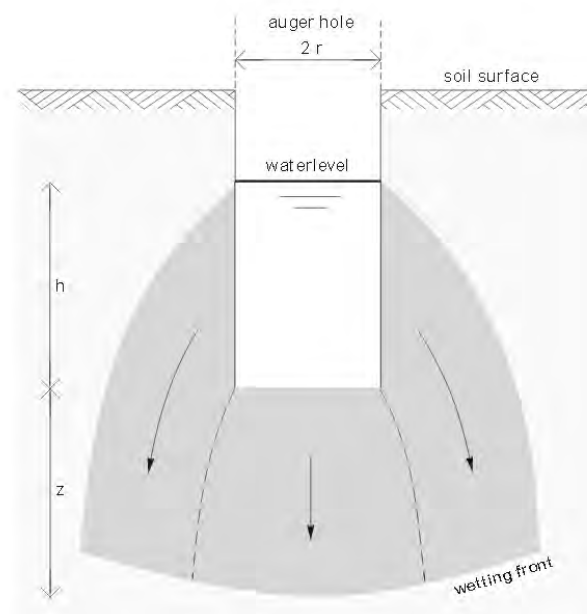
De gemiddelde hydraulische gradiënt (i) tussen de 2 punten is:

$$i = \frac{z + h + |h_m|}{z}$$

Als z groot genoeg is, benadert i 1. Uit de wet van Darcy ($k = \frac{v}{i}$) kunnen we dan afleiden dat de gemiddelde stroomsnelheid in de bevochtigde grond de doorlatendheid benadert ($k = v$).



*Figuur 2-28: Infiltratieproces onder een cilinderinfiltrometer
(bron: Oosterbaan & Nijland, 1994)*



*Figuur 2-29: infiltratie van een met water gevuld boorgat (omgekeerde boorgat methode)
(bron: Oosterbaan & Nijland, 1994)*

Voor de omgekeerde boorgatmethode (Figuur 2-29) kunnen we aannemen dat z groot genoeg is. Als men het boorgat vult met water tot de bodem rond en onder het boorgat zo goed als verzadigd is, zal de infiltratiesnelheid v , min of meer constant worden. De totale infiltratie Q zal dan

$$Q = v A$$

Met A : de infiltratie oppervlakte

Met $v = k$ wordt dit:

$$Q = k A$$

Bij de omgekeerde boorgatmethode gebeurt de infiltratie door zowel de bodem als de zijwanden van het boorgat. Dus:

$$A = \pi r^2 + 2\pi r h$$

Met r : straal van het boorgat
Met h : hoogte van de waterkolom in het boorgat

Als we aannemen dat de hydraulische gradiënt ongeveer 1 is mogen we door de wet van Darcy schrijven dat:

$$Q = k A_t = 2\pi k r \left(h + \frac{1}{2} r \right)$$

Q kan afgeleid worden van de snelheid van de daling van het water in het boorgat:

$$Q = -\pi r^2 \frac{dh}{dt}$$

Dus

$$2k \left(h + \frac{1}{2} r \right) = -r \frac{dh}{dt}$$

Na integratie en herschikking krijgen we:

$$k = 1,15 r \frac{\log \left(h_0 + \frac{1}{2} r \right) - \log \left(h_t + \frac{1}{2} r \right)}{t - t_0}$$

Met t : tijd sinds de start van de meting (s)
Met h_t : de hoogte van de waterkolom in het boorgat op tijdstip t (cm)

$h_0 = h_t$ met $t = 0$

$$h_t = D' - H_t$$

Met D' : de diepte van het boorgat onder de referentiehoogte

H_t : de diepte van het water in het boorgat ten opzichte van de referentiehoogte

Wanneer t en H gemeten worden in gepaste intervallen, kan k berekend worden. Door $h_t + \frac{1}{2}r$ op een log as uit te zetten tegen t op een lineaire as, bekomt men een rechte met helling

$$\tan \alpha = \frac{\log \left(h_0 + \frac{1}{2}r \right) - \log \left(h_t + \frac{1}{2}r \right)}{t - t_0}$$

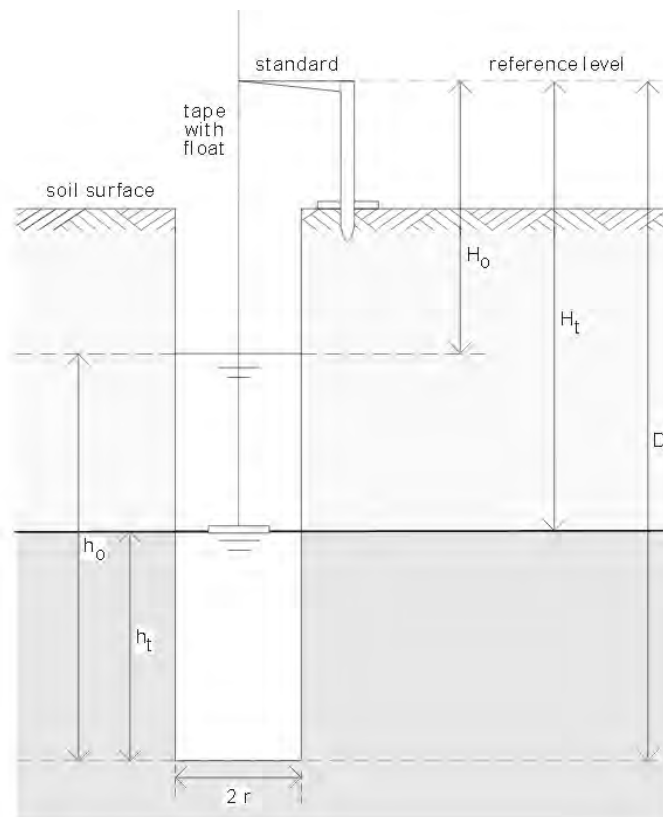
De berekening van k met

$$k = 1,15 r \frac{\log \left(h_0 + \frac{1}{2}r \right) - \log \left(h_t + \frac{1}{2}r \right)}{t - t_0}$$

Kan dus ook gedaan worden met de waarde van $\tan \alpha$

$$k = 1,15 r \tan \alpha$$

Een combinatie van k_h en k_v met overwicht van k_v wordt bepaald



*Figuur 2-30: Metingen voor de omgekeerde boorgatmethode
(bron: Oosterbaan & Nijland, 1994)*

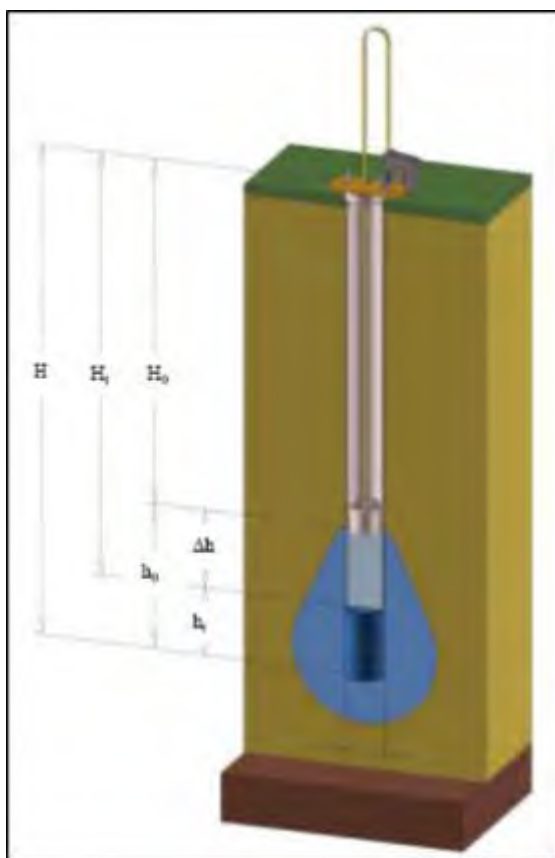
2.2.1.8.3 Methode

Werkvoorschrift

Werkvoorschrift op basis van de handleiding Hooghoudtmethode van Eijkelkamp:

Uitrusting:

- Edelmanboor
- Rolmeter
- Statief voor rolmeter
- vlotter
- Eventueel mantelbuis (filter)
- Water
- Trechter
- Chronometer
- Pen en papier



*Figuur 2-31: De omgekeerde boorgatmethode.
(bron: handleiding Hooghoudtmethode Eijkelkamp).*

Werkwijze:

- Maak op de locatie waar er een bepaling van de hydraulische conductiviteit moet gebeuren, een beschrijving van het bodemprofiel tot minimum 1 meter onder de diepte van de meting.
- Maak een boorgat tot de gewenste diepte. Indien het om losse grond gaat, gebruik dan een mantelbuis om het instorten van het boorgat te voorkomen.
- Plaats de trechter in het boorgat en giet er water in. Verzadig de bodem rond en onder het boorgat. Bij verzadiging heeft met een gelijkmatige daling van het waterniveau in het boorgat.
- Bevestig de vlotter aan het uiteinde van de rolmeter en bevestig de rolmeter aan het statief. Plaats het statief over het boorgat met de vlotter in het boorgat zodat de rolmeter met een boogje omhoog gaat door het gleufje in het statief (Figuur 2-31). Hiermee kan men de daling van het waterniveau aflezen.
- Begin de meting als de snelheid van de daling constant is en zorg dat het waterniveau overeenkomt met de bodemlaag waarin men wil meten.
- Lees per tijdseenheid (afhankelijk van de snelheid van de daling) de daling van het water af. Indien de doorlatendheid van de bodem zeer hoog is, is het aangewezen de tijd in vaste dalingsintervallen af te lezen.

Het aantal herhalingen is afhankelijk van de samenstelling van de bodemlaag waarin de k_{sat} bepaald wordt:

- Lichte bodems (bv. zand): 5 herhalingen
- Zwaardere bodems (bv. zandleem en leem): 3 herhalingen

Fysische randvoorwaarden

Aannames:

- De bodem is homogeen en isotroop
- Bodem achter het bevochtigingsfront is gesatureerd
- De hydraulische gradiënt is gelijk aan 1.

Aandachtspunten:

- De onderkant van het boorgat moet 20 cm boven de grondwaterstand of ondoordringbare laag gelegen zijn (handleiding hooghoudtmethode Eijkelkamp).

2.2.1.8.4 Sterkte/zwakte

Tabel 2-25: Omgekeerde boorgat methode; sterkte/zwakte-analyse.

Factor	Sterkte	Zwakte
Variabele:	meting van k_h en k_v (overwegend k_h)	
Schaal: omvang van de matrix, monstergrootte, effect van anisotropie		
Relatie van de test tot de matrix	universeel toepasbaar	
Nauwkeurigheid, gevoeligheid aan randvoorwaarden		
Robuustheid, herhaalbaarheid		onzekerheid van structuur, bv. in gerijpte klei; wat bij slecht weer ?
Ervaring en verspreiding	Gebruikt in de praktijk	
Technische relevantie		
Techniciteit, kwalificatie van de uitvoerder	Weinig gespecialiseerd	
Tijdsbesteding, rekening houdend met het aantal vereiste herhalingen en kost	+/- 45 min. per meting, langer bij slecht infiltrerende grondsoorten	
Economische haalbaarheid	aankoop set : +/- 1600 euro	

2.2.1.9 Infiltratiecapaciteit test ('waterwegwijzer voor architecten' 2000)

Op bodems in een stedelijke omgeving heeft de mens reeds vaak sterk ingegrepen, zodat de infiltratiecapaciteit niet uit eigenschappen van in de omgeving liggende ongestoorde bodems kan worden geëxtrapoleerd. Hiervoor heeft de VMM in zijn 'Waterwegwijzer voor architecten' van 2000 een proef omschreven om uit te voeren op de plaats waar de infiltratievoorziening gepland is.

2.2.1.9.1 Inleiding

Indeling:

in situ; falling head, meting in put

Principe:

De snelheid waarmee het water infiltreert in een put met gekende dimensies, is een maat voor de doorlatendheid van de bodem.

Toepassingsgebied:

In kader van:

- Ontwerp Infiltratievoorzieningen of bufferbekkens

Landen:

België, Vlaanderen (VMM)

2.2.1.9.2 Theoretische achtergrond

$$k_v = \frac{46,9}{H_{start}^{1,50}} (H_{start} - H_w) \frac{60}{T}$$

Met	k_v	: verticale doorlatendheid (cm/h)
	H_{start}	: de hoogte van het waterniveau bij het begin van de test (cm)
	H_w	: de hoogte van het waterniveau op een bepaald ogenblik (cm)
	T	: de tijd verlopen na de start van de test (minuten)

k_v wordt voornamelijk bepaald.

2.2.1.9.3 Methode

Werkvoorschrift

- Graaf een put tot op de diepte waarop de infiltratie zal worden aangelegd. Deze put heeft onderaan een diameter van 10 cm en bovenaan een diameter van maximum 30 cm.
- Vul de put met water gedurende 4 à 24 uren, teneinde de grond te verzadigen. Indien het water in minder dan 10 minuten verdwijnt, kan de test onmiddellijk uitgevoerd worden.
- Na verzadiging wordt de put met water gevuld tot op een hoogte van 15 à 30 cm van de bodem van de put. Men noteert dit als H_{start} .

- Bepaal nu de waterhoogte H_w na een tijd gelijk aan 15, 30, 60, 120 en eventueel 240 minuten. Indien het water volledig verdwenen is binnen de 30 minuten, herbegin dan de test en meet de tijd nodig om het waterniveau met 10 cm te laten dalen.
- Bepaal nu voor iedere meting de doorlatendheid met formule onder 2.2.1.9.2. Bepaal tenslotte het gemiddelde van al deze k_v waarden. De hoeveelheid water die in de bodem per m^2 en per uur kan geïnfiltreerd worden, wordt gegeven door de onderstaande tabel in functie van de gemiddelde doorlatendheid k_v . Dit is de infiltratiecapaciteit.

Met deze infiltratiecapaciteit kan je het afvoerdebiet bepalen en daarmee je infiltratievoorziening dimensioneren.

Tabel 2-26: Bepaling van de infiltratiecapaciteit op basis van de infiltratietest.

Gemiddelde doorlatendheid k_v , bepaald met een percolatietest (cm/h)	Infiltratiecapaciteit (l/h/m ²) of (mm/h)
$k_v \geq 15$	2,1
$10 \leq k_v \leq 15$	1,67
$5 \leq k_v \leq 10$	1,25
$3,5 \leq k_v \leq 5$	0,85
$2,5 \leq k_v \leq 3,5$	0,62
$0,5 \leq k_v \leq 2,5$	0,41
Voor $k_v \leq 5$ mm/h is geen infiltratie in de bodem mogelijk	

Fysische randvoorwaarden

De proef moet worden uitgevoerd in de winter wanneer de grondwaterstand het hoogst is.

Referentiekader voor beoordeling van de meetwaarde

Zie Tabel 2-26.

2.2.1.9.4 Sterkte/zwakte

Tabel 2-27: Doorlatendheidsbepaling uit Waterwegwijzer voor architecten; sterkte/zwakte-analyse.

Factor	Sterkte	Zwakte
Variabele:	Meting k_v en k_h (overwegend k_h)	
Schaal: omvang van de matrix, monstergrootte, effect van anisotropie		
Relatie van de test tot de matrix	universeel toepasbaar	
Nauwkeurigheid, gevoeligheid aan randvoorwaarden		
Robuustheid, herhaalbaarheid		onzekerheid van structuur, bv. in gerijpte klei; wat bij slecht weer ?
Ervaring en verspreiding	In 'waterwegwijzer voor architecten' van de VMM (versie 2000)	
Technische relevantie		
Techniciteit, kwalificatie van de uitvoerder	Niet gespecialiseerd	
Tijdsbesteding, rekening houdend met het aantal vereiste herhalingen en kost	Minimum 2u10 Maximum 28u	
Economische haalbaarheid	Goedkoop enkel schop, meetlat en water nodig.	

2.2.1.10 Soakaway/soakage Test.

De soakaway methode is een doe-het-zelf methode die zeer simpel, met huis-tuin-keuken materiaal kan uitgevoerd worden. Bij deze methode wordt een put gegraven met gekende afmetingen. Deze wordt gesatureerd en vervolgens wordt de tijd gemeten die nodig is voor de waterkolom om te zakken van een 3/4 gevulde put tot een 1/4 gevulde put.

De methode is gestandaardiseerd in de UK en wordt door meerdere instanties (o.m. Environment Agency) vereist of strikt opgelegd in de ontwerpfase van bouwprojecten. De vroegere methode (BRE Digest 151) ging uit van een kleine put van ongeveer 30 x 30 x 30 cm. De nieuwe norm (BRE Digest 365) gaat echter uit van 0,3 tot 1 x 1 tot 3 m. Uit de praktijk blijkt dat de methode in veel gevallen moeilijk uitvoerbaar is (Williams, 2010): graven van een strak geometrische put in zand of grindbodem is nauwelijks mogelijk, en nadien vullen met water is eveneens niet realistisch gezien de immense hoeveelheden water die nodig zijn zeker bij redelijk hoge doorlatendheid. De meetmethodiek strikt volgen in kleibodems is evenmin werkbaar gezien de wachttijd. Bij tussenliggende grondsoorten (leem, zandleem) kalven de zijwanden van de put veelal in reeds bij de eerste vulling.

Om deze reden geven we hieronder de uitvoering van de test met kleinere dimensies.

De methode maakte deel uit van de richtlijnen bij ontwerp van infiltrerende structuren voor regenwater in de UK minstens tot 2000 (Barrit, 2000).

2.2.1.10.1 Inleiding

Indeling:

in situ; falling head, meting in een put

Principe:

De daling van het water in functie van de tijd in een boorgat met gekende geometrie, is een maat voor de doorlatendheid van de bodem.

Toepassingsgebied:

In kader van:

- Ontwerp Infiltratievoorzieningen of bufferbekkens

Landen:

Genormeerde methode in Engeland, verdere toepassingen binnen de Commonwealth.

Bestaande Normering of opname in regelgeving:

BRE Digest 151 (UK)

BRE Digest 365 (UK)

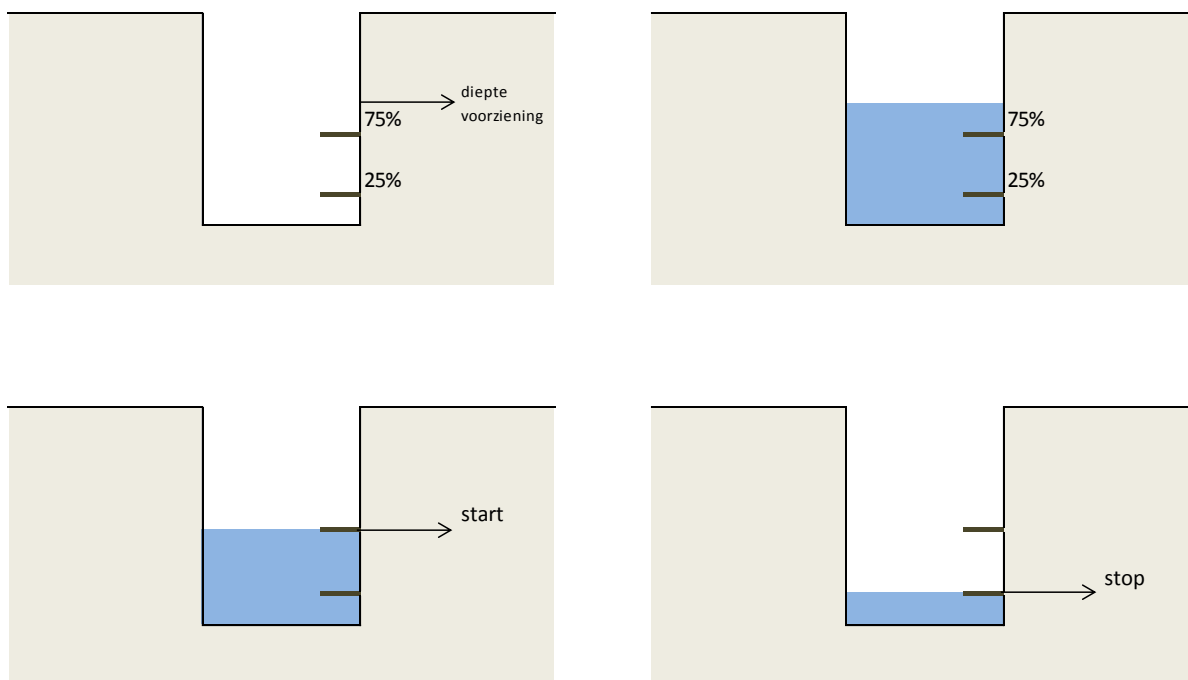
CIRIA 156 (CIRIA, 1996) (UK)

2.2.1.10.2 Theoretische achtergrond

De doorlatendheid wordt bepaald als:

$$k = \frac{V_{p75-25}}{a_{p50} t_{p75-25}}$$

Met V_{p75-25} : het effectieve bergingsvolume van water in de testput tussen 75 % en 25 % van de diepte.
 a_{p50} : de oppervlakte van de testput als hij voor 50 % gevuld zou zijn, inclusief de basis.
 t_{p75-25} : de tijd die de waterkolom nodig heeft om te zakken van 75 % tot 25 % effectieve diepte.



Figuur 2-32: Soakaway methode

Deze formule werd waarschijnlijk rechtstreeks afgeleid van de wet van Darcy. In de originele normeringen staat geen verwijzing naar de achterliggende theorie. Dit wordt ook opgemerkt door Watkins (1991). De reden waarom waarschijnlijk de tijd tussen 75 % en 25 % genomen wordt is omdat als je de doorlatendheid berekent op basis van het debiet, dit debiet kleiner wordt naargelang je waterkolom lager is omwille van de verminderde druk van de waterkolom. In het gebied van 75 % tot 25 % heb je dus de gemiddelde snelheid.

2.2.1.10.3 Methode

Werkvoorschrift

Hieronder wordt een beknopt werkvoorschrift gegeven. Deze methode werd geselecteerd voor de uitvoering op terrein. Een uitgebreid werkvoorschrift kan u vinden in de werkvoorschriften van de geselecteerde methodes (zie Bijlage A) voor uitvoering op terrein bij de vergelijkende studie.

Uitrusting:

- Schop
- Meter
- Eventueel stok met 75 % en 25 % op aangeduid
- Water

om opwoeling van de grond te voorkomen raden we aan om volgende elementen te gebruiken:

- Grind (bodem van put)
- Glazen bokaal (breken van waterstraal bij vullen van put)

Werkwijze:

- Graaf een put met gekende dimensies (type: L 30 x B 30 cm² x D 30 cm)
- Bepaal de natte oppervlakte wanneer de put half gevuld wordt met water (a_{p50})
- Vul de put met water
- Laat de put 1 keer volledig leeglopen.
- Afhankelijk van de snelheid van leeglopen van de put moeten andere stappen ondernomen worden:
 - o Indien het leeglopen van de put langer dan 10 minuten duurt, kan overgegaan worden naar de volgende stap.
 - o Indien de put volledig leegloopt binnen de 10 minuten moet de verzadiging herhaald worden tot de tijd voor het leeglopen van de put boven de 10 minuten ligt (maximaal 10x).
 - o Indien de put na 6 uur niet leeggelopen is, kan geconcludeerd worden dat de grond niet geschikt is voor infiltratie.
- Vul de put opnieuw volledig en meet de tijd in functie van de daling van het waterniveau zodanig dat de tijd (t_{p75-25}) gekend is of kan berekend worden die verloopt tussen het moment dat het waterniveau op 75 % en op 25 % staat van het oorspronkelijke niveau. Bereken het watervolume dat overeenkomt met deze daling (V_{p75-25}).
- Herhaal deze test minstens 2 maal, opeenvolgend, of bij voorkeur op dezelfde dag.

Uiteindelijk wordt de laagste meetwaarde uit de verschillende tests gekozen voor verdere dimensionering.

Fysische randvoorwaarden

Randvoorwaarden: de diepte van de put en de waterhoogte bij aanvang van de test is bij voorkeur vergelijkbaar met de diepte en de waterhoogte in de geplande infiltratiestructuur.

FHWA (Federal Highway Administration, US), (1980) geeft exemplarisch aan dat, op voorwaarde van een homogene ondergrond, 2 à 3 metingen voor een infiltratiebekken van 92x92 m² volstaan; ingeval van een lineaire structuur volstaat 1 meting per 150 m.

CIRIA (Construction Industry Research and Information Association, UK) (1996) geeft als richtlijn 1 test per 25 m in lijn of in oppervlakte.

Referentiekader voor beoordeling van de meetwaarde

Het 'Northern Ireland Environment Agency Water (Northern Ireland) Order 1999' stelt dat de tijd in seconden die nodig is om van 75 % gevuld tot 25 % gevuld te gaan moet gedeeld worden door de gedaalde afstand in millimeter tussen 75 % gevuld en 25 % gevuld. De test moet minimaal 3 maal herhaald worden in 2 testputten. Van deze waarden moet dan het gemiddelde genomen worden. Waar een waarde meer dan 50 % verschilt van dit gemiddelde, moet de test herhaald worden.

Een septische tank en ondergronds irrigatiesysteem mag enkel aangelegd worden indien het gemiddelde testresultaat tussen 15 en 100 ligt. Het minimum werd opgesteld omdat vermeden moet worden dat het effluent te snel in de bodem zou infiltreren en het grondwater verontreinigen.

2.2.1.10.4 Sterkte/zwakte

Tabel 2-28: Soakaway/soakage Test; sterkte/zwakte-analyse.

Factor	Sterkte	Zwakte
Variabele: - welke? - meting of PTF?	meting van k_h en k_v (overwegend k_h)	
Schaal: omvang van de matrix, monstergrootte, effect van anisotropie		Groot in vergelijking met andere methodes
Relatie van de test tot de matrix	Slecht toepasbaar in grovere grondsoorten (put graven + instorten tijdens infiltratie)	
Nauwkeurigheid, gevoeligheid aan randvoorwaarden		Resultaat geeft een benadering, geen exact resultaat.
Robuustheid, herhaalbaarheid		onzekerheid van structuur, bv. in gerijpte klei; wat bij slecht weer ?
Ervaring en verspreiding	Genormeerd in UK	
Technische relevantie		
Techniciteit, kwalificatie van de uitvoerder	Niet gespecialiseerd	

Factor	Sterkte	Zwakte
Tijdsbesteding, rekening houdend met het aantal vereiste herhalingen en kost		Sterk afhankelijk van doorlatendheid
Economische haalbaarheid	Goedkoop: Huis-tuin-en-keuken materiaal	

2.2.1.11 Pilot infiltration test (PIT)

In de Stormwater Management Manual for Western Washington wordt de Pilot Infiltration Test (PIT) als enige test aanvaard voor het bepalen van de infiltratiecapaciteit. Hierbij moet een testbekken uitgegraven worden met een horizontale oppervlakte van ongeveer 100 vierkante voet (ongeveer 9 m²) en tot op een diepte van de geplande infiltratievoorziening. In enkele gevallen kan de Large Scale PIT vervangen worden door een Small-Scale PIT:

- Het drainagegebied op de infiltratiesite is kleiner dan 1 acre (4046,9 m²)
- De test is in het kader van een Low Impact Development Best Management Practices van bioretentie of waterdoorlatende verharding voor kleine drainagegebieden en/of voorzieningen die wijd verspreid zijn over de projectsite.
- De site heeft een hoge infiltratiecapaciteit, wat een Large Scale PIT zeer moeilijk maakt, en het geotechnisch onderzoek suggereert uniforme bodemkarakteristieken.

Bij een Small-Scale PIT mag een testput gegraven worden van 12 tot 32 vierkante voet (ongeveer 1 tot 3 m²). In deze testputten moet eerst een constant waterniveau gehouden worden tot het aanvuldebiet constant is voor 1 uur (minimum 6 uur satureren bij Small-Scale PIT) waarna de daling van het water gemeten wordt tot de put leeg is.

2.2.1.11.1 Inleiding

Indeling:

in situ; constant head (+ falling head), meting in een put

Principe:

De daling van het water in functie van de tijd in een testbekken met gekende geometrie, is een maat voor de doorlatendheid van de bodem.

Toepassingsgebied:

In kader van:

- Ontwerp Infiltratievoorzieningen of bufferbekkens

Landen:

USA (Washington)

Bestaande Normering of opname in regelgeving:

Stormwater Management Manual for Western Washington

2.2.1.11.2 Theoretische achtergrond

De doorlatendheid wordt bepaald met de snelheid waarmee het water moet aangevuld worden om een constante waterkolom te behouden gedurende 30 minuten tot 1 uur. Om de dimensies van het infiltratiesysteem te berekenen worden hierop nog correctiefactoren toegepast (zie Tabel 2-29).

Er wordt hiervoor geen theoretische achtergrond gegeven maar deze formule werd waarschijnlijk rechtstreeks afgeleid van de wet van Darcy.

Tabel 2-29: Correctiefactor te gebruiken bij het ontwerp van infiltratiestructuren bij in situ metingen van de Hydraulische conductiviteit (Bron: Stormwater Management Manual for Western Washington)

Issue	Partial Correction Factor
Site variability and number of locations tested	$CF_v = 0,33 \text{ to } 1,0$
Test method	CF_t
Large-scale PIT	$= 0,75$
Small-scale PIT	$= 0,50$
Other small-scale (e.g. Double ring, falling head)	$= 0,40$
Grain Size Method	$= 0,40$
Degree of influent control to prevent siltation and bio-buildup	$CF_m = 0,9$

De totale Correctiefactor wordt berekend door:

$$CF_T = CF_v CF_t CF_m$$

De K_{SAT} wordt berekend door:

$$K_{SAT} design = K_{SAT} initial CF_T$$

2.2.1.11.3 Methode

Werkvoorschrift

Large-scale PIT

- Graaf een put tot op een diepte overeenkomstig met de toekomstige infiltratievoorziening. Maak dat de wanden voldoende hellend zijn zodat ze niet instorten of er geen erosie optreedt tijdens de test
- Het horizontale vlak moet ongeveer 100 vierkante voet zijn (+/- 9 m²). Noteer de afmetingen
- Installeer een verticale meetlat in het midden van de meetput
- Vul de put met water door middel van een 6-inch diameter buis met onderaan een spatbord zodat er zo weinig mogelijk grond verstoord wordt.
- Voeg water toe met een debiet zodat er een waterniveau van 6 tot 12 inches (+/- 15 tot 30,5 cm) behouden wordt boven de bodem van de put. Het debiet kan eventueel met een debietmeter gemeten worden.
- Noteer elke 15 - 30 min het cumulatieve volume en het debiet om het waterniveau te behouden.

- Blijf water toevoegen tot een uur nadat het debiet gestabiliseerd is om eenzelfde niveau te behouden. De tijd van verzadiging inclusief het uur stabilisatie moet minimum 6 uur bedragen.
- Na het uur dat het debiet gestabiliseerd is, mag de watertoevoer gestopt worden en meet de daalsnelheid van het water tot de put leeg is.

Smale-scale PIT

- Hierbij moet dezelfde procedure gevolgd worden enkel moet hier een put gegraven worden van 12 tot 32 vierkante voet (+/- 1 tot 3 m²).
- Hier wordt ook de optie gegeven om een druksensor in de put te hangen om het waterniveau te registreren.
- Op het einde van de test dient hier ook de put verder uitgegraven te worden om het gevolgde pad van het water te bepalen

Referentiekader voor beoordeling van de meetwaarde

Er wordt uitgegaan dat een infiltratiestructuur voor verwerking kan aangelegd worden als de gemeten (initiële) doorlatendheid 9 in./uur of minder. De design (lange termijn) doorlatendheden tot 3,0 in./uur kunnen ook overwogen worden mits aan enkele voorwaarden te voldoen.

2.2.1.11.4 Sterkte/zwakte

Tabel 2-30: Pilot infiltration test (PIT); sterkte/zwakte-analyse.

Factor	Sterkte	Zwakte
Variabele: - welke? - meting of PTF?	meting van k_h en k_v (overwegend k_h)	
Schaal: omvang van de matrix, monstergrootte, effect van anisotropie	Zeër groot in vergelijking met andere methodes	
Relatie van de test tot de matrix	Slecht toepasbaar in grovere grondsoorten (put graven + instorten tijdens infiltratie)	
Nauwkeurigheid, gevoeligheid aan randvoorwaarden		Resultaat geeft een benadering, geen exact resultaat.
Robuustheid, herhaalbaarheid		onzekerheid van structuur, bv. in gerijpte klei; wat bij slecht weer ?
Ervaring en verspreiding	Opgelegd door de overheid in Washington	
Technische relevantie		
Techniciteit, kwalificatie van de uitvoerder	matig gespecialiseerd	

Factor	Sterkte	Zwakte
Tijdsbesteding, rekening houdend met het aantal vereiste herhalingen en kost		tot 17u Sterk afhankelijk van doorlatendheid Heel veel water nodig
Economische haalbaarheid	Afhankelijk van gebruikte materiaal	

2.2.1.12 Two-stage Borehole test

De Two-stage Borehole test werd ontwikkeld om een snellere manier te vinden om een kwaliteitstest uit te voeren van een aangelegde gecompacteerd kleilaag. De test is dus ontworpen om gronden met een K_{SAT} waarde van 1×10^{-7} m/s tot 1×10^{-11} m/s te meten. Bij deze methode wordt k_v en k_h apart bepaald door eerst de infiltratie op de bodem van een buis te testen (end-of-casing test) en daarna het boorgat uit te diepen en opnieuw de K_{SAT} te bepalen via een Nasberg (Lefranc) test waarbij het boorgat open is aan de zijwanden. Deze methode wordt beschreven in Trautwein & Boutwell (1994). Het is een combinatie van de methodes U.S. Bureau of Reclamations methodes E-18 en E-19 (USBR 1984).

2.2.1.12.1 Inleiding

Indeling:

in situ; falling head, combinatie van meting op oppervlak en in boorgat

Principe:

De daling van het water in functie van de tijd in een boorgat met gekende geometrie, is een maat voor de doorlatendheid van de bodem. k_h en k_v worden apart bepaald.

Toepassingsgebied:

In kader van:

- Milieuonderzoek: Kwaliteitscontrole van gecompacteerd kleilaag door doorlatendheid te meten

Landen:

Bestaande Normering of opname in regelgeving:

ASTM D6391 - 11

2.2.1.12.2 Theoretische achtergrond

Om de k_h/k_v verhouding te berekenen bij de Two-stage borehole test wordt een veranderende geometrie gebruikt samen met de Hvorslev (1951) vergelijking. Deze vergelijking werd door Boutwell en Tsai (1992) aangepast voor gebonden medium door middel van de 'three-dimensional image potential' theorie van Carslaw en Jaeger (1959).

Elke falling head test kan in volgende formule gezet worden:

$$k_v = R_T G \ln \left(\frac{H_1}{H_2'} \right) / (t_2 - t_1)$$

Met:

- k_v : verticale hydraulische conductiviteit (m/s)
- R_T : viscositeitsfactor (water bij 20°C) (ASTM D5084)
- H_1 : initiële waterhoogte in boorgat (op tijd t_1)
- H_2' : finale waterhoogte in boorgat (op tijd t_2) gecorrigeerd voor volumetrische aspecten
- G : geometrische constante voor elke fase

Deze vergelijking is gebaseerd op de stroming in een gesatureerd medium wat opgaat zolang er gekeken wordt in de gesatureerde zone. Ook wordt aangenomen dat er een constante druk gecreëerd wordt. Dit is niet het geval bij een falling head test. Het verschil in druk is echter zeer klein in deze test aangezien het verschil in hoogte ten opzichte van de totale hoogte van de waterkolom klein is.

De geometrische factor (G) verschilt per fase en is afhankelijk van geometrie, 'pad' grens condities en anisotropie.

Voor de eerste fase kan dit geschreven worden als:

$$G1(m) = (\pi d^2 / 11 m D) [1 - a(D/4mb_1)]$$

Met

- d : inwendige diameter peilbuis
- m^2 : K_h/k_v (nog niet gekend)
- D : test diameter
- a : -1 voor voor een permeable basis bij b_1
+1 voor een impermeabele basis bij b_1
- b_1 : dikte van de geteste laag onder de casing

Voor fase II:

$$G2(m) = (d^2 / 16 L f m^2) [2 \ln(U_1) - a \ln(U_2) - p \ln U_3] \quad [3]$$

$$\text{Met} \quad U_1 = (mL / (D + 2T)) + (1 + (mL / (D + 2T))^2)^{1/2} \quad [4]$$

$$U_2 = \frac{4mb_2/D + mL/D + [1 + (4mb_2/D + mL/D)^2]^{1/2}}{4mb_2/D - mL/D + [1 + (4mb_2/D - mL/D)^2]^{1/2}} \quad [5]$$

$$U_3 = \frac{\{mL/D + [1 + (mL/D)^2]^{1/2}\}}{U_1} \quad [6]$$

$$f = 1,0 - 0,5623 e^{-1,566L/D} \quad [7]$$

L = lengte van de uitbreiding bij fase 2

$$b_2 = b_1 - \frac{L}{2}$$

T = dikte van de versmeerde zone

p = ratio van k_h tot de conductivity van de versmeerde zone

Vergelijking [4] is naar het elektrisch analoog (Harza) en flow net analyse (Taylor) (Taylor 1948)

Vergelijkingen [3] - [6] zijn gebaseerd op Hvorslev (1951) waar de cilindrische zone rond de filter van fase 2 benaderd wordt door een ellipsoïde. In vergelijking [7] worden empirische correcties uitgevoerd die de inconsistenties oplossen die voorkomen als L/D naar nul gaan zoals besproken in Hvorslev (1951).

Als we aannemen dat het medium isotropisch is ($k_v=k_h$ en dus $m = 1$), worden de vergelijkingen [1] en [2] of [3]:

Fase I

$$G1(1) = (\pi d^2/11D)[1 + a(D/4b_1)]$$

Fase II

$$G2(1) = (d^2/16Lf)[2 \ln(U_4) + a \ln(U_5)]$$

Met:

$$U_4 = L/D + [1 + (L/D)^2]^{1/2}$$

$$U_5 = \frac{4b_2/D + L/D + [1 + (4b_2/D + L/D)^2]^{1/2}}{4b_2/D - L/D + [1 + (4b_2/D - L/D)^2]^{1/2}}$$

Deze vergelijkingen zijn in goede overeenkomst met het elektrisch analoog Youngs (1968) als er van een isotropisch medium uit gegaan wordt met top en bodem begrensd.

Ook wordt er een correctie uitgevoerd om de tijd die elke fase duurt in rekening te brengen:

$$K'_j = \sum K_{j,i} T_i / \sum T_i$$

Met

K'_j	: aritmetisch gemiddelde met de tijd in rekening gebracht
j	: 1 voor fase 1 en 2 voor fase 2
i	: time increment number
T_i	: duur van de 'time increment' i

Uiteindelijk bekomt men volgende formule :

$$\frac{k_2}{k_1} = \frac{\ln \left[\frac{L}{D} + \sqrt{1 + \left(\frac{L}{D} \right)^2} \right]}{\ln \left[\frac{mL}{D} + \sqrt{1 + \left(\frac{mL}{D} \right)^2} \right]} m$$

De verticale en horizontale doorlaatbaarheid kunnen dan berekend worden als:

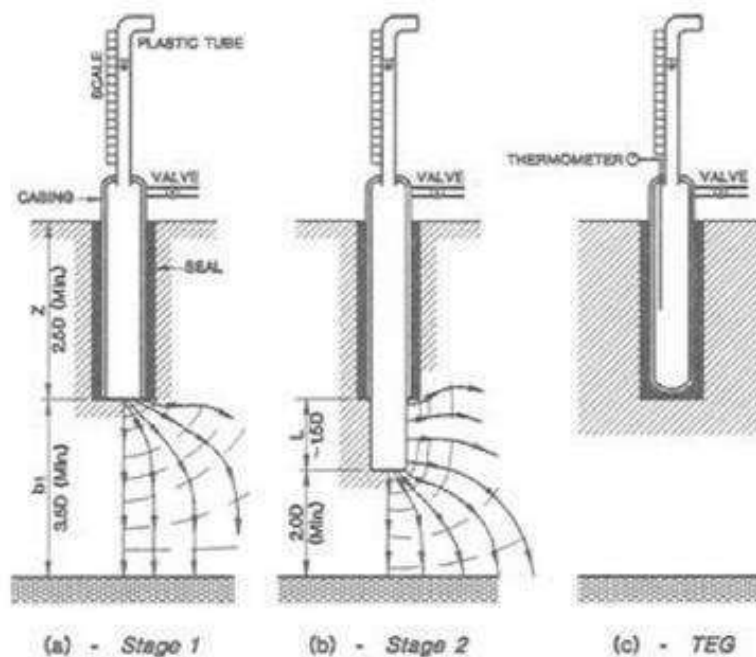
$$k_v = \frac{1}{m} k_1 \quad \text{en} \quad k_h = m k_1$$

2.2.1.12.3 Methode

Werkvoorschrift

Uitrusting:

- Edelmanboren (2 verschillende maten)
- Materiaal om bodem van boorgat vlak te maken
- Peilbuis
- Bentonietkorrels
- Water
- Eventueel pomp om water uit boorgat te verwijderen



*Figuur 2-33: Verschillende fases van een Two stage borehole test.
(Bron: Trautwein & Boutwell, 1994)*

Werkwijze:

Deze methode bestaat uit twee fases:

Fase I

Eerst wordt een boorgat gemaakt met een diameter die 5 cm groter is dan de gewenste diameter van de testput. De bodem van het boorgat moet vlak gemaakt worden. In de testput wordt een casing geplaatst (bv. een peilbuis). De annulaire ruimte rond de peilbuis wordt afgesloten met een bentonietstop dewelke minimum 12u moet zwellen. Dit is de meest kritische fase van de test omdat deze afdichting soms niet lukt.

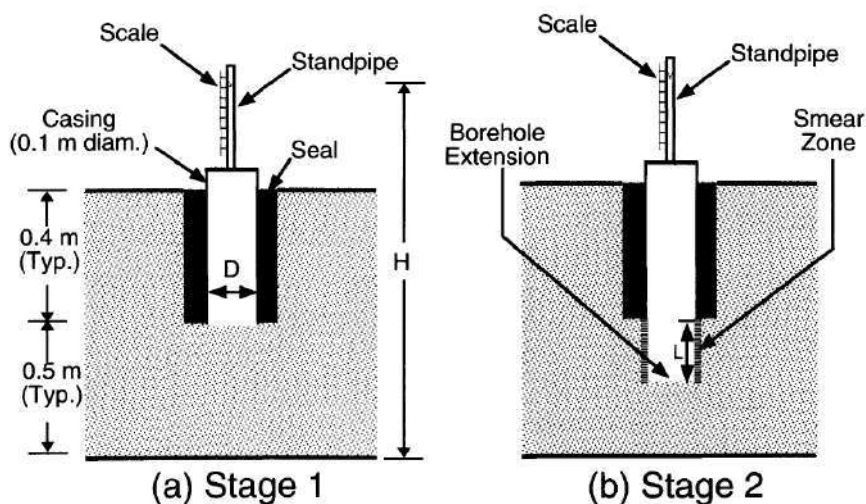
In dit geval moet opnieuw begonnen worden. Gedurende deze fase moet de casing afgesloten worden voor uitdroging te voorkomen of eventuele regenval tegen te houden.

Eens de kleistop uitgehard is kan er water in het boorgat gebracht worden en moet er gewacht worden tot de uitstroming constant wordt. Hierna kan men de meting starten (falling head). Hierna is de eerste fase afgelopen.

Fase II

Indien mogelijk, moet het water van fase I verwijderd worden uit de peilbuis. Het boorgat wordt verder uitgediept met een lengte die gelijk is aan de helft van de vorige diepte. In dit boorgat wordt dan opnieuw een meting uitgevoerd zoals in fase I.

Een gedetailleerde beschrijving van de werkwijze wordt gegeven in Boutwell (1992).



Figuur 2-34: Two Stage Borehole Test. (bron: Benson et al. 1997)

Fysische randvoorwaarden

Voor een standaard uitrusting met een diameter van 10 cm geldt het volgende:

- De laag waarin gemeten wordt moet minimum 60 cm dik zijn en 80 cm indien er onder deze laag een veel minder permeabele laag is.
- De testen moeten minimum 3 m van elkaar verwijderd zijn.

De bodem moet voldoende cohesief zijn zodat er een boorgat kan in gemaakt worden dat open blijft.

De absorptie van water door de onverzadigde grond wordt niet in rekening gebracht.

2.2.1.12.4 Sterkte/zwakte

Tabel 2-31: Two-stage Borehole test; sterkte/zwakte-analyse.

Factor	Sterkte	Zwakte
Variabele: - welke? - meting of PTF?	Meting k_v en k_h apart	
Schaal: omvang van de matrix, monstergrootte, effect van anisotropie		Eerder klein meetoppervlak
Relatie van de test tot de matrix	Slecht toepasbaar in grovere grondsoorten (instorten tijdens infiltratie)	
Nauwkeurigheid, gevoeligheid aan randvoorwaarden		
Robuustheid, herhaalbaarheid		
Ervaring en verspreiding		Vooraf gebruikt voor slecht permeabele gronden: testen van hydraulische conductiviteit van gecompacteerd kleilagen
Technische relevantie		
Techniciteit, kwalificatie van de uitvoerder	matig gespecialiseerd	
Tijdsbesteding, rekening houdend met het aantal vereiste herhalingen en kost		Sterk afhankelijk van doorlatendheid In klei duurt het enkele dagen tot weken tot de instroom constant wordt ($k < 10^{-7}$ cm/s)
Economische haalbaarheid		

2.2.1.13 Porous Probe methode (BAT)

Deze methode werd ontwikkeld voor slecht doorlaatbare bodems (10^{-7} m/s of minder).

Omdat deze bodems nooit geschikt zijn voor infiltratie, wordt deze methode niet verder besproken.

2.2.1.14 Tensioinfiltrometer

Tensioinfiltrometrie verschilt essentieel van alle andere meetmethodes. Andere methodes trachten de doorlatendheid van een bodem te bepalen onder aanleg van een hydraulische druk (head), een waterkolom, hetzij als falling head hetzij met constant head. De waterstroming gebeurt dan doorheen alle poriën in de bodem.

Een tensio-infiltrometer laat toe om infiltratiemetingen uit te voeren onder een beperkt negatieve hydraulische potentiaal. Hierdoor wordt infiltratie in de bodem vermeden via grote poriën, preferentiële kanalen zoals krimpscheuren, worm- of oude wortelgaten.

Deze benadering komt tegemoet aan beperkingen van de andere meetmethodes waarbij wel deze 'toevallige' macropositeit die in een relatief beperkt bodemvolume voorkomt, wordt betrokken in de meting.

Deze meting met tensioinfiltrometrie betreft dan ook de doorlatendheid van de bodemmatrix tegen verzadiging aan.

Referenties:

- Coquet Y et al., 2000.
- Wyseure et al., 1997.
- Ejieji et al., 2012.

2.2.1.14.1 Inleiding

Indeling:

in situ; meting onder beperkte negatieve hydraulische potentiaal, meting op oppervlak

Principe:

Meting op oppervlak onder beperkte negatieve hydraulische potentiaal.

Toepassingsgebied:

In kader van:

- Landbouwkundige toepassingen
- Bodem- en hydrologische studies en onderzoeken: waterconserverings-projecten.
- Wetenschappelijk onderzoek

Landen:

De meetmethode duikt op meestal in een wetenschappelijke omgeving in Canada, USA, Frankrijk, Afrika, België, ... De oorspronkelijke technische uitrusting was behoorlijk complex; er werden reeds vereenvoudigde uitvoeringen voorgesteld, op basis van vlot beschikbare materialen.

Bestaande Normering of opname in regelgeving:

Er bestaat geen normmethode.

2.2.1.14.2 Theoretische achtergrond

De methode steunt op het effect van de capillariteit in de grond. Water wordt in grote poriën vastgehouden met een beperkte zuigkracht, een negatieve hydraulische druk. In heel grote poriën is de zuigkracht vrijwel 0. De relatie tussen de zuigspanningen en de diameter van de poriën is beschreven door o.m. Hillel (1998). Ter illustratie: bij zuigspanningen van 0,5 of 2 kPa zullen poriën groter dan resp. 600 μm of 150 μm niet langer gevuld zijn en dus geen water geleiden. M.a.w. zal een meting van de doorlatendheid bij een onderdruk van 0,5 kPa of 5 cm negatieve waterkolom, geen waterstroming meer voorkomen in (equivalente) poriën groter dan 0,6 mm.

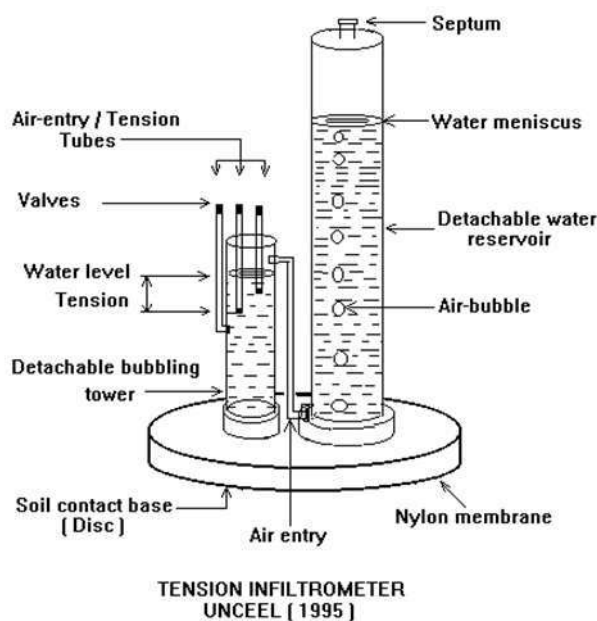
Het contactoppervlak is horizontaal en in die zin wordt in hoofdzaak k_v bepaald.

Het meettraject (debiet en tijd) of meettrajecten kunnen worden herrekend in de (onverzadigde) doorlatendheid volgens een aantal methodes.

Coquet Y et al. (2000) geven een overzicht van de analytische methodes. Naarmate de methode en het gekozen meet- en tijdstraject vereenvoudigt neemt ook de onzekerheid m.b.t. de k -waarde toe (van ca. 20 % naar nagenoeg 80 %).

Een andere herrekeningsprocedure voor de bepaling van hydraulische geleidbaarheid bij bepaalde druk, $k(\psi)$, grijpt terug naar de van Genuchtenparameters berekend voor de USDA-textuurklassen (volgens Carsel et al., 1988). Er wordt hierdoor terug gesteund op parameters die als gemiddelde of mediaanwaarden werden berekend voor bepaalde textuurklassen. In de berekeningsmethode verschijnen op deze wijze empirische factoren. De berekeningsmethode is dan ook niet volledig explicatief. Het is niet duidelijk in welke mate hierdoor fout gegenereerd wordt.

2.2.1.14.3 Methode



Figuur 2-35: Tensio-infiltrrometer

Werkvoorschrift

Uitrusting:

- Tensioinfiltrometer
- Zeer fijn gec calibreerd zand
- Water

Werkwijze:

Een waterverzadigd doorlatend membraan met gekende oppervlakte wordt in contact geplaatst met de bodemoppervlakte. De luchtintreewaarde van het membraan ligt ver onder de onderdruk die aangelegd wordt.

De hydraulische onderdruk ter hoogte van het membraan is instelbaar en een waterreservoir, ingeschakeld volgens het Mariottprincipe, laat toe het debiet van het infiltrerende water in functie van de tijd te volgen.

Teneinde zeker en volledig contact tussen membraan en grondoppervlak te realiseren, wordt soms voorgeschreven om een dunne tussenlaag met zeer fijn gec calibreerd zand aan te leggen.

De plaatsing van het apparaat op de te meten oppervlakte is de meest delicate stap in de procedure:

- Het contactvlak van het membraan met de bodem dient bij plaatsing van het apparaat strikt horizontaal te zijn, zeker bij meting bij potentialen kort tegen saturatie aan, hetgeen hier juist het doel is. Door kantelen van het membraan ontstaan minder lage potentialen, zelfs positieve potentialen, zodat hogere k-waarden worden gemeten.
- Het membraan dient ook in volledig contact te zijn met de bodem; luchtinclusies leiden tot lagere k-waarden.

Algemeen wordt voorgesteld te werken met een onderdruk van 2 cm (Mini Disk Infiltrometer, Decagon, 2014). In bodems met zeer hoge infiltratiecapaciteit wordt een onderdruk van 6 cm aangeraden, en in compacte bodems een onderdruk van 0,5 cm.

Het meettraject op zandleem tot leem zou ca. 5 min. bedragen. Op zware kleigronden kan dit oplopen tot 5 uur.

Fysische randvoorwaarden

Het contactoppervlak van het membraan met de bodem bepaalt de omvang van de bemonsterde bodemoppervlakte. In de kleinere uitvoeringen (Mini Disk Infiltrometer, Decagon) is deze oppervlakte 16 cm². Grotere uitvoeringen bemeten een oppervlakte van 100 cm² (Ref. Eijkelkamp). Nadeel van een groter contactoppervlak is de mogelijke fout bij niet strikt horizontale plaatsing (zie hoger).

In het kader van een onderzoek op basis van de Mini Disc Infiltrometer, met dus een klein contactoppervlak, werd reeds vastgesteld dat de meting met het apparaat wellicht zeer gevoelig is aan niet correcte plaatsing (Bélanger, 2010).

2.2.1.14.4 Sterkte/zwakte

Tabel 2-32: Tensioinfiltrometer; sterkte/zwakte-analyse.

Factor	Sterkte	Zwakte
Variabele:	k_v , met uitsluiting van 'toevallige' macroporositeit	
Schaal: omvang van de matrix, monstergrootte, effect van anisotropie		beperkte monstergrootte; indien groter contactoppervlakte wordt gekozen neemt ook het risico op fout toe.
Relatie van de test tot de matrix	in principe universeel toepasbaar	
Nauwkeurigheid, gevoeligheid aan randvoorwaarden	In termen van overeenkomst met equivalente poriëndiameter	
Robuustheid, herhaalbaarheid		de meetwaarde is zeer gevoelig aan kleine fouten in de opstelling van de uitrusting
Ervaring en verspreiding		Toepassing eerder in het kader van onderzoek
Technische relevantie	synthese	synthese
Techniciteit, kwalificatie van de uitvoerder		Vereist zeer goed opgeleide techniker
Tijdsbesteding, rekening houdend met het aantal vereiste herhalingen en kost		De tijdsbesteding wordt zeer hoog voor zwaardere bodemtexturen en/of compacte bodems
Economische haalbaarheid		Gezien de nodige kwalificaties van de uitvoerder, de tijdsbesteding, en nodige herhalingen voor niet-zandbodems, is dit een kostelijke methode.

2.2.1.15 Bouwer's air-entry permeameter

De air-entry permeameter werd ontwikkeld door Bouwer (Bouwer, 1966; Bouwer & Jackson, 1974).

2.2.1.15.1 Inleiding

Indeling:

in situ; constant head

Principe:

De infiltratiesnelheid van water in een cilindrisch, geïsoleerd stuk bodem, samen met de 'hydraulic head gradient' die de stroming van het water veroorzaakt (afgeleid van de diepte van het 'wetting front' en de waterdruk op dit punt), zijn een maat voor de gesatureerde hydraulische conductiviteit of doorlatendheid.

2.2.1.15.2 Theoretische achtergrond

De k-waarde wordt direct berekend met de wet van Darcy zoals in de Green and Ampt (1911) analyse (Youngs, 2001) waarvan de formule afgeleid is:

$$k = \frac{L(R_R/R_C)^2}{H_s + L - p_a/2} \frac{dh_s}{dt}$$

Met:

h_s	: de hoogte van de waterkolom van op de grond tot in het reservoir
L	: de diepte van het 'wettingfront' bij staalname
dh_s/dt	: de snelheid van de daling van het water
R_R	: de straal van het waterreservoir
R_C	: de straal van de infiltratiecilinder
p_a	: de minimum druk die bereikt wordt in de infiltratiecilinder na afsluiting.

Door het geïsoleerde stuk bodem in de infiltratiecilinder, wordt er k_v bepaald.

2.2.1.15.3 Methode

Werkvoorschrift

Onderstaand werkvoorschrift werd gebaseerd op Mullins & Smith (1991).

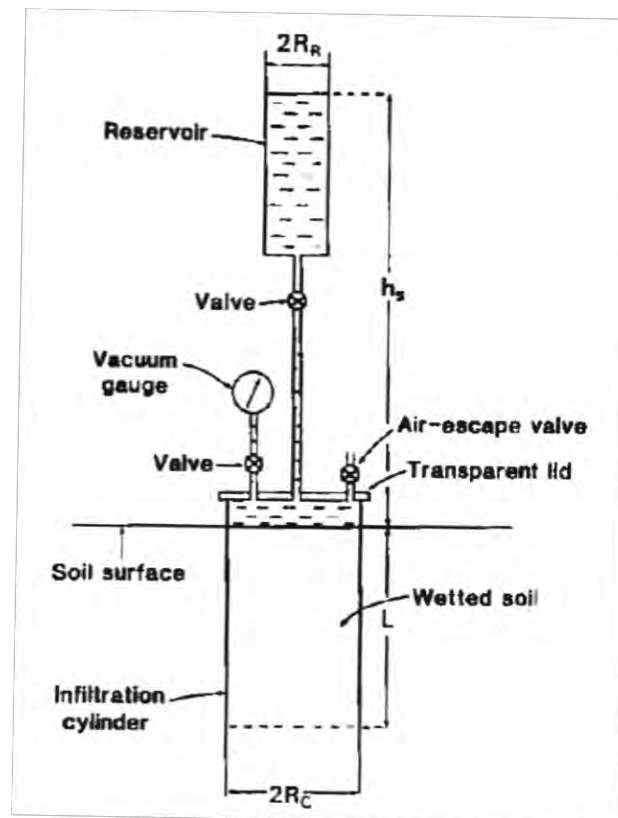
Uitrusting:

- Bouwer's air-entry permeameter
- Water
- Staalnamemateriaal (ev. Edelmanboor) of tensiometer

Werkwijze:

- Drijf de infiltratiecilinder in de grond zodat er nog een klein stuk boven de grond blijft.
- Vul het waterreservoir en zet het kraantje naar onder open

- Vul op deze manier het bovenste deel van de infiltratiecilinder. Laat de lucht ontsnappen via het lucht-ontsnap kraantje tot alle lucht uit de infiltratiecilinder is en sluit dan het kraantje.
- Laat water infiltreren in de grond tot ongeveer een diepte van 100 mm in de infiltratiecilinder. Stop dan met water toe te voegen aan het reservoir. Nu kan de meting beginnen.
- Meet de infiltratiesnelheid door de snelheid van de daling van het water in het waterreservoir te noteren.
- Sluit na deze meting het kraantje van het waterreservoir en zet het kraantje naar de drukmeter open. Deze drukmeter meet de druk van het water op het bodemoppervlak. Deze druk zal dalen totdat hij terug stijgt doordat er lucht uit de grond naar boven zal stijgen. Noteer deze minimum druk (negatief getal) als p_a . Deze p_a is gelijk aan $-h_f$, de druk van het water aan het 'wetting front'.
- Bepaal de diepte van het 'wetting front' op het tijdstip van de meting door staalname of met behulp van een tensiometer



Figuur 2-36: Air-entry permeameter (bron: Mullins & Smith (1991)).

Fysische randvoorwaarden

Aannames:

- De bodem is homogeen
- De bodem is Isotropisch
- De bodem is niet samendrukbaar
- Grond boven het bevochttingsfront is gesatureerd

2.2.1.15.4 Sterkte/zwakte

Tabel 2-33: Bouwer's air-entry permeameter; sterkte/zwakte-analyse.

Factor	Sterkte	Zwakte
Variabele:	Meting van k_v	
Schaal: omvang van de matrix, monstergrootte, effect van anisotropie	Meting op een geïsoleerd stuk bodem	
Relatie van de test tot de matrix		Enkel voor goed doorlaatbare bodems. Enkel indien ring in de grond kan gedreven worden. Dus wat met droge periodes en stenige gronden wanneer ring niet in bodem geraakt?
Nauwkeurigheid, gevoeligheid aan randvoorwaarden		
Robuustheid, herhaalbaarheid		onzekerheid van structuur, bv. in gerijpte klei; wat bij slecht weer ?
Ervaring en verspreiding		slechts experimenteel
Technische relevantie		
Techniciteit, kwalificatie van de uitvoerder	Matig gespecialiseerd	
Tijdsbesteding, rekening houdend met het aantal vereiste herhalingen en kost	30 minuten/ meting	
Economische haalbaarheid		

2.2.1.16 Enkele ring methode

De enkele ring methode bestaat eruit dat een ring een klein stuk in de bodem wordt gebracht zodat er geen water aan de oppervlakte onderdoor kan. In deze ring wordt water gebracht. In eerste instantie om de grond eronder te verzadigen. In tweede instantie zal de meting plaats vinden. De enkele ring methode kan zowel met een falling als een constant head (bv. met marriot principe) uitgevoerd worden. (Smith & Mullins, 1991).

2.2.1.16.1 Inleiding

Indeling:

in situ; falling of constant head, meting op een horizontaal oppervlak.

Principe:

De daling van het waterpeil of het volume geïnfiltreerd water in functie van de tijd over een gekende oppervlakte, is een maat voor de doorlatendheid van de bodem.

Toepassingsgebied:

In kader van:

- Ontwerp Infiltratievoorzieningen of bufferbekkens
- Bodem- en hydrologische studies en onderzoeken
- Wetenschappelijk onderzoek

Landen:

Wereldwijd

2.2.1.16.2 Theoretische achtergrond

De k_{fs} kan met verschillende methodes berekend worden (Verbist et al., 2010).

Voor de **constant head** enkele ring wordt vaak de Reynolds en Elrick (1990) (RE) vergelijking gebruikt:

$$k_{fs} = \frac{q_s}{\pi R_s^2 \{ [H / (C_1 d + C_2 R_s)] + [1 / \alpha^* (C_1 d + C_2 R_s)] + 1 \}}$$

Met	q_s	: steady state flow rate
	R_s	: straal van de ring
	H	: hoogte van de constant head waterkolom
	α^*	: macroscopische lengte van de bodem capillairen
	d	: diepte waarmee de ring in de bodem gedreven is.
	C	: dimensieloze constanten die gelden als $d \geq 0,03m$ en $H \geq 0,05m$ (Reynolds & Elrick, 1990)

Voor de **falling head** enkele ring methode kan de volgende algoritme worden gebruikt:

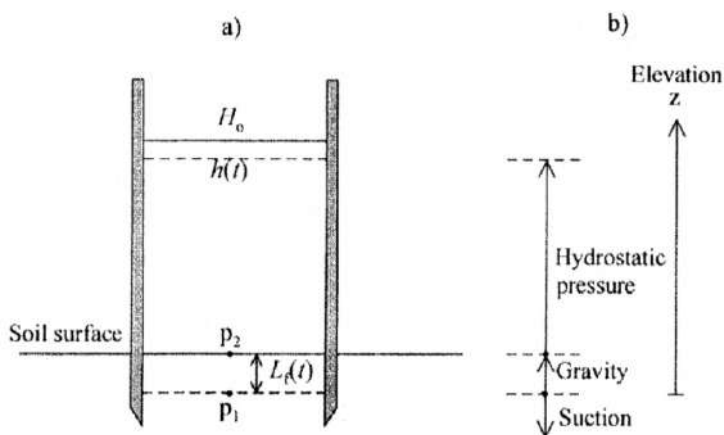
Volgens de wet van Darcy kan de infiltratiesnelheid (V) in onverzadigde grond onder een cilindervormige infiltrometer omschreven worden als:

$$V = k_T \Phi + z + hz$$

Met	k_T	: hydraulische conductiviteit van de transmissie zone (l/t)
	ϕ	: zuigkracht aan de onderkant van de transmissiezone (l)
	z	: diepte van de transmissiezone onder de infiltrometer (l)
	h	: hoogte van het water in de infiltrometer (l)

Hoe dieper de transmissiezone en hoe hoger het vochtgehalte van de bodem, hoe kleiner de invloed van ϕ en h relatief tot z . De hydraulische gradiënt ($i = (\phi + z + h)/z$) wordt dan 1 en de infiltratiesnelheid wordt constant zodat de basis infiltratiesnelheid wordt bereikt (van Hoorn, 1979).

Als we dit in krachten uitdrukken, kan $i = 1$ wordt dit op volgende manier verklaard (Guyonnet et al., 2000):



Figuur 2-37: (a) Schematische voorstelling van een ring infiltrometer.
(b) componenten van de hydraulische gradiënt. (bron: Guyonnet et al., 2000).

Als we aannemen dat het infiltratiefront recht is (Green and Ampt, 1911) en we kijken naar het verschil in hydraulic head in de verzadigde zone onder de ring, kunnen we de hydraulische gradiënt hieruit afleiden. In Figuur 2-37b wordt de hydraulische gradiënt voorgesteld met zijn componenten. Als de 'elevation origin' wordt gelijkgesteld aan de basis van de gesatureerde zone, wordt de 'hydraulic head' in punt p_1 gereduceerd tot de matrixpotentiaal aan het 'wetting front' (wetting front potential):

$$h_{p1} = \psi_f$$

Met	ψ_f	: de negative 'wetting front potential' die van kracht is op het infiltratiefront.
-----	----------	--

De hydraulic head in punt p_2 (h_{p2}) kan dan gelijk gesteld worden aan:

$$h_{p2} = L_f(t) + h(t)$$

Met	$L_f(t)$	: de dikte van het infiltratiefront = de elevation head
	$h(t)$	: hydrostatische druk

Hierdoor kan de hydraulische gradiënt $i(t)$ gedefinieerd worden als:

$$i(t) = \psi f - Lf(t) + h(t)Lf(t)$$

Bij de start van de infiltratie, is de dikte van het infiltratiefont ($L_f(t)$) nog klein. Hierdoor wordt de infiltratie gedomineerd door de zuigkracht en de hydrostatische druk. Als $L_f(t)$ groter wordt, zal $i(t)$ echter naar een waarde van -1 benaderen (zwaartekracht drainage).

Dus voor verzadigde bodem mogen we het volgende aannemen:

$$V \cong K_T \cong K_S$$

Combinatie van k_h en k_v wordt bepaald met overwicht van k_v .

2.2.1.16.3 Methode

Werkvoorschrift

De enkele ring methode kan zowel uitgevoerd worden met een constant head als een falling head.

Uitrusting:

- Metalen cilinder
- materiaal om de ring in de grond te drijven.
- Constant head: Mariottesysteem; falling head: vlotter met meter en houder of meter.
- Water
- Chronometer
- Grind, zand of plastic voor op bodem van cilinder.

Werkwijze:

Bij beide methodes wordt er een ring gelijkmatig enkele centimeters in de bodem gedreven.

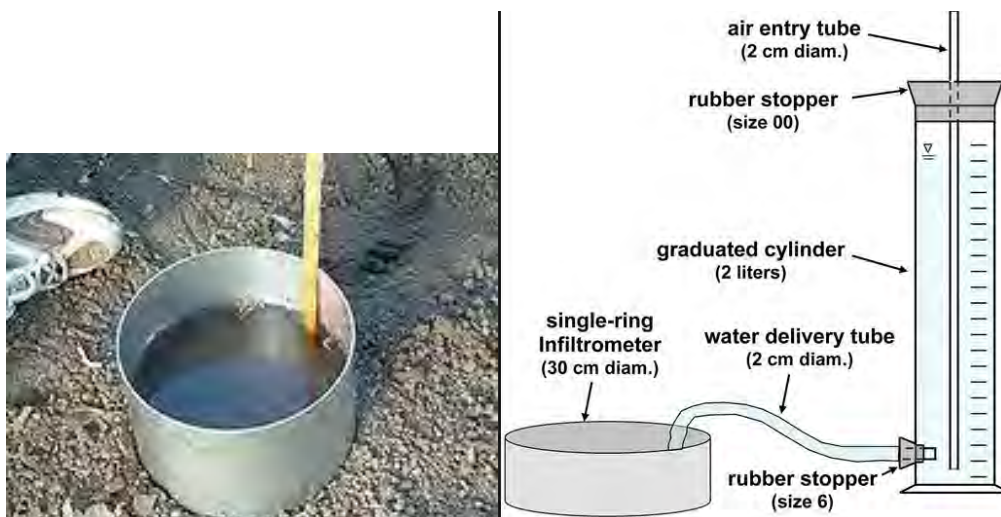
Met constant head:

Deze methode wordt uitgevoerd met een Mariottesysteem zoals teruggevonden in de Guelphpermeameter (Verbist et al., 2010). Hierdoor wordt er een constant waterpeil in de ring behouden. Op het reservoir kan dan afgelezen worden hoeveel water er nodig was om het waterniveau constant te houden en dus hoeveel water er in de grond geïnfiltreerd is.

Met falling head:

Hierbij wordt er water rechtstreeks in de ring gegoten. Hierbij kan men best een beschermende laag op het bodemoppervlak aanbrengen onder de vorm van een plastic folie, een laag grind of zand zodat er geen slib wordt gevormd die de poriën kan sluiten.

Bij beide methodes noteert men de hoeveelheid water die per tijdseenheid (afhankelijk van infiltratiesnelheid) infiltreert. Als men 3 opeenvolgende metingen heeft waarbij er een constante hoeveelheid infiltreert, kan men de meting starten.



*Figuur 2-38: enkele-ring infiltrometers links: falling head, rechts: constant head.
(Green et al. 2008)*

Fysische randvoorwaarden

Bij traag infiltrerende grond en vooral bij warm weer, moet ook rekening gehouden worden met het geëvaporeerde water vanuit de ring. Hiervoor werden methodes ontwikkeld waarbij de ring afgesloten werd (sealed enkele ringmethode).

Om de fouten door laterale stroming te verkleinen, moet er rekening mee gehouden worden dat de ring diameter groot genoeg is (Wu et al., 1997). Lai en Ren (2007) vonden dat de k -waarde stabiliseerde bij een ringdiameter groter dan 20 centimeter (Verbist et al., 2010).

Aannames:

- De bodem is homogeen, isotroop en niet samendrukbaar
- De bodem achter het bevochtigingsfront is gesatureerd.
- Er is geen lek tussen de ring en de bodem.

Reynolds and Elrick (1990) vergelijking (constant head):

- $0,3 < d/R_s < 1$
(verhouding diepte waarmee de ring in de grond gebracht is en de straal van de ring)
- Er mogen geen plassen gevormd zijn in de buurt van de ring.

2.2.1.16.4 Sterkte/zwakte

Tabel 2-34: Enkele ring methode; sterkte/zwakte-analyse.

Factor	Sterkte	Zwakte
Variabele:	Meting van k_v en k_h , vooral k_v .	
Schaal: omvang van de matrix, monstergrootte, effect van anisotropie	Hoe groter de ring, hoe groter stuk bodem er getest wordt.	
Relatie van de test tot de matrix	universeel toepasbaar MAAR oppassen voor verdamping bij traag infiltrerende bodems	
Nauwkeurigheid, gevoeligheid aan randvoorwaarden	RE: ongevoelig voor errors in d , R_s en H ; gevoelig aan voorwaarde dat $0,3 < d/R_s < 1$ en er mogen geen plassen gevormd zijn in de buurt van de ring.	
Robuustheid, herhaalbaarheid		onzekerheid van structuur, bv. in gerijpte klei; wat bij slecht weer ?
Ervaring en verspreiding	Wijd verspreid	
Technische relevantie		
Techniciteit, kwalificatie van de uitvoerder	Falling head: Weinig gespecialiseerd Constant head: matig gespecialiseerd	
Tijdsbesteding, rekening houdend met het aantal vereiste herhalingen en kost		
Economische haalbaarheid		

2.2.1.17 Dubbele ring methode

2.2.1.17.1 Inleiding

Indeling:

in situ; falling head of constant head, meting op een horizontaal oppervlak

Principe:

De daling van het waterpeil in functie van de tijd over een gekende oppervlakte, is een maat voor de doorlatendheid van de bodem. Door de grond onder het bodemoppervlak tussen binnen en buitenring te verzadigen, wordt het effect van laterale stroming ten gevolge van wegzijging beperkt (zie Figuur 2-39).

Toepassingsgebied:

In kader van:

- Landbouwkundige toepassingen: irrigatie, drainage
- Ontwerp Infiltratievoorzieningen of bufferbekkens
- Bodem- en hydrologische studies en onderzoeken: kwel vanuit waterlopen, kanalen, reservoirs of afvalwaterlagunes, effecten van grondbewerking, bestuderen van afvoerverschijnselen, waterbergingsproblemen (bv bij sportvelden).
- Milieuonderzoek: verplaatsing van milieuverontreinigende oplossingen, meststoffen of radioactieve afvalstoffen in het grondwater, uitloging onder afval-opslagplaatsen.

Landen:

Wereldwijd

Bestaande Normering of opname in regelgeving:

ASTM D3385-03: Standard Test Method for Infiltration Rate of Soils in Field Using Double-Ring Infiltrometer (constant head)

DIN 19862 blad 7 (Duitsland)

2.2.1.17.2 Theoretische achtergrond

Constant head:

Voor de constant head methode wordt verwezen naar de theoretische achtergrond van de enkele ring methode (2.2.16.2).

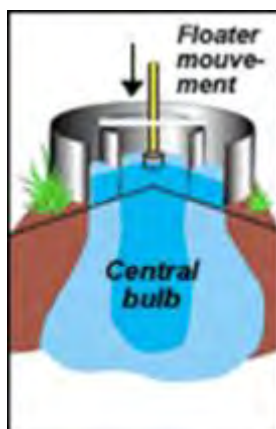
Falling head :

De k_{fs} kan met verschillende methodes berekend worden (Verbist et al., 2010).

In de handleiding van Eijkelkamp wordt voorgesteld om de Green & Ampt (1911) vergelijking te gebruiken. Deze werd afgeleid van de wet van Darcy en resulteert in de volgende formule:

$$k_{fs} = \frac{K(H_w + L - H_f)}{L}$$

Met	K	: de bijna-verzadigde doorlatendheid (L/T)
	H_w	: de dikte van de waterlaag op de bodem (L)
	L	: diepte van het bevochtgingsfront (L)
	H_f	: de drukpotentiaal aan het bevochtgingsfront (L)



*Figuur 2-39: Infiltratie van water onder een dubbele ring.
(bron: <http://agronomie.sdec-france.com>)*

Door de grond onder het bodemoppervlak tussen binnen- en buitenring te verzadigen, wordt het effect van laterale stroming ten gevolge van wegzijging beperkt. Hierdoor wordt k_v bepaald (zie Figuur 2-39).

2.2.1.17.3 Methode

Werkvoorschrift



*Figuur 2-40: 3 Meetsets voor de dubbele ring methode
(bron: <https://www.eijkelkamp.com>)*

Uitrusting:

- 2 ringen van verschillende diameter
- Materiaal om ringen in de grond te drijven
- Constant head: marriotesysteem; falling head: Vlotter met meter en houder of enkel meter
- Water
- Chronometer
- Grind, zand of platstiek voor op de bodem van de binnenste ring

Werkwijze:

Falling head:

Bron: 09.04 Dubbele ringinfiltrometer: gebruiksaanwijzing (Eijkelkamp)

- Selecteer een representatieve plaats op de onderzoekslocatie waarbij verschillende ringinfiltrometers 2 à 10 m uit elkaar geplaatst worden, afhankelijk van de terreinomstandigheden. Plaats de binnenring met de snijrand op de grond. Verwijder voorzichtig eventuele takjes of stenen die zich onder de rand bevinden. Bij een meting beneden maaiveld moet de betreffende bodemlaag in een profielkuil worden vrijgemaakt.
- Sla de infiltratiering gelijkmatig verticaal ongeveer 5 cm in de grond. Zorg er voor dat er zo weinig mogelijk bodemverstoring optreedt.

- De plaatsingsdiepte van de ring is zo klein mogelijk om bodemverstoring te voorkomen. Plaats de ringen in ieder geval tot onder een eventueel afwijkende toplaag van de bodem, zoals een geroerde toplaag, korst of bodemlaag met macro-poriën.
- Indien tijdens de installatie enige ruimte is ontstaan tussen de bodem en de ring, duw de grond dan weer op zijn plaats. Een eventueel verstoorde korst kan hersteld worden met bentoniet of ander bodemmateriaal.
- Zet de bijbehorende buitenring met de snijrand op de grond rondom de binnenring, en Hamer de buitenring in de grond, even diep als de binnenring (zie Figuur 2-40)
- Plaats de meetbrug inclusief meetstang en vlotter op de binnenring. Indien er vegetatie binnen de ringen aanwezig is die de meting kan beïnvloeden, bijvoorbeeld doordat de vlotter niet vrij kan bewegen, verwijder deze dan zonder de bodemstructuur te verstoren.
- Vul eerst de buitenring en direct daarna de binnenring met water tot een hoogte van ongeveer 5 à 10 cm, en start direct de meting ter bepaling van het infiltratieverloop (zie volgend punt).
- De hoogte van het water in de infiltratieringen moet in principe zo klein mogelijk zijn i.v.m. zo verticaal mogelijke infiltratie. De ringen mogen niet droogvallen. Een handige waterhoogte is daarom 5 à 10 cm.

Om het grondoppervlak te beschermen tijdens het ingieten van water is het nodig een beschermende laag te gebruiken, zoals een plastic folie, stuk jute, spons of 1 - 2 cm dikke laag grof zand of grind. Het is ook mogelijk de hand op de grond te leggen en daarop te gieten.

Zorg ervoor genoeg water bij de hand te hebben. Het vullen van één paar ringen met 10 cm water kost ongeveer 25 liter.

Opmerkingen:

- o Wanneer alleen de infiltratiecapaciteit van verzadigde grond bepaald wordt, kan de grond eventueel vooraf verzadigd worden (door water in de ringen te zetten) zonder te meten.
- o Gebruik voor een optimaal resultaat water van een zelfde kwaliteit en temperatuur als het water in het werkelijke systeem waarvoor de infiltratiecapaciteit bepaald wordt.
- Noteer bij de start van de meting de tijd en de beginstand van het water in de binnenring (referentie-niveau) zoals die op de meetstang af te lezen is.
- Bepaal vervolgens in een bepaald tijdsinterval de daling van de waterspiegel in de binnenring. Noteer telkens zowel de tijd als het waterniveau. Meet met een kort tijdsinterval tijdens het begin van de meting (bijvoorbeeld 1-2 min), en een langer interval aan het eind van de meting (bijvoorbeeld 20 à 30 min, afhankelijk van de grondsoort).

- Zorg ervoor dat de infiltratieringen tijdens de metingen niet droogvallen. Voeg extra water toe, bijvoorbeeld telkens wanneer er nog enkele centimeters water in de ringen staat. Noteer de nieuwe waterstanden.
- Houd het waterniveau in binnen- en buitenring gelijk. Bij een hoger waterniveau in de buitenring neemt de infiltratiesnelheid in de binnenring namelijk af. Bij een lager waterniveau in de buitenring neemt de bufferende werking tegen zijdelings wegzijgen af.
- Beëindig de meting indien de infiltratiesnelheid een nagenoeg constante waarde heeft bereikt. Vaak wordt een variatie van $< 10\%$ binnen een bepaalde tijdstap als constant beschouwd. Dit kan afhankelijk van de grondsoort binnen 1 à 2 uur optreden, of in uitzonderlijke gevallen pas na een dag.

Constant head:

Hierbij worden dezelfde voorbereidingen getroffen als bij de falling head methode. Enkel wordt in de middelste ring een marriotte systeem geïnstalleerd ipv gewoon water in te gieten. In de middelste ring wordt dan een constante waterkolom behouden.

Fysische randvoorwaarden

Bij traag infiltrerende grond en vooral bij warm weer, moet ook rekening gehouden worden met het geëvaporeerde water vanuit de binnenste ring. Hiervoor werden methodes ontwikkeld waarbij de ring afgesloten werd (sealed dubbele ring methode).

Aannames:

- De bodem is homogeen, isotroop en niet samendrukbaar
- Bodem achter het bevochtigingsfront is gesatureerd
- Er mag geen lek zijn tussen de ring en de bodem
- De stroomrichting vanuit de binnenste ring is enkel verticaal

2.2.1.17.4 Sterkte/zwakte

Tabel 2-35: Dubbele ring methode sterkte/zwakte-analyse.

Factor	Sterkte	Zwakte
Variabele:	Meting van k_v	
Schaal: omvang van de matrix, monstergrootte, effect van anisotropie	Relatief grote oppervlakte Hoe groter de binnenring, hoe representatiever	
Relatie van de test tot de matrix	universeel toepasbaar maar bij lage doorlatendheden opgepast voor verdamping!	
Nauwkeurigheid, gevoeligheid aan randvoorwaarden		Zeer gevoelig aan variatie
Robuustheid, herhaalbaarheid		onzekerheid van structuur, bv. in gerijpte klei; wat bij slecht weer ?
Ervaring en verspreiding	Normering, wereldwijde verspreiding	
Technische relevantie		
Techniciteit, kwalificatie van de uitvoerder	Niet gespecialiseerd	
Tijdsbesteding, rekening houdend met het aantal vereiste herhalingen en kost		
Economische haalbaarheid	+/-1650 euro (3 sets)	

2.2.1.17.5 Vergelijking tussen enkele en dubbele ring methode

Er werden reeds verschillende studies uitgevoerd naar de betekenis of meerwaarde van de buitenste ring van de dubbele ring methode. Bepaalde studies (Bower et al., 1951; Schiff, 1953) concludeerden dat deze ring de laterale beweging van het water uit de binnenste ring reduceert en de methode dus een meer accurate waarde van de verticale infiltratiesnelheid geeft. Andere studies (Burgy & Luthin, 1956; Verbist et al., 2010) vonden geen significant verschil tussen waarden bekomen met een enkele of dubbele ring. Een reden hiervoor zou kunnen zijn dat de eerste studies in gelaagde grond uitgevoerd werden in tegenstelling tot de andere proeven die in homogene grond uitgevoerd werden (Burgy & Luthin, 1956). Indien een minder permeabele laag grond onder de geteste laag voorkomt, wordt de laterale flow overheersend. Het effect van de dubbele ring wordt hier dus belangrijk.

Men moet bij het gebruik van de enkele ring er wel op letten dat de ring groot genoeg is, diep genoeg in de bodem gedreven wordt en er voldoende herhalingen worden uitgevoerd (Wu et al., 1997; Lai & Ren, 2007).

Studies uitgevoerd in homogene bodem vonden uitdrukkelijk geen verschil tussen waarden gemeten met enkele en dubbele ring (Burgy & Luthin, 1956; Verbist et al., 2010).

2.2.1.18 Simplified Falling Head technique

Bij de meeste in situ veldmethoden om de k_{fs} te bepalen van de onverzadigde zone, wordt er gewacht tot er een constante stroomsnelheid bereikt is van het water in de bodem. Deze methoden zijn zeer geschikt voor permeabele bodems. Maar omdat het bereiken van dit evenwicht zeer lang (weken tot maanden) kan duren bij slecht permeabele bodems, werd er gezocht naar een manier om de k_{fs} te benaderen door middel van berekeningen op basis van de early time transient flow (stroom niet constant in de tijd) (Fallow et al., 1994; Elrick et al., 1995; Odell et al., 1998). Hiermee werden zowel constant head (Fallow et al., 1994; Odell et al., 1998) als falling head technieken (Fallow et al., 1994; Elrick et al., 1995; Bagarello et al. 2004) ontwikkeld. De meetmethode in het veld is ongeveer hetzelfde als bij de enkele ring methode. Enkel moet niet gewacht worden tot de stroomsnelheid van het infiltrerende water constant is.

2.2.1.18.1 Inleiding

Indeling:

in situ; falling head, meting op een horizontaal oppervlak

Principe:

De tijd waarop een vooraf bepaald volume water in een ring met gekende diameter volledig in de bodem (begrensd door de ring die in de bodem gedreven is) geïnfiltreerd is, is een maat voor de doorlatendheid van de bodem. Hiervoor moet de parameter α^* (Elrick et al., 1989; Elrick & Reynolds, 1992) van Gardner's exponentieel model geschat worden. Deze methode houdt rekening met de zwaartekracht.

Toepassingsgebied:

In kader van:

- Wetenschappelijk onderzoek

Landen:

Italië

Historiek:

Fallow et al. (1994) ontwikkelde eerst constant head en falling head early-time transient flow enkele ring methodes. Hierna werden nog varianten hierop gemaakt door andere onderzoekers.

- **Early time constant-head technique (ECH)**

Fallow et al. (1994), Odell et al. (1998).

Elrick et al. (1995, 2002)

- **Early time falling head method (EFH)**

Fallow et al. (1994)

- **Sequential Early-Time Constant-Head/ falling head method (ECFH)**

Elrick et al. (1995)

- **Simplified Falling Head technique (SFH)**

Beschrijving techniek: Bagarello et al. (2004).

Vergelijking met andere methodes: Bagarello & Sgroi (2007), Bagarello et al. (2012).

2.2.1.18.2 Theoretische achtergrond

De volgende afleidingen worden beschreven in Bagarello et al. (2004).

Early time constant-head method (ECH)

Initieel is de waterflow in onverzadigde grond in één richting, gecontroleerd door pressure head en capillaire sorptie en niet onderhevig aan zwaartekracht. Dus de cumulatieve infiltratie van het water (I) kan beschreven worden als:

$$I = S_H t^{1/2} \quad [1]$$

Met	S_H	: soil sorptivity for a constant head ($L T^{-1/2}$)
	H	: hoogte waterkolom (L)
	t	: tijd (T).

Bij een constant head meting is S_H niet variabel en kan beschreven worden als (White & Sully, 1987; Fallow et al., 1994)

$$S_H = \left[\frac{(\Delta\theta)\phi_m}{b} + 2(\Delta\theta)k_{fs}H \right]^{1/2} \quad [2]$$

Met	$\Delta\theta$	: het verschil tussen θ_{fs} en θ_i ,
	θ_{fs}	: vochtgehalte waterverzadigde bodem,
	θ_i	: het initiële vochtgehalte
	ϕ_m	: de veld gesatureerde matric flux potentiaal
	b	: een constante = 0,55 (White & Sully, 1987)
	k_{fs}	: de veld gesatureerde hydraulische conductiviteit

De eerste term in vergelijking [2] geeft de sorptivity, S_0 , waarbij $H = 0$ en de tweede term geeft de toename van de sorptivity gecreëerd door de waterkolom boven de grond, H .

Door middel van de Green en Ampt (1911) (GA) vergelijking kan S_H voor constant head condities ook als volgt geschreven worden:

$$S_H = [2k_{fs}(\Delta\theta)(H - \Psi_f)]^{1/2} \quad [3]$$

Met ψ_f (L) = de druk van het grondwater aan het bevochttingsfront. ψ_f is negatief. Voor de vierkantsvergelijking GA voor hydraulische conductiviteit verhouden Φ_m en ψ_f zich als:

$$\Phi_m = -k_{fs}\Psi_f \quad [4]$$

Het enige verschil tussen vergelijking [2] en [3] is dat in [3] door de GA vergelijking, b gelijk gesteld wordt aan 0,5. Als we vergelijking [2] gebruiken voor K_{fs} te berekenen bekomen we:

$$k_{fs} = \frac{S_H^2}{(\Delta\theta) \left(2H + \frac{1}{b\alpha^*} \right)} \quad [5]$$

Met het gebruik van vergelijking [3] bekomen we:

$$k_{fs} = \frac{S_H^2}{2(\Delta\theta) \left(H + \frac{1}{\alpha^*} \right)} \quad [6]$$

$$\text{Met} \quad \alpha^* = \frac{K_{fs}}{\Phi_m} = -\frac{1}{\psi_f} \quad [7]$$

(Elrick and Reynolds, 1992)

Vergelijking [5] en [6] kunnen gebruikt worden om k_{fs} te bepalen met de gegevens van een early time constant head experiment. (Fallow et al., 1994; Odell et al., 1998; Elrick et al., 1995, 2002)

Fallow et al. (1994) bepalen S_H met behulp van de helling van het liniare gedeelte van de grafiek van I versus $t^{1/2}$, meten $\Delta\theta$ gedurende het experiment en gebruiken de schatting van α^* uit Elrick & Reynolds (1992).

Early time falling head methode (EFH)

Gedurende early time falling head (EFH) infiltratie, is S_H variable. Hierdoor vertoont deze geen lineaire verhouding in de grafiek van I versus $t^{1/2}$ (Odell et al., 1998). De cumulatieve infiltratie kan als volgt beschreven worden in functie van H (Elrick et al., 1995):

$$I(t) = \frac{a}{A} [H_0 - H(t)] \quad [8]$$

Met	a (L ²)	: de oppervlakte van de falling head buis
	A (L ²)	: de oppervlakte van het infiltrerende bodem oppervlak.
	H_0 (L)	: de hoogte van de waterkolom op $t = 0$

Vergelijking [2] werd door Fallow et al. (1994) herschreven voor het falling head infiltratieproces gebaseerd op een opeenvolging van constant-head condities:

$$I(t) = \left[2(\Delta\theta)K_{fs}H(t) + \frac{(\Delta\theta)\Phi_m}{b} \right]^{1/2} t^{1/2} \quad [9]$$

De impact van de falling head wordt omschreven door de term $H(t)$.

Wanneer vergelijking [8] in vergelijking [9] wordt vervangen, krijgt men (Fallow et al., 1994):

$$t^{1/2} = \frac{a}{A} \frac{[H_0 - H(t)]}{\left[2(\Delta\theta)K_{fs}H(t) + \frac{(\Delta\theta)\Phi_m}{b} \right]^{1/2}} \quad [10]$$

In de methode van Fallow et al. 1994 worden K_{fs} en Φ_m gelijktijdig bepaald door EFH data in vergelijking [10] te integreren in een non-lineaire, kleinste kwadraat procedure.

Sequential Early-Time Constant-Head/ falling head methode (ECFH)

Omdat H_0 moeilijk te bepalen is, ontwikkelde Elrick et al. (1995) de Sequential Early-Time Constant-Head/ falling head methode (ECFH) waarbij een initiële periode van constant-head infiltratie werd toegevoegd met $H = H_0$. Daarna in 2002 gebruikte Elrick et al. de GA vergelijking om een nieuwe vergelijking af te leiden voor de cumulatieve infiltratie (I) in falling-head condities. Deze negeert de zwaartekracht.

$$t = -\frac{(a/A)}{K_{fs}(\Delta\theta)} \left\{ I(t) + (\Delta\theta)B1 \ln \left[1 - \frac{I(t)}{(\Delta\theta)B1} \right] \right\} \quad [11]$$

Met:

$$B1 = \frac{(a/A)(H_0 - \Psi_f)}{\Delta\theta} \quad [12]$$

Philip (1992) leidde een GA vergelijking af waar wel rekening gehouden wordt met de zwaartekracht:

$$t = \frac{(\Delta\theta)}{K_{fs}B2} \left\{ \frac{I(t)}{\Delta\theta} - \frac{H_0 - \Psi_f}{B2} \ln \left[1 + \frac{I(t)B2}{(\Delta\theta)(H_0 - \Psi_f)} \right] \right\} \quad [13]$$

Met:

$$B2 = 1 - \frac{(\Delta\theta)}{(a/A)} \quad [14]$$

Vergelijkingen [11] en [13] zijn geldig tot de falling head tot nul gezakt is.

Simplified Falling Head technique (SFH)

Bij de early time technieken moet onderscheid gemaakt worden tussen methodes die zowel een meting van K_{fs} en ϕ_m of α^* (EFH en ECFH methodes) en methodes die werken met een schatting van α^* (ECH methode).

Uit experimenten blijkt dat de schatting van K_{fs} uit early time experimenten meer stabiel is dan de schatting van α^* met deze experimenten (Elrick et al., 2002) en K_{fs} niet in grote mate beïnvloed wordt door de gebruikte early-time methode (Odell et al., 1998). Hierdoor kan besloten worden dat er een voorkeur kan gegeven worden aan de methodes die een schatting gebruiken van α^* .

Bagarello et al. (2004) ontwikkelde de Simplified Falling Head methode waarbij α^* op voorhand moet ingeschat worden. Deze methode gebruikt een ring (waarbij $a/A=1$) die voor een deel in de bodem gedreven wordt. Hierin wordt een klein volume water gebracht V (L^3) dat niet groter is dan het water dan in het ingesloten deel bodem door de ring kan geïnfiltreerd worden.

De tijd die nodig is om al het water in de bodem te laten dringen wordt gemeten t_a (T). op $t = t_a$, $I(t_a) = H_0 = D$ met $D = V/A$ (L). Vergelijking [13] met vergelijking [7] ingevoegd wordt dan:

$$K_{fs} = \frac{(\Delta\theta)}{(1 - \Delta\theta)t_a} \left[\frac{D}{(\Delta\theta)} - \frac{\left(D + \frac{1}{\alpha^*}\right)}{(1 - \Delta\theta)} \ln \left(1 + \frac{(1 - \Delta\theta)D}{\left(\Delta\theta \left(D + \frac{1}{\alpha^*}\right)\right)} \right) \right] \quad [15]$$

Hierbij moet dus een schatting van α^* gebruikt worden en moeten via een meting t_a en $\Delta\theta$ bepaald worden.

Tabel 2-36: Schatting van α^ (Elrick & Reynolds, 1992)*

α^* (cm^{-1})	Soil Structure and Texture
0,36	Coarse sands and highly structured soils
0,12	Most structured soils and medium sands
0,04	Unstructured fine textured soils and fine sands
0,001	Compacted clays (e.g. clay liners)

Omdat op voorhand wordt berekend hoeveel water er mag gebruikt worden, zodat de infiltratie van het water niet dieper kan gaan dan dat de ring in de bodem gebracht is, wordt enkel k_v bepaald. Dit kan/moet echter gecheckt worden door de diepte van het 'bevochtigingsfront' (wetting front, $d_w(L)$) te berekenen op het eind van elk experiment met volgende formule:

$$d_w = -\frac{V}{A(\Delta\theta)} \quad [16]$$

d_w moet kleiner zijn dan de lengte van het deel de ring dat in de bodem gedreven is voor het uitvoeren van het experiment.

De resultaten van deze methode werden vergeleken met de resultaten van een meting met een constant head enkele ring en bleken een maximale discrepancy van +/- een factor 2, hetgeen te verwaarlozen is voor de meeste praktische toepassingen.

2.2.1.18.3 Methode

Werkvoorschrift

Simplified falling head methode

Uitrusting:

- Ring met gekende diameter en hoogte
- Chronometer
- Water
- Maatbeker
- Meter
- Spatel

Werkwijze:

- Neem een ongeroerd staal van de laag van 0 tot 0,05 m en 0,05 tot 0,10 m en bepaal hiervan de droge schijnbare dichtheid ρ_b (Mg/m^3) en het vochtgehalte van de bodem bij het bemonsteren, θ_i . Op het geroerde staal kan dan de bodemtextuur bepaald worden door middel van de korrelverdeling (particle size distribution), dit ter bepaling van $\Delta\theta$ en α^* .
- Indien het over zeer harde grond gaat, kan twee tot zes dagen voor het experiment de grond bevochtigd worden met 10 tot 12 liter water.
- Bepaal het volume water dat in de ring gegoten kan worden aan de hand van $\Delta\theta$ en d (de lengte van de ring die in de grond gebracht is). Hiermee kan de lege ruimte in de bodem begrensd door de ring berekend worden. Het volume te gebruiken water moet dan kleiner of gelijk zijn aan het berekende volume lege ruimte in de bodem.
- Drijf een ring met gekende diameter en hoogte in de grond en bepaal hoe diep de ring in de grond gedreven is. Verwijder de overtollige grond tegen de binnenwand van de ring met een spatel. Zo wordt het contact tussen de bodem en de ring verbeterd en wordt er vermeden dat het water een preferentieel pad langs de ring gaat volgen.
- Giet het water zo snel mogelijk in de ring (binnen de 5 seconden).
- Meet de tijd wanneer de helft van het water in de bodem geïnfiltreerd is $t_{0,5a}$.
- Meet de tijd wanneer alle water in de grond geïnfiltreerd is t_a .
- Door middel van deze gegevens kan met vergelijking 15 k_{fs} berekend worden.

Kwaliteitscontrole:

Neem na afloop van het experiment staal van de bodem in de ring en bepaal het bevochtigingsfront. Zo kan bepaald worden of de waterstroming zich enkel in de ring bevond en er dus enkel een verticale stroming plaats vond.

Fysische randvoorwaarden

Methode was ontwikkeld voor slecht permeabele bodem, maar kan ook uitgevoerd worden in goed permeabele bodem.

2.2.1.18.4 Sterkte/zwakte

Tabel 2-37: Simplified Falling Head technique; sterkte/zwakte-analyse.

Factor	Sterkte	Zwakte
Variabele:	Meting van k_v en k_h , vooral k_v	Schatting van α^*
Schaal: omvang van de matrix, monstergrootte, effect van anisotropie	Voor goed doorlaatbare gronden heeft ringgrootte geen effect op k_{fs} (Bagarello et al., 2012)	Voor slecht doorlaatbare gronden heeft ringgrootte wel een effect op k_{fs} (Bagarello et al., 2012)
Relatie van de test tot de matrix	Geschikt voor alle bodemtypes	Zeer harde bodemtypes zijn iets moeilijker want ring moet voor een deel in de grond gedreven worden.
Nauwkeurigheid, gevoeligheid aan randvoorwaarden		
Robuustheid, herhaalbaarheid	Eenvoudige uitvoering. Kortere tijdspanne dan technieken die een constant flow vereisen	Onzekerheid van structuur, bv. In gerijpte klei; wat bij slecht weer? Θ_i moet ook op voorhand bepaald worden in het labo.
Ervaring en verspreiding		slechts experimenteel?
Technische relevantie		
Techniciteit, kwalificatie van de uitvoerder	Weinig gespecialiseerd	
Tijdsbesteding, rekening houdend met het aantal vereiste herhalingen en kost	Meting op zich verkort in tijd maar ook labo testen nodig op voorhand.	
Economische haalbaarheid		

2.2.2 Laboratoriummethodes

2.2.2.1 Algemene opmerkingen

In onderstaande tekst staan verschillende ex situ meetmethodes beschreven voor de bepaling van de doorlatendheid van bodem. Bij de meeste methodes wordt er echter niet dieper ingegaan op de **staalname**. Hiervoor bestaan er verschillende methodieken.

- Eerst is er de steekring waarbij een ring zo gelijkmatig mogelijk in de grond wordt geduwd. Deze ring kan rechtstreeks in het toestel geplaatst worden. Het gevaar is echter dat het water een preferentiële weg vindt tussen het staal en de bemonsteringsring. Om dit te vermijden kan men de randen van de ring dichtlijmen.
- Een andere manier om dit te vermijden is te werken met een flexible wall permeameter waarbij de wanden flexibel zijn en dus nauw aansluiten op het staal (ASTM D5084).

Een andere keuze die gemaakt moet worden is de mate van **ingesloten lucht** in het monster. Dit kan men vermijden door ontlucht water te gebruiken voor de test. Ook de werkwijze voor de verzadiging speelt hierbij een belangrijke rol. Verschillende manieren van verzadiging zijn: onderdompelen in een waterbak, in de permeameter zelf door doorstroming van water of in een exsiccator waarin een vacuum gecreëerd wordt. Respectievelijk zorgen ze voor een stijgende graad van ontluchting van het staal. Ook het gebruikte water kan al dan niet ontlucht worden. Om deze beslissingen te nemen moet men een keuze maken of men meer de natuurlijke toestand wil nagaan (regen is ook niet ontlucht) of dat men de maximale doorlaatbaarheid van het staal wil meten.

2.2.2.2 Laboratoriummethode: Varying Moment Permeameter

Deze permeameter werd oorspronkelijk ontwikkeld om de hydraulische conductiviteit te meten van onverzadigde gronden, maar kan aangepast worden om ook de hydraulische conductiviteit van verzadigde gronden te meten. Bij deze permeameter wordt water horizontaal in de bodemkolom geïnfiltreerd door middel van een positieve drukhoogte in de kolom met onverzadigde grond. Hierbij meet men de hoeveelheid van het verschil in moment van het vooruitgaande waterprofiel ten opzichte van het vlak waardoor infiltratie plaatsvindt.

2.2.2.2.1 Inleiding

Indeling:

ex situ; horizontale infiltratie

Principe:

Door middel van een positieve drukhoogte infiltreert men water in een horizontale kolom met onverzadigde grond. Hierbij meet men de hoeveelheid van het verschil in moment van het vooruitgaande waterprofiel ten opzichte van het vlak waardoor infiltratie plaatsvindt.

Bestaande Normering of opname in regelgeving:

Niet genormeerd

2.2.2.2 Theoretische achtergrond

Uit de wet van darcy en de vergelijking van Philip (1957) die de term sorptivity introduceerde, kan volgende vergelijking afgeleid worden (Youngs, 1968; Youngs, 2001):

$$\frac{dM}{dt} = A \left[\int_{p_1}^{p_0} p g K' dp \right] = A \left[\int_{p_1}^0 p g K' dp + p g K p_0 \right]$$

Met:

- M : moment van het water in de bodem
- t : tijd
- A : oppervlakte van doorsnede bodemstaal
- p : drukhoogte (0 = aan infiltratieoppervlak, i = in de bodem achter het bevochtigingsfront)
- g : versnelling door de zwaartekracht, valversnelling
- K'(p) : hydraulische conductiviteit in functie van de water pressure head

(p)

Deze vergelijking is opgesteld voor onverzadigde gronden. In verzadigde gronden kan K'(p) gelijkgesteld worden aan K

Door dM/dt te meten bij verschillende drukken (p₀) van infiltrerend water en dit in een plot uit te zetten, kan K berekend worden door middel van de helling van deze plot.

In de originele publicatie, Youngs (1968), wordt gerekend met volgende vergelijking:

$$\frac{1}{\rho g} \frac{dM_0}{dt} = - \int_{p_0}^{p_n} \frac{K}{\rho g} dp = S_0 - S_n$$

Met:

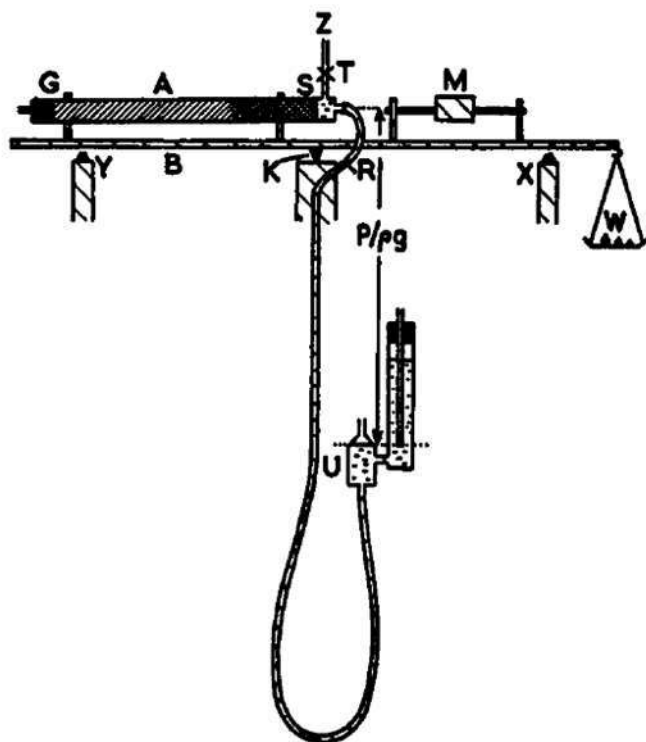
- ρ : dichtheid van water (of specifiek volumegewicht?)
- g : versnelling door de zwaartekracht, valversnelling
- M₀ : moment van het water in de bodem bij de ingang van het water
- t : tijd
- p : drukhoogte (x = 0 = aan infiltratieoppervlak, n = x → ∞)
- K : hydraulische conductiviteit

Hier is de drukhoogte gelijk aan p/pg

2.2.2.2.3 Methode

Werkvoorschrift

De oorspronkelijke methode wordt beschreven in Youngs (1968).



Figuur 2-41: Varying moment permeameter. (Youngs, 1968)

Hierbij wordt het poreus materiaal, in dit geval de bodem, in een plexiglas buis (A) gebracht. Deze wordt afgesloten aan de ingang door een filter van poreus metaal (porous sinter) (S) en aan de uitgang door een nylon gaas (G). Deze buis wordt gemonteerd op één kant van een onbuigbare staaf (B) dewelke gebalanceerd wordt op één punt (K) net onder de metalen filter (S). Aan de ander kant van de onbuigbare staaf wordt een verschuifbaar tegengewicht gemonteerd zodat de constructie horizontaal in balans kan gebracht worden. Ook wordt aan deze kant aan het uiteinde een schaal gemonteerd waar gewicht kan op geplaatst worden. Onder elke kant van de onbuigbare buis wordt ook een stop geïnstalleerd zodat de constructie nooit meer dan enkele graden uit balans kan komen (Y en X). Het water voor de test wordt aangevoerd via een flexibele tube (R) vanuit een reservoir (U) waarin een constant head wordt behouden. Dit water komt eerst in een kamer voor de filter waarnaar het in gezogen kan worden door een tube (Z). Eens de kamer vol is, kan deze tube afgesloten worden met een kraantje (T). Het water infiltreert dan in de kolom met bodem met een zuigkracht gelijk aan de gecreëerde drukhoogte (p/pg). Bij de opstelling moet wel gelet worden dat de stroomsnelheid van het water niet beïnvloed wordt door de weerstand van de filter. Voor de meting worden er gewichten in de schaal (W) gelegd zodat de constructie juist op punt X steunt. De tijd wordt genoteerd die nodig is om de constructie terug in balans te brengen doordat het water verder in de kolom beweegt. Deze procedure wordt verschillende keren herhaald door telkens gewicht toe te voegen in de schaal. Zo kan men een plot opstellen van Δw ten opzichte van de tijd (t).

Hierna wordt de zuiging aan de filter verminderd en terug metingen gedaan zodat een Δw ten opzichte van de tijd (t) plot kan opgesteld worden. In elk experiment wordt een reeks metingen uitgevoerd met een range van zuigkrachten en positieve drukken. Dit moet echter wel uitgevoerd worden voor het bevochtgingsfront het uiteinde van de kolom bereikt. Ook moet er op toegezien worden dat er steeds bevochtiging plaatsvindt van de kolom zodat er geen hysteresis effect kan plaatsvinden.

De hydraulische conductiviteit kan dan gevonden worden door de helling te berekenen van de grafiek die $(1/\rho g)dM_0/dt$ (y-as) uit zet ten opzichte van de drukhoogte $p/\rho g$ (x-as). Wanneer de grond verzadigd is, wordt de helling, en dus de K-waarde constant.

Fysische randvoorwaarden

De wet van Darcy is geldig dus:

- De bodem is homogeen
- De bodem is anisotroop

Er moet op toegezien worden dat er tijdens het experiment een constante watertoevoer is zodat er geen hysteresis kan optreden.

Ook moet er rekening gehouden worden met de doorlatendheid van de filter aan het begin van de kolom, Deze mag niet kleiner zijn dan deze van het materiaal.

2.2.2.2.4 Sterkte/zwakte

Tabel 2-38: Laboratoriummethode: Varying Moment Permeameter sterkte/zwakte-analyse.

Factor	Sterkte	Zwakte
Variabele:	Meting van k_v of k_h afhankelijk van monsternamerichting	
Schaal: omvang van de matrix, monstergrootte, effect van anisotropie		Kleine oppervlakte getest
Relatie van de test tot de matrix		Filter is limiterend voor bereik van de test
Nauwkeurigheid, gevoeligheid aan randvoorwaarden		
Robuustheid, herhaalbaarheid		
Ervaring en verspreiding		
Technische relevantie		
Techniciteit, kwalificatie van de uitvoerder	Matig gespecialiseerd	
Tijdsbesteding, rekening houdend met het aantal vereiste herhalingen en kost	Niet vermeld	
Economische haalbaarheid		

2.2.2.3 Laboratoriummethode: ICW permeameter

De ICW permeameter is een labomethode die algemeen toegepast wordt. Hierbij wordt een veldmonster (ring) eerst verzadigd waarna er een opwaartse stroom door gecreëerd wordt. De snelheid waarmee het water door het monster stroomt, bepaalt de doorlatendheid. Door een opwaartse stroom te creëren, worden luchtbellen beter uit het bodemmonster verdreven.

Deze techniek is geschikt voor bijna elke grondsoort behalve voor zeer goed doorlatende en zwel- of krimpg gevoelige gronden. Er bestaat zowel een constant head als een falling head variant van. Voor de meeste gronden kan een constant head test uitgevoerd worden. Enkel voor slecht doorlatende gronden (bv. klei-of veen monsters) wordt de falling head variant gebruikt. Door de manier van monsternamen, wordt de verticale of horizontale doorlatendheid bepaald.

2.2.2.3.1 Inleiding

Indeling:

ex situ; constant head (goed tot slecht doorlatende gronden) of falling head (zeer slecht doorlatende gronden)

Principe:

Een monster wordt verzameld in het veld en in het labo verzadigd. Tijdens de meting wordt de opwaartse waterstroming in het monster veroorzaakt door een verschillende waterdruk te creëren aan beide uiteinden van het bodemmonster. Er bestaat zowel een falling als een constant head variant. De stijging van het waterpeil boven het monster of de opgevangen hoeveelheid water dat door het monster infiltreert respectievelijk, in functie van de tijd over een gekende oppervlakte, is een maat voor de doorlatendheid van de bodem.

Voor de meeste bodems kan de constant head variant gebruikt worden behalve voor zeer slecht doorlatende bodems als klei en veen waarvoor de falling head variant gebruikt wordt.

Toepassingsgebied:

In kader van:

- Landbouwkundige toepassingen: irrigatie, drainage, cultuurtechnieken
- Bodem- en hydrologische studies en onderzoeken: weg- en waterbouw, zoals aanleg en verzwaring van dammen en dijken, Drinkwaterwinningen
- Milieuonderzoek: verplaatsing van milieuverontreinigende oplossingen, meststoffen of radioactieve afvalstoffen in het grondwater
- Ecologische studies en natuurbeheer

Landen:

wereldwijd

Bestaande Normering of opname in regelgeving:

NEN5789

ISO/FDIS 17312

ISO/TS 17892-11

2.2.2.3.2 Theoretische achtergrond

Bronnen:

- Klute & Dirksen, 1986;
- Koorevaar et al., 1983;
- Wit, 1963;
- Eijkelkamp, 2013

Constant head:

De formule wordt rechtstreeks afgeleid van de wet van Darcy. Voor een ééndimensionale, verticale stroming is deze als volgt:

$$q = -K i = K \frac{H}{z}$$

Met:	q	: flux of "volumestroomdichtheid": volume water per tijdseenheid en per
		oppervlakte-eenheid door het monster stroomt, ofwel Q/A
	K	: doorlatendheidscoëfficiënt (of K-factor)
	i	: stijghoogtegradiënt
	H	: stijghoogte
	z	: lengte van bodemkolom waardoor water stroomt

Het minteken duidt op de stroming die naar beneden gericht is dus in tegengestelde richting als de Y-as.

De flux (q) is evenredig met de stijghoogtegradiënt (i) als de doorlatendheid (K) constant is. Dit is het geval in een met water verzadigd, homogeen bodemstaal.

Door het hoogteverschil tussen de waterniveaus binnen en buiten de ringhouder, wordt een drukverschil gecreëerd. Hierdoor ontstaat een stationaire, eendimensionale stroming door het monster.

Er geldt dus:

$$K = \frac{Q L}{h A}$$

Met:	K	: doorlatendheidscoëfficiënt (of K-factor)
	Q	: debiet of "volumestroom": volume water dat per tijdseenheid door
het		monster stroomt ofwel V/t
	L	: lengte van het monster
	h	: waterhoogteverschil binnen en buiten de ringhouder
	A	: doorsnede van het monster

Dus men kan K berekenen met volgende formule:

$$K = \frac{V L}{A t h}$$

Met: V : Volume water dat door het monster stroomt
t : tijd dit gebruikt is voor de doorstroming van watervolume V

Falling head :

Aangezien in het geval van een falling head test het debiet verandert met de tijd, is de flux (q) in het monster evenredig met het hoogteverschil (h).

De veranderende snelheid van het volume doorgestroomde water kan dus uitgedrukt worden als:

$$\frac{dV}{dt} = -k h \frac{A}{L}$$

Met: V : Het volume van het water dat in de gemeten tijd t door het monster is gestroomd
t : de tijd die nodig is om volume V door het monster te laten stromen
k : doorlatendheidscoëfficiënt (of K-factor)
h : waterhoogteverschil binnen en buiten de ringhouder
A : doorsnede van het monster
L : lengte van het monster

De hoogte van het waterniveauverschil in de standbuis daalt echter ook ten gevolge van de doorstroming. Hierdoor kan men de verandering in volume ook uitdrukken als volgt:

$$dV = a dh$$

Met: V = Het volume van het water dat in de gemeten tijd t door het monster is gestroomd
a = oppervlakte van de dwarsdoorsnede van het monster
h = waterhoogteverschil binnen en buiten de ringhouder

dus:

$$\frac{dh}{h} = -K \frac{A}{a} L dt$$

$$\frac{dh}{h} = \frac{-K A dt}{a L}$$

Door integratie van beide zijden bekomen we:

$$K = \frac{a L}{A (t_2 - t_1)} \ln \frac{h_1}{h_2}$$

Met: h_1, h_2 : het begin- en eindhoogteverschil van het waterniveau
 a : oppervlakte van de dwarsdoorsnede van de ringhouder
 t : tijdverloop tussen het bereiken van het eindniveau

De bepaling met de falling head methode wordt gebruikt voor zeer slecht doorlatende bodems waardoor er dus ook moet rekening gehouden worden met de verdamping uit het bodemmonster. Hiervoor moet een correctie uitgevoerd worden door een extra factor toe te voegen aan de formule om K te berekenen.

$$K = \frac{a L}{A (t_2 - t_1)} \ln \frac{h_1}{h_2} + \frac{x a L}{A (h_1 h_2)}$$

x is een verdampingsfactor = 0,000864 m/d = 0,0864 cm/d. Afwijkingen hiervan zijn gering (Wit 1963).

$x a$ is het volume water dat vanuit het bodemmonster verdampt en het gemiddelde waterhoogteverschil tussen tijdstippen t_1 en t_2 is gelijk aan $(h_1 h_2)$

Met bovenstaande formule kan dus K berekend worden voor een falling head opstelling.

2.2.2.3.3 Methode

Werkvoorschrift

Dit werkvoorschrift volgt de gebruiksaanwijzing van de laboratorium-permeameters van Eijkelkamp (Eijkelkamp, 2013).

Eerst moet er een bodemmonster genomen worden met behulp van een ring (Ø 53 x 50 mm of 60 x 56 mm) of monsterbus (38 x 40 mm) waarbij de bodem zo weinig mogelijk verstoord wordt. Naargelang deze verticaal of horizontaal genomen wordt, kan de doorlatendheid in de desbetreffende richting bepaald worden.

Hierna moet het bodemmonster verzadigd worden in het labo. Hiervoor bestaan er verschillende methodes: waterbak, in de permeameter zelf of exsiccator (in vacuum) waarbij er in stijgende maten ingesloten lucht wordt verwijderd tijdens het verzadigen.

Hierna volgt de meting. Dit kan zowel volgens een constant head als een falling head methode gebeuren. De meetoplossing moet zoveel mogelijk overeenkomen met de originele bodemoplossing (bv. in zout milieu).

Constant head

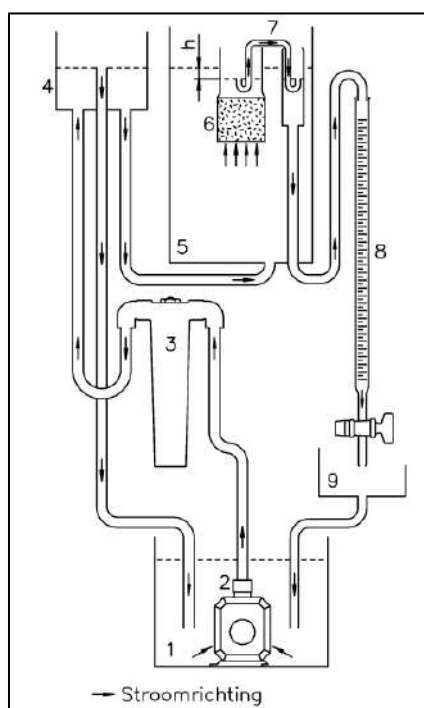
In onderstaande Figuur 2-42 kan een schematische voorstelling van de permeameter teruggevonden worden. Er kan zowel gewerkt worden met een gesloten systeem met een voorraadbak en pomp, zoals in Figuur 2-42 voorgesteld, als met een open systeem waarbij er constant vers water wordt toegevoegd en het water na doorgang door het bodemmonster afgevoerd wordt.

Bij een gesloten systeem wordt water vanuit een voorraadbak (1) door middel van een pomp (2) via een filter (3) omhoog gepompt naar een in hoogte verstelbare niveauregelaar (4). Deze niveauregelaar is enerzijds verbonden met een kunststof container (5) en anderzijds met een leiding waardoor overtollig water terugvloeit in de voorraadbak.

Met een afdichtplaat kan de container gesloten worden om verdamping tijdens de meting te beperken. Bij een open systeem vloeit water rechtstreeks vanuit de waterleiding in de niveauregelaar.

Doordat de niveauregulator en de container een communicerend vat vormen, zal de niveauregulator de waterhoogte in de container in stand houden (de waterspiegel in de niveauregulator is gelijk aan de waterspiegel in de container). Een volledig verzadigd ringmonster (6) wordt in een ringhouder geplaatst en voorzien van een zeefdop. De ringhouder wordt vervolgens in de container gezet. Via een plastic hevel (7) komt het water dat boven het monster staat in een buret (8) terecht. Een lekbak (9) vangt het water uit de buretten op en voert het terug naar de voorraadbak. Bij een open systeem vindt de afvoer vanuit de lekbak plaats naar bijvoorbeeld een wasbak.

Door de werking van de hevel ontstaat een hoogteverschil (h) in de waterstand binnen en buiten de ringhouder. Dit hoogteverschil moet zo klein mogelijk zijn en kan variëren van 2 mm voor zeer goed doorlatende gronden tot 20 mm voor slecht doorlatende bodems. Het veroorzaakt een continue stroming van water door het monster. De hoogte van de waterspiegels wordt gemeten met een eenpuntsmeetbrug. Door het afgevoerde water gedurende een bepaald tijdstraject op te vangen in de buret nadat de stroomsnelheid constant geworden is, kan met behulp van een formule de waterdoorlatendheidscoëfficiënt (de K-factor) van het betreffende monster berekend worden.



*Figuur 2-42: schematische voorstelling van een ICW permeameter
(bron: Eijkelkamp, 2013)*

Falling head

Hierbij verwijdt men de plastic hevel (7) en meet men de stijging van het water boven het bodemonmonster.

Fysische randvoorwaarden

De wet van Darcy is geldig dus:

- De bodem is homogeen

Aangezien bij elke meting de doorlatendheid maar in 1 richting gemeten wordt, valt de voorwaarde van anisotrope bodem hier weg.

2.2.2.3.4 Sterkte/zwakte

Tabel 2-39: Laboratoriummethode: ICW permeameter sterkte/zwakte-analyse.

Factor	Sterkte	Zwakte
Variable:	Meting van k_v of k_h afhankelijk van monsternamerichting	
Schaal: omvang van de matrix, monstergrootte, effect van anisotropie		Zeer kleine monsters dus weinig representatief voor de ruimtelijke variabiliteit in het veld.
Relatie van de test tot de matrix	Bijna alle bodems	Niet geschikt voor zeer goed doorlatende en zwel- of krimpgevoelige gronden
Nauwkeurigheid, gevoeligheid aan randvoorwaarden	Weinig gevoelig	
Robuustheid, herhaalbaarheid		Kleine monsters dus veel herhalingen nodig om representatief te zijn. Homogene zandige afzettingen 3 herhalingen, zware kleibodems: 20 tot 30 herhalingen
Ervaring en verspreiding	Genormeerd en algemeen gebruikt	
Technische relevantie		
Techniciteit, kwalificatie van de uitvoerder	Matig gespecialiseerd	
Tijdsbesteding, rekening houdend met het aantal vereiste herhalingen en kost	Verzadiging 1 dag tot een paar weken Meting: tot enkele dagen	
Economische haalbaarheid		

2.2.2.4 Laboratoriummethode: Oedometer indirecte meting

Oedometers werden oorspronkelijk ontwikkeld om de consolidatie of samendrukking van fijnkorrelige grond te meten in kader van bouwprojecten. Consolidatie mag niet verward worden met compactie waarbij door druk het volume van de factie ingesloten lucht verminderd wordt. Bij consolidatie wordt echter door druk water uit de bodem gedraineerd. Dit gaat sneller naargelang de grond een grotere doorlatendheid heeft. Op deze manier kan dus een indirecte afleiding gemaakt worden van de doorlatendheid van een grond.

In de literatuur wordt er ook soms verwezen naar een oedometer in kader van een falling of constant head test. Deze is zeer gelijkaardig aan de andere tests die besproken zijn. Wij beperken ons hier tot de bespreking van de indirecte afleiding via consolidatie.

2.2.2.4.1 Inleiding

Indeling:

ex situ; indirecte afleiding

Principe:

De transiënte consolidatie fenomenen worden gecontroleerd door de 'coefficient of consolidation'. Als de 1 dimensionele compliance m_v gekend is, kan de doorlatendheid k geschat worden.

Toepassingsgebied:

In kader van:

- Geotechnisch onderzoek

Bestaande Normering of opname in regelgeving:

ASTM D 2435

2.2.2.4.2 Theoretische achtergrond

Bij het samendrukken van het verzadigde bodemstaal zal water uit het staal draineren. De snelheid waarmee dit gebeurt, is echter afhankelijk van de doorlatendheid van de bodem. Hierdoor kan er door consolidatieproeven een schatting gemaakt worden van de verzadigde doorlatendheid.

$$k = c_v m_v \gamma_w$$

Met:	c_v	: coëfficiënt of consolidation
	m_v	: one-dimensional compliance
	γ_w	: volumegewicht water

Bij de test wordt een verticale druk op het staal gelegd dus naargelang de bodem bemonsterd is kan ofwel de verticale ofwel de horizontale doorlatendheid van het staal gemeten worden.

2.2.2.4.3 Methode

Werkvoorschrift

Bemonster de gewenste bodemlaag met een stalen ring.

Verzadig het monster door onderdompeling in water of in een excicator (vacuum) naargelang de graad van ontluchting van de bodem men wenst.

Voor een werkvoorschrift verwijzen we naar de handleiding van de oedometer.

Fysische randvoorwaarden

Deze methode geeft een inschatting van de k_{SAT} -waarde, en is dus geen exacte waarde.

2.2.2.4.4 Sterkte/zwakte

Tabel 2-40: Laboratoriummethode: oedometer sterkte/zwakte-analyse.

Factor	Sterkte	Zwakte
Variabele:	Meting van k_v of k_h afhankelijk van monsternamerichting	
Schaal: omvang van de matrix, monstergrootte, effect van anisotropie		Klein volume bodem getest
Relatie van de test tot de matrix		Enkel geschikt voor fijnkorrelige grond
Nauwkeurigheid, gevoeligheid aan randvoorwaarden		
Robuustheid, herhaalbaarheid		
Ervaring en verspreiding		
Technische relevantie		
Techniciteit, kwalificatie van de uitvoerder		Gespecialiseerd
Tijdsbesteding, rekening houdend met het aantal vereiste herhalingen en kost		
Economische haalbaarheid		

2.2.2.5 Laboratoriummethode: De Hauben water permeameter

Deze permeameter is tot stand gekomen door een samenwerking tussen Eijkelkamp (Agriseach Equipment, Nederland) en Prof. Dr. Horn (Christian-Albrechts-universiteit, Kiel, Duitsland). Deze laatste voert onderzoek naar bodemverdichting en zocht hiervoor naar gepaste laboratorium apparatuur. Om de doorlatendheid te meten van gesatureerde onverstoorde monsters van fijnkorrelige grond (slib en klei) ontwikkelde ze samen de Hauben water permeameter. Dit is een falling head methode die geschikt is voor hydraulische conductiviteit of doorlatendheid te meten van minder dan 1×10^{-5} m/s. Hiermee kan dan de invloed van compactheid gemeten worden door voor en na statische lading in een Oedometer de doorlatendheid te meten.

2.2.2.5.1 Inleiding

Indeling:

ex situ; falling head

Principe:

De daling van het waterpeil in functie van de tijd over een gekende oppervlakte, is een maat voor de doorlatendheid van de bodem.

Toepassingsgebied:

In kader van:

- Landbouwkundige toepassingen: irrigatie, drainage, erosie
- Geohydrologisch onderzoek
- Milieuonderzoek: verplaatsing van milieuverontreinigende oplossingen, meststoffen of radioactieve afvalstoffen in het grondwater
- Materiaal onderzoek

Landen:

Wereldwijd.

Ontwikkeld door samenwerking tussen Eijkelkamp (Nederland) en Prof. Dr. Horn (Christian-Albrechts-universiteit, Kiel, Duitsland)

Bestaande Normering of opname in regelgeving:

NEN 5124, EN17892-11 en ASTM D5084-10

2.2.2.5.2 Theoretische achtergrond

De formule om de doorlatendheid te berekenen is rechtstreeks afgeleid van de wet van Darcy voor laminaire stroming.

Door een grafiek te maken van h_1/h_2 versus de tijd kan de doorlatendheid afgeleid worden van het lineaire deel van de curve.

$$K = \frac{a l}{A t} \ln \frac{h_1}{h_2}$$

- Met:
- a : doorsnede van de piëzometrische koker (cm²)
 - l : monsterhoogte tijdens de test (cm)
 - A : doorsnede van het monster (cm²)
 - t : interval tussen de meting(en)
 - h₁ : de piëzometrische kolom aan het begin van het geselecteerde interval (cm)
 - h₂ : de piëzometrische kolom aan het einde van het geselecteerde interval (cm)

Men raad hier aan om een temperatuurscorrectie uit te voeren naar 10°C aan de hand van de empirische vergelijking van Poiseuille:

$$k_{10} = \alpha k_t$$

Met:

$$\alpha = \frac{1,359}{1 + 0,0337 T + 0,00022 T^2}$$

- Met:
- T : watertemperatuur gedurende de test (°C)
 - k_t : doorlatendheidscoëfficiënt bij omgevingstemperatuur (m/s)
 - α : correctiefactor die moet worden berekend of uit Tabel 2-41 moet worden gehaald. Voor tussentijdse waarden is lineaire interpolatie toegestaan
- worden
- A : referentietemperatuur van 10°C* komt overeen met de gemiddelde grondwatertemperatuur. Waar nodig kan een afwijkende temperatuur worden gebruikt.

Tabel 2-41: Correctiefactor per temperatuur van het water om naar een referentietemperatuur van 10°C om te rekenen

Temperatuur T (°C)	5	10	15	20	25
Correction factor α	1,158	1,000	0,874	0,771	0,686

De verticale doorlatendheid **k_v** wordt hier getest.

2.2.2.5.3 Methode

Werkvoorschrift

Voor een gedetailleerd werkvoorschrift verwijzen we naar de gebruiksaanwijzing van Eijkelkamp.

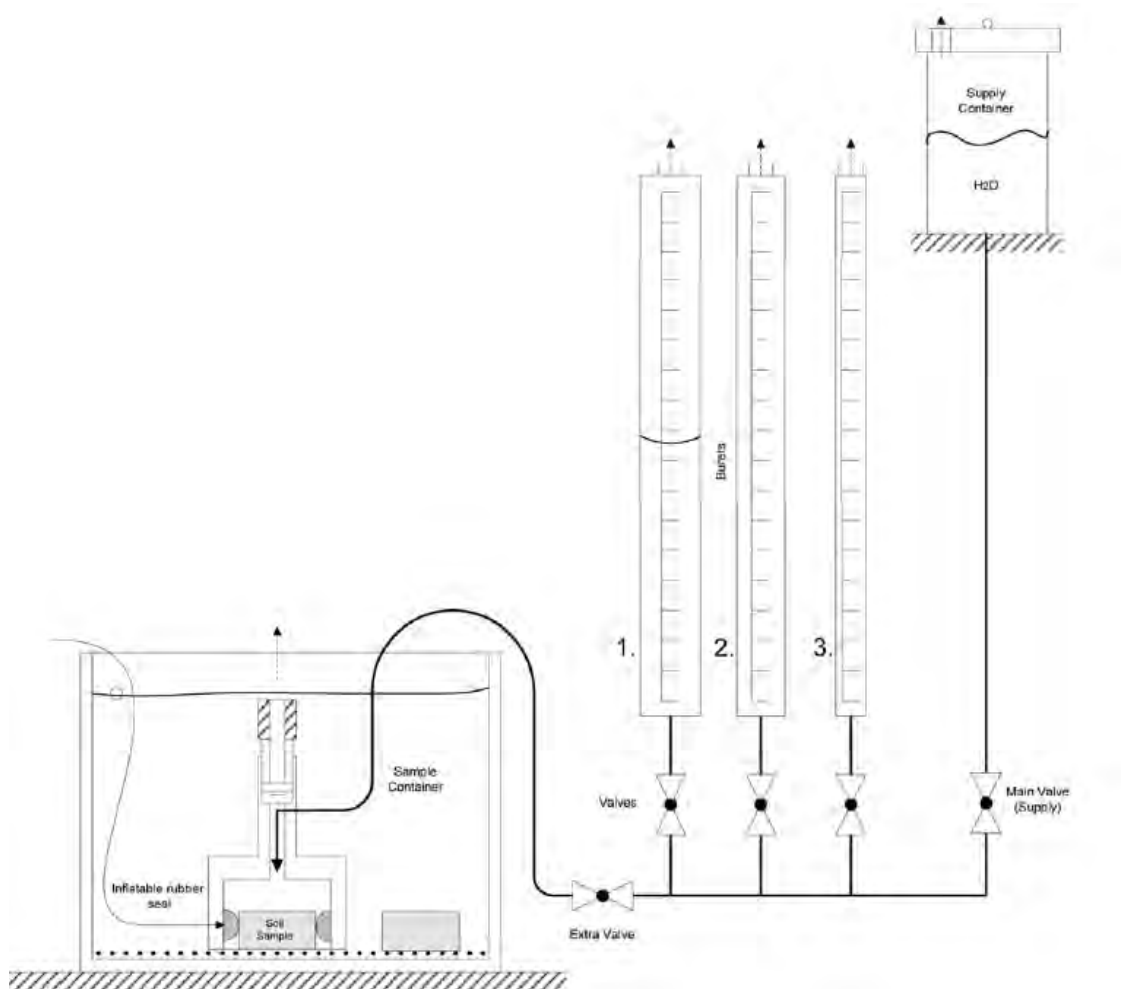
Bemonster de gewenste bodemlaag met een stalen ring.

Verzadig het monster door onderdompeling in water of in een excicator (vacuum) naargelang de graad van ontluchting van de bodem men wenst.

Plaats het monster in het toestel en veranker met de opblaasbare rubberafdichting.

Kies de juiste buret uit naargelang de vermoedelijke doorlatendheid van het monster. Er zijn 3 buretten met verschillende inwendige diameter. Hoe slechter de doorlatendheid, hoe dunner de buret moet zijn.

Voer hier dan een falling head test mee door op verschillende tijdstippen de hoogte van de waterkolom in de buret af te lezen. Men moet minstens 3 meetwaarden hebben.



*Figuur 2-43: Schematische voorstelling van de Hauben water permeameter
(bron: Eijkelkamp)*

Fysische randvoorwaarden

De wet van Darcy is geldig dus:

- De bodem is homogeen

Aangezien bij elke meting de doorlatendheid maar in 1 richting gemeten wordt, valt de voorwaarde van anisotrope bodem hier weg.

2.2.2.5.4 Sterkte/zwakte

Tabel 2-42: Laboratoriummethode: De Hauben water permeameter sterkte/zwakte-analyse.

Factor	Sterkte	Zwakte
Variabele:	Meting van k_v of k_h afhankelijk van monsternamerichting	
Schaal: omvang van de matrix, monstergrootte, effect van anisotropie		
Relatie van de test tot de matrix		Enkel geschikt voor fijnkorrelige structuur (slib, klei) met $K < 1 \times 10^{-5}$ m/s
Nauwkeurigheid, gevoeligheid aan randvoorwaarden		
Robuustheid, herhaalbaarheid	moet herhaald worden indien 3 herhalingen meer dan 10 % uit elkaar liggen.	
Ervaring en verspreiding		
Technische relevantie		
Techniciteit, kwalificatie van de uitvoerder	Gespecialiseerd	
Tijdsbesteding, rekening houdend met het aantal vereiste herhalingen en kost		Saturatie 1 – 2 dagen Meting: niet gespecificeerd. Kan lang duren bij zeer slecht doorlaatbare gronden
Economische haalbaarheid		

2.2.2.6 Laboratoriummethode: Oscillerende permeameter

In 1960 ontwikkelde Childs en Pouloussilis (1960) een permeameter die een oplossing zou zijn voor de grote hoeveelheden water die nodig zijn voor de constant en falling head permeameters. Ook wordt bij deze permeameters constant nieuw water door de bodem gelaten. Bij sommige kleigonden die kationen uitwisselen met het water, kunnen hierdoor de hydraulische eigenschappen van de bodem veranderen. De oscillerende permeameter is een variant van de falling head permeameter. Hierbij wordt een hoeveelheid ontlucht water toegevoegd. Door de benen van een U-systeem met een flexibele buis steeds op en neer te bewegen, wordt deze zelfde hoeveelheid water telkens afwisselend opwaarts en neerwaarts door het monster gestuurd.

2.2.2.6.1 Inleiding

Indeling:

ex situ; alternating hydraulic head

Principe:

Een bodemonmonster wordt verzameld in het veld en geanalyseerd in het labo. De daling en stijging van het waterpeil in functie van de tijd over een gekende oppervlakte, is een maat voor de doorlatendheid van de bodem.

Toepassingsgebied:

Puur experimenteel

Landen:

Ontwikkeld in Engeland

Bestaande Normering of opname in regelgeving:

Niet genormeerd

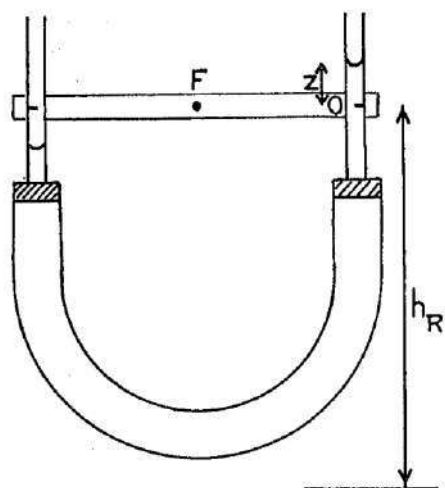
2.2.2.6.2 Theoretische achtergrond

Om de doorlatendheid te berekenen bestaan hier verschillende formules voor.

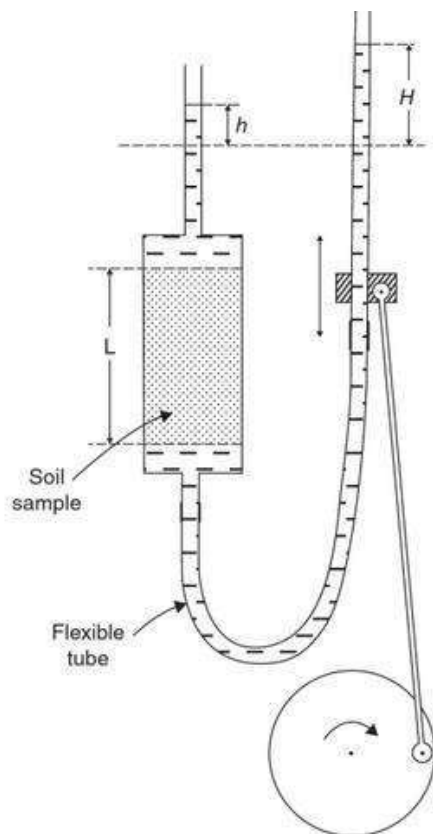
In de originele publicatie (Childs & Pouloussilis, 1960) wordt K afgeleid met de volgende formule:

$$\tan \theta = \left(\frac{\pi}{T}\right) \left(\frac{L}{k}\right) \left(\frac{a}{A}\right)$$

Met:	θ	: phase angle
	T	: periodic time van de oscillatie van O (vast punt op meter zie Figuur 2-44)
	L	: lengte van het grondmonster
	k	: doorlatendheid
	a	: oppervlakte van de doorsnede door het smalle deel van de U-structuur
	A	: oppervlakte van de doorsnede van het deel met het bodemonmonster.



Figuur 2-44: Oscillating permeameter (bron: Childs & Poulouvassilis, 1960)



Figuur 2-45: Oscillating permeameter (bron: Cooper, 2016)

Cooper (2016) leidde volgende twee mogelijke formules af:

$$K = \frac{aL\omega}{A \sqrt{\frac{H_0^2}{h_0^2} - 1}}$$

- Met:
- a : oppervlakte van de doorsnede door het smalle deel van de U-structuur
 - A : oppervlakte van de doorsnede van het deel met het bodemonmonster.
 - L : lengte van het grondmonster
 - H : hoogte van water in beweegbare tube t.o.v. referentiepunt (zie Figuur 2-45)
 - h : hoogte van water in tube boven bodemstaal t.o.v. referentiepunt (zie Figuur 2-45)

of

$$K = \frac{aL\omega}{A \tan \Phi}$$

- Met:
- a : oppervlakte van de doorsnede door het smalle deel van de U-structuur
 - A : oppervlakte van de doorsnede van het deel met het bodemonmonster.
 - L : lengte van het grondmonster
 - ω : ?
 - Φ : matrix potentiaal

Youngs (2001) leidde volgende formule af:

$$K = \frac{2\pi aL}{AT \tan \beta}$$

- Met:
- a : oppervlakte van de doorsnede door het smalle deel van de U-structuur
 - A : oppervlakte van de doorsnede van het deel met het bodemonmonster.
 - L : lengte van het grondmonster
 - T : de duur van 1 cyclus
 - β : phase angle met $\tan \beta = \sqrt{\frac{H_0^2}{h_0^2} - 1}$

2.2.2.6.3 Methode

Werkvoorschrift

Bemonster de te meten bodemlaag in het veld en verzadig in het labo.

Plaats het bodemonmonster in het toestel en voeg ontluicht water toe.

Wacht tot de hoogtes in beide benen van de U-structuur gelijk zijn en markeer deze hoogtes.

Zet het motortje aan zodat het toestel in beweging komt en laat voldoende cycli draaien tot de initiële perturbaties verdwenen zijn. De frequentie van het oscilleren moet aangepast worden naar gelang de doorlatendheid van het bodemstaal.

Neem een stopwatch en start deze wanneer het water in het ene uiteinde van de tube het 0-punt passeert. Stop deze stopwatch wanneer hierna het water in het andere uiteinde het 0-punt voorbijgaat.

Dit tijdsinterval heeft een grootte van $\frac{\theta T}{2\pi}$

Hiermee kan θ afgeleid worden.

Fysische randvoorwaarden

De wet van Darcy is geldig dus:

- De bodem is homogeen

Aangezien bij elke meting de doorlatendheid maar in 1 richting gemeten wordt, valt de voorwaarde van anisotrope bodem hier weg.

2.2.2.6.4 Sterkte/zwakte

Tabel 2-43: Laboratoriummethode: Oscillerende permeameter sterkte/zwakte-analyse.

Factor	Sterkte	Zwakte
Variabele:	Meting van k_v of k_h afhankelijk van monsternamerichting	
Schaal: omvang van de matrix, monstergrootte, effect van anisotropie		Zeer kleine monsters dus weinig representatief voor de ruimtelijk variabiliteit in het veld.
Relatie van de test tot de matrix	Bijna alle bodems	
Nauwkeurigheid, gevoeligheid aan randvoorwaarden	Weinig gevoelig	
Robuustheid, herhaalbaarheid		Kleine monsters dus veel herhalingen nodig om representatief te zijn.
Ervaring en verspreiding	meting	
Technische relevantie		
Techniciteit, kwalificatie van de uitvoerder	Matig gespecialiseerd	

Factor	Sterkte	Zwakte
Tijdsbesteding, rekening houdend met het aantal vereiste herhalingen en kost	Niet vermeld	
Economische haalbaarheid		

2.2.3 Pedotransferfuncties

2.2.3.1 Richtwaarden OVAM

Ref.: Ovam, 2002.

2.2.3.1.1 Inleiding

De OVAM documenteert en geeft richtlijnen voor ontwerpen voor bodemsanering, onder meer aan de hand van het achtergronddocument "Code van goede praktijk voor het uitvoeren van 'pump & treat'-saneringen". Dit rapport behandelt de grondwateronttrekkingsaspecten, algemene beschrijving van de techniek, richtlijnen voor het ontwerp en het opvolgen van van 'pump & treat'-saneringen.

2.2.3.1.2 Referentiekader

In de richtlijnen worden hydraulische parameters voor bekende geologische lagen in Vlaanderen en globale richtwaarden gegeven voor de horizontale doorlatendheid van bodems uit verschillende textuurklassen:

Tabel 2-44: Richtwaarden voor horizontale doorlatendheid voor verschillende bodemtypes opgesteld door OVAM (2002)

Bodem, textuurklasse	k_h (m/d)	(m/s)
klei	< 0,01	< $1,2 \times 10^{-7}$
leem; zandige leem; kleiig zand	0,01 – 0,1	$1,2 \times 10^{-7} - 1,2 \times 10^{-6}$
lemig zand; fijn zand	0,1 – 10	$1,2 \times 10^{-6} - 1,2 \times 10^{-4}$
middelgrof zand	10 – 20	$1,2 \times 10^{-4} - 2,3 \times 10^{-4}$
grof zand	20 – 50	$2,3 \times 10^{-4} - 5,8 \times 10^{-4}$
grind	50 – 1000	$2,3 \times 10^{-4} - 1,2 \times 10^{-2}$

Het betreft ongestoorde gronden. De oorsprong en de definities van de naamgeving zijn niet gekend, doch ze vormen wellicht een combinatie tussen de ISO-indeling en de indeling van de Bodemkaart van België.

Men merkt dat aangegeven wordt dat binnen de grondsoorten fijn tot lemig zand horizontale doorlatendheden kunnen voorkomen die variëren met een factor 10^2 . Binnen de grondsoorten leem, zandige leem en kleiig zand wordt een factor 10 aangegeven.

2.2.3.2 Richtwaarden voor doorlatendheid van grond in functie van de textuur

2.2.3.2.1 Inleiding

In de cursus Grondmechanica (Cursusnota's – oktober 2005) van Prof. Dr. Ir. F. De Smedt (Vrije Universiteit Brussel) worden richtwaarden gegeven voor doorlatendheid van ongestoorde gronden.

2.2.3.2.2 Referentiekader

Tabel 2-45: Richtwaarden voor doorlatendheid voor verschillende bodemtypes

Textuur	k (m/s)
grof grind	> 0,1
medium grind	0,01 – 0,1
fijn grind	10^{-3} – 10^{-2}
grof zand	10^{-4} – 10^{-3}
medium zand	10^{-5} – 10^{-4}
fijn zand	10^{-6} – 10^{-5}
grof silt	10^{-7} – 10^{-6}
medium silt	10^{-8} – 10^{-7}
fijn silt	10^{-9} – 10^{-8}
klei	< 10^{-9}

Men merkt dat zeer categorisch wordt ingedeeld, essentieel op basis van de USDA-grondsoortbenaming, en met vereenvoudigd in de doorlatendheden door sprongen met een factor 10.

2.2.3.3 Doorlatendheid bepaald op basis van de effectieve diameter en het poriëngetal

2.2.3.3.1 Inleiding

In de historie van het onderzoek naar de bepaling van fysische karakteristieken van grondmateriaal bleek al gauw dat een verband kon gevonden worden tussen granulometrische grootheden en de doorlatendheid. Dit leidde o.m. tot de empirische Hazen-vergelijking (1982) doorgaans geschreven als volgt:

$$k = C_U d_{10}^2$$

Met k : doorlatendheid (cm/s)
 C_U : Hazen's empirische coëfficiënt (varieert tussen 1.0 en 1.5)
 d_{10} : de zgn. effectieve diameter (10-percentiel) (mm),

onder de randvoorwaarden:

minimale schijnbare dichtheid

d_{10} ligt tussen 100 μm en 3 mm

$C_U < 5$.

De Hazen-vergelijking geldt m.a.w. voor zand tot grind, goed gekalibreerd, en los gestort.

De vaststelling dat de effectieve diameter, een eenvoudig te meten grootheid, een solide parameter kon vormen voor een bepaling van de doorlatendheid, heeft meerdere onderzoekers gedurende decennia geïnspireerd. Enkel een meer recente, succesvolle benadering wordt hier toegelicht.

2.2.3.3.2 Benadering van Chapuis

Chapuis (o.m. 2004, 2012) voerde onderzoek uit naar methodes voor de afleiding van de doorlatendheid op basis van de effectieve diameter doch naar veel ruimere randvoorwaarden dan deze die gelden voor de Hazen-vergelijking. Belangrijk is hierbij dat zijn definitie van de matrix 'grond' in deze thematiek uitdrukkelijk deze is ten behoeve van ingenieurstechnieken, civieltechnische toepassingen, niet deze van bodemkundige of landbouwkundige wetenschappen. De matrix in deze benadering betreft dus niet de 'top soil' of de bouwlaag; organische stofgehalte wordt niet als variabele meegenomen, of tenminste niet rechtstreeks.

Zonder in te gaan op de onderzoekshistoriek die hieraan ten grondslag ligt, wordt hier de benadering van Chapuis (2004) als volgt gegeven:

$$k = 0,024622 \left[\frac{d_{10}^2 \cdot e^3}{(1+e)} \right]^{0,7825} \quad R^2 = 0,91$$

met k : verzadigde doorlatendheid (m/s)
 d_{10} : de zgn. effectieve diameter (mm),
 e : poriëngetal van de bodem in natuurlijke toestand ($e = n/(1-n)$, met n de porositeit).

De machtsfunctie werd empirisch afgeleid door optimalisatie (best fit) naar maximale R^2 . De toetsing gebeurde aan de hand van gepubliceerde data van nagenoeg 100 monsters, met doorlatendheidsmeting in labo met permeameter met bijzondere aandacht voor de kwaliteitscontrole.

Randvoorwaarden zijn in deze benadering (Chapuis, 2012):

- het poriëngetal e (of de porositeit n) dient bepaald te worden op ongestoord materiaal, op de grond in natuurlijke toestand,
- het poriëngetal e ligt tussen 0,3 en 1 (of een porositeit tussen 0,23 en 0,5),
- d_{10} ligt tussen 3 μ en 3 mm.

De afwijkingen t.o.v. de gemeten doorlatendheden bleven volgens deze benadering tussen de helft tot het dubbele van de gemeten waarden. Uit onderzoek op basis van bijkomende datasets bleek de benadering performant binnen de vork (werkgebied) van doorlatendheden van 0,1 tot 10^{-7} m/s (Chapuis, 2012).

2.2.3.4 Doorlatendheidscoëfficiënt volgens VLARIO

In het kader van aanleg van infiltratievoorzieningen, geeft VLARIO in zijn publicatie 'Katern afkoppelen, bufferen en infiltreren' (Versie 2, 20 april 2005) verschillende inschattingen van de infiltratiecapaciteit van verschillende grondsoorten om een idee te krijgen waar infiltratie zinvol is. Ze raden aan om een test uit te voeren maar wijzen er wel op dat dit weinig zinvol is bij gronden die vanuit theoretisch standpunt een veel te kleine doorlatendheid hebben.

Tabel 2-46: Ruwe inschatting van de infiltratiecapaciteit van verschillende grondsoorten.

Grondsoort	Infiltratiecapaciteit	
Grof zand	500 mm/u	(= $1,4 \times 10^{-4}$ m/s)
Fijn zand	20 mm/u	(= $5,6 \times 10^{-6}$ m/s)
Leemachtig fijn zand	11 mm/u	(= $3,1 \times 10^{-6}$ m/s)
Lichte zavel	10 mm/u	(= $2,8 \times 10^{-6}$ m/s)
Löss	6 mm/u	(= $1,7 \times 10^{-6}$ m/s)
Veen	2,2 mm/u	(= $6,1 \times 10^{-7}$ m/s)
Leem	2,1 mm/u	(= $5,8 \times 10^{-7}$ m/s)
Lichte klei	1,5 mm/u	(= $4,2 \times 10^{-7}$ m/s)
Matig zware klei	0,5 mm/u	(= $1,4 \times 10^{-7}$ m/s)
Kleiige leem	0,4 mm/u	(= $1,1 \times 10^{-7}$ m/s)

2.2.3.5 Doorlatendheidscoëfficiënt k volgens De Beer

Referentie:

Grondmechanica Deel I: Inleidende begrippen Prof. Dr. Ir. E. De Beer, 1971 (negende herziene druk)

2.2.3.5.1 Referentiekader

Tabel 2-47: enkele waarden van de doorlaatendheidscoëfficiënt k bepaald op enkele typische grondmonsters in het laboratorium.

Grondsoort	Doorlatendheid (cm/sec)
Zuiver grint	$k > 1$
Zand	$1 > k > 10^{-2}$
Fijnzand	$10^{-2} > k > 10^{-4}$
Leem	$10^{-5} > k > 10^{-7}$
klei	$k < 10^{-7}$

Dichtheid en (dynamische) viscositeit zijn verdisconteerd in de hydraulische conductiviteit of doorlatendheid k (m/dag of m/s). De meetmethode is niet gegeven.

Men merkt dat aangegeven wordt dat binnen eenzelfde grondsoort, voor zuiver zand over fijn zand tot leem, waarden kunnen voorkomen die variëren met een factor 10^2 .

2.2.3.6 Staringreeks (NI)

De Staringreeks is oorspronkelijk een database van waterretentie- en doorlatendheidskarakteristieken van voornamelijk landbouwbodems in Nederland (Wösten e.a., 2001). De reeks vormt een evolutieve klassevertaalfunctie: voor iedere textuurklasse wordt de gemiddelde bodemfysische karakteristiek vermeld. De reeks wordt in principe geregeld geüpdatet. Er worden 18 bovengronden en 18 ondergronden onderscheiden. Met ondergrond wordt een bodemdikte tussen 20 à 35 cm-mv tot 1 à 1,5 m-mv bedoeld.

De in de klassevertaalfunctie opgenomen verzadigde doorlatendheden van de ondergrond zijn opgelijst in volgende tabel. De textuurbenaming in Tabel 2-48 volgt de Belgische indeling.

Tabel 2-48: Doorlatendheden voor de grondsoorten volgens de Staringreeks, met benaderende equivalenten in de Belgische indeling.

Code Staringreeks	Doorlatendheid (m/s)	Grondsoort, benaderend vlgs. de Belgische indeling
O1	1.76E-06	zand
O2	1.47E-06	zand
O3	1.26E-06	lemig zand
O4	1.14E-06	licht zandleem
O5	2.89E-06	zand
O6	3.93E-06	grinthoudend, grove fractie > 5%
O7	4.53E-06	zandige klei tot licht zandleem
O8	1.05E-06	kleiig zand, licht zandleem tot zandleem
O9	2.58E-07	kleiig zand tot zwaar zandleem
O10	2.45E-07	zandige tot lichte klei
O11	1.60E-06	zandige klei tot klei
O12	1.18E-07	zware zandige klei tot zware klei
O13	5.06E-07	zware zandige klei tot zeer zware klei
O14	1.75E-07	zwaar zandleem tot zandleem
O15	4.28E-07	licht leem, leem of zwaar leem
O16	1.24E-07	bodems op weinig materiaal
O17	3.39E-07	bodems op weinig materiaal
O18	3.99E-06	bodems op weinig materiaal

Tot in 2001 werden 832 gemeten bodemfysische karakteristieken opgenomen. Op deze basis werd getracht pedotransferfuncties (PTF) af te leiden, enerzijds voor zand en anderzijds voor zavel en klei. Variabelen zijn korrelgrootte, schijnbare dichtheid en organischestofgehalte.

Zand:

$$k_s = 45,8 - 14,34 \text{ DICHTHEID} + 0,001481 \text{ LEEM}^2 - 27,5 \text{ DICHTHEID}^{-1} - 0,891 \ln(\text{LEEM}) - 0,34 \ln(\text{HUMUS})$$

$$(R^2 = 32 \%)$$

Zavel en klei (hoofdzakelijk niet-eolische afzettingen):

$$k_s = -42,6 + 8,71 \text{ HUMUS} + 61,9 \text{ DICHTHEID} - 20,79 \text{ DICHTHEID}^2 - 0,2107 \text{ HUMUS}^2 - 0,01622 \text{ LUTUM HUMUS} - 5,382 \text{ DICHTHEID HUMUS}$$

$$(R^2 = 31 \%)$$

Met	k_s^*	: verzadigde doorlatendheid (cm/dag)
	Dichtheid	: schijnbare dichtheid (ton/m ³)
	Lutum	: kleifractie (<2 µ) (gewichtspersent)
	Leem	: klei- en leemfractie (< 50 µ), (gewichtspersent)
	Humus	: organischestofgehalte (gewichtspersent)

Men merkt dat in de gemiddelde waarden (zie Tabel 2-48) weinig variatie voorkomt tussen grondsoorten, met minder dan een factor 40 tussen hoogste en laagste waarde. In de meetwaarden en wellicht in realiteit ligt deze variatie aanzienlijk hoger, hetgeen zich ook weerspiegelt in de eerder lage determinatiecoëfficiënten in de PTF: variabelen als korrelgrootteverdeling, schijnbare dichtheid en organischestofgehalte verklaren minder dan 1/3 van variatie in de voorkomende doorlatendheden.

2.2.3.7 Kenwaarden MDDEFP ten behoeve van aanleg infiltratiestructuren

MDDEFP (Ministère du Développement Durable, de l'Environnement, de la Faune et des Parcs, Canada, 2014) stelt in het kader van een eerste diagnose, doorlatendheden als functie van de grondsoort. De voorgestelde doorlatendheden gaan terug op het werk van Fergusson (1994).

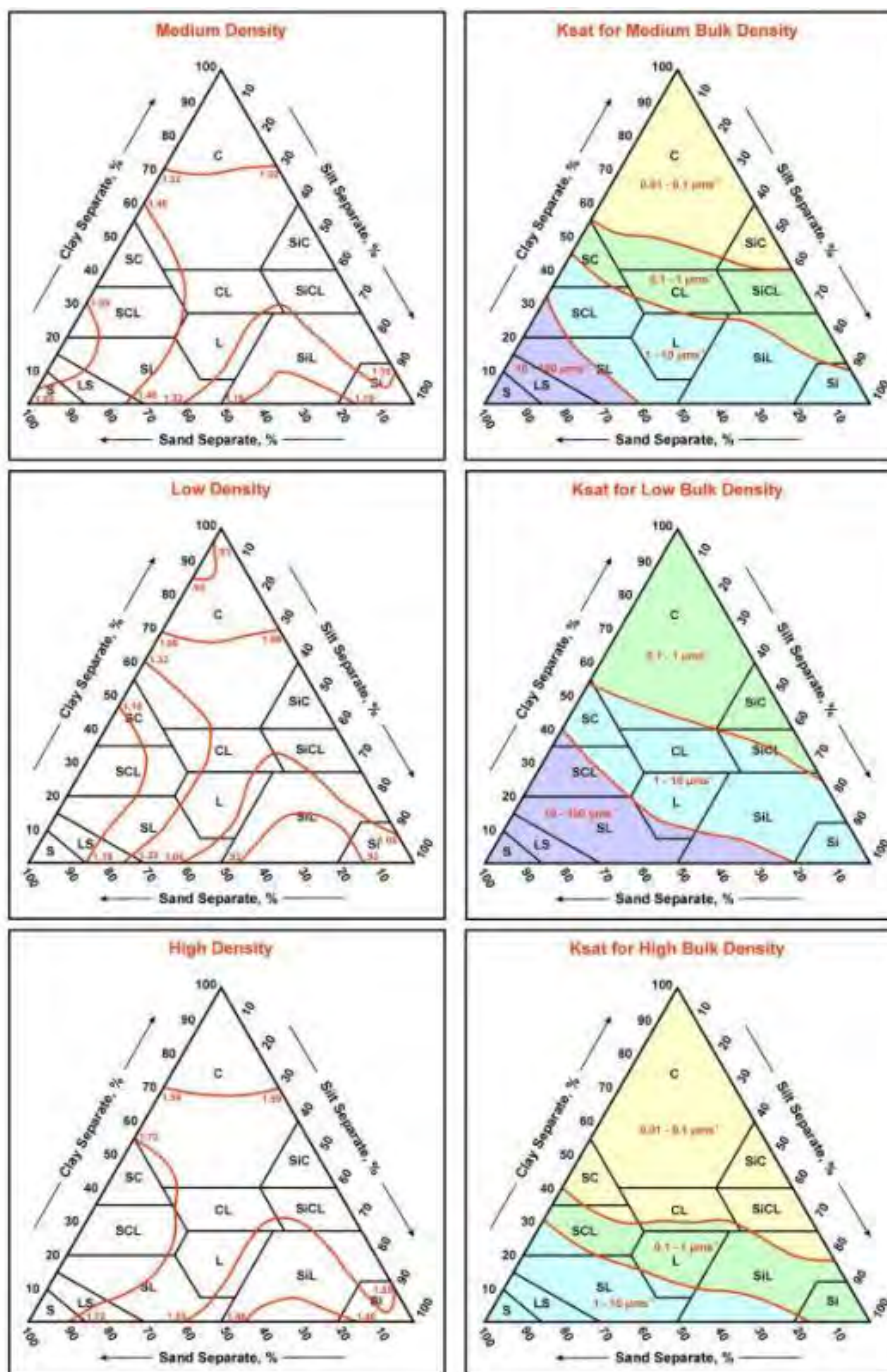
Tabel 2-49: Kenwaarden verzadigde doorlatendheid MDDEFP

Type de sol	Conductivité hydraulique saturée	
	(mm/h)	(m/s)
Sable	210	$5,83 \times 10^{-5}$
Sable limoneux	61	$1,69 \times 10^{-5}$
Limon sablonneux	26	$7,22 \times 10^{-6}$
Limon	13	$3,61 \times 10^{-6}$
Limon silteux	6,8	$1,89 \times 10^{-6}$
Limon argilo-sablonneux	4,3	$1,19 \times 10^{-6}$
Limon argilleux	2,3	$6,39 \times 10^{-7}$
Limon argilo-silteux	1,5	$4,17 \times 10^{-7}$
Argile sablonneuse	1,2	$3,33 \times 10^{-7}$
Argile silteuse	0,9	$2,50 \times 10^{-7}$
Argile	0,6	$1,67 \times 10^{-7}$

2.2.3.8 Guide for Estimating Ksat from Soil Properties (USDA)

Het National Soil Survey Handbook van de Natural Resources Conservation Service (USDA) geeft op basis van de USDA-textuurklassen een benadering voor de doorlatendheid (NSSHandbook, Part 618 (Subpart B), item 88).

De doorlatendheid kan geschat worden op basis van (een schatting van) de schijnbare dichtheid van de bodem en de granulometrie. Onder specifieke voorwaarden is deze textuurbenadering echter niet geldig.



Figuur 2-46: Benadering van de doorlatendheid op basis van granulometrie en schijnbare dichtheid (NSSH, USDA)

Onder specifieke voorwaarden vervalt de bovenstaande benadering; dan gelden de doorlatendheden als in Tabel 2-50:

Tabel 2-50: Specifieke voorwaarden waaronder de granulometriebepaarding niet geldt (NSSH, USDA)

Specifieke voorwaarden	Saturated Hydraulic Conductivity ($\mu\text{m s}^{-1}$)
All fragmental, cindery, or pumiceous.	≥ 100
Many medium or coarser vertical pores that extend through the layer.	≥ 100
Medial-pumiceous, medial-skeletal, ashy-pumiceous, ashy-skeletal, or hydrous-pumiceous material that is very friable, friable, soft, or loose.	10 – 100
When material is moderately moist or wetter, structure is moderate or strong granular, strong blocky, or prismatic smaller than very coarse; no stress surfaces or slickensides.	10 – 100
Common medium or coarser vertical pores extend through the layer.	10 – 100
Strong very coarse blocky or prismatic structure and no stress surfaces or slickensides.	1 – 10
≥ 35 percent clay that is soft, slightly hard, very friable or friable; no stress surfaces or slickensides and the clay activity is in the range of the Subactive class (i.e., CEC7/non-carbonate clay = $< 0,24$) after subtracting the quantity $[2 \times (\% \text{ OC} \times 1,7)]$.	1 – 10
Few stress surfaces, few slickensides, or both.	0,1 – 1
Massive and very firm or extremely firm or weakly cemented.	0,1 – 1
Continuously moderately cemented.	0,1 – 1
Common or many stress surfaces or common or many slickensides.	0,01 – 0,1
Continuously indurated or very strongly cemented.	$< 0,01$

Belangwekkend in de richtlijnen van de NSSH is dat de vork waarin de doorlatendheid zonder meting kan benaderd worden, beperkt wordt tot een factor 10.

2.3 RICHTLIJNEN BUURLANDEN/GEWESTEN

Om een idee te krijgen van de actueel gebruikte methodes om doorlatendheid te testen en de regelgeving omtrend afvoer van hemelwater werden verschillende personen gecontacteerd uit ervarings- of kenniscentra uit Vlaanderen en buurlanden en -gewesten. In Bijlage B kunnen de personen/instanties teruggevonden die in deze context gecontacteerd werden. In totaal werden er 86 personen/instanties gecontacteerd met de vraag voor een interview. Hieronder worden de resultaten van de interviews weergegeven.

In het tweede punt wordt een overzicht gegeven van de bestaande richtlijnen in de buurlanden en gewesten omtrend de verwerking van hemelwater.

2.3.1 Interviews

Als leidraad bij deze interviews werd een vragenlijst opgesteld:

1. Uitvoering infiltratieproeven

- a. Voert u infiltratieproeven uit of interpreteert u resultaten ervan? Zo ja, welke testen?
- b. Waarom deze methode(s)?
- c. Wat zijn uw ervaringen hiermee?
- d. Wordt er randinformatie voorzien (geologie, textuur,...) bij de rapportage en in het licht van de interpretatie (geschiktheid van de locatie, van stratificatie, ten behoeve van het ontwerp)?
- e. Hoeveel herhalingen voert u uit? Hoeveel metingen worden er per are uitgevoerd? Hoe wordt er beslist waar exact de infiltratiemeting plaats vindt?
- f. Op welke diepte worden de infiltratiemetingen uitgevoerd?
- g. Wat is uw referentiekader voor de interpretatie van de resultaten?
- h. Wat is de kostprijs van deze metingen?
- i. Waar heeft u uw materiaal aangekocht?
- j. Zijn er vormen van kwaliteitscontrole al dan niet externe auditing?
- k. Zijn deze methodes geaccrediteerd/genormeerd? Of heeft u weet van methodes die dit wel zijn?

2. Wetgeving afvoer van hemelwater (buurlanden/gewesten)

- a. Wat zijn de richtlijnen over de door de bouwheer aan de overheid te leveren informatie?
- b. Welk onderzoek is vereist door de bouwheer?
- c. Wat zijn de voorschriften voor de hemelwaterafvoer bij de aanleg van verharding zowel binnen het openbaar domein als het privédomein?
- d. Wat zijn de richtlijnen omtrent het verplicht gebruik van bovengrondse bronmaatregelen in bepaalde situaties?

Initieel werd deze vragenlijst opgestuurd met de vraag of we een interview mochten afnemen. Aangezien hier weinig respons op kwam, werd in tweede instantie gevraagd om de vragenlijst in te vullen en terug te sturen via mail. Hierop kwamen meer reacties.

2.3.1.1 Vlaanderen

Hieronder kunnen de resultaten van de interviews gevonden worden met ervarings- of kenniscentra uit Vlaanderen. In Bijlage C kan ook een overzicht gevonden worden met de methoden die gebruikt worden door verschillende instanties in Vlaanderen.

2.3.1.1.1 Prof.dr.ir. Wim Cornelis (Ugent Vakgroep Bodembeheer)

Skype-interview op 18/05/2016

De testen die ze uitvoeren zijn:

- Dubbele ring: vooral als weinig materiaal voor handen (bv. ontwikkelingslanden)
- Enkele ring constant head (mariot)
- Guelph Pressure infiltrometer (Soil moisture equipment): wanneer dunne laag
- Tensio infiltrometer (Soil moisture equipemnet Sana Barbara): handiger poreus materiaal
- Tensio infiltrometer (Soil Moiture systems): met doek.
- Mini-disk infiltrometer = geautomatiseerd gebruikt in Mojavewoestijn
- (->pedotransferfunctie creëren)
- Dual head dubbele ring (Decagon): geautomatiseerd. Deze hebben ze nog niet maar denken erover deze aan te schaffen.
- Regenvalsimulator (infiltratiemeting): in combinatie met metingen erosie en run-off. Voordeel= meer controle, meer eenduidige resultaten, macroporiën uitsluiten, goede praktijkervaringen mee. Nadeel = veel terreinvoorbereiding

Andere veel gebruikte methodes zijn:

- Beerkan methode: kleine enkele ring
- UGT Punzel: Hood infiltrometer (Duitsland)
- Boorgaten methodes:
 - o Aardvark (druksensor)
 - o Geulph (Soil Moisute equipment)
 - o Inverse boorgatenmethode

Als kan wordt tension infiltrometer gebruikt, anders wat er voor handen is. Hoe groter het meetoppervlak, hoe beter. Als toch klein meetoppervlak, veel herhalingen uitvoeren.

Toepassingen zijn:

Landbouw: infiltratie capaciteit, doorlatendheid ->bodembeheersmaatregelen of droogtebestreiding

Modellen voor de toekomst:

- Fysisch (Richardsvergelijking) SWAP, Hydrus, overlandflow
Conceptuele SWAT, Aquacrop,
Kostprijs:
- Terrein: 500 euro/dag (1 veld)
- Labo: 70 euro voor 6 herhalingen

Er wordt een profielonderzoek uitgevoerd. Soms worden trapsgewijs de verschillende lagen getest. Soms wordt het onderzoek ook gecombineerd met penetratietesten.

Gemakkelijke methoden zijn:

- Geautomatiseerde Aardvark
- Guelph (hierbij is wel luchtdichtheid een aandachtspunt)
- Omgekeerde boorgatenmethode

Een belangrijk aandachtspunt is ook dat er veel rekenmethodes bestaan:

Bv. Tensio: Wooding in combinatie met Logsdon and Jaynes of Gardner

Opmerking: in oorspronkelijk onderzoek waarin tabel van Elrick en Reynolds met 4 waarden voor macroscopische lengte werd gepubliceerd werd gesteld dat dit slechts eerste indicatieve waarden waren en dat er nog veel onderzoek nodig was. Maar ondertussen blijven deze gegevens gebruikt worden.

Aantal herhalingen: standaard minimum 6

Meestal worden de testen uitgevoerd aan het maaiveld maar in functie van het onderzoek kunnen ook andere dieptes getest worden (max. 3 dieptes) bv. in gecompacteerd in ploegzone.

Referentiekader:

Reynolds 2007, 2009 : $< 10^{-6}$ problematisch en $> 10^{-4}$ problematisch

Hyper 2008: 10^{-6}

NRCS (O neal) 5 permeabiliteitsklassen (later +6 en +7)

Kwaliteit: niet want mechanische testen, maar als in toekomst de geautomatiseerde drukmeter gebruikt wordt, zullen er wel referentiemetingen gebeuren.

Normen: Dubbele ring en Geulph: ISO methodes

2.3.1.1.2 Prof. dr. ir. Patrick Willems (KULeuven)

Via mail op 11/05/2016

Ik heb de vragen even bekeken, maar vrees dat ik weinig input kan leveren. De eerste reeks vragen hebben te maken met infiltratieproeven waar ik zelf geen ervaringen mee heb. De tweede reeks vragen zijn eerder gericht naar lokale besturen. Zelf voer ik o.a. onderzoek naar de noden inzake bijkomende toekomstige infiltratie als gevolg van de klimaatverandering en de toenemende urbanisatie-verharding, en de modelmatige inschatting van de effecten. Gegevens over infiltratiecapaciteit gebruik ik hierbij vooral als input in de modellen.

Telefonisch interview op 11/05/2016

Welke gegevens gebruikt u als input voor de infiltratiecapaciteit in uw modellering?

Hiervoor gebruiken we referentiewaardes op basis van het bodemtype. Om deze te bekomen worden referentiewaardes gebruikt uit verschillende tabellen waar dan een range uit wordt berekend.

In de modellen wordt ook nog rekening gehouden met de bodemvochtigheid en de seizoensvariatie hiervan. Wat wel effectief wordt gemeten, is het debiet in de rivier.

2.3.1.1.3 Prof. dr. ir. Jan Diels (KUL Afdeling Bodem- en Waterbeheer)

Schriftelijk vragenlijst ingevuld op 3/06/2016

1. Uitvoering infiltratieproeven

- a. Voert u infiltratieproeven uit of interpreteert u resultaten ervan? Zo ja, welke testen?

Dubbele ring infiltrometer, 'tension infiltrometer', regenvalsimulator

- b. Waarom deze methode(s)?

De eerste omwille van zijn eenvoud en relatief grote bodemoppervlak dat bemeten wordt. De tweede omdat ook conductiviteitswaarden nabij verzadiging bekomen worden. Regenvalsimulator als ook erosiegevoeligheid gemeten moet worden. Volgens mij dient men ook de 'single ring' infiltrometer te overwegen omdat men dan met een zelfde inspanning (en hoeveelheid water) veel meer metingen kan doen dan met een "double ring infiltrometer", wat ook belangrijk is gezien de ruimtelijk variabiliteit. We hebben het nog niet gedaan, maar ik zou het zeker overwegen bij toekomstig onderzoek.

- c. Wat zijn uw ervaringen hiermee?.

Dubbele ringinfiltrometer werkt goed op bodems die vrij hoge conductiviteit hebben. Op bodems die een lage K_{sat} hebben (en zeker als ze nat zijn) duurt het wat te lang, maar lukt nog wel. 'Tension infiltrometer' is OK voor onderzoeksdoeleinden. Regenvalsimulator geeft zeer nuttige data, maar is uiteraard zeer omslachtig

- d. Wordt er randinformatie voorzien (geologie, textuur,...) bij de rapportage en in het licht van de interpretatie (geschiktheid van de locatie, van stratificatie, ten behoeve van het ontwerp)?

We doen deze metingen in het kader van onderzoek, niet voor derden. Vraag is dus niet relevant.

- e. Hoeveel herhalingen voert u uit? Hoeveel metingen worden er per are uitgevoerd? Hoe wordt er beslist waar exact de infiltratiemeting plaats vindt?

We doen deze metingen in het kader van onderzoek, niet voor derden. Vraag is dus niet relevant. Plaats, diepte, aantal herhalingen hangen af van objectieven.

- f. Op welke diepte worden de infiltratiemetingen uitgevoerd?

We doen deze metingen in het kader van onderzoek, niet voor derden. Vraag is dus niet relevant.

- g. Wat is uw referentiekader voor de interpretatie van de resultaten?

We doen deze metingen in het kader van onderzoek, niet voor derden. Vraag is dus niet relevant.

- h. Wat is de kostprijs van deze metingen?

We doen deze metingen in het kader van onderzoek, niet voor derden. Vraag is dus niet relevant.

- i. Waar heeft u uw materiaal aangekocht?

Eijkelkamp voor dubbele ringinfiltrometer. Tension infiltrometer en regenvalsimulator maken we zelf.

- j. Zijn er vormen van kwaliteitscontrole al dan niet externe auditing?

Neen. We doen deze metingen in het kader van onderzoek, niet voor derden.

- k. Zijn deze methodes geaccrediteerd/genormeerd? Of heeft u weet van methodes die dit wel zijn?

Neen. We doen deze metingen in het kader van onderzoek, niet voor derden.

2. Wetgeving afvoer van hemelwater (buurlanden/gewesten)

Wij doen deze metingen niet voor derden, en ben ook niet op de hoogte van de wetgeving

[2.3.1.1.4 Prof. dr. ir. Guido Wyseure \(Faculty of Bioscience Engineering; KU Leuven\)](#)

Schriftelijk vragenlijst ingevuld op 8/06/2016

1. Uitvoering infiltratieproeven

- a. Voert u infiltratieproeven uit of interpreteert u resultaten ervan? Zo ja, welke testen?

Meestal tension-infiltrometer testen, soms ook dubbele ring, boorgaten, Guelph permeameter en inverse boorgaten methode, ook bepaling van conductiviteit in het laboratorium

- b. Waarom deze methode(s)?

Tension-infiltrometer gebruikt weinig water, gaat snel en levert ook informatie over de impact van de macro-poriën.

- c. Wat zijn uw ervaringen hiermee?

Tension-infiltrometer is snel en handig om de ruimtelijke variabiliteit van de infiltratie te gaan bepalen.

- d. Wordt er randinformatie voorzien (geologie, textuur,...) bij de rapportage en in het licht van de interpretatie (geschiktheid van de locatie, van stratificatie, ten behoeve van het ontwerp)?

Uiteraard is de correlatie met textuur, ligging en belangrijk

- e. Hoeveel herhalingen voert u uit? Hoeveel metingen worden er per are uitgevoerd? Hoe wordt er beslist waar exact de infiltratiemeting plaats vindt?

Meestal 2 indien er zeer veel metingen zijn op een terrein; anders 3 en meer indien meer specifiek voor een bodem gewerkt wordt.

De bodemkaart, bodemgebruik en de inschatting in het landschap

- f. Op welke diepte worden de infiltratiemetingen uitgevoerd?

Meestal aan de oppervlakte, maar soms ten behoeve van bodemprofiel beschrijving op diverse dieptes verdeeld over de lagen van het profiel

- g. Wat is uw referentiekader voor de interpretatie van de resultaten?

Onderzoek voor hydrologische en landbouwkundige toepassingen (bvb irrigatie en drainage)

- h. Wat is de kostprijs van deze metingen?

In het kader van ons onderzoek is er geen expliciete kostprijs

- i. Waar heeft u uw materiaal aangekocht?

Deels zelf gemaakt (tension infiltrometer) of bvb. aangekocht bij Ejikelpamp.

- j. Zijn er vormen van kwaliteitscontrole al dan niet externe auditing?

Fouten analyses worden gemaakt maar geen commerciële activiteiten

- k. Zijn deze methodes geaccrediteerd/genormeerd? Of heeft u weet van methodes die dit wel zijn?

NA voor wetenschappelijke toepassingen

2.3.1.1.5 dr. ir. Anne Beeldens (KU Leuven, Departement Burgerlijke Bouwkunde en OCW)

Interview op 27/04/2015

Testen worden uitgevoerd in het kader van de aanleg van waterdoorlatende verharding.

De gebruikte methodes zijn:

- nemen van Kopecky ringen en analyse in het labo
- grotere ongeroerde stalen
- open-end test met waterkolom van 1 m
- putmethode

De resultaten van de drie laatste komen meestal goed overeen, maar de test met de Kopecky ringen toont veel variatie.

Normaal worden per perceel 4 open-end testen uitgevoerd in de 4 hoeken. Indien er te veel variatie op zit, wordt een bijkomende test uitgevoerd in het midden van het perceel.

De open-end test wordt uitgevoerd met een waterkolom van 1 m, constant head test. Hierbij worden granulaten op de bodem gebracht. De doorsnede van de test is 10 cm diameter.

Soms wordt ook een dubbele of enkele ringtest uitgevoerd.

De referentiewaardes voor de bepaling of een bodem geschikt is voor waterdoorlatende verharding aan te leggen is:

- $\geq 10^{-4}$: geen bijkomende maatregelen
- $10^{-4} - 10^{-6}$: overloop in fundering
- $< 10^{-6}$: drainage aanleggen onder verharding.

Bij de uitgevoerde putproef wordt geen granulaat op de bodem gelegd

De prijs voor 1 terrein (= 4 metingen) is 800 euro. Dit gebeurt op een halve dag met 2 techniekers. Voor een bijkomende proef wordt 100 euro gerekend.

De uitrusting van de Open-end werd aangekocht via een Duitse straatsteenfabrikant.

Verder vermeld Anne Beeldens nog het CLASS project in Noorwegen waar testen worden gedaan ivm waterdoorlatende verharding maar ook ivm bodem.

2.3.1.2 Wallonië

2.3.1.2.1 ir Laurent Piront (Geolys sprl)

Schriftelijk vragenlijst ingevuld op 6/06/2016

1. Uitvoering infiltratieproeven

- a. Voert u infiltratieproeven uit of interpreteert u resultaten ervan? Zo ja, welke testen?

JA, wij voeren deze tests uit en interpreteren eveneens de resultaten.

OUI nous réalisons ces tests et nous assurons également leur interprétation.

Algemeen voeren we infiltratietesten uit voor ondiepe proeven en slug test (toevoegen of onttrekken van water) voor testen op grotere diepte (> 1,5m)

Généralement nous réalisons des tests d'infiltration pour les tests de faibles profondeur et nous réalisons également des slug tests (par ajout ou retrait d'eau) à l'occasion pour les ouvrages de plus grandes profondeur (>1.5 m)

- b. Waarom deze methode(s)?

Deze proeven zijn gemakkelijk te implementeren en laten toe een goede schatting te maken van de infiltratiecapaciteit van de plaatselijke bodem. Deze testen zijn ook gemakkelijk te interpreteren (berekeningen in Excel Spreadsheet).

Ces tests sont faciles à mettre en œuvre et permettent d'avoir une bonne estimation des capacités d'infiltration su sol en place. Ces tests sont également faciles à interpréter (feuille de calcul Excel)

- c. Wat zijn uw ervaringen hiermee?

Wij realiseren systematische deze testen en hebben veel ervaring met de realisatie/interpretatie.

Nous réalisons systématiquement ces tests et avons une bonne expérience concernant leur réalisation/interprétation.

- d. Wordt er randinformatie voorzien (geologie, textuur,...) bij de rapportage en in het licht van de interpretatie (geschiktheid van de locatie, van stratificatie, ten behoeve van het ontwerp)?

Ja, ons rapport bevat systematische een beschrijving van de context van de bestudeerde site (topografie, hydrologie, hydrogeologische, naburige waterwinningen, overstromingsrisico, resultaten van de proefboringen, grondwaterstanden, dimensionering van het infiltratiesysteem).

Oui, notre rapport reprend systématiquement un descriptif du contexte du site étudié (topographique, hydrologique, hydrogéologique, prise d'eau à proximité, risques en aval, détail des relevés de sondages, niveaux piézométriques, dimensionnement du système d'infiltration)

- e. Hoeveel herhalingen voert u uit? Hoeveel metingen worden er per are uitgevoerd? Hoe wordt er beslist waar exact de infiltratiemeting plaats vindt?

Algemeen wordt er op een terrein van 1 are met een eengezinswoning 3 infiltratietesten (0,70m diepte) uitgevoerd en een lithologisch onderzoek van de diepere lagen (2m, eventueel met opmeting van waterniveau).

Généralement, pour un terrain de 1 are avec maison unifamiliale, nous réalisons 3 tests d'infiltration (0.70 m de profondeur) et un sondage de relevé lithologique pus profond (2m, permettant la mesure d'un niveau d'eau éventuel)

f. Op welke diepte worden de infiltratiemetingen uitgevoerd?

De testen worden uitgevoerd op de diepte van de toekomstige infiltratievoorziening (0,7m voor infiltratiedrains, 1,5 – 2 m voor een stormbekken).

Les tests sont réalisés à la profondeur du dispositif d'infiltration qui sera mis en place (0.7m pour des drains d'infiltration, 1.5 – 2 m pour un bassin d'orage

g. Wat is uw referentiekader voor de interpretatie van de resultaten?

De testen worden meestal gerealiseerd en geïnterpreteerd in het kader van de SAIWE/SPW gids van 2004 over de infiltratie van gezuiverd afvalwater.

Les tests sont généralement réalisés et interprétés suivant les prescriptions du guide SAIWE/SPW de 2004 sur l'infiltration des eaux usées épurées.

h. Wat is de kostprijs van deze metingen?

De gemiddelde prijs voor een gemiddeld onderzoek voor een eengezinswoning in de klassieke context is 700 € voor de uitvoering van 3 testen + een diepe boring + een dimensionering van het afvalwaterzuiveringssysteem. Het regenwaterverwerkingssysteem wordt gedimensioneerd voor een supplement van ongeveer 500€. Voor meer complexe projecten, zijn de prijzen hoger (projectafhankelijk zeer variabel).

Pour une intervention globale pour une maison unifamiliale en contexte classique, le prix moyen est de l'ordre de 700 € pour la réalisation des 3 test + 1 forage profond + dimensionnement du système de gestion des eaux usées épurées. Le système de gestion des eaux pluviales est dimensionné moyennant un supplément de l'ordre de 500€. Pour les cas plus complexes, les prix sont plus importants (très variable d'un ca à l'autre)

i. Waar heeft u uw materiaal aangekocht?

Het meeste bij Eijkelkamp.

Eijkelkamp principalement

j. Zijn er vormen van kwaliteitscontrole al dan niet externe auditing?

Ja, de infiltratietesten, zoals al onze producten, ondergaan regelmatig interne en externe audits.

Oui les tests d'infiltrations, comme l'ensemble de nos prestations, font l'objet d'audits internes et externes récurrents

- k. Zijn deze methodes geaccrediteerd/genormeerd? Of heeft u weet van methodes die dit wel zijn?

NEEN deze technieken zijn niet genormeerd maar zijn aanbevolen door de SPW en we kennen geen andere technieken die momenteel geaccrediteerd zijn.

NON ces techniques ne sont pas normées mais sont conseillées par le SPW et nous ne connaissons pas actuellement d'autres techniques normées.

2. Wetgeving afvoer van hemelwater (buurlanden/gewesten)

- a. Wat zijn de richtlijnen over de door de bouwheer aan de overheid te leveren informatie?

De verplichtingen zijn opgelegd door de gemeente/stadsbesturen en zeer variabel van gemeente tot gemeente.

Les obligations sont énoncées par les administrations communales et généralement très variables d'une commune à l'autre

- b. Welk onderzoek is vereist door de bouwheer?

Cf bovenstaande. Algemeen moet de projectleider een studie laten uitvoeren om de infiltratiecapaciteit van de bodem te laten meten door een bevoegd studiebureau.

Cf ci-dessus. Généralement, l'auteur de projet doit faire réaliser une étude visant à mesurer les capacités d'infiltration du sol par un bureau d'étude compétent en la matière.

- c. Wat zijn de voorschriften voor de hemelwaterafvoer bij de aanleg van verharding zowel binnen het openbaar domein als het privédomein?

Ik denk niet dat er voorschriften bestaan voor dit onderwerp (hiervan ben ik niet zeker). De minimumwaarde waarbij geïnfiltrerd kan worden wordt meegegeven in de bouwvergunning.

Je ne pense pas qu'il existe de directive à ce sujet (pas de certitude toutefois). Un taux maximum d'imperméabilisation est fixé dans le permis d'urbanisme.

- d. Wat zijn de richtlijnen omtrent het verplicht gebruik van bovengrondse bronmaatregelen in bepaalde situaties?

Dit kan ik niet met zekerheid zeggen maar ik denk dat de verplichting om een hemelwaterput aan te leggen wordt opgelegd door de gemeente. De infiltratievoorziening moet minimum 1m boven de grondwatertafel aangelegd worden. Enkel na een milieueffectenrapport kan deze onder de grondwatertafel aangelegd worden.

Sans certitude, je pense que l'obligation de mise en place de citernes d'eau de pluies émane de l'administration communale. L'infiltration des eaux doit se faire au minimum 1 m au-dessus du toit de la nappe. Elle ne peut se faire dans la nappe que moyennant la réalisation d'une étude d'incidence détaillée.

2.3.1.2.2 ir. Eric Lefevre (inasep (intercommunale Namuroise de Services Publics))

Skype-interview op 06/06/2016

In Wallonië is er op het gebied van waterbeheer een overkoepelende organisatie AquaWal, waaronder 7 regionale instellingen waarvan inasep er een is voor regio van Namen.

Huidige situatie:

Momenteel beslist de gemeente/stad of er testen moeten uitgevoerd worden. Dus dit is zeer afhankelijk van plaats tot plaats. Deze overweging wordt gemaakt bij beoordeling van de bouwaanvraag, of komt aan bod tijdens de MER procedure. De infiltratietesten kaderen vaak in een overkoepelende hydrologische studie waar soms infiltratietesten worden uitgevoerd. De hydrologische studie wordt opgesteld door INASEP, in overleg met de steden of gemeentes. INASEP zal, indien zij dit nuttig acht, voorstellen infiltratietesten uit te voeren. De infiltratietesten worden uitgevoerd door private studiebureaus (vb SGS). Hierbij wordt de SAIWE studie uit 2004 als leidraad gebruikt. Deze werd opgesteld voor gezuiverd afvalwater, voornamelijk afkomstig van IBA. Een specifieke studie voor regenwater werd dit jaar opgestart. Steden die al een infiltratievoorziening/bufferbekken hebben aangelegd zijn onder andere: Namen en Gembloux.

Toekomst:

Momenteel zijn er 2 studies opgestart in opdracht van de Waalse regering die elk over 2 jaar lopen:

- EPUSOL: vervolgstudie van SAIWE

Uitgevoerd door UCL (Faculté des bioingénieurs - Earth and life Institute) Professeurs Patrick Gerin (patrick.gerin@uclouvain.be), Marnik Vanclooster (marnik.vanclooster@uclouvain.be) et ing projet: Nicolas Stipo (nicolas.stipo@uclouvain.be)

Hierbij probeert men te bepalen hoeveel water er kan infiltreren op bepaalde locaties en proberen te achterhalen wat de beste factor is om de doorlatendheid van de bodem te voorspellen (oa bodemtextuur, structuur,...). Hierbij maakt inasep deel uit van de stuurgroep. Een later doel is om een doorlatendheidskaart op te stellen voor Wallonië. De bodemkaart zou een mogelijke input zijn voor deze doorlatendheidskaart.

- Studie ivm infiltratievoorzieningen voor regenwater.

Gestion décentralisée de la parcelle des eaux pluviales en zone urbanisable en RW : UCL (Laboratoire Architecture et Climat) Professeur: André De Herde (deherde@matriciel.be), architecte du projet: Sophie Trachte (sophie.trachte@uclouvain.be)

- Hierbij wordt het ontwerp van infiltratievoorzieningen bekeken.

2.3.1.2.3 Prof. dr. ir. Aurore Degré (ULg - Gembloux Agro-Bio Tech BIOSystem Engineering
Water -soil - Plant Exchanges

Skype-interview op 03/06/2016

1. Uitvoering infiltratieproeven

- a. Voert u infiltratieproeven uit of interpreteert u resultaten ervan? Zo ja, welke testen?

Ja: dubbele ring, tensiometer, staalname en analyses in het labo

Meestal 2 of 3 metingen met de tensiometer en 1 in het labo ter bepaling van de $K(h)$.

- b. Waarom deze methode(s)?

Deze worden gebruikt in kader van landbouwonderzoek: hydrologie, respiratie van de bodem, hydrodynamische modellen opstellen.

- c. Wat zijn uw ervaringen hiermee?
- d. Wordt er randinformatie voorzien (geologie, textuur,...) bij de rapportage en in het licht van de interpretatie (geschiktheid van de locatie, van stratificatie, ten behoeve van het ontwerp)?

Op voorhand wordt een cartografische studie gedaan en het bodemtype bepaald, maar er wordt verder geen bijkomende randinfo gerapporteerd.

- e. Hoeveel herhalingen voert u uit? Hoeveel metingen worden er per are uitgevoerd? Hoe wordt er beslist waar exact de infiltratiemeting plaats vindt?

Minimum 3 herhalingen meestal 8, afhankelijk van de mogelijkheden binnen het project.

- f. Op welke diepte worden de infiltratiemetingen uitgevoerd?

De metingen met de tensiometer worden meestal aan de oppervlakte uitgevoerd. De stalen voor testen in het labo worden ook in de diepte genomen, per bodemlaag.

- g. Wat is uw referentiekader voor de interpretatie van de resultaten?

De grens van 10^{-6} m/s wordt gebruikt voor te bepalen of het goed doorlatend is of niet. De infiltratietesten vinden doorgaans plaats op leemachtige texturen.

- h. Wat is de kostprijs van deze metingen?

voeren geen metingen uit voor externe klanten.

- i. Waar heeft u uw materiaal aangekocht?

De grote tensiometer bij Eijkelkamp, de mini-disk bij decagon.

- j. Zijn er vormen van kwaliteitscontrole al dan niet externe auditing?

Er zijn interne werkvoorschriften op basis van de handleiding aangevuld met praktijkervaringen.

- k. Zijn deze methodes geaccrediteerd/genormeerd? Of heeft u weet van methodes die dit wel zijn?

Geen weet van accreditatie of auditing.

2. Wetgeving afvoer van hemelwater (buurlanden/gewesten)

Voor kleine projecten is dit niet verplicht en wordt dit niet gedaan. Voor grote projecten moeten hydrologische studie uitgevoerd worden denk ik.

2.3.1.2.4 Prof. ir. dr. Sarah Garre (Université de Liège - Gembloux Agro-Bio Tech UR TERRA)

Schriftelijk vragenlijst ingevuld op 8/06/2016

1. Uitvoering infiltratieproeven

- a. Voert u infiltratieproeven uit of interpreteert u resultaten ervan? Zo ja, welke testen?

Niet zelf, maar wel doctoraatsstudenten uit mijn groep. Vooral infiltrometer (tension-disc infiltrometer vooral). Daarnaast ook veel labo-onderzoek: evaporatie-experiment, permeameter.

- b. Waarom deze methode(s)?

Infiltrometer om een idee te hebben van het gedrag op het veld. Toch vaak verschillend van labometingen waar vaak grote variabiliteit is. Ook voor stenige bodems.

- c. Wat zijn uw ervaringen hiermee?

Infiltrometer metingen zijn interessant, maar geven enkel informatie over de oppervlakte. Om lange termijn-gedrag te voorspellen moet ook de diepere dynamiek gekarakteriseerd worden. Vaak verschillend dan labometingen. Labometingen geven nogal wat variabiliteit. Moeilijk te vergelijken tussen labos. Soms al verschillen vastgesteld tussen verschillende operatoren mbt permeameter metingen, zeker op gereconstrueerde stalen.

- d. Wordt er randinformatie voorzien (geologie, textuur,...) bij de rapportage en in het licht van de interpretatie (geschiktheid van de locatie, van stratificatie, ten behoeve van het ontwerp)?

Bij ons meer in het kader van landbouw-georiënteerde studies. Randinformatie wordt dus zeker gegeven.

- e. Hoeveel herhalingen voert u uit? Hoeveel metingen worden er per are uitgevoerd? Hoe wordt er beslist waar exact de infiltratiemeting plaats vindt?

Hangt sterk van de site en het soort studie af. We proberen altijd 3 herhalingen op dezelfde locatie uit te voeren. Aantal per are hangt af van de heterogeniteit van het veld. Naargelang de mogelijkheden kan een bestaande bodemkaart, nieuwe boringen of EMI kartering daarbij goede aanwijzingen geven.

- f. Op welke diepte worden de infiltratiemetingen uitgevoerd?

Met infiltrometer meestal enkel aan de oppervlakte. Voor labometingen proberen we stalen te nemen in elke bodemhorizon, meestal niet dieper dan 1m.

- g. Wat is uw referentiekader voor de interpretatie van de resultaten?

De literatuur en de bestaande historische databank van het labo. Hier is volgens mij sterke nood aan meer en betere referenties.

- h. Wat is de kostprijs van deze metingen?

Infiltrometer heb ik nog niet op bestelling uitgevoerd. Evaporatieexperiment is 100 euro per staal, excl btw.

- i. Waar heeft u uw materiaal aangekocht?

Verschillende bedrijven: eijkelkamp, UMS, ...

- j. Zijn er vormen van kwaliteitscontrole al dan niet externe auditing?

Neen, op dit moment niet. Dit is een van de pijnpunten in veel labo's voor bodemfysica.

- k. Zijn deze methodes geaccrediteerd/genormeerd? Of heeft u weet van methodes die dit wel zijn?

Neen.

2.3.1.2.5 Prof. dr. ir. Marnik Vanclooster (Université Catholique de Louvain - Earth and Life Institute)

Schriftelijk vragenlijst ingevuld op 6/10/2016

1. Uitvoering infiltratieproeven

- a. Voert u infiltratieproeven uit of interpreteert u resultaten ervan? Zo ja, welke testen?

JA

- Double ring
- Suction infiltrometer
- Falling head
- Pressure infiltrometer

- b. Waarom deze methode(s)?

Methodes beschikbaar in het labo

- c. Wat zijn uw ervaringen hiermee?

Toepassingen in agro-hydrologische projecten

Ondersteuning studenten projecten

- d. Wordt er randinformatie voorzien (geologie, textuur,...) bij de rapportage en in het licht van de interpretatie (geschiktheid van de locatie, van stratificatie, ten behoeve van het ontwerp)?

Ja

- e. Hoeveel herhalingen voert u uit? Hoeveel metingen worden er per are uitgevoerd? Hoe wordt er beslist waar exact de infiltratiemeting plaats vindt?

Minimaal 3 repetities

- f. Op welke diepte worden de infiltratiemetingen uitgevoerd?

Variable, afhankelijk van proefopzet

- g. Wat is uw referentiekader voor de interpretatie van de resultaten?

Pedotransferfuncties voor hydraulische geleidbaarheden in bodems.

- h. Wat is de kostprijs van deze metingen?

Geen commerciële toepassingen

- i. Waar heeft u uw materiaal aangekocht?

Eigen constructie + Eijkelpark

- j. Zijn er vormen van kwaliteitscontrole al dan niet externe auditing?

Niet systematisch

- k. Zijn deze methodes geaccrediteerd/genormeerd? Of heeft u weet van methodes die dit wel zijn?

Nee, maar er is een lopend project om de fysische metingen te normaliseren in het laboratorium.

2. Wetgeving afvoer van hemelwater (buurlanden/gewesten)

- a. Wat zijn de richtlijnen over de door de bouwheer aan de overheid te leveren informatie?

Mij onbekend.

- b. Welk onderzoek is vereist door de bouwheer?

Mij onbekend

- c. Wat zijn de voorschriften voor de hemelwaterafvoer bij de aanleg van verharding zowel binnen het openbaar domein als het privédomein?

Mij onbekend

- d. Wat zijn de richtlijnen omtrent het verplicht gebruik van bovengrondse bronmaatregelen in bepaalde situaties?

Mij onbekend.

2.3.1.3 Nederland

2.3.1.3.1 H.J. (Harrie) Winteraeken (Waterschap Roer en Overmaas)

Schriftelijk vragenlijst ingevuld op 02/06/2016

1. Uitvoering infiltratieproeven

- a. Voert u infiltratieproeven uit of interpreteert u resultaten ervan? Zo ja, welke testen?

Nee, we laten wellicht volgend jaar weer regensimulatieproeven op akkers uitvoeren voor bepaling oppervlakkige afstroming en bodemerrosie.

Rest vragen punt 1 nu niet van toepassing.

2. Wetgeving afvoer van hemelwater (buurlanden/gewesten)

- a. Wat zijn de richtlijnen over de door de bouwheer aan de overheid te leveren informatie?

Voor bebouwing kunnen via de bouwvergunning aanvullende bouwvoorschriften gelden voor het scheiden van regenwater van afvalwater. Indien deze voorschriften worden gesteld, dan vindt bij de bouw ook controle plaats op de naleving.

- b. Welk onderzoek is vereist door de bouwheer?

Niet bekend.

- c. Wat zijn de voorschriften voor de hemelwaterafvoer bij de aanleg van verharding zowel binnen het openbaar domein als het privédomein?

Deze kunnen verschillend zijn afhankelijk van de mogelijkheden tot afkoppelen van regenwater van het gemengde rioolstelsel.

- d. Wat zijn de richtlijnen omtrent het verplicht gebruik van bovengrondse bronmaatregelen in bepaalde situaties?

Niet bekend.

2.3.1.3.2 Harry van Luijtelaar (Stichting RIONED)

Schriftelijk vragenlijst ingevuld op 05/06/2016

Ad1

Stichting RIONED heeft een leidraadmodule uitgebracht over verschillende soorten proeven om de doorlatendheid van de grond te meten.

We hebben ook een meetprotocol opgezet voor het beproeven van infiltratievoorzieningen

Wat bedoelt u met infiltratieproeven? Ik denk wat wij doorlatendheidsmetingen noemen.

Wij voeren zelf geen metingen uit.

We zijn wel bezig met een rekenmodel voor het interpreteren van proeven aan infiltratievoorzieningen.

Het meetprotocol is bedoeld om de kwaliteit van de metingen te verbeteren.

Doorlatendheidsmetingen worden soms uitgevoerd door gecertificeerde partijen.

Ad2

Ben niet bekend met de verplichtingen van bouwheren richting de overheid inzake informatie van hemelwatervoorzieningen en eventuele onderzoeksplichten.

Voorschriften voor hemelwaterafvoer bij de aanleg van verharding.

Er wordt vooral voorgeschreven hoe een installateur riolering en voorzieningen moet aanleggen. Voor het perceel ligt dat bij het ISSO.

Specifieke voorschriften voor het publieke domein kan ik niet

Gemeenten kunnen onder voorwaarden particulieren opleggen het regenwater op eigen terrein te moeten verwerken.

2.3.1.3.3 Marius Heinen (Wageningen UR + Alterra)

1. Uitvoering infiltratieproeven

- a. Voert u infiltratieproeven uit of interpreteert u resultaten ervan? Zo ja, welke testen?:

Veld: dubbele-ring infiltrometer (in ver verleden ook: Guelph permeameter); Lab: doorlatendheid bij verzadiging (K_{sat}), doorlatendheidscurve (doorlatendheid als functie van drukhoogte of watergehalte) via verdampingsmethode

Waarom bent u gestopt met het gebruiken van de Guelph permeameter?
Guelph Permeameter (GP)

Deze is midden jaren 80 vd vorige eeuw op de markt gekomen. Er was goed mee te werken. Omdat sinds begin jaren 90 vd vorige eeuw simulatie modellen in opkomst kwamen zag je dat de interesse in veldmetingen afnam (kostbaarder dan simuleren). Daarnaast speelt ook dat ook bij de GP enkele praktische problemen speelde, zoals de kans dat de 2e meting deels in een andere laag plaatsvond, of dat er meer cq minder macroporiën meededen tijdens de 2e meting (persoonlijke ervaring). De bijbehorende theorieën zijn benaderingen en de uitkomsten waren dus afhankelijk welke theorie je hanteerde (zie o.m. Heinen & Raats, 1990). Recente ervaringen hebben wij niet.

De verdampingsmethode waarover u spreekt, is dit met een verzadigd staal op een balans en met 2 tensiometers op verschillende hoogtes? Of werkt deze anders? Meet deze $K(h)$ of K_{sat} ?

Verdampingsmethode

Wij gebruiken nog de uitvoering zoals die origineel door onze oud-collega's (Wind, Boels, Halbertsma) is ontworpen; uiteraard hier en daar gemoderniseerd. Hierbij wordt een grondmonster (staal) voorzien van 4 tensiometers op verschillende hoogtes en op een balans geplaatst. Het tijdsverloop van de tensiometers en van het gewicht wordt geregistreerd, en hieruit worden uiteindelijke, na toepassing van enkele theorieën, de waterretentie- ($w_c(h)$) en doorlatendheidskarakteristiek ($K(h)$) bepaald. K_{sat} wordt afzonderlijk bepaald aan een ander monster (staal).

De versie waar U op wijst (2 tensiometers) is neem ik aan de commercieel verkrijgbare versie van UMS (<http://www.ums-muc.de/en/home/>), met bijbehorende software HYPROP. De uitwerking die in HYPROP wordt gehanteerd maakt gebruik van enkele vereenvoudigingen van de oorspronkelijke theorieën die wij hanteren. HYPROP heeft als voordeel dat er meerdere analytische relaties voor $w_c(h)$ en $K(h)$ kunnen worden gefit. Maar in principe kunnen wij ook onze uitgewerkte data achteraf met HYPROP doorrekenen om die andere analytische relaties te fitten aan de door ons gegenereerde datapunten.

b. Waarom deze methode(s)?:

Goed beschreven in literatuur, eenvoud in gebruik

c. Wat zijn uw ervaringen hiermee?:

Goed

d. Wordt er randinformatie voorzien (geologie, textuur,...) bij de rapportage en in het licht van de interpretatie (geschiktheid van de locatie, van stratificatie, ten behoeve van het ontwerp)?

Bodemprofielbeschrijving, schatting/meting textuur (kleigehalte, leemgehalte, zandgehalte), en schatting/meting organische stofgehalte. Soms ook afzettingssmilieu beschrijven.

e. Hoeveel herhalingen voert u uit? Hoeveel metingen worden er per are uitgevoerd? Hoe wordt er beslist waar exact de infiltratiemeting plaats vindt?

Dat hangt van projectdoelstelling en budget af. Meestal wordt in duplo gemeten.

f. Op welke diepte worden de infiltratiemetingen uitgevoerd?:

Ring-infiltrometer aan maaiveld; Guelph permeameter in boorgat van enkele decimeters tot max. 100 cm diepte; Labmonsters worden op diverse dieptes gestoken (tot max. 120 cm diepte) afhankelijk van aanwezig bodemprofiel.

g. Wat is uw referentiekader voor de interpretatie van de resultaten?

Historische metingen in vergelijkbare bodemprofielen.

Bedoelt u hier de Staringreeks mee?

Referentiekader is natuurlijk de aanwezige informatie; uiteraard is dat vooral de informatie zoals verwoord in de Staringreeks.

Van de andere kant is het natuurlijk ook zo dat elk monster uniek is, en dat we op dit moment juist ook bezig zijn met locaties te bemonsteren en bemeten die nog ontbreken (dan wel sterk ondervetegenwoordigd zijn) volgens de Bodemkaart van NL. Dat levert in principe nieuwe informatie op.

h. Wat is de kostprijs van deze metingen?

Veldmetingen: gebaseerd op uurtarief medewerker: 1 tot enkel uren aangevuld met reistijd.
Labmetingen: K_{sat} : € 300; verdampingsmethode: € 525 (beide exclusief monsternamen in het veld; daarvoor wordt weer uurtarief medewerker gerekend aangevuld met reistijd)

- i. Waar heeft u uw materiaal aangekocht?

Eijkelkamp (www.eijkelkamp.com); deels zelf gemaakt

- j. Zijn er vormen van kwaliteitscontrole al dan niet externe auditing?

Er wordt gewerkt volgens werkvoorschriften. Eindrapport wordt door collega gereviewed.

- k. Zijn deze methodes geaccrediteerd/genormeerd? Of heeft u weet van methodes die dit wel zijn?

Er zijn diverse Nederlandse NEN normen (www.nen.nl).

2. Wetgeving afvoer van hemelwater (buurlanden/gewesten)

Dit valt buiten werkgebied van ons team.

2.3.1.3.4 Rob Hermans (Stichting RIONED)

Per mail geantwoord op 06/06/2016

Het is eigenlijk heel simpel: wij hebben voor zover mij bekend geen voorgeschreven regels in relatie tot de gemeentelijke zorgplichten of voorzieningen op particulier terrein.

Via de bouwregelgeving zijn regels ook marginaal oplegbaar. Via een maatwerkvoorschrift of verordening op basis van de lozing kan meer. Feitelijk kan iedere gemeente zelf bepalen welke eis zij stelt en als dat van toepassing is geldt dat ook voor de berekening of het meten van de infiltratiecapaciteit.

Privaatrechtelijk is er wel iets voor voorzieningen op eigen terrein geregeld, via de ISSO-publicatie 70.1. <http://kennisbank.isso.nl/docs/publicatie/70-1/2011>

Wat er precies in staat over infiltratiemetingen weet ik overigens niet. Daarvoor zou u met ISSO contact kunnen opnemen.

2.3.1.4 Frankrijk

2.3.1.4.1 Nathalie Le Nouveau (CEREMA (Centre d'études et d'expertise sur les risques, l'environnement, la mobilité et l'aménagement))

Telefonisch interview op 08/06/2016

CEREMA is een organisatie die tussen overheid en burger staat. CEREMA voert onderzoek, en verzameld expertise rond waterbeheer en ook infiltratie, maar uitvoeren van testen voor klanten doen ze zelden, hoewel ze de uitrusting hebben om dergelijke testen uit te voeren. In de doorgestuurde 'étude de sols pour les ouvrages d'infiltration ou de rétention d'eaux pluviales', mede ontwikkeld door CEREMA, worden 4 methoden beschreven: essai Porchet (à niveau constant, double anneau, test à la fosse (Essai Matsuo), essai d'eau dans un forage en tube ouvert (type Nasberg). De publicatie vermeldt eveneens een referentiekader. Ook wordt toegelicht hoe een infiltratiestudie wordt vergezeld van een pedologisch onderzoek en worden er ISO normen voorgesteld voor het uitvoeren van infiltratieonderzoek met de dubbele ring methode (NF EN ISO 22282-5) en de "tube ouvert (NF EN ISO 22282-2)". De publicatie is slechts een richtlijn. De gebruikte methode is afhankelijk van de expertise van het studiebureau. De publicatie licht tevens toe wanneer het raadzaam is om een infiltratiestudie uit te voeren. De uiteindelijke beslissing of het noodzakelijk is een infiltratiestudie uit te voeren, en of een infiltratiestructuur te voorzien wordt beslist bij beoordeling van de bouwaanvraag, op gemeentelijk niveau. Daarom zijn er grote verschillen tussen de verschillende regio's in Frankrijk. Nathalie Le Nouveau onderschrijft de noodzaak om in Frankrijk op nationaal niveau de richtlijnen verder te ontwikkelen. Momenteel is er een studie bezig voor 'un cahier des charges pour les études d'infiltration' (contactpersoon: Bruno KERLOCH van CEREMA in Lille). Ook had ze weet van een studie in Brussel. (Deze kaart kan geraadpleegd worden op http://www.leefmilieu.brussels/sites/default/files/user_files/geq06_-_carte_infiltration_eau_pluviale_-_kaart_hemelwater_infiltratie_0.pdf) Ook in Frankrijk is dergelijke kaart in ontwikkeling, o.a. door medewerking van CEREMA.

2.3.2 Richtlijnen buurlanden/gewesten

Hierna volgen de geldende richtlijnen in Wallonië, Frankrijk, Nederland en Duitsland. Over het algemeen is er een overkoepelende wetgeving in elk land/gewest/provincie (behalve Frankrijk) maar kan deze door de plaatselijke autoriteiten verfijnd of aangepast worden. Hierdoor is de wetgeving zeer plaatsgebonden.

2.3.2.1 Wallonië

Volgens artikel R.277 van de Waalse waterwetgeving, wordt in alle nieuwe voorzieningen de scheiding van regenwater en afvalwater verplicht waar een gescheide riolering aanwezig is. De infiltratie van regenwater op eigen terrein wordt wel aangemoedigd, maar hierover zijn geen wettelijke voorschriften vanuit de Waalse overheid. Wel kunnen regionale overheden de aanleg van een infiltratievoorziening opleggen (volgens 'la circulaire dite Forêt du 9 janvier 2003'). Dit om overstromingen te voorkomen. Deze regelgeving verschilt sterk tussen gemeentes/steden.

Bij grote projecten moet een hydrologische studie uitgevoerd worden dewelke een doorlatendheidsmeting kan omvatten. Bij kleinere bouwprojecten komt dit minder voor. De metingen worden uitgevoerd door een privaat studiebureau. Deze volgen meestal de waterwetgeving die bestaat voor de infiltratie van gezuiverd afvalwater in een individuele behandeling afvalwater (IBA): Système d'Assistance et d'Information Wallon pour l'Épuration autonome (SAIWE). Hierbij wordt wel verplicht om, waar mogelijk, het gezuiverde afvalwater te infiltreren. Hierbij wordt een doorlatendheid van 10^{-6} m/s vereist en een afstand van minimum 50 cm (ideaal > 100 cm) tot de watertafel om vervuiling van het grondwater te voorkomen door nog een extra zuivering door de bodem. Ook moeten deze installaties vermeden worden in overstromingsgebied. In dit voorschrift wordt een meetmethode beschreven voor de meting van de bodemdoorlatendheid. Deze is in principe hetzelfde als de falling head Porchet methode.

La méthode de mesure de la vitesse d'infiltration reconnue comme étant la plus appropriée pour le dimensionnement des systèmes d'infiltration est la méthode de mesure in situ, à charge variable. Celle-ci doit être réalisée selon un protocole expérimental défini afin de fournir une valeur de vitesse d'infiltration la plus proche des conditions réelles de fonctionnement. Les étapes suivantes décrivent la procédure d'un test standard :

1. creuser un trou de 15 cm de $\varnothing$ à la profondeur proposée pour le fond de la tranchée (généralement 0,8 m) le trou doit être cylindrique sur une hauteur minimum de 30 cm, dans la zone d'absorption prévue de sol ;
2. Griffer les parois et le fond du trou afin de retrouver la texture naturelle du sol.
3. enlever toute la terre excédentaire ;
4. placer au fond du trou une couche de 5 cm de gravier fin ($\varnothing$ de 1,2 à 1,8 cm) ;
5. remplir le trou avec de l'eau claire sur une hauteur minimum de 30 cm ;
6. laisser le sol se pré-saturer pendant au moins 4 h mais de préférence pendant une nuit. L'eau doit être claire, exempte de produits organiques ou de fortes teneurs en sodium ;
7. effectuer la mesure :
 - a. si l'eau demeure dans le trou après la période de pré-saturation. On ajuste la profondeur de l'eau à 15 cm. On mesure ensuite la baisse du niveau d'eau toutes les 30 minutes. Continuer l'essai jusqu'à ce que la dernière lecture soit identique à la précédente ou alors après 4 heures ;
 - b. s'il ne reste plus d'eau dans le trou après la période de pré-saturation. On ajoute 15 cm d'eau dans le trou. On mesure ensuite la baisse du niveau d'eau par intervalle de 30 minutes, et on ajuste la hauteur d'eau à 15 cm en apportant l'eau manquante. Continuer l'essai jusqu'à ce que la dernière lecture soit identique à la précédente ou alors après 4 heures ;
 - c. si les 15 cm d'eau apportés ont disparu avant que le délai de 30 minutes ne se soit écoulé, dans ce cas, l'intervalle de temps entre les mesures doit être de dix minutes.
8. calculs: Le taux de percolation (min/cm) = Temps (en minutes)/abaissement du niveau d'eau (cm) ;
9. au moins deux essais de percolation doivent être réalisés, un essai à chaque extrémité de l'emplacement proposé du système d'infiltration et à profondeur d'installation du système. Ils doivent être réalisés dans des conditions météorologiques normales, sans pluie ni gel.

La conversion des vitesses d'infiltration en vitesse d'application des effluents est approximative seulement

Enkel voor regenwater dat als industrieel afvalwater wordt beschouwd (bv. van afwatering op een industriële site) kunnen via de milieuvergunning bepaalde verplichtingen opgelegd worden.

Momenteel zijn er 2 studies opgestart in opdracht van de Waalse regering die elk over 2 jaar lopen:

- EPUSOL: vervolgstudie van SAIWE

Uitgevoerd door UCL (Faculté des bioingénieurs - Earth and life Institute) Professeurs Patrick Gerin (patrick.gerin@uclouvain.be), Marnik Vanclooster (marnik.vanclooster@uclouvain.be) et ing projet: Nicolas Stipo (nicolas.stipo@uclouvain.be)

Hierbij probeert men te bepalen hoeveel water er kan infiltreren op bepaalde locaties en probeert men te achterhalen wat de beste factor is om de doorlatendheid van de bodem te voorspellen (oa bodemtextuur, structuur, ...). Een later doel is om een doorlatendheidskaart op te stellen voor Wallonië. De bodemkaart zou een mogelijke input zijn voor deze doorlatendheidskaart.

- Studie ivm infiltratievoorzieningen voor regenwater.

Gestion décentralisée de la parcelle des eaux pluviales en zone urbanisable en RW : UCL (Laboratoire Architecture et Climat) Professeur: André De Herde (deherde@matriciel.be), architecte du projet: Sophie Trachte (sophie.trachte@uclouvain.be)

Hierbij wordt het ontwerp van infiltratievoorzieningen bekeken.

2.3.2.2 Frankrijk

In Frankrijk wordt op gemeentelijk niveau beslist over de aanleg van infiltratievoorzieningen. Hier bestaat geen overkoepelende wetgeving. Hierdoor zijn er hier eveneens veel regionale verschillen in de wettelijke verplichtingen. Het Centre d'Études et d'expertise sur les risques, l'environnement, la mobilité et l'aménagement Direction technique Territoires et ville (Cerema) heeft een procedure opgesteld om een studie uit te voeren voor de aanleg van een infiltratievoorziening: 'Fiche n° 6: Étude de sols pour les ouvrages d'infiltration ou de rétention d'eaux pluviales'

Dit is een deel van: Procédures d'autorisation et de déclaration des projets d'aménagement au titre du code de l'environnement rubrique 2.1.5.0: rejets d'eaux pluviales. Deze voorschriften zijn (nog) niet wettelijk verplicht. Ze stellen voor om een studie uit te voeren in 2 fases, 3 bij specifieke problemen:

- Fase 1: Een administratief onderzoek met inspectie van de site en eventueel een oppervlakkige verkenning. Dit is de 'kwalitatieve fase'.
 - o Administratief onderzoek:
 - Topografie, hydrografie
 - Pedologie, geologie, hydrogeologie geotechnisch
 - Historiek van de site

- o Terreinbezoek
 - visuele analyse van oa. De geomorphologie, waterlopen, vegetatie (waterminnend), waterbronnen, puinlagen, ...
 - Een buurtonderzoek kan nuttig zijn om seizoenale fenomenen te ontdekken die op het moment van de studie niet zichtbaar zijn.
 - Uitvoeren van een handboring van 1,5 à 2 m voor de catacterisatie van de aanwezige bodemlagen en eventueel de grondwatertafel.
 - Situeren van vochtige zones
 - Checken of voorgaande studies kloppen
- Fase 2: Deze fase bestaat uit een in situ onderzoek met eventueel een permeabiliteitstest. Dit is de 'kwantitatieve fase' van het vooronderzoek.
 - o Opstellen van een bodemprofiel met mechanische boring of een sleuf van 2 à 5 m door middel van niet destructieve methodes en identificeren van homogene lagen. Indien nodig ook stabiliteits- en draagkracht- (qualité de portance du sol) metingen.
 - o Doorlatendheidsmetingen. In deze voorschriften worden 4 methodes voorgesteld voor het bepalen van de verzadigde doorlatendheid van de bodem: de Porchet methode met constant head, de dubbele ring methode, de Matsuo methode en de Nasberg methode. De keuze voor een van deze methodes hangt af van:
 - De vermoedelijke doorlatendheid afhankelijk van de in fase 1 bepaalde aanwezige bodem.
 - De diepte van de meting bepaald via zowel de uitgevoerde boringen en de vooropgestelde inrichtingsplannen.
 - De vooropgestelde aan te leggen voorziening. Afhankelijk van de voorziening zal vooral horizontale, verticale of globale infiltratie plaatsvinden. Verschillende methodes testen de doorlatendheid in andere richtingen.

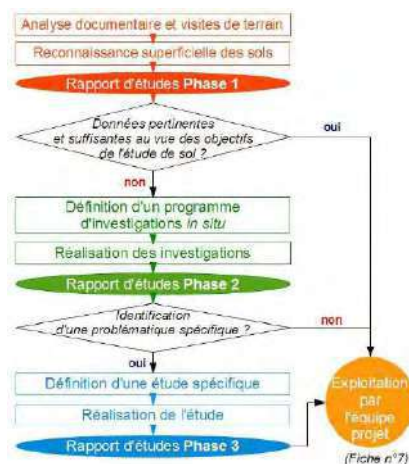
Er wordt ook gewezen op het belang van de structuur (cohérence) voor de doorlatendheid en het voldoende verzadigen van de grond voor de start van de testen.

De grens om een infiltratievoorziening aan te leggen stellen ze op **10⁻⁷ m/s** (0,36 mm/h of 8,6 mm/dag).

- o bepaling van de maximumhoogte van de grondwatertafel, indien nodig met behulp van 1 of meerdere peilbuizen.
- o Opstellen van situeringsplannen met localistie van alle onderzochte elementen.

- Fase 3: Deze fase kan bestaan uit meer zwaardere of minder courante onderzoeken in geval van specifieke problemen die aan het licht gekomen zijn bij het vooronderzoek. Bv. verontreinigingen, ondergrondse holtes, stabiliteitsproblemen,...

In de voorschriften wordt ook vooropgesteld hoe een rapport zou moeten opgesteld worden.



Figuur 2-47: Schema van het verloop van een bodemstudie voor het aanleggen van regenwater bekkens volgens Cerema.

Tabel 2-51: Toepassingsdomein en principes van veelgebruikte methodes om de doorlatendheid van de bodem te testen (Cerema)

Essais et K mesuré	Illustration	Nature des sols	Principe de l'essai	Remarques sur le domaine d'application
Percolation à niveau constant (essai Porchet) ^a <i>K local</i>		Sols superficiels, suffisamment cohérents	Réalisation d'une cavité par sondage manuel ; après saturation préalable, suivi du volume d'eau utilisé pour maintenir le niveau d'eau dans la cavité.	Essai en sondage (de faible profondeur et de faible diamètre) généralement effectué avec une tarière à main et mesurant la perméabilité locale, davantage représentatif de techniques d'infiltration de petites tailles.
Infiltrmètre ouvert à double-anneau NF EN ISO 22282-5 <i>K vertical dominante</i>		Sols superficiels moyennement à peu perméables <i>K entre 10⁻⁵ et 10⁻⁴ m/s</i>	Préparation d'une surface plane à profondeur donnée ; après saturation préalable, suivi du volume d'eau utilisé pour maintenir le niveau d'eau dans l'anneau central. L'anneau externe, dit de garde, permet de privilégier les écoulements verticaux.	Essai en surface (pouvant être réalisé dans une fosse), privilégiant la prise en compte de la perméabilité verticale des sols, davantage représentative de techniques d'infiltration telles que les chaussées à structure-réservoir.
Test à la fosse / Essai Matsuo Non normalisé <i>K global / K vertical</i>		Sols superficiels, suffisamment cohérents	Réalisation d'une cavité par sondage à la pelle ; après saturation préalable, suivi du niveau d'eau utilisé pour maintenir le niveau d'eau dans la cavité. Pour accéder à la seule perméabilité verticale (essai Matsuo), un 2 ^{ème} essai est réalisé en allongeant la fosse afin de supprimer les effets de bord.	Essai en cavité de grandes dimensions privilégiant la perméabilité globale du terrain, davantage représentative de techniques d'infiltration à forte emprise. Une saturation préalable sera difficilement atteignable dans le cas des sols assez perméables ($K > 10^{-4}$ m/s)
Essai d'eau dans un forage en tube ouvert (type Nasberg) ^a NF EN ISO 22282-2 <i>K local</i>		Sols fins suffisamment homogènes; <i>K supérieur à 10⁻⁶ m/s</i>	Réalisation d'une cavité par forage ; mesure de la perméabilité par suivi de la variation de charge hydraulique créée de préférence par injection à débit constant, à différentes profondeurs.	Essai en sondage pouvant privilégier la prise en compte de la perméabilité horizontale des sols, davantage représentative du fonctionnement attendu de techniques d'infiltration telles que les puits d'infiltration.

^a Un protocole d'essai est défini dans le cadre des études de faisabilité d'une filière ANC.

^a Des perméabilités plus faibles peuvent être mesurées avec un essai à charge variable.

Momenteel zijn er in Frankrijk ook studies lopende voor het uitbreiden van de wetgeving. Zo is men bezig met het opstellen van 'un cahier des charges pour les études d'infiltration'. Ook is men een kaart aan het ontwikkelen met de mogelijkheid van hemelwaterinfiltratie op aangeduid.

2.3.2.3 Nederland

Ook in Nederland wordt op gemeentelijk niveau beslist over de verplichting van aanleggen van infiltratievoorzieningen op privéterrein. Via de bouwvergunning, maatwerkvoorschrift of verordening kan opgelegd worden dat er infiltratievoorzieningen moeten aangelegd worden en of er al dan niet in situ metingen moeten aan vooraf gaan.

Een voorbeeld hiervan is Nijmegen waarvoor de eisen voor afkoppeling in onderstaande tabel kunnen gevonden worden.

Tabel 2-52: Eisen voor het afkoppelen van hemelwater op particulier en openbaar terrein in Nijmegen met verwijzing naar hoofdstukken van de nota 'Afkoppelen en infiltreren hemelwater' (Zuurman en Neienhuijsen, 2010)

Ontheffing en onderzoek (algemeen)			
	Particulier terrein	Openbaar terrein	Hfdst
Ontheffing infiltratieplicht (via aanvraag bouwvergunning, op basis van advies van Ingenieursbureau)	Ontheffing als: - dakoppervlak nieuwbouw kleiner is dan 50 m²; - uitbreiding dakoppervlak kleiner is dan 150 m²; - voor infiltratie beschikbare onbebouwde ruimte¹ < 20% van perceeloppervlak; - doorlatendheid bodem bovengrondse infiltratie < 1 m/d; - doorlatendheid bodem ondergrondse infiltratie < 2 m/d; - de gemiddeld hoogste grondwaterstand 0,7 m onder de onderkant van de infiltratievoorziening zit; - als er geen noodoverstort gecreëerd kan worden.	Niet van toepassing	2.1
Kwalitatieve aspecten	Geen infiltratie van hemelwater: - in grondwaterwingsgebied; - bij verontreinigde grond: nadere beoordeling (Milieu/Bodem): verontreinigde locaties conform Wet Bodembescherming (Globislocaties); (Bij bedrijven eventueel maatwerkvoorschriften door afdeling Milieu/Industrie.) Geen ondergrondse infiltratie van hemelwater: - in grondwaterbeschermingsgebied (gemeentelijk).	Geen infiltratie van hemelwater: - bij routes gevaarlijke stoffen; - bij marktplaatsen en bushaltes; - in grondwaterwingsgebied; - bij verontreinigde grond: nadere beoordeling (Afdeling Milieu/Bodem): verontreinigde locaties conform Wet Bodembescherming (Globislocaties). Geen ondergrondse infiltratie van hemelwater: - in grondwaterbeschermingsgebied.	2.2
Infiltratieonderzoek & waterhuishoudingplan	Bergingsnorm van 10 mm. Voor het aantonen van minder capaciteit zijn een infiltratieonderzoek en een waterhuishoudingplan verplicht.	Infiltratieonderzoek en waterhuishoudingplan zijn verplicht.	2.3
Ontwerp (algemeen)			
Berging	Vaste norm van 10 mm dakoppervlak aangesloten op rioolstelsel. Indien uit onderzoek blijkt dat de waterdoorlatendheid van de bodem (k) groter of gelijk is aan 3 m/d kan volstaan worden met een berging van 5 mm	voor $k < 3$ geldt dat $B = 10$ mm Voor $k \geq 3$ geldt dat $B = 5$ mm	3.1
Toe te passen systemen	geen eisen	In openbare ruimte zijn alleen toegestaan: - bovengrondse groen-infiltratievoorzieningen - infiltratielolien	3.2
Overstortconstructie	Bij overloop naar openbaar terrein, hemelwaterafvoer bovengronds aanleveren	- Is vereist, 100 l/sec/ha (met uitzondering van grootschalige areaaluitbreiding). - Bij voorkeur naar groen of water, zoniet dan naar riolering.	3.3
Ledigingstijd	24 uur	24 uur	3.4
Afstand tot bebouwing, perceel of groenvoorziening	Infiltratiesysteem moet zich in zijn geheel minimaal 2 m van gebouw of aangrenzend perceel bevinden. Bij kelders zijn mogelijk beschermende maatregelen nodig.	- Infiltratiesysteem moet zich minimaal 2 m van gebouw bevinden, tenzij beschermende maatregelen zijn getroffen. - Afstand tot groen is maatwerk, algemene regel is buiten kroonprojectie.	3.5
Afstromingsverliezen en afvoervertraging in berekening	Worden niet meegenomen in de berekeningen	Worden niet meegenomen in de berekeningen	3.6

¹ om de volgende redenen kan onbebouwde ruimte niet beschikbaar zijn voor infiltratie van hemelwater:

- Aanwezigheid van bodemverontreiniging
- Aanwezigheid van archeologisch waardevolle locaties
- Aanwezigheid van kabels en leidingen
- Oppervlakte binnen de kroonprojectie van bomen.

In de beleidsnota van Waterschap Roer en Overmaas: 'Lozen van afgekoppeld regenwater op oppervlaktewater' kunnen onder andere volgende aanbevelingen gevonden worden voor het aanleggen van een infiltratievoorziening:

Locatie:

- Hoogste grondwaterstand moet bij voorkeur 0,5 m verwijderd zijn van de bodem van de voorziening.
- Bij ijzerhoudend grondwater geen snel dichtslibbende elementen zoals geotextiel gebruiken
- Niet infiltreren in verontreinigde bodem
- Zo weinig mogelijk bomen zodat bladeren de voorziening niet kunnen verstopen.

Dimensionering:

- De infiltratiecapaciteit is afhankelijk van:
 - o Het infiltratieoppervlak
 - o De doorlatendheid van de ondergrond
 - o De grondwaterstand
 - o De mate van dichtslibben van de voorziening
- Er moet een geohydrologisch onderzoek uitgevoerd worden om de doorlatendheid en grondwaterstand te bepalen. De veiligheidsfactor die hierbij gehanteerd moet worden is de laagst gemeten doorlaatbaarheid gedeeld door een factor 2. Hierdoor wordt al rekening gehouden met mogelijke dichtslibbing.
- Vuistregel doorlatendheid:
 - o < 0,2 m/d: infiltratie af te raden
 - o 0,2 – 0,5 m/d: infiltratie mogelijk met extra berging vanwege leeglooptijd groter dan 24 uur
 - o > 0,5 m/d: infiltratie goed mogelijk.
- De maximale waterstand in de voorziening is bij voorkeur 0,30 m om verdrinkingsgevaar en ledigingstijd zo klein mogelijk te houden.

De verwerking van regenwater op openbaar domein valt onder het 'Besluit lozen buiten inrichtingen (2011)'.

- **In stedelijk gebied** beslist de gemeente of ze het regenwater loost in de riolering of op oppervlaktewater. De gemeente is ook wel verantwoordelijk voor de milieugevolgen van de laatste optie.
- **Buiten de bebouwde kom** wordt het regenwater meestal naar de bodem afgeleid of eventueel naar een aanwezig oppervlaktewaterlichaam. Hiervoor bestaan geen uitgewerkte voorschriften

Voor rijkswegen en provinciale wegen zijn in artikel 3.5 wel voorschriften opgenomen die stellen dat het regenwater bij voorkeur gecontroleerd in de bodem moet geïnfiltreerd worden (berm of een opvangvoorziening zoals een zalsloot of een opvangvijver). Als dit niet (of niet volledig) mogelijk is, mag geloosd worden in oppervlaktewater of op een rioelstelsel. Er worden geen richtwaarden vermeld onder welke waarde er geen infiltratievoorzieningen aangewezen zijn. En of deze in situ moet bepaald worden.

In Nederland is in opdracht van RIONED een onderzoek lopende uitgevoerd door Grontmij en Tauw over de werking van ondergrondse infiltratievoorzieningen. In kader van dit onderzoek wordt een meetprotocol uitgewerkt voor het beproeven van ondergrondse infiltratievoorzieningen.

(<http://www.riool.net/-/meetprotocol-ondergrondse-infiltratievoorzieningen-op-komst>)

2.3.2.4 Duitsland

In Duitsland wordt de uiteindelijke beslissing voor de omgang met hemelwater op gemeentelijk niveau genomen. Vanuit de Bondsrepubliek Duitsland is er een overkoepelende wetgeving: Wasserhaushaltsgesetz (2009). Deze vermeldt dat voor elk nieuwbouwproject het verplicht is om regenwater gescheiden te verzamelen van het afvalwater. De aanwezigheid van een gescheide riolering is zeer afhankelijk van streek tot streek. Juridisch gezien wordt regenwater opgevangen op het terrein beschouwd als afvalwater. Voor het lozen in oppervlaktewater gelden dus dezelfde eisen als voor afvalwater, namelijk dat de lozing de kwaliteit van het oppervlakte water niet mag verslechteren. In artikel 55 stelt men ook dat regenwater geïnfiltreerd mag worden op eigen terrein.

Deze overkoepelende wetgeving blijft echter op de vlakte en laat ruimte voor de deelstaten, 'Länder' om deze zelf in te vullen via de 'Wassergesetze' en verordeningen. Bij deze verordeningen worden normbladen toegevoegd met beschrijving van de te gebruiken technieken. Deze worden opgesteld door het Duitse standardisatieinstituut (Deutsches Institut für Normierung, DIN) in samenwerking met de vereniging voor water, afvalwater en afval (Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall, DWA). In normblad (Arbeitsblatt) DWA-A 138 wordt de planning, bouw en exploratie van installaties voor de infiltratie van regenwater behandeld.

Ook via het bestemmingsplan (Bebauungspläne) kunnen compensatiemaatregelen opgelegd worden in de vorm van groene daken of natuurlijke infiltratie.

Op gemeentelijk niveau kunnen via de bouwaanvraag en omgevingsvergunning bijkomende regels opgelegd worden in verband met afval- en regenwater.

Tegenwoordig wordt in Duitsland een aparte heffing toegepast voor afvalwater en regenwater. Vroeger werden deze gecombineerd en gebaseerd op de hoeveelheid verbruikt drinkwater. Hier kwam echter veel protest tegen (zelfs in de vorm van rechtszaken) omdat drinkwatergebruik en opvang en lozing van regenwater niet altijd samenlopend zijn (bv. appartement met veel drinkwaterconsumptie en klein oppervlak ten opzichte van bedrijventerrein met gematigde drinkwaterconsumptie en veel opvang van regenwater). In de nieuwe heffing op afvalwater wordt de prijs enkel nog gebaseerd op de consumptie van drinkwater. De heffing op lozing van regenwater wordt berekend op basis van de oppervlakte die aangesloten is op het regenwaterriool.

In 2005 bedroeg deze tussen 0,5 en 2 euro/m². Door deze maatregel worden hergebruik en infiltratie van regenwater op het terrein gestimuleerd. Dit houdt in geval van hergebruik een drievoudige besparing in: een besparing op kosten van drinkwater waaruit een besparing op heffing op afvalwater volgt en een besparing op heffing op regenwater.

Voorbeeld steden die hergebruik en infiltratie stimuleren zijn Hamburg en Bremen. Hamburg streeft hierbij naar een waterhuishouding zo dicht mogelijk bij de natuurlijke cyclus door plaatselijk te infiltreren. In Bremen is er voor percelen > 1000 m² een gescheiden heffing en voor percelen < 1000 m² een standaardheffing. Hierop kunnen echter wel uitzonderingen gevraagd worden indien men maatregelen getroffen zijn voor een verminderde lozing van regenwater (hergebruik, infiltratievoorziening, groendak, ...). De heffing wordt dan berekend via factoren die per soort oppervlak worden toegepast. Een voorbeeld is het volgende.

400 m² verhard oppervlak aangesloten op riolering = factor 1;

100 m² dakoppervlak aangesloten op infiltratievoorziening (volume $\geq 1,5$ m³/100 m²) met overloop = factor 0,3;

100 m² groendak zonder overloop = factor 0.

Dit maakt in totaal $(400 \text{ m}^2 \times 1) + (100 \text{ m}^2 \times 0,3) + (100 \text{ m}^2 \times 0) = 430 \text{ m}^2$ waar heffing voor gerekend wordt.

Ook worden hier subsidies uitgereikt voor de aanleg van groendaken en regenwatergebruiksinstallaties.

De verantwoordelijkheid van de kwaliteit van de infiltratievoorzieningen ligt bij de eigenaar. Bremen streeft wel naar een zo natuurlijk mogelijke infiltratie omdat hierbij de zuiveringscapaciteit (door bodem of beplanting) zo groot mogelijk is.

2.4 SELECTIE VAN RELEVANTE TESTEN VOOR HET MEETPROGRAMMA

Belangrijkste elementen in de overweging zijn de volgende:

1. Technische complexiteit is bij voorkeur beperkt, mogelijk om redenen van
 - reproduceerbaarheid (robuustheid)
 - opleidingsniveau van de operator, de technieker
 - tijd en kosten
2. Bestaat er reeds voldoende draagvlak, voldoende ervaring, vanuit wetenschappelijk oogpunt, maar ook in beleid, bv. normmethodes?
3. Werkgebied, bepaalbaarheidsgrens: vanuit pragmatisch oogpunt heeft het geen zin om doorlatendheden exact te willen bepalen die lager liggen dan waarden die sowieso de aanleg van infiltratiestructuren uitsluiten.
4. Verder m.b.t. de operationele en kostenzijde: Welke laagdikte wordt bemeten; welke laagdikte is relevant voor infiltratie en dient dus bemeten te worden? Op welke diepte ligt deze grondlaag, hoe groot is het ingezet watervolume en dient voor de voorbereiding van de meting een kraan ingezet te worden?

Algemeen:

Er wordt in de afweging van de methodes geen a priori of bijzonder gewicht toegekend aan de keuze tussen falling head of constant head als methodeprincipe. De algoritmes die werden afgeleid ten behoeve van de doorrekening op basis van het meettraject werden ofwel mathematisch afgeleid of empirisch bepaald. Voor elke methode gelden vanzelfsprekend specifieke randvoorwaarden die dienen meegenomen te worden, toegepast in het meetprogramma.

Volgende methodes worden voorgesteld voor opname in het meetprogramma:

2.4.1 Ongestoorde staalname, gevolgd door een bepaling in het labo a.d.h.v. een opstelling met opwaartse stroming

Het onderzoek betreft eerder hogere doorlatendheden ($>10^{-8}$ m/s) en kan dus uitgevoerd worden met opwaartse stroming.

Meetprincipe heeft een ruim maatschappelijk draagvlak en theoretische basis.

Exclusief k_v wordt bepaald.

Bij voorkeur hogere kolommen, gezien deelnemende laagdikte; de kolomhoogte toe te passen in het meetprogramma is nog te bepalen in functie van de uitvoeringswijze en bijgevolg kost.

Gevoelige handelingen liggen essentieel in de staalname: reproduceerbaarheid (robuustheid). Hoogte van de ongestoorde monsters, en bijgevolg de wijze van staalname zijn sterk medebepalend voor tijd en kosten.

In kader van dit onderzoek werd de afdeling Geotechniek toegewezen om de labometingen uit te voeren. Zij voeren de doorlatendheidsmetingen als volgt uit: Uit een ringstaal van 10 cm diameter wordt een staal genomen met een kopecky ring (5 cm diameter en 5 cm hoogte) In eerste instantie wordt er een test gedaan onder veranderlijk verval (falling head). Indien de doorlatendheid echter $> 1 \cdot 10^{-6}$ m/sec, wordt er overgegaan tot een test met constant head op een staal samengesteld uit gehomogeniseerde grond die gedroogd en gezeefd wordt. Er wordt hier gestreefd naar een poriënvolume van 40 %.

2.4.2 Enkele ring methode

Meetprincipe heeft een maatschappelijk draagvlak en theoretische basis.

Hoofdzakelijk k_v wordt bepaald.

Minimale diameter van 30 cm is te voorzien omwille van max. representativiteit.

Steeds in een combinatie met profielonderzoek waaruit blijkt dat geen ondoorlatende laag binnen infiltratiediepte ligt (overigens evenzeer relevant m.b.t. de andere methodieken).

Methode met afleiding van de doorlatendheid uit het onverzadigde traject:

- bewezen voldoende nauwkeurig;
- omwille van de tijd en dus kost.

2.4.3 Open end methode

Meetprincipe heeft een ruim maatschappelijk draagvlak en theoretische basis.

Expliciet k_v wordt bepaald.

Meting is echter op een beperkt bodemvolume, doch ze levert waarschijnlijk voldoende reproduceerbaarheid.

Een basisuitrusting, met een vorm van automatisatie en dus standaardisatie, vergt wel een investeringskost.

Beperkte uitvoeringstijd en -kost.

2.4.4 Methode Porchet (met constant head)

Meetprincipe heeft een ruim maatschappelijk draagvlak en theoretische basis.

Combinatie $k_h - k_v$

Meting echter op een relatief beperkt bodemvolume (kolom van +/- 15 cm).

Beperkte kost.

2.4.5 Hooghoudt of Soakaway Test

Meetprincipe heeft een ruim maatschappelijk draagvlak en theoretische basis

Meting op groter bodemvolume

Combinatie $k_h - k_v$

Beperkte uitvoeringstijd en kost

De stuurgroepvergadering van 21 mei 2015 heeft geopteerd voor opname van de Soakawaytest in het meetprogramma omwille van de weinig complexe uitvoering en een mogelijke directe interpretatie. De methode is makkelijk uit te voeren: ze vergt allerm minst specifieke apparatuur, opleiding of kennis.

2.4.6 PTF

In het kader van het vooronderzoek van de site is eveneens voorzien een granulometrisch onderzoek uit te voeren van de bemeten grondlaag. De grondsoort wordt dan bepaald op basis van de granulometrie. Op basis van de grondsoort zullen eveneens kenwaarden van doorlatendheid kunnen opgezocht worden.

2.4.7 Andere

Andere falling of constant head methodes worden op basis van de eerder genoemde criteria niet weerhouden.

Ook de tensioinfiltrometrie wordt niet weerhouden. De methode is veelbelovend en wellicht zinvol in het bijzonder voor grondlagen met betekenisvolle structuurontwikkeling. De methode heeft een beperkt maatschappelijk draagvlak, maar wel een theoretische basis. Nadelen liggen echter:

- waarschijnlijk in de reproduceerbaarheid (robuustheid),
- in de nodige aantal herhalingen voor niet-zandgronden,
- in de nodige tijd en hoge kost.

3. INFILTRATIETESTEN

3.1 INLEIDING, VASTSTELLING VAN HET PROGRAMMA

Het oorspronkelijke concept van meetprogramma voorzag in metingen in grondsoorten zoals deze opgelijst voorkomen onder tabelvorm in publicaties zoals Waterwegwijzer Bouwen en Verbouwen (VMM, versies tot 2010). Het betreft 10 grondsoorten Grof zand, Fijn Zand, Leemachtig fijn zand, Lichte zavel, Löss, Veen, Leem, Lichte klei, Matig zware klei, Kleiige leem. Verder is voorzien dat een meetprogramma wordt uitgevoerd op minstens 5 plaatsen, sites, in Vlaanderen per grondsoort. Per site worden in het meetprogramma 4 methodes uitgevoerd in situ, en 1 methode ex situ, in het laboratorium. Elke methode wordt in 3 herhalingen uitgevoerd per site.

Op basis van de literatuurstudie werd in overleg met de stuurgroep van 21 mei 2015 gemotiveerd besloten enkele wijzigingen door te voeren in dit meetprogramma.

3.1.1 Grondsoorten

Het programma m.b.t. de grondsoorten wordt bijgestuurd als volgt:

- De definitie van de initieel beschreven grondsoorten is niet helder; ze refereren in enkele gevallen naar een Nederlandse naamgeving of naar een niet goed afgelijnde oorsprong van een grond. Zie hiervoor paragraaf 2.1.3 van de literatuurstudie.
- Aan slechts enkele van deze grondsoortbenamingen kunnen equivalenten gekoppeld worden die terug te vinden zijn in Belgische bodemkartering.
- Grondsoort 'veen' heeft - mogelijk - een definitie die uitgaat van het organischestof-gehalte, en geen informatie meer bevat m.b.t. de textuur van het minerale deel. Als bodemserie wordt ze wel gedefinieerd in de Belgische Bodemkartering, maar in de praktijk gaat het hier over polygonen die zeer wisselende humusrijke en minerale lagen vertonen, met een verwachte hoge variatie in doorlatendheid. De bodemserie komt bovendien vrijwel steeds voor in beekvalleien, met hoge grondwaterstanden waardoor infiltratiestructuren minder kansen krijgen.
- Er wordt voorgesteld aan te sluiten bij de textuurindeling van de Bodemkaart van België omwille van de beschikbaarheid en de toegankelijkheid van deze informatie, en de mogelijke referenties, bv. bij het identificeren van grondsoorten van bouwpercelen, en de eventuele mogelijkheid om een karakteristieke doorlatendheid te kiezen zonder terreinonderzoek.
- De Bodemkaart van België geeft informatie over de textuurklassen
 - o Zand (Z)
 - o Lemig en kleig zand (S)
 - o Licht zandleem(P)
 - o Zandleem (L)

- o Leem (A)
- o Klei (E)
- o Zware klei (U)

Ten behoeve van het meetprogramma werd voorgesteld om de klasse U (zware klei) niet mee te nemen omwille van een doorgaans verwachte zeer lage doorlatendheid, en gezien deze klasse eveneens meest voorkomt in beekvalleien met hoge grondwaterstanden.

- De textuurklasse E (klei) wordt wel opgenomen in het programma: de textuur komt onder meer verspreid voor in gebieden waar het Tertiair dagzoomt, en dan dikwijls op topografisch hoger gelegen plaatsen, zonder permanent hoge grondwaterpeilen, soms evenwel met een hangwatertafel.
- In het kader van dit onderzoek wordt ook besloten om een textuur “Grof zand” mee te nemen. Deze textuur heeft geen definitie in België. Een dergelijke benaming is in Vlaanderen in de praktijk wel gebruikt en een omschrijving van een dergelijke grondsoort heeft in dit kader dan ook zin. Een gemotiveerd voorstel werd hiervoor gedaan onder paragraaf 2.1.3. van de literatuurstudie.

Samenvattend worden m.a.w. de textuurklassen Z, S, P, L, A, E, en een grondsoort Grof zand opgenomen in het programma.

3.1.2 Testen

Zoals gemotiveerd onder paragraaf 2.4 werd in overleg met de stuurgroep beslist tot de 4 in situ testen als volgt:

- OpenEnd-test (Constant head)
- Soakaway-test (Falling head)
- Porchetmethode (Constant head)
- Enkele Ring (Falling head)

Daarnaast worden ongestoorde bodemonsters genomen en aangeleverd ten behoeve van meting van de doorlatendheid volgens de methode in gebruik door de Afdeling Geotechniek (AOW).

Eveneens wordt van de bemeten bodemlaag een grondmonster genomen ten behoeve van de bepaling van de granulometrie. Op deze basis kan een doorlatendheid afgeleid worden uit experttabellen.

Op basis van deze aanpak worden 6 benaderingen van de doorlatendheid mogelijk.

In het oorspronkelijke concept werden 3 herhalingen per methode per site voorzien. Er is besloten dit aantal herhalingen op te trekken naar 4 ten behoeve van de statistische verwerking. Ingeval een outlier zou worden geïdentificeerd, verliezen 2 resterende herhalingen immers vrijwel alle kracht. 4 herhalingen laten veel meer kansen op betekenisvolle uitsplitsing.

3.2 VOORONDERZOEK

In het vooronderzoek worden geschikte sites voor de uitvoering van het meetprogramma geïdentificeerd als basis voor de uiteindelijke selectie, en afspraken met de eigenaar, gebruiker-pachter of projectontwikkelaar van de site gemaakt.

3.2.1 Opzoeken en inventarisatie gronden

3.2.1.1 Opzoeking sites

Voor de inventarisatie van mogelijke sites werd beroep gedaan op het netwerk vanuit de uitvoerder (Bodemkundige Dienst v. België). Er werden architectenbureaus, projectontwikkelaars en landbouwbedrijven gecontacteerd. Eveneens werd nagevraagd bij privépersonen. Voor uiteindelijk nog ontbrekende grondsoorten werd gezocht via de database van de Bodemkundige Dienst van België (grondanalyse) en/of werden specifieke personen aangesproken.

De gecontacteerde personen ontvingen een korte beschrijving van het doel van de studie, de verwachte werken en hinder, en de voorwaarden.

3.2.1.2 Desktop-voorstudie

De mogelijke sites werden gelokaliseerd op de Bodemkaart van België. Op basis van de voorkomende bodemserie(s) - textuur van de A-horizont of ingeval varianten of substraten zijn aangegeven - werd een verwachte textuur van de B, C of D-horizont afgeleid. Eveneens werd rekening gehouden met geologische informatie (Dak van het Tertiair).

3.2.1.3 Eerste inventarisatie

Voor elke site wordt genoteerd de ligging: (adres, provincie, Lambertcoördinaten), contactpersonen, de voorkomende bodemserie(s), de verwachte textuur van de ondergrond, mogelijke hinder voor eigenaar, gebruiker-pachter of projectontwikkelaar, verwachte vergoeding.

3.2.2 Terrein-voorstudie

Uit de eerste inventarisatie werden sites gekozen voor het vooronderzoek op terrein. In deze selectie worden een aantal criteria gehanteerd:

- Niet geroerde ondergrond;
- Voldoende informatie m.b.t. de textuur van de horizont(en) in de ondergrond (op basis van de Bodemkaart van België; opgehoogde terreinen kunnen bv. meegenomen worden indien de voldoende informatie beschikbaar is op basis van polygonen, bodemseries in de omgeving);
- Huidige gebruik van het terrein en mogelijke hinder;
- Relatie met de eigenaar, gebruiker-pachter of projectontwikkelaar van de site.

- Geografische spreiding: er wordt getracht om de 5 sites per grondsoort in de mate van het mogelijke over Vlaanderen te spreiden. Vanzelfsprekend zullen bepaalde grondsoorten eerder regionaal voorkomen (bv. leem eerder zuidelijk). De Bodemassociatiekaart is hierbij de leidraad. Poldergebieden worden hier niet betrokken.

In het vooronderzoek op de site wordt een profielonderzoek uitgevoerd tot 2 m-mv. Het onderzoek wordt uitgevoerd met Edelmanboor van 10 cm diameter.

Er werd een werkvoorschrift opgesteld voor het vooronderzoek waarin volgende voorzien is:

- De opgeboorde grond wordt als boorstaat neergelegd per meter op plasticfolie, en gefotografeerd.
- De verschillende bodemlagen worden beschreven en notitie wordt gemaakt van textuur (palpatiemethode¹²), organischstofgehalte, voorkomen van exogeen materiaal, kleur en –schakeringen, gleyverschijnselen, eventueel hardheid, vochtigheid, en grondwaterstand indien op minder dan 2 m-mv.
- Specifiek wordt gefocust op:
 - o Welke textuur hebben de horizonten in de ondergrond? Welke horizont kan in aanmerking komen voor de tests?
 - o Is deze horizont ongeroerd?
 - o Is deze horizont voldoende dik om te kunnen testen als een homogene bodemlaag (min. 40 cm)?
 - o Op welke diepte bevindt zich het grondwaterpeil (op het ogenblik van waarneming)?
 - o Is de horizont niet te diep onder maaiveld gelegen?
- Andere informatie is van meer praktische aard:
 - o Is het terrein bereikbaar met het nodige materiaal (graafmachine) en water (500 à 1000 l)?
 - o Interesse of opmerkingen van de eigenaar, gebruiker-pachter of projectontwikkelaar, ...
- De plaats van de boring wordt gefotografeerd met referentie-elementen in de omgeving.
- De plaats van de boring wordt vastgelegd met GPS, en genoteerd op plan of luchtfoto.
- Van de horizont(en) waar mogelijk de tests zullen worden uitgevoerd wordt een grondstaal genomen.

¹² Textuurbepaling door palpatie is een expertbepaling. De bepaling gebeurt door gedroogde, gezeefde grond (over een zeef van 2 mm) aan te voelen tussen de vingers, zonodig met gebruik van hulpmiddelen als water, HCl en referentiemonsters.

- Alle gegevens worden op een fiche genoteerd.
- Grondstalen worden voor bepaling van de textuur ingeleverd bij de Bodemkundige Dienst van België. Hierop worden bepaald:
 - o Textuur door palpatie
 - o :

kleifractie:	0 - 2 μ
leemfracties:	2 - 10 μ
	10 - 20 μ
	20 - 50 μ
zandfracties:	50 - 100 μ
	100 - 200 μ
	200 - 500 μ
	500 - 1000 μ
	1000 - 2000 μ
- Indien bij de waarnemingen relevant geacht: Organischestofgehalte (Gloeirest).

In totaal werden 99 sites aan een eerste vooronderzoek onderworpen (desktop, Bodemkaart van België, contacten) (Tabel 3-1).

Na deze voorafgaande selectie werd vooronderzoek op terrein (profielonderzoek, staalname, granulometrische analyse) uitgevoerd op 86 sites, met het oog op de selectie voor opname in het meetprogramma. Dit aantal ligt gevoelig hoger dan verwacht of gepland. Het bleek immers zeer moeilijk om voor enkele specifieke texturen, bodemprofielen geschikt voor het meetprogramma terug te vinden.

Hierbij zijn volgende vaststellingen te noteren:

- Slechts op 49 % van de sites komt de textuur op basis van granulometrische analyse van de onderzochte bodemhorizont overeen met de textuur die men zou verwachten op basis van de Bodemkaart van België.
- Het bleek bijzonder moeilijk om zand-ondergronden terug te vinden die als 'Grof zand' konden worden geïdentificeerd. Oorzaak hiervan is zonder twijfel de regio waarin de sites werden gekozen, doch verdergaand is er ook de definitie van 'Grof zand': de kleifractie dient lager te zijn dan 8 %, en de klei- en leemfractie samen dienen lager te zijn dan 10 %. Zo worden geregeld Tertiaire zanden aangeboord met een duidelijke grof-zandige fractie, doch met een hoge leem- of kleifractie waardoor deze textuur als "Lemig zand" (S) wordt benoemd.
- De textuurklassen E en P komen aanzienlijk minder frequent voor dan verwacht op basis van de Bodemkaart.

**Tabel 3-1: Sites ten behoeve van het vooronderzoek
en het meetprogramma doorlatendheidstesten**

Nr	Verwachte textuur van de B, C of D-	Bodem-serie	Gemeente	Provincie	CoordX	CoordY	Project; hinder	Vergoeding verwacht	Voor- onderzoek	Textuur	Textuur	Diepte meetvlak	Horizont- dikte	Grond- waterpeil	Selectie
										Granulometrie	Palpatie				
1	Z	Zeg/Zcg	Houthalen Helchteren	Limburg	223500	197540	gewenst	X	X	S	Z (15)	30	30-80	>165	X
2	Z	t-Zdg/t-Zcg	Neerpelt	Limburg	229034	212460	gewenst	X	X	Z	S (20)	65	65-100	100	X
3	Z	Zeg (Zdg)	Hamont Achel	Limburg	227789	221153	gewenst	X	X	Z	S (20)	40	40 - 85		X
4	Z	t-Zeg	Boholt	Limburg	234708	209779	gewenst (aardappelen)	X	X	S	S-P (20-25)	30	30-60	120	
5	L	Lba0	Heverlee	Vlaams-brabar	171853	173271	bouwerceel	X	X	/	/	/	/	/	
6	Z/S	sFep	Ekeren	Antwerpen	155360	218600	uiteindelijk geweigerd			/	/	/	/	/	
7	Z/S	Sepz	Ekeren	Antwerpen	155360	218200	uiteindelijk geweigerd			/	/	/	/	/	
8	L	Ldc (Lca)	Merchtem	Vlaams-brabar	141077	183109	gewenst, bouwerceel	X	X	L	A(40)	60	60-100	190	X
9	P	Sdmv/Peg	Turnhout	Antwerpen	191048	225244	uiteindelijk geweigerd			/	/	/	/	/	
10	L	Lbp(c)	Bierbeek	Vlaams-brabar	180020	168300	gewenst, grasstrook	X	X	A	A(40)	40	50-125	>200	X
11	A	Aba1	Meldert Hoegaarden	Vlaams-brabar	182250	164080	uiteindelijk geweigerd			/	/	/	/	/	
12	U/E	uhc	Kortenaken	Vlaams-brabar	197720	175900	uiteindelijk geweigerd			/	/	/	/	/	
13	A	Abb	Engelmanshoven (St-Truid)	Limburg	211800	162270	Fruitaanplanting, extensief			/	/	/	/	/	
14	A	Abp(c)/Aba1	Engelmanshoven (St-Truid)	Limburg	211550	163590	vrij, akker			/	/	/	/	/	
15	E	wLca/EDx	Holsbeek	Vlaams-brabar	179680	178320	Fruitaanplanting, extensief	X	X	P	S(20)	40	10-110	>200	X
16	E	wLca/EDx	Pellenberg	Vlaams-brabar	178100	174550	gras, geweigerd	X	X	/	/	/	/	/	
17	A	Abp1	Korbeek Dijle (bertem)	Vlaams-brabar	169530	170670	Gras	X	X	L	A (40)	50	40-85	>200	X
18	S/Z	S-Z	Neerijse (Huldenberg)	Vlaams-brabar	167730	167630	Gras	X	X	Z	S(20)	95	95-200	>200	X
19	A	Aba1	St Agatha-Rode	Vlaams-brabar	168981	161495	Gras	X	X	A	A(40)	40	40-190	>200	X
20	E/U	UDx	St Agatha-Rode	Vlaams-brabar	168608	161623	Maïs	X	X	L	L(35)	70	70-160	>200	
21	A	Aba1	Heers	Limburg	214490	159460	Gras, OK	X	X						
22	A	OT/Aba1/Abp	Heers	Limburg	215740	156000	Gras	X	X	A	A (40)	100	100-200	>200	X
23	A	OT/Aba1/Abp	Heers	Limburg	215670	156000	Gras	X	X	/	/				
24	Z	Zdb	Wachtebeke	Oost-Vlaander	115843	209058	weiland, mogelijk hoge C	X	X	Z	Z (15)	50	50-(80)142	190	X
25	Z/S	Zdg/Scdp	Assenede	Oost-Vlaander	105077	210882	Maïs	X	X	Z	Z (15)	100	100-200	180	
26	Z/S	Zdg/Zcg	Assenede	Oost-Vlaander	105234	210152	Maïs	X	X	Z	Z (15)	60	60-120	150	
27	L/P/S	Ldcz (Lhcz)	Haselt-Wimmeringen	Limburg	218884	174553	fruit, weide	X	X	L	L(35)	50	50-200	190	X
28	S	Saf/sLba/OT	Oud-Heverlee	Vlaams-brabar	170696	169279	uiteindelijk geweigerd	X	X	/	/				
29	E	w-Zdg	Koersel	Limburg	215042	196323	weiland	X	X	E	S(21)	80	70-200	>200	X
30	L	Ldcz	3570 Alken	Limburg	217468	173924	gras	X	X	P	L(35)	60	60-90	klei vanaf 145	
31	L	OB (Lbp)	Bierbeek	Vlaams-brabar	177238	168646	weiland (kippen)	X	X	A	A(35)	60	60-100	>200	
32	L	OB (Lbp)	Bierbeek	Vlaams-brabar	177276	168676	weiland (nietgeschikt, s	X	X	/	/				
33	L	Lbf(p)	Nieuwrode	Vlaams-brabar	181156	181855	grasland	X	X	L	A(40)	50	50-110	>200	

Nr	Verwachte textuur van de B, C of D-	Bodem-serie	Gemeente	Provincie	CoordX	CoordY	Project; hinder	Vergoeding verwacht	Voor- onderzoek	Textuur	Textuur	Diepte meestVlak	Horizont- dikte	Grond- waterpeil	Selectie
										Granulometrie	Palpatie				
34	L	Ldc/Ldcz	3850 Nieuwerkerken	Lumburg	210009	175443	Weiland	X	X	S	P(25)	50	50-105	>200	X
35	E/P/S	wLdc	3850 Nieuwerkerken	Lumburg	210863	175109	bouwceel	X	X	L	L(35)	50	50-160	>200	X
36	L	Lhc	3540 Herk-De-Stad	Lumburg	205793	178982	Weiland	X	X	L	L(35)	40	40-80	152	
37	Z	X/ZDF	3545 Zelem	Lumburg	201106	186775	braakgrond	X	X	S	S(20)	80	80-120	>200	X
38	P/S	Pccz/Lhc	3540 Herk-De-Stad	Lumburg	203900	180840	Weiland	X	X	/	/	/	/	/	
39	S	t-Scf/t-Sdg	Peer	Lumburg	229571	203009	gras	X	X	L	L(35)	70	70-110	>200	
40	S	Scm/Sdm	Begijnendijk	Vlaams-brabar	178953	189961	bouwceel			/	/	/	/	/	
41	A	Aba0(b)/(x)Aba	Duisburg (Tervuren)	Vlaams-brabar	162678	167656	extensief gazon: niet ger	X	X	A	A(40)	40	40-125	>200	
42	A	AbB	Vossem (Tervuren)	Vlaams-brabar	163803	168516	gazon naast hangaar, niet	X	X	A	A(40)	20	20-80	>200	
43	A	Aba	Vossem (Tervuren)	Vlaams-brabar	163835	168503	woongebied	X	X	Idem vorige	Idem vorige		20-80		
44	A	Abp	Vossem (Tervuren)	Vlaams-brabar	163409	169166	tijdelijk grasland niet ger	X	X	A	A(40)	60	60-105	>200	X
45	A	OB (Abp)	Duisburg (Tervuren)	Vlaams-brabar	162070	165930	bouwceel	X	X	A	A(40)	60	60-110	>200	
46	L	Lcf(p)	Wezemaal (Rotselaar)	Vlaams-brabar	178192	181680	(braakliggend) akker	X	X	L	L(35)	50	50-130	>200	X
47	Z	Zcm	Geel	Antwerpen	194600	205930	bouwceel	X	X	S	Z(15)	60	40-105	>200	X
48	Z(grof)	Zcch	Nazareth	Oost-Vlaander	95145	181660	Geen hinder	X	X	Z	Z(15)		50-90	190	
49	A	Aba1	Zottegem	Oost-Vlaander	107756	173529	Geen hinder	X	X	E	A(40)		40-110	>200	
50	S	sLdc	Aalst	Oost-Vlaander	129510	182345	Geen hinder	X	X	E	L(35)		45-100	>200	
51	L	Ldc	Aalst	Oost-Vlaander	129460	182331	Geen hinder	X	X	S	S(21)	40	40-80	>200	X
52	S/L	(s)Lcc	Aalst	Oost-Vlaander	129586	182459	Geen hinder	X	X	E	A(40)	40	40-85	>200	X
53	E	EDx	Nieuwenhove	Oost-Vlaander	122541	164242	na mais		X	E	A	40	40-200		
54	A	Aba1	Geraardsbergen	Oost-Vlaander	122122	163793	Stoppel, groenbemester	X	X	L	L(35)		45-100	>200	
55	A	Aba1	Geraardsbergen	Oost-Vlaander	122348	163984	Stoppel, groenbemester	X	X	L	L(35)		60-140	>200	
56	L	Lbp(c)	Bierbeek	Vlaams-brabar	180080	168260	Gras extensief	X	X	A	A(40)	60	(60)70-105	>200	
57	L/P	Aba1	Brakel	Oost-Vlaander	106152	167363	Stoppel, groenbemester	X	X	A	A(40)	40	45-110	>200	X
58	Z(grof)	ZAfe	Bekkevoort	Vlaams-brabar	192604	182775	Weiland	X	X	E	E	60	70-150	/	X
59	E/U	Uep	Nazareth	Oost-Vlaander	101011	183490	Stoppel	X	X	L	A(40)	40	40-90	>200	X
60	S	Sbc	Semmerzake/Gavere	Oost-Vlaander	100815	181747	Mais	X	X	S	S	100	35-100	>200	
61	S	Sbc	Semmerzake/Gavere	Oost-Vlaander	100709	181135	Stoppel, groenbemester	X	X	S	S	95	35-95	>200	X
62	P	Pbc	Sint-Martens-Latem	Oost-Vlaander	99700	190740	na mais	X	X	P	L(35)	60	60-110	/	X
63	Z	Zdh	Nazareth	Oost-Vlaander	95033	180959	na mais	X	X	Z(grof)	Z(10)	30	50-100	/	X
64	E/P/S	w-Scfc	Schaffien	Vlaams-brabar	202023	188586	Stoppel	X	X	E	S(20)	40	40-140	>200	X
65	E/U	UDx	St Agatha-Rode	Vlaams-brabar	168662	161608	slechte weg	X	X	U	L(35)	35	35-200	/	
66	Z(grof)	Zdg/Zeg	Geel	Antwerpen	191734	210693	grasland	X	X	Z	Z(11)	50	50-100	120	X

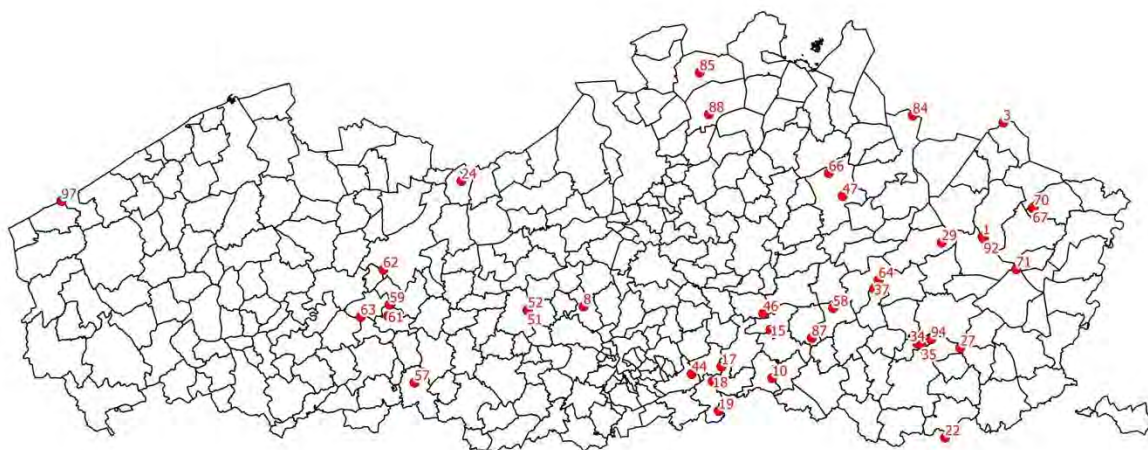
Nr	Verwachte textuur van de B, C of D-	Bodem-serie	Gemeente	Provincie	CoordX	CoordY	Project; hinder	Vergoeding verwacht	Voor- onderzoek	Textuur	Textuur	Diepte meetvlak	Horizont- dikte	Gron- waterpeil	Selectie
										Granulometrie	Palpatie				
67	Z	Sbft	Bree	Limburg	233853	203421	na aardappel oogst	X	X	Z	Z	30	30-70	/	X
68	Z	Sft	Bree	Limburg	234111	203691	na mais	X	X	S	S	40	40-110	/	
69	Z(grof)	Zgt	Bree	Limburg	234094	203627	na mais	X	X	S	S	40	40-90	/	
70	Z	Sbft	Bree	Limburg	234082	203610	na mais	X	X	S	S	30	0-30	/	X
71	Z	Sbft	Bree	Limburg	230436	190832	na mais	X	X	Z(grof)	Z	40	40-110	/	
72	Z(grof)	/	Tremelo	Vlaams-brabar	/	/	wss niet grof zand			/	/			/	
73	P	Pcm	Laakdal	Antwerpen	199413	198377	na mais	X	X	S	S	35	35-65	/	
74	P	Pcx	Geel	Antwerpen	191694	205572	Zeer goed bereikbaar	X	X	L	L	50	50-110	/	
75	Z(grof)	X	Hechtel	Limburg	218957	202913	ok	X	X	Z	Z	10	10-70	/	
76	Z	Z	Bree	Limburg	241801	205048	Naast veldweg	X	X	Z	Z	50	50-90	/	
77	Z(grof)	Zegx	Balen	Limburg	201979	205904	na mais	X	X	Z	Z	30	65-200	/	
78	Z(grof)	Z	Retie	Vraag Frank	198438	216186	naast voetbalterrein	X	X	S	S	/	40-110	/	
79	Z(grof)	Zcg	Postel	Antwerpen	204803	220864	bosweg, jeep nodig		X	Z	Z	100	100-200	160	
80	Z(grof)	Zcg	Postel	Antwerpen	205715	221481	bosweg, jeep nodig		X	Z(grof)	Z	110	110-200	200	
81	Z(grof)	X	Postel	Antwerpen	208686	217311	Onbereikbaar		X	/	/	/		/	
82	Z(grof)	Zdgb	Wuustwezel	Antwerpen	166983	222835	Goed bereikbaar	X	X	Z	Z	60	60-110	140	
83	Z(grof)	Zdg	Mol	Antwerpen	207113	211740	Geen hinder	X	X	Z(grof)	Z	50	50-100	100	
84	Z(grof)	Zcg	Mol	Antwerpen	209096	222571	Geen hinder	X	X	Z(grof)	Z	80	80-200	/	X
85	Z(grof)	Sdm	Wuustwezel	Antwerpen	165079	231498	Geen hinder	X	X	Z(grof)	S	100	100-200	/	X
86	Z(grof)	Zdgb	Kalmthout	Antwerpen	160449	233042	Geen hinder	X	X	Z	Z	40 of 100	40-200	150	
87	E/U	Edx	Meensele-Kiezegeem	Vlaams-brabar	188216	176610	Geen hinder	X	X	E	E	30	25-65	/	X
88	Z(grof)	Zdgb	Wuustwezel(Brecht)	Antwerpen	166983	222835	Goed bereikbaar	X	X	Z(grof)	Z	100	100-150	150	X
89	Z(grof)	Zdgb	Wuustwezel(Brecht)	Antwerpen	166983	222835	Goed bereikbaar	X	X	Z(grof)	Z	110	110-200	150	
90	P	Pcf	Houwaart	Vlaams-brabar	183618	180061	Naast weg	X	X	L	L	40	40-150	>200	
91	P	Pbp	Houwaart	Vlaams-brabar	183875	181260	Naast weg	X	X	L	L	40	40-110	>200	
92	Z	Zdgt	Houthalen Helchteren	Limburg	223730	197100	gewenst	X	X	S	S	40	40-80	>165	X
93	E/L/P	wLdc	Alken	Limburg	212498	175837	Plantage	X	X	/	/	30	30-80	/	
94	P	Pcc	Alken	Limburg	212850	176350	Geen hinder	X	X	P	P	30	30-80	/	X
95	P	Lccz	Alken	Limburg	212956	176627	toegankelijk	X	X	L	L	30	30-80	/	
96	P	Pcc	Scherpenheuvel	Vlaams-brabar	192405	184660	Geen hinder	X	X	E	E	40	40-140	/	
97	Z(grof)	dA0	Nieuwpoort	West-Vlaande	33 200	204914	Geen hinder		X	Z/Z(grof)	Z	0	0-200	/	X
98	P	Pcm	Laakdal	Antwerpen	199323	198356	na mais	X	X	S	S	/	40-85	/	
99	Z(grof)	X	Hechtel	Limburg	218783	202947	Geen hinder	X	X	Z	Z	/	15-150	/	

3.2.3 Selectie voor het meetprogramma

Op basis van de gegevens uit het vooronderzoek worden de finale sites voor het meetprogramma geselecteerd. De hierbij gehanteerde criteria zijn de volgende:

- De textuur van de horizont(en) onder de A-horizont.
- De dikte van deze horizont(en), waarbij een relatief homogene bodemlaag vereist is van minstens 50 cm dikte zodat de methodes kunnen toegepast worden in een verondersteld zelfde en homogene grond.
- De grondwaterstand bij voorkeur op minstens 90 à 100 cm dieper dan het voorziene meetoppervlak.
- Minimaal 5 sites per grondsoort.
- Regionale spreiding (binnen de gebieden van natuurlijk voorkomen van de gronden).
- Bereikbaarheid, toegankelijkheid.
- Timing: vrijgeven van bouwcelen; landbouwpercelen met late en hoogwaardige vruchten kunnen slechts betreden worden na de oogst.
- Relatie met de eigenaar, gebruiker-pachter of projectontwikkelaar van de site.

Finaal worden er 38 sites vastgelegd voor het meetprogramma (Figuur 3-1).



*Figuur 3-1: Sites op kaart, finaal vastgelegd voor het meetprogramma.
De nr aangeduid op kaart stemt overeen met de site nr zoals aangeduid in Tabel 3-1.*

3.3 TESTPROGRAMMA

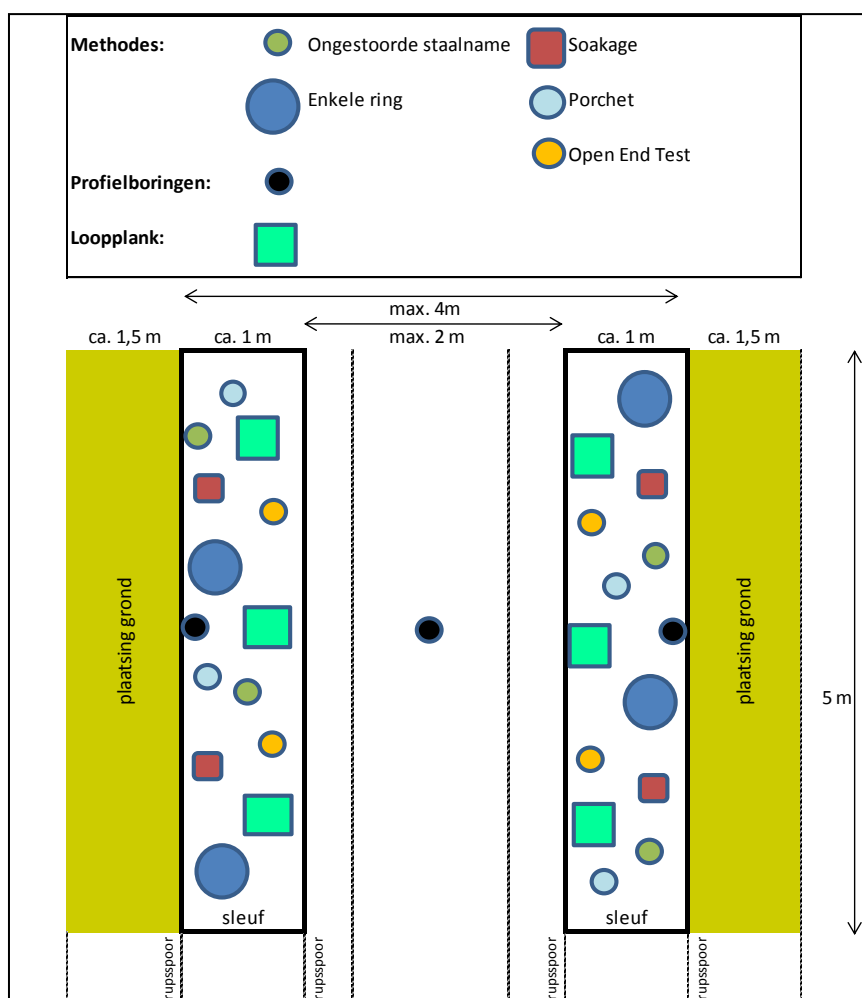
3.3.1 Lay-out, proefopzet

Op elke site worden, weerszijden van de profielboring van het vooronderzoek, 2 parallelle sleuven gegraven tot op de diepte van de te onderzoeken bodemhorizont. De sleuven hebben een lengte van minstens 5 m, een breedte van 1 m en liggen op afstand van ca. 2 m.

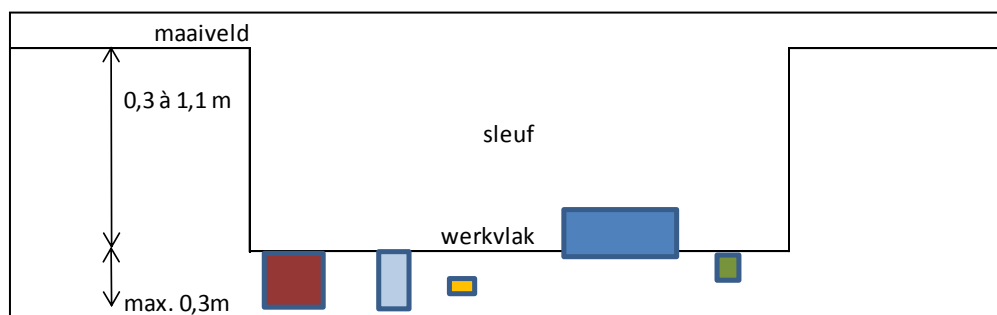
De proeven worden uitgevoerd vanuit het werkvlak op de bodemhorizont. Teneinde versmering, verdichting of roering van het werkvlak te voorkomen wordt getracht maximaal te werken vanuit loopplanken op het werkvlak.

De individuele metingen worden voor elke methode verspreid opgesteld over de sleuven. Hierdoor bedraagt de tussenafstand tussen elke herhaling per methode maximaal 4 m; alle methodes en herhalingen worden op deze wijze uitgevoerd binnen een oppervlakte van max. 20 m². Een schematisch inzicht in de lay-out wordt gegeven door de volgende figuren.

Ter controle worden 2 bijkomende profielboringen uitgevoerd tot ca. 1 m diepte onder het werkvlak (of 1,5 à 2 m-mv) en profielbeschrijvingen opgemaakt.



Figuur 3-2: Schematisch overzicht van de lay-out voor het meetprogramma per site.



Figuur 3-3: Schematisch, zijaanzicht van meethoogtes t.o.v. een werkvlak in een sleuf voor de verschillende methodes.

3.3.2 Voorbereiding

3.3.2.1 Uitrusting

De basisuitrusting werd verworven voor uitvoering van de meetmethodes in situ of staalname bij de volgende constructeurs:

Tabel 3-2: Uitrusting voor de meetmethodes opgenomen het meetprogramma.

Methode	Uitrusting
OpenEnd-test	Borgwardt Wissenschaftliche Beratung Büro BWB Norderstedt Winsener Straße 9 24568 Kattendorf (D) Ingenieurbüro Wolfgang Bothe Burbekstraße 24 22523 Hamburg (D) www.bwb-norderstedt.de
	Zelfbouw (Bodemkundige Dienst van België)
Methode Porchet	AXIS-Environnement 11 Rue des Écoles 56400 AURAY (F) www.axisnet.fr
Enkele ringmethode	Eijkelkamp Nijverheidsstraat 30 6987 EM Giesbeek (NL) www.eijkelkamp.com
Soakaway-test	Zelfbouw (BDB)
Doorlatendheidsbepaling in het laboratorium; en containers, ringen voor ongestoorde monsternamen	Afd. Geotechniek (MOW) Zelfbouw (BDB, Afd. Geotechniek)

M.b.t. de OpenEnd-test: Gezien defecten werden vastgesteld aan de uitrusting, werd een technisch ontwerp opgemaakt voor een uitrusting die voldoet aan de wetenschappelijke principes van deze test. Deze uitrusting werd gebouwd, getest en in gebruik genomen.

Voor het graven van de sleuven tot op de geplande diepte werd een kraan van 1,8 ton op rupsen, met brede bak en met bak met tanden voor droge grond, op trailer, ingehuurd.

3.3.3 Opmaak werkvoorschriften en opleiding

Er werden werkvoorschriften uitgeschreven voor de 4 in situ methoden en voor de ongestoorde staalname. Deze kunnen teruggevonden worden in Bijlage A. Het werkvoorschrift m.b.t. de OpenEnd-test werd aangepast aan de nieuwe vervangende uitrusting.

5 techniekers van de Bodemkundige Dienst van België kregen opleiding voor de uitvoering van deze methodes onder de kwaliteitsprocedures voorzien onder ISO-9001-2008.

Specifiek voor de OpenEnd-test werd beroep gedaan op het OnderzoeksCentrum voor de Wegenbouw (OCW), Sterrebeek. Deze hebben voorzien in een dag opleiding op een site. Ten overvloede was een bijkomende opleiding voorzien door de Duitse constructeur; deze is nooit doorgegaan omwille van ziekte van de opleider.

3.4 DATAVERWERKING MEETPROGRAMMA

De dataverwerking werd toegepast op K waardes verzameld op 38 sites. Bij selectie van de sites was de beoordeling van de bodemtextuur via granulometrie leidend. De textuurbeoordeling via granulometrie stemt echter niet overeen met de textuurbeoordeling via palpatie in het laboratorium. Zo werden via palpatie meer sites ingedeeld in de klasse A en minder in de klasse E (Tabel 3-3). Ook werd de textuurgroep Zg opgenomen in de textuur Z wanneer de textuur via palpatie in het labo werd bepaald. Omdat bij selectie van de sites de beoordeling via granulometrie als leidend werd beschouwd, wordt bij vermelding van textuur in het verloop van de tekst, zonder verdere specificatie, de beoordeling via granulometrie bedoeld.

Tabel 3-3: Aantal sites per textuurklasse zoals vastgelegd volgens de verschillende methodes om textuur te beoordelen.

Granulometrie	# sites	Palpatie labo	# sites	Palpatie op het terrein	# sites	Bodemkaart	# sites
A	5	A	10	A	6	A	5
E	5	E	1	E	2	E	6
L	6	L	4	L	7	L	6
P	5	P	4	P	1	P	4
S	6	S	9	S	8	S	5
Z	6	Z	10	Z	5	Z	6
Zg	5			Zg	9	Zg	6

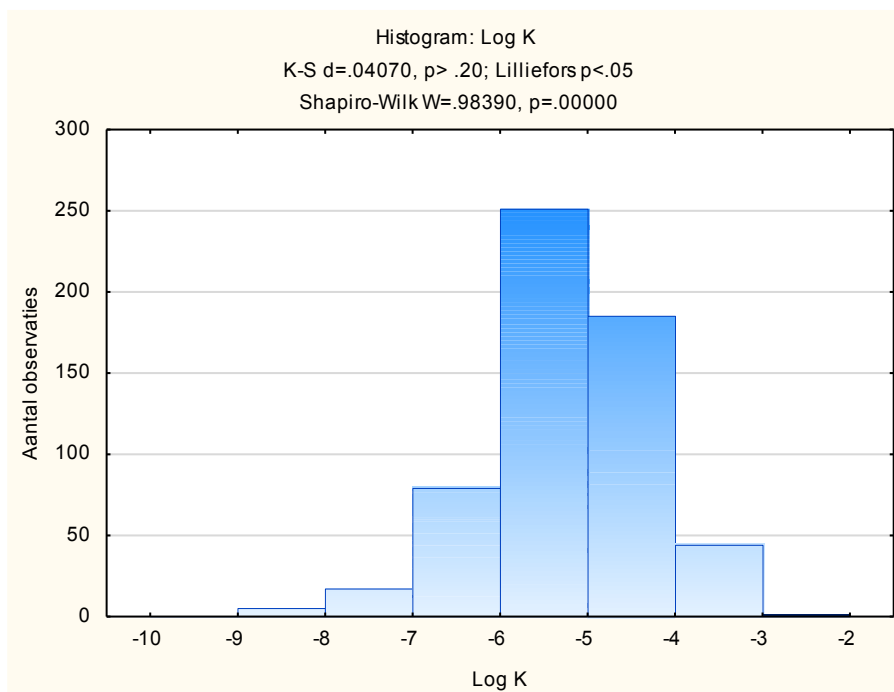
Op elke site werden de Enkele Ring methode (ER), de Open End methode (OE), de Porchet methode (PO) en de Soakaway methode (SO) in vier herhalingen uitgevoerd met uitzondering van:

- Site 15 (Textuur P) waar geen K metingen volgens de PO methode werden weerhouden en slechts 2 herhalingen van de SO methode.
- Site 57 (Textuur A) waar slechts 3 herhalingen van de OE methode werden weerhouden.
- Site 85 (Textuur Zg) waar geen metingen van de SO methode werden weerhouden.
- Site 94 (Textuur P) waar geen metingen van de ER methode werden weerhouden.
- Site 97 (Textuur Z) waar geen metingen van de SO methode werden weerhouden.

In totaal werden op deze wijze 582 K waardes van in situ testen weerhouden voor verdere data-analyse. Het meetresultaat van de infiltratietesten, de K-waardes, werd uitgedrukt in m/s. De meetresultaten werden in een Excel document overgemaakt aan de opdrachtgever.

3.4.1 Normaliteit van de dataset

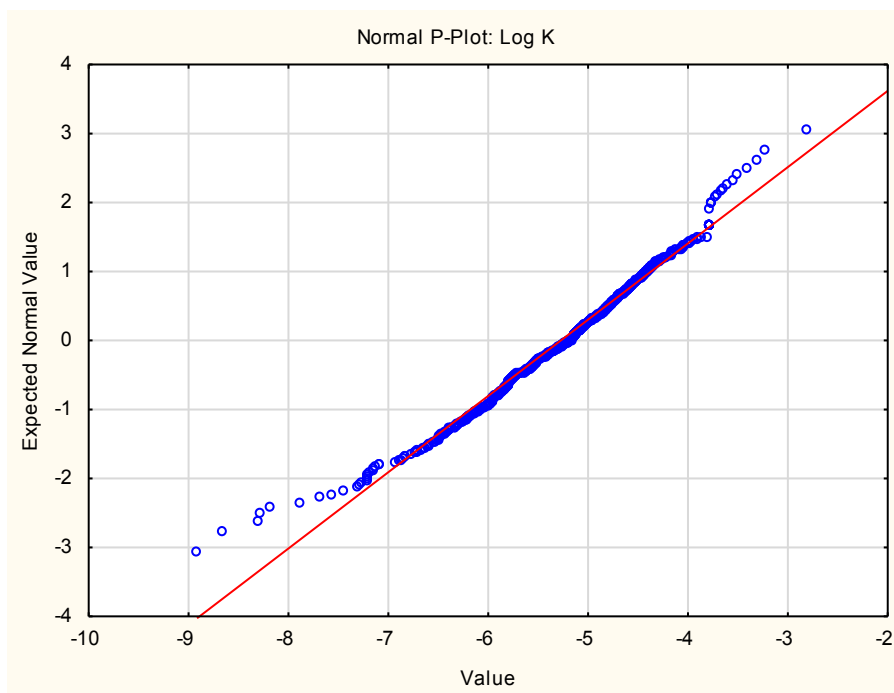
De normaliteit van de dataset werd onderzocht met behulp van het softwarepakket statistica (Statsoft, 2012). De normaliteit werd beoordeeld via de Lilliefors Test, de Kolmogorov-Smirnov Test en de Shapiro-Wilk W Test. De totale dataset van 582 K waarden was niet normaal verdeeld volgens deze testen. Van de K waarden, uitgedrukt in m/s, werd de logaritme genomen waarna de normaliteit opnieuw werd onderzocht. Na deze logtransformatie was de dataset nog steeds niet normaal verdeeld volgens de Lilliefors Test en de Shapiro-Wilk W Test (Figuur 3-4).



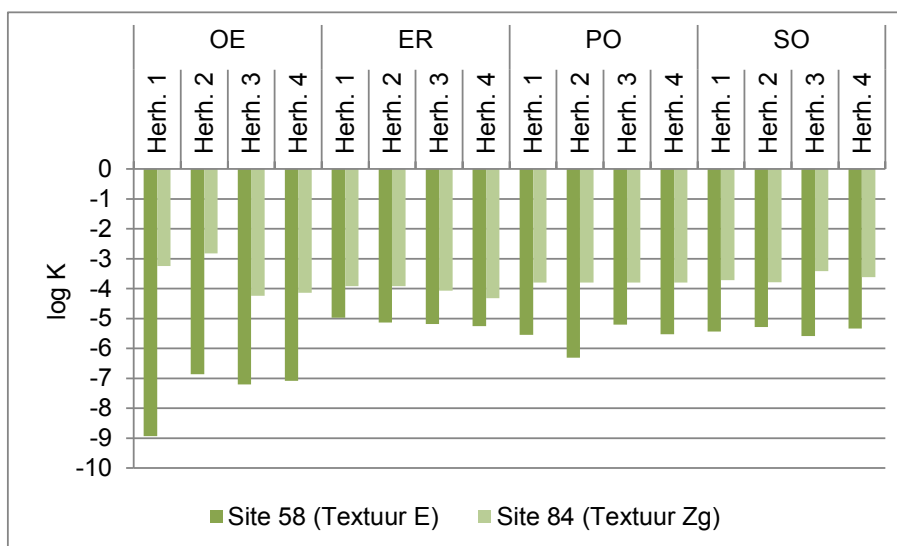
Figuur 3-4: Histogram van de Log K over de ganse dataset.

De dataset was niet normaal verdeeld omdat zeer hoge en zeer lage log K waarden voorkomen terwijl de meerderheid ligt tussen -4 en -6 (Figuur 3-5). Indien het criterium wordt gebruikt dat een waarde die meer dan drie keer de standaarddeviatie afwijkt van het gemiddelde een uitbijter is, houdt dit in dat alle waarden hoger dan -4.3 en lager dan -6.1 kunnen worden beschouwd als uitbijters.

Indicatief voor deze uitbijters zijn site 58 met textuur E en site 84 met textuur Zg (Figuur 3-6). In site 58 werd in herhaling 1 van de OE methode een zeer lage log K gemeten 2 eenheden lager dan het gemiddelde voor de site, terwijl voor de site 84 meerdere zeer hoge log K voorkomen.

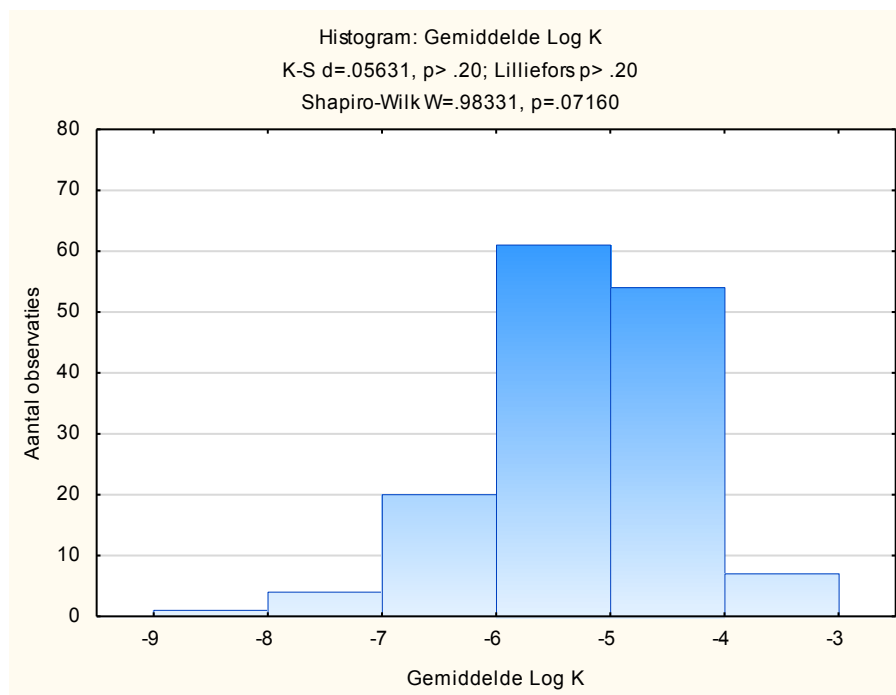


Figuur 3-5: PP plot van de Log K over de ganse dataset.

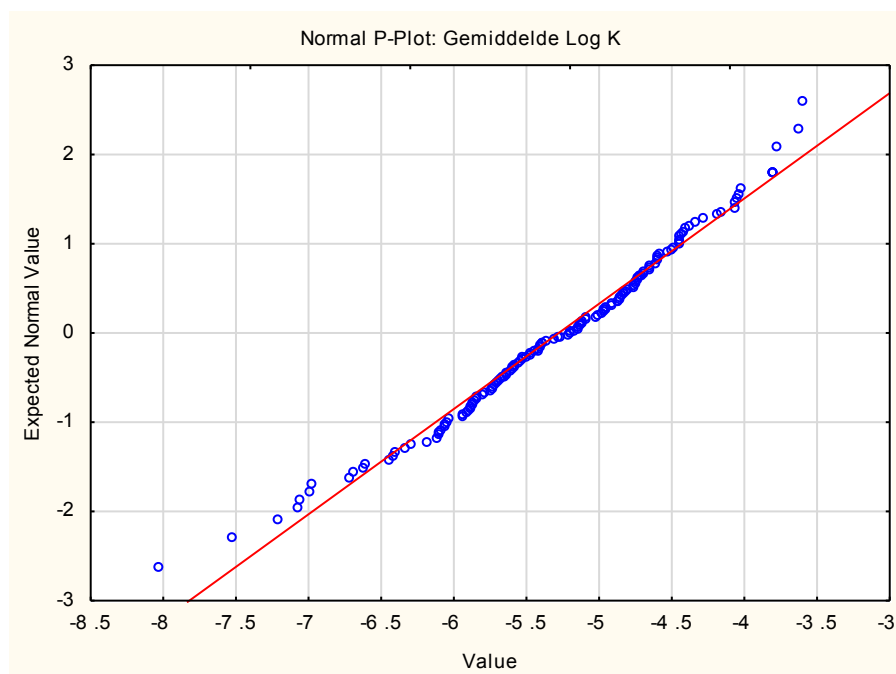


Figuur 3-6: Log K van site 58 (textuur E) en site 84 (textuur Zg)

Om zo veel mogelijk waarnemingen in de analyse te betrekken werd beslist om een gemiddelde te maken van elke meetmethode die per site werd uitgevoerd. Op deze manier werd de dataset gereduceerd tot 147 waarden. Deze dataset was normaal verdeeld volgens de drie testen (Figuur 3-7 en Figuur 3-8).



Figuur 3-7: Histogram van de log K gemiddelde per meetmethode per site.



Figuur 3-8: PP plot van de log K gemiddelde per meetmethode per site.

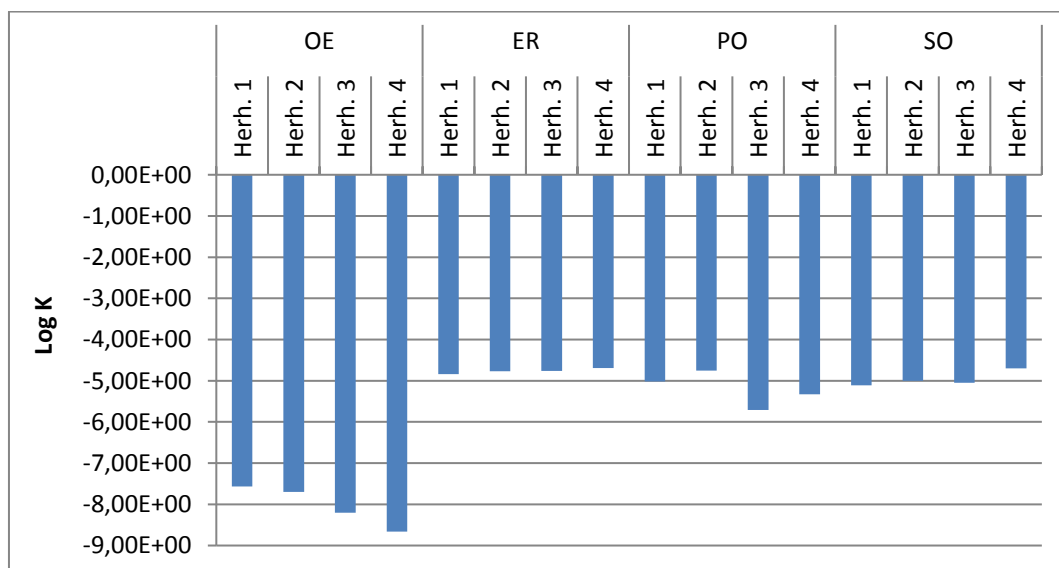
3.4.2 Analyse van de gemiddelde Log K per meetmethode per site

Op de 147 waarden waarbij log K werd uitgemiddeld, per methode en per site, werd via ANOVA analyse de significante invloed van volgende parameters onderzocht:

- De methode waarmee de meting werd uitgevoerd.
- De bodemtextuur van de site, bepaald volgens vier verschillende methodes (Tabel 3-3).
- De site waar de meting werd uitgevoerd.
- De temperatuur van het water dat gebruikt werd voor de infiltratietest.
- De diepte waarop de infiltratietest werd uitgevoerd.
- De drainagetrapp van de site zoals aangeduid volgens de bodemkaart van België.
- De diepte van de grondwatertafel tijdens het uitvoeren van de meting.

Indien één van bovenstaande parameters een invloed had op de Log K werd via een post hoc Tukey test onderzocht welke groepen significant van elkaar verschillen. Alvorens de ANOVA uit te voeren werd via de Levene's test onderzocht of de varianties homogeen verdeeld waren. Indien de varianties homogeen verdeeld bleken, werd de dataset gereduceerd tot dat de varianties van de desbetreffende groep niet meer homogeen waren. Indien echter meer dan 15 waarden uit de dataset moesten worden verwijderd, werd overgegaan naar een niet-parametrische Kruskal-Wallis analyse. De analyse werd uitgevoerd met het softwarepakket statistica (Statsoft, 2012).

In de dataset van 147 gemiddelde Log K waarden was er één waarneming waarbij de waarde meer dan drie keer de standaarddeviatie lager was dan de gemiddelde waarneming. Het betreft de gemiddelde Log K bekomen met de OE meting op site 27, textuur Leem. De vier herhalingen van de OE bepaling gaven allemaal een lagere log K (Figuur 3-9).



Figuur 3-9: Log K waarden gemeten via de vier methodes op site 27 (textuur Leem)

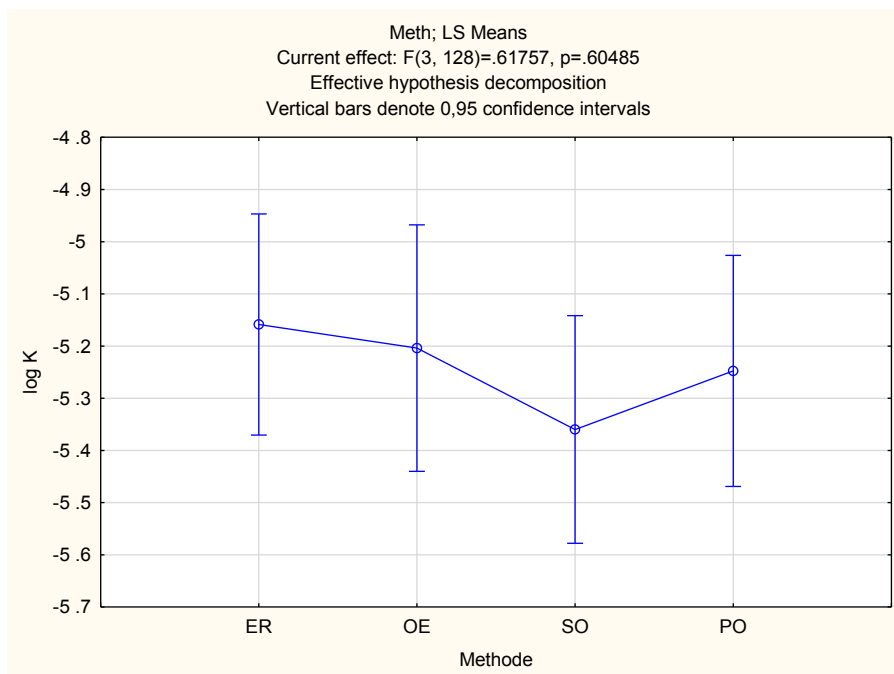
3.4.2.1 Invloed van de methode

De invloed van de meetmethode op de gemiddelde Log K werd onderzocht. Derhalve geen homogene varianties te bekomen in de groepen dienden 15 data te worden verwijderd uit de dataset (Tabel 3-4). Het betrof 9 waarnemingen met de OE methode, 4 waarnemingen met de PO methode, 1 waarneming met de SO methode en 1 waarneming met de ER methode. De metingen die verwijderd werden met de OE methode zijn veeleer lage log K waardes. In site 84 (textuur Zg), werden drie van de vier waarnemingen verwijderd uit de dataset.

Tabel 3-4: Data verwijderd uit de dataset waarmee een ANOVA analyse werd uitgevoerd ter studie van de invloed van de meetmethode op de log K. De data werden verwijderd derhalve geen homogene varianties te bekomen volgens de Levene test.

Site	Textuur	Methode	Gemiddelde log K
1	S	PO	-3.80
8	L	OE	-6.99
22	A	OE	-7.22
27	L	OE	-8.03
35	L	OE	-7.06
37	S	OE	-7.08
47	S	OE	-6.72
58	E	OE	-7.52
70	P	PO	-3.80
84	Zg	OE	-3.61
84	Zg	PO	-3.80
84	Zg	SO	-3.64
94	P	OE	-6.99
97	Z	ER	-3.78
97	Z	PO	-3.80

Met de ANOVA analyse kon niet worden aangetoond dat de meetmethode een invloed heeft op de log K (Figuur 3-10).



Figuur 3-10: Gemiddelde log K van de vier meetmethodes met daarbij de 95 % betrouwbaarheidsintervallen.

Ook indien een niet parametrische test werd toegepast op de volledige dataset, dus inclusief de data aangeduid in Tabel 3-4, kon in relatie tot de meetmethode geen verschil tussen de gemiddelde log K worden aangetoond.

3.4.2.2 Invloed van de bodemtextuur

De invloed van de bodemtextuur op de gemiddelde log K werd onderzocht voor de verschillende procedures om de bodemtextuur te bepalen.

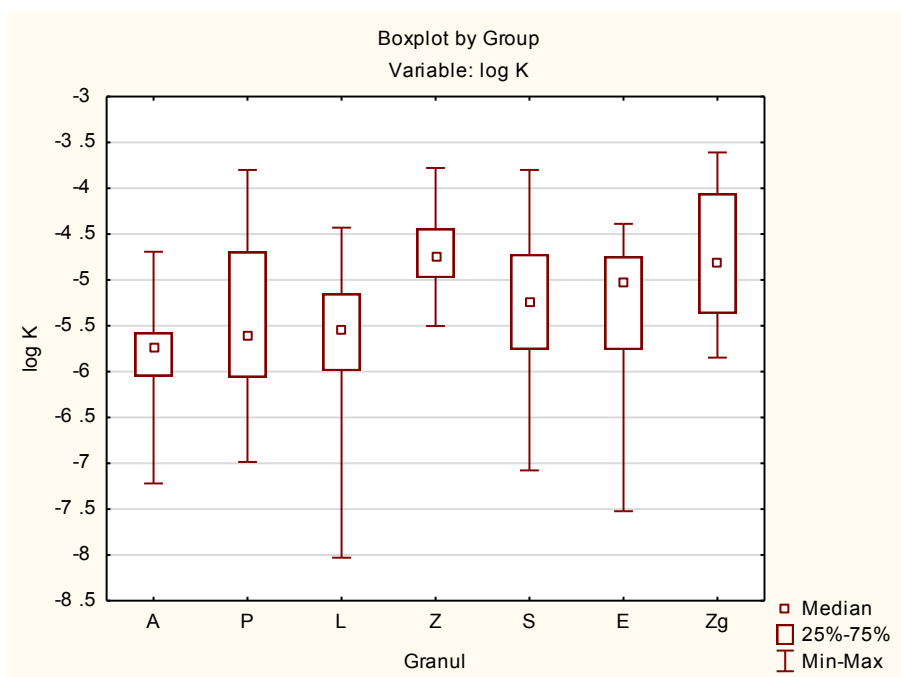
3.4.2.2.1 Invloed van de bodemtextuur bepaald via granulometrie

De invloed van de bodemtextuur, bepaald via granulometrie, op de gemiddelde log K werd onderzocht. Het bleek niet mogelijk om een dataset te bekomen zonder homogene varianties wanneer minder dan 16 data werden verwijderd uit de dataset. Vandaar werd beslist geen ANOVA analyse uit te voeren maar wel een niet-parametrische Kruskal Wallis test. Deze toonde significant hogere Log K aan voor Z, Zg ten opzichte van A en L (Tabel 3-5). Eveneens was er een significant verschil tussen P en Z.

Tabel 3-5: p waarden berekend door middel van de Kruskal-Wallis test waarbij de individuele textuur groepen, beoordeeld volgens granulometrie, met elkaar worden vergeleken.

Depe nd.: log K	Multiple Comparisons p values (2-tailed); log K Independent (grouping) variable: Granul Kruskal-Wallis test: H (6, N= 147) =35.87906 p =.0000						
	A R:42.950	P R:64.029	L R:55.667	Z R:105.59	S R:73.354	E R:75.100	Zg R:100.18
A		1 .000000	1 .000000	0 .000031	0 .385370	0 .356025	0 .000571
P	1 .000000		1 .000000	0 .047822	1 .000000	1 .000000	0 .230528
L	1 .000000	1 .000000		0 .001233	1 .000000	1 .000000	0 .013909
Z	0 .000031	0 .047822	0 .001233		0 .199048	0 .402952	1 .000000
S	0 .385370	1 .000000	1 .000000	0 .199048		1 .000000	0 .843627
E	0 .356025	1 .000000	1 .000000	0 .402952	1 .000000		1 .000000
Zg	0 .000571	0 .230528	0 .013909	1 .000000	0 .843627	1 .000000	

De hoogste Log K werden geobserveerd voor Z en Zg, de laagste voor A (Figuur 3-11).



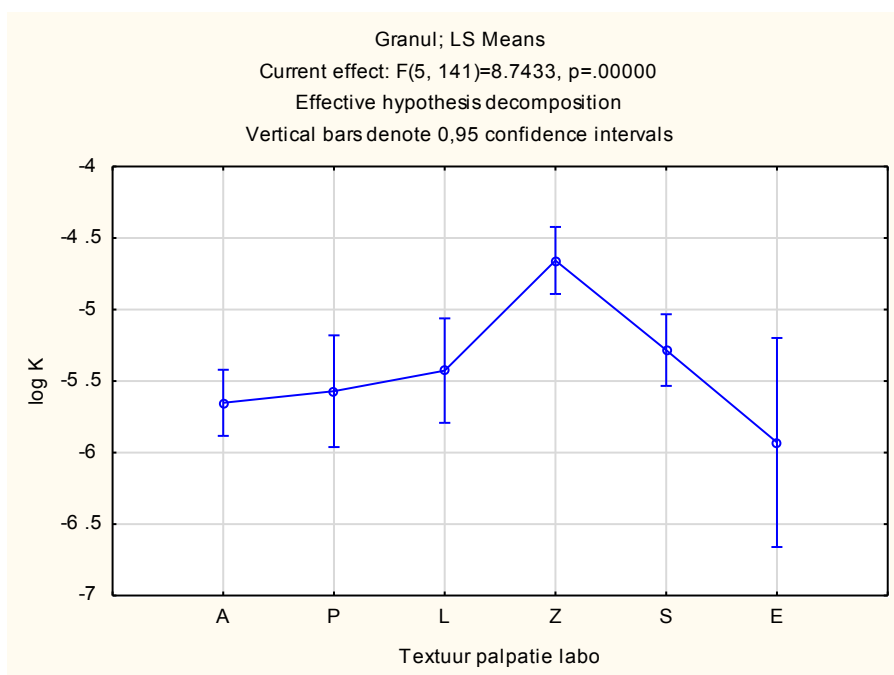
Figuur 3-11: Box plot die de gemiddelde Log K met de spreiding aanduidt voor de verschillende textuurklassen, zoals bepaald door granulometrie, over de ganse dataset.

Ook indien de textuurgroep Zg wordt opgenomen in de textuurgroep Z bleek een ANOVA analyse niet mogelijk vanwege homogene varianties tussen groepen.

3.4.2.2.2 Invloed van de textuur bepaald via palpatie in het labo.

In tegenstelling tot de textuurbeoordeling via granulometrie kon via de textuurbeoordeling via palpatie in het labo wel een ANOVA analyse worden uitgevoerd. De analyse kon worden uitgevoerd op de volledige dataset van 147 waarnemingen. In textuurbeoordeling door palpatie beoordeeld in het labo werd geen onderscheid gemaakt tussen Z en Zg.

De textuur, zoals beoordeeld in het labo, bleek significant de Log K te beïnvloeden (Figuur 3-12). De log K in de textuurklasse Z, beoordeeld via palpatie in het Labo was significant hoger dan de log K in de overige textuurklassen (Tabel 3-6). Deze waarnemingen bevestigen de hoger beschreven verschillen in log K wanneer de textuur beoordeeld werd via granulometrie.



Figuur 3-12: Gemiddelde log K per bodemtextuur beoordeeld via palpatie in het labo en de 95 % betrouwbaarheidsintervallen.

Tabel 3-6: p waarden berekend via een post hoc Tukey test waarbij per textuurklasse, zoals beoordeeld door palpatie in het labo, het verschil in log K werd onderzocht.

Tukey HSD test; variable log K (Spreadsheet8) Approximate Probabilities for Post Hoc Tests Error: Between MS = .54673, df = 141.00							
Cell No.	Textuur palp labo	{1} A -5.652	{2} P -5.571	{3} L -5.427	{4} Z -4.657	{5} S -5.283	{6} E -5.929
1	A		0.999271	0.908193	0.000020	0.267382	0.980163
2	P	0.999271		0.994919	0.001034	0.825062	0.956781
3	L	0.908193	0.994919		0.006030	0.987902	0.829360
4	Z	0.000020	0.001034	0.006030		0.004154	0.013358
5	S	0.267382	0.825062	0.987902	0.004154		0.562889
6	E	0.980163	0.956781	0.829360	0.013358	0.562889	

3.4.2.2.3 Invloed van de textuur bepaald via palpatie in het labo ten opzichte van de textuur bepaald op het terrein en de textuur via de bodemkaart.

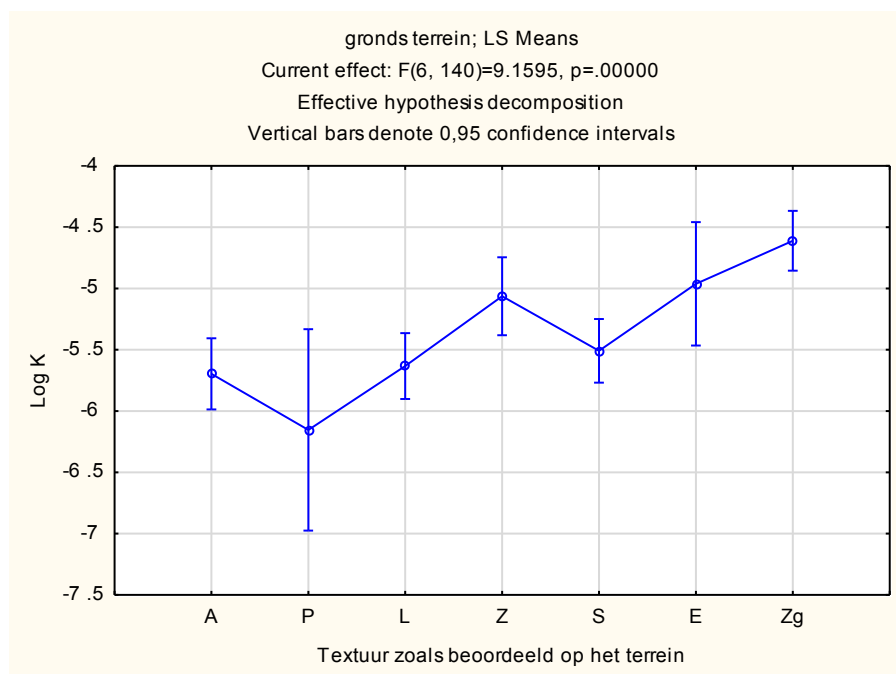
Ook wanneer de sites werden ingedeeld via palpatie op het terrein, of zoals aangeduid op de bodemkaart, kon een ANOVA analyse worden uitgevoerd op de ganse dataset (147 waardes). Om na te gaan welke textuurbeoordeling het best de verschillen in log K aanduidt, werd een multifactoriële ANOVA analyse uitgevoerd met drie factors; textuurbeoordeling door palpatie in het labo, textuurbeoordeling door palpatie op het terrein, textuur aangeduid op de bodemkaart. Uit de analyse blijkt dat de textuurbeoordeling via palpatie in het laboratorium de meest significante variabele is (Tabel 3-7).

Tabel 3-7: Significantie van de parameters na een multifactoriële ANOVA analyse met als afhankelijke variabele de log K en als categorische variabelen de textuurbeoordeling via palpatie in het labo, de textuurbeoordeling via palpatie op het terrein en de textuur aangeduid op de bodemkaart.

Effect	Univariate Results for Each DV (Spreadsheet8) Sigma-restricted parameterization Effective hypothesis decomposition				
	Degr. of Freedom	log K SS	log K MS	log K F	log K p
Intercept	1	1064 .513	1064 .513	2091 .978	0 .000000
Palpatie Labo	5	5 .604	1 .121	2 .202	0 .057909
Palpatie terrein	6	5 .578	0 .930	1 .827	0 .098711
Bodemkaart	6	4 .170	0 .695	1 .366	0 .233252
Error	129	65 .642	0 .509		
Total	146	100 .990			

Ook wanneer de textuurklasse Zg in de textuurklasse Z wordt opgenomen, voor de beoordeling via palpatie op het terrein en de aanduiding op de bodemkaart, blijft de beoordeling via palpatie in het labo de meest significante parameter.

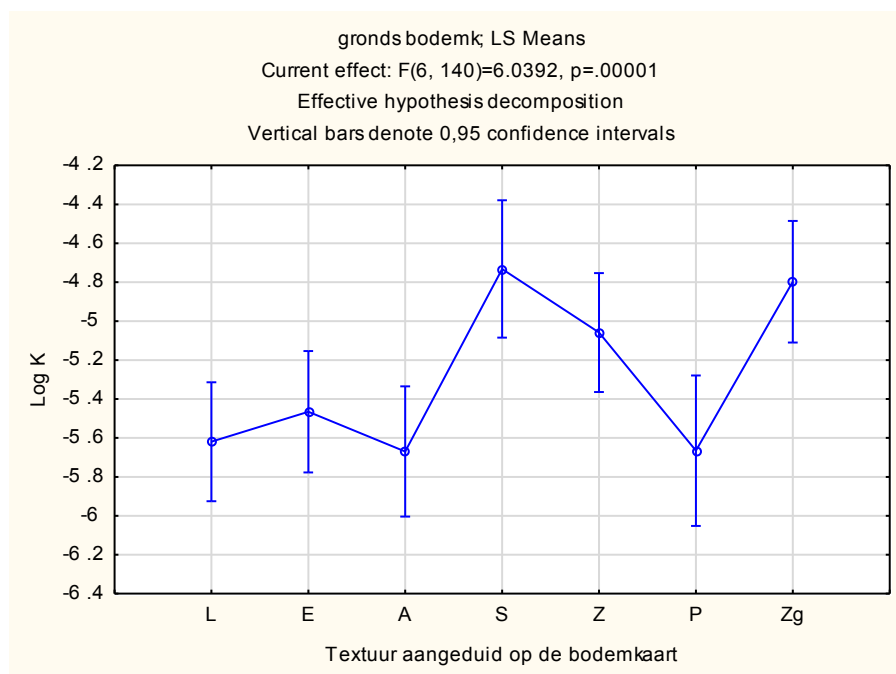
Wanneer de textuur wordt beoordeeld via palpatie op het terrein, of via de bodemkaart blijkt steeds dat een hogere infiltratie wordt aangetoond in de zanderige texturen (Figuur 3-13 en Figuur 3-14). Echter de onderlinge verschillen tussen de textuurklassen zijn afhankelijk van de manier waarop de textuur bepaald werd. Zo verschilt enkel de textuurklasse Zg van enkele overige textuurklassen wanneer de beoordeling via palpatie op het terrein gebruikt wordt (Tabel 3-8) en zijn er significante verschillen met de textuurklasse S en de overige textuurklassen wanneer de textuur zoals aangeduid op de bodemkaart gebruikt wordt (Tabel 3-9).



Figuur 3-13: Gemiddelde log K per bodemtextuur beoordeeld via palpatie op het terrein en de 95 % betrouwbaarheidsintervallen.

Tabel 3-8: p waarden berekend via een post hoc Tukey test waarbij per textuurklasse, zoals beoordeeld door palpatie op het terrein, het verschil in log K werd onderzocht.

Cell No.	Tukey HSD test; variable: Log K: Approximate Probabilities for Post Hoc Tests Error: Between MS = .51801, df = 140.00							
	gronds terrein	{1} -5.696	{2} -6.154	{3} -5.633	{4} -5.063	{5} -5.509	{6} -4.962	{7} -4.611
1	A		0.945277	0.999919	0.056537	0.963880	0.159400	0.000026
2	P	0.945277		0.897746	0.179043	0.756780	0.179581	0.006857
3	L	0.999919	0.897746		0.097255	0.994774	0.231679	0.000026
4	Z	0.056537	0.179043	0.097255		0.326787	0.999885	0.279619
5	S	0.963880	0.756780	0.994774	0.326787		0.474284	0.000037
6	E	0.159400	0.179581	0.231679	0.999885	0.474284		0.878262
7	Zg	0.000026	0.006857	0.000026	0.279619	0.000037	0.878262	



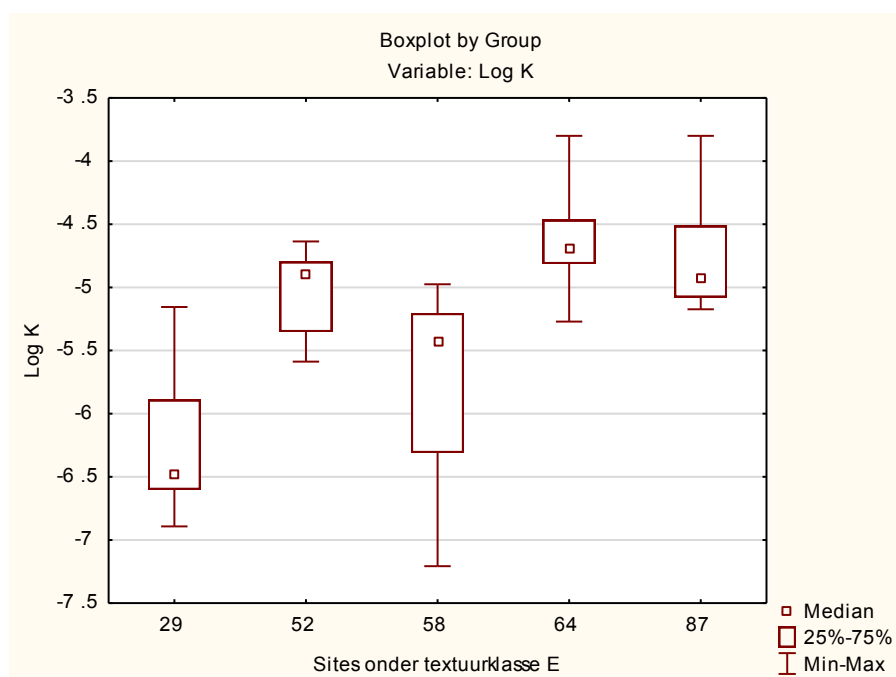
Figuur 3-14: Gemiddelde log K per bodemtextuur zoals aangeduid op de bodemkaart en de 95 % betrouwbaarheidsintervallen.

Tabel 3-9: p waarden berekend via een post hoc Tukey test waarbij per textuurklasse, zoals aangeduid door de bodemkaart, het verschil in log K werd onderzocht.

Cell No.	Tukey HSD test; variable Log K Approximate Probabilities for Post Hoc Tests Error: Between MS = .57304, df = 140.00							
	gronds bodemk	{1} -5.620	{2} -5.466	{3} -5.670	{4} -4.732	{5} -5.058	{6} -5.665	{7} -4.797
1	L		0.992784	0.999991	0.003228	0.136025	0.999997	0.003730
2	E	0.992784		0.975307	0.033957	0.518958	0.985432	0.043892
3	A	0.999991	0.975307		0.002637	0.106807	1.000000	0.003119
4	S	0.003228	0.033957	0.002637		0.811119	0.007683	0.999965
5	Z	0.136025	0.518958	0.106807	0.811119		0.183450	0.901068
6	P	0.999997	0.985432	1.000000	0.007683	0.183450		0.009896
7	Zg	0.003730	0.043892	0.003119	0.999965	0.901068	0.009896	

3.4.2.3 Invloed van de site

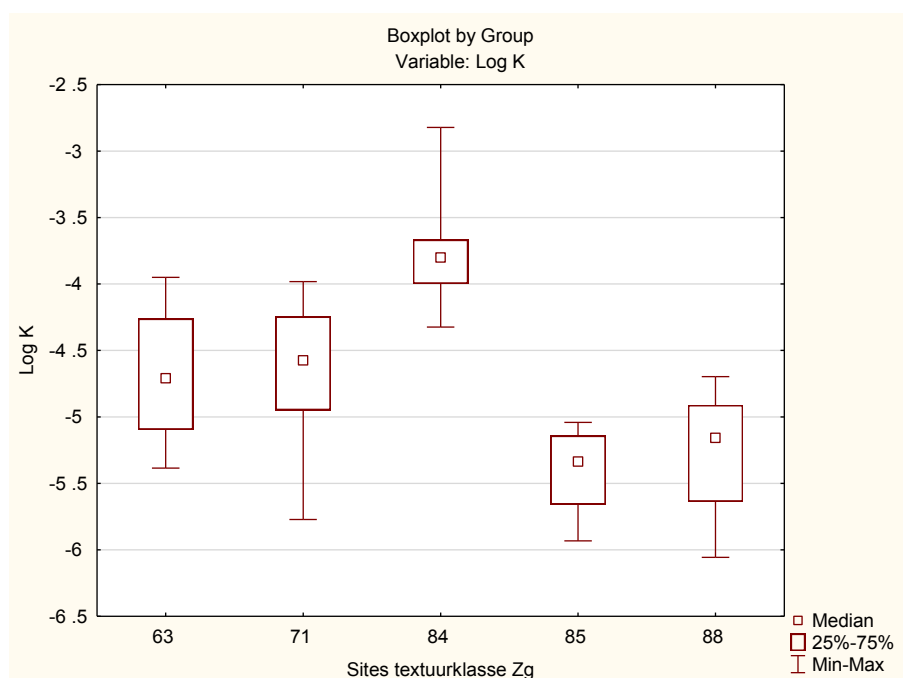
Het bleek niet mogelijk een ANOVA analyse uit te voeren om de invloed van de site te bestuderen op de gemiddelde Log K omdat de variaties van de groepen homogeen waren, ook wanneer de 15 uiterste waarden werden verwijderd uit de dataset. Een Kruskal-Wallis analyse toonde aan dat de site een significante invloed heeft op de gemiddelde Log K. Dit was te verwachten gezien ook al significante verschillen werden aangetoond tussen de verschillende textuurgroepen. De vraag die rest is of er binnen eenzelfde textuurgroep significante verschillen kunnen worden aangetoond tussen de verschillende sites. Dit werd onderzocht voor de verschillende textuurgroepen, aangeduid door granulometrie. Het onderzoek werd uitgevoerd op de log K waarbij elke meting apart werd beschouwd, dus niet het gemiddelde van vier herhalingen. Voor geen enkele textuurgroep waren de log K normaal verdeeld waardoor een Kruskal-Wallis analyse werd uitgevoerd om verschillen tussen sites te detecteren. Binnen de textuurgroep A werden geen significante verschillen aangetroffen tussen de verschillende sites. Binnen de textuurgroepen E (Figuur 3-15, Tabel 3-10), L, P, S, Z en Zg (Figuur 3-16, Tabel 3-11) bleken er significante verschillen tussen de sites.



Figuur 3-15: Box plot die de gemiddelde Log K met de spreiding aanduidt voor de verschillende sites binnen textuurklasse E.

Tabel 3-10: p waarden berekend door middel van de Kruskal-Wallis test waarbij de log K van de individuele sites binnen textuurklasse E met elkaar worden vergeleken.

Depend.: Log K	Multiple Comparisons p values (2-tailed); Log K (Spreadsheet51) Independent (grouping) variable: Site Kruskal-Wallis test: H (4, N= 79) =51.70921 p =.0000				
	29 R:13.375	52 R:45.188	58 R:23.533	64 R:62.438	87 R:54.438
29		0 .000883	1 .000000	0 .000000	0 .000004
52	0 .000883		0 .086543	0 .335021	1 .000000
58	1 .000000	0 .086543		0 .000024	0 .001790
64	0 .000000	0 .335021	0 .000024		1 .000000
87	0 .000004	1 .000000	0 .001790	1 .000000	



Figuur 3-16: Box plot die de gemiddelde Log K met de spreiding aanduidt voor de verschillende sites binnen textuurklasse Zg.

Tabel 3-11: p waarden berekend door middel van de Kruskal-Wallis test waarbij de log K van de individuele sites binnen textuurklasse Zg met elkaar worden vergeleken.

Depend.: Log K	Multiple Comparisons p values (2-tailed); Log K (Spreadsheet51) Independent (grouping) variable: Site Kruskal-Wallis test: H (4, N= 76) =47.47620 p =.0000				
	63 R:40.000	71 R:41.875	84 R:66.750	85 R:17.083	88 R:21.438
63		1 .000000	0 .006122	0 .065787	0 .174306
71	1 .000000		0 .014425	0 .032844	0 .088538
84	0 .006122	0 .014425		0 .000000	0 .000000
85	0 .065787	0 .032844	0 .000000		1 .000000
88	0 .174306	0 .088538	0 .000000	1 .000000	

3.4.2.4 Invloed van de overige factoren

Met behulp van een ANOVA analyse werd de invloed van volgende variabelen onderzocht:

- De temperatuur van het water dat gebruikt werd voor de infiltratietest.
- De diepte waarop de infiltratietest werd uitgevoerd.
- De drainagetrapp van de site zoals aangeduid volgens de bodemkaart van België.
- De diepte van de grondwatertafel tijdens het uitvoeren van de meting.

Continue variabelen (temperatuur van het water, diepte waarop de test werd uitgevoerd, diepte van de grondwatertafel) werden onderverdeeld in klassen, om zo een ANOVA analyse mogelijk te maken (Tabel 3-12). Een belangrijke kanttekening hierbij is dat bij de selectie van de meetlocaties, sites met een grondwatertafelstand hoger dan 1 m werden geweerd uit het onderzoek. Deze bepaling van de grondwatertafelstand werd uitgevoerd in het najaar van 2015, tijdens de voorselectie. De natste drainagetrapp die voorkomt in het onderzoek is 'e', drainagetrappen, 'h', 'i', 'f' en 'g' komen niet voor in het onderzoek.

Tabel 3-12: Vertaling van continue naar categorische variabelen ter studie van de invloed van deze parameters op de gemiddelde log K

	Temperatuur water	Diepte grondwater	Diepte van de meting
Hoog	$\geq 20\text{ °C}$	$\geq 2\text{ m}$	$\geq 1\text{ m}$
Midden	$\geq 10\text{ °C}$ en $< 20\text{ °C}$	$\geq 1.5\text{ m}$ en $< 2\text{ m}$	$\geq 0.5\text{ m}$ en $< 1\text{ m}$
Laag	$< 10\text{ °C}$	$< 1.5\text{ m}$	$< 0.5\text{ m}$

Geen van de vier onderzochte variabelen bleek een significante invloed te hebben op de gemiddelde log K.

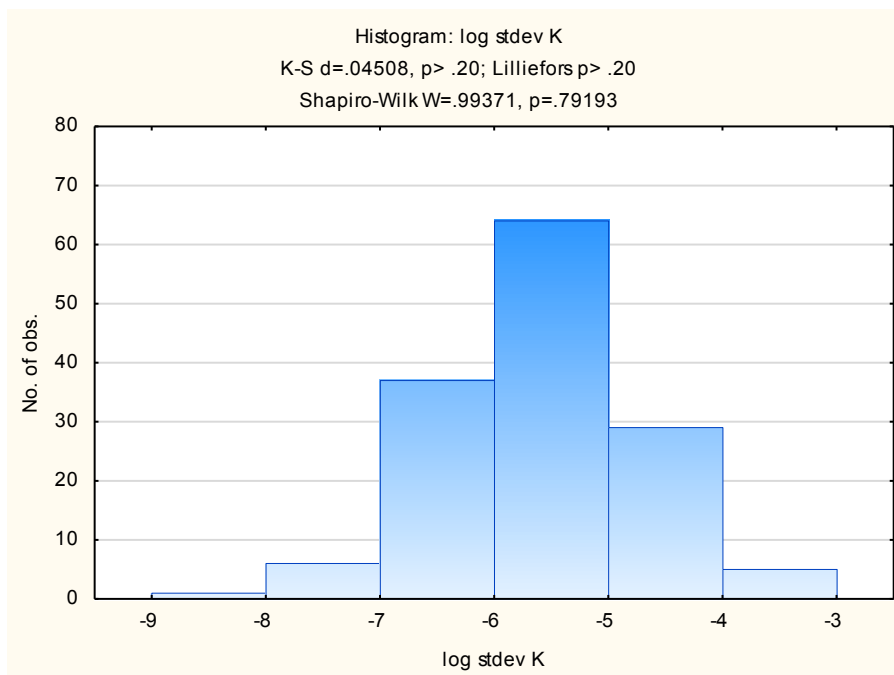
3.4.3 Multivariate ANOVA analyse op de standaarddeviatie van de log K per meetmethode per site

3.4.3.1 Normaliteit van de dataset

Om een beeld te krijgen van de variabiliteit op de log K meting in functie van de meetmethode en de bodemtextuur werd een ANOVA analyse uitgevoerd. Net zoals voor de K waarden, uitgedrukt in m/s, bleek de standaarddeviatie berekend over de vier herhalingen van een meetmethode per site niet normaal verdeeld. De logaritme van de standaarddeviatie berekend over de vier herhalingen per meetmethode per site van de K waarde was wel normaal verdeeld (Figuur 3-17).

In de dataset werden echter 5 waardes niet weerhouden. Het betreft de bepaling van de K waarde met de ER en PO test in site 97 (textuur Z), De bepaling van de K waarde met de PO test in site 84 (textuur Zg) en bepaling van de K waarde met de PO test in site 1 (textuur S). Het betreft waardes met een zeer hoge K waarde, hoger dan de maximum waarde die kan worden gemeten met de respectievelijk PO of ER methode.

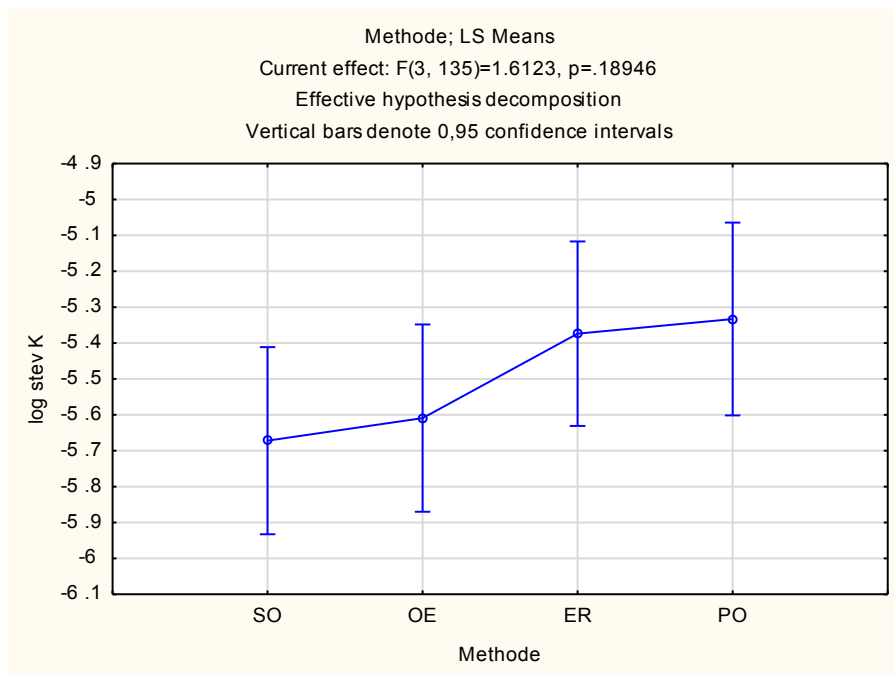
De meetwaarde werd in de vier herhalingen gelijk gesteld met de maximumwaarde waardoor de standaarddeviatie over de vier herhalingen 0 werd. In de verdere analyse werden dus nog 142 waardes beschouwd.



Figuur 3-17: Histogram van de log van de standaarddeviatie berekend over de vier herhalingen van elke meetmethode uitgevoerd per site.

3.4.3.2 Invloed van de meetmethode

De invloed van de meetmethode op de standaarddeviatie berekend over de vier herhalingen van een meetmethode op dezelfde site werd onderzocht via een ANOVA analyse. Drie waardes werden verwijderd uit de dataset omdat de varianties in de groepen anders homogeen waren verdeeld. Het betreft de standaarddeviatie berekend over de vier herhalingen van de OE methode in site 22 (textuur A) en site 27 (textuur L) en de standaarddeviatie berekend over de vier herhalingen van de OE methode in site 84 (textuur Zg). Op deze manier werden nog 139 waardes weerhouden voor ANOVA analyse. De meetmethode bleek niet significant gerelateerd aan de standaarddeviatie berekend over de vier herhalingen per meetmethode per site (Figuur 3-18).



Figuur 3-18: Standaarddeviatie berekend over de log K van de vier herhalingen van één meetmethode per site, in functie van de meetmethode met daarbij de 95 % betrouwbaarheidsintervallen.

Hoewel er volgens de ANOVA analyse geen verschil is in standaarddeviatie tussen de vier meetmethodes werden er duidelijk meer extreme waarden gemeten volgens de OE methode (Tabel 3-13). Over alle textuurklassen, buiten Zg, werden opvallend meer extreem lage K waarden gemeten wanneer de OE methode werd toegepast. Het betreft ook telkens geïsoleerde observaties, enkel voor site 22 (Textuur A) werden systematisch voor de vier herhalingen zeer lage log K waarden geobserveerd wanneer de OE methode werd toegepast.

Een belangrijke kanttekening hierbij echter is dat de OE bepaling niet steeds op hetzelfde tijdstip werd uitgevoerd dan de K bepaling met de overige drie meetmethodes. De K bepaling volgens de ER, PO en SO methode werd meestal uitgevoerd in de maanden augustus, september, oktober en november van 2015. Omdat een technisch defect werd vastgesteld aan de installatie bij de OE bepaling na het eerste bezoek op de sites werd het merendeel van de sites terug bezocht in de maand januari van 2016 voor een tweede K bepaling met de OE methode. Gezien het opbouwend neerslagoverschot in de wintermaanden mag worden verwacht dat de bodem natter was, wat het risico op luchtinsluiting bij uitvoering van de infiltratieproef verhoogd. Dit effect wordt ook het Lisse-effect genoemd en werd onder andere beschreven door Guo et al. (2008). De beschreven luchtinsluiting zal infiltratie verhinderen waardoor extreem lage K waarden worden opgetekend. Bij 14 van de 17 extreem lage K waarden, opgemeten met de OE methodes werd de K waarde bekomen bij het tweede bezoek tijdens de wintermaanden. Echter 3 van de 17 extreem lage K waarden werden opgemeten op hetzelfde moment wanneer de andere drie infiltratietesten (ER, SO en PO) werden uitgevoerd. Op 30/11/2015 werden op site 67 (Textuur Z) 2 extreem lage K waarden vastgesteld door middel van de OE methode, echter ook de PO methode gaf op dat moment één extreem lage waarde.

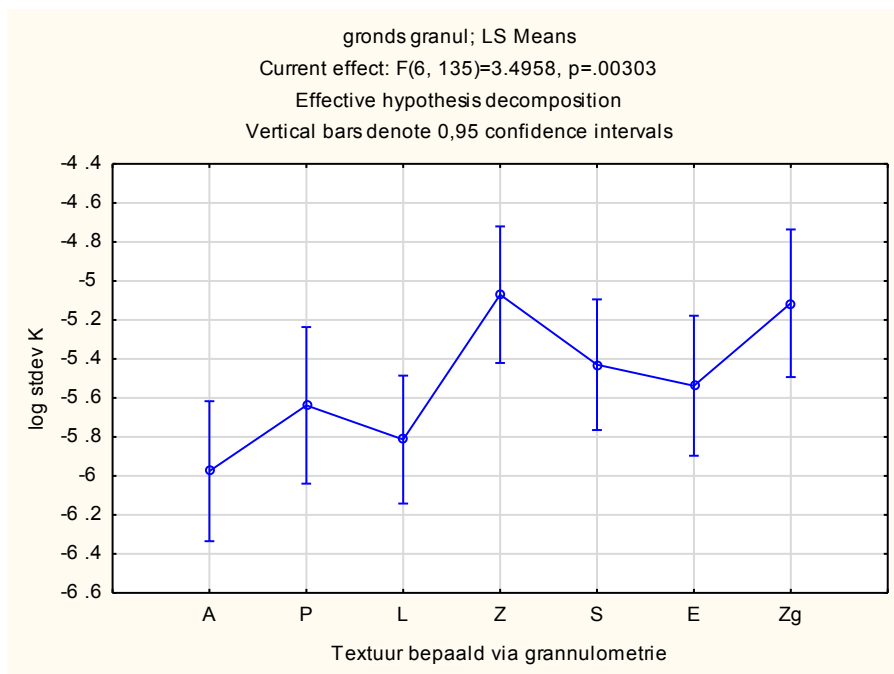
Op 11/01/2016 werd op site 94 (Textuur P) een extreem lage K waarde opgetekend wanneer deze bepaald werd met de OE methode, voor de andere methodes werd geen extreem lage K waarde geobserveerd. Echter op deze site werd geen K meting met de ER bekomen. Het waterpeil in de ring bleef namelijk constant waardoor geen K waarde kon worden geobserveerd. Dit is een duidelijke indicatie van een Lisse-effect.

Tabel 3-13: Extreme observaties volgens de vier testmethodes in de zeven textuurklassen

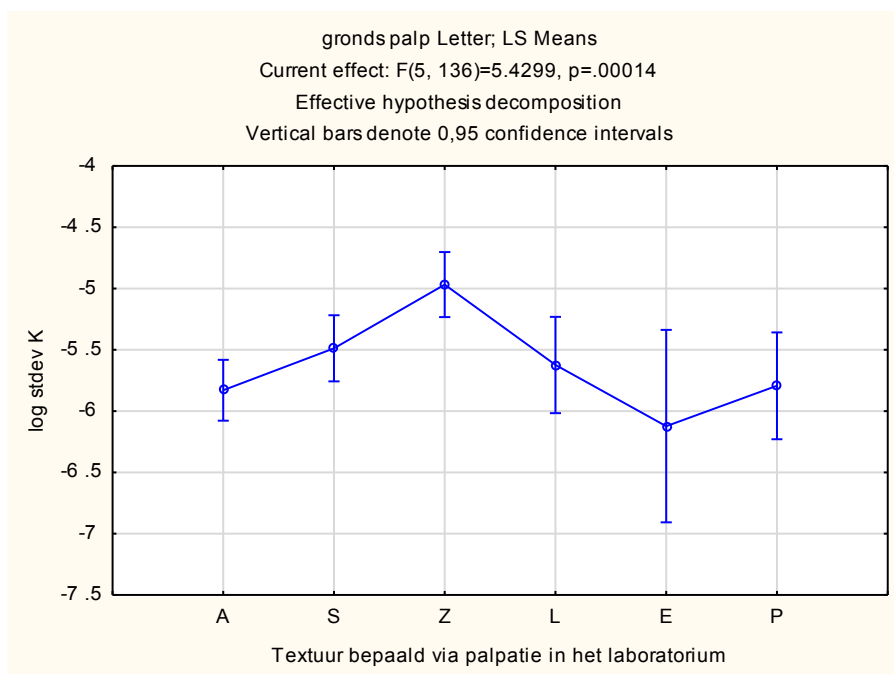
Textuur /methode	# waarden > gemiddelde log K + 2stdev				# waarden < gemiddelde log K - 2stdev			
	ER	OE	PO	SO	ER	OE	PO	SO
A	2	0	1	1	1	4	0	0
E	0	0	0	0	0	2	0	0
L	0	0	0	0	0	4	0	0
P	0	1	0	0	0	1	0	0
S	0	0	0	0	0	4	0	0
Z	0	0	0	0	0	2	1	0
Zg	0	2	0	0	0	0	0	0

3.4.3.3 Invloed van de bodemtextuur

Net zoals op de gemiddelde Log K per meetmethode per site heeft de bodemtextuur een significante invloed op de standaarddeviatie van de log K per meetmethode per site (Figuur 3-19 en Figuur 3-20). De invloed van de bodemtextuur werd onderzocht met behulp van een ANOVA analyse op de 142 waardes weerhouden na de normaliteit-analyse. Wanneer de verschillen binnen de groepen bestudeerd worden blijkt er vooral een verschil tussen Z en Zg enerzijds en de A, P en L anderzijds (Tabel 3-14 en Tabel 3-15). Wanneer de vier methodes van textuurbepaling met elkaar worden vergeleken in een multifactoriële analyse blijkt de textuurbepaling via palpatie in het laboratorium de meest significante parameter (Tabel 3-16).



Figuur 3-19: Standaarddeviatie berekend over de log K van de vier herhalingen van één meetmethode per site, in functie van de bodemtextuur bepaald via granulometrie met daarbij de 95 % betrouwbaarheidsintervallen.



Figuur 3-20: Standaarddeviatie berekend over de log K van de vier herhalingen van één meetmethode per site, in functie van de bodemtextuur bepaald via palpatie in het laboratorium met daarbij de 95 % betrouwbaarheidsintervallen.

Tabel 3-14: p waarden berekend via een post hoc Tukey test waarbij per textuurklasse, zoals bepaald via granulometrie, het verschil in standaarddeviatie van de log K werd onderzocht.

Cell No.	Tukey HSD test; variable log stdev K (Spreadsheet3) Approximate Probabilities for Post Hoc Tests Error: Between MS = .65964, df = 135.00							
	gronds granul	{1} -5.976	{2} -5.638	{3} -5.814	{4} -5.071	{5} -5.430	{6} -5.538	{7} -5.115
1	A		0.879228	0.994667	0.006677	0.295956	0.612286	0.018944
2	P	0.879228		0.994276	0.348909	0.986069	0.999801	0.495565
3	L	0.994667	0.994276		0.035898	0.669645	0.921639	0.083984
4	Z	0.006677	0.348909	0.035898		0.766133	0.520781	0.999998
5	S	0.295956	0.986069	0.669645	0.766133		0.999489	0.881373
6	E	0.612286	0.999801	0.921639	0.520781	0.999489		0.680070
7	Zg	0.018944	0.495565	0.083984	0.999998	0.881373	0.680070	

Tabel 3-15: p waarden berekend via een post hoc Tukey test waarbij per textuurklasse, zoals bepaald via palpatie in het laboratorium, het verschil in standaarddeviatie van de log K werd onderzocht.

Cell No.	Tukey HSD test; variable log stdev K (Spreadsheet3) Approximate Probabilities for Post Hoc Tests Error: Between MS = .63064, df = 136.00						
	gronds palp Letter	{1} -5.830	{2} -5.488	{3} -4.968	{4} -5.624	{5} -6.123	{6} -5.793
1	A		0.437164	0.000059	0.952237	0.981538	0.999992
2	S	0.437164		0.071658	0.993294	0.656422	0.847029
3	Z	0.000059	0.071658		0.068439	0.065016	0.017342
4	L	0.952237	0.993294	0.068439		0.871596	0.992849
5	E	0.981538	0.656422	0.065016	0.871596		0.978876
6	P	0.999992	0.847029	0.017342	0.992849	0.978876	

Tabel 3-16: Significantie van de parameters na een multifactoriële ANOVA analyse met als afhankelijke variabele de standaarddeviatie van de log K en als categorische variabelen de textuurbeoordeling via granulometrie, textuurbeoordeling via palpatie in het labo, de textuurbeoordeling via palpatie op het terrein en de textuur aangeduid op de bodemkaart.

Effect	Univariate Results for Each DV (Spreadsheet3) Sigma-restricted parameterization Effective hypothesis decomposition				
	Degr. of Freedom	log stdev K SS	log stdev K MS	log stdev K F	log stdev K p
Intercept	1	1041.749	1041.749	1711.319	0.000000
Grannulome	6	7.272	1.212	1.991	0.072306
Palpatie la	5	7.606	1.521	2.499	0.034435
Palpatie terrein	6	2.305	0.384	0.631	0.705074
Bodemkaart	6	5.755	0.959	1.576	0.160196
Error	129	65.642	0.509		
Total	146	100.990			

3.4.4 Onderlinge relatie tussen de in situ meetmethodes

De SO methode en de PO methodes bleken het sterkst gecorreleerd (Tabel 3-17). De correlaties met de OE methode waren duidelijk lager. Dit wordt verklaard door het hogere aantal extreme waarden geobserveerd met de OE methode. De relaties waren het meest significant wanneer alle data werden betrokken in de analyse. Wanneer enkel de relaties in de zand texturen worden bestudeerd zijn er enkel significante correlaties tussen de SO en OE methode en de SO en PO methode. Wanneer de niet-zand texturen worden beschouwd (A, E, L, P, S) zijn significante correlatie tussen ER, PO en SO en één significante correlatie tussen OE en PO.

*Tabel 3-17: Pearson correlatie (R) tussen de verschillende in situ meetmethodes. * duidt significante correlaties aan volgens $p < 0.05$.*

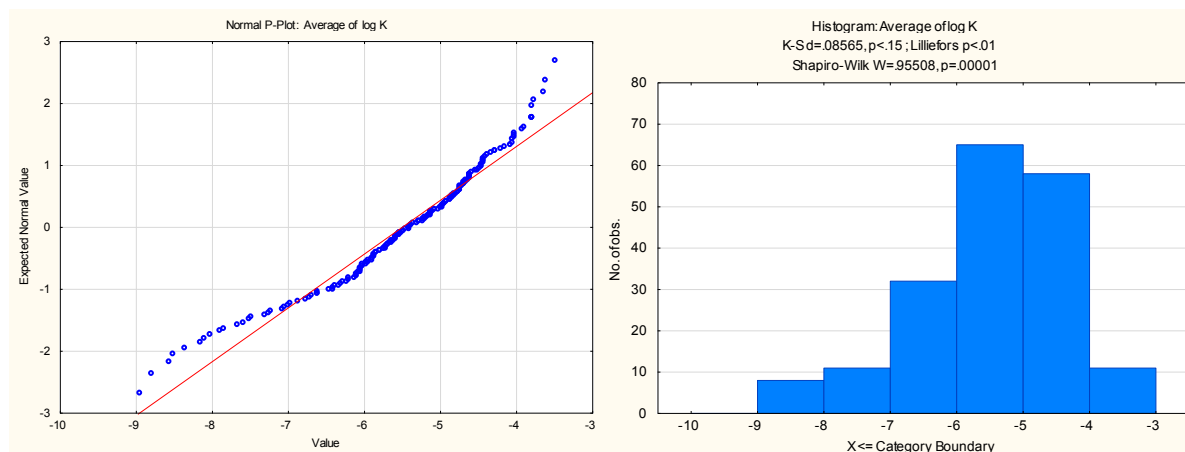
	ER	OE	PO
Alle data			
OE	0.16		
PO	0.70*	0.54*	
SO	0.70*	0.44*	0.84*
Zand texturen (Z, Zg)			
OE	0.49		
PO	0.57	0.63	
SO	0.52	0.85*	0.87*
Overige texturen (A, E, L, P, S)			
OE	-0.15		
PO	0.65*	0.42*	
SO	0.61*	0.20	0.79*

3.4.5 K bepaling in het laboratorium

Op de 38 sites werden door BDB stalen verzameld ter bepaling van de K waarde in het laboratorium. De staalnames omvatten steekringen en geroerde monsters. De steekringen hadden een diameter van 100 mm en een hoogte van 50 of 52 mm. Per site werden vier steekringen bemonsterd. Daarnaast werd per site een geroerd monster van 10 liter verzameld. De stalen werden vervolgens verwerkt door MOW, Afd. Geotechniek te Gent. Op de steekringen, de ongeroerde stalen, werd een doorlatendheidsproef met veranderlijk verval uitgevoerd. Wanneer een K waarde hoger dan 10^{-6} m/s werd bekomen werd bijkomend, op het geroerde monster, een doorlatendheidsproef met constant verval uitgevoerd.

3.4.5.1 Vergelijking van de K bekomen in het laboratorium en K waarde bekomen in situ.

Om de K waarde bekomen in het laboratorium te vergelijken met deze bepaald in situ werd een dataset samengesteld van 185 K waardes. Elke waarde omvatte het gemiddelde van vier K metingen per site, per meetmethode. De dataset bleek echter niet normaal verdeeld volgens de PP plot en ook volgens de K-Smimov, Lilliefors en Shapiro-Wilk test (Figuur 3-21).

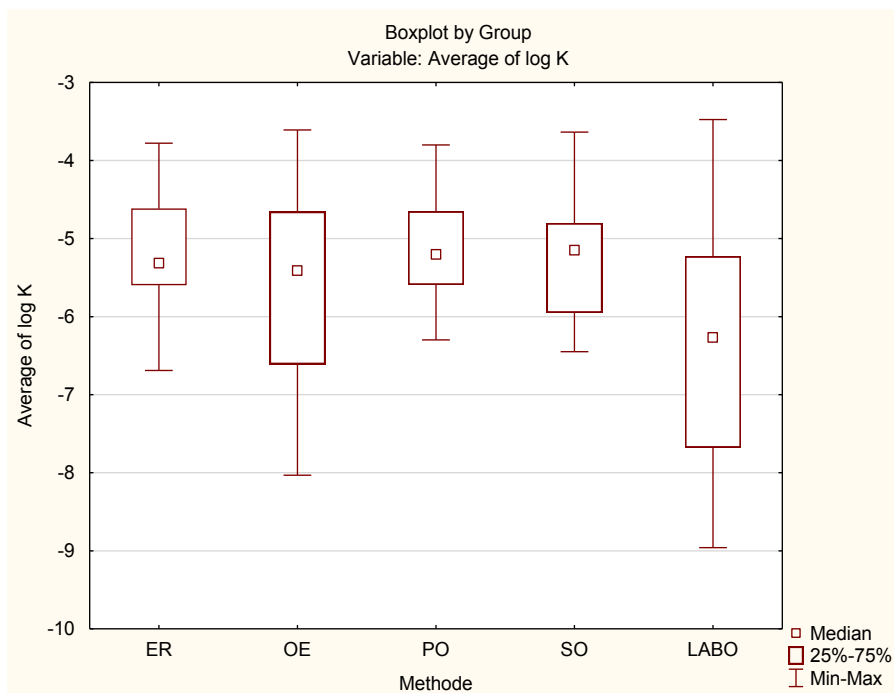


Figuur 3-21: PP plot en histogram van zowel de in situ, als de in het labo bepaalde, Log K waardes uitgemiddeld per site en per meetmethode.

Omdat de dataset niet normaal verdeeld was, werd gebruik gemaakt van de niet-parametrische Kruskal-Wallis test. De K waarde bepaald in het laboratorium was significant verschillend van de K waarde bepaald in situ voor elk van de vier in situ test methodes (Tabel 3-18). De K waarde bepaald in het laboratorium was lager dan de K waarde bepaald in situ (Figuur 3-22). De mediaan van de in situ K waarde varieert van 3.8×10^{-6} m/s, volgens de PO methode tot 7.09×10^{-6} volgens de SO methode. De mediaan van de K waarde bepaald in het laboratorium was slechts 5.1×10^{-7} m/s. Ook de spreiding van de K waardes was hoger wanneer deze werd bepaald in het laboratorium (Figuur 3-22).

Tabel 3-18: p waardes berekend door middel van de Kruskal-Wallis test waarbij de gemiddelde log K van de bepaling het laboratorium (LABO) worden vergeleken met de vier in situ methodes.

Depend.: Log K	Multiple Comparisons p values (2-tailed); Log K Independent (grouping) variable: Methode Kruskal-Wallis test: H (4, N= 185) =23.20734 p =.0001				
	ER	OE	PO	SO	LABO
ER		0.918388	1.000000	1.000000	0.000365
OE	0.918388		0.914185	1.000000	0.139270
PO	1.000000	0.914185		1.000000	0.000362
SO	1.000000	1.000000	1.000000		0.025742
LABO	0.000365	0.139270	0.000362	0.025742	



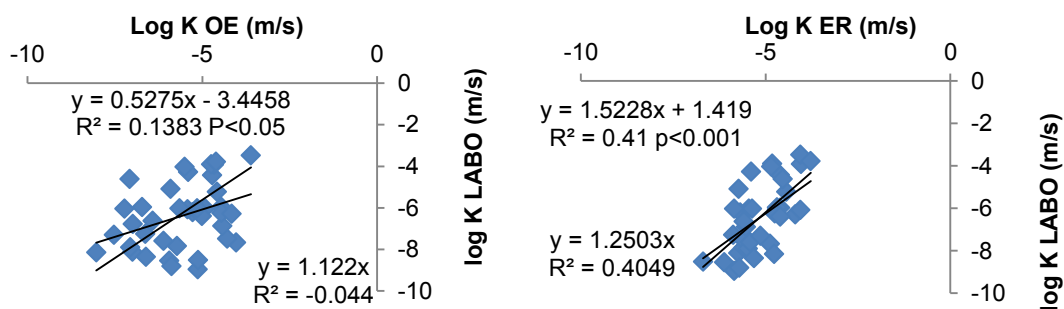
Figuur 3-22: Box plot van zowel de in situ, als de in het labo bepaalde, gemiddelde log K waarden

Wanneer de ganze dataset werd beschouwd werd er een significante correlatie geobserveerd tussen de K waarden bepaald in het laboratorium en de K waarden bepaald in situ (Tabel 3-19). Wanneer de data worden uitgesplitst tussen de Zand texturen en de overige texturen waren de correlaties niet meer significant. Enkel met de K bepaling volgens de ER-methode was er nog een significante correlatie.

*Tabel 3-19: Pearson correlatie (R) tussen de log K bepaling in het laboratorium en K bepaling in situ volgens de verschillende meetmethodes. * duidt significante correlaties aan volgens $p < 0.05$.*

	ER	OE	PO	SO	Gemiddelde in situ
Zand texturen (Z, Zg)	0.28	0.48	0.20	0.19	0.34
Overige texturen (A, E, L, P, S)	0.51*	0.04	0.26	0.23	0.29
Alle data	0.61*	0.35*	0.46*	0.53*	0.58*

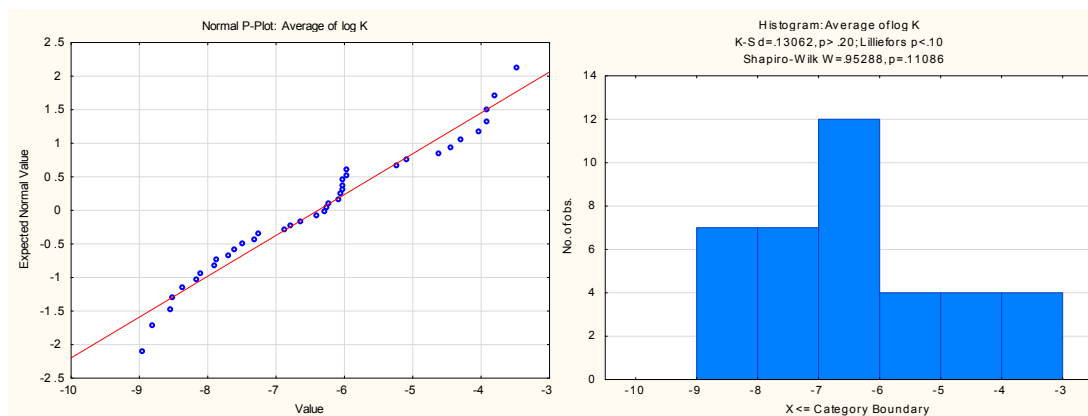
Hoewel de correlatie tussen de K bepaling via de OE methode en de K bepaling in het laboratorium significant is, is er nog een grote spreiding met de trendlijn tussen beiden (Figuur 3-23). Deze spreiding is aanzienlijk lager wanneer de beste correlatie, deze met de K bepaling volgens de ER methode wordt beschouwd.



Figuur 3-23: Scatterplot die relatie weergeeft tussen de log K bepaald in het laboratorium en de log K bepaald in situ via de Open End (OE) methode en de Enkele Ring (ER) methode. In de analyse werden alle data beschouwd.

3.4.5.2 Invloed van de bodemtextuur op de K waarde bekomen in het laboratorium

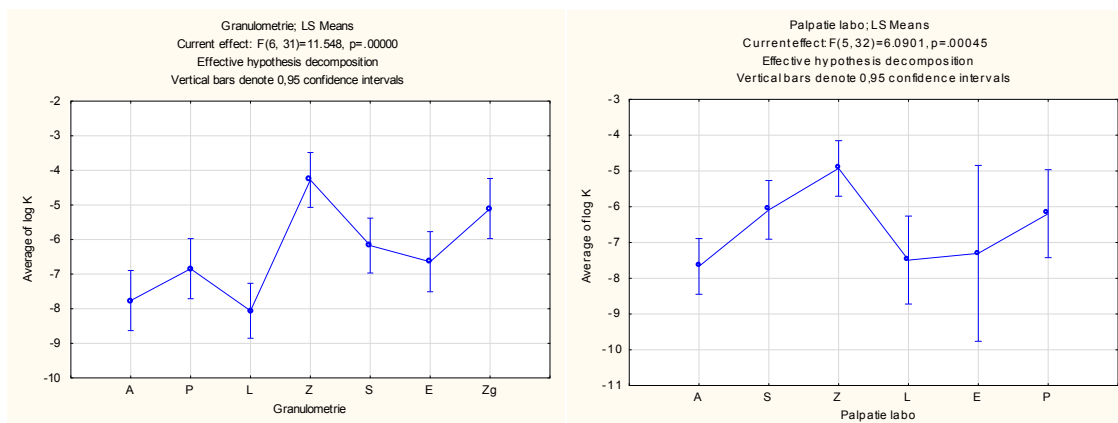
De gemiddelde log K bepaald in het labo, per site, werd beoordeeld als normaal verdeeld (Figuur 3-24). Dit liet ANOVA analyse toe ter beoordeling van de relatie tussen bodemtextuur en log K.



Figuur 3-24: PP plot van de gemiddelde Log K per site zoals bepaald in het laboratorium.

Volgens de ANOVA analyse was Log K het hoogste wanneer de textuur beoordeeld werd als Z of Zg. Zowel wanneer de textuurindeling gebaseerd wordt op granulometrie, als wanneer deze gebaseerd wordt op basis van palpatie in het laboratorium (Figuur 3-25). De Log K is het laagste voor de texturen A en L.

Wanneer de textuurbeoordeling gebaseerd wordt op granulometrie verschilt de Log K van Z significant van alle andere texturen buiten Zg (Tabel 3-20). Wanneer de textuurbeoordeling gebaseerd wordt op palpatie in het laboratorium is er enkel een significant verschil met de texturen A en L (Tabel 3-21).



Figuur 3-25: Standaarddeviatie berekend over de log K bepaald in het laboratorium, uitgemiddeld per site, in functie van de bodemtextuur bepaald via palpatie in het laboratorium met daarbij de 95 % betrouwbaarheidsintervallen. Links wordt de indeling in bodemtextuur gemaakt zoals bepaald volgens granulometrie, rechts wordt de indeling in bodemtextuur gemaakt zoals bepaald via palpatie in het laboratorium.

Tabel 3-20: p waarden berekend via een post hoc Tukey test waarbij de Log K bepaald in het laboratorium, werd vergeleken tussen de verschillende textuurgroepen. Het onderscheid tussen de textuurgroepen werd gemaakt door granulometrie.

Cell No.	Tukey HSD test; variable Log K Approximate Probabilities for Post Hoc Tests Error: Between MS = .90715, df = 31.000							
	Granulometrie	{1}	{2}	{3}	{4}	{5}	{6}	{7}
1	S		0.024	0.026	0.118	0.904	0.982	0.523
2	Z	0.024		0.000	0.000	0.002	0.005	0.778
3	L	0.026	0.000		0.999	0.372	0.209	0.000
4	A	0.118	0.000	0.999		0.726	0.518	0.002
5	P	0.904	0.002	0.372	0.726		1.000	0.090
6	E	0.982	0.005	0.209	0.518	1.000		0.177
7	Zg	0.523	0.778	0.000	0.002	0.090	0.177	

Tabel 3-21: p waarden berekend via een post hoc Tukey test waarbij de Log K bepaald in het laboratorium, werd vergeleken tussen de verschillende textuurgroepen. Het onderscheid tussen de textuurgroepen werd gemaakt palpatie in het laboratorium.

Cell No.	Tukey HSD test; variable Log K Approximate Probabilities for Post Hoc Tests Error: Between MS = 1.4568, df = 32.000						
	Palpatie labo	{1}	{2}	{3}	{4}	{5}	{6}
1	Z		0.317	0.000	0.013	0.435	0.496
2	S	0.317		0.075	0.400	0.929	1.000
3	A	0.000	0.075		1.000	1.000	0.331
4	L	0.013	0.400	1.000		1.000	0.654
5	E	0.435	0.929	1.000	1.000		0.962
6	P	0.496	1.000	0.331	0.654	0.962	

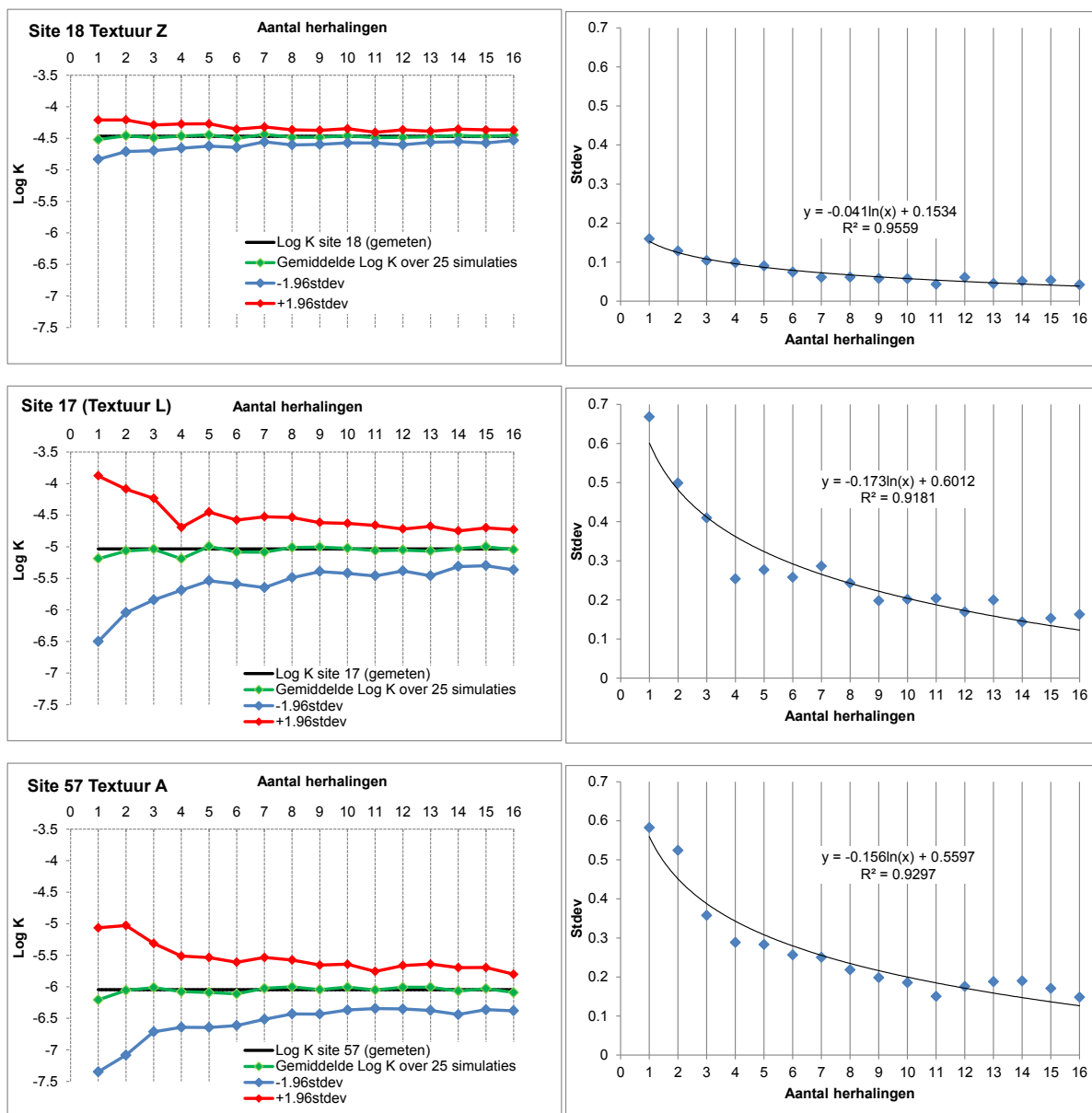
3.4.6 Standaarddeviatie in functie van het aantal herhalingen

Om te onderzoeken hoeveel herhalingen nodig zijn om een beeld te krijgen van de K waarde op een site werd een analyse opgemaakt voor drie type sites: site 18 met textuur Z, site 17 met textuur L en site 57 met textuur A. Voor deze sites werden de 16 (of 15 voor site 57) observaties beschouwd als herhalingen. Bij deze observaties werd volgende transformatie F doorgevoerd:

$$F(K) = \sqrt{-\log K}$$

De F(K) waarden bleken normaal verdeeld, voor de drie sites, volgens de Lilliefors Test, de Kolmogorov-Smirnov Test en de Shapiro-Wilk W Test.

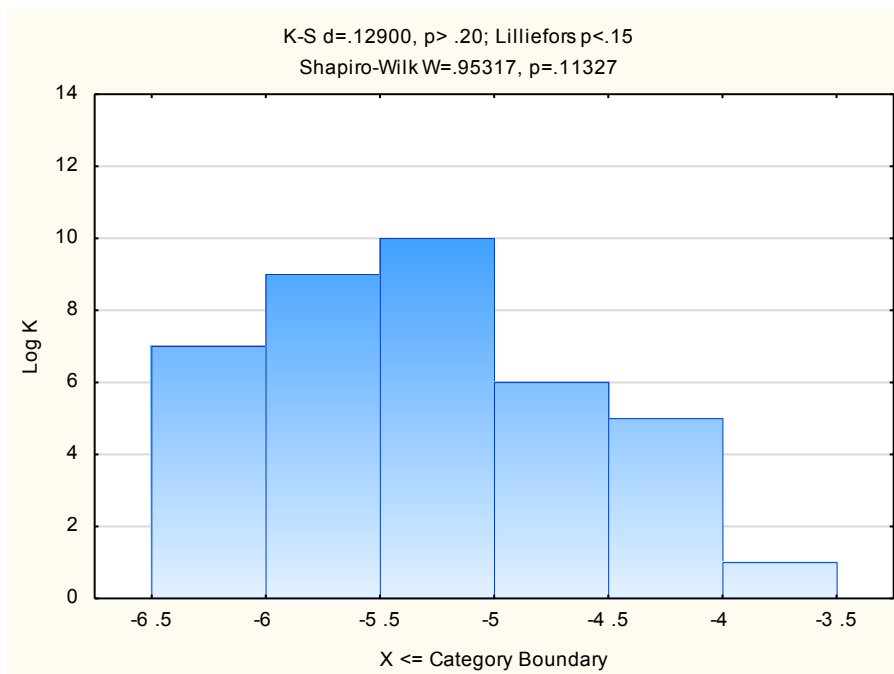
Vervolgens werd per site 25 keer een F(K) verdeling gesimuleerd met telkens 1 tot 16 herhalingen, volgens de normaal verdeling. Deze simulaties werden uitgevoerd met het softwarepakket R. De F(K) die op deze manier werden gegenereerd werden vervolgens terug getransformeerd naar Log K waarden. Op deze manier ontstond een dataset met 25 simulaties van gemiddelde Log K waarden berekend uit respectievelijk 1 tot 16 herhalingen. Per herhaling kan bijgevolg een 95 % betrouwbaarheidsinterval worden berekend over de 25 simulaties van log K (Figuur 3-26). De standaarddeviatie, nodig om dit betrouwbaarheidsinterval te berekenen, bleek logaritmisch af te nemen in functie van het aantal herhalingen (Figuur 3-26). Zo blijkt dat de kans op een gemiddelde log K ver verwijderd van de oorspronkelijke Log K exponentieel groter is wanneer slechts 1 of 2 herhalingen worden uitgevoerd. Vanaf 3 tot 4 herhalingen is de afname in standaarddeviatie lineair en wordt de meerwaarde van een extra herhaling minder groot.



Figuur 3-26: 95 % Betrouwbaarheidsinterval en standaarddeviatie in functie van het aantal herhalingen voor een steekproef van 25 log K observaties voor site 18 (Textuur Z), site 17 (Textuur L) en site 54 (Textuur A) en de standaarddeviatie nodig om deze betrouwbaarheidsintervallen te berekenen (het 95 % betrouwbaarheidsinterval werd berekend tussen -1.96stdev en +1.96stdev).

3.5 RICHTWAARDEN VOOR INFILTRATIE AFGELEID VAN HET PRAKTIJKONDERZOEK

Indien per site het gemiddelde wordt gemaakt van de 16 observaties, door de vier verschillende methodes kan aan de hand van de Log K een normaalverdeling worden bekomen (Figuur 3-27).



Figuur 3-27: Histogram van de log van de standaarddeviatie berekend over de vier herhalingen van elke meetmethode uitgevoerd per site.

Op basis van deze normaalverdeling kan een referentietabel worden opgesteld voor de 38 sites (Tabel 3-22).

Tabel 3-22: Referentietabel op basis van de in situ bepalingen uitgevoerd op 38 sites in het praktijkonderzoek.

Categorie	Log K (m/s)	K (m/s)
Zeer laag (10 % laagste)	-6.13	7.41x10 ⁻⁷
Laag (25 % laagste)	-5.73	1.86x10 ⁻⁶
Normaal (50 %)	-5.27	5.37x10 ⁻⁶
Hoog (25 % hoogste)	-4.82	1.51x10 ⁻⁵
Zeer hoog (10 % hoogste)	-4.41	3.89x10 ⁻⁵

Wanneer de K waardes vergeleken worden met enkele referentiewaardes uit de literatuur blijkt, voor de zanderige texturen, dat de waardes geobserveerd in het praktijkonderzoek lager liggen vergeleken met Ovam (2002). De K waardes uit het praktijkonderzoek liggen wel hoger dan deze volgens Vlario (2005) en deze uit de Staringreeks (Wösten et al., 2002) (Tabel 3-23). Voor de leemachtige texturen is, in grootteorde, de K waarde geobserveerd in het praktijkonderzoek gelijkaardig aan Ovam (2002), Vlario (2005) en de Staringreeks (Wösten et al. 2002). Voor Klei werd in het praktijkonderzoek een grotere K waarde geobserveerd dan deze gerapporteerd in Ovam (2002), Vlario (2005) en de meeste kleitypes in de Staringreeks (Wösten et al., 2002).

Tabel 3-23: K waardes geobserveerd in situ tijdens het praktijkonderzoek vergeleken met K waardes gerapporteerd volgens Ovam (2002); Vlario (2005) en de Staringreeks (Wösten et al., 2002)

Praktijkonderzoek		Ovam (2002)		Vlario (2005)		Staringreeks (Wösten et al., 2002)	
Indeling	K (m/s)	Indeling	K (m/s)	Indeling	K (m/s)	Indeling	K (m/s)
Zanderige texturen							
						O1	1,76x10 ⁻⁶
Zg	2,05x10 ⁻⁵	Grof zand	2,3x10 ⁻⁴ tot 5,8x10 ⁻⁴	Fijn zand	5,6x10 ⁻⁶	O2	1,47x10 ⁻⁶
Z	1,70x10 ⁻⁵	Middel grof zand	1,2x10 ⁻⁴ tot 2,3x10 ⁻⁴	Leemachtig fijn zand	3,1x10 ⁻⁶	O3	1,26x10 ⁻⁶
S	5,44x10 ⁻⁶	Lemig zand, fijn zand	1,2x10 ⁻⁶ tot 1,2x10 ⁻⁴	Lichte zavel	2,8x10 ⁻⁶	O5	2,89x10 ⁻⁶
Leemachtige texturen							
P	3,79x10 ⁻⁶	Leem, zandige leem, kleiig zand	1,2x10 ⁻⁷ tot 1,2x10 ⁻⁶	Löss	1,7x10 ⁻⁶	O7	4,53x10 ⁻⁶
L	2,07x10 ⁻⁶			Leem	5,8x10 ⁻⁷	O8	1,05x10 ⁻⁶
A	1,58x10 ⁻⁶					O9	2,58x10 ⁻⁷
						O14	1,75x10 ⁻⁷
						O15	4,28x10 ⁻⁷
Kleiachtige texturen							
				Lichte klei	4,2x10 ⁻⁷	O10	2,45x10 ⁻⁷
E	4,85x10 ⁻⁶	Klei	< 1,2x10 ⁻⁷	Matig zware klei	1,4x10 ⁻⁷	O11	1,60x10 ⁻⁶
				Kleiige leem	1,1x10 ⁻⁷	O12	1,18x10 ⁻⁷
						O13	5,06x10 ⁻⁷

3.6 EVALUATIE VAN DE METHODES

3.6.1 Samenvatting van het onderzoek

Op 38 sites werden in vier herhalingen vier meetmethodes uitgetest ter bepaling van de verzadigde hydraulische conductiviteit, K_{SAT} of ook K-waarde. Na het literatuuronderzoek werden in samenspraak met de Stuurgroep vier meetmethodes weerhouden; de Enkele-Ringmethode (ER), de Porchetmethode (PO), de Soakawaymethode (SO) en de Open-Endmethode (OE). De ER- en SO- methode volgen het principe van veranderend verval, terwijl in de PO- en de OE- methode een constante waterdruk wordt aangehouden. Bij selectie van de meetlocaties was het de betrachting om voor elke textuurklasse 5 sites te selecteren. Als basis voor deze selectie werd de beoordeling via granulometrie gevolgd. Deze bleek echter niet steeds overeen te komen met de beoordeling volgens palpatie in het labo of palpatie op het terrein, en verschilde dikwijls van wat werd aangeduid op de bodemkaart.

Ondanks de verschillen in interpretatie van de bodemtextuur bleek steeds een significant hogere infiltratiesnelheid voor zandige texturen vergeleken met de andere bodemtexturen. De infiltratie in zandige texturen (Z, Zg) was een factor 5 tot 10 hoger vergeleken met de andere bodemtexturen. Tussen de overige bodemtexturen was er geen significant verschil in infiltratiesnelheid. Bovendien werd in de bodemtextuur E een hogere infiltratiesnelheid waargenomen vergeleken met elders gerapporteerde infiltratiewaardes (Ovam, 2002; Vlaro 2005; Wösten et al. 2002). Naast de gemiddelde K-waarde, uitgemiddeld over vier herhalingen, bleek ook de standaarddeviatie over de vier herhalingen hoger voor zandige texturen (Z, Zg) vergeleken met textuur leem (A). Wanneer de vier gebruikte manieren om de bodemtextuur te beoordelen met elkaar werden vergeleken bleek dat de granulometrie en palpatie in het labo het meest bepalend waren om verschillen in K-waarde te onderscheiden. Bodemtextuur bleek de enige variabele die een significante invloed had op de K-waarde. Andere parameters zoals drainagetrapp, diepte van de meting, diepte van de grondwatertafel, temperatuur van water of bodem bleken geen significante invloed te hebben op de meetwaarde. Binnen eenzelfde textuurgroep bleken er wel duidelijk significante verschillen tussen de sites. Enkel voor textuur A was dit niet geval.

Tussen de vier geteste in situmeetmethodes werd er geen verschil in K-waarde geobserveerd. Ook de standaarddeviatie tussen de vier herhalingen per site bleek gelijk tussen de vier meetmethodes. Voor de vier in situmeetmethodes bleek het betrouwbaarheidsinterval rondom de gemiddelde waarneming exponentieel af te nemen vanaf 3 tot 4 herhalingen. In de OE-methode werden meer outliers geobserveerd, zowel in het hoge bereik als in het lage bereik. Een belangrijke kanttekening is de mogelijke verhoogde gevoeligheid voor luchtinsluiting, het zogenaamde Lisse-effect, bij het uitvoeren van deze meting in natte omstandigheden. Dit effect zal deels het hoger aantal outliers in het lage bereik verklaren gezien de meting meestal op een tweede tijdstip, later in de winter van 2015 plaats vond. Tussen de vier methodes was er een significante correlatie; enkel de correlatie tussen de OE-methode en de drie andere methodes bleek lager, in overeenstemming met het hoger aantal outliers.

De K-waarde bekomen na bepaling in het labo was significant lager dan deze bekomen in situ. Ook de variatie op de meting was significant hoger. Voor de zandtexturen (Z, Zg) was er geen significante correlatie met de bepaling in situ. Voor de overige texturen was de correlatie enkel significant met de in situ-ER-methode. De hogere variatie op de bepaling van de K-waarde in het laboratorium, toe te schrijven aan het relatief kleine bodemvolume dat wordt bemonsterd, bevestigt buitenlands onderzoek (bijvoorbeeld Mohanty en Kanwar, 1994).

3.6.2 Evaluatie van de meetmethodes

De standaarddeviatie tussen de vier herhalingen per site per methode was gelijk volgens de praktijktesten waardoor praktische overwegingen determinerend zijn bij de keuze van de te volgen techniek (Tabel 3-24). Zo scoort de ER-methode globaal goed wat betreft de praktische overwegingen maar zijn er beperkingen in stenige ondergronden en is er veel graafwerk nodig wanneer een meting op grotere dieptes wordt uitgevoerd. De PO-methode wordt op basis van de terreinervaringen en de verwerking van de meetgegevens als zeer betrouwbaar geacht. Het waterverbruik is evenwel hoger wat de meting meer omslachtig maakt. Ook is er een beperking in het hoge bereik. De techniek biedt wel het voordeel dat het graafwerk beperkt is wanneer deze wordt gebruikt op dieper liggende horizonten: de te bemeten boorput kan met een boor aangelegd worden. De SO-methode scoort goed in het praktijkonderzoek. De testresultaten correleren mooi met de andere testresultaten en er werden vrijwel geen outliers geobserveerd. Belangrijke kanttekening is echter dat in 13 % van de metingen de put geheel instortte waardoor geen meting mogelijk was. In 42 % van de gevallen stortte de put deels in tijdens de meting en kon de K-waarde nog afgeleid worden uit de daling van het waterniveau in de eerste centimeters na de start van de meting. Voor deze afleiding is enige theoretische voorkennis vereist. Daarnaast is, zoals bij de ER-methode, enig graafwerk vereist voor de meting kan worden uitgevoerd. Bij de OE-methode werden meer outliers geobserveerd; dit is echter vermoedelijk deels te wijten aan het Lisse-effect. Ook het bodemoppervlak waar de infiltratie wordt gemeten is kleiner waardoor het risico op outliers toeneemt. De techniek is dan weer vlot inzetbaar op grotere dieptes en het waterverbruik is beperkt. De installatie is ook complexer wat het risico op technische problemen verhoogd. Anderzijds kan de meting volledig worden geautomatiseerd waardoor interpretatiefouten op het terrein worden ingeperkt; anderzijds wordt visuele controle op correct functioneren van het apparaat moeilijk.

Tabel 3-24: Vergelijking van de verschillende insitu methodes

	Enkele Ring (ER)	Porchet (PO)	Soakaway (SO)	Open End (OE)
Investeringskost	Gematigd	Gematigd	Zeer laag	Eerder hoog
Gemiddelde duur tot verzadiging	1 tot 3 uur	4 uur	0.5 tot 24 u	20 minuten
Hoeveelheid water nodig voor de meting	Normaal (+- 20 l)	Kan oplopen tot meer dan 100 l	Normaal (+- 20 l)	Normaal (+- 20 l)
Risico op outliers	Normaal	Normaal	Normaal	Hogere kans
Beperkingen en calamiteiten op het terrein	Moeilijk om ring aan te brengen in stenige ondergrond Veel graafwerk indien metingen op de diepere horizonten	Vereist opvolging tijdens de meting Beperking in meetbereik bij hoge K	Put valt in Veel graafwerk indien metingen op de diepere horizonten	Visuele controle moeilijk bij technische storingen ingeval automatisatie

4. MODELLERING

De modellering is uitgevoerd voor het riool- en rivierstelsel van de Benedenvliet. Het integrale hydrodynamische riool-riviermodel van de Benedenvliet van VMM is als basis gebruikt. Het model is door VMM afdeling Operationeel waterbeheer ter beschikking gesteld in versie 5.5 van het softwarepakket InfoWorks ICM (Integrated Catchment Modelling) verdeeld door Innovyze.

Met het oog op het modelleren van de impact van infiltratie dienen neerslagtijdreeksen van 30 jaar van het KMI station te Ukkel doorgerekend te worden in verschillende toestanden en scenario's. Om de rekentijd te beperken, is op basis van het volledig hydrodynamisch model een geïntegreerd conceptueel riool-riviermodel opgebouwd.

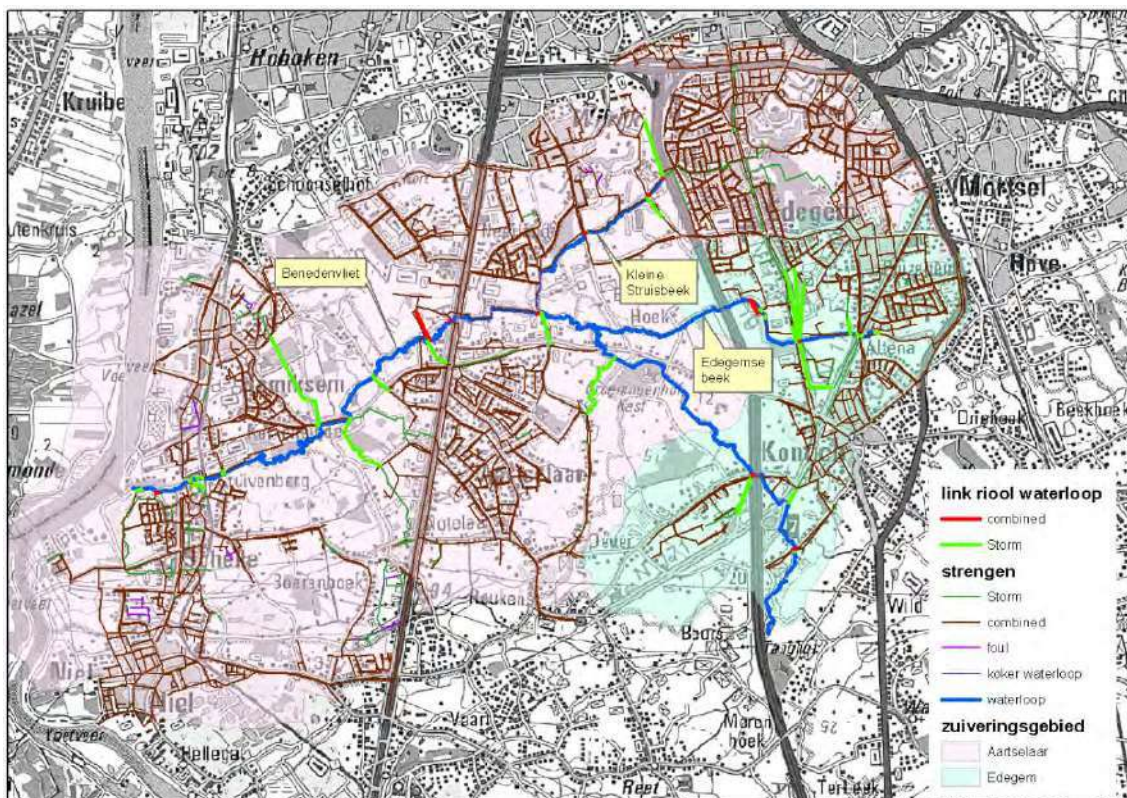
In wat volgt wordt ingegaan op het modelgebied, de conceptuele modellering van de hydrodynamica, de conceptuele modellering van de hydrologie en de scenario's.

4.1 MODELGEBIED

Het stroomgebied van de Benedenvliet is gelegen in de provincie Antwerpen ten zuiden van de stad Antwerpen. Hydrografisch gezien behoort het stroomgebied van de Benedenvliet tot het bekken van de Benedenschelde. De Benedenvliet wordt geklasseerd als een eerste categorie onbevaarbare waterloop afwaarts van de autoweg A12. De Benedenvliet vormt hier de grens tussen de fusiegemeentes Antwerpen en Aartselaar. Verder afwaarts vormt de Benedenvliet de grens tussen de fusiegemeentes Hemiksem en Schelle. Vlak voor zijn monding in de Schelde wordt de Benedenvliet geklasseerd als een bevaarbare waterloop.

De Benedenvliet loost op de Schelde langs een uitwateringsstructuur met een terugslagklep. Hierdoor stroomt bij hoogtij op de Schelde geen water richting Benedenvliet. Bij hoge waterpeilen op de Benedenvliet wordt gebruik gemaakt van een pompstation om water naar de Schelde te pompen. Het pompstation staat in verbinding met zowel de waterloop als de riolering. De stroomgebiedoppervlakte bedraagt 47.7 km².

Het modelgebied van de Benedenvliet wordt weergegeven in Figuur 4-1. In het model van de Benedenvliet zijn het rivier- en rioolstelsel opgenomen. Het rivierstelsel bevat stroomopwaarts een aantal zijlopen van 2^{de} categorie. De Mandoersebeek en de Edegemsebeek vloeien opwaarts van Aartselaar samen om de Benedenvliet te vormen. Vervolgens mondt ook de Kleine Struisbeek uit in de Benedenvliet. Het rioolstelsel bevat de stelsels van de zuiveringsgebieden van Aartselaar en Edegem in de bestaande toestand (toestand A). De rivier- en rioolstelsels zijn geïntegreerd langs een aantal koppelingen. Deze omvatten naast de lozingen van het regenwaterafvoerstelsel (RWA; Storm) en van het gemengde afvoerstelsel (GWA; Combined) in de waterloop ook de koppelingen tussen de overstromingszones van de waterloop met de rioleringsputten. De koppelingen komen aan bod bij de conceptuele modellering van het rioolstelsel (zie Hoofdstuk 4.2.1). Op het rioolstelsel zijn onverharde en verharde oppervlaktes aangesloten. De verharde oppervlaktes omvatten voor 45 % straten en 55 % daken.



Figuur 4-1: Het modelgebied van de Benedenvliet (bron VMM)

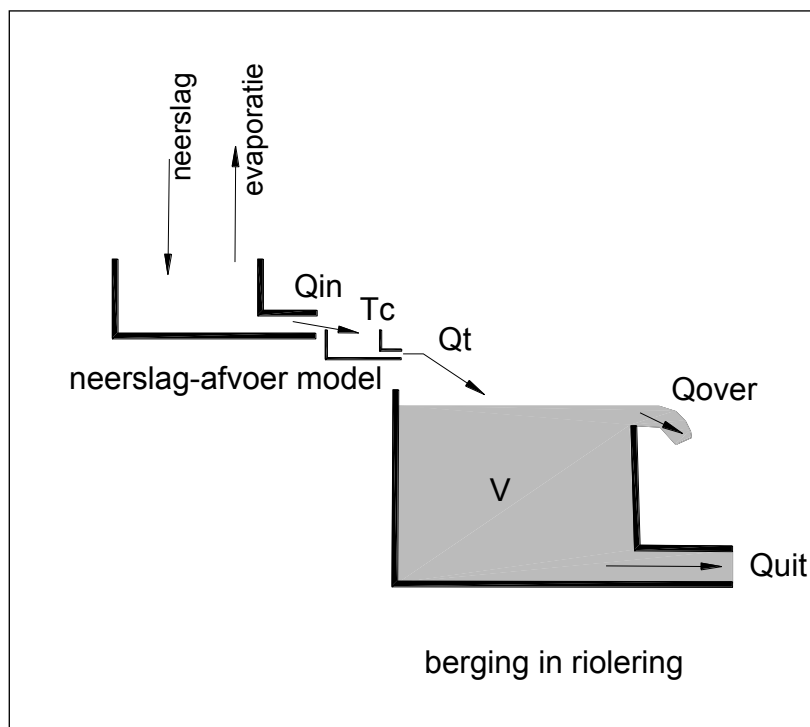
4.2 CONCEPTUELE MODELLERING HYDRODYNAMICA

4.2.1 Conceptuele modellering rioolstelsel

De conceptuele modellering van het rioolstelsel is uitgevoerd in InfoWorks ICM en vertrekkend van het volledig hydrodynamisch gekoppeld riool-waterloop model.

Het rioleringsysteem is conceptueel opgedeeld in verschillende bakelementen die onderling met elkaar verbonden zijn. In principe wordt per overstort (of algemeen per uitlaat) één bak voorzien. De laatste (meest afwaartse) bak stelt dan meestal de RWZI voor met overstort en effluent naar de waterloop.

Elk bakelement bestaat typisch uit twee delen, namelijk een deel voor de berekening van de toegevoerde neerslagafvoer en een deel voor de berekening van de berging in de riolering zoals weergegeven in Figuur 4-2.



Figuur 4-2: Schematische voorstelling van een bakelement uit de conceptuele modellering van een rioolstelsel

Het neerslag-afvoer model is aanwezig in het volledig hydrodynamisch model, maar is met het oog op de scenario's ondergebracht in iFramework (Urban module, zie §4.3).

Het stelsel opwaarts van een debietbeperkende structuur (zoals een knijpleiding, een wervelventiel, een pomp, ...) of een uitlaat wordt in een bakelement van het conceptueel model vervangen door een reservoir (Storage Area) met een hoogte-opervlakte relatie. Deze stelt de statische berging in het stelsel voor en is eenvoudig te bepalen in InfoWorks ICM (Total Storage Calculation tool). De neerslag-afvoer (Q_t) wordt opgelegd aan het reservoir van het bakelement.

Elk bakelement bevat één of meerdere overlaten, voorbeelden zijn (i) een overstort naar de waterloop, (ii) een intern overstort naar een ander deel van het rioolstelsel of (iii) een overlaat voor het interactief modelleren van enerzijds de overstroming vanuit de mangaten of slikkers van het rioolstelsel naar het maaiveld of anderzijds de overstroming vanuit de waterloop op het maaiveld naar de putten van het rioolstelsel. Deze overlaten zijn aanwezig in het volledig hydrodynamisch model en zijn in het conceptuele model verbonden met het reservoir (Storage Area) van de bak.

Een bakelement is verbonden met de bak van een stroomafwaarts deel van het rioolstelsel. Hiertoe is de debietbeperkende structuur van de opwaartse bak verbonden met het reservoir van de stroomafwaartse bak. Desgevallend zijn bakelementen tevens verbonden langs interne overlaten. Door de aaneenschakeling van de bakken is een conceptueel gemodelleerd rioolstelsel bekomen dat gekoppeld is met het hydrodynamisch gemodelleerd waterloopstelsel.

Het gekoppelde hydrodynamisch gemodelleerde waterloopstelsel en conceptueel gemodelleerde rioolstelsel zijn afgeijkt aan het volledig hydrodynamisch gemodelleerde waterloop-rioolmodel. Het afijken is in eerste instantie gebeurd door het in rekening brengen van dynamische berging. De bakelementen brengen zoals bovenstaand beschreven de statische berging in rekening als het volume in het stelsel onder het drempelpeil van de overlaat. Er treedt echter ook berging op boven het drempelpeil in de verhanglijn die zich instelt naar het overstort en in de delen van het stelsel die afstromen naar het overstort met drempelpeilen hoger dan het drempelpeil van het overstort. Deze dynamische berging is in rekening gebracht door het toepassen van een factor op de statische berging. Er is een vergelijking gemaakt voor waterstand, doorvoer- en overstortvolume en het doorvoer- en overstorthydrogram. De kalibratie is stapsgewijs en bakelement per bakelement uitgevoerd. Het resultaat van elke stap is meegenomen bij de kalibratie van de verdere afwaartse bakken. In tweede instantie is een verdere verfijning mogelijk door het toepassen van tijdsverschuiving en afvlakking van de piekafvoer. Dit gebeurt langs het iFramework (zie §4.3).

De events waarvoor de kalibratie uitgevoerd is, zijn opgenomen in Tabel 4-1.

Tabel 4-1: Overzicht van de events voor de kalibratie van het rioolstelsel

T [jaar]	Start [dd/mm/jjjj hh:mm]	Einde [dd/mm/jjjj hh:mm]
0.5	20/05/1928 03:00	21/05/1928 13:00
1	22/10/1964 15:00	26/10/1964 15:00
2	13/09/1998 01:00	17/09/1998 19:00
5	29/08/1945 22:00	02/09/1945 19:00
10	01/05/1978 04:00	05/05/1978 02:00
25	09/07/1942 20:00	14/07/1942 09:00
50	15/07/1962 05:00	18/07/1962 03:00
100	27/08/1996 07:00	05/09/1996 06:00

Per terugkeerperiode worden de start- en einddatum en het volgnummer gegeven van het event dat maatgevend is voor een bepaalde terugkeerperiode. De maatgevende events zijn bepaald o.b.v. de overstromingsdieptes ter hoogte van de overstromingszones voor de waterloop. Het is daarom mogelijk dat, lokaal en voor het rioolstelsel, de volgorde van deze events afwijkt. Op basis van het aantal events dat doorgerekend werd met het integraal model van de Benedenvliet in het kader van het project voor het opstellen van gedifferentieerde buffereisen (IMDC, 2013), is het mogelijk om een maatgevend event te selecteren tot een terugkeerperiode van 0.5 jaar.

In wat volgt wordt een overzicht gegeven van de conceptuele schematisatie van het rioolstelsel in bakelementen en van de belangrijkste kenmerken per bakelement.

Het rioolstelsel van het modelgebied Benedenvliet bestaat zoals aangegeven uit twee deelstelsels: het deelstelsel van zuiveringsgebied Edegem en het deelstelsel van zuiveringsgebied Aartselaar. Er is geen interactie tussen deze deelstelsels. Elk deelstelsel heeft een RWZI die haar effluent loost op de waterloop, respectievelijk op de Mandoersebeek (RWZI Edegem) en op de Benedenvliet (RWZI Aartselaar).

Voor het rioolstelsel van beide zuiveringsgebieden is een schematische weergave opgesteld als basis voor het opbouwen van het conceptuele rioolmodel. In Figuur 4-3 wordt de verhouding van de deelmodellen weergegeven:

- Zuiveringsgebied Edegem: Het deelmodel Edegem en Kontich omvat het rioolmodel van het volledige zuiveringsgebied Edegem en heeft een eigen RWZI;
- Zuiveringsgebied Aartselaar:
 - o Het deelmodel Schelle wordt verpompt naar het deelmodel van Hemiksem;
 - o Het deelmodel van Hemiksem wordt verpompt naar het deelmodel van Wilrijk en Aartselaar;
 - o Het deelmodel Edegem Noord, Wilrijk en Aartselaar loost via een gewone leiding in het deelmodel van Wilrijk en Aartselaar;
 - o Tot slot wordt het effluent van de RWZI uit het deelmodel Wilrijk en Aartselaar en het overstortwater verpompt naar de waterloop Benedenvliet.



Figuur 4-3: Overzicht rioolstelsel met opdeling in deelstelsels

4.2.1.1 Zuiveringsgebied Edegem

In Figuur 4-4 wordt de schematische weergave van het zuiveringsgebied van Edegem getoond. In Tabel 4-2 worden de belangrijkste kenmerken van de baelementen voor het zuiveringsgebied van Edegem weergegeven. In de verdere tekst worden de baelementen geïdentificeerd aan de hand van de doorvoerleiding (zie 'ID' veld).

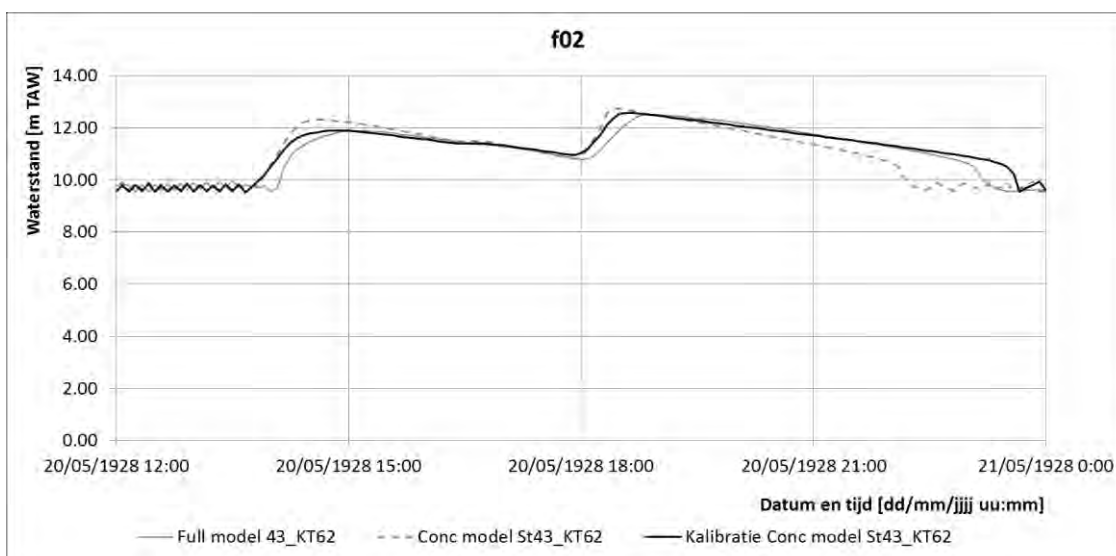


Tabel 4-2: Overzicht van de kenmerken van de bakelementen van het zuiveringsgebied Edegem

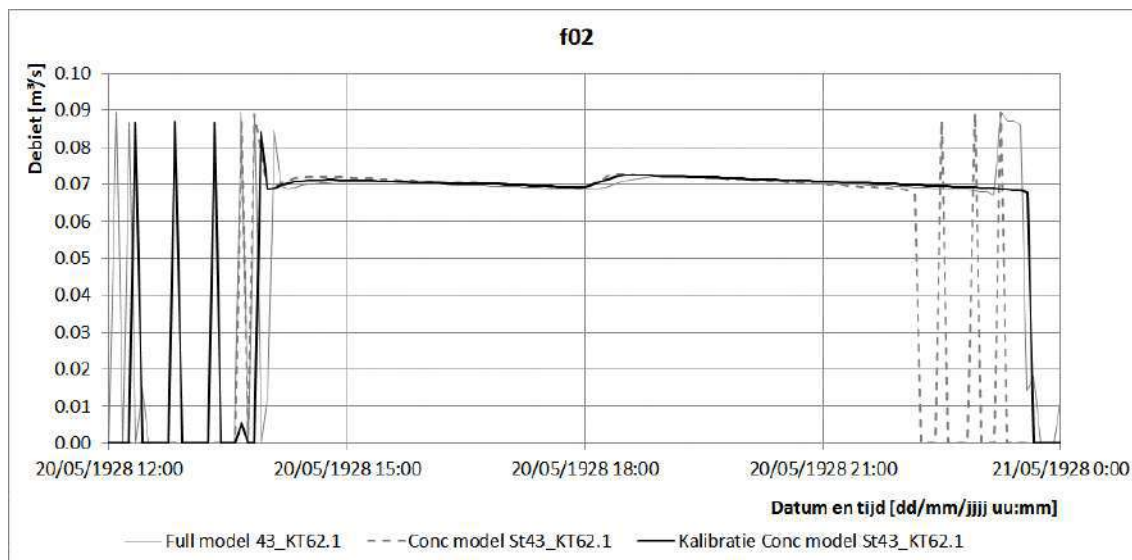
Doorvoer			Overstort			Stelsel			
Type	ID	Naar	Drempelpeil [mTAW]	ID	Naar	Statische berging [m³]	Factor Dynamische berging	Verharde oppervlakte [ha]	# IE
Knijpleiding	43_31.1	43_14	12.46	43_31.2	EDB09	160	25%	21.44	3838
Doorvoerleiding	43_KT467.1	43_14	13.30	43_KT476.2	EDB012	304		23.01	1709
			13.30	43_KT479.2	EDB012	304			
			16.22	43_KT491.2	EDB012	1313			
Knijpleiding	43_14.1	43_1	12.27	43_27.2	EDB011	1386		21.40	1573
Knijpleiding	43_200.1	43_1	10.93	43_200.2	EDB028c	866	40%	45.76	5030
			18.97	43_175.1	43_14	6915			
Pomp + Persleiding	43_KT950.1	43_KT67	15.71	43_KT942.1	MAN040c2	208		4.75	423
Knijpleiding	43_KT67.1	43_KT62	16.60	43_KT67.2	MAN048	538		11.17	820
			18.20	43_KT1294.2	43_8	1153			
			17.97	43_KT2092.1	43_8	1047			
Pomp + Persleiding	43_KT62.1	43_8	12.16	43_KT57.4	MAN059c	1185	50%	15.99	1861
			14.90	43_KT2140.1	MAN059c	3582			
Doorvoerleiding	43_8.1	43_1	14.14	43_KT549.1	43_588	3281		13.07	1109
Doorvoerleiding	43_588.3	43_1	11.11	43_588.2	EDB019	618		2.93	423
Pomp	43_1.1	RWZI	10.66	43_3.2	EDB026	3145		114.28	12191
	43_1.2								
				43_1.3	waterloop				

In het deel 'Doorvoer' van Tabel 4-2 worden de bakelementen geïdentificeerd (zie kolom 'ID') en met aanduiding van het type doorvoer en het bakelement waarnaar doorgevoerd wordt. In het deel 'Overstort' staat welke overstorten actief zijn per bakelement, met welke drempelpeilen en naar welke bakelementen of knooppunten (in de waterloop) deze afvoeren (zie kolom 4 t.e.m. 6). In het deel 'Stelsel' van de tabel staan de kenmerken van het stelsel, namelijk de statische berging op basis van de drempelpeilen, de factor van de dynamische berging, het aantal inwonersequivalenten (#IE) en de (totaal) aangesloten verharde oppervlakte (straat- en dakoppervlakte). Er wordt opgemerkt dat de pomp '43_1.3' een SWA (Storm Water Afvoer) vijzel is die gemengd water rechtstreeks op de beek loost.

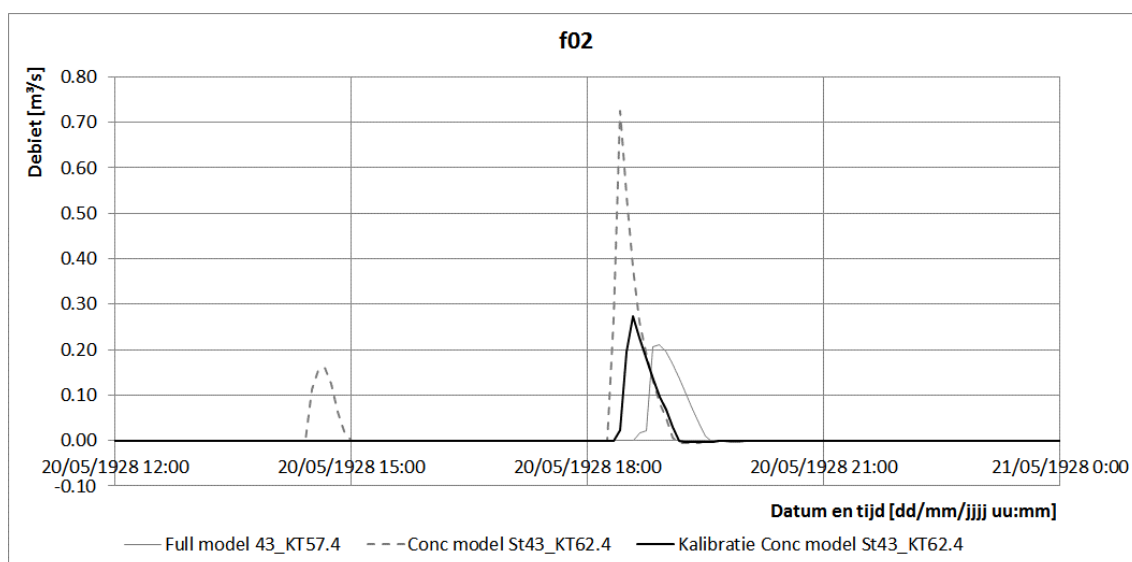
Door het toepassen van de dynamische bergingsfactor wordt de statische berging vergroot. Bij wijze van voorbeeld wordt in Figuur 4-5, Figuur 4-6 en Figuur 4-7 het effect van de factor getoond voor het bakelement 43_KT62. In dit bakelement wordt een dynamische bergingsfactor van 50 % afgeijkt. De grafieken geven het waterstands- of debietverloop weer voor het hydrodynamisch model, het niet-gekalibreerde conceptueel model en het gekalibreerde conceptueel model bij een event met een terugkeerperiode van 0.5 jaar. Het toepassen van de dynamische berging heeft zowel een effect op de pieken in waterstand of debiet als op het totale doorvoer- of overstortvolume.



Figuur 4-5: Waterstandsverloop van een bakelement (ID: 43_KT62) in het volledig hydrodynamisch (Full), het niet-gekalibreerde conceptueel (Conc.) en het gekalibreerd conceptueel (Kalibratie Conc.) model van het zuiveringsgebied Edegem bij een event met terugkeerperiode van 0.5 jaar



Figuur 4-6: Doorvoerdebiet van een bakelement (ID: 43_KT62.1) in het volledig hydrodynamisch (Full), het niet-gekalibreerde conceptueel (Conc.) en het gekalibreerd conceptueel (Kalibratie Conc.) model van het zuiveringsgebied Edegem bij een event met terugkeerperiode van 0.5 jaar



Figuur 4-7: Overstortdebiet van een bakelement (ID: 43_KT57.4) in het volledig hydrodynamisch (Full), het niet-gekalibreerde conceptueel (Conc.) en het gekalibreerd (Kalibratie Conc) conceptueel model van het zuiveringsgebied Edegem bij een event met terugkeerperiode van 0.5 jaar

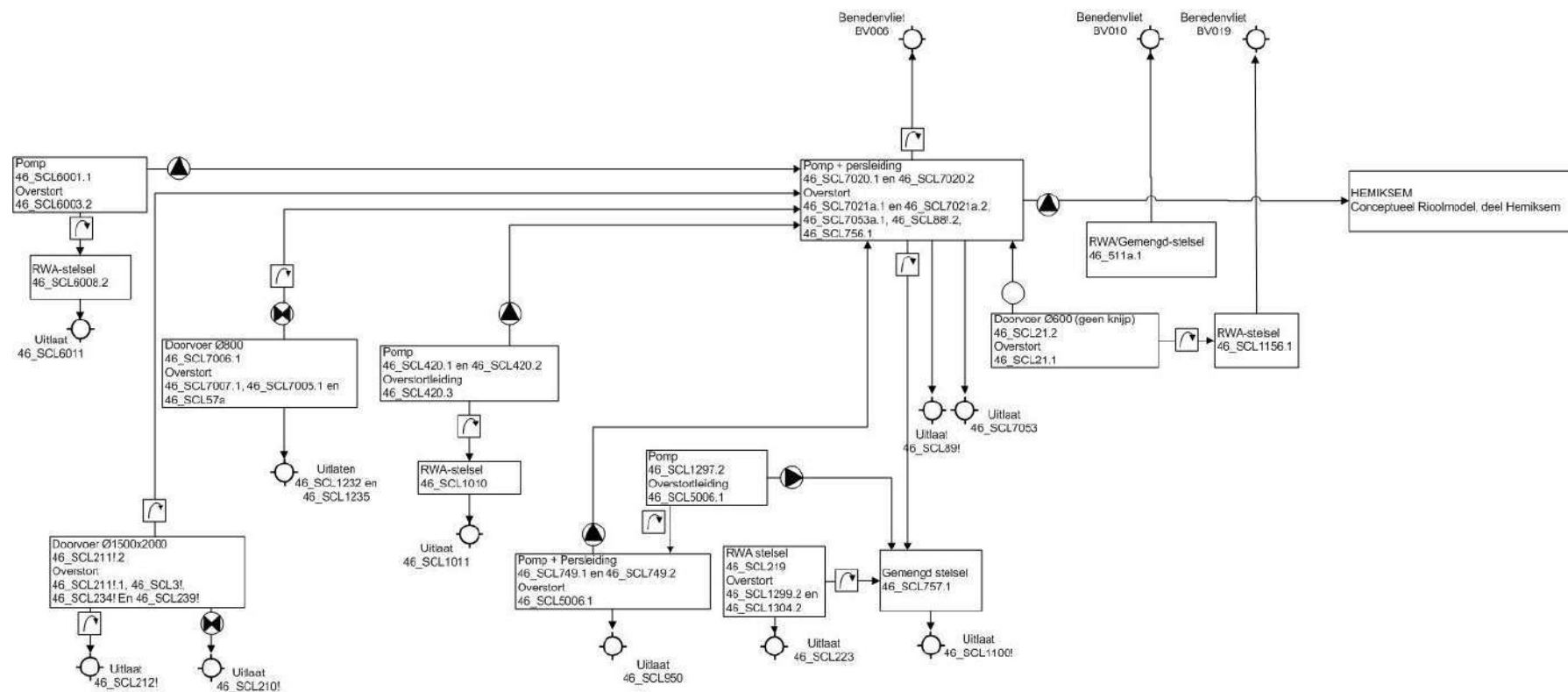
In Tabel 4-3 worden de kalibratievariabelen voor het volledig hydrodynamisch model (Full) vergeleken met het gekalibreerde conceptueel model (Conc.) voor een event met een terugkeerperiode van 0.5 jaar (f02). De tabellen voor events met terugkeerperioden van 2 (T02) en 5 (T05) jaar staan in Bijlage AD.1.

Tabel 4-3: Overzicht van waterstanden, debieten en volumes van bakelementen in het zuiveringsgebied Edegem voor een event met een terugkeerperiode van 0.5 jaar (f02)

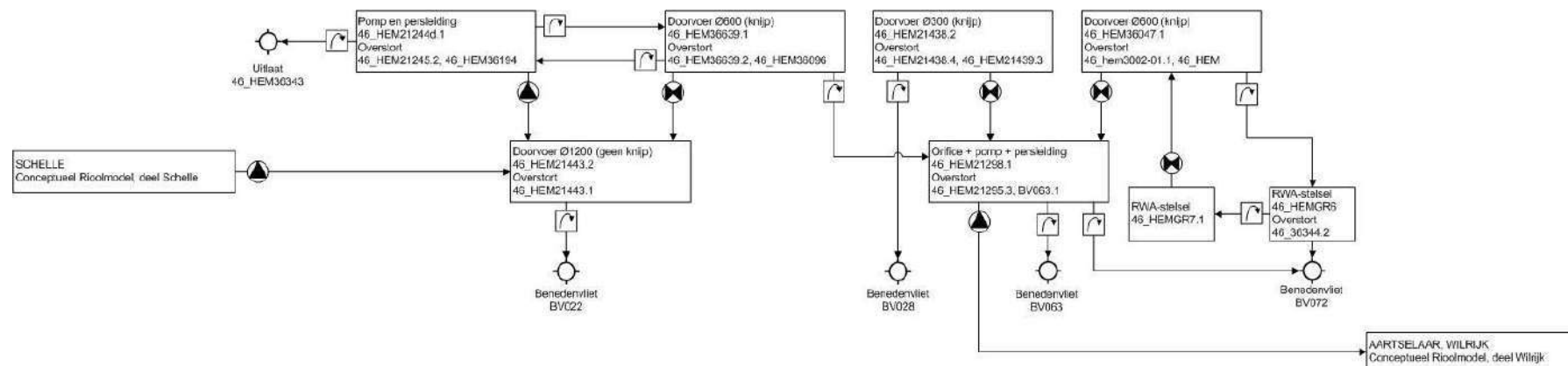
Berging (bak)					Doorvoer					Overstort					
ID	Min [m TAW]		Max [m TAW]		ID	Volume [m³]		Max [m³/s]		Drempel-peil [mTAW]	ID	Volume [m³]		Max [m³/s]	
	Full	Conc.	Full	Conc.		Full	Conc.	Full	Conc.			Full	Conc.	Full	Conc.
43_31	11.78	11.78	12.91	12.99	43_31.1	3205	3287	0.43	0.42	12.46	43_31.2	1297	1288	0.63	0.72
43_KT467	10.89	10.89	12.86	13.09	43_KT467.1	3798	4416	1.04	1.23	13.3	43_KT476.2	0	0	0.00	0.00
										13.3	43_KT479.2	42	0	0.07	0.00
										16.22	43_KT491.2	0	0	0.00	0.00
43_14	9.37	9.37	12.81	13.00	43_14.1	8885	9238	0.52	0.49	12.27	43_27.2	1523	1684	1.10	1.64
43_200	8.50	8.42	11.17	11.26	43_200.1	6801	6834	0.91	1.02	10.93	43_200.2	1682	1930	0.99	1.65
										18.97	43_175.1				
43_KT950	12.27	12.27	15.81	15.80	43_KT950.1	601	614	0.02	0.02	15.71	43_KT942.1	177	196	0.23	0.24
43_KT67	15.13	15.10	16.48	16.37	43_KT67.1	1326	1292	0.11	0.11	16.6	43_KT67.2	0	0	0.00	0.00
										18.2	43_KT1294.2	0	0	0.00	0.00
										17.97	43_KT2092.1	93	0	0.05	0.00
43_KT62	9.50	9.49	12.50	12.57	43_KT62.1	3372	3456	0.09	0.09	12.16	43_KT57.4	348	361	0.21	0.27
										14.9	43_KT2140.1	52	34	0.02	0.02
43_8	9.42	9.41	11.84	11.82	43_8.1	10006	10957	0.99	1.53	14.14	43_KT549.1	20	0	0.06	0.00
43_588	9.28	9.28	11.68	11.35	43_588.3	3636	3953	0.30	0.38	11.11	43_588.2	-2938	-3239	0.09	0.00
43_1	8.17	8.17	11.12	11.26	43_1.1	5124	5254	0.10	0.10	10.66	43_3.2	3002	3106	1.08	1.71
					43_1.2	11721	12164	0.30	0.30	nvt	43_1.3	9610	10120	0.37	0.37

4.2.1.2 Zuiveringsgebied Aartselaar

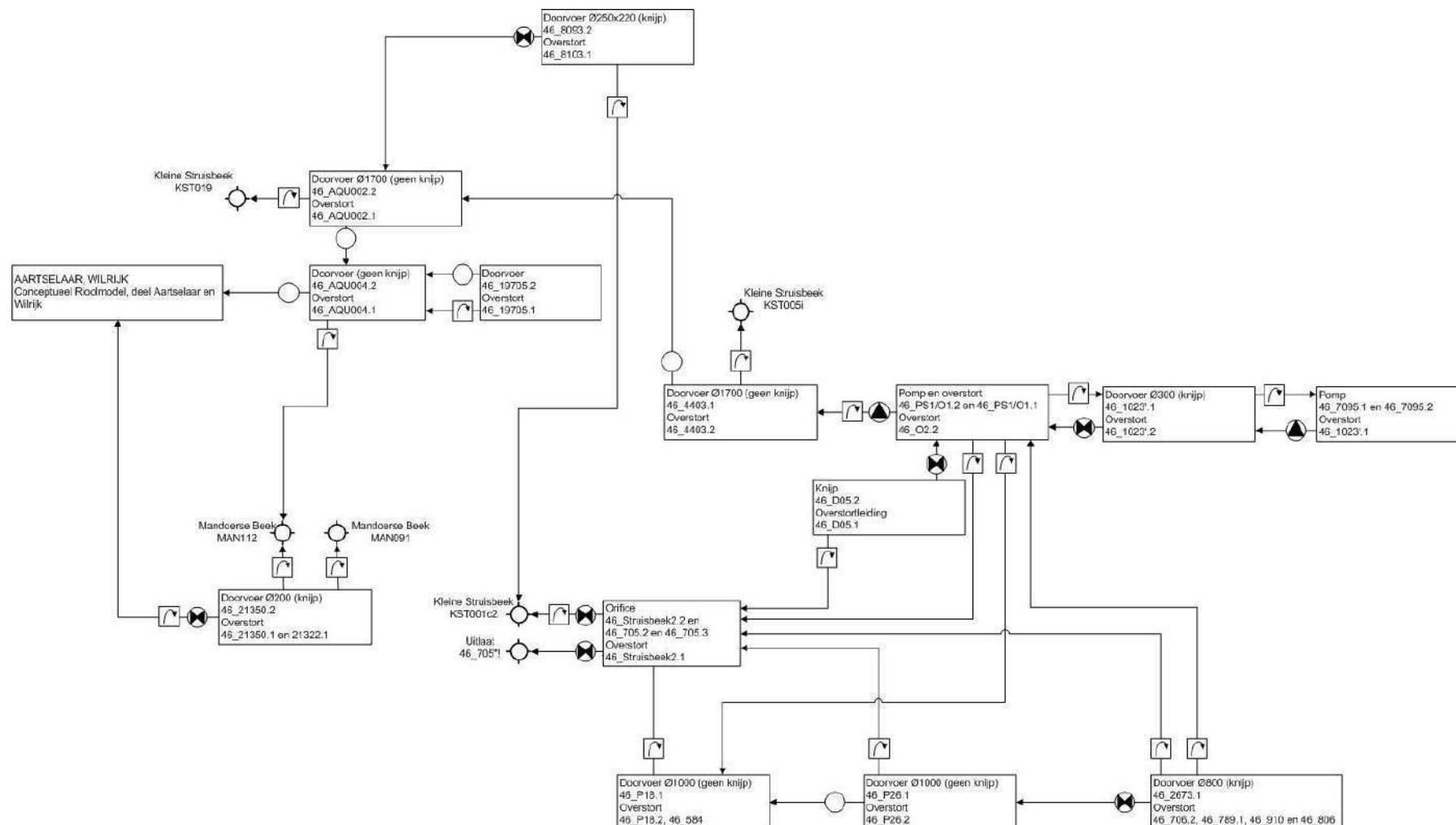
In functie van de leesbaarheid wordt het rioolstelsel van het zuiveringsgebied van Aartselaar in Figuur 4-8, Figuur 4-9, Figuur 4-10 en Figuur 4-11 getoond per deelstelsel. Het volledige stelsel wordt getoond in Figuur 4-3 (zie Hoofdstuk 4.2.1). De belangrijkste kenmerken van de bakelementen voor het zuiveringsgebied van Aartselaar worden in Tabel 4-4 weergegeven. In de verdere tekst worden de bakelementen geïdentificeerd aan de hand van de doorvoerleiding (zie 'ID' veld). De indeling van de tabel is gelijkaardig aan deze van Tabel 4-2 voor het zuiveringsgebied van Edegem (zie Hoofdstuk 4.2.1.1).



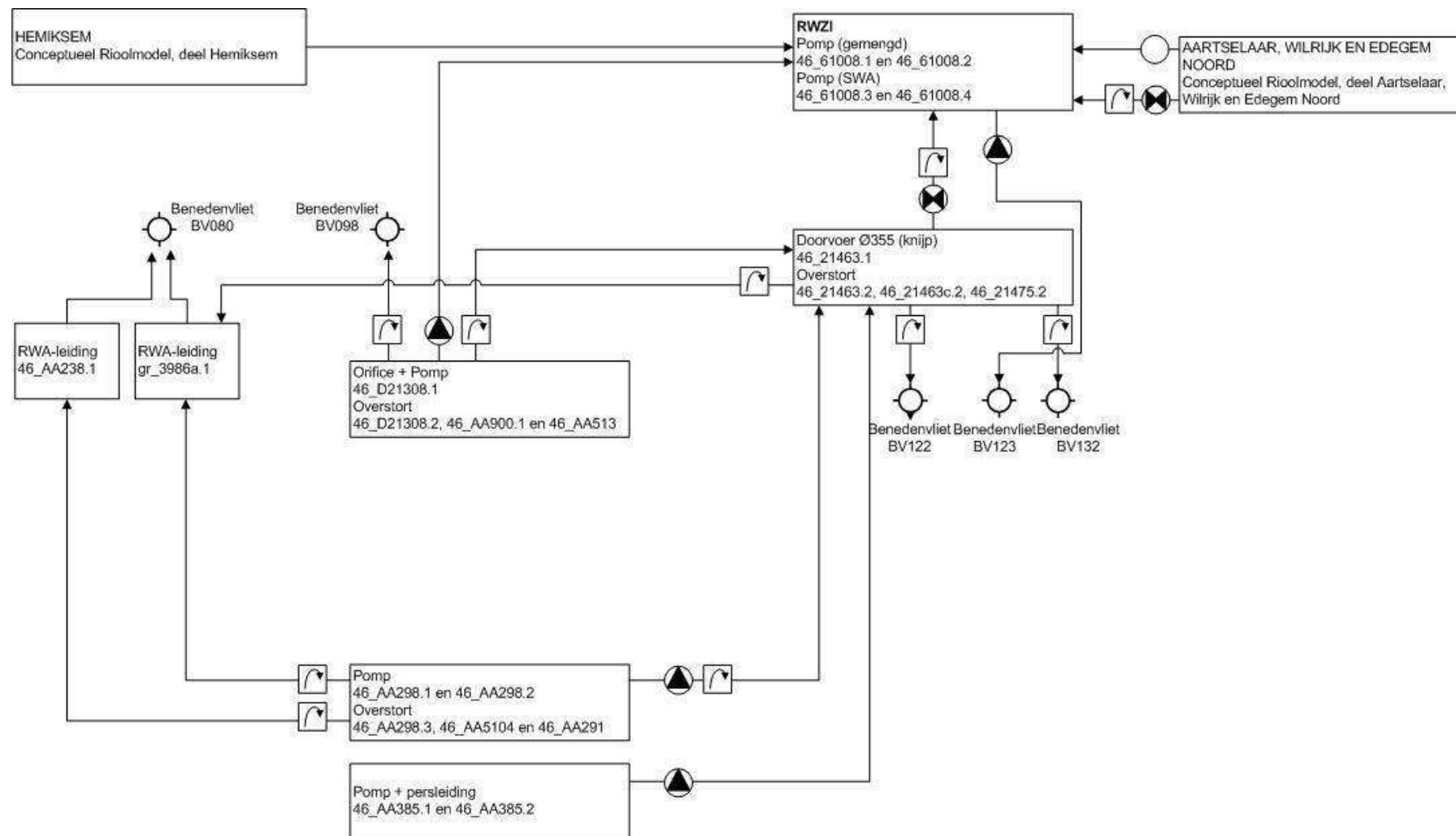
Figuur 4-8: Schematische weergave van het rioleringsstelsel van deelgebied Schelle, in zuiveringsgebied van Aartselaar



Figuur 4-9: Schematische weergave van het rioleringsstelsel van deelgebied Hemiksem, in zuiveringsgebied van Aartselaar



Figuur 4-10: Schematische weergave van het rioleringsstelsel van deelgebied Edegem-Noord/Wilrijk/Aartselaar, in zuiveringsgebied van Aartselaar



Figuur 4-11: Schematische weergave van het rioleringsstelsel van deelgebied Wilrijk en Aartselaar, in zuiveringsgebied van Aartselaar

Tabel 4-4: Overzicht van de kenmerken van de bakelementen in het zuiveringsgebied Aartselaar

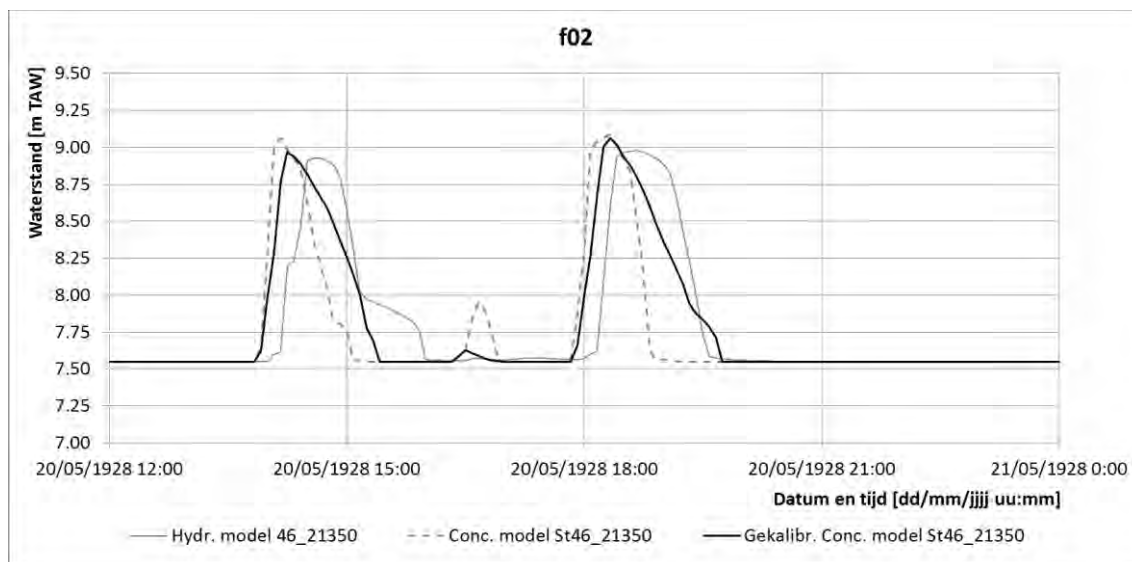
Doorvoer			Overstort			Stelsel			
Type	ID	Naar	Drempelpeil [mTAW]	ID	Naar	Statische berging [m³]	Factor Dynamische berging [-]	Verharde opper- vlakke [ha]	# IE
Pomp	46_SCL6001.1	46_SCL7020.1 46_SCL7020.2	4.00	46_SCL6003.2	46_SCL6011	611		2.05	189
Doorvoerleiding	46_SCL211!.2	46_SCL210!	4.18	46_SCL211!.1	46_SCL212!	288		9.67	723
			7.15	46_SCL6!.1	46_SCL7020.1 46_SCL7020.2	762			
			8.64	46_SCL234!.1	46_SCL212!	979			
			9.89	46_SCL239!.1	46_SCL212!	1126			
Doorvoerleiding	46_SCL7006.1	46_SCL7020.1 46_SCL7020.2	3.72	46_SCL7007.1	46_SCL1232 46_SCL1229	58		6.44	501
			3.74	46_SCL7005.1	46_SCL1232 46_SCL1229	63			
Pomp	46_SCL420.1 46_SCL420.2	46_SCL7020.1 46_SCL7020.2	4.23	46_SCL420.3	46_SCL1011	60		0.00	225
Pomp + Persleiding	46_SCL749.1 46_SCL749.2	46_SCL7020.1 46_SCL7020.2	11.53	46_SCL5006.1	46_SCL950	401		6.69	1038
Doorvoerleiding	46_SCL21.2	46_SCL7020.1 46_SCL7020.2	4.77	46_SCL21.1	BV019	1433		6.04	498
Pomp + persleiding	46_SCL7020.1 46_SCL7020.2	46_HEM21443.2	6.85	46_SCL88!.2	46_SCL89!		50%	90.12	7362
			4.85	46_SCL7053a.1	46_SCL7053				
			2.28	46_SCL7021a.1 46_SCL7021a.2	BV006	4283			
			13.38	46_SCL756.1	46_SCL757.1 (gemengd stelsel) en uitlaat 46_SCL1100!				

Doorvoer			Overstort			Stelsel			
Doorvoerleiding	46_SCL757.1	46_SCL1100! (uitlaat)				722		10.45	555
Pomp	46_SCL1297.2	46_SCL757.1	12.04	46_SCL1297.1	46_SCL749.1 46_SCL749.2	27		0.00	276
pomp + persleiding	46_HEM21244.1	46_HEM21443.2	6.03	46_HEM21245.2	46_HEM36343	77		475.30	3
			17.45	46_HEM36194.2	46_HEM36639.1	511			
Doorvoerleiding	46_HEM36639.1	46_HEM21443.2	15.63	46_HEM36639.2	46_HEM21244.1	14		1208.89	11
			20.11	46_HEM36096.1	46_HEM21298.4	1018			
Doorvoerleiding	46_HEM21443.2	46_HEM21298.4	5.37	46_HEM21443.1	BV022	11775		15.40	1428
Doorvoerleiding	46_HEM21438.2	46_HEM21298.4	4.10	46_HEM21438.4	BV028	23		7.10	362
			5.24	46_HEM21439.3	BV028	83			
Doorvoerleiding	46_HEM36047.1	46_HEM21298.4	15.15	46_HEM3002-o1.1	BV072	196		5.79	1140
Pomp + persleiding	46_HEM21298.4	RWZI: 46_61008.1 46_61008.2 46_61008.3 46_61008.4	5.14	BV063.1	BV063	13947	20%	39.34	4779
			5.25	46_HEM21295.3	BV072	14317			
Knijpleiding + Pomp	46_D21308.1	RWZI: 46_61008.1 46_61008.2 46_61008.3 46_61008.4	9.37	46_AA900.1	46_21463.1	700		7.88	449
			9.84	46_AA513.1	46_21463.1	820			
			6.35	46_D21308.2	BV098	231			
Pomp + persleiding	46_AA385.1	46_21463.1	n.v.t.					0.27	37

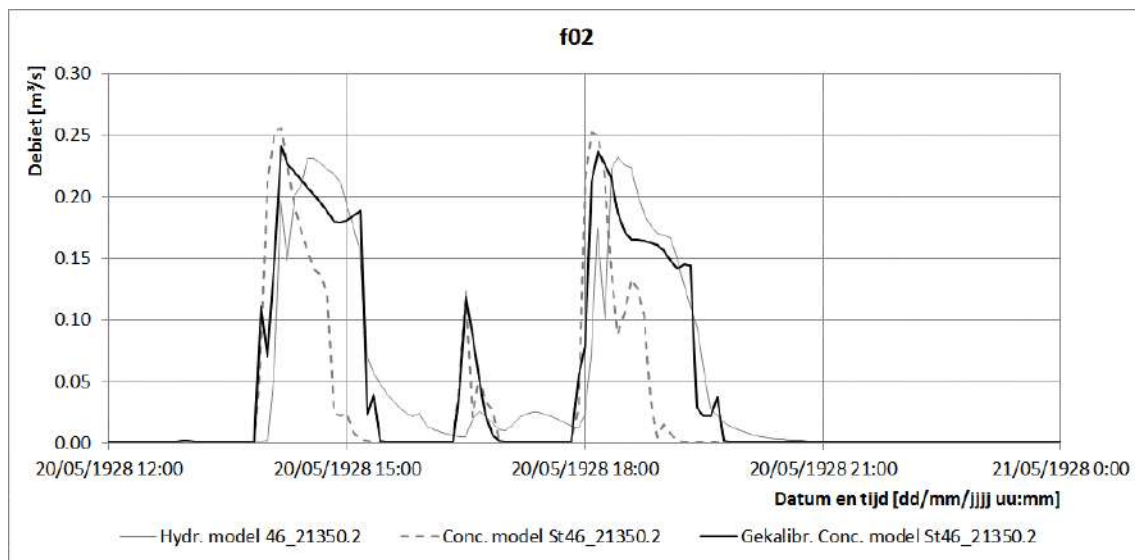
Doorvoer			Overstort			Stelsel			
Pomp	46_AA298.1 46_AA298.2	46_21463.1	9.41	46_AA291.2	BV080	79		5.57	36
			9.07	46_AA298.3	BV080	33			
			12.49	46_AA5104.2	46_21463.1	298			
Knijpleiding	46_21463.1	RWZI: 46_61008.1 46_61008.2 46_61008.3 46_61008.4	10.15	46_AA805.2	BV080	5626	200%	130.19	10349
			7.63	46_D21643c.2	BV132	1117			
			8.69	46_21475.2	BV122	2374			
			6.49	46_21463.5	RWZI: 46_61008.1 46_61008.2 46_61008.3 46_61008.4	135			
Knijpleiding	46_2673.1	46_P26.1	11.90	46_706.2	46_Struisbeek2.2 (KST001c2)	381		21.77	2417
			14.67	46_789.1	46_Struisbeek2.2 (KST001c2)	1840			
			13.52	46_910.3	46_PS1/O1	1185			
			13.94	46_806.1	46_PS1/O1	1442			
Doorvoerleiding	46_P26.1	46_P18.1	11.30	46_P26.2	46_Struisbeek2.2 (KST001c2)	737		7.88	670
Doorvoerleiding	46_P18.1	46_PS/O1	10.81	46_P18.2	46_Struisbeek2.2 (KST001c2)	752		11.53	952
Knijpleiding	46_1023'.1	46_PS/O1	14.07	46_1023.1	46_PS1/O1	250	50%	18.90	1922
Knijpleiding	46_D05.2	46_PS/O1	12.30	46_D05.1	46_Struisbeek2.2 (KST001c2)	1		1.51	99

Doorvoer			Overstort			Stelsel			
Pomp	46_PS1/O1	46_4403.1	12.74	46_505.3	46_D05.2	13061	30%	103.30	8110
			10.35	46_O2.2	46_Struisbeek2.2 (KST001c2)	2459			
			10.64	46_P584.1	46_P18.1	3300			
			8.80	46_PS1/O1.1	46_4403.1	1516			
Doorvoerleiding	46_4403.1	46_AQU002.2	9.36	46_4403.2	KST005i	2468		nvt	nvt
Doorvoerleiding	46_8093.2	46_AQU002.2	12.87	46_8103.1	KST001c2	187		3.24	245
Doorvoerleiding	46_AQU002.2	46_AQU004.2	8.97	46_AQU002.1	KST019	3393		4.54	444
Doorvoerleiding	46_19705.2	46_AQU004.2	10.08	46_19705.1	46_AQU004.2	6		14.70	1343
Doorvoerleiding	46_AQU004.2	RWZI: 46_61008.1 46_61008.2 46_61008.3 46_61008.4	7.98	46_AQU004.1	MAN112	3988	200%	36.55	2410
Doorvoerleiding	46_21350.2	RWZI: 46_61008.1 46_61008.2 46_61008.3 46_61008.4	8.86	46_21350b.1	RWZI: 46_61008.1 46_61008.2 46_61008.3 46_61008.4	97	400%	15.35	582
			13.09	46_21322.2	MAN091	1148			

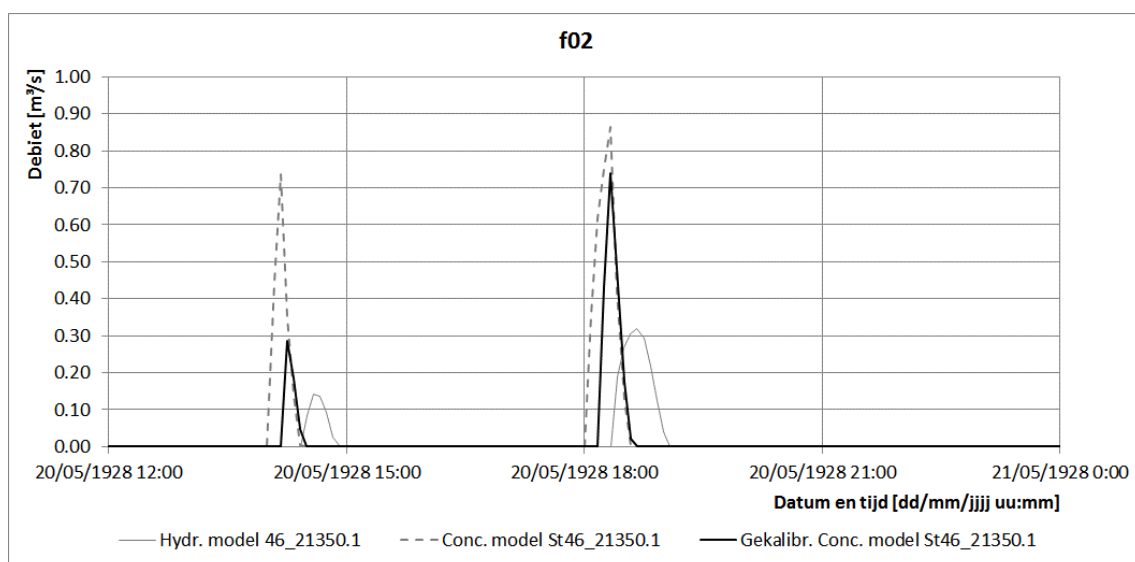
Gelijkaardig aan het zuiveringsgebied van Edegem wordt in Figuur 4-12, Figuur 4-13 en Figuur 4-14 de impact van de dynamische bergingsfactor geïllustreerd voor een opwaarts gesitueerd bakelement (46_21350) en in Figuur 4-15, Figuur 4-16 en Figuur 4-17 voor een afwaarts gesitueerd bakelement (46_AQU004). De grafieken geven het waterstands- of debietverloop weer voor het hydrodynamisch model, het niet-gekalibreerde conceptueel model en het gekalibreerde conceptueel model bij een event met een terugkeerperiode van 0.5 jaar. Het toepassen van de dynamische berging heeft zowel een effect op de pieken in waterstand of debiet als op het totale doorvoer- of overstortvolume.



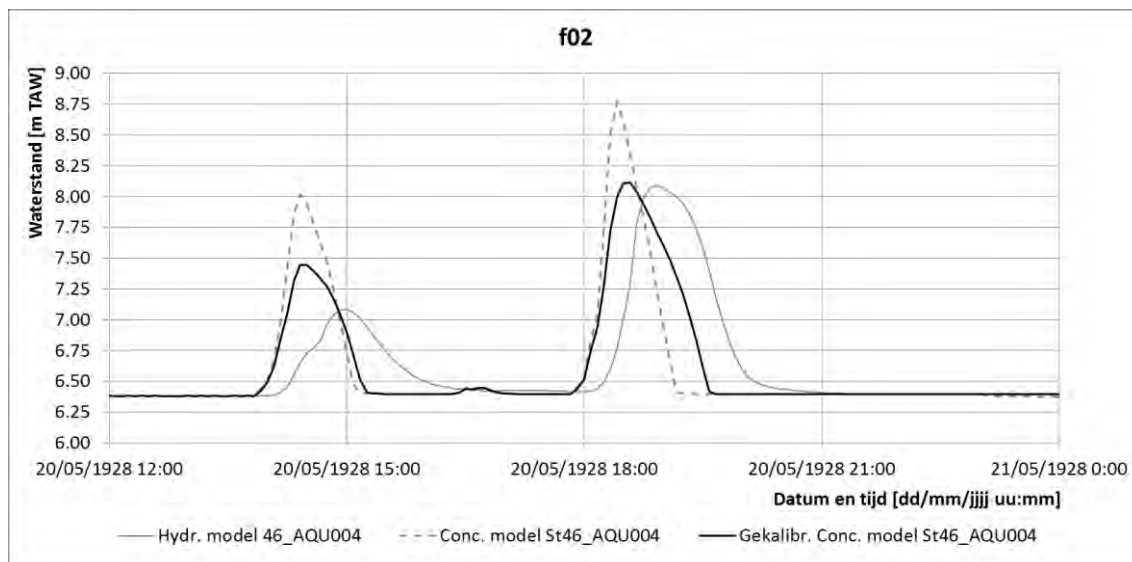
Figuur 4-12: Waterstandsverloop van een bakelement (ID: 46_21350) in het opwaarts deel van het volledig hydrodynamisch (Full), het niet-gekalibreerde conceptueel (Conc.) en het gekalibreerd (Kalibratie Conc.) conceptueel model van het zuiveringsgebied Aartselaar bij een event met terugkeerperiode van 0.5 jaar



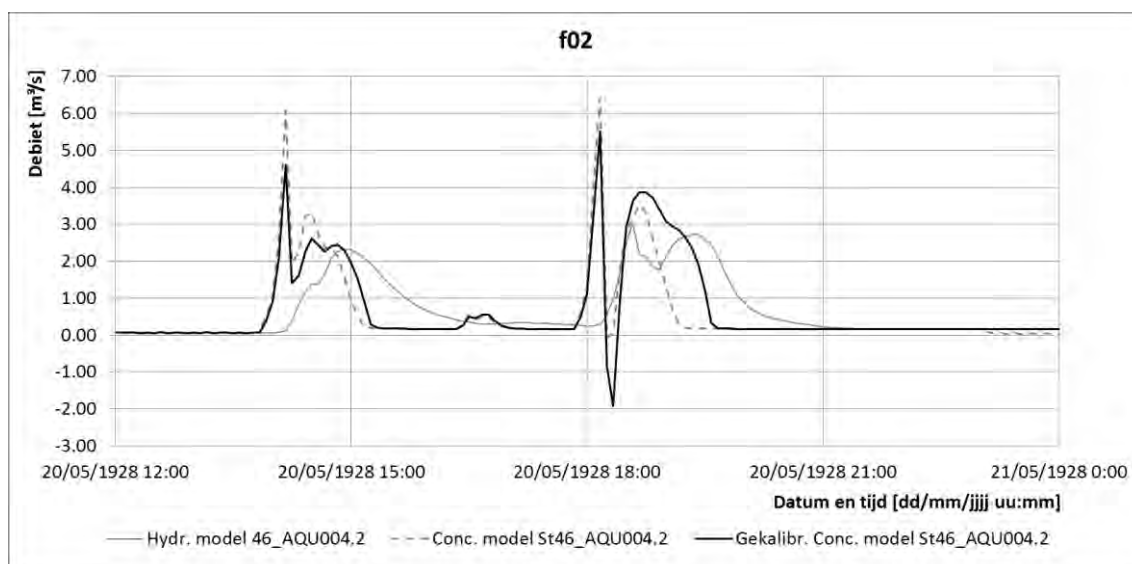
Figuur 4-13: Doorvoerdebiet van een bakelement (ID: 46_21350.2) in het opwaarts deel van het volledig hydrodynamisch (Full), het niet-gekalibreerde conceptueel (Conc.) en het gekalibreerd (Kalibratie Conc.) conceptueel model van het zuiveringsgebied van Aartselaar bij een event met terugkeerperiode van 0.5 jaar



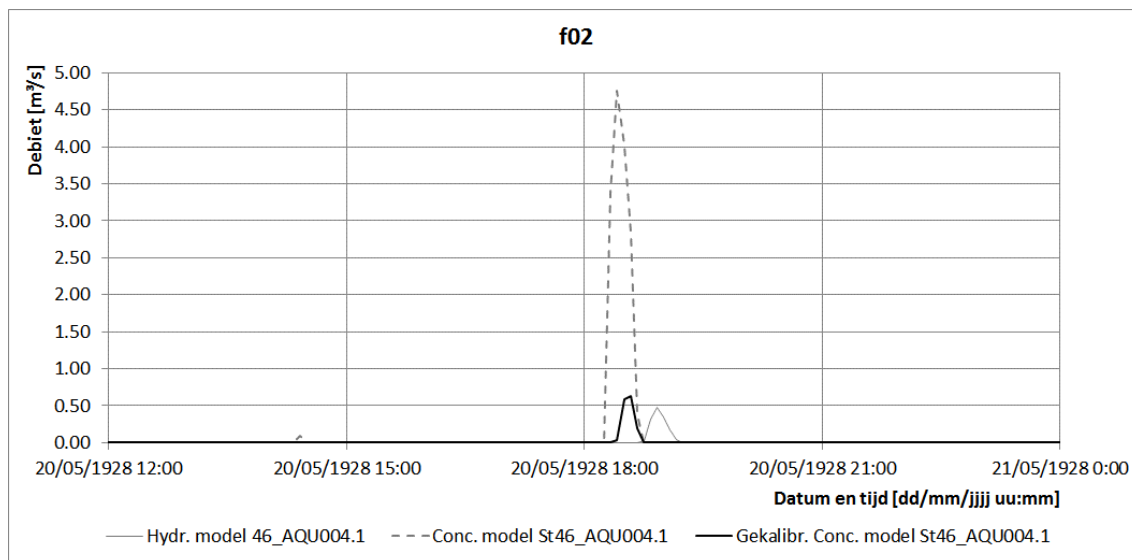
Figuur 4-14: Overstortdebiet van een bakelement (ID: 46_21350.1) in het opwaarts deel van het volledig hydrodynamisch (Full), het niet-gekalibreerde conceptueel (Conc.) en het gekalibreerd conceptueel (Kalibratie Conc.) model van het zuiveringsgebied van Aartselaar bij een event met terugkeerperiode van 0.5 jaar



Figuur 4-15: Waterstandsverloop van een bakelement (ID: 46_AQU004) in het afwaarts deel van het volledig hydrodynamisch (Full), het niet-gekalibreerde conceptueel (Conc.) en het gekalibreerd conceptueel (Kalibratie Conc.) model van het zuiveringsgebied van Aartselaar bij een event met terugkeerperiode van 0.5 jaar



Figuur 4-16: Doorvoerdebiet van een bakelement (ID: 46_AQU004.2) in het afwaarts deel van het volledig hydrodynamisch (Full), het niet-gekalibreerde conceptueel (Conc.) en het gekalibreerd conceptueel (Kalibratie Conc.) model van het zuiveringsgebied van Aartselaar bij een event met terugkeerperiode van 0.5 jaar



Figuur 4-17: Overstortdebiet van een bakelement (ID: 46_AQU004.1) in het afwaarts deel van het volledig hydrodynamisch (Full), het niet-gekalibreerde conceptueel (Conc.) en het gekalibreerd conceptueel (Kalibratie Conc.) model van het zuiveringsgebied van Aartselaar bij een event met terugkeerperiode van 0.5 jaar

In Tabel 4-5 worden de kalibratievariabelen voor het volledig hydrodynamisch model (Full) vergeleken met het gekalibreerde conceptueel model (Conc.) voor een event met een terugkeerperiode van 0.5 jaar (f02). De tabellen voor events met terugkeerperioden van 2 (T02) en 5 (T05) jaar staan in Bijlage D.2.

Tabel 4-5: Overzicht van waterstanden, debieten en volumes van bakelementen in het zuiveringsgebied Aartselaar voor een event met een terugkeerperiode van 0.5 jaar (f02)

Berging (bak)					Doorvoer					Overstort					
ID	Min [m TAW]		Max [m TAW]		ID	Volume [m³]		Max [m³/s]		Drempel-peil [mTAW]	ID	Volume [m³]		Max [m³/s]	
	Full	Conc.	Hydr.	Conc.		Full	Conc.	Full	Conc.			Full	Conc.	Full	Conc.
46_SCL6001	1.82	1.82	2.75	2.68	46_SCL6001.1	401	327	0.02	0.02	4.00	46_SCL6003.2	0	0	0.00	0.00
46_SCL211!	2.71	2.71	2.78	2.79	46_SCL211!.2	1573	1633	0.49	0.52	4.18	46_SCL211!.1	0	0	0.00	0.00
										7.15	46_SCL6!.1	111	0	0.04	0.00
										8.64	46_SCL234!.1	-12	0	0.00	0.00
										9.89	46_SCL239!.1	169	0	0.06	0.00
46_SCL7006	1.41	1.41	4.24	3.10	46_SCL7006.1	173	1193	0.24	0.36	3.72	46_SCL7007.1	444	0	0.36	0.00
										3.74	46_SCL7005.1	433	0	0.40	0.00
46_SCL420	2.81	2.81	3.31	3.31	46_SCL420.1	64	57	0.02	0.02	4.23	46_SCL420.3	0	0	0.00	0.00
46_SCL749	8.88	8.89	11.53	11.59	46_SCL749.1	643	662	0.02	0.02	11.53	46_SCL5006.1	14	36	0.03	0.10
46_SCL21	4.56	4.53	4.93	4.84	46_SCL21.4	817	1443	0.09	0.28	4.77	46_SCL21.1	758	178	0.30	0.16
46_SCL7020	-1.95	-1.94	2.77	3.09	46_SCL7020.1	5194	6609	0.09	0.09	6.85	46_SCL88!.2	0	0	0.00	0.00
										4.85	46_SCL7053a.1	0	0	0.00	0.00
					46_SCL7020.2	4282	5468	0.07	0.07	2.28	46_SCL7021a.1	5143	5251	1.43	3.61
											46_SCL7021a.2	3343	3413	0.93	2.35
46_SCL757	12.76	12.76	13.53	13.61	46_SCL757.1	1603	1597	0.35	0.36						
46_SCL1297	10.34	10.34	10.83	10.83	46_SCL1297.2	83	38	0.03	0.03	12.04	46_SCL1297.1	0	0	0.00	0.00
46_HEM21244	3.43	3.43	6.19	6.18	46_HEM21244.1	412	378	0.03	0.03	6.03	46_HEM21245.2	666	407	0.40	0.33
										17.45	46_HEM36194.2	-2	0	0.00	0.00

Berging (bak)					Doorvoer					Overstort					
ID	Min [m TAW]		Max [m TAW]		ID	Volume [m³]		Max [m³/s]		Drempel-peil [mTAW]	ID	Volume [m³]		Max [m³/s]	
	Full	Conc.	Hydr.	Conc.		Full	Conc.	Full	Conc.			Full	Conc.	Full	Conc.
46_HEM36639	15.25	15.24	15.78	15.73	46_HEM36639.1	1237	1730	0.18	0.38	15.63	46_HEM36639.2	547	301	0.32	0.19
										20.11	46_HEM36096.1	-3	0	0.00	0.00
46_HEM21443	3.29	2.11	5.54	5.55	46_HEM21443.2	13258	16109	0.66	1.21	5.37	46_HEM21443.1	943	631	0.75	0.79
46_HEM21438	3.43	3.43	5.35	5.35	46_HEM21438.2	721	601	0.23	0.21	4.10	46_HEM21438.4	442	488	0.22	0.22
										5.24	46_HEM21439.3	113	153	0.16	0.16
46_HEM36047	14.11	14.11	14.67	14.45	46_HEM36047.1	1125	1252	0.26	0.31	15.15	46_hem3002-o1.1	0	0	0.00	0.00
46_HEM21298	1.35	1.35	5.09	5.52	46_HEM21298.4	20655	23460	0.40	0.43	5.14	BV063.1	720	899	0.08	0.07
										5.25	46_HEM21295.3	2381	2782	1.64	2.58
46_D21308	5.36	5.36	6.42	6.42	46_D21308.1	878	975	0.08	0.10	9.37	46_AA900.1	0	0	0.00	0.00
										9.84	46_AA513.1	8	0	0.01	0.00
										6.35	46_D21308.2	140	134	0.29	0.31
46_AA385	14.90	14.90	15.68	15.68	46_AA385.1	40	60	0.03	0.03	n.v.t.					
46_AA298	7.50	7.50	9.18	9.25	46_AA298.1	108	124	0.02	0.02	9.41	46_AA291.2	250	0	0.09	0.00
					46_AA298.2	179	184	0.02	0.02	9.07	46_AA298.3	166	436	0.11	0.23
										12.49	46_AA5104.2	-53	0	0.00	0.00
46_21463	5.78	5.78	8.02	8.27	46_21463.1	6213	6605	0.26	0.34	10.15	46_AA805.2	120	0	0.24	0.00
										7.63	46_D21643c.2	7590	7617	2.32	4.61
										8.69	46_21475.2	135	0	0.17	0.00
										6.49	46_21463.5	14648	16396	3.05	5.22

Berging (bak)					Doorvoer					Overstort					
ID	Min [m TAW]		Max [m TAW]		ID	Volume [m³]		Max [m³/s]		Drempel- peil [mTAW]	ID	Volume [m³]		Max [m³/s]	
	Full	Conc.	Hydr.	Conc.		Full	Conc.	Full	Conc.			Full	Conc.	Full	Conc.
46_2673	10.55	10.55	11.57	11.94	46_2673.1	3559	3818	0.64	1.04	11.90	46_706.2	0	10	0.00	0.03
										14.67	46_789.1	0	0	0.00	0.00
										13.52	46_910.3	0	0	0.00	0.00
										13.94	46_806.1	19	0	0.01	0.00
46_P26	8.37	8.37	11.16	11.02	46_P26.1	4756	5262	0.73	1.33	11.30	46_P26.2	0	0	0.00	0.00
46_P18	7.80	7.80	10.85	10.76	46_P18.1	6535	6815	0.91	1.79	10.81	46_P18.2	37	0	0.06	0.00
46_1023'	13.60	13.59	14.25	14.30	46_1023'.1	2750	2745	0.28	0.34	14.07	46_1023.1	-110	-184	0.00	0.00
46_D05	12.33	12.33	12.92	12.87	46_D05.2	178	187	0.02	0.02	12.30	46_D05.1	0	0	0.00	0.00
46_PS1/O1	5.66	5.70	9.86	10.07	46_PS1/O1.2	8103	8152	0.14	0.14	12.74	46_505.3	66	-87	0.05	0.00
										10.35	46_O2.2	0	0	0.00	0.00
										10.64	46_584.1	-45	-18	0.00	0.00
										8.80	46_PS1/O1.1	17890	19582	3.26	7.35
46_4403	8.46	8.38	9.57	9.73	46_4403.1	23672	23925	2.37	5.73	9.36	46_4403.2	2532	2542	1.05	1.70
46_8093	12.02	12.02	12.52	12.47	46_8093.2	520	572	0.13	0.13	12.87	46_8103.1	0	0	0.00	0.00
46_AQU002	7.48	7.46	8.72	8.69	46_AQU002.2	25679	26125	2.44	5.81	8.97	46_AQU002.1	0	0	0.00	0.00
46_19705	9.81	9.82	10.41	10.47	46_19705.2	1996	2065	0.45	0.51	10.08	46_19705.1	446	527	0.28	0.28
46_AQU004	6.38	6.37	8.09	8.12	46_AQU004.2	33462	33638	3.02	5.53	7.98	46_AQU004.1	417	434	0.48	0.63
46_21350	7.55	7.55	8.98	9.06	46_21350.2	2068	2117	0.23	0.24	8.86	46_21350.1	670	709	0.32	0.74
										13.09	46_21322.1	0	0	0.00	0.00

4.2.2 Conceptuele modellering rivierstelsel

Het volledig hydrodynamisch gemodelleerd waterloopstelsel is omgevormd tot een 'Flood Routing' model. Een 'Flood Routing' model bepaalt de verandering van de vorm van een afvoerhydrogram als gevolg van de geleiding door het waterloopstelsel met behulp van methoden als Muskingum, 'Transfer Routing' of Muskingum-Cunge. Deze methoden zijn niet beschikbaar in InfoWorks ICM, maar wel in InfoWorks RS. Onderstaand worden de methoden beknopt toegelicht op basis van de documentatie bij versie 13.5 van het softwarepakket verdeeld door Innovyze.

In de Muskingum methode wordt uitgegaan van respectievelijk de continuïteitsvergelijking en de bergingsrelatie:

$$I - O = \frac{dS}{dt}$$

$$S = k * [x * I - (1 - x) * O]$$

met:

I: het instromend debiet van de waterlooptak [m³/s];

O: het uitstromend debiet van de waterlooptak [m³/s];

S: de berging in de waterlooptak [m³];

t: de tijd [s];

x: een wegingsfactor [-];

k: een bergingsconstante [s].

Door de combinatie van de bovenstaande vergelijkingen is het mogelijk om een expliciete vergelijking uit te werken voor de berekening van de uitstroom van de waterlooptak in een volgende tijdstap:

$$O_2 = C_0 * I_2 + C_1 * I_1 + C_2 * O_1$$

De coëfficiënten C_0 , C_1 en C_2 zijn de volgende:

$$C_0 = -\frac{k * x - 0.5 * \Delta t}{k * (1 - x) + 0.5 * \Delta t}$$

$$C_1 = \frac{k * x + 0.5 * \Delta t}{k * (1 - x) + 0.5 * \Delta t}$$

$$C_2 = \frac{k * (1 - x) - 0.5 * \Delta t}{k * (1 - x) + 0.5 * \Delta t}$$

De subscripts 1 en 2 bij de termen O en I komen overeen met de tijdstappen t_1 en t_2 . De te kalibreren parameters bij de Muskingum methode zijn de wegingsfactor x en de bergingsconstante k.

De 'Transfer Routing' methode is gelijkaardig aan de Muskingum methode, maar maakt gebruik van transferfuncties met andere parameters. De volgende formule wordt toegepast:

$$O(t) = a_0 * I(t - \delta) + a_1 * I(t - dt - \delta) + \dots + a_p * I(t - p * dt - \delta) + b_1 * O(t - dt) + b_2 * O(t - 2dt) + \dots + b_q * O(t - q * dt)$$

met:

O(t): het stroomafwaartse debiet op tijdstip t [m³/s];

I(t): het stroomopwaartse debiet op tijdstip t [m³/s];

dt: de tijdstap [s];

a_i, b_i: coëfficiënten [-];

δ: een tijdcoëfficiënt [s]

De parameters van een transferfunctie zijn bijgevolg de tijdstap dt, de coëfficiënten a en b en de deltacoëfficiënt. De tijdstap dient voor elke functie bepaald te worden en is niet noodzakelijk gelijk aan de rekentijdstap. Het aantal coëfficiënten a en b is vrij te bepalen.

De Muskingum-Cunge methode is nauwkeuriger dan de Muskingum methode. Voor het toepassen van de methode dienen relaties gespecificeerd te worden tussen de golfsnelheid en de dempingsparameters enerzijds en het debiet anderzijds. Deze relaties kunnen echter ook aangemaakt worden op basis van een te specificeren dwarsprofiel voor de stroomopwaartse zijde van de waterlooptak. De formule gebruikt in de methode is een convectieve diffusie vergelijking afgeleid van de Saint-Venant vergelijkingen.

In conservatieve vorm is de vergelijking:

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_0^Q \frac{dQ}{c} + \frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{\mu}{c^2} \frac{\partial Q}{\partial x} \right) + q = 0$$

met:

Q: het debiet [m³/s];

c of c(Q): de golfsnelheid [m/s];

μ of μ(Q): de demping [m²/s];

x: de afstand langs de waterloop [m];

t: de tijd [s];

q: de laterale instroming per eenheid van lengte [m²/s].

Elke methode berekent het debiet aan de afwaartse zijde van de waterlooptak. Op basis van een QH relatie is het echter mogelijk om de debieten om te zetten in waterpeilen.

Het conceptuele waterloopmodel is rechtstreeks in InfoWorks RS opgebouwd. Het stelsel is conceptueel opgedeeld in verschillende waterlooptakken ('Reaches') die onderling met elkaar verbonden zijn. Elke tak wordt voorgesteld door 'Flood Routing' elementen. Bij de opdeling is onder andere rekening gehouden met de monding van zijwaterlopen, de lozingspunten van overstorten van het rioolstelsel, de locaties waar de waterloop overstroomt, de aanwezigheid van belangrijke kunstwerken, ... Op deze wijze worden de interacties binnen het waterlopenstelsel, tussen het riool- en het waterloopstelsel en tussen de waterlopen en de overstromende oevers in rekening gebracht in het conceptuele model. De belangrijke kunstwerken en de eventuele kunstwerkregelingen zijn opgenomen in het conceptuele model.

Aan de hand van testberekeningen en in overleg met de opdrachtgever is er gekozen om de Muskingum-methode toe te passen. De opbouw is stapsgewijs uitgevoerd van stroomop- naar stroomafwaarts.

In het aangeleverde volledig hydrodynamische riool-riviermodel wordt het rivierstelsel belast met neerslag-afvoer gesimuleerd met het hydrologische PDM model. Gelijkaardig aan het conceptueel rioolstelsel zijn de neerslag-afvoer modellen van het waterloopstelsel ondergebracht in het iFramework (zie §4.3) met het oog op de scenario's. De neerslag-afvoer tijdreeksen gesimuleerd met de PDM-cellen van iFramework zijn als debiettijdreeksen opgelegd aan het conceptuele riviermodel in InfoWorks RS.

Het gekoppelde conceptuele waterloopmodel is afgeijkt aan het volledig hydrodynamisch gemodelleerde waterloopmodel zoals beschreven in het lastenboek. Voor de kalibratie van het conceptueel riviermodel is gebruik gemaakt van de events in Tabel 4-6.

Tabel 4-6: Overzicht van de events voor de kalibratie van het rioolstelsel

T [jaar]	Start [dd/mm/jjjj hh:mm]	Einde [dd/mm/jjjj hh:mm]
≈1	07/10/1998 12:00	09/10/1998 12:00
≈25	12/11/2010 00:00	18/11/2010 00:00
50	27/08/1996 12:00	01/09/1996 12:00
100	12/08/1998 12:00	16/09/1998 12:00

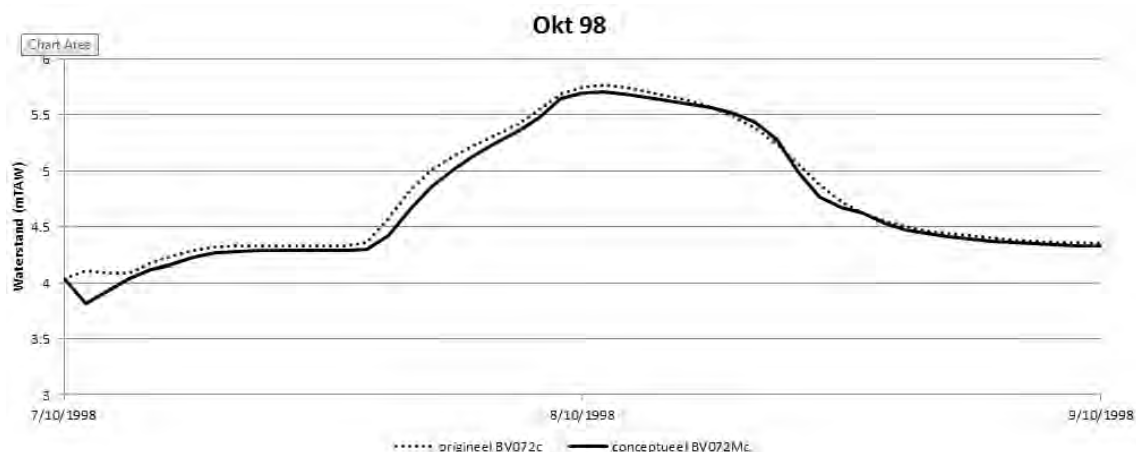
In wat volgt wordt een overzicht gegeven van de conceptuele schematisatie van het rivierstelsel in Flood Routing elementen en van de belangrijkste kenmerken per element.

Tabel 4-7 geeft een overzicht van de belangrijkste parameters van de Muskingum elementen in het conceptueel riviermodel.

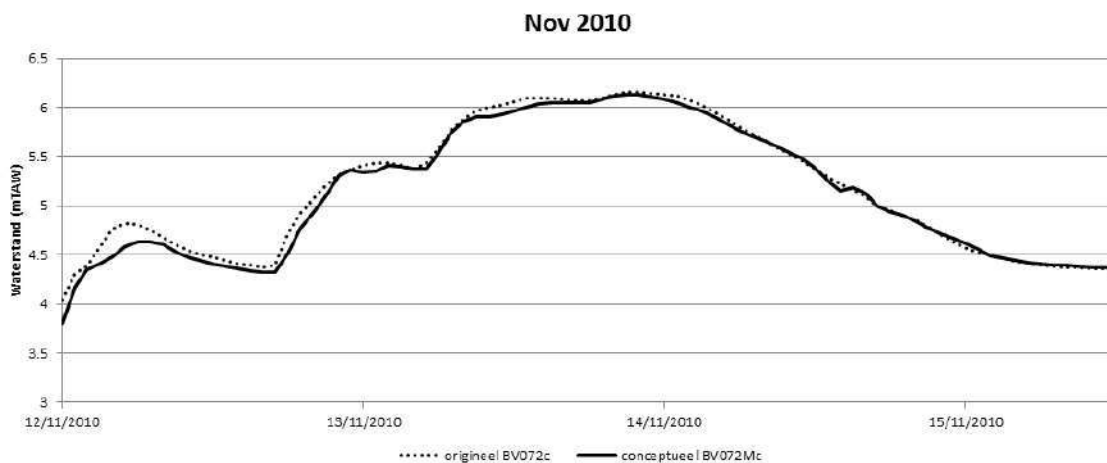
Tabel 4-7: Overzicht van de belangrijkste kenmerken van de Muskingum elementen in het conceptueel riviermodel

Muskingum node	Bed level [mTAW]	Muskingum K	Muskingum X	Lengte waterloop [m]
Benedenvliet				
BV062M	3.01	1800	0.15	-
BV072Mc	3.38	1000	0.10	417
BV080cM	3.41	1000	0.10	412
BV097M	3.49	1200	0.15	652
BV123cM	4.48	2000	0.15	1245
BV134cM	4.90	1800	0.15	674
Mandoersebeek				
MAN112Mc	6.52	2000	0.15	1087
MAN100cM	7.51	2500	0.15	995
MAN091M	8.55	7000	0.15	579
MAN059M	11.67	8500	0.15	3147
MAN040M	14.62	1900	0.15	1202
MAN024M	17.42	3000	0.15	1240
Edegemsebeek				
EDB031M	9.51	3600	0.15	1925
EDB020M	10.32	2400	0.15	641
EDB011M	11.57	2500	0.20	938
Kleine Struisbeek				
KSTk100-01M	7.28	1500	0.10	506
KST020M	7.62	2400	0.15	864
KST007cM	8.37	1600	0.10	958

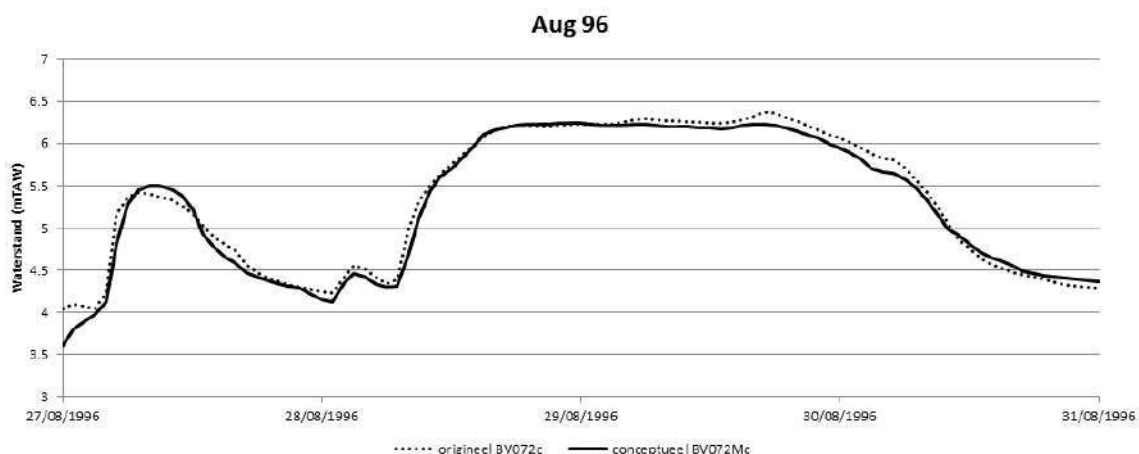
Figuur 4-18 tot en met Figuur 4-21 tonen het waterstandsverloop op de Benedenvliet ter hoogte van de Cleydaellaan in Aartselaar (BV072) voor de verschillende kalibratie events. In het algemeen wordt er een goede overeenkomst bekomen met het originele model. Bij grote events is er regelmatig een onderschatting van de dalende flank van het waterstandsverloop (Figuur 4-21). Deze onderschatting is hoofdzakelijk te wijten aan het feit dat de effecten van opstuwung niet kunnen gemodelleerd worden met behulp van de Muskingum methode.



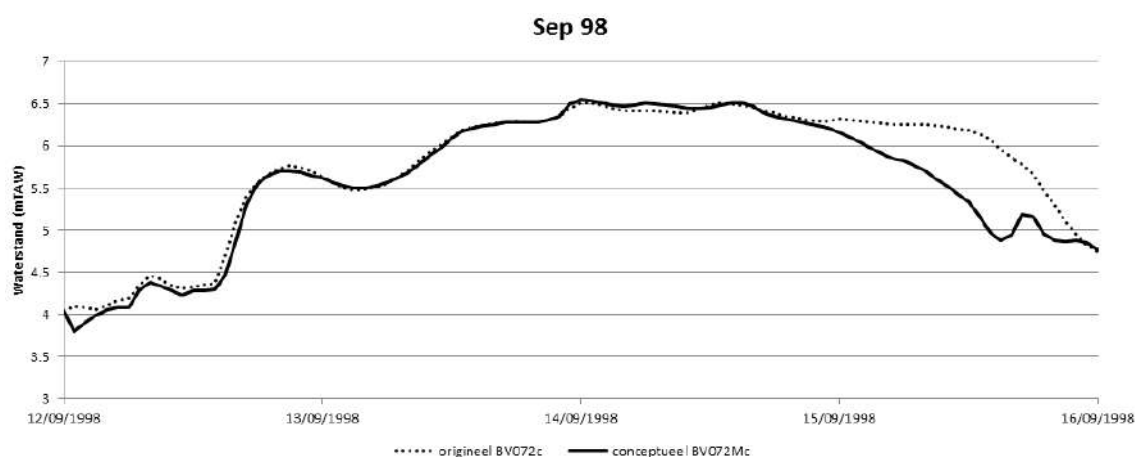
Figuur 4-18: Overzicht van de waterpeilen in de Benedenvliet ter hoogte van de Cleydaellaan te Aartselaar in het volledig hydrodynamisch en het conceptueel waterloopmodel voor een periode in oktober 1998 met een terugkeerperiode van 1 jaar



Figuur 4-19: Overzicht van de waterpeilen in de Benedenvliet ter hoogte van de Cleydaellaan te Aartselaar in het volledig hydrodynamisch en het conceptueel waterloopmodel voor een periode in november 2010 met een terugkeerperiode van 25 jaar



Figuur 4-20: Overzicht van de waterpeilen in de Benedenvliet ter hoogte van de Cleydaellaan te Aartselaar in het volledig hydrodynamisch en het conceptueel waterloopmodel voor een periode in augustus 1996 met een terugkeerperiode van 50 jaar



Figuur 4-21: Overzicht van de waterpeilen in de Benedenvliet ter hoogte van de Cleydaellaan te Aartselaar in het volledig hydrodynamisch en het conceptueel waterloopmodel voor een periode in september 1998 met een terugkeerperiode van 100 jaar

4.2.3 Conceptuele modellering riool-rivierstelsel

Op basis van Hoofdstuk 4.2.1 is een conceptueel model van het rioolstelsel beschikbaar in InfoWorks ICM. Gebruik makend van de exportmogelijkheden naar het csv bestandformaat in InfoWorks ICM is het conceptuele modelnetwerk geconverteerd naar een netwerk in InfoWorks RS. Bepaalde modelementen en de regelingen van kunstwerken dienen handmatig geconverteerd te worden. Ook de schematisatie voor het modelleren van de overstroming van het maaiveld (Storage Areas) is op gelijkaardige wijze geconverteerd van InfoWorks ICM naar InfoWorks RS.

Er is gebleken dat InfoWorks RS bijzonder gevoelig is voor de vele interacties binnen het conceptuele rioolmodel. Hiervoor is door Innovyze op vraag van IMDC een aanpassing aan de modelvalidatie routine ingebracht in de versie 16.0.1 van de software. Aangezien ook na deze aanpassing de gevoeligheid voor een groot aantal interacties blijft, is de nadruk gelegd op het in model brengen van de belangrijkste interacties. Het conceptuele rioolmodel is gevalideerd in InfoWorks RS aan de hand van simulaties met vrije uitstroming naar de waterlopen.

Het conceptuele rioolmodel is gekoppeld met het conceptuele riviermodel. Ook bij deze koppeling is de bijzondere gevoeligheid van InfoWorks RS voor het groot aantal interacties binnen het geïntegreerde model gebleken. Aangezien het verder terugbrengen van het aantal interacties zou leiden tot een te ruwe schematisatie van het riool-rivierstelsel is in overleg met de opdrachtgever besloten om de modellering verder te zetten aan de hand van het conceptuele rioolmodel geïntegreerd met het hydrodynamische riviermodel in InfoWorks ICM (zie Hoofdstuk 4.2.1).

4.3 CONCEPTUELE MODELLERING HYDROLOGIE

Zoals aangegeven bij de conceptuele modellering van de hydrodynamica (zie hoofdstuk 4.2) is het conceptuele riool-riviermodel van de Benedenvliet met het oog op de scenario's belast met neerslag-afvoer debieten bepaald met het iFramework. In wat volgt wordt het iFramework eerst algemeen toegelicht (zie Hoofdstuk 4.3.1). Vervolgens wordt ingegaan op de implementatie van de modellering van de hydrologie (zie Hoofdstuk 4.3.2) en van de bronmaatregelen (zie Hoofdstuk 4.3.3) in het iFramework. Tot slot wordt de hydrologische modellering van de impact van autonome ontwikkeling beschreven (zie Hoofdstuk 4.3.4).

4.3.1 iFramework

Voor de conceptuele modellering van de hydrologie van zowel landelijke als verstedelijkte gebieden wordt gebruik gemaakt van iFramework.

iFramework werd ontwikkeld door IMDC (i.s.m. onder andere KU Leuven) in het kader van het project voor Next Generation hydrologische modellen, in opdracht van VMM AOW. Voor een uitgebreide toelichting omtrent dit modeleringsplatform wordt verwezen naar de desbetreffende rapportering (IMDC *et al.*, 2014).

De flexibele modelomgeving van iFramework laat een geïntegreerde benadering hydrologische processen toe en biedt de mogelijkheid om bijkomende processen, zoals bronmaatregelen en autonome ontwikkeling, te integreren.

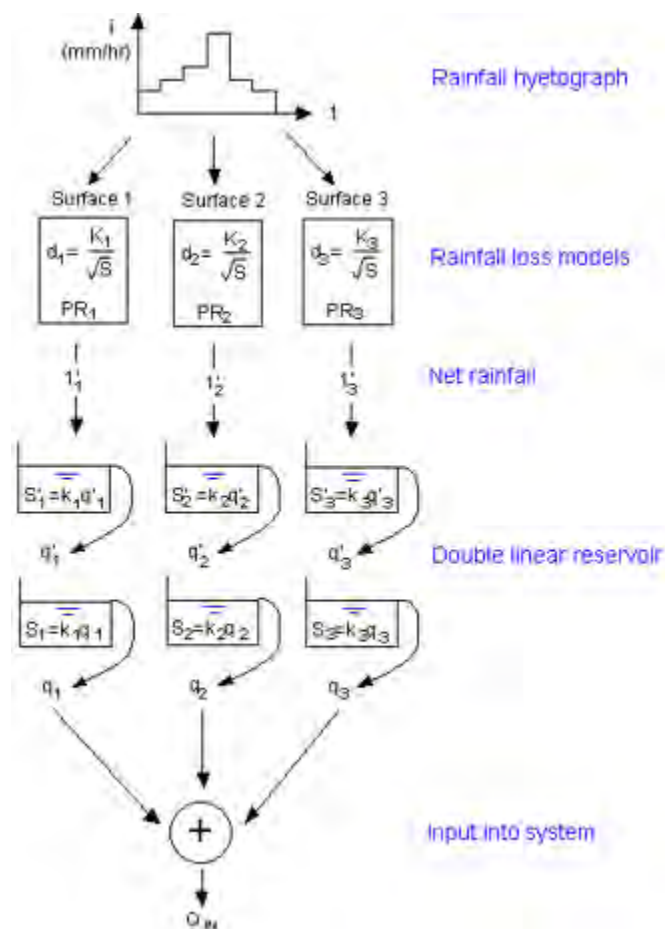
4.3.2 Hydrologische modellering

Het aangeleverde integrale hydrodynamische riool-riviermodel van de Benedenvliet wordt belast met neerslag-afvoer debieten gesimuleerd met conceptuele hydrologisch modellen. Voor de input voor het rioolgedeelte van het aangeleverde model wordt gebruik gemaakt van het Wallingford model in InfoWorks ICM (zie hoofdstuk 4.3.2.1). Voor de input van het riviergedeelte van het aangeleverde model wordt gebruik gemaakt van het InfoWorks PDM model (zie hoofdstuk 0).

In wat volgt wordt een beschrijving gegeven van het aanmaken van de tijdreeksen van neerslagafvoer van het riool- en waterloopgedeelte als opwaartse randvoorwaarden van het geïntegreerde riool-waterloopmodel in InfoWorks ICM.

4.3.2.1 Rioolgedeelte

In het integrale hydrodynamische riool-riviermodel van de Benedenvliet wordt de neerslag-afvoer berekend door middel van het Wallingford model. Het model wordt weergegeven in Figuur 4-22. Het bestaat uit een neerslag verlies module en een neerslag routing module. Voor de conceptuele modellering van de hydrologie is het Wallingford model geïmplementeerd in de Urban module van het iFramework.



Figuur 4-22: Overzicht van het conceptueel Wallingford model dat de input voor het rioolgedeelte van het conceptueel rioolmodel levert (bron: ICM handleiding)

In het aangeleverde InfoWorks ICM model zijn er 4044 subcatchments die elk een input leveren aan het rioolstelsel. Deze bevatten 50 verschillende parametersets. Deze 50 sets zijn doorgerekend met het conceptueel hydrologisch model in het iFramework met elk een oppervlakte van 1 ha. Vervolgens zijn de resultaten herschaald om als input te dienen voor het conceptueel rioolstelsel in InfoWorks ICM. Op basis van tijdreeksen van neerslag en verdamping zijn op deze wijze tijdreeksen van neerslag-afvoer gesimuleerd in de huidige toestand en na autonome ontwikkeling in 2050.

4.3.2.2 Riviergedeelte

Voor de neerslag-afvoer van het rivierstelsel wordt gebruik gemaakt van het InfoWorks PDM model. Dit was reeds geïmplementeerd in het iFramework. De PDM Subcatchments van het aangeleverde InfoWorks ICM model zijn gebruikt om de neerslag-afvoer van het rivierstelsel te bepalen. Aan deze Subcatchments was de verharde oppervlakte, die afwatert naar het rioolstelsel, in het aangeleverde model reeds onttrokken. Op basis van tijdreeksen van neerslag en verdamping zijn tijdreeksen van neerslag-afvoer gesimuleerd in de huidige toestand en na autonome ontwikkeling in 2050. Deze worden opgelegd aan het hydrodynamisch model van het rivierstelsel in InfoWorks ICM.

4.3.3 Bronmaatregelen

De bronmaatregelen die in de huidige studie in rekening gebracht worden omvatten het opvangen en hergebruiken, het infiltreren en het bufferen van hemelwater. Op privaat domein omvatten de bronmaatregelen hemelwateropvang met hergebruik en overloop in hetzij een infiltratiebekken, hetzij een bufferbekken, hetzij een combinatie van beide. Op publiek domein worden met uitzondering van hemelwateropvang met hergebruik dezelfde bronmaatregelen voorzien.

De bronmaatregelen zijn als conceptuele modules geïmplementeerd in iFramework. Onderstaand wordt hiervan per module een overzicht gegeven. Deze modules worden toegepast op de output van de modellering van de neerslagafvoer (zie Hoofdstuk 4.3.2) en dienen als uiteindelijke input van het geïntegreerde conceptuele riool en hydrodynamisch riviermodel.

4.3.3.1 Hemelwatermodule

De hemelwatermodule houdt rekening met de tijdelijke berging van hemelwater en het hergebruik ervan.

De hemelwatermodule zelf bestaat uit een eenvoudig reservoir met een overloop en een debietonttrekking. De werking van het reservoir ligt voor de hand:

- de neerslagafvoer wordt naar het reservoir geleid, en vult dit;
- het reservoir heeft een bepaald volume (afhankelijk van de aangesloten verharde oppervlakte) en loopt over zodra het maximum volume bereikt wordt, waarna de neerslagafvoer rechtstreeks wordt afgevoerd naar de infiltratie- of buffervoorziening (zie Hoofdstuk 4.3.3.2 en 4.3.3.3);
- zolang er water in het reservoir staat wordt op continue wijze in de tijd een variabel debiet afgenomen. De debietfunctie hangt af van verschillende parameters. De voornaamste parameters is de aard van de gebruiker:
 - o huishoudelijk gebruik: wc/wasmachine (heel het jaar door), tuin (zomer). Hiervoor worden de kengetallen van de VMM gebruik worden (CIW, 2014);
 - o industrieel gebruik.

Voor de berekening van het hergebruik voor privé-huishoudens is er uitgegaan van een gebruik van 30 l/dag/pp (toilet) (CIW, 2014). Er is uitgegaan van een gemiddelde gezinsgrootte van 2.36 mensen (FOD Economie, 2011). Op basis van een GIS analyse van de grondoppervlakte van woningen in de kadastrale percelenplannen voor het stroomgebied van de Benedenvliet is er uitgegaan van een mediane dakoppervlakte van 80 m² per gezin. Hierdoor is een gemiddeld hergebruik van 0.885 mm/dag in rekening gebracht ($=30 \cdot 2.36 / 80$). In het geval van appartementsgebouwen wordt er verondersteld dat enkel de appartementen op de benedenverdiepen gebruik maken van de hemelwaterput.

Voor het volume van het reservoir is er gebruik gemaakt van 5000 l/huis (CIW, 2014). Met een mediane dakoppervlakte van 80 m² bekomt men een volume van 62.5 mm per m² aangesloten oppervlakte.

Voor industriële gebouwen is het hergebruik minder eenduidig in te schatten. Aan de hand van GIS gegevens van de grondoppervlakte van industriële gebouwen in de kadastrale percelenplannen voor het stroomgebied van de Benedenvliet is er uitgegaan van een mediane dakoppervlakte van 550 m². Op basis van de Hemelwaterverordening (CIW, 2014) moet er een reservoir voorzien worden van 10 000 l. Er wordt verondersteld dat er enkel toiletten aangesloten zijn op het reservoir (30 l/dag/persoon). Uit een analyse van gegevens van de Rijksdienst voor Sociale Zekerheid (RSZ) wordt de gemiddelde bedrijfsgrootte geschat op 33.3 mensen. Hierdoor is een gemiddeld hergebruik van 1.816 mm/dag in rekening gebracht ($=30 \cdot 33.3 / 550$).

4.3.3.2 Infiltratiemodule

Voor de dimensionering van de infiltratiemodule wordt er uitgegaan van de gewestelijke stedenbouwkundige verordening hemelwater (CIW, 2014). Deze stelt dat het volume van een infiltratiebekken minimaal 25 mm/m² afstromende oppervlakte bedraagt. Wanneer er echter gebruik gemaakt wordt van een hemelwaterput mag de afvoerende oppervlakte verminderd worden met 60 m². Analooq aan de hemelwatermodule wordt er gebruik gemaakt van een mediane dakoppervlakte van 80 m² per gezin (zie Hoofdstuk 4.3.3.1). Hierdoor vermindert het volume van het infiltratiebekken van de opgestelde 25 mm/m² naar 6.25 mm/m² ($25 \text{ mm/m}^2 \cdot (80 - 60 \text{ m}^2) / 80 \text{ m}^2$). Omdat de infiltratie module uitgaat van 1m² infiltratieoppervlakte moet er een correctie gebeuren bij het toepassen van deze module. Deze wordt analooq aan het volume van het infiltratiebekken aangepast van de vooropgestelde 0.04 m²/m² naar 0.01 m²/m² ($0.04 \text{ m}^2/\text{m}^2 \cdot (80 - 60 \text{ m}^2) / 80 \text{ m}^2$).

Voor industriële gebouwen wordt er uitgegaan van een mediane dakoppervlakte van 550 m² (zie Hoofdstuk 4.3.3.1). Door het gebruik van een hemelwaterput mag deze met 60 m² in vermindering gebracht worden. Hierdoor daalt het buffervolume naar 22.3 mm/m² ($25 \text{ mm/m}^2 \cdot (550 - 60 \text{ m}^2) / 550 \text{ m}^2$) en de infiltratieoppervlakte naar 0.036 m²/m² ($0.04 \text{ m}^2/\text{m}^2 \cdot 490 \text{ m}^2 / 550 \text{ m}^2$).

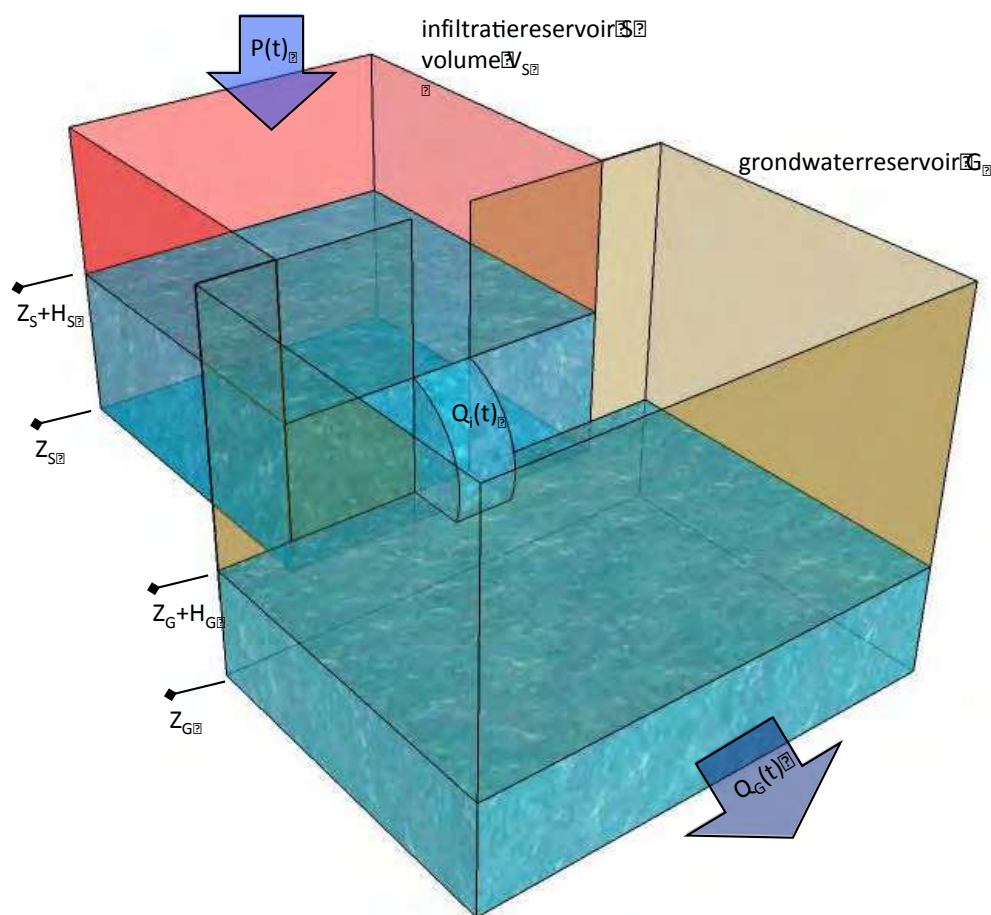
Voor de berekening van de invloed van industriële gebouwen op infiltratie wordt er rekening gehouden met het percentage aan industriële gebouwen in het stroomgebied dat bepaald is op basis van een GIS analyse. Hieruit blijkt dat het gemiddeld percentage aan industriële gebouwen in het stroomgebied ongeveer 3.57 % bedraagt in 2010 en 3.64 % in 2050.

Voor de implementatie van het infiltratieproces in iFramework is zowel een conceptuele als een meer fysisch gebaseerde benadering mogelijk. Onderstaand worden beide benadering beschreven en wordt aangegeven welke benadering gevolgd wordt in de huidige studie.

4.3.3.2.1 Conceptuele benadering

Het concept weergegeven in Figuur 4-23 bestaat uit twee gekoppelde reservoirs: één voor het infiltratiebekken S en één voor het ontvangende grondlichaam G. Het principe van de verschillende fluxen binnen deze module is als volgt:

- het grondlichaam heeft een initieel vochtgehalte dat gerelateerd wordt aan het vochtgehalte uit het hydrologisch model. Dit wordt vertegenwoordigd door het niveau $Z_G + H_G$.
- neerslag-afvoer stroomt in het S reservoir en stroomt onmiddellijk vrij over in het G reservoir (formules stroming door een opening), voor zover $Z_G + H_G \leq Z_S$. Als $Z_G + H_G > Z_S$ wordt de stroming (formules gedeeltelijk verdrongen stroming door een opening). Naarmate het niveau in G (het bodemvochtgehalte) toeneemt zal de infiltratieflux $Q_i(t)$ dus afnemen. Op deze wijze wordt rekening gehouden met de graduele wijziging van de infiltratiecapaciteit tijdens de buiduur.
- wanneer de niveaus in G en S gelijk zijn ($Z_G + H_G = Z_S + H_S$, of de bodem is verzadigd), houdt de infiltratie feitelijk op, sluit het algoritme de opening en vult het S reservoir zich (indien er nog steeds neerslag valt) tot het vol is, waarna het overstort naar het rioolstelsel. Het volume in reservoir G stroomt leeg naar de trage PDM-deelstroom.
- ten allen tijde wordt de volumebalans verzekerd d.m.v. continuïteit.



Figuur 4-23: Weergave van de conceptuele benadering van het infiltratieproces

De parameters van de infiltratiemodule (reservoir-volumes, infiltratie-oppervlaktes, dimensies van de opening, verschil tussen ZG en ZS, relatie tussen ZG+HG en bodemvocht) worden afgeijkt op basis van de resultaten van de infiltratietesten. Als richtwaarden wordt er gebruik gemaakt van de kengetallen uit de Hemelwaterverordening. De buffereis wordt dan 25 mm per m² afstromende oppervlakte (CIW, 2014).

Het grondwaterreservoir G kan gekoppeld worden aan het bodemvocht (SM) reservoir van PDM. Op deze manier wordt er een bijkomende input voor het SM reservoir gecreëerd. Indien de module gebruikt wordt zonder PDM is er geen overloop in het SM reservoir. De lediging van het infiltratie reservoir gebeurt dan volledig vrij. Het infiltrerende water verdwijnt dan uit het model.

Voor de modellering van de uitstroming van de reservoirs kan eventueel ook gewerkt worden met een fractie van het volume van het reservoir.

Een voordeel van deze infiltratiemodule is dat deze onafhankelijk is van de aangesloten oppervlakte. Op basis van de richtlijnen in de Hemelwaterverordening wordt er een volume per verharde oppervlakte gedefinieerd (zie Hoofdstuk 4.3.3.2). Hierdoor is er geen gedetailleerde dimensionering van het infiltratiebekken nodig.

Een nadeel van deze infiltratiemodule is het feit dat deze bij het toepassen van de Hemelwaterverordening met een beperkt infiltratievolume werkt (≤25 mm). Dit volume is veel lager dan de gemiddelde maximale bodemvocht capaciteit (SM_{max}) van de PDM Subcatchments van het model van de Benedenvliet (200 mm). Daardoor wordt nagenoeg steeds een onverzadigde toestand bekomen en loopt de infiltratie nagenoeg steeds 'vrij' ('niet verdrongen') over in het G reservoir.

4.3.3.2.2 Fysisch gebaseerde benaderingen

Onderstaand worden meer fysisch gebaseerde benaderingen van het infiltratieproces beschreven. Het grootste nadeel van meer fysisch gebaseerde benaderingen is dat deze gedetailleerde parameters nodig hebben.

CIRIA model

Het CIRIA model (Bettess, 1996) veronderstelt dat infiltratie enkel langs de wand van het bekken plaatsvindt en dat de bodem verzadigd is. De infiltratie wordt dan gegeven door:

$$Q_{inf} = (B + L) \cdot \frac{h_w}{2} k_s$$

Met B de breedte van het bekken, L de lengte van het bekken, h_w de hoogte van het water in het bekken en k_s de verzadigde conductiviteit.

De overstort van het infiltratiebekken naar het rioolstelsel of het bufferbekken wordt dan gegeven door:

$$Q_w = \mu_w B (h_w - h_0) \sqrt{2g(h_w - h_0)}$$

Met h₀ de hoogte van de overflow en μ_w de constante van de stuw (0.4).

Het nadeel van deze benadering is dat de dimensies van het infiltratiebekken gekend moeten zijn.

Indien er uitgegaan wordt van de minimum infiltratieoppervlakte van 4 m² per 100 m² afstromende oppervlakte bekomt men (indien men uitgaat van een vierkant zijvlak en een totaal volume van 25 mm/m²) een breedte van 1.25 m een lengte van 0.14 m en eveneens een hoogte van 0.14 m.

$$Q_{inf} = (B + L) \cdot \frac{h_w}{2} k_s = (1.25 + 0.14) \frac{h_w}{2} k_s = 0.695 k_s \cdot h_w$$

Horton model

Het Horton model (Horton, 1939) is een empirisch model dat uitgaat van een initiële infiltratiecapaciteit f_0 in droge condities die exponentieel vermindert tot een steady state infiltratiecapaciteit f_∞ .

$$f_c(t) = f_\infty + (f_0 - f_\infty)e^{-kt}$$

Met k de parameter die bepaalt hoe snel de infiltratiecapaciteit daalt in de tijd. In deze vorm is de infiltratiecapaciteit echter enkel afhankelijk van de tijd. Om te voorkomen dat de infiltratiecapaciteit ook sterk zou dalen bij zeer lichte neerslag wordt er gebruik gemaakt van de geïntegreerde vorm van de Horton formule.

$$F(t) = \int_0^{t_p} f_c(t) dt = f_\infty t_p + \frac{(f_0 - f_\infty)}{k} (1 - e^{-kt_p})$$

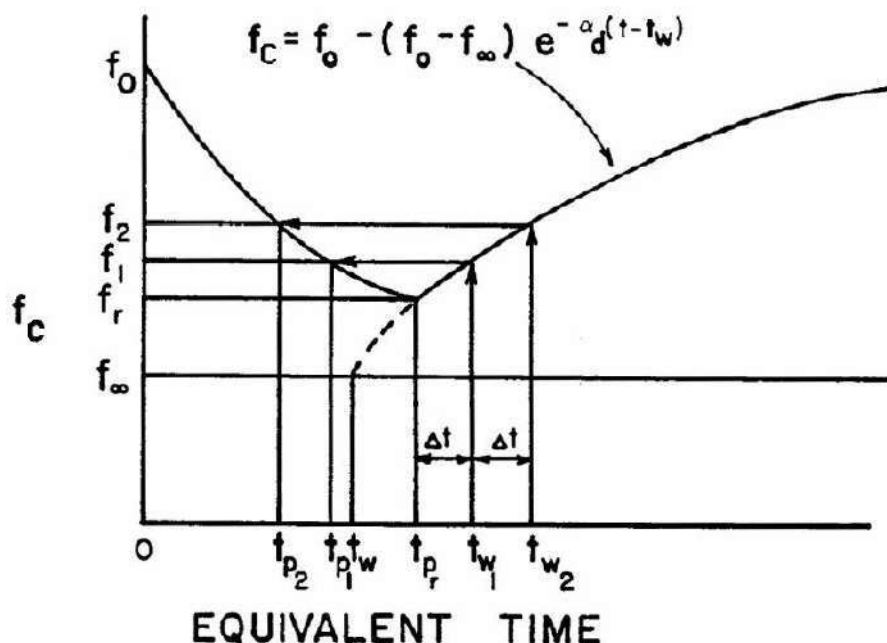
Met F het cumulatieve infiltratievolume op tijdstip t_p . Met behulp van bovenstaande formule kan dit iteratief opgelost worden voor t_p . Hierbij geldt dat $t_p \leq t$ waardoor de infiltratiecapaciteit niet enkel afhankelijk wordt van de tijd maar ook van het geïnfiltreerd volume.

Om dit model te kunnen gebruiken in een continue simulatie, wordt de initiële infiltratiecapaciteit terug verhoogd tijdens droge periodes. Hiervoor wordt er gebruik gemaakt van de aanpak van het SWMM model (SWMM, 1988) die uitgaat van een hypothetische droogcurve.

$$f_c(t) = f_0 - (f_0 - f_\infty)e^{-\alpha_d(t-t_w)}$$

Met α_d de parameter die de stijging van de concave regeneratiecurve bepaalt en t_w het tijdstip waar de regeneratiecurve f_∞ bereikt. In Figuur 4-24 komen f_r en t_{pr} overeen met de infiltratiecapaciteit op de start van de droge periode (t_{pr}). Op basis hiervan kan het verder verloop van de droging (t_{p1} , t_{p2} , ...) per tijdstap Δt bepaald worden.

$$t_{pr1} = -\frac{1}{\alpha_d} \ln[1 - e^{-\alpha_d \Delta t} (1 - e^{-\alpha_d t_{pr}})]$$



Figuur 4-24: Overzicht van de regeneratiecurve van het Horton model
(bron: (Horton, 1939))

Green-Ampt model

Het Green-Ampt model is een fysisch gebaseerd infiltratiemodel dat oorspronkelijk bedoeld was voor infiltratie bij plasvorming (Green en Ampt, 1911). Verdere aanpassingen maakten het model ook toepasbaar voor continue simulaties. De volgende versie van het model wordt gebruikt door het SWMM model (SWMM, 1988):

$$f_c = K_s \left(1 + \frac{|\Psi_f| \Delta \theta_i}{F} \right)$$

Met $\Delta \theta_i$ het initieel bodemvocht deficit en $|\Psi_f|$ de capillaire zuigspanning van het infiltratiefront en K_s de gesatureerde hydraulische conductiviteit. Zolang de neerslagintensiteit lager is dan de infiltratiecapaciteit infiltreert al het water. Om de infiltratie te bepalen bij plasvorming wordt er gebruik gemaakt van het feit dat de infiltratiecapaciteit de afgeleide is van de cumulatieve infiltratie.

$$\frac{dF}{dt} = f_c(t) = K_s \left(1 + \frac{|\Psi_f| \Delta \theta_i}{F} \right)$$

$$K_s(t_2 - t_1) = \frac{F_{t_2} - F_{t_1}}{K_s} + \frac{|\Psi_f| \Delta \theta_i}{K_s} \ln \left(\frac{F_{t_1} + |\Psi_f| \Delta \theta_i}{F_{t_2} + |\Psi_f| \Delta \theta_i} \right)$$

Wat iteratief opgelost kan worden voor F_{t_2} met $t_2 - t_1 = \Delta t$.

Voor de regeneratie van de infiltratiecapaciteit tijdens droge condities wordt er verondersteld dat enkel het bovenste deel van de bodem (L) bepalend is voor de infiltratie capaciteit.

$$L = 4 \cdot \sqrt{\frac{K_s}{25.4}}$$

De regeneratiefactor DF [uur⁻¹] wordt beschreven door $DF = L / 300$. Elke droge tijdstap wordt het initieel bodemvocht deficit verhoogd volgens:

$$\Delta\theta_i = \Delta\theta_i + DF \cdot \Delta\theta_{max} \cdot \Delta t$$

Omgekeerd wordt tijdens neerslag eerst het initieel bodemvocht deficit gereduceerd tot nul alvorens infiltratie naar de diepere grondlagen afgevoerd wordt. Tijdens een regenbui wordt er echter wel steeds uitgegaan van het zelfde initieel bodemvocht deficit.

In overleg met de stuurgroep van de opdracht is besloten om de Green-Ampt module te implementeren in iFramework (IMDC, 2016).

4.3.3.3 Buffervoorziening

De Hemelwaterverordening (CIW, 2014) voorziet de plaatsing van een buffervoorziening wanneer infiltratie niet of slechts gedeeltelijk mogelijk is. De buffervoorziening heeft dezelfde dimensionering als het infiltratiebekken en heeft een maximaal doorvoerdebiet van 20 l/s/ha afvoerende oppervlakte. Dit komt overeen met een doorvoerdebiet van 0.0005 l/s/m² (20 l/s / 10000 m² * (80-60 m²)/80 m²). Er wordt opgemerkt dat dit voor de gemiddelde dak oppervlakte van 80m² neerkomt op een debiet van 0,16 l/s. Dit is moeilijk realiseerbaar. De modellering gaat wat dit betreft uit van een geïdealiseerde situatie.

In het optimalisatie scenario (zie Hoofdstuk 4.4.1.3) zullen er combinaties gemaakt worden van infiltratiebekkens en buffervoorzieningen. Hierbij wordt de buffervoorziening gecombineerd met het infiltratiebekken en wordt er gezorgd dat de som van het volume van het infiltratiebekken en de buffervoorziening overeenstemt met het volume dat vooropgesteld is in de Hemelwater verordening (CIW, 2014).

4.3.4 Autonome ontwikkeling

Als gevolg van autonome ontwikkeling in 2050 treedt klimaat- en landgebruiksverandering op. De impact van autonome ontwikkeling op de afvoer naar het riool- en rivierstelsel is in rekening gebracht zoals onderstaand beschreven.

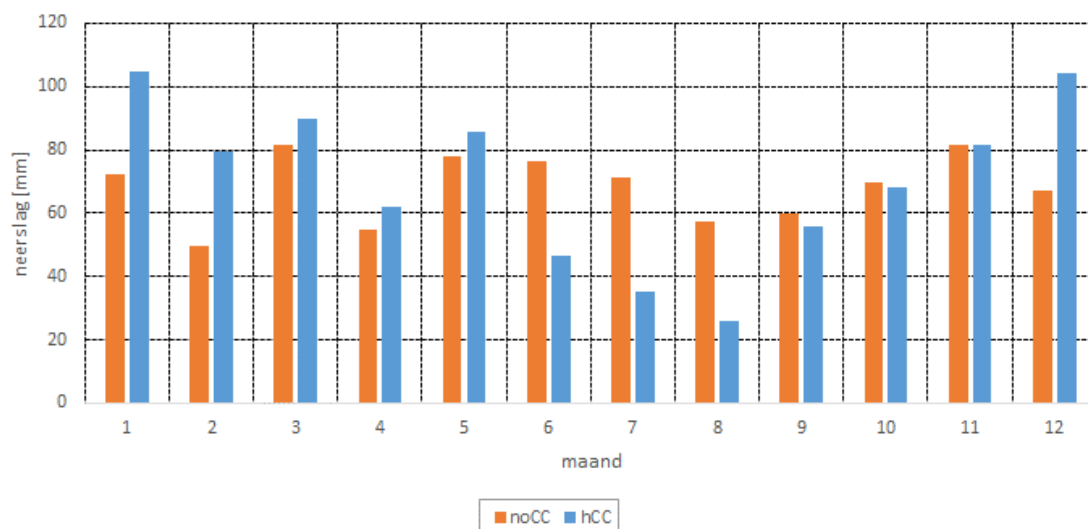
4.3.4.1 Klimaatverandering

Klimaatverandering heeft impact op neerslag en potentiële verdamping enerzijds en op de zeespiegel anderzijds. Neerslag en potentiële verdamping vormen de invoer van de neerslag-afvoer modellen. De zeespiegel heeft een mogelijke impact op de afwaartse randvoorwaarde van het riviermodel. In wat volgt wordt beschreven hoe de impact van klimaatverandering op neerslag, potentiële verdamping en de zeespiegel in rekening gebracht is.

Neerslag-Verdamping

Om de impact van klimaatverandering op de neerslag-afvoer in rekening te brengen is gebruik gemaakt van de geperturbeerde 30-jarige tijdreeksen van neerslag (10 minuten waarden) en verdamping (dagwaarden) van het KMI station te Ukkel aangeleverd door de opdrachtgever. Deze neerslag- en evaporatiereeksen zijn geperturbeerd voor het jaar 2050 op basis van perturbatiefactoren voor het hoog klimaatscenario. De perturbatiefactoren zijn opgesteld door de KU Leuven (Baguis *et al.*, 2009).

Uit de analyse van neerslaggegevens voor 1977-1988 blijkt dat de gemiddelde jaartotalen slecht beperkt toenemen onder invloed van klimaatverandering. Er treedt echter wel een duidelijke verschuiving van de maandgemiddelde neerslagtotalen op van de zomermaanden naar de wintermaanden zoals weergegeven in Figuur 4-25.

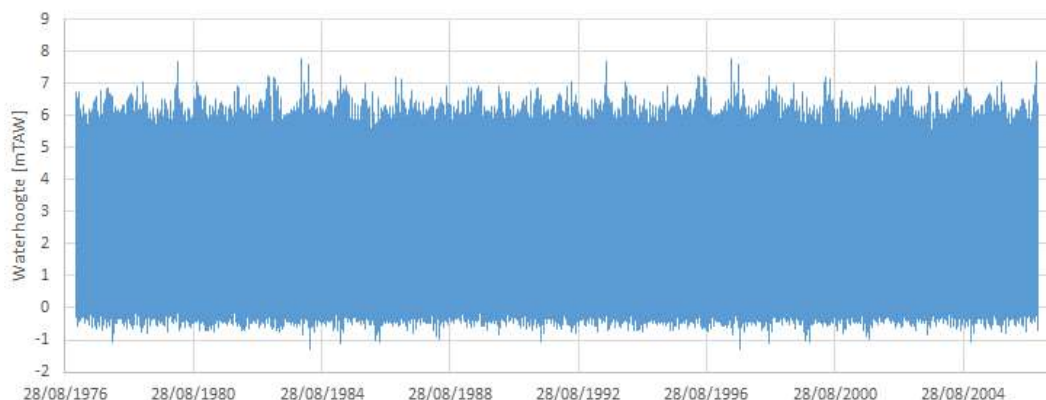


Figuur 4-25: Overzicht van de gemiddelde maandelijkse neerslagtotalen in het huidig klimaat (noCC) en het hoog klimaatscenario in 2050 (hCC) voor de periode 1977-1988

Zeespiegel

Voor de zeespiegelstijging ten gevolge van klimaatsverandering is gebruik gemaakt van de waarden bepaald door het KNMI. Deze stellen de waterstandstijging op open zee in het hoog klimaatscenario gelijk aan 30 cm tegen het jaar 2050 (KNMI, 2014).

In het aangeleverde model van de Benedenvliet bestaat de afwaartse rand uit een getij-afhankelijke tijdreeks van waterpeilen op de Zeeschelde voor de periode 1956-2006. De peilen bij hoog- en laagwater zijn afgeleid uit de tijdreeks. Om de zeespiegelstijging in rekening te brengen zijn de peilen bij hoogwater verhoogd met 30 cm. Een gemiddelde getijkromme is bepaald op basis van de originele tijdreeks. Vervolgens is een tijdreeks met zeespiegelstijging in 2050 aangemaakt door de gemiddelde getijkromme toe te passen op de hoog- en laagwaterpeilen (Figuur 4-26).

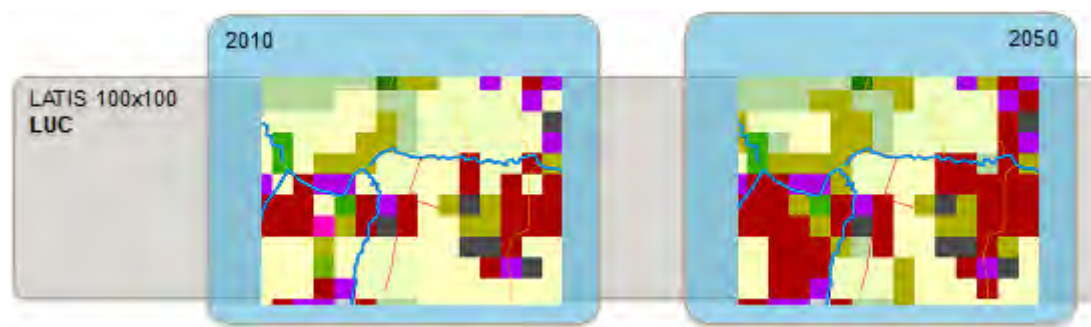


Figuur 4-26: Waterstanden op de Schelde onder invloed van zeespiegelstijging bij het hoog klimaatscenario in 2050

4.3.4.2 Landgebruikverandering

Om de impact van landgebruikverandering in rekening te brengen is er gebruik gemaakt van de Land Use Change (LATIS LUC) kaarten (Figuur 4-27) van het LATIS LUC softwarepakket voor het berekenen van overstromingsschade en –risico (Deckers *et al.*, 2012) bij veranderend landgebruik. Deze kaarten, met het landgebruik in Vlaanderen in 2010 en in 2050, werden bepaald door de VITO (de Kok *et al.*, 2011). Het landgebruik wordt weergegeven in cellen van 100 op 100 m. Deze kaarten laten toe om de toename van de bebouwing in 2050 ten opzichte van 2010 te kwantificeren aan de hand van de toename van het aantal residentiële cellen.

Op basis van de kaarten worden de oppervlaktes van de hydrologische riool- en waterloopstroomgebieden aangepast (zie onderstaand). De stijging van de verharde oppervlakte leidt tot een toename van de hydrologische inputdebieten in het rioolstelsel.



Figuur 4-27: Voorbeeld van de LATIS LUC (Land Use Change; VITO gegevens) landgebruikkaarten in 2010 en 2050. Residentiële gebieden worden rood weergegeven

Tevens werden door de VITO woondichtheidskaarten bepaald met de bevolkingsaantallen in 2010 en 2050 in residentiële cellen van 100 op 100 m (Figuur 4-28). Op basis van deze kaarten wordt de toename van de droogweerafvoer in het rioolstelsel in rekening gebracht van 2010 naar 2050 (zie onderstaand).



Figuur 4-28: Voorbeeld van de VITO kaarten met de woondichtheid (roze) in 2010 en 2050

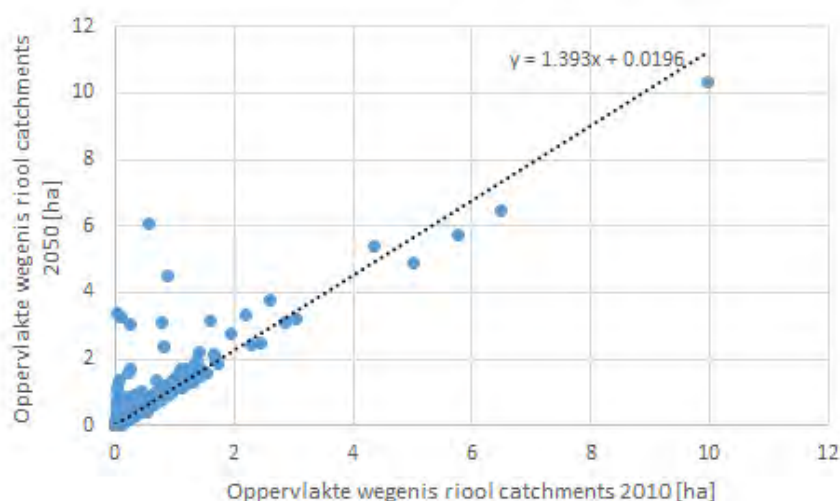
In wat volgt wordt beschreven hoe de oppervlaktes van de hydrologische riool- en waterloopstroomgebieden aangepast worden.

Deelstroomgebieden rioolstelsel

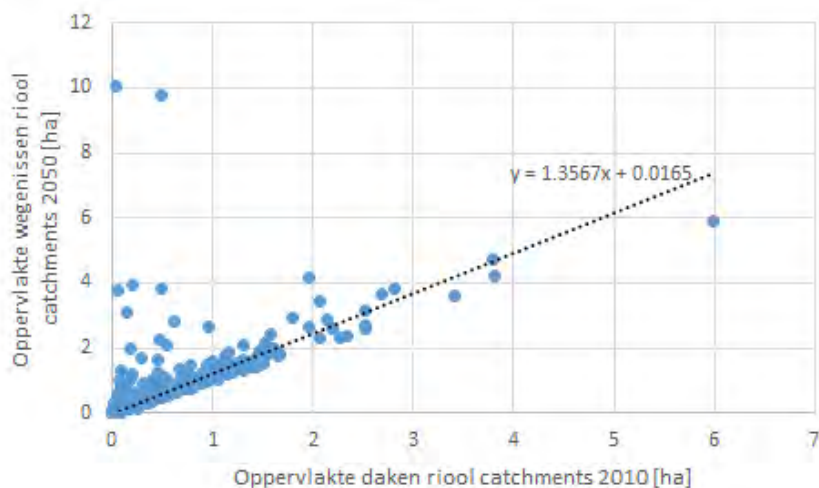
Het rioolgedeelte van het aangeleverde model bevat deelstroomgebieden (Subcatchments) die aangesloten zijn op de modelknooppunten het rioolstelsel. Voor elk deelstroomgebied wordt de toevoerende oppervlakte gespecificeerd van verschillende landgebruiken, namelijk dak, wegenis, onverhard... Het aangeleverde model bevat zowel geografisch als niet-geografisch afgebakende deelstroomgebieden.

Binnen de geografisch afgebakende deelstroomgebieden wordt de autonome ontwikkeling in rekening gebracht door de percentuele verandering in dakoppervlakte van residentiële en industriële gebouwen en van wegenis van 2010 naar 2050 in de VITO landgebruikkaarten toe te passen op de toevoerende oppervlakten.

Voor de niet-geografisch afgebakende deelstroomgebieden, wordt gebruik gemaakt van de gemiddelde verandering van de oppervlakte dak en wegenis in het stroomgebied van de Benedenvliet. Gemiddeld neemt de oppervlakte aan wegenis toe met een factor 1.39 (Figuur 4-29). De dakoppervlakte neemt gemiddeld toe met een factor 1.36 (Figuur 4-30).



Figuur 4-29: Overzicht evolutie wegenis oppervlakte in riool catchments onder invloed van autonome ontwikkeling in 2050 op basis van de VITO landgebruikkaarten

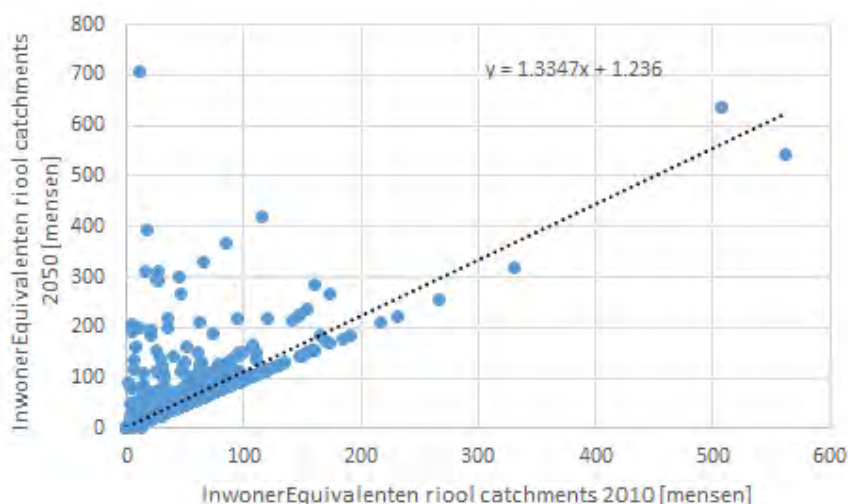


Figuur 4-30: Overzicht evolutie dakoppervlakte in riool catchments onder invloed van autonome ontwikkeling in 2050 op basis van de VITO landgebruikkaarten

De deelstroomgebieden van het rioolmodel leggen tevens de droogweerafvoer op aan het rioolstelsel op basis van het gespecificeerd aantal InwonerEquivalenten (I.E.'s). Dit komt overeen met het aantal inwoners per deelstroomgebied.

Binnen de geografisch afgebakende deelstroomgebieden wordt de toename van het aantal I.E.'s door autonome ontwikkeling in rekening gebracht door de percentuele verandering in woondichtheid van 2010 naar 2050 in de VITO kaarten toe te passen op de I.E.'s in het rioolmodel.

Voor de niet-geografisch afgebakende deelstroomgebieden wordt gebruik gemaakt van de gemiddelde toename van de woondichtheid ten gevolge van autonome ontwikkeling. Deze komt overeen met een factor 1.33 (Figuur 4-31).



Figuur 4-31: Overzicht evolutie I.E.'s in riool catchments onder invloed van autonome ontwikkeling in 2050 op basis van de VITO landgebruikkaarten

Deelstroomgebieden rivierstelsel

De toename van de verharde oppervlakte in de geografisch afgebakende deelstroomgebieden van het rioolstelsel wordt afgehouden van de oppervlakte van de deelstroomgebieden die afstromen naar het rivierstelsel.

4.4 SCENARIO'S

4.4.1 Inleiding

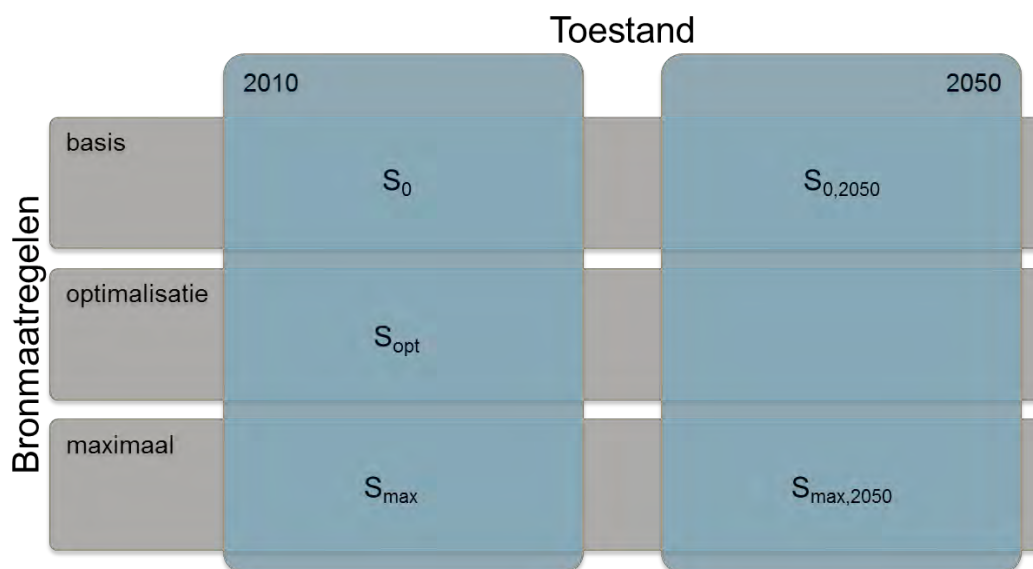
Figuur 4-32 geeft een overzicht van de scenario's die beschouwd zijn in de huidige studie. Er zijn drie scenario's van bronmaatregelen beschouwd:

- een basisscenario (S_0) dat overeenkomt met de huidige toestand en dient als referentie bij het beoordelen van de impact van de overige scenario's;
- een maximaal scenario ($S_{\max}$) dat uitgaat van het maximaal inzetten op bronmaatregelen. Er wordt nagegaan wat het effect is van de bronmaatregelen in de veronderstelling dat deze maximaal worden toegepast conform de Code van goede praktijk en de Hemelwaterverordening. De bronmaatregelen worden in rekening gebracht in de conceptuele modellering van de hydrologie zoals beschreven in Hoofdstuk 4.3.3;
- een optimalisatie scenario (S_{opt}) waarbij wordt gezocht naar een optimale combinatie van infiltratie en bufferen door een percentage van het volume in overeenstemming met de Hemelwaterverordening (zie Hoofdstuk 4.3.3.3) te implementeren als buffervoorziening en waarbij dit percentage afhankelijk is van het bodemtype of infiltratiecapaciteit.

Daarnaast zijn het basis- en het maximaal scenario beschouwd in twee toestanden:

- 2010: de toestand met het huidige klimaat en landgebruik;
- 2050: de toestand met het klimaat en landgebruik na autonome ontwikkeling in 2050. De impact van autonome ontwikkeling wordt in rekening gebracht in de conceptuele modellering van de hydrologie zoals beschreven in Hoofdstuk 4.3.4.

Aan de hand van deze twee toestanden is enerzijds de impact van autonome ontwikkeling bepaald ten opzichte van het basisscenario. Anderzijds is nagegaan in welke mate de bronmaatregelen de gevolgen van autonome ontwikkeling opvangen.



Figuur 4-32: Schematische weergave van de beschouwde scenario's

De scenario's en de toestanden zijn geïmplementeerd en gesimuleerd in iFramework dat instaat voor de conceptuele modellering van de hydrologie (zie Hoofdstuk 4.3). Vervolgens zijn de hydrologische modelresultaten gesimuleerd met het conceptuele rioolmodel geïntegreerd met het hydrodynamische riviermodel in InfoWorks ICM (zie Hoofdstuk 4.2.3). Telkens is de periode 1977-2006 of 30 jaar beschouwd. De hydrodynamische simulaties zijn uitgevoerd in perioden van een jaar met een maand overlapping in december om initialisatie van waterpeilen en debieten toe te laten. De gesimuleerde jaarperioden zijn samengevoegd na het weglaten van de overlapping.

In wat volgt wordt de modelopvatting van de beschouwde scenario's en toestanden eerst bondig beschreven. Vervolgens worden de resultaten besproken.

4.4.1.1 Basisscenario (S_0)

In het basisscenario zijn de bronmaatregelen (zie Hoofdstuk 4.3.3) reeds geïmplementeerd in het iFramework, maar zonder werkzaam te zijn.

In de toestand 2010 is het model belast met neerslagafvoertijdreeksen gesimuleerd met het iFramework op basis van tijdreeksen van neerslag en verdamping van het KMI station te Ukkel.

In de toestand na autonome ontwikkeling in 2050 is het model belast met neerslagafvoertijdreeksen gesimuleerd met het iFramework op basis van de geperturbeerde tijdreeksen van neerslag en verdamping van het KMI station te Ukkel voor het hoog klimaatscenario (zie Hoofdstuk 4.3.4.1). De impact van landgebruikverandering is in rekening gebracht zoals beschreven in Hoofdstuk 0.

Aan de afwaartse modelrand is tevens zeespiegelstijging in rekening gebracht zoals beschreven in Hoofdstuk 4.3.4.1.

4.4.1.2 Maximaal scenario ($S_{\max}$)

In het maximaal scenario worden de bronmaatregelen toegepast met een infiltratiecapaciteit die het gemiddelde benadert van de gemeten infiltratiecapaciteiten van de bodemtexturen, met uitzondering van de zandige textuur. Dit wordt nader toegelicht in Hoofdstuk 4.4.1.3.

Verder worden in de toestanden 2010 en 2050 dezelfde tijdreeksen van neerslag en verdamping en van afwaartse waterpeilen toegepast als in het basisscenario (zie hoofdstuk 4.4.1.1).

4.4.1.3 Optimalisatie scenario (S_{opt})

Zoals aangegeven wordt in het optimalisatie scenario gezocht naar een optimale combinatie van infiltreren en bufferen. Het opzet van de studie is om per bodemtype van de Bodemkaart van België een optimum te bepalen. De resultaten van de infiltratietesten geven echter aan dat, met uitzondering van de zandige textuur, geen significant verschillende infiltratiecapaciteiten gemeten worden per bodemtextuur. Daarom wordt de optimalisatie uitgevoerd voor het gemiddelde van de infiltratiecapaciteit gemeten voor de zandige textuur en voor zeven infiltratiecapaciteiten binnen het bereik van gemeten waarden voor de overige texturen.

De waarden zijn vastgelegd in overleg met de stuurgroep van de opdracht (IMDC, 2016) en worden weergegeven in Tabel 4-8. Er is voor gekozen om meer lage dan hoge infiltratiecapaciteiten te analyseren aangezien eerder bij lage waarden de mogelijkheid tot infiltreren in vraag gesteld wordt. Elke infiltratiewaarde heeft een volgnummer. Dit wordt gebruikt in de verdere naamgeving van het optimalisatie scenario. De infiltratiewaarde met volgnummer 4 komt overeen met de waarden toegepast in het maximaal scenario.

Tabel 4-8 bevat tevens geanalyseerde verhoudingen van infiltreren en bufferen. Op basis van deze verhoudingen wordt de beschikbare oppervlakte en volume van de infiltratievoorziening opgedeeld in een deel voor infiltratie en een deel voor buffering. Deze analyse is toegepast bij de lage infiltratiecapaciteiten aangezien bij de hoge capaciteiten het toepassen van infiltratie de voorkeur geniet. De opvatting van de buffervoorziening wordt beschreven bij de bronmaatregelen (zie Hoofdstuk 4.3.3). Tevens wordt opgemerkt dat de variant met 100 % bufferen voor alle infiltratiecapaciteiten dezelfde is aangezien er niet geïnfiltreerd wordt. Ter volledigheid wordt er ook een variant doorgerekend die enkel een hemelwatermodule bevat. Er wordt opgemerkt dat deze variant voor alle infiltratiecapaciteiten dezelfde is aangezien er niet geïnfiltreerd of gebufferd wordt.

Per infiltratiecapaciteit worden de infiltratie-buffer varianten doorgerekend met de tijdreeksen van neerslag en verdamping en van afwaartse waterpeilen toegepast in het basisscenario voor de toestand 2010 (zie hoofdstuk 4.4.1.1).

Tabel 4-8: De infiltratiecapaciteiten beschouwd in het optimalisatie scenario en de geanalyseerde verhoudingen van infiltreren en bufferen

Nr	Infiltratiecap. [10 ⁻⁶ m/s]	Verhouding infiltreren/bufferen [%/ %]				Opm.	
1	22.00	100/0			0/100	0/0	Zand
2	8.90	100/0					
3	3.50	100/0					
4	1.80	100/0					
5	0.80	100/0	50/50				
6	0.50	100/0	50/50				
7	0.10	100/0	50/50	25/75			
8	0.01	100/0	50/50	25/75			

4.4.2 Resultaten

De impact van de verschillende scenario's zijn vergeleken op basis van een aantal variabelen, welke afgeleid zijn uit de resultaten van de continue lange termijn simulaties. Deze variabelen zijn afgeleid voor elk van de scenario's, wat toelaat om de impact van de scenario's te evalueren. Hieronder worden de variabelen omschreven met vervolgens de aanpak van de evaluatie:

- de hoeveelheid hemelwater $V_{RWZI}(t)$ die op jaarbasis wordt afgevoerd naar de RWZI (impact zuiveringsrendement): dit wordt grafisch voorgesteld d.m.v. een puntenwolk (voor elk jaar een punt), met het basis-scenario in de X-as en het scenario in de Y-as. Deze puntenwolk geeft inzicht in de mate waarin de impact variabele is t.o.v. eerder toevallige klimaatvariaties (b.v. een droog jaar vs. een nat jaar). Om het 'rendement' te bepalen van het scenario (om na te gaan of de impact structureel 'beter' (of slechter) is), is een QQ-plot echter meer aangewezen, vermits deze de toevallige jaarvariaties negeert. Hierbij worden de hemelwatervolumes gesorteerd. Vervolgens worden de gesorteerde reeksen t.o.v. elkaar geplott (X-as basisscenario, Y-as scenario). Een bepaald punt in de grafiek zal dus niet noodzakelijk op één gemeenschappelijk jaar wijzen. De trend van de QQ-plot geeft een uitstekend inzicht in de mate van systematisch verschil tussen beide scenario's, en of deze afwijking meer uitgesproken is voor kleine of voor grote volumes.
- het piekdebiet bij T1/7, T0.5, T1, T2.5, T5, T7.5, T15 en T30 vanuit de overstorten $Q_{p,o}(T)$ (impact waterkwantiteit en waterkwaliteit¹³): d.m.v. een QQ-plot (basisscenario in de X-as en scenario in de Y-as) kunnen scenario en basisscenario op snelle manier voor alle terugkeerperiodes worden vergeleken.
- het jaardebiet $Q_{gem,o}(t)$ dat vanuit overstorten wordt aangesloten op de waterloop (impact waterkwaliteit): opnieuw wordt hier een puntenwolk voorgesteld en een QQ-plot op basis van gesorteerde waarden voorzien.

¹³ Over de impact voor waterkwaliteit zal nog overleg gepleegd worden met het bestuur, vermits deze parameter in zekere mate redundant is, met de frequentie van overstorten. Voor ecologisch kwetsbare waterlopen en oppervlaktewateren wordt door de code de overstortfrequentie van 7 dagen/jaar voorgeschreven, wat een overschrijdingsfrequentie van 1/7 per jaar geeft.

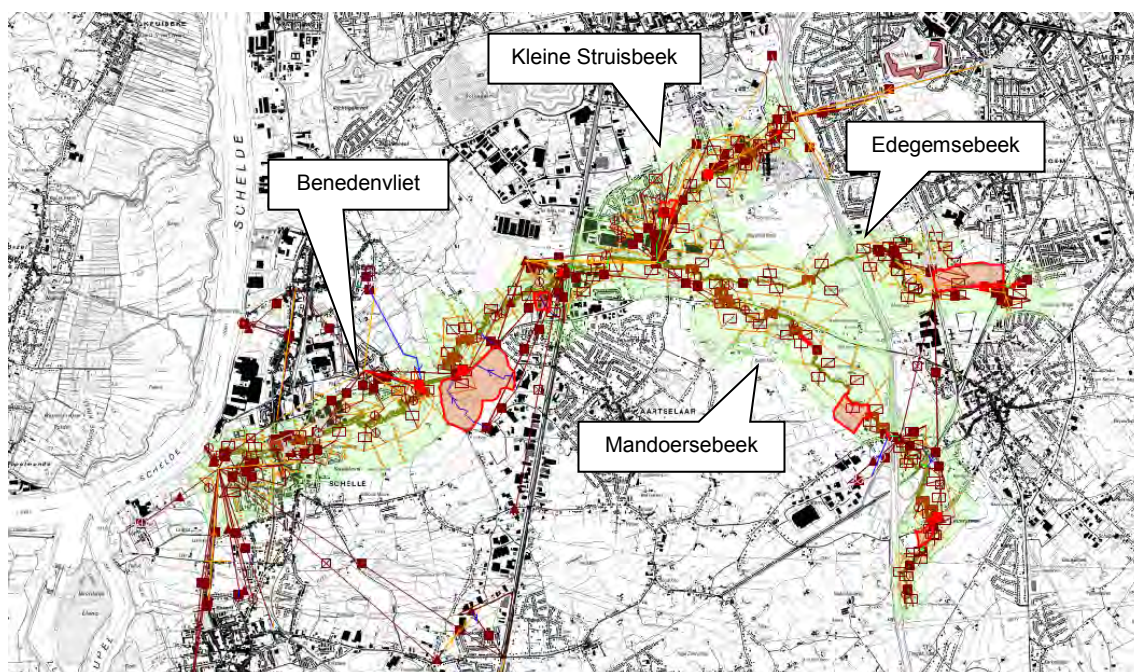
- de frequentie van overstorten $N_O(t)$ (impact waterkwaliteit): opnieuw wordt hier een puntenwolk voorgesteld en een QQ-plot op basis van gesorteerde waarden voorzien.
- het jaarvolume hemelwater $V_I(t)$ dat kan infiltreren: wordt voor het volledige modelgebied weergegeven per maand en per jaar in de multi-criteria analyse.
- het piekdebiet op de waterloop $Q_{p,W}(T)$ (impact waterkwantiteit) voor verschillende terugkeerperiodes: dezelfde visualisaties als voor het piekdebiet vanuit de overstorten worden voorzien.
- het optreden van overstromingen $V_{tot,F}(t)$ zowel vanuit de riolering als de waterloop (impact waterkwantiteit): dit kan samengevat worden als een totaal overstromingsvolume, waarvoor een puntenwolk en een QQ-plot wordt opgemaakt.

In Hoofdstuk 4.4.2.1 worden de bovenstaande variabelen weergegeven voor locaties verspreid over het modelgebied. Hierbij wordt zowel ingegaan op de verschillende varianten van de bronmaatregelen als op de verschillende toestanden.

Met het oog op inzicht in de impact van bronmaatregelen op het watersysteem zijn de verschillende variabelen in zekere mate gesynthetiseerd. Hiertoe is een pragmatische vorm van een MCA (multi-criteria analyse) toegepast in Hoofdstuk 4.4.2.2.

4.4.2.1 Modelgebied

Figuur 4-33 geeft een overzicht van de locaties binnen het modelgebied waarvoor de variabelen weergegeven en besproken worden. De locaties zijn tevens opgenomen in Tabel 4-9.



Figuur 4-33: Situering van de locaties (rood) binnen het modelgebied van de Benedenvliet die weerhouden zijn voor de beoordeling van de impact van bronmaatregelen en autonome ontwikkeling in 2050

Tabel 4-9: Overzicht van de locaties binnen het modelgebied weerhouden voor de beoordeling van de impact van bronmaatregelen en autonome ontwikkeling

Modelement	Zuiveringsgebied	Omschrijving
Mandoersebeek		
MAN059		Bovenloop waterloop
MAN079		Middenloop waterloop
St43_KT950.2	Edegem	Overstort
I_MAN068R'		Overstromingsgebied
I_MAN040R		Overstromingsgebied
Edegemsebeek		
EDB009		Bovenloop waterloop
St43_14.2	Edegem	Overstort
r_EDB019R		Overstromingsgebied
Kleine Struisbeek		
KST005		Bovenloop waterloop
St46_AQU002.1	Aartselaar	Overstort
I_KST019R		Overstromingsgebied
Benedenvliet		
BV097		Middenloop waterloop
BV123		Bovenloop waterloop
St46_HEM21298.3	Aartselaar	Overstort
46_D21643c.2	Aartselaar	Overstort
I_BV077R		Overstromingsgebied
I_BV120R		Overstromingsgebied

Optimalisatie

In het optimalisatiescenario worden zoals beschreven in Hoofdstuk 4.4.1.3 acht verschillende waarden van de infiltratiecapaciteit toegepast in de infiltratiemodule van de bronmaatregelen (zie Hoofdstuk 4.3.3). Om na te gaan of het mogelijk is om tot een optimale verhouding van infiltreren en bufferen te komen, zijn voor een aantal infiltratiecapaciteiten tevens varianten beschouwd waarin de infiltratiemodule van de bronmaatregelen gedeeltelijk tot geheel vervangen is door een buffermodule. Daarnaast is ook een variant beschouwd waarin de bronmaatregelen beperkt worden tot hemelwaterhergebruik.

• Mandoersebeek

Figuur 4-34 tot Figuur 4-40 geven de resultaten weer voor de Mandoersebeek.

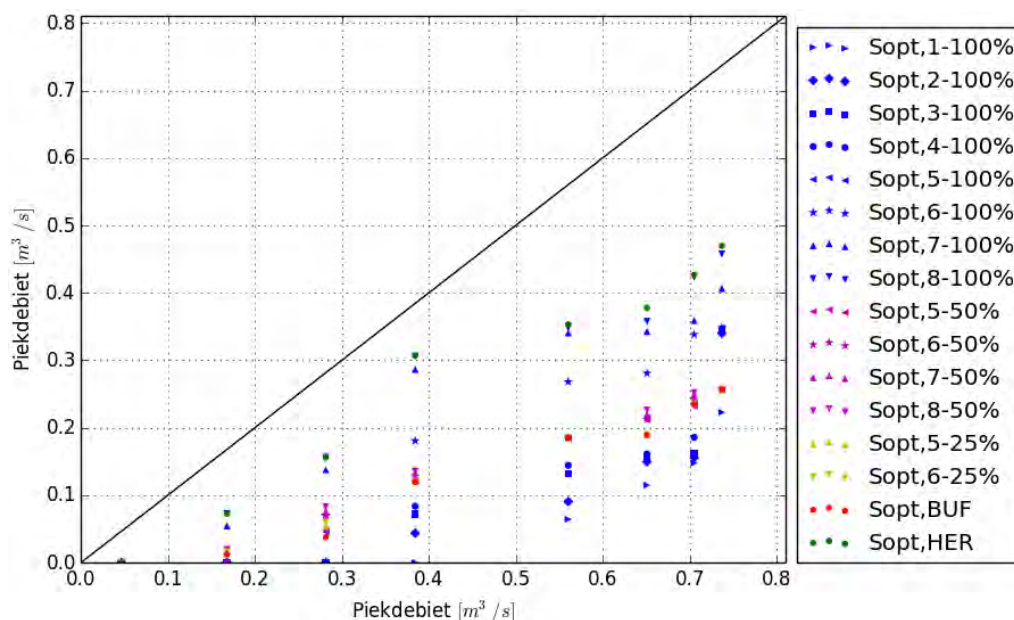
De overstortwerking wordt significant beïnvloed door de bronmaatregelen. In het geval van 100 % infiltratie wordt een aanzienlijk sterkere daling van de piekdebieten berekend bij de hoge infiltratiewaarden dan bij de lage infiltratiewaarden. De dalingen van de piekdebieten voor de variant met 100 % bufferen bevinden zich overwegend tussen de resultaten van de vier hoogste (nr. 1-4; 22.00-1.80 10^{-6} m/s) en de overige lagere (nr. 5-8; 0.80-0.01 10^{-6} m/s) infiltratiewaarden in, maar sluiten eerder aan bij de resultaten van de hoogste infiltratiewaarden. De dalingen van de piekdebieten in de variant met enkel hemelwaterhergebruik sluiten aan bij de dalingen van de laagste infiltratiecapaciteit. Dit geeft aan dat de daling van de piekdebieten berekend bij de laagste infiltratiewaarde hoofdzakelijk te wijten is aan het effect van hemelwaterhergebruik. Gezien het grote verschil in dalingen tussen de lagere infiltratiewaarden en de variant met 100 % bufferen zijn voor de lagere infiltratiecapaciteiten varianten doorgerekend met 50 % en 25 % infiltratie en respectievelijk 50 % en 75 % bufferen. Hierdoor dalen de piekdebieten tot waarden die de piekdebieten in de variant met 100 % bufferen benaderen.

De dalingen van de piekdebieten zijn overwegend het sterkst in het geval van 25 % infiltratie. Deze variant is enkel doorgerekend voor de twee laagste infiltratiecapaciteiten.

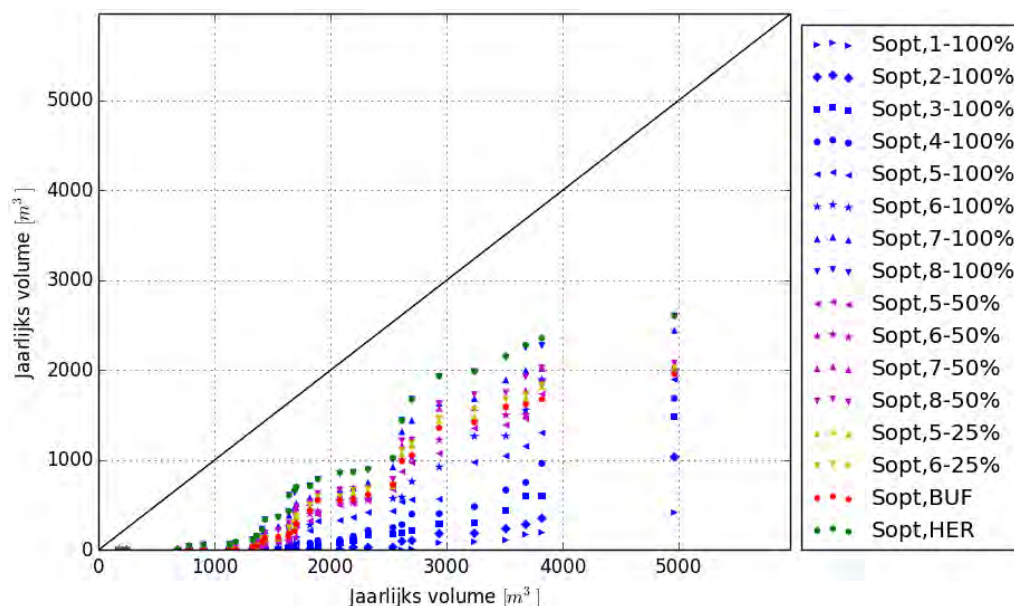
Voor wat betreft het jaarlijks overstortvolume wordt een gelijkaardig beeld bekomen. Hierbij sluiten de resultaten bij de twee laagste infiltratiewaarden (nr. 7-8; $0.10-0.01 \cdot 10^{-6} \text{m/s}$) echter dichter aan bij de variant met 100 % bufferen en worden aanzienlijk lagere overstortvolumes berekend bij de overige hogere infiltratiewaarden (nr. 1-6; $22.00-0.50 \cdot 10^{-6} \text{m/s}$). Dit geeft aan dat infiltratie een sterkere impact heeft op de overstortvolumes dan op de –piekdebieten. Bij de hoogste infiltratiewaarden wordt de overstortwerking nagenoeg te niet gedaan in de simulaties.

De bronmaatregelen met 100 % infiltratie geven afhankelijk van de locatie een minimale tot een beperkte daling van de piekdebieten op de waterloop ten opzichte van het basisscenario. De verharde oppervlakte levert in dit deel van het modelgebied slechts 6% van de hydrologische input. De sterkste dalingen worden bekomen bij de vier hoogste infiltratiewaarden. De variant met 100 % bufferen geeft geen aanleiding dat een significante daling van de piekdebieten op de Mandoersebeek. Deze beperkte daling is eveneens te wijten aan de beperkte verharde oppervlakte in dit gebied. Ook de variant met enkel hemelwaterhergebruik geeft geen aanleiding tot significante dalingen van de piekdebieten op de waterloop.

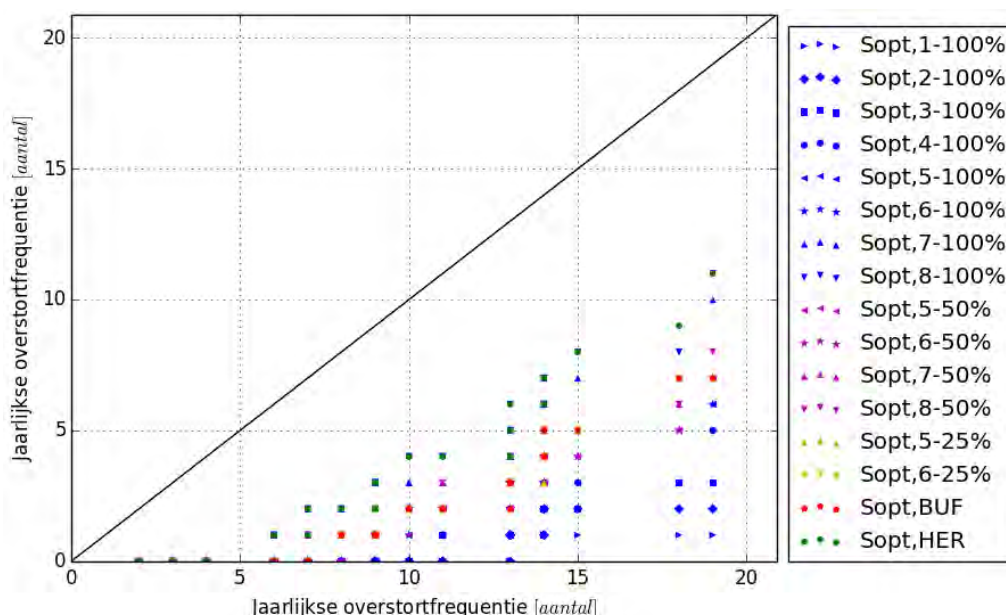
De jaarlijks overstromende volumes langs de Mandoersebeek worden plaatsafhankelijk weinig tot beperkt beïnvloed door de bronmaatregelen. De sterkste dalingen ten opzichte van het basisscenario worden berekend bij het toepassen van 100 % infiltratie en de vier hoogste infiltratiecapaciteiten. De variant met 100 % bufferen leidt niet tot significante dalingen van het jaarlijks overstroemd volume ten opzichte van het basisscenario. Hetzelfde geldt voor de variant met enkel hemelwaterhergebruik.



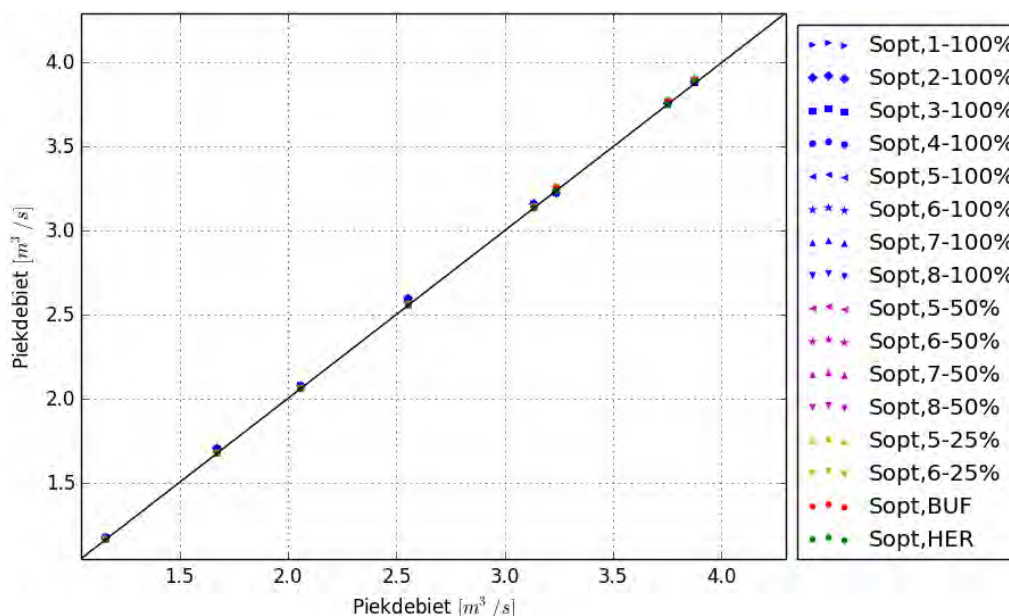
Figuur 4-34: Puntenwolk van de overstortpiekdebieten (overstort St43_KT950.2) langs de Mandoersebeek in het basisscenario (S_0) tegenover het optimalisatiescenario ($S_{opt,i-j}$) met 8 infiltratiecapaciteiten ($i=1-8$; $22.00-0.01 \cdot 10^{-6} \text{ m/s}$), verschillende verhoudingen van infiltreren (j ; 100%, 50%, 25%) in combinatie met bufferen en varianten met enkel bufferen ($S_{opt,BUF}$) en enkel hemelwaterhergebruik ($S_{opt,HER}$)



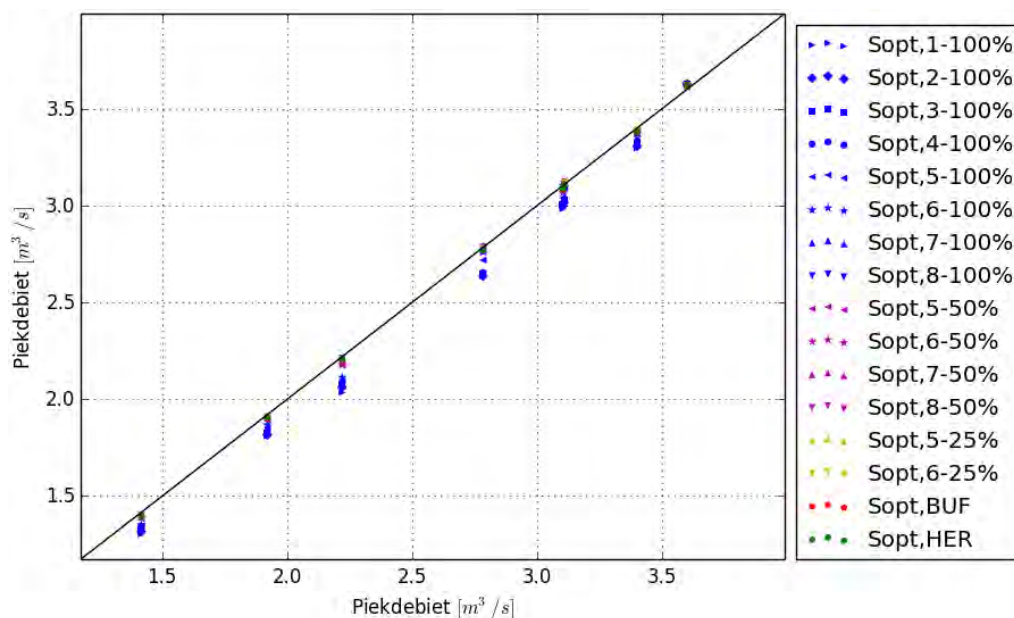
Figuur 4-35: QQ plot van de overstortvolumes langsheen de Mandoersebeek (overstort St43_KT950.2) in het basisscenario (S_0) tegenover het optimalisatiescenario ($S_{opt,i-j}$) met 8 infiltratiecapaciteiten ($i=1-8$; $22.00-0.01 \cdot 10^{-6} \text{ m/s}$), verschillende verhoudingen van infiltreren (j ; 100%, 50%, 25%) in combinatie met bufferen en varianten met enkel bufferen ($S_{opt,BUF}$) en enkel hemelwaterhergebruik ($S_{opt,HER}$)



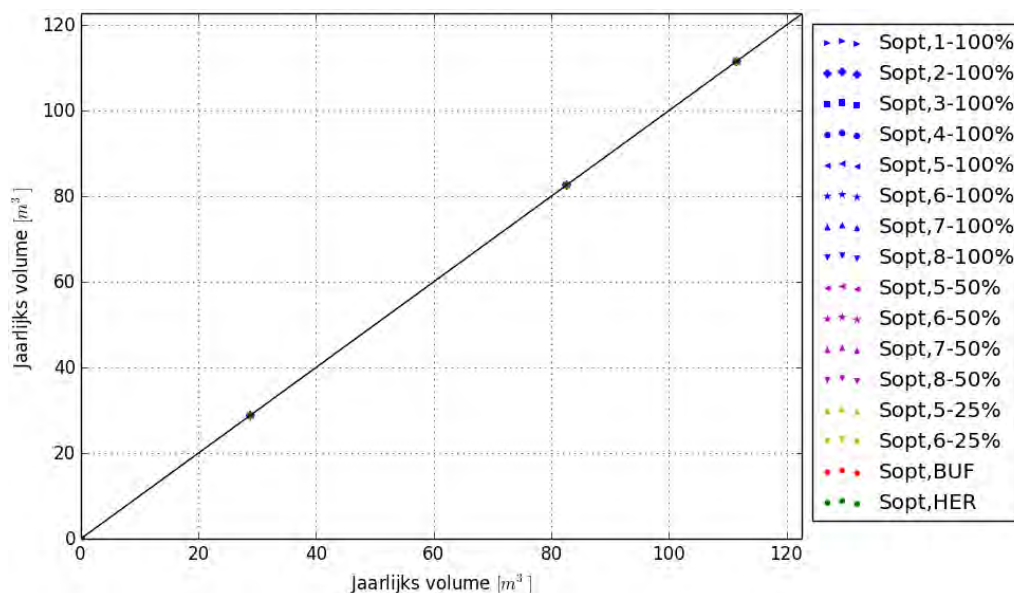
Figuur 4-36: QQ plot van de jaarlijkse overstortfrequentie langs de Mandoersebeek (overstort: St43_KT950.2) in het basisscenario (S_0) tegenover het optimalisatiescenario ($S_{opt,i,j}$) met 8 infiltratiecapaciteiten ($i=1-8$; $22.00-0.01 \cdot 10^{-6} \text{ m/s}$), verschillende verhoudingen van infiltreren (j ; 100%, 50%, 25%) in combinatie met bufferen en varianten met enkel bufferen ($S_{opt,BUF}$) en enkel hemelwaterhergebruik ($S_{opt,HER}$)



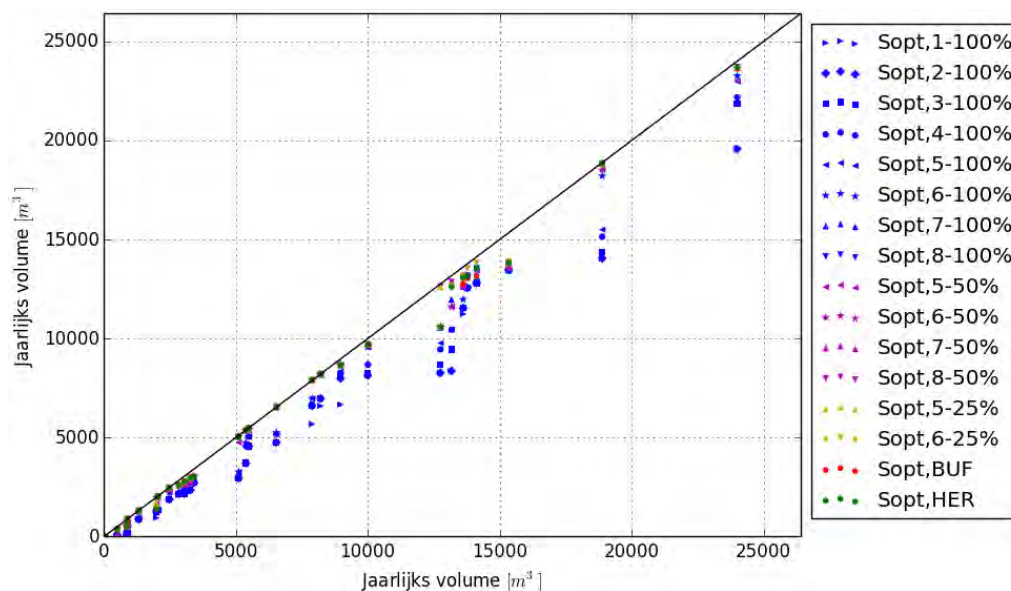
Figuur 4-37: QQ plot van de piekdebieten op de Mandoersebeek (Knooppunt: MAN048) in het basisscenario (S_0) tegenover het optimalisatiescenario ($S_{opt,i,j}$) met 8 infiltratiecapaciteiten ($i=1-8$; $22.00-0.01 \cdot 10^{-6} \text{ m/s}$), verschillende verhoudingen van infiltreren (j ; 100%, 50%, 25%) in combinatie met bufferen en varianten met enkel bufferen ($S_{opt,BUF}$) en enkel hemelwaterhergebruik ($S_{opt,HER}$)



Figuur 4-38: Puntenwolk van de piekdebieten op de Mandoersebeek (Knooppunt: MAN079) in het basisscenario (S_0) tegenover het optimalisatiescenario ($S_{opt,i,j}$) met 8 infiltratiecapaciteiten ($i=1-8$; $22.00-0.01 \cdot 10^{-6} \text{ m/s}$), verschillende verhoudingen van infiltreren (j ; 100%, 50%, 25%) in combinatie met bufferen en varianten met enkel bufferen ($S_{opt,BUF}$) en enkel hemelwaterhergebruik ($S_{opt,HER}$)



Figuur 4-39: Puntenwolk van het jaarlijks overstromd volume langsheen de Mandoersebeek (Storage area: I_MAN040R) in het basisscenario (S_0) tegenover het optimalisatiescenario ($S_{opt,i,j}$) met 8 infiltratiecapaciteiten ($i=1-8$; $22.00-0.01 \cdot 10^{-6} \text{ m/s}$), verschillende verhoudingen van infiltreren (j ; 100%, 50%, 25%) in combinatie met bufferen en varianten met enkel bufferen ($S_{opt,BUF}$) en enkel hemelwaterhergebruik ($S_{opt,HER}$)



Figuur 4-40: QQ plot van het jaarlijkse overstroomd volume langsheen de Mandoersebeek (Storage area: I_MAN074R) in het basisscenario (S_0) tegenover het optimalisatiescenario ($S_{opt,i-j}$) met 8 infiltratiecapaciteiten ($i=1-8$; $22.00-0.01 \cdot 10^{-6} \text{ m/s}$), verschillende verhoudingen van infiltreren (j ; 100%, 50%, 25%) in combinatie met bufferen en varianten met enkel bufferen ($S_{opt,BUF}$) en enkel hemelwaterhergebruik ($S_{opt,HER}$)

- **Edegemsebeek**

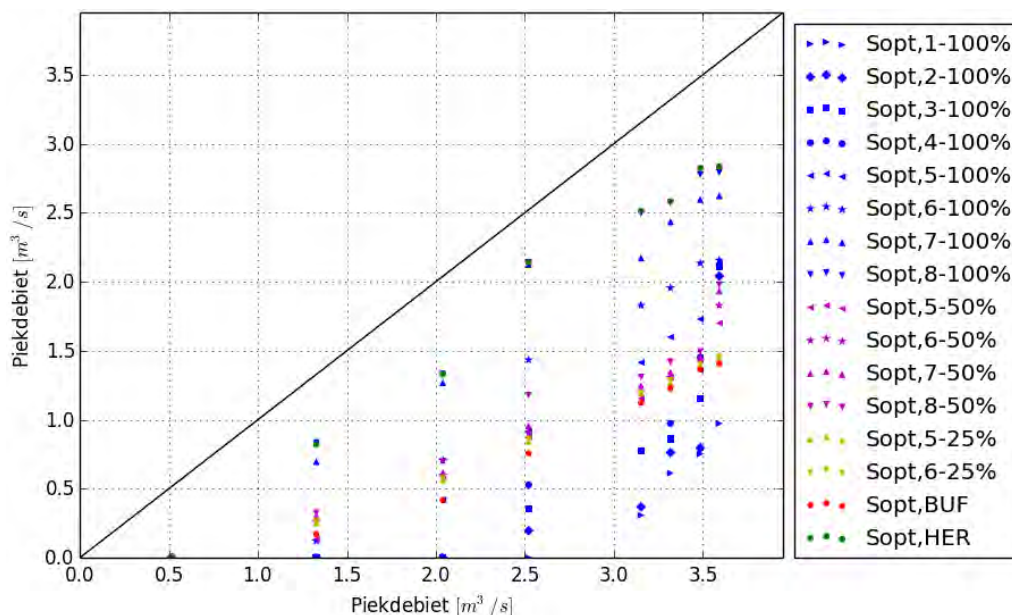
Figuur 4-41 tot en met Figuur 4-46 geven de resultaten weer voor de Edegemsebeek.

De resultaten voor wat betreft de overstortwerking geven een gelijkaardig beeld aan dat van de overstortwerking op de Mandoersebeek (zie hoger).

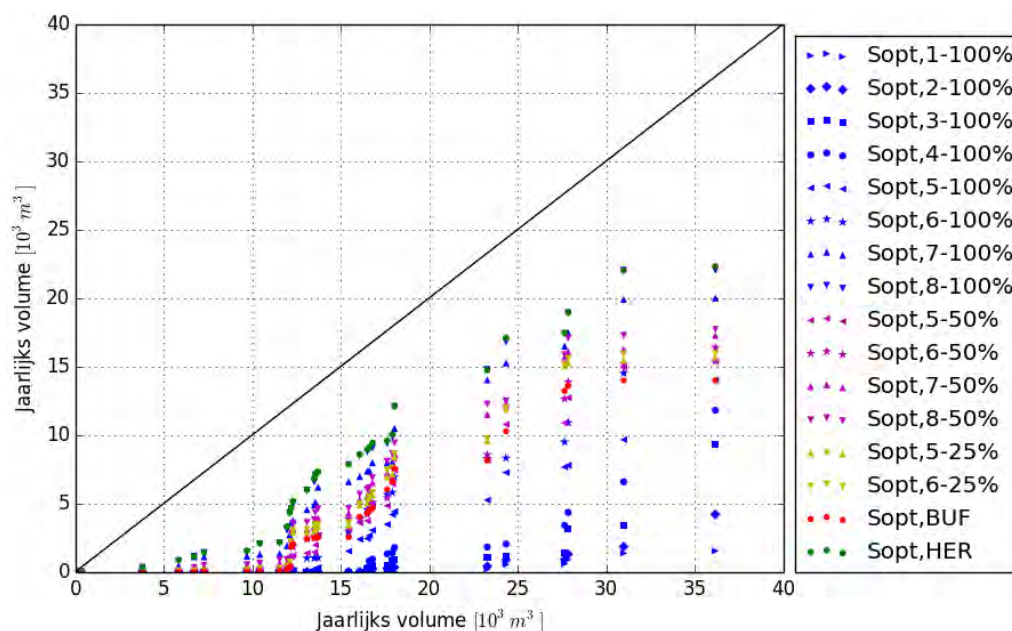
Bij de resultaten voor wat betreft het volume dat jaarlijks afgevoerd wordt naar de RWZI van Edegem (modelelementen 43_10008.1, St43_14.1, St43_588.3 en St43_8.1) geven de bronmaatregelen met 100 % infiltratie aanleiding tot een matige tot sterke daling van de afvoervolumes respectievelijk voor de twee laagste (nr. 7-8; $0.10\text{-}0.01\ 10^{-6}\text{m/s}$) en de hogere (nr. 1-6; $22.00\text{-}0.50\ 10^{-6}\text{m/s}$) infiltratiewaarden. Opvallend is dat varianten waarin de infiltratievoorziening gedeeltelijk tot geheel vervangen worden door een buffervoorziening geen aanleiding geven tot een significant verschillende jaarlijkse afvoer naar de RWZI van Edegem dan in het geval van 100 % infiltratie bij de laagste infiltratiewaarde (nr. 8; $0.01\ 10^{-6}\text{m/s}$). Dit wordt verklaard doordat bij infiltratie water uit het rioolstelsel verdwijnt, waar dit bij bufferen in het rioolstelsel blijft.

De bronmaatregelen met 100 % infiltratie geven aanleiding tot een matige tot sterke daling van de piekdebieten op de waterloop respectievelijk voor de twee laagste (nr. 7-8; $0.10\text{-}0.01\ 10^{-6}\text{m/s}$) en de overige hogere (nr. 1-6; $22.00\text{-}0.50\ 10^{-6}\text{m/s}$) infiltratiewaarden. De verharde oppervlakte levert in dit deel van het modelgebied ongeveer 24 % van de hydrologische input. De dalingen van de piekdebieten voor de variant met 100 % bufferen bevinden zich overwegend tussen de resultaten van de vier hoogste (nr. 1-4; $22.00\text{-}1.80\ 10^{-6}\text{m/s}$) en de lagere (nr. 5-8; $0.80\text{-}0.01\ 10^{-6}\text{m/s}$) infiltratiecapaciteiten in, maar sluiten eerder aan bij de resultaten van de hoge infiltratiewaarden. De dalingen van de piekdebieten in de variant met enkel hemelwaterhergebruik sluiten opnieuw aan bij de resultaten voor de laagste infiltratiewaarde. Gezien het grote verschil in dalingen tussen de lagere infiltratiewaarden en de variant met 100 % bufferen zijn voor de lagere infiltratiecapaciteiten varianten doorgerekend met 50 % en 25 % infiltratie en daardoor respectievelijk 50 % en 75 % bufferen. Hierdoor dalen de piekdebieten tot waarden die de piekdebieten in de variant met 100 % bufferen benaderen. De dalingen van de piekdebieten zijn het sterkst in het geval van 25 % infiltratie.

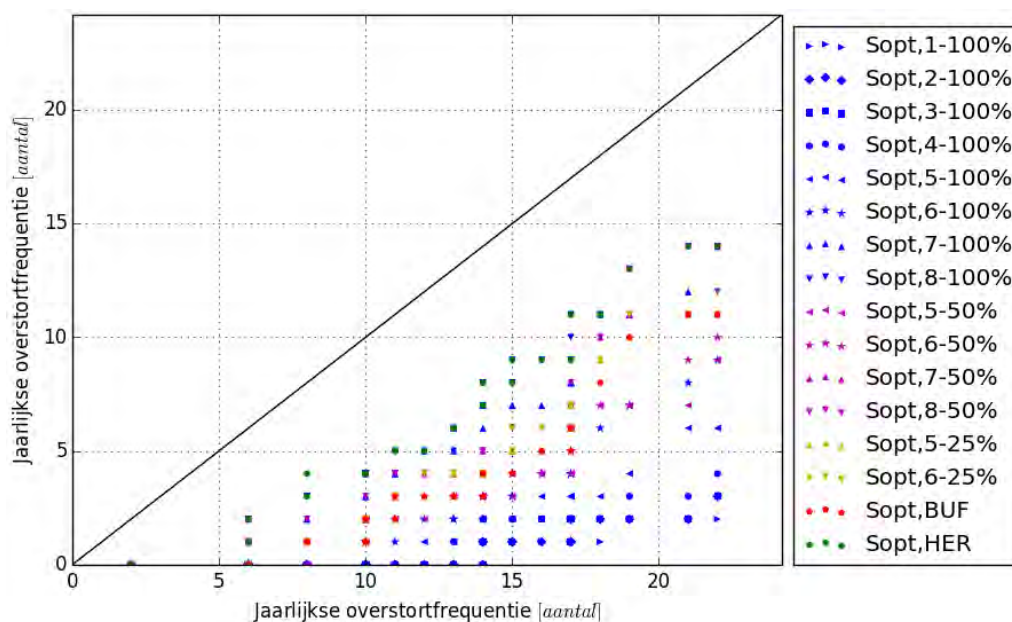
De resultaten voor wat betreft het jaarlijks overstromend volume langs de Edegemsebeek sluiten aan bij de sterkere impact van infiltratie op de overstortvolumes dan op de -piekdebieten. Daardoor bevinden de jaarlijks overstromende volumes in de variant met 100 % bufferen zich eerder tussen de jaarlijks overstromende volumes bij de zes hoogste (nr. 1-6; $22.00\text{-}0.50\ 10^{-6}\text{m/s}$) en de twee laagste (nr. 7-8; $0.10\text{-}0.01\ 10^{-6}\text{m/s}$) infiltratiewaarden in.



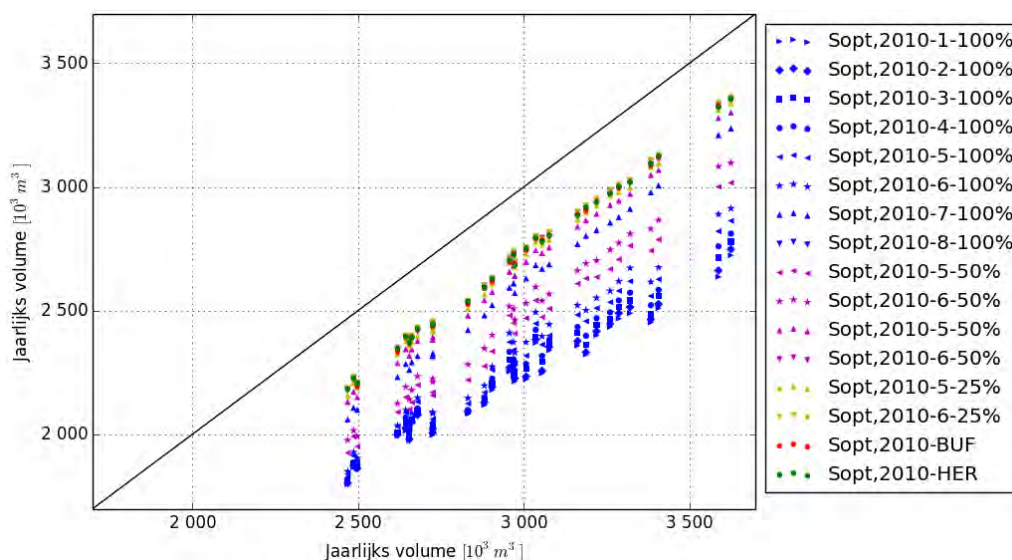
Figuur 4-41: Puntenwolk van de overstort piekdebieten langsheen de Edegemsebeek (overstort St43_14.2) in het basisscenario (S_0) tegenover het optimalisatiescenario ($S_{opt,i,j}$) met 8 infiltratiecapaciteiten ($i=1-8$; $22.00-0.01 \cdot 10^{-6} \text{ m/s}$), verschillende verhoudingen van infiltreren (j ; 100%, 50%, 25%) in combinatie met bufferen en varianten met enkel bufferen ($S_{opt,BUF}$) en enkel hemelwaterhergebruik ($S_{opt,HER}$)



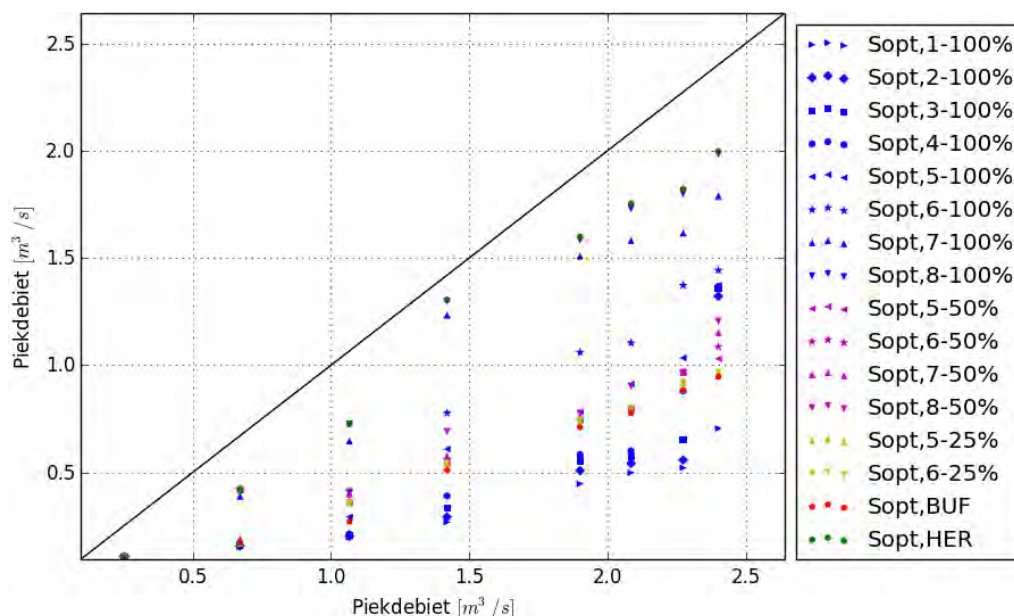
Figuur 4-42: QQ plot van de jaarlijkse overstortvolumes langsheen de Edegemsebeek (overstort St43_14.2) in het basisscenario (S_0) tegenover het optimalisatiescenario ($S_{opt,i,j}$) met 8 infiltratiecapaciteiten ($i=1-8$; $22.00-0.01 \cdot 10^{-6} \text{ m/s}$), verschillende verhoudingen van infiltreren (j ; 100%, 50%, 25%) in combinatie met bufferen en varianten met enkel bufferen ($S_{opt,BUF}$) en enkel hemelwaterhergebruik ($S_{opt,HER}$)



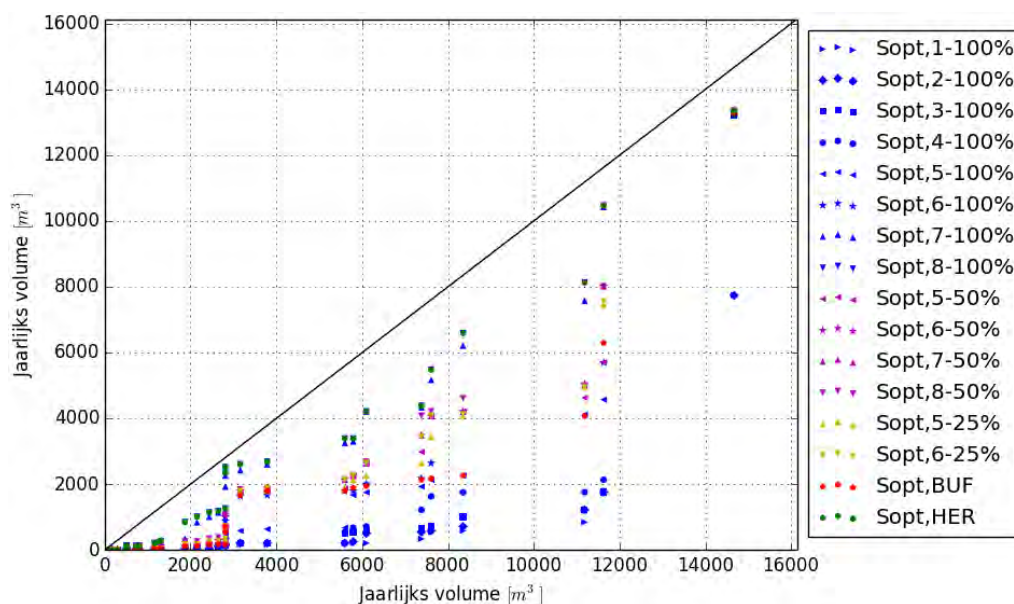
Figuur 4-43: QQ plot van de jaarlijkse overstortfrequentie langsheen de Edegemsebeek (overstort St43_200.2) in het basisscenario (S_0) tegenover het optimalisatiescenario ($S_{opt,i-j}$) met 8 infiltratiecapaciteiten ($i=1-8$; $22.00-0.01 \cdot 10^{-6} \text{ m/s}$), verschillende verhoudingen van infiltreren (j ; 100%, 50%, 25%) in combinatie met bufferen en varianten met enkel bufferen ($S_{opt,BUF}$) en enkel hemelwaterhergebruik ($S_{opt,HER}$)



Figuur 4-44: Puntenwolk van de jaarlijkse afvoervolumes naar het RWZI van Edegem in het basisscenario (S_0) tegenover het optimalisatiescenario ($S_{opt,i-j}$) met 8 infiltratiecapaciteiten ($i=1-8$; $22.00-0.01 \cdot 10^{-6} \text{ m/s}$), verschillende verhoudingen van infiltreren (j ; 100%, 50%, 25%) in combinatie met bufferen en varianten met enkel bufferen ($S_{opt,BUF}$) en enkel hemelwaterhergebruik ($S_{opt,HER}$)



Figuur 4-45: Puntenwolk van de piekdebieten op de Edegemsebeek (knooppunt EDB009) in het basisscenario (S_0) tegenover het optimalisatiescenario ($S_{opt,i-j}$) met 8 infiltratiecapaciteiten ($i=1-8$; $22.00-0.01 \cdot 10^{-6} \text{ m/s}$), verschillende verhoudingen van infiltreren (j ; 100%, 50%, 25%) in combinatie met bufferen en varianten met enkel bufferen ($S_{opt,BUF}$) en enkel hemelwaterhergebruik ($S_{opt,HER}$)



Figuur 4-46: QQ plot van het jaarlijks overstromd volume langsheen de Edegemsebeek (storage area I_EDB019R) in het basisscenario (S_0) tegenover het optimalisatiescenario ($S_{opt,i-j}$) met 8 infiltratiecapaciteiten ($i=1-8$; $22.00-0.01 \cdot 10^{-6} \text{ m/s}$), verschillende verhoudingen van infiltreren (j ; 100%, 50%, 25%) in combinatie met bufferen en varianten met enkel bufferen ($S_{opt,BUF}$) en enkel hemelwaterhergebruik ($S_{opt,HER}$)

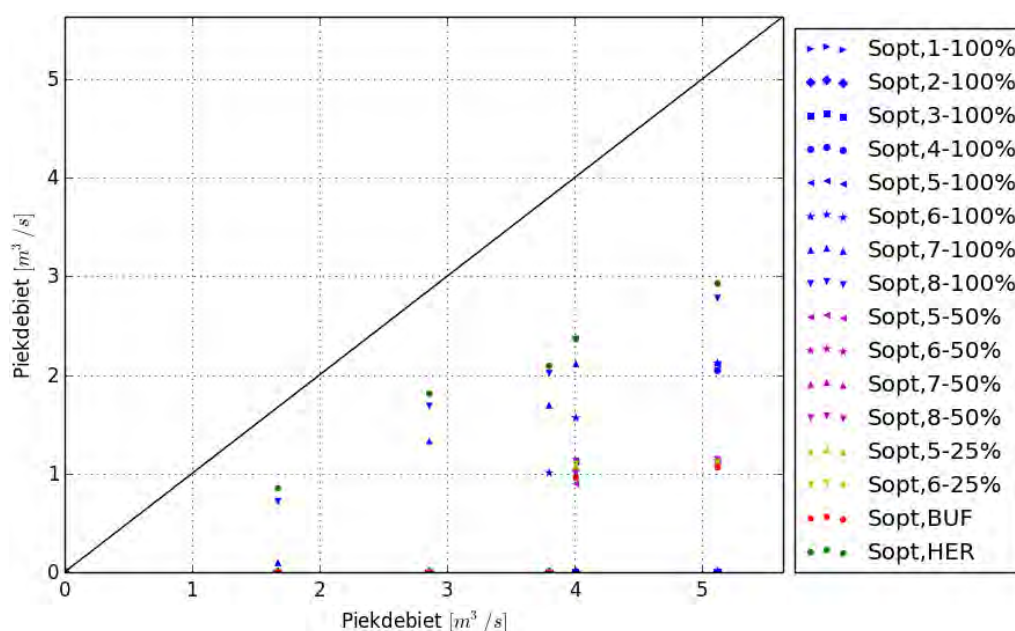
- **Kleine Struisbeek**

Figuur 4-47 tot en met Figuur 4-51 geven de resultaten week voor de Kleine Struisbeek.

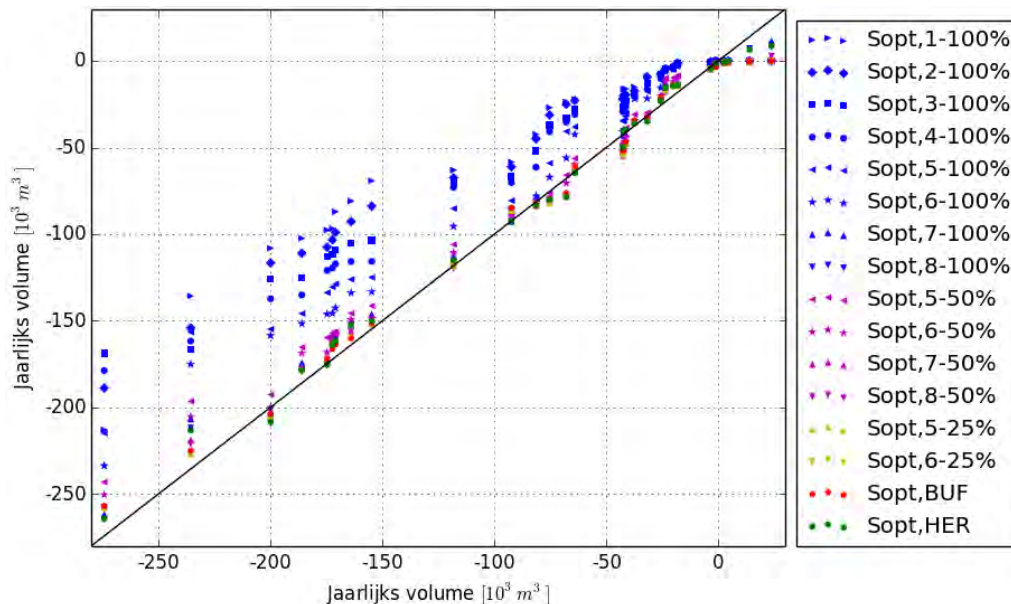
De resultaten voor wat betreft de overstortwerking geven een gelijkaardig beeld aan dat van de piekdebieten op de Kleine Struisbeek en ook aan dat van de overstortwerking op de Mandoersebeek en de Edegemsebeek (zie hoger). Voor de overstortvolumes worden er negatieve debieten bekomen. Dit wijst op terugstroming vanuit de waterloop. De bronmaatregelen geven een daling van de terugstroomvolumes.

De bronmaatregelen met 100 % infiltratie geven ten opzichte van het basisscenario aanleiding tot een matige tot sterke daling van de piekdebieten op de waterloop voor respectievelijk de twee laagste (nr. 7-8; $0.10-0.01 \cdot 10^{-6} \text{ m/s}$) en de hogere (nr. 1-6; $22.00-0.50 \cdot 10^{-6} \text{ m/s}$) infiltratiewaarden. Ongeveer 28 % van de hydrologische input wordt in dit deel van het modelgebied gegenereerd door verharde oppervlakte. De dalingen van de piekdebieten voor de variant met 100 % bufferen bevinden zich overwegend tussen de resultaten van de vier hoogste (nr. 1-4; $22.00-1.80 \cdot 10^{-6} \text{ m/s}$) en de lagere (nr. 5-8; $0.80-0.01 \cdot 10^{-6} \text{ m/s}$) infiltratiewaarden in, maar sluiten gelijkaardig aan de Edegemsebeek eerder aan bij de resultaten van de hoge infiltratiewaarden. De dalingen in de variant met enkel hemelwaterhergebruik sluiten zoals bij de overige waterlopen aan bij de dalingen voor de laagste infiltratiecapaciteit. Gezien het grote verschil in dalingen tussen de lage infiltratiewaarden en de variant met 100 % bufferen zijn voor de lage infiltratiecapaciteiten varianten doorgerekend met 50 % en 25 % infiltratie en daardoor respectievelijk 50 % en 75 % bufferen. Hierdoor dalen de piekdebieten tot waarden die de piekdebieten in de variant met 100 % bufferen benaderen. De dalingen van de piekdebieten zijn het sterkst in het geval van 25 % infiltratie.

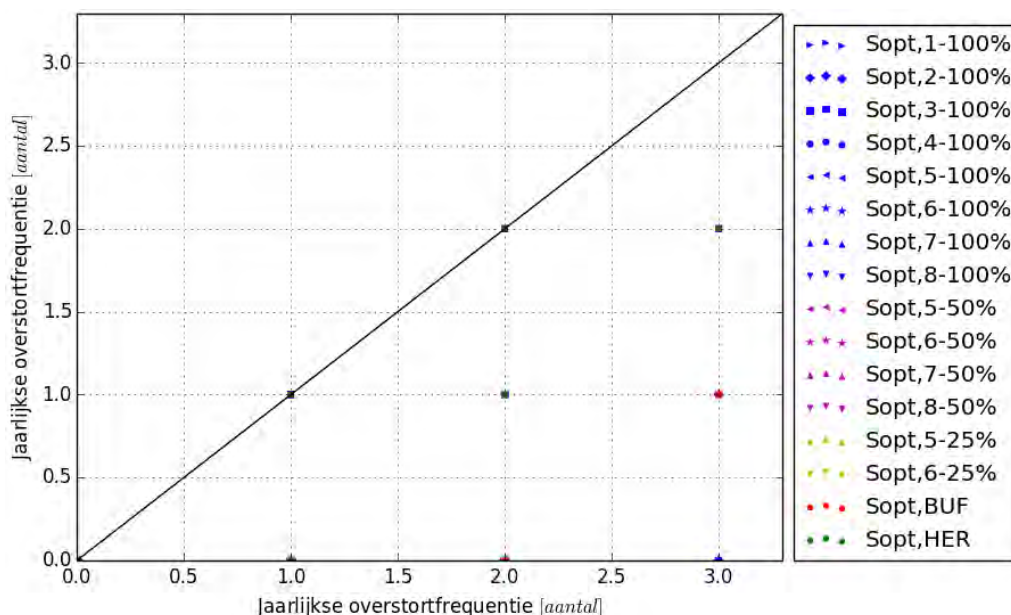
Ook het jaarlijks overstromend volume langs de Kleine Struisbeek wordt overwegend sterk gereduceerd onder invloed van de bronmaatregelen. Er wordt opgemerkt dat de jaarlijks overstromende volumes langs de Kleine Struisbeek beperkt zijn in vergelijking met de overige waterlopen van het modelgebied. Daardoor is het mogelijk dat individuele afvoerperioden aanleiding geven tot afwijkende resultaten.



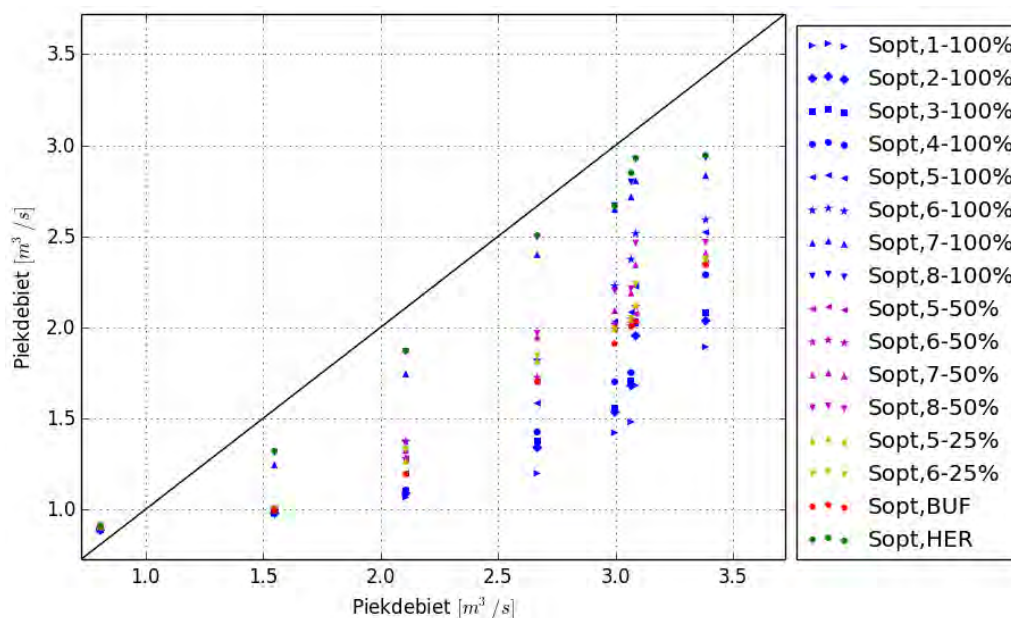
Figuur 4-47: QQ plot van de piekdebieten van een overstort langs de Kleine Struisbeek (overstort St46_AQU002.1) in het basisscenario (S_0) tegenover het optimalisatiescenario ($S_{opt,i-j}$) met 8 infiltratiecapaciteiten ($i=1-8$; $22.00-0.01 \cdot 10^{-6} \text{ m/s}$), verschillende verhoudingen van infiltreren (j ; 100%, 50%, 25%) in combinatie met bufferen en varianten met enkel bufferen ($S_{opt,BUF}$) en enkel hemelwaterhergebruik ($S_{opt,HER}$)



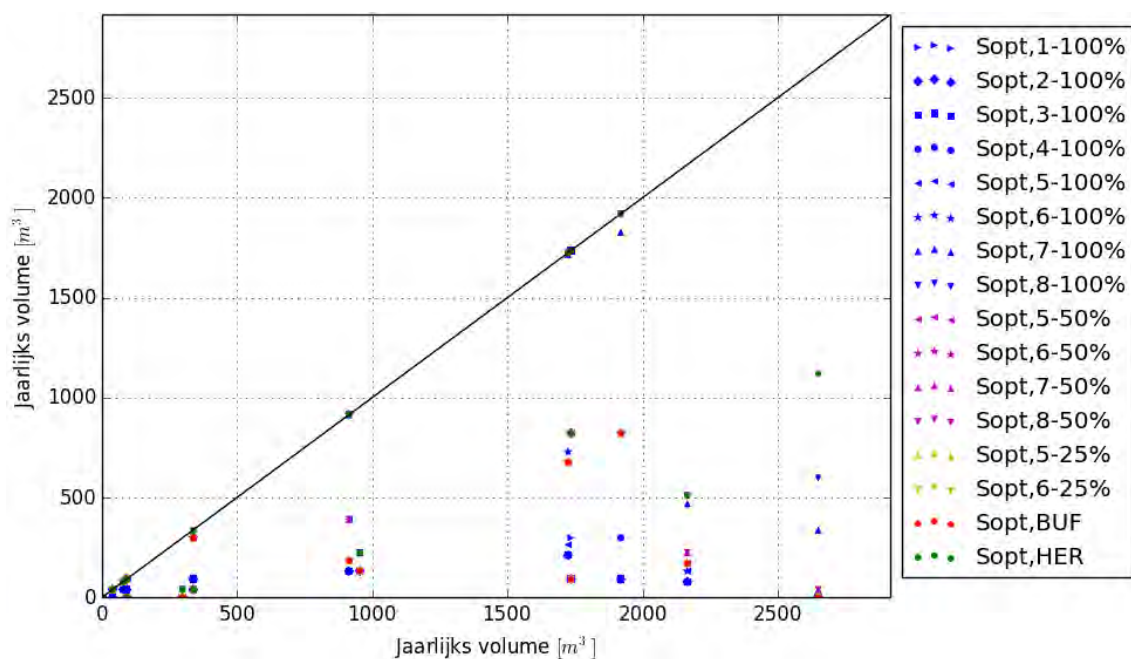
Figuur 4-48: QQ plot van de overstortvolumes langsheen de Kleine Struisbeek (overstort St46_AQU002.1) in het basisscenario (S_0) tegenover het optimalisatiescenario ($S_{opt,i-j}$) met 8 infiltratiecapaciteiten ($i=1-8$; $22.00-0.01 \cdot 10^{-6} \text{ m/s}$), verschillende verhoudingen van infiltreren (j ; 100%, 50%, 25%) in combinatie met bufferen en varianten met enkel bufferen ($S_{opt,BUF}$) en enkel hemelwaterhergebruik ($S_{opt,HER}$)



Figuur 4-49: QQ plot van de overstortfrequentie langsheen de Kleine Struisbeek (overstort St46_AQU002.1) in het basisscenario (S_0) tegenover het optimalisatiescenario ($S_{opt,i-j}$) met 8 infiltratiecapaciteiten ($i=1-8$; $22.00-0.01 \cdot 10^{-6} \text{ m/s}$), verschillende verhoudingen van infiltreren (j ; 100%, 50%, 25%) in combinatie met bufferen en varianten met enkel bufferen ($S_{opt,BUF}$) en enkel hemelwaterhergebruik ($S_{opt,HER}$)



Figuur 4-50: QQ plot van de piekdebieten op de Kleine Struisbeek (knooppunt KST005) in het basisscenario (S_0) tegenover het optimalisatiescenario ($S_{opt,i-j}$) met 8 infiltratiecapaciteiten ($i=1-8$; $22.00-0.01 \cdot 10^{-6} \text{ m/s}$), verschillende verhoudingen van infiltreren (j ; 100%, 50%, 25%) in combinatie met bufferen en varianten met enkel bufferen ($S_{opt,BUF}$) en enkel hemelwaterhergebruik ($S_{opt,HER}$)



Figuur 4-51: Puntenwolk van de jaarlijkse overstroomde volumes langsheen de Kleine Struisbeek (Storage area I_KST019R) in het basisscenario (S_0) tegenover het optimalisatiescenario ($S_{opt,i-j}$) met 8 infiltratiecapaciteiten ($i=1-8$; $22.00-0.01 \cdot 10^{-6} \text{ m/s}$), verschillende verhoudingen van infiltreren (j ; 100%, 50%, 25%) in combinatie met bufferen en varianten met enkel bufferen ($S_{opt,BUF}$) en enkel hemelwaterhergebruik ($S_{opt,HER}$)

- **Benedenvliet**

Figuur 4-52 tot en met Figuur 4-62 geven de resultaten weer voor de Benedenvliet.

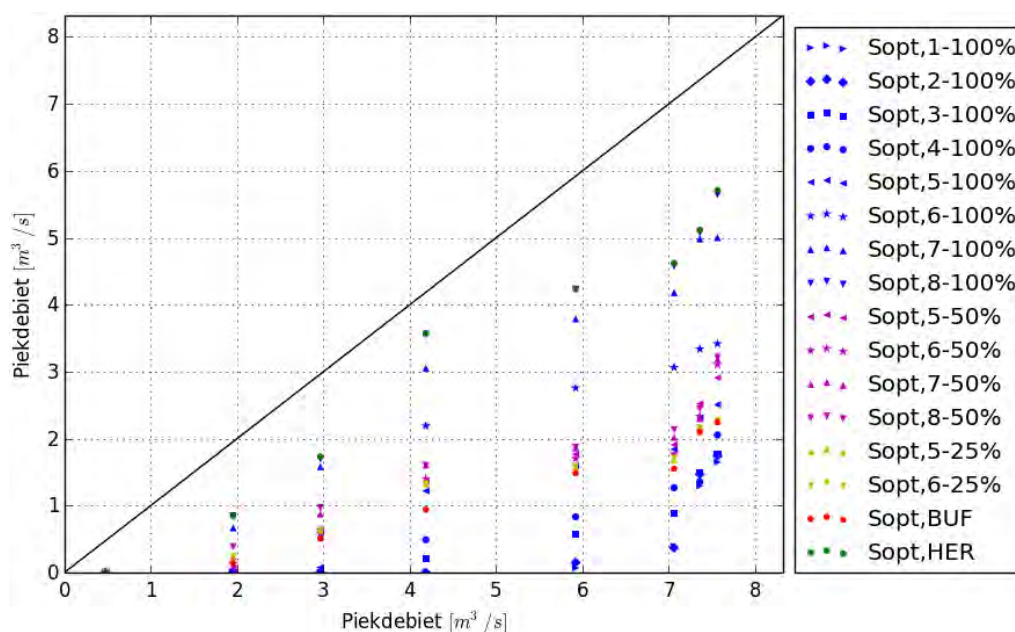
De resultaten voor wat betreft de overstortwerking geven een gelijkaardig beeld aan dat van de overstortwerking op de bovenlopen van het modelgebied (zie hoger).

Bij de resultaten voor wat betreft het volume dat jaarlijks afgevoerd wordt naar de RWZI van Aartselaar (modelelementen 46_21462.1, 46_D21308a.1, 46_D21308a.2, 46_D21350a.2, 46_HEMD21298.1 en St46_AQU004.2) geven de bronmaatregelen met 100 % infiltratie eveneens aanleiding tot een matige tot sterke daling van de afvoervolumes respectievelijk voor de twee laagste (nr. 7-8; $0.10\text{--}0.01\ 10^{-6}\text{m/s}$) en de hogere (nr. 1-6; $22.00\text{--}0.50\ 10^{-6}\text{m/s}$) infiltratiewaarden. Gelijkaardig aan de afvoervolumes van de RWZI van Edegem (zie Figuur 4-44) valt op dat varianten waarin de infiltratievoorziening gedeeltelijk tot geheel vervangen worden door een buffervoorziening geen aanleiding geven tot een significant verschillende jaarlijkse afvoer naar de RWZI dan in het geval van 100 % infiltratie bij de laagste infiltratiewaarde (nr. 8; $0.01\ 10^{-6}\text{m/s}$). Dit wordt verklaard doordat bij infiltratie water uit het rioolstelsel verdwijnt, waar dit bij bufferen in het rioolstelsel blijft. In de variant met enkel hemelwaterhergebruik sluiten de dalingen van de jaarlijkse afvoervolumes naar de RWZI eveneens aan bij de dalingen voor de laagste infiltratiewaarde.

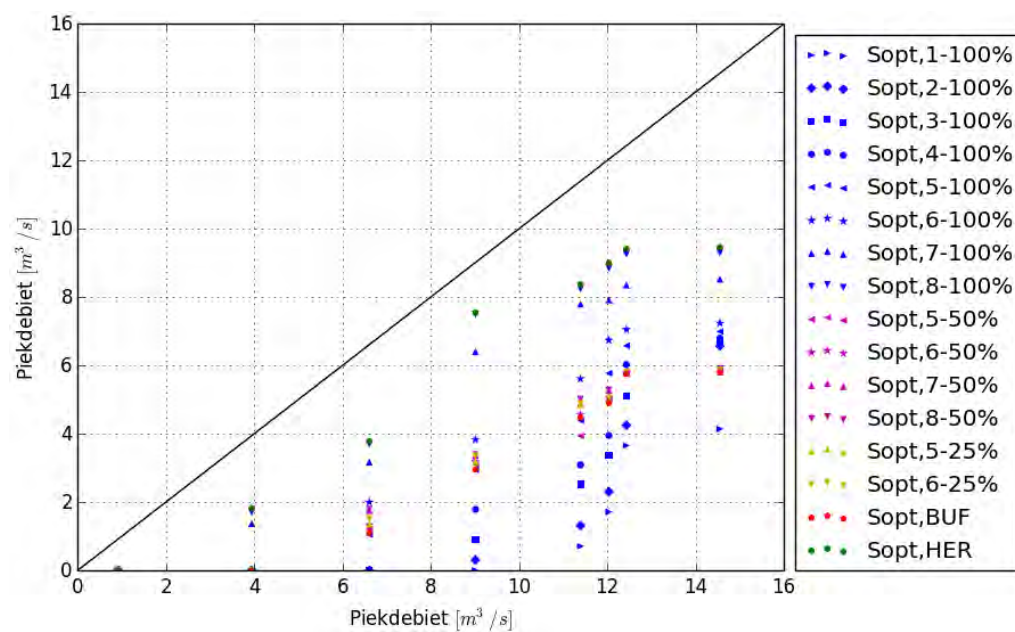
De bronmaatregelen met 100 % infiltratie geven ten opzichte van het basisscenario aanleiding tot een niet-significante tot matige daling van de piekdebieten op de waterloop respectievelijk voor de twee laagste (nr. 7-8; $0.10\text{--}0.01\ 10^{-6}\text{m/s}$) en de hogere (nr. 1-6; $22.00\text{--}0.50\ 10^{-6}\text{m/s}$) infiltratiewaarden. De dalingen van de piekdebieten voor de variant met 100 % bufferen sluiten aan bij de resultaten voor de laagste infiltratiewaarden.

Ook bij het doorrekenen van varianten met 50 % en 25 % infiltratie en daardoor respectievelijk 50 % en 75 % bufferen worden geen significante dalingen bekomen van de piekdebieten ten opzichte van het basisscenario. De beperktere daling van de piekdebieten onder invloed van infiltratie en bufferen in vergelijking met de bovenlopen van het modelgebied houdt onder andere verband met de aanzienlijk grotere stroomgebiedoppervlakte die afwatert naar de Benedenvliet in vergelijking met de bovenlopen.

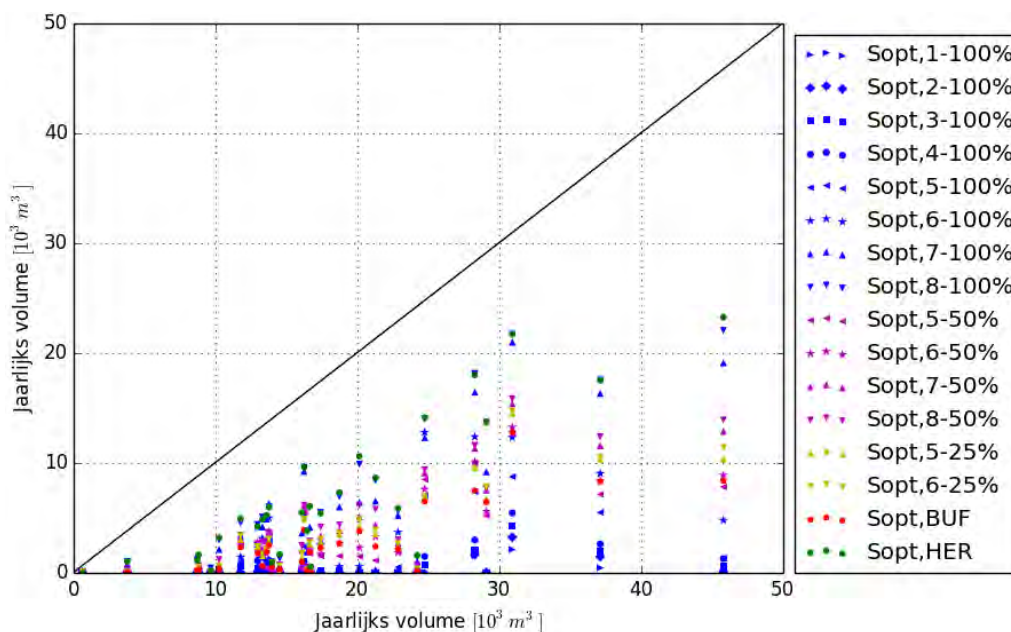
De resultaten voor wat betreft het jaarlijks overstromend volume langs de Benedenvliet bieden een beeld dat aansluit bij dat van de overstortpiekdebieten en -volumes.



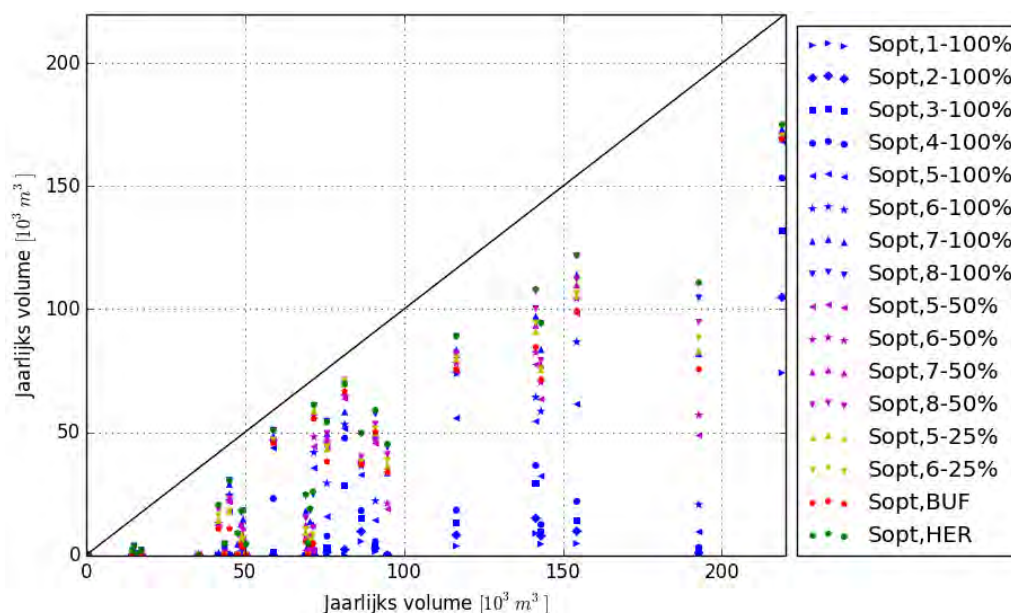
Figuur 4-52: QQ plot van de piekdebieten van de overstorten langsheen de Benedenvliet (overstort St46_HEM21298.3) in het basisscenario (S_0) tegenover het optimalisatiescenario ($S_{opt,i-j}$) met 8 infiltratiecapaciteiten ($i=1-8$; $22.00-0.01 \cdot 10^{-6} \text{ m/s}$), verschillende verhoudingen van infiltreren (j ; 100%, 50%, 25%) in combinatie met bufferen en varianten met enkel bufferen ($S_{opt,BUF}$) en enkel hemelwaterhergebruik ($S_{opt,HER}$)



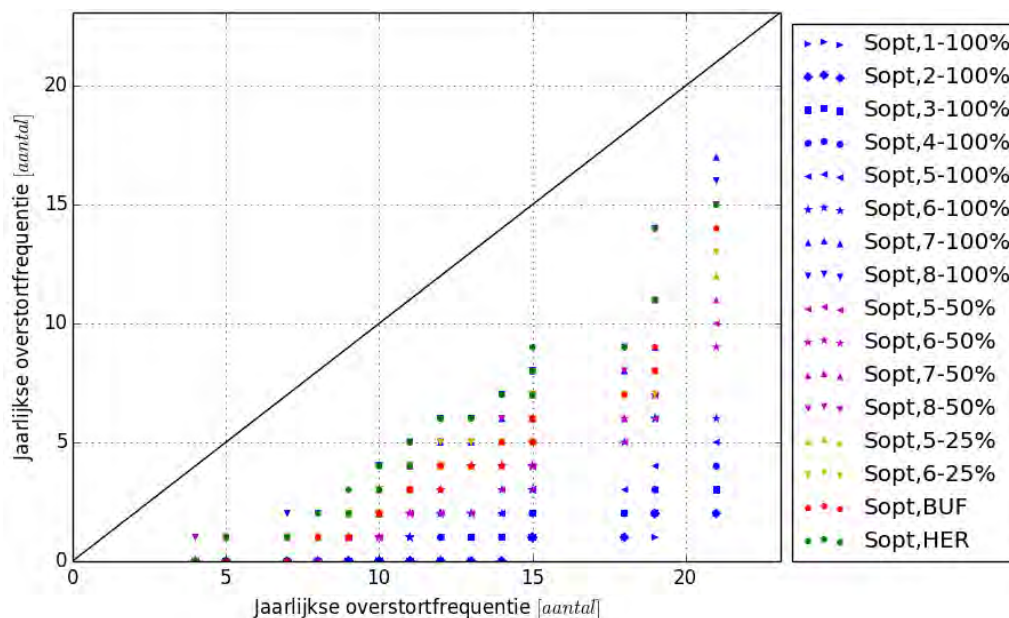
Figuur 4-53: Puntenwolk van de piekdebieten van de overstorten langsheen de Benedenvliet (overstort 46_D21643c.2) in het basisscenario (S_0) tegenover het optimalisatiescenario ($S_{opt,i-j}$) met 8 infiltratiecapaciteiten ($i=1-8$; $22.00-0.01 \cdot 10^{-6} \text{ m/s}$), verschillende verhoudingen van infiltreren (j ; 100%, 50%, 25%) in combinatie met bufferen en varianten met enkel bufferen ($S_{opt,BUF}$) en enkel hemelwaterhergebruik ($S_{opt,HER}$)



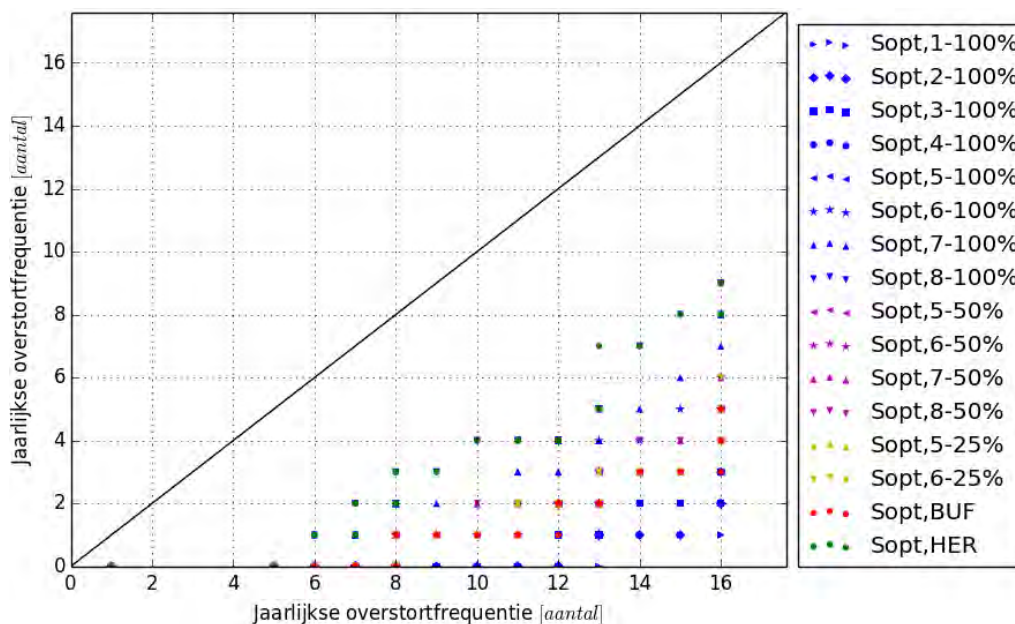
Figuur 4-54: Puntenwolk van de jaarlijkse overstortvolumes op de overstorten langsheen de Benedenvliet (overstort St46_HEM21298.3) in het basisscenario (S_0) tegenover het optimalisatiescenario ($S_{opt,i,j}$) met 8 infiltratiecapaciteiten ($i=1-8$; $22.00-0.01 \cdot 10^{-6} \text{ m/s}$), verschillende verhoudingen van infiltreren (j ; 100%, 50%, 25%) in combinatie met bufferen en varianten met enkel bufferen ($S_{opt,BUF}$) en enkel hemelwaterhergebruik ($S_{opt,HER}$)



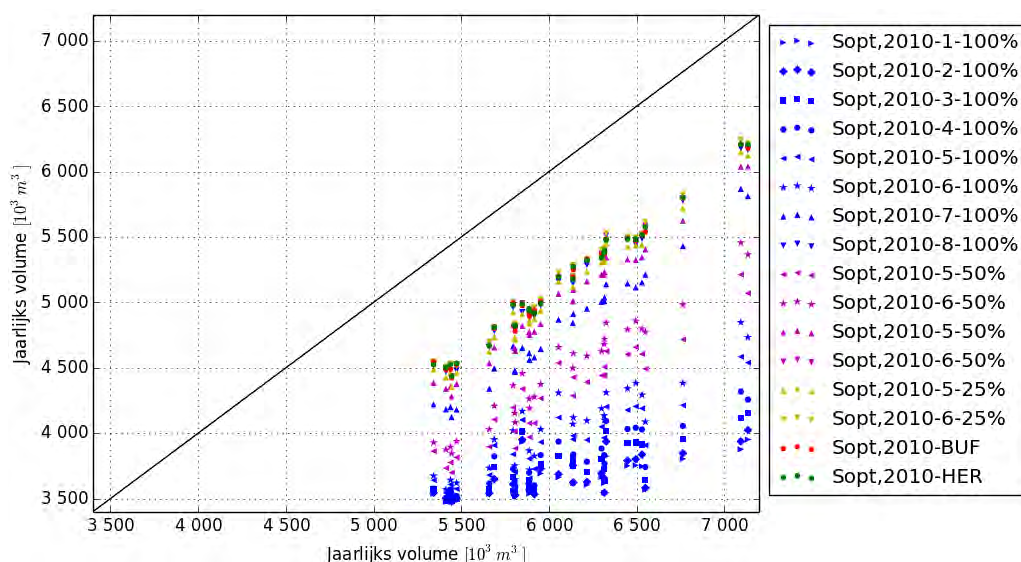
Figuur 4-55: Puntenwolk van de jaarlijkse overstortvolumes op de overstorten langsheen de Benedenvliet (overstort 46_D21643c.2) in het basisscenario (S_0) tegenover het optimalisatiescenario ($S_{opt,i,j}$) met 8 infiltratiecapaciteiten ($i=1-8$; $22.00-0.01 \cdot 10^{-6} \text{ m/s}$), verschillende verhoudingen van infiltreren (j ; 100%, 50%, 25%) in combinatie met bufferen en varianten met enkel bufferen ($S_{opt,BUF}$) en enkel hemelwaterhergebruik ($S_{opt,HER}$)



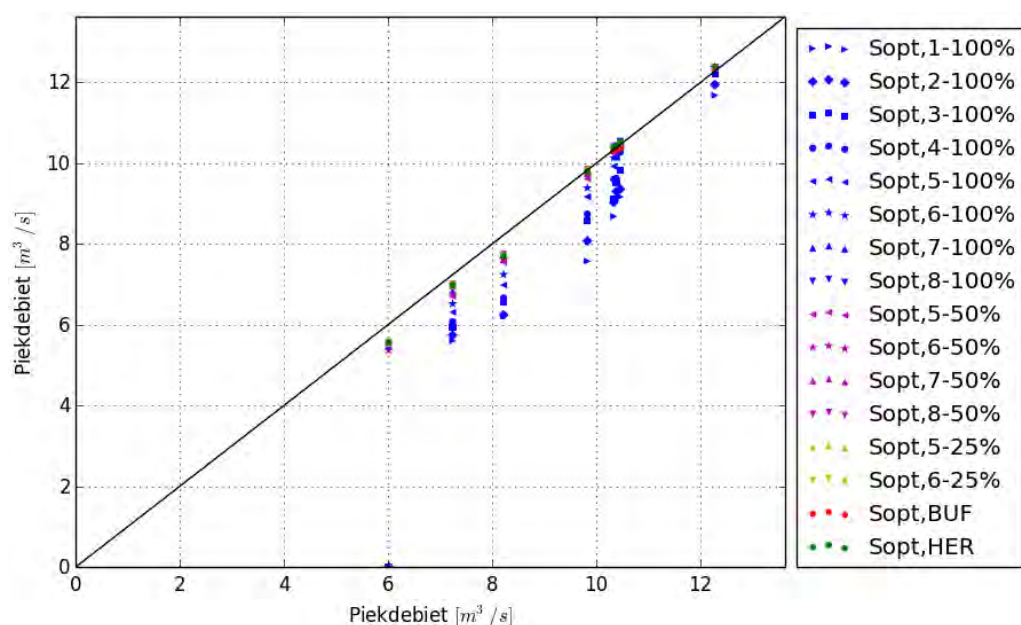
Figuur 4-56: QQ plot van de overstortfrequentie op de overstorten langsheen de Benedenvliet (overstort St46_HEM21298.3) in het basisscenario (S_0) tegenover het optimalisatiescenario ($S_{opt,i,j}$) met 8 infiltratiecapaciteiten ($i=1-8$; $22.00-0.01 \cdot 10^{-6} \text{ m/s}$), verschillende verhoudingen van infiltreren (j ; 100%, 50%, 25%) in combinatie met bufferen en varianten met enkel bufferen ($S_{opt,BUF}$) en enkel hemelwaterhergebruik ($S_{opt,HER}$)



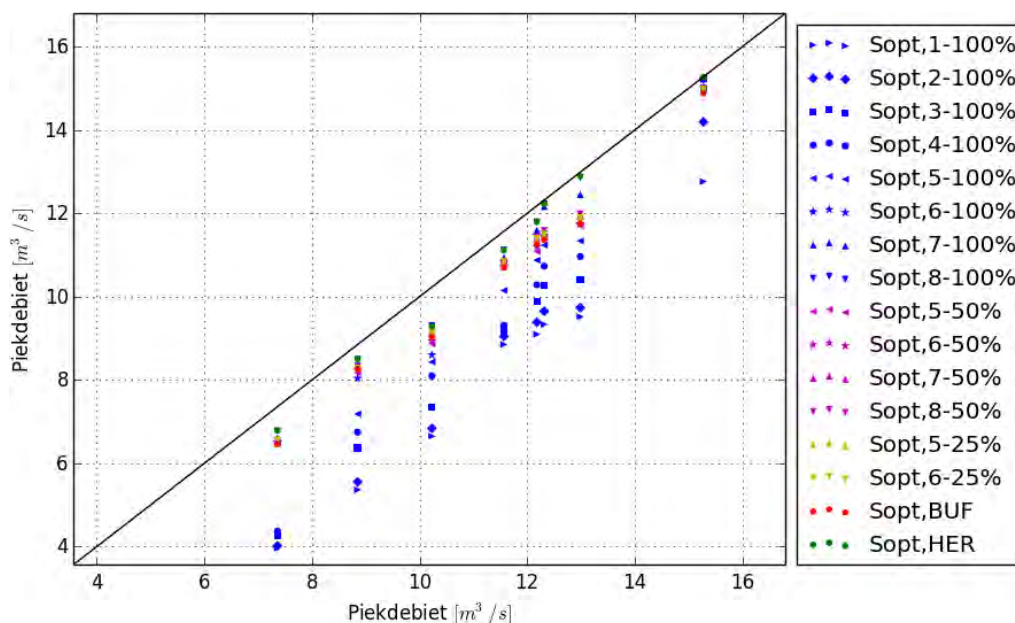
Figuur 4-57: QQ plot van de overstortfrequentie op de overstorten langsheen de Benedenvliet (overstort 46_D21643c.2) in het basisscenario (S_0) tegenover het optimalisatiescenario ($S_{opt,i,j}$) met 8 infiltratiecapaciteiten ($i=1-8$; $22.00-0.01 \cdot 10^{-6} \text{ m/s}$), verschillende verhoudingen van infiltreren (j ; 100%, 50%, 25%) in combinatie met bufferen en varianten met enkel bufferen ($S_{opt,BUF}$) en enkel hemelwaterhergebruik ($S_{opt,HER}$)



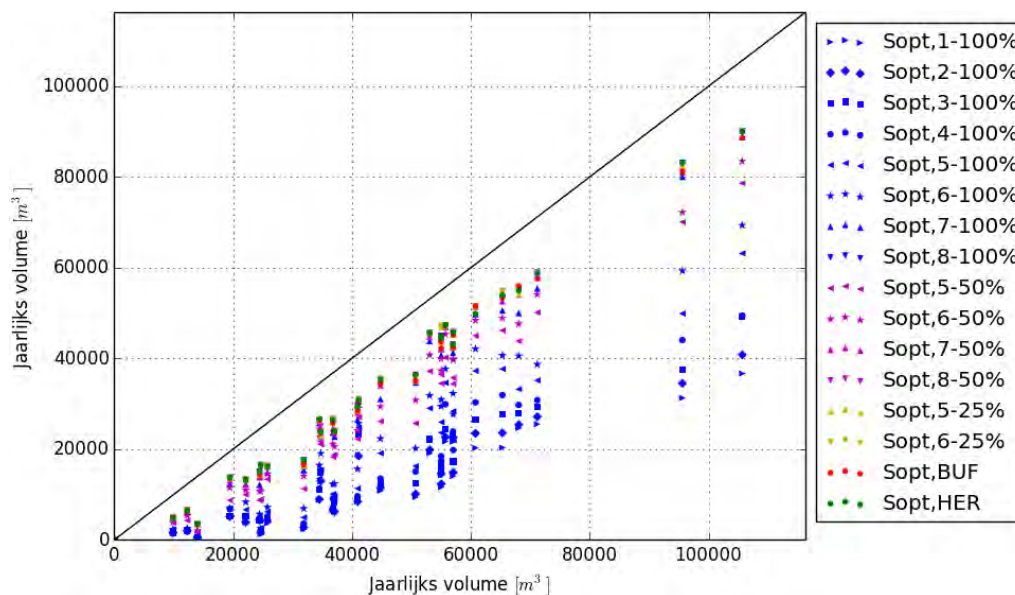
Figuur 4-58: Puntenwolk van de jaarlijkse afvoervolumes naar het RWZI van Aartselaar in het basisscenario (S_0) tegenover het optimalisatiescenario ($S_{opt,i-j}$) met 8 infiltratiecapaciteiten ($i=1-8$; 22.00-0.01 10^{-6} m/s), verschillende verhoudingen van infiltreren (j ; 100%, 50%, 25%) in combinatie met bufferen en varianten met enkel bufferen ($S_{opt,BUF}$) en enkel hemelwaterhergebruik ($S_{opt,HER}$)



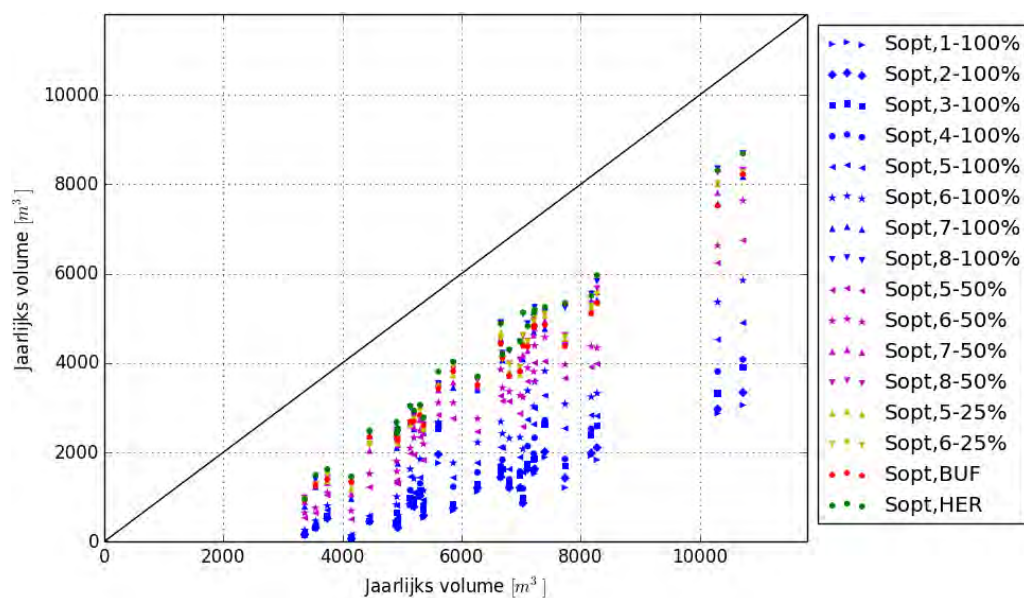
Figuur 4-59: Puntenwolk van de piekdebieten op de Benedenvliet (knooppunt BV072) in het basisscenario (S_0) tegenover het optimalisatiescenario ($S_{opt,i-j}$) met 8 infiltratiecapaciteiten ($i=1-8$; 22.00-0.01 10^{-6} m/s), verschillende verhoudingen van infiltreren (j ; 100%, 50%, 25%) in combinatie met bufferen en varianten met enkel bufferen ($S_{opt,BUF}$) en enkel hemelwaterhergebruik ($S_{opt,HER}$)



Figuur 4-60: QQ plot van de piekdebieten op de Benedenvliet (knooppunt BV123) in het basisscenario (S_0) tegenover het optimalisatiescenario ($S_{opt,i-j}$) met 8 infiltratiecapaciteiten ($i=1-8$; $22.00-0.01 \cdot 10^{-6} \text{ m/s}$), verschillende verhoudingen van infiltreren (j ; 100%, 50%, 25%) in combinatie met bufferen en varianten met enkel bufferen ($S_{opt,BUF}$) en enkel hemelwaterhergebruik ($S_{opt,HER}$)



Figuur 4-61: Puntenwolk van het jaarlijks overstroomd volume langsheen de Benedenvliet (storage area I_BV077R) in het basisscenario (S_0) tegenover het optimalisatiescenario ($S_{opt,i-j}$) met 8 infiltratiecapaciteiten ($i=1-8$; $22.00-0.01 \cdot 10^{-6} \text{ m/s}$), verschillende verhoudingen van infiltreren (j ; 100%, 50%, 25%) in combinatie met bufferen en varianten met enkel bufferen ($S_{opt,BUF}$) en enkel hemelwaterhergebruik ($S_{opt,HER}$)



Figuur 4-62: Puntenwolk van het jaarlijks overstroomd volume langsheen de Benedenvliet (storage area I_BV120R) in het basisscenario (S_0) tegenover het optimalisatiescenario ($S_{opt,i-j}$) met 8 infiltratiecapaciteiten ($i=1-8$; $22.00-0.01 \cdot 10^{-6} \text{ m/s}$), verschillende verhoudingen van infiltreren (j ; 100%, 50%, 25%) in combinatie met bufferen en varianten met enkel bufferen ($S_{opt,BUF}$) en enkel hemelwaterhergebruik ($S_{opt,HER}$)

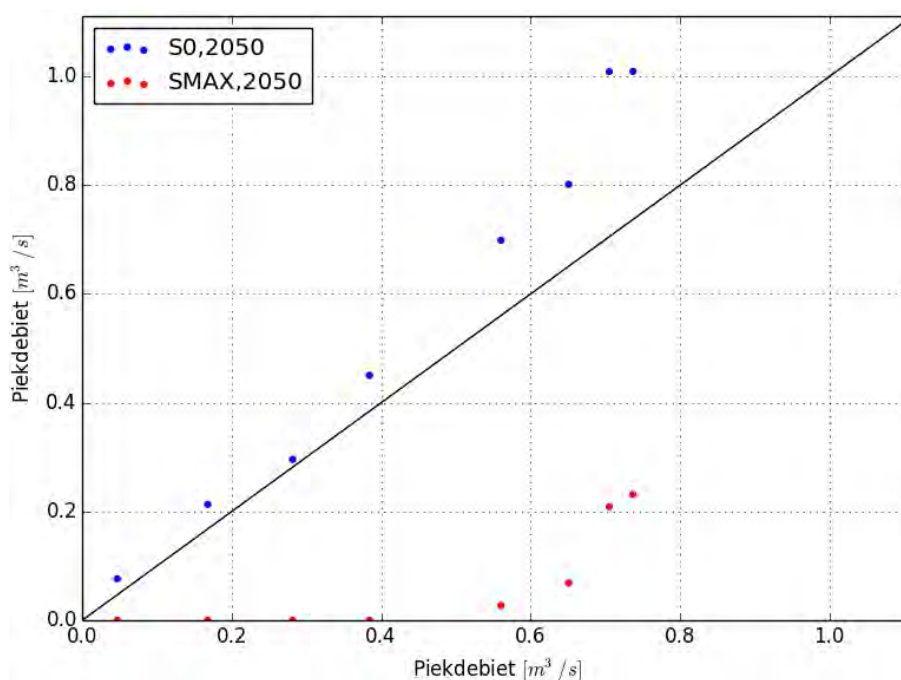
Autonome ontwikkeling in 2050

In wat volgt wordt ingegaan op de impact van autonome ontwikkeling in 2050 op het basisscenario (S_0) en op de mate waarin het maximaal scenario ($S_{\max}=S_{\text{opt},4-100\%}$) toelaat om deze impact op te vangen. In het maximaal scenario worden bronmaatregelen met infiltratie toegepast (infiltratiecapaciteit nr. 4; $1.8 \cdot 10^{-6}$ m/s).

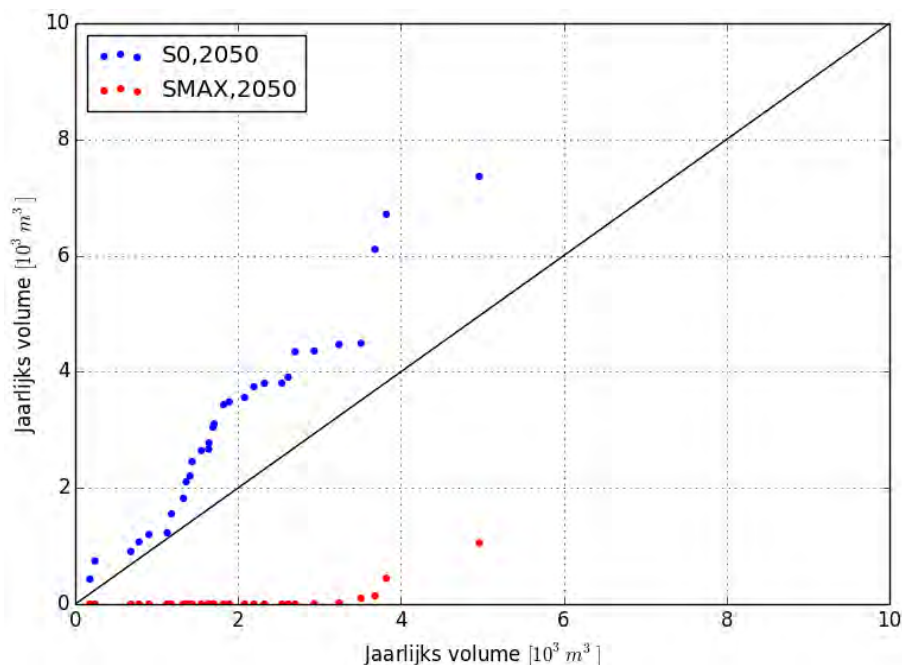
• Mandoersebeek

Langs de Mandoersebeek is er bij autonome ontwikkeling in het basisscenario een stijging van zowel de piekdebieten van de overstorten en op de waterloop als van de jaarlijks overstroomde volumes waarneembaar (Figuur 4-63 tot Figuur 4-69). De jaarlijkse overstortvolumes nemen eveneens toe onder invloed van autonome ontwikkeling.

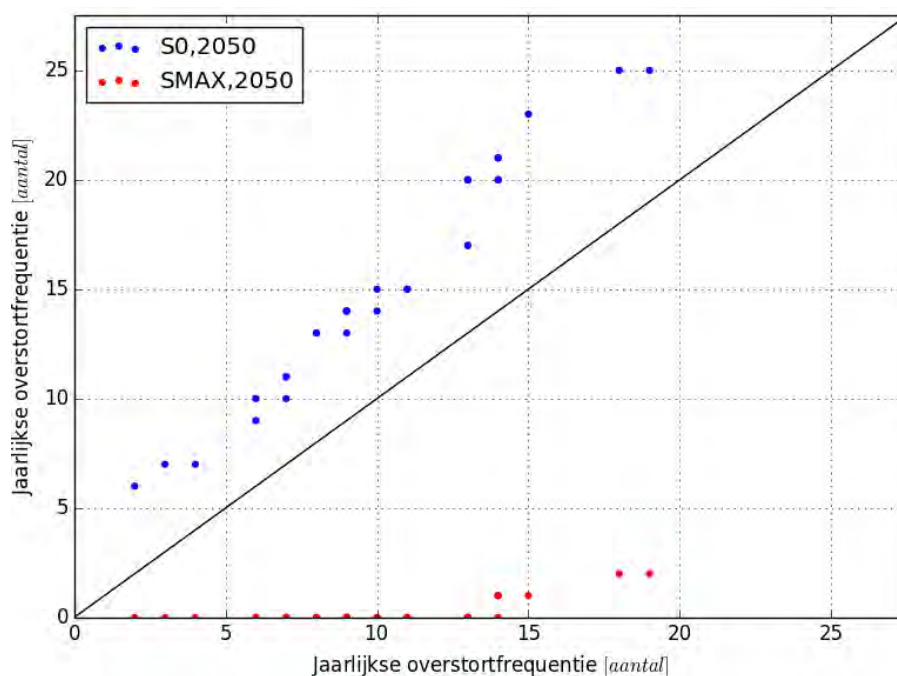
Onder invloed van het maximaal scenario wordt de invloed van autonome ontwikkeling vooral sterk teruggedrongen voor wat betreft de piekdebieten van de overstorten. De hoogfrequente overstortwerking wordt nagenoeg te niet gedaan. Voor wat betreft de piekdebieten op de waterlopen en de jaarlijks overstroomde volumes wordt in het maximale scenario een vermindering gesimuleerd ten opzichte van het basisscenario. De impact van autonome ontwikkeling wordt echter niet opgevangen. De beperkte invloed op de piekdebieten op de waterloop is te wijten aan de beperkte aangesloten verharde oppervlakte in dit gebied.



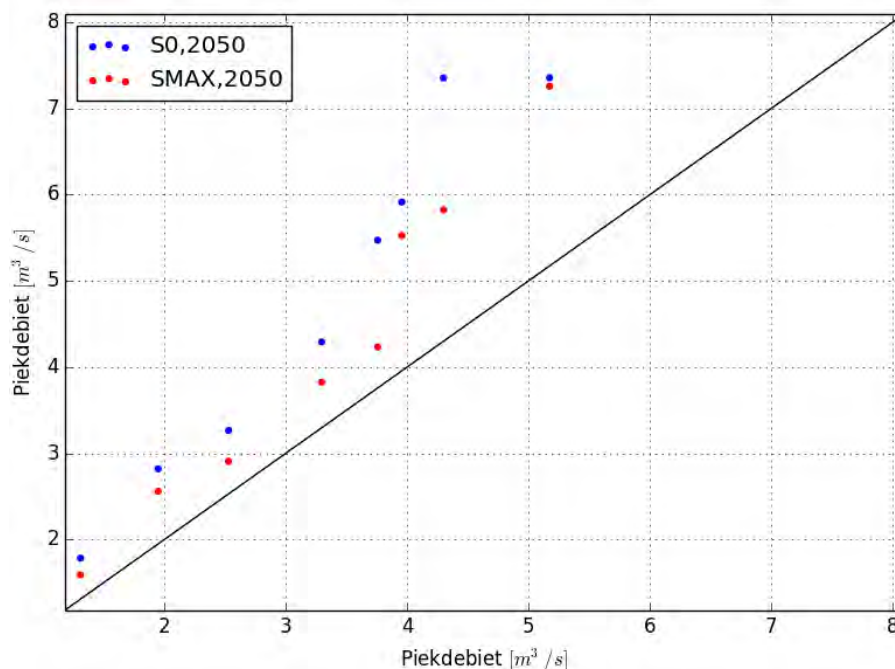
Figuur 4-63: Puntenwolk van de piekdebieten op overstort St43_KT950.2 langs de Mandoersebeek in het basisscenario (S_0) in 2010 tegenover het basisscenario ($S_{0,2050}$) en het maximaal scenario ($S_{\max,2050}$) na autonome ontwikkeling in 2050



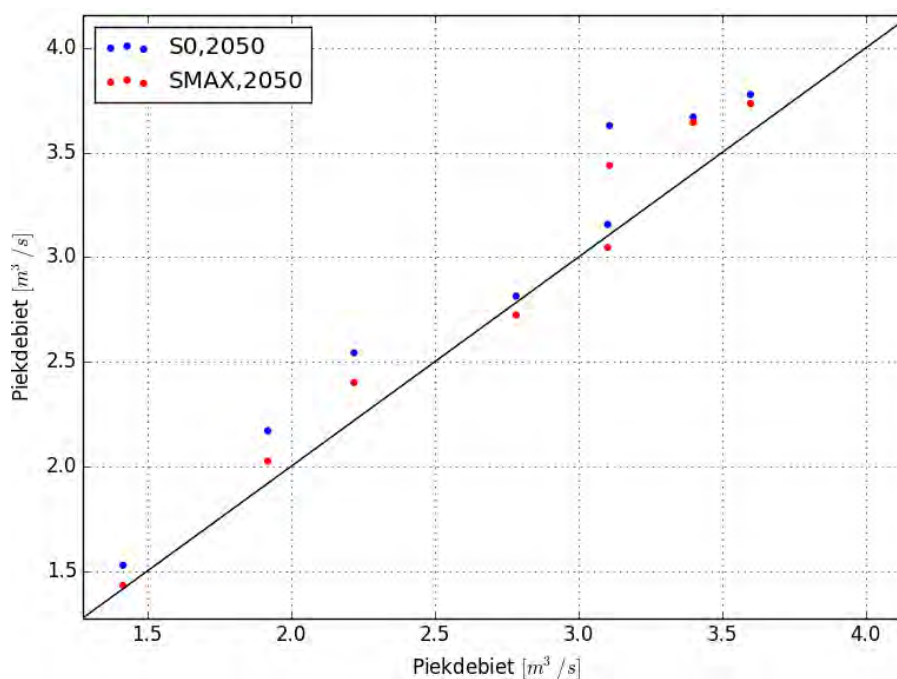
Figuur 4-64: QQ plot van de overstortvolumes op de Mandoersebeek (overstort St43_KT950.2) in het basisscenario (S_0) in 2010 tegenover het basisscenario ($S_{0,2050}$) en het maximaal scenario ($S_{max,2050}$) na autonome ontwikkeling in 2050



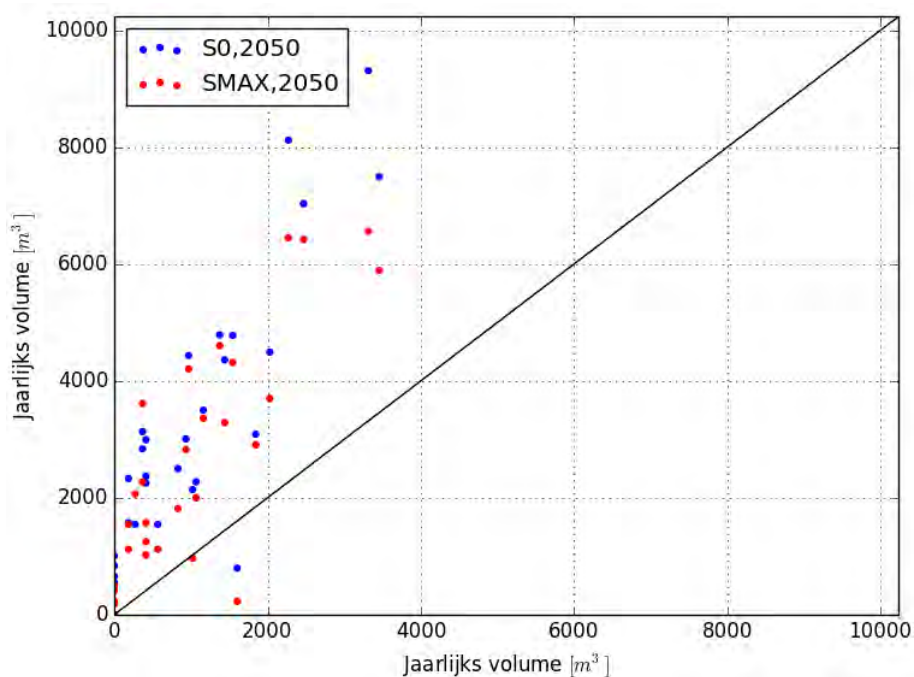
Figuur 4-65: QQ plot van de jaarlijkse overstortfrequentie langs de Mandoersebeek (overstort: St43_KT950.2) in het basisscenario (S_0) in 2010 tegenover het basisscenario ($S_{0,2050}$) en het maximaal scenario ($S_{max,2050}$) na autonome ontwikkeling in 2050



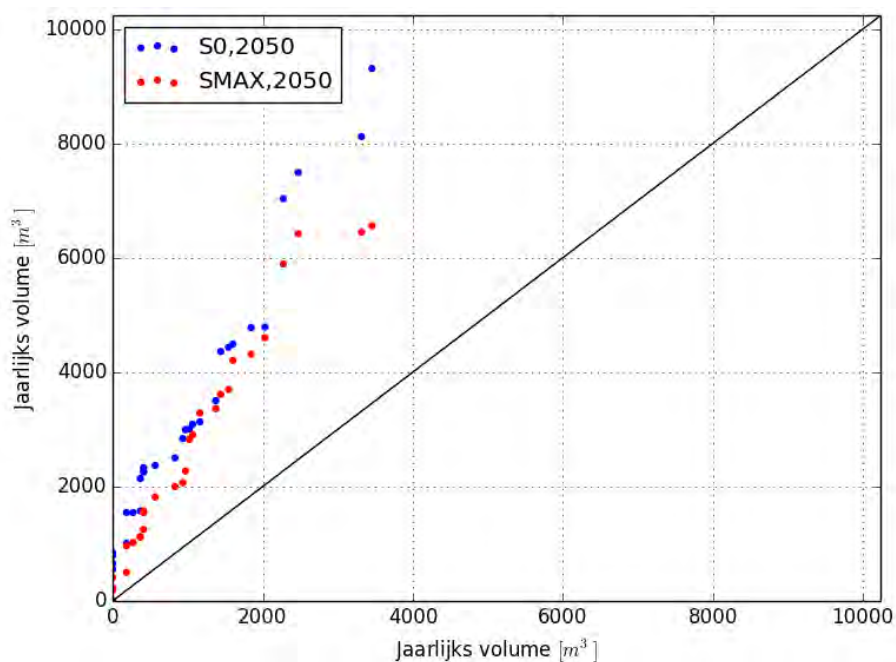
Figuur 4-66: QQ plot van de piekdebieten op de Mandoersebeek (Knooppunt: MAN059) in het basisscenario (S_0) in 2010 tegenover het basisscenario ($S_{0,2050}$) en het maximaal scenario ($S_{max,2050}$) na autonome ontwikkeling in 2050



Figuur 4-67: Puntenwolk van de piekdebieten op de Mandoersebeek (Knooppunt: MAN079) in het basisscenario (S_0) in 2010 tegenover het basisscenario ($S_{0,2050}$) en het maximaal scenario ($S_{max,2050}$) na autonome ontwikkeling in 2050



Figuur 4-68: Puntenwolk van het jaarlijks overstroomd volume langsheen de Mandoersebeek (Storage area: I_MAN068R) in het basisscenario (S_0) in 2010 tegenover het basisscenario ($S_{0,2050}$) en het maximaal scenario ($S_{max,2050}$) na autonome ontwikkeling in 2050

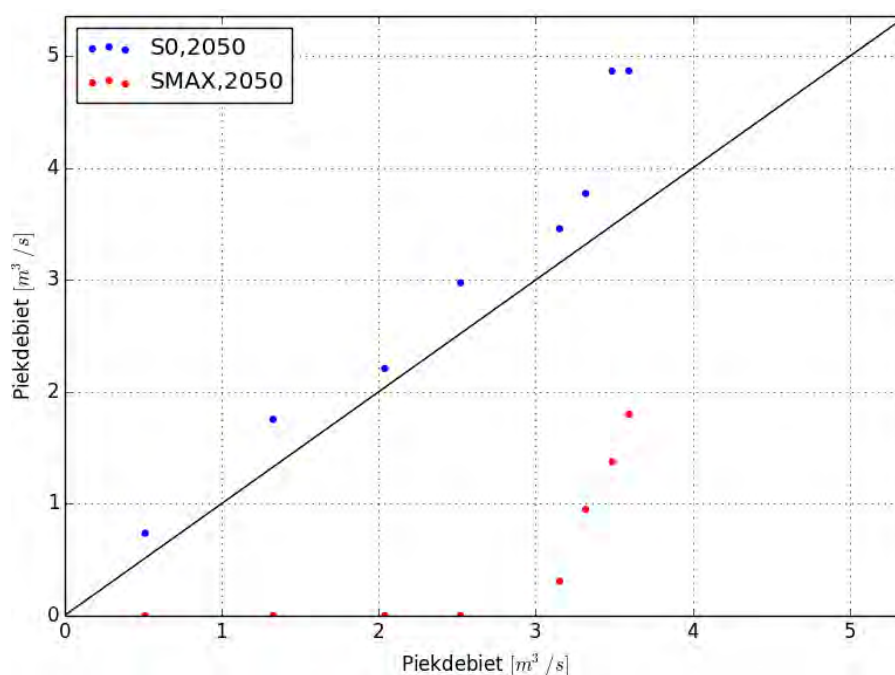


Figuur 4-69: QQ plot van het jaarlijkse overstroomd volume langsheen de Mandoersebeek (Storage area: I_MAN068R) in het basisscenario (S_0) in 2010 tegenover het basisscenario ($S_{0,2050}$) en het maximaal scenario ($S_{max,2050}$) na autonome ontwikkeling in 2050

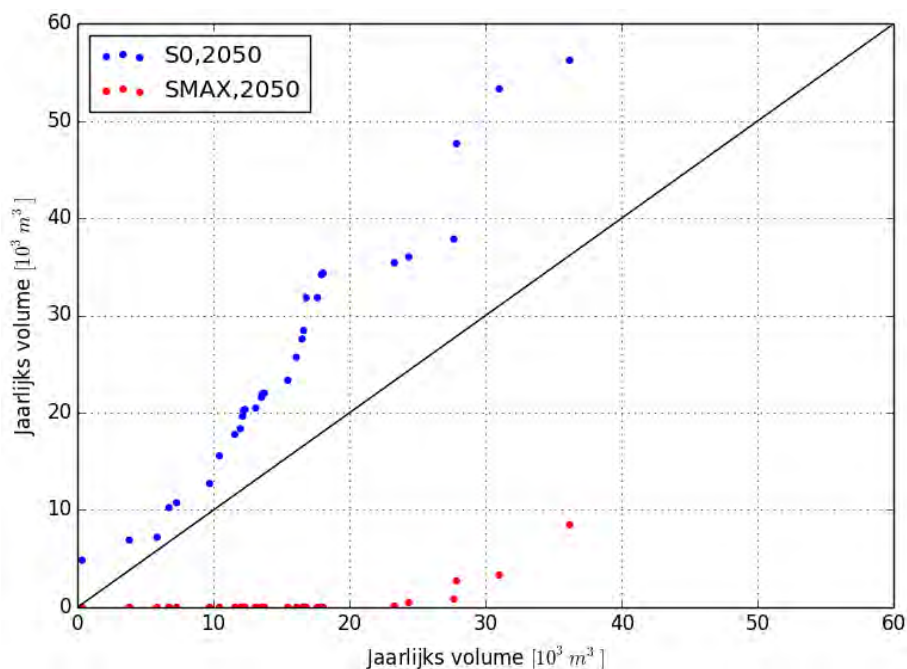
• Edegemsebeek

In Figuur 4-70 tot en met Figuur 4-75 nemen de piekdebieten op de waterloop en van de overstorten in beperkte mate toe onder invloed van autonome ontwikkeling. De hiermee gepaard gaande stijging van de overstortvolumes en –frequenties is echter overwegend sterker. Dit gaat ook op voor het jaarlijks overstroomd volume. Voor de volumes die jaarlijks naar het RWZI van Edegem (modelelementen 43_10008.1, St43_14.1, St43_588.3 en St43_8.1) afgevoerd worden is er onder invloed van autonome ontwikkeling een stijging merkbaar.

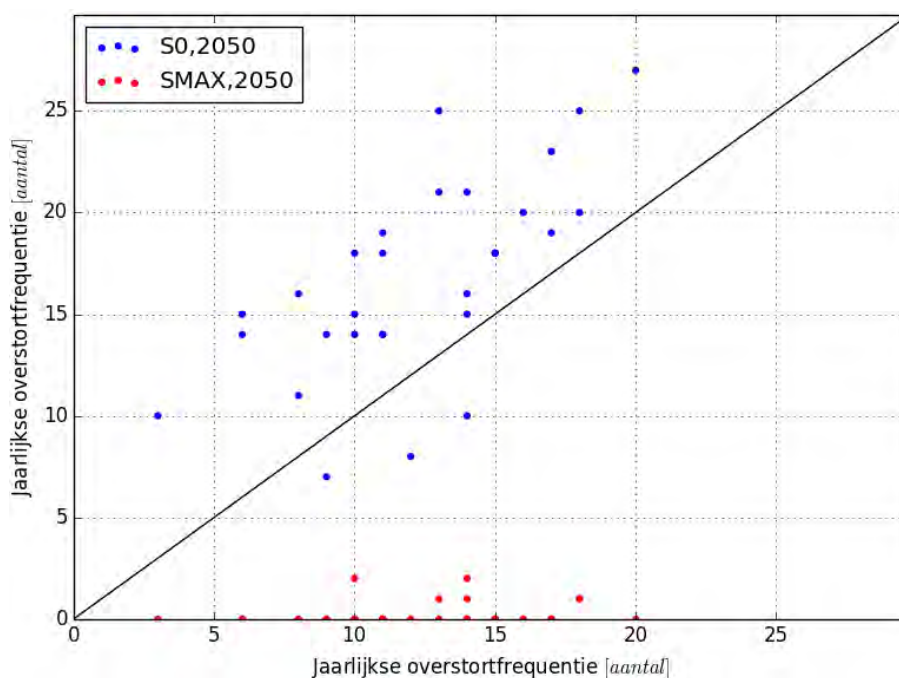
In het algemeen wordt het in maximaal scenario de invloed van autonome ontwikkeling opgevangen. De piekdebieten op de waterlopen worden sterk teruggedrongen tot onder de waarden in het basisscenario in 2010. Deze daling is te wijten aan de verstedelijking van het gebied. Hierdoor is de impact van de bronmaatregelen op de waterloop veel groter dan langs de Mandoersebeek. De overstortwerking alsook de overstortvolumes wordt te niet gedaan voor hoogfrequente events. Het jaarlijks overstroomd volume langs de Edegemsebeek wordt, met uitzondering van een aantal uitzonderlijke events, teruggebracht naar waarden die lager zijn dan in het basisscenario in 2010. Ook de jaarlijkse afvoervolumes naar de RWZI van Edegem liggen lager dan in het basisscenario in 2010.



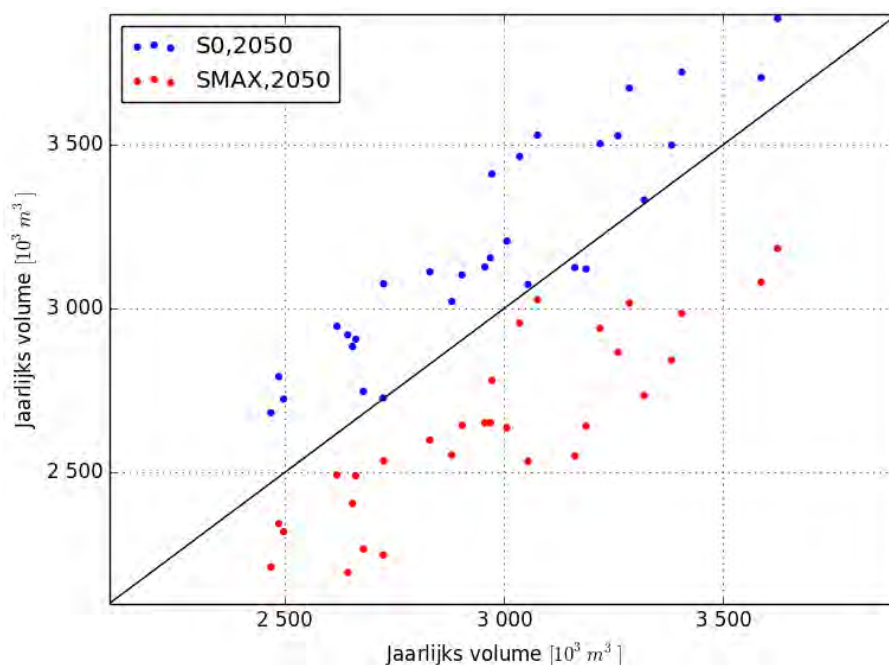
Figuur 4-70: QQ plot van de overstort piekdebieten langs de Edegemsebeek (overstort St43_14.2) in het basisscenario (S_0) in 2010 tegenover het basisscenario ($S_{0,2050}$) en het maximaal scenario ($S_{max,2050}$) na autonome ontwikkeling in 2050



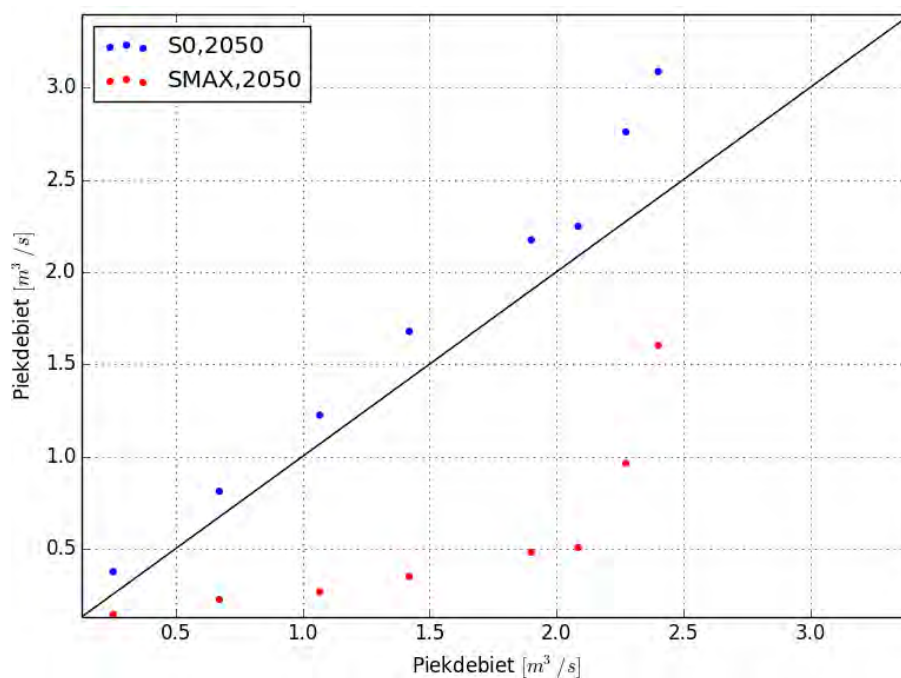
Figuur 4-71: QQ plot van de jaarlijkse overstortvolumes langsheen de Edegemsebeek (overstort St43_14.2) in het basisscenario (S_0) in 2010 tegenover het basisscenario ($S_{0,2050}$) en het maximaal scenario ($S_{max,2050}$) na autonome ontwikkeling in 2050



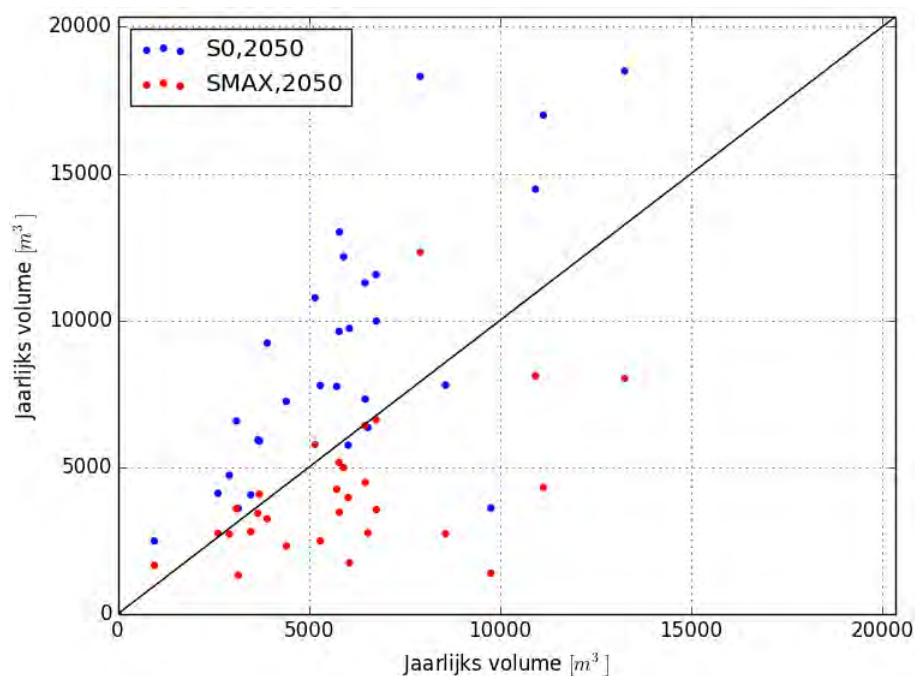
Figuur 4-72: Puntenwolk van de jaarlijkse overstortfrequentie langsheen de Edegemsebeek (overstort St43_14.2) in het basisscenario (S_0) in 2010 tegenover het basisscenario ($S_{0,2050}$) en het maximaal scenario ($S_{max,2050}$) na autonome ontwikkeling in 2050



Figuur 4-73: Puntenwolk van de jaarlijkse afvoervolumes naar de RWZI van Edegem in het basisscenario (S_0) in 2010 tegenover het basisscenario ($S_{0,2050}$) en het maximaal scenario ($S_{max,2050}$) na autonome ontwikkeling in 2050



Figuur 4-74: Puntenwolk van de piekdebieten op de Edegemsebeek (knooppunt EDB009) in het basisscenario (S_0) in 2010 tegenover het basisscenario ($S_{0,2050}$) en het maximaal scenario ($S_{max,2050}$) na autonome ontwikkeling in 2050

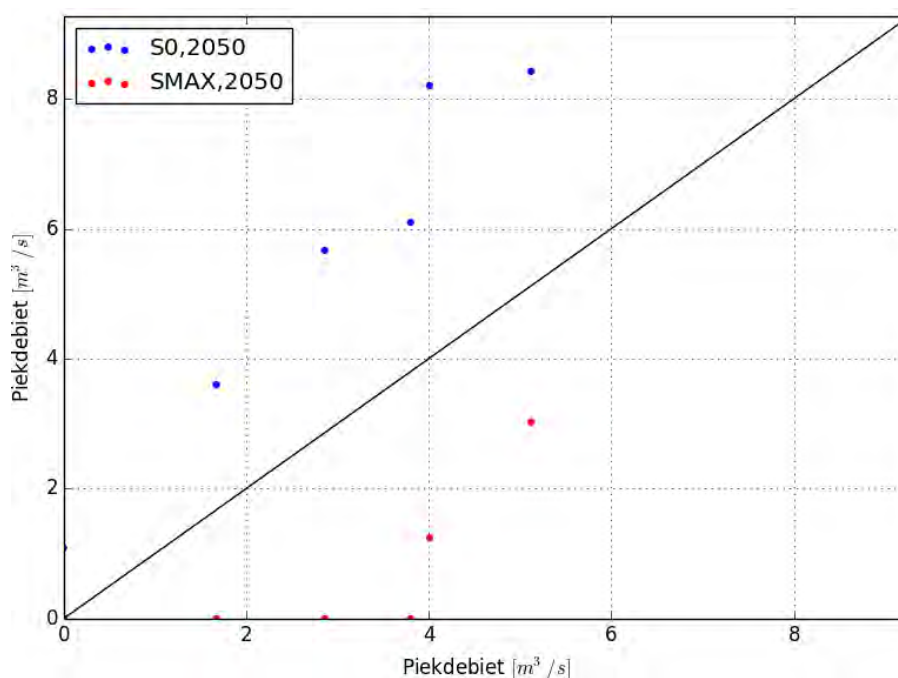


Figuur 4-75: Puntenwolk van het jaarlijks overstroomd volume langsheen de Edegemsebeek (storage area r_EDB019R) in het basisscenario (S_0) in 2010 tegenover het basisscenario ($S_{0,2050}$) en het maximaal scenario ($S_{max,2050}$) na autonome ontwikkeling in 2050

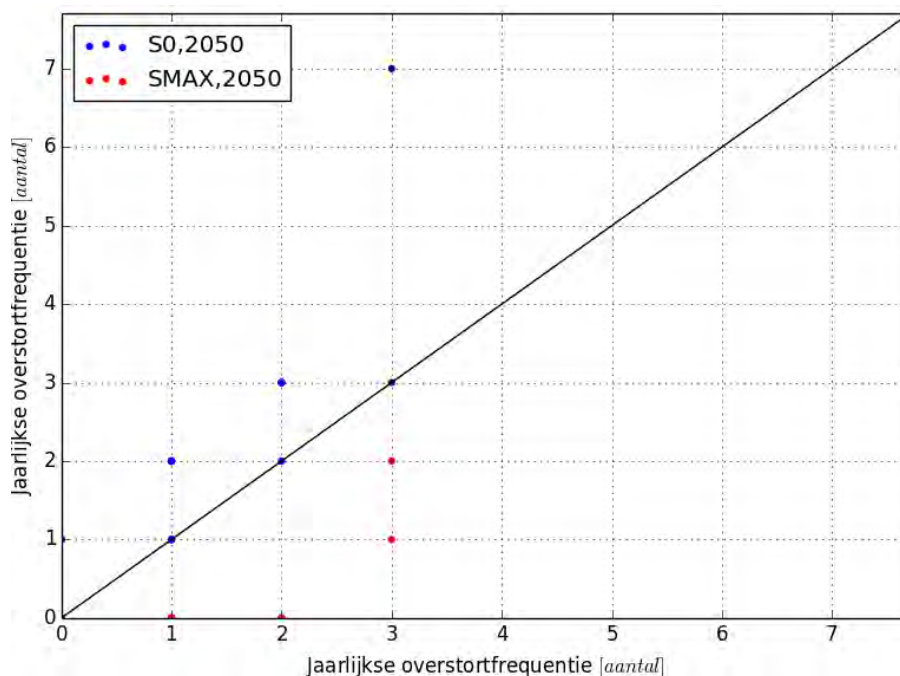
• Kleine Struisbeek

In Figuur 4-76 tot en met Figuur 4-79 worden de resultaten weergegeven voor de Kleine Struisbeek. De piekdebieten van de overstorten nemen sterk toe onder invloed van autonome ontwikkeling. De overstortfrequentie wordt slechts beperkt beïnvloed door autonome ontwikkeling. De piekdebieten op de waterloop stijgen, met uitzondering van een aantal uitzonderlijke events, eerder beperkt onder invloed van autonome ontwikkeling. De jaarlijks overstroomde volumes langs de waterloop nemen sterk toe onder invloed van autonome ontwikkeling.

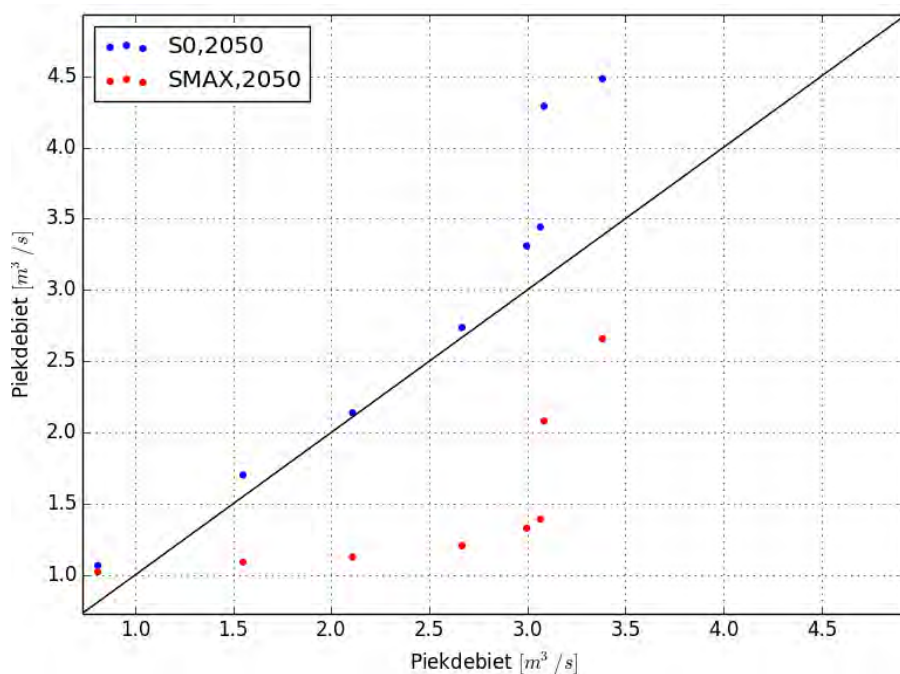
In het maximaal scenario wordt de invloed van autonome ontwikkeling op de piekdebieten op de waterlopen sterk teruggedrongen tot onder de waarden in het basisscenario in 2010. Deze daling is te wijten aan de sterke verstedelijking van dit gebied. De overstortwerking wordt te niet gedaan voor hoogfrequente events. De jaarlijks overstroomde volumes langs de waterloop worden sterk verminderd, maar de invloed van autonome ontwikkeling wordt niet te niet gedaan.



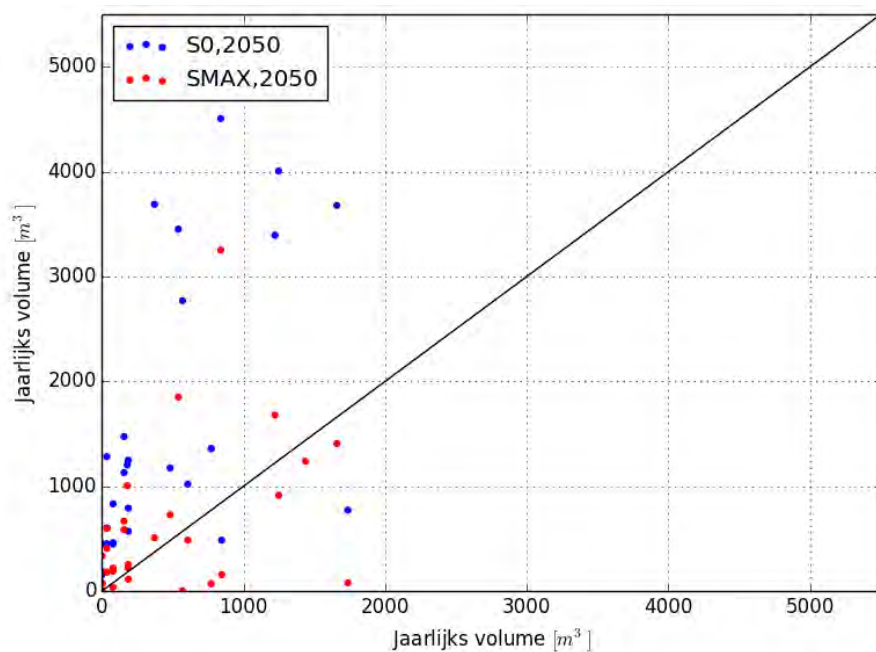
Figuur 4-76: QQ plot van de piekdebieten van een overstort langs de Kleine Struisbeek (overstort St46_AQU002.1) in het basisscenario (S_0) in 2010 tegenover het basisscenario ($S_{0,2050}$) en het maximaal scenario ($S_{max,2050}$) na autonome ontwikkeling in 2050



Figuur 4-77: Puntenwolk van de overstortfrequentie langsheen de Kleine Struisbeek (overstort St46_AQU002.1) in het basisscenario (S_0) in 2010 tegenover het basisscenario ($S_{0,2050}$) en het maximaal scenario ($S_{max,2050}$) na autonome ontwikkeling in 2050



Figuur 4-78: QQ plot van de piekdebieten op de Kleine Struisbeek (knooppunt KST005) in het basisscenario (S_0) in 2010 tegenover het basisscenario ($S_{0,2050}$) en het maximaal scenario ($S_{max,2050}$) na autonome ontwikkeling in 2050

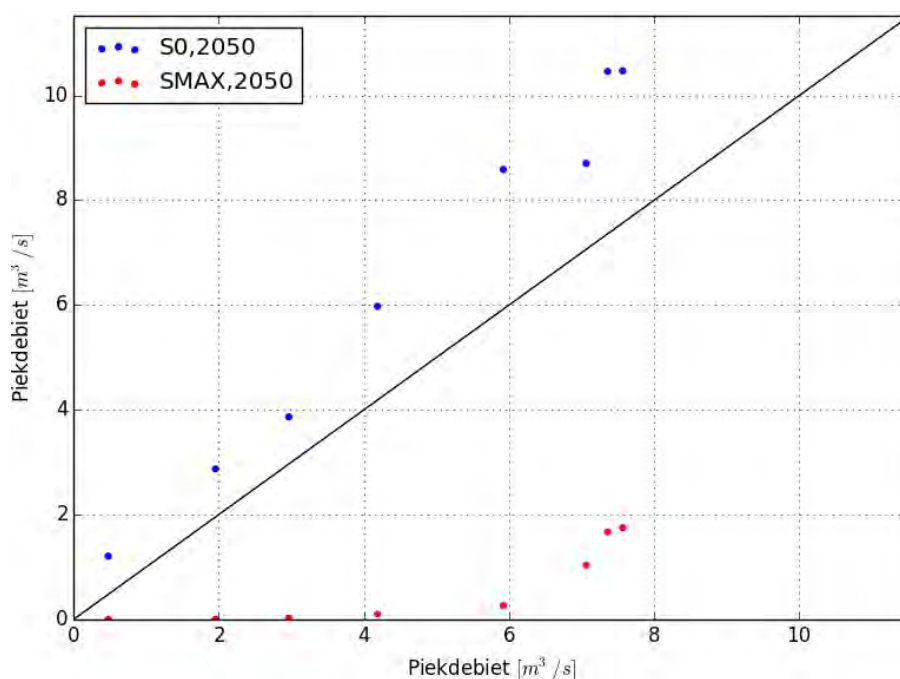


Figuur 4-79: QQ plot van de jaarlijkse overstroomde volumes langs de Kleine Struisbeek (Storage area r_KST030R) in het basisscenario (S_0) in 2010 tegenover het basisscenario ($S_{0,2050}$) en het maximaal scenario ($S_{max,2050}$) na autonome ontwikkeling in 2050

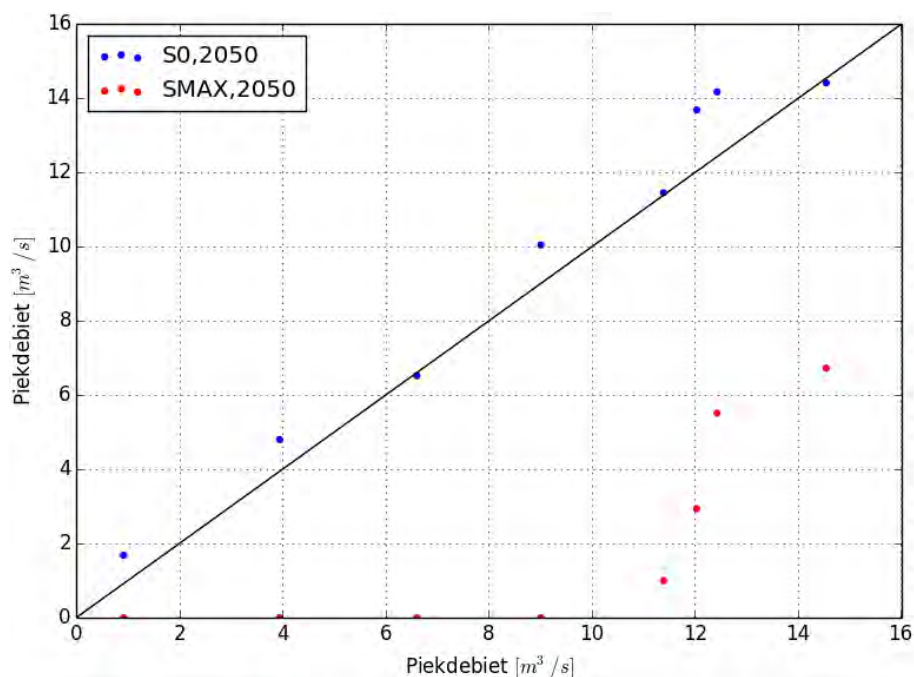
• **Benedenvliet**

In Figuur 4-80 tot Figuur 4-90 worden de resultaten voor de Benedenvliet weergegeven. Wat betreft de piekdebieten van de overstorten geeft autonome ontwikkeling plaatsafhankelijk een significante toename dan wel geen toename van de piekdebieten. Ook de overstortfrequentie, het jaarlijks overstortvolume, het jaarlijks overstromingsvolume en de jaarlijkse afgevoerde volumes naar de RWZI van Aartselaar (modelelementen 46_21462.1, 46_D21308a.1, 46_D21308a.2, 46_D21350a.2, 46_HEMD21298.1 en St46_AQU004.2) nemen aanzienlijk toe als gevolg van autonome ontwikkeling. Wat deze laatste variabele betreft moet echter opgemerkt worden dat er langs de bypass onder de autosnelweg A12 volume vanuit de waterloop in de riolering stroomt en zo bijdraagt tot verhoogde afvoervolumes. De piekdebieten op de waterloop stijgen significant onder invloed van autonome ontwikkeling.

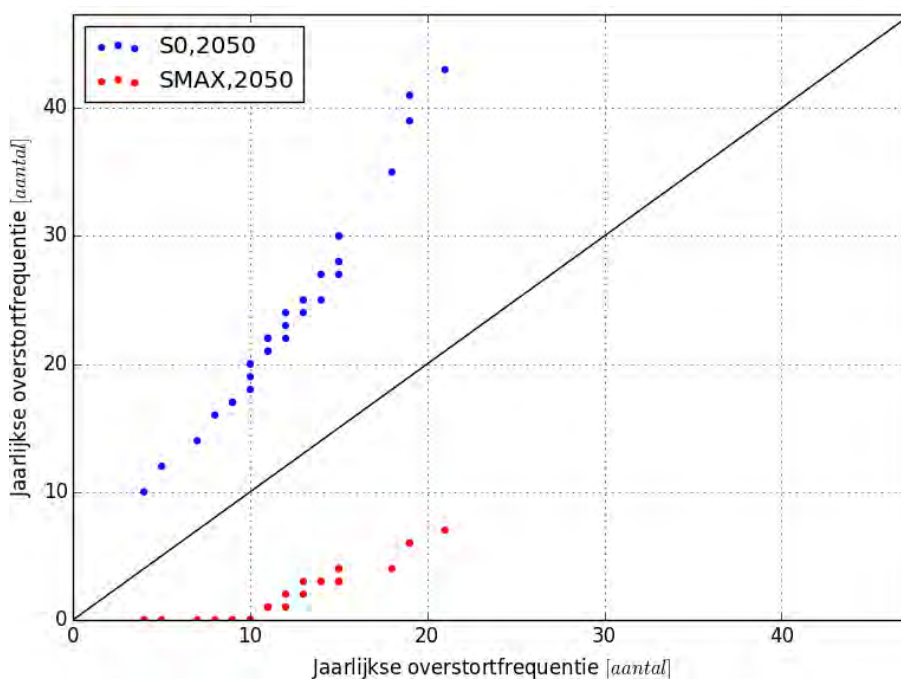
In het maximaal scenario wordt de invloed van autonome ontwikkeling op de piekdebieten op de waterlopen, met uitzondering van een aantal events, opgevangen. De overstortwerking wordt nagenoeg te niet gedaan voor hoogfrequente events. Ook het jaarlijks overstroomd volume langs de waterloop wordt teruggebracht tot waarden lager dan in het basisscenario in 2010. Dit geldt ook voor de volumes die op jaarbasis afgevoerd worden naar de RWZI van Aartselaar.



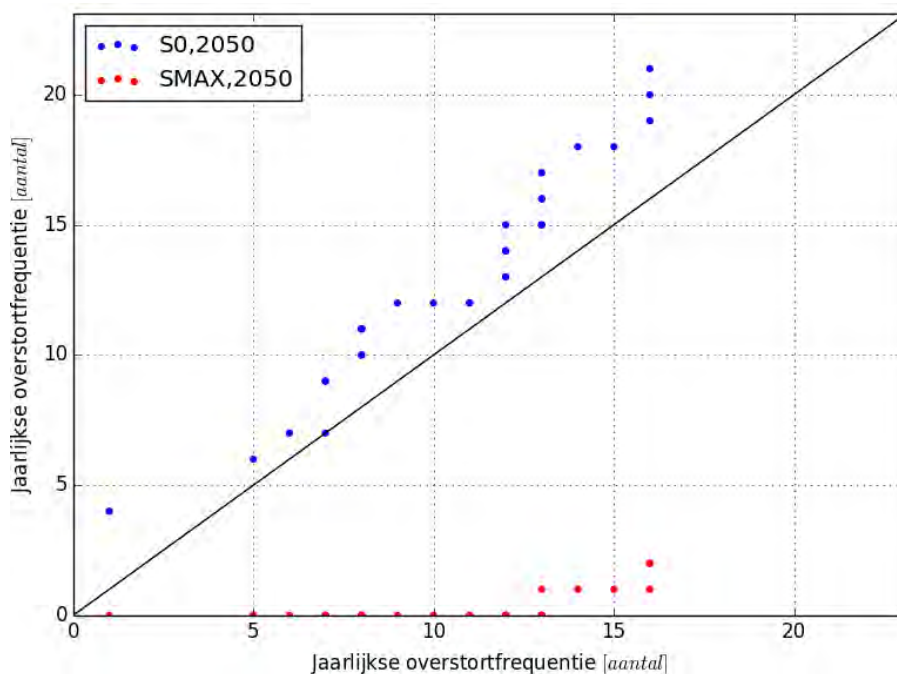
Figuur 4-80: QQ plot van de piekdebieten van de overstorten langs de Benedenvliet (overstort St46_HEMD21298.3) in het basisscenario (S_0) in 2010 tegenover het basisscenario ($S_{0,2050}$) en het maximaal scenario ($S_{max,2050}$) na autonome ontwikkeling in 2050



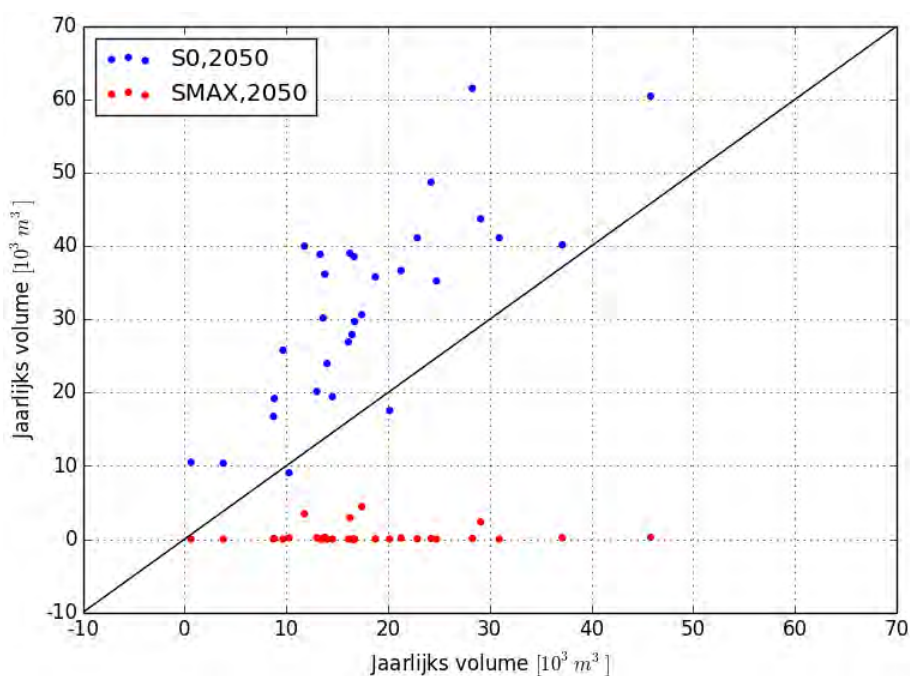
Figuur 4-81: Puntenwolk van de piekdebieten op de overstorten langs de Benedenvliet (overstort 46_D21643c.2) in het basisscenario (S_0) in 2010 tegenover het basisscenario ($S_{0,2050}$) en het maximaal scenario ($S_{max,2050}$) na autonome ontwikkeling in 2050



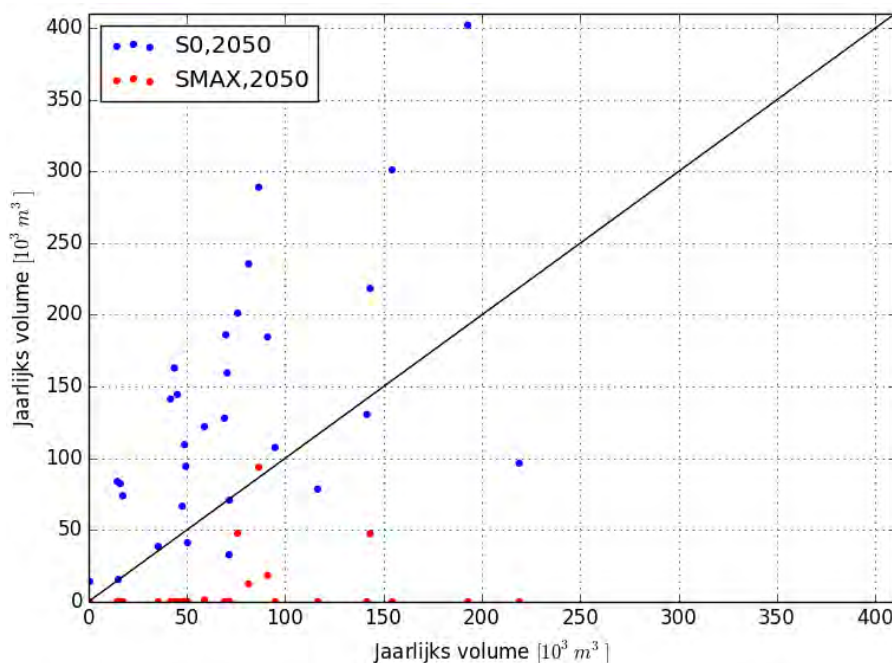
Figuur 4-82: QQ plot van de overstortfrequentie op de overstorten langs de Benedenvliet (overstort St46_HEM21298.3) in het basisscenario (S_0) in 2010 tegenover het basisscenario ($S_{0,2050}$) en het maximaal scenario ($S_{max,2050}$) na autonome ontwikkeling in 2050



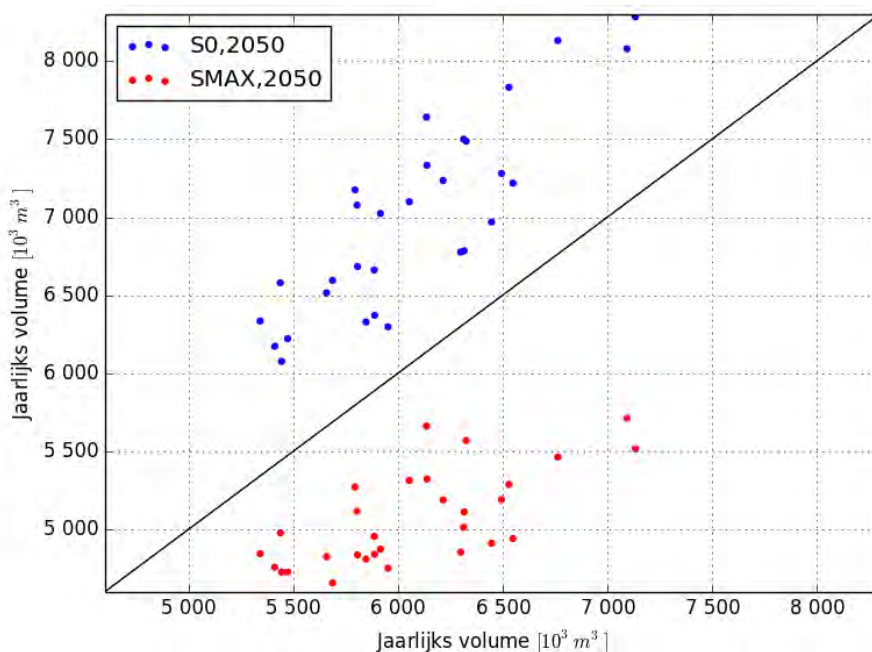
Figuur 4-83: QQ plot van de overstortfrequentie op de overstorten langs de Benedenvliet (overstort 46_D21643c.2) in het basisscenario (S_0) in 2010 tegenover het basisscenario ($S_{0,2050}$) en het maximaal scenario ($S_{max,2050}$) na autonome ontwikkeling in 2050



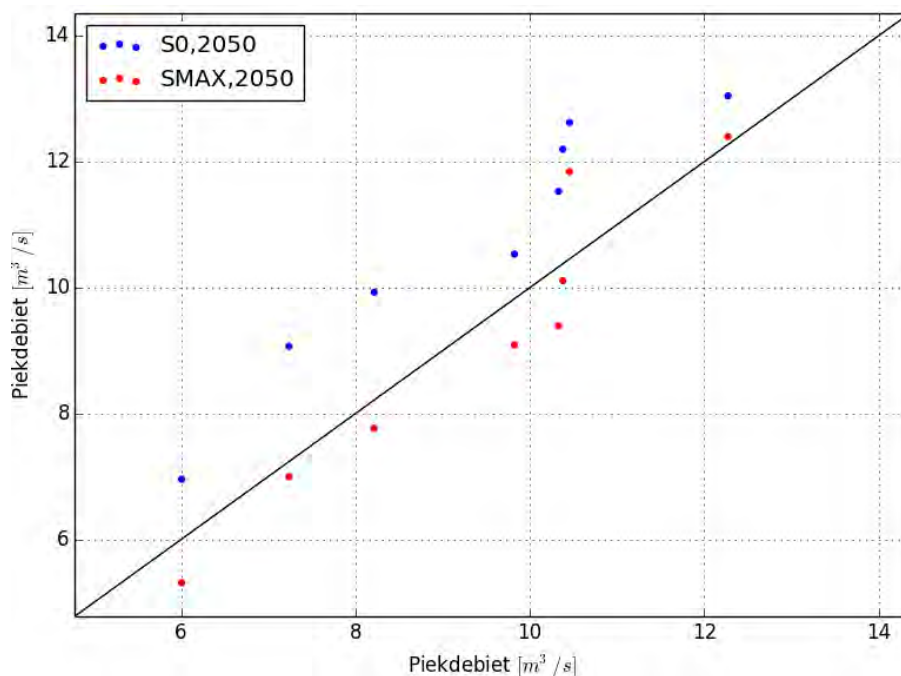
Figuur 4-84: Puntenwolk van de jaarlijkse overstortvolumes op de overstorten langs de Benedenvliet (overstort St46_HEM21298.3) in het basisscenario (S_0) in 2010 tegenover het basisscenario ($S_{0,2050}$) en het maximaal scenario ($S_{max,2050}$) na autonome ontwikkeling in 2050



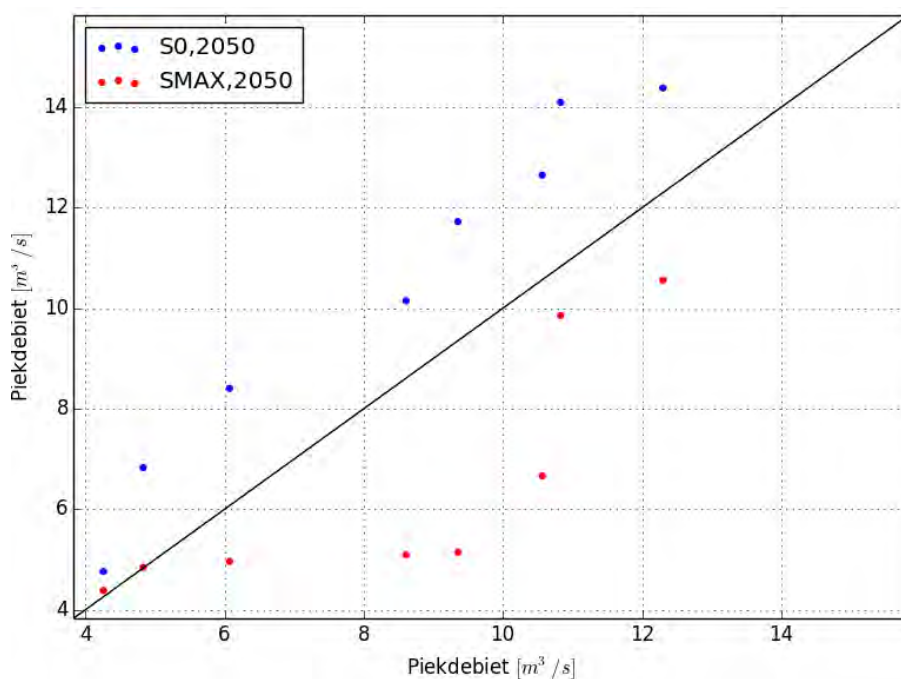
Figuur 4-85: Puntenwolk van de jaarlijkse overstortvolumes op de overstorten langs de Benedenvliet (overstort 46_D21643c.2) in het basisscenario (S_0) in 2010 tegenover het basisscenario ($S_{0,2050}$) en het maximaal scenario ($S_{max,2050}$) na autonome ontwikkeling in 2050



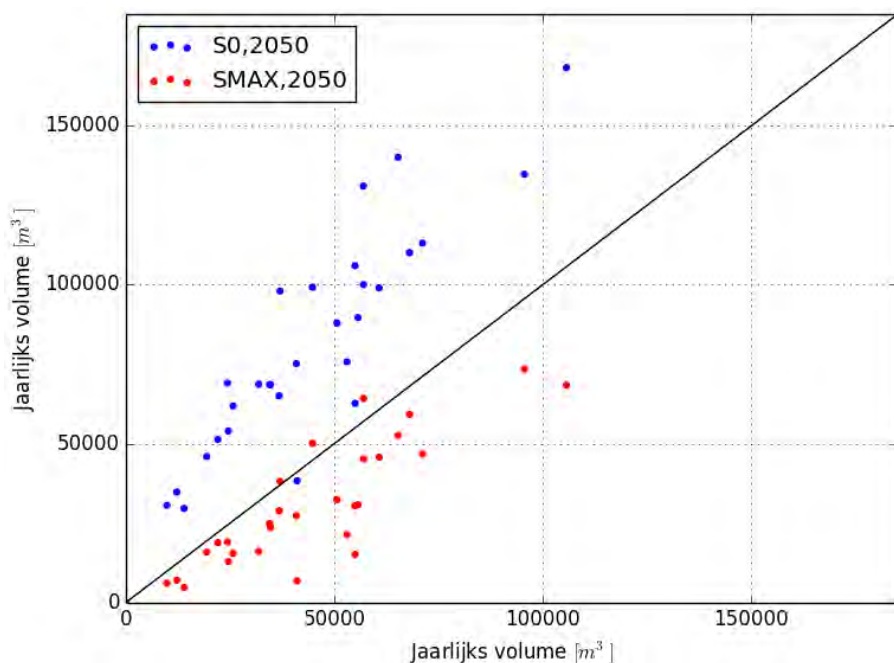
Figuur 4-86: Puntenwolk van de jaarlijkse afvoervolumes naar de RWZI van Aartselaar in het basisscenario (S_0) in 2010 tegenover het basisscenario ($S_{0,2050}$) en het maximaal scenario ($S_{max,2050}$) na autonome ontwikkeling in 2050



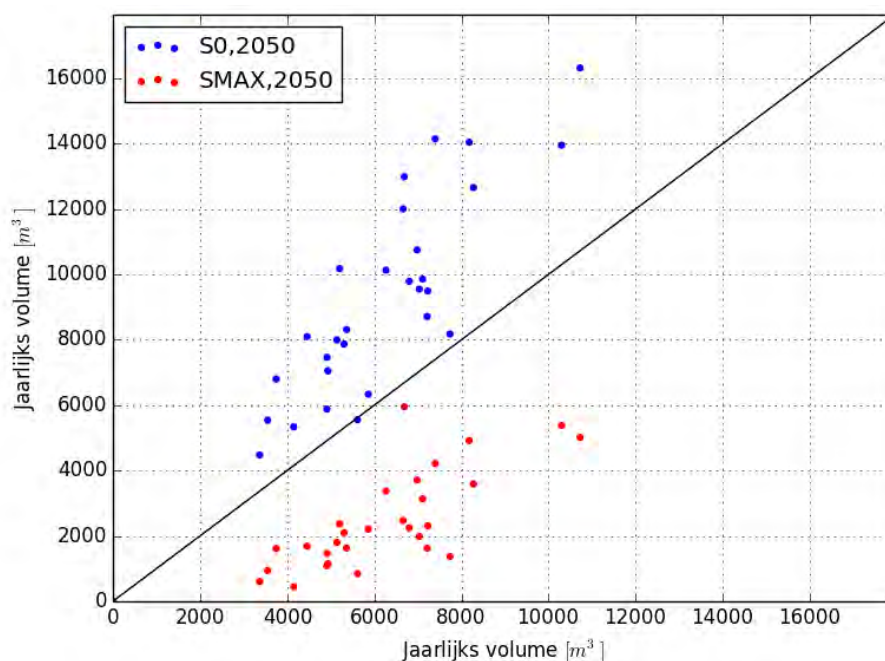
Figuur 4-87: Puntenwolk van de piekdebieten op de Benedenvliet (knooppunt BV072) in het basisscenario (S_0) in 2010 tegenover het basisscenario ($S_{0,2050}$) en het maximaal scenario ($S_{max,2050}$) na autonome ontwikkeling in 2050



Figuur 4-88: QQ plot van de piekdebieten op de Benedenvliet (knooppunt BV132) in het basisscenario (S_0) in 2010 tegenover het basisscenario ($S_{0,2050}$) en het maximaal scenario ($S_{max,2050}$) na autonome ontwikkeling in 2050



Figuur 4-89: Puntenwolk van het jaarlijks overstroomd volume langs de Benedenvliet (storage area I_BV077R) in het basisscenario (S_0) in 2010 tegenover het basisscenario ($S_{0,2050}$) en het maximaal scenario ($S_{max,2050}$) na autonome ontwikkeling in 2050



Figuur 4-90: Puntenwolk van het jaarlijks overstroomd volume langs de Benedenvliet (storage area I_BV120R) in het basisscenario (S_0) in 2010 tegenover het basisscenario ($S_{0,2050}$) en het maximaal scenario ($S_{max,2050}$) na autonome ontwikkeling in 2050

Conclusie

• Optimalisatie

Het toepassen van bronmaatregelen met 100 % infiltratie geeft ten opzichte van het basisscenario aanleiding tot een significante daling van de overstortwerking zowel wat betreft de piekdebieten, de overstortvolumes en de overstortfrequenties. De impact is echter steeds aanzienlijk sterker bij de hogere (nr. 1-6; 22.00-0.50 10^{-6} m/s) dan bij de twee laagste (nr. 7-8; 0.10-0.01 10^{-6} m/s) infiltratiecapaciteiten. Bij de laagste infiltratiecapaciteiten worden de dalingen hoofdzakelijk verklaard door de hergebruikvoorziening van de bronmaatregelen op privédomein, namelijk woningen en industrie.

Door het toepassen van 100 % bufferen worden dalingen van de overstortwerking bekomen die zich tussen deze van de laagste en de hogere infiltratiewaarden in bevinden. Voor wat betreft de overstortpiekdebieten sluiten de resultaten bij 100 % bufferen eerder aan bij resultaten voor vier hoogste infiltratiewaarden (nr. 1-4; 22.00-1.80 10^{-6} m/s). Voor wat betreft de overstortvolumes sluiten de resultaten bij 100 % bufferen eerder aan bij resultaten voor twee laagste infiltratiewaarden. Dit geeft aan dat infiltratie een sterkere impact heeft op de overstortvolumes dan op de -piekdebieten. Bij de hoogste infiltratiewaarden wordt de overstortwerking echter nagenoeg te niet gedaan.

Bij het toepassen van combinaties van infiltreren en bufferen bij de lage infiltratiecapaciteiten wordt de overstortwerking beperkt ten opzichte van het toepassen van 100 % infiltratie. De resultaten sluiten nauwer aan bij de resultaten voor 100 % bufferen, maar leiden niet tot een gunstiger resultaat.

Het toepassen van bronmaatregelen met 100 % infiltratie heeft ten opzichte van het basisscenario tevens tot gevolg dat de jaarlijkse afvoervolumes naar de RWZI's van Edegem en Aartselaar aanzienlijk afnemen. Ook hierbij is de impact steeds sterker bij de hogere (nr. 1-6; 22.00-0.50 10^{-6} m/s) dan bij de twee laagste (nr. 7-8; 0.10-0.01 10^{-6} m/s) infiltratiecapaciteiten. Door het toepassen van 100 % bufferen worden afvoervolumes berekend die sterk aansluiten bij de afvoervolumes berekend voor de laagste infiltratiewaarde (nr. 8; 0.01 10^{-6} m/s). Dit wordt verklaard doordat bij infiltratie water uit het rioolstelsel verdwijnt, waar dit bij bufferen in het rioolstelsel blijft. Door het toepassen van combinaties van infiltreren en bufferen bij de tweede laagste infiltratiecapaciteit (nr. 7; 0.10 10^{-6} m/s) worden, om gelijkaardige redenen, hogere jaarlijkse afvoervolumes naar de RWZI's bekomen dan bij 100 % infiltratie. Door het toepassen van combinaties van infiltreren en bufferen bij de laagste infiltratiecapaciteit (nr. 8; 0.01 10^{-6} m/s) worden geen significant verschillende jaarlijkse afvoervolumes naar de RWZI's bekomen dan bij 100 % infiltratie.

De impact van de verminderde overstortwerking op de piekdebieten op de waterlopen varieert locatieafhankelijk ten opzichte van het basisscenario van niet-significant tot sterk. Dit houdt verband met de aangesloten verharde oppervlakte en de oppervlakte van het stroomgebied, maar is door de complexiteit van het rioolstelsel en de interacties met de benedenloop van het rivierstelsel niet eenduidig te bepalen. Bovendien is de impact in het geval van 100 % infiltratie aanzienlijk sterker bij de hogere (nr. 1-6; 22.00-0.50 10^{-6} m/s) dan bij de twee laagste (nr. 7-8; 0.10-0.01 10^{-6} m/s) infiltratiecapaciteiten. Door het toepassen van bronmaatregelen met 100 % bufferen worden piekdebieten op de waterlopen berekend die zich overwegend tussen de piekdebieten bij het toepassen van de vier hoogste (nr. 1-4; 22.00-1.80 10^{-6} m/s) en de lagere (nr. 5-8; 0.80-0.01 10^{-6} m/s) infiltratiewaarden in bevinden. Door tevens combinaties van gedeeltelijke infiltratie en bufferen toe te passen bij de laagste infiltratiewaarden worden piekdebieten berekend die dichter aansluiten bij de piekdebieten op basis van het toepassen van 100 % bufferen.

Voor wat betreft de jaarlijks overstroomde volumes langs de waterlopen worden, gelijkaardig aan de overstortvolumes, overwegend volumes bekomen die zich tussen deze bij de zes hoogste en de laagste infiltratiewaarden in bevinden.

Globaal genomen geven de resultaten aan dat het bij hogere infiltratiecapaciteiten (nr. 1-6; 22.00-0.50 10^{-6} m/s) aangewezen is om in te zetten op bronmaatregelen met 100 % infiltratie. Voor wat betreft lage infiltratiewaarden (nr. 7-8; 0.10-0.01 10^{-6} m/s) geven de resultaten aan dat het toepassen van bronmaatregelen met 100 % bufferen aanleiding geeft tot de sterkste impact op de overstortwerking en de piekdebieten op de waterlopen. Voor wat betreft het jaarlijks afvoervolume naar de RWZI's geeft 100 % inzetten op infiltratie bij de tweede laagste infiltratiecapaciteit (nr. 7; 0.10 10^{-6} m/s) aanleiding tot een sterkere daling van het afvoervolume dan 100 % bufferen.

- **Autonome ontwikkeling in 2050**

De impact van autonome ontwikkeling in 2050 ten opzichte van het basisscenario is minder eenduidig voor wat betreft de werking van het rioolstelsel. De piekdebieten van de overstorten nemen toe onder invloed van autonome ontwikkeling. De overstortfrequentie en de –volumes nemen overwegend ook toe, maar er worden ook afnames berekend. Deze houden onder andere verband met het gewijzigde neerslagpatroon ten gevolge van klimaatverandering met verhoogde neerslag tijdens de wintermaanden tot gevolg (zie Hoofdstuk 4.3.4.1).

Door het maximaal toepassen van bronmaatregelen met infiltratie met een eerder hoge infiltratiecapaciteit (nr. 4; 1.8 10^{-6} m/s) wordt de impact van autonome ontwikkeling op de overstortwerking opgevangen en wordt de overstortwerking nagenoeg te niet gedaan voor wat betreft hoogfrequente overstortevents. Ook de impact van autonome ontwikkeling op de jaarlijkse afvoer naar de RWZI's wordt opgevangen door de toepassing van bronmaatregelen met infiltratie.

De impact van het toepassen van bronmaatregelen met infiltratie op de piekdebieten op de waterlopen is eerder locatieafhankelijk. Dit houdt zoals aangehaald verband met de aangesloten verharde oppervlakte, de oppervlakte van het stroomgebied en de complexe interacties met het rioolstelsel. De impact op de overstroomde volumes langs de waterlopen vertoont een gelijkaardig beeld.

4.4.2.2 Multi-criteria analyse (MCA)

Voor de MCA zijn de variabelen beschreven in Hoofdstuk 4.4.2 onderverdeeld in een kwantiteits-criterium en een kwaliteits-criterium. Als de verschillende variabelen binnen één criterium geaggregeerd worden, laat dit een eenvoudige visualisatie toe. Aan de verschillende variabelen is een gelijk gewicht gegeven. Vervolgens zijn deze herschaald. Het meest gunstige scenario krijgt de score 1 en het basisscenario (S_0) 0. De tussenliggende waarden lineair zijn genormaliseerd. De herschaalde variabelen worden vervolgens per jaar opgeteld:

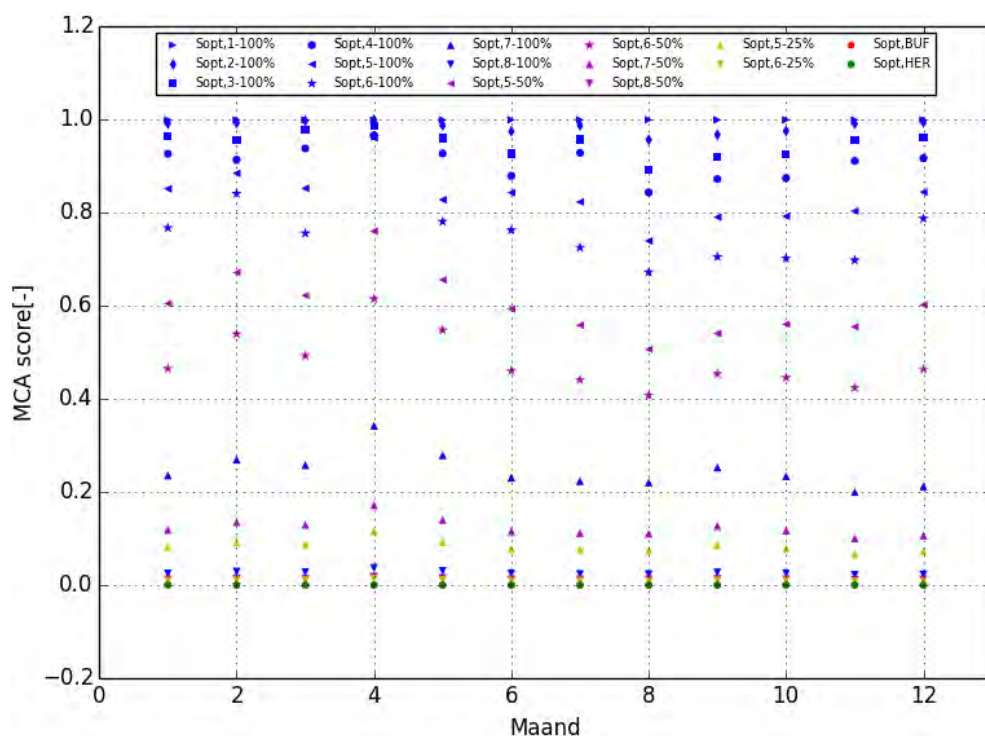
$$P_{kwaliteit}(t) = \left(V_{RWZI}^z(t) + Q_{gem,o}^z(t) + V_I^z(t) + N_o^z(t) + \sum_T Q_{p,o}^z(T) \right)$$

$$P_{kwantiteit}(t) = \left(V_{tot,F}^z(t) + \sum_T Q_{p,w}^z(T) + \sum_T Q_{p,o}^z(T) \right)$$

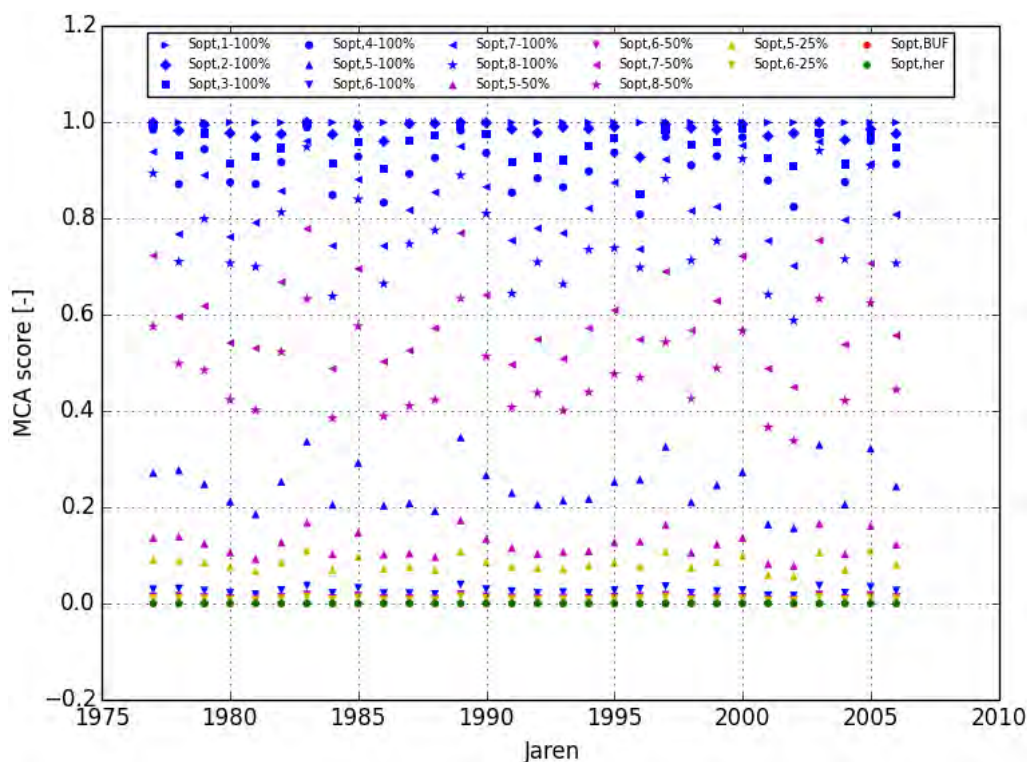
De z-superscripten in de bovenstaande formule duiden op de herschaalde variabelen. De parameters voor kwaliteit en kwantiteit worden berekend per jaar ($t=1$ tot 30). Vervolgens zijn de waarden van de criteria weergegeven per jaar alsook uitgezet tegenover elkaar, op basis waarvan een interpretatie van het rendement van een scenario mogelijk is.

Voorafgaand aan de bespreking van de globale MCA resultaten worden twee variabelen besproken die niet aan bod komen in de beschrijving van de resultaten van het modelgebied per waterloop (hoofdstuk 4.4.2.1) aangezien deze variabelen bepaald zijn voor het volledige modelgebied.

Een eerste variabele is het volume hemelwater dat infiltreert en maakt deel uit van het kwaliteit-criterium van de MCA als een jaarvolume ($V_I(t)$). In Figuur 4-91 wordt de variabele eerst weergegeven als genormaliseerd maandtotalen voor de gesimuleerde periode van 30 jaren. Hieruit komt voor wat betreft de hogere infiltratiewaarden (nr. 1-6; 22.00-0.50 10^{-6} m/s) een seizoensvariatie naar voren met verhoogde infiltratie in de winter- en de zomermaanden. Deze variatie sluit vrij goed aan bij het neerslagpatroon in het huidig klimaat dat weergegeven wordt in Figuur 4-25 (zie Hoofdstuk 4.3.4.1). De laagste infiltratiewaarden geven aanleiding tot lage genormaliseerde waarden zonder seizoensvariatie. De waarden onderscheiden zich op basis van de infiltratiecapaciteit en de verhouding infiltratie ten opzichte van bufferen die toegepast wordt in de bronmaatregelen. De variant met 100 % bufferen en enkel hemelwaterhergebruik geeft logischerwijs geen infiltratie. In Figuur 4-92 worden de genormaliseerde infiltratiewaarden vervolgens per jaar weergegeven. Het beeld dat hieruit naar voren komt, wordt opnieuw bepaald door de verschillen in infiltratiecapaciteit en de verhoudingen tussen infiltreren en bufferen.

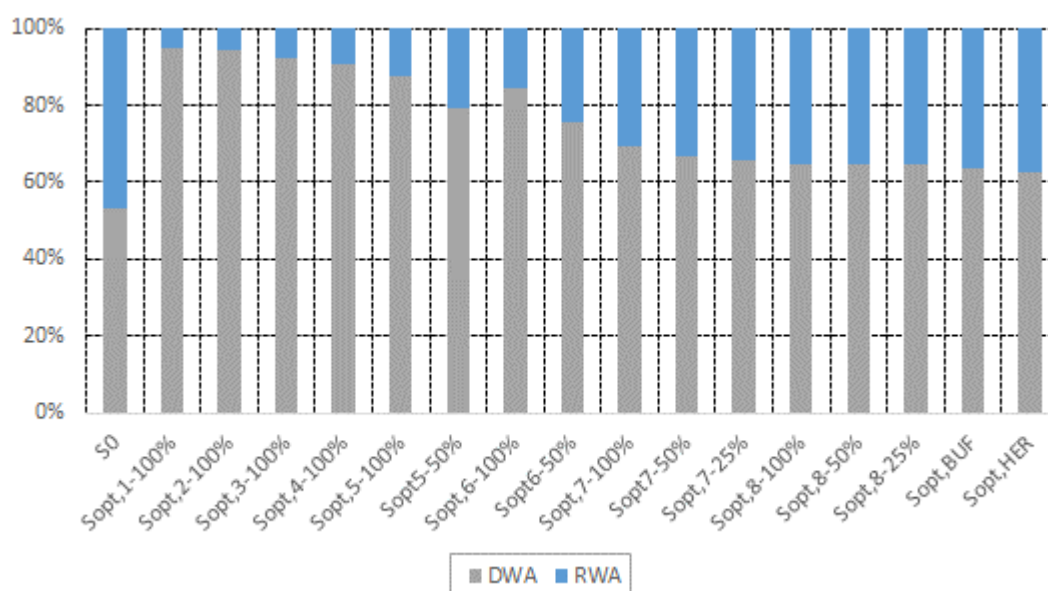


Figuur 4-91: Weergave van de scores per maand van de infiltratie voor het optimalisatiescenario ($S_{opt,i,j}$) met 8 infiltratiecapaciteiten ($i=1-8$; $22.00-0.01 \cdot 10^{-6} \text{ m/s}$), verschillende verhoudingen van infiltreren (j ; 100%, 50%, 25%) in combinatie met bufferen en varianten met enkel bufferen ($S_{opt,BUF}$) en enkel hemelwaterhergebruik ($S_{opt,HER}$)



Figuur 4-92: Weergave van de scores per jaar van de jaarlijkse infiltratie ($V_{I(t)}$) voor het optimalisatiescenario ($S_{opt,i,j}$) met 8 infiltratiecapaciteiten ($i=1-8$; $22.00-0.01 \cdot 10^{-6} \text{ m/s}$), verschillende verhoudingen van infiltreren (j ; 100%, 50%, 25%) in combinatie met bufferen en varianten met enkel bufferen ($S_{opt,BUF}$) en enkel hemelwaterhergebruik ($S_{opt,HER}$)

Een tweede variabele is de verdunningsgraad van de afvoer naar het rioolstelsel. Gezien de samenhang met de variabele voor de afvoer naar het rioolstelsel is de verdunningsgraad niet opgenomen in de MCA. In Figuur 4-93 wordt het aandeel droogweerafvoer (DWA) en regenwaterafvoer (RWA) in de totale hydrologische afvoer naar het rioolstelsel weergegeven voor het basisscenario en de varianten van het optimalisatiescenario. In het basisscenario is nagenoeg de helft van de afvoer naar het rioolstelsel verdund met RWA. De verdunning neemt af tot minder dan 10 % bij het toepassen van bronmaatregelen met de vier hoogste infiltratiecapaciteiten (nr. 1-4; $22.00-1.80 \cdot 10^{-6} \text{ m/s}$). Bij de tussenliggende infiltratiewaarden (nr. 5-6; $0.8 \cdot 10^{-6}-0.5 \cdot 10^{-6} \text{ m/s}$) wordt de verdunning teruggebracht tot minder dan 15 %. Wanneer bij deze infiltratiewaarden infiltratie gecombineerd wordt met bufferen stijgt het aandeel van de regenwaterafvoer echter tot 25 %. Bij de laagste infiltratiewaarden (nr. 7-8; $0.10-0.01 \cdot 10^{-6} \text{ m/s}$) bedraagt het aandeel van de regenwaterafvoer ongeveer een derde van de totale hydrologische afvoer naar het rioolstelsel.



Figuur 4-93: Het aandeel droogweerafvoer (DWA) en regenwaterafvoer (RWA) in de totale hydrologische afvoer naar het rioolstelsel voor het basisscenario (S_0), optimalisatiescenario ($S_{opt,i-j}$) met 8 infiltratiecapaciteiten ($i=1-8$; $22.00-0.01 \cdot 10^{-6} \text{ m/s}$), verschillende verhoudingen van infiltreren (j ; 100%, 50%, 25%) in combinatie met bufferen en varianten met enkel bufferen ($S_{opt,BUF}$) en enkel hemelwaterhergebruik ($S_{opt,HER}$)

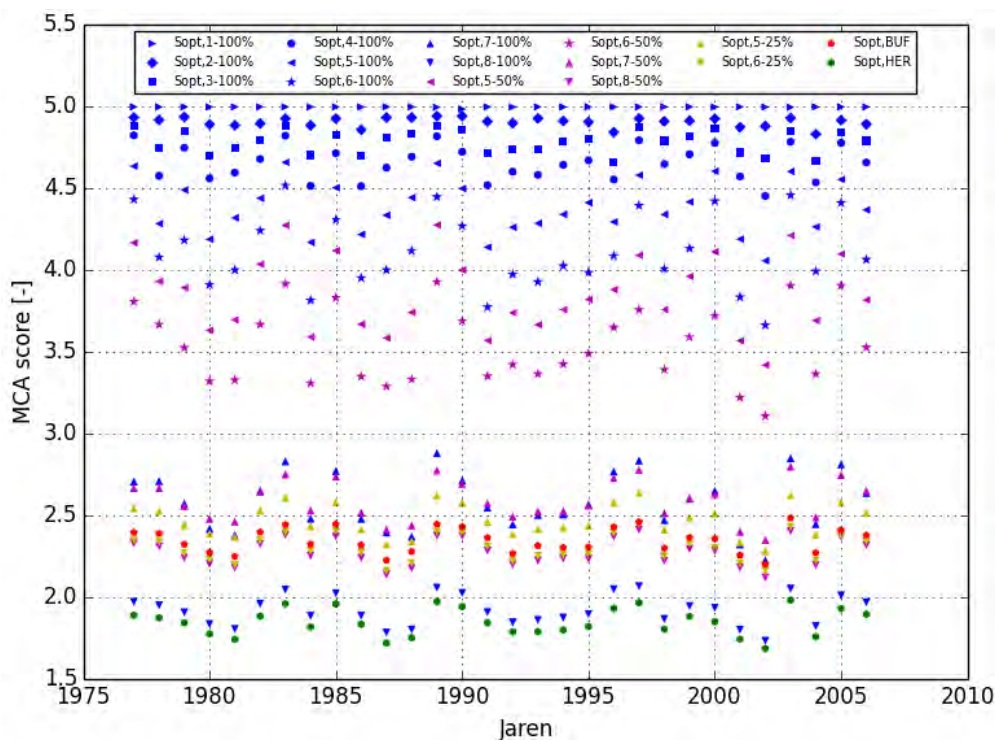
Onderstaand worden de resultaten van de MCA voor het kwantiteits- en kwaliteits-criterium weergegeven op jaarbasis (Figuur 4-94, Figuur 4-95) en uitgezet tegenover elkaar in een puntenwolk Figuur 4-96. Ook in de puntenwolk komt elk punt overeen met een jaar uit de gesimuleerde periode van 30 jaar.

De algemene trend van de resultaten beschreven in Hoofdstuk 4.4.2.1 blijft bewaard. Opnieuw komt een duidelijke afscheiding tussen de resultaten van de hogere (nr. 1-6; $22.00-0.50 \cdot 10^{-6} \text{ m/s}$) en de laagste (nr. 7-8; $0.10-0.01 \cdot 10^{-6} \text{ m/s}$) infiltratiewaarden tot uiting. De maximale scores voor het kwaliteit-criterium zijn hoger dan deze voor het kwantiteit-criterium aangezien meer variabelen in beschouwing genomen worden.

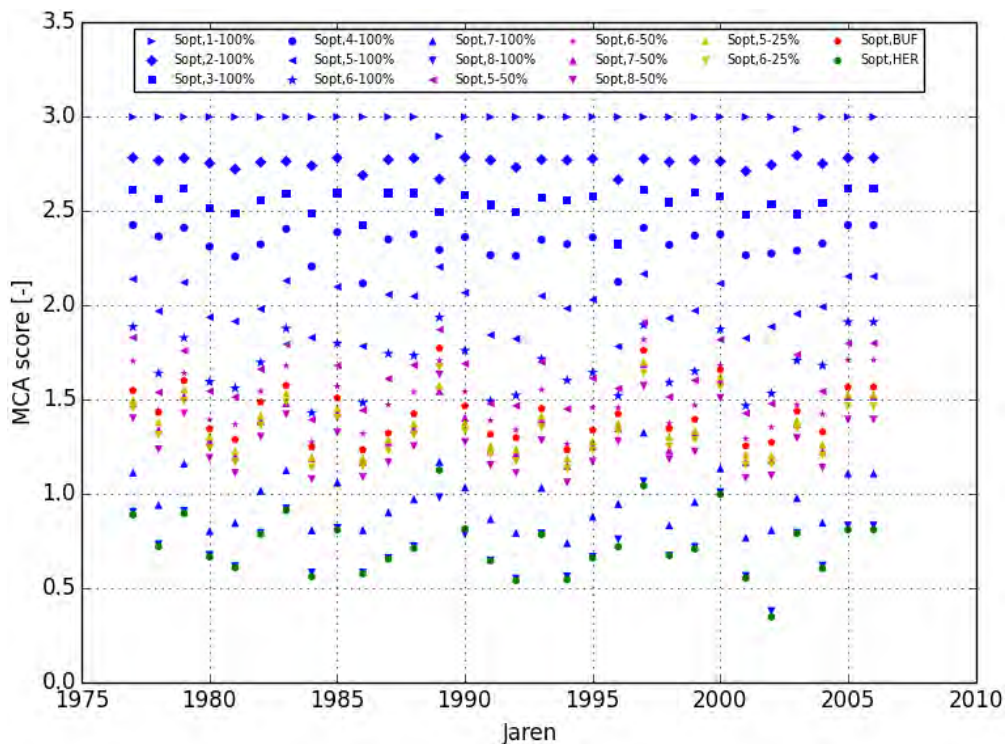
Voor het kwaliteits-criterium zijn de scores van de vier hoogste infiltratiecapaciteiten (nr. 1-4; 22.00-1.80 10^{-6} m/s) in Figuur 4-94 onderling gelijkaardig. Logischerwijs wordt de hoogste score behaald bij de grootste infiltratiecapaciteit. De tussenliggende infiltratiecapaciteiten (nr. 5-6; 0.80-0.50 10^{-6} m/s) scoren minder hoog, maar afgetekend ten opzichte van de laagste infiltratiewaarden. Het scenario met 100 % bufferen bevindt zich tussen de scenario's met de tweede laagste en de laagste infiltratiecapaciteit en 100 % infiltratie in (nr. 7-8; 0.10-0.01 10^{-6} m/s). De scores van de laagste infiltratiecapaciteit onderscheiden zich bovendien niet sterk van deze voor de variant met enkel hemelwaterhergebruik. Deze resultaten geven aan dat het voor de waterkwaliteit gunstiger is om volledig te bufferen bij de laagste infiltratiecapaciteit en dat vanaf de tweede laagste infiltratiecapaciteit eerder ingezet dient te worden op infiltratie. Bij het toepassen van infiltratie verdwijnt water uit het rioolsysteem, waar dit bij bufferen in het systeem behouden blijft. Hierdoor scoort het scenario met de tweede laagste infiltratiecapaciteit beter op de variabele met het jaarlijkse afvoervolume naar de RWZI.

Op basis van het kwantiteits-criterium scoort het bufferscenario in Figuur 4-95 tussen de scenario's met de hogere (nr. 1-6; 22.00-0.50 10^{-6} m/s) en de laagste (nr. 7-8; 0.10-0.01 10^{-6} m/s) infiltratiecapaciteiten in. Dit is voornamelijk te verklaren door een betere buffering van de piekdebieten bij het toepassen van een bufferbekken. Deze resultaten geven aan dat het bij lage infiltratiecapaciteiten ($<0.10 \cdot 10^{-6}$ m/s) gunstiger is om een bufferbekken te voorzien.

Hierbij wordt echter opgemerkt dat er in de modellering van het bufferscenario aangenomen wordt dat elke oppervlakte vertraagd kan afgevoerd worden. In realiteit is dit echter maar realiseerbaar voor oppervlaktes vanaf 5 000 m² en daardoor voor het overgrote deel van de projecten met bronmaatregelen niet. Bovendien geldt ook hier de eerder gemaakte opmerking met betrekking tot de realiseerbaarheid van de gecontroleerde doorvoer van de buffervoorziening (zie Hoofdstuk 4.3.3.1). De bekomen resultaten zijn dan ook gunstiger dan wat in realiteit gerealiseerd zal worden. De beperkte winst van infiltratie bij de laagste infiltratiecapaciteiten ($<0.10 \cdot 10^{-6}$ m/s) ten opzichte van bronmaatregelen met enkel hemelwaterhergebruik geeft aan dat bronmaatregelen bij deze infiltratiewaarden eerder beperkt dienen te worden tot het hergebruik.



Figuur 4-94: Weergave van de scores per jaar van het optimalisatiescenario ($S_{opt,i,j}$) met 8 infiltratiecapaciteiten ($i=1-8$; $22.00-0.01 \cdot 10^{-6} \text{ m/s}$), verschillende verhoudingen van infiltreren (j ; 100%, 50%, 25%) in combinatie met bufferen en varianten met enkel bufferen ($S_{opt,BUF}$) en enkel hemelwaterhergebruik ($S_{opt,HER}$) op het kwaliteit-criterium van de Multi-criteria analyse



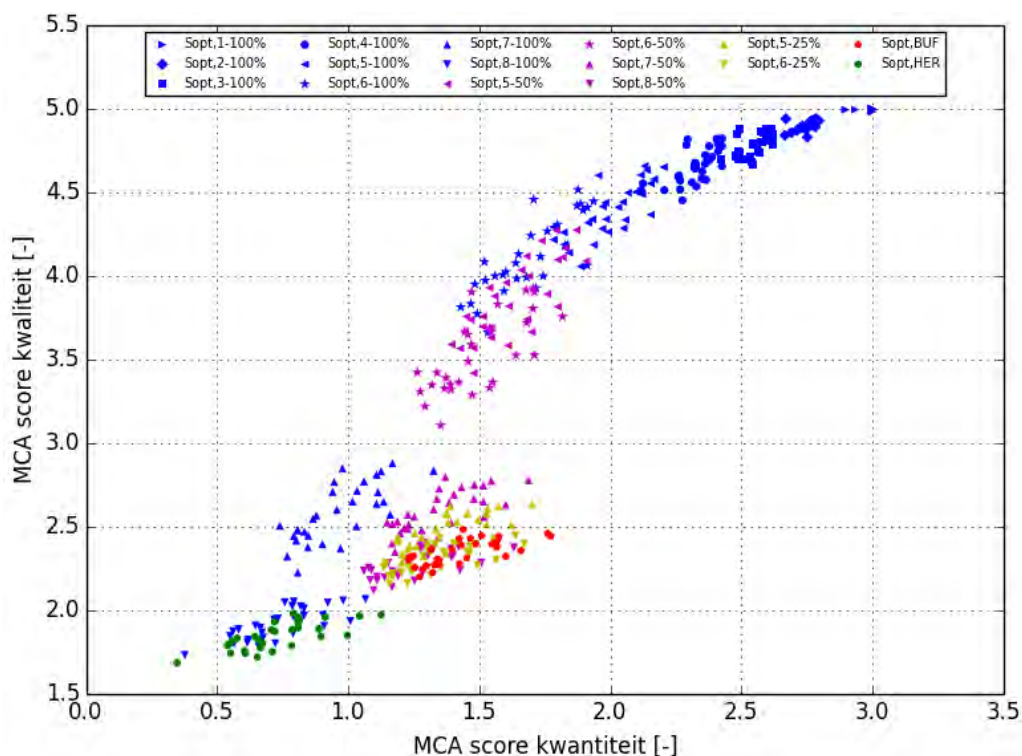
Figuur 4-95: Weergave van de scores per jaar van het optimalisatiescenario ($S_{opt,i,j}$) met 8 infiltratiecapaciteiten ($i=1-8$; $22.00-0.01 \cdot 10^{-6} \text{ m/s}$), verschillende verhoudingen van infiltreren (j ; 100%, 50%, 25%) in combinatie met bufferen en varianten met enkel bufferen ($S_{opt,BUF}$) en enkel hemelwaterhergebruik ($S_{opt,HER}$) op het kwantiteit-criterium van de Multi-criteria analyse

Figuur 4-96 vat de bovenstaande bevindingen samen. Elk scenario met bronmaatregelen scoort beter dan het basisscenario. De varianten met hogere infiltratiecapaciteiten (nr. 1-6; $22.00\text{--}0.50\ 10^{-6}\text{m/s}$) bevinden zich afgescheiden in de rechter bovenhoek. Bij de varianten met de laagste infiltratiecapaciteiten (nr. 7-8; $0.10\text{--}0.01\ 10^{-6}\text{m/s}$) en 100 % infiltreren scoort de variant met de tweede laagste capaciteit (nr. 7; $0.10\ 10^{-6}\text{m/s}$) enigszins beter op beide criteria dan de variant met de laagste capaciteit. De laagste capaciteit scoort bovendien slechts beperkt beter dan de variant met enkel hemelwaterhergebruik.

De variant met 100 % bufferen scoort wat betreft het kwaliteits-criterium tussen de twee laagste infiltratiecapaciteiten in. Wat betreft het kwantiteits-criterium scoort de variant met 100 % bufferen enigszins beter dan de varianten met de twee laagste infiltratiecapaciteiten.

Door het toepassen van varianten met combinaties van infiltreren en bufferen wordt in het geval van de laagste infiltratiecapaciteit een beperkte winst geboekt op zowel het kwaliteits- als het kwantiteits-criterium. Hierdoor sluit het meer aan bij de scores van de variant met 100 % bufferen. In het geval van de tweede laagste infiltratiecapaciteit wordt een beperkte winst geboekt op het kwantiteitscriterium, maar wordt ook een zeker verlies gemaakt voor wat betreft het kwaliteitscriterium. Dit leidt opnieuw tot de bevinding dat bij de tweede laagste infiltratiecapaciteit (nr. 7; $0.10\ 10^{-6}\text{m/s}$) eerder ingezet dient te worden op infiltreren en bij de laagste capaciteit (nr. 8; $0.01\ 10^{-6}\text{m/s}$) op bufferen. Ook hier dienen echter de reeds aangehaalde opmerkingen gemaakt te worden met betrekking tot de realiseerbaarheid van bufferen met gecontroleerde doorvoer.

In het geval van vijfde en zesde hoogste infiltratiecapaciteiten ($0.80\text{--}0.50\ 10^{-6}\text{m/s}$) wordt door het toepassen van varianten met combinaties van infiltreren en bufferen verlies gemaakt op zowel het kwantiteits- als het kwaliteits-criterium. Het verlies is het sterkst bij het kwantiteits-criterium. Hierdoor scoren deze infiltratiecapaciteiten in de combinatievarianten vergelijkbaar met de variant met 100 % bufferen op het kwantiteits-criterium.



Figuur 4-96: Puntenwolk van de scores per jaar van het kwantiteits- tegenover het kwaliteitscriterium van het optimalisatiescenario ($S_{opt,i-j}$) met 8 infiltratiecapaciteiten ($i=1-8$; $22.00-0.01 \cdot 10^{-6} \text{ m/s}$), verschillende verhoudingen van infiltreren (j ; 100%, 50%, 25%) in combinatie met bufferen en varianten met enkel bufferen ($S_{opt,BUF}$) en enkel hemelwaterhergebruik ($S_{opt,HER}$)

4.5 CONCLUSIES

In de huidige studie is doormiddel van hydrologische en hydrodynamische modellering in het stroomgebied van de Benedenvliet in de provincie Antwerpen de impact nagegaan van het toepassen van bronmaatregelen in overeenstemming met de Hemelwaterverordening en de Code van goede praktijk voor het ontwerp, de aanleg en het onderhoud van rioleringsystemen. De bronmaatregelen omvatten hemelwaterhergebruik op het privaat domein (woningen en industrie), infiltratie en/of bufferen met gecontroleerde doorvoer. Er is tevens nagegaan of bij weinig doorlatende gronden door het combineren van infiltratie en bufferen een meer optimale toepassing van de bronmaatregelen bereikt wordt. Tot slot is de impact van autonome ontwikkeling met klimaat- en landgebruikverandering in 2050 bepaald op een situatie zonder bronmaatregelen (basisscenario) en is nagegaan in welke mate de bronmaatregelen met maximale infiltratie in staat zijn de gevolgen van autonome ontwikkeling op te vangen.

Aangezien het een impactstudie betreft, is van een aantal geïdealiseerde uitgangspunten vertrokken. Zo is hemelwaterhergebruik toegepast op elk privé en industrieel gebouw. Voor de infiltratievoorziening is verondersteld dat de stand van de grondwatertafel geen beperkende factor vormt en er vrije drainage mogelijk is. Wat betreft de buffervoorziening is aangenomen dat elke oppervlakte vertraagd kan afgevoerd worden. In realiteit is dit echter maar realiseerbaar voor oppervlaktes vanaf 5 000 m² en daardoor voor het overgrote deel van de projecten met bronmaatregelen niet. Bovendien wordt verondersteld dat het mogelijk is om het doorvoerdebiet te beperken tot 20 l/s/ha in de praktijk moeilijk realiseerbaar is bij kleine buffervoorzieningen.

De modelresultaten geven aan dat elk van de scenario's met bronmaatregelen een positieve kwalitatieve en kwantitatieve impact heeft op het rioolstelsel, het waterlopenstelsel en het grondwater. Voor wat betreft het rioolstelsel geven de bronmaatregelen aanleiding tot een verminderde overstortwerking en een verbeterde werking van de RWZI. Dit laatste is een gevolg van een verminderde afvoer naar de RWZI en van een lagere verdunningsgraad in het rioolstelsel. De verminderde overstortwerking door de bronmaatregelen draagt bij aan een vermindering van de afvoerpieken op de waterlopen en daardoor aan een vermindering van de overstromingen. Hierbij wordt opgemerkt dat de impact van de bronmaatregelen op de waterlopen in belangrijke mate bepaald wordt door de verharde oppervlakte die afwatert naar de bronmaatregelen. Tot slot draagt het toepassen van infiltratie van hemelwater bij tot de aanvulling van de grondwatertafel.

De modelresultaten vertonen een aanzienlijk verschil in effectiviteit van de bronmaatregelen afhankelijk van de infiltratiecapaciteit van de ondergrond. Zo geven de resultaten aan dat voor infiltratiecapaciteiten groter dan $0.50 \cdot 10^{-6}$ m/s ingezet dient te worden op volledige infiltratie zonder bufferen. Voor infiltratiecapaciteiten tot $0.10 \cdot 10^{-6}$ m/s geven de modelresultaten aan dat bronmaatregelen met enkel infiltratie een positieve invloed hebben op de werking van de RWZI aangezien de infiltratie bijdraagt tot een verminderde doorvoer in het rioolstelsel. Anderzijds geven de modelresultaten aan dat bij deze lage infiltratiecapaciteiten een gecombineerd infiltratie- en bufferbekken met gelijke volumes toelaat om de piekdebieten van de overstorten en op de waterloop sterker terug te dringen. Voor nog lagere infiltratiecapaciteiten in de grootteorde van 10^{-8} m/s geven de modelresultaten aan dat de impact van infiltratie weinig verschilt van het toepassen van enkel hemelwaterhergebruik en dat een bufferbekken het meest effectief is.

Hierbij dient echter in het achterhoofd gehouden te worden dat, zoals hoger aangehaald, uitgegaan is van een geïdealiseerde buffervoorziening. Bij deze lage infiltratiecapaciteiten wordt de impact van de bronmaatregelen grotendeels bepaald door het hemelwaterhergebruik op het privédomein, namelijk woningen en industrie.

Om een volledig beeld te krijgen op de effectiviteit van de maatregelen wordt aanbevolen om de praktisch realiseerbaarheid van de doorvoer van kleinere bufferbekkens verder te bestuderen.

Het toepassen van autonome ontwikkeling in 2050 geeft in de modelsimulaties aanleiding tot een aanzienlijke toename van de overstortwerking. De impact hiervan op de waterlopen hangt samen met de afstromende verharde oppervlakte in verhouding tot de totale oppervlakte van het stroomgebied. De mate waarin bronmaatregelen met maximale infiltratie deze gevolgen van autonome ontwikkeling opvangen hangt eveneens samen met de afwaterende verharde oppervlakte.

5. AANZET TOT RICHTLIJNEN

Op basis van de uitgevoerde studie wordt in wat volgt een aanzet gemaakt tot richtlijnen voor het uitvoeren van infiltratieproeven en het dimensioneren van bronmaatregelen.

5.1 INFILTRATIEPROEVEN

Op basis van het praktijkonderzoek kunnen volgende richtlijnen worden geformuleerd met betrekking tot het uitvoeren van infiltratieproeven.

- Gezien de hogere variatie in de bepaling van K in het laboratorium en de slechte correlatie met de in situ K-bepalingen krijgen in situ K-bepalingen de voorkeur. Of indien toch gekozen wordt voor de bepaling in het labo wordt best gewerkt met meer dan vier herhalingen. Bovendien wordt er best rekening mee gehouden dat de dan gemeten K-waarde tot een factor 10 lager is dan de K bepaald in situ. Bijkomende kanttekening is dat voor een zinvolle K-meting de ongestoorde stalen best worden genomen door vakbekwame medewerkers, en dat graafwerk vereist is.
- Binnen eenzelfde textuurgroep werden er significante verschillen in K tussen de sites aangetoond wat aanduidt dat het zinvol is de K-waarde te bepalen op het terrein in plaats van deze af te leiden van referentietabellen. Als gevolg hiervan is het dus niet mogelijk een infiltratiekaart op te maken puur en enkel gebaseerd op de bodemkaart.
- Om een eerste inschatting te maken van de K-waarde, wordt best gewerkt met een textuurbeoordeling; deze kan zowel via palpatie in het laboratorium als via granulometrie. Voor zandige texturen (Z, Zg) zal de infiltratiesnelheid doorgaans hoger zijn dan voor de andere bodemtexturen (S, P, L, A, E). Verdere detaillering in functie van de bodemtextuur blijkt niet zinvol. De enige wijze waarop er iets concreets kan gezegd worden over de doorlatendheid van een bepaalde bodem, is dit in situ te testen.
- Om het risico op outliers in te perken, en de meting zo betrouwbaar mogelijk te maken worden er best minimaal drie herhalingen uitgevoerd binnen eenzelfde "referentiezone" met een straal van 20 meter. Ook een vierde herhaling heeft nog een belangrijke meerwaarde naar de betrouwbaarheid van de meting.
- In de textuurklasse E werden hogere K-waardes gemeten dan wat werd verwacht op basis van het textuuronderzoek. Ook in deze textuurklasse lijkt meten zinvol om zo een goede inschatting van de infiltratiecapaciteit te bekomen.
- De K-meting in dit onderzoek werd steeds uitgevoerd in een ongestoorde B-, C- of D-horizont. Tijdens de voorselectie werd aan de hand van profielbeschrijvingen onderzocht in welke mate effectief op een bepaalde diepte kon worden gemeten. Zo werden sites geweerd waar een hoge grondwatertafelstand werd vastgesteld, of waar onderliggende horizonten de meetwaarde zou kunnen beïnvloeden. Dergelijk profielonderzoek is primordiaal bij het uitvoeren van een infiltratieonderzoek.
- Evenzeer is een profielonderzoek nodig in het horizontale vlak. De onderzoeker dient immers een duidelijk beeld te krijgen van de continuïteit van de horizont die bemeten wordt, en dus van een mogelijke representativiteit van de meetwaardes in het horizontaal vlak.

- Het Lisse-effect, belemmering van de infiltratie door luchtinsluiting in het bodemprofiel, verstoort vermoedelijk in een aantal gevallen de K-meting waardoor extreem lage waarden werden opgemeten. Om dit te voorkomen worden best geen K-metingen uitgevoerd wanneer de bodemvochttoestand in het bodemprofiel niet in evenwicht is, in periodes van zware regenval. De meting wordt best uitgevoerd wanneer de bodem zich in steady state bevindt, en het vochtgehalte veldcapaciteit benadert. Vermoedelijk wordt na zware regenval best een week gewacht voor de meting uit te voeren.
- De watertemperatuur werd beoordeeld als een niet-significante parameter in de dataset. De theoretische doorrekening illustreert echter een correctie van de K-waarde met 10 % à 30 %. Dit is eerder verwaarloosbaar wanneer het wordt vergeleken met de geobserveerde standaarddeviatie maar is wel van belang wanneer K-waarden absoluut geïnterpreteerd worden.
- De standaarddeviatie over de vier K-metingen per meetmethode per site was gemiddeld 60% van de gemiddelde K-meting per meetmethode per site. Deze hoge variatie is in belangrijke mate een gevolg van de werkelijke variatie in bodemeigenschappen. De variatie wordt best meegenomen bij het gebruik en interpretatie van de K-waarde in mogelijke vervolgtrajecten zoals onder andere de modellering van processen of beslissingen omtrent infiltratie-infrastructuur.

5.2 ONTWERP BRONMAATREGELEN

Op basis van de uitgevoerde modelstudie worden de volgende richtlijnen naar voor gebracht voor het dimensioneren van bronmaatregelen met hemelwaterhergebruik op het privédomein (woningen en industrie) en infiltratie en/of buffervoorzieningen:

- bij infiltratiecapaciteiten groter dan $0.50 \cdot 10^{-6}$ m/s wordt aanbevolen om enkel een infiltratievoorziening te voorzien;
- bij infiltratiecapaciteiten tussen $0.50 \cdot 10^{-6}$ en $0.10 \cdot 10^{-6}$ m/s wordt aanbevolen om enkel een infiltratievoorziening te voorzien in functie van het verminderen van zowel piekdebieten van de overstorten en op de waterloop als de afvoer naar de RWZI en in functie van het vergroten van de aanvulling van de grondwatertafel;
- bij infiltratiecapaciteiten tussen $0.10 \cdot 10^{-6}$ en $0.01 \cdot 10^{-6}$ m/s wordt aanbevolen een gecombineerde infiltratie en buffervoorziening met gelijke volumes te voorzien in functie van het verminderen van piekdebieten van de overstorten en op de waterloop;
- bij infiltratiecapaciteiten kleiner dan $0.01 \cdot 10^{-6}$ m/s wordt aanbevolen om enkel een buffervoorziening te voorzien op voorwaarde dat de totale oppervlakte van de individueel aangesloten percelen verharde oppervlakte groter is dan 5000 m² en dat de doorvoerdebieten van de buffervoorziening praktisch realiseerbaar zijn.

6. REFERENTIES

6.1 LITERATUUR EN INFILTRATIE-TESTEN

Ameryckx J.B., Verheye W.H., Vermeire R. 1995. Bodemkunde: bodemvorming, bodemeigenschappen, de bodems van België, bodembehoud en -degradatie, bodembeleid en bodempolitiek. Gent, Ameryckx. 346 p..

Amoozegar, A. 1989. A compact constant-head permeameter for measuring saturated hydraulic conductivity of the vadose zone. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 53:1356-1361.

Amoozegar, A. 1992. Compact constant head permeameter: A convenient device for measuring hydraulic conductivity. p. 31–42. In G.C. Topp et al. (ed.) *Advances in measurement of soil physical properties: bringing theory into practice*. SSSA Spec. Publ. 30. SSSA, Madison, WI.

Amoozegar, A. 2002. Models for Field Determination of Saturated Hydraulic Conductivity. *Soil Sci. Soc. Of North Carolina Proceedings*, Vol. XLV p45-53.

Bagarello, V., Iovino, M., Elrick, D., 2004. A simplified falling head technique for rapid determination of field-saturated hydraulic conductivity. *Soil Science Society of America Journal* 68, 66–73.

Bagarello and Sgroi; 2007. Using simplified falling head technique to detect temporal changes in field-saturated hydraulic conductivity at the surface of a sandy loam soil. *Soil & Tillage Research* 94, 283 – 294.

Bagarello, V., D'Asaro F, Iovino M. 2012. A field assessment of the Simplified Falling Head technique to measure the saturated soil hydraulic conductivity. *Geoderma* 187 – 188; 49 – 58.

Baize D., Jabiol B., 2011. Guide pour la description des sols. INRA Éditions, 2e édition revue et augmentée, Quae, Versailles, 2011, 430 p.

Barrit C.M.H., 2000. The building acts and regulations applied: Houses and flats. 2nd ed.. Routledge, 2000. 288 p.

Bélanger V., 2010. Variabilité de paramètres hydrogéologiques dans des faciès sédimentaires de l'aquifère paléodeltaïque de Saint-Honoré. *Projet de fin d'études 6 GLG 604*. Université du Québec à Chicoutimi. 72p.

BMVBS, 2008. *Arbeitshilfen Abwasser – Planung, Bau und Betrieb von Abwassertechnischen Anlagen in Liegenschaften des Bundes (section A-5-6)*. Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung.

Bodenkundliche Kartieranleitung, 2005. Hrsg.: Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe in Zusammenarbeit mit den Staatlichen Geologischen Diensten, 5. Aufl., Hannover. 438 p.

Boutwell G.P. 1992. The STEI Two-Stage Borehole Field Permeability Test. *Containment Liner Technology and Subtitle "D"*. Houston Section, ASCE, Houston, TX.

Boutwell, G.P. and Tsai, C.N. June 1992. Two-Stage Field Permeability Test for Clay Liners. *Geotechnical News*. Vol. 10, No. 2, pp. 32-34.

Bouwer, H., and R. D. Jackson, 1974. Determining soil properties, in *Drainage for Agriculture* (J. van Schilfgaarde, ed.), *Am. Soc. Agron.*, Madison, WI, 1974, pp.611-672.

Bouwer, H., Rapid field measurement of air-entry value and hydraulic conductivity of soil as significant parameters in flow system analysis, *Water Resour. Res.*, 2: 729-723 (1966).

Brandt P., 2015. Principal Scientist at Soils Investigation and Design, Inc. and Owner, Soils Investigation and Design, Inc..

- Burgy, R.H., Luthin, J.N. 1956, A test of the single- and double-ring types of infiltrometers. Eos, Transactions American Geophysical Union. Volume 37, Issue 2 April 1956 Pages 189–192
- Carslaw, H.S. and Jaeger, J.C. 1959. Conduction of Heat in Solids, 2nd Ed., Oxford University Press, London, UK.
- Carsel, R. F. and R. S. Parrish, 1988. Developing joint probability distributions of soil water retention characteristics. Water Resource Res. 24: 755-769.
- Chapuis R.P., 2004. Predicting the saturated hydraulic conductivity of sand and gravel using effective diameter and void ratio. Can. Geotech. J. 41: 787-795 (2004).
- Chapuis R.P., 2012. Predicting the saturated hydraulic conductivity of soils: a review. Bull. Eng. Geol. Environ (Springer, 2012) 71:401-434.
- Chenlo F., Moreira R., Pereira G., 2004. Kinematic viscosity of aqueous solutions of several sugars with sodium chloride: correlation with concentration and temperature. e-rheo.pt, 4 (2004) 1-6.
- Childs, E.C. & Poulvassilis, A., 1960. An Oscillating permeameter. Soil Science. Vol. 90 pp. 326-328
- CIRIA (Construction Industry Research and Information Association, UK), 1996. Infiltration drainage – Manual of Good Practice. Rapport 156. London.
- Conseil Général Loire en Rhone-Alpes, 2005. Etude à la parcelle, dans le cadre de la mise en place d'un système d'assainissement individuel. 15p.
- Cooper J. David. 2016. Soil Water Measurement: A Practical Handbook. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons. Chapter 17 : Hydraulic conductivity measurements of confined soil samples p246-247
- Coquet Y., Boucher A., Labat C., Vachier P., Roger-Estrade J., 2000. Caractérisation hydrodynamique des sols à l'aide de l'infiltromètre à disques. Aspects Théoriques et pratiques. Etudes et Gestion des Sols, 7,1, 2000 pp7-24.
- Craul T., 2015. President at Craul Land Scientists, State College Pennsylvania Area.
- Darcy, H.P.G., 1856: *Les fontaines publiques de la ville de Dijon*, Parijs.
- de Bakker, H. en Schelling J., 1966. Systeem van bodemklassificatie voor Nederland; de hogere niveaus (herzien in 1987). Wageningen, Pudoc.
- de Beaucorps G., n.d.. Note sur les modalités pratiques d'exécution des mesures du pouvoir filtrant d'un sol en place. Eaux et Forêts.
- De Beer, 1971, Grondmechanica Deel I: Inleidende begrippen, (negende herziene druk)
- Decagon, 2014. Mini Disk Infiltrometer. Decagon Devices, Inc.. 21p.
- Deckers J. 1996. Bodemgeografie. Instituut van Land en Waterbeheer, K.U.Leuven.
- De Smedt F., 2005. Grondmechanica, Cursusnota's – oktober 2005) VUB. Prof. Dr. Ir. F. De Smedt.
- De Smedt F., 2013. Grondmechanica, Cursusnota's – mei 2013) VUB. Prof. Dr. Ir. F. De Smedt.
- Diserens E., 1934. Beitrag zur Bestimmung der Durchlässigkeit des Bodens in natürlicher Bodenlagerung. Schweiz. Landw. Monatstr. 12
- Dondeyne S., L. Vanierschot, R. Langohr, E. Van Ranst, S. Deckers (2014). The soil map of the Flemish region converted to the 3rd edition of the World Reference Base for soil resources (41 map sheets at scale 1:40 000, 1 map sheet at 1:250 000). KU Leuven, Universiteit Gent, Vlaamse Overheid, Brussels. <http://dx.doi.org/10.13140/2.1.4381.4089>
- Dorsey N.E., 1968. Properties of ordinary water-substance in all its phases: water vapour, water, and all the ices. Hafner Publishing Company, NY. 673 p.

Dubé J.P. en Barabé Y., 1991. Guide technique sur la conception des installations septiques communautaires (petites agglomérations). Révisé janvier 1991. Préparé pour EAT environnement, SQUAE et la Société québécoise d'assainissement des eaux, Québec.

Eijkelkamp, maart 2013, gebruiksaanwijzing 09.02 laboratorium-permeameters (M1.09.02.N)

Ejjeji C.J., Abdulkareem K. and Onatola O. O., 2012. Improvement of a simple tension infiltrometer for determining soil hydrological properties. LAUTECH Journal of Engineering and Technology 7(1) 2012: 14-18.

Elrick, D.E., and W.D. Reynolds. 1986. An analysis of the percolation test based on three-dimensional saturated-unsaturated flow from a cylindrical test hole. Soil Science. 142:308-321.

Elrick, D.E., W.D. Reynolds, and K.A. Tan. 1989. Hydraulic conductivity measurements in the unsaturated zone using improved well analyses. Ground Water Monitoring Review. 9:184-193.

Elrick, D.E., G. W. Parkin, W. D. Reynolds, D. J. Fallow. 1995. Analysis of Early-Time and Steady State Single-Ring Infiltration Under Falling Head Conditions. Water Resour. Res. 31 : 1883 – 1893.

Elrick DE, Reynolds WD. 1992. Methods for analyzing constant-head well permeameter data. Soil Science Society of America Journal 56:320–323.

Elrick, D.E., Angulo-Jaramillo, R., Fallow, D.J., Reynolds, W.D., Parkin, G.W., 2002. Analysis of infiltration under constant head and falling head conditions. In: Raats, P.A.C., et al. (Eds.), Environmental mechanics: Water, Mass and Energy Transfer in the Biosphere, Geophysical Monograph Series, vol. 129. AGU, Washington, DC, pp. 47–53.

Ernst L.F. 1950. A new formula for the calculation of the permeability factor with the auger hole method. T.N.O. Groningen 1950. Translated from the Dutch by H. Bouwer. Cornell Univ. Ithaca. N.Y. 1955.

Fallow, D.J., Elrick, D.E., Reynolds, W.D., Baumgartner, N., Parkin, G.W., 1994. Field measurement of hydraulic conductivity in slowly permeable materials using early-time infiltration measurements in unsaturated media. In: Daniel, D.E., Trautwein, S.J. (Eds.), Hydraulic Conductivity and Waste Contaminant Transport in Soil, ASTM STP 1142. American Society for Testing and Materials, Philadelphia, PA, pp. 375–389.

Ferguson B., 1994. Stormwater infiltration. Lewis Publishers, CRC Press. Boca Raton. USA.

FHWA (Federal Highway Administration, US), 1980. Underground Disposal of Stormwater Runoff. Rapport FHWA-TS-80-218.

Garca-Coln, L. S., del Castillo, L. F. and Goldstein, P. 1989. Theoretical basis for the Vogel-Fulcher-Tammann equation. Phys. Rev. B 40, 7040. Erratum Phys. Rev. B 41, 4785 (1990)

Gardner, W.R. 1958 Some steady-state solutions of the unsaturated moisture flow equation with application to evaporation from a water table. Soil Sci. 85:228-232.

Green, W.A., and G.A. Ampt. 1911. The flow of air and water through soils. J. Agric. Sci. 4:1–24.

Green, T.R., G.H. Dunn, R.H. Erskine, J.D. Salas, and L.R. Ahuja. 2008. Fractal analyses of steady infiltration and terrain on an undulating agricultural field. Vadose Zone Journal 8, no. 2: 310–320.

Guo, H., Jiao, J. J. and Weeks, P. 2008. Rain-induced subsurface airflow and Lisse effect. Water Resources Research. 44: 1-9.

Guyonnet, D., Amraoui, N, Kara, R., 2000. Analysis of transient data from infiltrometer tests in fine-grained soils (vol 38, pg 396)", GROUND WATE, 38(4), 2000, pp. 486-486.

Hazen, A. 1892. Some physical properties of sands and gravels. Massachusetts State Board of Health, Annual Report, 539-556

Hiemstra G. , Bos N., Harbers J., Mauritz R., Peters G., Wartena L., 1994. Weerkunde voor de agrarische sector. Houten, Stam Techniek, 248pp.

Hillel, D., 1982. Introduction to Soil Physics. San Diego, CA: Academic Press. xxvii + 771 pp.

Hooghoudt S.B., 1936. Bijdragen tot de kennis van eenige natuurkundige grootheden van den grond, 4. Bepaling van den doorlaatafactor van den grond met behulp van pompproeven (z.g. boorgatenmethode). Verslagen landbouwkundige onderzoekingen 42B, 449-541.

Hooghoudt S.B., 1940. Bijdragen tot de kennis van eenige natuurkundige grootheden van den grond no. 7: Algemeene beschouwing van het probleem van de detailontwatering en de infiltratie door middel van parallel loopende drains, greppels, slooten en kanalen. Verslagen van landbouwkundige onderzoekingen der rijkslandbouwproefstations (ISSN 0372-6223 ; no. 46, 14 B). Algemeene Landsdrukkerij, 's-Gravenhage.

Hvorslev, M.J. 1951. Time lag and soil permeability in ground water observations. U.S. Army Corps of Engineers, Engineer Research and Development Center, Waterways Experimental Station, Vicksburg, Miss. Bulletin 36.

Johnson H.P, Frevert R.K. and Evans D.D. 1952. Simplified procedure for the measurement and computation of soil permeability below the water-table. Agric. Eng. Pp. 283-286.

Kestin J., Khalifa H.E., Correia R.J., 1981. The dynamique and kinematic viscosity of aqueous NaCl solutions in the temperature range 20-150 °C and the pressure range 0,1-35 MPa. J. Phys.Chem.Ref.Data. Vol. 10, No.1. pp71-87.

Kirkham D. 1945. Proposed methods for field measurements of permeability of soil below the watertable. Proc. Soil. Sc. Soc. Am. Pp. 58-68

Kirkham D. and van Bavel C.H.M. 1948. Theory of seepage into auger holes. Proc. Soil Sc. Soc. Am. Pp. 75-82

Kirkham D. 1955. Measurement of the hydraulic conductivity of soil in place. Symposium on permeability of soil. AM. Soc. for Testing Materials. Spec. Techn. Publ. No. 163.

Klute, A. and Dirksen, C. 1986. Hydraulic Conductivity and Diffusivity: Laboratory Methods. In: Klute (ed.). Methods of Soil Analysis. Part I. Physical and Mineralogical Methods. SSSA Book Series : 5.

Koorevaar, P.G. Menelik and Dirksen, C. 1983. Elements of Soil Physics. Developments in Soil Science 13. Elsevier, Amsterdam.

Lachère C., 2012. Les essais Porchet. Infiltrer les eaux pluviales; les enjeux des essais de perméabilité. Adopta. Agence de l'eau Artois-Picardie; Conseil Régional Nord-Pas-de-Calais. 19p.

Lai, J., and L. Ren. 2007. Assessing the size dependency of measured hydraulic conductivity using double-ring infiltrometers and numerical simulation. Soil Sci. Soc. Am. J. 71:1667–1675.

Lamachaire J.M., 1971. Mesure in situ de la perméabilité d'un sol non-saturé. Etude bibliographique. BRGM, Département hydrogéologique. 77p.

Lee, D.M. 1984. A comparison of methods for measuring the saturated hydraulic conductivity of four field soils having a range of textures. M.Sc. thesis, Univ. of Guelph, Canada.

Lemmens B., Desmedt J., Hoes H., De Klerck K., 2007. Bodem geeft geheimen prijs. Het Ingenieursblad 11-12/2007. pp2-6.

Marechal R. en Tavernier R., 1974. Atlas van België. Pedologie. Nationaal Comité voor Geografie.

Mathieu C., Pieltain F., Asseline J., Chossat J.C. et Valentin C., 1998. Analyses physiques des sols – methodes choisies. Lavoisier, 275p.

Maurice Cassan. 2005. Les essais de perméabilité sur site dans la reconnaissance des sols. Presses de l'Ecole des Ponts et Chaussées. 568p

MDDEFP (Ministère du Développement Durable, de l'Environnement, de la Faune et des Parcs), 2014. Guide de Gestion des Eaux Pluviales. Stratégies d'aménagements, principes de conception et pratiques de gestion optimales pour les réseaux de drainage en milieu urbain. Quebec. 386 p.

Mohanty, B.P., Kanwar, R.S., Everts, C.J. (1994) Comparison of Saturated Hydraulic Conductivity Measurement Methods for a Glacial-Till Soil. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 58:672-677.

Mooers, J.D., and D.H. Waller, 1993 ON-Site Wastewater Disposal in Nova Scotia, Final Report, On-Site Wastewater Research Program Phase 2 1990-1993. Technical University of Nova Scotia
Mullins, C. E. & Smith, K. A. (1991). *Soil analysis : physical methods*. New York (N.Y.): Dekker

Mullins, C. E. & Smith K. A. (1991). *Soil analysis : physical methods*. New York (N.Y.): Dekker

Norris J.M. and Skaling W. Guelph Permeameter: Commercial and Regulatory Demands for Acceptance of a New Method. 1992. In *Advances in Measurements of Soil Physical Properties: Bringing Theory into Practice*. : proceedings of a symposium sponsored by Division S-1 of the Soil Science Society of America in San Antonio, Texas, 21-26 Oct. 1990 I editors. G. Clarke Topp, W. Daniel Reynolds, and Richard E. Green. p. em. -(SSSA special publication ; no. 30) ISBN 0-89118-801-0

NSSHHandbook (n.d.), Part 618 (Subpart B), item 88

http://www.nrcs.usda.gov/wps/portal/nrcs/detail/soils/survey/?cid=nrcs142p2_054224

NRCS (n.d.). *National Engineering Handbook*, Part 631 Geology. Chapter 5 Engineering Geology, Logging, Sampling and Testing. National Resources Conservation Service, USDA. 56p.

Odell, B.P., P.H. Groenevelt, and D.E. Elrick. 1998. Rapid determination of hydraulic conductivity in clay liners by early-time analysis. *Soil Sci. Sc. Am. J.* 62.: 56 – 62.

Oosterbaan, R.J. and H.J. Nijland. 1994. Determining the Saturate Hydraulic Conductivity. In: *Drainage Principles and Applications*. H.P. Ritzema. ILRI Publication 16. P435 – 476

OVAM, 2002. Code van goede praktijk - Pump & Treat Deel 1: Grondwateronttrekkingsaspecten. OVAM. 109p.

Philip, J.R. 1957. The theory of infiltration: 1. The infiltration equation and its solution. *Soil Sci.* 83: 345-357. 4. Sorptivity and algebraic infiltration equations. *Soil Sci.* 84: 257-264.

Philip, J.R. 1968. Absorption and infiltration in two- and three-dimensional systems. In *Water in the unsaturated zone*. R.E. Rijtema and H. Wassink (eds.). *Proc. IASH/AIHS (Unesco) Symp., Wageningen*, vol. 1, pp. 503-525.

Philip, J.R. 1969. Theory of infiltration. *Adv. Hydrosoci.* 5 :215-296.

Philip, J.R. 1992. Falling head ponded infiltration. *Water Resour. Res.* 28:2147-2148.

Radcliffe, D.E. and West L.T. 2000. Relating saturated hydraulic conductivity to percolation and borehole permeameter tests. *Soil Surv. Horiz.* 41:99-103.

Rat M., Laviron F., Jorez J.-C. 1970. Essai Lefranc. *Bulletin de Liaison des Laboratoires Routiers*. No. spécial N «Hydraulique des sols», pp.56-66.

Reynolds, W.D. 1993. Saturated hydraulic conductivity: field measurement. Pages 599-613. In M.R. Carter (ed.) *Soil Sampling and Methods of Analysis*. Canadian Society of Soil Science. Lewis Publishers, Boca Raton, USA.

Reynolds, W.D., Elrick, D.E. 1983. A reexamination of the constant head well permeameter method for measuring saturated hydraulic conductivity above the water table. *Soil Sci.*, v. 136, no. 4, pp. 250-268.

Reynolds, W.D., Elrick, D.E. and Topp, G.C. 1983. A reexamination of the constant head well permeameter method for measuring saturated hydraulic conductivity above the water table. *Soil Sci.*, v. 136, no. 4, pp.250-268.

- Reynolds, W.D., Elrick, D.E. 1985. In situ measurement of field-saturated hydraulic conductivity, sorptivity, and the α -parameter using the Guelph permeameter. *Soil Sci.*, v. 140, no. 4, pp. 292-302.
- Reynolds, W.D., Elrick, D.E. and Topp, G.C. 1983. A reexamination of the constant head well permeameter method for measuring saturated hydraulic conductivity above the water table. *Soil Sci.*, v. 136, no. 4, pp.250-268.
- Reynolds, W.D., Elrick, D.E. and Clothier B.E. 1985. The constant head well permeameter.effect on unsaturated flow. *Soil Sci.*, v. 139, no.2, pp. 172-180.
- Reynolds, W.D., and D.E. Elrick. 1990. Ponded infiltration from a single ring: I. Analysis of steady flow. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 54:1233–1241.
- Roederer P., 1987. Perméabilité des sols (Methode Porchet) d'après MM. de Beaucorps, de Chevron-Villette, Langle, Pujos et Roederer. Méthodes recueillis par M. Roederer. E-S 19. Ministère de l'Agriculture, Direction des Sols. Rep.Tunisienne. 15p.
- Smith & Mullins. 1991. Soil analysis Physical Methods. Dekker(chapter 4, p196)
- Stephens, D.B. and Neuman S.P. 1982a. Vadose zone permeability tests: Summary. *Am. Soc. Civ. Eng. Proc. J. Hydrol. Div.* 108:623-639.
- Stephens, D.B. and Neuman, S.P. 1982b. Vadose zone permeability tests: Steady state results. *Am. Soc. Civ. Eng. Proc. J. Hydrol. Div.* 108:640-659.
- Stephens, D.B. and Neuman, S.P. 1982c. Vadose zone permeability tests: Unsteady flow. *Am. Soc. Civ. Eng. Proc. J. Hydrol. Div.* 108:660-677.
- Stephens, D.B., Neuman, S.P, Tyler, S., Lambert, K., Watson, D., Rabold, R., Knowlton, R., Byers, E. and Yates, S. 1983a. In situ determination of hydraulic conductivity in the vadose zone using borehole infiltration tests. Tech. Completion Rep., Proj? B-073-NMEX, N.M. Water Resour. Res. Inst., Las Cruces, N. Mex.
- Stephens, D.B., Tyler, S., Lambert, K. and Yates, S. 1983b. Field experiments to determine saturated hydraulic conductivity in the vadose zone. In: Role of the unsaturated zone in radioactive and hazardous waste disposal. J.W. Mercer et al. (eds.). Ann Arbor Science, Ann Arbor, Mich., pp. 113-126.
- Steur G. en Heijink W., 1987. Bodemkaart van Nederland. Algemene begrippen en indelingen, 3de ed.. Stichting voor bodemkartering, Wageningen.
- Stormwater Management Manual for Western Washington. 2001. Washington State Department of Ecology. Water Quality Program. August 2001. Publication No. 99-13
- Taylor, D. 1948. Fundamentals of soil mechanics. Chapman And Hall, Limited.; New York
- Talsma, T. and Hallam P.M. 1980. Hydraulic conductivity measurement of forest catchments. *Aust. J. Soil Res.* 30:139-148.
- Tan T., Phoon K., Hight D., Lerouel S., Eds., 2007. Characterisation and engineering properties of natural soils. vol.3. Taylor and Francis Group, London.
- Thal Larsen, J.H. (1931). Over den invloed van regenval op den grondwaterstand (tekst van een voordracht uit 1930). *Landbouwkundig Tijdschrift* 43: p. 222-240.
- Trautwein, S., and Boutwell, G. 1994. In-situ hydraulic conductivity tests for compacted soil liners and caps. Hydraulic conductivity and waste contaminant transport in soil. ASTM STP 1142, D. Daniel and S. Trautwein, eds., 184-226.
- Van Alboom, G; Dupont, H.; Maertens, J.; Haelterman, K. 2012. Glauconiethoudende zanden. *Geotechniek*, april 2012. 32-37.
- Van Bavel C.H.M. and Kirkham D., 1948. Field measurements of soil permeability using auger holes. *Proc. Soil. Sc. Soc. Am.*, pp. 90-96

Van Hoorn, J.W. 1979. Determining hydraulic conductivity with the inversed auger hole and infiltrometer methods. In J. Wesseling, ed. Proceedings of the International Drainage Workshop, pp. 150–154. ILRI Publication 25. Wageningen, The Netherlands, ILRI.

Van Ranst, E., Sys, C. 2000. Eenduidige legende voor de digitale bodemkaart van Vlaanderen (Schaal 1:20 000).

Verbist, K., Torfs, S., Cornelis, W.M., Oyarzún, R., Soto, G., Gabriels, D. 2010. Comparison of Single- and Double-Ring Infiltrometer Methods on Stony Soils. *Vadose Zone J.* 8:462-475.

VLARIO, 'Katern afkoppelen, bufferen en infiltreren' (Versie 2, 20 april 2005)

VMM, Waterwegwijzer bouwen en verbouwen, 2010

Watkins D.C.. 1991. The Hydraulic Design and Performance of Soakaways. Report SR 271 December 1991. HR Wallingford Limited, Howbery Park. Wallingford. Oxfordshire OX10 8BA. UK

White, I. and Sully, M.J. 1987. Macroscopic and microscopic capillary length and time scales from field infiltration. *Water Resour. Res.* 23:1514-1522.

Williams M., 2010. BRE365 – it's the pits. *Geoscientist*, Geological Society of London. Vol. 20, nr 9. pg3

Winger R.J., 1960. In place permeability tests and their use in subsurface drainage. United States Bureau of Reclamation. 48 p

Wit K.E. 1963. Meting van de doorlatendheid in ongeroerde monsters. Rapport 17. ICW, Wageningen.

Wösten J.H.M., Veerman G.J. en Stolte J., 2001. Waterretentie en doorlatendheidskarakteristieken boven en ondergronden in Nederland: de Staringreeks (Vernieuwde uitgave 2001). Technisch Document 18, DLO-Staring Centrum, Wageningen.

Wu, L., L. Pan, M. Roberson, and P.J. Shouse. 1997. Numerical evaluation of ring-infiltrimeters under various soil conditions. *Soil Sci.* 162:771–777.

Wyseure G.C.L., Sattar M.G.S., Adey M.A. & Rose D.A., 1997. "Determination of Unsaturated Hydraulic Conductivity in the Field by a Robust Tension Infiltrometer", Department of Agricultural and Environmental Science, University of Newcastle upon Tyne, Groot-Brittannië. Youngs, E.G., 1968. An estimation of sorptivity for infiltration studies from moisture moment considerations. *Soil Science*: September 1968 - Volume 106 - Issue 3 - ppg 157-163.

Youngs, E.G. 1968. An estimation of sorptivity for infiltration studies from moisture moment considerations. *Soil Sci.* 106:157-163.

Youngs, E.G., 1972 (1). Two- and three-dimensional infiltration: Seepage from irrigation channels and infiltrometer rings, *J. Hydrol.*, 15: 301-315

Youngs, E.G., 1972 (2). *Soil Analysis Physical Methods*. Chapter 4. p193.

Youngs, E.G. 2001. Hydraulic conductivity of saturated soils. In K.A. Smith and C.E. Mullins, Eds. *Soil and Environmental Analysis: Physical Methods*, 2nd ed. Marcel Dekker, Inc., New York, NY, pp. 141-181.

Zangar, C.N. 1953. Theory and problems of water percolation. U.S. Dept. Interior, Bureau of Reclamation, Eng. Monogr. 8, Denver, Colorado.

Zhang, Z.F., Groenevelt, P.H. and Parkin, G.W., 1998. The well shape-factor for the measurement of soil hydraulic properties using the Guelph Permeameter. *Soil Tillage Res.* 49:219-221.

www.engineeringtoolbox.com

<http://www.arbeitshilfen-abwasser.de/html/a5-6openendtest.html>

6.2 MODELLERING

Baguis P., Roulin E., Willems P. & Ntegeka V. (2009). Climate change scenarios for precipitation and potential evapotranspiration over central Belgium. *Theor. Appl. Climatol.*, 99(3), 273–286, doi: 10.1007/s00704-009-0146-5.

Bettess R. (1996). Infiltration drainage: manual of good practice. Construction Industry Research and Information Association, London.

CIW (2014). Technisch achtergronddocument bij de gewestelijke stedenbouwkundige verordening hemelwater.

Deckers P., De Maeyer P., Vanneuville W., Peeters P. & Mostaert F. (2012). Uitbouw van het risico-instrumentarium ten behoeve van de EU overstromingsrichtlijn: LATIS LUC. versie 2.0. Waterbouwkundig Laboratorium & Vakgroep Geografie, Universiteit Gent: Antwerpen, België, WL Rapporten, 779_05c.

de Kok J.L., Poelmans L., Uljee I. & Engelen G. (2011). Eindrapport, Landgebruiksveranderingen voor de kostenraming van overstromingen. VITO, 2011/RMA/RDM/N8120_001.

FOD Economie (2011). Kleine en minder kleine gezinnen. Geraadpleegd 24 februari 2015, http://statbel.fgov.be/nl/statistieken/organisatie/statbel/informatie/statbel/in_de_kijker_archief/in_de_kijker_2011/20111206_kleine_en_minder_kleine_gezinnen_archives.jsp.

Green W.H. & Ampt G. (1911). Studies of Soil Physics. Part I - the Flow of Air and Water through Soils. *Agric. Sci.*, 4, 1–24.

Horton R.E. (1939). Approach toward a Physical Interpretation of Infiltration Capacity. *Proc. Soil Sci. Soc. Am.*, 23(3), 399–417.

IMDC (2013). Uitwerken van een rekenmodel voor het vastleggen van gedifferentieerde bufferingseisen in functie van de waterloop en het vaststellen van een uniforme bufferingseis. VMM, afdeling Ecologisch Toezicht, I/RA/11414/13.248/INE.

IMDC (2016). Opstellen van richtlijnen voor het meten van de infiltratiecapaciteit en het modelmatig onderbouwen voor de dimensionering van infiltratievoorzieningen, Verslag stuurgroepoverleg dd. 12/04/2016. VMM, afdeling Operationeel Waterbeheer, I/VV/11461/16.096/JSW.

IMDC, KU Leuven, KMI, GIM, UCL & U Utrecht (2014). Next-generation tools m.b.t hydrometrie, hydrologie en hydraulica in het operationele waterbeheer - fase 1: analyse. Next-generation tools m.b.t. hydrometrie, hydrologie en hydraulica in het operationele waterbeheer - fase 1: analyse, deelopdracht 1: hydrologische neerslagafvoerm modellen. Vlaamse Milieumaatschappij - Afdeling Operationeel Waterbeheer, I/RA/11432/14.097/BPA.

KNMI (2014). KNMI'14: Climate Change scenarios for the 21st Century – A Netherlands perspective; by Bart van den Hurk, Peter Siegmund, Albert Klein Tank (Eds), Jisk Attema, Alexander Bakker, Jules Beersma, Janette Bessembinder, Reinout Boers, Theo Brandsma, Henk van den Brink, Sybren Drijfhout, Henk Eskes, Rein Haarsma, Wilco Hazeleger, Rudmer Jilderda, Caroline Katsman, Geert Lenderink, Jessica Loriaux, Erik van Meijgaard, Twan van Noije, Geert Jan van Oldenborgh, Frank Selten, Pier Siebesma, Andreas Sterl, Hylke de Vries, Michiel van Weele, Renske de Winter and Gerd-Jan van Zadelhoff. KNMI, De Bilt, The Netherlands, Scientific Report WR2014-01.

Bijlage A Werkvoorschriften meetmethoden

HOOFDSTUK 2: In-situ bepaling van de infiltratiesnelheid met de Ringmethode

2.1 Voorbereiding

2.1.1 Benodigd materiaal

- Ring of ringen (een ring met een kleine en een ring met een grotere diameter als gewerkt wordt met dubbele ring);
- kruisvormig verbindingsstuk;
- aangepaste hamer;
- vlotter met houder en meetstaaf;
- chronometer of polshorloge met secondewijzer;
- thermometer;
- watercontainers;
- grint of
- soepele plasticfolie met een oppervlakte minstens ter grootte van de oppervlakte omschreven door de kleine ring;
- borstel;
- schop, in geval er niet rechtstreeks op ongestoord maaiveld wordt gewerkt;
- veldboek in geval het een proefveld betreft;
- formulier INFILRINGF (BDB\O&S\FORMULIER\INFILRING\INFILRINGF).

2.1.2 Bepaling meetplaats

De meetplaats wordt opgegeven op het formulier of wordt gekozen in de referentiezone.

De uiteindelijk gekozen meetplaats moet voldoende karakteristiek zijn voor het ruimere bodemoppervlak in de referentiezone. Let er op dat op de gekozen plaats geen uitzonderlijke verschijnselen aanwezig zijn: mol- of muizengaten, stenen, organisch materiaal zoals grove wortels, hout,...

Noteer de meetplaats op het formulier (BDB\O&S\FORMULIER\INFILRING\INFILRINGF).

De uitvoering gebeurt op maaiveld of volgens de diepte(s) vermeld op het formulier.

Als de diepte van het meetvlak niet vermeld staat op het formulier, wordt deze als volgt bepaald:

1. Er wordt een **profielbeschrijving** uitgevoerd volgens het werkvoorschrift PROFIEL (BDB\O&S\WV\PROFIEL). Het profiel wordt elementair beschreven en genoteerd op het formulier INLPROF: diepte en aard van het bodemmateriaal van elke verschillende bodemlaag (van...tot...cm onder maaiveld).

2. Vervolgens wordt de diepte van het meetvlak bepaald aan de hand van de volgende richtlijn: de bodem blijft homogeen tot minstens 0,3 m onder het meetvlak.
3. Indien de grondwatertafel zich op minder dan 30 cm onder het meetvlak bevindt kan de meting niet uitgevoerd worden, tenzij volgens instructies vermeld op het formulier.

Noteer of schets de meetplaats op het formulier.

Afwijkingen van de standaard vooropgestelde meetplaats worden steeds vermeld op het formulier.

2.1.3 Voorbereiding meetplaats

Meting op maaiveldhoogte

Afhankelijk van instructie op het formulier wordt gemeten op het onverstoord bodemoppervlak of wordt het bodemoppervlak voorbereid.

Het oppervlak, minstens ter grootte van de ring met de grootste diameter, kan voorbereid worden op twee wijzen:

- ofwel worden de grove elementen op het bodemoppervlak verwijderd: de strooisellaag, het wegsnijden van vegetatie zonder het oppervlak zelf te storen,
- ofwel wordt met de schop de eerste 1 à 2 cm van het oppervlak weggesneden en afgehaald. Belangrijk is hierbij het oppervlak zo weinig mogelijk te versmeren.

Indien relevant, beschrijf kort de voorbereiding van het bodemoppervlak op het formulier.

Meting op diepte

Graaf een put tot de diepte waarop de meting moet uitgevoerd worden en maak een horizontaal oppervlak vrij, groot genoeg om de ring(en) te kunnen plaatsen. Belangrijk hierbij is om het meetoppervlak zo weinig mogelijk te versmeren. Voorzie ook ruimte bij het graven van de put om af te dalen in de diepte en de meting te kunnen uitvoeren.

Steeds geldt:

Betreed nooit het oppervlak van de meting, dit is de plaats waar de ring of ringen liggen of zullen liggen.

Indien het oppervlak sterk versmeerd werd door het graven of voorbereiden van het meetvlak, bv. bij zeer natte bodem, ga er dan eerst over met een borstel in één beweging om het vlak te verruwen.

Meet de diepte van het meetvlak t.o.v. het maaiveld (mv) en noteer deze op het formulier.

2.1.4 Aantal herhalingen

Het aantal herhalingen (aantal meetplaatsen) is afhankelijk van de opdracht, het doel van de meting en/of de gewenste nauwkeurigheid. Als het aantal niet vermeld werd, dan bedraagt het aantal herhalingen minstens 3 voor een zelfde referentiezone.

2.2 Uitvoering

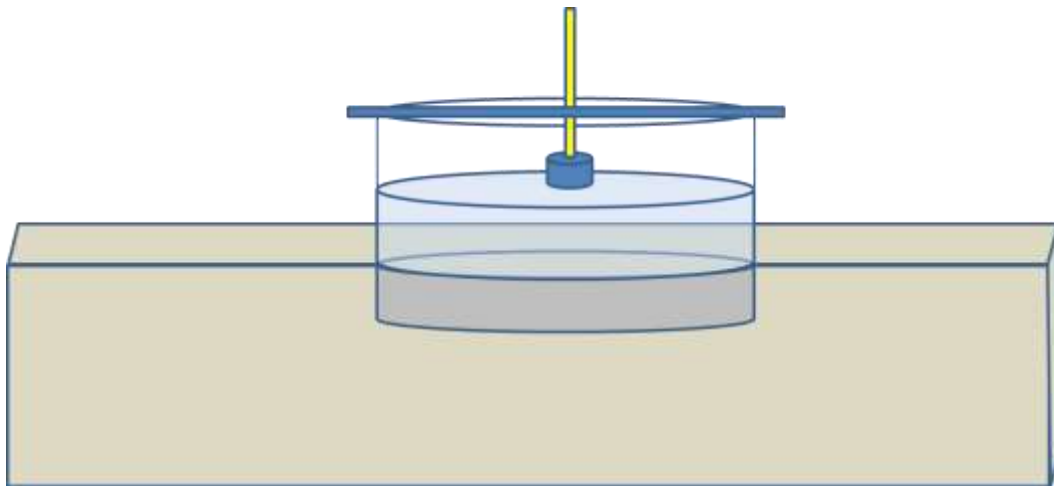
Er bestaan 2 varianten in de uitvoering van de methode: uitvoering met Enkele Ring, of uitvoering met Dubbele Ring. Beide hebben dezelfde technische en wetenschappelijke grondslag.

De keuze voor een van beide uitvoeringswijzen is vooraf aangegeven op het formulier en/of opgegeven door de opdrachtgever.

2.2.1 Uitvoering met enkele ring

Voorbereiding

1. Noteer op het formulier, onder opmerkingen, de vochttoestand van de bodem indien deze nat of zeer nat is.
2. Plaats, na de eventuele voorbereiding van de meetplaats, de ring met de snijrand op het bodemoppervlak.
3. Plaats het kruisvormig verbindingsstuk centraal op de ring.



4. Sla met de hamer op het kruisvormig verbindingsstuk waardoor de ring in de bodem wordt gedreven. Als de bodem uitzonderlijk hard is en de ring niet in de bodem dringt, kan je beide voeten aan weerszijden van de hamer op het verbindingsstuk plaatsen en het eigen gewicht tijdens het hameren mee laten wegen op het verbindingsstuk. Let er op dat de ring verticaal in de bodem dringt. De ring moet voldoende diep in de bodem dringen zodat er geen water zijdelings onder de ringwand kan wegsijpelen. In het bijzonder in stenige ofwel in zeer zware gronden dient hieraan bijzonder zorg besteed te worden. In het bijzonder in

stenige ofwel in zeer zware gronden dient hieraan bijzonder zorg besteed te worden.

5. Neem het kruisvormig verbindingsstuk weg. Meet de hoogte van de ring boven het meetoppervlak en noteer dit op het formulier.
6. Ofwel: Leg een grintlaagje van 1 à 2 cm op het bodemoppervlak in de ring, zonder de bodem te storen.
Ofwel: Leg een plastic folie op het bodemoppervlak midden in de ring, zonder de bodem te storen.
7. Meet de diameter en de hoogte van de ring boven het meetoppervlak en noteer deze op het formulier.
8. Meet de temperatuur van de grond vlak naast, buiten de ring: steek de sonde gedurende minstens 1 minuut op 5 cm diepte. Meet de temperatuur tot op 1 °C nauwkeurig en noteer deze op het formulier.

Verzadiging

9. Meet de temperatuur van het gebruikte water tot op 1 °C nauwkeurig en noteer deze op het formulier.
10. Giet voorzichtig water binnen in de ring. Om de waterstroom te breken kan boven het grind of de plastic folie een voorwerp (bv. een dunne tegel) gelegd worden zodat de waterstroom het grind of de folie niet verplaatst. Giet water tot een waterpeil van ca. 10 cm boven het bodemoppervlak. Noteer het tijdstip op het formulier.

Controleer of er geen water onder de ringwand door sijpelt. Indien dit het geval is, moet de ring dieper in de grond geslagen worden. In het uitzonderlijke geval blijft toch steeds water wegsijpelen, bijvoorbeeld in stenige ondergronden. Indien naar schatting meer dan 10% van de waterdaling in de ring veroorzaakt wordt door zijlings wegsijpelend water, wordt de uitvoering van de methode op deze plaats gestopt. Noteer dit bij de opmerkingen.

Normaal zal het water zal in de bodem dringen waardoor het waterpeil met enkele cm zal dalen en het bovenste deel van het bodemoppervlak zal verzadigen.

Als het water zeer traag zakt (minder dan 1 cm per 5 minuten) kan je, indien je over meerdere meetsets beschikt, reeds een tweede meting opstarten op een andere meetplaats.

Als het waterpeil zeer snel wegzakt (5 cm per minuut), vul dan een tweede maal bij tot meer dan 10 cm boven het bodemoppervlak zodat er voldoende opnames kunnen gebeuren tijdens de eigenlijke meting. Het is mogelijk dat preferentiële stromingskanalen aanwezig zijn (worm-, wortel- of andere gaten).

Let erop dat er steeds water in de meetring staat, totdat de meting start.

Meting

11. Noteer het tijdstip, als einde van de verzadigingsperiode. Vul zo nodig terug water bij tot ca. 10 cm boven het meetvlak. Als er met een voorwerp werd gewerkt om de waterstraal te breken, haal dit dan weg. Indien er met een plastic folie werd gewerkt, haal dan de aangebrachte folie weg door deze onder water op te rollen of te plooien en daarna voorzichtig uit het water te halen. Er mag nauwelijks slib worden gevormd gezien dit slib tijdens de infiltratie de poriën snel zal afdichten.
12. Plaats onmiddellijk de houder met vlotter op de ring en start de meting van de dalingssnelheid van het wateroppervlak in de binnenring door aflezing van het waterpeil op het meetstaafje t.o.v. een referentieniveau op de houder. Het interval van meting wordt bepaald door de dalingssnelheid. Dit interval kan gaan van 5 seconden tot 30 minuten of langer. Blijf meten tot je bij benadering (10 % afwijking) een gemiddeld constante dalingssnelheid vaststelt. Noteer de tijden en bijhorende meetstanden op het formulier.
 - a. De meting kan worden beëindigd als er op minstens drie opeenvolgende opnamemomenten een gemiddeld constante dalingssnelheid wordt vastgesteld.
 - b. Als het waterpeil niet meetbaar daalt, moet de waterstand driemaal worden genoteerd binnen een tijdsspanne van 45 minuten, waarna de meting mag worden beëindigd.

2.2.2 Uitvoering met dubbele ring

In deze uitvoering worden 2 ringen met een verschillende diameter gebruikt.

Vorbereiding

1. Plaats, na de eventuele voorbereiding van de meetplaats, de grote ring met de snijrand op het bodemoppervlak. Plaats vervolgens de kleine ring (meetring) in het centrum van de grote ring, eveneens met de snijrand op het bodemoppervlak.
2. Plaats het kruisvormig verbindingsstuk centraal op de beide ringen.
3. Sla met de hamer op de afdekplaat waardoor beide ringen in de bodem worden gedreven. Als de bodem uitzonderlijk hard is en de ringen niet in de bodem dringen, kan je beide voeten aan weerszijden van de hamer op de afdekplaat plaatsen en het eigen gewicht tijdens het hameren mee laten wegen op de afdekplaat. Let er op dat de ringen verticaal in de bodem dringen. De ringen moeten voldoende diep in de bodem zitten zodat er geen water onder de ringen kan wegsijpelen.
4. Neem het kruisvormig verbindingsstuk weg. Leg ofwel grint ofwel de plasticfolie op het bodemoppervlak in de kleine ring zoals hoger beschreven.

5. Meet de diameter en de hoogte van de kleine ring boven het meetoppervlak en noteer deze op het formulier.
6. Meet de temperatuur van de grond vlak naast, buiten de ring: steek de sonde gedurende minstens 1 minuut op 5 cm diepte. Meet de temperatuur tot op 1 °C nauwkeurig en noteer deze op het formulier.

Verzadiging

7. Meet de temperatuur van het gebruikte water tot op 1 °C nauwkeurig en noteer deze op het formulier.
8. Giet voorzichtig water in de zone tussen binnen- en buitenring, en daarna ook binnen de binnenring (meetring), tot een hoogte van ca. 10 cm boven het bodemoppervlak. Dit water zal deels in de bodem dringen waardoor het peil met enkele cm zal dalen en de bovenste ca. 10 cm van het bodemoppervlak zal verzadigen. Noteer het tijdstip op het formulier.
9. Controleer of er geen water onder de buitenringwand door sijpelt. Indien dit het geval is, moet de ring dieper in de grond geslagen worden. In het uitzonderlijke geval blijft toch steeds water wegsijpelen, bijvoorbeeld in stenige ondergronden. Indien naar schatting meer dan 10% van de waterdaling in de ring veroorzaakt wordt door zijlings wegsijpelend water, wordt de uitvoering van de methode op deze plaats gestopt. Noteer dit bij de opmerkingen.

Indien het water zeer traag zakt (minder dan 1 cm per 5 minuten) kan je, indien je over meerdere meetsets beschikt, reeds een tweede meting opstarten op een andere meetplaats.

Indien het waterpeil zeer snel wegzakt (5 cm per minuut), vul dan een tweede maal bij tot minstens 10 cm boven het bodemoppervlak. Het is mogelijk dat preferentiële stromingskanalen aanwezig zijn (worm- of andere gaten).

Let erop dat er steeds water in de binnenring (meetring) staat, totdat de meting start.

Meting

10. Noteer het tijdstip, als einde van de verzadigingsperiode. Vul de binnenring tot minstens 10 cm boven het bodemoppervlak door er voorzichtig zuiver water in te gieten zodat het bodemoppervlak niet gestoord wordt. Indien er met een voorwerp werd gewerkt om de waterstraal te breken, haal dit dan weg. Indien er met een plastic folie werd gewerkt, haal de folie weg door deze onder water op te rollen of te plooien en daarna voorzichtig uit het water te halen. Er mag nauwelijks slib worden gevormd gezien dit slib tijdens de infiltratie de poriën snel zal afdichten.

11. Plaats onmiddellijk de houder met vlotter op de binnenring en start de meting van de dalingssnelheid van het wateroppervlak in de binnenring door aflezing van het waterpeil op het meetstaafje t.o.v. een referentieniveau. Het interval van meting wordt bepaald door de dalingssnelheid. Dit kan gaan van 5 sec tot 30 minuten. Blijf meten tot je bij benadering (10% afwijking) een constante dalingssnelheid vaststelt. Noteer de tijden en bijhorende meetstanden op het formulier.
 - a. De meting kan worden beëindigd als er op drie opnamemomenten een gemiddeld constante dalingssnelheid wordt vastgesteld.
 - b. Als het waterpeil niet meetbaar daalt, moet de waterstand driemaal worden genoteerd binnen een tijdsspanne van 45 minuten, waarna de meting mag worden beëindigd.
12. Tijdens de meting moet er steeds water staan tussen binnen- en buitenring, of de bodem in deze zone moet verzadigd blijven. Vul zo nodig water bij.

2.3 Afwerking en nazorg

Verwijder na het beëindigen van de meting de houder met vlotter en trek de binnen- en buitenring uit de bodem. Het resterende water kan gerecupereerd worden om bv. de zone tussen de binnen- en buitenring op de volgende meetplaats te vullen.

De op het formulier (BDB\O&S\FORMULIER\INFILRING\INFILRINGF) gevraagde inlichtingen moeten duidelijk en volledig ingevuld worden.

Het materiaal moet na afloop van de staalname gereinigd worden.

2.4 Opmerkingen

Het werkvoorschrift kan afwijken van de standaard vooropgestelde werkwijze naargelang de doelstellingen die gerealiseerd moeten worden. Dit wordt aangegeven in het projectplan en het formulier door de projectverantwoordelijke.

Locatie:		Schets van de plaats t.o.v. bv. straat, met ligging van de herhalingen:
Uitvoerder:		
Datum:		
ENKELE of DUBBELE Ring:		
Bodemtemperatuur:	°C	
Watertemperatuur:	°C	
Vorbereiding van de meetoppervlakte:		

[illegible]

HOOFDSTUK 2: Bepaling volgens de Constant Head Porchetmethode

2.1 Voorbereiding

2.1.1 Benodigd materiaal

- Edelmanboor (diameter minstens 15 cm);
- spatel voor afwerking van de bodem van het boorput;
- bijhorende riverside boor in geval van diepe boorputten;
- filterelement met hoogte minstens 20 cm en diameter ca. 15 cm (aan te wenden ingeval van risico op inkalven van het boorgat);
- grint;
- thermometer;
- chronometer;
- meter (rol- of plooiometer, lengte tot minstens de diepte van de boorput);
- grove borstel;
- meetset voor Constant-head-Porchetmethode:
 - o statief met vlotter en ventiel;
 - o gegradueerde waterreservoir of maatbeker, met inhoud van minstens 2 liter en met graduering op 0,1 liter of minder;
 - o waterreservoir gevuld met water, minstens 20 liter;
 - o verbindingsslangen;
- formulier KSATPORF (BDB\O&S\FORMULIER\KSATPOR\KSATPORF);
- indien nodig: formulier INLPROF (BDB\O&S\FORMULIER\PROFIEL\INLPROF);
- veldboek of opdrachtformulier met ligging site, figuur van de plattegrond, geplande meetlocatie(s), geplande diepte,...; deze worden verstrekt door de projectverantwoordelijke.

2.1.2 Bepaling van de meetlocatie

De put voor de bepaling wordt geboord in de referentiezone. Afwijkingen van de standaard vooropgestelde meetlocatie worden steeds met motivatie vermeld op het formulier.

2.1.3 Bepaling van de boorgatdiepte

De uitvoering gebeurt volgens de vermelde diepte(s) op het formulier.

Indien relevant: de bodem van de boorput moet normaliter gelijk zijn aan de diepte van de toekomstig aan te leggen infiltratievoorziening.

De boorput is minstens 20 cm diep in zandtextuur, gaande naar minstens 30 cm diep in zwaardere texturen. Als vanaf het maaiveld wordt geboord om de meting uit te voeren op een dieperliggende bodemlaag, moet de boorput vanzelfsprekend dieper zijn.

Als de boorputdiepte niet vermeld staat op het opdrachtformulier wordt deze als volgt bepaald:

1. Er wordt een **profielbeschrijving** uitgevoerd volgens het werkvoorschrift PROFIEL (BDB\O&S\WV\PROFIEL). Het profiel wordt elementair beschreven en genoteerd

op het formulier INLPROF: diepte en aard van het bodemmateriaal van elke verschillende bodemlaag (van...tot...cm onder maaiveld).

2. Vervolgens wordt de diepte van de boorput bepaald aan de hand van de volgende richtlijn: de aan te leggen waterkolom moet in een homogene bodemlaag liggen die homogeen blijft tot minstens 0,3 m onder de bodem van de boorput. De waterkolom (hoogte minstens 20 à 30 cm) moet in dezelfde bodemlaag liggen.
3. Indien de grondwatertafel zich op minder dan 30 cm onder de bodem van de put bevindt kan de meting niet uitgevoerd worden.

Noteer of schets de meetplaats op het formulier.

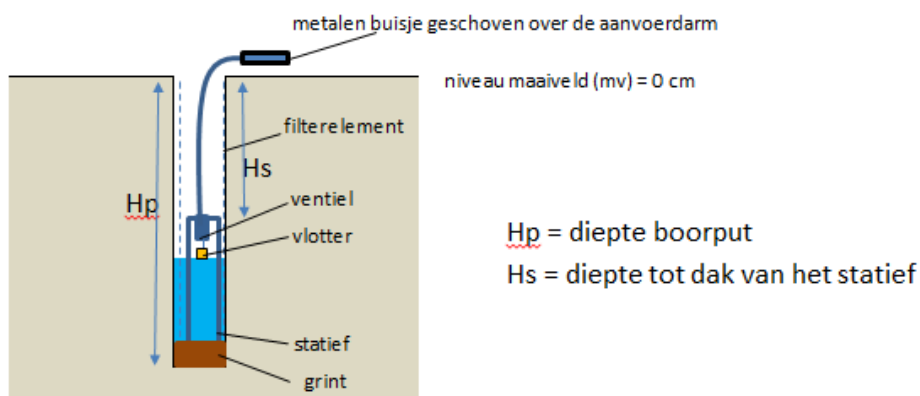
2.1.4 Aantal boorputten (herhalingen)

Voor een zelfde referentiezone moet de meting gebeuren in minstens 3 boorputten. Afwijkingen van het aantal putten of herhalingen worden vermeld in het proefveldboek of op het formulier.

2.2 Uitvoering

VOORBEREIDING:

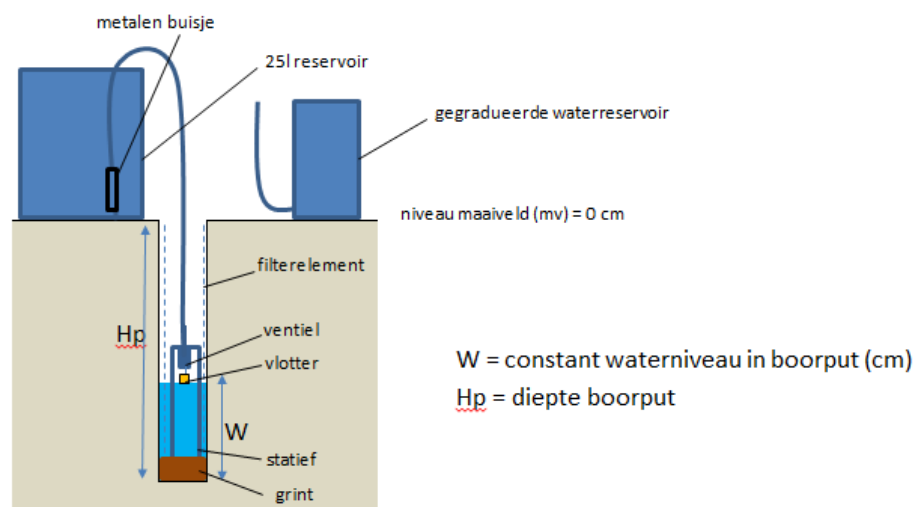
1. Boor een boorput met gekende dimensies (15 cm diameter) met de Edelmanboor tot op de geplande diepte. Noteer de diameter op het formulier als deze geen 15 cm bedraagt.
2. Noteer op het formulier, onder opmerkingen, de vochttoestand van de bodem indien deze nat of zeer nat is.
3. Meet de temperatuur van de bodem gedurende minstens 1 minuut tot op 1 °C nauwkeurig: steek de sonde in ca. 0,5 l vers opgegraven en aangedrukte grond. Noteer deze op het formulier. Als meerdere metingen op een dag worden uitgevoerd volstaat 1 temperatuurbepaling.
4. Werk de bodem van de put af: graaf met een spatel, of bij diepe boorgaten met een riverside boor, in elk geval zodanig dat bodem vlak wordt; hierbij mag de bodem niet worden gecompacteerd of versmeerd. Indien mogelijk of nodig, verruw de putwanden: versmering moet verwijderd worden.



5. Als de wanden van het boorgat zullen invallen: breng het filterelement in het boorgat. Uit voorzorg kan ook steeds de filter worden geplaatst. Als de annulaire ruimte (ruimte tussen buis en wand van het boorgat) meer dan 0,5 cm bedraagt, vul deze ruimte dan op met grint.
6. Meet de diepte van de put (H_p) tot op de mm nauwkeurig ten opzichte van een gekozen vast punt op maaiveldhoogte en noteer dit op het formulier.
7. Strooi een laagje grint van ca. 2 cm op de bodem van de put. Plaats hierop het statief en druk dit zacht aan. Meet de afstand (H_s) van het vaste punt op maaiveldhoogte tot het plexiglazen dak van het statief tot op de mm nauwkeurig en noteer deze op het formulier.

VERZADIGING:

8. Plaats het grote waterreservoir (>20 l) op het maaiveld; open de stop.
9. Meet de temperatuur van het water tot op 1 °C nauwkeurig en noteer deze op het formulier. Als meerdere metingen op een dag worden uitgevoerd volstaat 1 temperatuurbepaling.
10. Vul het kleine, gegradueerde waterreservoir met water, waarbij de uitloopparm voldoende hoog wordt gehouden zodat het water niet uit het reservoir wegloopt, en plaats dit waterreservoir eveneens naast het boorgat.
11. Steek dan de uitloopparm van het kleine waterreservoir in het lange metalen buisje met de darm die naar het statief leidt.
12. Vanaf het ogenblik dat het water door de darm naar het statief in de boorput loopt, wordt het metalen buisje losgekoppeld van de darm van het kleine waterreservoir en snel in het grote waterreservoir gestoken; het uiteinde van het buisje komt tot op de bodem van het grote reservoir. Let er ondertussen op dat het kleine reservoir niet leegloopt. Nu stroomt water vanuit het grote reservoir door hevelwerking via het statief in de put en start de waterverzadiging van de bodem.
13. Noteer de starttijd (uur, minuten) hiervan op het formulier.



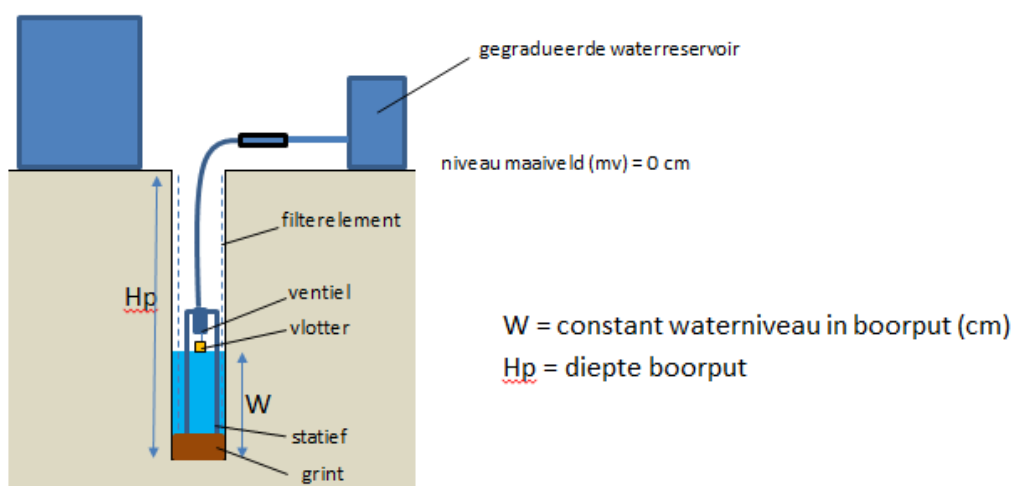
14. Wanneer het waterpeil in de put de vlotter van het statief bereikt, stopt de waterstroming. Een gevoelig onderdeel van de uitrusting is de vlotter met het

ventiel. Hou de correcte werking van het ventiel in het oog. Als bij hoog waterpeil de vlotter het ventiel niet voldoende sluit, blijft water instromen en stijgt het peil boven het statief. Raak even de vlotter aan waardoor het ventiel alsnog zal sluiten en het waterpeil zakt tot de vlotter het peil terug beheerst.

15. Wanneer water in de bodem infiltreert wordt het waterpeil in de put constant gehouden doordat het ventiel opent. Deze toestand moet minstens 4 uur worden aangehouden vóór de meting kan starten. Eventueel moet ondertussen water toegevoegd worden aan het grote reservoir zodat het waterpeil in de put gehandhaafd kan blijven.
 - a. Bij trage infiltratiesnelheid, bv. bij zwaardere texturen dan zand, en wanneer blijkt dat tijdens de hierop volgende meting het geïnfiltreerde volume per tijdseenheid niet constant blijft, moet de verzadigingsperiode verlengd worden.
 - b. Ingeval van zeer hoge infiltratiesnelheid, kan het voorkomen dat het infiltratiedebiet in de put hoger is dan het debiet dat kan geleverd worden door de uitrusting. In dat geval zal het waterpeil in de put de vlotter nooit bereiken in deze periode van 4 uur. Een meting zal dan anders verlopen; zie verder.
16. Na de verzadigingsperiode kan de meting starten. Noteer de tijd (uur, minuten) op het formulier van het einde van de verzadigingsperiode.

METING:

17. Haal de metalen buis uit het grote waterreservoir en sluit het waterdampje van het gevulde, gegradueerd waterreservoir hierop aan. Als alternatief kan ook het metalen buisje onmiddellijk in een gevulde maatbeker worden gestoken. In beide alternatieven is het belangrijk dat de hevelwerking niet wordt onderbroken. Nu voedt het gegradueerd waterreservoir of de maatbeker de waterkolom in de put.



18. Start de meting: lees op tijd 0 (start de chronometer) het volume water af op de wand van het gegradueerde reservoir of maatbeker. Lees af op minstens 0,1 l nauwkeurig. Door interpolatie op zicht kan zelfs afgelezen worden op minder dan 0,05 liter nauwkeurig bij zeer trage infiltratie. Noteer tijd en volume op het

formulier. Zoals hoger beschreven moet tijdens de meting gelet worden op de correcte werking van vlotter en ventiel en moet zo nodig ingegrepen worden.

19. Volg de daling van het volume water: tracht in te schatten hoe snel het volume daalt om het tijdsinterval te bepalen waarop genoteerd wordt. Een registratie kan bv. zijn per 0,1 l water per minuut of per 10 minuten. Noteer dan tijden en volumes op het formulier.
- a. De metingen zijn geldig wanneer de dalingssnelheid, of het geïnfiltreerde volume per tijdseenheid, gemiddeld dezelfde blijft (bv. ca. 0,15 l per 2 minuten). Richtinggevend voor het aantal nodige meettijdstippen is 10. Dit kan minder bedragen als de infiltratie zeer langzaam gebeurt (bv. met 0,1 l per uur). Het aantal kan ook hoger liggen als niet duidelijk is dat het debiet gemiddeld niet constant blijft.
 - b. Als het geïnfiltreerde volume per tijdseenheid gemiddeld niet constant blijft, dan werd de verzadigingsperiode te kort gekozen en moet de verzadiging verder gezet worden vooraleer wordt gemeten.
 - c. Bij zeer lage infiltratiesnelheid (bv. met meting van 0.05 l/h) kan na 2 uur, met waarnemingen op minstens 3 tijdstippen, de meting worden beëindigd.
 - d. In het uitzonderlijke geval van zeer hoge infiltratiesnelheid komt het voor dat het waterpeil de vlotter niet bereikt. Noteer dan minstens 2 maal tijd en volume zodat het debiet van de installatie op deze plaats kan berekend worden. Meet bij benadering de afstand tussen maaiveld en waterpeil en noteer dit onder "Opmerking:", ook als er geen waterpeil in de put waar te nemen valt. De meting wordt dan beëindigd.
20. Indien relevant, beschrijf na afloop van de metingen bij de opmerkingen eventueel de mate waarin de put ingekalfd of verzand is.

2.3 Afwerking en nazorg

De op het formulier gevraagde inlichtingen dienen volledig ingevuld te worden.

Na de meting worden statief, eventuele filter, en reservoirs verwijderd en met water gereinigd, in het bijzonder een filterelement. Boorputten worden opgevuld met het opgeboorde materiaal en het maaiveld wordt verzorgd achtergelaten.

2.4 Opmerkingen

De uitvoering van het werkvoorschrift kan afwijken van de hierboven standaard vooropgestelde werkwijze. Dit wordt aangegeven op het formulier door de projectverantwoordelijke.

Formulier : Uitvoering van de Constant-Head-PORCHETMETHODE

Locatie:

Schets van de plaats t.o.v. bv. straat, met ligging van de boorputten:

Uitvoerder:

Datum:

Bodemtemperatuur:

°C

Watertemperatuur:

°C

[illegible]

HOOFDSTUK 2: Bepaling volgens de Open-Endmethode

2.1 Voorbereiding

2.1.1 Benodigd materiaal

- spade;
- meter (rol- of plooiometer, lengte tot minstens de meetdiepte);
- thermometer;
- minstens 10 l compacteerbaar, vochtig grondmateriaal, bv. zandleem tot klei; de vochttoestand is zodanig dat met de vuist geen water uit het materiaal kan geperst worden;
- lange zware staaf (bv. 1 m lente, 5 cm diameter) om grond te compacteren;

Ofwel meetset voor de Open-End-methode met de BDB-uitrusting:

- o chronometer
- o werkvlak, tafel, met 4 planken of tegels om onder de tafelpoten te plaatsen
- o statief met opgebouwde uitrusting (maatcilinders, kranen op een kraanblok, buisverbindingen)
- o waterreservoir van 35 liter met kraan
- o waterreserve van minstens 30 liter;
- o PVC- of PP-buizen (meetcilinders) met binnendiameter ca. 10 à 11 cm en van verschillende lengtes
- o dispositief met vlotter, afsluiter, en aansluitslang

Ofwel meetset voor de Open-End-methode met de OR-uitrusting:

- o portable of PC met seriële aansluiting;
- o stroomvoorziening (batterij van 12 V of voedingseenheid op basis van 220 V);
- o waterreservoir van minstens 20 liter;
- o waterfilter en waterpomp;
- o meetcilinder voorzien van sensor;
- o verbindingen tussen reservoir, pomp en meetcilinder;
- o elektronische sturingseenheid met bekabeling voor stroomvoorziening, monitoring van de sensor, aansturing van de pompeenheid, dataprocessing en verbinding met een portable PC;

En verder

- Ofwel formulier KSATOE BDBF (BDB\O&S\FORMULIER\KSATOE\KSATOE BDBF
- Ofwel formulier KSATOE ORF (BDB\O&S\FORMULIER\KSATOE\KSATOE ORF);

En verder

- indien nodig: formulier INLPROF (BDB\O&S\FORMULIER\PROFIEL\INLPROF);
- veldboek of opdrachtformulier met ligging van de site, figuur van de plattegrond, geplande meetlocatie(s), geplande diepte,...; deze worden verstrekt door de projectverantwoordelijke.

2.1.2 Bepaling van de meetlocatie

De put voor de bepaling wordt aangelegd in de referentiezone. Afwijkingen van de standaard vooropgestelde meetlocatie worden steeds, met motivatie vermeld op het formulier.

2.1.3 Bepaling van de putdiepte

De uitvoering gebeurt volgens de vermelde diepte(s) op het formulier. De put is minstens 10 cm diep.

Indien relevant: de bodem van de put moet normaliter gelijk zijn aan de diepte van de toekomstig aan te leggen infiltratievoorziening.

Wanneer de putdiepte niet vermeld staat op het opdrachtformulier, wordt deze als volgt bepaald:

1. Er wordt een **profielbeschrijving** uitgevoerd volgens het werkvoorschrift PROFIEL (BDB\O&S\WV\PROFIEL). Het profiel wordt elementair beschreven en genoteerd op het formulier INLPROF: diepte en aard van het bodemmateriaal van elke verschillende bodemlaag (van...tot...cm onder maaiveld).
2. Vervolgens wordt de diepte van de put bepaald aan de hand van de volgende richtlijn: de aan te leggen waterkolom moet op een homogene bodemlaag liggen die homogeen blijft tot minstens 0,3 m onder de bodem van de put.
3. Indien de grondwatertafel zich op minder dan 30 cm onder de bodem van de put bevindt, kan de meting niet uitgevoerd worden.

Noteer of schets de meetplaats op het formulier.

2.1.4 Aantal putten (herhalingen)

Voor een zelfde referentiezone moet de meting gebeuren in minstens 3 putten. Afwijkingen van het aantal putten of herhalingen worden vermeld in het proefveldboek of op het formulier.

2.2 Uitvoering

Er worden 2 uitvoeringswijzen van de methode beschreven: uitvoering met de BDB-uitrusting, of uitvoering met de OR-uitrusting. Beide hebben een identieke technische en wetenschappelijke grondslag.

De uitvoering met de BDB-uitrusting betreft een volledig manuele methode. In de uitvoering met de OR-uitrusting wordt de meting elektronisch geautomatiseerd.

De keuze voor een van beide uitvoeringswijzen is vooraf aangegeven op het formulier en/of opgegeven door de opdrachtgever.

VOORBEREIDING:

1. Graaf met de spade een put tot de geplande meetdiepte. Op de meetdiepte heeft de put een diameter van grofweg 30 cm. De bodem van de put vormt het meetvlak. Draag er zorg voor dat het meetvlak niet wordt versmeerd of vergraven. Noteer de diepte van het meetvlak op het formulier.

2. Noteer op het formulier, onder opmerkingen, de vochttoestand van de bodem indien deze nat of zeer nat is.
3. Meet de temperatuur van de bodem gedurende minstens 1 minuut tot op 1 °C nauwkeurig: neem hiertoe ca. 0,5 l vers opgegraven grond vanop de diepte boven het meetvlak, en steek de sonde hierin en druk deze grond aan. Noteer de temperatuur op het formulier. Ingeval meerdere metingen op eenzelfde dag worden uitgevoerd, dienen de temperatuurmetingen slechts eenmaal te gebeuren.

2.2.1 UITVOERING MET DE BDB-UITRUSTING

SPECIFIEKE VOORBEREIDING:

4. Plaats het statief op het werkvlak of de tafel. Ga aan de hand van de waterpas na of het statief in een grove benadering horizontaal staat: de luchtbel mag niet volledig doorlopen in de pas. Dit is voornamelijk belangrijk op hellend terrein.
5. Plaats het reservoir op de voorziene ruimte op het statief, met de rode kraan aan de zijde van de reeds aanwezige rode kraan. Verbind de buizen tussen beide kranen. Sluit beide kranen. Zie na dat alle zwarte kranen gesloten zijn.
6. Vul het reservoir met minstens 20 tot meer dan 30 liter water.
7. Maak een grove schatting op basis van expertkennis of de bodem zeer of weinig doorlatend is. Kies op deze basis een PP- of PVCbuis (de meetcilinder):
 - Standaard wordt een lange buis (ca. 1 m) gebruikt.
 - In geval de bodem als zeer doorlatend wordt ingeschat, plaats dan een kortere buis.Duid op het formulier aan of een PP of PVC-buis werd gekozen. Meet de lengte (Hc) van de gekozen buis op een halve cm nauwkeurig en noteer deze op het formulier. Deze buis vormt de meetcilinder. De meetcilinder kan een snijdende en een niet-snijdende zijde hebben.
8. Schuif het dispositief voorzichtig volledig over de meetcilinder, gebeurlijk langs de niet snijdende zijde, tot dwarsverbindingen verder schuiven verhinderen. Draag er hierbij zorg voor dat de spanveren correct over de meetcilinder glijden. Plaats de meetcilinder met (het snijdende) open einde verticaal op het meetvlak in de put.
9. Giet rondom de basis aan de buitenzijde van de meetcilinder de vochtige compacteerbare grond, tot op ca. 20 cm hoogte boven het meetvlak. Compacteer deze grond geleidelijk en volledig rondom de meetcilinder, uit te voeren door herhaalde slagen met de lange staaf. Draag er evenwel zorg voor dat de meetcilinder niet wordt geraakt of niet wordt verplaatst. Het aanbrengen en compacteren van deze grond kan in 2 maal gebeuren, bv. indien dit op grotere diepte moet gebeuren en er minder zicht is op de correcte uitvoering. Vul daarboven verder aan met de oorspronkelijke grond, met nog een 10 à 20 cm hoogte. Compacteer ook deze grond. Deze handelingen zorgen ervoor dat de meetcilinder stabiel staat, en dat er slechts een verwaarloosbare hoeveelheid water via het meetvlak opwaarts buiten de cilinder kan infiltreren.

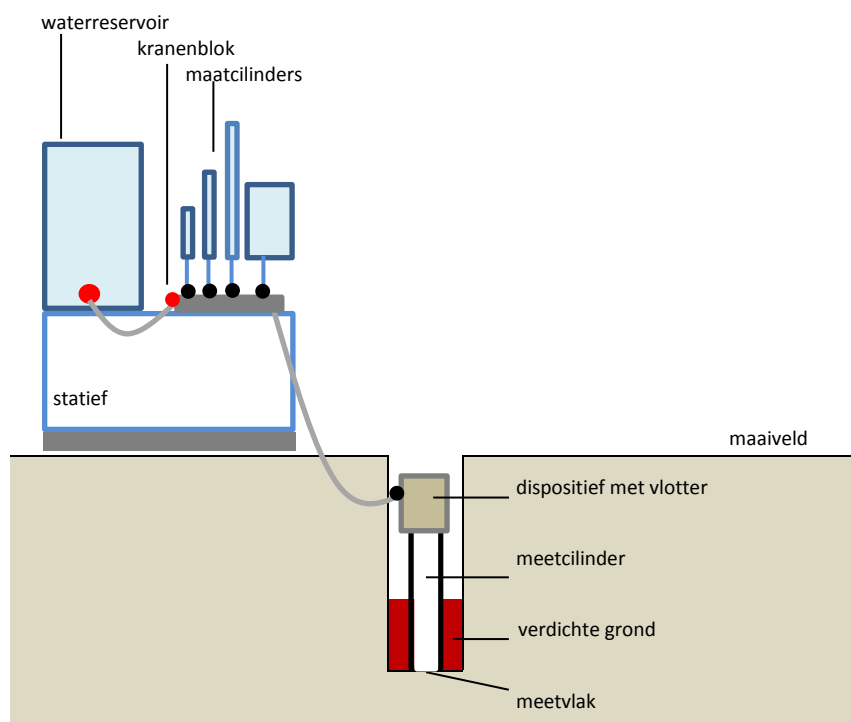


Foto 1: Geïnstalleerde meetcilinder met opgeschoven dispositief en aangesloten aanvoerslang.



Foto 2: Tafel met statief, kranenblok waterreservoir, meetcilinders en aanvoerslang.

Figuur 1: Proefopstelling, schematisch



10. Giet ca. 250 ml grint in de meetcilinder. Zorg ervoor dat geen grint ligt op de vlotter of op het mechanisme van het dispositief.
11. Sluit de zwarte kraan van het dispositief. Koppel de buisaansluiting van de kraan van het dispositief aan op de lange aanvoerslang vanuit het statief.
12. Meet de temperatuur van het water in het reservoir tot op 1 °C nauwkeurig en noteer deze op het formulier. Dit dient enkel te gebeuren bij de eerste meting op een zelfde dag.

VERZADIGING:

13. Start de verzadigingsprocedure op: open de beide rode kranen op het statief en daarna de zwarte kraan aan het dispositief. Noteer dit starttijdstip op het formulier. Nu wordt de meetcilinder geleidelijk gevuld met water. Wanneer de cilinder volledig is gevuld met water, legt de vlotter de wateraanvoer stil. Water infiltreert in de bodem, en het waterpeil daalt in de cilinder tot de vlotter de aanvoer weer opent. De cilinder wordt weer volledig gevuld, enz..
 - Ga na of de vlotter vrij kan bewegen en de wand van de cilinder niet raakt.
 - Meet de afstand (Hv) tussen het waterpeil en de top van de meetcilinder op een halve cm nauwkeurig, en noteer deze op het formulier.
14. Tijdens deze periode worden de zwarte kranen op de kranenblok één voor één geopend tot de maatcilinders maximaal tot aan de hoogste maataanduiding worden gevuld. Sluit dan de overeenkomstige kraan. Indien een hoge doorlatendheid verwacht wordt kunnen eventueel de grootste maatcilinders met de hand nog worden bijgevuld tot boven de hoogste maatstreep.
15. De verzadigingsperiode wordt minstens 20 minuten aangehouden. Mogelijk moet het waterreservoir worden aangevuld.
16. Controleer tijdens deze periode ook voor alle zekerheid dat vanaf de rode kraan op de kranenblok tot aan het dispositief geen enkel lekverlies optreedt.

METING:

17. Noteer op het formulier het tijdstip wanneer de verzadigingsperiode wordt beëindigd.
18. Bij hevige regenval en bij lage doorlatendheid, kan het dispositief voorzichtig worden afgedekt, bv. met een omgekeerde emmer.
19. Neem de chronometer. Sluit de rode kraan van de kranenblok en open onmiddellijk één van de zwarte kranen op de kranenblok. Kies een aanvoer van een kleine maatcilinder voor lage verwachte doorlatendheid, een grote maatcilinder voor hoge verwachte doorlatendheid. Onmiddellijk zal het peil in de gekozen maatcilinder beginnen dalen: deze cilinder voedt nu de meetcilinder op het meetvlak. Schat in dat de totale meettijd van de maatcilinder niet lager zal liggen dan enkele minuten. Indien dat wel het geval zou zijn, sluit dan de zwarte kraan van deze cilinder, en open de kraan van een grotere maatcilinder. Er mag m.a.w. overgeschakeld worden tussen maatcilinders vóór het eigenlijke meettraject start. Het uiteindelijke meettraject moet wel met dezelfde maatcilinder in het gemeten tijdsverloop worden uitgevoerd.

20. Start de meting, het meettraject. Noteer het volume in de maatcilinder en start terzeldertijd de chronometer. Het volume wordt afgelezen tot op de maatstreep, en eventueel tot op helft van de maatstreep. Noteer op geregelde tijdstippen de verlopen tijd en het overeenkomstige volume in de maatcilinder op het formulier.
- Het verdient aanbeveling om de notitie van het volume uit te voeren op vaste tijdsintervallen, bv. elke 10 sec. of elke 30 sec., of elke 5 minuten. Kies het tijdsinterval in functie van de verwachte totale meetduur.
 - Tracht minstens 10 tot 20 maal tijd en volume te noteren.
 - De totale meetduur ligt normaliter tussen enkele minuten en 20 minuten. Uitzonderlijk in zeer weinig doorlatende gronden kan de meetduur 1 uur bedragen.
 - Controleer tijdens de meting of het geïnfiltreerde volume per zelfde tijdsinterval bij benadering hetzelfde blijft. Indien dit niet het geval is, dan moet de verzadigingshandeling hernomen worden met bijkomend 10 minuten. Pas in dat geval het tijdstip aan van einde van verzadiging op het formulier. Start erna terug de meting.
21. Kijk tijdens de meting na of het vlottersysteem correct functioneert, of er, eventueel met tussenpauzes, water wordt aangevoerd, of het waterpeil bij benadering hetzelfde blijft, of de vlotter vrij kan bewegen en de meetcilinder niet raakt.
22. Zelden komt een zeer lage hydraulische conductiviteit (K_{sat}) voor, soms buiten het praktische meetbereik van deze uitrusting:
- Indien binnen een tijdsinterval van 1 uur minder dan 10 ml wordt genoteerd, staak dan de meting, en noteer dan dit en het geïnfiltreerde volume per verlopen tijd op het formulier. De doorlatendheid is dan zeer laag.
 - Indien het waterpeil nooit de vlotter bereikt, is de doorlatendheid zeer groot. Meet dan binnen 1 minuut minstens 3 maal de afstand (H_{vd}) tussen het waterpeil en de top van de buis, op 1 cm nauwkeurig. Indien deze afstand vrijwel constant blijft (niet systematisch daalt of stijgt, op 2 cm nauwkeurig), noteer dan de gemiddelde waarde (H_{vd}), en meet de tijd waarover 1 liter wordt geïnfiltreerd. Dit gebeurt vanzelfsprekend door aflezing op één van de grootste maatcilinders.

EINDE:

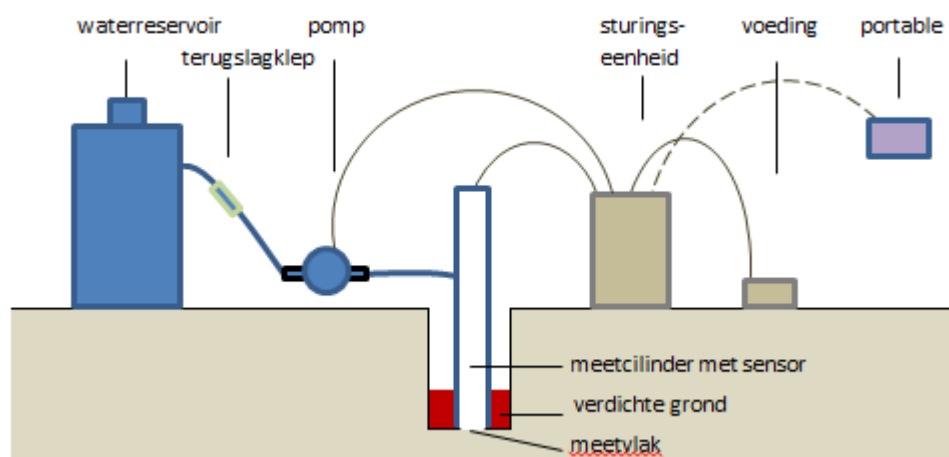
23. Noteer het tijdstip van het einde van de meting op het formulier. Sluit alle kranen.
24. Na de meting wordt het dispositief voorzichtig van de meetcilinder geschoven en terzijde – niet op de grond, wel bv. in een emmer – gelegd. Zorg ervoor dat geen grond of slijk in het dispositief of in de verbindingen en leidingen terecht komt.
25. De meetcilinder wordt uit de testput getrokken en gereinigd.
26. Vervolgens kan een meting in een andere put worden opgestart, ofwel: zie Afwerking en nazorg.

2.2.2 UITVOERING MET DE OR-UITRUSTING

ALGEMEEN: zorg ervoor dat elektrische componenten (sturingseenheid, pomp, voeding, stekkers en contacten) en binnenzijde van de waterdarmen steeds vrij blijven van slijk, water, regen.

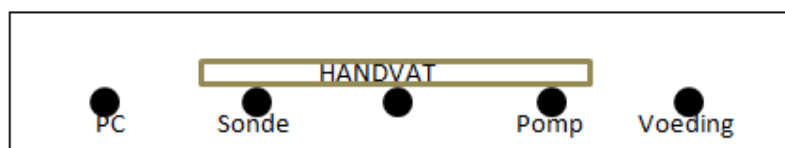
SPECIFIEKE VOORBEREIDING:

3. Plaats de meetcilinder met het open einde in de put centraal op het meetvlak.
4. Giet rondom de basis van de meetcilinder de vochtige compacteerbare grond, tot op ca. 10 hoogte boven het meetvlak. Compacteer deze grond geleidelijk en volledig rondom de meetcilinder, uit te voeren door herhaalde slagen met de lange staaf. Draag er evenwel zorg voor dat de meetcilinder niet wordt geraakt of niet wordt verplaatst. Het aanbrengen en compacteren van deze grond kan in 2 maal gebeuren, bv. indien dit op grotere diepte moet gebeuren en er minder zicht is op de correcte uitvoering. Deze handelingen zorgen ervoor dat de meetcilinder stabiel staat, en dat er slechts een verwaarloosbare hoeveelheid water via het meetvlak opwaarts buiten de cilinder kan infiltreren.
5. De waterleidingen worden aangesloten volgens het schema. De leiding met terugslagklep wordt aangesloten tussen het waterreservoir en de pomp; de stromingsrichting is richting pomp. Let bij de aansluitingen op de stromingsrichting, aangeduid aan de verbindingen met de pomp.



6. De elektrische leidingen worden aangesloten op de sturingseenheid volgens het schema, m.u.v. de portable: deze wordt in geen geval nu reeds aangekoppeld ! Elke aansluiting op de sturingseenheid is uniek; omwisseling is niet mogelijk.

Bovenaanzicht
sturingseenheid;
aansluitingen:



VERZADIGING

7. Meet de temperatuur van het gebruikte water tot op 1 °C nauwkeurig en noteer deze op het formulier.
8. Start de hele procedure op: open de voorklep van de sturingseenheid en activeer de eenheid met de hoofdschakelaar. Noteer dit starttijdstip op het formulier. Vanaf dit tijdstip verlopen de volgende meetprocedures volledig automatisch, aangestuurd door de sturingseenheid. Er dient enkel genoteerd te worden en zorg voor gedragen worden dat het waterreservoir voldoende gevuld blijft zodat de pomp nooit lucht aanzuigt.
9. Onmiddellijk start de pomp en wordt de meetcilinder geleidelijk gevuld met water. Wanneer de cilinder volledig is gevuld met water, legt de sensor de pomp automatisch stil. Water infiltreert in de bodem, en het waterpeil daalt in de cilinder tot de sensor de pomp weer doet aanslaan. De cilinder wordt weer volledig gevuld, enz.. Cyclisch wordt zo eenzelfde klein volume water toegevoegd aan de cilinder. De bodem onder het meetvlak wordt verzadigd met water. Voor de verzadigingsperiode voorziet de sturingseenheid standaard 600 seconden (of 10 minuten). Volg de tijdsaanduiding op de display van de sturingseenheid. Vervolgens start de sturingseenheid met het meten van de cyclustijd, dit is de tijd tussen het cyclisch aanslaan van de pomp. De display van de sturingseenheid geeft dan weer (bv.):

Cyclusnummer	Cyclusduur (seconden)	Voedingsspanning (V)
P. 03	83 s	11,8 V
5,1 E-4		5,1 E-4
Gemiddelde hydraulische conductiviteit (m/s)		Actuele hydraulische conductiviteit (m/s)

In dit werkvoorschrift wordt de verzadigingsperiode verlengd, na de standaard voorziene periode van 600 seconden, als volgt:

- ofwel wordt de verzadigingsperiode verlengd met 10 minuten, tot een maximum van 20 minuten verlopen sinds het starttijdstip. Ondertussen worden op de display van de sturingseenheid reeds cycli weergegeven;
- ofwel worden 20 cycli uitgevoerd in minder dan 20 minuten tijd sinds het starttijdstip (dit laat vermoeden dat de bodem zeer doorlatend is), en wordt op het formulier het tijdstip genoteerd wanneer de 20^{ste} cyclus werd bereikt.

Noteer op het formulier welk van beide werd opgevolgd door aan te vinken ingeval 20 minuten werd bereikt, of door het tijdstip aan te geven waarop de 20 cyclus werd bereikt. Noteer tijdens deze verzadigingsperiode op het formulier indicatief ook enkele cyclusgegevens: cyclusnummer, duur, gemiddelde hydraulische conductiviteit, actuele hydraulische conductiviteit.

Controleer dat de voedingsspanning minstens 11 V bedraagt. Zo niet moet de batterij opgeladen of vervangen worden.

METING:

10. Na 20 minuten of na 20 cycli verzadigen, worden systematisch de gegevens gevolgd op de display:

Volg de evolutie van de gemiddelde en de actuele hydraulische conductiviteit. Indien deze niet meer verschillen dan twee eenheden na de weergeven komma (0,2), mag gestopt worden met de metingen. Dit gebeurt normaliter binnen maximaal 10 cycli in deze meetfase.

Noteer tijdens deze meetfase op het formulier cyclusgegevens van minstens de laatste cycli: cyclusnummer, duur, gemiddelde hydraulische conductiviteit, actuele hydraulische conductiviteit.

Ingeval de cyclusduur aanzienlijk toeneemt (bv. met een factor 5 à 10), dan duidt dit op een zeer lage hydraulische conductiviteit, soms buiten het meetbereik van deze uitrusting. Indien een cyclusduur van 1 uur (3600 s) wordt bereikt, staak dan de meting, en noteer dit op het formulier. Zorg er steeds voor dat het waterreservoir voldoende gevuld blijft zodat de pomp nooit lucht aanzuigt.

EINDE:

11. Koppel de seriële verbinding aan de PC/portable. Start een programma zoals Hyperterminal of Putty.

Het is mogelijk de data uit te lezen uit de sturingseenheid via commando's:

Transfer ; Capture text (en geef naam aan het bestand) ; A

Transfer ; Capture tekst ; Stop

Daarna of in elk geval: maak het geheugen van de sturingseenheid leeg via het commando: I

De sturingseenheid mag uitgeschakeld worden of is nu klaar voor een nieuwe meetprocedure.

12. Na de meting(en) worden de elektrische aansluitingen en waterleidingen voorzichtig afgekoppeld, en wordt de uitrusting verwijderd en gereinigd met een vochtige doek. Zorg ervoor dat geen grondresten in de verbindingen en leidingen terecht komt.

2.3 Afwerking en nazorg

De op het formulier gevraagde inlichtingen dienen volledig ingevuld te worden.

Putten worden opgevuld, en het maaiveld wordt verzorgd achtergelaten.

2.4 Opmerkingen

De uitvoering van het werkvoorschrift kan afwijken van de hierboven standaard vooropgestelde werkwijze. Dit wordt aangegeven in het formulier door de projectverantwoordelijke.

Formulier: Uitvoeren van de in-situ K_{sat} -bepaling volgens de OPEN-ENDmethode met de BDB-uitrusting

Locatie:

Schets van de plaats t.o.v. bv. straat, met ligging van de herhalingen:

Uitvoerder:

Datum:

°C

°C

Testputnummer:		Testputnummer:		Testputnummer:		Testputnummer:	
Diepte put (Hp):	cm	Diepte put (Hp):	cm	Diepte put (Hp):	cm	Diepte put (Hp):	cm
Meetcilinderlengte (L):	cm	Meetcilinderlengte (L):	cm	Meetcilinderlengte (L):	cm	Meetcilinderlengte (L):	cm
Verzadiging van: tot (tijd in u;min):		Verzadiging van: tot (tijd in u;min):		Verzadiging van: tot (tijd in u;min):		Verzadiging van: tot (tijd in u;min):	
Diepte waterpeil (Hv):	cm	Diepte waterpeil (Hv):	cm	Diepte waterpeil (Hv):	cm	Diepte waterpeil (Hv):	cm
Tijd (min;sec)	Watervol. (ml)	Tijd (min;sec)	Watervol. (ml)	Tijd (min;sec)	Watervol. (ml)	Tijd (min;sec)	Watervol. (ml)
Einde meting (u;min):		Einde meting (u;min):		Einde meting (u;min):		Einde meting (u;min):	
Ingeval zeer hoge K _{sat} : diepte tot waterpeil (Hvd):	cm	Ingeval zeer hoge K _{sat} : diepte tot waterpeil (Hvd):	cm	Ingeval zeer hoge K _{sat} : diepte tot waterpeil (Hvd):	cm	Ingeval zeer hoge K _{sat} : diepte tot waterpeil (Hvd):	cm
Opmerking:		Opmerking:		Opmerking:		Opmerking:	

Formulier : Uitvoeren van een in-situ Ksat-bepaling volgens de OPEN-END methode met de OR-uitrusting

Locatie:

Schets van de plaats t.o.v. bv. straat, met ligging van de herhalingen:

Uitvoerder:

Datum:

Bodemtemperatuur:

°C

Watertemperatuur:

°C

Testputnummer:				Testputnummer:			
Diepte meetvlak: cm				Diepte meetvlak: cm			
START:h				START:h			
Cyclus	Tijd (sec)	K _{SAT} (gemiddeld)	K _{SAT} (m/s)	Cyclus	Tijd (sec)	K _{SAT} (gemiddeld)	K _{SAT} (m/s)
		 X 10 ^{.....}	 X 10 ^{.....}			 X 10 ^{.....}	 X 10 ^{.....}
		 X 10 ^{.....}	 X 10 ^{.....}			 X 10 ^{.....}	 X 10 ^{.....}
		 X 10 ^{.....}	 X 10 ^{.....}			 X 10 ^{.....}	 X 10 ^{.....}
		 X 10 ^{.....}	 X 10 ^{.....}			 X 10 ^{.....}	 X 10 ^{.....}
20 ^e cyclus:h..... of na 20 min.				20 ^e cyclus:h..... of na 20 min.			
Cyclus	Tijd (sec)	K _{SAT} (gemiddeld)	K _{SAT} (m/s)	Cyclus	Tijd (sec)	K _{SAT} (gemiddeld)	K _{SAT} (m/s)
		 X 10 ^{.....}	 X 10 ^{.....}			 X 10 ^{.....}	 X 10 ^{.....}
		 X 10 ^{.....}	 X 10 ^{.....}			 X 10 ^{.....}	 X 10 ^{.....}
		 X 10 ^{.....}	 X 10 ^{.....}			 X 10 ^{.....}	 X 10 ^{.....}
		 X 10 ^{.....}	 X 10 ^{.....}			 X 10 ^{.....}	 X 10 ^{.....}
		 X 10 ^{.....}	 X 10 ^{.....}			 X 10 ^{.....}	 X 10 ^{.....}
		 X 10 ^{.....}	 X 10 ^{.....}			 X 10 ^{.....}	 X 10 ^{.....}
		 X 10 ^{.....}	 X 10 ^{.....}			 X 10 ^{.....}	 X 10 ^{.....}
		 X 10 ^{.....}	 X 10 ^{.....}			 X 10 ^{.....}	 X 10 ^{.....}
		 X 10 ^{.....}	 X 10 ^{.....}			 X 10 ^{.....}	 X 10 ^{.....}
		 X 10 ^{.....}	 X 10 ^{.....}			 X 10 ^{.....}	 X 10 ^{.....}
Opmerking:				Opmerking:			

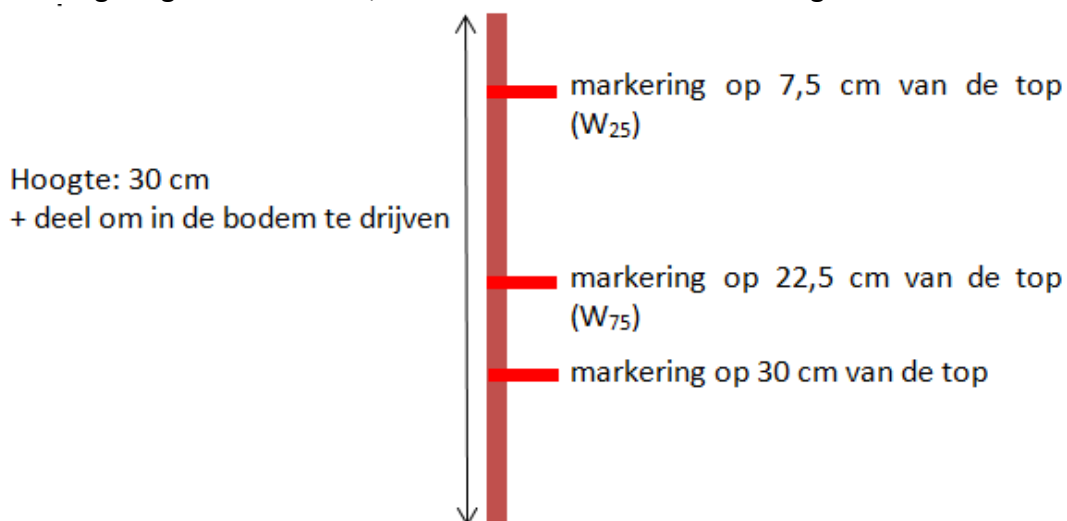
Testputnummer:				Testputnummer:			
Diepte meetvlak: cm				Diepte meetvlak: cm			
START:h				START:h			
Cyclus	Tijd (sec)	K _{SAT} (gemiddeld)	K _{SAT} (m/s)	Cyclus	Tijd (sec)	K _{SAT} (gemiddeld)	K _{SAT} (m/s)
		 X 10 ^{.....}	 X 10 ^{.....}			 X 10 ^{.....}	 X 10 ^{.....}
		 X 10 ^{.....}	 X 10 ^{.....}			 X 10 ^{.....}	 X 10 ^{.....}
		 X 10 ^{.....}	 X 10 ^{.....}			 X 10 ^{.....}	 X 10 ^{.....}
		 X 10 ^{.....}	 X 10 ^{.....}			 X 10 ^{.....}	 X 10 ^{.....}
20 ^e cyclus:h..... of na 20 min.				20 ^e cyclus:h..... of na 20 min.			
Cyclus	Tijd (sec)	K _{SAT} (gemiddeld)	K _{SAT} (m/s)	Cyclus	Tijd (sec)	K _{SAT} (gemiddeld)	K _{SAT} (m/s)
		 X 10 ^{.....}	 X 10 ^{.....}			 X 10 ^{.....}	 X 10 ^{.....}
		 X 10 ^{.....}	 X 10 ^{.....}			 X 10 ^{.....}	 X 10 ^{.....}
		 X 10 ^{.....}	 X 10 ^{.....}			 X 10 ^{.....}	 X 10 ^{.....}
		 X 10 ^{.....}	 X 10 ^{.....}			 X 10 ^{.....}	 X 10 ^{.....}
		 X 10 ^{.....}	 X 10 ^{.....}			 X 10 ^{.....}	 X 10 ^{.....}
		 X 10 ^{.....}	 X 10 ^{.....}			 X 10 ^{.....}	 X 10 ^{.....}
		 X 10 ^{.....}	 X 10 ^{.....}			 X 10 ^{.....}	 X 10 ^{.....}
		 X 10 ^{.....}	 X 10 ^{.....}			 X 10 ^{.....}	 X 10 ^{.....}
		 X 10 ^{.....}	 X 10 ^{.....}			 X 10 ^{.....}	 X 10 ^{.....}
Opmerking:				Opmerking:			

HOOFDSTUK 2: Bepaling volgens de Soakawaymethode

2.1 Voorbereiding

2.1.1 Benodigd materiaal

- Edelmanboorset (diameter minstens 8 cm), ingeval een profielbeschrijving dient te worden uitgevoerd;
- spade;
- grove handborstel;
- chronometer;
- thermometer;
- stalen rolmeter (3 m);
- voorzie voldoende water: normaal meer dan 60 l water per put (per test); uitzonderlijk in zeer doorlatende bodems meer dan 300 l water per test);
- veldboek ingeval het een proefveld betreft;
- formulier KSATSOF (BDB\O&S\FORMULIER\KSATSO\KSATSOF);
- indien nodig: formulier INLPROF (BDB\O&S\FORMULIER\PROFIEL\INLPROF);
- grint;
- een recipiënt dat zwaarder weegt dan water (bv. een glazen bokaal van ca. 8 cm diameter en 8 cm hoogte);
- een meetlat die in de bodem kan gedreven worden of met een hamer in de bodem geslagen kan worden; de meetlat is schematisch als volgt te voorzien:



LET WEL: Andere uitvoeringen van de meetlat zijn mogelijk: bv. waarbij het deel om in de bodem te drijven duidelijk verschilt van de meetlat in de testput (de markering op 30 cm van de top is dan overbodig), en/of met een markering op de meetlat op 30 cm boven het gedeelte dat in de bodem wordt gedreven. Hou hiermee rekening tijdens de uitvoering.

2.1.2 Bepaling van de meetlocatie

De put voor de bepaling wordt gegraven in de referentiezone. Noteer de meetlocatie op het formulier. Afwijkingen van de standaard vooropgestelde meetlocatie worden steeds vermeld op het formulier.

2.1.3 Bepaling van de putdiepte

De uitvoering gebeurt volgens de vermelde dieptes op het formulier.

Indien relevant: de bodem van de put moet normaliter gelijk zijn aan de diepte van de toekomstig aan te leggen infiltratievoorziening.

Als de putdiepte niet vermeld staat op het opdrachtformulier, wordt deze als volgt bepaald:

1. Er wordt een **profielbeschrijving** uitgevoerd volgens het werkvoorschrift PROFIEL (BDB\O&S\WV\PROFIEL). Het profiel wordt elementair beschreven en genoteerd op het formulier INLPROF: diepte en aard van het bodemmateriaal van elke verschillende bodemlaag (van...tot...cm onder maaiveld).
2. Vervolgens wordt de diepte van de put bepaald aan de hand van de volgende richtlijn: de aan te leggen waterkolom moet in een homogene bodemlaag liggen die homogeen blijft tot minstens 0,3 m onder de bodem van de put. De waterkolom (hoogte ca. 30 cm) moet in dezelfde bodemlaag liggen.
3. Als de grondwatertafel zich op minder dan 30 cm onder de bodem van de put bevindt kan de meting niet uitgevoerd worden.

Noteer of schets de meetplaats op het formulier KSATSOF.

2.1.4 Aantal putten (herhalingen in de referentiezone)

Er moeten minstens 3 testputten gegraven worden in een zelfde referentiezone. Afwijkingen van het aantal putten of herhalingen worden vermeld in het proefveldboek of op het formulier.

2.2 Uitvoering

VOORBEREIDING:

1. Graaf een put met verticale wanden, met gekende dimensies (type: L30xB30 cm² x D minimum 30 cm). Zorg er maximaal voor dat de grond van de wanden en de bodem van de put niet versmeerd of aangedrukt worden. Als gegraven wordt met een spade, dan mag de spade nooit tegen de putwand gedrukt worden. Hierdoor wordt aandrukken van de wand vermeden. In de praktijk kan de spade bv. tegen een voettip worden afgeduwd. Als verregaande versmering niet te vermijden is, verruw dan de wanden en de bodem met de grove handborstel in één beweging per wand of bodem.
2. Noteer op het formulier, onder opmerkingen, de vochttoestand van de bodem als deze nat of zeer nat is.
3. Meet de temperatuur gedurende minstens 1 minuut tot op 1 °C nauwkeurig, van het te gebruiken water en vervolgens van de bodem: steek de sonde in ca. 0,5 l vers opgegraven en aangedrukte grond). Noteer deze op het formulier. Als

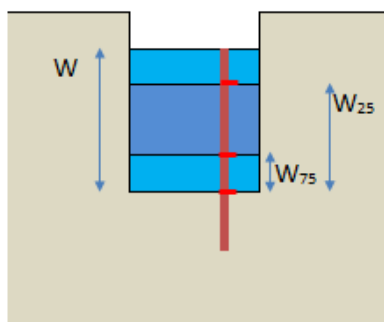
meerdere metingen op een dag worden uitgevoerd volstaat 1 temperatuurbepaling.

4. Meet de put op en noteer de exacte afmetingen op het formulier (lengte, breedte en diepte) in mm, de diepte t.o.v. maaiveld (mv).
5. Drijf de meetlat verticaal in de bodem tot op de diepte dat de onderste markering op de lat net de bodem van de put bereikt. De top van de meetlat bevindt zich nu op 30 cm hoogte boven de putbodem.
6. Giet een laagje grint (ca. 1cm) op de bodem van de put. Plaats op het grint een recipiënt waarin het water zal gegoten worden. Deze voorzieningen dienen om verstoring van de bodem te vermijden bij het gieten van water in de put.

VERZADIGING:

7. Vul de put met water tot minstens boven de top van de meetlat (normaal minstens 30 l). Giet hierbij het water geleidelijk in het recipiënt waarbij er zorg voor wordt gedragen dat het stromende water de bodem en de wanden van de put zo minimaal mogelijk verstoort. Laat het water volledig infiltreren in de bodem om de omringende grond te verzadigen. Noteer het tijdstip van de start van deze infiltratie op het formulier.
 - a. Als het water snel infiltreert (binnen 10 minuten) moet het gat telkens terug gevuld worden tot de infiltratietijd langer duurt dan 10 minuten. Dit moet tot maximum 10 keer herhaald worden.
 - b. Als de infiltratie langer duurt dan 10 minuten kan de meting gestart worden na deze infiltratie.
 - c. Als duidelijk wordt dat het water binnen een tijd van 6 uur niet volledig infiltreert, is de bodem geheel niet geschikt voor infiltratievoorzieningen. Meet in dat geval de afstand in mm tussen de top van de meetlat en het watervlak en het tijdstip waarop deze vaststelling werd gedaan. Deze proef wordt dan gestaakt.

Noteer het tijdstip van het einde van deze infiltratie op het formulier.



niveau maaiveld (mv)

W = waterniveau in testput bij start van de meting

$W = 30$ cm boven het niveau van de bodem van de put.

W_{25} = waterniveau boven de bodem van de put wanneer 25% van de waterkolom geïnfiltreerd is.

W_{75} = waterniveau boven de bodem van de put wanneer 75% van de waterkolom geïnfiltreerd is.

METING:

8. Vul de put nogmaals met water tot aan de top van de meetlat en volg de daling van het waterniveau tijdens de infiltratie. Noteer op het formulier het tijdstip TW25 (tot op een minuut nauwkeurig; of tot op een seconde nauwkeurig als het water snel infiltreert) op het ogenblik dat het waterniveau W_{25} bereikt. Volg dan

de verdere daling van het waterniveau op en noteer het tijdstip (TW75) waarop W75 bereikt wordt.

Inkalving van de putwanden komt voor, soms dermate dat de markering (W75) niet meer zichtbaar is. Maak in dat geval voorzichtig deze markering vrij (onder het waterniveau) met enkele vingers, zonder daarom het bodemmateriaal uit de put te verwijderen of te compacteren.

9. Noteer de waarnemingen i.v.m. stabiliteit van de wanden van de put en voorkomende inkalving.

2.3 Afwerking en nazorg

De op het formulier gevraagde inlichtingen moeten duidelijk en volledig ingevuld worden. Alle materiaal moet na afloop van de meting gereinigd worden. De put wordt opgevuld met de opgegraven grond; het maaiveld wordt verzorgd achtergelaten.

2.4 Opmerkingen

De uitvoering van het werkvoorschrift kan afwijken van de hierboven standaard vooropgestelde werkwijze naargelang de doelstellingen die gerealiseerd worden. Dit wordt aangegeven in het formulier door de projectverantwoordelijke.

Formulier : Uitvoering van de SOAKAWAY-METHODE

Locatie:			Schets van de plaats t.o.v. bv. straat, met ligging van de herhalingen:
Uitvoerder:			
Datum:			
Bodemtemperatuur:		°C	
Watertemperatuur:		°C	

Putnummer:	Putnummer:	Putnummer:	Putnummer:
Uitvoerder:	Uitvoerder:	Uitvoerder:	Uitvoerder:
Breedte van de put: cm	Breedte van de put: cm	Breedte van de put: cm	Breedte van de put: cm
Lengte van de put: cm	Lengte van de put: cm	Lengte van de put: cm	Lengte van de put: cm
Diepte put: cm	Diepte put: cm	Diepte put: cm	Diepte put: cm
Verzadigingsperiode (infiltratie tot peil lager dan W_{75}) (tijdstippen tot op de min. nauwkeurig): van (tijd): tot (tot): Indien de verzadiging minder dan 10 minuten duurt, wordt ze maximaal 10 maal herhaald. In dit geval, noteer aantal maal: Het komt voor dat binnen 6 uur volledige infiltratie niet zal optreden. Noteer dan het waterniveau t.o.v. de top van de meetlat en het tijdstip: mm, om:	Verzadigingsperiode (infiltratie tot peil lager dan W_{75}) (tijdstippen tot op de min. nauwkeurig): van (tijd): tot (tot): Indien de verzadiging minder dan 10 minuten duurt, wordt ze maximaal 10 maal herhaald. In dit geval, noteer aantal maal: Het komt voor dat binnen 6 uur volledige infiltratie niet zal optreden. Noteer dan het waterniveau t.o.v. de top van de meetlat en het tijdstip: mm, om:	Verzadigingsperiode (infiltratie tot peil lager dan W_{75}) (tijdstippen tot op de min. nauwkeurig): van (tijd): tot (tot): Indien de verzadiging minder dan 10 minuten duurt, wordt ze maximaal 10 maal herhaald. In dit geval, noteer aantal maal: Het komt voor dat binnen 6 uur volledige infiltratie niet zal optreden. Noteer dan het waterniveau t.o.v. de top van de meetlat en het tijdstip: mm, om:	Verzadigingsperiode (infiltratie tot peil lager dan W_{75}) (tijdstippen tot op de min. nauwkeurig): van (tijd): tot (tot): Indien de verzadiging minder dan 10 minuten duurt, wordt ze maximaal 10 maal herhaald. In dit geval, noteer aantal maal: Het komt voor dat binnen 6 uur volledige infiltratie niet zal optreden. Noteer dan het waterniveau t.o.v. de top van de meetlat en het tijdstip: mm, om:
Opmerking:	Opmerking:	Opmerking:	Opmerking:
Meting, start (*) Tijdstip W25:	Meting, start (*) Tijdstip W25:	Meting, start (*) Tijdstip W25:	Meting, start (*) Tijdstip W25:
Meting, stop (*) Tijdstip W75:	Meting, stop (*) Tijdstip W75:	Meting, stop (*) Tijdstip W75:	Meting, stop (*) Tijdstip W75:

(*) Indien de verzadiging (infiltratie) minder dan 10 minuten duurde, worden de tijdstippen (W25 en W75) tot op de tweede nauwkeurig genoteerd; zoniet volstaat notitie tot op de minuut nauwkeurig.

HOOFDSTUK 2: Profielbeschrijving en het nemen van stalen voor profielbepaling

2.1 Voorbereiding

2.1.1 *Specificatie van de opdracht*

De projectleider geeft de opdracht schriftelijk (ev. via e-mail) door aan de FM TAL of rechtstreeks aan de uitvoerder(s), en specificeert de opdracht op het inlichtingsformulier, waarbij een duidelijke afspraak voor de uitvoeringsdatum wordt gemaakt.

Voor het uitvoeren van een grondboring voor profielbeoordeling wordt gebruik gemaakt van het inlichtingsformulier BDB\O&S\FORMULIER\PROFIEL\INLPROF. Onder de rubriek 'Opdracht' op dit inlichtingsformulier staat vermeld hoe de profielbeschrijving dient uitgevoerd te worden. De projectleider kan een hiervan afwijkend inlichtingsformulier opstellen, specifiek voor de opdracht, dat dan ook hiertoe dient gebruikt te worden.

Bij een gewone profielbeschrijving worden geen bodemstalen genomen van de horizonten. Op het inlichtingsformulier worden enkel de kolommen met betrekking tot de diepte en de beschrijving van de horizont ingevuld. Bodemstalen worden echter wel genomen indien bijkomende bepalingen (in het labo) van de horizonten uitgevoerd moeten worden.

2.1.2 *Benodigd materiaal*

- Edelmanboorset (diameter 7 à 15 cm), inbegrepen boorverlengstukken indien vereist;
- staalnamezakjes (in jute of katoen, of kunststof; dit kan gespecificeerd worden in de opdracht);
- meetklok (eventueel);
- Munsell-kleurenkaart (eventueel);
- plasticfolie van 1.2 m breedte, indien toepasselijk;
- GPS, indien toepasselijk;
- voorgedrukte etiketten voor het labelen van de staalnamezakjes of dikke stift;
- inlichtingsformulier profielbepaling;
- foto-apparaat indien vereist;
- proefveldboek indien toepasselijk;
- koelbox met koelelementen indien toepasselijk.

2.1.3 *Nummering van de stalen*

Indien extra bepalingen uitgevoerd moeten worden voor de profielbeschrijving, wordt van elke horizont een bodemstaal genomen.

De nummering gebeurt volgens een oneindige opvolging van nummers, voorafgegaan door de voorletters van de naam van de staalnemer of door de afkorting van de afdeling (O&S).

Als nummering wordt, van de rol met kleefetiketten met dubbele nummers, het nummer op het brede etiket op de zakken gekleefd, vooraleer deze op te vullen. Hetzelfde nummer op

het smalle etiket wordt op het bijhorende inlichtingsformulier gekleefd (eerste kolom). Op elk zakje, en dus voor elk monster van de verschillende bodemlagen, wordt een apart etiket gekleefd. De dubbels van de verschillende etiketten worden in de juiste volgorde op het bijhorende inlichtingsformulier gekleefd.

Bij gebrek aan kleefnummers wordt de nummering duidelijk met een dikke stift genoteerd op de zakken. Hetzelfde nummer wordt vermeld op het inlichtingsformulier. Indien toepasselijk worden ook in het proefveldboek de nummers van de stalen ingeschreven.

2.1.4 Tijdstip van profielboring en staalname

Zowel de profielboring als de staalname kan het ganse jaar door uitgevoerd worden.

2.2 Uitvoering

2.2.1 Plaats van profielboring

Indien toepasselijk moet in eerste instantie nagekeken worden of er in het veldboek of op het inlichtingsformulier (rubriek 'Opdracht') sprake is van specifieke instructies. Indien geen verdere toelichting in het veldboek of op het inlichtingsformulier staat moet de profielboring uitgevoerd worden binnen de op voorhand gekozen referentiezone. Noteer de ligging van de profielboring in het proefveldboek.

2.2.2 Aantal profielboringen en staalname

Indien geen verdere toelichting in het proefveldboek of op het inlichtingsformulier staat, neem 1 profielboring/200m² als richtlijn. Bij een profielbeschrijving met staalname wordt van de gewenste bodemlagen een staal genomen.

2.2.3 Diepte profielboring

Standaard wordt geboord tot 120 cm diepte. Afwijking van de boordiepte staat vermeld in het proefveldboek of op het inlichtingsformulier (rubriek "Opdracht").

2.2.4 Voorbereiding

Zoals verder uiteengezet wordt het opgevoerde grondmateriaal open gespreid. Het kan aangewezen zijn om het grondmateriaal open te spreiden op een plasticfolie, dit om vermenging met onderliggend materiaal te vermijden en/of nadien het open gespreide materiaal vlot te kunnen verwijderen. Spreid in dat geval een plasticfolie open naast de geplande boorplaats.

2.2.5 De boortechniek en de beschrijving

Door middel van een rechtsdraaiende beweging wordt de holte van de Edelmanboor net niet volledig met grond gevuld. Telkens als deze boorholte gevuld is wordt de boor bovengehaald. De grond wordt uit de holte geduwd en een nieuwe boorbeweging volgt zoals hoger beschreven. Vermijd compactie van de grond in de boor (verkeerde inschatting van dikte bodemlaag) door de draaibeweging niet te lang uit te voeren.

- Spreid het opgevoerde bodemmateriaal meter per meter uit naast het boorgat op een zo proper mogelijke ondergrond (zo veel mogelijk vrijgemaakt van takjes, bladeren, enz.), of op de plastic folie, zodat het bodemprofiel duidelijk wordt wanneer men de uitgespreide grond bekijkt. Bij het openspreiden per meter wordt bij voorkeur gewerkt

van links naar rechts. De eerste meter opgeboord materiaal wordt steeds meest veraf gelegd van het boorgat, de volgende meter(s) wordt (worden) dichterbij gelegd, enz..., zodat met de boorinhoud niet meer over de eerste meter(s) moet bewogen worden over het reeds open gespreide materiaal. Hierdoor wordt vermeden dat materiaal uit de boor zou vallen op de voorgaande meter(s).



Figuur: Op plasticfolie uitgespreid materiaal, per meter, van links naar rechts; de positie van het boorgat is onderaan de foto (buiten beeld).

- Noteer de diepte (van...tot...cm onder maaiveld) van elke zichtbaar/voelbaar verschillende bodemlaag op het inlichtingsformulier. Eventueel kan tijdens de boring de diepte van de bodemlagen gemeten worden met behulp van een meetklok (indien grote nauwkeurigheid gewenst is). In de meeste gevallen wordt de diepte ingeschat met behulp van de boor en de verlengstukken.
- Indien dit als deel van de opdracht geformuleerd werd, neem dan een foto (maximale close-up) van het open gespreide grondmateriaal, en eventueel van details uit het open gespreide grondmateriaal. Het is van belang dat de foto nadien kan geïdentificeerd worden: Ofwel wordt een blad met code of identificatie van de boring naast het materiaal gelegd en samen gefotografeerd, ofwel wordt de nummer van de foto op het apparaat genoteerd op het inlichtingsformulier, of nog kan een staalnamezak met etiket duidelijk mee gefotografeerd worden.
- Noteer per horizont de aard van het bodemmateriaal, bv.:
 1. benaderende beschrijving van de granulometrie (grof zand, fijn zand, zandleem, leem, klei, en tussenvormen), aanwezigheid van bijmengingen, bv. keien, baksteenfragmenten, houtskoolstippen, en verdergaand, indien herkenbaar, aanwezigheid van mica, glauconiet, enz.,
 2. kleur en kleurschakering (ev. a.d.h.v. de Munsell-kleurenkaart),
 3. vochtigheid,

4. ingeval in een vochtige bodem wordt geboord, kan onderscheid gemaakt worden in hardheid of verdichting van de bodem, ondervonden bij de boring;
5. gleyverschijnselen en roest (aard: stippen, tongen, banden, vlammen en hoeveelheid),
6. diepte (benaderend) van de grondwatertafel (indien binnen boorbereik),
7. humus (zwart/donkerbruin/grijsbruin), wortels, aanwezigheid van wormen,
8. kalkstippen, ijzerconcreties, kalksteen, ijzerzandsteen,
9. andere,...

De lijst van de te noteren kenmerken kan verschillen naargelang de doelstelling en wordt door de projectleider bepaald en besproken voor de uitvoering.

- Bij staalname wordt een goede vuist vol genomen (de gewenste hoeveelheid grond is afhankelijk van de analyse); het staal wordt genomen over de hele dikte van de beschreven horizont. Doorgaans worden stalen van het uitgespreide opgevoerde bodemmateriaal naast het boorgat genomen worden; let er dan op dat van elke bodemlaag een zuiver, homogeen staal genomen wordt.

2.2.6 Invullen van het inlichtingsformulier

Bij elke profielbeschrijving dient een apart inlichtingsformulier ingevuld te worden (zie BDB\O&S\FORMULIER\PROFIEL\INLPROF). Hierop wordt de identificatie van het project (projectnummer, omschrijving locatie bv. via proefveldnummer) en de proefveldhouder genoteerd. Daarnaast worden de datum van de profielbeschrijving en de naam van de uitvoerder genoteerd. Op de voorziene plaats op dit formulier wordt een schets gemaakt van de exacte locatie van de boring of GPS-gegevens genoteerd (hetzij coördinaten, hetzij de code aangegeven door het GPSinstrument), zodat deze traceerbaar is.

2.3 Afwerking en nazorg

De gevulde staalnamezakjes dienen goed afgesloten te worden. Wanneer de identificatie van de staalnamezakjes met etiketten gebeurt, volstaat het de halfvolle zakjes om te plooien met het etiket naar buiten gericht.

De op de inlichtingsformulieren gevraagde inlichtingen dienen duidelijk en volledig ingevuld te worden. Het inlichtingsformulier wordt samen met eventuele GPS-data en/of fotomateriaal voorgelegd aan de projectleider.

De grondstalen dienen bewaard te worden zodat geen grote temperatuurschommelingen in het materiaal optreedt, bv. in een koelbox met koelelementen. De grondstalen, samen met de inlichtingsformulieren ervan, dienen zo snel mogelijk overgebracht te worden naar Ontvangst Staalname.

Boorgaten worden opgevuld tenzij anders gemeld bij de opdracht, en het terrein wordt verzorgd achtergelaten. Het gebruikte materiaal moet na afloop van de staalname door de technisch medewerkers gereinigd worden.

INLICHTINGSFORMULIER PROFIELBEPALING

Project:

Proefveldnummer:

Projectnummer (facturatie):

Naam en adres van de proefveldhouder

klantnummer:

taal:

naam:

voornaam:

straat:

postnummer:

gemeente:

Staalnamedatum:

--	--	--	--	--	--	--	--

Naam staalnemer:

Stamnummer:

--	--	--

Schets locatie profielbeschrijving

begroeiing perceel:

Te rapporteren aan:

Opdracht:

☐ Enkel profielbeschrijving

☐ Profielbeschrijving met staalname / analyse:

INLICHTINGSFORMULIER PROFIELBEPALING

Etiket/staalnummer	diepte van - tot (cm)	beschrijving horizont (kleur, kleurschakering, granulometrie, vochtigheid, gley, humus, wortels, wormen, diepte grondwater,...)	eventuele bepalingen (labo)
			☐ grondsoort (manueel) ☐ granulometrie 5 fracties ☐ granulometrie 9 fracties ☐ organische stof (% C) ☐
			☐ grondsoort (manueel) ☐ granulometrie 5 fracties ☐ granulometrie 9 fracties ☐ organische stof (% C) ☐
			☐ grondsoort (manueel) ☐ granulometrie 5 fracties ☐ granulometrie 9 fracties ☐ organische stof (% C) ☐
			☐ grondsoort (manueel) ☐ granulometrie 5 fracties ☐ granulometrie 9 fracties ☐ organische stof (% C) ☐
			☐ grondsoort (manueel) ☐ granulometrie 5 fracties ☐ granulometrie 9 fracties ☐ organische stof (% C) ☐
			☐ grondsoort (manueel) ☐ granulometrie 5 fracties ☐ granulometrie 9 fracties ☐ organische stof (% C) ☐
			☐ grondsoort (manueel) ☐ granulometrie 5 fracties ☐ granulometrie 9 fracties ☐ organische stof (% C) ☐

Bijlage B Contacten buurlanden/gewesten voor interviews

Gebied	contactpersoon	instantie
Vlaanderen	onderzoeksinstellingen	
	Prof. Jean Berlamont	KUL Dep. Burgerlijke Bouwkunde, Hydraulica
	Prof. Patrick Willems	KUL Dep. Burgerlijke Bouwkunde, Hydraulica
	Prof. Dr. Ir. Lucie Vandewalle	KUL Labo Reyntjens
	Prof. dr. ir. Anne Beeldens	Onderzoekscentrum voor de wegenbouw (OCW)
	dr. Ir. W. Cornelis	Ugent Vakgroep Bodembeheer
	Prof. dr. ir. Jan Diels	KUL Afdeling Bodem- en Waterbeheer
	Prof. dr. ir. Guido Wyseure	KUL Afdeling Bodem- en Waterbeheer
	andere uitvoerders	
	Luc Verhelst	SGS
Wallonië	m.b.t. regelgeving en beleid	
	Michel Clignet, Jacques Defoux	DGRNE (Dir. Générale des Ressources Naturelles et de l'Environnement)
	Philippe Dierickx	DGRNE (Dir. Générale des Ressources Naturelles et de l'Environnement)
	dr. Ir. François Mayer	la DEE (Département de l'Environnement et de l'Eau)
	ir. Lefevre Eric	INASEP (Intercommunale Namuroise de Service Public CVBA)
	Isabelle Massart	IBW (Intercommunale du Brabant-Wallon)
		SPGE (La Société Publique de Gestion de l'Eau)
	Jean-Luc Lejeune	le représentant du ministre Di Antonio, en charge des compétences Environnement,
	m.b.t. normering en inhoudelijke onderbouwing	
	Prof. dr. ir. Dimitri Xanthoulis	université de Liège (Hydrology and Agricultural Hydraulics Department)
	Prof. dr. ir. Laurent Block	université de Liège (Soil Science Department)
	Gilles Colinet	université de Liège (Soil Science Department)
	Jean-Marie Marcoen	université de Liège (Soil Science Department)
	Prof. Alain Dassargues	Unité de recherche Hydrologéologie et Géologie de l'Environnement
	Sophie Slepenn	L'ISSEP (Institut de certification officiel des laboratoires en Wallonie)
	Prof. ir. dr. Marnik Vanclooster	UCL Environmental Sciences (ELIE)
	Prof. dr. ir. Aurore Degre	ULg - Gembloux Agro-Bio Tech BIOSystem Engineering Water - Soil - Plant Exchanges
	Prof. dr. ir. Sarah Garre	Ulg - Gembloux Agro-Bio Tech UR TERRA
		aries consultants
	ir. Laurent Piront	geolys
Duitsland	m.b.t. regelgeving en beleid	
		Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz NRW
		Landesamt für Umwelt, Wasserwirtschaft und Gewerbeaufsicht Rheinland-Pfalz
		umwelt bundesamt
		umwelt bundesamt
		Bayerisches Staatsministerium für Umwelt und Verbraucherschutz
	Michael Morawietz	Sächsisches Staatsministerium für Umwelt und Landwirtschaft
		Thüringer Landesverwaltungsamt
	Dietmar Wienholdt	schleswig-holstein
	Wolfgang Meier	Behörde für Umwelt und Energie Hamburg (Abteilung Wasserwirtschaft)
		Niedersächsischer Landesbetrieb für Wasserwirtschaft
		Ministerium für Klimaschutz, Umwelt, Landwirtschaft, Natur- und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen
		hanseWasser Bremen GmbH
		Wasserstraßen- und Schifffahrtsamt Bremen
		Bund der Ingenieure für Wasserwirtschaft, Abfallwirtschaft und Kulturbau Landesverband Niedersachsen - Bremen e.V.
	Dipl.-Ing. Werner Kochta	
	Dipl.-Wirtschaftsjurist Sebastian Exner	Landesverband der Energie- und Wasserwirtschaft Hessen/Rheinland-Pfalz e.V. (LDEW)
		Ministerium für Umwelt und Verbraucherschutz Saarland
		Geschäftsstelle VEWSaar e.V
		Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg (LUBW)
		Wasserwirtschaftsverband Baden-Württemberg e.V. (WBW)
		Landesbetrieb für Hochwasserschutz und Wasserwirtschaft Sachsen-Anhalt (LHW)
		Kundenzentrum Berliner Wasserbetriebe
		Ministerium für Ländliche Entwicklung, Umwelt und Landwirtschaft des Landes Brandenburg
		Landesverband der Wasser- und Bodenverbände Mecklenburg-Vorpommern
	Eckhard Kohlhas	Landesamt für Umwelt, Naturschutz und Geologie (Mecklenburg-Vorpommern)
	Eva Klaußner-Ziebarth	Ministry of Agriculture, Environment and Consumer Protection
	Ms Christine von Lonski	German Water Partnership
	m.b.t. normering en inhoudelijke onderbouwing	
	Prof. Jan Vanderborght	Forschungszentrum Jülich (Bundesministerium für Bildung und Forschung)
	idem	Institut für Bio- und Geowissenschaften (IBG)
		DIN, Berlin (DIN 19682-7, ...)
	Hetzel, Dr. Friedrich	Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e. V.
		Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit

Gebied	contactpersoon	instantie
Nederland	m.b.t. regelgeving en beleid	
	Hr. H. Gastkemper	RIONED
	Harry van Lijstelaar	RIONED
	Rob Hermans	RIONED
	lf. Jac Peerboom	Waterschap De Dommel
	drs. H. Winteraeken	Waterschap Roer en Overmaas
	m.b.t. normering en inhoudelijke onderbouwing	
	Marius Heinen	Wageningen UR (Toetsing aan de Staringreeks)
	Prof. dr.ir. Mark Bakker	TU Delft (Fac. Civil Engineering and Geosciences)
	Prof. Dr.ir. Frans H.M. van de Ven	TU Delft (Fac. Civil Engineering and Geosciences - Urban Water Management)
	dr. Ruud Bartholomeus	KWR Watercycle Research Institute
	Irene van Veelen	ISSO kenniscentrum voor installatietechnieken
Frankrijk	m.b.t. regelgeving en beleid	
		Agences de l'eau
		DISE (interdepartementeel niveau
		departementeel niveau
	Nathalie Lenouveau	CEREMA (Centre d'études et d'expertise sur les risques, l'environnement, la mobilité et l'aménagement)
	Vivien Lecomte	le GRAIE
		l'INRA
	Catherine Fackler Charbonnel	SPANC (Service Public d'Assainissement Non Collectif)
	Marie Vestit	SPANC (Service Public d'Assainissement Non Collectif)
		Communauté de Communes de la Haute Somme "Combles-Péronne-Roisel"
	Béatrice Fernandez	Agence de l'eau Rhin-Meuse
	Pauline Deletre	Agence de l'eau Rhin-Meuse
		Chambres d'agriculture France
	m.b.t. normering en inhoudelijke onderbouwing	
		AFNOR
	ir. Abdel Lakel	CSTB (Centre Scientifique et Technique du Bâtiment)
	David Le Bellac	CSTB (Centre Scientifique et Technique du Bâtiment)
		Geneopolis
	Julie Coulerot	Agro Conseil
	Perrine Marchant	Geosan
EU	onderzoeksinstellingen	
		CEN-CENELEC Management Centre
		National Standards Body(NSB)

Bijlage C Overzicht meetmethoden toegepast in Vlaanderen

	In situ													Laboratorium			
	Ring-infiltrrometer	Dubbele-ringinfiltrrometer	Constant Head permeameter (CSS)	Compact Constant Head	Infiltratieproef, falling head	Lefranc (*)	Open-endtest	tensioninfiltrrometer	Porchet	Gulp	soakaway	regenvalsimulator	Putproef	Korrelverdeling	Oedometer	Permeameter / ICW	Proctortest
Abesim environmental management		X															
Advison		X		X										X			
Afdeling geotechniek (Vlaanderen)	X	X					X							X	X	X	X
Avlop	X	X											X				
Bodemkundige Dienst van België	X	X			X		X		X		X			X		X	
Burges					X												
Geert Cockaerts bvba.		X															
Geos															X	X	X
Geosan				X													
Geosonda	X				X												
Geotechnica		X	X		X									X			
Group Verbeke		X				X											
KU Leuven, labo Reyntjens															X		
KU Leuven, Afdeling Bodem- en Waterbeheer		X			X			X		X		X		X		X	
OCW	X	X					X						X				
Rimeco		X															
Saneco		X															
SGS				X		X											
TEC nv (deel van Group Van Vooren nv)					X												
Translab																	
Ugent, onderzoeksgroep bodemfysica	X	X						X		X		X		X		X	

Deze informatie werd verkregen via interviews of via de website van het bedrijf.

(*) waarschijnlijk wordt bedoeld de Nasberg-test , uit te voeren boven grondwaterpeil selectie meetprogramma

Bijlage D Kalibratieparameters Conceptueel rioolstelsel

D.1 Zuiveringsgebied Edegem

Tabel Bijlage D-1: Overzicht van waterstanden en debieten en volumes van doorvoer en overstorten voor T02 voor zuiveringsgebied Edegem.

Berging (bak)					Doorvoer					Overstort					
ID	Min [m TAW]		Max [m TAW]		ID	Volume [m³]		Max [m³/s]		Drempel- peil [mTAW]	ID	Volume [m³]		Max [m³/s]	
	Hydro.	Conc.	Hydro.	Conc.		Hydro.	Conc.	Hydro.	Conc.			Hydro.	Conc.	Hydro.	Conc.
43_31	11.78	11.78	12.78	12.75	43_31.1	11294	11513	0.22	0.25	12.46	43_31.2	1450	1130	0.33	0.29
43_KT467	10.89	10.89	12.72	12.70	43_KT467.1	10513	10513	0.48	0.51	13.3	43_KT476.2	0	0	0.00	0.00
										13.3	43_KT479.2	0	0	0.00	0.00
										16.22	43_KT491.2	0	0	0.00	0.00
43_14	9.37	9.37	12.69	12.68	43_14.1	27854	28809	0.38	0.45	12.27	43_27.2	3681	2903	0.65	0.65
43_200	8.51	8.42	11.23	11.28	43_200.1	19636	16044	0.41	0.36	10.93	43_200.2	3899	7415	0.69	0.97
										18.97	43_175.1				
43_KT950	12.27	12.28	15.76	15.76	43_KT950.1	1838	1807	0.02	0.02	15.71	43_KT942.1	428	441	0.09	0.09
43_KT67	15.13	15.10	16.08	15.96	43_KT67.1	3524	3519	0.09	0.09	16.6	43_KT67.2	0	0	0.00	0.00
										18.2	43_KT1294.2	0	0	0.00	0.00
										17.97	43_KT2092.1	61	0	0.01	0.00
43_KT62	9.48	9.48	13.04	13.04	43_KT62.1	9088	9693	0.09	0.09	12.16	43_KT57.4	1505	1354	0.34	0.39
										14.9	43_KT2140.1	172	44	0.01	0.00
43_8	9.42	9.41	11.67	11.41	43_8.1	27109	28218	0.73	0.78	14.14	43_KT549.1	-49	0	0.00	0.00
43_588	9.28	9.28	11.76	11.47	43_588.3	13308	15135	0.40	0.43	11.11	43_588.2	-11562	-13339	0.00	0.00
43_1	8.17	8.17	11.19	11.29	43_1.1	16973	17063	0.10	0.10	10.66	43_3.2	5379	3857	0.70	0.88
					43_1.2	37673	38239	0.30	0.30						
					43_1.3	28851	29859	0.37	0.37						

Tabel Bijlage D-2: Overzicht van waterstanden en debieten en volumes van doorvoer en overstorten voor T05 voor zuiveringsgebied Edegem.

Berging (bak)					Doorvoer					Overstort					
ID	Min [m TAW]		Max [m TAW]		ID	Volume [m³]		Max [m³/s]		Drempel- peil [mTAW]	ID	Volume [m³]		Max [m³/s]	
	Hydro.	Conc.	Hydro.	Conc.		Hydro.	Conc.	Hydro.	Conc.			Hydro.	Conc.	Hydro.	Conc.
43_31	11.78	11.78	13.25	13.43	43_31.1	5932	6259	0.40	0.35	12.46	43_31.2	4759	4296	1.26	1.62
43_KT467	10.89	10.89	13.16	13.51	43_KT467.1	8361	8633	1.28	1.57	13.3	43_KT476.2	340	334	0.41	0.78
										13.3	43_KT479.2	335	167	0.19	0.39
										16.22	43_KT491.2	54	0	0.13	0.00
43_14	9.37	9.37	13.10	13.44	43_14.1	14853	15638	0.43	0.51	12.27	43_27.2	7793	7580	1.64	2.73
43_200	8.51	8.42	11.42	11.59	43_200.1	9802	2490	0.57	0.59	10.93	43_200.2	9572	15901	1.63	2.91
										18.97	43_175.1				
43_KT950	12.27	12.28	15.87	15.85	43_KT950.1	984	969	0.02	0.02	15.71	43_KT942.1	997	1029	0.40	0.47
43_KT67	15.13	15.10	16.69	16.66	43_KT67.1	2363	2315	0.12	0.12	16.6	43_KT67.2	198	57	0.23	0.12
										18.2	43_KT1294.2	0	0	0.00	0.00
										17.97	43_KT2092.1	248	0	0.12	0.00
43_KT62	9.50	9.49	13.00	12.84	43_KT62.1	4791	5193	0.09	0.09	12.16	43_KT57.4	5376	5814	0.95	1.49
										14.9	43_KT2140.1	104	70	0.02	0.03
43_8	9.42	9.41	12.16	12.77	43_8.1	17992	18715	1.05	2.26	14.14	43_KT549.1	300	0	0.18	0.00
43_588	9.28	9.28	11.98	11.76	43_588.3	9217	13404	0.44	0.53	11.11	43_588.2	-7431	-11889	0.45	0.37
43_1	8.18	8.17	11.39	11.61	43_1.1	10280	10172	0.10	0.10	10.66	43_3.2	7759	6473	1.33	2.37
					43_1.2	20725	20425	0.30	0.30						
					43_1.3	14100	13851	0.37	0.37						

D.2 Zuiveringsgebied Aartselaar

Tabel Bijlage D-3: Overzicht van waterstanden en debieten en volumes van doorvoer en overstorten voor T02 voor zuiveringsgebied Aartselaar.

Berging (bak)					Doorvoer					Overstort					
ID	Min [m TAW]		Max [m TAW]		ID	Volume [m³]		Max [m³/s]		Drempel-peil [mTAW]	ID	Volume [m³]		Max [m³/s]	
	Hydr.	Conc.	Hydr.	Conc.		Hydr.	Conc.	Hydr.	Conc.			Hydr.	Conc.	Hydr.	Conc.
46_SCL6001	1.81	1.82	2.71	2.62	46_SCL6001.1	834	888	0.02	0.02	4.00	46_SCL6003.2	0	0	0.00	0.00
46_SCL211!	2.71	2.71	2.74	2.74	46_SCL211!.2	4125	4048	0.21	0.21	4.18	46_SCL211!.1	0	0	0.00	0.00
										7.15	46_SCL6!.1	250	0	0.01	0.00
										8.64	46_SCL234!.1	2	0	0.00	0.00
										9.89	46_SCL239!.1	413	0	0.02	0.00
46_SCL7006	1.41	1.41	3.93	2.91	46_SCL7006.1	2480	2861	0.13	0.14	3.72	46_SCL7007.1	156	0	0.10	0.00
										3.74	46_SCL7005.1	127	0	0.08	0.00
46_SCL420	2.81	2.81	3.31	3.30	46_SCL420.1	190	230	0.02	0.02	4.23	46_SCL420.3	0	0	0.00	0.00
46_SCL749	8.88	8.87	11.57	11.60	46_SCL749.1	2111	2125	0.02	0.02	11.53	46_SCL5006.1	305	308	0.11	0.11
46_SCL21	4.56	4.53	4.83	4.79	46_SCL21.4	3492	4184	0.08	0.20	4.77	46_SCL21.1	705	15	0.14	0.02
46_SCL7020	-1.95	-1.94	2.82	2.90	46_SCL7020.1	16860	17303	0.09	0.09	6.85	46_SCL88!.2	0	0	0.00	0.00
										4.85	46_SCL7053a.1	0	0	0.00	0.00
					46_SCL7020.2	10044	11318	0.07	0.07	2.28	46_SCL7021a.1	16195	16045	1.19	1.55
										2.28	46_SCL7021a.2	10527	10429	0.77	1.01
										13.38	46_SCL756.1	232	0	0.01	0.00
46_SCL757	12.76	12.76	13.12	13.14	46_SCL757.1	4287	4552	0.21	0.23						
46_SCL1297	10.34	10.34	10.83	10.83	46_SCL1297.2	276	308	0.03	0.03	12.04	46_SCL1297.1	0	0	0.00	0.00
46_HEM21244	3.43	3.43	6.09	6.07	46_HEM21244.1	1248	1327	0.03	0.03	6.03	46_HEM21245.2	309	159	0.10	0.05
										17.45	46_HEM36194.2	-6	0	0.00	0.00
46_HEM36639	15.25	15.24	15.68	15.59	46_HEM36639.1	4609	4959	0.15	0.23	15.63	46_HEM36639.2	179	0	0.07	0.00
										20.11	46_HEM36096.1	-3	0	0.00	0.00

Berging (bak)					Doorvoer					Overstort					
ID	Min [m TAW]		Max [m TAW]		ID	Volume [m³]		Max [m³/s]		Drempel-peil [mTAW]	ID	Volume [m³]		Max [m³/s]	
	Hydr.	Conc.	Hydr.	Conc.		Hydr.	Conc.	Hydr.	Conc.			Hydr.	Conc.	Hydr.	Conc.
46_HEM21443	3.29	2.11	5.57	5.60	46_HEM21443.2	19525	22881	0.36	0.39	5.37	46_HEM21443.1	19873	19151	0.91	1.20
46_HEM21438	3.43	3.43	5.28	5.28	46_HEM21438.2	1280	1284	0.07	0.07	4.10	46_HEM21438.4	1862	1808	0.12	0.12
										5.24	46_HEM21439.3	147	143	0.04	0.04
46_HEM36047	14.11	14.11	14.37	14.30	46_HEM36047.1	3150	3222	0.12	0.13	15.15	46_hem3002-o1.1	0	0	0.00	0.00
46_HEM21298	1.35	1.34	5.30	5.62	46_HEM21298.4	61277	66014	0.36	0.40	5.14	BV063.1	17296	17973	0.37	0.37
										5.25	46_HEM21295.3	1125	810	0.23	0.42
46_D21308	5.36	5.36	6.61	6.61	46_D21308.1	5420	6564	0.07	0.10	9.37	46_AA900.1	0	0	0.00	0.00
										9.84	46_AA513.1	0	0	0.00	0.00
										6.35	46_D21308.2	-2795	-3704	0.08	0.17
46_AA385	14.90	14.90	15.68	15.68	46_AA385.1	127	147	0.03	0.03	n.v.t.					
46_AA298	7.49	7.50	9.11	9.15	46_AA298.1	194	529	0.02	0.02	9.41	46_AA291.2	547	0	0.04	0.00
					46_AA298.2	855	973	0.02	0.02	9.07	46_AA298.3	49	291	0.03	0.07
46_21463	5.78	5.78	8.00	8.02	46_21463.1	23242	23571	0.26	0.33	12.49	46_AA5104.2	-163	0	0.00	0.00
										10.15	46_AA805.2	0	0	0.00	0.00
										7.63	46_D21643c.2	9862	10944	2.20	2.28
										8.69	46_21475.2	0	0	0.00	0.00
46_2673	10.55	10.55	11.11	11.13	46_2673.1	9763	9745	0.44	0.48	6.49	46_21463.5	34657	36368	2.50	2.75
										11.90	46_706.2	0	0	0.00	0.00
										14.67	46_789.1	0	0	0.00	0.00
										13.52	46_910.3	0	0	0.00	0.00
46_P26	8.37	8.37	10.81	9.94	46_P26.1	13190	13151	0.57	0.65	13.94	46_806.1	5	0	0.00	0.00
										11.30	46_P26.2	0	0	0.00	0.00

Berging (bak)					Doorvoer					Overstort					
ID	Min [m TAW]		Max [m TAW]		ID	Volume [m³]		Max [m³/s]		Drempel- peil [mTAW]	ID	Volume [m³]		Max [m³/s]	
	Hydr.	Conc.	Hydr.	Conc.		Hydr.	Conc.	Hydr.	Conc.			Hydr.	Conc.	Hydr.	Conc.
46_P18	7.80	7.80	10.61	9.86	46_P18.1	18008	18239	0.76	0.91	10.81	46_P18.2	0	0	0.00	0.00
46_1023'	13.60	13.59	14.19	14.17	46_1023'.1	7751	8012	0.26	0.28	14.07	46_1023.1	-14	0	0.00	0.00
46_D05	12.33	12.33	12.82	12.79	46_D05.2	610	643	0.02	0.02	12.30	46_D05.1	0	0	0.00	0.00
46_PS1/O1	5.66	5.65	9.81	9.63	46_PS1/O1.2	27087	27824	0.14	0.14	12.74	46_505.3	18	-22	0.01	0.00
										10.35	46_O2.2	0	0	0.00	0.00
										10.64	46_584.1	0	0	0.00	0.00
										8.80	46_PS1/O1.1	44531	45206	2.73	3.41
46_4403	8.46	8.39	9.53	9.38	46_4403.1	71286	73813	2.21	3.48	9.36	46_4403.2	1070	-1072	0.66	0.04
46_8093	12.02	12.02	12.27	12.25	46_8093.2	1375	1398	0.07	0.07	12.87	46_8103.1	0	0	0.00	0.00
46_AQU002	7.49	7.46	8.91	8.37	46_AQU002.2	79012	81300	2.21	3.57	8.97	46_AQU002.1	-1500	-1277	0.00	0.00
46_19705	9.81	9.82	10.22	10.24	46_19705.2	6292	6428	0.24	0.25	10.08	46_19705.1	263	294	0.06	0.07
46_AQU004	6.38	6.37	8.30	8.01	46_AQU004.2	16800 0	17166 9	3.59	4.23	7.98	46_AQU004.1	- 66448	- 67647	1.07	0.07
46_21350	7.55	7.55	8.95	8.94	46_21350.2	6641	7018	0.22	0.22	8.86	46_21350.1	598	282	0.20	0.19
										13.09	46_21322.1	0	0	0.00	0.00

Tabel Bijlage D-4: Overzicht van waterstanden en debieten en volumes van doorvoer en overstorten voor T05 voor zuiveringsgebied Aartselaar

Berging (bak)					Doorvoer					Overstort						
ID	Min [m TAW]		Max [m TAW]		ID	Volume [m³]		Max [m³/s]		Drempel- peil [mTAW]	ID	Volume [m³]		Max [m³/s]		
	Hydr.	Conc.	Hydr.	Conc.		Hydr.	Conc.	Hydr.	Conc.			Hydr.	Conc.	Hydr.	Conc.	
46_SCL6001	1.82	1.82	3.58	3.50	46_SCL6001.1	755	764	0.02	0.02	4.00	46_SCL6003.2	0	0	0.00	0.00	
46_SCL211!	2.71	2.71	2.83	2.85	46_SCL211!.2	3494	3497	0.81	0.99	4.18	46_SCL211!.1	0	0	0.00	0.00	
										7.15	46_SCL6!.1	238	0	0.08	0.00	
										8.64	46_SCL234!.1	-23	0	0.00	0.00	
										9.89	46_SCL239!.1	355	0	0.09	0.00	
46_SCL7006	1.41	1.41	4.65	3.44	46_SCL7006.1	-657	2456	0.41	0.66	3.72	46_SCL7007.1	1527	0	0.50	0.00	
										3.74	46_SCL7005.1	1492	0	0.55	0.00	
46_SCL420	2.81	2.82	3.31	3.30	46_SCL420.1	140	151	0.02	0.02	4.23	46_SCL420.3	0	0	0.00	0.00	
46_SCL749	8.87	8.88	11.76	11.83	46_SCL749.1	1015	1024	0.02	0.02	11.53	46_SCL5006.1	1161	1209	0.47	0.65	
46_SCL21	4.56	4.53	5.07	4.92	46_SCL21.4	1275	2988	0.09	0.40	4.77	46_SCL21.1	2328	451	0.46	0.29	
46_SCL7020	-1.95	-1.94	2.79	3.38	46_SCL7020.1	10092	10745	0.09	0.09	6.85	46_SCL88!.2	20	0	0.05	0.00	
					46_SCL7020.2	4726	5721	0.07	0.08	4.85	46_SCL7053a.1	234	0	0.36	0.00	
										2.28	46_SCL7021a.1	15380	17664	1.71	6.07	
										2.28	46_SCL7021a.2	9997	11482	1.11	3.94	
13.38	46_SCL756.1	307	467	0.13	0.63											
46_SCL757	12.76	12.76	13.94	13.96	46_SCL757.1	3511	3391	0.41	0.41							
46_SCL1297	10.33	10.34	10.83	10.83	46_SCL1297.2	160	190	0.03	0.03	12.04	46_SCL1297.1	-2	0	0.00	0.00	
46_HEM21244	3.44	3.44	6.29	6.31	46_HEM21244.1	687	615	0.03	0.03	6.03	46_HEM21245.2	1803	1054	0.81	0.88	
										17.45	46_HEM36194.2	-4	0	0.00	0.00	
46_HEM36639	15.25	15.24	15.94	15.84	46_HEM36639.1	2806	3680	0.19	0.47	15.63	46_HEM36639.2	1285	521	0.66	0.60	
										20.11	46_HEM36096.1	-5	0	0.00	0.00	

Berging (bak)					Doorvoer					Overstort					
ID	Min [m TAW]		Max [m TAW]		ID	Volume [m³]		Max [m³/s]		Drempel-peil [mTAW]	ID	Volume [m³]		Max [m³/s]	
	Hydr.	Conc.	Hydr.	Conc.		Hydr.	Conc.	Hydr.	Conc.			Hydr.	Conc.	Hydr.	Conc.
46_HEM21443	3.29	2.11	5.63	5.70	46_HEM21443.2	6156	9676	0.78	1.18	5.37	46_HEM21443.1	18123	17593	1.43	1.99
46_HEM21438	3.43	3.43	5.43	5.42	46_HEM21438.2	848	693	0.24	0.13	4.10	46_HEM21438.4	1480	1526	0.38	0.37
										5.24	46_HEM21439.3	495	535	0.35	0.35
46_HEM36047	14.11	14.11	15.33	14.69	46_HEM36047.1	2433	2697	0.30	0.54	15.15	46_hem3002-o1.1	221	0	0.28	0.00
46_HEM21298	1.35	1.34	5.43	5.76	46_HEM21298.4	36897	39998	0.46	0.56	5.14	BV063.1	15086	15651	0.40	0.41
										5.25	46_HEM21295.3	5483	6249	2.26	5.06
46_D21308	5.36	5.36	6.66	6.67	46_D21308.1	4010	4633	0.08	0.10	9.37	46_AA900.1	-22	0	0.00	0.00
										9.84	46_AA513.1	16	0	0.02	0.00
										6.35	46_D21308.2	-1659	-2114	0.54	0.67
46_AA385	14.89	14.90	15.68	15.68	46_AA385.1	112	105	0.03	0.03	n.v.t.					
46_AA298	7.50	7.50	9.22	9.36	46_AA298.1	232	281	0.02	0.02	9.41	46_AA291.2	560	0	0.17	0.00
					46_AA298.2	313	340	0.02	0.02	9.07	46_AA298.3	448	968	0.18	0.47
										12.49	46_AA5104.2	-42	0	0.09	0.00
46_21463	5.78	5.78	8.16	9.06	46_21463.1	9620	6542	0.26	0.36	10.15	46_AA805.2	2290	0	1.80	0.00
										7.63	46_D21643c.2	30561	46987	3.69	11.48
										8.69	46_21475.2	1383	218	0.73	0.59
										6.49	46_21463.5	35974	43909	3.65	12.15
46_2673	10.55	10.55	11.93	12.34	46_2673.1	7936	7785	0.70	1.13	11.90	46_706.2	415	623	0.26	1.01
										14.67	46_789.1	56	0	0.06	0.00
										13.52	46_910.3	60	0	0.07	0.00
										13.94	46_806.1	37	0	0.03	0.00
46_P26	8.37	8.37	11.43	11.37	46_P26.1	10681	10613	0.81	1.46	11.30	46_P26.2	205	32	0.19	0.08

Berging (bak)					Doorvoer					Overstort					
ID	Min [m TAW]		Max [m TAW]		ID	Volume [m³]		Max [m³/s]		Drempel- peil [mTAW]	ID	Volume [m³]		Max [m³/s]	
	Hydr.	Conc.	Hydr.	Conc.		Hydr.	Conc.	Hydr.	Conc.			Hydr.	Conc.	Hydr.	Conc.
46_P18	7.80	7.80	11.03	11.02	46_P18.1	12739	14200	0.91	1.78	10.81	46_P18.2	1843	549	0.85	0.79
46_1023'	13.60	13.59	14.49	14.44	46_1023'.1	6323	6249	0.32	0.38	14.07	46_1023.1	-1482	-946	0.00	0.00
46_D05	12.33	12.33	13.03	12.96	46_D05.2	363	373	0.02	0.02	12.30	46_D05.1	5	0	0.02	0.00
46_PS1/O1	5.66	5.65	10.08	10.57	46_PS1/O1.2	16385	15569	0.14	0.14	12.74	46_505.3	175	-196	0.11	0.00
										10.35	46_O2.2	751	207	0.45	0.83
										10.64	46_584.1	-407	-250	0.00	0.00
										8.80	46_PS1/O1.1	42382	45156	4.07	10.03
46_4403	8.48	8.39	9.80	9.94	46_4403.1	49477	57566	2.61	7.20	9.36	46_4403.2	9282	3582	1.62	2.86
46_8093	12.02	12.02	12.77	12.72	46_8093.2	1172	1204	0.18	0.19	12.87	46_8103.1	12	0	0.02	0.00
46_AQU002	7.49	7.47	9.35	9.16	46_AQU002.2	58868	65062	2.39	7.18	8.97	46_AQU002.1	-4295	-2385	1.06	0.90
46_19705	9.81	9.82	10.86	11.02	46_19705.2	4480	4703	0.57	0.96	10.08	46_19705.1	1139	1031	0.41	0.53
46_AQU004	6.38	6.37	8.56	9.04	46_AQU004.2	13084 4	14175 9	3.83	5.85	7.98	46_AQU004.1	- 52519	- 56839	2.47	5.17
46_21350	7.55	7.55	9.03	9.20	46_21350.2	2900	2840	0.24	0.23	8.86	46_21350.1	3325	3330	0.58	1.60
										13.09	46_21322.1	0	0	0.00	0.00

