



Faculteit Ingenieurswetenschappen  
Departement Burgerlijke Bouwkunde

**Afdeling Hydraulica**

Kasteelpark Arenberg 40  
BE-3001 Heverlee (Leuven)

tel. 016 32 16 58

fax 016 32 19 89

Patrick.Willems@bwk.kuleuven.be

[www.kuleuven.be/hydr](http://www.kuleuven.be/hydr)

# Evaluatie van berekeningsmethoden voor het bepalen van de benodigde buffercapaciteit van kleinschalige opvangsystemen in het kader van erosiebestrijding

Eindrapport voor

Vlaamse Overheid - Departement LNE

- Afdeling Land en Bodembescherming, Ondergrond, Natuurlijke Rijkdommen

**Ir. Pieter Meert**

**Prof. dr. ir. Patrick Willems**

juli 2013

Faculteit Ingenieurswetenschappen  
Departement Burgerlijke Bouwkunde  
**Afdeling Hydraulica**  
Kasteelpark Arenberg 40  
BE-3001 Heverlee (Leuven)



tel. 016 32 16 58  
fax 016 32 19 89  
Patrick.Willems@bwk.kuleuven.be

[www.kuleuven.be/hydr](http://www.kuleuven.be/hydr)

Deze studie werd vanwege de Vlaamse Overheid – Departement LNE – Afdeling Land en Bodembescherming, Ondergrond, Natuurlijke rijkdommen opgevolgd door:

Petra Deproost

Jan Vermang

Liesbeth Vandekerckhove

Daarnaast bestond de stuurgroep ook nog uit:

Nik Dezillie (VMM – Afdeling Operationeel Waterbeheer)

Thomas Vansteenkiste (VMM – Afdeling Operationeel Waterbeheer)

Ingeborg Barrez (VMM – Afdeling Ecologisch Toezicht)

Thijs Van Der Meeren (Agentschap voor Natuur en Bos – Afdeling Beleid)

Bart Neyrinck (Infrax)

Geert Wellens (Aquafin)

Karel Vandaele (Watering van Sint-Truiden)

Stefanie Bourgeois (Provincie Vlaams-Brabant – Dienst Waterlopen)

Dieter Croonenborghs (Provincie Vlaams-Brabant – Dienst Waterlopen)

Eddy Poelman (Provinciaal Centrum voor Milieuonderzoek – Steunpunt erosie)

Liesbeth Rosseel (Provinciaal Centrum voor Milieuonderzoek – Steunpunt erosie)

Martijn De Naegel (Inagro – Afdeling Erosiebestrijding)

## Inhoud

<b>0</b>	<b>Samenvatting.....</b>	<b>4</b>
<b>1</b>	<b>Lijst van afkortingen.....</b>	<b>5</b>
<b>2</b>	<b>Inleiding.....</b>	<b>6</b>
<b>3</b>	<b>Literatuuronderzoek van gangbare methodes.....</b>	<b>7</b>
3.1	Inleiding.....	7
3.2	Deelaspecten.....	7
3.3	Keuze van de maatgevende neerslag.....	11
3.3.1	Aspect tijdsdimensie neerslag: enkelvoudige gebeurtenis versus tijdreeks	11
3.3.2	Aspect buiduur.....	12
3.3.3	Aspect statistische tijdreeksanalyse.....	14
3.3.4	IDF-verbanden voor Vlaanderen.....	16
3.3.5	Aspect terugkeerperiode.....	21
3.3.6	Aspect concentratietijd.....	21
3.3.6.1	Op basis van de kinematische golfsnelheid.....	21
3.3.6.2	Op basis van de wet van Manning.....	21
3.3.6.3	Op basis van empirische formules.....	23
3.3.6.4	Op basis van debietmeetgegevens.....	25
3.4	Berekening van het opwaartse neerslagafstromingsdebiet.....	25
3.4.1	Gedetailleerd fysisch-gebaseerde modellen.....	26
3.4.2	Conceptuele simulatiemodellen.....	30
3.4.3	Empirische of eenvoudige conceptuele modellen.....	41
3.4.3.1	Stap 1: Berekening netto neerslag.....	41
3.4.3.2	Stap 2: Berekening afvoerdebiet.....	57
3.5	Modellering opvangsysteem.....	62
3.6	Berekening of keuze van het doorvoerdebiet.....	63
3.6.1	Gravitair leeglopend opvangsysteem: lineair reservoirmodel.....	63
3.6.2	Stroming door openingen: knijpopening of schuifafsluiter.....	63
3.6.3	Stromingen door leidingen.....	65
3.6.4	Constant doorvoerdebiet: wervelventiel.....	65
3.6.5	Keuze doorvoerdebiet.....	65
3.7	Berekening van de afwaartse veiligheid (veiligheid tegen overstroming langs het afwaartse ontvangende oppervlaktewater) of de keuze van de aanvaardbare frequentie van overloop.....	65
3.7.1	Standaard-keuze aanvaardbare frequentie van overloop.....	65
3.7.2	Via expliciete kwantificering afwaartse veiligheid.....	66
3.7.3	Berekening overstromingsrisico.....	67
3.7.4	Berekening overlastrisico.....	68
3.8	Berekening effectiviteit opvangsysteem en bepaling benodigd bergingsvolume.....	69
3.8.1	Hydraulische effectiviteit.....	69
3.8.2	Effectiviteit sedimentopvang.....	71
	Stap 1: berekening bodemverlies.....	71
	Stap 2: berekening sediment delivery ratio en vangefficiëntie.....	72
3.9	Berekening invloed klimaatverandering.....	76
<b>4</b>	<b>Schematisch overzicht van basisconcepten/deelmethoden, onderliggende veronderstellingen, voor- en nadelen.....</b>	<b>79</b>
<b>5</b>	<b>Onderzoek naar de geldigheid van de veronderstellingen voor Vlaanderen.....</b>	<b>85</b>
<b>6</b>	<b>Inventaris van de benodigde invoer-, parameter- en kalibratiegegevens en beschikbaarheid in Vlaanderen.....</b>	<b>88</b>
<b>7</b>	<b>Selectie van meest geschikte methode(n) voor Vlaanderen.....</b>	<b>92</b>
<b>8</b>	<b>Inventaris gangbare methoden.....</b>	<b>96</b>



<b>9</b>	<b>Toepassing methodes in gevalstudies</b> .....	<b>106</b>
9.1	Bufferbekken Jonker Janlaan te Attenhoven (Landen) .....	107
9.2	Bufferbekken Nederhasseltstraat te Ninove .....	114
9.3	Heulen gracht te Velm .....	119
9.3.1	Beschrijving meetcampagnes .....	119
9.3.2	Bepaling concentratietijd o.b.v. debietmetingen .....	126
9.3.3	Berekening en analyse tijdsvariatie runoff-coëfficiënt .....	127
9.3.4	Ruimtelijke variatie runoff-coëfficiënt .....	136
9.3.5	Neerslagafvoermodel .....	139
9.3.6	Benodigde bergingscapaciteit .....	144
9.3.7	Invloed op afwaartse waterloop .....	147
9.3.8	Sedimentopvang .....	150
9.4	Maarkedal .....	156
9.4.1	Beschrijving meetcampagnes .....	156
9.4.2	Bepaling concentratietijd o.b.v. debietmetingen .....	162
9.4.3	Berekening en analyse tijdsvariatie afvoercoëfficiënt .....	163
9.4.4	Neerslagafvoermodel .....	170
9.4.5	Benodigde bergingscapaciteit .....	172
9.4.6	Sedimentopvang .....	174
<b>10</b>	<b>Gevoeligheidsanalyse op basis van het knelpuntgebied Boesdaal te Linkebeek, Sint-Genesius-Rode en Beersel</b> .....	<b>179</b>
10.1	Gebiedsbeschrijving .....	179
10.2	Analyse met vaste parameterwaarden .....	181
10.3	Gevoeligheidsanalyse.....	185
10.3.1	Concentratietijd .....	185
10.3.2	Runoff-coëfficiënt .....	186
10.3.3	Klimaatscenario's .....	189
10.3.4	Knijphoogte en oppervlakteberging.....	190
<b>11</b>	<b>Aanbevelingen m.b.t. bijkomende monitoring</b> .....	<b>192</b>
11.1	Meetgoten .....	192
11.2	Neerslagsimulaties .....	192
11.3	Bestaande bufferbekkens.....	193
11.4	Besluit	193
<b>12</b>	<b>Rekeninstrument</b> .....	<b>194</b>
<b>13</b>	<b>Referenties</b> .....	<b>195</b>
	<b>Bijlage A: Neerslagstatistieken</b> .....	<b>202</b>
	<b>Bijlage B: Terugkeerperiode van overloop volgens continue simulatiemethode</b> .....	<b>203</b>
	<b>Bijlage C: Benodigde bergingscapaciteiten volgens continue simulatiemethode</b> .....	<b>222</b>
	<b>Bijlage D: Invloed klimaatopwarming</b> .....	<b>229</b>
	<b>Bijlage E: Handleiding rekeninstrument</b> .....	<b>233</b>

## 0 Samenvatting

Deze studie naar de meest gangbare methodes voor het berekenen van de benodigde buffercapaciteit van opvangsystemen in het kader van erosiebestrijding heeft aangetoond dat de continue simulatieaanpak de meest aanbevolen ontwerpmethodes is. In deze methode wordt een lange-termijn tijdreeks van neerslag (vb. de beschikbare 100-jarige tijdreeks met 10-minuten neerslagintensiteiten te Ukkel) gesimuleerd in een hydrologisch deelmodel van het opwaartse deelstroomgebied en de resulterende tijdreeks van neerslagafstromingsdebieten gesimuleerd in een reservoir-type model van het opvangsysteem. Op die manier wordt voldoende nauwkeurig rekening gehouden met de tijdsdynamiek van de neerslag. Methoden die geen of onvoldoende rekening houden met deze tijdsdynamiek, zoals methoden op basis van enkelvoudige ontwerpcurven (vb. blokneerslag, gebruikt in de rationale methode en de SCS-methode) kunnen (sterk) afwijkende resultaten opleveren. Bij het gebruik van blokneerslag wordt verondersteld dat de voorafgaandelijke en navolgende neerslag nul is, wat niet correct is. Blokneerslagintensiteiten worden immers afgeleid uit IDF-verbanden, die gemiddelde intensiteiten voorstellen voor bepaalde tijdsduren en terugkeerperioden, onafhankelijk van de voorafgaandelijke of navolgende neerslag. De SCS-methode, die internationaal frequent wordt toegepast, blijkt geen nauwkeurige runoff-coëfficiënten op te leveren voor kleine concentratietijden (kleiner dan 1 dag) en kleine terugkeerperioden (lager dan 20 jaar). Een alternatieve aanpak is om de runoff-coëfficiënten via de SCS-methode op basis van dagneerslag in te schatten, maar dit levert geen voordeel in vergelijking met de rationale of andere empirische methoden.

Voor het hydrologisch deelmodel maken alle modellen/methoden gebruik van het concept van de concentratietijd en de oppervlakterunoff-coëfficiënt. Deze runoff-coëfficiënt is afhankelijk van een groot aantal factoren, zoals het verzadigingsgehalte van de ondergrond, de voorafgaandelijke neerslagintensiteit en van de toestand van het bodemoppervlak (ruwheid, verslempingsgraad en bedekkingsgraad) en varieert dus continu in de tijd. De meeste methoden gaan uit van een constante runoff-coëfficiënt, wat een aanvaardbare veronderstelling is omdat de meest relevante perioden voor het ontwerp van de opvangsystemen deze met maximale runoff-coëfficiënt zijn. Deze coëfficiënt kan geschat worden op basis van empirische tabellen i.f.v. landgebruik, terreinhelling, bodemtype, verslempingsgraad van de toplaag en neerslagintensiteit, wat in grootteorde meestal een goede inschatting oplevert voor ontwerpberoeeningen.

De dimensionering van de capaciteit van het opvangsysteem dient bepaald op basis van bepaalde criteria die de effectiviteit van het opvangsysteem evalueren. Zowel de effectiviteit m.b.t. sedimentopvang als de hydraulische effectiviteit, zoals het overlooprisico en indien nodig de afwaartse veiligheid, dienen gecontroleerd. De hydraulische effectiviteit wordt typisch geëvalueerd op basis van de overloopfrequentie van het opvangsysteem. Bij overloop van afvoersystemen in residentiële gebieden wordt volgens de gangbare normen een overlooperugkeerperiode van 20 jaar of meer gehanteerd. In andere gevallen, kan deze terugkeerperiode lager worden gekozen, zoals 10 jaar bij overloop in landelijk gebied. Deze overlooperugkeerperiode geeft evenwel geen correct beeld van het afwaarts overstromingsrisico. De terugkeerperiode van afwaartse debieten kan immers totaal verschillend zijn van deze van de overloop. Ook kan door het verschil in concentratietijd voor het deelstroomgebied opwaarts van het opvangsysteem en het gehele stroomgebied opwaarts van het watersysteem waarin het opvangsysteem overloopt, de overloopdebieten vroeger komen dan de debietpiek in het afwaarts watersysteem. Door de tijdsvertraging die het opvangsysteem veroorzaakt kan het opvangsysteem hydraulisch zelfs een nadelig effect hebben. Daarom wordt aanbevolen om bij aanwezigheid van een afwaarts watersysteem de invloed op dit watersysteem expliciet door te rekenen. Dit kan in een hydraulisch model van de afwaartse waterloop of riolering (eventueel reeds beschikbaar bij de waterloop- of rioleringsbeheerder). Anderzijds volstaat meestal een eenvoudiger aanpak via een reservoir-type model of een beschikbare debietmeetreeks langs de waterloop. De effectiviteit van de sedimentopvang kan anderzijds ingeschat worden op basis van een empirische berekening van het bodemverlies en via de bezinkingsnelheid van de sedimenten.

## 1 Lijst van afkortingen

ALBON	Afdeling Land- en Bodembescherming, Ondergrond, Natuurlijke rijkdommen van het Departement Leefmilieu, Natuur en Energie van de Vlaamse overheid.
CN	Curve Number
ET <sub>o</sub>	Potentiële Evapotranspiratie
HIC	Hydrologisch InformatieCentrum, onderdeel van het Waterbouwkundig Laboratorium dat instaat voor het verzamelen en beheren van alle hydrologische gegevens die relevant zijn voor het beheer van de bevaarbare waterlopen in Vlaanderen.
IGO – Leuven	Intergemeentelijk Opbouwwerk Leuven, dienstverlenende intergemeentelijke vereniging die duurzame, maatschappelijke relevante en kwaliteitsvolle diensten ontwikkelt en verleent aan lokale besturen en hun inwoners
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change.
IDF – verband	Neerslagintensiteit / duur / frequentie – verbanden.
KMI	Koninklijk Meteorologisch Instituut van België
NAM-model	Nedbør – Afstrømnings – Model, conceptueel hydrologisch model dat onderdeel is van de MIKE-software, ontwikkeld door Danish Hydraulic Institutue (DHI).
PCM	Provinciaal Centrum voor Milieuonderzoek (Provincie Oost-Vlaanderen)
PDM-model	Probability Distributed Model, conceptueel hydrologisch model ontwikkeld door het Brits Instituut of Hydrology.
POT	Peak – Over – Threshold
PDS	Partial – duration – series
SDR	Sediment Delivery Ratio
SCS-methode	Soil Conservation Service van het U.S. Department of Agriculture
SRM	Simplified Runoff Model
UCL	Université Catholique de Louvain
VHA	Vlaamse Hydrografische Atlas
VHM	Veralgemeend conceptueel hydrologisch model, ontwikkeld aan de KU Leuven
VMM – AOW	Vlaamse Milieumaatschappij – Afdeling Operationeel Waterbeheer
WL	Waterbouwkundig Laboratorium

## 2 Inleiding

Dit rapport kadert in de studie “Evaluatie van berekeningsmethoden voor het bepalen van de benodigde buffercapaciteit van kleinschalige opvangsystemen in het kader van erosiebestrijding” (bestek nr. BOD/STUD/2011/01) voor de Vlaamse Overheid - Departement Leefmilieu, Natuur en Energie - Afdeling Land en Bodembescherming, Ondergrond, Natuurlijke Rijkdommen. Meer specifiek beschrijft ze de eindresultaten bij de studie.

De studie bestaat uit drie deelopdrachten:

- Deelopdracht 1: Inventaris, beschrijving en vergelijking van bestaande berekeningsmethoden:
  1. Literatuuronderzoek naar de gangbare methodes voor het berekenen van de buffercapaciteit van opvangsystemen, zoals beschreven in de ‘Code van goede praktijk erosiebestrijdingswerken’, uitgegeven door het departement Leefmilieu, Natuur en Energie van de Vlaamse Overheid (ALBON - Vandekerckhove, 2010).
  2. Opmaak schematisch overzicht van de onderliggende veronderstellingen bij deze methodes.
  3. Onderzoek naar de geldigheid van deze veronderstellingen voor Vlaanderen.
  4. Inventaris van de benodigde invoer-, parameter- en kalibratiegegevens voor de geldige methoden en de beschikbaarheid van deze gegevens in Vlaanderen.
  5. Selectie van meest geschikte methode(n) voor Vlaanderen.
- Deelopdracht 2: Evaluatie (kalibratie en validatie) van de geselecteerde berekeningsmethoden
  1. Toepassing geselecteerde methodes op gevalstudies
  2. Keuze finale methode
- Deelopdracht 3: Aanbevelingen met betrekking tot toekomstige monitoring:
  1. Gevoeligheidsanalyse van de continue simulatiemethode
  2. Formuleren van voorstellen voor bijkomende meetcampagnes

De eindresultaten van de verschillende deelopdrachten worden hierna verder beschreven.

## 3 Literatuuronderzoek van gangbare methodes

### 3.1 Inleiding

In dit hoofdstuk wordt een literatuuroverzicht gegeven van de gangbare methodes voor het berekenen van de benodigde buffercapaciteit van opvangsystemen voor oppervlakkig afstromend water en sediment uit kleine landelijke stroomgebiedjes. Met “kleine gebieden” worden hier gebieden bedoeld met een oppervlakte van enkele ha tot enkele 100-tallen ha. Het betreft opvangsystemen (bufferende aarden dam met bufferzone of erosiepoel, bufferbekkens en buffergrachten) zoals beschreven in de ‘Code van goede praktijk erosiebestrijdingswerken’. Het literatuuronderzoek omvat zowel de methoden die in Vlaanderen recent werden toegepast, als internationaal gangbare methodes.

Voor elk van deze gangbare methodes wordt hierna een overzicht gegeven, die de volgende aspecten omvat:

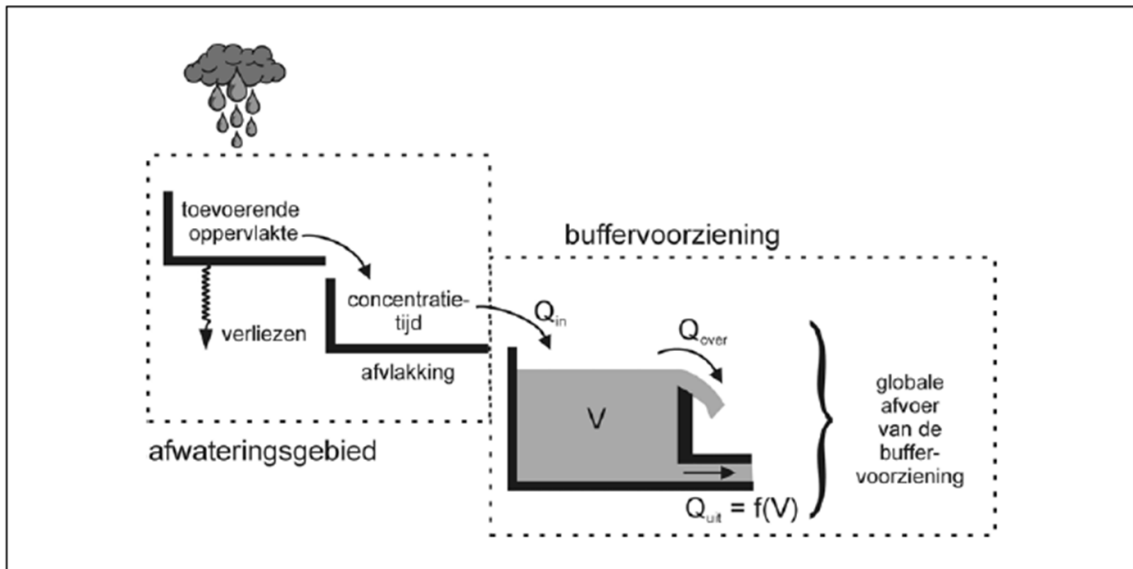
- De basisconcepten (vb. hydrologische principes) waarop de methode gebaseerd is.
- De veronderstellingen die aan de basis liggen van de methode.
- Een overzicht van de benodigde parameters en invoergegevens die de methode vereist, of parameterkalibratie al dan niet noodzakelijk / wenselijk is, en welke meetgegevens nodig zijn om zulke kalibratie mogelijk te maken.
- Details over de toepasbaarheid van de methode (onafhankelijk van de beschikbare parameter- en/of invoergegevens): de condities / karakteristieken van het deelstroomgebied en het type opvangsysteem, waarvoor de methode (op basis van de basisconcepten en veronderstellingen) geldig is. Deze toepasbaarheid wordt gesitueerd; er wordt uitgelegd waarvoor de methode oorspronkelijk werd ontwikkeld, en waarom de gemaakte veronderstellingen voor deze toepassing geldig zijn.

Ook werd een literatuurlezing gemaakt van de nationale en internationale studies waarin de methodes de laatste jaren werden toegepast. Indien door de auteurs in het kader van deze studie relevante en bruikbare informatie werd gegeven m.b.t. de nauwkeurigheid, voordelen en/of moeilijkheden, worden deze hier gerapporteerd.

De meeste van deze methoden werden/worden niet enkel toegepast voor het dimensioneren van kleinschalige opvangsystemen voor erosiebestrijding, maar ook voor kleinschalige opvangsystemen in andere toepassingen, zoals bergings- of buffervoorzieningen langs rioleringen, langs (snel)wegen, in nieuwbouwprojecten in het kader van de watertoets, enz. Indien de implementatie van de methodes voor deze andere toepassingen tot interessante resultaten heeft geleid die ook geldig zijn voor de toepassing van erosiebestrijding, werden zij ook meegenomen.

### 3.2 Deelaspecten

Figuur 1 geeft een schematisch overzicht van de verschillende deelaspecten die van belang zijn bij de hydrologisch-hydraulische modellering van kleinschalige opvangsystemen. Er wordt een onderscheid gemaakt tussen de modellering van het afstromings- of afwateringsgebied opwaarts van het opvangsysteem, en de hydraulische of waterbalans-modellering van het opvangsysteem zelf. Alle types opvangsystemen die in Vlaanderen gebruikt worden in het kader van de erosiebestrijding kunnen geschematiseerd of conceptueel gemodelleerd worden via een bergingsreservoir dat gevoed wordt met het neerslagafstromingsdebiet van het opwaartse afwateringsgebied, en dat geleidigd wordt met een doorvoerdebiet naar het afwaartse oppervlaktewater. Indien de bergingscapaciteit overschreden wordt, treedt een overlaat in werking die een bijkomend debiet, het overlaatdebiet, in het afwaarts ontvangende oppervlaktewater brengt.



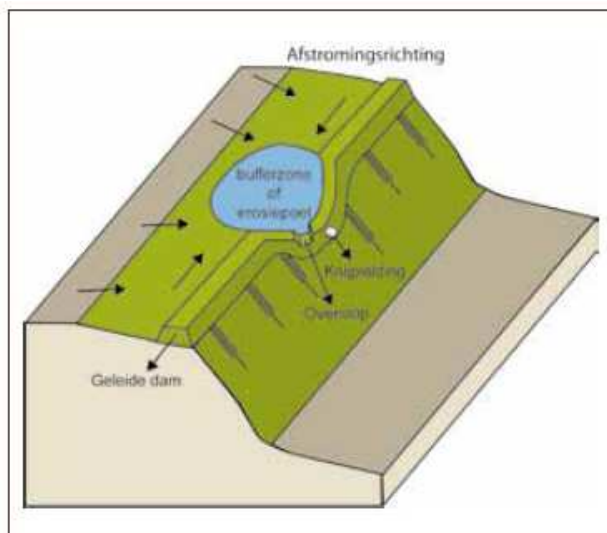
Figuur 1. Schematisch overzicht van de deelaspecten betrokken in de hydrologisch-hydraulische modellering van kleinschalige opvangsystemen (gebaseerd op Vaes, 1999)

Hierna wordt voor de in Vlaanderen gangbare opvangsystemen voor erosiebestrijding een schets gegeven van hoe het opvangsysteem en de configuratie doorvoer – overlaat er kan uitzien. Figuur 2 toont een voorbeeld van een opvangsysteem achter een aarden bufferende dam, en Figuur 3 van een bufferende dam, gecombineerd met een geleidende dam. De doorvoer wordt in beide voorbeelden gerealiseerd door een knijpleiding in de dam, de overlaat via een gecontroleerde overloop van de bufferende dam. Indien er geen afwaarts watersysteem is, gebeuren de doorvoer en de overloop naar een achterliggend terrein.

Het afwaartse watersysteem (rivier, beek, riolering, ...) of terrein (weiland, akker, ...) ontvangt dus de som van het doorvoerdebiet en het overlaatdebiet. Door de aanleg van het opvangsysteem wordt de natuurlijke neerslagafstromingssituatie verstoord, waarbij alle neerslagafstromings-gebeurtenissen (hydrogrammen) die een piekdebiet hebben groter dan het maximale doorvoerdebiet worden afgetopt, het afgetopt volume tijdelijk wordt geborgen en vertraagd afgevoerd. Afhankelijk van de dimensionering kunnen extreme neerslagafstromingsvolumes de opvangcapaciteit overschrijden en een plotse piekbelasting van het afwaartse watersysteem veroorzaken. Let wel dat deze laatste situatie vaak nagenoeg overeenkomt met de natuurlijke neerslagafvoersituatie. Het opwaartse neerslagafstromingsdebiet wordt immers volledig afgevoerd naar het afwaartse watersysteem, net zoals in de oorspronkelijke situatie (vóór de aanleg van het opvangsysteem) het geval is. De tijdelijke opvang en de vertraagde afvoer hebben wel een versturende invloed op de neerslagafstroming. De piekafvoer wordt afgetopt maar de vertraagde afvoer kan in sommige gevallen de piekafvoer van het afwaartse watersysteem verhogen indien deze identiek gefaseerd (gelijktijdig) verloopt met meer afwaarts toekomstige neerslagafstromingen van andere deelstroomgebieden. De dimensionering van het opvangsysteem moet garanderen dat modderoverlast in de woningen en op de wegen in de directe omgeving van het opvangsysteem vermeden wordt en dat de afwaartse veiligheid (frequentie of risico van/op wateroverlast langs de ontvangende waterloop of riolering) de veiligheid bij de oorspronkelijke natuurlijke toestand benadert.



*Figuur 2. Opvangsysteem voor erosiebestrijding achter een aarden bufferende dam.*



Figuur 3. Opvangsysteem voor erosiebestrijding via een geleidende dam.



Op basis van dit overzicht wordt duidelijk dat elke methode voor het hydraulisch ontwerp van kleinschalige opvangsystemen uit verschillende deelaspecten bestaat. De methode bestaat derhalve uit deelmethoden voor elk van deze deelaspecten:

- Keuze van de “maatgevende” neerslag
- Berekening van het neerslagafstromingsdebiet van het opwaartse afvoergebied voor de maatgevende neerslag
- Berekening of keuze van het doorvoerdebiet van het opvangsysteem
- Keuze van de aanvaardbare frequentie van overloop van het opvangsysteem, waarbij het aangeraden wordt de afwaartse veiligheid (vb. veiligheid tegen overstroming langs het afwaartse ontvangende oppervlaktewater) – indien relevant – eveneens te berekenen.
- Berekening effectiviteit opvangsysteem en bepaling benodigd bergingsvolume.

Hierna wordt voor elk van deze deelaspecten een overzicht gegeven van de gangbare en mogelijke methodes, met – waar mogelijk en nuttig – de specifieke uitwerking voor de Vlaamse situatie.

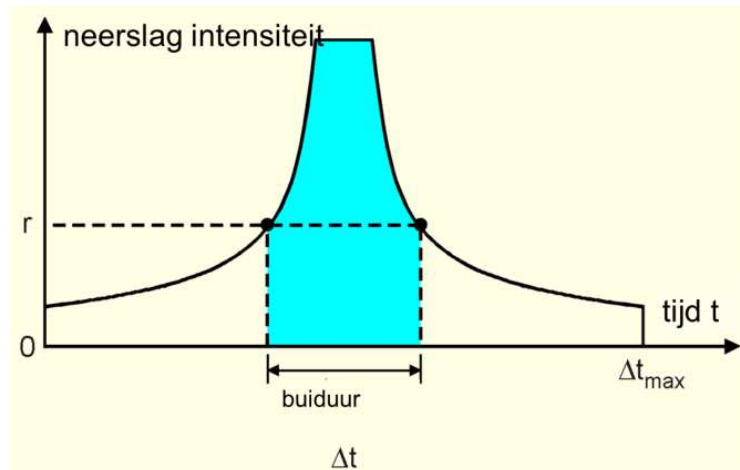
### **3.3 Keuze van de maatgevende neerslag**

De berekening van het opwaartse neerslagafstromingsdebiet gebeurt via een keuze van de neerslag gevolgd door een omzetting van deze neerslag in een neerslagafstromingsdebiet. De neerslag kan hierbij meerdere mogelijke vormen aannemen: een tijdreeks of een enkelvoudige gebeurtenis.

#### **3.3.1 Aspect tijdsdimensie neerslag: enkelvoudige gebeurtenis versus tijdreeks**

De tijdreeks kan een historische tijdreeks zijn, d.w.z. afgeleid van historische waarnemingen, of stochastisch gegenereerd op basis van een neerslaggenerator (stochastisch neerslagmodel). De stochastische generator dient uiteraard afgeijkt aan historische waarnemingen, maar is minder gebonden aan de historische periode waarvoor neerslagwaarnemingen (bij verschillende tijd- en ruimteschalen) voorhanden zijn.

Enkelvoudige gebeurtenissen kunnen welbepaalde historische regenbuien zijn of regenbuien met een welbepaalde gemiddelde herhalingstijd of terugkeerperiode. Enkelvoudige gebeurtenissen voor een welbepaalde terugkeerperiode kunnen de vorm aannemen van een blokneerslag (constante neerslagintensiteit gedurende een bepaalde tijdsduur, de buiduur genoemd) of een meer complex hyetogram met een tijdsvariabele neerslagintensiteit. Een voorbeeld van zulk tijdsvariabel hyetogram is de “composietbui” die standaard gebruikt wordt bij het ontwerp van rioleringsystemen. Composietbuien zijn synthetisch samengesteld, zodanig dat de neerslagintensiteit uitgemiddeld over elke tijdsduur, die centraal in de bui wordt beschouwd, eenzelfde terugkeerperiode heeft (Figuur 4).

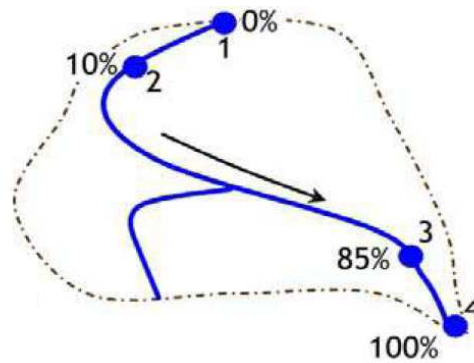


Figuur 4. Composietbui.

De afleiding van enkelvoudige gebeurtenissen voor welbepaalde terugkeerperioden vraagt een voorafgaandelijke statistische analyse van de tijdreeks. De neerslaggebeurtenis met een welbepaalde terugkeerperiode wordt in het neerslagafvoermodel gesimuleerd en er wordt verondersteld dat de terugkeerperiode van de neerslagafvoer (modeluitvoer) identiek is aan de terugkeerperiode van de neerslag (modelinvoer). Dit is echter enkel het geval voor neerslagafvoersystemen waarbij een verhoogde neerslag ook effectief tot een verhoogde afvoer leidt. Dit is voor niet volledig verharde gebieden niet altijd het geval, omdat het aandeel van het neerslagvolume dat effectief afstroomt bepaald wordt door een groot aantal factoren zoals de verzadigingsgraad van de bodem, de infiltratiecapaciteit en de toestand van het bodemoppervlak (ruwheid, verslemping, bodembedekking, ...). Dus, door de sterke seizoensvariatie van de neerslag, de verzadigingsgraad van de ondergrond en de toestand van het bodemoppervlak, kan een verhoogde neerslag zowel tot een verhoogde als een verlaagde neerslagafvoer leiden afhankelijk van de periode van het jaar. Voor verharde gebieden (vb. rioleringstoepassingen) kunnen enkelvoudige gebeurtenissen wel met goed gevolg toegepast worden.

### 3.3.2 Aspect buiduur

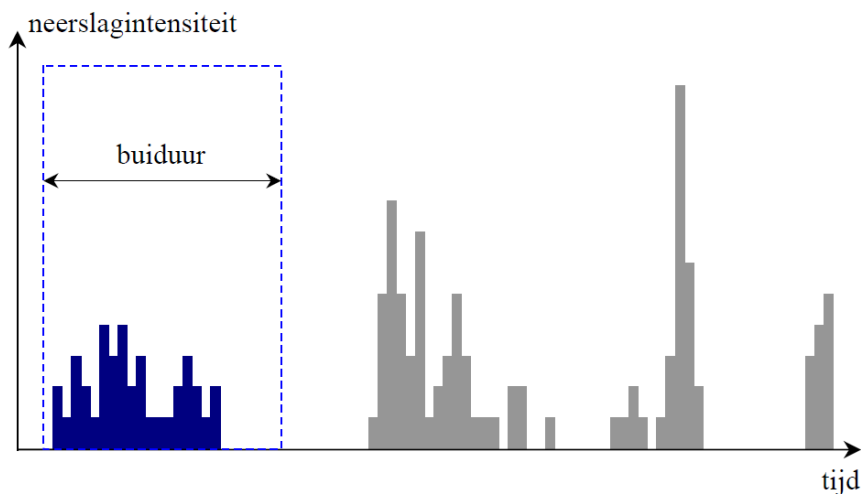
Door de buiduur gelijk te kiezen aan de concentratietijd van het neerslagafvoersysteem, wordt na omzetting van de neerslag naar neerslagafvoer een piekafvoerdebiet bekomen dat dezelfde terugkeerperiode heeft als de terugkeerperiode van de neerslagintensiteit. De concentratietijd is hierbij de tijd die de neerslag nodig heeft om vanuit het meest verafgelegen punt in het neerslagafvoergebied de meer afwaartse locatie te bereiken waar de neerslagafvoer wordt beschouwd. Of anders gezegd, het is de tijd gedurende dewelke de neerslag dient aan te houden tot het ganse opwaartse neerslagafvoergebied bijdraagt aan de afwaartse neerslagafvoer (Figuur 5). Voor kortere tijdsduren draagt slechts een deel bij, zodat lagere neerslagafvoeren worden bekomen. Voor langere tijdsduren draagt ook het ganse stroomgebied bij maar eenzelfde neerslagintensiteit over een langere tijdsduur komt minder frequent voor, dus is minder kritisch.



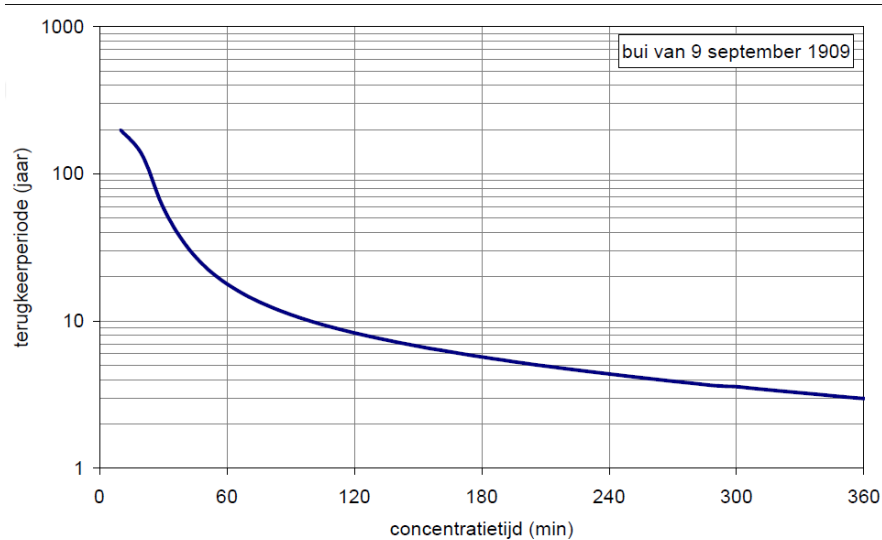
*Figuur 5. Concentratietijd van een stroomgebied. De percentages geven aan in welke mate het debiet op die plaats bijdraagt aan het debiet in het meest afwaartse punt (4).*

Composietbuien kunnen door hun specifieke samenstelling (neerslagintensiteiten uitgemiddeld over elke tijdsduur hebben eenzelfde terugkeerperiode) gebruikt worden voor de berekening van de afvoer bij een welbepaalde terugkeerperiode op elke locatie in het neerslagafvoersysteem. Elke locatie heeft immers een andere concentratietijd. Door een breed bereik van concentratietijden/uitmiddelingstijden te kiezen, kan men met eenzelfde composietbui piekafvoerdebieten bekomen voor elke locatie in het afstroomgebied. Bij een alternatieve aanpak met blokneerslag moeten een groot aantal blokneerslagbuien, met telkens een andere buiduur, gesimuleerd worden.

Historische regenbuien (voorbeeld in Figuur 6) hebben een gelijkaardig nadeel als het gebruik van blokneerslag. De neerslagintensiteit uitgemiddeld over verschillende tijdsduren centraal in de bui hebben meestal een andere terugkeerperiode (zie voorbeeld in Figuur 7). Een welbepaalde historische regenbui kan dus slechts gebruikt worden voor de bepaling van de afvoer op één welbepaalde locatie en voor één welbepaalde terugkeerperiode. Beschouwing van verschillende locaties of terugkeerperiodes vraagt dus het simuleren van een groot aantal historische gebeurtenissen. Of, voor een welbepaalde locatie, zullen slechts welbepaalde historische regenbuien bruikbaar zijn.



*Figuur 6. Voorbeeld van een historische regenbui*



Figuur 7. Variatie van de terugkeerperiode van de neerslagintensiteit met de tijdsduur voor een regenbui met 1 van de meest extreme korte-duur intensiteiten in de neerslagreeks te Ukkel sinds 1898.

In tegenstelling tot rioleringsystemen gebeurt de dimensionering bij opvangsystemen voor erosiebestrijding op slechts één welbepaalde locatie in het stroomgebied, wat de bruikbaarheid van enkelvoudige historische regenbuien beperkt. Dit in combinatie met de niet volledige verharding van het stroomgebied zorgt ervoor dat enkelvoudige buien hier niet aanbevolen worden voor toepassingen van modellering of dimensionering van erosiebestrijdingsmaatregelen (zie ook verder). Eventueel kunnen ze wel gebruikt worden indien bepaalde veronderstellingen gemaakt kunnen worden (zie verder).

Het gebruik van enkelvoudige neerslaggebeurtenissen wordt ook wel eens de methode met toepassing van “statistiek vooraf” genoemd, d.w.z. de statistische analyse gebeurt vooraleer de neerslag wordt omgezet in neerslagafvoer, dus voorafgaandelijke statistische analyse op de neerslag. Alternatief hieraan wordt de volledige beschikbare neerslagtijdreeks gesimuleerd in het neerslagafvoermodel, wordt een tijdreeks van neerslagafvoerdebieten bekomen en wordt deze statistisch naverwerkt. Men verwijst daarom vaak naar de tijdreeks-gebaseerde methode als de methode met toepassing van “statistiek achteraf”, d.w.z. na doorrekening van de neerslag in het neerslagafvoermodel. De tijdreeks-gebaseerde methode heeft het voordeel dat de statistische informatie die beschikbaar is in de neerslagtijdreeks niet voorafgaandelijk uit de tijdreeks geëxtraheerd moet worden. Deze inspanning en bijhorende veronderstellingen kunnen vermeden worden. Tegenover dit voordeel staat het nadeel dat de tijdreeksgebaseerde methode een meer tijdrovende neerslagafvoerberekening vergt (grotere rekentijd).

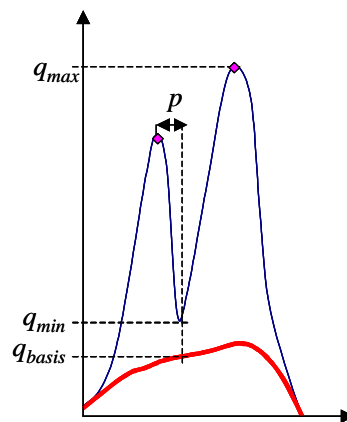
### 3.3.3 Aspect statistische tijdreeksanalyse

Bij zowel de tijdreeksgebaseerde methode als de methode op basis van enkelvoudige gebeurtenissen dient een statistische tijdreeksanalyse te gebeuren: ofwel op de neerslagtijdreeks, ofwel op de tijdreeks van berekende neerslagafvoerdebieten. Men wenst op basis van zulke analyse te bepalen met welke terugkeerperiode een bepaalde neerslagintensiteit (bij een bepaalde uitmiddeldingsduur) of een bepaald afvoerdebiet zich voordoet. De eerste stap in zulke statistische analyse is het extraheren van onafhankelijke neerslagintensiteiten of afvoerdebieten uit de tijdreeks. De tweede stap is daarna de berekening van de terugkeerperiode volgens een extreme-waarden-analyse.

Voor de eerste stap, het extraheren van onafhankelijke waarden uit de tijdreeks, zijn twee methoden gangbaar: de methode van de periodieke maxima (vb. jaarlijkse maxima) en de Peak-Over-Threshold (POT) of Partial-Duration-Series (PDS) methode. De methode van de periodieke maxima deelt de tijdreeks op in voldoende lange perioden van gelijke duur, waarvan verwacht wordt dat de waarden uit verschillende perioden onafhankelijk zijn. Bij de POT/PDS-methode wordt gewerkt met perioden van verschillende duur. De tijdreeks wordt opgedeeld in

deelperioden, vb. regen- of debiet/hydrogramperioden, op basis van hydrologische onafhankelijkheidscriteria. De POT/PDS-methode extraheert meer onafhankelijke waarden uit de tijdreeks en laat daardoor in het algemeen in de tweede stap een nauwkeurigere extreme-waarden-analyse toe. Een statistische analyse is immers meestal nauwkeuriger als ze gebaseerd is op een uitgebreidere set van onafhankelijke waarden. Daarom wordt hier de POT/PDS-methode aanbevolen. Enig nadeel van de POT/PDS-methode is dat er meerdere methoden zijn om de onafhankelijke waarden uit de tijdreeks te extraheren; wat subjectiviteit introduceert in de keuze van de methode. Dit nadeel weegt evenwel niet op tegen het voordeel.

De extractie van de onafhankelijke extremen bij de POT/PDS-methode gebeurt door toepassing van onafhankelijkheidscriteria. Er zijn verschillende criteria mogelijk. Bijvoorbeeld, twee afvoerpieken kunnen als (nagenoeg) onafhankelijk beschouwd worden als de neerslagintensiteiten die er aan de basis van liggen geen invloed uitoefenen op beide afvoerpieken maar slechts op één van beide. Willems (2009b) ontwikkelde een algoritme om dit na te gaan. Het algoritme kan dus gebruikt worden om een tijdreeks van afvoerdebieten op te delen in nagenoeg onafhankelijke afvoerhydrogrammen. Twee opeenvolgende afvoerpieken (Figuur 8) worden hierbij als onafhankelijk beschouwd als (i) de lengte van de dalende flank van een eerste piek ( $p$ ) een minimale lengte heeft, typisch langer dan de gemiddelde tijdsduur die de neerslag nodig heeft om van het meest verwijderde punt in het stroomgebied de locatie van de afvoerdebieten te bereiken (de zogenaamde recessieconstante, zie ook deel 3.4.2) volgens de snelle hydrologische deelstroom (d.i. oppervlakte-afstroming in het stroomgebied), (ii) het laagste debiet tussen de twee piekafvoeren voldoende laag is of voldoende dicht bij de basisafvoer is gesitueerd (een maximale waarde voor de fractie  $f$  ( $f = (q_{min} - q_{basis})/q_{max}$ ) indien er basisafvoer is of gekend is, of  $f = q_{min}/q_{max}$  indien er geen basisafvoer is), en (iii) de piekafvoer een minimale waarde heeft ( $q_{lim}$ ). De methode werd geïmplementeerd in het WETSPRO-werkboek in MS Excel (Willems, 2009b). Deel 3.4.2 licht verder toe hoe de recessieconstante van de snelle hydrologische deelstroom ingeschat kan worden en hoe de basisafvoer kan berekend of geschat worden.



Figuur 8. Parameters gebruikt in de criteria voor het definiëren van (nagenoeg) onafhankelijke piekafvoeren

Voor het definiëren van nagenoeg onafhankelijke neerslagintensiteiten bij de POT/PDS-methode gebruikten Vaes et al. (1994, 1996, 1998, 2004) en Willems et al. (2001) een tussentijd van 12 uur tussen 2 onafhankelijke waarden als onafhankelijkheids criterium, of groter wanneer de neerslagintensiteiten worden uitgemiddeld over tijdsduren die langer zijn dan 12 uur. In dat laatste geval werd de tussentijd even groot gekozen als de uitmiddelingsduur (ook aggregatieniveau genoemd).

In een tweede stap worden de geëxtraheerde onafhankelijke waarden gerangschikt van groot naar klein, waarbij de empirische terugkeerperiode wordt berekend als  $n/i$  met  $n$  de lengte van de volledige tijdreeks (exclusief de perioden met ontbrekende waarden) en  $i$  het rangschikingsnummer ( $i=1$  voor de grootste waarde,  $i=2$  voor de tweede grootste, enz). Deze empirische terugkeerperiode kan als beste schatter van de werkelijke terugkeerperiode beschouwd worden, wanneer de empirische terugkeerperiode klein is (vb. kleiner dan een derde van de lengte van de tijdreeks; bij een 30-jarige tijdreeks kunnen terugkeerperiodes tot

10 jaar met goed gevolg empirisch geschat worden). Grotere terugkeerperioden worden geschat via statistische extreme-waarden-analyse, gebruik makend van de extreme-waarden-theorie (Willems et al., 2008). Hiervoor zijn verschillende methodes voorhanden. De methode die door de Vlaamse waterloopbeheerders wordt gebruikt, en die ook aan de basis ligt van de Vlaamse composietbuien, maakt gebruik van lineaire regressie in Quantile-Quantile (Q-Q) plots (Willems, 2007; Willems et al., 2002, 2008).

De empirische terugkeerperiode-berekening of statistische extreme-waarden-analyse kan doorgevoerd worden voor neerslag- of debiet-waarden uitgemiddeld over één of meerdere uitmiddelingduren. Na analyse voor een bepaald bereik aan uitmiddelingduren (aggregatieniveaus), kunnen de resultaten van deze analyse samengevat worden in de vorm van neerslagintensiteit-duur-frequentie (IDF) of debiet-duur-frequentie (QDF) verbanden.

Voor Vlaamse neerslag werden in het verleden meermaals IDF-verbanden afgeleid. Hieronder wordt een overzicht gegeven.

### **3.3.4 IDF-verbanden voor Vlaanderen**

In het verleden werden door meerdere auteurs IDF-verbanden opgemaakt die geldig zijn voor Vlaanderen. Hieronder volgt een overzicht, waarbij telkens aanduiding wordt gegeven van de meetperiode en locatie waarop de IDF-verbanden gebaseerd zijn, de methode die gebruikt werd voor de extreme-waarden-analyse die aan de basis ligt van de neerslagstatistieken, het toegepaste type extreme-waarden-analyse, het bereik van terugkeerperioden waarvoor ze geldig zijn (dus de drempelwaarden die toegepast werden in de extreme-waarden-analyse), eventuele aanduiding van het (vroeger of huidig) gebruik ter ondersteuning van beleid of beheer in Vlaanderen, en een referentie.

- Laurent (1976): neerslagperiode 1934-1973, Ukkel, methode van de jaarlijkse maxima, Gumbel kansverdeling
- Demarée (1985): neerslagperiode 1934-1983, Ukkel, methode van de jaarlijkse maxima, Gumbel kansverdeling, terugkeerperioden groter dan 1 jaar: gebruikt voor de richtlijnen voor het ontwerp van rioleringen vanaf 1987; (Demarée, 1985)
- Vaes & Willems (1994), neerslagperiode 1967-1993, Ukkel, vergelijking methode jaarlijkse maxima met de POT/PDS methode, vergelijking Generalized Extreme Value (GEV) distribution versus Generalized Pareto Distribution (GPD), terugkeerperioden vanaf 3 maanden; (Vaes et al., 1994a, 1994b)
- Vaes et al. (1996), neerslagperiode 1967-1993, Ukkel, POT methode, exponentiële extreme-waarden-verdeling, geldigheid voor aggregatieniveaus tot 360 min., specifiek voor riolerings toepassingen, gebruikt voor de opmaak van composietbuien in opdracht van Aquafin; gebruikt in de 'Krachtlijnen voor een geïntegreerd rioleringsbeleid in Vlaanderen (VMM, 1996)' en in de Hydronaut-procedure van Aquafin; (Vaes et al., 1996)
- Vaes & Willems (1998), neerslagperiode 1967-1993, Ukkel, POT/PDS methode, twee-component exponentiële extreme-waarden-verdeling, samengestelde IDF-relaties op basis van twee buitypen en twee seizoenen, geldigheid voor aggregatieniveaus tot 15 dagen, ook bruikbaar voor waterlooptoepassingen, gebruikt voor de opmaak van afzonderlijke composietbuien voor winter en zomer in opdracht van AMINAL - Afdeling Water; (Vaes et al., 1998)
- Delbeke & Demarée (2000), neerslagperiode 1898-1997, alle 10-minuten neerslagreeksen in Vlaanderen, methode van de jaarlijkse maxima en POT/PDS methode, GEV en GPD kansverdelingen, in opdracht van AMINAL – Afdeling Water; (Delbeke, 2000); in 2006 werd door Mohymont een gelijkaardige studie uitgevoerd maar beperkt tot stations in het Waals Gewest
- Willems (2000), neerslagperiode 1898-1997, Ukkel, POT/PDS methode, twee-component exponentiële verdeling, bijsturing op basis van een schalingstheorie, en correctie voor 10-minuten tijdstap; (Willems, 2000)
- Willems (2009), aanpassing van de IDF-verbanden aan de Belgische klimaatscenario's tot 2100 (CCI-HYDR, Federaal Wetenschapsbeleid); (Willems, 2009a)

- Willems (2011), neerslagperiode 1898-2007, Ukkel, POT/PDS methode, twee-component exponentiële verdeling, bijsturing rekening houdend met klimaatoscillaties; op basis van deze bijsturing werden nieuwe composietbuien voor het rioleringsontwerp opgesteld voor het CIW; (Willems, 2011)

De neerslagstatistieken worden ook uitgebreid gebruikt binnen het rioleringsontwerp en de dimensionering van allerhande neerslagafwateringssystemen (vb. langs snelwegen, of in industrieterreinen). In de "Krachtlijnen voor een geïntegreerd rioleringsbeleid in Vlaanderen" van 1996 (VMM, 1996) en de "ontwerp-Code van Goede Praktijk voor het Ontwerp van Rioleringsystemen" uit 2004 (Vaes et al., 2004) zijn de neerslagstatistieken gebaseerd op de neerslaggegevens van het KMI te Ukkel voor de periode 1967-1993. Ze zijn gebaseerd op de IDF-relaties opgesteld door Vaes et al. (1996). Deze IDF-verbanden waren op hun beurt een verfijning van de eerdere IDF-verbanden van Demarée (1985). Enerzijds werd een langere en meer recente neerslagreeks gebruikt. Anderzijds werd overgeschakeld op de "Partial Duration Series" of "Peak-Over-Threshold" methode i.p.v. de (voor kleine terugkeerperioden) minder nauwkeurige methode op basis van jaarlijkse maxima. Vaes et al. (1996) maakten gebruik van een exponentiële extreme-waarden-verdeling en leidden verbanden af tussen de parameters van deze verdeling en het aggregatieniveau (tijdsduur waarover de neerslagintensiteiten worden uitgemiddeld). Deze verbanden bleken geldig voor aggregatieniveaus van 10 tot 360 minuten.

In een latere studie toonde Willems (2000) aan dat de exponentiële extreme-waarden-verdeling beschouwd in Vaes et al. (1996) deze is voor één bepaald buitype (zeer intense regenbuien van korte duur; convectieve regenbuien dus). Willems (2000) breidde de IDF-verbanden uit door gebruik te maken van een twee-component exponentiële extreme-waarden-verdeling, die zowel de korte-duur intense convectieve zomeronweders beschrijft als de langdurigere buien van frontale oorsprong. Ook werd in Willems (2000) een correctie doorgevoerd voor de onderschatting in de 10-minuten neerslagstatistieken omwille van de tijdstap van de 10-minuten neerslagreeks. Voor hogere aggregatieniveaus (20, 30, ... minuten) worden de neerslagintensiteiten bepaald op basis van een bewegend gemiddelde (verschuivend met een tijdstap van 10 minuten), terwijl dat voor de 10-minuten intensiteiten niet mogelijk is. Indien 1-minuut intensiteitsmetingen zouden beschikbaar zijn, zouden hogere 10-minuten neerslagextremen worden gevonden dan deze die nu worden bekomen op basis van de 10-minuten meetreeks van Ukkel.

In de ontwerp-code van Vaes et al. (2004) werden de IDF-verbanden van Vaes et al. (1996) echter niet aangepast aan deze inzichten van Willems (2000), enerzijds omwille van de toepassing (voor rioleringsstoepassingen zijn enkel de kleine aggregatieniveaus van belang, dus tot 360 minuten; de IDF-statistieken worden voor deze kleine aggregatieniveaus vooral bepaald door de extreme convectieve regenbuien), anderzijds omdat de noodzaak tot correctie van de 10-minuten neerslagintensiteiten onvoldoende kon worden aangetoond. In een later onderzoek kon de onderschatting van de 10-minuten intensiteiten wel worden aangetoond, door gebruik te maken van de 1-minuut neerslagmetingen van de stad Antwerpen (zie Willems et al., 2002). Bovendien werd in Willems (2000) een schalingwet toegepast (afkomstig van fractaaltheorie) die correctie/extrapolatie toeliet op basis van de schalingseigenschappen van neerslag afgeleid voor de hogere aggregatieniveaus.

De IDF-verbanden van zowel Vaes et al. (1996, 2004) als Willems (2000) zijn gebaseerd op onafhankelijke neerslagextremen die uit de continue 10-minuten tijdreeks werden geëxtraheerd. Twee opeenvolgende neerslagextremen zijn hierbij "onafhankelijk" verondersteld indien de tussentijd groter is dan 12 uur of groter dan het beschouwde aggregatieniveau. Aggregatie is doorgevoerd volgens de methode van het bewegend gemiddelde met een stap van 10 minuten.

Willems (2011) zorgde voor een recente herziening van deze IDF-verbanden en de bijhorende ontwerpneerslag voor rioleringsstoepassingen, door gebruik te maken van een langere reeks van 10-minuten neerslagmetingen te Ukkel voor de periode 1898-2007. Er werd vastgesteld dat de neerslagkwantielen voor terugkeerperioden groter dan 1 jaar, wanneer berekend voor de ganse meetperiode 1898-2007 of voor de periode 1970-2007, beperkt hoger zijn in vergelijking met de metingen voor 1967-1993. Hiervoor werden twee redenen beschreven: (1) statistieken van neerslagextremen vertonen multidecadale oscillaties, waarbij de periode 1967-1993 een oscillatiedal omvat, dus de langjarige neerslagstatistieken onderschat, (2) de invloed van de klimaatopwarming. De IDF-curven werden daarom door Willems (2011) aangepast. Het betreft een aanpassing van de oorspronkelijke IDF-curven op basis van de periode 1967-1993 aan de

volledige waarnemingsreeks voor de periode 1898-2007 en aan de periode 1970-2007 die overeen komt met de meest recente klimaatoscillatiegolf. Deze laatste periode omvat een volledige klimaatoscillatiecyclus (oscillatiedal van de jaren 1970 en oscillatiepiek van de jaren 1990).

Willems (2011) merkte op dat deze recent aangepaste IDF-statistieken mogelijk nu reeds achterhaald zijn. De klimaatverandering zet zich immers continu verder. Toekomstige klimaatevoluties zijn echter nog zeer onzeker. In het rapport van Willems (2009) werden op basis van de huidige inzichten en kennis m.b.t. het klimaatonderzoek klimaatscenario's tot 2100 afgeleid samen met hun onzekerheid. Deze kunnen gebruikt worden in functie van de ontwerperperiode, en kunnen door de grote onzekerheid geïntegreerd worden in een risico-analyse gebaseerde aanpak.

Deze IDF-verbanden (voorbeeld Figuur 9) hebben de volgende vergelijking:

$$T = \frac{n}{m \left( p_a \exp\left(-\frac{i-i_0}{\beta_a}\right) + (1-p_a) \exp\left(-\frac{i-i_0}{\beta_b}\right) \right)} \quad (1)$$

waarbij:

$T$  = de terugkeerperiode [jaar]

$i$  = de neerslagintensiteit [mm/h]

$n$  = het aantal gebruikte jaren = 27 jaar

$m$  = het aantal gebruikte waarden boven de drempel

$i_0$  = de drempelwaarde [mm/h]

$\beta$  = de gemiddelde intensiteit van de exponentiële extreme-waarden-verdeling [mm/h]

De parameter  $p_a$  stelt de relatieve frequentie (proportie) voor aan regenbuien type "a" (waarschijnlijk te associëren met convectieve regenbuien), terwijl  $(1-p_a)$  de proportie voorstelt aan regenbuien type "b" (waarschijnlijk te associëren met buien van frontale oorsprong).

De parameter  $m$  wordt als volgt berekend:

$$m = 1 + 54 \frac{p_1}{p_1 - p_a} \quad (2)$$

$$\log(p_1) = -1.12 - 0.5 \log(D) \quad (3)$$

De parameters  $\beta_a$ ,  $\beta_b$ ,  $p_a$  and  $i_0$  zijn als volgt afhankelijk van het aggregatieniveau  $D$  [dagen]:

$$\log(\beta_a) = -0.05 - 0.58 \log(D) \quad (4)$$

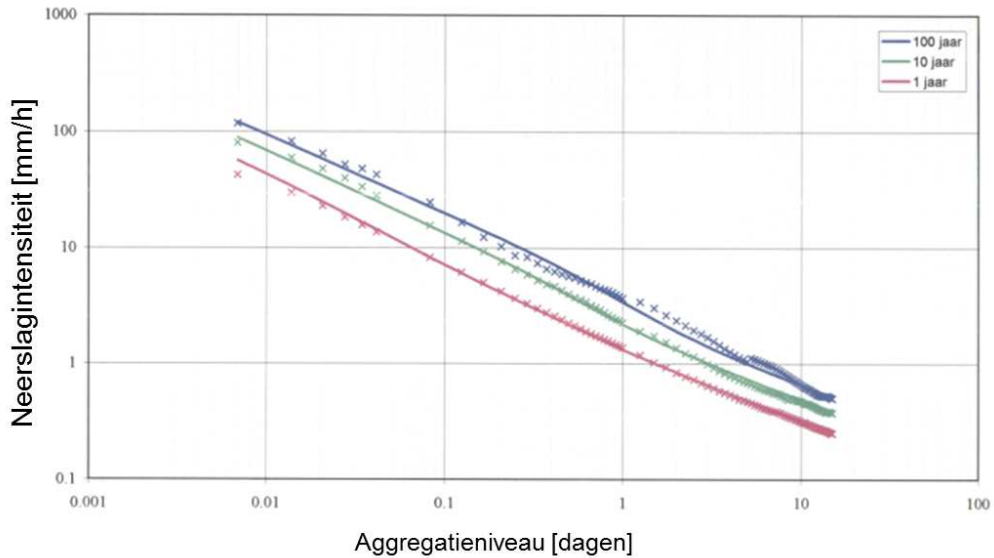
$$\log(\beta_b) = -0.55 - 0.58 \log(D) \quad (5)$$

$$\log(p_a) = -1.35 - 0.58 \log(D) \quad (6)$$

$$\log(i_0) = -0.05 - 0.58 \log(D) \quad (7)$$

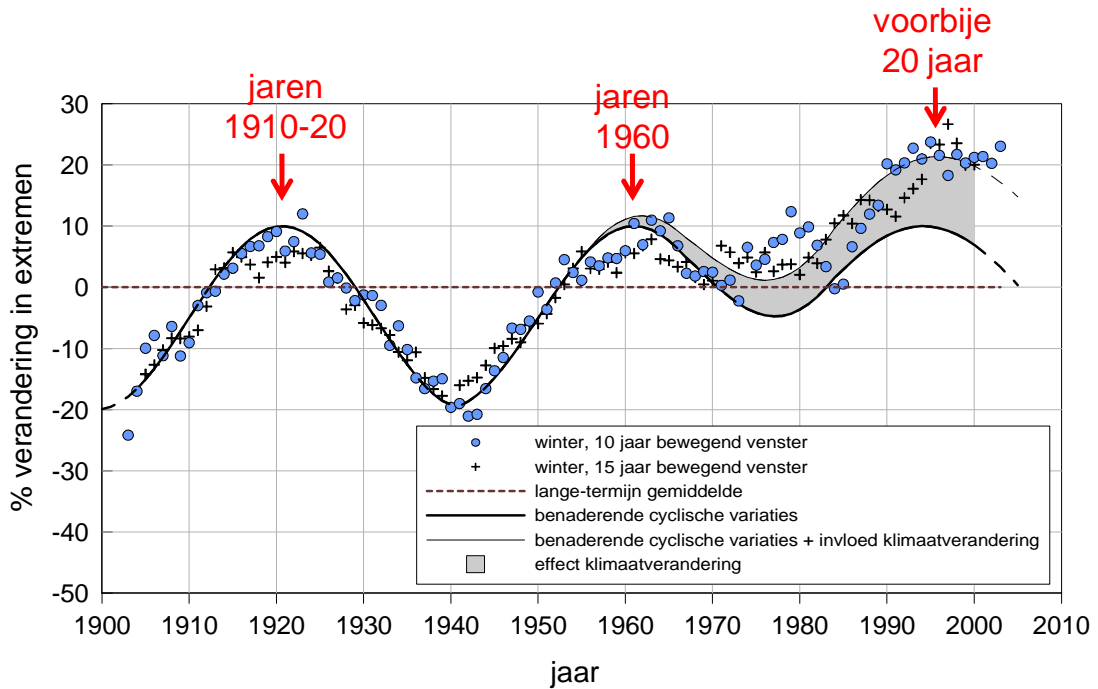
De factor 0.58 (schalingsexponent) is constant in alle vergelijkingen (4) – (7) omwille van de schalingseigenschappen van neerslag (zie hoger; of Willems, 2000, voor meer details hierover).



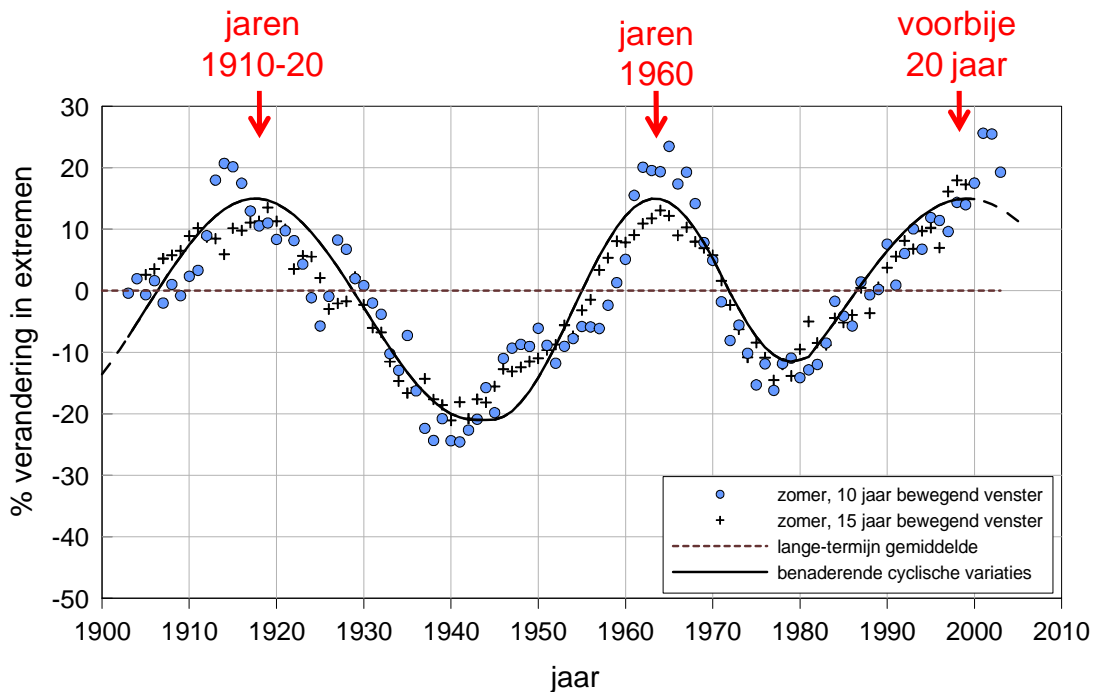


Figuur 9. IDF-verbanden voor Ukkel (Willems, 2000)

Een opmerking is dat neerslagstatistieken door de multidecadale oscillaties sterk in de tijd kunnen variëren. Zoals geïllustreerd in Figuur 10 en Figuur 11 kunnen de IDF-neerslagkwantilen over perioden van enkele jaren 10 tot 20% hoger of lager liggen in vergelijking met de langjarige statistieken (over meerdere decennia). Dit leert dat men voorzichtig moet zijn met het gebruik van statistieken of het interpreteren van de resultaten van statistische analyses die gebaseerd zijn op korte meetreeksen. Zo worden vaak conclusies getrokken over trends in debieten of erosiehoeveelheden op basis van metingen voor een beperkte periode van 10 jaar of minder. Deze trends kunnen het gevolg zijn van gewijzigde landbouwpraktijken of erosiebestrijdingsmaatregelen, maar kunnen evengoed het gevolg zijn van de neerslagvariabiliteit. Vergelijking van de trends in debieten of erosiehoeveelheden met de trends in neerslag is dan aangewezen. Ook kan men statistieken (vb. gemiddelden of percentielen van debieten, erosiehoeveelheden) afgeleid op basis van korte meetreeksen niet als representatief beschouwen voor de lange-termijn waarden. Zoals hiervoor toegelicht werd met de klimaatoscillaties rekening gehouden bij de opmaak van de meest recente Vlaamse IDF-verbanden van Willems (2011), zodat deze wel representatief zijn voor de lange-termijn historische neerslagcondities voor onze regio.



Figuur 10. Variatie in extreme neerslagkwantielen, berekend als gemiddeld verschil in neerslagkwantielen op basis van deelperioden van 10 of 15 jaar (bewegend venster met stappen van 1 jaar) versus dezelfde neerslagkwantielen berekend op basis van de ganse beschikbare meetreeks 1898-2007, voor de wintermaanden december-januari-februari, voor een uitmiddellingsduur van 10 minuten, en voor neerslagkwantielen > 0.8 mm.



Figuur 11. Variatie in extreme neerslagkwantielen, berekend als gemiddeld verschil in neerslagkwantielen op basis van deelperioden van 10 of 15 jaar (bewegend venster met stappen van 1 jaar) versus dezelfde neerslagkwantielen berekend op basis van de ganse beschikbare meetreeks 1898-2007, voor de zomermaanden juni-juli-augustus, voor een uitmiddellingsduur van 10 minuten, en voor neerslagkwantielen > 1 mm.

Bijlage A geeft een tabel met de aanbevolen neerslagontwerpwaarden volgens de meest recente IDF-verbanden van Willems (2011).

### 3.3.5 Aspect terugkeerperiode

Bij het gebruik van enkelvoudige maatgevende neerslaggebeurtenissen of IDF-neerslagstatistieken dient de maatgevende neerslag gekozen voor een bepaalde terugkeerperiode. De gekozen terugkeerperiode is logischerwijs dezelfde als deze die hierna wordt besproken bij het dimensioneren van de opvangcapaciteit.

### 3.3.6 Aspect concentratietijd

De concentratietijd van een deelstroomgebied kan voor een welbepaalde afwaartse locatie op meerdere manieren worden ingeschat.

#### 3.3.6.1 Op basis van de kinematische golfsnelheid

Bij de kinematische golfbenadering worden de volledig hydrodynamische stromingsvergelijkingen benaderd door de traagheids- en drukgradiënttermen te verwaarlozen t.o.v. de weerstand. Deze benadering is derhalve enkel geschikt voor benaderingen in de beschrijving van de stroming wanneer alleen energieverliezen als gevolg van wrijving en de invloed van de bodemhelling (zwaartekracht) in rekening gebracht moeten worden. Dit kan vaak met goede benadering verondersteld worden in opwaartse stroomgebiedjes met natuurlijke, vrije oppervlakteafstroming. De momentumvergelijking die op elke plaats  $x$  in het stroomgebied en op elk tijdstip  $t$  toepasbaar is om stroomsnelheden  $U$  en waterdiepten  $h$  te berekenen is:

$$\frac{\partial U}{\partial t} + U \frac{\partial U}{\partial x} + g \frac{\partial h}{\partial x} - g (S - S_f) = 0$$

met  $S$  de terreinhelling en  $S_f$  de energieverliesterm als gevolg van wrijving (ook weerstandsformule genoemd). Zowel  $S$  als  $S_f$  zijn dimensieloos (of m/m voor de terreinhelling). Bij de kinematische golfbenadering worden de eerste drie termen in de momentumvergelijking nul verondersteld. Hierdoor vereenvoudigt de momentumvergelijking zich tot:  $S = S_f$ . De keuze van de weerstandsformule is hier dus het belangrijkste. Alhoewel er meerdere weerstandsformules bestaan (Chézy, Darcy-Weissbach, Bazin, ...), wordt meestal de formule van Manning gebruikt, omdat deze relatief eenvoudig is en meestal een goede benadering geeft van de meer complexe methoden. Hierna, in deel 3.3.6.2 wordt besproken hoe via veronderstelling over de wrijvingswet (wet van Manning) de concentratietijd kan geschat worden op basis van de lengte, de helling en de ruwheid van het deelstroomgebied en van de neerslagintensiteit.

#### 3.3.6.2 Op basis van de wet van Manning

De wet van Manning is een wrijvingswet maar kan gebruikt worden voor de berekening van de concentratietijd via de berekening van de gemiddelde afstroomsnelheid, op voorwaarde dat permanente eenparige stroming verondersteld kan worden. Dit is een verder vereenvoudigde versie van de kinematische golfbenadering. "Permanent" betekent dat de stroming niet verandert in de tijd. "Eenparig" betekent dat de waterhoogte niet verandert met de plaats, zoals in Figuur 12. Het is dus stroming die typisch optreedt bij vlakke oppervlakken. Vaak kan ze met goede benadering verondersteld worden in opwaartse gedeelten van een stroomgebied of waterloop.



Figuur 12. Eenparige beweging.

De wet van Manning (ook de wet van Manning-Strickler of Gauckler-Manning-Strickler genoemd) is een empirisch afgeleide formule voor de wrijvingswet:

$$S_f = n^2 q^2 \frac{P^{\frac{4}{3}}}{A^{\frac{10}{3}}}$$

met:

$q$ : het afstromingsdebiet, in dit geval het oppervlakte-afstromingsdebiet  $q_{OF}$  [ $m^3/s$ ]

$A$ : de natte oppervlakte loodrecht op de afstromingsrichting [ $m^2$ ]

$P$ : de natte omtrek loodrecht op de afstromingsrichting [ $m$ ]

$n$ : de ruwheidscoëfficiënt van Manning voor het afstromingsoppervlak [ $s/m^{1/3}$ ]

Gebruik makend van de kinematische golfbenadering wordt in de wet van Manning  $S_f$  vervangen door de terrehelling  $S$ . Uitgaande van de veronderstelling dat de diepte ( $h$ ) van het afstromingswater verwaarloosbaar klein is in vergelijking met de breedte van de afstromingsoppervlak, dus door een brede rechthoekige verticale afstromingsoppervlakte (loodrecht op de afstromingsrichting) te veronderstellen, kan  $q=U.A$ ,  $A=h.b$ ,  $P=b$  verondersteld worden. Hieruit volgt dat de gemiddelde afstromingssnelheid  $U$  volgens de wet van Manning bij permanente eenparige stroming te berekenen is als:

$$U = \frac{1}{n} h^{2/3} S^{1/2}$$

met:

$U$ : gemiddelde afstromingssnelheid [ $m/s$ ]

$h$ : afstromingswaterhoogte [ $m$ ]

Het oppervlakteafstromingsdebiet per eenheid breedte loodrecht op de afstromingsrichting  $q_{OF}$  kan verder berekend worden als  $q_{OF} = i L$ :

$$q_{OF} = i L = U h = \frac{1}{n} h^{5/3} S^{1/2}$$

met:

$i$ : de netto of effectieve neerslag [ $mm/h$ ]. Deze mag gelijk gesteld worden aan de intensiteit van de ontwerpneerslag (zie IDF-verbanden in bijlage A). Deze zal echter ook afhankelijk zijn van de concentratietijd, waardoor de berekening van de concentratietijd iteratief zal moeten verlopen. Men veronderstelt eerst een bepaalde concentratietijd en neemt de hierbij horende neerslagintensiteit om een nieuwe concentratietijd te berekenen. Indien beide waarden voldoende dicht bij elkaar liggen is de berekening voltooid.

$L$ : afstromingsafstand [ $m$ ]

De concentratietijd  $T$  kan hieruit afgeleid worden via  $T = L / U$ :

$$T = 7 \frac{L^{0.6} n^{0.6}}{i^{0.4} S^{0.3}}$$

met:

$T$ : concentratietijd [ $min$ ]

De ruwheidscoëfficiënt van Manning wordt empirisch bepaald (zie Tabel 1). De tabel maakt voor landoppervlakten een onderscheid tussen "theoretische" en "effectieve" waarden. De theoretische waarden gelden voor een oppervlak dat bestaat uit één welbepaald egaal type landoppervlak. In werkelijkheid komt zulk egaal oppervlak zelden voor. In dat geval wordt gerekend met een "effectieve" coëfficiënt die rekening houdt met andere invloeden die de oppervlakteafstroming ondervindt aan de oppervlakte naast de bodemruwheid. Voorbeelden van andere invloeden zijn hindernissen aan de oppervlakte, de impact van de regendruppels, erosie en transport van sedimenten, de invloed van de sleepkracht aan de oppervlakte, enz. Voor kleine waterdiepten over natuurlijke oppervlakken krijgt de Manning-coëfficiënt daardoor al snel waarden groter dan 0.1. De effectieve waarden zijn afgeleid van de resultaten bekomen door Engman (1986) door de kinematische golfbenadering toe te passen samen met de analyse van berging aan de oppervlakte op basis van gemeten neerslagafstromingsdebieten op veldniveau, en door Crawford and Linsley (1966) na kalibratie van het Stanford Watershed Model.

Tabel 1. Manning-ruwheidscoëfficiënt voor verschillende soorten oppervlakken.

Type ruwheid	Manning-coëfficiënt [s/m <sup>1/3</sup> ]	
	Theoretisch	Effectief
<b>Landoppervlak</b>		
Gladde oppervlakken (beton, asfalt, grind of kale grond)	0.01	0.01 – 0.014
Braakland	0.02 - 0.03	0.05 – 0.3
Weiland	0.03	0.06 - 0.2
Akker	0.03 - 0.05	0.1 – 0.4
Struikgewas	0.05 - 0.1	0.2 – 0.6
Bos	0.1 - 0.15	0.4 - 0.8
<b>Waterlopen</b>		
Recht	0.03	
Meanderend	0.04	
Begroeid	0.05	
Overwoekerd	0.1	

### 3.3.6.3 Op basis van empirische formules

Een groot aantal empirische formules werden afgeleid voor de berekening van de concentratietijd, op basis van specifieke waarnemingen of experimenten. Hierdoor zijn ze meestal slechts geldig voor specifieke streken of andere specifieke randvoorwaarden van de waarnemingen. Enkele voorbeelden van empirische formules worden hierna gegeven. Waar gekend zijn ook de voorwaarden aangegeven waaronder de formules geldig zijn.

#### formule van Kirpich (1940)

$$T = 0.00195 \frac{L^{0.77}}{S^{0.385}}$$

De helling van het terrein  $S$  wordt hierbij typisch berekend als het verval vanaf 10% van de afgelegde weg tot 85% van de afgelegde weg in m/m.

#### formule van Kerby (1959)

$$T = 4.3 \sqrt{\frac{n \cdot L}{g}} \cdot S^{-1/4}$$

met:

$g$ : 9.81 m/s<sup>2</sup>

$n$ : vertragingscoëfficiënt met voor:

ondoortalende oppervlakken:  $n = 0.02$

naakte grond, effen:  $n = 0.10$

ruw:  $n = 0.20$

grasland:  $n = 0.40$

loofbossen:  $n = 0.40$

naaldbossen:  $n = 0.80$

afgeleid voor stroomgebieden met:

- een afstromingsafstand kleiner dan 400m

SCS-methode (1961)

$$T = \frac{L^{0.8} \cdot (S + 1)^{0.7}}{0.441 \cdot Y^{0.5}}$$

met:

T: concentratietijd in uur

S: maximale potentiële berging, berekend als  $S = \frac{25400}{cn'} - 254$

Y: gemiddelde helling (%)

cn': retardatiefactor, die nagenoeg gelijk is aan de CN (Curve Number, zie deel 3.4.3.1)

Deze methode overspant een groot aantal mogelijke bodemgebruiken.

formule van Giff & Symons (1968)

$$T = 0.29 \cdot \sqrt{\frac{L}{\varphi}} \cdot S^{-1/4}$$

met:

$\varphi$ : de runoff-coëfficiënt

formule van Izzard (1946)

$$T = 526.76 k \frac{L^{1/3}}{(\varphi i)^{2/3}}$$

waarin:

$$k = \frac{2.76 \cdot 10^{-5} \cdot \varphi \cdot i + c}{S^{1/3}}$$

met:

c: de ruwheidscoëfficiënt met voor:

effen asfaltbedekking:  $c = 0.007$

beton:  $c = 0.012$

dichte bezoding:  $c = 0.046$  à  $0.06$

afgeleid voor stroomgebieden met:  $\varphi i L < 3880$

formule van Temez (1978)

$$T = 0.105 \frac{L^{0.76}}{S^{0.190}}$$

afgeleid voor stroomgebieden in Spanje.

Indien deze methoden worden toegepast op opwaartse Vlaamse deelstroomgebieden, komt men voor kleine stroomgebiedjes van grootteorde 5 ha aan een concentratietijd met een grootteorde van 10 min, terwijl grotere gebiedjes met een oppervlakte van grootteorde 80 ha een grotere concentratietijd hebben van grootteorde 30 min (zie deel 8).

#### 3.3.6.4 *Op basis van debietmeetgegevens*

Deel 3.4.2 licht toe hoe op basis van korte of lange debietmeetreeksen de concentratietijd rechtstreeks geval-specifiek bepaald kan worden, op basis van de helling van de dalende flank van individuele hydrogrammen.

### 3.4 **Berekening van het opwaartse neerslagafstromingsdebiet**

De berekening van het neerslagafstromingsdebiet horende bij de maatgevende neerslag gebeurt typisch via een neerslagafvoermodel. Deze kan verschillende vormen aannemen gaande van eenvoudige rekenregels tot meer complexe hydrologische modellen.

Hydrologische modellen worden typisch opgedeeld in vereenvoudigde empirische modellen, vereenvoudigde conceptuele modellen en meer gedetailleerde fysisch gebaseerde modellen. Het kunnen discrete of continue simulatiemodellen zijn, die toelaten om ofwel enkelvoudige buien door te rekenen of continue lange-termijn tijdreeksen. Verder kunnen ze de neerslagafvoer ruimtelijk gemiddeld berekenen of ruimtelijk variabel.

Meer complexe of gedetailleerde hydrologische modellen hebben het potentieel om het hydrologisch responsgedrag van een stroomgebied nauwkeuriger te beschrijven, maar in de praktijk verdwijnt dit voordeel vaak omwille van het beperkt aantal beschikbare invoer- en kalibratiegegevens. Meer gedetailleerde modellen vragen meer invoer en/of hebben meer kalibratieparameters. Voor een bepaalde gevalstudie met een welbepaalde beschikbaarheid aan meetgegevens bestaat er een "optimale" modelgedetailleerdheid. Modellen met een hogere of lagere gedetailleerdheid zouden een lagere nauwkeurigheid in modelresultaten opleveren. Het bepalen van de optimale gedetailleerdheid is echter niet eenvoudig. Ze wordt daarom haast steeds via praktijkervaring ingeschat. Het bepaalt de hydrologische modelkeuze.

Naast de modelgedetailleerdheid is er de fysische basis van het model. Meer fysisch gebaseerde modellen laten toe om de modelparameters te relateren aan gekende gebiedseigenschappen, zoals topografie, landgebruik en bodemtype. Meer empirische of conceptuele modellen dienen gekalibreerd te worden aan tijdreeksen van afvoerdebieten. Conceptuele modellen bevatten zowel empirische elementen als fysisch-gebaseerde elementen. De parameters van zulke modellen hebben daardoor een fysische betekenis, maar zijn vaak niet rechtstreeks meetbaar. Verbanden met gebiedseigenschappen kunnen afgeleid worden maar enkel na kalibratie van het model voor een groot aantal (deel-)stroomgebieden die een bruikbaar bereik aan gebiedseigenschappen bestrijken.

Discrete modellen kunnen enkel gebruikt worden in combinatie met enkelvoudige neerslaggebeurtenissen. Ze vereisen naast de keuze van de neerslaggebeurtenis ook de keuze van de initiële condities, vb. het verzadigingsgehalte van de ondergrond bij de aanvang van de gebeurtenis. Continue simulatiemodellen kunnen daarentegen gebruikt worden voor de simulatie van lange-termijn-neerslagtijdreeksen. Ze vergen eveneens een inschatting van de initiële condities bij de aanvang van de simulatie, maar de invloed van deze initiële condities laat zich slechts over een beperkte tijdsperiode voelen. Daarom gaan tijdreeksimulaties in hydrologische modellen vaak gepaard met een opwarmperiode. Dit is een periode van enkele maanden waarvoor de modelresultaten niet nauwkeurig zijn en dus verwijderd worden.

Hierna worden voor elk van deze klassen van hydrologische of neerslagafvoermodellen enkele voorbeelden van bestaande modellen gegeven. Het overzicht vertrekt van de gedetailleerd fysisch-gebaseerde modellen die – wat modelbeschrijving betreft – het dichtst aansluiten bij de fysische realiteit. Daarna worden de verschillende soorten conceptuele vereenvoudigingen besproken.

### 3.4.1 Gedetailleerd fysisch-gebaseerde modellen

Gedetailleerd fysisch-gebaseerde hydrologische modellen beschrijven de hydrologische processen in een stroomgebied op een gedetailleerde manier, zowel temporeel als ruimtelijk (in planzicht) en in de diepte (voorbeeld Figuur 13).

In het algemeen verloopt de afstroming van regenwater naar waterlopen op drie duidelijk gescheiden manieren: langs de oppervlakte, via de onverzadigde, ondiepe ondergrond en via het grondwater. Regenwater dat op het oppervlak neervalt zal door de poreuze structuur van de ondergrond infiltreren. Het aandeel van het regenwater dat in de bodem infiltreert, is afhankelijk van de saturatie van de bodem en van de neerslagintensiteit. Indien (in het eerste geval) de bergingscapaciteit van de ondergrond het verzadigingsgehalte bereikt, vermindert de infiltratie sterk en kan het neerslagoverschot niet langer infiltreren. Wanneer de neerslagintensiteit hoger is dan de infiltratiecapaciteit van de bodem (in het tweede geval), kan enkel de neerslaghoeveelheid gelijk aan de infiltratiecapaciteit infiltreren, terwijl het neerslagoverschot op het oppervlak blijft staan. In beide gevallen zal plasvorming optreden en, nadat de oppervlakkige opslag wordt overschreden, kan het regenwater afstromen langs het oppervlak. Dit proces wordt hier oppervlakte-afstroming ("overland flow", "surface runoff") genoemd. Het eerste fenomeen waarbij het verzadigingsgehalte van de ondergrond wordt bereikt krijgt de benaming "verzadigingsoverschot" ("saturation excess") en de oppervlakte-afstroming die er het gevolg van is wordt ook "Dunniaanse oppervlakte-afstroming" genoemd. Het komt voornamelijk voor in de nabijheid van waterlopen waar meestal een relatief hoge grondwatertafel wordt waargenomen, maar kan ook ontstaan indien een boeilaag met lage hydraulische conductiviteit nabij het oppervlakte (vb. een kleilens) voorkomt. Het tweede fenomeen waarbij de neerslagintensiteit bij hevige regenval de infiltratiecapaciteit van de onverzadigde zone overschrijdt wordt hier aangeduid door de term "infiltratie-overschot" ("infiltration excess") en de overeenkomstige oppervlakte-afstroming door "Hortoniaanse oppervlakte-afstroming". Zoals reeds eerder aangehaald, zijn de erosiegevoelige akkerbouwpercelen beschouwd in deze studie erg gevoelig aan verslemping en korstvorming gedurende het groeiseizoen. Zolang er niet bewerkt wordt (meestal vanaf de inzaai van het gewas) neemt de korstvorming toe en daalt de infiltratiecapaciteit, tot er weer geploegd wordt na de oogst en de ruwheid van het oppervlak wordt hersteld. In sommige teeltrotaties kan dit pas na de winter zijn. Daardoor kan oppervlakkige afstroming vooral optreden als gevolg van infiltratie-overschot, en kan Hortoniaanse eerder dan Dunniaanse oppervlakte-afstroming het dominante proces zijn in de stroomgebiedjes beschouwd in deze studie.

Het regenwater dat niet langs de oppervlakte afstroomt maar in de grond infiltreert kan het afvoersysteem bereiken via de onverzadigde en ondiepe zone of via de verzadigde en diepere zone (het grondwater) van de ondergrond. Afstroming via de onverzadigde zone wordt ook hypodermische afstroming genoemd. Ze krijgt samen met de drainagedebieten ook wel de naam tussenstroom ("interflow") aangezien ze zich tussen de oppervlakte- en de grondwaterafstroming bevindt. Grondwaterafstroming is tenslotte de neerslagafstroming via de verzadigde zone van de ondergrond of het grondwater. Voor deze laatste deelstroom wordt ook wel de benaming "basisafvoer" ("baseflow") gebruikt. Deze laatste omvat evenwel ook andere permanente debietbijdragen in de waterloop zoals industriële en huishoudelijke lozingen.

De relatieve verhoudingen van de drie soorten afstromingen (de drie deelstromen) hangt voornamelijk af van de eigenschappen van de ondergrond, de topografie en de waterhoogte in de waterloop. Ze kunnen ook sterk in de tijd variëren. Zo zal bij het begin van een bui, na een droogweelperiode, het vochtgehalte in de onverzadigde zone toenemen. Deze toename heeft een stijging van de hydraulische geleidbaarheid van de bodem tot gevolg. Bij een verdere stijging van de neerslagintensiteit of korte opeenvolging van regenbuien gaat de vochtgehaltetoeename verder tot een evenwichtsvochtgehalte (verzadiging) wordt bereikt.

Bij een verdere toename van de neerslag en infiltratiehoeveelheden zal ook de grondwatertafel stijgen. In alluviale vlaktes met hoge grondwatertafels, dus typisch afwaarts in stroomgebieden, kan na een bepaalde tijd de grondwatertafel het maaiveld bereiken. Dit fenomeen en het optreden van verzadigde zones bovenop de grondwatertafel treedt dus sneller op meer afwaarts in het stroomgebied; vaak in de onmiddellijke nabijheid van een waterloop waar een ondiepere onverzadigde zone voorkomt. Verzadigde zones kunnen echter ook meer opwaarts optreden, bijvoorbeeld in het geval van akkers met een ploegzool: verzadigde zones kunnen



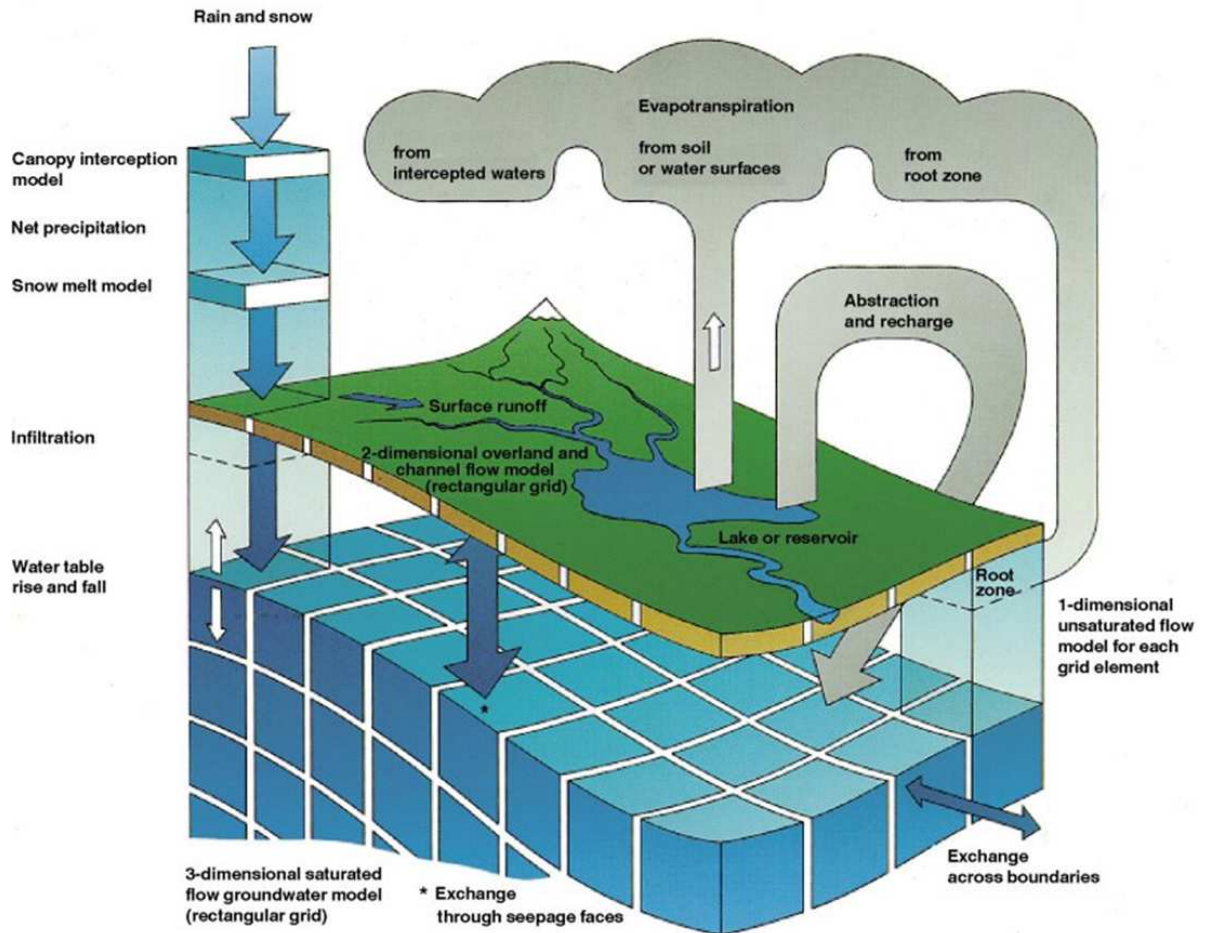
ontstaan bovenop de ploegzool, zelfs wanneer de bodem onder de ploegzool niet verzadigd is (Verbist et al., 2007).

Tijdens het verloop van een bui kan de totale oppervlakte van de verzadigde zones in een stroomgebied toenemen of afnemen ('variable contributing area concept'). Voor meer opwaartse gebiedjes in hellend gebied, zoals de erosiegevoelige gebieden die in deze studie worden beschouwd, zal het optreden van verzadigde zones echter minder voorkomen (zie hoger).

In gedetailleerd fysische gebaseerde hydrologische modellen worden de hiervoor geschetste fysische processen expliciet gemodelleerd. Vermits het niet haalbaar is om deze fysische processen in elk punt van het stroomgebied te beschrijven, wordt de modellering beperkt tot een bepaald aantal punten. Meestal worden hiervoor punten op een raster genomen (Figuur 13). De vergelijkingen die de fysische processen beschrijven worden dan gediscrètiseerd (bijvoorbeeld volgens de eindige differentiemethode) zodat de vergelijkingen slechts de processen beschrijven in en tussen de deelgebieden of "blokjes" die door het raster worden vastgelegd. De horizontale afmetingen van de blokjes kunnen uiteraard worden gekozen door de modelleerder (bijvoorbeeld 100m×100m) en worden bepaald door de vereiste graad van ruimtelijke detaillering. In de verticale richting neemt men meestal één blokje per geologische en/of watervoerende laag. Als basislagen worden de oppervlakte, de onverzadigde en de verzadigde zones (grondwater) gedefinieerd. Eventueel kunnen deze basislagen verder opgedeeld worden in deellagen. Dit bepaalt weerom de graad van detaillering.

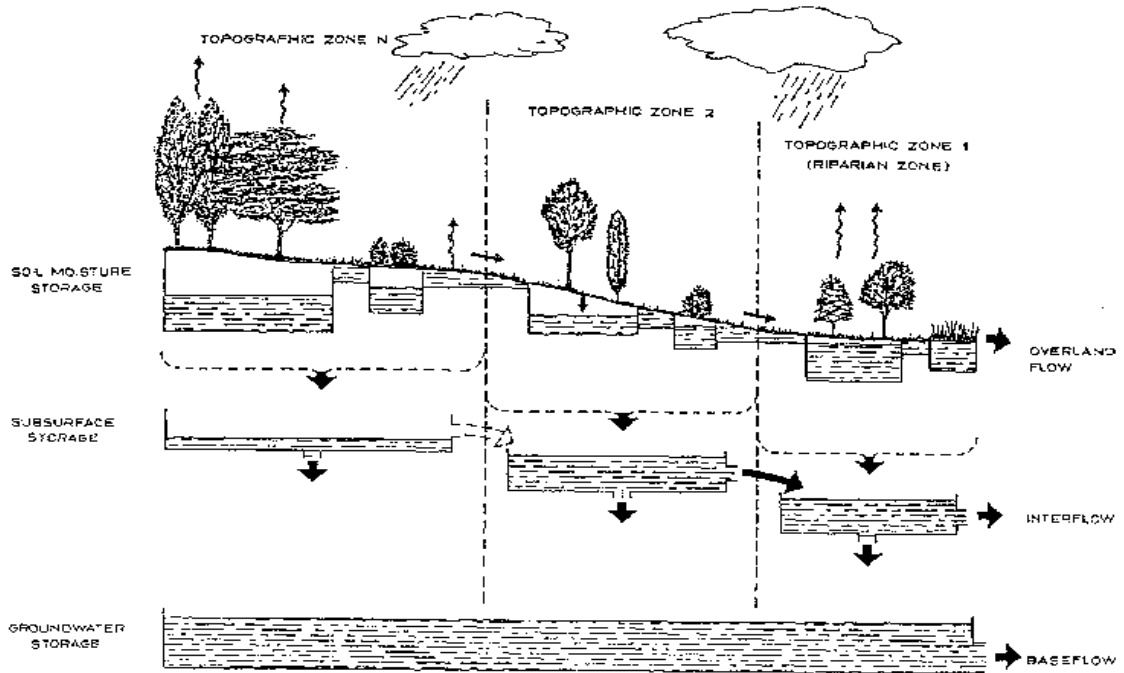
Voor elk blokje in het model dient men naast de geometrische eigenschappen (raster, dikte) ook allerlei grondeigenschappen te specificeren, zoals de porositeit en de geleidbaarheid (voor de ondergrond) en het landgebruik (voor de oppervlakte).

De basisvergelijkingen van dit model bestaan zoals deze van alle fysisch-gebaseerde hydrologische en hydraulische modellen uit twee basisvergelijkingen: de bewegingsvergelijking beschrijft het behoud van hoeveelheid beweging (behoud van momentum), de continuïteitsvergelijking beschrijft het behoud van massa of hoeveelheid water. Hier beschrijven de bewegingsvergelijkingen het transport van water doorheen de scheidingsvlakken tussen de blokjes. De continuïteitsvergelijkingen beschrijven de berging van water in de blokjes. De transport- en bergingsprocessen zullen uiteraard sterk verschillen voor de drie basislagen.



Figuur 13. Een gedetailleerd ruimtelijk verdeeld hydrologisch model: MIKE-SHE (Refsgaard & Storm, 1995a, 1995b).

Gedetailleerde fysisch-gebaseerde modellen hebben het voordeel dat ze ruimtelijk verspreide informatie aanleveren over verschillende hydrologische toestandsvariabelen zoals de oppervlakteafstroming, oppervlakteberging, bodemvochtgehalte, grondwaterstand of piëzometrische hoogte in de verschillende watervoerende lagen, enz. Ze hebben echter ook belangrijke nadelen. De hoge graad van ruimtelijke detaillering vraagt een groot aantal gegevens van grondeigenschappen, welke meestal niet allen nauwkeurig gekend zijn. In dat geval worden de modelparameters gekalibreerd aan alle beschikbare meetreeksen van rivierdebieten en grondwaterstanden. Bij een zeer gedetailleerd model zijn het aantal beschikbare meetreeksen te beperkt om alle modelparameters te kunnen identificeren. In dat geval kunnen meerdere sets van modelparameters bepaald worden, die allen een even goede vergelijking opleveren tussen de modelresultaten en de beschikbare meetreeksen. Natuurlijk strookt slechts één van deze parametersets met de realiteit (tenminste als de modelstructuur correct de fysische processen in het stroomgebied weerspiegelt). Men verwijst vaak naar dit probleem als het fenomeen van de “equifinaliteit” of “overparameterisatie”.



Figuur 14. Een semi-gedistribueerd hydrologisch model.

De hiervoor vermelde modellen zijn ontwikkeld voor stroomgebiedstoepassingen. Bepaalde processen die vooral invloed hebben op de neerslagafstroming in opwaartse deelgebiedjes in hellend gebied, dus de gebiedjes die typisch erosiegevoelig zijn, zoals korstvorming/verslumping, worden meestal niet ingerekend.

Een ruimtelijk verdeeld model dat specifiek voor erosietoepassingen werd ontwikkeld is het STREAM-model (Evrard et al., 2009). Het model laat expliciet toe om met de verslumpingstoestand van de bodem rekening te houden. Het STREAM-model wordt "expert-gebaseerd" genoemd omdat tabellen zijn ontwikkeld die toelaten om de modelparameters vast te leggen in functie van landgebruik- en bodemeigenschappen. Deze tabellen werden afgeleid op basis van een groot aantal (meer dan 5000) metingen in kleine stroomgebieden tussen 10 en 1000 ha, maar enkel in Normandië (Noord-Frankrijk). Interessant is dat het model rekening houdt met korstvorming aan de oppervlakte, wat bij de klassieke ruimtelijk verdeelde hydrologische modellen niet het geval is. De toepassing van het STREAM-model in enkele Vlaamse stroomgebieden (Ganspoel en Velm) leverde een goede nauwkeurigheid op, maar enkel na aanpassing van de modelparameters die het infiltratiedebiet bepalen aan lokale terreinmetingen. Vooral de neerslagafstroming van convectieve buien in de zomer werd nauwkeurig gemodelleerd; de afstromingsresultaten voor buien van frontale oorsprong in de winter bleken minder goed. Toepassing in een andere regio (Zuid-Frankrijk) leverde geen goede resultaten op, wat duidelijk maakt dat de expert-gebaseerde modeltabellen niet universeel maar slechts regio-specifiek geldig zijn. Het model laat toe om naast de afstromingsdebieten en -volumes ook de sedimentconcentraties in te schatten.

Een ander ruimtelijk verdeeld hydrologisch model dat voor zowel kleine als grote stroomgebieden werd ontwikkeld en naast runoff ook sedimentconcentraties kan berekenen, en reeds in Vlaanderen werd getest (voor het Ganspoel stroomgebied; Zema et al., 2012), is het AnnAGNPS (Annualized Agricultural Non-Point Source) model. Vreemd genoeg laat dit model enkel simulaties met een dagtimestep toe, wat inconsistent is met toepassingen op kleine stroomgebieden. Wel laat het toe om daggemiddelde waterbalansen en sedimentvrachten, nutriënten, pesticiden, enz te simuleren. Het model is minder nuttig voor de toepassing van deze studie. Interessant is wel dat het model gebruik maakt van de SCS-methode (zie deel 3.4.3) voor de berekening van de oppervlakteafstroming, maar dan via een continue simulatieaanpak. De fractie neerslag die bijdraagt tot de oppervlakteafstroming, d.i. de zogenaamde (oppervlakte)runoff-coëfficiënt, wordt hierbij voor elke dagtimestep aangepast aan het bodemvochtgehalte.

### 3.4.2 Conceptuele simulatiemodellen

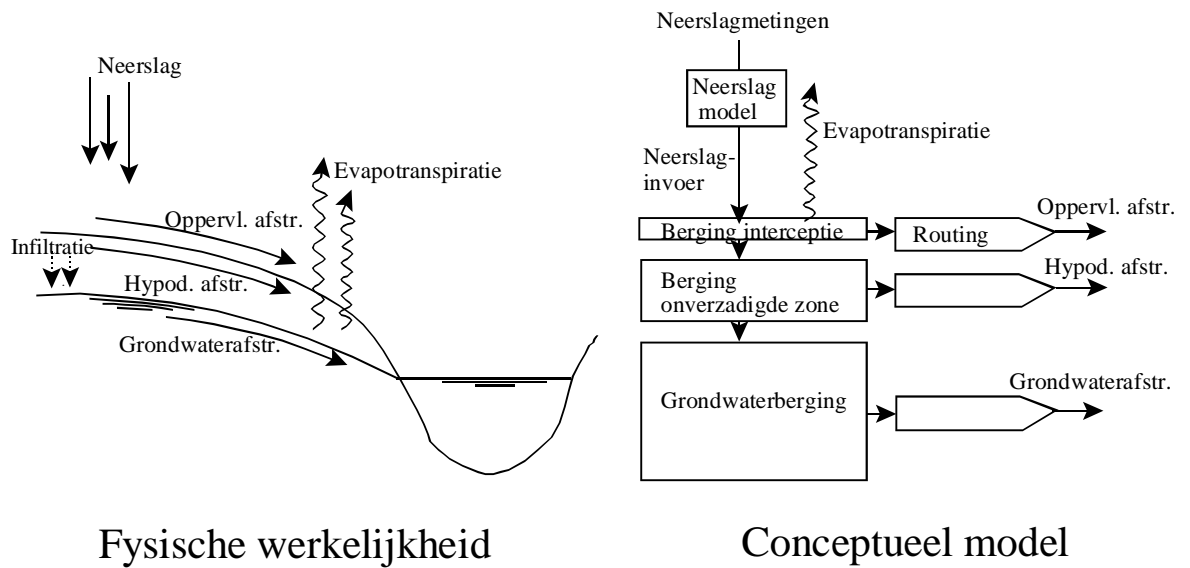
Conceptuele simulatiemodellen beschrijven het neerslagafvoerproces op een meer geschematiseerde of ruimtelijk uitgemiddelde manier. Ze trachten de essentie van het neerslagafvoerproces in een stroomgebied te beschrijven. Deze hydrologische cyclus heeft, naast een temporeel verloop, ook een sterk spatiaal verloop. De betrokken processen (atmosferische en hydrologische) aan en onder de oppervlakte kunnen ruimtelijk sterk variabel zijn. Bij conceptuele modellen zal men deze spatiale variabiliteit meestal buiten beschouwing laten. Men zal in de beschrijvende vergelijkingen van de gemodelleerde processen gebiedsgemiddelde parameterwaarden gebruiken. Men spreekt in dit geval over 'gebiedsgemiddelde' conceptuele modellen ('lumped conceptual models').

De meeste bestaande conceptuele modellen voor neerslagafstroming hebben een gelijkaardige globale modelstructuur. Als basis voor deze structuur wordt het bestaan van enkele bergingsreservoirs aangenomen. De reservoirs zijn onderling verbonden en geven op een conceptuele manier de berging van water weer aan de oppervlakte (vb. in plassen of aan oppervlaktevegetatie), de onverzadigde zones, en de verzadigde zones of het grondwater. De stroming van water tussen en door de reservoirs (ook routing genoemd) geeft een voorstelling van de neerslagafstroming.

Ondanks de vele gelijkaardige structurele aspecten verschillen de bestaande conceptuele modellen wel sterk in hun complexiteit. Het aantal hydrologische deelprocessen dat men tracht te schematiseren kan immers sterk verschillen. Zo kunnen drie tot tientallen bergingsreservoirs worden gemodelleerd.

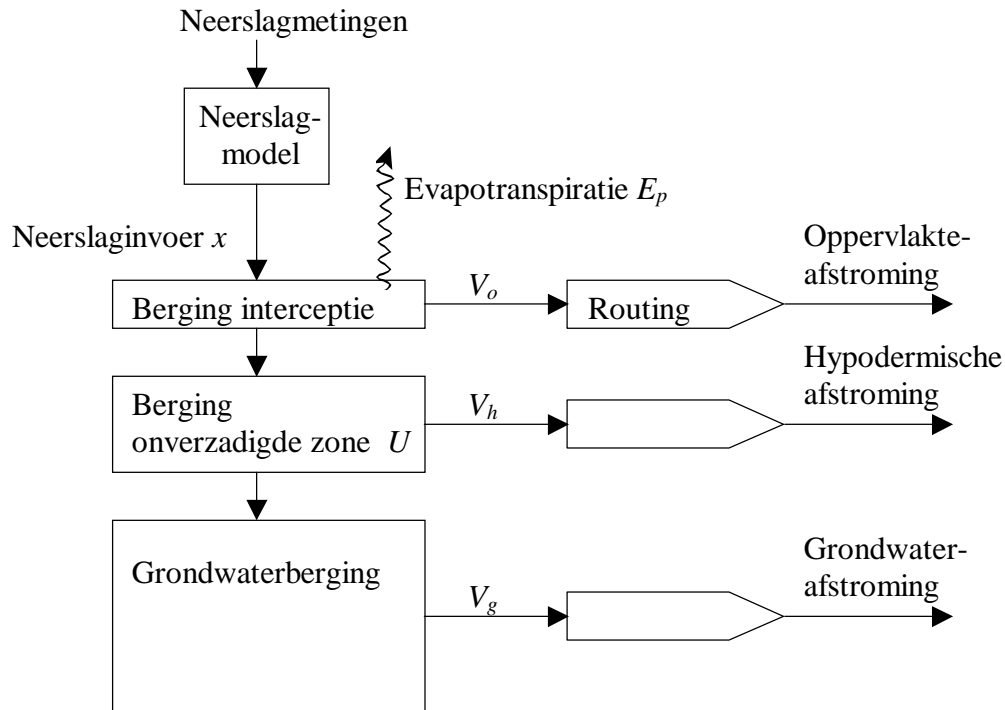
Ook verschillen de modellen sterk in de mathematische verbanden voor de verschillende hydrologische deelprocessen. Zo kan de routing beschreven worden door lineaire reservoirmodellen (exponentieel eenheidshydrogram), niet lineaire reservoirmodellen, cascades van lineaire reservoirmodellen of meer algemene eenheidshydrogrammen. De infiltratiedebieten kunnen afhankelijk verondersteld worden van de volumes in bepaalde bergingsreservoirs via lineaire of meer complexe verbanden.

Op basis van Figuur 15 worden enkele vaak voorkomende basisconcepten van bestaande conceptuele hydrologische modellen toegelicht. Per gebied waarvoor een gebiedsgemiddeld hydrologisch model opgebouwd wordt, wordt één tijdreeks van neerslag- en evapotranspiratieinvoer berekend op basis van de beschikbare neerslaggegevens. Deze tijdreeks zou identiek moeten zijn aan deze die de meest nauwkeurige modellering toelaat. Zulke tijdreeks kan enkel op een empirische wijze bepaald worden nadat het model gecalibreerd is, door een aantal tijdreeksen te simuleren in het model en de invloed op de modelresultaten te analyseren. Meestal wordt eenvoudig de gebiedsgemiddelde neerslag over het gebied of de puntneerslag geregistreerd door een pluviograaf in of in de omgeving van het gebied aangenomen als neerslaginvoer. Dit bepaalt het neerslagmodel in Figuur 15.



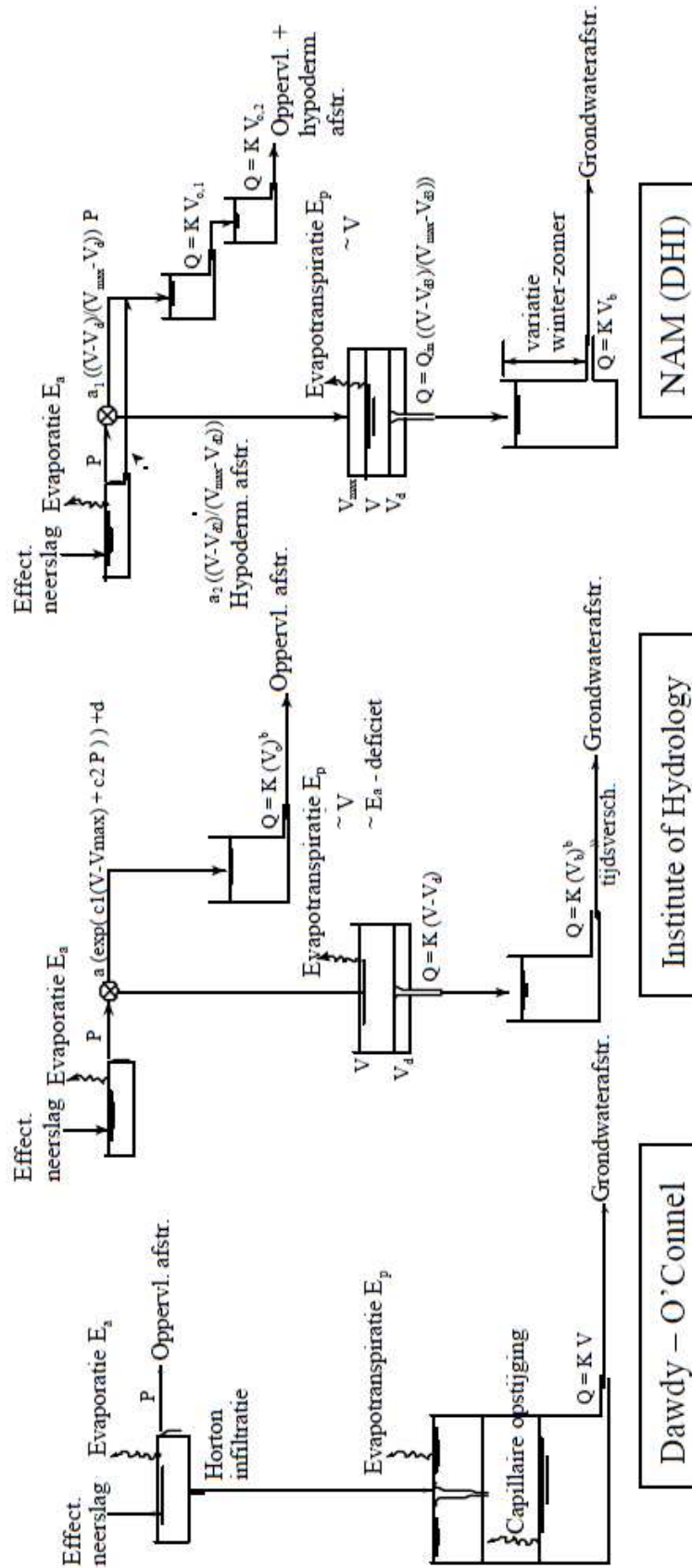
Figuur 15. Algemene structuur van een typisch conceptueel neerslagafvoermodel.

De neerslaginvoer wordt gescheiden in de neerslagbijdragen tot de verschillende (meestal twee of drie) deelstromen (Figuur 16). Per neerslaggebeurtenis wordt het cumulatief neerslagvolume  $X$  also gescheiden in verschillende deelvolumes:  $V_o$  voor de oppervlakte-afstroming,  $V_h$  voor de hypodermische afstroming,  $V_g$  voor de grondwaterafstroming, ... De neerslagfracties die bijdragen tot deze deelstromen zijn dan  $f_o = V_o/X$ ,  $f_h = V_h/X$ ,  $f_g = V_g/X$ , ... Deze neerslagfracties zijn dus de runoff-coëfficiënten horende bij de deelstromen. Een deel van het neerslagvolume ( $V_u$ ) zal tijdelijk geborgen worden in de ondergrond en eventueel later verdwijnen via evapotranspiratie. Deze 'werkelijke evapotranspiratie' is een fractie van de potentiële evapotranspiratie  $ETo$  en neemt toe met toenemende verzadigingsgraad van de ondergrond. De berging van water kan gebeuren in één of meerdere bergingsreservoirs ( $U$ ) die de berging in verschillende zones van de ondergrond voorstellen. De parameter  $U_{max}$  is de bergingscapaciteit. De relatieve berging  $U/U_{max}$  is dan een maat voor de verzadigingsgraad van de ondergrond. De scheiding in de deelstromen wordt bepaald door wiskundige verbanden voor bepaalde meta-processen, vb. de infiltratie, de percolatie, enz.



Figuur 16. Schematisch overzicht van de toestandsvariabelen in een typisch conceptueel hydrologisch model.

In Figuur 17 wordt een vergelijking gemaakt van drie bestaande conceptuele modellen: het Dawdy - O'Donnell model (Dawdy & O'Donnell, 1965), NAM (Nielsen & Hansen, 1973) en het Brits Institute of Hydrology Lumped (IHL) model (Clarke, 1994). De voorstellingswijze in deze figuur stemt niet voor alle modellen overeen met deze die door de auteurs van de modellen wordt verkozen. Ze werd gewijzigd om een betere vergelijking mogelijk te maken. Het Dawdy - O'Donnell model is het eerste conceptueel model waarbij de volgende drie essentiële bergingsreservoirs als basiscomponenten worden beschouwd : berging van hemelwater aan de oppervlakte, berging van interstitieel poriënwater in de onverzadigde zone van de ondergrond en grondwaterberging. De meeste later ontwikkelde conceptuele modellen zijn erg gelijkaardig hieraan.



Figuur 17. Vergelijking van drie gebiedsgemiddelde conceptuele hydrologische modellen.

Andere voorbeelden zijn het BHV-model (Bergström, 1995; Lindström et al., 1997), IHACRES (Jakeman et al., 1990; Croke & Jakeman, 2004), LASCAM (Sivapalan et al., 1996), SOBEK-RR (Deltares), het SACRAMENTO-model (U.S. National Weather Service; Burnash, 1995), het Soil Moisture and Accounting modelleringsysteem (SMAR; University College Galway, Ierland; O'Connor et al., 2001), het Probability Distributed Model (PDM; Brits Institute of Hydrology; Moore, 1985; Moore & Clarke, 1981) en vele andere. Ze hebben elk hun eigen modelstructuur. Zo beschouwt het SACRAMENTO-model bijkomend capillaire waterbergingsvolumes, het SMAR-model meerdere lagen/bergingsvolumes voor de onverzadigde zone, het PDM-model een verdelingsfunctie voor de bergingscapaciteit, enz.

Een overzicht en meer details bij conceptuele hydrologische modelleringstoepassingen en vergelijking met ruimtelijk verdeelde modelleringstoepassingen in Vlaanderen kan gevonden worden in Vansteenkiste et al. (2009, 2011, 2012a, 2012b). De vergelijking van een groot aantal hydrologische modellen en typen van modellen voor een opwaarts stroomgebied in Duitsland kan gevonden worden in Breuer et al. (2009), Huisman et al. (2009) en Viney et al. (2009). Deze referenties geven aan dat gebiedsgemiddelde conceptuele modellen geen lagere nauwkeurigheid hebben in vergelijking met de meer complexe ruimtelijk verdeelde modellen, dit omwille van de overparameterisatie van de complexe modellen.

De Vlaamse waterloopbeheerders maken ook gebruik van conceptuele continue-simulatie neerslagafvoermodellen van stroomgebieden, meer bepaald:

- het PDM-model (Moore, 1985; Moore & Clarke, 1981), geïntegreerd in de InfoWorks-RS software voor hydrodynamische riviermodellering, door de Vlaamse Milieumaatschappij (VMM) – Afdeling Operationeel Waterbeheer (AOW) (vb. Cabus, 2008).
- het NAM-model (Nielsen & Hansen, 1973), geïntegreerd in de MIKE11-software voor hydrodynamische riviermodellering, door het Waterbouwkundig Laboratorium (WL) – Departement Mobiliteit en Openbare Werken van de Vlaamse Overheid.

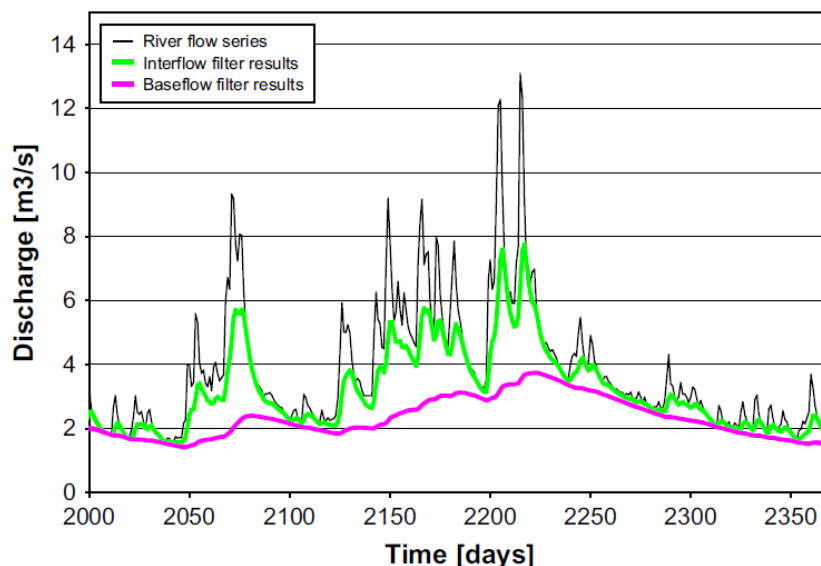
Voor de specifieke modellering van de oppervlakteafstroming heeft VMM-AOW ook een vereenvoudigd modelconcept, het Simplified Runoff Model (SRM), ontwikkeld en geïntegreerd in de InfoWorks-RS software (Cabus & De Jongh, 2007). Het berekent de effectieve neerslag als de stroomgebiedsneerslag vermenigvuldigd met een constante potentiële runoff-coëfficiënt en een bodemvochtdeficiëtfactor. De bodemvochtdeficiëtfactor geeft aan hoe de runoff-coëfficiënt varieert in de tijd en wordt afgeleid van de PDM resultaten (tijdsvariatie in bodemvochtberging in PDM). Deze effectieve neerslag wordt omgezet in een oppervlakteafstromingsdebiet door routing in twee lineaire reservoirmodellen in serie.

Daarnaast werd door de KU Leuven een Veralgemeend conceptueel Hydrologisch Model (VHM), en bijhorende modelleringmethode ontwikkeld (Willems, 2007, 2012). Via deze VHM-methode kan de modelstructuur van een gebiedsgemiddeld conceptueel model bepaald worden door gebruik te maken van een debietmeetreeks. Bij de andere modellen ligt de modelstructuur, d.w.z. de modelvergelijkingen die de hydrologische processen beschrijven, op voorhand vast en kalibreert men enkel de parameters van die vergelijkingen. Verschillende modellen gebruiken echter verschillende vergelijkingen. Zo veronderstelt het NAM-model dat de oppervlakterunoff-coëfficiënt lineair toeneemt met het verzadigingsgehalte van de bodem, terwijl het PDM-model (bij standaard gebruik) een machtsverband veronderstelt tussen de oppervlakterunoff-coëfficiënt en het verzadigingsgehalte van de bodem. Uiteraard levert dat sterk verschillende resultaten op, bij extrapolatie van het model naar hoge of lage bodemverzadigingswaarden. De vraag stelt zich dan welke vergelijkingen het best de hydrologie van een specifiek stroomgebied beschrijven. Dit is wat de VHM-methode doet. Ze identificeert de “beste” modelstructuur (ook wel modelstructuur-identificatie genoemd) voor een concrete gevalstudie. Dit gebeurt via een stapsgewijze aanpak op basis van debiet-, neerslag- en ETo-meetgegevens. De methode laat o.a. toe om de afhankelijkheid van de runoff-coëfficiënt met het bodemvochtgehalte (of verzadigingsgraad van de ondergrond) en/of met de voorafgaandelijke neerslag te identificeren op een data-gebaseerde wijze indien een debietmeetstation of debietmeetcampagnes beschikbaar zijn in het stroomgebied en indien betrouwbare neerslag- en ETo-waarden voor dat stroomgebied geschat kunnen worden voor de duur van de debietmeetreeks.

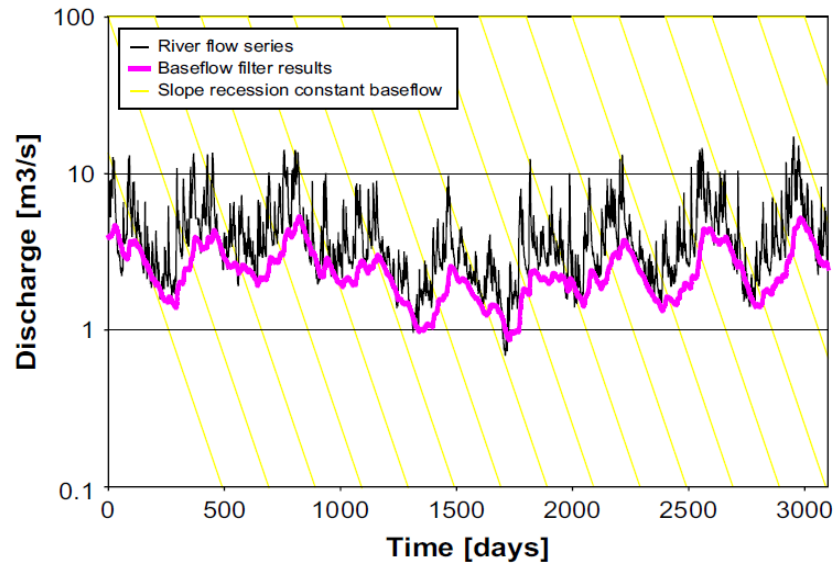


De aanpak maakt gebruik van een aantal tijdreeksanalyses. Eerst worden op de beschikbare debietmeetreeks de volgende tijdreeksverwerkingen toegepast:

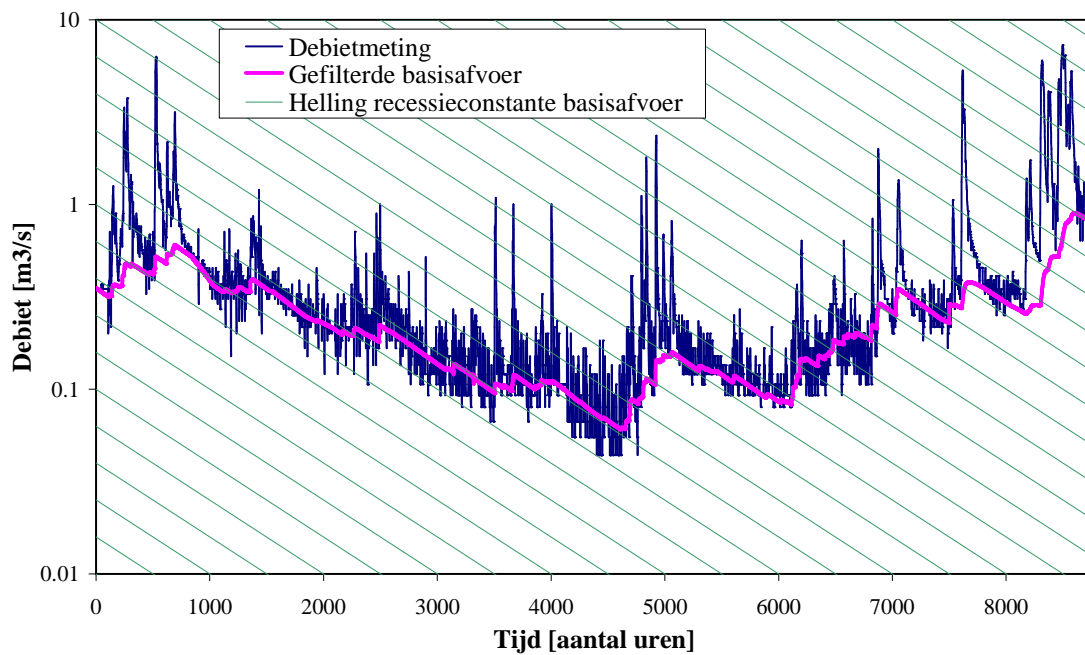
- Deelstroombijfiltering: de debietmeetreeks wordt opgedeeld in hydrologische deelstromen. Typisch kunnen uit een rivierdebietmeetreeks de basisafvoer ("baseflow", trage hydrologische deelstroom; meestal het gevolg van grondwaterafstroming in het stroomgebied) en de snelle hydrologische deelstroom geëxtraheerd worden. Vaak kan de snelle deelstroom nog verder opgedeeld worden in een snelste deelstroom en minder snelle deelstroom (tussenstroom of "interflow") (voorbeeld Figuur 18). De snelste deelstroom is hierbij meestal het gevolg van oppervlakte-afstroming in het stroomgebied en de tussenstroom het gevolg van hypodermische neerslagafstroming of drainage. Willems (2009) beschrijft een mogelijke filtermethode. De filter splitst de tijdreeks in twee deelstromen: een trage deelstroom en een snelle deelstroom. Door de filter een eerste maal toe te passen op de debietmeetreeks wordt de basisafvoer als filterresultaat bekomen. Door de filter daarna op de overblijvende snellere afvoerdebeten toe te passen, kunnen deze verder opgedeeld worden, met interflow als filterresultaat. Het overblijvend gedeelte is dan de snelste deelstroom. De filter van Willems (2009) heeft twee parameters:  $k$  en  $w$ . De parameter  $k$  stelt de recessieconstante voor van de deelstroom die als filterresultaat wordt bekomen (dus in de eerste filterstap de recessieconstante van de basisafvoer of grondwaterafstroming, in de tweede filterstap de recessieconstante van de interflow). De parameter  $w$  is de fractie van het totaal debietvolume dat (gemiddeld voor het debietvolume in de ganse tijdreeks) bijdraagt tot het overblijvend debiet na filtering ( $1-w$  is de fractie van het totaal debietvolume dat bijdraagt tot het filterresultaat; in de eerste filterstap is  $1-w$  de fractie die bijdraagt tot de basisafvoer, in de tweede filterstap is dat de fractie die bijdraagt tot de interflow). Figuur 19, Figuur 20 en Figuur 21 tonen voorbeelden van grondwater- en interflow-filterresultaten. De filter maakt gebruik van de kennis dat tijdens droge perioden het neerslagafstromingsdebiet exponentieel daalt. Door de logaritmische transformatie van het debiet in de ordinaat in Figuur 19, Figuur 20 en Figuur 21 vertonen droge perioden een lineaire daling. De gehelde lijnen in deze figuren geven de helling aan van deze lineaire debietrecessie. De inverse helling komt overeen met de recessieconstante  $k$ . De recessieconstante bepaalt dus hoe snel een deelstroom daalt in de tijd tijdens droge perioden. De parameter  $w$  wordt visueel en iteratief gecalibreerd, door ervoor te zorgen dat de gefilterde deelstroom zo goed mogelijk aansluit bij de debietmeetreeks, gedurende de recessieperioden van de deelstroom.



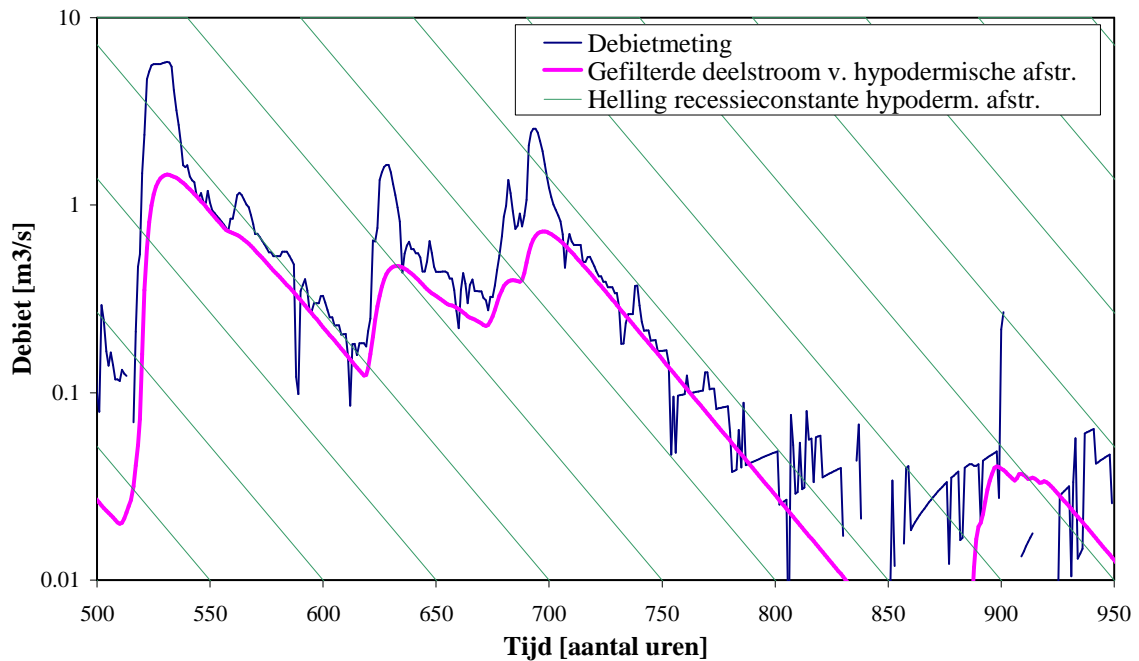
Figuur 18. Filterresultaten van de basisafvoer en interflow voor een winterperiode, voorbeeld Grote Nete te Varendonk (Willems, 2009)



Figuur 19. Filterresultaten van de basisafvoer en identificatie van de grondwater-recessieconstante, voorbeeld Grote Nete te Varendonk (Willems, 2009)

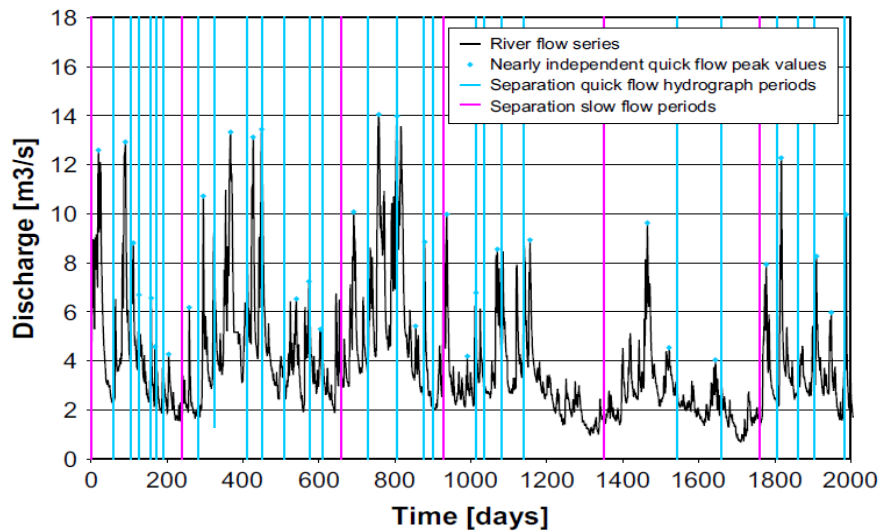


Figuur 20. Filterresultaten van de basisafvoer en identificatie van de grondwater-recessieconstante, voorbeeld Molenbeek te Erpe-Mere (Willems et al., 2002)



Figuur 21. Filterresultaten van de basisafvoer en identificatie van de interflow-recessieconstante, voorbeeld Molenbeek te Erpe-Mere (Willems et al., 2002)

- Scheiding van de tijdreeks in nagenoeg onafhankelijke hydrogramgebeurtenissen: De debietmeetreeks wordt opgedeeld in nagenoeg onafhankelijke hydrogramperioden voor zowel de snelle als de trage deelstroom. Dit gebeurt op basis van de statistische tijdreeksanalyse en de onafhankelijkheidscriteria beschreven in deel 3.3.3. Deze procedure van scheiding in deelperioden wordt tweemaal toegepast: eenmaal voor het scheiden in onafhankelijke snelle deelstroomperioden en een tweede maal voor het scheiden in onafhankelijke trage deelstroomperioden. De minimale duur  $p$  van de dalende flank tussen twee opeenvolgende piekdebieten in de tijdreeks (Figuur 8) wordt voor het scheiden van de tijdreeks in snelle deelstroomperioden gebaseerd op de recessieconstante van de snelle hydrologische deelstromen. Voor het scheiden van de tijdreeks in trage deelstroomperioden wordt deze gebaseerd op de recessieconstante van de trage hydrologische deelstroom. De maximale debieten gedurende de onafhankelijke snelle deelstroomperioden kunnen gebruikt worden voor statistische hoogwateranalyses (zie ook deel 3.3.3); de minimale debieten gedurende de onafhankelijke trage deelstroomperioden voor statistische laagwateranalyses. Figuur 22 toont een voorbeeld van de scheiding van een debietmeetreeks in nagenoeg onafhankelijke snelle en trage deelstroomgebeurtenissen en de selectie van nagenoeg onafhankelijke piekafvoeren uit de tijdreeks.

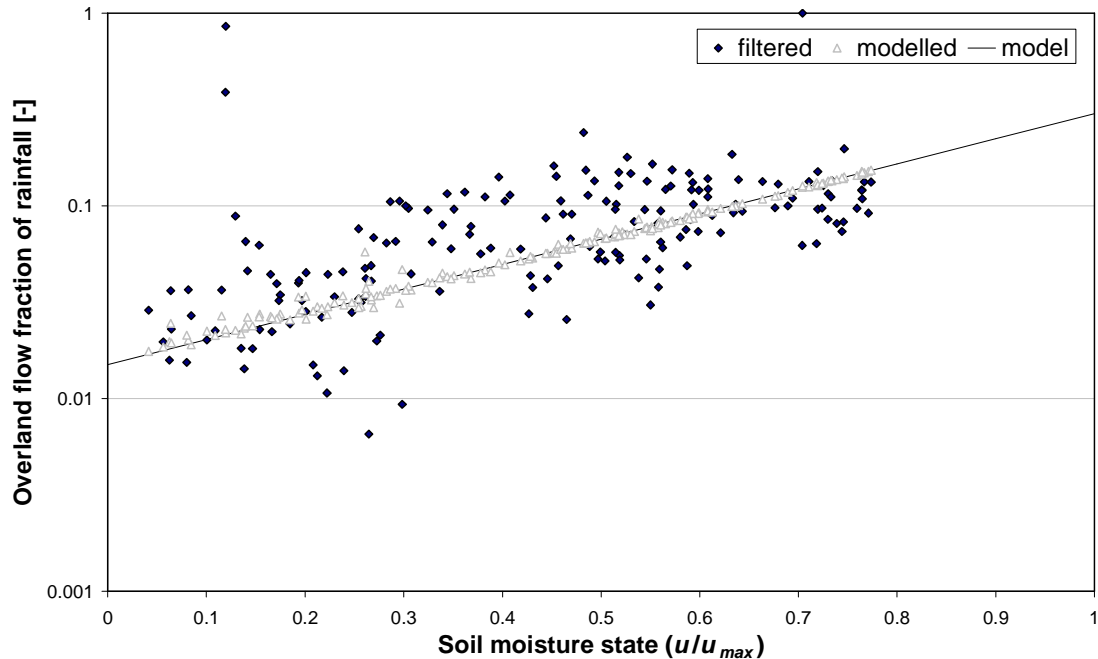


*Figuur 22. Scheiding van de debietmeetreeks in nagenoeg onafhankelijke snelle en trage deelstroomgebeurtenissen en selectie van nagenoeg onafhankelijke piekafvoeren, voorbeeld Grote Nete te Varendonk (Willems, 2009)*

Uit deze tijdreeksvoorverwerkingsresultaten kan heel wat informatie gehaald worden die kan gebruikt worden voor het identificeren van het hydrologisch responsgedrag van het stroomgebied, en dat voor verschillende deelcomponenten van het hydrologisch model. Zo geeft de deelstroomscheiding informatie over het totaal volume in de verschillende hydrologische deelstromen. Deling van deze volumes door het totale neerslagvolume geeft een indicatie van de fractie van het neerslagvolume dat bijdraagt tot elk van de deelstromen, dus van de runoff-coëfficiënt, en dit voor zowel de snelle deelstroom (oppervlakteafstroming, de tussenstroom (hypodermische afstroming) als de trage deelstroom (grondwaterafstroming). De  $k$ -waarden in de deelstroomfiltering geven een aanduiding van de snelheid van de afstroming (hoe kleiner  $k$ , hoe sneller de afstroming). Ze zullen hierna in meerdere andere methoden terugkomen.

Ook kan het neerslagvolume ( $V_u$  in Figuur 16) dat infiltreert maar niet afstroomt en geborgen wordt in de ondergrond, en eventueel later verdampt, voor elke tijdstap in de tijdreeks berekend worden als het restvolume (totale neerslaginvoer min neerslagvolumes die bijdragen tot de deelstromen). Door dit restvolume in de tijd te cumuleren, en daarvan een fractie te evapotranspireren door toepassing van het verdampingsdeelmodel, wordt een schatting bekomen van de tijdsvariatie van het neerslagvolume dat geborgen is in de ondergrond ( $U$ ). Dit volume is een maat voor het bodemvochtgehalte of de relatieve verzadigingstoestand ( $U/U_{max}$ ) van de bodem, gemiddeld voor het stroomgebied. Het verdampingsdeelmodel zet  $ET_o$  om in werkelijke evapotranspiratie, en de verhouding tussen beide is typisch afhankelijk van de relatieve verzadigingstoestand van de bodem. Meestal wordt in conceptuele neerslagafvoermodellen een lineaire afhankelijkheid verondersteld tussen de verhouding van de werkelijke over de potentiële evapotranspiratie en het relatief verzadigingsgehalte.

Figuur 23 geeft een voorbeeld van een model-structuuridentificatieresultaat voor het deelmodel dat de afhankelijkheid van de runoff-coëfficiënt van oppervlakteafstroming met de verzadigingsgraad van de ondergrond beschrijft voor een groot stroomgebied (grootteorde Vlaamse hydrografische zone van  $10 \text{ km}^2$  of groter), op basis van afwaartse debietmetingen in de waterloop. Op dezelfde manier kan ook de afhankelijkheid van de runoff-coëfficiënt met andere tijdsvariabele verklarende variabelen geïdentificeerd en gekalibreerd worden. Zo is het voor de kleine afstromingsgebiedjes die typisch voorkomen opwaarts van erosiebestrijdingsmaatregelen nuttig om naast de afhankelijkheid met de bodemverzadiging ook de afhankelijkheid met de kort- en langdurige voorafgaandelijke neerslagvolumes te analyseren. Zeer hoge neerslagintensiteiten, die zich vooral voordoen tijdens kortdurende convectieve zomerbuien en – omwille van de kleine concentratietijd – hoge afstromingsvolumes kunnen geven voor kleine stroomgebiedjes, kunnen aanleiding geven tot infiltratie-overschot. Deel 9 beschrijft zulke analyse voor de gevalstudies van de Heulen gracht en Maarkedal.



Figuur 23. Identificatie van het verband tussen de runoff-coëfficiënt en het relatief verzadigingsgehalte van de ondergrond volgens de VHM-aanpak, voor Grote Nete te Varendonk (Willems, 2012)

Na bepaling van de runoff-coëfficiënten voor de verschillende deelstromen kan in het model de totale neerslaginvoer worden opgedeeld in de deelneerslagvolumes die bijdragen tot elke deelstroom. De omzetting van deze deelneerslagvolumes in een afstromingsdebiet gebeurt voor elke deelstroom via routingmodellen.

Deze routingdeelmodellen nemen de vorm aan van reservoirmodellen. Een reservoirmodel zet een invoerdebiet om in een uitvoerdebiet (Figuur 24) gebruik makend van het bergingsvolume in het reservoir als toestandsvariabele. Dit bergingsvolume stelt de hoeveelheid water voor die zich op ieder tijdsogenblik bevindt aan de oppervlakte (voor het routingdeelmodel dat de oppervlakteafstroming beschrijft) of in de bovenste grondlaag of het drainagesysteem (voor de tussenstroom) of in het grondwater (voor de grondwaterafstroming). Het uitvoerdebiet wordt afhankelijk gemaakt van het bergingsvolume via een lineair of niet-lineair verband. Bij een lineair verband (zoals in Figuur 24) spreekt men van een “lineair reservoirmodel” (zie ook deel 3.6). Het bergingsvolume wordt berekend via het sluiten van de waterbalans, dus door bij het bergingsvolume van de voorgaande tijdstap het verschil tussen het inkomend debiet en het uitgaand debiet bij te tellen. De  $k$ -waarde die het lineair verband tussen het bergingsvolume en het uitvoerdebiet beschrijft komt overeen met de recessieconstante zoals hiervoor reeds gedefinieerd. Ze beschrijft de responstijd van het reservoirmodel, of de gemiddelde verblijftijd van het water in het reservoir, of ook de tijd gedurende dewelke het uitgaand debiet – bij een ontbrekend ingaand debiet (dus tijdens droge perioden) – tot een fractie  $\exp(-1) = 0.37$  van zijn oorspronkelijke waarde daalt.

Merk op dat deze  $k$ -waarde sterk afhankelijk is van de hydrologische deelstroom: kleine  $k$ -waarde voor oppervlakte-afstroming, iets grotere  $k$ -waarde voor interflow en grote  $k$ -waarde voor grondwaterafstroming.

Het is duidelijk dat de  $k$ -waarde verband houdt met de concentratietijd van het stroomgebied. De  $k$ -waarde stelt de gemiddelde verblijftijd voor van het water in het stroomgebied, en verschilt van de concentratietijd als de maximale afstromingstijd, maar is er rechtstreeks mee gecorreleerd.

Het lineair reservoirmodel kan toegepast worden via volgende vergelijking, met  $q_{in}(t)$  de neerslaginvoer op ieder tijdstap  $t$  en  $q_{uit}(t)$  het neerslagafstromingsdebiet op tijdstap  $t$  (zie ook Figuur 24) met de parameterwaarden  $k$  en de tijdsvertraging op de invoer  $t_0$ . Wanneer de

neerslaginvoer gekend is als tijdstapgemiddelde waarden (wat typisch het geval is, vb. mm/tijdstap) wordt de vergelijking als volgt toegepast:

$$q_{uit}(t) = \exp\left(-\frac{1}{k}\right) q_{uit}(t-1) + \left(1 - \exp\left(-\frac{1}{k}\right)\right) q_{in}(t-t_0) \quad (8)$$

Wanneer de neerslaginvoer gekend is als ogenblikkelijke waarden, zoals typisch het geval is bij afstromingsdebieten van een meer opwaarts stroomgebied, wijzigt de vergelijking als volgt:

$$q_{uit}(t) = \exp\left(-\frac{1}{k}\right) q_{uit}(t-1) + \left(1 - \exp\left(-\frac{1}{k}\right)\right) \left(\frac{q_{in}(t-1-t_0) + q_{in}(t-t_0)}{2}\right) \quad (9)$$

De tijdstapgemiddelde invoer wordt in het laatste geval dus benaderd door de ogenblikkelijke invoerwaarden op tijdstippen  $t$  en  $t-1$  uit te middelen. Merk op dat tijdens droge perioden, dus wanneer  $q_{in}=0$ , vergelijkingen (8) en (9) zich vereenvoudigen tot:

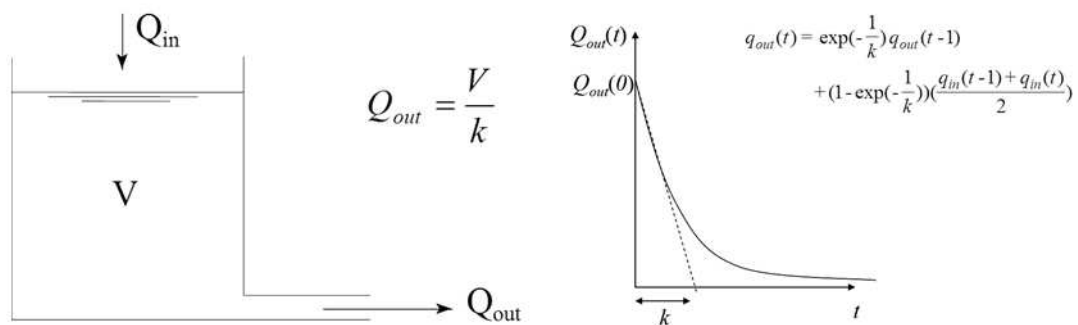
$$q_{uit}(t) = \exp\left(-\frac{1}{k}\right) q_{uit}(t-1)$$

of na toepassing van deze formule voor een reeks opeenvolgende tijdstappen tijdens een droge periode met duur  $t$ , vanaf een debiet  $q_{uit}(0)$  op tijdstip 0:

$$q_{uit}(t) = \exp\left(-\frac{t}{k}\right) q_{uit}(0)$$

Deze formule bewijst waarom de  $k$ -waarde overeenkomt met de tijd gedurende dewelke het uitgaand debiet – bij een ontbrekend ingaand debiet (dus tijdens droge perioden) – tot een fractie  $\exp(-1) = 0.37$  van zijn oorspronkelijke waarde daalt. Ze toont ook aan dat het debiet van een lineair reservoirmodel exponentieel daalt tijdens droge perioden (zie Figuur 24).

Naast lineaire modellen worden soms ook niet-lineaire of multi-lineaire reservoirmodellen gebruikt. Bij een multi-lineair reservoirmodel wordt het verband tussen het uitvoerdebiet en het bergingsvolume beschreven door een stapsgewijze lineaire relatie. Ook worden soms meerdere reservoirmodellen in serie geplaatst, een cascade van reservoirs genoemd (zie ook verder in deel 3.6).



Figuur 24. Het lineair reservoirmodel en bijhorend exponentieel eenheidshydrogram

De Vlaamse waterloopbeheerders maken momenteel gebruik van conceptuele hydrologische modellen omdat ze een goed evenwicht bieden tussen rekentijd en nauwkeurigheid, dus een modelgedetailleerdheid hebben die dicht bij het optimum gesitueerd is, voor het modelleren van de neerslagafstroming naar waterlopen. Ze worden opgemaakt per deelstroomgebied (vb. Vlaamse VHA-zone), voor de bemeten deelstroomgebieden gekalibreerd aan debietmeetreeksen, en voor de niet-bemeten deelstroomgebieden ingeschat op basis van de modelparameters van naburige deelstroomgebieden. Ze geven echter geen informatie over de ruimtelijke spreiding van de neerslagafstroming, wat ook voor neerslagafvoerschattting ter hoogte van erosiebestrijdingsmaatregelen niet nodig is. Interessant is dat ze door VMM-AOW en het WL reeds werden gekalibreerd en dus beschikbaar zijn voor een groot deel van

Vlaanderen. Nadeel is dat ze typisch afgeijkt zijn aan beschikbare debietmeetgegevens, die meestal een eind afwaarts van de deelstroomgebieden die hier beschouwd worden, gesitueerd zijn.

### **3.4.3 Empirische of eenvoudige conceptuele modellen**

Zuiver empirische modellen worden zelden gebruikt voor de berekening van neerslagafvoerdebieten. De meest eenvoudige neerslagafvoermodellen omvatten een conceptuele beschrijving van het neerslagafvoerproces aangevuld met een empirische bepaling van de modelparameters. De meest gangbare modellen in deze klasse, die ook meest frequent gebruikt worden bij de dimensionering van erosiebestrijdingsmaatregelen, zijn de SCS-methode en de rationale methode. Ze werden ook als enige methoden opgenomen in de Code van goede praktijk voor het opmaken van een gemeentelijk erosiebestrijdingsplan (Vandekerckhove et al., 2001). Deze en andere empirisch-conceptuele modellen worden hierna beschreven. De methoden omvatten meestal twee stappen. In een eerste stap wordt de netto neerslag berekend, dit is het neerslagdeel dat bijdraagt tot de afstroming. In een tweede stap wordt deze netto neerslag omgezet in een al dan niet tijdsvariabel afvoerdebiet. Ze worden meestal toegepast in combinatie met enkelvoudige neerslaggebeurtenissen.

#### *3.4.3.1 Stap 1: Berekening netto neerslag*

##### SCS-methode

De SCS-methode werd ontwikkeld door het Soil Conservation Service van het U.S. Department of Agriculture (SCS, 1972; Hoesein et al., 1989; NRCS, 2010). Het omvat een empirische methode voor de bepaling van de bergingscapaciteit  $S$  van een stroomgebied, op basis van de Curve Number ( $CN$ ):

$$S = \frac{1000}{CN} - 10 \quad \text{wanneer de bergingscapaciteit wordt uitgedrukt in inches}$$

$$S = \frac{25400}{CN} - 254 \quad \text{wanneer de bergingscapaciteit wordt uitgedrukt in mm}$$

Empirische tabellen werden opgemaakt die aangeven hoe de waarde voor  $CN$  functie is van het bodemtype, het landgebruik en het initieel bodemvochtgehalte: Tabel 2 en Tabel 3.

Tabel 2. CN-waarde in functie van type landgebruik of gewas, de teelttechniek en het type hydrologische bodemgroep (zie Tabel 3 voor een beschrijving van deze bodemgroepen) (Vandekerckhove et al., 2001)

Landgebruik of gewas	Teelttechniek	Hydrologische toestand	Hydrologische bodemgroep			
			A	B	C	D
<b>Braak</b>	Rechte rij	-	77	86	91	94
<b>Rijgewas</b>						
	Rechte rij	Slecht	72	81	88	91
	Rechte rij	Goed	67	78	85	89
	Contour	Slecht	70	79	84	88
	Contour	Goed	65	75	82	86
	Terras	Slecht	66	74	80	82
	Terras	Goed	62	71	78	81
<b>Graangewas</b>						
	Rechte rij	Slecht	65	76	84	88
	Rechte rij	Goed	63	75	83	87
	Contour	Slecht	63	74	82	85
	Contour	Goed	61	73	81	84
	Terras	Slecht	61	72	79	82
	Terras	Goed	59	70	78	81
<b>Dichtgezaaide leguminosen of weiderotatie</b>						
	Rechte rij	Slecht	66	77	85	89
	Rechte rij	Goed	58	72	81	85
	Contour	Slecht	64	75	83	85
	Contour	Goed	55	69	78	83
	Terras	Slecht	63	73	80	83
	Terras	Goed	51	67	76	80
<b>Begraasde weide</b>						
		Slecht	68	79	86	89
		Matig	49	69	79	84
		Goed	39	61	74	80
	Contour	Slecht	47	67	81	88
	Contour	Matig	25	59	75	83
	Contour	Goed	6	35	70	79
<b>Permanente weide</b>		Goed	30	58	71	78
<b>Bos</b>						
		Slecht	45	66	77	83
		Matig	36	60	73	79
		Goed	25	55	70	77
<b>Erf</b>						
		-	59	74	82	86
<b>Verharde wegen</b>						
		-	74	84	90	92



Tabel 3. Beschrijving van de hydrologische bodemgroepen ter bepaling van de CN-waarde (Vandekerckhove et al., 2001)

Bodemgroep	Omschrijving
A	Laagste afvoerpotentiaal. Omvat diepe zanden met zeer weinig leem en klei, ook diepe, snel doorlatende löss
B	Matige lage afvoerpotentiaal. Meestal zandige gronden minder diep dan groep A, maar met een meer-dan-gemiddelde infiltratie na grondig natmaken.
C	Matig hoge afvoerpotentiaal. Omvat ondiepe gronden en gronden met aanzienlijke hoeveelheden klei en colloïden, maar minder dan deze van groep D. De bodems hebben een minder-dan-gemiddelde infiltratie na voorverzadiging.
D	Hoogste afvoerpotentiaal. Meestal kleien met een hoog zwellingspercentage, maar ook ondiepe bodems met bijna ondoordringbare substraten nabij het oppervlak.

De bergingscapaciteit  $S$  stelt de bergingscapaciteit in de bodem voor. Voor de bergingscapaciteit aan de oppervlakte ( $I_a$ ) wordt verondersteld dat deze 20% bedraagt van de bergingscapaciteit in de ondergrond:

$$I_a = 0.2 S \quad (10)$$

De netto neerslag ( $R$ ) wordt berekend door te veronderstellen dat, voor een enkelvoudige regenbui, de verhouding van de berging in de ondergrond op het ogenblik dat oppervlakteafstroming begint over de bergingscapaciteit gelijk is aan de verhouding van het volume oppervlakteafstroming over het volume beschikbare neerslag (dus na aftrekking van de oppervlakteberging).

Er wordt dus verondersteld dat de verhouding van de werkelijke berging in de bodem over de maximale bergingscapaciteit (dus de verzadigingsgraad van de bodem) dezelfde is als de verhouding van de werkelijke oppervlakteafstroming over de potentiële oppervlakteafstroming. Deze veronderstelling gaat enkel op bij een welbepaalde (exponentiële) ruimtelijke verdeling van de neerslagintensiteit en de infiltratiecapaciteit van de bodem over het stroomgebied. Na verdere vereenvoudiging en wiskundige herwerking werd in NRCS (2010) volgende vergelijking bekomen:

$$R = \frac{(P - I_a)^2}{(P - I_a) + S} \quad (11)$$

met  $P$  de neerslagdiepte bij de buiduur van de neerslaggebeurtenis, waarbij de buiduur meestal gelijk wordt gekozen aan de concentratietijd, alhoewel dit laatste geen vereiste is van de SCS-methode. Als  $P^* = P - I_a$  wordt beschouwd als het neerslagvolume na aftrekking van oppervlakteberging, dan kan deze SCS-formule voor de berekening van de netto neerslag als volgt worden herschreven:

$$R = \frac{P^*}{P^* + S} P^* = \varphi P^* \quad (12)$$

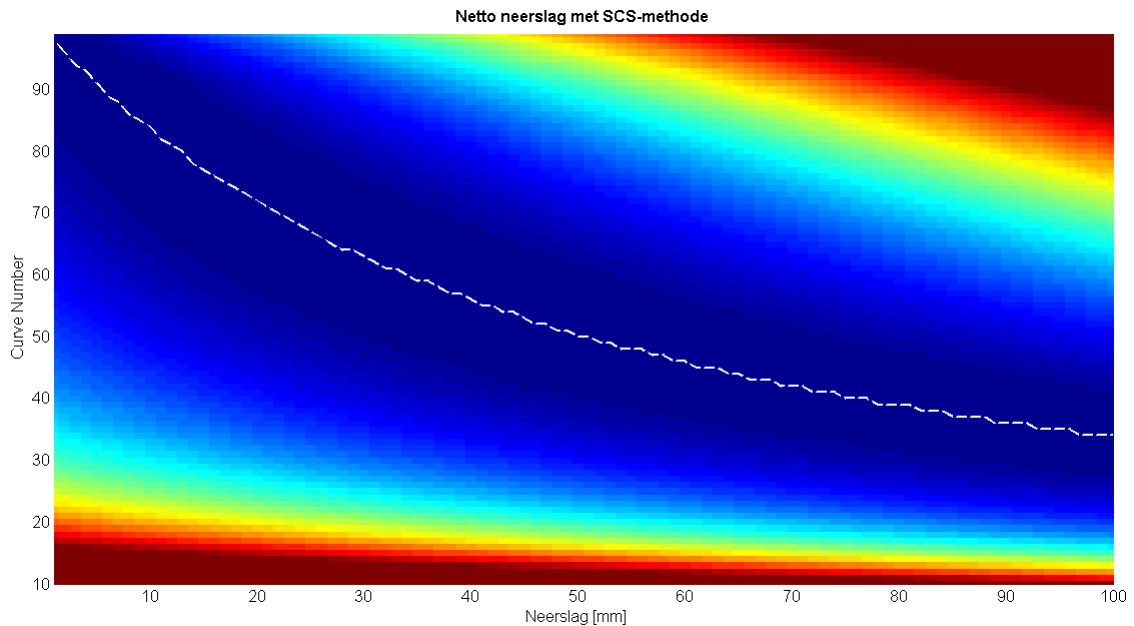
met  $\varphi$  de oppervlakterunoff-coëfficiënt. Deze herschreven formule laat toe om hierna een link te leggen met de rationale methode.

De combinatie van voorgaande drie formules (10), (11) en (12) levert volgende formule op voor de runoff-coëfficiënt:

$$\varphi = \frac{P - 0.2 S}{P + 0.8 S} \quad (13)$$

In voorgaande formules hebben  $P$ ,  $P^*$  en  $R$  telkens dezelfde eenheid als  $S$ , in inches of mm - afhankelijk van de formule die werd toegepast voor de berekening van  $S$  uit  $CN$  - of na omzetting van de eenheid een andere eenheid voor neerslagdiepte.

De SCS-methode is enkel van toepassing voor voldoende grote neerslagdiepten, d.w.z. in het gebied waar  $R$  toeneemt met toenemende  $P$ . De minimale neerslagdiepte kan gevonden worden door de eerste afgeleide van  $R$  te berekenen en gelijk te stellen aan nul. Deze minimale neerslagdiepte is gelijk aan  $S/5$  of  $5080/CN - 50.8$ . De witte stippellijn in Figuur 25 geeft het verband tussen het curve number en de bijhorende minimale neerslagdiepte. Voor de  $CN$ -waarden die meest gangbaar zijn in Vlaanderen, komt dit overeen met minimale neerslagdiepten van ongeveer 10 mm (voor  $CN=84$ ) tot 7 mm (voor  $CN=88$ ). Enkel de combinaties van neerslag en curve number die zich in het gedeelte rechtsboven van deze lijn bevinden zijn realistisch. In het gedeelte onder de stippellijn zal de netto neerslag afnemen bij een toename van de neerslagintensiteit.



*Figuur 25. Contourplot van de netto neerslag berekend met de SCS-methode, in functie van de neerslag (in mm) en het curve number. Het donkerblauw bevat de laagste waarden, terwijl het rode de hoogste bevat. De witte stippellijn geeft voor elke  $CN$ -waarde de minimale neerslagdiepte.*

Een aangepaste versie van deze SCS-methode werd ontwikkeld door Chang (1992), Muzik & Chang (1992). De aanpassing bestaat erin om de parameters  $S$  en  $I_a$  als random variabelen te behandelen eerder dan als constante waarden. De bergingscapaciteit  $S$  wordt afhankelijk gemaakt van de 5-dagen neerslagintensiteit en aan de bergingscapaciteit aan de oppervlakte  $I_a$  wordt een kansverdeling gegeven. Omwille van de grote buiduren die bij deze aanpassing werden gebruikt, wordt deze methode hierna niet verder beschouwd.

Voor Vlaamse condities heeft de  $CN$  meestal een waarde in het bereik 84 – 88 (zie deel 8). Tabel 4 geeft voor deze  $CN$ -waarden een beeld van de bijhorende runoff-coëfficiënt voor een reeks van terugkeerperioden en buiduren. De runoff-coëfficiënt werd berekend via formule (13). Wanneer deze waarden worden vergeleken met de typische runoff-coëfficiënten voor Vlaamse opwaartse stroomgebieden (typisch tussen 0.3 en 0.7; zie verder), dan blijkt de SCS-methode zeer lage (onrealistisch lage?) runoff-coëfficiënten op te leveren voor kleine terugkeerperioden en kleine buiduren/concentratietijden. Dit is niet zo verrassend, aangezien de oorspronkelijke SCS-methode werd ontwikkeld uitgaande van dagneerslagvolumes (Ogrosky et al., 1964). Wanneer de runoff-coëfficiënten worden berekend voor een buiduur van 1 dag (Tabel 5) dan worden wel realistische runoff-coëfficiënten bekomen voor grote terugkeerperioden (20 jaar in de tabel); zie ook later in deel 9 voor de vergelijking tussen de runoff-coëfficiënten berekend volgens verschillende methodes. Een oplossing bestaat er daarom in om de runoff-coëfficiënt met de SCS-methode daggemiddeld te berekenen (via vergelijking (13) en met daggemiddelde neerslagwaarden voor  $P$ ) en deze ook voor kleinere buiduren/concentratietijden toe te passen (cfr. vergelijking (12)). Deze methode wordt hierna de aangepaste SCS-methode genoemd. Volledig uitgeschreven wordt de netto neerslag dan als volgt berekend:

$$R = \varphi \cdot P^* = \varphi \cdot (P - I_a) = \left( \frac{N - 0.2 \cdot S}{N + 0.8 \cdot S} \right) \cdot (P - 0.2 \cdot S) \quad (14)$$

Met  $N$  de daggemiddelde neerslagdiepte,  $P$  de neerslagdiepte horende bij de concentratietijd en  $S$  de bergingscapaciteit, zoals hierboven gedefinieerd.

Tabel 4. Neerslagintensiteit en neerslagvolume i.f.v. buiduur en terugkeerperiode volgens Willems (2009) en bijhorende runoff-coëfficiënt volgens de SCS-methode en de in Vlaanderen gangbare CN-waarden 84 en 88, voor enkele buiduren kleiner dan 1 uur.

Terugkeerperiode [jaar]	Buiduur [min]					
	10	15	20	30	40	50
<b>Neerslagintensiteit [mm/h]</b>						
20	112.2	82.7	66.8	49.3	39.8	33.7
5	88.5	64.0	50.9	36.8	29.2	24.4
2	72.8	51.6	40.4	28.6	22.4	18.5
<b>Neerslagvolume [mm]</b>						
20	18.7	20.7	22.3	24.7	26.5	28.1
5	14.7	16.0	17.0	18.4	19.5	20.3
2	12.1	12.9	13.5	14.3	14.9	15.4
<b>Runoff-coëfficiënt voor CN=84</b>						
20	0.16	0.19	0.21	0.24	0.26	0.28
5	0.09	0.12	0.13	0.15	0.17	0.18
2	0.05	0.06	0.07	0.09	0.10	0.11
<b>Runoff-coëfficiënt voor CN=88</b>						
20	0.25	0.28	0.31	0.34	0.36	0.38
5	0.18	0.21	0.22	0.25	0.27	0.28
2	0.13	0.15	0.16	0.18	0.19	0.20

Tabel 5. Neerslagintensiteit en neerslagvolume i.f.v. buiduur en terugkeerperiode volgens Willems (2009) en bijhorende runoff-coëfficiënt volgens de SCS-methode en de in Vlaanderen gangbare CN-waarden 84 en 88, voor buiduren van 1 uur of groter.

Terugkeerperiode [jaar]	Buiduur [min]					
	60 (=1h)	360 (=6h)	720 (=12h)	1440 (=1dag)	7200 (=5dagen)	14400 (=10dagen)
<b>Neerslagintensiteit [mm/h]</b>						
20	29.4	7.5	4.4	2.7	0.9	0.6
5	21.1	5.2	3.2	2.0	0.7	0.5
2	15.9	4.2	2.6	1.7	0.6	0.4
<b>Neerslagvolume [mm]</b>						
20	29.4	45.0	53.3	64.9	105.9	138.2
5	21.1	31.1	38.6	49.1	84.2	110.8
2	15.9	24.9	31.7	40.9	71.1	93.7
<b>Runoff-coëfficiënt voor CN=84</b>						
20	0.29	0.42	0.47	0.53	0.67	0.73
5	0.19	0.31	0.37	0.45	0.61	0.68
2	0.11	0.24	0.31	0.39	0.56	0.63
<b>Runoff-coëfficiënt voor CN=88</b>						
20	0.39	0.52	0.57	0.63	0.74	0.79
5	0.29	0.41	0.48	0.55	0.69	0.75
2	0.21	0.34	0.42	0.50	0.65	0.71

*Rationele methode*

Bij de rationele methode worden de neerslagverliezen (in de ondergrond en aan de oppervlakte) ingerekend via een constante runoff-coëfficiënt  $\varphi$ :

$$R = \varphi P$$

Zowel  $P$  als  $R$  hebben de eenheid van neerslagdiepte, vb. mm.

De bepaling van de runoff-coëfficiënt wordt hierna toegelicht.

*Schatting runoff-coëfficiënt*

De runoff-coëfficiënt  $\varphi$  kan geschat worden zoals hierboven bij de conceptuele neerslagafvoermodellering besproken, op basis van een tijdreeksanalyse van de rivierdebiet-, neerslag- en ETo-waarnemingen, indien beschikbaar. Meestal zijn zulke waarnemingen niet beschikbaar voor kleinschalige opwaartse stroomgebiedjes. De runoff-coëfficiënt wordt dan ruwweg ingeschat op basis van ervaring en/of tabellen die de typische grootteorde van de runoff-coëfficiënt weergeven i.f.v. landgebruik en andere gebiedseigenschappen (zie verder). Dezelfde tabellen worden ook gebruikt aan de basis van bepaalde fysisch-gebaseerde hydrologische modellen (vb. WetSpa, SWAT), voor de parameterbepaling van onbemeten stroomgebieden of voor de initiële schatting van de parameterwaarden voorafgaandelijk aan de kalibratie via debietmetingen.

Terwijl de runoff-coëfficiënt sterk kan variëren in de tijd, vb. in functie van de seizoensvariatie in bodembedekking, of het verzadigingsgehalte van de ondergrond, bodemruwheid of korstvorming, wordt in de rationele methode met een vaste runoff-coëfficiënt gewerkt. Dit kan de temporeel gemiddelde runoff-coëfficiënt zijn, maar bij voorkeur wordt de runoff-coëfficiënt gekozen die zich typisch voordoet tijdens perioden van hoge oppervlakteafstroming. Merk hierbij op dat hoge oppervlakteafstroming zich zowel kan voordoen door hoge neerslagintensiteiten als door hoge runoff-coëfficiënten. De gevalstudie van Maarkedal in deel 9.4 geeft aan dat voor het gebied van de Bovenschelde, de hoogste runoff-coëfficiënten zich voordoen in de winter bij hoge bodemverzadiging. Voor de gevalstudie van de Heulen gracht (deel 9.3), wat een typisch voorbeeld is voor Droog Haspengouw, is deze variatie veel minder duidelijk, ondermeer door het beperkt aantal meetwaarden in de winterperiodes. Voor kleine stroomgebiedjes doen de hoogste neerslagintensiteiten uitgemiddeld over de concentratietijd zich echter voor in de zomer, wanneer de runoff-coëfficiënt typisch iets lager is.

Tabel 6 geeft een indicatie van de typische waarden voor de (tijdsvariabele) runoff-coëfficiënt i.f.v. het landgebruik van het stroomgebiedje. Voor bepaalde landgebruikstypen, zoals weiden, akkers en bossen, bestrijkt de runoff-coëfficiënt een breed bereik aan waarden. De runoff-coëfficiënt hangt voor deze landgebruikstypes immers sterk af van het reliëf, het bodemtype, de neerslagintensiteit, enz; zie Tabel 7 en Tabel 8. Deze tabellen geven een richtlijn bij het verfijnen van de runoff-coëfficiënt voor de landgebruikstypes met een breed bereik aan waarden. De tabellen dekken echter niet alle mogelijke situaties. Bijvoorbeeld, indien men de runoff-coëfficiënt wil laten variëren met de intensiteit van de ontwerpbui, staan er in Tabel 8 maar drie neerslagintensiteiten vermeld. Men kan echter inter- of extrapoleren voor de intensiteiten die niet in de tabel voorkomen. Ook is het belangrijk te beseffen dat de tabellen enkel informatie kunnen verschaffen over de grootteorde van de runoff-coëfficiënt en geen nauwkeurige waarden. Verdere detaillering van de tabellen heeft daardoor weinig zin. Een nauwkeurige inschatting van de runoff-coëfficiënt is enkel mogelijk op basis van geval-specifieke neerslag- en debietmetingen of op basis van regenvalsimulaties (Evrard et al., 2008). Deel 9 geeft hiervan concrete voorbeelden voor de gevalstudies Heulen gracht en Maarkedal. Bij deze gevalstudies blijkt dat de runoff-coëfficiënt niet enkel afhankelijk is van de specifieke locatie van het afstromingsgebied, dus van de gebiedseigenschappen zoals hellingsgraad, landgebruik en bodemtype, maar eventueel ook van het bodemvochtgehalte (verzadigingsoverschot) en ook de neerslagintensiteit (infiltratie-overschot). Merk op dat deze afhankelijkheid en tijdsafhankelijkheid van de runoff-coëfficiënt expliciet kan ingerekend worden bij de fysisch-gebaseerde en conceptuele simulatiemodellen (zie delen 3.4.1 en 3.4.2). Opnieuw kan dit enkel nauwkeurig gebeuren mits kalibratie van de modellen aan meetgegevens. De tabellen met typische waarden voor de runoff-coëfficiënten, zoals Tabel 6, Tabel 7 en Tabel 8, zijn via een verzameling van internationale bronnen afkomstig van internationale terreinwaarnemingen in verschillende streken van de wereld. Specifiek onderzoek voor Vlaanderen zou deze tabellen kunnen verfijnen en het bereik van waarden verkleinen,

maar vereist een groot aantal bemeten kleinschalige opwaartse stroomgebiedjes, welke niet beschikbaar zijn en ook op korte termijn niet beschikbaar zullen komen.

Omwille van de grote onzekerheid op de inschatting van de runoff-coëfficiënt is het aangewezen om voor de gebiedjes waarvoor in de nabijheid geen debietmetingen beschikbaar zijn, een bereik in te schatten binnen dewelke de runoff-coëfficiënt bij hoge neerslagafstroming kan variëren en daarop een gevoeligheidsanalyse uit te voeren. Op die manier wordt een bereik van netto neerslagen  $R$  bekomen, i.p.v. één welbepaalde waarde.

*Tabel 6. Runoff-coëfficiënt  $\phi$  in functie van type landgebruik/vegetatie (afgeleid o.b.v. meerdere bronnen waaronder Chow, 1964, De Smedt, 1999, Vandekerckhove et al., 2001, Viessman & Lewis, 2003, De Smedt, 2006).*

Landgebruik	Runoff-coëfficiënt
Verhard	0.8 – 1
Wegen	0.7 – 0.95
Beton	0.8 – 0.95
Geasfalteerd	0.7 – 0.95
Straatstenen	0.7 – 0.85
Daken	0.75 – 0.95
Woonzones	0.3 – 0.7
Villawijk	0.3 – 0.5
Vrijstaande woningen	0.4 – 0.75
Voorstedelijke agglomeratie	0.25 – 0.4
Appartementsgebouwen	0.5 – 0.7
Industriezones	0.5 – 0.9
Verspreid	0.5 – 0.8
Geconcentreerd	0.6 – 0.9
Handelscentra	0.5 – 0.95
Stedelijk	0.7 – 0.95
Gemeentelijk	0.5 – 0.7
Spoorwegen	0.2 – 0.4
Tuinen	0.2 – 0.4
Parken en begraafplaatsen	0.1 – 0.25
Speelvelden	0.2 – 0.35
Weiden	0.1 – 0.6
Akkerland	0.2 – 0.8
Braakliggende gronden	0.1 – 0.3
Boomgaarden-laagstam	0.4 – 0.8
Boomgaarden-hoogstam	0.1 – 0.4
Bos	0.1 – 0.4
Waterpartijen	0 – 0.1

Tabel 7. Runoff-coëfficiënt  $\phi$  in functie van helling en bodemtype voor enkele typen landgebruik/vegetatie (Vandekerckhove et al., 2001, o.b.v. Tourbier & Westmacott, 1974).

Landgebruik	Helling	Bodemtype		
		Zand-leem	Klei-leem	Zware klei
<b>Weiden</b>				
	Vlak (0.5% helling)	0.1	0.3	0.4
	Hellend (5-10%)	0.15	0.35	0.55
	Sterk hellend (10-30%)	0.2	0.4	0.6
<b>Akkerland</b>				
	Vlak (0.5% helling)	0.3	0.5	0.6
	Hellend (5-10%)	0.4	0.6	0.7
	Sterk hellend (10-30%)	0.5	0.7	0.8
<b>Bos</b>				
	Vlak (0.5% helling)	0.1	0.3	0.4
	Hellend (5-10%)	0.25	0.35	0.5
	Sterk hellend (10-30%)	0.3	0.5	0.6

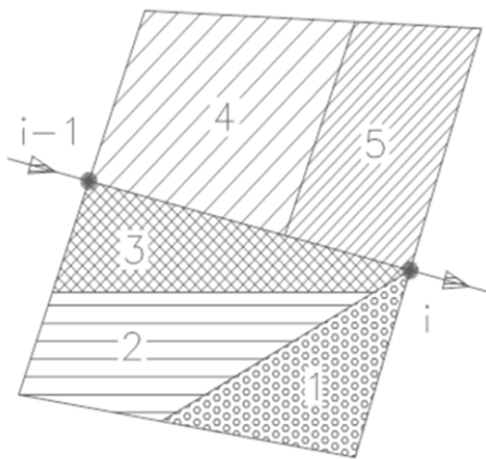
Tabel 8. Runoff-coëfficiënt  $\phi$  in functie van neerslagintensiteit en bodemtype voor enkele typen landgebruik/vegetatie (weiden, akkers en bos) (afgeleid van Vandekerckhove et al., 2001, o.b.v. Horn and Schwab, 1963, en Schwab et al., 1993). Voor de bodemtypes wordt verwezen naar Tabel 3.

Landgebruik en hydrologische condities	Neerslagintensiteit, voor bodemtype B, in mm/h			Bodemtype, voor neerslagintensiteit 100 mm/h		
	25	100	200	A	C	D
<b>Akkers – gewassen</b>						
Rijgewas, slechte condities	0.63	0.65	0.66	0.58	0.71	0.73
Rijgewas, goede condities	0.47	0.56	0.62	0.48	0.61	0.64
Graangewas, slechte condities	0.38	0.38	0.38	0.33	0.42	0.44
Graangewas, goede condities	0.18	0.21	0.22	0.18	0.23	0.24
<b>Weiden</b>						
Hooiweide (rotatie), goede condities	0.29	0.36	0.39	0.29	0.41	0.42
Graasweide (permanent), goede condities	0.02	0.17	0.23	0.11	0.21	0.22
<b>Bos</b>						
Bos (volgroeid), goede condities	0.02	0.1	0.15	0.05	0.13	0.14

In de huidige Vlaamse praktijk (zie deel 8) wordt een breed bereik aan runoff-coëfficiëntwaarden toegepast: van 0.25 tot 0.70, afhankelijk van de precieze locatie. Een  $\phi$ -waarde van 0.6 komt het meest frequent voor. Voor akkerland is 0.68 de meest gebruikte waarde, 0.35 voor weiden in licht hellende gebieden, 0.3 voor weiden in vlakke gebieden, en 0.8 voor verharde gebieden.

#### Bepaling runoff-coëfficiënt voor stroomgebiedjes met gecombineerde landgebruikstypen

Voor stroomgebiedjes met gecombineerde landgebruikstypen kan een gewogen gemiddelde runoff-coëfficiënt berekend worden, met gewichtsfactoren op basis van de relatieve oppervlakte van elk landgebruikstype (zie voorbeeld Figuur 26).



$$Q_i(t) = \sum_{j=1}^5 Q_{i,j}(t)$$

$$Q_{i,j}(t) = A_{vj} \cdot \varphi_{vj} \cdot i(t_v) + A_{oj} \cdot \varphi_{oj} \cdot i(t_o)$$

$A_{vj}$ : verhard oppervlak deelgebied  $j$

$A_{oj}$ : onverhard oppervlak deelgebied  $j$

$\varphi_{vj}$ : runoff-coëfficiënt oppervlak  $A_{vj}$

$\varphi_{oj}$ : runoff-coëfficiënt oppervlak  $A_{oj}$

$t_v = t + t_{\min} - t_{\text{inlaattijd verhard}}$

$t_o = t + t_{\min} - t_{\text{inlaattijd onverhard}}$

Figuur 26. Gebruik van een gecombineerde runoff-coëfficiënt bij deelstroomgebieden met verschillende landgebruiksklassen (verhard en onverhard in het voorbeeld).

#### Regionale verschillen in gemiddelde runoff-coëfficiënt

Voor de grotere opwaartse deelstroomgebieden (grootteorde 20 – 200 km<sup>2</sup>) die bemeten zijn door debietmeetstations (VMM – AOW en HIC), werden in Willems et al. (2005) gemiddelde oppervlakte-afstromingscoëfficiënten berekend. Ze zijn gebaseerd op de debietmeetreeksen van 58 opwaartse debietmeetstations verspreid over Vlaanderen. Dit zijn alle stroomopwaartse debietmeetstations (vooral limnigrafen) waarvoor zo volledig mogelijke tijdreeksen van uurlijkse debietwaarden voor de periode 1990-2002 beschikbaar waren. Tabel 9 geeft een overzicht van deze stations. De stroomgebiedsoppervlakte varieerde tussen 2.7 en 810 km<sup>2</sup>, maar voor de meeste stations was deze tussen 20 en 200 km<sup>2</sup>. Op deze meetreeksen werd de hydrologische deelstroomfilter toegepast (zie deel 3.4.2), en de deelstroomresultaten gebruikt om jaar- en maandgemiddelde runoff-coëfficiënten te berekenen voor totale afstroming, oppervlakteafstroming en interflow. Tabel 10 geeft een overzicht van de verhouding tussen het jaargemiddeld afstromingsdebiet ( $Q$ ) en de jaargemiddelde stroomgebiedsneerslag ( $N$ ) voor zowel het totaal afstromingsdebiet ( $Q_{\text{tot}}$ ) als de basisafvoer ( $Q_{\text{bf}}$ ), de interflow ( $Q_{\text{if}}$ ) en de oppervlakte-afstroming ( $Q_{\text{of}}$ ) voor alle bemeten deelbekkens. Ook werden jaargemiddelde verhoudingen berekend tussen elk deelstroomdebiet en het totaal afstromingsdebiet. De debietverhoudingen of gemiddelde runoff-coëfficiënten ( $Q_{\text{tot}}/N$  en  $Q_{\text{of}}/N$ ) blijken groter in het westen van Vlaanderen. Dit is in overeenstemming met de vroegere vaststelling van Voet (1996) dat de stroomgebieden in het westen van Vlaanderen een gebied bestrijken met een hoge coëfficiënt van variatie (CV) voor de debieten; zie Figuur 27. Ook blijkt uit Tabel 10 dat de runoff-coëfficiënten een andere grootteorde vertonen voor verschillende bekkens of deelgebieden in Vlaanderen. De verschillen kunnen worden toegeschreven aan de bodemeigenschappen zoals de dikte van de onverzadigde bodemlaag, de kenmerken van de bodemtoplaag, geologische karakteristieken zoals het soort tertiaire afzetting, enz.

De regionale verschillen zijn ook consistent met de resultaten van de analyse van Cabus & De Jongh (2007). Zij hebben op basis van het SRM-concept (zie deel 3.4.2) potentiële runoff-coëfficiënten afgeleid voor 74 bemeten stroomgebieden in Vlaanderen; zie Figuur 35. Zeer hoge potentiële runoff-coëfficiënten werden waargenomen in het hellend gebied van West- en Oost-Vlaanderen, lagere coëfficiënten in de droge leemstreek en in de zandstreek. De verschillen in helling, bodemgebruik en bodemtype bleken deze regionale verschillen onvoldoende te verklaren. Daarom werd door Cabus & De Jongh (2007) een vierde verklarende variabele geïntroduceerd: de geologische ondergrond. De drie gebieden komen overeen met de volgende geologische klassen:

- Ieperiaan\_Maldegem: met opgenomen formaties Ko, Aa, Ge, Tt, Ma
- Rupeliaan/Landenaan: met opgenomen formaties LA, Ld-Br, To, P, Pa, RU, Kr, Kz, MI

- Diestiaan/Scaldisaan: met opgenomen formaties Bb, Bc, Bs, Di, Kd, Kl, Li, Li-Pd, Me, Pd.

Tabel 13 geeft een overzicht van de stroomgebiedsgemiddelde runoff-coëfficiënten die werden bekomen i.f.v. helling, bodemgebruik, bodemtype en geologische ondergrond.

Merk op dat dit gemiddelde runoff-coëfficiënten zijn voor grotere gebieden die meestal een groot aantal landgebruikstypen omvatten, vandaar dat de waarden van deze coëfficiënten dichter bij elkaar liggen dan deze in Tabel 4 t.e.m. Tabel 8. Ze geven dus slechts een aanduiding van de "streekgemiddelde" runoff-coëfficiënten. Ze zijn dus niet rechtstreeks bruikbaar om runoff-coëfficiënten van kleinere opwaartse stroomgebiedjes te schatten, maar geven wel een indicatie van de maandgemiddelde regionale verschillen.

Tabel 9. Overzicht gebruikte limnigraaftijdreeksen voor de berekening van deelstroomgebiedsgemiddelde runoff-coëfficiënten (Willems et al., 2005).

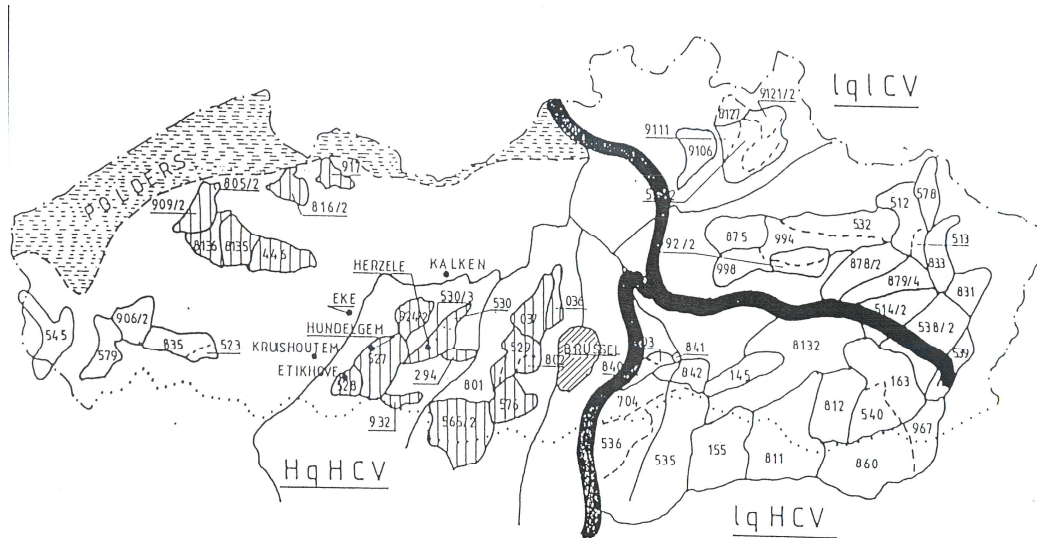
HIC_nr	begin	einde	Waterloop	Plaatsnaam	Bekken	Beheerder	Nummer	Opp. Km2
052	01/01/2002	31/12/2002	Kleine Nete	Grobendonk	Nete	HIC	D05210102	590
054	01/01/2002	31/12/2002	Kleine Nete	Herentals-stuw	Nete	HIC	D05456122	338.6
058	01/01/1997	31/12/2002	Witte Nete	Retie	Nete	AMWA	893	40.7
064	01/01/1997	31/12/2002	Aa	Turnhout	Nete	AMWA	9121/2	37.3
073	01/01/1990	31/12/2002	Grote Nete	Hulshout	Nete	HIC	D07310102	468.2
082	01/01/1997	31/12/2002	Wimp	Wiekevorst-Herenthout	Nete	AMWA	875	54
086	01/01/1997	31/12/2002	Grote Laak	Vorst	Nete	AMWA	992/2	78.7
138	01/01/1997	31/12/2002	Demer	Bilzen	Demer	AMWA	539	97
141	01/01/2000	31/12/2002	Winge	Wezemaal	Demer	AMWA	845	63.9
142	01/01/1997	31/12/2002	Winge	Sint Pieters Rode	Demer	AMWA	844	33.3
143	01/01/2000	31/12/2002	Losting	Wezemaal	Demer	AMWA	846	2.7
144	01/01/2000	31/12/2002	Motte	Rillaar	Demer	AMWA	850	26
145	01/01/2000	31/12/2002	Velp	Ransberg	Demer	HIC	D14510102	96.1
147	01/01/2000	31/12/2002	Zwartwater	Molenstede	Demer	AMWA	851	64.8
148	06/04/2001	31/12/2002	Zwarte Beek	Lummen	Demer	AMWA	878/2	100.9
152	01/01/2000	31/12/2002	Gete	Halen	Demer	HIC	D15210102	810.5
153	01/01/1997	31/12/2002	Gete	Budingen	Demer	AMWA	813	555
155	01/01/1990	31/12/2002	Grote Gete	Hoegaarden	Demer	HIC	D15510102	208.5
156	01/01/1997	31/12/2002	Melsterbeek	Rummen	Demer	AMWA	812	149
161	01/01/2000	31/12/2002	Mangelbeek	Lummen	Demer	AMWA	879/4	108.9
163	01/01/2000	31/12/2002	Herk	Kermt	Demer	HIC	D16310102	280.2
165	15/01/1997	31/12/2002	Herk	Wellen	Demer	AMWA	540	108
009	03/06/1997	31/12/2002	Molenbeek	Massemen	Schelde	AMWA	924/2	44.8
342	01/01/1997	31/12/2002	Zwalm	Nederzwalm	Schelde	AMWA	527	114.3
347	01/01/1997	31/12/2002	Maarkebeek	Etikhove	Schelde	AMWA	528	50.8
403	01/05/1997	31/12/2002	Heulebeek	Heule	Leie	AMWA	523	92.7
404	01/01/1997	31/12/2002	Heulebeek	Moorsele	Leie	AMWA	835	46.8
422	01/01/1997	31/12/2002	Kerkebeek	Sint-Michiels - Brugge	Polders	AMWA	805/2	67.5
423	01/01/1997	31/12/2002	Kerkebeek	Loppem	Polders	AMWA	909/2	57.4
425	01/01/1997	31/12/2002	Rivierbeek	Oostkamp	Polders	AMWA	8136	63.5
426	14/03/1997	31/12/2002	Hertsbergebeek	Oostkamp	Polders	AMWA	8135	73.5
442	01/01/1997	31/12/2002	Ede	Maldegem	Polders	AMWA	816/2	41.9
488	01/01/1997	31/12/2002	Krekelbeek - Ha	Kortemark - Handzame	Ijzer	AMWA	903	
491	01/01/1997	31/12/2002	Poperingevaart	Oostvleteren	Ijzer	AMWA	545	83.4
492	01/01/1997	31/12/2002	Kemmelbeek	Boezinge	Ijzer	AMWA	821	68
496	01/01/1997	31/12/2002	Sint-Jansbeek	Merkem	Ijzer	AMWA	906/2	75.3
098	01/01/1997	31/12/2002	Dijle	Sint Joris Weert	Dijle	AMWA	535	645
112	01/01/1997	31/12/2002	Voer	Heverlee	Dijle	AMWA	841	51
115	01/05/1999	31/12/2002	Molenbeek	Heverlee	Dijle	AMWA	843	39.6
116	01/01/1997	31/12/2002	Molenbeek	Korbeek Lo	Dijle	AMWA	842	34.2
118	01/01/1997	31/12/2002	Laan	Terlanen	Dijle	AMWA	536	113.8
233	01/01/1997	31/12/2002	Zuunbeek	Sint-Pieters-Leeuw	Zenne	AMWA	576	66
022	01/01/1997	31/12/2002	Dommel	Overpelt	Maas	AMWA	512	92.7
024	01/01/1997	31/12/2002	Warmbeek	Achel	Maas	AMWA	578	85.1
042	01/01/1997	31/12/2002	Kleine A/Wildert	Essen-Wildert	Maas	AMWA	900	29
044	01/01/1997	31/12/2002	Kleine Aa-Weeri	Wuustwezel	Maas	AMWA	898/2	70
047	01/01/1997	31/12/2002	Mark	Minderhout	Maas	AMWA	897	94.2
048	01/01/1997	31/12/2002	Mark	Merkspias	Maas	AMWA	8127	30.2
513	01/01/1997	31/12/2002	A-beek	Bree	Maas	AMWA	833/2	61.3
517	11/10/2000	31/12/2002	Witbeek	Kessenich	Maas	AMWA	832	32.4
281	10/10/1996	28/02/2002	Vondelbeek	Opwijk	Dender	AMWA	9601	
282	20/03/1986	31/08/1994	Molenbeek	Mere	Dender	AMWA	530/3	40.5
284	07/01/1983	31/12/1997	Molenbeek	Iddergem	Dender	HIC	D28410102	15.56
285	24/01/1989	28/02/2002	Bellebeek	Essene	Dender	AMWA	529/2	88.5
286	07/01/1983	31/12/2002	Bellebeek (Lomt	St. Katharina Lombeek	Dender	AMWA	801	22.5
287	24/01/1989	31/12/2002	Steenvoortbeek	Ternat	Dender	AMWA	802	26.3
288	27/11/1985	28/02/2002	Molenbeek	Geraardsbergen	Dender	AMWA	932	19.1
289	01/01/1980	28/02/2002	Mark	Viane	Dender	AMWA	565/2	171.4

Toelichting bij de tabel: Telkens wordt het HIC\_nr. weergegeven als het nummer van de limnigraaf gebruikt door het Hydrologisch InformatieCentrum (HIC) van de Vlaamse Overheid, de periode waarover de metingen gebruikt werden, de waterloop en locatie van de limnigraaf, het rivierbekken waarbinnen deze waterloop zich bevindt, de beheerder van de limnigraaf (HIC of VMM-AOW of vroeger AMWA), het nummer van de limnigraaf volgens AMWA en de deelstroomgebiedsooppervlakte opwaarts van de limnigraaf.



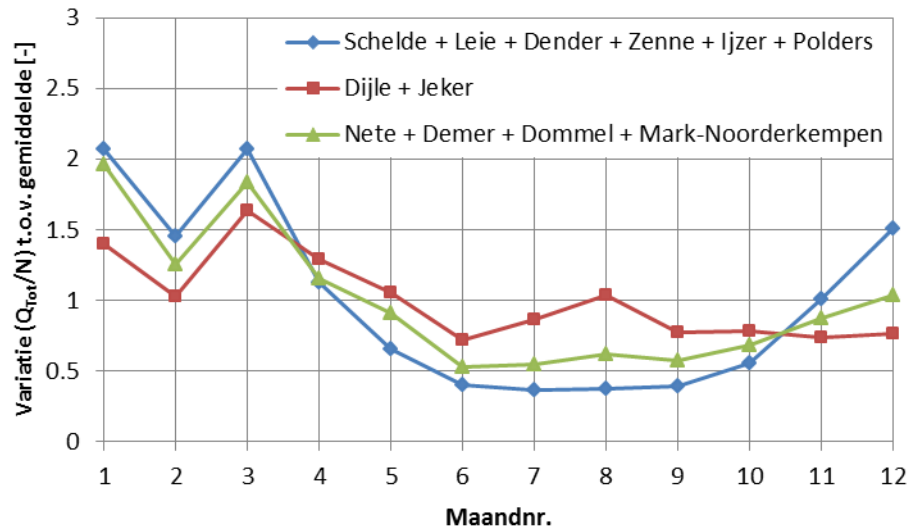
Tabel 10. Jaar- en deelstroomgebiedsgemiddelde debiet-neerslag en debiet-verhoudingen voor de bemeten deelbekkens in Vlaanderen (Willems et al., 2005).

Bekken	HIC_NR	Qtot/N	Qbf/N	Qif/N	Qof/N	Qbf/Qtot	Qif/Qtot	Qof/Qtot
Nete	52	0.531211	0.36657	0.108978	0.062374	0.659796	0.223318	0.129746
Nete	54	0.607987	0.416757	0.122127	0.072191	0.658779	0.216178	0.129608
Nete	58	0.653425	0.502065	0.114064	0.023859	0.743279	0.191943	0.049061
Nete	64	0.57916	0.381795	0.124179	0.070278	0.615908	0.237087	0.145507
Nete	73	0.53985	0.397109	0.088581	0.059673	0.707069	0.180542	0.12398
Nete	82	0.45898	0.319797	0.10957	0.028946	0.665851	0.261757	0.074561
Nete	86	0.508084	0.414347	0.058504	0.031578	0.799919	0.127663	0.076089
Demer	138	0.31177	0.201877	0.050916	0.060025	0.617029	0.176629	0.212189
Demer	141	0.31788	0.201754	0.072784	0.04719	0.607116	0.247433	0.171049
Demer	142	0.35216	0.206322	0.099903	0.047769	0.535552	0.310122	0.15548
Demer	143	1.411995	0.783477	0.354785	0.227856	0.538686	0.263138	0.175195
Demer	144	0.595588	0.391838	0.136883	0.060745	0.645079	0.241962	0.118002
Demer	145	0.319035	0.16212	0.095601	0.061113	0.479299	0.316115	0.205003
Demer	147	0.809719	0.595593	0.12248	0.10046	0.702477	0.167659	0.14089
Demer	148	0.453387	0.29524	0.08843	0.074266	0.617815	0.214663	0.182873
Demer	152	0.31339	0.267388	0.028875	0.024768	0.830616	0.106319	0.095175
Demer	153	0.354479	0.28306	0.040709	0.034845	0.767485	0.131984	0.117746
Demer	155	0.324437	0.259404	0.040743	0.025538	0.781271	0.1373	0.091861
Demer	156	0.319644	0.250376	0.049364	0.029298	0.769696	0.169775	0.113986
Demer	161	0.486032	0.376188	0.068476	0.04774	0.748944	0.156077	0.111058
Demer	163	0.240908	0.152591	0.055449	0.039067	0.631654	0.230983	0.126664
Demer	165	0.31208	0.223015	0.060099	0.027068	0.685534	0.210439	0.101983
Schelde	9	0.480408	0.258078	0.13724	0.082125	0.518435	0.297544	0.180215
Schelde-Z	342	0.531045	0.287208	0.14848	0.106257	0.526121	0.287828	0.21809
Schelde-Z	347	0.452307	0.212693	0.159376	0.084987	0.455529	0.35964	0.198218
Leie	403	0.448995	0.164592	0.160384	0.128444	0.345377	0.361594	0.299525
Leie	404	0.658759	0.299982	0.189371	0.183699	0.442994	0.288992	0.281413
Polders	422	0.353068	0.116079	0.169595	0.071348	0.381059	0.449055	0.19081
Polders	423	0.365932	0.143479	0.159162	0.064577	0.434814	0.417623	0.178982
Polders	425	0.442181	0.197075	0.163962	0.082488	0.862344	0.340826	0.172244
Polders	426	0.37847	0.124681	0.18285	0.075267	0.520603	0.419785	0.170161
Polders	442	0.441665	0.100592	0.226246	0.116068	0.399855	0.452995	0.230966
Ijzer	488	0.390244	0.14599	0.172306	0.068455	0.340282	0.463532	0.197336
Ijzer	491	0.357405	0.122401	0.156236	0.082821	0.371342	0.419857	0.238749
Ijzer	492	0.486298	0.243473	0.16379	0.084417	0.60671	0.324497	0.184716
Ijzer	496	0.348917	0.166986	0.12929	0.068821	0.618549	0.350118	0.205467
Dijle	98	0.441471	0.35716	0.051624	0.034965	0.786297	0.130683	0.090118
Dijle	112	0.344798	0.252702	0.038275	0.054304	0.707004	0.121267	0.183311
Dijle	115	0.418341	0.298106	0.07584	0.054322	0.694144	0.191432	0.145193
Dijle	116	0.391882	0.277309	0.071023	0.036284	0.689448	0.193339	0.111695
Dijle	118	0.675463	0.596741	0.05239	0.043506	0.875733	0.08568	0.075358
Zenne	233	0.282715	0.153085	0.102346	0.033199	0.508418	0.388085	0.133058
Maas-Dorn	22	0.536137	0.440515	0.062561	0.039381	0.80101	0.131542	0.091636
Maas-Dorn	24	0.348178	0.267849	0.048849	0.028474	0.752342	0.149424	0.091828
Maas-Dorn	42	0.547545	0.322419	0.128466	0.09191	0.567159	0.247201	0.186084
Maas-Dorn	44	0.334666	0.171313	0.108841	0.055597	0.507685	0.341764	0.182463
Maas-Dorn	47	0.302418	0.12708	0.093451	0.083685	0.395037	0.320377	0.291901
Maas-Dorn	48	0.279854	0.127184	0.086921	0.062745	0.430048	0.319871	0.21803
Maas	513	0.44508	0.365336	0.050903	0.033962	0.802926	0.125997	0.089984
Maas	517	0.800905	0.609683	0.145249	0.049402	0.749794	0.192626	0.07291
Dender	281	0.374535	0.248407	0.081512	0.043289	0.630515	0.236662	0.127444
Dender	282	0.930562	0.586745	0.21653	0.147262	0.67184	0.208058	0.133332
Dender	284	0.379217	0.24267	0.091254	0.029019	0.611692	0.259996	0.107998
Dender	285	0.439242	0.3094	0.075122	0.063237	0.668255	0.192027	0.176595
Dender	286	0.549105	0.39216	0.09205	0.058628	0.673004	0.19358	0.153966
Dender	287	0.346505	0.241306	0.067812	0.039971	0.664896	0.216226	0.144982
Dender	288	0.348355	0.193221	0.098571	0.053658	0.54351	0.291611	0.159317
Dender	289	0.357869	0.214788	0.095581	0.064681	0.593543	0.272291	0.18776



Figuur 27. Opdeling van Vlaanderen in drie gebieden met verschillende debietkarakteristieken (Voet, 1996).

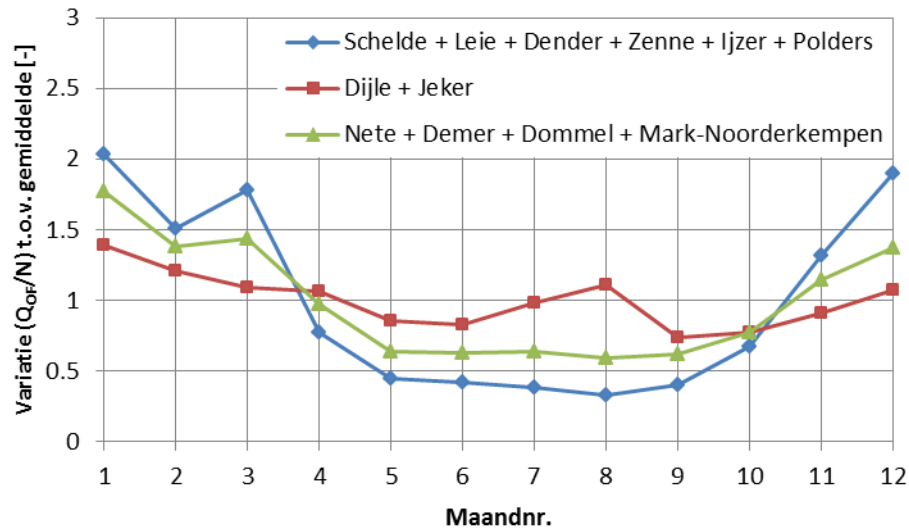
De runoff-coëfficiënten blijken verder sterke maandvariaties te vertonen; zie Figuur 28 t.e.m. Figuur 35.



Figuur 28. Gemiddelde relatieve maandvariatie van de Q<sub>tot</sub>/N verhouding voor drie groepen van stroomgebieden

Tabel 11. Gemiddelde relatieve maandvariatie van de Q<sub>tot</sub>/N verhouding voor drie groepen van stroomgebieden

Maandnr.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
<b>Schelde</b>	2.07	1.46	2.07	1.12	0.66	0.40	0.37	0.37	0.39	0.56	1.01	1.51
<b>Nete</b>	1.96	1.25	1.84	1.15	0.91	0.52	0.55	0.62	0.57	0.68	0.87	1.03
<b>Dijle</b>	1.40	1.03	1.63	1.29	1.05	0.71	0.86	1.03	0.77	0.78	0.73	0.76



Figuur 29. Gemiddelde relatieve maandvariatie van de Qof/N verhouding voor drie groepen van stroomgebieden

Tabel 12. Gemiddelde relatieve maandvariatie van de Qof/N verhouding voor drie groepen van stroomgebieden

Maandnr.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
<b>Schelde</b>	2.04	1.51	1.78	0.78	0.45	0.42	0.38	0.33	0.40	0.67	1.31	1.90
<b>Nete</b>	1.77	1.38	1.43	0.97	0.64	0.63	0.63	0.59	0.62	0.78	1.15	1.37
<b>Dijle</b>	1.39	1.21	1.09	1.06	0.86	0.82	0.98	1.11	0.74	0.77	0.91	1.07

In Willems et al. (2005) werden verder afhankelijkheden onderzocht tussen de jaar- en deelstroomgebiedsgemiddelde runoff-coëfficiënten en deelstroomgebiedseigenschappen zoals de hellingsgraad, het landgebruik en de bodemtextuur. Via “principal component” analyse en clusteranalyse werden drie geografische gebieden geïdentificeerd (Figuur 30) die gelijkaardige verbanden vertonen tussen de stroomgebiedsgemiddelde runoff-coëfficiënt en de stroomgebiedseigenschappen. Vertaald naar rivierbekkens komen deze drie gebieden overeen met: Groep 1: de stroomgebieden van de Polders, de Maas en de Nete; Groep 2: de stroomgebieden van de IJzer en de Leie; Groep 3: de stroomgebieden van de Dender, de Bovenschelde, de Dijle en de Zenne. Voor de Gentse Kanaalzone en de Benedenschelde waren er te weinig gegevens. In het Demerbekken bevinden zich gedeelten van elk van de drie groepen. Groep 1 werd verder opgedeeld in Groep 1a: het Netebekken en Groep 1b: de Polders en het Maasbekken. Verdere opdeling op basis van de bodemassociatie (Figuur 31 en Figuur 32) resulteerde in de volgende zeven gebieden:

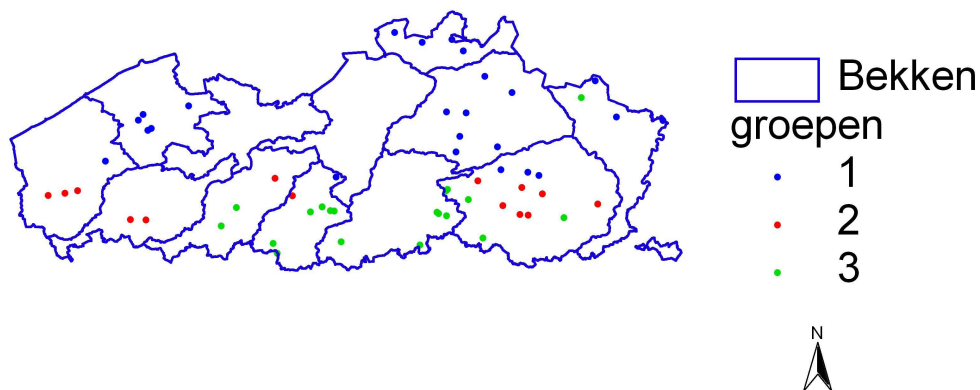
- Gebied 1: De kustvlakte en een deel van het Benedenschelde-bekken. Hier bevinden zich geen debietmeetstations, geen runoff-coëfficiënten konden dus afgeleid worden voor dit gebied.
- Gebied 2: Het volledige in Vlaanderen gelegen deel van het Maasbekken, een deel van het Benedenschelde-bekken, en een deel van het Dijlebekken. Hier bevinden zich de volgende debietmeetstations, met HIC-nummers: 22, 24, 42, 44, 47, 48, 141, 143 en 233. De HIC-nummers verwijzen naar de nummers van het Hydrologisch InformatieCentrum van de Vlaamse Overheid bij de debietmeetstations, zoals ook vermeld in Tabel 10.
- Gebied 3: Het volledige Netebekken, en een deel van het Demerbekken. Hier bevinden zich de volgende debietmeetstations, met HIC-nummers: 52, 54, 58, 64, 73, 82, 86, 147, 148, 161.

- Gebied 4: Delen van de bekken van Demer, Dijle, Dender, Bovenschelde en Benedenschelde. Hier bevinden zich de volgende debietmeetstations, met HIC-nummers: 9, 138, 142, 144, 145, 152, 153, 156, 163, 165 en 517.
- Gebied 5: De zuidelijke zone. Hier bevinden zich de volgende debietmeetstations, met HIC-nummers: 98, 122, 115, 116, 118, 155, 281, 282, 284, 285, 286, 287, 288, 342 en 347.
- Gebied 6: Groot deel van de Polders, en delen van de bekken van IJzer, Leie en Gentse Kanalen. Hier bevinden zich de volgende debietmeetstations, met HIC-nummers: 422, 423, 425, 426, 442 en 488.
- Gebied 7: Delen van de bekken van IJzer en Leie. Hier bevinden zich de volgende debietmeetstations, met HIC-nummers: 403, 404, 491, 492 en 496.

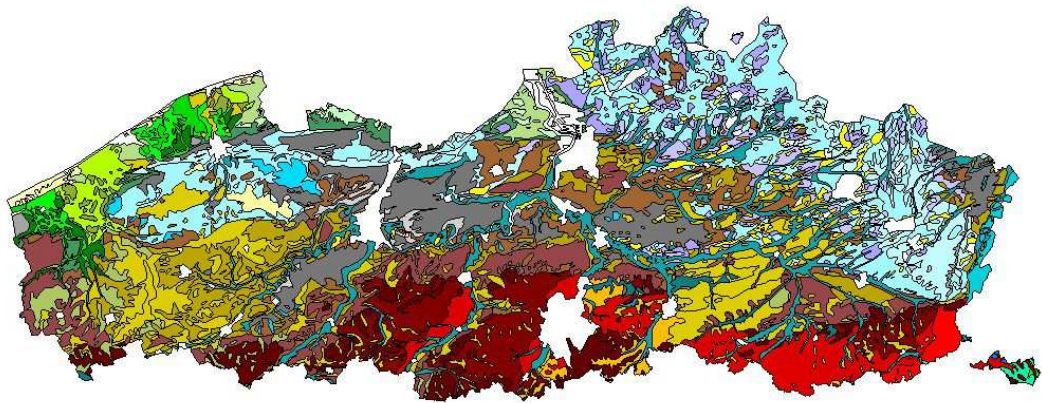
Deze gebieden zijn weergegeven in Figuur 34.

Voor elk van de groepen deelstroomgebieden werden meervoudige regressieverbanden afgeleid tussen de jaargemiddelde runoff-coëfficiënt en gebiedseigenschappen. Deze zijn van de volgende vorm:

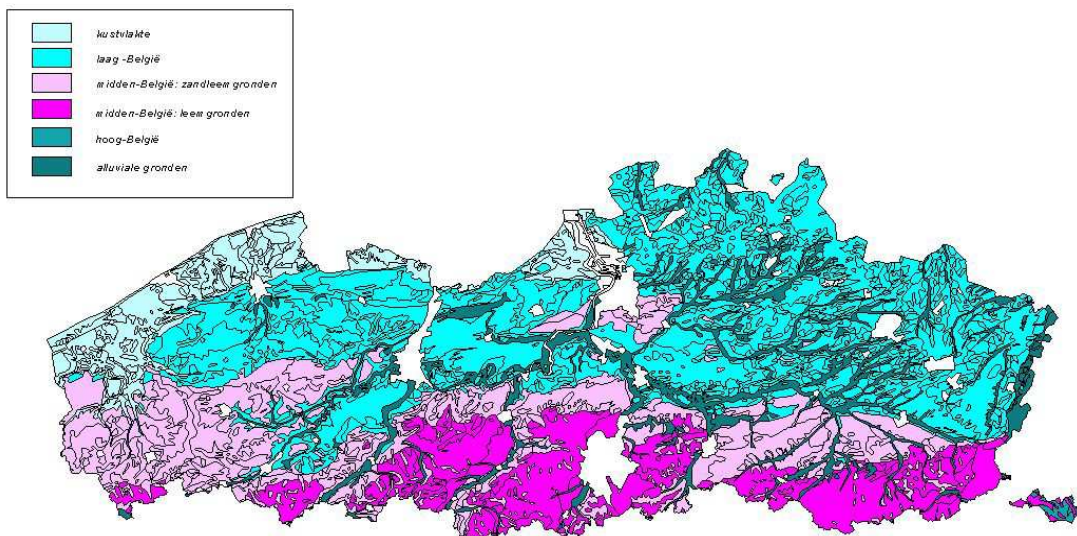
$$\text{Runoff-coëfficiënt} = \exp(a * \% \text{urbaan} + b * \% \text{akker} + c * \% \text{weiland} + d * \% \text{bos} + e * \% \text{heide} + f * \% \text{water} + g * \% \text{wegen} + h * \text{helling} + i * \% \text{zand} + j * \% \text{leem} + k * \% \text{klei} + l * \% \text{veen} + m)$$



Figuur 30. Clustering van de bemeten deelstroomgebieden in drie groepen

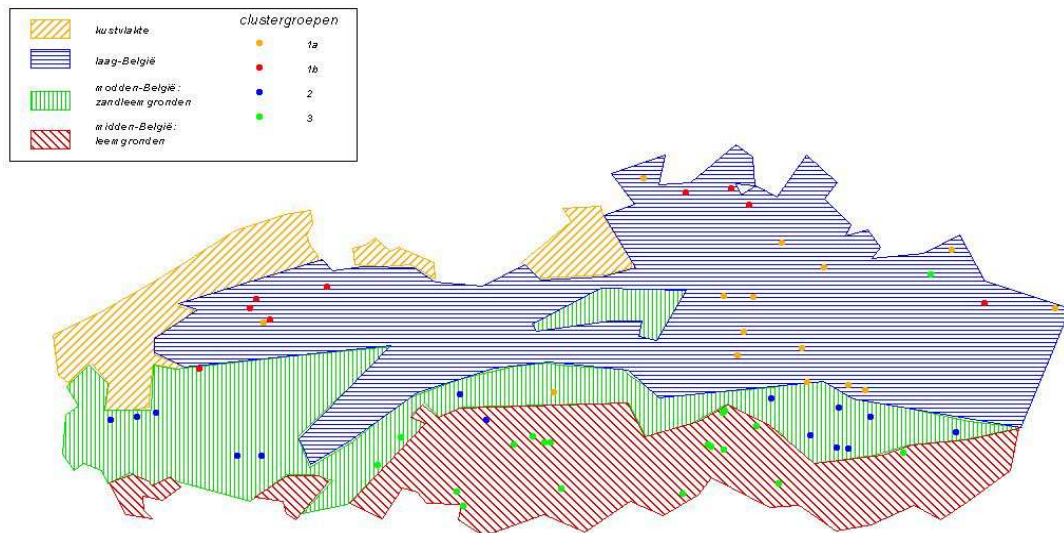


Figuur 31. Bodemassociatiekaart van Vlaanderen

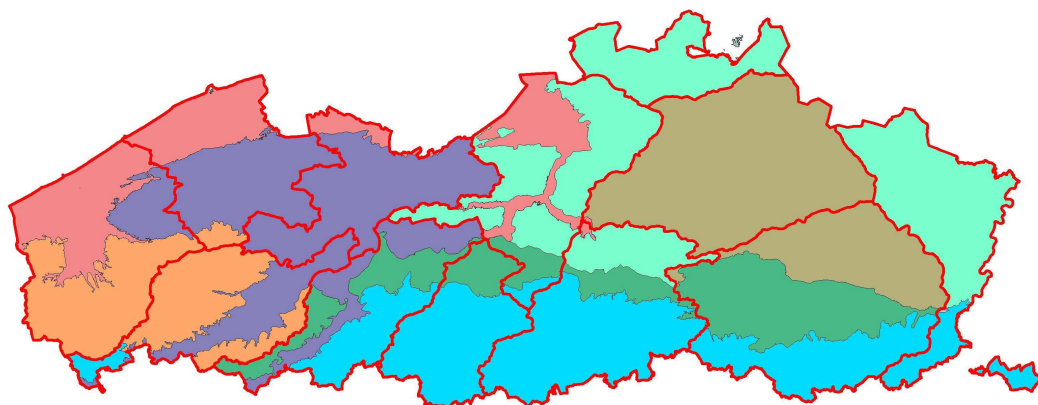


Figuur 32. Vereenvoudigde bodemassociatiekaart van Vlaanderen

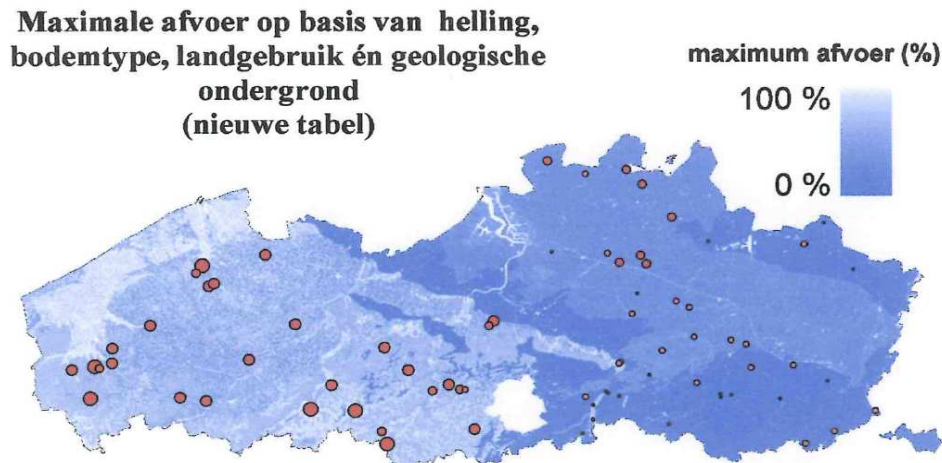




Figuur 33. Schematische voorstelling van de bodemassociatiekaart van Vlaanderen met de clustergruppen



Figuur 34. Opdeling van Vlaanderen in zeven gebieden met gelijkaardige karakteristieken inzake runoff-coëfficiënt rekening houdend met de bodemassociatie (legende: zie zeven gebieden zoals hiervoor in de tekst opgelijst)



Figuur 35. Potentiële runoff-coëfficiënten voor 74 bemeten stroomgebieden in Vlaanderen (grootte van de cirkel is evenredig met de runoff-coëfficiënt). De blauwe achtergrondkleur geeft de variatie weer zoals verwacht op basis van de runoff-coëfficiënten in Tabel 13 i.f.v. helling, bodemgebruik, bodemtype en geologische ondergrond (Cabus & De Jongh, 2007)

Tabel 13. Stroomgebiedsgemiddelde runoff-coëfficiënt  $\phi$  in functie van geologische ondergrond, bodemgebruik, helling en bodemtype (Cabus & De Jongh, 2007).

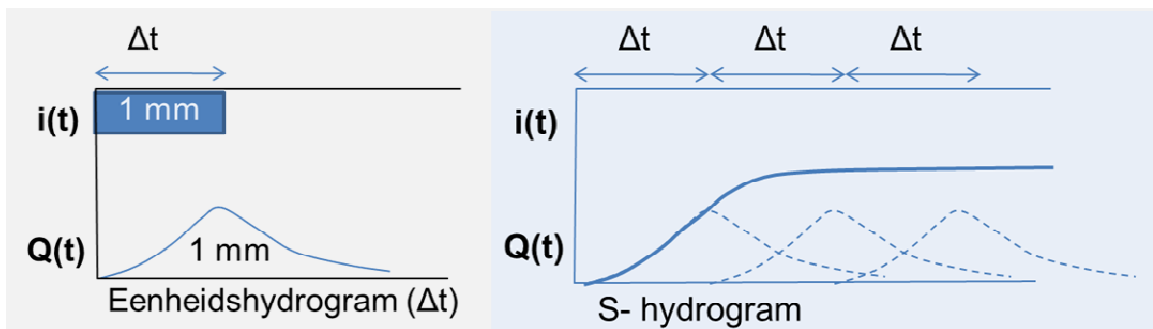
Geologie	Bodemgebruik	Helling [%]	Bodemtype		
			Zand Lemig zand Lichte zandleem	Zandleem Leem	Klei Zware klei
Ieperiaan_Maldegem	Akkers	<5	0.34	0.62	0.73
Ieperiaan_Maldegem	Akkers	>5	0.51	0.88	0.91
Ieperiaan_Maldegem	Weiland/bos	<5	0.73	0.62	0.82
Ieperiaan_Maldegem	Weiland/bos	>5	0.74	0.68	0.88
Ieperiaan_Maldegem	Braakland/bebouwing	<5	0.54	0.47	0.81
Ieperiaan_Maldegem	Braakland/bebouwing	>5	0.71	0.74	0.85
Rupeliaan/Landeniaan	Akkers	<5	0.12	0.12	0.16
Rupeliaan/Landeniaan	Akkers	>5	0.17	0.20	0.22
Rupeliaan/Landeniaan	Weiland/bos	<5	0.14	0.14	0.19
Rupeliaan/Landeniaan	Weiland/bos	>5	0.18	0.19	0.20
Rupeliaan/Landeniaan	Braakland/bebouwing	<5	0.15	0.17	0.20
Rupeliaan/Landeniaan	Braakland/bebouwing	>5	0.17	0.22	0.23
Diestiaan/Scaldisiaan	Akkers	<5	0.27	0.27	0.38
Diestiaan/Scaldisiaan	Akkers	>5	0.39	0.46	0.51
Diestiaan/Scaldisiaan	Weiland/bos	<5	0.31	0.33	0.44
Diestiaan/Scaldisiaan	Weiland/bos	>5	0.41	0.42	0.46
Diestiaan/Scaldisiaan	Braakland/bebouwing	<5	0.35	0.39	0.46
Diestiaan/Scaldisiaan	Braakland/bebouwing	>5	0.39	0.50	0.54

### 3.4.3.2 Stap 2: Berekening afvoerdebiet

#### Enkelvoudig eenheidshydrogram

De netto neerslag  $R$  kan omgezet worden in een tijdsvariabel afstromingsdebiet door een eenheidshydrogram te veronderstellen en door vermenigvuldiging met de oppervlakte  $A$  van het deelstroomgebied. Hoe dit precies gebeurt wordt verder concreet geschetst bij de SCS-methode, de rationele methode en het lineair reservoirmodel.

Het eenheidshydrogram beschrijft de transferfunctie tussen de neerslaggebeurtenis (het neerslaghyetogram) en het afvoerhydrogram. Het eenheidshydrogram kan afgeleid worden uit een opgemeten hyetogram en bijbehorend hydrogram van een bui met (nagenoeg) constante intensiteit en duur  $\Delta t$ . Men kiest een intense, relatief korte bui met een neerslagintensiteit die zoveel mogelijk gelijkmatig verdeeld is in ruimte en tijd en niet beïnvloed is door voorgaande of navolgende buien. Het hyetogram moet dat van de effectieve neerslag zijn ("rainfall excess": neerslag die aanleiding geeft tot oppervlakteafstroming; d.i. de bruto neerslag min evapotranspiratie, infiltratie en oppervlakteberging). Deze effectieve neerslag is de netto neerslag  $R$  zoals berekend in deel 3.4.3.1. Men trekt van het opgemeten hydrogram de basisafvoer en eventueel de interflow (de bijdrage tot respectievelijk het grondwater en de onverzadigde zone) af, om alleen de oppervlakteafstroming over te houden. Dit kan men doen gebruik makend van de deelstroomfilter zoals hiervoor besproken. Daarna reduceert men de ordinaten, zodat het volume van het hydrogram (per eenheid van stroomgebiedsoppervlakte) gelijk wordt aan 1 mm. Het resultaat is het eenheidshydrogram behorende bij een bepaalde  $\Delta t$  (Figuur 36). Eenheidshydrogrammen voor andere buiduren  $\Delta t$  kunnen bekomen worden door samenstelling van hetzelfde eenheidshydrogram voor een aantal opeenvolgende tijdstappen; ze hebben typisch de vorm van een S-hydrogram (Figuur 36). Met behulp van enkele eenheidshydrogrammen voor relatief korte neerslagperiodes, kan men dan door superpositie het hydrogram synthetiseren voor een neerslaggebeurtenis met andere intensiteiten en duren (Chow, 1964; Chow et al., 1988).



Figuur 36. Het eenheidshydrogram horende bij een bepaalde buiduur  $\Delta t$  (links) en het S-hydrogram voor andere buiduren door samenstelling van het eenheidshydrogram (rechts).

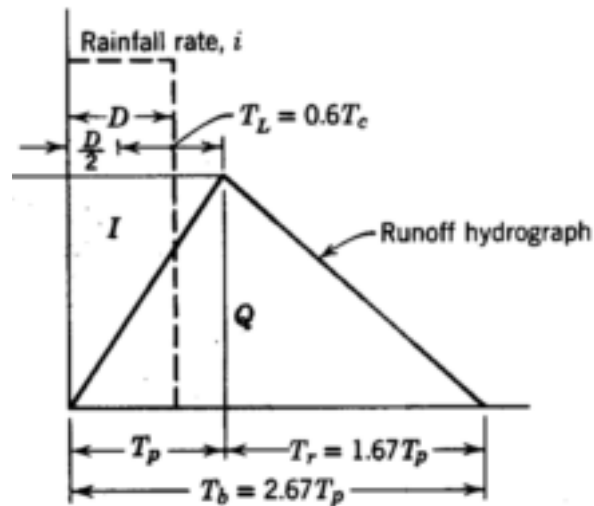
#### SCS-methode

De SCS-methode veronderstelt klassiek een driehoekig eenheidshydrogram; zie Figuur 37. De tijd tot de piek van het driehoekig eenheidshydrogram ( $T_p$ ) wordt berekend als de halve buiduur plus 60% van de concentratietijd  $T_C$ :

$$T_p = \frac{D}{2} + 0.6 T_C$$

Indien de buiduur gelijk gesteld wordt aan de concentratietijd vereenvoudigt deze formule zich tot:  $T_p = 1.1 T_C$ . De duur van de dalende flank van het driehoekig eenheidshydrogram wordt gelijk gesteld aan 167% van de tijd tot het piekdebiet ( $T_r = 1.67 T_p$ ), zodat de totale duur van het hydrogram (de basis van de driehoek) berekend wordt als  $T_b = 2.67 T_p$ .





Figuur 37. Driehoekig eenheidshydrogram gebruikt in de SCS-methode.

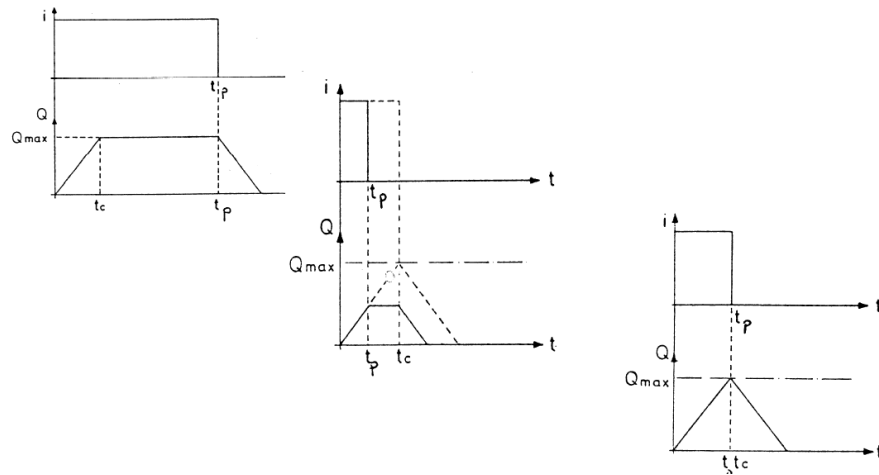
Omdat de SCS-methode meestal wordt toegepast in combinatie met een enkelvoudige neerslaggebeurtenis wordt het buivolume horende bij die gebeurtenis (met een duur gelijk aan de concentratietijd) verdeeld in de tijd, vertraagd en afgevlakt, volgens dit driehoekig eenheidshydrogram. Aangezien de basis van de driehoek gelijk is aan  $T_b = 2.67 T_p$  en het totaal volume van het afstromingshydrogram gelijk aan het volume netto neerslag ( $R$  in deel 3.4.3.1), kan het piekdebiet  $Q_{max}$  worden berekend via eenvoudige driehoeksmeetkunde:

$$Q_{max} = \frac{2RA}{T_b}$$

Uiteraard dient de vermenigvuldiging met de gebiedsoppervlakte  $A$  om het netto neerslagvolume  $R$  (vb. in mm) om te zetten in een debiet (vb. in  $m^3/s$ ).

#### Rationele methode

De rationele methode gaat intrinsiek uit van een trapezoidaal eenheidshydrogram, zoals geschetst in Figuur 38. Er wordt verondersteld dat een deel van het stroomgebied bijdraagt aan de afvoer, proportioneel met de tijd vanaf het begin van de bui. Het afvoerdebiet stijgt dus lineair van het begin van de bui tot een tijd gelijk aan de concentratietijd van het stroomgebied. Voor een buiduur langer dan de concentratietijd blijft het piekafvoerdebiet constant tot het einde van de bui. Wanneer de bui afgelopen is, daalt het afvoerdebiet opnieuw proportioneel met de tijd naar nul. Voor een bui met een duur gelijk aan de concentratietijd wordt alzo een gelijkbenig driehoekig eenheidshydrogram bekomen. Dit is dus een vereenvoudigde versie van het eenheidshydrogram beschouwd in de SCS-methode. Indien de buiduur korter is dan de concentratietijd wordt een trapezoidaal eenheidshydrogram met een lager piekdebiet bekomen.



Figuur 38. Het eenheidshydrogram beschouwd bij de rationele methode.

Omdat de rationele methode wordt toegepast in combinatie met een enkelvoudige neerslaggebeurtenis wordt het buivolume horende bij die gebeurtenis (dus met een duur gelijk aan de concentratietijd) verdeeld in de tijd, vertraagd en afgevlakt, volgens het trapezoidaal eenheidshydrogram. Het piekdebiet kan opnieuw, zoals geschetst bij de SCS-methode, worden berekend via eenvoudige driehoeksmetkunde. Bij een buiduur gelijk of groter aan de concentratietijd  $T$ , wordt het piekdebiet  $Q_{max}$  berekend als:

$$Q_{max} = \frac{R A}{T}$$

Voor een kleinere buiduur  $D=t_p$  wordt het piekdebiet gereduceerd tot:

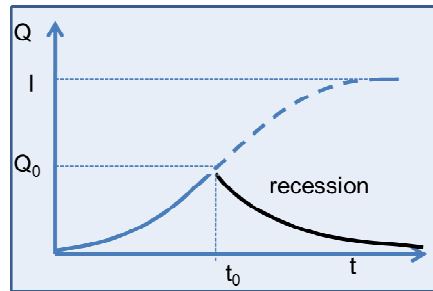
$$Q_{max} = \frac{D R A}{T^2}$$

#### Lineair reservoirmodel

De lineaire reservoirmodellen die klassiek in conceptuele reservoirmodellen gebruikt worden hebben een exponentieel eenheidshydrogram:

$$u_0(t) = \frac{1}{k} \exp\left(-\frac{t}{K}\right),$$

zoals geschetst door de dalende flank in Figuur 24. Een zeer kortstondige neerslaginvoer leidt tot een plotse stijging in het bergingsvolume en uitvoerdebiet, gevolgd door een exponentiële daling. Indien de bui een bepaalde duur heeft ( $t_0$  in Figuur 39), leidt dit tot het eenheidshydrogram van Figuur 39. Vergelijking met Figuur 38 leert dat de lineaire stijgende en dalende flanken bij het hydrogram beschouwd in de rationele methode bij de reservoirmethode worden vervangen door exponentieel stijgende en dalende flanken. De vorm wordt bepaald door de  $k$ -waarde, zoals hiervoor besproken. Deze  $k$ -waarde wordt ook de reservoirconstante of tijdsconstante of recessieconstante genoemd. Ze bepaalt de snelheid waarmee het debiet stijgt of daalt tijdens en na een neerslaggebeurtenis. De recessieconstante  $k$  kan afgeleid worden uit de debietmeetreeks (indien beschikbaar) of zoals voor de concentratietijd geschat op basis van gebiedseigenschappen (vb. helling en landgebruik voor de  $k$ -waarde van oppervlakteaftstroming).



Figuur 39. Het eenheidshydrogram beschouwd bij het reservoirmodel.

Indien een debietmeetreeks beschikbaar is opwaarts of verder afwaarts in het stroomgebied, of in een nabijgelegen stroomgebied met gelijkaardige gebiedseigenschappen, kan de recessieconstante  $k$  geschat worden op basis van de vorm van de dalende flanken van de hydrogrammen (zie voorbeelden in Figuur 19, Figuur 20 en Figuur 21). Tijdens droge perioden heeft het neerslagafstromingsdebiet  $q$  een exponentieel dalend verloop:

$$q(t) = \exp\left(-\frac{t}{k}\right) q(t-1)$$

Na logaritmische transformatie van het debiet wordt dit verloop lineair en is de inverse helling gelijk aan de tijdsconstante  $k$ :

$$\frac{1}{k} = \ln(q(t-1)) - \ln(q(t))$$

Figuur 20 en Figuur 21 tonen hoe deze helling grafisch/visueel kan geschat worden door het iteratief aanpassen van de helling of  $k$ -waarde tot deze helling gemiddeld voor een groot aantal debietrecessieperioden blijkt overeen te komen met de waargenomen lineaire daling van het debiet.

Merk op dat de recessieconstante verschilt voor de verschillende hydrologische deelstromen: in grootteorde bedraagt ze voor stroomgebieden met een oppervlakte van  $10 \text{ km}^2$  meerdere weken tot een maand voor grondwaterafstroming, één tot enkele dagen voor interflow, en enkele uren voor oppervlakteafstroming. De  $w$ -parameters in de deelstroomfilter (zie deel 3.4.2) geven aan hoe het totale neerslagvolume verdeeld wordt over de drie deelstromen. Het totale afstromingsdebiet wordt dus bepaald door drie reservoirmodellen of exponentiële eenheidshydrogrammen in parallel. Uiteraard bepaalt vooral het reservoirmodel of eenheidshydrogram van de oppervlakte-afstromingscomponent de piekdebieten. Het driehoekig of trapezoidaal eenheidshydrogram dat bij de SCS- of rationale methode wordt beschouwd stelt derhalve enkel deze component voor, en verwaarloost de basisafvoer en interflow. De meeste conceptuele hydrologische modellen (zie deel 3.4.2) gebruiken ook zulke parallelschakeling van reservoirmodellen.

#### Op basis van debietmeetgegevens

Een andere methode om de piekafvoer of het afvoervolume voor een bepaalde terugkeerperiode te schatten is door gebruik te maken van de debietmeetgegevens van een dichtstbijzijnd debietmeetstation. Meestal zullen deze meer stroomafwaarts gelegen zijn dan de erosiebestrijdingsmaatregel; dus voor een ruimer stroomgebied. De debieten kunnen echter herschaald worden. Door proportioneel met de oppervlakte te herschalen wordt de veronderstelling gemaakt dat de afvloeiing uniform is over het ganse deelstroomgebied opwaarts van het debietmeetstation. Door Van Hoestenbergh et al. (2008) werd op basis van metingen in 30 deelstroomgebieden van 240 ha tot 26000 ha het volgende verband afgeleid tussen de piekafvoer  $Q$  (in  $l/(s \cdot ha)$ ) en de deelstroomgebiedsoppervlakte  $A$  (in ha):

$$Q = 10^{-0.3631 \ln(A) + 1.4138}$$

Let wel dat deze formule niet noodzakelijk extrapolerbaar is naar kleinere stroomgebiedsoppervlakten, maar het geeft een indicatie. Ook had het verband een niet te

verwaarlozen fout; de correlatiecoëfficiënt tussen gemeten en met de formule berekende piekafvoeren bedroeg 0.6.

Uiteraard is de piekafvoer afhankelijk van een veel groter aantal gebiedseigenschappen dan enkel de stroomgebiedsoppervlakte. Een verdere uitbreiding zou er in kunnen bestaan om het regressieverband niet enkel af te leiden op basis van één soort gebiedseigenschap maar meerdere. Dit werd recent gedaan door Auerswald et al. (2012) voor een groot aantal debietmeetwaarden (meer dan 20000) via een regressieverband dat ook rekening houdt met bodemeigenschappen, zoals de bodemtextuur en landgebruikseigenschappen, zoals het gewastype. Ook het tijdsvariabel karakter van de neerslagafstroming werd meegenomen door het bodemvochtgehalte en de neerslagintensiteit als onafhankelijke variabele mee te nemen in het regressieverband. Er werd een hoge nauwkeurigheid bekomen, alhoewel men voorzichtig moet zijn met regressieverbanden die een groot aantal regressieparameters (dus vrijheidsgraden) bevatten. Net zoals de gedetailleerde fysisch-gebaseerde hydrologische modellen kunnen zij sterk overgeparameteriseerd zijn. Men zou slechts een deel van de metingen mogen gebruiken voor kalibratie en het overige deel om het regressieverband te valideren.

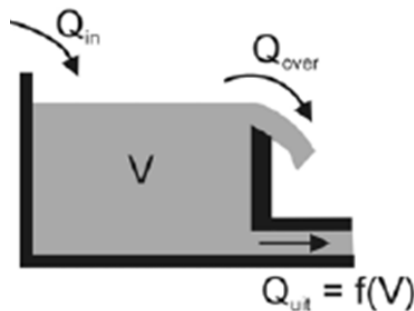
Voor Vlaamse condities bedraagt de piekafvoer van een neerslagintensiteit met een terugkeerperiode van 10 jaar voor kleine opwaartse stroomgebiedjes van grootteorde 5ha meestal tussen 8 l/(s.ha) en 20 l/(s.ha). Voor grotere stroomgebieden is deze lager. Voor stroomgebieden van grootteorde 200 ha bedraagt de piekafvoer gemiddeld voor Vlaanderen eerder 5 l/(s.ha) (zie deel 8).

### 3.5 Modelling opvangsysteem

Opvangsystemen, zoals een bufferbekken achter een dam kunnen hydraulisch eenvoudig gemodelleerd worden met een bergingsreservoirmodel. In dit model wordt het bergingsvolume continu gesimuleerd via het concept van behoud van volume:

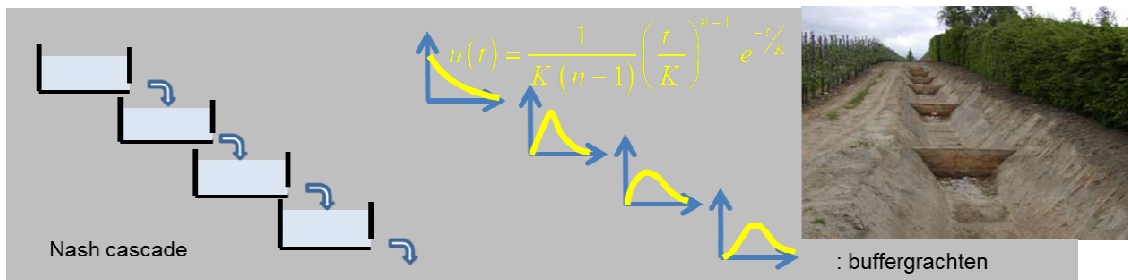
$$V(t) = V(t-1) + q_{in} - q_{uit} - q_{over}$$

met  $V(t)$  en  $V(t-1)$  het gebufferd volume tijdens de tijdstappen  $t$  en  $t-1$ ,  $q_{in}$  het instromend neerslagafstromingsdebiet van het opwaarts stroomgebied,  $q_{uit}$  het doorvoerdebiet, en  $q_{over}$  het overloopdebiet (Figuur 40). Eventueel kunnen ook het verdampingsdebiet en het infiltratiedebiet ingerekend worden. Het infiltratiedebiet kan constant verondersteld worden, of afhankelijk van het bodemvochtgehalte. Het tijdsvariabel verloop van het bodemvochtgehalte kan afgeleid worden uit de simulatieresultaten van het hydrologisch model (zie deel 3.4).



Figuur 40. Het reservoirmodel

In geval het opvangsysteem bestaat uit verschillende bufferbekkens in hetzelfde stroomgebiedje, kunnen deze gemodelleerd worden door verschillende reservoirmodellen in serie of parallel te plaatsen (afhankelijk van de precieze configuratie van deze bufferbekkens, al dan niet met extra neerslagafstroming). Buffergrachten kunnen eveneens gemodelleerd worden door reservoirmodellen in serie. De uitvoer van het vorige, opwaartse reservoir wordt dan als invoer  $p$  gelegd aan het volgende. Zulke seriële schakeling van reservoirmodellen wordt ook een cascade of Nash-cascade genoemd (Chow, 1964).



Figuur 41. Nash cascade en het aangepast eenheidshydrogram, ideaal voor de modellering van buffergrachten

De berekening van het instromend neerslagafstromingsdebiet van het opwaarts stroomgebied werd hiervoor in deel 3.4 besproken. Het doorvoerdebiet wordt hierna in deel 3.6 toegelicht, en het overloopdebiet in deel 3.7.

## 3.6 Berekening of keuze van het doorvoerdebiet

### 3.6.1 Gravitair leeglopend opvangsysteem: lineair reservoirmodel

Een gravitair leeglopend opvangsysteem kan goed benaderd worden door een lineair reservoirmodel. In dat model is het doorvoerdebiet lineair afhankelijk van het bergingsvolume:

$$q_{uit} = \frac{V(t)}{k}$$

met  $k$  de reservoirconstante of recessieconstante. Een lineair reservoirmodel dat gevuld wordt met een continu in de tijd variërend instroomdebiet  $q_{in}$  kan als volgt opgelost worden met de methode van de eindige differenties:

$$q_{uit}(t) = \exp\left(-\frac{1}{k}\right) q_{uit}(t-1) + \left(1 - \exp\left(-\frac{1}{k}\right)\right) \left(\frac{q_{in}(t-1-t_0) + q_{in}(t-t_0)}{2}\right)$$

Het doorvoerdebiet op een bepaald tijdstip  $t$  kan berekend worden als functie van het doorvoerdebiet op het vorige tijdstip ( $t-1$ ) en het gemiddeld neerslagafstromingsdebiet ( $q_{in}$ ) gedurende de tijdstap  $[t-1; t]$ . Dit laatste gemiddeld neerslagafstromingsdebiet is in de formule berekend door uitmiddeling van de ogenblikkelijke debieten op de tijdstippen  $t$  en  $t-1$ :  $\frac{q_{in}(t-1) + q_{in}(t)}{2}$ . De bijkomende parameter  $t_0$  is een tijdsvertraging op de invoer, die vaak 0

wordt gekozen maar die nuttig is in gevallen waarbij de neerslagafstroming niet onmiddellijk tot berging en doorvoer leidt. De parameter  $k$  komt overeen met de gemiddelde verblijftijd van het water in het opvangsysteem. Deze kan berekend worden als het maximaal buffervolume gedeeld door het gemiddeld doorvoerdebiet. Dit doorvoerdebiet kan berekend worden op basis van de afmetingen van de doorvoerleiding. Hiervoor worden de debietformules gebruikt voor de stroming door openingen of leidingen; zie hierna in deel 3.6.2 en 3.6.3.

### 3.6.2 Stroming door openingen: knijpopening of schuifafsluiter

Bij een opening met vrije uitstroom (vb. knijpopening of opening onder een schuifafsluiter; Figuur 42), dus zonder hinder van de afwaartse waterhoogte, wordt het debiet berekend via (Berlamont, 1992, 2004; of andere hydraulische standaard handboeken):

$$q_{uit} = C_d A_0 \sqrt{2gh} \quad (14)$$

met  $C_d$  de debietcoëfficiënt,  $A_0$  de oppervlakte van de opening [ $m^2$ ],  $g$  de valversnelling [ $m/s^2$ ],  $h$  de waterhoogte ten opzichte van het zwaartepunt van de opening [ $m$ ] en het berekende doorvoerdebiet  $q_{uit}$  in  $m^3/s$ . Tabel 15 geeft een overzicht van het lozingsdebiet van

knijpleidingen in functie van de waterhoogte en de diameter van de knijpopening, voor een gangbare debietcoëfficiënt 0.85. De debietcoëfficiënt is afhankelijk van de oppervlakte van de knijpopening, relatief t.o.v. de wateroppervlakte in het opvangsysteem onmiddellijk opwaarts van de knijpopening (Figuur 43 en Tabel 14). In deze figuur is  $A_1$  de oorspronkelijk doorsnede,  $A_c$  de ingesnoerde doorsnede en  $A_0$  de oppervlakte van de opening.

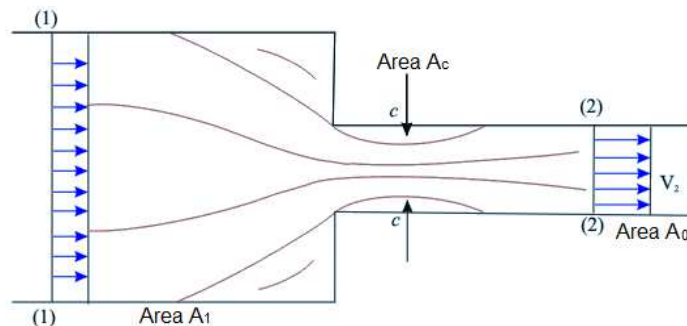


Knijpconstructie via buis

Buis met knijplaat

Schuifafsluiter

Figuur 42. Voorbeelden van doorvoerconstructies



Figuur 43. Oppervlaktecontractie  $A_0/A_1$  bepaalt de debietcoëfficiënt.

Tabel 14. Debietcoëfficiënt in functie van de oppervlaktecontractie  $A_0/A_1$ .

$A_0/A_1$	0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1
$C_d$	0	0.32	0.45	0.55	0.63	0.71	0.77	0.84	0.89	0.95	1

Tabel 15. Lozingsdebiet knijpleidingen (in l/s) in functie van de waterhoogte in het bekken en de diameter van de knijpopening, voor een debietcoëfficiënt 0.85.

Waterhoogte [m]:	Diameter knijpopening [mm]:									
	100	125	150	160	200	250	300	315	400	500
0.2	13.2	20.7	29.8	33.9	52.9	82.7	119.0	131.2	211.6	330.6
0.4	18.7	29.2	42.1	47.9	74.8	116.9	168.3	185.6	299.2	467.6
0.6	22.9	35.8	51.5	58.6	91.6	143.2	206.1	227.3	366.5	572.6
0.8	26.4	41.3	59.5	67.7	105.8	165.3	238.0	262.4	423.2	661.2
1	29.6	46.2	66.5	75.7	118.3	184.8	266.1	293.4	473.1	739.3
1.2	32.4	50.6	72.9	82.9	129.6	202.5	291.5	321.4	518.3	809.8
1.4	35.0	54.7	78.7	89.6	140.0	218.7	314.9	347.2	559.8	874.7

Bij een schuifafsluiter kan een gelijkaardige tabel afgeleid worden op basis van (14), maar is de oppervlakte van de opening niet afhankelijk van één parameter, de diameter van de opening zoals bij een knijpleiding, maar ook van de breedte en de hoogte van de vrije opening onder de schuif.

### 3.6.3 *Stromingen door leidingen*

Bij leidingen van een zekere lengte (bijvoorbeeld rioolbuizen) die onder druk stromen, wordt het debiet bepaald door het niveauverschil in de punten op- en afwaarts van de leiding. Volgens de wet van Bernoulli geldt namelijk dat:

$$\Delta h = \Delta F = K \cdot Q^2 \cdot L + (1 + \zeta) \cdot K' \cdot Q^2$$

Waarin:

$$K = n^2 \frac{P^{4/3}}{A^{10/3}} = 10.294 \cdot \frac{n^2}{D^{16/3}}$$

$$K' = \frac{1}{2gA^2} = \frac{0.083}{D^4}$$

Met  $D$  de diameter van de leiding,  $L$  de lengte van de leiding,  $n$  de Manningcoëfficiënt (typisch 0.013 voor rioolleidingen) en  $\zeta$  de ladingsverliescoëfficiënt. Meestal is  $(1+\zeta)K' \ll KL$ , zodat het debiet berekend kan worden als:

$$Q = \sqrt{\frac{D^{16/3} \cdot \Delta h}{10.294 \cdot n^2 \cdot L}}$$

Het verschil in waterpeil tussen het opwaartse en afwaartse punt kan voor de eenvoud gelijk verondersteld worden aan het maximale waterpeil in het bekken.

### 3.6.4 *Constant doorvoerdebiet: wervelventiel*

Bij een wervelventiel wordt een constant debiet doorgelaten.

Het maximaal toelaatbare doorvoerdebiet van de buffervoorziening hangt typisch af van de capaciteit van het afwaartse ontvangende watersysteem. Deze is ofwel bepaald/opgelegd door de beheerder van het afwaartse systeem of kan specifiek gekwantificeerd worden via hydrologische-hydraulische modellering van het afwaartse watersysteem.

### 3.6.5 *Keuze doorvoerdebiet*

De keuze van het doorvoerdebiet, de doorvoerrelatie en de hoogte van de knijpopening zullen een invloed hebben op het dynamisch gedrag van het bufferbekken. Een hoger doorvoerdebiet zal ervoor zorgen dat er meer water wordt weggevoerd door de knijpopening. De overstortfrequentie verkleint daardoor. Door de grotere uitstroom daalt echter de verblijftijd in het reservoir en zullen er bijgevolg ook minder sedimenten kunnen bezinken. Een gelijkaardige analyse kan gemaakt worden bij de keuze van de hoogte van de knijpopening. Door de knijpopening hoger te leggen dan het laagste punt van het bufferbekken is er een dood volume in het bufferbekken waarin de sedimenten ongestoord kunnen bezinken. Het dood volume zorgt er echter ook voor dat de effectieve bergingscapaciteit verminderd, dus dat de overstortfrequentie toeneemt, met modderoverlast tot gevolg. De concrete keuze zal steeds afhankelijk zijn van de specifieke situatie en berust best op expertkennis van de erosiecoördinator naast de hydraulische berekeningsresultaten voor de overstortfrequentie en de efficiëntie van de sedimentopvang.

## 3.7 **Berekening van de afwaartse veiligheid (veiligheid tegen overstroming langs het afwaartse ontvangende oppervlaktewater) of de keuze van de aanvaardbare frequentie van overloop**

### 3.7.1 *Standaard-keuze aanvaardbare frequentie van overloop*

Volgens de Europese norm EN 752 (voor External Drain and Sewer Systems), is de aanvaardbare frequentie van overloop van opvangsystemen gemiddeld één keer om de 2 tot 10 jaar wanneer waterlopen of wegen worden bedreigd door de overloop, en meer dan 10 jaar

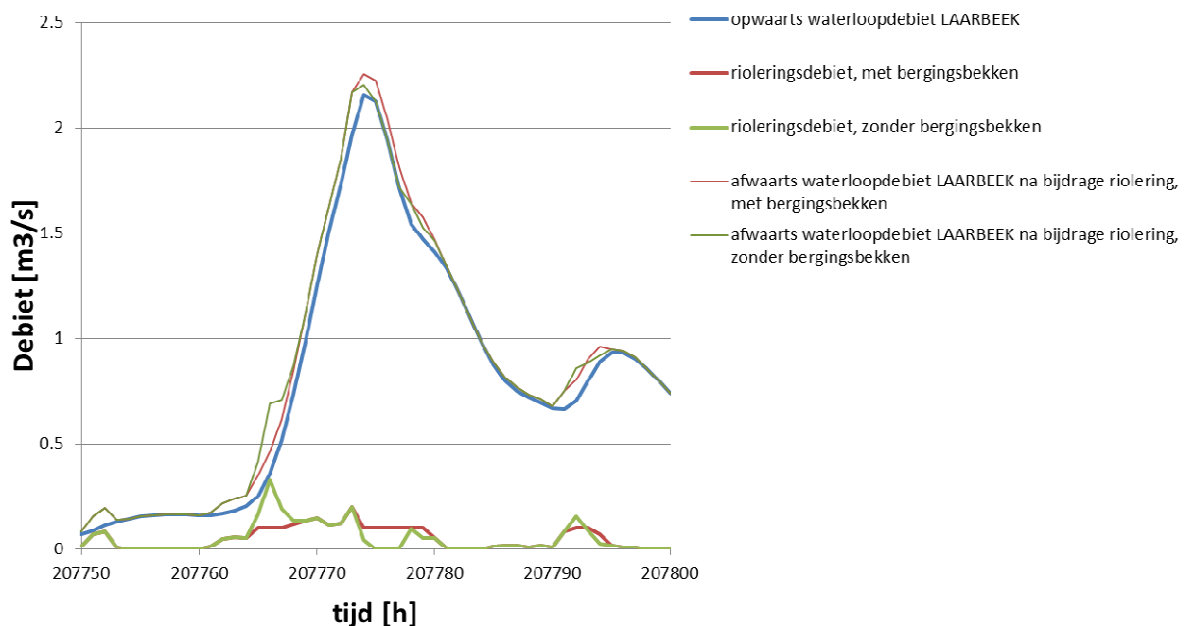
indien woningen worden bedreigd. Meer specifiek worden in dat geval de volgende aanvaardbare terugkeerperioden van overloop gedefinieerd:

- 10 jaar voor landelijk gebied
- 20 jaar voor residentiële gebieden
- 30 jaar voor steden en commerciële centra
- 50 jaar voor tunnels.

In de huidige Vlaamse praktijk bij het ontwerpen van erosiebestrijdingsmaatregelen (zie deel 8) worden vaak terugkeerperioden tussen de 2 – 20 jaar beschouwd. Een terugkeerperiode van 10 jaar wordt meestal gehanteerd. Gegeven dat de afwaartse overstroming vaak gepaard gaat met modder in de woningen, en rekening houdend met de hogere Europese norm, lijkt een terugkeerperiode van minstens 20 jaar echter aangewezen.

### 3.7.2 Via expliciete kwantificering afwaartse veiligheid

In plaats van de frequentie van overloop te begrenzen kan men de effectiviteit van de buffervoorziening ook expliciet kwantificeren, door de sedimentopvang te begroten of door de afwaartse veiligheid van de buffervoorziening na te gaan. Wanneer het opvangsysteem afwatert naar een ander watersysteem, zoals een afwaartse gracht, waterloop of riolering, moet rekening gehouden worden met de afvoercapaciteit van het ontvangende watersysteem (cfr. de principes van integraal waterbeheer). Voor grotere waterlopen die een significant grotere concentratietijd hebben in vergelijking met het bufferbekken, kunnen piekafvoeren zich verschoven in de tijd voordoen, wat de effectiviteit van de maatregel sterk kan beïnvloeden. In Figuur 44 wordt dit probleem geïllustreerd voor een concrete Vlaamse gevalstudie. Ook in de gevalstudie van het knelpuntgebied Boesdaal in deel 10 is de afwaartse veiligheid een belangrijk aspect.



*Figuur 44. Waterloopdebiet Laarbeek in het Demerbekken, voor de overstromingsperiode van sept. 1998, voor en na rioleringsbijdrage met een kleinere concentratietijd (1h) dan de concentratietijd van de waterloop (enkele uren) en voor en na de inrichting van een bergingsbekken ontworpen volgens  $250 \text{ m}^3/\text{ha}$  en een doorvoerdebiet van  $20 \text{ l}/(\text{s}\cdot\text{ha})$*

Daarom is het, in geval van een afwaarts watersysteem, aangewezen om het afwaarts overstromingsrisico expliciet te berekenen en tot een aanvaardbaar niveau te beperken. Dit vraagt evenwel heel wat bijkomende modelleringsinspanning. De afwaartse veiligheid moet dan



expliciet begroot worden. Dit vereist dat het doorvoer- en overloopdebiet op het afwaartse watersysteem wordt gemodelleerd, vb. door kwantificering van de overstromingsgevolgen en de bijhorende schade. Dit kan bij toepassing van een methode op basis van enkelvoudige neerslaggebeurtenissen voor een reeks gebeurtenissen met verschillende terugkeerperioden, of bij het gebruik van continue tijdreeks simulatie voor alle overloopgebeurtenissen in de tijdreeks; zie hierna in deel 3.7.3. Indien het opvangsysteem niet afwatert naar een waterloop of riolering en bijvoorbeeld uitstroomt en overstort over een akker of weg is de modellering van de afwaartse veiligheid niet nodig.

### 3.7.3 Berekening overstromingsrisico

Convolutie van de kans op voorkomen van de overloopgebeurtenissen met de bijhorende overstromingsschade levert het overstromingsrisico op (Van Dyck, 2007):

$$risico = \int_{q_c}^{+\infty} S(q) f_Q(q) dq \quad (15)$$

met  $f_Q(q)$  de kansdichtheidsfunctie van het overloopdebiet  $q$ ,  $S(q)$  de overstromingsschade bij dat debiet, en  $q_c$  het drempeldebiet boven dewelke overstromingsschade optreedt. Voor de berekening van de overstromingsschade op een welbepaalde locatie, met een welbepaald type landgebruik, werd door het Waterbouwkundig Laboratorium de LATIS-tool ontwikkeld. Ze wordt momenteel door de Vlaamse waterbeheerders als standaard tool gebruikt voor de analyse van overstromingsrisico's langs waterlopen.

Om te voorkomen dat de overstromingsschade bij elk mogelijk overloopdebiet berekend moet worden, kan de integraal in (15) benaderd worden door een sommatie over de verschillende overloopgebeurtenissen in de gesimuleerde tijdreeks (elke gebeurtenis heeft zich precies 1 maal voorgedaan in de tijdreeks, dus heeft eenzelfde empirische voorkomingskans gelijk aan 1 gedeeld door het totaal aantal overloopgebeurtenissen). De nauwkeurigheid waarmee zulke methode de integraal in (15) benadert, wordt uiteraard sterk bepaald door de lengte van de tijdreeks. Bij een korte beschikbare tijdreeks kan de integraal beter benaderd worden door de set van overloopgebeurtenissen uit de tijdreeks uit te breiden met enkele grotere gebeurtenissen met bijhorende (meestal kleinere) voorkomingskans. Een andere, meest gangbare methode in dat geval is om de integraal te vervangen door een sommatie over een reeks representatieve debieten, verdeeld over een bereik aan terugkeerperioden  $T_i$  (vb. 1, 2, 5, 10, 20, 50, 100, ... jaar). Na berekening van de uitgestrektheid van de overstroming voor deze terugkeerperioden, en de berekening van de bijhorende schades  $S_i$ , kan het overstromingsrisico, zoals gedefinieerd volgens (15), benaderd worden met de volgende formule (Vanneuville et al., 2003):

$$risico \approx \sum_{i=1}^{n-1} \left( \frac{1}{T_i} - \frac{1}{T_{i+1}} \right) \left( \frac{S_i + S_{i+1}}{2} \right) + \frac{S_n}{T_n}$$

De uitgestrektheid van de overstroming of de hydraulische overstromingsgevolgen langs afwaartse waterlopen kunnen begroot worden via hydraulische modellering, zoals dat gangbaar is bij de Afdeling Operationeel Waterbeheer van de Vlaamse Milieumaatschappij, het Waterbouwkundig Laboratorium en bepaalde waterloopbeheerders zoals de Provincies. De gevolgen van de overlaatdebieten van het opvangsysteem op de afwaartse waterloopdebieten kunnen ook eenvoudiger berekend worden door optelling van de tijdreeks van overlaatdebieten (zoals bepaald met de continue simulatieaanpak) en de tijdreeks van neerslagafstromingsdebieten van het stroomgebied opwaarts van het watersysteem waarin het opvangsysteem overloopt, en statistische naverwerking. De tijdreeks van neerslagafstromingsdebieten van het stroomgebied kan bepaald worden zoals hiervoor beschreven in deel 3.4.

Bij de schadebepaling zou men er ook rekening mee moeten houden dat de afwaartse overstromingen vaak gepaard gaan met modder in de woningen. Dit wordt echter niet standaard ingerekend in de schadebepaling.

Ook andere gevolgen dan de niet-materiële zouden ingerekend moeten worden in de overstromings“schade” of overstromingsgevolgen. Exploratief onderzoek naar de sociale en ecologische gevolgen van overstromingen langs rivieren werd recent uitgevoerd door het ADAPT-project voor Federaal Wetenschapsbeleid (Giron et al., 2010). Gelijkaardig onderzoek is momenteel lopende voor de overstromingsgevolgen in de stedelijke omgeving t.g.v. rioleringsoverstromingen in het PLURISK-project voor Federaal Wetenschapsbeleid (<http://www.kuleuven.be/hydr/plurisk>).

Een aspect dat in beide onderzoeksprojecten ook bekeken werd/wordt is de zelfredzaamheid (“coping capacity”) van de bevolking. Contradictorisch genoeg blijken de overstromingsgevolgen voor eenzelfde gebeurtenis toe te nemen na inrichting van bufferbekkens of andere maatregelen ter vermindering van de overstromingskans. Bij vermindering van de overstromingskans vermindert de zelfredzaamheid (mensen zijn minder gewoon om rekening te houden met de “natuurlijke” overstromingskans, dus minder voorbereid, en verwachten meer van de overheid in het onder controle houden van de overstromingen ...). Door de inrichting van de buffervoorziening doen kleine overstromingsgebeurtenissen, die slechts beperkte gevolgen hebben maar mensen waakzaam houdt, zich niet meer voor, terwijl de overblijvende overstromingen allen grote gevolgen hebben. Het verschil tussen kleine en grote gebeurtenissen wordt dus groter. Ook dit is een aspect van belang, maar de kwantificering van de concrete gevolgen staat nog in de kinderschoenen.

Onafhankelijk van de berekeningsmethode van het afwaartse overstromingsrisico, kan men na keuze van het aanvaardbare afwaartse overstromingsrisico eventueel via terugrekening of iteratie de overloopfrequentie bepalen die daarmee overeenstemt.

### **3.7.4 Berekening overlastrisico**

Gelijkaardig aan het overstromingsrisico (volgens vergelijking (15)) kan het overlastrisico berekend worden. Overlast wordt hierbij gedefinieerd als het ontstaan van modderstromen die zorgen voor een directe toevoer van water en sediment naar huizen en wegen. Het kan verondersteld worden dat het ontstaan van modderoverlast het gevolg is van overstorten van het bufferbekken. De schade kan dan uitgedrukt worden in het totale overgestorte volume, wat met schadefuncties eventueel kan omgezet worden naar een bijhorend risico.

Ook is het nuttig om een onderscheid te maken tussen de overlastfrequentie en de overstortfrequentie. Niet elke overstorting zal immers leiden tot overlast. Zo kan het bijvoorbeeld aanvaardbaar zijn om gemiddeld eens per twee jaar een overstortgebeurtenis toe te laten, indien die slechts tot een beperkte overlast leidt en slechts bij grotere terugkeerperioden, vb. 20 jaar, tot grote overlast. Hierbij zal men dus niet enkel de terugkeerperiode van overstort moeten berekenen, maar ook de terugkeerperiode van het overstortvolume.

Het overloopdebiet wordt berekend op basis van debietformules gebruikt voor de stroming over overlaten (zie Berlamont, 1992, 2004; of andere hydraulische standaard handboeken). Bij een standaard dunwandige overstort met een vierkante doorsnede wordt het debiet als volgt bepaald:

$$q_{over} = C_d b \sqrt{g} h^{3/2}$$

met  $C_d$  de debietcoëfficiënt,  $b$  de breedte van de overstort [m],  $g$  de valversnelling [ $m/s^2$ ],  $h$  de opwaartse waterhoogte ten opzichte van de overstortdrempel [m] en het berekende overstortdebiet  $q_{over}$  in  $m^3/s$ . Wanneer het waterpeil in het bufferbekken nog verder stijgt en het water dus over de volledige breedte van de dam stroomt, kan eenvoudig verondersteld worden dat het volume en dus ook het waterpeil in het bufferbekken gelijk blijft aan het maximale. Het overstortdebiet wordt dan gevonden door het maximale volume af te trekken van het berekende volume en dit verschil te delen door de gekozen tijdstap.

## 3.8 Berekening effectiviteit opvangsysteem en bepaling benodigd bergingsvolume

### 3.8.1 *Hydraulische effectiviteit*

De buffercapaciteit wordt klassiek bepaald door de frequentie van overloop van het opvangsysteem te beperken tot een welbepaalde aanvaardbare waarde. Deze keuze is afhankelijk van de effectiviteit van het opvangsysteem en de gevolgen van de overloop. Vorig deel 3.7 gaf aan dat deze gevolgen ook expliciet gekwantificeerd kunnen worden, en de buffercapaciteit ook bepaald kan worden door begrenzing van het overstromingsrisico en/of het overlastrisico. Volgens het risico-concept, is de aanvaardbare overloopfrequentie lager bij grotere water- en modderoverlast en, in geval van een ontvangend watersysteem, ook bij grotere overstromingsgevolgen.

De buffercapaciteit op basis van de beperking van de frequentie van overloop kan op verschillende manieren berekend worden. Verwijzend naar deel 3.3.1 bestaat de meest nauwkeurige methode erin om een lange-termijn tijdreeks van neerslag door te rekenen in het (conceptueel) model van het bufferbekken. Door een bepaald buffervolume en doorvoerdebiet te veronderstellen kan de frequentie van overloop empirisch bepaald worden. Door dit voor een groot aantal buffervolumes te doen, kan voor een bepaald doorvoerdebiet via interpolatie het benodigd buffervolume bepaald worden.

Eenvoudigere methodes maken gebruik van enkelvoudige neerslaggebeurtenissen (ontwerpneerslag). Zoals in deel 3.3.1 toegelicht gaan deze uit van de veronderstelling dat de terugkeerperiode van de modeluitvoer (de overloop van het bufferbekken in dit geval) identiek is aan de terugkeerperiode van de modelinvoer (de ontwerpbeurt). Eén van de methodes bestaat erin om van het totaal volume instroom gedurende de gebeurtenis het volume doorstroom (gedurende de duur van de gebeurtenis) af te trekken en het resterend volume te berekenen. Deze methode gaat uit van de veronderstelling dat de bui geen langere duur heeft, dus dat de voorafgaandelijke en navolgende perioden droog zijn. De ontwerpneerslag afgeleid uit IDF-verbanden gaat echter niet uit van deze veronderstelling. De IDF-verbanden zijn gebaseerd op de grootste neerslagintensiteiten in de tijdreeks uitgemiddeld over de buiduur, onafhankelijk van de voorafgaandelijke of navolgende neerslag. Deze methode onderschat dus het benodigde buffervolume. Ze gaat immers uit van de verkeerde veronderstelling dat de duur van een reële bui nooit langer is dan de concentratietijd; dus dat het opvangsysteem leeg is bij het begin van de bui. IDF-verbanden en de gemiddelde neerslagintensiteit gedurende de concentratietijd dienen om het maximale afvoerdebiet te bepalen (zie 3.4.3.2), niet het totaal buivolume.

Men kan zich afvragen of het gebruik van composietbuien de onderschatting van het benodigde bergingsvolume bij het toepassen van een enkelvoudige neerslagintensiteit bij een bepaalde buiduur niet oplost. De composietbui omvat immers stijgende en dalende flanken, dus voorafgaandelijke en navolgende neerslag. De composietbuien mogen echter zo niet geïnterpreteerd worden; de vorm van de composietbuien is niet historisch realistisch, maar bepaald via een statistische methode met als doel om via één enkele modelsimulatie hydrologische en hydraulische effecten te kunnen berekenen en dit gelijktijdig op meerdere plaatsen langsheen een watersysteem. Dit is voor rioleringsstelsels zeer handig, maar minder nuttig voor erosiebestrijdingsmaatregelen die slechts op één plaats in het stroomgebied gelokaliseerd zijn en waarvoor dus slechts één bepaalde concentratietijd voorkomt. Verder is het gebruik van ontwerpgebieden enkel correct voor watersystemen waarvoor de hydrologische en hydraulische gevolgen eenduidig bepaald worden door de neerslagintensiteit bij een bepaalde buiduur. Dit is voor rioleringen het geval door de hoge graad van verharding, maar niet voor stroomgebieden met een natuurlijke neerslagafstroming.

In plaats van in de vorige eenvoudige methode het doorvoerdebiet in te rekenen wordt soms ook het doorvoerdebiet verwaarloosd, of wordt het invoerdebiet vermenigvuldigd met een correctiefactor om rekening te houden met de invloed van het doorvoerdebiet. Wanneer het doorvoerdebiet wordt verwaarloosd, rekent men een veiligheidsmarge in, die mogelijks de onderschatting van de methode compenseert, maar daar kan a priori weinig uitspraak over gedaan worden. Het kan onderzocht worden door vergelijking met een continue simulatieaanpak.

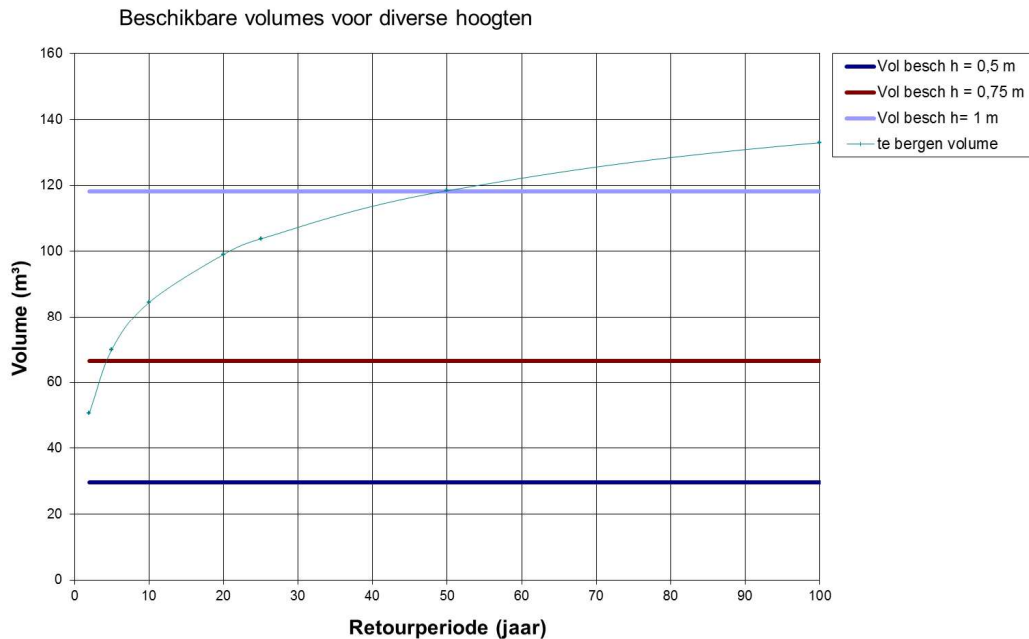
Zulke simulatieaanpak werd gevolgd voor de opmaak van de ontwerptabellen opgenomen in de Code van goede praktijk voor het ontwerp van rioleringsstelsels (VMM, 1996; Vaes et al., 2004). Ze werden opgemaakt via tijdreeks simulaties van de lange-termijn 10-minuten neerslagreeks te Ukkel. De resultaten van deze simulaties zijn samengevat in tabellen met het benodigde buffervolume voor een reeks van overloofrequenties en doorvoerdebieten (tussen 1 en 50 l/(s.ha)). Ze zijn evenwel beperkt tot een concentratietijd van 10 minuten. Afzonderlijke ontwerptabellen werden afgeleid voor constante doorvoerdebieten, en doorvoerdebieten die lineair variëren met het buffervolume. Bijlagen B en C geven deze tabellen, aangevuld met bijkomende tabellen voor concentratietijden van 20, 30, 40, 50 en 60 minuten. Ook zijn tabellen toegevoegd voor een doorvoerdebiet dat toeneemt met de vierkantswortel van het bergingsvolume. Deel 3.6 leert immers dat het debiet door een knijpopening bij een constante oppervlakte niet lineair toeneemt met het volume maar met de vierkantswortel van het volume. Bijlage B bevat de tabellen voor de terugkeerperiode van overloop van het opvangsysteem in functie van zijn buffervolume en doorvoerdebiet, terwijl Bijlage C de benodigde buffervolumes tabelleert in functie van het maximale doorvoerdebiet en de terugkeerperiode van de overlaat. Op dit ogenblik loopt een studie voor VMM - Afdeling Ecologisch Toezicht om gedifferentieerde buffereisen op te stellen die rekening houden met de eigenschappen van de afwaartse waterloop.

De methode op basis van een vaste aanvaardbare frequentie van overloop of overlast gaat voorbij aan het verschil in responsgedrag tussen het opwaartse en het afwaartse watersysteem (zie deel 3.7).

In bepaalde internationale studies wordt de dimensionering van het opvangsysteem niet gebaseerd op de begrenzing van de overloofrequentie (dus na tijdreeks simulatie die een groot aantal gebeurtenissen omvat) maar eerder op basis van een bepaalde historische gebeurtenis (of een beperkt aantal gebeurtenissen). Men simuleert deze neerslaggebeurtenissen in het model en voorkomt overloop of schade. Het uitgangspunt van deze methode is om maatregelen te ontwerpen die recente of welgekende historische rampen of problemen zouden voorkomen hebben. Voordeel van deze methode is dat ze het nut en effect van de maatregel concreter maakt en daardoor eventueel een groter draagvlak creëert. Het grote nadeel van de methode is echter dat de maatregel statistisch niet onderbouwd is, maar bepaald door het willekeurig karakter van recente historische gebeurtenissen. Een betere aanpak is om na een statistische onderbouwing van het ontwerp, concrete impactberekeningen uit te voeren op basis van bepaalde historische gebeurtenissen.

Naast de afwaartse veiligheid dient de dimensionering van het opvangsysteem uiteraard ook de efficiëntie van de erosiebestrijding in rekening te brengen, zoals de sedimentatieaspecten, zoals verder besproken in deel 3.8.2. Zo dient men naast de toelaatbare frequentie van overloop of de afwaartse veiligheid ook de verblijftijd in rekening te brengen. De verblijftijd moet groot genoeg zijn om voldoende sedimentatie in het opvangsysteem te garanderen. Het benodigde buffervolume en de bijhorende verblijftijd zijn echter meestal haast steeds zodanig groot dat de hydraulische "veiligheid" meestal de beperkende factor is. Merk op dat de modellen van het bergingsreservoir-type toelaten om de verblijftijd van het opvangsysteem te berekenen. De gemiddelde verblijftijd wordt berekend als het buffervolume gedeeld door het gemiddeld doorvoerdebiet. Bij een lineair reservoirmodel is dit de recessieconstante  $k$ . Ook kan men een conceptueel sedimentatiemodel enten aan het hydraulisch model; zie deel 3.8.2.

Een ander aspect dat een belangrijke rol speelt bij de bepaling van het benodigde buffervolume zijn de praktische beperkingen. In de praktijk is het vaak het overleg met de landbouwers dat het buffervolume bepaalt en niet de aanbevolen volumes op basis van hydraulische en sedimentatie-overwegingen. Het is echter essentieel om voorafgaandelijk aan zulk overleg de aanbevolen volumes te berekenen. Figuur 45 is in deze context een nuttige grafiek, waarbij een vergelijking wordt gemaakt tussen het benodigd bergingsvolume voor verschillende terugkeerperioden versus het beschikbare bergingsvolume voor een aantal randvoorwaarden (vb. verschillende dam- en uitgravingshoogten).



Figuur 45. Vergelijking benodigd en beschikbaar bergingsvolume

### 3.8.2 Effectiviteit sedimentopvang

Voorgaande paragraaf beperkt zich tot de berekening van de hydraulische effectiviteit via de analyse van de hydraulische veiligheid. De effectiviteit van de erosiebestrijdingsmaatregel wordt echter in de eerste plaats bepaald door de sedimentatie-efficiëntie. De onzekerheid in de berekening van de hoeveelheid sedimentopvang is echter een factor hoger dan de onzekerheden in de hydrologische en hydraulische berekeningen.

#### Stap 1: berekening bodemverlies

De meest courant gebruikte methode voor de berekening van het bodemverlies is de universele bodemverliesvergelijking of de "R.U.S.L.E."-vergelijking (Revised Universal Soil Loss Equation; Renard et al., 1997); zie ook Vandekerckhove et al. (2001). De intergeul- en geulerosie wordt berekend als een product van 6 factoren:  $A = R.K.L.S.C.P$ , met:

- $A$ : de geschatte gemiddelde hoeveelheid bodemverlies per ha en per jaar
- $R$ : erosiviteitsfactor. Deze werd voor de Vlaamse bodemerosiekaart berekend op basis van de gemiddelde dagelijkse neerslaghoeveelheid  $P$  [mm] volgens de formule van Salles (2002):  $R = \mu \sum \alpha (P)^\beta$  met  $R$  in  $\frac{MJ \text{ mm}}{ha \text{ j}}$ ,  $\mu$  een te kalibreren parameter, en  $\alpha$  en  $\beta$  te kalibreren maandvariabele parameters (Notebaert et al., 2006). Indien de gemiddelde neerslag wordt gebaseerd op de Ukkelneerslaggegevens voor de periode 1898-2004, wordt een waarde van  $R = 880 \frac{MJ \text{ mm}}{ha \text{ j}}$  bekomen.
- $K$ : bodemerodibiliteitsfactor, gebaseerd op het nomogram van Wischmeier et al. (1971). Deze wordt berekend op basis van de erosiviteitsfactor  $R$  en 5 bodemparameters (humusgehalte, bodemstructuur, permeabiliteit, minerale fractie van 2-100  $\mu\text{m}$  en van 100-2000  $\mu\text{m}$ ). Vaak wordt deze factor door een gebrek aan gegevens enkel berekend op basis van bodemtextuur van de bodemtoplaag. Voor Vlaanderen werd de  $K$  (Dg) factor bepaald aan de hand van de formule van Declercq en Poesen (1992) (zie Notebaert et al., 2006). Volgende waarden werden afgeleid (Van Rompaey et al., 2000) met  $K$  in  $\frac{kg \text{ h}}{m^2 \text{ MJ mm}}$ :
  - o Leem:  $K=42$

- Zandleem:  $K=40$
- Licht zandleem:  $K=25$
- Lemig zand:  $K=20$
- Zand:  $K=12$
- Klei:  $K=40$
- L.S: topografische factor: product van terreinlengte en –helling
- C: gewasfactor. Deze is gelijk aan 1 voor een onbedekte oppervlakte. Voor enkele veel voorkomende teeltrotaties bedraagt deze (Schietecatte et al., 1999);
  - Mais - mais - mais – aardappelen:  $C=0.47$
  - Mais - mais - mais – raaigras:  $C=0.38$
  - Wintertarwe - aardappelen - mais - raaigras:  $C=0.37$
  - Wintertarwe - aardappelen - mais - suikerbieten:  $C=0.37$
  - Aardappelen - wintertarwe - mais:  $C=0.33$
  - Wintertarwe - aardappelen - bieten - raaigras:  $C=0.29$
  - Suikerbieten - wintertarwe - wintergerst - suikerbieten - wintertarwe - raaigras:  $C=0.24$

Een meer uitgebreide lijst kan teruggevonden worden in Verstraeten et al. (2001) en Vandekerckhove et al. (2001).

- P: erosiebeheersingsfactor. Deze is gelijk aan 1 voor op- en neerploegen met de helling. Voor contourploegen bedraagt ze 0.9 voor een hellingsgraad van 21-25%, 0.8 voor 17-21%, 0.7 voor 13-17%, 0.6 voor 9-13%, 0.5 voor 6-9%, 0.4 voor 3-6%, 0.6 voor 1-3% (Wischmeier & Smith, 1978).

De potentiële bodemerosie wordt bekomen door  $P=1$  en  $C=0.37$  (gemiddelde voor akkerland) op alle percelen te veronderstellen. De afdeling Land en Bodembescherming, Ondergrond, Natuurlijke Rijkdommen van de Vlaamse Overheid laat jaarlijks een potentiële bodemerosiekaart per perceel opmaken, te consulteren via de Databank Ondergrond Vlaanderen (<https://dov.vlaanderen.be>).

De Vlaamse Milieumaatschappij heeft aan de hand van meetgegevens voor grotere stroomgebieden van ongeveer 300 ha in hellende en erosiegevoelige stroomgebieden in de bekkens van Bovenschelde en Demer afgeleid dat bij een extreme hoogwatergolf maximale sedimentconcentraties kunnen voorkomen van 10 tot 30 g/l. Door deze concentraties te vermenigvuldigen met het runoff-volume kan een alternatieve schatting bekomen worden van de gemiddelde hoeveelheid bodemverlies.

Naast deze empirische en conceptuele modellen bestaan er – zoals bij de neerslagafvoermodellering – ook fysisch gebaseerde sedimenttransportmodellen. Voorbeelden hiervan zijn het EROSION-2D/3D-model (Schmidt, 1996), het afgeleide STM2D/3D-model (Biesemans, 2000) en het WaTEM/SEDEM-model (Van Rompaey et al., 2001; Van Oost et al., 2000; Verstraeten et al., 2002). Op deze modellen wordt hier niet verder in gegaan.

### *Stap 2: berekening sediment delivery ratio en vangefficiëntie*

Van de gemiddelde hoeveelheid bodemverlies zal finaal slechts een fractie het opvangbekken of erosiepoel bereiken. Deze fractie wordt weergegeven door de “Sediment Delivery Ratio” (SDR). Voor de grotere stroomgebieden (tot 5000 ha) in het Bovenscheldebekken zijn waarden voor de SDR bekomen rond de 25% (Van Hoestenberghé et al., 2008). Van deze hoeveelheid sedimenten die het opvangbekken bereiken, zal slechts een deel door het bekken worden tegengehouden, bepaald door de vangefficiëntie van het bekken. De vangefficiëntie is afhankelijk van vele parameters, zoals de grootte en vorm van het bekken, de textuur van het sediment, de uitlaatconstructie, enz, en kan daarom zeer moeilijk ingeschat worden. Waarden van 30% tot 60% komen voor in de literatuur voor Vlaanderen (Verstraeten, 2000). Een manier

om de vangefficiëntie expliciet te berekenen is op basis van de bezinkingsnelheid. Deze kan voor sedimentdeeltjes berekend worden via de wet van Stokes als:

$$v_s = \frac{g d^2 (d_v - d_{vl})}{18 \eta}$$

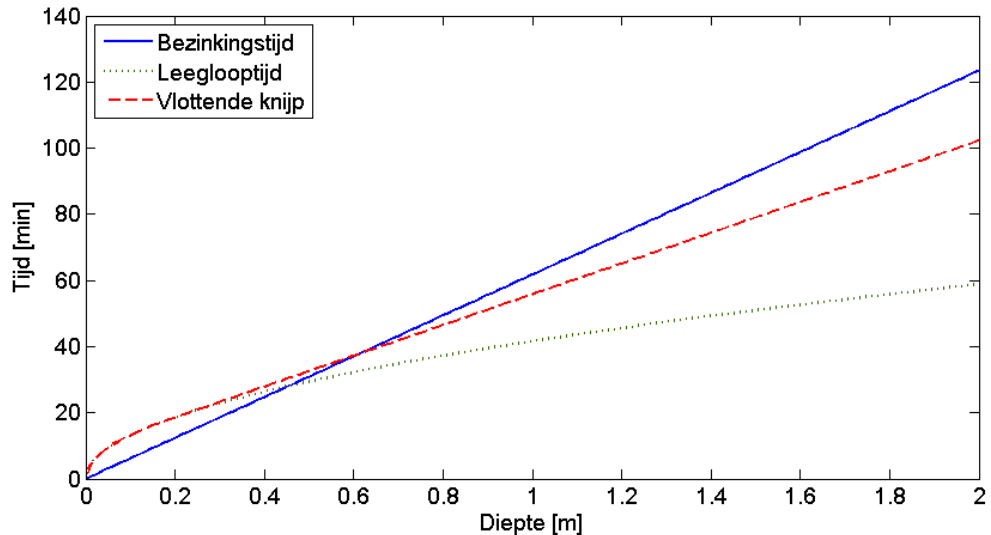
met  $v_s$  de bezinkingsnelheid [m/s],  $r$  de diameter van het deeltje [ $\mu\text{m}$ ],  $d_v$  de dichtheid van de vaste stof van het deeltje (voor leem:  $2600 \text{ kg/m}^3$ ),  $d_{vl}$  de dichtheid van de vloeistof waarin het deeltje bezinkt ( $999.099 \text{ kg/m}^3$  bij  $15^\circ\text{C}$ ),  $\eta$  de viscositeit van water (richtwaarde  $0.00139 \text{ kg/ms}$ ). Via de viscositeit is de bezinkingsnelheid afhankelijk van de temperatuur.

Tabel 16 geeft aan hoe de bezinkingsnelheid afhankelijk is van de deeltjesgrootte en de temperatuur. Voor een watertemperatuur van  $10^\circ\text{C}$  en een leemdeeltje met een kleine straal van  $0.01 \text{ mm}$  is de bezinkingsnelheid  $0.007 \text{ cm/s}$ , voor een gemiddelde straal van  $0.03 \text{ mm}$  is de bezinkingsnelheid  $0.06 \text{ cm/s}$ , en voor een maximale straal van  $0.06 \text{ mm}$  is deze  $0.24 \text{ cm/s}$ . De tijd nodig om  $1 \text{ m}$  te bezinken komt hiervoor overeen met  $4 \text{ uur}$  voor een leemdeeltje van  $0.01 \text{ mm}$ ,  $28 \text{ min}$  voor een leemdeeltje van  $0.03 \text{ mm}$ , en  $7 \text{ min}$  voor een leemdeeltje van  $0.06 \text{ mm}$ .

Tabel 16. Bezinkingsnelheid van deeltjes i.f.v. de deeltjesstraal en de watertemperatuur (Fifield, 2001).

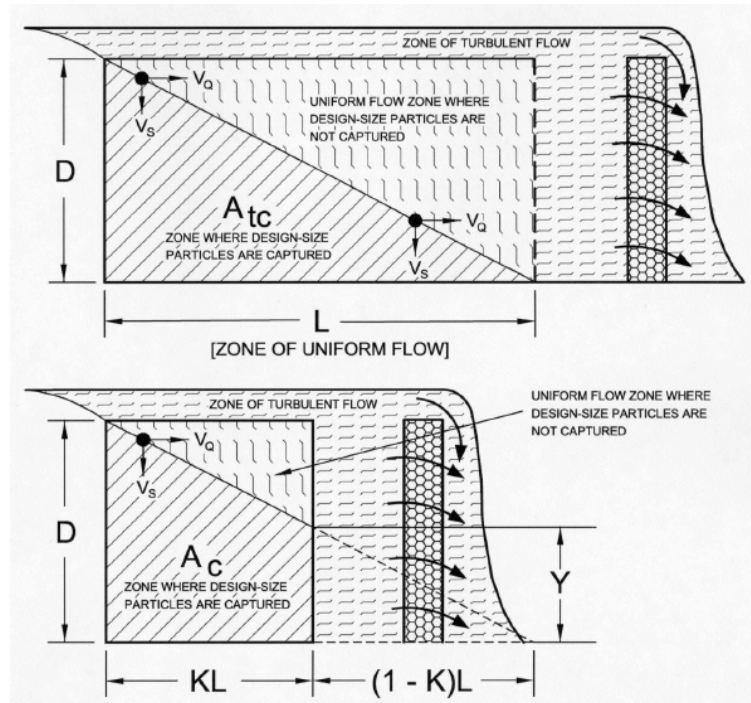
Straal deeltje [mm]	Bezinkingsnelheid [cm/s] bij een watertemperatuur van:					Type deeltje
	$0^\circ\text{C}$	$5^\circ\text{C}$	$10^\circ\text{C}$	$15^\circ\text{C}$	$20^\circ\text{C}$	
0.01	0.005	0.006	0.007	0.008	0.009	Fijn leem
0.02	0.02	0.023	0.027	0.031	0.035	Middengrof leem
0.03	0.044	0.052	0.06	0.069	0.078	Grof leem
0.04	0.078	0.092	0.107	0.122	0.139	
0.05	0.122	0.143	0.167	0.191	0.217	
0.06	0.176	0.207	0.24	0.275	0.313	Zeer fijn zand
0.07	0.239	0.281	0.327	0.375	0.426	
0.08	0.312	0.367	0.427	0.49	0.556	
0.09	0.395	0.465	0.54	0.62	0.704	Fijn zand
0.11	0.488	0.574	0.667	0.765	0.869	
0.11	0.59	0.694	0.807	0.926	1.051	
0.12	0.703	0.826	0.96	1.101	1.251	
0.13	0.825	0.97	1.127	1.293	1.468	
0.14	0.956	1.125	1.307	1.499	1.703	
0.15	1.098	1.291	1.501	1.721	1.955	
0.16	1.249	1.469	1.707	1.958	2.224	
0.17	1.41	1.658	1.928	2.211	2.511	
0.18	1.581	1.859	2.161	2.478	2.815	
0.19	1.761	2.072	2.408	2.761	3.136	
0.2	1.952	2.295	2.668	3.06	3.475	

Deze bezinkingstijd kan vergeleken worden met de leeglooptijd van het bufferbekken. Ter illustratie: een bekken van  $100 \text{ m}^2$  met een knijpopening van  $160 \text{ mm}$  op  $1 \text{ m}$  diepte heeft een leeglooptijd van  $41 \text{ min}$ . Bij lagere dieptes is de bezinkingstijd relatief kleiner in vergelijking met de leeglooptijd, zie Figuur 46. De bezinkingsefficiëntie kan dus verhoogd worden door de waterhoogte in de bufferbekkens te beperken of door te werken met een vlottende knijpleiding, vb.  $10$  à  $20 \text{ cm}$  onder het wateroppervlak. Op die manier kunnen de sedimenten in het water onder de knijpopening ongestoord bezinken. De leeglooptijd met een vlottende knijpopening op  $20 \text{ cm}$  onder het wateroppervlak is eveneens getoond in Figuur 46.



Figuur 46. Bezinkingstijd (blauw), leeglooptijd met knijpopening onderaan (groen) en leeglooptijd met vlottende knijpopening (rood) in functie van de diepte van een bekken met een oppervlakte van  $100 \text{ m}^2$ ; voor een knijpleiding met een diameter van  $160 \text{ mm}$  en een bezinkingssnelheid van  $0.027 \text{ cm/s}$ .

Figuur 47 geeft schematisch weer hoe de efficiëntie in sedimentopvang kan berekend worden in functie van de diepte en lengte van het opvangsysteem, de bezinkingssnelheid en de doorstroomsnelheid. De doorstroomsnelheid wordt berekend uit het doorvoerdebiet gedeeld door de verticale doorstroomoppervlakte. De effectieve diepte en lengte van het opvangsysteem is hierbij in beperkte mate kleiner dan de werkelijke diepte en lengte; de wet van Stokes voor de berekening van de bezinkingssnelheid is immers enkel van toepassing voor het gebied met laminaire stroming.



Figuur 47. Concept voor de berekening van de efficiëntie van de bezinking van deeltjes in suspensie in zones met laminaire en turbulente stroming (Fifield, 2001). Boven: lengte voldoende groot voor optimale bezinking; Onder: kleinere lengte.



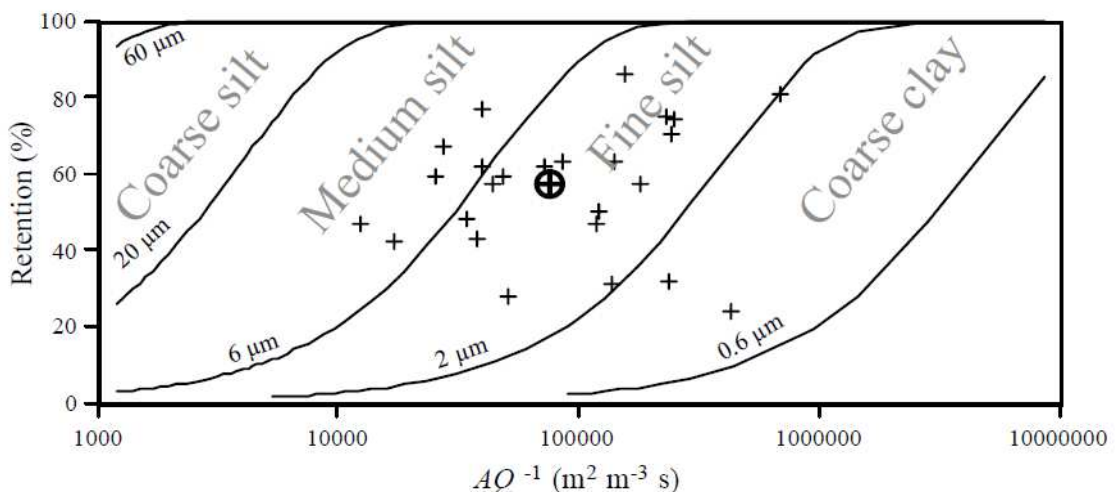
Chen (1975) leidde de volgende relatie af voor het percentage  $[E]$  deeltjes die bezinken bij een bepaalde bezinkingssnelheid:

$$E = 100 \left( 1 - \exp\left(-v_s \frac{A}{q_{uit}}\right) \right) = 100 \left( 1 - \exp\left(-\frac{v_s}{v_0}\right) \right)$$

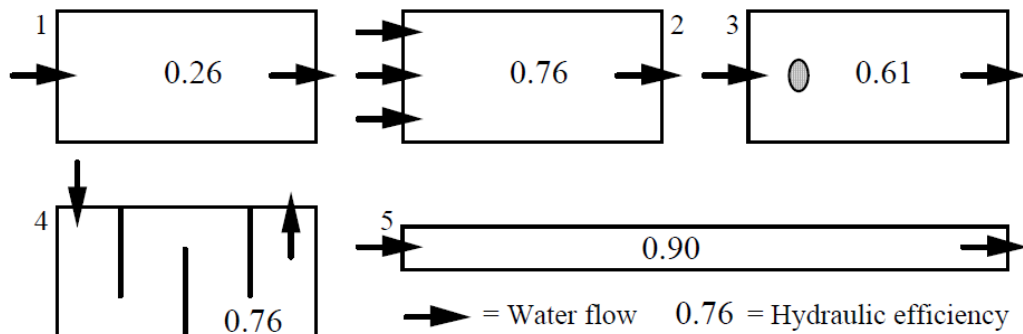
met  $A$  [ $\text{m}^2$ ] de horizontale oppervlakte van het opvangsysteem. De verhouding  $q_{uit}/A$  wordt "oppervlaktebelasting"  $v_0$  genoemd. Voor een rechthoekig opvangsysteem is ze ook gelijk aan de diepte van het opvangsysteem gedeeld door de gemiddelde verblijftijd van het water in het opvangsysteem. Voor bergbezinkingsbekkens afwaarts langs rioleringen werd in Vlaanderen en Nederland via experimenten van KU Leuven en TU Delft het volgende "verbeterde" verband afgeleid (Kluck, 1997; De Cock et al., 1998):

$$E = 100 \left( 1 - \exp\left(-1.22 \left(\frac{v_s}{v_0}\right)^{1.16}\right) \right)$$

Voor verschillende deeltjesgroottes/bezinkingssnelheden worden via de relatie van Chen (1975) de curven van Figuur 48 bekomen. Het percentage  $E$  stijgt dus met een toenemende bezinkingssnelheid (grotere deeltjes), een toenemende horizontale oppervlakte en een lager doorstroomdebiet (=doorvoerdebiet; ook hydraulische belasting genoemd). Soms kan het percentage  $E$  ook toenemen bij een toenemende hydraulische belasting, omdat een groter invoerdebiet (dus ook doorvoerdebiet) vaak gepaard gaat met de instroom van zwaardere deeltjes. Naast de horizontale oppervlakte en de hydraulische belasting heeft Persson et al. (1999) op basis van twee-dimensionale hydraulische modellering aangetoond dat ook de vorm van het opvangsysteem een belangrijke rol speelt (zie Figuur 49).



Figuur 48. Voorspeld percentage deeltjes die bezinken volgens de relatie van Chen (1975) en waargenomen percentage door Braskerud (2001) voor klei i.f.v. de oppervlakte van het opvangsysteem en de inverse hydraulische belasting.



Figuur 49. Hydraulische efficiëntie (% deeltjes die bezinken) van verschillende vormen van opvangsystemen voor eenzelfde opvangvolume ( $2700 \text{ m}^3$ , volgens Persson et al., 1999) en eenzelfde diepte van 1.5 m. Het oorspronkelijke systeem (1) kan verbeterd worden door de instroom ruimtelijk beter te verdelen (2), door een klein eiland te introduceren aan de inlaat (3), door schotten te gebruiken (4) of door het opvangsysteem langer te maken (5).

Uiteraard is de deeltjesgrootte niet constant, maar volgt ze een bepaalde verdeling die afhankelijk is van de locatie en de grootte van het instroomdebiet. Meestal wordt de gemiddelde deeltjesgrootte gebruikt, alhoewel hier wordt aangeraden ook een gevoeligheidsanalyse door te voeren voor minimale en maximale deeltjesgroottes.

Het meeste sediment wordt afgezet aan de uitlaatconstructie (laagste punt); dit kan oplopen tot meerdere centimeters per jaar.

De geschatte sedimentopvang kan ook gebruikt worden om de vermindering van het bergingsvolume in de tijd in rekening te brengen, i.f.v. de ruimingsfrequentie.

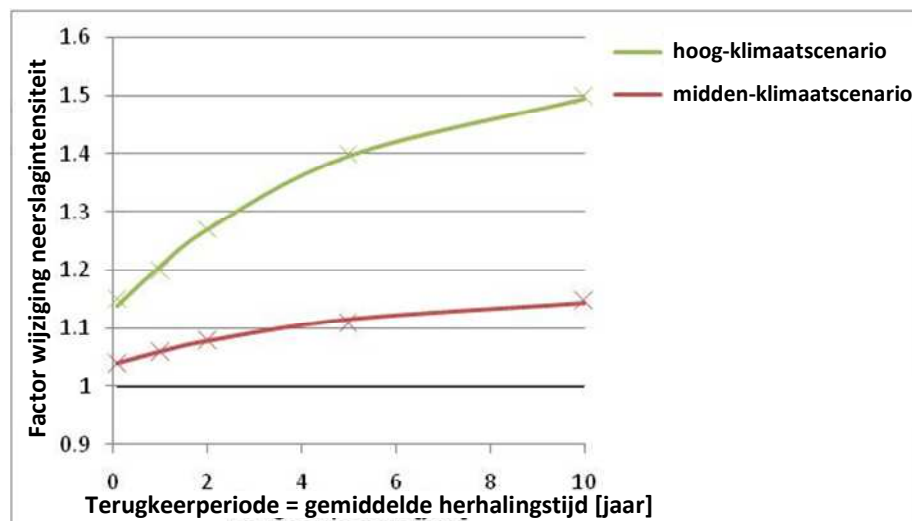
### 3.9 Berekening invloed klimaatverandering

Een goede praktijk voor het dimensioneren van de opvangsystemen houdt niet enkel rekening met de huidige neerslagstatistieken (op basis van recente neerslagreeksen), maar ook met de toekomstige klimaatcondities. Voor Vlaanderen werden klimaatscenario's voor hydrologische impactanalyse ontwikkeld door Willems et al. (2010) (zie ook Willems, 2009a, 2011, Willems et al., 2009, 2011, en Willems & Vrac, 2011).

Deze zijn ontwikkeld na statistische analyse van een groot aantal klimaatmodelsimulaties: meer dan 30 simulaties met mondiale klimaatmodellen (ongeveer 20 simulaties opgenomen in het archief bij het vierde Assessment Report van het IPCC en 17 simulaties met het nieuwste en momenteel meest gerespecteerde klimaatmodel ECHAM5), en 31 simulaties met regionale Europese klimaatmodellen. Voor het neerschalen van de dag- en gridgemiddelde neerslagresultaten naar de 10-minuten tijdschaal en naar puntneerslag, werden twee methoden toegepast, getest en vergeleken: een eerste methode op basis van kwantiel-perturbatiefactoren, en een tweede methode op basis van Weather Typing. De eerste methode maakt rechtstreeks gebruik van de neerslagresultaten van klimaatmodellen. Dergelijke procedure levert mogelijk onbetrouwbare resultaten op aangezien de nauwkeurigheid van de neerslagresultaten van klimaatmodellen, vooral voor de extreme convectieve neerslag in de zomer, niet zo groot is. Daarom werd de tweede methode op basis van Weather Typing uitprobeerde. Deze tweede methode maakt primair gebruik van de meer nauwkeurige luchtdrukresultaten van de klimaatmodellen en relateert die op basis van historische reeksen aan de kleinschalige extreme neerslag. De methode werd verder uitgebreid om (per weerstype) rekening te houden met de neerslagtoename bij een bepaalde temperatuurtoename. Toekomstige neerslagverandering blijkt immers niet enkel het gevolg te zijn van veranderingen in de atmosferische circulatiepatronen, maar ook van veranderingen in de neerslagverdeling (bij eenzelfde circulatiepatroon) ten gevolge van de temperatuurstijging. De neergeschaalde laag-, midden- en hoog-klimaatscenario's tot 2100 werden door Willems (2009a) gebruikt om aangepaste neerslagstatistieken (IDF-verbanden en composietbuien) af te leiden, en de honderdjarige tijdreeks van 10-minuten neerslag te Ukkel (1901-2000) aan te passen. De aangepaste reeksen

kunnen gebruikt worden als invoer in de hydrologische simulatiemodellen, o.a. om de invloed na te gaan van de potentieel toekomstige klimaatverandering op de ontwerpwaarden voor het dimensioneren van opvangsystemen.

Figuur 50 geeft de toename in neerslagintensiteit weer (voor tijdsduren tussen 10 minuten en 15 dagen) bij een midden- en hoog-klimaatscenario. Het midden-klimaatscenario is een scenario waarbij 50% van de klimaatmodellen een hogere impact geven en 50% een lagere impact. Het hoog-klimaatscenario komt overeen met de hoogste impact van de bestudeerde klimaatmodelsimulaties. Uit Figuur 50 blijkt dat een extreme neerslagintensiteit die zich momenteel gemiddeld maar eens per 10 jaar voordoet in het midden-klimaatscenario een 15% hogere intensiteit heeft tegen 2100, terwijl die stijging toeneemt tot 50% in het hoog-klimaatscenario. In dat hoog-klimaatscenario komt een neerslagintensiteit die zich nu gemiddeld eens per twee jaar voordoet, tegen 2100 gemiddeld eens per jaar voor. Of, met andere woorden, extreme regenbuien met zulke intensiteit doen zich in zulk scenario tweemaal zo vaak voor.



Figuur 50. Factor toename in neerslagintensiteit (tot 2100) bij een midden- en hoog-klimaatscenario.

Naast de stijging in de grote korte-duur hemelwaterpieken geven de klimaatmodellen voor de zomer een sterke daling van het aantal regendagen met kleine neerslaghoeveelheden. Hierdoor neemt – ondanks de toename in de extreme piekneerslag – de totale neerslaghoeveelheid in de zomermaanden af, wat aanleiding geeft tot verdroging. Rekening houdend met de kennis dat Vlaanderen per inwoner een lage beschikbaarheid aan zoetwater heeft, kan dat aanleiding geven tot een belangrijke toename in de laagwaterproblematiek. Een belangrijke uitdaging zal er in bestaan om ons waterbeheer aan deze wijzigende omstandigheden aan te passen. De afstemming met het landbeheer kan hierbij een belangrijke rol spelen. Opwaartse opvangsystemen in combinatie met infiltratie (daar waar de ondergrond dit toelaat) laat toe om erosie, wateroverlast en verdroging gelijktijdig en meest efficiënt aan te pakken.

Bijlage D bevat aangepaste tabellen voor het hoog-klimaatscenario voor de terugkeerperiode van overloop van het opvangsysteem in functie van de buffercapaciteit en het doorvoerdebiet. Ook de tabellen die het benodigd buffervolume weergeven in functie van het maximale doorvoerdebiet en de terugkeerperiode zijn in die bijlage in aangepaste vorm terug te vinden. In vergelijking met de tabellen voor het huidige klimaat geeft dit een toename van de nodige buffercapaciteit met 15% tot 50%. Tabel 17 vat de grootteordes van de huidige en aangepaste ontwerpwaarden samen.

Tabel 17. Grootte-orde van buffervolumes in functie van het maximaal ledigingsdebiet en terugkeerperiode van de noodoverlaat (Willems, 2009).

terugkeerperiode 'Krachtlijnen voor een geïntegreerd rioleringsbeleid' van 1996		2 jaar	5 jaar		
terugkeerperiode lange termijn simulaties bij constante doorvoer, <b>huidig klimaat</b>		±1 jaar	±2 jaar	±5 jaar	±20 jaar
terugkeerperiode lange termijn simulaties bij constante doorvoer, <b>hoog klimaatscenario</b>		±0.5 jaar	±1 jaar	±2 jaar	±10 jaar
terugkeerperiode lange termijn simulaties bij lineaire doorvoerrelatie, <b>huidig klimaat</b>		±0.5 jaar	±1 jaar	±2 jaar	±10 jaar
terugkeerperiode lange termijn simulaties bij lineaire doorvoerrelatie, <b>hoog klimaatscenario</b>		<0.5 jaar	±0.5 jaar	±1 jaar	±5 jaar
maximaal ledigingsdebiet (via infiltratie, afgeknepen doorvoer, verdamping, ...)	40 l/(s.ha)	50 m <sup>3</sup> /ha 5 mm	100 m <sup>3</sup> /ha 10 mm	150 m <sup>3</sup> /ha 15 mm	200 - 250 m <sup>3</sup> /ha 20 - 25 mm
	10 l/(s.ha)	100 m <sup>3</sup> /ha 10 mm	150 m <sup>3</sup> /ha 15 mm	200 - 250 m <sup>3</sup> /ha 20 - 25 mm	300 - 400 m <sup>3</sup> /ha 30 - 40 mm

Een vraag die zich bij klimaatverandering steeds stelt is hoe men best omgaat met de grote onzekerheid op de toekomstige klimaatverandering. Het verschil tussen de drie klimaatscenario's (hoog, midden en laag) is inderdaad groot. De aanbevolen aanpak bestaat erin om bij de dimensionering van de opvangsystemen rekening te houden met de verschillende klimaatscenario's. Ze geven een aanduiding van hoe sterk de opvangsystemen in de toekomst mogelijks moeten aangepast worden om het hoofd te kunnen bieden aan de klimaatverandering. Dit betekent dat de mogelijkheid wordt voorzien om later tegen een relatief beperkte kostprijs de buffercapaciteit uit te breiden; dus dat de eventueel toekomstig bijkomend benodigde omliggende ruimte wordt gevrijwaard. Deze aanpak wordt internationaal bestempeld als "climate proof" of flexibel of adaptief ontwerp. Ook kan men – indien op basis van huidige klimaatcondities verschillende opties worden afgewogen – rekening houden met de potentieel toekomstige klimaatcondities. Het wordt dus aanbevolen om als onderdeel van de huidige dimensionering de invloed van de klimaatscenario's te analyseren, ook al gebeurt de dimensionering op dit ogenblik niet rechtstreeks op basis van de klimaatscenario's.

## 4 Schematisch overzicht van basisconcepten/deelmethoden, onderliggende veronderstellingen, voor- en nadelen

Voor elk van de methoden en deelaspecten, zoals beschreven in deel 2, wordt in dit deel een schematisch overzicht gegeven van de veronderstellingen die aan de basis liggen van de methoden (en die dus in deel 2 werden toegelicht). Dit gebeurt in tabelvorm (Tabel 18). Ook de voor- en nadelen staan opgelijst. Enkel de voornaamste veronderstellingen en voor- en nadelen die relevant zijn in de context van het evalueren en onderling vergelijken van de methoden zijn vermeld.

De verschillende methoden zijn hierbij geklasseerd, volgens het type basisconcept, zoals methoden gebaseerd op de rationele methode, empirische methoden zoals de Soil Conservation Service (SCS) methode, conceptuele hydrologische modellen, op basis van bakkenmodellen, meer gedetailleerd fysisch gebaseerde modellen, enz.

Bij het opmaken van dit overzicht van methoden en bijhorende veronderstellingen is een onderscheid gemaakt tussen de methoden voor:

- Keuze van de maatgevende neerslag
  - o Aspect tijdsdimensie neerslag: enkelvoudige gebeurtenis versus tijdreeks
  - o Aspect buiduur
  - o Aspect statistische tijdreeksanalyse
  - o IDF-verbanden voor Vlaanderen
  - o Aspect terugkeerperiode
  - o Aspect concentratietijd
- Berekening van het opwaartse neerslagafstromingsdebiet
  - o Gedetailleerd fysisch-gebaseerde modellen
  - o Conceptuele simulatiemodellen
  - o Empirische of eenvoudige conceptuele modellen
    - Stap 1: Berekening netto neerslag
    - Stap 2: Berekening afvoerdebiet
- Modelleren opvangsysteem
- Berekening of keuze van het doorvoerdebiet
- Berekening van de afwaartse veiligheid (veiligheid tegen overstroming langs het afwaartse ontvangende oppervlaktewater) of de keuze van de aanvaardbare frequentie van overloop
- Berekening effectiviteit opvangsysteem en bepaling benodigd bergingsvolume
- Berekening invloed klimaatverandering

Tabel 18. Overzicht van basisconcepten/deelmethoden samen met de voornaamste veronderstellingen, voor- en nadelen die relevant zijn in de context van vergelijking van methoden.

BASISCONCEPTEN/ DEELMETHODEN	VERONDERSTELLINGEN	NADEEL	VOORDEEL
<b>Keuze van de maatgevende neerslag</b>			
<b>enkelvoudige gebeurtenis</b>	terugkeerperiode van de neerslagafvoer (modeluitvoer) is identiek aan de terugkeerperiode van de neerslag (modelinvoer)	concentratietijd stroomgebiedje moet ingeschat worden (buiduur)	korte rekentijd
geselecteerde historische bui		terugkeerperiodes beperkt tot waargenomen buien, meestal geen afgeronde waarden	
blokneerslag		slechts bruikbaar voor 1 welbepaalde locatie, met welbepaalde concentratietijd	
composietbui			zelfde bui bruikbaar voor meerdere locaties, met verschillende concentratietijden
<b>tijdreeks</b>		lange rekentijd	
historische waarnemingen/ontwerptabel Code: Ukkelreeks	meetperiode voldoende lang om nauwkeurige lange-termijn statistieken af te leiden ; statistische karakteristieken afgeleid uit meetperiode representatief voor lange-termijn statistieken; neerslagreeks omvat volledige klimaatoscillatieperiodes	gebonden aan beschikbare meetperiode en meetlocatie	
stochastisch gegeneerd	meetperiode historische metingen waaraan de neerslaggenerator werd afgeijkt is voldoende lang om nauwkeurige neerslagkarakteristieken en kansverdelingen af te leiden; en representatief voor lange-termijn statistieken; neerslagreeks omvat volledige klimaatoscillatieperiodes		tijds lengte onbeperkt (maar gebaseerd op extrapolatie historische meetreeks); kan ruimtelijk gedetailleerde en gecorreleerde neerslaginformatie aanleveren
<b>aspect statistische tijdreeksanalyse</b>			
periodieke (vb. Jaarlijkse) maxima		niet alle onafhankelijke waarden worden gebruikt: kleinere dataset, vaak minder nauwkeurige statistische analyse	eenduidige selectie extremen; geen subjectieve onafhankelijkheids-criteria
POT/PDS methode		subjectieve keuze onafhankelijkheids-criteria	alle onafhankelijke waarden worden gebruikt: grotere dataset, nauwkeurigere statistische analyse

BASISCONCEPTEN/ DEELMETHODEN	VERONDERSTELLINGEN	NADEEL	VOORDEEL
<b>aspect berekening concentratietijd</b>			
o.b.v. kinematische golfsnelheid	in oppervlakteafstroming kan de invloed van traagheid en drukgradiënt verwaarloosd worden in vergelijking met energieverliezen als gevolg van wrijving en de invloed van de bodemhelling (zwaartekracht)	vereist informatie over de lengte, helling en ruwheid van het stroomgebiedje; wrijvingswet moet gekozen worden	gebaseerd op universele hydrodynamische stromingsvergelijkingen
o.b.v. permanente eenparige stroming en wet van Manning	afstroming is permanent en eenparig: geen verandering in tijd en plaats	vereist informatie over de lengte, helling en ruwheid van het stroomgebiedje	geeft goede benadering van meer complexe methoden
o.b.v. empirische formules		weinig betrouwbaar: verschillende formules blijken soms sterk verschillende schattingen op te leveren; vereist gebiedsinformatie, afhankelijk van de methode, typische informatie over de lengte, helling en ruwheid van het stroomgebiedje	eenvoudig
10-min veronderstellen; ontwerptabel Code	concentratietijd is 10-minuten	concentratietijd wordt niet expliciet berekend maar verondersteld	zeer eenvoudig
<b>Berekening van het opwaartse neerslagafstromingsdebiet</b>			
<b>aspect discreet/continue</b>			
gebeurtenis-gebaseerd model		onzekere inschatting initiële conditie (vb. verzadigingstoestand ondergrond); enkel te combineren met enkelvoudige neerslaggebeurtenis	eenvoud en korte rekentijd
continu simulatiemodel		lange neerslaginvoerreeks nodig	lange-termijn simulaties van neerslagtijdreeks mogelijk
<b>aspect ruimtelijke gedetailleerdheid</b>			
gebiedsgemiddeld		goede benadering van kleine gebiedjes met min of meer homogene gebiedseigenschappen	eenvoud, modelparameters identificeerbaar
ruimtelijk verdeeld		complexe modelimplementatie; overparameterisatie	houdt ruimtelijk expliciet rekening met niet-homogene gebiedseigenschappen
<b>gedetailleerd fysisch-gebaseerde model</b>			
		overparameterisatie; grote rekentijd	modelparameters kunnen gerelateerd worden aan gekende gebiedseigenschappen, zoals topografie, landgebruik en bodemtype; is een voordeel voor onbemeten stroomgebieden
STREAM-model		geldig voor stroomgebieden in Normandië; o.b.v. enkelvoudige gebeurtenis: initiële condities zijn dus sterk	expert-gebaseerd op basis van groot aantal metingen in kleine stroomgebieden; toepassing in Evrard et al. (2009) in 2

BASISCONCEPTEN/ DEELMETHODEN	VERONDERSTELLINGEN	NADEEL	VOORDEEL
		bepalend	Vlaamse stroomgebieden leverde goede nauwkeurigheid op, maar enkel na aanpassing infiltratieparameters aan lokale meetwaarden
<b>conceptueel simulatiemodel</b>		parameters niet rechtstreeks meetbaar; dienen gekalibreerd te worden of ingeschat voor onbemeten stroomgebieden	kleine rekentijd
<b>empirische of eenvoudig conceptueel model</b>		enkel geldig voor beperkt bereik aan gebiedseigenschappen of neerslagcondities	kleine rekentijd; parameters kunnen geschat worden voor onbemeten stroomgebieden
<b>stap 1: Berekening netto neerslag</b>			
SCS-methode	de verhouding van de berging in de ondergrond op het ogenblik dat oppervlakteafstroming begint over de bergingscapaciteit gelijk is aan de verhouding van het volume oppervlakteafstroming over het volume beschikbare neerslag; de initiële oppervlakteverliezen bedragen een vaste fractie van de bergingscapaciteit van de ondergrond; neerslagintensiteit is groter dan S/5	empirisch geschatte parameters mogelijk niet nauwkeurig voor specifieke stroomgebieden; runoff-coëfficiënt wordt constant verondersteld tijdens de duur van de neerslaggebeurtenis; niet bruikbaar voor neerslagintensiteiten kleiner dan S/5; onrealistisch lage runoff-coëfficiënten voor kleine terugkeerperioden en kleine concentratietijden	eenvoudige methode; geen kalibratie nodig
aangepaste SCS-methode	SCS-methode, maar met de "runoff-coëfficiënt" berekend via de daggemiddelde neerslag en toegepast op de neerslagintensiteiten bij kleinere concentratietijden	zelfde nadelen als gewone SCS-methode	runoff-coëfficiënt is realistischer in vergelijking met de gewone SCS-methode
rationele methode; vaste runoff coëfficiënt	runoff-coëfficiënt is constant en ganse stroomgebied draagt evenredig met de oppervlakte bij tot de afvoer; eventueel kan de runoff-coëfficiënt gekozen worden bij stroomgebiedscondities met hoge neerslagafstroming, vb. hoge bodemverzadiging, korstvorming, bodemruwheid	empirisch geschatte parameters mogelijk niet nauwkeurig voor specifieke stroomgebieden; runoff-coëfficiënt wordt constant verondersteld per stroomgebied, niet afhankelijk van bodemvochtgehalte of voorafgaandelijke neerslag	eenvoudige methode; geen kalibratie nodig
<b>stap 2: Berekening afvoerdebiet</b>			
eenheidshydrogram (driehoekig bij SCS-methode, trapezoidaal bij rationele methode)	het stroomgebied draagt bij tot de afvoer, proportioneel met de tijd tot het begin van de bui	kunstmatige vorm eenheidshydrogram; enkel snelle afstromingscomponent beschouwd	eenvoudige handmatige berekening
lineair reservoirmodel (exponentieel eenheidshydrogram)	model volgt het natuurlijk afstromingsgedrag van het stroomgebied		parameter k kan afgeleid worden uit debietmeetgegevens; drie deelstromen kunnen eenvoudig beschouwd worden via 3 reservoirs in parallel;



BASISCONCEPTEN/ DEELMETHODEN	VERONDERSTELLINGEN	NADEEL	VOORDEEL
o.b.v. debietmeetgegevens	debietpiek is proportioneel met stroomgebiedsoppervlakte, dus stroomgebied is homogeen en draagt volledig bij tot de afvoer	vereist debietmetingen	of meerdere reservoirs in serie voor buffergrachten kan afgeleid worden van geval-specifieke debietmetingen
<b>Modellering opvangsysteem</b>			
<b>reservoirmodel</b>	opvangsysteem bestaat uit enkelvoudig buffervolume; behoud van volume		
<b>cascade reservoirmodellen</b>	opvangsysteem bestaat uit aaneenschakeling van buffervolumes zoals bij buffergrachten		
<b>Berekening of keuze van het doorvoerdebiet</b>			
<b>lineair reservoirmodel</b>	doorvoerdebiet lineair afhankelijk van het bergingsvolume	goede benadering gravitaire uitstroom	
<b>constant doorvoerdebiet</b>	doorvoerdebiet verondersteld o.b.v. afvoercapaciteit afwaarts watersysteem (vb. gracht, waterloop, riolering)	enkel geldig voor wervelventiel	
<b>debietformule stroming door openingen</b>	debietcoëfficiënt ingeschat		correcte formule stroming door knijpopening
<b>Berekening van de afwaartse veiligheid</b>			
<b>vuistregel overlooffrequentie</b>	overlooffrequentie en frequentie afwaartse gevolgen identiek	invloed op het afwaarts watersysteem wordt niet expliciet gekwantificeerd; vuistregel op basis van ervaring	
<b>kwantificering overstromingsgevolgen</b>			invloed op het afwaarts watersysteem wordt expliciet gekwantificeerd
kans op overstroming		de overstromingsgevolgen worden niet gekwantificeerd	
overstromingsrisico (convolutie kans en gevolgen)			overstromingsgevolgen worden expliciet ingerekend

BASISCONCEPTEN/ DEELMETHODEN	VERONDERSTELLINGEN	NADEEL	VOORDEEL
<b>Berekening effectiviteit opvangsysteem en bepaling benodigd bergingsvolume</b>			
<b>hydraulische effectiviteit; op basis van overloopfrequentie</b>	zie hiervoor		
via tijdreeks simulatie/ontwerp- tabel Code			correcte berekening benodigd buffervolume
via volume ontwerp bui min doorvoer	ontwerpbuizen o.b.v. IDF gebaseerd op geen voorafgaandelijke en navolgende neerslag; wat niet juist is!	benodigd buffervolume wordt onderschat	
<b>hydraulische effectiviteit; op basis van afwaarts overstromingsrisico</b>	zie hiervoor		
<b>effectiviteit sedimentopvang</b>			
Stap 1: berekening boderverlies			
Fysisch-gebaseerde modellering		Zie voor- en nadelen fysisch-gebaseerde modellering bij neerslagafvoermodellering	
RUSLE methode		grote onzekerheden door het universeel karakter	eenvoud
op basis van gemeten sedimentconcentraties tijdens hoogwatergolven	voor grotere stroomgebieden van grootteorde 300 ha	ook grote onzekerheid	op basis van meetwaarden voor Vlaanderen
Stap 2: berekening vangefficiëntie			
op basis van bezinkingssnelheid	wet van Stokes		

## 5 Onderzoek naar de geldigheid van de veronderstellingen voor Vlaanderen

Na het overzicht van de verschillende methoden en veronderstellingen wordt in dit deel in een tweede analyse nagegaan welke veronderstellingen voor Vlaamse kleine landelijke deelstroomgebieden en voor de opvangsystemen beschouwd in deze opdracht, al dan niet (of mogelijk) geldig zijn. Het resultaat van deze analyse is samengevat in Tabel 19.

Tabel 19. Indicatie m.b.t. geldigheid van de basisconcepten/deelmethoden voor Vlaamse kleine landelijke stroomgebiedjes en voor de opvangsystemen beschouwd in deze opdracht.

BASISCONCEPTEN/ DEELMETHODEN	GELDIGHEID/TOEPASBAARHEID
<b>Keuze van de maatgevende neerslag</b>	
<b>enkelvoudige gebeurtenis</b> (geselecteerde historische bui, blokneerslag of composietbui)	niet geldig voor niet-sterk verharde gebieden: waar runoff sterk afhangt van (seizoens)variatie in verzadigingsgehalte van de ondergrond; d.i. het geval voor de opwaartse, vaak landelijke stroomgebiedjes die hier beschouwd worden
<b>tijdreeks</b>	
historische waarnemingen/ontwerptabel Code: Ukkelreeks	lange-termijn Ukkelreeks beschikbaar (1898-2007); geldig voor gans Vlaanderen, behalve polderstreek; periode 1970-2007 omvat volledige oscillatieperioden; reeks wordt ook gebruikt aan de basis van ontwerp van rioleringsstelsels en door waterbeheerders (vb. VMM-AOW) voor overstromingskansberekening langs onbevaarbare waterlopen
stochastisch gegeneerd	nog geen nauwkeurige stochastisch gegeneerde reeks beschikbaar voor Vlaanderen; komt op korte termijn wel beschikbaar via onderzoeksprojecten voor VMM-AOW en FWO door U.Gent & KU Leuven; maar afgeijkt aan de Ukkel-reeks, dus weinig voordeel in vergelijking met de beschikbare Ukkel-reeks, tenzij voor het ruimtelijk aspect, maar dat speelt weinig voor kleine stroomgebiedjes
<b>aspect statistische tijdreeksanalyse</b>	
periodieke (vb. Jaarlijkse) maxima	levert vertekende resultaten op voor de kleine terugkeerperioden die typisch beschouwd worden voor kleinschalige opvangsystemen
POT/PDS methode	steeds geldig en hier zeker toepasbaar; nodige software-ondersteuning beschikbaar
<b>aspect berekening concentratietijd</b>	
o.b.v. kinematische golfsnelheid	goede benadering voor opwaartse stroomgebiedjes
o.b.v. wet van Manning	goede benadering voor opwaartse stroomgebiedjes
o.b.v. empirische formules	nauwkeurigheid minder duidelijk, wel in grootteorde, wat volstaat voor de hier beschouwde toepassing; eventueel meerdere methoden toepassen en resultaten onderling vergelijken; de Kirpich-methode werd in Vlaanderen frequent toegepast en blijkt goede resultaten te geven
10-min veronderstellen; ontwerptabel Code	niet nauwkeurig: concentratietijd moet expliciet berekend worden
<b>Berekening van het opwaartse neerslagafstromingsdebiet</b>	
<b>aspect discreet/continue</b>	
gebeurtenis-gebaseerd model	niet geldig voor niet-sterk verharde gebieden door grote invloed en onzekere inschatting initieel bodemvochtgehalte
continu simulatiemodel	aanbevolen voor niet-sterk verharde gebieden want rekening houdend met sterke tijdsdynamiek invloed bodemvochtgehalte
<b>aspect ruimtelijke gedetailleerdheid</b>	
gebiedsgemiddeld	niet geldig voor grote, niet homogene stroomgebieden, of waarvoor de neerslagintensiteit ruimtelijk sterk kan variëren
ruimtelijk verdeeld	bepert geldig (vb. uitvoeren van ruimtelijke analyses, nauwkeurigheid problematisch door overparameterisatie)
<b>gedetailleerd fysisch-gebaseerd model</b>	
STREAM-model	zeer geldig maar beperkt toepasbaar voor de hier beschouwde toepassing door overparameterisatie
	mogelijks geldig, maar vereist de opmaak van specifieke Vlaamse expert-gebaseerde modeltabellen of kalibratie aan meetreeksen van afstromingsdebieten, wat op korte termijn niet haalbaar is en ook niet kosten-efficiënt lijkt

BASISCONCEPTEN/ DEELMETHODEN	GELDIGHEID/TOEPASBAARHEID
<b>conceptueel simulatiemodel</b>	geldig en toepasbaar voor homogene stroomgebieden opwaarts van beschikbare debietmeetstations
<b>empirische of eenvoudig conceptueel model</b>	beperkt geldig afhankelijk van methode en veronderstellingen
stap 1: Berekening netto neerslag	
SCS methode	beperkt geldig voor grotere terugkeerperioden (grootteorde 20 jaar of meer) en wanneer netto neerslag wordt berekend op basis van dagneerslag
aangepaste SCS-methode	methode wordt door de aanpassing geldig voor concentratietijden kleiner dan 1 dag, maar de methode blijft beperkt geldig voor grote terugkeerperioden
rationele methode; vaste runoff coëfficiënt	niet geldig voor stroomgebieden waarvoor de runoff-coëfficiënt sterk varieert in tijd en ruimte; het ruimtelijk aspect is OK voor kleine stroomgebieden; het tijdsaspect is niet OK voor niet-sterk verharde gebieden: waar runoff sterk afhangt van (seizoens)variatie in verzadigingsgehalte van de ondergrond, voorafgaandelijke neerslag, bodemruwheid en korstvorming; d.i. het geval voor de opwaartse, vaak landelijke stroomgebiedjes die hier beschouwd worden; de geschatte runoff-coëfficiënten, vb. op basis van de tabellen in deel 3.4.3.1, kunnen zeer onzeker zijn (de tabellen bevatten brede marges) want gebaseerd op internationale waarnemingen
stap 2: Berekening afvoerdebiet	
enkelvoudig eenheidshydrogram	geldig voor kleine stroomgebieden met natuurlijke neerslagafstroming, en waarvoor de basisafvoer verwaarloosd kan worden
lineair reservoirmodel	geldig voor kleine stroomgebieden met natuurlijke neerslagafstroming
o.b.v. debietgegevens	niet geldig voor grote, niet homogene stroomgebieden; niet toepasbaar in stroomgebieden waar geen debietmetingen beschikbaar zijn
<b>Modellering opvangsysteem</b>	
<b>reservoirmodel</b>	geldig voor elk enkelvoudig opvangsysteem: bufferbekken, erosiepoel
<b>cascade reservoirmodellen</b>	geldig voor buffergrachten
<b>Berekening of keuze van het doorvoerdebiet</b>	
<b>lineair reservoirmodel</b>	geldig voor gravitaire en vrije uitstroom
<b>constant doorvoerdebiet</b>	geldig bij wervelventiel
<b>debietformule stroming door openingen</b>	geldig voor vrije uitstroom door opening, vb. knijpopening of opening onder een schuifafsluiter
<b>Berekening van de afwaartse veiligheid</b>	
<b>vuiستregel overloopfrequentie</b>	
<b>kwantificering overstromingsgevolgen</b>	aanbevolen methode
<b>kans op overstroming overstromingsrisico (convolutie kans en gevolgen)</b>	aanbevolen methode

BASISCONCEPTEN/ DEELMETHODEN	GELDIGHEID/TOEPASBAARHEID
<b>Berekening effectiviteit opvangsysteem en bepaling benodigd bergingsvolume</b>	
<b>hydraulische effectiviteit; op basis van overloopfrequentie</b>	
via tijdreekssimulatie/ontwerp- tabel Code	tijdreekssimulatie is steeds geldig; ontwerptabel code vereist correcte inschatting concentratietijd
via volume ontwerp-bui min doorvoer	niet geldig omdat ontwerp-buizen o.b.v. IDF geen voorafgaandelijke en navolgende neerslag inrekenen
<b>hydraulische effectiviteit; op basis van afwaarts overstromingsrisico</b>	
<b>effectiviteit sedimentopvang</b>	
Stap 1: berekening bodemverlies	
RUSLE methode	geldig maar met de nodige voorzichtigheid te gebruiken, gegeven dat het universele karakter van de RUSLE formule internationaal al meermaals is tegengesproken
op basis van gemeten sedimentconcentraties tijdens hoogwatergolven	geldig tijdens hoogwaterperioden en voor stroomgebieden met gelijklopende, homogene eigenschappen als deze van de grote stroomgebieden grootteorde 300 ha in Bovenschelde en Demerbekken waarvoor de metingen werden doorgevoerd
Stap 2: berekening vangefficiëntie	
op basis van bezinkingsnelheid	geldig via universele wet van Stokes; vaak wordt verondersteld dat de gemiddelde deeltjesgrootte representatief is voor bezinkingsnelheid, maar gevoeligheidsanalyse voor minimale groottes is mogelijk

Merk op dat er in de analyse geen onderscheid werd gemaakt tussen de toepasbaarheid voor verschillende soorten opvangsystemen, zoals bufferbekkens, buffergrachten en erosiepoelen. Alle methodes zijn immers toepasbaar voor al deze typen van opvangsystemen. Merk ook op dat alle methoden toelaten om rekening te houden met de eventuele instroom van opwaartse grachten, verharde gebieden of regenwaterriolering. Ook laten ze allen toe om zowel opvangsystemen te dimensioneren onder huidige klimaatcondities als om toekomstige klimaatscenario's door te rekenen (zie deel 3.9).

## 6 Inventaris van de benodigde invoer-, parameter- en kalibratiegegevens en beschikbaarheid in Vlaanderen

In dit deel wordt in een derde analyse voor de verschillende deelmethodes een overzicht gegeven (Tabel 20) van de benodigde gegevens (voor modelinvoer, parameterschatting en modelkalibratie), en hun beschikbaarheid. De minder relevante vakken zijn niet ingevuld. Ook is een indicatie gegeven van het tijdsbestek bij de toepassing van de methoden (voor de deelmethodes waarvoor dit relevant is). Hierbij zijn voor de eenvoud drie klassen gebruikt. Een “klein tijdsbestek” betekent dat na het opzoeken van de gegevens de toepassing van de methode bestaat uit een eenvoudige handberekening. Een “middelgroot tijdsbestek” betekent dat er een computersimulatie dient te gebeuren die mits de nodige software-ondersteuning relatief snel doorgevoerd kan worden. Een “groot tijdsbestek” vraagt een meer tijdrovende modelimplementatie- en simulatie.

Tabel 20. Indicatie van de benodigde gegevens en het tijdsbestek voor elk van de deelmethodes.

BASISCONCEPTEN/ DEELMETHODEN	BENODIGDE GEGEVENS	BESCHIKBAARHEID GEGEVENS	TIJDSBESTEK
<b>Keuze van de maatgevende neerslag</b>			
<b>enkelvoudige gebeurtenis</b>			
geselecteerde historische bui	bestaande historische meetreeksen (lokaal of Ukkel)	Beschikbaar	Klein
blokneerslag	bestaande IDF-verbanden	Beschikbaar	Klein
composietbui	bestaande composietbuizen	Beschikbaar	Klein
<b>Tijdreeks</b>			
historische waarnemingen/ontwerptabel Code: Ukkelreeks	bestaande Ukkel-neerslagreeks of bestaande ontwerptabel	Beschikbaar	Middelgroot
stochastisch gegenereerd	stochastische neerslaggenerator, of gegenereerde 10-min neerslagreeksen	nog niet beschikbaar; in opmaak in lopende onderzoeksprojecten	Middelgroot
<b>aspect statistische tijdreeksanalyse</b>			
periodieke (vb. jaarlijkse) maxima	lange-termijn tijdreeks		
POT/PDS methode	lange-termijn tijdreeks		
<b>aspect berekening concentratietijd</b>			
o.b.v. kinematische golfsnelheid	lengte, helling en ruwheid stroomgebied, neerslagintensiteit	Standaard beschikbaar	Klein
o.b.v. wet van Manning	lengte, helling en ruwheid stroomgebied, neerslagintensiteit	Standaard beschikbaar	Klein
o.b.v. empirische formules	afhankelijk van de methode: typisch lengte, helling, ruwheid, runoff-coëfficiënt en/of neerslagintensiteit	Standaard beschikbaar	Klein
10-min veronderstellen; ontwerptabel Code	ontwerptabel code	Beschikbaar	Klein
<b>Berekening van het opwaartse neerslagafstromingsdebiet</b>			
<b>aspect discreet/continue</b>			
gebeurtenis-gebaseerd model	enkelvoudige neerslaggebeurtenissen	Beschikbaar in combinatie met gebruik “enkelvoudige neerslaggebeurtenis” als maatgevende neerslag	Klein
continu simulatiemodel	lange-termijn neerslagreeks	Beschikbaar in combinatie met tijdreeksmethode	Middelgroot

BASISCONCEPTEN/ DEELMETHODEN	BENODIGDE GEGEVENS	BESCHIKBAARHEID GEGEVENS	TIJDSBESTEK
<b>aspect ruimtelijke gedetailleerdheid</b>			
gebiedsgemiddeld		Af te leiden van beschikbare ruimtelijke verdeelde gegevens	Klein/ Middelgroot
ruimtelijk verdeeld		Gedeeltelijk beschikbaar: DEM, landgebruik, bodemtype /textuur	Groot
<b>gedetailleerd fysisch- gebaseerde model</b>	per pixel of perceel met homogene gebiedseigenschappen: neerslag, potentiële evapotranspiratie (PET), gemiddelde terreinhoogte, landgebruik, bodemtype/textuur + ev. i.f.v. type model: geologische en watervoerende lagen en karakteristieken, hydraulische conductiviteit ondergrond (per laag), specifieke bergingscoëfficiënt, enz.; om overparameterisatieprobleem te verminderen: validatiegegevens meetreeksen grondwaterstanden, bodemvochtgehalten, interne debietmeetstations	Gedeeltelijk beschikbaar: neerslag na ruimtelijke interpolatie pluviografen + ev. gebruik radardata, dichtstbijzijnde PET- meting, DEM, landgebruik, bodemtype/textuur	Groot
STREAM-model	oppervlaktetextuur, bodemtype, landgebruik; tabellen om modelparameters te schatten o.b.v. landgebruik en bodemtype	tabellen niet specifiek voor Vlaanderen beschikbaar; zouden specifiek voor Vlaanderen kunnen opgemaakt worden; maar vereist mogelijk zeer groot aantal bemeten stroomgebieden, dus niet haalbaar; tenzij de parameters eerder bepaald in de studie van Evrard (2007b) ook voor andere streken in Vlaanderen toegepast kunnen worden	
<b>conceptueel simulatiemodel</b>	oppervlakte stroomgebied, gebiedsgemiddelde neerslag en PET	beschikbaar na ruimtelijke neerslaginterpolatie; modellen reeds beschikbaar per VHA- zone gebiedsgemiddeld bij WL (NAM), VMM- AOW (PDM) en bepaalde provincies	Middelgroot
<b>empirische of eenvoudig conceptueel model</b>			Klein
stap 1: Berekening netto neerslag			
SCS methode	landgebruik of gewas, teelttechniek, hydrologische condities, hydrologische bodengroep, neerslagintensiteit: dag neerslag en bij concentratietijd	Standaard beschikbaar	
rationele methode; vaste runoff coëfficiënt	landgebruik, ev.: gewas, helling, bodemtype, neerslagintensiteit bij concentratietijd	Standaard beschikbaar	

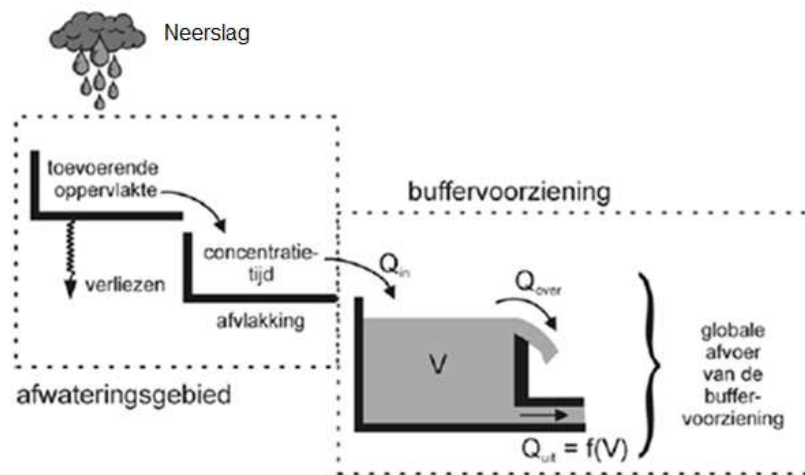
BASISCONCEPTEN/ DEELMETHODEN	BENODIGDE GEGEVENS	BESCHIKBAARHEID GEGEVENS	TIJDSBESTEK
<b>stap 2: Berekening afvoerdebit</b>			
enkelvoudig eenheidshydrogram	concentratietijd	te berekenen; zie deelmethode "concentratietijd"	
lineair reservoirmodel	recessieconstante	te schatten via deelmethode "concentratietijd" of af te leiden van debietmeetgegevens	
o.b.v. debietgegevens	debietmeetreeksen voor enkele hydrogrammen incl. dalende debietflank	meestal slechts meer afwaarts beschikbaar	
<b>Modellering opvangsysteem</b>			
<b>reservoirmodel</b>	doorvoerdebit		
<b>cascade reservoirmodellen</b>	overloophoogten		
<b>Berekening of keuze van het doorvoerdebit</b>			
<b>lineair reservoirmodel</b>			
<b>constant doorvoerdebit</b>			
<b>debitformule stroming door openingen</b>	knijpopening of de opening onder de schuifafsluiter		
<b>Berekening van de afwaartse veiligheid</b>			
<b>vuistregel overlooffrequentie</b>			Klein
<b>kwantificering overstromingsgevolgen</b>	hydraulisch model afwaarts watersysteem		Groot
kans op overstroming	hydraulisch overstromingsmodel + DEM		
overstromingsrisico (convolutie kans en gevolgen)	schadeberekingsmodel (vb. LATIC-tool)		
<b>Berekening effectiviteit opvangsysteem en bepaling benodigd bergingsvolume</b>			
<b>hydraulische effectiviteit; op basis van overlooffrequentie</b>			Klein/ Middelgroot
via tijdreeks simulatie/ontwerptabel Code			
via volume ontwerpbui min doorvoer			
<b>hydraulische effectiviteit; op basis van afwaarts overstromingsrisico</b>			Groot
<b>effectiviteit sedimentopvang</b>			Middelgroot
Stap 1: berekening bodemverlies			
RUSLE methode	neerslagpatroon, bodemeigenschappen, terreinlengte en -helling, teeltrotatie en grondbewerkingspraktijk	meeste zijn standaard beschikbaar; alternatief kan ook de Vlaamse potentiële bodemerosiekaart per perceel gebruikt worden	Beschikbaar
op basis van gemeten sedimentconcentraties tijdens hoogwatergolven		Beschikbaar	
Stap 2: berekening vangefficiëntie			
Op basis van bezinkingssnelheid	Bodemtype; verdeling deeltjesgrootte	Schatting beschikbaar	



Merk op dat voor de meeste methoden de benodigde gegevens, zoals in Tabel 20 opgelijst, standaard of minimaal beschikbaar zijn. Enkel voor de meer complexe modelleringsmethoden zijn niet alle meetgegevens beschikbaar, maar kunnen nog steeds via veronderstellingen en kalibratie aan debietmeetgegevens schattingen gemaakt worden. Aangezien er geen garantie is dat dure, bijkomende meetcampagnes een hoge modelleringsnauwkeurigheid opleveren, worden ze hier slechts aanbevolen als “mogelijk toepasbaar” (zie ook volgend deel 7).

## 7 Selectie van meest geschikte methode(n) voor Vlaanderen

Op basis van de voorgaande drie analyses (zie delen 3, 4 en 5) en de bijhorende overzichtstabellen wordt in dit hoofdstuk een aanbeveling gemaakt voor de meest geschikte methode: de continue simulatiemethode. In wat volgt zullen de verschillende deelaspecten van deze methode (zie Figuur 51) behandeld worden en wordt er op basis van de hoofdstukken 3, 4 en 5 geconcludeerd wat de meest geschikte deelmethode is voor het beschouwde deelaspect. Om de toepassing van de continue simulatiemethode voor de gebruiker te vereenvoudigen werd een rekeninstrument ontwikkeld, dat de continue simulatie methode kan toepassen in twee richtingen: de berekening van het benodigde buffervolume op basis van de karakteristieken van het afwateringsgebied en het bepalen van de terugkeerperiode van overloop van een ontworpen bufferbekken.



Figuur 51. Schematisch overzicht van de deelaspecten betrokken in de hydrologische en hydraulische modellering van kleinschalige opvangsystemen (gebaseerd op Vaes, 1999)

Het eerste deelaspect van het model is de maatgevende neerslag die wordt aangelegd in het model, ter berekening van de benodigde buffercapaciteit. Hiervoor zijn er twee mogelijkheden: ofwel wordt een enkelvoudige bui (blokneerslag of composietbui) opgelegd ofwel een langdurige tijdreeks (bijvoorbeeld de 100-jarige Ukkel-neerslagreeks). De eerste deelmethode is de methode met de statistiek vooraf, aangezien de blokneerslag en composietbui afgeleid zijn van IDF-curve op basis van de Ukkel-neerslag reeks. De tweede deelmethode is een methode waarbij de statistiek pas achteraf wordt toegepast. Het grote voordeel van het gebruik van de continue neerslagreeks t.o.v. enkelvoudige buien is dat er in het model rekening kan gehouden worden met een voorafgaandelijke vulling van het bufferbekken. Bijgevolg kan de invloed van kort op elkaar volgende buien meegerekend worden. In de continue simulatieaanpak (en het rekeninstrument) wordt daarom gebruik gemaakt van een continue tijdreeks, meer bepaald de 100-jarige Ukkel-neerslagreeks met een tijdsresolutie van 10 minuten. Tevens is de mogelijkheid voorzien om deze neerslagreeks, na aanpassing aan de beschikbare Vlaamse klimaatscenario's, door te rekenen.

Het volgende onderdeel is het afwateringsgebied, opwaarts van het bufferbekken, dat het neerslagafstromingsdebiet bepaalt. Voor de kwantificering van dit debiet zijn er twee belangrijke aspecten: de verliezen als gevolg van evapotranspiratie en infiltratie en de afvlakking als gevolg van de uitgestrektheid van het afwateringsgebied. Dit kan gemodelleerd worden met behulp van een gedetailleerd fysisch-gebaseerd model, wat echter als nadeel heeft dat deze modellen veel informatie vragen en een grote rekentijd nodig hebben om een continue tijdreeks door te rekenen. Eenvoudiger is het gebruik van een gebiedsgemiddeld conceptueel simulatiemodel. In de continue simulatiemethode wordt gebruik gemaakt van het lineaire reservoir model (zie deel 3.4.3). Dit eenvoudige model maakt gebruik van slechts twee parameters: de runoff-coëfficiënt

om de verliezen te begroten (stap 1: berekening netto neerslag) en de concentratietijd om de afvlakking in te rekenen (stap 2: berekening afvoerdebiet). De berekening van de netto neerslag gebeurt dus op basis van de rationele methode, toegepast op de historische neerslagreeksen. De afvlakking wordt in rekening gebracht met behulp van het lineaire reservoirmodel. Indien metingen beschikbaar zijn kan de runoff-coëfficiënt (en de variatie ervan) en de recessieconstante afgeleid worden uit deze metingen. In het andere geval kan de runoff-coëfficiënt afgeleid worden uit de tabellen in deel 3.4.3.1 en wordt de recessieconstante gelijk gesteld aan de concentratietijd. Deze laatste kan berekend worden met behulp van de empirische formules uit deel 3.3.6 of ingeschat worden op basis van observaties in het veld. Aangezien hier relatief kleine (en dus uniforme) afwateringsgebieden beschouwd worden, is het gebruik van dergelijke gebiedsgemiddelde conceptuele modellen verantwoord. In deel 9.3 en 9.4 wordt voor twee bemeten gebieden de nauwkeurigheid van dergelijke modellen aangetoond.

Tot slot is er de modellering van de eigenlijke buffervoorziening. De meest geschikte deelmethode hiervoor is eerder in deel 3.5 beschreven en maakt gebruik van het behoud van volume. Bufferbekkens en erosiepoelen maken gebruik van één enkel reservoir, terwijl een buffergracht best gemodelleerd wordt als een opeenvolging van reservoirs, een zogenaamde 'Nash-cascade'. Op basis van het waterpeil in het bufferbekken kan dan het doorvoer- en eventueel overstortdebiet berekend worden, via de formules in deel 3.6. De meest geschikte methode hiervoor is om gebruik te maken van een vierkantswortel relatie tussen het volume (of het waterpeil) in het bufferbekken en het doorvoerdebiet, aangezien dit het beste overeenstemt met de werkelijkheid. De formules in deel 3.6 drukken het debiet uit in functie van het waterpeil (zie vergelijking (14)), terwijl in de continue simulatiemethode enkel volumes berekend worden voor het bufferbekken. Aangezien een constante horizontale oppervlakte verondersteld wordt, is de verhouding van het huidige volume tot het maximaal volume gelijk aan de verhouding van het huidige waterpeil tot het maximale. Het huidige debiet wordt dan berekend als het product van het maximale debiet en de vierkantswortel van de verhouding tussen huidig volume en maximale volume. Volledig uitgeschreven wordt dit dan:

$$Q(t) = Q_{\max} \cdot \sqrt{\frac{h(t)}{h_{\max}}} = Q_{\max} \cdot \sqrt{\frac{V(t)}{V_{\max}}}$$

Met  $Q(t)$ ,  $h(t)$  en  $V(t)$  respectievelijk het debiet, waterpeil en volume op het huidige tijdstip en  $Q_{\max}$ ,  $h_{\max}$  en  $V_{\max}$  het maximale debiet, waterpeil en volume.

De continue simulatieaanpak wordt hier dus aanbevolen als meest geschikte methode voor de berekening en narekening van benodigde buffervolumes. Ze levert immers de meest nauwkeurige, niet vertekende resultaten op, is eenvoudig toepasbaar en vereist geen bijkomende gegevens dan deze die standaard beschikbaar zijn in Vlaanderen. Het is verrassend dat deze methode niet eerder in Vlaanderen rechtstreeks voor het ontwerp van opvangsystemen voor erosiebestrijding werd toegepast (zie deel 8). Onrechtstreeks (maar onbewust) wordt ze wel toegepast indien de ontwerptabel uit de code van goede praktijk voor het ontwerp van rioleringsstelsels wordt gebruikt. Probleem is echter dat deze tabel zich beperkt tot een concentratietijd van 10 minuten, maar soms foutief ook voor stroomgebieden met een grotere concentratietijd wordt toegepast.

Er bestaan meer geavanceerde methoden, die bijkomende gegevens vereisen, welke ook een goede nauwkeurigheid kunnen opleveren, maar waar weinig of geen ervaring mee is in de context van het ontwerp van kleinschalige opvangsystemen. Gedetailleerd ruimtelijk verdeelde hydrologische modellen, bijvoorbeeld, laten toe om expliciet met de ruimtelijke spreiding van de stroomgebiedseigenschappen rekening te houden, maar zijn overgeparameteriseerd en daardoor niet noodzakelijk nauwkeuriger. Ze worden hier geklasseerd als "mogelijk toepasbaar" omdat er weinig ervaring mee is en niet eerder op basis van Vlaamse meetgegevens gevalideerd werden. Met validatie wordt hier bedoeld het opbouwen en kalibreren van het model op basis van gekende gebiedseigenschappen en bepaalde meetgegevens, en de controle voor meetreeksen (vb. debietmeetreeksen) op andere locaties (niet gebruikt bij de kalibratie, ook niet voor bepaalde deelperioden). Bijkomend onderzoek zou samen met intensieve meetcampagnes kunnen uitgevoerd worden om de bruikbaarheid van zulke methoden verder te onderzoeken, maar er wordt verwacht dat dit slechts op lange termijn

rendeert (niet enkel in de context van erosiebestrijding, maar ook voor tal van andere hydrologische modelleringstoepassingen).

Tabel 21 geeft een overzicht van de verschillende deelaspecten van de modellering van kleinschalige opvangsystemen en de daarbij horende deelmethoden die gebruikt kunnen worden in de modellering. De deelmethoden die gebruikt worden in de aanbevolen continue simulatiemethode zijn hierin aangegeven met een kruisje. In deelopdracht 2 van deze studie (zie deel 9) is de methode toegepast en onderworpen aan een validatie voor verschillende gevalstudies. In die deelopdracht is deze methode daarnaast ook nog vergeleken met de methoden die op dit ogenblik meest frequent worden toegepast, zoals de methode op basis van blokneerslag in combinatie met de rationele methode en de SCS-methode.

Tabel 21. Selectie van de meest geschikte deelmethode(n) voor kleine landelijke stroomgebiedjes en opvangsystemen beschouwd in deze opdracht.

BASISCONCEPTEN/ DEELMETHODEN	MEEST GESCHIKTE METHODE(N)
<b>Maatgevende neerslag</b>	
<b>Enkelvoudige gebeurtenis</b>	
geselecteerde historische bui	
blokneerslag	
composietbui	
<b>Tijdreeks</b>	
historische waarnemingen/ontwerptabel Code: Ukkelreeks	X
stochastisch gegenereerd	
<b>Aspect berekening concentratietijd</b>	
o.b.v. kinematische golfsnelheid	
o.b.v. wet van Manning	
o.b.v. empirische formules	X
o.b.v. praktijk ervaring en waarnemingen	X
10-min veronderstellen; ontwerptabel Code	
<b>Opwaarts neerslagafstromingsdebiet</b>	
<b>Aspect discreet/continue</b>	
gebeurtenis-gebaseerd model	
continu simulatiemodel	X
<b>Aspect ruimtelijke gedetailleerdheid</b>	
gebiedsgemiddeld	X
ruimtelijk verdeeld	
<b>Model type</b>	
Gedetailleerd fysisch-gebaseerd model	
Empirisch of eenvoudig conceptueel model	
SCS-methode	
Rationele methode	
Conceptueel simulatiemodel	X
<b>Modellering opvangsysteem</b>	
Reservoirmodel	X (voor bufferbekkens)
Cascade van reservoirmodellen	X (voor buffergrachten)
<b>Keuze doorvoerdebiet</b>	
Lineair reservoirmodel	
Constant doorvoerdebiet	
Debietformule stroming door openingen	X
<b>Afwaartse veiligheid</b>	
Vuistregel overloopfrequentie	X
Expliciete kwantificering	
<b>Effectiviteit opvangsysteem en bepaling benodigd bergingsvolume</b>	
<b>Op basis van overloopfrequentie</b>	
Tijdreeks simulatie / ontwerptabel code	X

Volume ontwerpbui min doorvoer

**Effectiviteit sedimentopvang**

Stap 1: berekening bodemverlies

RUSLE methode

X

Op basis van gemeten sedimentconcentraties

X (indien beschikbaar)

Stap 2: berekening vangefficiëntie

Op basis van bezinkingssnelheid

X

## 8 Inventaris gangbare methoden

De opdrachtgever, LNE-ALBON, heeft bij de erosiecoördinatoren een bevraging georganiseerd m.b.t. de huidige berekeningsmethode en een standaard voorbeeld voor het dimensioneren van de kleinschalige opvangsystemen in het kader van de erosiebestrijding. Deze methoden worden hieronder in detail besproken en zijn in Tabel 22 bondig samengevat.

### Steunpunt Land en Water (Watering van Sint-Truiden, i.s.m. de Provincie Limburg)

*Informatie bezorgd door: dr. Karel Vandaele*

Voorafgaandelijke opmerking: modellering of voorafgaandelijke berekening van de benodigde bergingscapaciteit gebeurt slechts uitzonderlijk. Meestal is het ontwerp vooral bepaald door de beschikbare ruimte (oppervlakte die kan ingenomen worden, na overleg met de eigenaar(s) van de grond) en de helling van het terrein. Via de hoogte van de dam (en evt. uitgraving) wordt dan de haalbare buffercapaciteit bepaald.

Voor de Jonker Janlaan te Attenhoven (Landen) gebeurde wel een berekening, volgens de volgende methode:

- bepaling bergingscapaciteit: berekening te bufferen volume op basis van blokneerslag met een buiduur gelijk aan de concentratietijd min constant doorvoerdebiet.
- keuze terugkeerperiode: 20 jaar
- keuze buiduur: gelijk aan concentratietijd afstromingsgebied: formule van Kirpich
- keuze runoff-coëfficiënt: onderstaande tabel wordt gebruikt:

*Afvloeiingscoëfficiënt voor verschillende soorten oppervlakten.*

Type landgebruik	Runoff-coëfficiënt [-]
Wegenis verhard	1
Landbouwweg	1
Bebouwing	1
Tuin	0.3
Waterpartijen	0.05
Akker	0.4
Laagstam	0.7
Hoogstam	0.2
Weide	0.2
Bos	0.2

- keuze doorvoerdebiet: ?? (afhankelijk van capaciteit afwaartse watersysteem, vb. riolering)
- specifiek voor de Jonker Janlaan te Attenhoven (Landen):
  - oppervlakte: 83 ha
  - neerslagintensiteit 20 jaar: 42 mm/h
  - concentratietijd: 30 min (Kirpich)
  - gemiddelde runoff-coëfficiënt: 0.43 (op basis van gewogen gemiddelde voor alle landgebruikstypes; vooral akker: 0.40)
  - afvloeiingsdebiet (piekdebiet): 50 l/(s.ha) volgens rationele methode

- keuze doorvoerdebiet: 18 l/(s.ha) volgens maximaal afvoerdebiet van 1.5 m<sup>3</sup>/s van het rioleringsstelsel
- berekend benodigd bergingsvolume: 4817 m<sup>3</sup>, d.i. 58 m<sup>3</sup>/ha, of 134.6 m<sup>3</sup> per effectieve ha (zie deel 9.1 ter vergelijking met de het benodigd bergingsvolume in deze studie)

Langs de Heulen gracht te Velm is een sedimentmeetstation geïnstalleerd, waar reeds sinds mei 2006 debiet-, neerslag- en sedimentconcentratiemetingen worden uitgevoerd. Deze metingen waren het onderwerp van verschillende studies (vb. Vandaele et al., 2004, 2007; Evrard et al., 2007a, 2007b, 2009). Zie meer hierover in deel 9.3.

Provincie Vlaams-Brabant:

*Informatie bezorgd door: Stefanie Bourgeois, Katleen Gillijns*

Methode 1:

- bepaling bergingscapaciteit: berekening te bufferen volume op basis van blokneerslag voor de gekozen buiduur; men neemt hierbij het gemiddelde van de SCS-methode en de rationele methode.
- keuze terugkeerperiode: 10 jaar
- keuze buiduur: 4 uur, onafhankelijk van de concentratietijd van het stroomgebied
- keuze CN-waarde: standaard 84; keuze runoff-coëfficiënt bij rationele methode: standaard 0.6
- keuze doorvoerdebiet: verwaarloosd

Methode 2:

- keuze bergingscapaciteit: 250 m<sup>3</sup>/ha, overeenkomstig een doorvoerdebiet van 20 l/(s.ha) volgens de buffereisen van de Provincie. Het theoretisch berekende volume wordt overlegd met de landbouwer/eigenaar(s). Meestal wordt het ontwerp aangepast door te spelen met de diepte van de uitgraving of de hoogte van de dam.

Opmerking: opnieuw is het ontwerp meestal vooral bepaald door de beschikbare ruimte, na overleg met de eigenaar(s) van de grond. Ook wordt rekening gehouden met het hergebruik van het grondverzet, vb. gebruik van de uitgegraven grond voor de aanleg van de aarden dam. Achteraf gebeurt een controleberekening op basis van de hogere methoden.

IGO Leuven:

*Informatie bezorgd door: Ronald Grobben*

Voorbeeld berekeningsmethode van een studiebureau (op basis van methoden Provincie Vlaams-Brabant):

- keuze bergingscapaciteit: 200 m<sup>3</sup>/ha onverharde oppervlakte, of berekening via instroomvolume op basis van ontwerp bui (blokneerslag) vermenigvuldigd met een correctiefactor om rekening te houden met de invloed van het doorvoerdebiet (ter vergelijking met deel 3.8.1 en bijlage C: het benodigd bergingsvolume voor een terugkeerperiode van 2 jaar en een doorvoerdebiet van 20 l/(s.ha) = 121 m<sup>3</sup> (constant doorvoerdebiet) of 155 m<sup>3</sup> (lineair doorvoerdebiet) per effectieve ha. Met een runoffcoëfficiënt van 0.56 komt dit neer op 68 m<sup>3</sup> resp. 87 m<sup>3</sup> per ha onverharde oppervlakte)

- keuze terugkeerperiode: 2 jaar
- keuze runoff-coëfficiënt: 0.56 (bij vlakke terreinen: 0.3; voor verharde oppervlakten: 0.8) omwille van de grote hellingspercentages van weilanden en akkers
- keuze doorvoerdebiet: 20 l/(s.ha). Deze uitstroom wordt echter niet in rekening gebracht bij berekening van het te bergen volume, om een soort van extra veiligheidsmarge in te rekenen

Provincie Oost-Vlaanderen: Provinciaal Centrum voor Milieuonderzoek:

*Informatie bezorgd door: Eddy Poelman, Liesbet Rosseel*

Standaard methode (vuistregels):

- keuze bergingscapaciteit: 250 m<sup>3</sup>/ha volgens de buffereisen van de Provincie, of vuistregels afgeleid van Code van goede praktijk voor het ontwerp van rioleringsstelsels: 330 m<sup>3</sup>/ha voor T=20 jaar, 270 m<sup>3</sup>/ha voor T=10 jaar, 220 m<sup>3</sup>/ha voor T=5 jaar, 160 m<sup>3</sup>/ha voor T=2 jaar, 120 m<sup>3</sup>/ha voor T=1 jaar, 90 m<sup>3</sup>/ha voor T=0.5 jaar. Het theoretisch berekende volume wordt overlegd met de landbouwer/eigenaar. Meestal wordt het ontwerp aangepast door te spelen met de diepte van de uitgraving of de hoogte van de dam.
- keuze terugkeerperiode: 10 jaar (indien rechtstreeks woningen bedreigd zijn) of 2 – 10 jaar (indien enkel waterlopen of wegen bedreigd worden) of 2 jaar of minder in de andere gevallen
- keuze buiduur/concentratietijd: 10 minuten (want bergingscapaciteit op basis van tabel Code van goede praktijk voor het ontwerp van rioleringsstelsels)
- runoff-coëfficiënt (om de bergingscapaciteit per ha effectieve oppervlakte om te rekenen naar een reële bergingscapaciteit): 0.68 voor hellende akkers met zandleem- of leembodem, 0.25 voor hellende weiden; deze worden beschouwd als “worst case” getallen, dus tijdens perioden met hoge bodemverzadiging en extreme piekafvoeren
- keuze doorvoerdebiet: 20 l/(s.ha) volgens de buffereisen van de Provincie; soms strenger voor bepaalde beken, vb. 10 l/(s.ha). In de Provincie Oost-Vlaanderen worden echter weinig aarden dammen met knijpleiding aangelegd. Het gaat eerder om kleinschalige opvangsystemen met een dam in kokosmat of houthaksel. Deze zorgt voor een trage doorstroom (filtering doorheen het materiaal), wat effectiever blijkt naar sedimentopvang (vb. dam in Wortegem-Petegem). Eventueel worden in deze dam wel een paar kleine knijpopeningen voorzien om redenen van stabiliteit. Het is zeer moeilijk om voor een dergelijke dam het doorvoerdebiet te kennen. Verder wordt in samenwerking met de Provinciale School geëxperimenteerd met een vlottende knijp.

Methode specifieke studie voor Langemunte te Sint-Martens-Lierde (door Van Hoestenbergh et al., 2008):

- oppervlakte: 5 ha (kleinste stroomgebied), 25 ha (groter gebied)
- concentratietijd: 15 min; geschat op basis van het quotiënt van de lengte van de langste stroombaan met de gemiddelde snelheid over het stroomgebied; voor onbegroeide akkers op gemiddelde tot steile hellingen worden maximale snelheden tot 1,5 m/s verondersteld (op basis van Chow)
- terugkeerperiode: 10 jaar
- neerslagintensiteit 10 jaar: 25 mm/h (wat de neerslagintensiteit blijkt bij een terugkeerperiode van 10 jaar en een buiduur van 60 min, i.p.v. 15 min !?)
- gemiddelde runoff-coëfficiënt: 0.68 voor het kleinste gebied (akkerland, rijgwas; bodemgroep C) en 0.6 voor het grotere gebied.



- CN-waarde: 88 (kleinste gebied), 82 (groter gebied)
- afvloeiingsdebiet: 50 l/(s.ha) volgens rationele methode; 20 l/(s.ha) volgens de SCS-methode (kleinste gebied) of 8 l/(s.ha) volgens de SCS-methode (groter gebied)
- keuze doorvoerdebiet: 20 l/(s.ha)
- berekend benodigd bergingsvolume, voor een buiduur van 60 min: 172 m<sup>3</sup>/ha (kleinste gebied), 160 m<sup>3</sup>/ha (groter gebied), of 252.9 m<sup>3</sup> (kleinste gebied), 266.7 m<sup>3</sup> (groter gebied) per effectieve ha. (Van Hoestenbergh et al., 2008)

Voor Maarkedal werd van september 2006 t.e.m. februari 2010 een sedimentmeetstation geïnstalleerd, debiet-, neerslag- en sedimentconcentratie metingen uitgevoerd en geanalyseerd (eindrapport Provinciaal centrum voor milieuonderzoek, 2009). Zie meer hierover in deel 9.4.

Tabel 22. Combinatiemethoden die op dit ogenblik in Vlaanderen worden toegepast door geselecteerde erosiecoördinatoren.

BASISCONCEPTEN/ DEELMETHODEN	TOEGEPASTE COMBINATIEMETHODEN				
	VLAAMS- BRABANT METHODE 1	VLAAMS- BRABANT METHODE 2	LIMBURG LAND&WATER	OOST-VLAANDEREN STANDAARD METHODE	SPEC. STUDIE LANGEMUNTE
<b>Keuze van de maatgevende neerslag</b>					
<b>enkelvoudige gebeurtenis</b>					
geselecteerde historische bui					
blokneerslag	X		X		X
composietbui					
<b>tijdreeks</b>					
historische waarnemingen/ontwerptabel Code: Ukkelreeks		X		X	
stochastisch gegenereerd					
<b>aspect statistische tijdreeksanalyse</b>					
periodieke (vb. Jaarlijkse) maxima					
POT/PDS methode					
<b>Aspect berekening concentratietijd</b>					
o.b.v. kinematische golfsnelheid					
o.b.v. wet van Manning					
o.b.v. empirische formules	4 uur verondersteld?		X (Kirpich)		X (op basis van het quotiënt van de lengte van de langste stroombaan met de gemiddelde snelheid over het stroomgebied; voor onbegroeide akkers op gemiddelde tot steile hellingen worden maximale snelheden tot 1,5 m/s verondersteld (op basis van Chow))
10-min veronderstellen; ontwerptabel Code		X		X	

BASISCONCEPTEN/ DEELMETHODEN	TOEGEPASTE COMBINATIEMETHODEN				
	VLAAMS- BRABANT METHODE 1	VLAAMS- BRABANT METHODE 2	LIMBURG LAND&WATER	OOST-VLAANDEREN STANDAARD METHODE	SPEC. STUDIE LANGEMUNTE
<b>Berekening van het opwaartse neerslagafstromingsdebiet</b>					
<b>aspect discreet/continu</b>					
gebeurtenis-gebaseerd model	X		X		X
continu simulatiemodel					
<b>aspect ruimtelijke gedetailleerdheid</b>					
gebiedsgemiddeld	X	X	X	X	X
ruimtelijk verdeeld					
<b>gedetailleerd fysisch-gebaseerde model</b>					
STREAM-model					
<b>conceptueel simulatiemodel</b>					
<b>empirische of eenvoudig conceptueel model</b>					
stap 1: Berekening netto neerslag					
SCS methode	X				X
	gemiddelde SCS en rationale methoden				
rationele methode; vaste runoff coëfficiënt	X		X		X
	gemiddelde SCS en rationale methoden				
stap 2: Berekening afvoerdebiet					
enkelvoudig eenheidshydrogram					X
lineair reservoirmodel					
o.b.v. debietgegevens					
<b>Modellering opvangsysteem</b>					
<b>reservoirmodel</b>					
<b>cascade reservoirmodellen</b>					
<b>Berekening of keuze van het doorvoerdebiet</b>					
<b>lineair reservoirmodel</b>					
constant doorvoerdebiet	X	X	X?	X	X
	verwaarloosd?	20 l/(s.ha)		20 l/(s.ha)	
<b>debietformule stroming door openingen</b>					
<b>Berekening van de afwaartse veiligheid</b>					
<b>vuistregel overloopfrequentie</b>					
<b>kwantificering overstromingsgevolgen</b>					
kans op overstroming					
overstromingsrisico (convolutie kans en					

BASISCONCEPTEN/ DEELMETHODEN	TOEGEPASTE COMBINATIEMETHODEN				
	VLAAMS- BRABANT METHODE 1	VLAAMS- BRABANT METHODE 2	LIMBURG LAND&WATER	OOST-VLAANDEREN STANDAARD METHODE	SPEC. STUDIE LANGEMUNTE
gevolgen)					
<b>Berekening effectiviteit opvangsysteem en bepaling benodigd bergingsvolume</b>					
<b>hydraulische effectiviteit; op basis van overloopfrequentie</b>					
via tijdreeksimulatie/ontwerpt abel Code		X		X	
via volume ontwerp bui min doorvoer	X		X		X
<b>hydraulische effectiviteit; op basis van afwaarts overstromingsrisico</b>					
<b>effectiviteit sedimentopvang</b>					
Stap 1: berekening boderverlies					
RUSLE methode					X
op basis van gemeten sedimentconcentraties tijdens hoogwatergolven, en gemeten gehalte zwevende stoffen in waterloop			X		X
volumetrische opname erosiekanaal/meetgoot			X (Velm)	X (Maarkedal)	X
fysisch-gebaseerde modellering			X		
Stap 2: berekening vangefficiëntie					
op basis van bezinkingssnelheid					X
gemeten slibvolume			X (Velm)		X

Verder werden bijkomende voorbeelden geanalyseerd. Ze werden door de opdrachtgever geselecteerd uit de beschikbare subsidiedossiers. Tabel 23 hierna geeft een overzicht van de belangrijkste eigenschappen, dimensioneringswaarden en -methoden van de opvangsystemen ontworpen in deze dossiers. Enkel de gekende waarden en methoden, zoals opgenomen in het dossier, zijn vermeld.

Tabel 23. Voorbeelden van enkele ontwerpen van opvangsystemen uit geselecteerde subsidiedossiers.

Project- vb-nr.	Gemeente	Projectlocatie	Oppervlakte deelstroom- gebied (ha)	Benodigde buffercapaciteit				
				(m <sup>3</sup> )	(m <sup>3</sup> /ha)	(m <sup>3</sup> /ha met coeff 1)		
1	Bertem	Ruwaal	20.06	922	45.96	153.21		
2			3.02	139	46.03	153.42		
3	Bertem	Koeheide	46	2116	46.00	153.33		
4			4.57	276	60.39	201.31		
5	Bertem	Koeheide	98.83	4539	45.93	153.09		
6	Bierbeek	Waversesteen weg		4300				
7	Brakel	Faytestraat	4	125	31.25			
8			1.25	75	60.00			
9	Herent	Diependaal	16	1361	85.06	283.54		
10			9	997.	110.80	369.33		
11			60	5106	85.10	283.67		
12			35.03	2193	62.60	313.02		
13			37.55	3652	97.26			
14	Herent	Schoonzicht/ Winksele dorp	57	1778	31.19	311.93		
15			72	717	9.96	49.79		
16	Hoegaarden	Hoksem	36	4032	112.00	200.00		
17	Kortenberg	Frans Mombaers- straat	17	776	45.65	152.16		
18	Landen	Bormanstraat West- Walshoutem	103	1500 0	145.63			
19	Nieuwerkerken	Manis Bosch	8	585	73.13	182.81		
20			Helmen Bosch	2.5	86	34.40	114.67	
21			Kasseloren Bosch	12	668	55.67	185.56	
22	Tervuren	Smisstraat	2.96	295	99.66	332.21		
23	Tervuren	Nachtegalen- laan/ Leeuweriken- laan	3.6					
24	Tervuren	Kongowijk	13.3	1000	75.19	200.50		
25	Tongeren	Sluizen	209	778	3.72			
26			6.5	77	11.85			
27			6.5	243	37.38			
28			10.8	893	82.69			
29			24	427	17.79			
30			3	106	35.33			
31			39	376	9.64			
32			152	1081	7.11			
33			Wortegem- Petegem	Biesbosstraat		30		
34			Borgloon	Rijkel	27	1080	40.00	
35	4	160			40.00			
36	27	1080			40.00			
37	9.3	372			40.00			
38	7	280			40.00			

Project- vb-nr.	Doorvoer debiet (l/(s.ha))	CN	Runoff- coëfficiënt	Neerslag- intensiteit (mm/h)	Terugkeer periode (jaar)	Concentratietijd
1	2	84	0.3	26.2	5	2uur
2	2	84	0.3	26.2	5	2uur
3	2	84	0.3	26.2	5	2uur
4	0	84	0.3	26.2	5	2uur
5	2	84	0.3	26.2	5	2uur
6					10	4uur
7						
8						
9	1	84	0.3	35.8	10	4 uur
10			0.3	35.8	10	4 uur
11	1	84	0.3	35.8	10	4 uur
12			0.2	35.8	10	4 uur
13			0.2 - 0.3	35.8	10	4 uur
14	1	73	0.1	35.8	10	4uur
15	1	79	0.2	35.8	10	4uur
16	20		0.56			
17	5	84	0.3	26.2	5	2 uur
18					10	
19	50		0.4		2	10min
20	50		0.3		2	5min
21	50		0.3			13.33min
22		84	0.3	35.8	10	4uur
23	11			220 l/s.ha		10min
24		84	0.375	35.8	10	4uur
25	12					
26	12					
27	12					
28	12					
29	12					
30	12					
31	12					
32	12					
33						
34					10	
35					10	
36					10	
37					10	
38					10	

Project- vb-nr.	Soort opvang- systeem	Afwatering naar	Ontwerper	Methode
1	erosiepoel		IGO-Leuven	gemiddelde SCS en rationele methoden
2	erosiepoel	gracht		
3	buffergracht niet gerealiseerd			
4	aarden dam			
5	Infiltratiebuffer bekken			
6	2 erosiepoelen en 1 infiltratie- bufferbekken	oppervlakte water	IGO-Leuven	
7	erosiepoel- bufferbekken	riolering	studiebureau VDS	
8	erosiepoel- bufferbekken	riolering		
9	erosiepoel	open gracht	IGO-Leuven	gemiddelde SCS en rationele methoden
10	erosiepoel	open gracht	studiebureau Kockaerts BVBA	rationele methode; ook erosieberging 20 ton/ha.jaar ingerekend
11	infiltratiebuffer bekken	riolering Brusselse- steenweg	IGO-Leuven	gemiddelde rationele methode en SCS-methode
12	erosiepoel		studiebureau Kockaerts BVBA	rationele methode; ook erosieberging 10 ton/ha.jaar ingerekend
13	bufferbekken		studiebureau Kockaerts BVBA	rationele methode; ook erosieberging 10 ton/ha.jaar ingerekend
14	erosiepoel	holle weg	IGO-Leuven	gemiddelde rationele methode en SCS-methode
15	erosiepoel	holle weg	IGO-Leuven	gemiddelde rationele methode en SCS-methode
16	bufferbekken achter aarden dam	Hoksem- beek	studiebureau Soresma A+D Engels	200 m <sup>3</sup> /ha verondersteld
17	bufferbekken	gracht	IGO-Leuven	gemiddelde rationele methode en SCS-methode
18	erosiepoel		studiebureau Ecolas	
19	bufferbekken		studiebureau Libost	rationele methode
20	bufferbekken		studiebureau Libost	rationele methode
21	bufferbekken		studiebureau Libost	rationele methode
22	erosiepoel	gracht	IGO-Leuven	gemiddelde rationele methode en SCS-methode
23	bufferbekken	riolering	bvba Milieu en Infrastructuur	
24	infiltratiebuffer bekken		IGO-Leuven	vergelijking drie methodes: rationele methode, SCS- methode, zonder infiltratie (worst case scenario)

25	bufferbekken achter aarden dam		Technum	
26	erosiepoel			
27	achter aarden			
28	dam			
29				
30				
31				
32				
33	erosiepoel			
34	bufferbekken	Goimeer- zoubeek	ing.bureau Eureplan	4 mm/ha verondersteld voor T=10jaar
35	erosiepoel; L- vormig talud met knijpleiding			5 mm/ha verondersteld voor T=10jaar
36	buffergracht			
37	erosiepoel; L- vormig damwand met knijpleiding			
38	bufferbekken; afkoppeling riolering	Hoogbeek		

## 9 Toepassing methodes in gevalstudies

De in deel 7 geselecteerde meest geschikte methode voor Vlaanderen is in deelopdracht twee van het onderzoek toegepast voor vijf gevalstudies. Naast de twee oorspronkelijk voorziene gevalstudies, Heulen gracht en Maarkedal, zijn enkele bijkomende gevalstudies geanalyseerd, zodat per provincie één gevalstudie wordt beschouwd. Voor Maarkedal en Heulen gracht zijn gegevens van meetcampagnes beschikbaar, wat bijkomende kalibratie- en validatiemogelijkheden geeft. Voor de andere gevalstudies zijn deze metingen niet beschikbaar, maar is het nog steeds nuttig om de methoden toe te passen en de resultaten van verschillende methoden onderling te vergelijken. De laatste gevalstudie, knelpuntgebied Boesdaal, werd als onderdeel van deelopdracht drie onderworpen aan een gevoeligheidsanalyse om na te gaan in welke mate de verschillende gebiedseigenschappen het benodigde buffervolume beïnvloeden. Dit is besproken in het volgende hoofdstuk.

De volgende gevalstudies werden behandeld:

- Provincie Limburg:
  - Heulen gracht te Velm (bemeten); contactpersoon: Karel Vandaele, Steunpunt Land en Water, Watering van Sint-Truiden
- Provincie Oost-Vlaanderen:
  - Nederhasselstraat Ninove, Langemunte te Sint-Martens-Lierde
  - Maarkedal (bemeten); contactpersonen: Liesbet Rosseel, Eddy Poelman, Provinciaal Centrum voor Milieuonderzoek (PCM)
- Provincie Vlaams-Brabant:
  - Jonker Janlaan te Attenhoven (Landen)
  - Knelpuntgebied Boesdaal op de grens van 3 gemeenten (Linkebeek, Sint-Genesius-Rode en Beersel), waar er regelmatig heel wat water- en modderoverlast is; drie voorziene erosiepoelen; contactpersoon: Katleen Gillijns, Provincie Vlaams-Brabant, dienst waterlopen

Naast deze gevalstudies is de continue simulatiemethode ook toegepast op een reeks buffervolumes, van 10 tot 500 m<sup>3</sup>/ha, en doorvoerdebieten, van 1 tot 50 l/(s.ha). De resultaten ervan zijn samengevat in tabellen in Bijlage B en Bijlage C. Deze kunnen veralgemeend worden gebruikt als ontwerptabellen.



## 9.1 Bufferbekken Jonker Janlaan te Attenhoven (Landen)

De eerste gevalstudie is gebruikt om de resultaten van berekeningsmethoden voor de dimensionering van kleinschalige opvangsystemen te vergelijken. De gevalstudie situeert zich aan de Jonker Janlaan te Attenhoven (Landen), waar een bufferbekken gepland is. Het Steunpunt Land en Water (Karel Vandaele) gebruikte naar aanleiding van het advies van ADLO bij de aanvraag van de bouwvergunning voor het bufferbekken volgende berekening van het benodigd bergingsvolume volgens de rationele methode:

- oppervlakte: 83 ha
- neerslagintensiteit 20 jaar: 42 mm/h
- concentratietijd: 30 min (Kirpich)
- gemiddelde runoff-coëfficiënt: 0.43 (op basis van gewogen gemiddelde voor alle landgebruikstypes; vooral akker: 0.40)
- piekafvloeiingsdebiet: 50 l/(s.ha) volgens rationele methode
- keuze doorvoerdebiet: 18 l/(s.ha) volgens maximaal afvoerdebiet van 1.5 m<sup>3</sup>/s van het rioleringsstelsel, d.i. 42 l/s per effectieve ha
- berekend benodigd bergingsvolume: 58 m<sup>3</sup>/ha, d.i. 134.6 m<sup>3</sup> per effectieve ha

Op basis van de continue simulatiemethode, identiek aan deze waarmee de ontwerptabel van de Code van goede praktijk voor het ontwerp van rioleringsstelsels werd opgemaakt, maar hier herberekend voor een concentratietijd van 30 minuten, wordt Tabel 24 bekomen voor de terugkeerperiode horende bij verschillende maximale bergingsvolumes en constante doorvoerdebieten; (zie ook Bijlage B voor de volledige tabel) of de bijhorende ontwerptabel van Tabel 28 (zie ook Bijlage C voor de volledige ontwerptabel).

Volgens deze (meer nauwkeurige) ontwerptabel komt een bergingsvolume van 134.6 m<sup>3</sup> per effectieve ha bij een doorvoerdebiet van 42 l/s per effectieve ha overeen met een overloopt terugkeerperiode van 10 jaar. "Effectieve ha" wordt hier gedefinieerd als de effectieve afstromingsoppervlakte in hectare berekend als het product van de oppervlakte van het deelstroomgebied en de gemiddelde runoff-coëfficiënt. Deze terugkeerperiode is een factor 2 kleiner dan de terugkeerperiode van 20 jaar waarvoor de ontwerpneerslagintensiteit oorspronkelijk werd beschouwd. Volgens de ontwerptabel is een groter bergingsvolume van 170 m<sup>3</sup> per effectieve ha noodzakelijk om een overloopt terugkeerperiode van 20 jaar te bereiken. Dit is een factor 1.26 groter dan wat bekomen werd met de rationele methode.

Om na te gaan of het gebruikte IDF-verband een deel van het verschil verklaart werd de neerslagintensiteit opnieuw afgeleid, maar op basis van de meest recente IDF-verbanden van Willems (2011) (zie deel 3.3.4). Deze IDF-verbanden geven voor een aggregatieniveau van 30 minuten en een terugkeerperiode van 20 jaar een neerslagintensiteit van 49.33 mm/h i.p.v. 42 mm/h zoals oorspronkelijk gebruikt. Wanneer de oorspronkelijke berekeningen van het Steunpunt Land en Water worden herhaald voor deze aangepaste neerslagintensiteit wordt een benodigd buffervolume van 171.3 m<sup>3</sup> per effectieve ha gevonden i.p.v. 134.6 m<sup>3</sup>. Dit sluit dicht aan bij de waarde van 170 m<sup>3</sup>/ha die werd gevonden met de continue methode.

Merk op dat de resultaten in Tabel 24 gebaseerd zijn op een constant doorvoerdebiet. In werkelijkheid daalt het doorvoerdebiet met dalende waterhoogte. Tabel 25 geeft de gewijzigde resultaten bij een lineaire doorvoerrelatie (doorvoerdebiet daalt lineair met het volume in de buffervoorziening). Het benodigd buffervolume stijgt hierdoor tot 250 m<sup>3</sup> per effectieve ha. Het oorspronkelijk berekend bergingsvolume van 134.6 m<sup>3</sup> per effectieve ha komt overeen met een overloopt terugkeerperiode van 3.33 jaar.

De formule in deel 3.6 leert dat het debiet door een knijpopening bij een constante oppervlakte niet lineair toeneemt met het volume maar met de vierkantswortel van het volume. Wanneer dit type doorvoerrelatie wordt gesimuleerd, worden de resultaten in Tabel 26 gevonden. Het benodigde buffervolume wordt 230 m<sup>3</sup> per effectieve ha. Het oorspronkelijk berekend bergingsvolume van 134.6 m<sup>3</sup> per effectieve ha komt in dit geval overeen met een overloopt terugkeerperiode van 4.17 jaar i.p.v. de oorspronkelijk veronderstelde 20 jaar.

Tabel 24. Terugkeerperiode (in aantal jaren) van overloop van het opvangsysteem in functie van zijn buffervolume en doorvoerdebiet (bij een **constant doorvoerdebiet** en een concentratietijd van 30 minuten), voor het huidige klimaat (10-min Ukkel-reeks 1901-2000).

Maximale berging [m <sup>3</sup> /ha]:	constant doorvoerdebiet [l/(s.ha)]:									
	50	42	30	25	20	15	10	5	2	1
120	10.00	6.67	4.35	3.85	2.63	1.96	1.27	0.56	0.23	0.11
134.6	16.67	10.00	5.26	4.55	3.57	2.56	1.61	0.75	0.30	0.14
140	20.00	11.11	5.88	4.76	4.00	2.63	1.89	0.81	0.33	0.15
150	20.00	11.11	7.14	5.26	4.55	3.13	2.17	0.93	0.37	0.17
160	20.00	16.67	8.33	6.25	5.00	3.85	2.50	1.05	0.44	0.19
170	33.33	20.00	11.11	7.14	5.56	4.35	3.03	1.28	0.50	0.21
180	33.33	25.00	12.50	11.11	6.67	5.26	3.33	1.59	0.56	0.24
190	33.33	33.33	14.29	11.11	9.09	5.26	3.85	1.92	0.65	0.27
200	50.00	33.33	16.67	12.50	11.11	6.67	4.17	2.27	0.72	0.30
210	>50	33.33	25.00	14.29	11.11	8.33	4.17	2.44	0.86	0.34
220	>50	50.00	25.00	20.00	14.29	9.09	5.56	2.70	0.96	0.38
230	>50	>50	33.33	20.00	16.67	10.00	6.25	3.13	1.06	0.43
240	>50	>50	33.33	25.00	20.00	12.50	7.14	3.57	1.20	0.47
250	>50	>50	50.00	25.00	20.00	16.67	7.14	4.17	1.45	0.52
260	>50	>50	>50	33.33	25.00	20.00	9.09	4.76	1.64	0.58
270	>50	>50	>50	>50	25.00	20.00	10.00	5.56	1.89	0.66

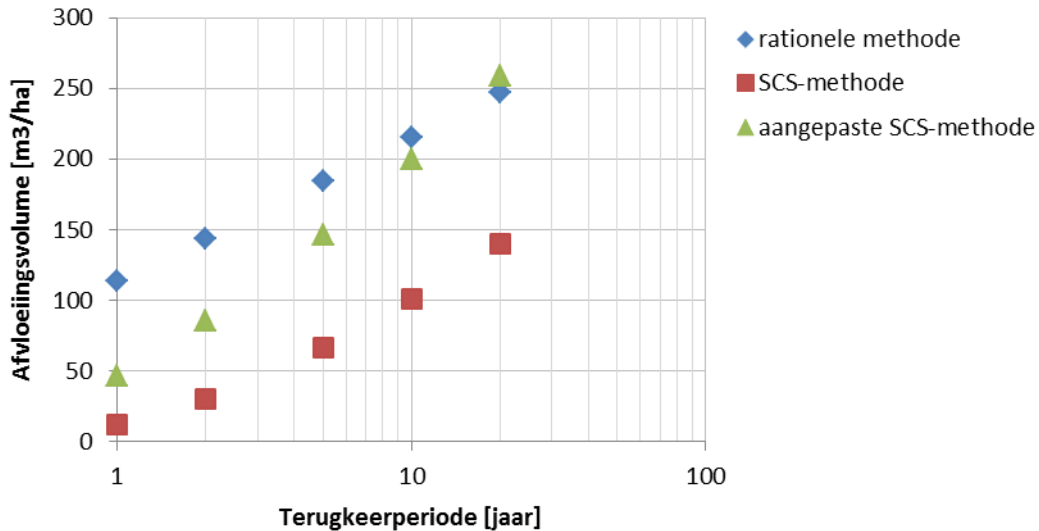
Tabel 25. Terugkeerperiode (in aantal jaren) van overloop van het opvangsysteem in functie van zijn buffervolume en doorvoerdebiet (bij een **doorvoerrelatie lineair afhankelijk van het geborgen volume** en een concentratietijd van 30 minuten), voor het huidige klimaat (10-min Ukkel-reeks 1901-2000).

Maximale berging [m <sup>3</sup> /ha]:	constant doorvoerdebiet [l/(s.ha)]:									
	50	42	30	25	20	15	10	5	2	1
120	3.23	2.56	1.67	1.39	1.16	0.84	0.53	0.27	0.11	0.06
130	3.57	3.03	2.08	1.64	1.35	1.05	0.62	0.33	0.12	0.06
134.6	3.85	3.33	2.33	1.82	1.49	1.16	0.69	0.35	0.13	0.07
140	4.17	3.45	2.44	2.13	1.54	1.23	0.76	0.39	0.14	0.07
150	5.00	4.17	2.94	2.44	1.96	1.47	0.93	0.45	0.16	0.08
160	5.26	4.55	3.57	3.13	2.50	1.69	1.05	0.52	0.18	0.08
170	6.67	5.26	4.00	3.57	3.03	2.04	1.25	0.60	0.21	0.09
180	6.67	5.88	4.76	3.85	3.33	2.70	1.52	0.70	0.24	0.10
190	8.33	6.25	5.00	4.55	3.85	3.13	1.92	0.80	0.27	0.11
200	11.11	9.09	5.88	5.00	4.17	3.70	2.38	0.89	0.30	0.12
210	12.50	10.00	6.67	5.56	4.55	4.00	2.56	1.03	0.34	0.13
220	16.67	11.11	7.69	7.14	5.56	4.17	2.94	1.14	0.38	0.14
230	20.00	14.29	8.33	7.69	6.67	4.55	3.23	1.30	0.43	0.15
240	20.00	20.00	9.09	8.33	7.69	5.26	3.57	1.43	0.49	0.16
250	20.00	20.00	11.11	9.09	8.33	6.25	4.17	1.64	0.55	0.17
260	25.00	20.00	16.67	11.11	11.11	7.14	4.17	1.89	0.62	0.18
270	50.00	25.00	20.00	14.29	11.11	8.33	5.88	2.08	0.68	0.19

Tabel 26. Terugkeerperiode (in aantal jaren) van overloop van het opvangsysteem in functie van zijn buffervolume en doorvoerdebiet (bij een **doorvoerrelatie afhankelijk van de vierkantswortel van het geborgen volume** en een concentratietijd van 30 minuten), voor het huidig klimaat (10-min Ukkel-reeks 1901-2000).

Maximale berging [m <sup>3</sup> /ha]:	constant doorvoerdebiet [l/(s.ha)]:									
	50	42	30	25	20	15	10	5	2	1
120	4.17	3.13	2.22	1.82	1.54	1.12	0.69	0.37	0.14	0.08
130	5	4	2.94	2.27	1.75	1.37	0.88	0.45	0.17	0.08
134.6	5.56	4.17	3.03	2.44	2.04	1.47	0.97	0.49	0.19	0.09
140	5.56	4.35	3.33	2.86	2.17	1.64	1.11	0.51	0.20	0.09
150	6.67	5	3.85	3.23	2.56	1.92	1.27	0.6	0.24	0.11
160	7.14	5.88	4.55	3.7	3.23	2.33	1.52	0.7	0.28	0.12
170	8.33	6.67	5	4.35	3.45	2.94	1.75	0.79	0.31	0.13
180	11.11	7.69	5.56	5	4.35	3.33	2.13	0.94	0.37	0.15
190	12.5	11.11	6.25	5.26	4.76	3.85	2.5	1.15	0.43	0.16
200	16.67	11.11	8.33	5.88	5.26	4.17	3.03	1.23	0.48	0.18
210	20	14.29	10	7.69	5.88	4.35	3.45	1.52	0.54	0.19
220	25	20	11.11	9.09	8.33	4.76	4	1.67	0.61	0.21
230	33.33	20	14.29	9.09	8.33	7.14	4.35	1.89	0.69	0.24
240	33.33	20	20	14.29	8.33	7.69	5.56	2.27	0.76	0.26
250	33.33	25	20	16.67	9.09	8.33	5.56	2.78	0.90	0.29
260	50	33.33	20	20	12.5	10	6.67	2.94	0.98	0.31
270	> 50	50	20	20	20	12.5	7.69	3.23	1.08	0.34

Wanneer het neerslagafstromingsvolume wordt berekend met de klassieke methoden, de rationale methode en de SCS-methode, worden i.f.v. de terugkeerperiode van de neerslag de waarden bekomen van Figuur 52 en Tabel 27. Voor de SCS-methode werd uitgegaan van een Curve Number van 88 voor akkerland. Naast de gewone toepassing van de SCS-methode, zoals ze ook klassiek in Vlaanderen voor het ontwerp van kleinschalige opvangsystemen wordt toegepast (zie deel 8), werd ook een aangepaste SCS-methode toegepast waarbij de runoff-coëfficiënt wordt berekend op basis van de dagneerslag en toegepast op de neerslagintensiteit voor de concentratietijd (zie ook 3.4.3.1). De SCS-methode onderschat de afstromingsvolumes sterk in vergelijking met de rationele methode, zoals ook reeds toegelicht in deel 3.4.3.1. Voor de aangepaste SCS-methode worden hogere afstromingsvolumes gevonden. Voor hoge terugkeerperioden (20 jaar) zijn de afstromingsvolumes volgens de rationele en de aangepaste SCS-methode vergelijkbaar. Voor de continue methode zijn geen afstromingsvolumes getoond, omdat dit concept niet van toepassing is op de methode. De continue simulatiemethode vertrekt namelijk van een tijdreeks van neerslag, terwijl de rationele en SCS-methode enkel kijken naar één bepaalde neerslagbui.



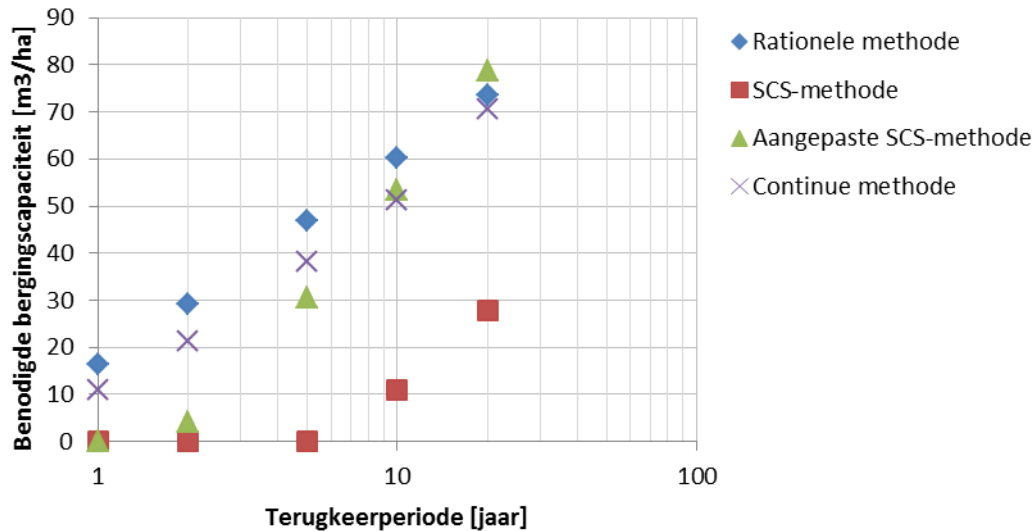
Figuur 52. Afstromingsvolume, in  $m^3$  per effectieve ha, versus terugkeerperiode voor verschillende methodes

Tabel 27. Afstromingsvolumes, in  $m^3$  per effectieve ha, in functie van de terugkeerperiode en de gekozen berekeningsmethode voor het bufferbekken in de Jonker Janlaan te Attenhoven.

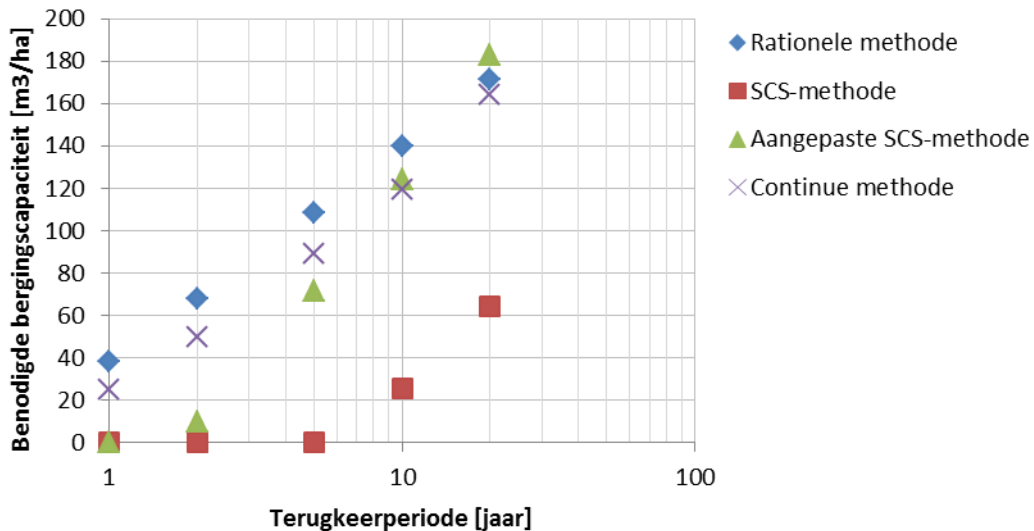
Methode:	Terugkeerperiode [jaar]:				
	1	2	5	10	20
Rationele	113.5	143.1	184.0	215.3	246.7
SCS	11.6	30.2	66.4	100.8	139.8
Aangepaste SCS	46.2	85.0	146.6	199.6	258.4

Figuur 53 en Figuur 54 tonen voor deze afstromingsvolumes het benodigde bergingsvolume, zowel in  $m^3/ha$  (Figuur 53) als in  $m^3$  per effectieve ha (Figuur 54) bij een constant doorvoerdebiet. Negatieve buffercapaciteiten zijn uiteraard niet mogelijk; ze betekenen dat het doorvoerdebiet voldoende groot is in vergelijking met het afstromingsvolume zodat er geen buffering noodzakelijk is. Ze werden daarom afgekapt bij de nulwaarde als ondergrens. Volgens de (meer nauwkeurige) continue simulatiemethode werd voor een terugkeerperiode van 20 jaar een benodigd bergingsvolume gevonden van  $166 m^3$  per effectieve ha. Voor de rationele methode wordt voor deze terugkeerperiode een iets hogere waarde gevonden van  $171 m^3$  per effectieve ha. Via de aangepaste SCS-methode wordt een waarde van  $183 m^3$  per effectieve ha bekomen. Voor een constant doorvoerdebiet geven de rationele, de aangepaste SCS en de continue simulatiemethode dus gelijkaardige resultaten.

In het meer realistische geval van een doorvoerdebiet dat via een vierkantswortel relatie verband houdt met het volume, neemt het benodigde bergingsvolume toe tot  $214 m^3$  per effectieve ha. Per effectieve ha is dit ca.  $30$  à  $40 m^3$  meer dan de rationele en de aangepaste SCS-methode. Beide onderschatten dus het benodigde bergingsvolume.

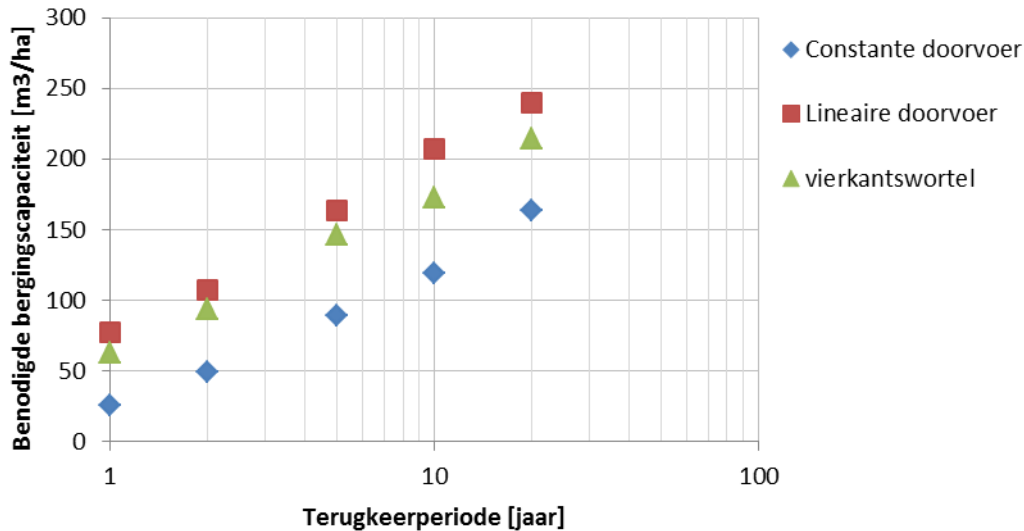


Figuur 53. Benodigd bergingsvolume, in  $m^3/ha$ , versus terugkeerperiode voor verschillende methodes, bij een constant doorvoerdebiet van  $42 l/(s.ha)$



Figuur 54. Benodigd bergingsvolume, in  $m^3$  per effectieve ha, versus terugkeerperiode voor verschillende methodes, bij een constant doorvoerdebiet van  $42 l/(s.ha)$

De resultaten van Figuur 53 en Figuur 54 zijn gebaseerd op een constant doorvoerdebiet. Figuur 55 geeft via de continue simulatieaanpak aan hoe het benodigde buffervolume wijzigt voor andere doorvoerrelaties (doorvoervolume lineair afhankelijk met het buffervolume, of met de vierkantswortel van het buffervolume; zie deel 3.6). De vierkantswortel relatie is de meest realistische voor gravitair leegstromende systemen. De andere twee vormen de twee uiterste, waarbij een constante doorvoer voor de snelste leegloop zorgt en de lineaire doorvoerrelatie voor de traagste. De benodigde buffercapaciteiten na toepassing van de normale doorvoervergelijking (afhankelijk van de vierkantswortel van het buffervolume) zijn in dit geval vergelijkbaar met deze na toepassing van een lineaire doorvoer, maar beduidend hoger dan deze na toepassing van een constante doorvoer.

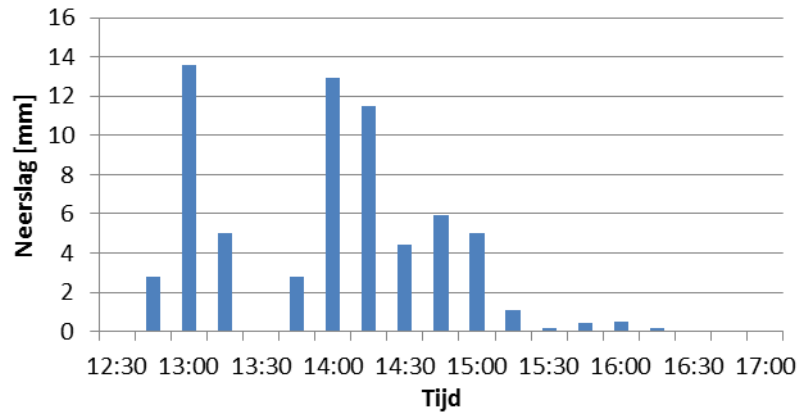


Figuur 55. Benodigd bergingsvolume, in  $m^3$  per effectieve ha, versus terugkeerperiode voor verschillende doorvoerrelaties bij de continue simulatiemethode, bij een maximaal doorvoerdebiet van  $42 \text{ l/(s.ha)}$

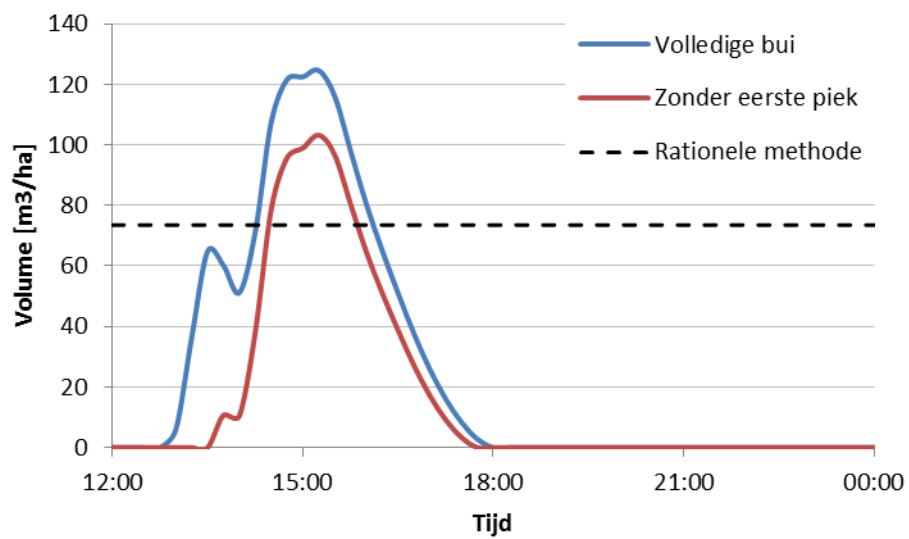
Tabel 28. Nodige buffervolumes, in  $m^3$  per effectieve ha, in functie van de terugkeerperiode van de overlaat voor de drie doorvoerrelaties bij een maximaal doorvoerdebiet van  $42 \text{ l/(s.ha)}$ .

Type doorvoerrelatie:	Terugkeerperiode van overloop [jaar]:				
	1	2	5	10	20
Constant	24.6	49.2	94.8	135.1	167.2
Lineair	76.7	107.2	165.7	207.9	240.0
Vierkantsw.	61.6	92.0	146.0	185.0	218.4

Het verschil in resultaat tussen de rationale en de continue methode kan aangetoond worden met behulp van een eenvoudig concreet voorbeeld voor het bufferbekken aan de Jonker Janlaan te Attenhoven. Figuur 56 toont het verloop van de regenval op 27 augustus 2002, opgemeten aan het meetstation in Walshoutem (op een afstand van ca. 5 km van de Jonker Janlaan in Attenhoven). De bui vertoont twee pieken tussen 12 en 13 mm per kwartier, waarbij de tweede piek ongeveer een half uur duurt. Afgaande op de IDF-verbanden in Bijlage A kan gesteld worden dat de tweede piek van deze bui (tussen 14:00 en 14:30, met een neerslagintensiteit van ca. 25 mm per half uur) een terugkeerperiode heeft van iets meer dan 20 jaar. Volgens de tabel in bijlage A heeft een bui van 30 minuten met een terugkeerperiode van 20 jaar een totale neerslaghoeveelheid van 24.67 mm. Figuur 57 toont het verloop van het volume in het bufferbekken in de tijd, na doorrekening van de bui van 27 augustus in het continue model. Er is hierbij een onderscheid gemaakt tussen de volledige bui en een tweede synthetische bui, waarbij verondersteld is dat er voor 14 uur geen neerslag gevallen is. Op die manier kan de invloed van een (gedeeltelijk) gevuld bufferbekken nagegaan worden. In het model is een vierkantswortel-relatie verondersteld bij de berekening van het doorvoerdebiet. Het is duidelijk dat het buffervolume berekend met de rationale methode ( $171 \text{ m}^3$  per effectieve ha, of  $73.5 \text{ m}^3$  per ha, voor een bui van 30 minuten voor een terugkeerperiode van 20 jaar) onvoldoende is om overstortingen te voorkomen, ook zonder het inrekenen van de eerste piek.



Figuur 56. Tijdsverloop (met een tijdstap van 15 minuten) neerslag op 27 augustus 2002, opgemeten aan het meetstation van Walshoutem (HIS\_Pk09\_156)



Figuur 57. Tijdsverloop van het gebufferde volume (in  $m^3$  per ha) voor de originele bui (blauw) en de aangepaste bui (rood). Het benodigde buffervolume volgens de rationele methode is eveneens aangegeven.

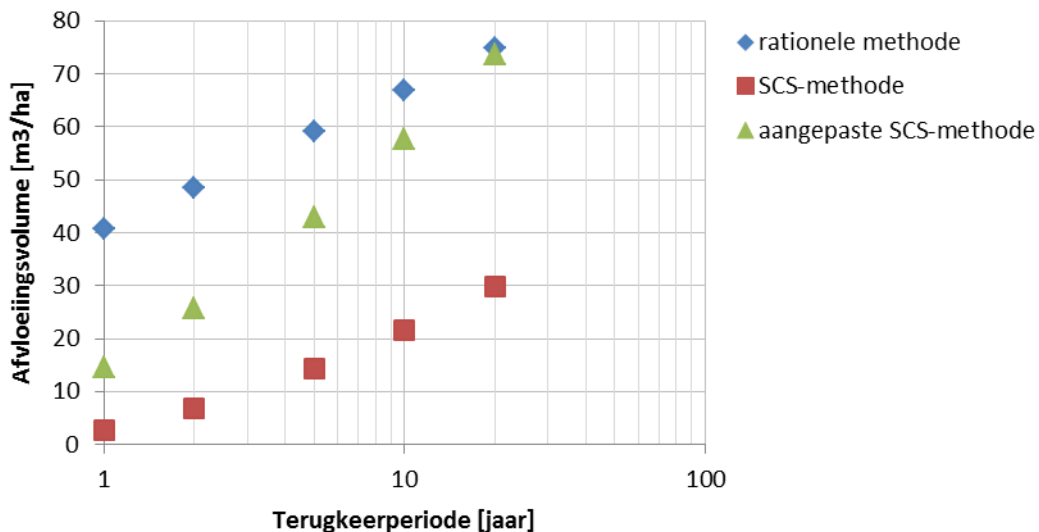
## 9.2 Bufferbekken Nederhasselstraat te Ninove

De berekeningsmethoden voor de benodigde buffercapaciteit werden ook voor een tweede gevalstudie vergeleken, ditmaal in de Provincie Oost-Vlaanderen, meer specifiek voor het bufferbekken langs de Nederhasselstraat te Ninove.

Het stroomgebied opwaarts van dit bufferbekken heeft de volgende karakteristieken:

- oppervlakte: 5.3 ha
- gemiddelde helling: 0.02125 m/m
- maximale afstromingslengte: 400 m
- concentratietijd: 8.66 min (Kirpich), afgerond 10 min
- gemiddelde runoff-coëfficiënt: 0.4
- keuze CN-waarde: 88
- keuze doorvoerdebiet: 50 l/(s.ha)

Wanneer het neerslagafstromingsvolume wordt berekend met de klassieke methoden, de rationale methode en de SCS-methode, worden i.f.v. de terugkeerperiode de waarden bekomen van Figuur 58 en Tabel 29. Ook bij deze gevalstudie onderschat de SCS-methode de afstromingsvolumes sterk in vergelijking met de rationale methode. Voor de aangepaste SCS-methode worden hogere afstromingsvolumes gevonden. Voor hoge terugkeerperioden (20 jaar) zijn de afstromingsvolumes volgens de rationale en de aangepaste SCS-methode vergelijkbaar.



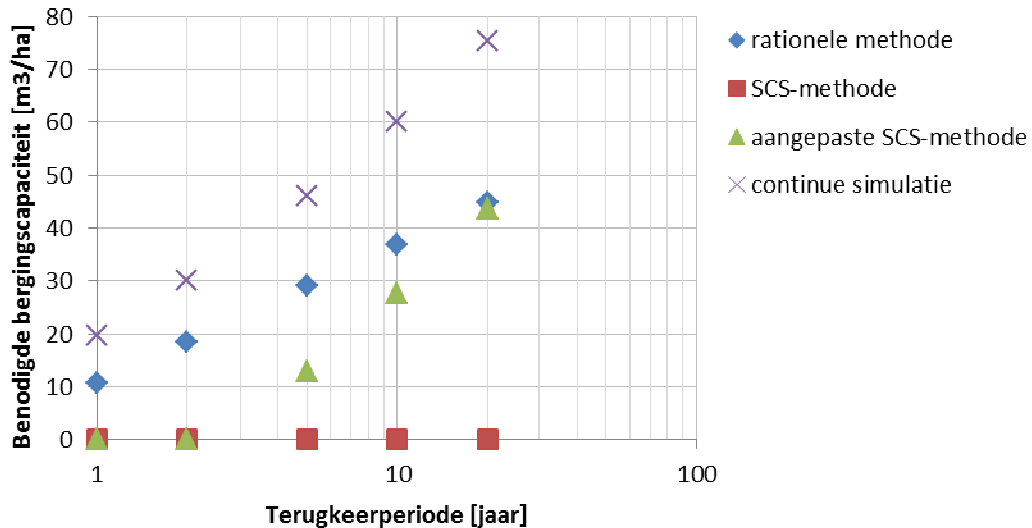
Figuur 58. Afstromingsvolume (in  $m^3$  per ha) versus terugkeerperiode voor verschillende methodes

Tabel 29. Afstromingsvolumes, in  $m^3$  per ha, in functie van de terugkeerperiode en de gekozen berekeningsmethode, voor het bufferbekken in de Nederhasselstraat te Ninove

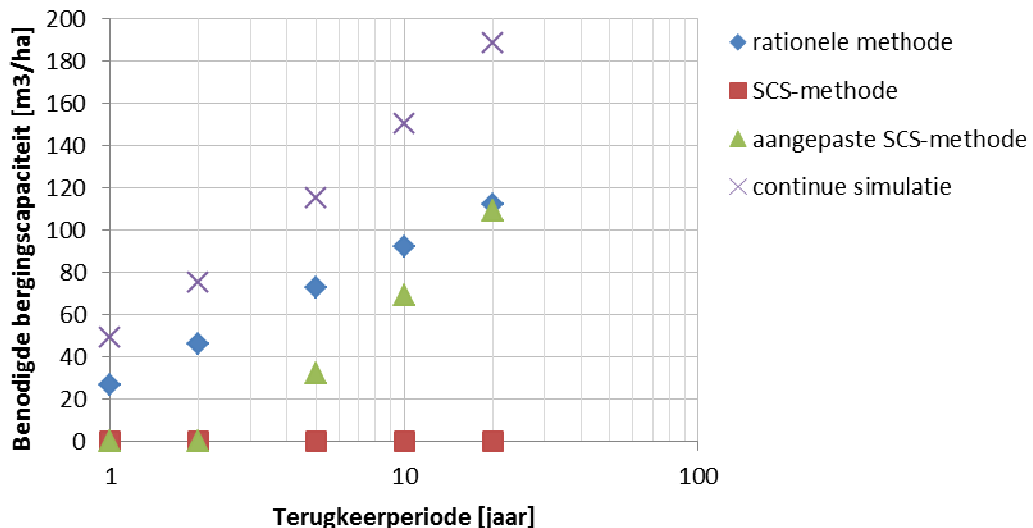
Methode:	Terugkeerperiode [jaar]:				
	1	2	5	10	20
Rationele	40.63	48.53	59.98	66.89	74.79
SCS	2.75	6.80	14.40	21.59	29.86
Aangepaste SCS	14.52	25.77	42.92	57.54	73.71



Figuur 59 en Figuur 60 tonen voor deze afstromingsvolumes het benodigde bergingsvolume in  $m^3/ha$  (Figuur 59) en in  $m^3$  per effectieve ha (Figuur 60). Volgens de (meer nauwkeurige) continue simulatiemethode wordt voor een terugkeerperiode van 20 jaar een benodigd bergingsvolume gevonden van  $188 m^3$  per effectieve ha. Voor de rationale methode wordt voor deze terugkeerperiode een beduidend lagere waarde gevonden van  $111 m^3$  per effectieve ha. Via de aangepaste SCS-methode wordt een waarde van  $109 m^3$  per effectieve ha bekomen. De terugkeerperiode van dit bergingsvolume is volgens de continue simulatiemethode 4.5 jaar, d.i. een factor 4.4 kleiner dan de terugkeerperiode van 20 jaar die met de methode beoogd wordt. Zowel de rationale methode als de SCS-methode onderschatten dus in belangrijke mate het benodigd buffervolume.

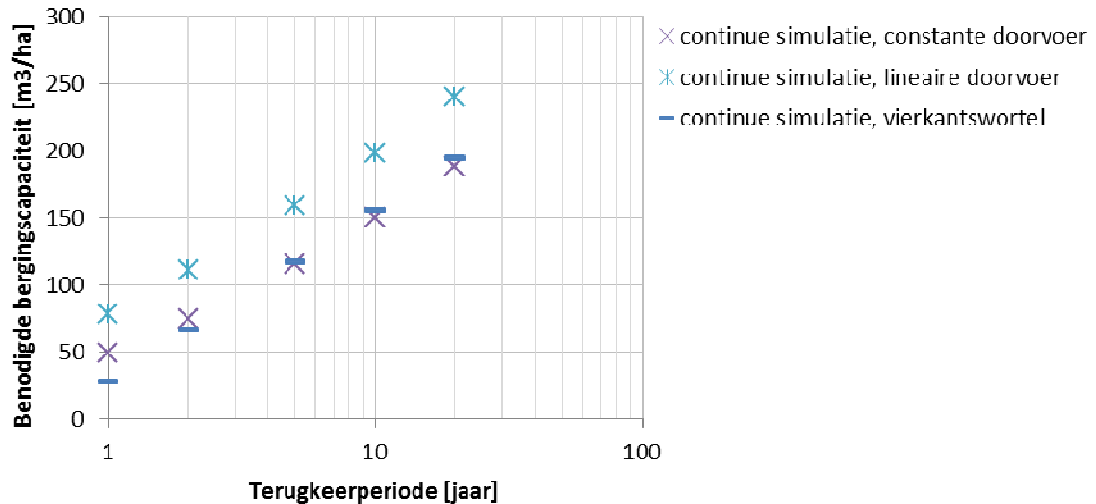


Figuur 59. Benodigd bergingsvolume, in  $m^3/ha$ , versus terugkeerperiode voor verschillende methodes, bij een constant doorvoerdebiet van  $50 l/(s.ha)$



Figuur 60. Benodigd bergingsvolume, in  $m^3$  per effectieve ha, versus terugkeerperiode voor verschillende methodes, bij een constant doorvoerdebiet van  $50 l/(s.ha)$

Figuur 61 geeft via de continue simulatieaanpak aan hoe het benodigd buffervolume wijzigt voor de andere doorvoerrelaties. De resultaten na toepassing van de normale doorvoervergelijking (afhankelijk van de vierkantswortel van het buffervolume) zijn opnieuw vergelijkbaar met deze na toepassing van een constante doorvoer.



Figuur 61. Benodigd bergingsvolume, in  $m^3$  per effectieve ha, versus terugkeerperiode voor verschillende doorvoerrelaties bij de continue simulatiemethode, bij een maximaal doorvoerdebiet van  $50 \text{ l/(s.ha)}$

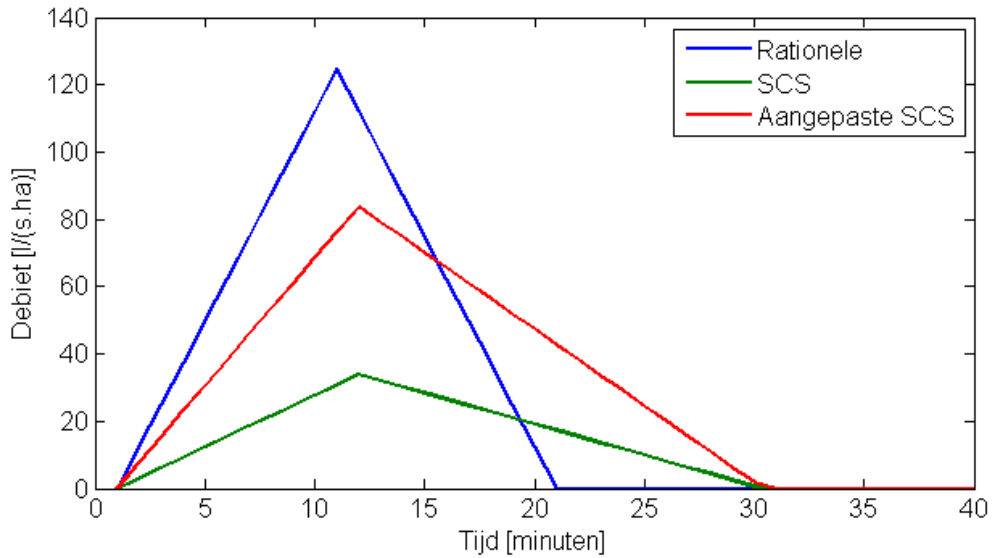
De berekening van het benodigde buffervolume in de rationale en SCS methoden gebeurt door het doorstroomvolume af te trekken van het afstroomvolume, waarbij verondersteld wordt dat beide even lang duren. Het afstromingshydrogram heeft dan een vorm zoals gedefinieerd in 3.4.3.2. Voor het doorvoerdebiet wordt een gelijkaardig verloop verondersteld, met het piekdebiet gelijk aan het maximale doorvoerdebiet. Dit stemt echter niet overeen met wat er in werkelijkheid gebeurt, aangezien de doorvoer uit het bufferbekken trager op gang zal komen en langer zal duren dan de invoer. Om het effect van deze vereenvoudiging op de berekening van het benodigde buffervolume na te gaan zijn de afstromingshydrogrammen opgelegd aan het conceptuele model voor het bufferbekken, dat als bergingsreservoir gemodelleerd wordt. De uitstroom kan dan constant verondersteld worden of afhankelijk van het volume in het bufferbekken (via een lineaire of vierkantswortelrelatie). Dit stemt overeen met de berekeningen van de continue methode, met het verschil dat nu een ontwerpbui aangelegd wordt, terwijl er in de continue simulatie methode met de werkelijk opgetreden buien en een voorafgaandelijke vulling van het bufferbekken wordt gerekend.

Figuur 62 en Figuur 63 tonen het resultaat van een dergelijke analyse voor de rationale methode. Een afvloeiingsvolume van  $74.8 \text{ m}^3$  per ha werd omgezet naar een driehoekig hydrogram met een piek van  $124.66 \text{ l/(s.ha)}$  (overeenkomstig een terugkeerperiode van 20 jaar). Het maximale bergingsvolume werd vastgelegd op het eerder bepaalde  $44.8 \text{ m}^3/\text{ha}$  of  $111 \text{ m}^3$  per effectieve ha. Op basis van het tijdsverloop van het volume in het bufferbekken kan besloten worden dat het buffervolume berekend met de rationale methode een goede benadering geeft, in vergelijking met het expliciet doorrekenen van het afstromingshydrogram. Enkel in geval van de lineaire doorvoerrelatie zal de capaciteit van het bufferbekken licht overschreden worden. In geval van de vierkantswortel-relatie ligt het maximale volume op  $42.27 \text{ m}^3/\text{ha}$ , zodat er geen sprake is van al te grote overschattingen van de benodigde capaciteit, door te rekenen met de vereenvoudigde methode.

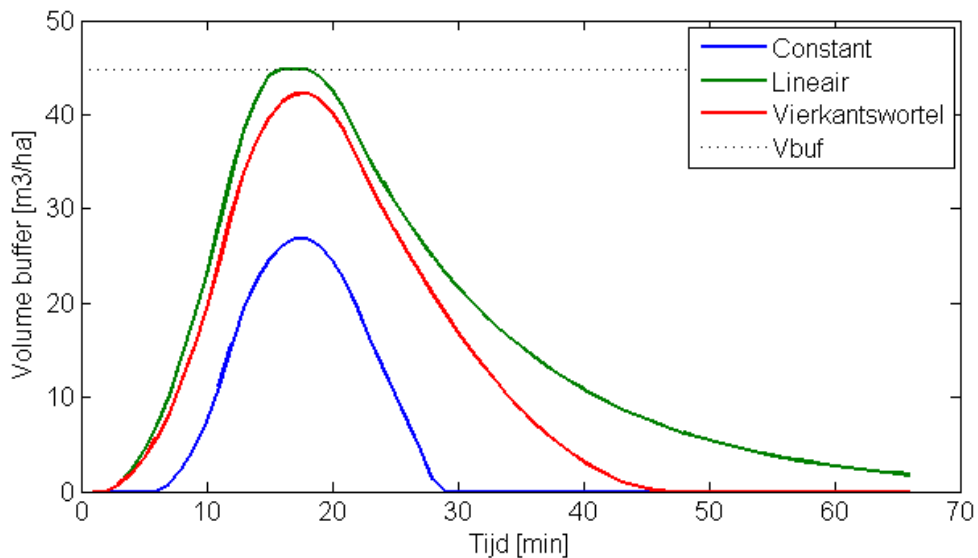
Figuur 64 toont een gelijkaardige analyse voor de aangepaste SCS-methode. Voor de SCS-methode is geen vergelijking gemaakt omdat de methode aangaf dat er geen buffering nodig is (zie Figuur 60). Ook voor de aangepaste SCS-methode zal de benodigde capaciteit, berekend met de vereenvoudigde methode ( $43.6 \text{ m}^3/\text{ha}$  of  $109 \text{ m}^3$  per effectieve ha), van het bufferbekken niet overschreden worden, na doorrekening van het afstromingshydrogram.

De vereenvoudigde berekeningsmethode waarbij het benodigde buffervolume berekend wordt als het verschil van het afstroomvolume en het doorstroomvolume geeft dus in beide gevallen een voldoende goede benadering van het benodigde buffervolume in vergelijking met het doorrekenen van het afstroomhydrogram. De vereenvoudigde berekeningsmethode verklaart dus niet waarom de rationale methode en de aangepaste SCS-methode lagere volumes

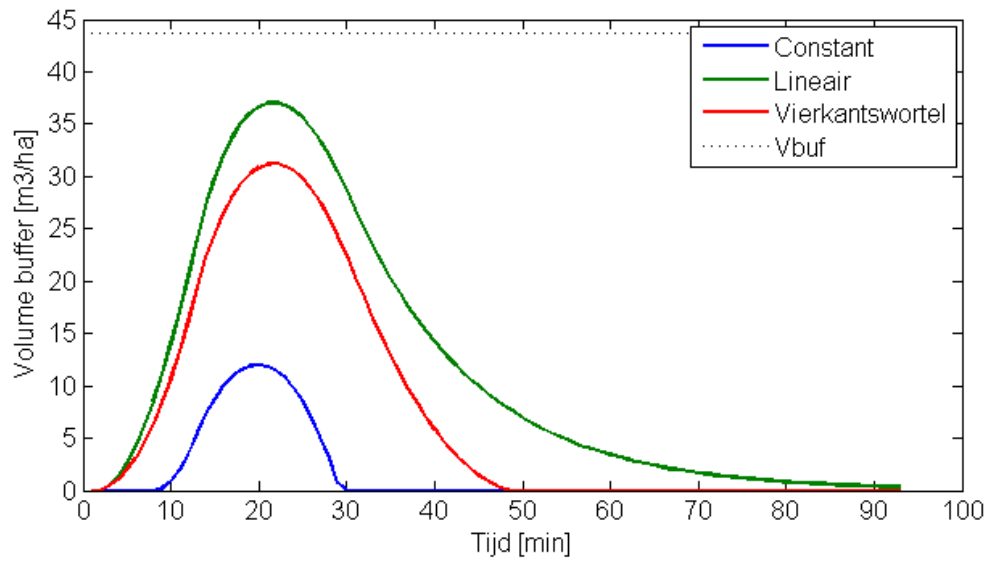
opleveren dan de continue methode. Het verschil is dus enkel te wijten aan de voorafgaandelijke vulling van het bufferbekken.



Figuur 62. Afstroomhydrogrammen (in l/(s.ha)) voor de rationele methode (blauw), SCS-methode (groen) en aangepaste SCS-methode (rood), bij een terugkeerperiode van de neerslag van 20 jaar.



Figuur 63. Tijdsverloop van het volume in het bufferbekken (in m<sup>3</sup> per ha) voor de rationele methode, met constante doorvoer (blauw), lineaire doorvoerrelatie (groen) en vierkantwortel-relatie (rood), bij een terugkeerperiode van de neerslag van 20 jaar, bepaald met het continue simulatie model. De zwarte stippellijn geeft het benodigde volume weer dat eerder berekend werd met de rationele methode.



*Figuur 64. Tijdsverloop van het volume in het bufferbekken (in m<sup>3</sup> per ha) voor de aangepaste SCS-methode, met constante doorvoer (blauw), lineaire doorvoerrelatie (groen) en vierkantswortel-relatie (rood), bij een terugkeerperiode van de neerslag van 20 jaar, bepaald met het continue simulatie model. De zwarte stippellijn geeft het benodigde volume weer dat eerder berekend werd met de aangepaste SCS-methode.*

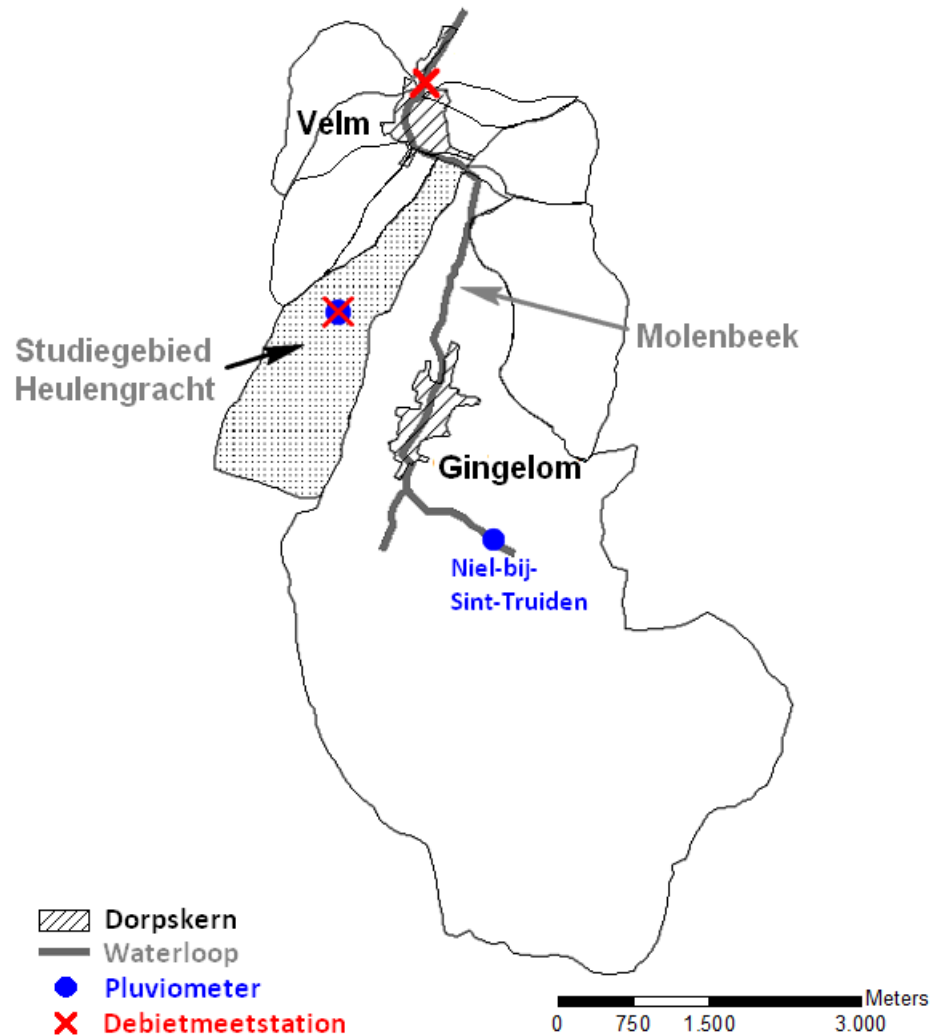
### 9.3 Heulen gracht te Velm

In deze derde gevalstudie van de Heulen gracht te Velm zijn meetcampagnes beschikbaar van debieten en sedimentconcentraties, die toelaten om bijkomende analyses uit te voeren, zoals de analyse van de runoff-coëfficiënt.

#### 9.3.1 Beschrijving meetcampagnes

Het afstromingsgebied opwaarts van de San Dimas meetgoot langs de Heulen gracht te Velm heeft een oppervlakte van 210 ha (Figuur 65 en Figuur 66). De meetinstallatie bestaat uit een meetgoot, een waterpeilmeter en een staalnametoestel. De Heulen gracht is geen permanent watervoerende gracht. Enkel in perioden van neerslag wordt via de gracht water afgevoerd. Het debiet werd berekend uit het waterpeil via een gekalibreerd Q-H verband. Ook staat er aan de meetgoot een pluviograaf, die eigendom is van ALBON. In de periode mei 2006 – december 2008 werden voor 31 gebeurtenissen zowel debiet- als neerslaggegevens geregistreerd, en in de periode november 2010 – oktober 2012 zijn dit 10 gebeurtenissen, wat een totaal van 41 gebeurtenissen geeft: Tabel 30. De metingen voor de periode mei 2006 – december 2008 werden ter beschikking gesteld door dr. Karel Van Daele van het Steunpunt Land en Water, en werden uitgevoerd door Olivier Evrard, doctorandus aan de UCL. De metingen vanaf november 2010 zijn continue registraties en worden momenteel uitgevoerd voor doctorandus Lore Fondu van de Afdeling Fysische en Geografische Geografie van de KU Leuven (prof. Gerard Govers). Al deze beschikbare meetgegevens werden geaggregeerd tot een tijdstap van 10 minuten.

De Heulen gracht ligt in het stroomgebied van de Melsterbeek, op de grens van Gingelom en Sint-Truiden, meer specifiek in het deelstroomgebied (VHA-zone) van de Molenbeek langs Velm (deelgemeente van Sint-Truiden) (Figuur 65). Het stroomgebied van de Melsterbeek is gelegen in het oostelijk deel van de Belgische Leemstreek en behoort tot het bovenstrooms gebied van het Demerbekken. Het zuidelijk deel van het stroomgebied, waar de Heulen gracht gesitueerd is, wordt gekenmerkt door een golvend landschap en de aanwezigheid van (diep) ingesneden beekvalleien met een relatief groot verval, die het Haspengouwse leemplateau draineren in zuid-noord richting. Vele kleine valleitjes zijn niet permanent watervoerend en kennen alleen periodieke oppervlakkige afstroming van regenwater. Om deze reden spreekt men vaak van “droge valleien”. Het landbouwareaal in het stroomgebied van de Melsterbeek is vrij aanzienlijk en bedraagt ongeveer 65% van de totale oppervlakte. Voor de Heulen gracht is dat zelfs dicht bij de 100%. Ongeveer 80% van de oppervlakte van het afstromingsgebied van de Heulen gracht wordt ingenomen door akkers, de rest door laagstam plantages (fruitgaarden) (Vandaele et al., 2007). Zomergewassen bestaan uit vb. bieten, aardappelen, vlas en industriële groenten, terwijl wintergewassen vooral wintertarwe en –gerst zijn. Het landbouwgebied in en rond de Heulen gracht heeft in de tweede helft van de 20<sup>ste</sup> eeuw een ruilverkaveling ondergaan. De Heulen gracht is een belangrijke aanvoerrote voor water en modder naar het dorpscentrum van Velm (Vandaele et al., 2004, 2007). Om deze aanvoer te beperken werden in januari 2003 en juli 2004 drie aarden damconstructies en ongeveer 10 ha grasstroken (zowel grasbufferstroken als grasgangen) aangelegd in de Heulen gracht (Vandaele et al., 2007). Deze situeren zich afwaarts van de meetgoot (Figuur 66). In februari 2007 werd er stroomopwaarts van de meetgoot een bufferbekken met een capaciteit van 500 m<sup>3</sup> aangelegd (Figuur 66). Dit bufferbekken wordt gevoed via een akker, die verbonden is met het bufferbekken via een duiker onder de nabijgelegen weg. Bij extreme neerslaggebeurtenissen zal de duiker dienst doen als knijpleiding en zal een grote hoeveelheid water gestockeerd worden op de akker (Figuur 68).



Figuur 65. Locatie van het studiegebied van de Heulen gracht en de meetlocaties in het stroomgebied van de Molenbeek.

Langs de Molenbeek is een limnigraaf aanwezig in het dorpscentrum van Velm, op kleine afstand afwaarts van de Heulen gracht. Deze wordt beheerd door de Afdeling Operationaal Waterbeheer (AOW) van de VMM. Ze heeft een opwaartse stroomgebiedsoppervlakte van 30.5 km<sup>2</sup>. Ook heeft VMM een permanente pluviograaf te Niel-bij-Sint-Truiden. De neerslaggegevens te Niel hebben een hogere resolutie dan deze ter hoogte van de meetgoot (0.01 mm t.o.v. 0.1 mm). Om vergelijking mogelijk te maken met de metingen op de Heulen gracht, en de ontbrekende perioden van pluviograafgegevens aan de Heulen gracht op te vullen, werden voor de volgende twee perioden continue debiet- en neerslagmeetreeksen voor de Molenbeek verzameld (tevens met een tijdstap van 10 minuten):

- Periode 1: 1/05/2006 – 31/12/2008
- Periode 2: 1/11/2010 – 31/10/2012

Voor deze perioden werden ook potentiële evapotranspiratie (ET<sub>o</sub>) gegevens verzameld. Deze zijn afkomstig van het VMM-meetnet (meetstation Liedekerke), gecorrigeerd met een lange-termijn volumecorrectiefactor op basis van de KMI-gegevens te Ukkel, conform de methode toegepast in Vansteenkiste et al. (2012). Deze volumecorrectiefactor werd bepaald door vergelijking van de cumulatieve ET<sub>o</sub>-waarden voor een periode waarvoor ET<sub>o</sub>-gegevens beschikbaar zijn voor zowel Liedekerke en Ukkel (Figuur 69), en bedraagt +10%. De ET<sub>o</sub>-gegevens te Ukkel zijn gebaseerd op een aangepaste Penman-methode, volgens Bultot (1983).



Figuur 66. Afstromingsgebied van de Heulen gracht te Velm.





*Figuur 67. Buffer met vertraagde afvoer langs de Heulen gracht, opwaarts van de San Dimas meetgoot.*

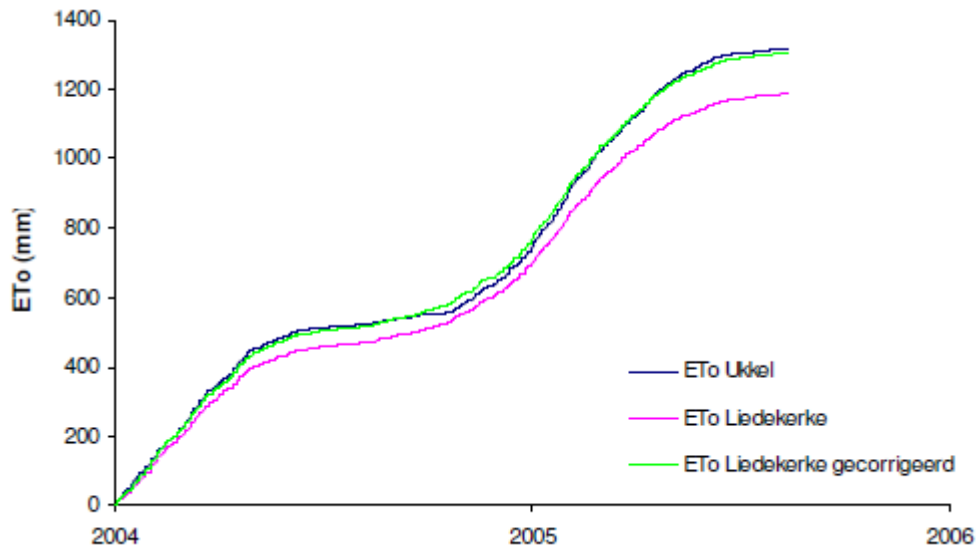


*Figuur 68. Berging van water op de akker stroomopwaarts van het bufferbekken. Deze foto werd genomen tijdens het onweer van 27 augustus 2002.*



Tabel 30. Overzicht opgemeten gebeurtenissen langs de Heulen gracht (HG) en de Molenbeek (MB) te Velm in de perioden mei 2006 – dec. 2008 en nov 2010 – okt 2012.

nr	Datum	Duur [min]	Neer-slag HG [mm]	Neer-slag Niel [mm]	Piek-debiet HG [m <sup>3</sup> /s]	Totaal afstroom -volume HG [mm]	Piek-debiet Mb [m <sup>3</sup> /s]	Totaal afstroom -volume Mb [mm]
1	5/5/2006	190	10.5	0.58	0.01	0.01	0.69	0.07
2	5/18/2006	240	5.3	6.63	0.03	0.14	0.12	0.04
3	5/21/2006	1530	18	11.96	0.19	0.90	0.43	0.40
4	5/25/2006	960	11.2	1.3	0.04	0.36	0.10	0.14
5	5/29/2006	970	14.5	13.02	0.14	0.95	0.31	0.36
6	6/14/2006	710	19.7	16.33	0.42	1.47	1.49	0.54
7	8/3/2006	1000	12.9	11.69	0.09	1.50	0.16	0.13
8	8/4/2006	1160	17.6	14.4	0.11	1.92	0.20	0.19
9	8/5/2006	350	7.8	6.16	0.27	0.80	0.35	0.11
10	8/14/2006	1040	22.7	20.93	0.16	2.29	0.58	0.46
11	8/15/2006	800	9.8	7.92	0.09	1.61	0.32	0.20
12	8/16/2006	790	10.3	7.97	0.33	2.44	0.35	0.22
13	8/19/2006	930	7.9	6.16	0.12	0.22	0.38	0.23
14	8/21/2006	1030	23.4	21.77	0.38	2.39	1.22	0.68
15	1/18/2007	2430	622.7	28.34	0.03	0.48	0.27	0.50
16	2/25/2007	4310	115.4	25.55	0.12	3.74	0.43	1.14
17	3/6/2007	1500	6	4.56	0.06	1.19	0.15	0.37
18	5/25/2007	450	13.51	4.22	0.18	0.50	0.43	0.24
19	6/11/2007	1860	44	15.22	1.48	11.12	1.68	1.17
20	6/18/2007	1190	4.9	3.89	0.10	1.13	0.43	0.36
21	8/9/2007	2200	50	44.28	0.34	8.63	1.12	1.83
22	8/21/2007	1420	20.8	26.58	0.24	2.19	0.70	0.87
23	10/29/2007	1970	24.8	28.81	0.31	7.45	0.43	0.74
24	12/2/2007	1410	11.4	8.99	0.22	2.85	0.23	0.42
25	12/6/2007	1250	12.6	7.62	0.25	3.73	0.45	0.63
26	1/5/2008	1710	11.2	8.71	0.29	3.79	0.13	0.38
27	1/31/2008	1280	6.2	6.75	0.68	8.22	0.30	0.37
28	5/29/2008	550	18.7	18.2	0.33	1.11	0.65	0.37
29	6/4/2008	1130	27.8	23.62	0.17	1.35	0.86	0.80
30	6/12/2008	860	26.3	26.98	0.16	1.27	0.99	1.06
31	8/3/2008	1650	33.6	34.95	1.80	12.55	1.71	2.75
32	12/01/2010	2950	0	19.81	0.04	0.44	0.26	3.23
33	6/28/2011	870	32.9	31.38	0.26	2.06	0.84	2.95
34	8/14/2011	810	18.7	20.95	0.02	0.11	0.59	2.17
35	8/18/2011	1130	33.6	36.23	0.71	6.87	1.79	2.46
36	8/22/2011	970	21.5	24.48	0.46	4.15	1.36	2.23
37	9/05/2011	870	34.4	4.39	0.03	0.04	0.30	0.73
38	2/15/2012	1060	6	7.09	0.07	0.76	0.25	0.34
39	6/16/2012	2210	14.9	16.07	0.53	10.05	0.43	0.80
40	7/07/2012	1510	9.5	16.09	0.17	0.35	0.63	0.82
41	7/15/2012	1050	8.9	17.28	0.15	0.76	0.66	0.79

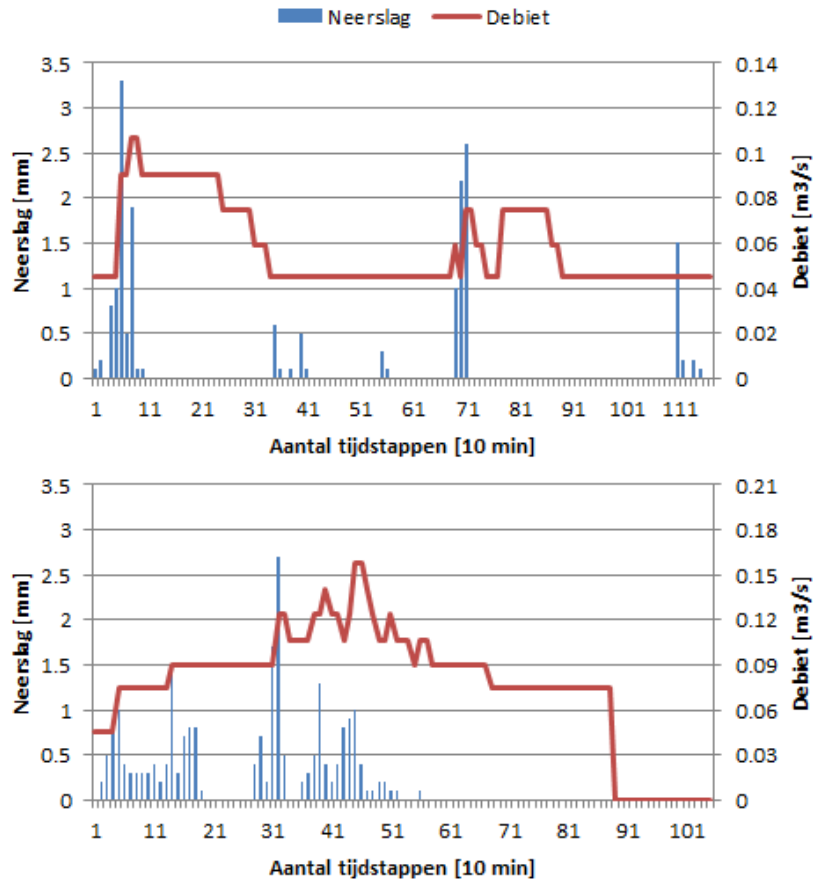


Figuur 69. Correctie van de ETo cumulatieve volumes te Liedekerke op basis van de ETo-gegevens van het KMI te Ukkel.

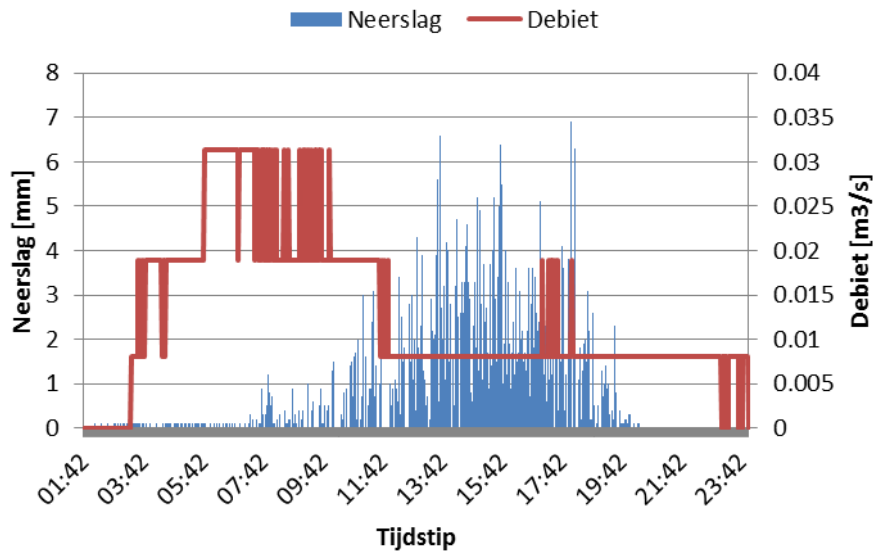
Deze meetgegevens lieten toe om volgende analyses uit te voeren:

- Bepaling van de concentratietijd o.b.v. de debietmetingen;
- Berekening van de afvoercoëfficiënt;
- Analyse en eventuele verklaring van de tijdsvariatie van de afvoercoëfficiënt;
- Analyse van de ruimtelijke variatie van de afvoercoëfficiënt (tussen het afstromingsgebied van de Heulen gracht versus het groter stroomgebied van de Molenbeek te Velm);
- Invloed van deze waarden en variaties in afvoercoëfficiënt op de dimensionering van de buffervoorziening;
- Analyse van de impact van de buffervoorziening op de afwaartse waterloop;
- Analyse van de sedimenttoevoer en gebruik ervan om de effectiviteit van de sedimentopvang te schatten.

Het is echter opgemerkt dat niet alle meetresultaten even betrouwbaar zijn. Figuur 70 toont de resultaten van twee gebeurtenissen, opgemeten in augustus 2006, waarbij het hydrogram niet het verwachte gedrag vertoont. In beide gevallen vertoont het hydrogram lange perioden met constante debieten, en stijgende en dalende flanken in trapvorm. Omdat deze onnauwkeurigheden hun invloed kunnen hebben op de berekening van de runoff-coëfficiënten zijn deze “onnauwkeurige” metingen verder afzonderlijk aangeduid. Daarnaast zijn er twee gebeurtenissen die ter plaatse van de Heulen gracht een zeer hoog neerslagvolume vertonen, m.n. gebeurtenissen 15 (Figuur 71) en 16. Deze twee gebeurtenissen zijn eveneens als “onbetrouwbaar” geklasseerd.



Figuur 70. Weinig betrouwbare debietmetingen in de Heulen gracht voor de gebeurtenissen van 4 augustus 2006 (boven) en 14 augustus 2006 (onder).

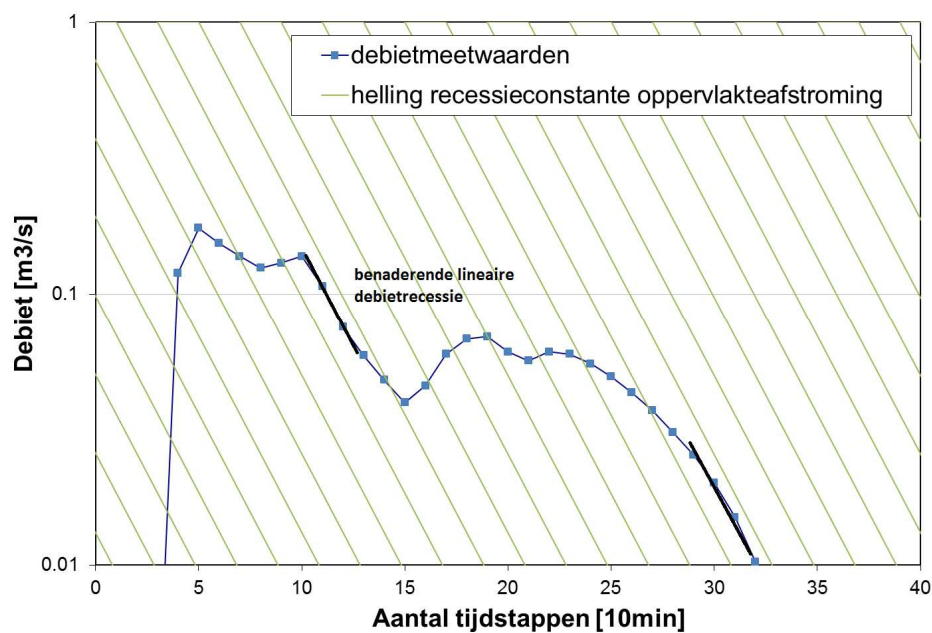


Figuur 71. Onbetrouwbare debiet- en neerslagmetingen in de Heulengracht voor de gebeurtenis van 18 januari 2007.

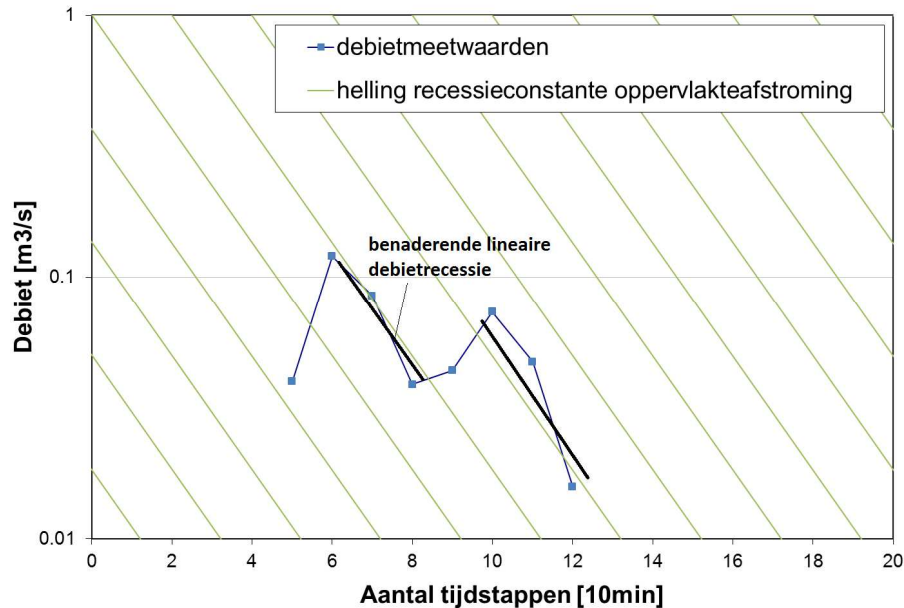
### 9.3.2 Bepaling concentratietijd o.b.v. debietmetingen

Zoals in delen 3.3.6.4 en 3.4.2 toegelicht kan de concentratietijd geval-specifiek correct empirisch bepaald worden op basis van debietmeetgegevens. Dit wordt hieronder geïllustreerd op basis van de recente debietgegevens voor de Heulen gracht.

Figuur 72 en Figuur 73 plotten de debietmeetwaarden van twee recente meetcampagnes op een logschaal versus de tijdschaal. De helling van de steilste lineaire dalingen geven de recessieconstante van oppervlakteafstroming weer, zoals grafisch geïdentificeerd op basis van in de figuren. De minder steile hellingen zijn ofwel het gevolg van tragere hydrologische deelstromen (interflow, baseflow), d.i. bij lagere debieten, ofwel door niet volledig droge perioden. Hydrologische deelstromen vertonen immers typisch een exponentieel recessief verloop tijdens droge perioden. De recessieconstante die in de figuren geïdentificeerd is stelt de gemiddelde verblijftijd voor van het oppervlaktewater in het afstromingsgebied opwaarts van de debietmeetlocatie en is dus een maat voor de concentratietijd. In dit specifieke geval van de Heulen gracht te Velm is een gemiddelde recessieconstante van 30 min gevonden.



Figuur 72. Bepaling recessieconstante oppervlakteafstroming o.b.v. debietmeetgegevens; Velm 2-5-2012 16:50 – 3-5-2012 1:00.



Figuur 73. Bepaling recessieconstante oppervlakteafstroming o.b.v. debietmeetgegevens; Velm 20-5-2012 1:30 – 8:00.

### 9.3.3 Berekening en analyse tijdsvariatie runoff-coëfficiënt

Voor elk van de opgemeten gebeurtenissen in beide perioden (mei 2006 – dec. 2008, en nov. 2010 – okt. 2012) werd de afvoercoëfficiënt berekend, zowel de gemiddelde als de maximale afvoercoëfficiënt per gebeurtenis (Tabel 31 en Tabel 32). De gemiddelde afvoercoëfficiënt werd berekend als het totaal afstromingsvolume gedeeld door het totaal neerslagvolume, gemeten door de pluvio aan de Heulen gracht, per gebeurtenis (Tabel 30). De maximale afvoercoëfficiënt werd bepaald door het piekdebiet te delen door het voorafgaandelijk neerslagvolume gedurende een periode gelijk aan 60 minuten (volgens het concept van de rationele methode). Normaliter moet deze periode gelijk zijn aan de concentratietijd (d.i. hier 30 minuten), maar omdat een periode van 60 minuten een iets beter verband vertoonde met de baseflow in Velm (zie Figuur 78) werd gekozen voor een periode van 60 minuten. Om te voorkomen dat kleine tijdsverschuivingen deze berekening beïnvloeden, werd het maximaal neerslagvolume gebruikt dat zich voordoet gedurende alle mogelijke deelperioden met een lengte aan 60 minuten tussen het begin van de gebeurtenis en het tijdstip van het piekdebiet.

Tabel 31. Gebeurtenisspecifieke gemiddelde en maximale afvoercoëfficiënten voor de Heulen gracht en de Molenbeek te Velm voor elke bemeeten gebeurtenis.

nr.	Datum	Gemidd. runoff-coeff. HG	Max. runoff-coeff. HG	Gemidd. runoff-coeff. Molenbeek	Max. runoff-coeff. Molenbeek
1	5/5/2006	0.00	0.00	0.01	0.02
2	5/18/2006	0.03	0.06	0.01	0.02
3	5/21/2006	0.05	0.38	0.02	0.06
4	5/25/2006	0.03	0.19	0.01	0.03
5	5/29/2006	0.07	0.32	0.03	0.05
6	6/14/2006	0.07	0.29	0.03	0.07
7	8/3/2006	0.12	0.18	0.01	0.02
8	8/4/2006	0.11	0.12	0.01	0.02
9	8/5/2006	0.10	0.56	0.01	0.05
10	8/14/2006	0.10	0.23	0.02	0.06
11	8/15/2006	0.16	0.11	0.02	0.03
12	8/16/2006	0.24	0.35	0.02	0.03
13	8/19/2006	0.03	0.13	0.03	0.03

nr.	Datum	Gemidd. runoff- coeff. HG	Max. runoff- coeff. HG	Gemidd. runoff-coeff. Molenbeek	Max. runoff- coeff. Molenbeek
14	8/21/2006	0.10	0.34	0.03	0.08
15	1/18/2007	0.00	0.18	0.00	0.11
16	2/25/2007	0.03	0.23	0.01	0.06
17	3/6/2007	0.20	0.08	0.06	0.01
18	5/25/2007	0.04	0.13	0.02	0.02
19	6/11/2007	0.25	0.34	0.03	0.03
20	6/18/2007	0.23	0.20	0.07	0.06
21	8/9/2007	0.17	0.43	0.04	0.10
22	8/21/2007	0.11	0.54	0.04	0.11
23	10/29/2007	0.30	1.00	0.03	0.09
24	12/2/2007	0.25	0.45	0.04	0.03
25	12/6/2007	0.30	0.82	0.05	0.10
26	1/5/2008	0.34	0.88	0.03	0.03
27	1/31/2008	1.33	1.50	0.06	0.05
28	5/29/2008	0.06	0.80	0.02	0.11
29	6/4/2008	0.05	0.21	0.03	0.08
30	6/12/2008	0.05	0.23	0.04	0.09
31	8/3/2008	0.39	0.83	0.08	0.05
32	12/01/2010	-	-	-	-
33	6/28/2011	0.06	0.18	0.09	0.04
34	8/14/2011	0.01	0.04	0.12	0.07
35	8/18/2011	0.20	0.19	0.07	0.03
36	8/22/2011	0.19	0.23	0.10	0.05
37	9/05/2011	0.00	0.02	0.02	0.02
38	2/15/2012	0.13	0.29	0.06	0.07
39	6/16/2012	0.67	0.68	0.05	0.04
40	7/07/2012	0.04	0.24	0.09	0.06
41	7/15/2012	0.09	0.52	0.09	0.16

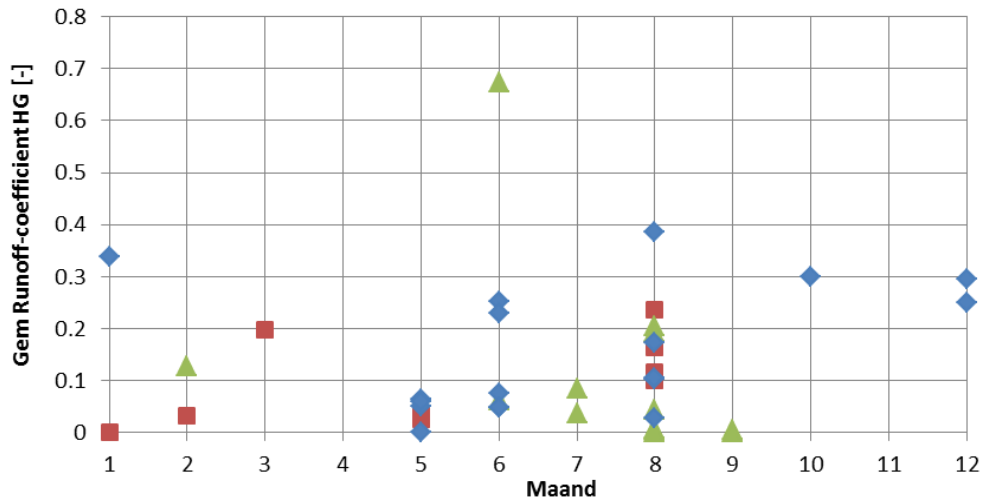
Tabel 32. Gebeurtenisgemiddelde debietfilterresultaten voor de Molenbeek te Velm, en voorafgaandelijke neerslag voor de pluviografen langs de Heulen gracht en te Niel voor elke bemeten gebeurtenis.

nr.	Datum	Baseflow Molenbeek [mm]	Interflow Molenbeek [mm]	Opp. afstr. Molenbeek [mm]	Voorafg. 60-min neerslag HG [mm/10min]
1	5/05/2006	0.0016	0.0009	0.0015	4.5
2	5/18/2006	0.0011	0.0002	0.0004	0.82
3	5/21/2006	0.0019	0.0007	0.0005	0.88
4	5/25/2006	0.0014	0.0002	0.0000	0.4
5	5/29/2006	0.0021	0.0011	0.0007	0.76
6	6/14/2006	0.0025	0.0034	0.0028	2.48
7	8/03/2006	0.0010	0.0002	0.0002	0.88
8	8/04/2006	0.0013	0.0003	0.0003	1.5
9	8/05/2006	0.0014	0.0008	0.0012	0.84
10	8/14/2006	0.0019	0.0017	0.0011	1.16
11	8/15/2006	0.0021	0.0003	0.0003	1.36
12	8/16/2006	0.0019	0.0006	0.0005	1.64
13	8/19/2006	0.0015	0.0006	0.0005	1.58
14	8/21/2006	0.0026	0.0028	0.0019	1.88
15	1/18/2007	0.0014	0.0004	0.0003	0.3
16	2/25/2007	0.0021	0.0004	0.0003	0.9
17	3/06/2007	0.0020	0.0003	0.0002	1.24

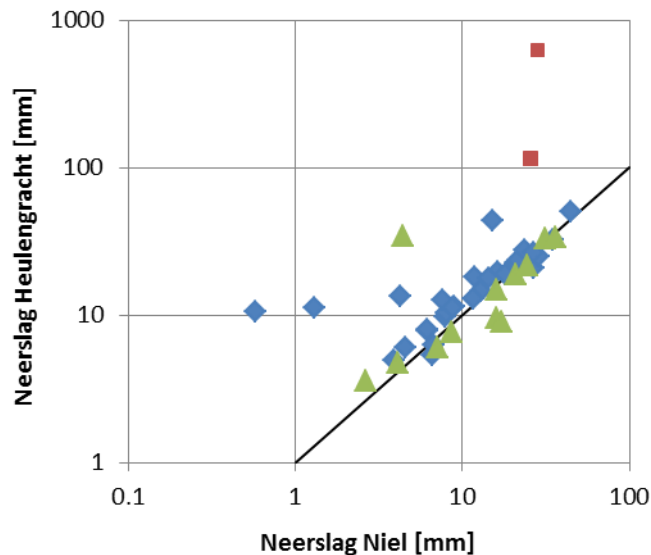
nr.	Datum	Baseflow Molenbeek [mm]	Interflow Molenbeek [mm]	Opp. afstr. Molenbeek [mm]	Voorafg. 60-min neerslag HG [mm/10min]
18	5/25/2007	0.0018	0.0018	0.0017	2.322
19	6/11/2007	0.0035	0.0024	0.0014	7.36
20	6/18/2007	0.0021	0.0008	0.0006	0.9
21	8/09/2007	0.0043	0.0033	0.0018	1.36
22	8/21/2007	0.0031	0.0022	0.0014	0.76
23	10/29/2007	0.0023	0.0011	0.0006	0.54
24	12/02/2007	0.0021	0.0006	0.0003	0.84
25	12/06/2007	0.0029	0.0015	0.0008	0.52
26	1/05/2008	0.0018	0.0003	0.0001	0
27	1/31/2008	0.0020	0.0006	0.0003	0.77
28	5/29/2008	0.0024	0.0021	0.0022	0.7
29	6/04/2008	0.0030	0.0027	0.0018	1.34
30	6/12/2008	0.0038	0.0053	0.0034	1.24
31	8/03/2008	0.0062	0.0071	0.0036	3.7
32	11/28/2010	0.0018	0.0003	0.0001	0
33	6/27/2011	0.0021	0.0005	0.0001	2.5
34	8/11/2011	0.0024	0.0006	0.0001	1.04
35	8/16/2011	0.0033	0.0029	0.0006	6.5
36	8/22/2011	0.0040	0.0016	0.0003	3.47
37	9/05/2011	0.0018	0.0004	0.0001	2.26
38	2/15/2012	0.0020	0.0010	0.0001	0.42
39	6/16/2012	0.0026	0.0010	0.0002	1.34
40	7/07/2012	0.0037	0.0016	0.0002	1.24
41	7/15/2012	0.0041	0.0021	0.0003	0.5

Figuur 74 toont dat de gemiddelde runoff-coëfficiënt ter plaatse van de Heulen gracht varieert tussen 0 en 0.4, met voor de meeste gebeurtenissen waarden tussen 0 en 0.3 en af en toe waarden boven de 0.3. Voor één van de gebeurtenissen werd een gemiddelde runoff-coëfficiënt van 1.33 berekend (buiten de schaal van de figuur), welke uiteraard niet correct kan zijn. Merk ook op dat de berekende runoff-coëfficiënten niet noodzakelijk overeenkomen met de werkelijke runoff-coëfficiënten. Ze zijn immers gebaseerd op de veronderstelling van de gemeten neerslagintensiteiten ter hoogte van de pluviograaf langs de Heulen gracht overeenkomen met de gebiedsgemiddelde neerslagintensiteiten boven het afstromingsgebied. Door de kleine grootte van het afstromingsgebied en de lokatie van de pluviograaf afwaarts in het afstromingsgebied wordt echter verwacht dat de invloed van de neerslagonzekerheid in dit geval zeer beperkt is. Om de nauwkeurigheid van de pluviograaf aan de Heulen gracht verder te onderzoeken werden de neerslagvolumes van de Heulen gracht – pluviograaf voor de verschillende gebeurtenissen vergeleken met deze van de VMM te Niel (bij Sint-Truiden), d.i. pluviograaf P09\_012. Figuur 75 toont dat de verschillen in neerslagvolumes tussen beide pluviografen voor de meeste gebeurtenissen zeer beperkt zijn. Voor zes gebeurtenissen registreert de pluviograaf langs de Heulen gracht een beduidend groter neerslagvolume, wat mogelijks wijst op onderschattingen te Niel. Ook de twee onbetrouwbare neerslagmetingen zijn duidelijk zichtbaar.

Figuur 74 lijkt op het eerste zicht weinig seizoensvariatie te vertonen. Bij de interpretatie van de figuur is het echter belangrijk om rekening te houden met het verschil in aantal gebeurtenissen per maand. Voor maanden met meer gebeurtenissen is de statistische kans groter dat enkele hogere runoff-coëfficiënten worden waargenomen, ook al is de verdeling in runoff-coëfficiënt gelijk. De waargenomen gebeurtenissen langs de Heulen gracht zijn zeer ongelijkmatig verdeeld over de maanden van het jaar, met voornamelijk gebeurtenissen tussen de maanden mei en augustus. Op basis van deze gegevens is het dus zeer moeilijk om uitspraken te doen over de seizoensvariatie van de runoff-coëfficiënt.



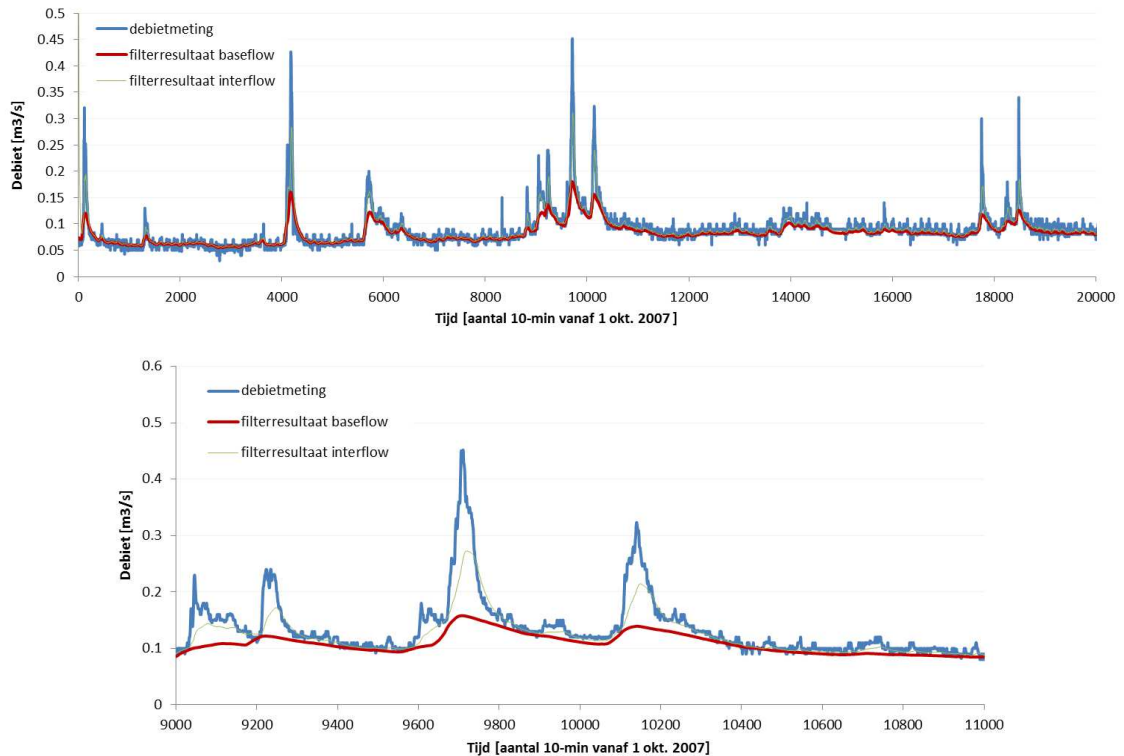
Figuur 74. Gemiddelde runoff-coëfficiënt voor alle opgemeten gebeurtenissen aan de meetgoot op de Heulen gracht te Velm in de periode mei 2006 – dec. 2008 (blauw) en nov. 2010 – okt. 2012 (groen), in functie van de maand van het jaar. De minder betrouwbare metingen zijn aangeduid in het rood.



Figuur 75. Neerslagvolume voor alle opgemeten gebeurtenissen aan de meetgoot op de Heulen gracht te Velm in de periode mei 2006 – dec. 2008 (blauw) en nov. 2010 – okt. 2012 (groen): vergelijking pluviograaf aan de Heulen gracht versus de VMM pluviograaf P09\_012 te Niel (bij Sint-Truiden).

Om de variatie in runoff-coëfficiënt te verklaren, werd vanuit onderzoeksoogpunt de afhankelijkheid onderzocht met o.a. het verzadigingsgehalte van de ondergrond. Voor dit verzadigingsgehalte zijn er geen rechtstreekse metingen beschikbaar. Een onrechtstreekse inschatting bestaat erin om via de debiet- en neerslaggegevens van het omhullende stroomgebied van de Molenbeek te Velm via waterbalanssluiting de overblijvende berging in de ondergrond te berekenen (zie deel 3.4.2). Deze inschatting is echter onderhevig aan heel wat onzekerheden, zoals de neerslagonzekerheid en de onzekerheid in de inschatting van de werkelijke evapotranspiratieverliezen. Een andere onrechtstreekse indicator voor de bodemvochtverzadiging is de basisafvoer in de waterloop. Deze basisafvoer is immers hoofdzakelijk afkomstig van de grondwaterafstroming in het stroomgebied, welke zeer sterk gerelateerd is aan de bodemverzadiging. De basisafvoer werd via de numerieke filter besproken in deel 3.4.2 afgeleid uit de debietmeetreeks voor de Molenbeek te Velm; zie Figuur 76.

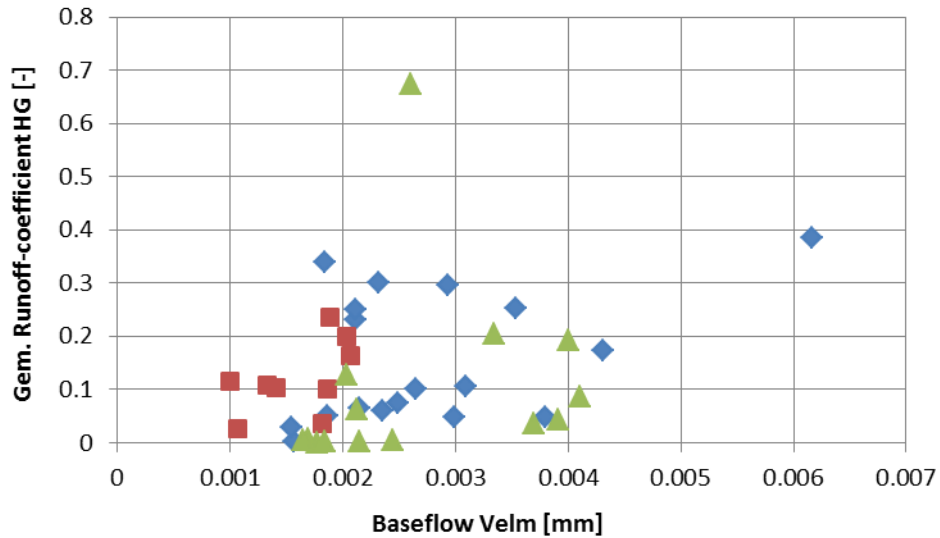




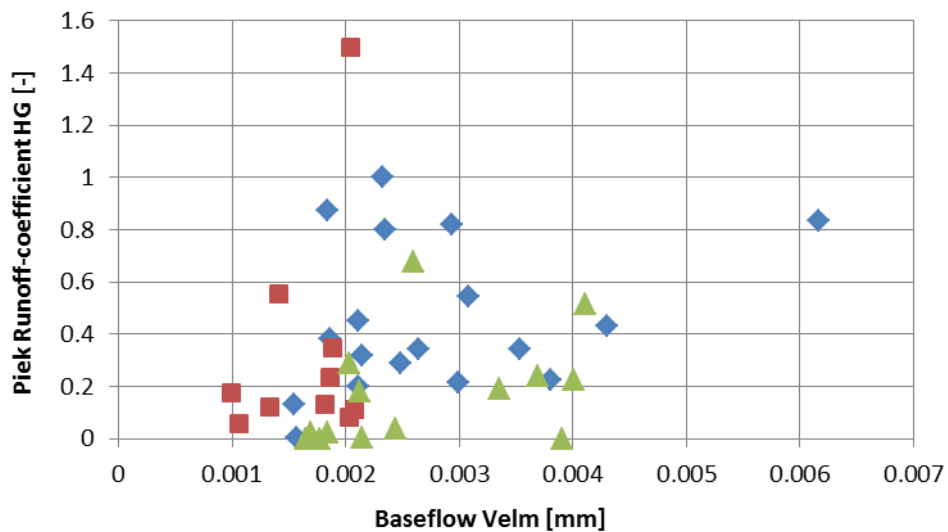
*Figuur 76. Baseflow- en interflowfilterresultaat voor het debiet op de Molenbeek te Velm: voorbeeld voor winterperiode okt. 2007 – febr. 2008.*

In Figuur 77 is de gemiddelde runoff-coëfficiënt voor de Heulen gracht uitgezet tegen de basisafvoer te Velm (als indicator voor de bodemverzadiging). Figuur 78 toont dezelfde analyse voor de maximale runoff-coëfficiënt. Gemiddeld gezien zal een hogere baseflow leiden tot een hogere runoff-coëfficiënt. Het is echter zeer moeilijk om in beide figuren een eenduidig verband vast te stellen tussen het basisdebiet te Velm en de runoff-coëfficiënt voor de Heulen gracht. Voor een groot aantal punten uit de eerste meetperiode (blauwe punten) kan een goede correlatie gevonden worden. Er zijn echter meerdere gebeurtenissen waar de runoff-coëfficiënt duidelijk hoger ligt. Na toevoeging van de punten uit de tweede meetperiode (groene punten) blijkt een nog grotere spreiding te ontstaan.

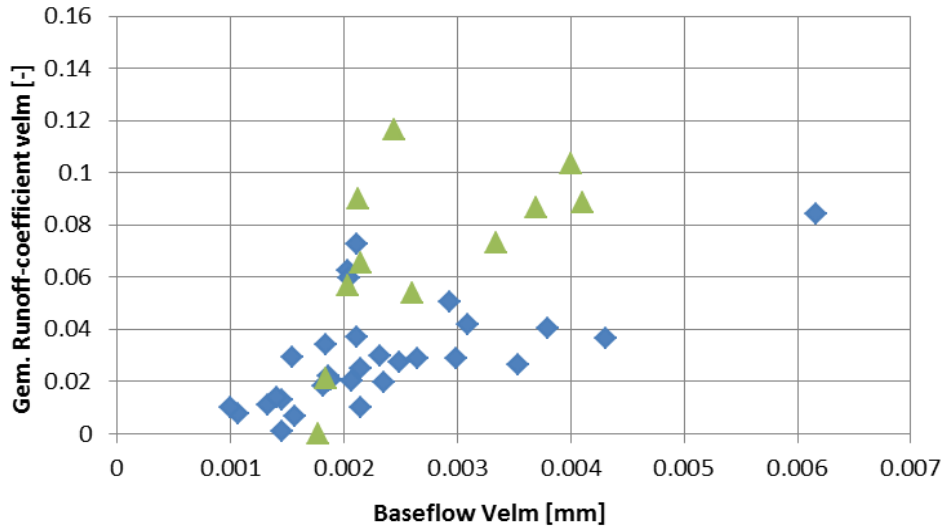
Aan de limnigraaf in de dorpskern van Velm, net afwaarts van de Heulen gracht, wordt er wel een duidelijk verband gevonden tussen de runoff-coëfficiënt en het verzadigingsoverschot (Figuur 79). Dit is trouwens het geval voor een groot aantal limnigrafen in Vlaanderen. Op stroomgebiedschaal zal de oppervlakteafstroming in hoofdzaak bepaald worden door het optreden van verzadigde zones, zoals eerder verduidelijkt in paragraaf 3.4.3.1. Voor meer opwaartse en hellende gebiedjes blijkt dit niet te kloppen, voornamelijk omdat er daar zeer weinig tot geen sprake is van verzadigde gebieden.



Figuur 77. Gemiddelde runoff-coëfficiënt voor alle opgemeten gebeurtenissen aan de meetgoot op de Heulen gracht te Velm in de periode mei 2006 – dec. 2008 (blauw) en nov. 2010 – okt. 2012 (groen), versus de gemiddelde basisafvoer voor deze perioden op de Molenbeek te Velm. De minder betrouwbare metingen zijn aangeduid in het rood.

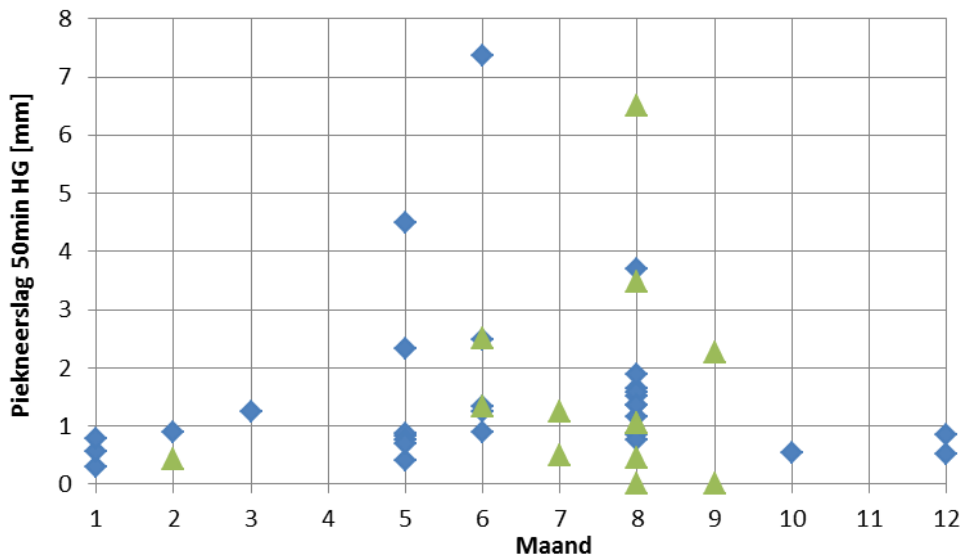


Figuur 78. Maximale runoff-coëfficiënt voor alle opgemeten gebeurtenissen aan de meetgoot op de Heulen gracht te Velm in de periode mei 2006 – dec. 2008 (blauw) en nov. 2010 – okt. 2012 (groen), versus de gemiddelde basisafvoer voor deze perioden op de Molenbeek te Velm. De minder betrouwbare metingen zijn aangeduid in het rood.

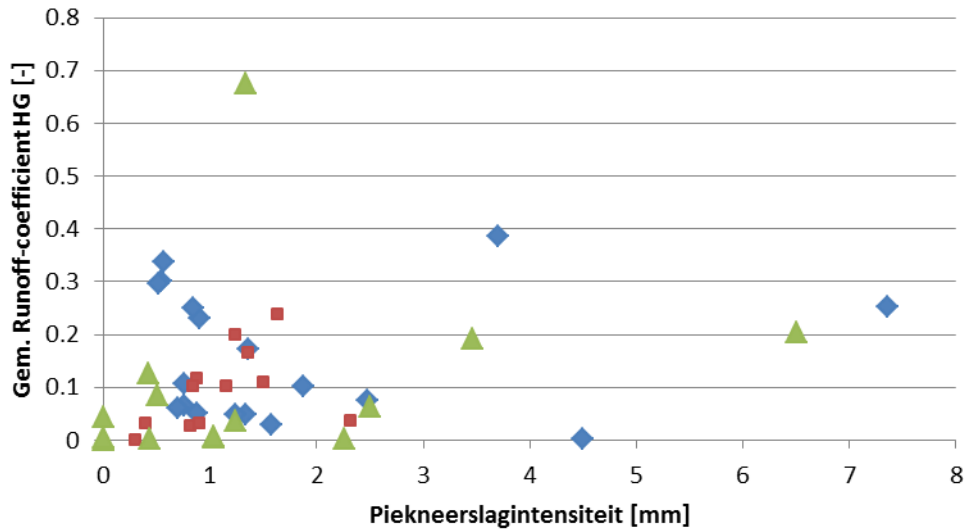


*Figuur 79. Gemiddelde runoff-coëfficiënt voor de Molenbeek te Velm, voor alle opgemeten gebeurtenissen aan de meetgoot op de Heulen gracht te Velm in de periode mei 2006 – dec. 2008 (blauw) en nov. 2010 – okt. 2012 (groen), versus de gemiddelde basisafvoer voor deze perioden op de Molenbeek te Velm.*

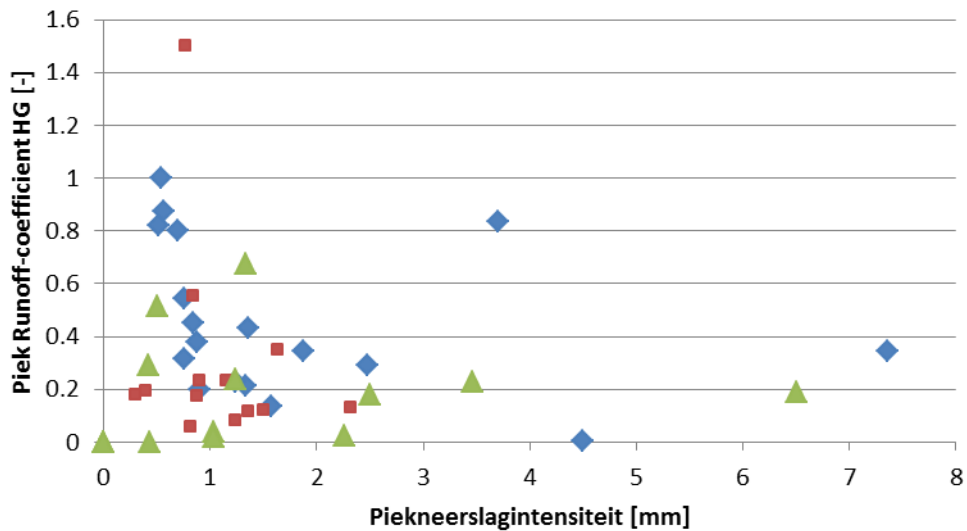
Een andere factor die de sterke tijdsvariatie van de runoff-coëfficiënt kan verklaren is de sterke seizoensvariatie van de korte-duur neerslagintensiteiten; zie Figuur 80. De korte-duur neerslagintensiteiten zijn vooral het gevolg van convectieve onweders, die zich voordoen tijdens warme zomermaanden. Wanneer de intensiteit van dergelijke onweders de infiltratiecapaciteit van de bodem overschrijdt is er sprake van een “infiltration-excess”. Het regenwater kan niet infiltreren, zal daardoor afstromen en zo tot een hogere runoff-coëfficiënt leiden. Figuur 81 en Figuur 82 tonen echter aan dat er geen duidelijk verband kan gevonden worden tussen de maximale neerslagintensiteit en de runoff-coëfficiënt, zowel de gemiddelde als de piekwaarde.



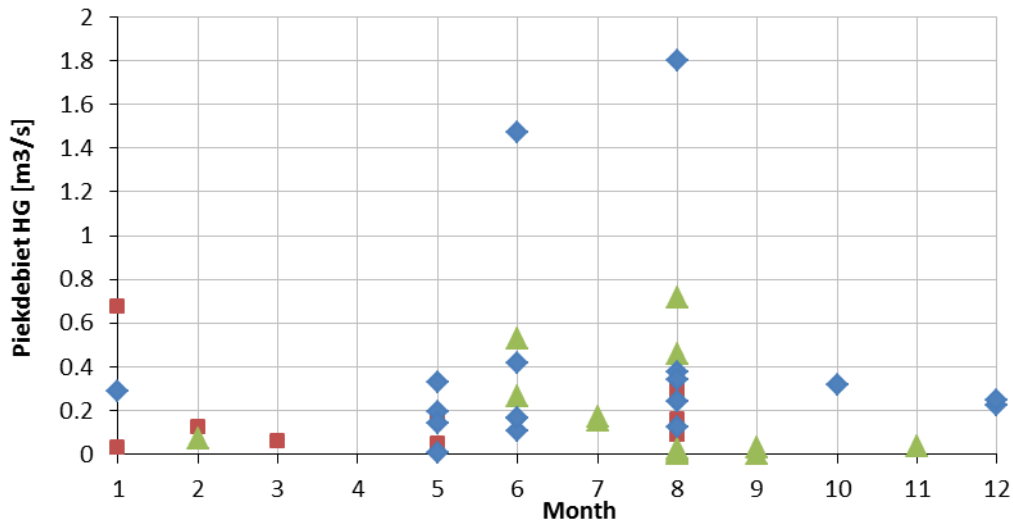
*Figuur 80. Piekneerslagintensiteit voor een aggregatieniveau van 50 minuten, voor alle opgemeten gebeurtenissen aan de meetgoot op de Heulen gracht te Velm in de periode mei 2006 – dec. 2008 (blauw) en nov. 2010 – okt. 2012 (groen), in functie van de maand van het jaar.*



Figuur 81. Gemiddelde runoff-coëfficiënt voor alle opgemeten gebeurtenissen aan de meetgoot op de Heulen gracht te Velm in de periode mei 2006 – dec. 2008 (blauw) en nov. 2010 – okt. 2012 (groen), versus de piekneerslagintensiteit voor een aggregatieniveau van 50 minuten. De minder betrouwbare metingen zijn aangeduid in het rood.

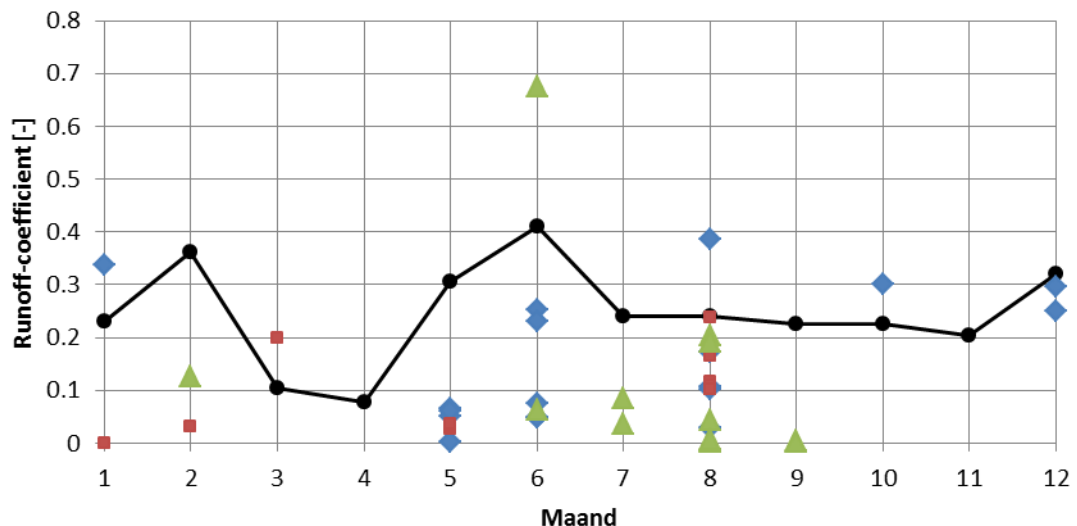


Figuur 82. Maximale runoff-coëfficiënt voor alle opgemeten gebeurtenissen aan de meetgoot op de Heulen gracht te Velm in de periode mei 2006 – dec. 2008 (blauw) en nov. 2010 – okt. 2012 (groen), versus de piekneerslagintensiteit voor een aggregatieniveau van 50 minuten. De minder betrouwbare metingen zijn aangeduid in het rood.



*Figuur 83. Piekafvoer, voor alle opgemeten gebeurtenissen aan de meetgoot op de Heulen gracht te Velm in de periode mei 2006 – dec. 2008 (blauw) en nov. 2010 – okt. 2012 (groen), in functie van de maand van het jaar. De minder betrouwbare metingen zijn aangeduid in het rood.*

Naast het verzadigingsoverschot en het infiltratieoverschot speelt ook de bodembedekking een belangrijke rol bij neerslagafstroming. Evrard (2008) voerde in het toestroomgebied van de Heulen gracht een groot aantal neerslagsimulaties uit, met als doel de runoff-coëfficiënt te bepalen op basis van het bodemgebruik, de bodemruwheid, de versleppingsgraad en de bedekkingsgraad. Met behulp van de kennis van het relatieve bodemgebruik van het gebied kan dan per maand een geaggregeerde runoff-coëfficiënt berekend worden. Figuur 84 toont de berekende runoff-coëfficiënten in vergelijking met de opgemeten waarden. Het is opvallend dat in nagenoeg alle gevallen de geaggregeerde runoff-coëfficiënt hoger ligt dan diegene die berekend is op basis van de meetgegevens.



*Figuur 84. Vergelijking geaggregeerde runoff-coëfficiënt (zwarte lijn) met de gemiddelde runoff-coëfficiënten voor alle opgemeten gebeurtenissen aan de meetgoot op de Heulen gracht in de periode mei 2006 – dec 2008 (blauw) en nov 2010 – okt 2012 (groen).*

Op basis van bovenstaande analyse kan geconcludeerd worden dat het zeer moeilijk is om het tijdsvariabele verloop van de runoff-coëfficiënt in te brengen in het continue simulatiemodel. Daarnaast is het onrealistisch om voor elk erosiegevoelig gebied een meetcampagne op te

stellen om bovenstaande analyse te kunnen uitvoeren. Daarom wordt geadviseerd om met een constante waarde van de runoff-coëfficiënt te rekenen. Deze constante waarde kan dan bepaald worden op basis van de tabellen in deel 3.4.3.1. Uit de studie blijkt dat deze waarde in de meeste gevallen de werkelijk optredende waarde overschat. Het zijn echter de extreme situaties waarvoor de benodigde buffercapaciteit berekend dient te worden, waardoor deze overschatting minder problematisch is.

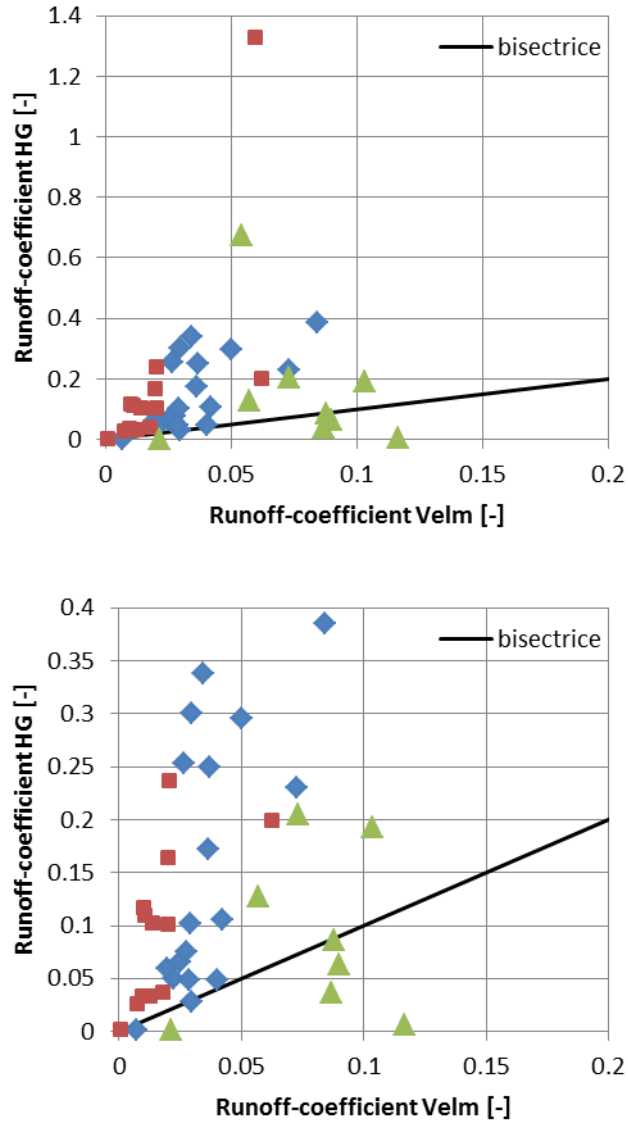
#### **9.3.4 Ruimtelijke variatie runoff-coëfficiënt**

Voor dezelfde gebeurtenissen als voor de Heulen gracht werd ook voor de Molenbeek te Velm de runoff-coëfficiënt berekend en vergeleken met deze voor de Heulen gracht. De runoff-coëfficiënten voor de Heulen gracht zijn systematisch hoger dan deze voor de Molenbeek; zie Figuur 85. Dit bevestigt dat runoff-coëfficiënten in kleine opwaartse gebiedjes een grootteorde groter kunnen zijn dan zoals waargenomen in afwaartse debietmeetstations.

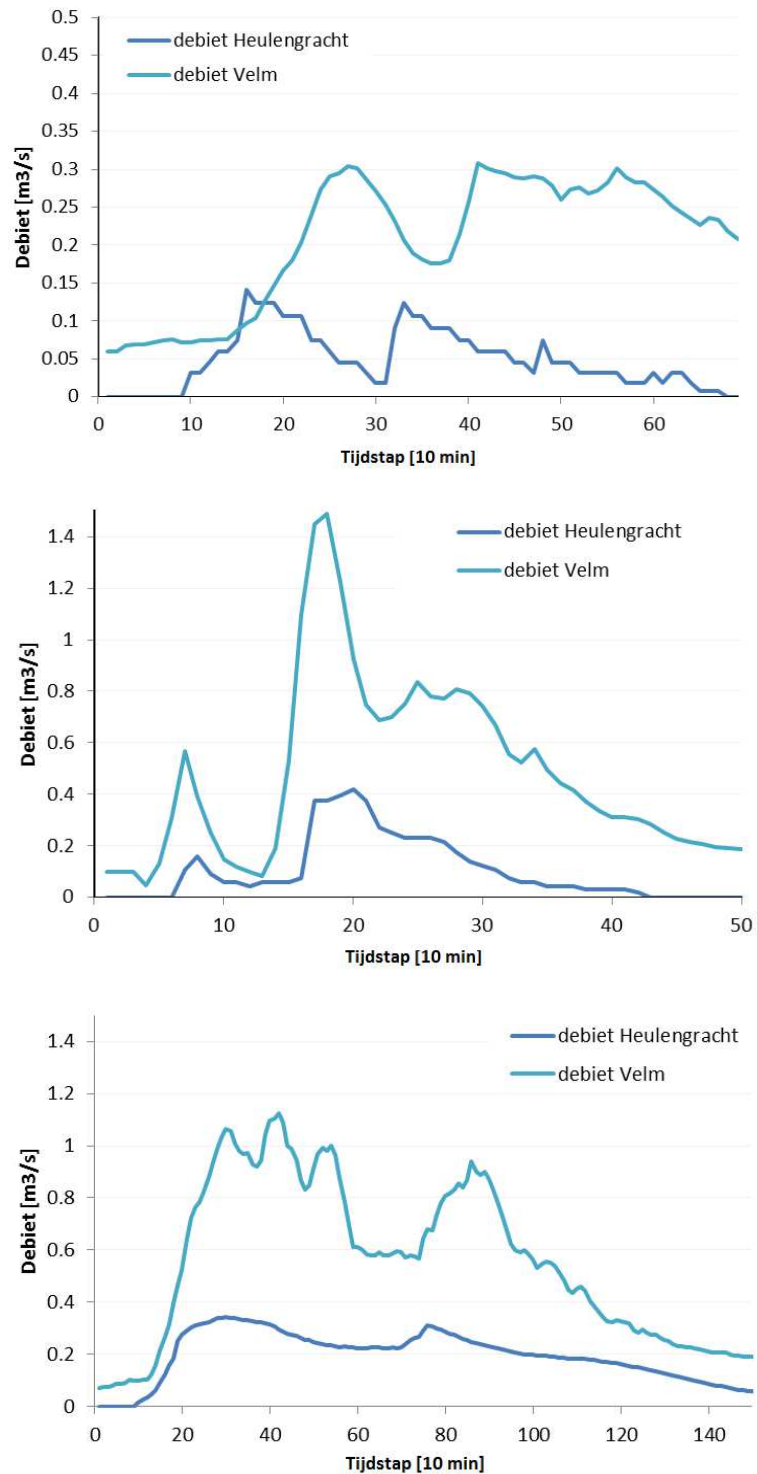
Voor de meeste gebeurtenissen, vooral deze met hoge afvoeren, worden gelijkaardige debiettijdsvariëaties teruggevonden (zie Figuur 86), maar met een kleine tijdsvertraging langs de Molenbeek afwaarts omwille van de grotere stroomgebiedsoverflakte.

De sterk afwijkende waarde in Figuur 85 met een runoff-coëfficiënt van meer dan 1.3 langs de Heulen gracht kan uiteraard niet correct zijn. Deze fout moet het gevolg zijn van een sterk onderschatte maximale neerslagintensiteit (vb. door optreden van een zeer lokale extreme regenbui, waarvan de piekintensiteit gemist werd door de pluviograaf) ofwel door een verkeerde debietmeting.

Het is opvallend dat voor de eerste meetperiode duidelijke verbanden gevonden kunnen worden tussen enerzijds de basisafvoer te Velm en de gemiddelde runoff-coëfficiënt te Velm (Figuur 87) en anderzijds tussen de gemiddelde runoffcoëfficiënt te Velm en die van de Heulen gracht (Figuur 85). Wanneer de basisafvoer te Velm en de runoff-coëfficiënt van de Heulen gracht echter uitgezet worden tegen elkaar, zoals in Figuur 77, is er nog weinig te merken van dit verband.

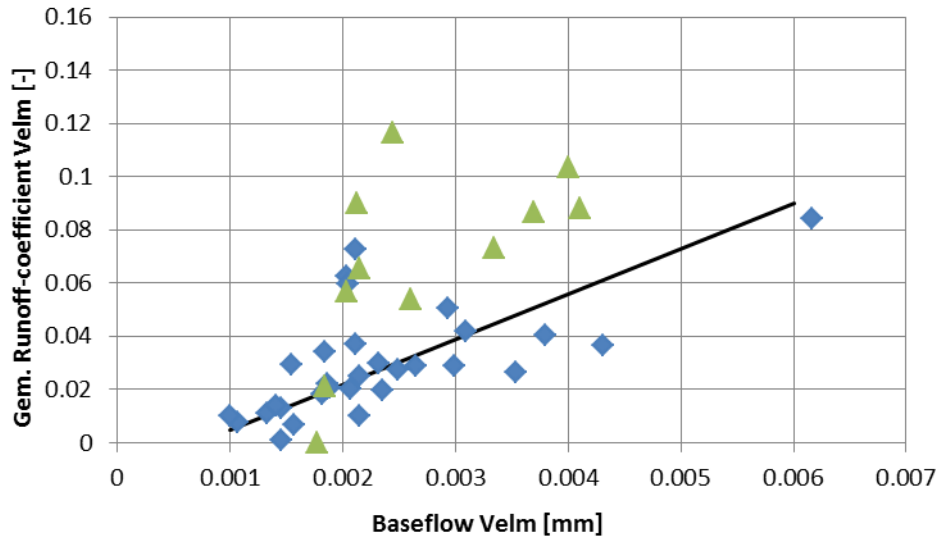


*Figuur 85. Runoff-coëfficiënt langs de Heulen gracht versus deze voor de Molenbeek te Velm, voor alle opgemeten gebeurtenissen aan de meetgoot op de Heulen gracht te Velm in de periode mei 2006 – dec. 2008 (blauw) en nov. 2010 – okt. 2012 (groen). De minder betrouwbare metingen zijn aangeduid in het rood.*



Figuur 86. Vergelijking debietmeting voor de Heulen gracht en de Molenbeek te Velm, voor drie geselecteerde gebeurtenissen: op 29/05/2006 (boven), 14/06/2006 (midden), 9/08/2007 (onder).





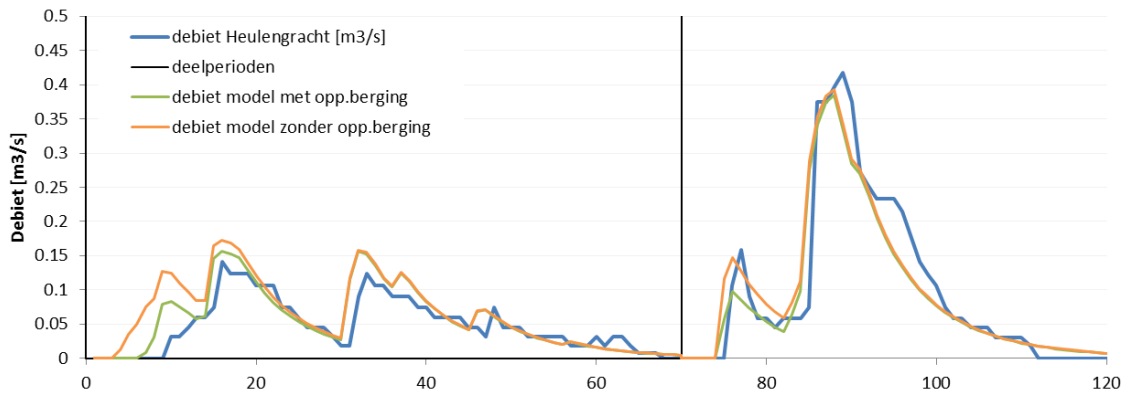
Figuur 87. Gemiddelde runoff-coëfficiënt voor de Molenbeek te Velm, voor alle opgemeten gebeurtenissen aan de meetgoot op de Heulen gracht te Velm in de periode mei 2006 – dec. 2008 (blauw) en nov. 2010 – okt. 2012 (groen), versus de gemiddelde basisafvoer voor deze perioden op de Molenbeek te Velm.

### 9.3.5 Neerslagafvoermodel

De afvoerhydrogrammen van zowel de Heulen gracht als de Molenbeek worden goed gemodelleerd door lineaire reservoirmodellen: in de meetgoot van de Heulen gracht wordt enkel oppervlakteafstroming opgemeten, aan de limnigraaf op de Molenbeek het totaal afstromingsdebiet dat bestaat uit zowel oppervlakteafstroming, interflow en baseflow.

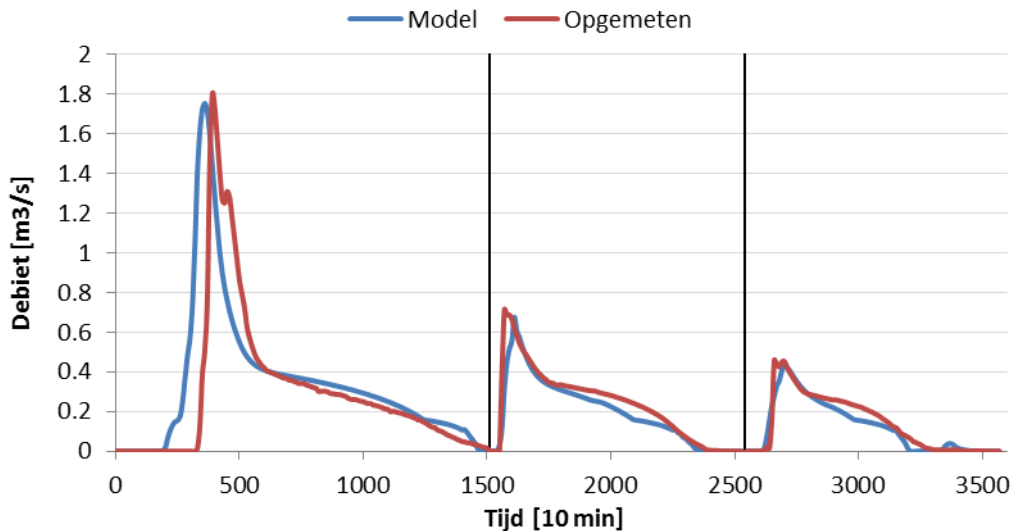
#### Heulen gracht

Het lineair reservoirmodel voor de oppervlakteafstroming aan de Heulen gracht heeft een  $k$ -waarde gelijk aan de concentratietijd van 30 minuten (zie deel 9.3.2). Figuur 88 toont het resultaat van het lineair reservoirmodel voor twee gebeurtenissen die plaats vonden voor de aanleg van het opwaartse bufferbekken. Omdat het debiet tijdens de initiële periode van de hydrogrammen vaak overschat werd, wat waarschijnlijk te wijten is aan neerslagverliezen t.g.v. oppervlakteberging in het afstromingsgebied, werd een deelmodel met 2 mm oppervlakteberging toegevoegd. Figuur 88 toont de resultaten zonder en met toepassing van deze oppervlaktebergingsverliezen. De invloed van de oppervlakteberging is enkel zichtbaar in het eerste gedeelte van het hydrogram: na verloop van tijd vallen beide hydrogrammen samen. Om te vermijden dat er na elke (minieme) regenval afstroming zal plaatsvinden is het dus aangeraden om de oppervlakteberging in te rekenen. Het inrekenen van oppervlakteberging heeft ook een invloed op de runoff-coëfficiënt, aangezien een bepaalde hoeveelheid neerslag (in dit geval 2 mm) niet meegerekend wordt bij de oppervlakteafstroming. Na inrekenen van de oppervlakteberging verkleint dus de runoff-coëfficiënt.



*Figuur 88. Resultaat lineair reservoirmodel oppervlakteafstroming zonder en met 2mm oppervlakteberging, voor de meetgoot op de Heulen gracht te Velm, voor twee opgemeten gebeurtenissen: 29/05/2006 en 14/06/2006.*

Na de aanleg van het bufferbekken opwaarts van de meetgoot is het eenvoudige lineaire reservoirmodel niet langer geldig. Het conceptuele model is daarom uitgebreid om zo goed mogelijk de werkelijkheid weer te geven. Het lineaire reservoir model voor de oppervlakteafstroming werd opgedeeld in twee delen: een deel van 60 ha dat rechtstreeks afstroomt naar de meetgoot en een deel van 150 ha dat afstroomt naar de akker net voor het bufferbekken. De akker en het bufferbekken zijn gemodelleerd als een bergingsreservoir met een relatie tussen volume en waterpeil. Voor de akker is een omgekeerde piramide met driehoekig grondvlak verondersteld, voor het bufferbekken een balk. Figuur 89 toont de resultaten van het uitgebreide conceptuele model voor drie opgemeten gebeurtenissen. De runoff-coëfficiënt is voor elke gebeurtenis constant gehouden, maar verschilt wel per gebeurtenis (nl. 0.45 voor de eerste en 0.2 voor de twee laatste). De andere parameters (debietcoëfficiënten, oppervlaktes, lengtes, ...) zijn voor de drie gebeurtenissen gelijk.



*Figuur 89. Resultaat uitgebreid conceptueel model, met opwaartse buffervoorziening, voor de opgemeten gebeurtenissen van 04/08/2008, 18/08/2011 en 23/08/2011 aan de meetgoot op de Heulengracht te Velm.*

### Molenbeek

Voor de Molenbeek te Velm zijn de parameterwaarden van Tabel 33 afgeleid na toepassing van de baseflow- en interflow numerieke filter. Het baseflow- en interflow-filterresultaat werd reeds voor een deelperiode getoond in Figuur 76. Op basis van deze filterresultaten en de opdeling van de tijdreeks in afzonderlijke oppervlakteafstromingshydrogrammen (zie methode in deel

3.4.2) werden hydrologische modelverbanden afgeleid. Dit gebeurde in eerste instantie voor de winterperiode 1/10/2007 – 29/02/2008. De neerslagfractie die bijdraagt tot berging in de ondergrond ( $f_u$ ) daalt via een exponentieel verband met de bodemberging  $u$  (met  $u/u_{max}$  het relatief verzadigingsgehalte van de ondergrond) (Figuur 90):

De oppervlakterunoffcoëfficiënt ( $f_o$ ) stijgt via een exponentieel verband met het relatief verzadigingsgehalte van de ondergrond (Figuur 91):

$$f_o = \exp\left(-4.5 + 3 \frac{u}{u_{max}}\right)$$

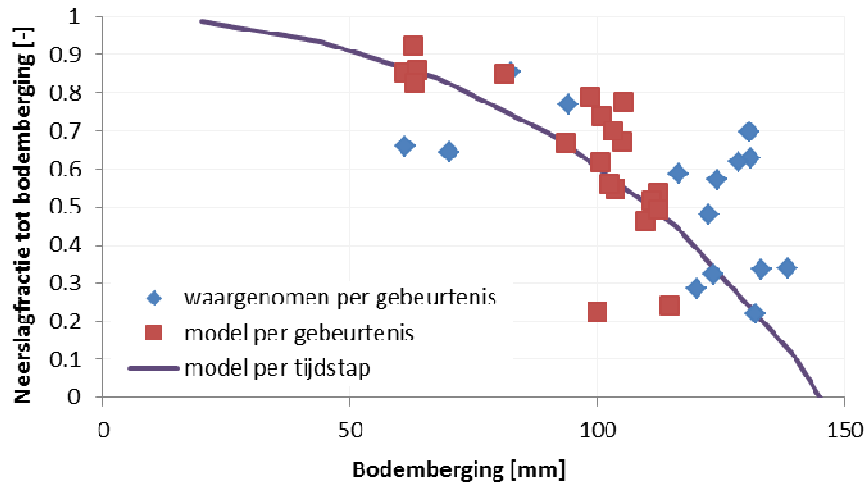
Met de voorafgaandelijke droogweerperiode of korte- of lange-termijn neerslagvolume werd geen afhankelijkheid gevonden (voorbeeld Figuur 92), waardoor naast verzadigingsoverschot geen invloed infiltratieoverschot of invloed van korstvorming werd geïdentificeerd.

Voor de interflow-runoffcoëfficiënt ( $f_i$ ) is het verband met de bodemberging minder duidelijk (Figuur 93). Ze blijkt nagenoeg constant of beperkt exponentieel stijgend met het relatief verzadigingsgehalte van de ondergrond:

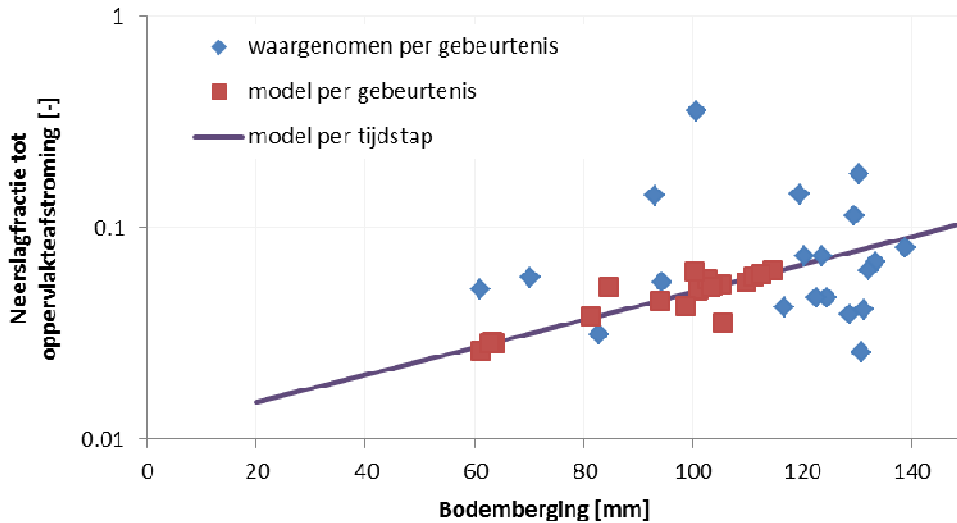
$$f_i = \exp\left(-3.2 + 2 \frac{u}{u_{max}}\right)$$

*Tabel 33. Filterparameterwaarden voor de Molenbeek te Velm*

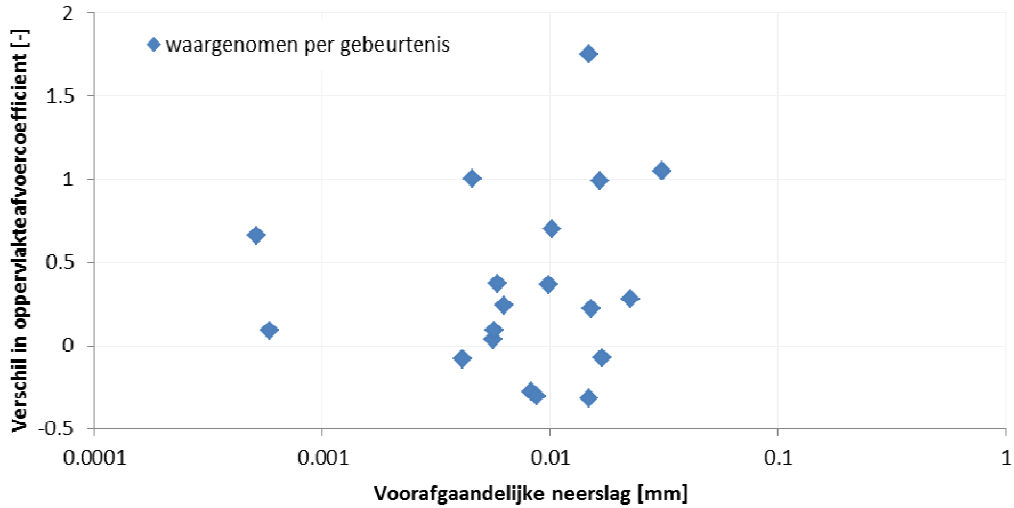
<b>Parameter</b>	<b>Waarde</b>
Constance debiettoevoer	0.07 m <sup>3</sup> /s
Recessieconstante baseflow	50 h
Recessieconstante interflow	2 h
Recessieconstante oppervlakteaftstroming	50 min
Gemiddelde fractie van totaal afstromingsvolume dat bijdraagt tot baseflow	60%
	(tot 80% tijdens droge zomerperioden; d.i. wanneer rivierdebiet = baseflow is gedaald tot 0.05 m <sup>3</sup> /s)
Gemiddelde fractie van totaal afstromingsvolume dat bijdraagt tot interflow	15%
	(daling tot 5% tijdens droge zomerperioden)
Gemiddelde fractie van totaal afstromingsvolume dat bijdraagt tot oppervlakteaftstroming	25%
	(tot 15% tijdens droge zomerperioden)



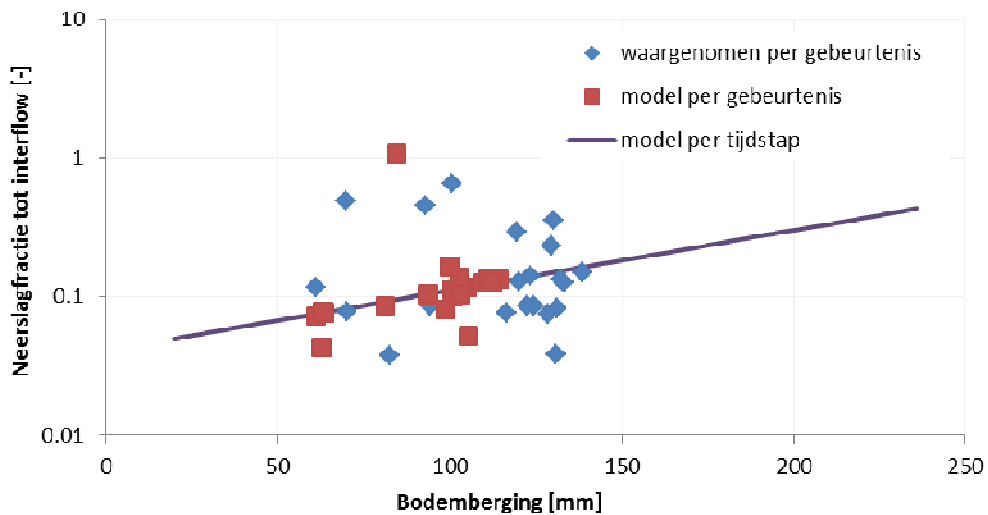
Figuur 90. Identificatie en kalibratie van het hydrologisch deelmodel voor de neerslagfractie die bijdraagt tot berging in de ondergrond i.f.v. de bodemberging.



Figuur 91. Identificatie en kalibratie van het hydrologisch deelmodel voor de neerslagfractie die bijdraagt tot oppervlakteafstroming i.f.v. de bodemberging: verzadigingsoverschotmodel.

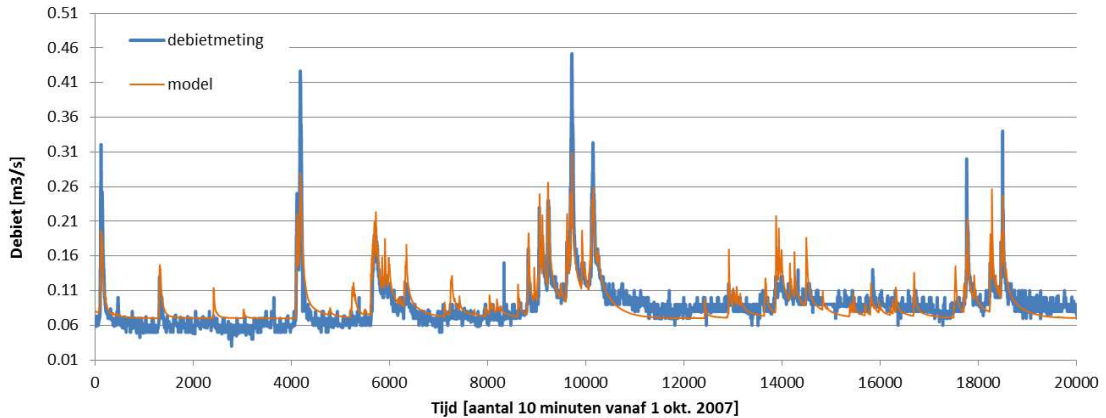


Figuur 92. Verschil tussen de neerslagfractie die bijdraagt tot oppervlakteafstroming en neerslagfractie berekend met het verzadigingsoverschotmodel, i.f.v. het 10 dagen voorafgaandelijk neerslagvolume.

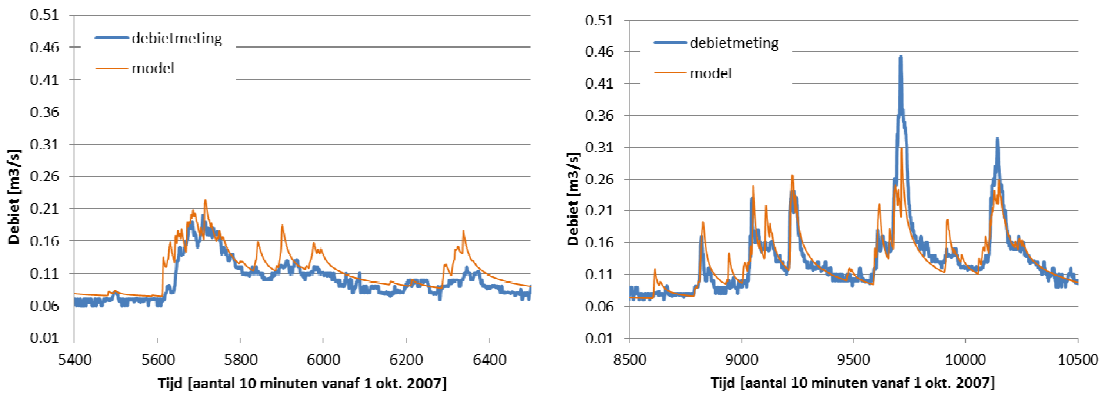


Figuur 93. Identificatie en kalibratie van het hydrologisch deelmodel voor de neerslagfractie die bijdraagt tot interflow i.f.v. de bodemberging.

Toepassing van deze geïdentificeerde en gekalibreerde hydrologische deelmodellen voor de continue simulatie van de neerslagreeks te Niel levert de modelresultaten op van Figuur 94. Figuur 95 toont de ingezoomde resultaten voor deelperioden. Piekaftoeren worden voor bepaalde deelperioden soms beperkt over- of onderschat, maar de vorm van de tijdsvariatie in het debiet wordt goed beschreven. De over- of onderschattingen kunnen te maken hebben met de neerslagonzekerheid (de stroomgebiedsneerslag wordt gelijk verondersteld aan de puntneerslag te Niel) of andere factoren die de tijdsvariatie in de runoff-coëfficiënten verklaren naast het verzadigingsoverschot.



Figuur 94. Hydrologisch modelresultaat voor het debiet op de Molenbeek te Velm: voorbeeld voor winterperiode okt. 2007 – febr. 2008.



Figuur 95. Hydrologisch modelresultaat voor het debiet op de Molenbeek te Velm: deelperioden in nov. 2007 en dec. 2007.

### 9.3.6 Benodigde bergingscapaciteit

De terugkeerperiode (in aantal jaren) van overloop van een opvangsysteem met een bepaalde bergingscapaciteit werd volgens de continue simulatieaanpak voor een concentratietijd van 30 minuten reeds gerapporteerd in Deel 9.1; zie Tabel 24, Tabel 25 en Tabel 26; zie ook Bijlage B en Bijlage C.

Net zoals bij de twee vorige gevalstudies (zie Deel 9.1 en Deel 9.2) is hierna een vergelijking gemaakt van het neerslagafstromingsvolume en de bijhorende benodigde bergingscapaciteit volgens de continue simulatieaanpak, de rationale methode, de SCS-methode en de aangepaste SCS-methode. Voor de SCS-methode werd opnieuw uitgegaan van een Curve Number van 88 voor akkers.

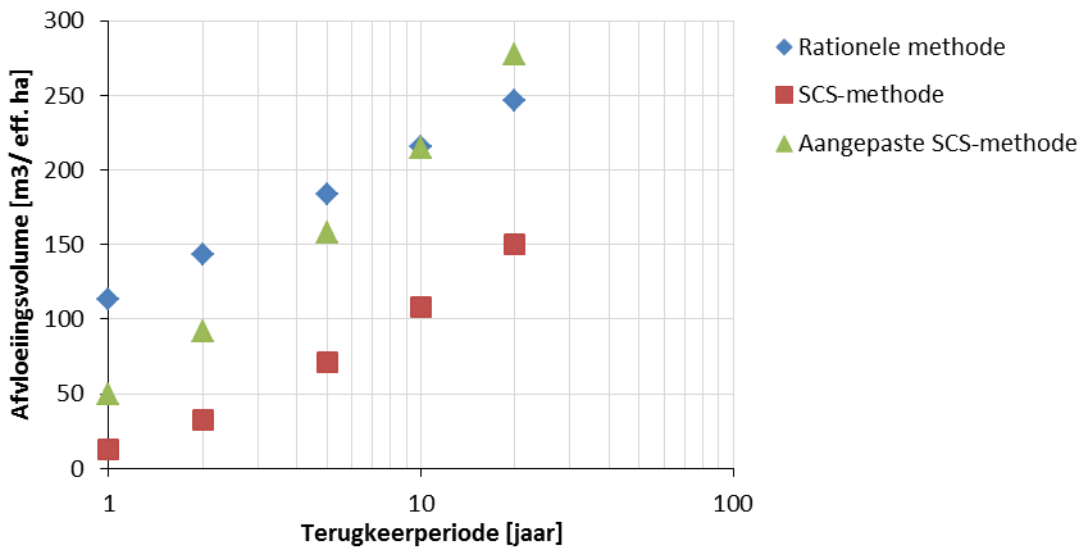
Gelijkaardig aan de voorgaande gevalstudies kunnen de tabellen van bijlage B gebruikt worden om het benodigde buffervolume voor de Heulengracht te bepalen. De analyse van de meetgegevens (in delen 9.3.3 tot 9.3.5) toonde echter aan dat de runoff-coëfficiënt tijdsvariabel is. Het benodigd bergingsvolume bij een bepaalde terugkeerperiode kan dan evenwel niet meer eenvoudig afgeleid worden uit het benodigd bergingsvolume per effectieve ha oppervlakte, zoals bij een constante runoff-coëfficiënt. Daarom is een constante waarde van 0.40 verondersteld. Dit is, met uitzondering van één event, de bovengrens van de runoff-coëfficiënt voor alle gebeurtenissen. Op basis van de gegevens van de knijpleidingen in de eerste aarden dam (Evrard, 2008) wordt een doorvoerdebiet tussen 2 à 5 l/(s.ha) bekomen.

Figuur 96 geeft de gesimuleerde neerslagafstromingsvolumes weer i.f.v. de terugkeerperiode, terwijl Figuur 97, Figuur 98 en Figuur 99 de overeenkomstige benodigde bergingsvolumes tonen

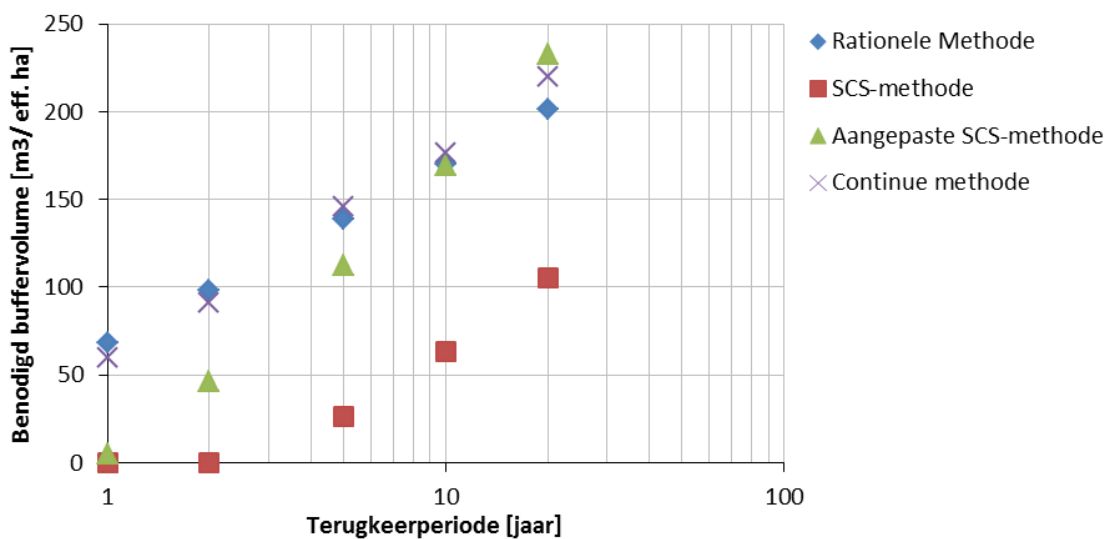
per effectieve ha, voor verschillende doorvoerdebieten (10, 5 en 2 l/(s.ha)). Voor de continue methode zijn opnieuw geen afstromingsvolumes getoond, daar deze overeenkomen met de afstromingsvolumes bij de rationale methode.

In vergelijking met de continue simulatiemethode, geven de SCS-methode en de rationale methode opnieuw sterke onderschattingen van de benodigde bergingsvolumes. Ook de aangepaste SCS-methode onderschat de bergingsvolumes. Het verschil in benodigd buffervolume tussen continue en rationale methode blijkt afhankelijk te zijn van het doorvoerdebiet: Bij een doorvoerdebiet van 10 l/(s.ha) komen de waarden nagenoeg overeen. Voor lagere doorvoerdebieten neemt het verschil tussen continue en rationale methode toe. Wanneer bij de continue simulatiemethode niet met constante debieten gerekend wordt, zal dit verschil nog verder toenemen.

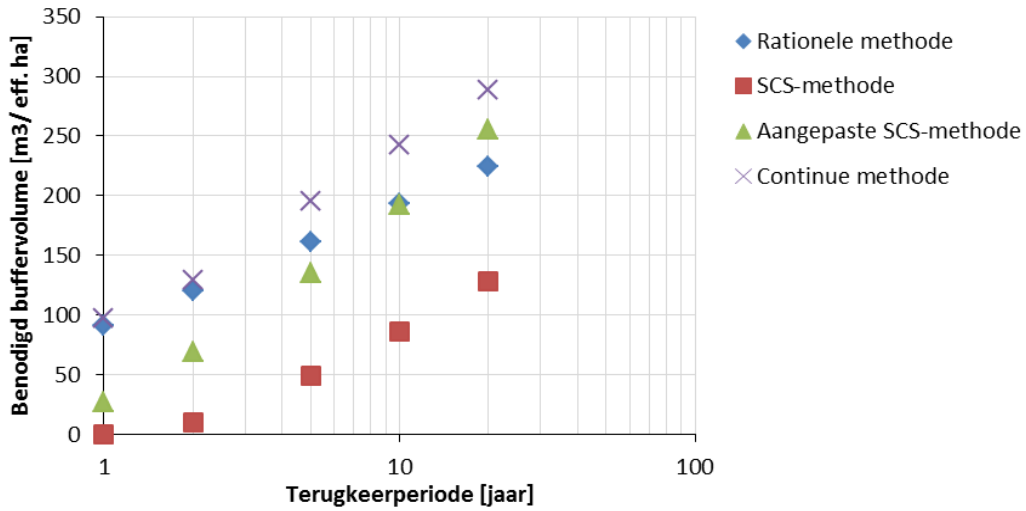
Tabel 34 lijst de benodigde bergingsvolumes op volgens de continue simulatiemethode, voor een terugkeerperiode van 20 jaar. Deze terugkeerperiode is gangbaar voor gebieden waar woningen bedreigd worden door de water- en modderstromen (zie Deel 3.3.5).



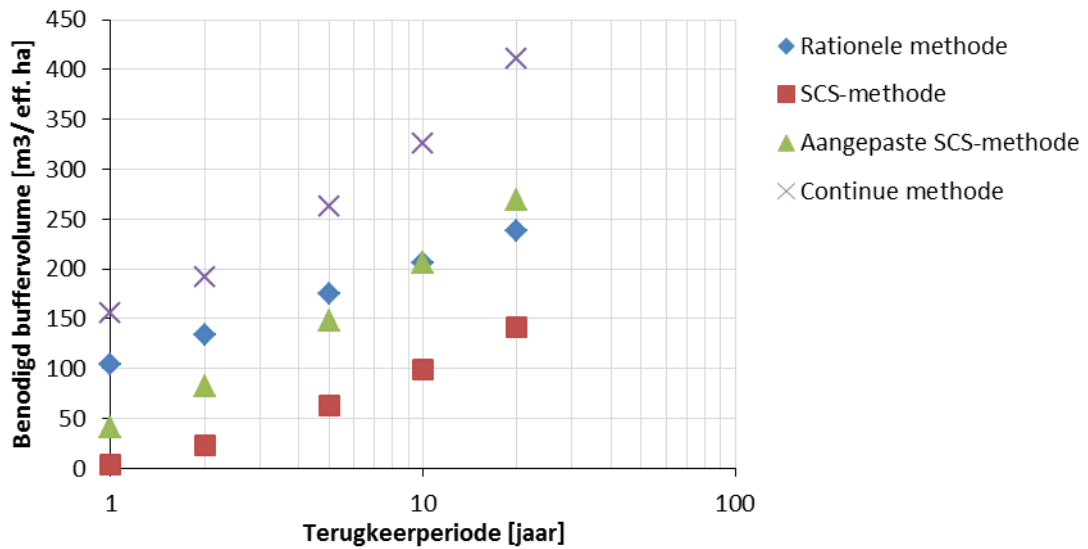
Figuur 96. Afstromingsvolume versus terugkeerperiode voor verschillende methodes, voor de Heulen gracht te Velm.



Figuur 97. Benodigd bergingsvolume, in m<sup>3</sup> per effectieve ha, versus terugkeerperiode voor verschillende methodes, voor de Heulen gracht te Velm bij een constant doorvoerdebiet van 10 l/(s.ha).



Figuur 98. Benodigd bergingsvolume, in  $m^3$  per effectieve ha, versus terugkeerperiode voor verschillende methodes, voor de Heulen gracht te Velm bij een constant doorvoerdebiet van 5 l/(s.ha).



Figuur 99. Benodigd bergingsvolume, in  $m^3$  per effectieve ha, versus terugkeerperiode voor verschillende methodes, voor de Heulen gracht te Velm bij een constant doorvoerdebiet van 2 l/(s.ha).

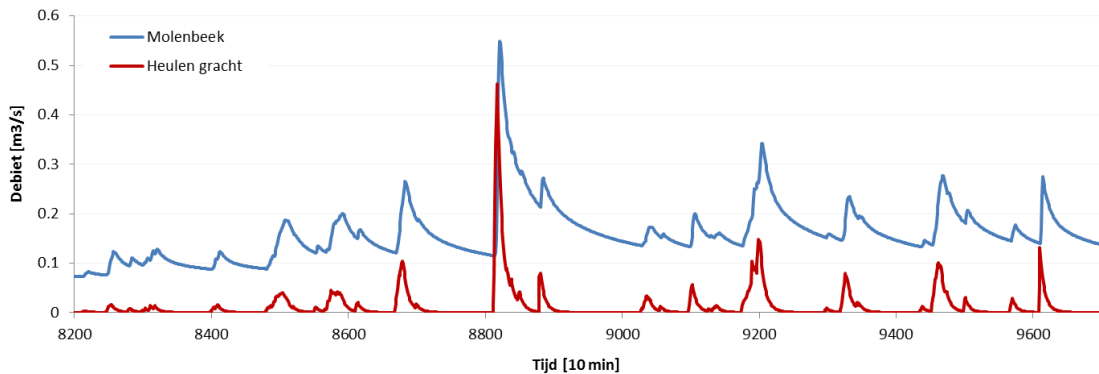
Tabel 34. Benodigd bergingsvolume in ( $m^3$  per effectieve ha) volgens de rationele methode en de continue simulatiemethode (met constant en variabel doorvoerdebiet), voor de Heulen gracht te Velm, voor een terugkeerperiode van 20 jaar.

Doorvoerdebiet (l/s.ha)	2	5	10
Rationele methode	237.7	224.2	201.7
Continue methode, constant	410.8	288.0	220.0
Continue methode, lineair	500.0	351.2	300.0
Continue methode, vierkantswortel	450.0	327.0	260.0



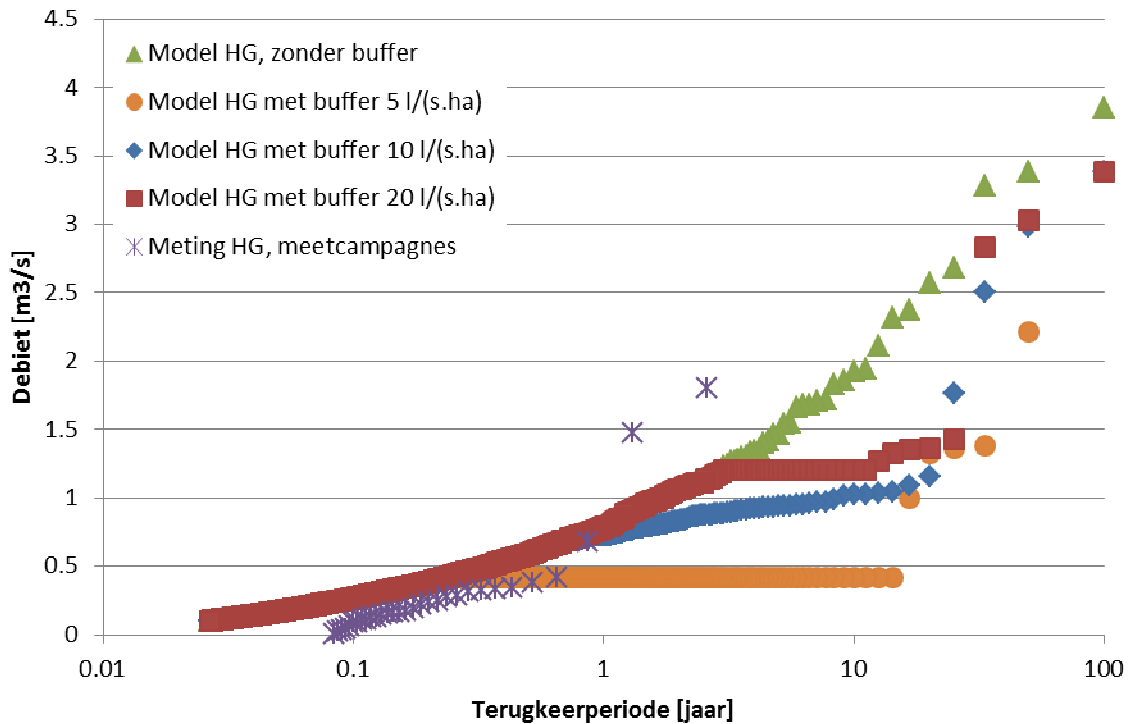
### 9.3.7 Invloed op afwaartse waterloop

De invloed van de afstromingsdebieten en de buffering langs de Heulen gracht op de afwaartse rivierdebieten langs te Molenbeek werden bestudeerd ter hoogte van het dorpscentrum van Velm. De 100-jarige tijdreeks van Ukkel (1901-2000) werd daarvoor doorgerekend in zowel het vereenvoudigd model van de Heulen gracht als van de Molenbeek (zie hiervoor afgeleid). Figuur 100 toont ter illustratie voor een beperkte periode de 10-minuten simulatieresultaten voor de Molenbeek en de Heulen gracht. De piekafvoer van de Heulen gracht komt typisch slechts een kleine tijd vroeger dan de piekafvoer van de Molenbeek afwaarts. Dit is in overeenstemming met de waarneming in de debietmetingen van Figuur 86. Door dit kleine tijdsverschil draagt de Heulen gracht in belangrijke mate bij tot de piekafvoer op de Molenbeek. Ook daarom wordt verwacht dat het opvangsysteem langs de Heulen gracht effectief zal zijn.



*Figuur 100. Simulatieresultaten van het continu simulatiemodel voor de Heulen gracht en de Molenbeek opwaarts van Velm, voor de eerste tijdstappen van 10-minuten in de 100-jarige Ukkelreeks sinds 1901.*

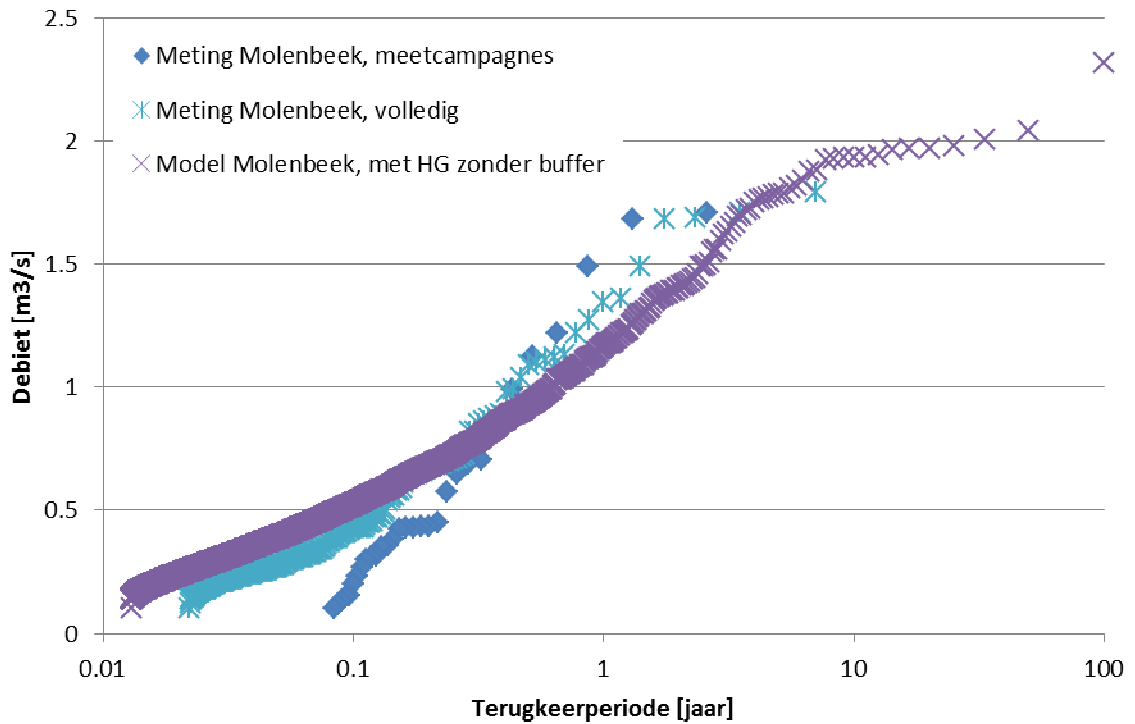
Figuur 101 toont de piekafvoerdebieten van de Heulen gracht versus de terugkeerperiode voor en na implementatie van een opvangsysteem met het benodigd bergingsvolume volgens Tabel 34 (terugkeerperiode van 20 jaar) en drie doorvoerdebieten: 5, 10 en 20 l/(s.ha). Het effect van de keuze van het doorvoerdebiet wordt in de figuur meteen duidelijk: een kleiner doorvoerdebiet zorgt voor lagere afwaartse debieten bij terugkeerperioden tussen 0.3 en 20 jaar (voor 5 l/(s.ha)), tussen 1 en 20 jaar (voor 10 l/(s.ha)) of tussen 3 en 20 jaar (voor 20 l/(s.ha)). Voor terugkeerperioden groter dan 20 jaar treden overlaatdebieten op die tot terugkeerperioden van 100 jaar kleiner blijven dan de oorspronkelijke afstromingsdebieten. Voor terugkeerperioden van 100 jaar of groter heeft het opvangsysteem logischerwijs nagenoeg geen effect meer; slechts een kleine fractie van de neerslagafstromingsdebieten wordt nog gebufferd.



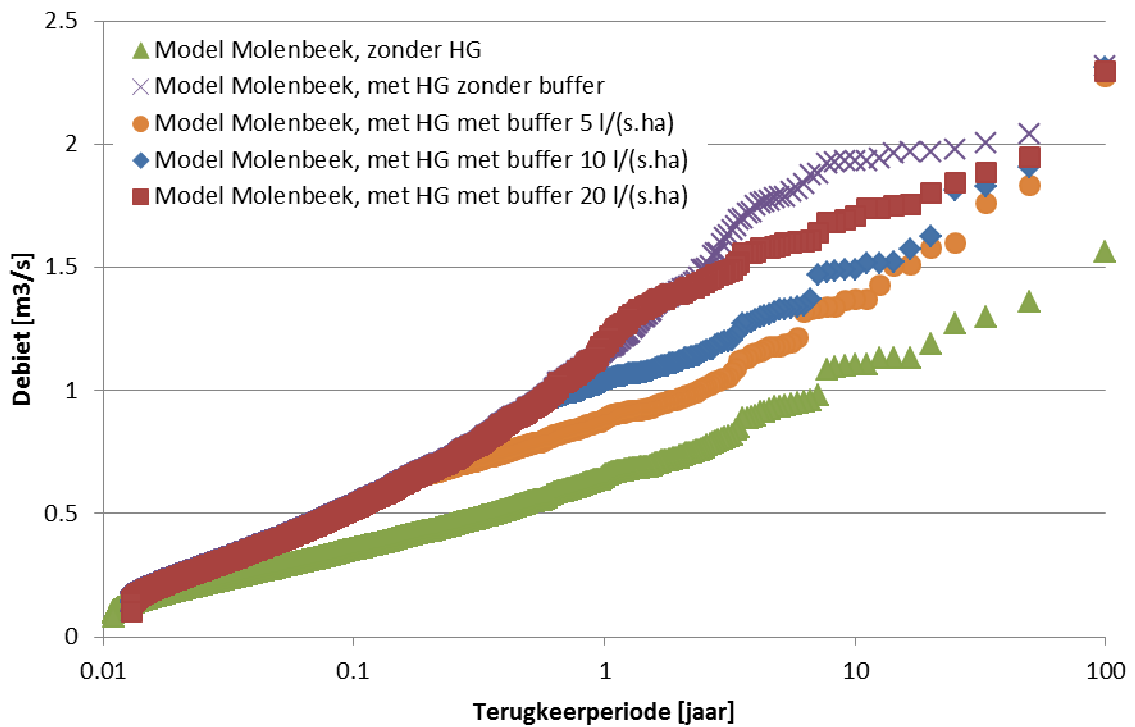
Figuur 101. Piekfvoer in de Heulen gracht afwaarts versus terugkeerperiode, o.b.v. simulatie van de 100 jarige Ukkelreeks, zonder en met opvangsysteem voor een maximaal doorvoerdebiet van 5, 10 en 20 l/(s.ha).

De bijhorende piekfvoeren op de Molenbeek zijn zonder implementatie van het opvangsysteem weergegeven in Figuur 102. Om de nauwkeurigheid van de vereenvoudigde modellen in het beschrijven van de piekfvoeren langs de Molenbeek te Velm te evalueren, is tevens een vergelijking gemaakt met de piekfvoeren in de volledig beschikbare debietmeetreeks voor de Molenbeek te Velm voor de periode 27/10/2005 – 31/10/2012. De overeenkomst hoeft niet perfect te zijn. Het klimaat in de periode 2005-2012 kan immers afwijken van deze in de volledige periode van 100 jaar te Ukkel. In grootteorde worden de piekfvoeren goed beschreven.

Figuur 103 beschrijft het effect van het opvangsysteem voor de drie doorvoerdebieten van 5, 10 en 20 l/(s.ha).



Figuur 102. Piekafvoer in de Molenbeek te Velm versus terugkeerperiode, o.b.v. simulatie van de 100 jarige Ukkelreeks, zonder opvangsysteem langs de Heulen gracht, en vergelijking met de piekafvoeren in de volledige debietmeetreeks okt. 2005 – okt. 2012.



Figuur 103. Piekafvoer in de Molenbeek te Velm versus terugkeerperiode, o.b.v. simulatie van de 100 jarige Ukkelreeks, zonder en met opvangsysteem voor een maximaal doorvoerdebiet van 5, 10 en 20 l/(s.ha).

Om de hydraulische effectiviteit van het opvangsysteem te beoordelen, kan zowel naar Figuur 101 (piekafvoeren Heulen gracht) als Figuur 103 (piekafvoeren Molenbeek) worden gekeken. Wanneer de piekafvoer afwaarts in de Heulen gracht een bepaalde drempelwaarde overschrijdt, kan wateroverlast met modderstromen zich voordoen. Historische analyse geeft aan dat dit zich voordoet bij piekdebieten groter dan ongeveer  $2 \text{ m}^3/\text{s}$ .

Het opvangsysteem vermindert ook de piekbelasting op de Molenbeek. Indien overstromingen zich langs de Molenbeek (vb. dorpscentrum Velm) voordoen met een terugkeerperiode kleiner dan 20 jaar, en indien het maximaal doorvoerdebiet van het opvangsysteem tot een terugkeerperiode van 20 jaar geen aanzienlijke debietbijdrage levert aan de Molenbeek, zal het opvangsysteem een gunstig effect hebben: de terugkeerperiode van overstroming zal verhogen tot ongeveer 20 jaar. Indien overstromingen zich langs de Molenbeek voordoen met een terugkeerperiode groter dan 20 jaar, dan heeft het opvangsysteem geen of slechts een marginaal effect op de vermindering van het overstromingsrisico van de Molenbeek. Het opvangsysteem vermindert de piekafvoer in de Molenbeek immers slechts in zeer beperkte mate (zie Figuur 103).

### 9.3.8 Sedimentopvang

Om de effectiviteit van de sedimentopvang te begroten werd het conceptueel simulatiemodel van het bufferbekken uitgebreid met een sedimentopvangberekening. Dit vereist in eerste instantie een schatting van de sedimenttoevoer. In deel 3.8.2 (stap 1 - berekening bodemverlies) werden daarvoor berekeningsmethoden beschreven, maar de concrete toepassing ervan valt buiten het bestek van deze studie. De sedimenttoevoer werd daarom gekwantificeerd op basis van de sedimentconcentratie metingen aan de meetgoot. Hierbij dient opgemerkt te worden dat de sedimentconcentratie ter plaatse van de meetgoot moeilijk gekoppeld kan worden aan het totale bodemverlies. Het bufferbekken opwaarts van de meetgoot zorgt immers voor een eerste sedimentopvang. Figuur 104 geeft aan dat er een stijgend verband wordt gevonden tussen het afstromingsdebiet en de sedimentvracht ter plaatse van de meetgoot. Zowel een exponentieel verband als een machtsverband blijken goed te fitten voor debieten tot  $0.8 \text{ m}^3/\text{s}$ . Het machtsverband heeft hierbij de volgende vergelijking:

$$\text{sedimentvracht} \text{ [kg / s]} = a (q - q_{crit})^b$$

met  $a=22$ ,  $b=3.4$  en  $q_{crit} = 0 \text{ m}^3/\text{s}$  het debiet boven dewelke er bodemverlies optreedt.

De convexe vorm van het verband geeft aan dat de sedimentconcentratie stijgt met toenemend debiet, wat logisch is.

Voor hogere debieten treedt afvlakking (verzadiging) op van de sedimentvracht. Deze afvlakking werd benaderd door volgend S-verband:

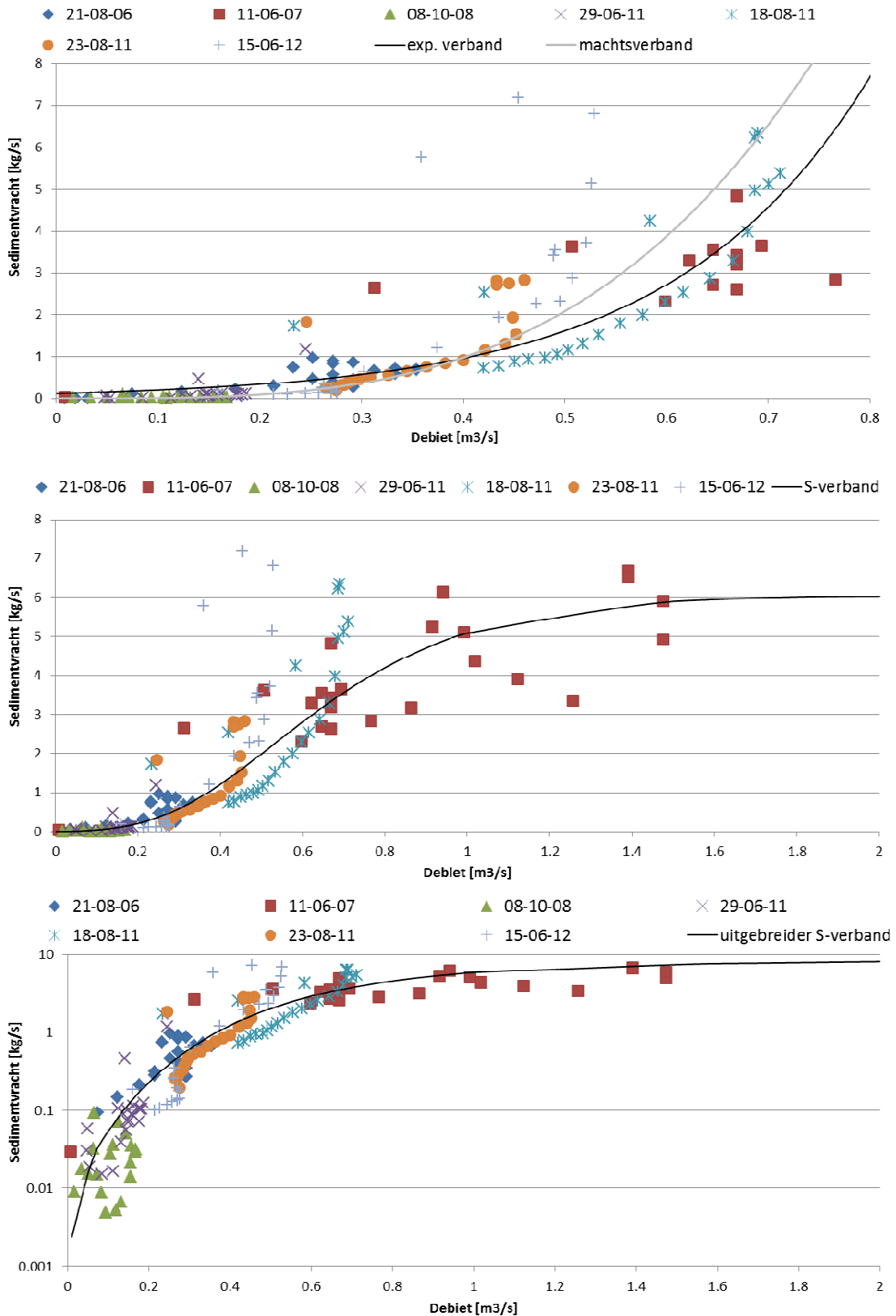
$$\text{sedimentvracht} \text{ [kg / s]} = a \left( \exp\left(b \left(1 - \exp\left(-\frac{q - q_{crit}}{c}\right)\right)\right) - 1 \right)$$

met  $a=0.005$ ,  $b=7.1$ ,  $c=0.27$  en  $q_{crit} = 0 \text{ m}^3/\text{s}$ ;

of volgend uitgebreider S-verband:

$$\text{sedimentvracht} \text{ [kg / s]} = a \left( \exp\left((b + d (q - q_{crit})) \left(1 - \exp\left(-\frac{q - q_{crit}}{c}\right)\right)\right) - 1 \right)$$

met  $a=0.06$ ,  $b=4.6$ ,  $c=0.22$ ,  $d=0.1$  en  $q_{crit} = 0 \text{ m}^3/\text{s}$ .



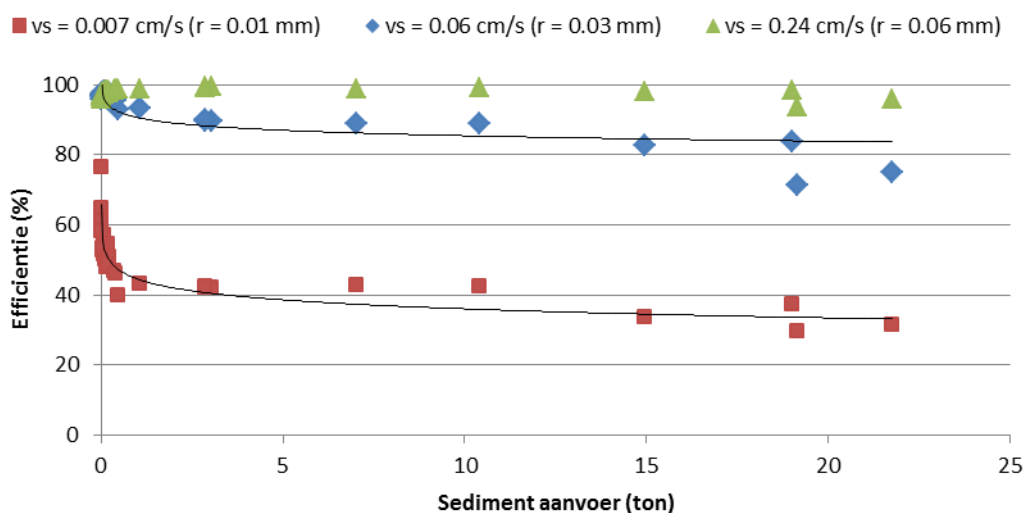
Figuur 104. Sedimentvracht versus afstromingsdebiet voor alle opgemeten gebeurtenissen aan de meetgoot op de Heulen gracht te Velm.

Naast de afhankelijkheid met het debiet kan ook de afhankelijkheid met het seizoen (en dus de bodembedekking) onderzocht worden. De meeste gebeurtenissen waarvoor sedimentmetingen beschikbaar zijn langs de Heulen gracht situeren zich echter in de zomer (vooral juni en augustus). Voor de winterperiodes zijn er geen sedimentmetingen beschikbaar, wat geen seizoensanalyse toelaat.

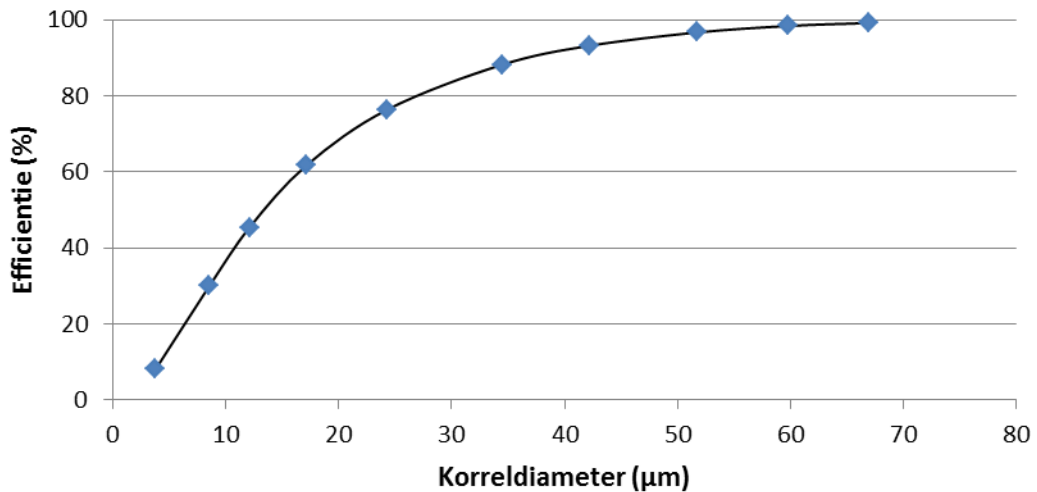
Het S-verband tussen de sedimentvracht en het afstromingsdebiet is gebruikt om de sedimenttoevoer i.f.v. het afstromingsdebiet tijdsvariabel te simuleren in het continue simulatiemodel van de Heulen gracht. Het reeds bestaande conceptuele model werd daarom uitgebreid met een extra bergingsreservoir ter plaatse van de eerste aarden dam, aangezien het S-verband enkel geldig is ter plaatse van de meetgoot. De sedimentopvang werd conceptueel gemodelleerd door in het continue simulatiemodel van het bufferbekken de sedimenten op basis van een bepaalde deeltjesgrootte een bepaalde valsnelheid te geven. De verdeling van de verblijftijd bepaalt dan welk percentage van de toegevoerde sedimenten in het bufferbekken bezinken.

Er werd een gevoeligheidsanalyse uitgevoerd om na te gaan hoe de “vangefficiëntie” van de sedimenten functie is van de veronderstelde deeltjesgrootte. Dit gebeurde voor alle bemeeten gebeurtenissen aan de meetgoot.

Figuur 105 toont aan dat de vangefficiëntie daalt voor enerzijds een toename van de totale hoeveelheid aangevoerd sediment en anderzijds voor kleinere deeltjes. De vangefficiëntie werd hierbij gedefinieerd als de gewichtsverhouding van de totale hoeveelheid bezonken sediment en de totale hoeveelheid aangevoerd sediment. Daarnaast toont Figuur 106 de vangefficiëntie in functie van verschillende valsnelheden voor één specifieke gebeurtenis. Hiervoor wordt een logaritmisches stijgend verband gevonden.

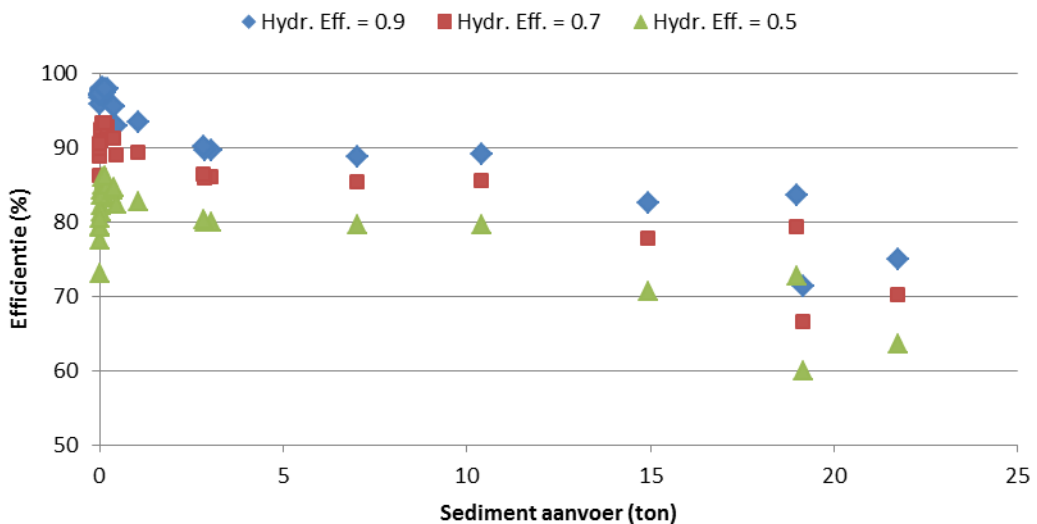


Figuur 105. Efficiëntie sedimentopvang in functie van de aangevoerde sedimentvracht en van de deeltjesgrootte, voor verschillende gesimuleerde gebeurtenissen op de Heulen gracht te Velm.

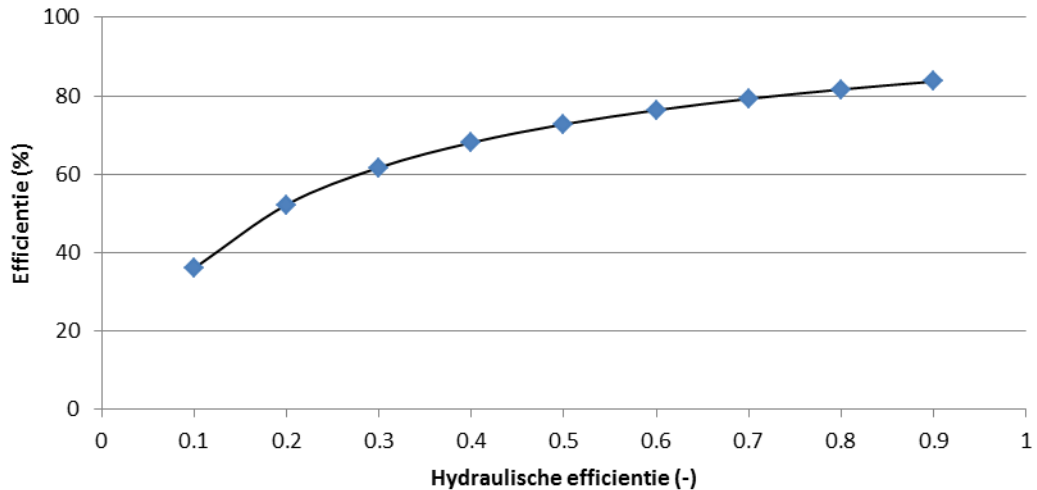


Figuur 106. Efficiëntie sedimentopvang in functie van de korreldiameter, voor de gebeurtenis van 11 juni 2007 op de Heulen gracht te Velm.

Naast de deeltjesgrootte werd ook nog een tweede parameter ingevoerd in het conceptuele sedimentatie model: de zogenaamde hydraulische efficiëntie (cfr. Figuur 49). Deze factor brengt in rekening dat er niet over de volledige oppervlakte van het bufferbekken sedimentatie zal optreden, als gevolg van turbiditeit aan de in- en uitgangen (zie deel 3.8.2). Ook voor deze factor werd een gevoeligheidsanalyse uitgevoerd, die getoond is in Figuur 107 en Figuur 108. In beide figuren is de valsnelheid constant en gelijk aan 0.06 cm/s verondersteld. Op basis van de figuren kunnen gelijkaardige conclusies getrokken worden: de vangefficiëntie daalt voor een toename van de aangevoerde hoeveelheid sediment en voor een lagere hydraulische efficiëntie. De vangefficiëntie stijgt in functie van de hydraulische efficiëntie, al zal de 100 % niet bereikt worden.



Figuur 107. Efficiëntie sedimentopvang in functie van de hydraulische efficiëntie en van de aangevoerde sedimentvracht, voor verschillende gesimuleerde gebeurtenissen op de Heulen gracht te Velm.



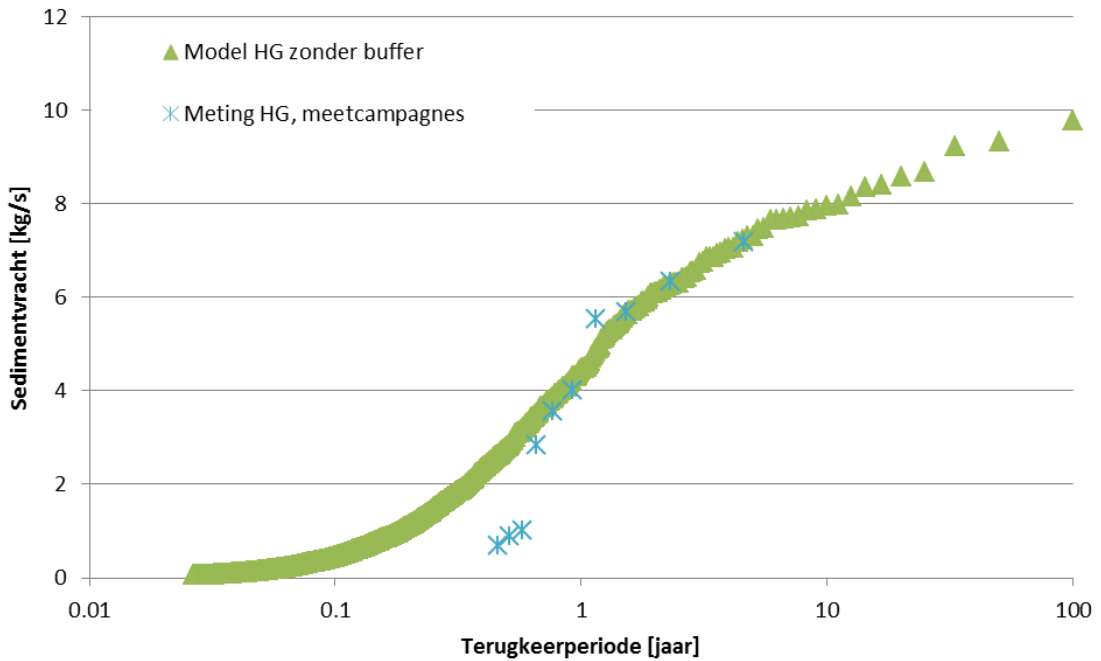
*Figuur 108. Efficiëntie sedimentopvang in functie van de hydraulische efficiëntie van het bufferbekken, voor de gebeurtenis van 11 juni 2007 op de Heulen gracht te Velm.*

Daarna zijn de resultaten bij de sedimentopvang statistisch verder geanalyseerd door de 100-jaar Ukkel neerslag te simuleren in het conceptueel simulatiemodel met inbegrip van het sedimentatiemodel. Figuur 109 en Figuur 110 tonen hoe de 10-minuten maximale sedimentvrucht per gebeurtenis toeneemt met toenemende terugkeerperiode (voor een valsnelheid van 0.007 cm/s en 1.5 m maximale hoogte in het opvangsysteem). In Figuur 109 wordt deze empirische extreme-waarden-verdeling van de sedimentvruchten gevalideerd door vergelijking met de 10-minuten uitgemiddelde meetwaarden voor alle gebeurtenissen. In de veronderstelling dat alle significante gebeurtenissen opgemeten werden in zowel periode 1 als periode 2, levert de verdeling van de sedimentvruchtmaxima voor alle gebeurtenissen een verdeling die hoort bij een totale periode van 4.6 jaar (totale lengte van perioden 1 en 2). De hoogste meetwaarde heeft dus een empirische terugkeerperiode van 4.6 jaar. Zoals ook opgemerkt bij de validatie van de piekafvoeren hoeft de verdeling o.b.v. de meetwaarden niet perfect aan te sluiten aan de verdeling o.b.v. de 100-jaar Ukkelneerslag omdat er systematische verschillen kunnen bestaan tussen beide perioden.

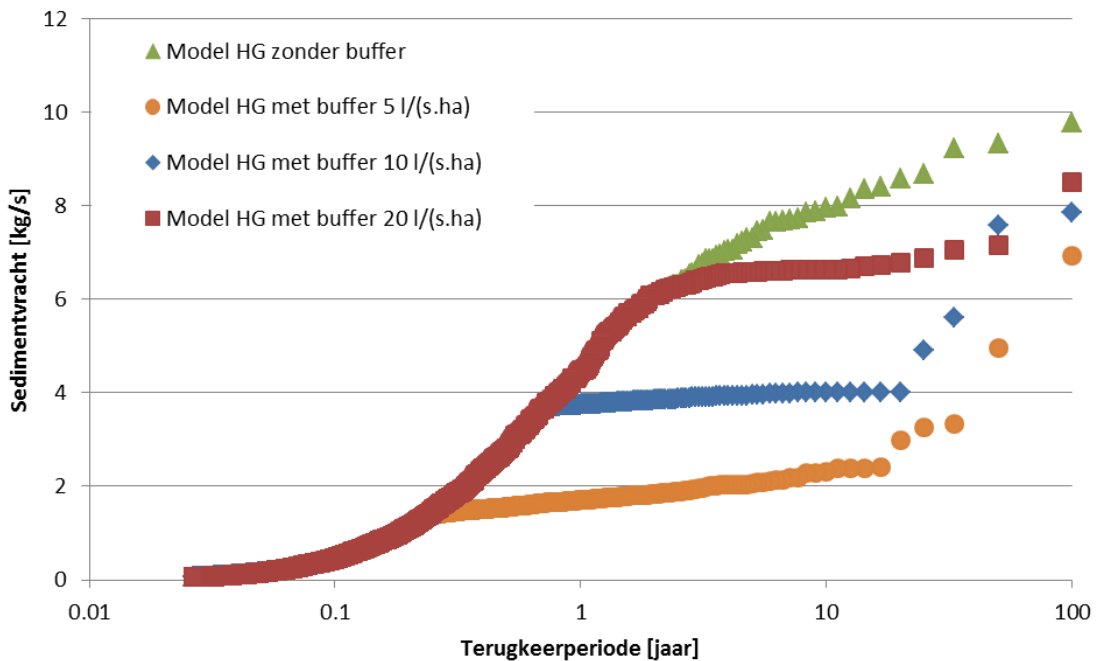
De totale jaarlijkse sedimentvrucht die door het model gesimuleerd wordt is 1.15 ton/(ha.jaar), wat minder is dan de schattingen gemaakt door Vandaele et al. (2004) en Govers (1991), die een jaarlijkse sedimentvrucht van respectievelijk 7.6 en 3.6 ton/(ha.jaar) uitkwamen. Deze studies zijn echter gebaseerd op opmetingen op het terrein, terwijl het simulatiemodel gebruik maakt van de debieten ter plaatse van de meetgoot. Door het grote afstromingsoppervlak en de reeds aanwezige erosie maatregelen zal een groot deel van de sedimentvrucht reeds opwaarts geborgen zijn. Een nauwkeurige vergelijking van de jaarlijkse sedimentvrucht is dus zeer moeilijk.

Figuur 110 toont hoe de verdeling van de sedimentvruchten wijzigt na implementatie van een opvangsysteem, met een benodigd bergingsvolume zoals hiervoor bepaald bij een terugkeerperiode van overloop van 20 jaar, en dit voor een maximaal doorvoerdebiet van 5, 10 en 20 l/(s.ha).





Figuur 109. Sedimentvracht van de Heulen gracht te Velm versus terugkeerperiode, o.b.v. simulatie van de 100 jarige Ukkelreeks, en vergelijking met de sedimentvrachten opgemeten aan de meetgoot voor alle gebeurtenissen.



Figuur 110. Sedimentvracht van de Heulen gracht te Velm versus terugkeerperiode, o.b.v. simulatie van de 100 jarige Ukkelreeks, zonder en met opvangsysteem voor een maximaal doorvoerdebiet van 5, 10 en 20 l/(s.ha).

## 9.4 Maarkedal

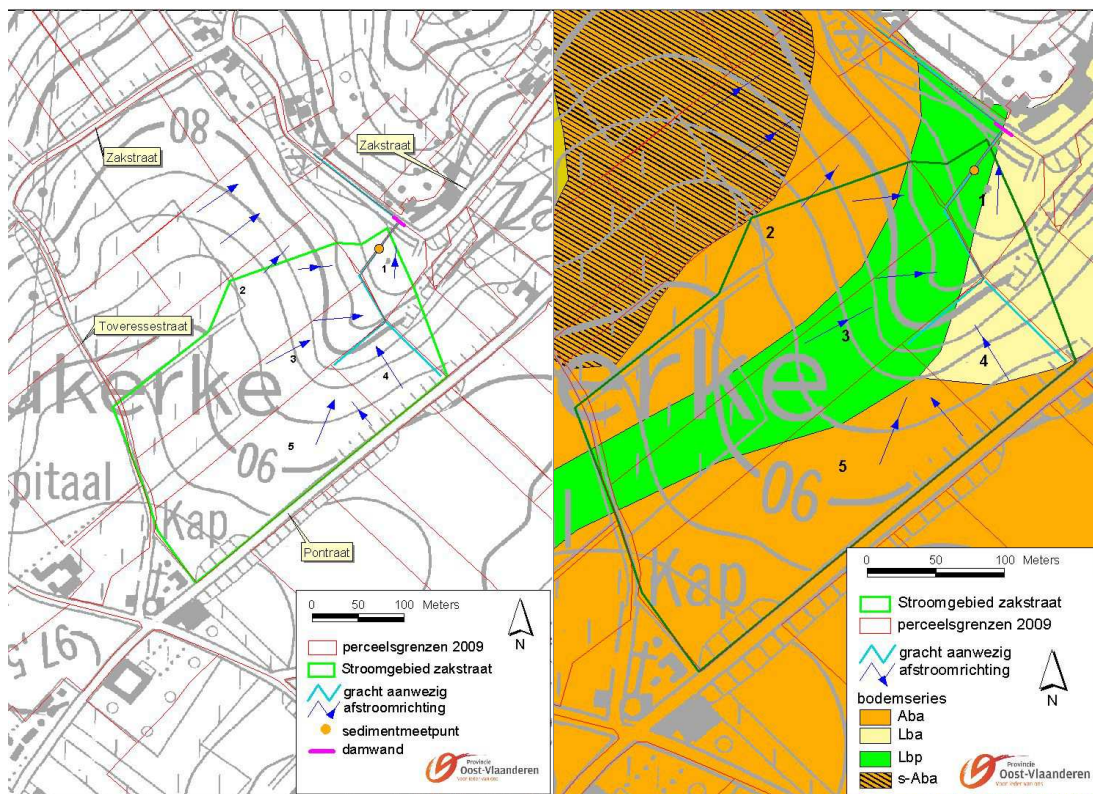
Ook aan de Zakstraat in Maarkedal werden debiet- en sedimentmeetcampagnes uitgevoerd. Ze lieten een gelijkaardige gedetailleerde analyse toe als voor de Heulen gracht.

### 9.4.1 Beschrijving meetcampagnes

De meetgoot aan de Zakstraat te Nukerke-Maarkedal (Figuur 111, Figuur 112) was operationeel in de periode van september 2006 t.e.m. februari 2010. De installatie en opvolging van het meetstation kaderde in een samenwerkingsovereenkomst tussen het Vlaams Gewest en het Provinciebestuur van Oost-Vlaanderen.

Het afstromingsgebied opwaarts van de meetgoot heeft een oppervlakte van ca. 6 ha en omvat een zestal percelen met een lemige tot zandlemige textuur (Figuur 111). Het projectgebied is nagenoeg volledig in gebruik als akkerland, met teeltrotaties van vooral wintergerst, silomais, wintertarwe en gras. De percelen worden gekenmerkt door een hoge tot zeer hoge erosiegevoeligheid. De afwatering gebeurt omwille van de convergerende topografie in de richting van één perceelsgracht, die uitmondt in een langsgracht van de Zakstraat. Aan de overzijde van de Zakstraat treedt er ter hoogte van een woning frequent water- en modderoverlast op (Provinciaal centrum voor milieuonderzoek, 2009).

De meetgoot bevindt zich op de perceelsgracht tussen een akkerperceel en een graslandperceel op een 15-tal meter van de baangracht langs de Zakstraat (Figuur 112). Waar de perceelsgracht uitmondt in de baangracht werd een houten wand voorzien om modder- en wateroverlast ter hoogte van de woning te vermijden. De meetinstallatie bestaat uit een meetgoot, een pluviograaf, een waterpeilmeter en een staalnametoestel. De perceelsgracht is geen permanent watervoerende gracht. Enkel in perioden van neerslag wordt via de perceelsgracht water afgevoerd. De meting van het waterpeil gebeurde om de 15 minuten. In geval van neerslag werd het waterpeil iedere minuut geregistreerd, tot 68 minuten na het einde van de regenbui. Het debiet werd berekend uit het waterpeil via een gekalibreerd Q-H verband.



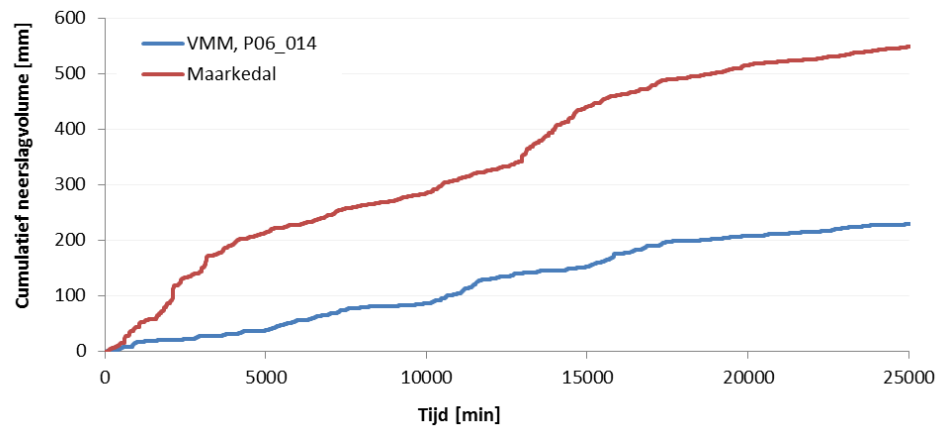
Figuur 111. Situering van het meetstation aan de Zakstraat te Nukerke-Maarkedal.



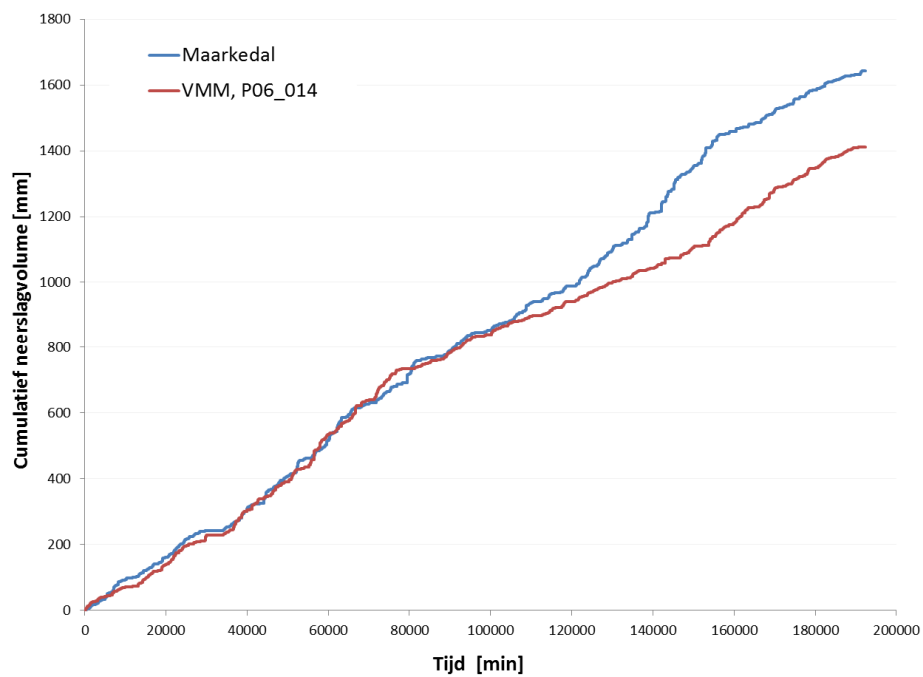
*Figuur 112. Foto's van de meetinstallatie aan de Zakstraat te Nukerke-Maarkedal.*

Omdat de volumecontrole van de neerslagregistratie (vergelijking tussen het cumulatief neerslagvolume verzameld in de fles met de neerslagregistratie in de logger van de pluviograaf) regelmatig problemen of onnauwkeurigheden meldt, werden de neerslaggegevens ook hier vergeleken met deze van een andere, dichtstbijzijnde pluviograaf. Dit is de pluviograaf P06\_014 in het meetnet van VMM-AOW, te Maarke-Kerkem. Deze pluviograaf heeft 15-minuten metingen ter beschikking sinds 16/05/2004. Ze werden voor deze studie verwerkt tot einde 2008.

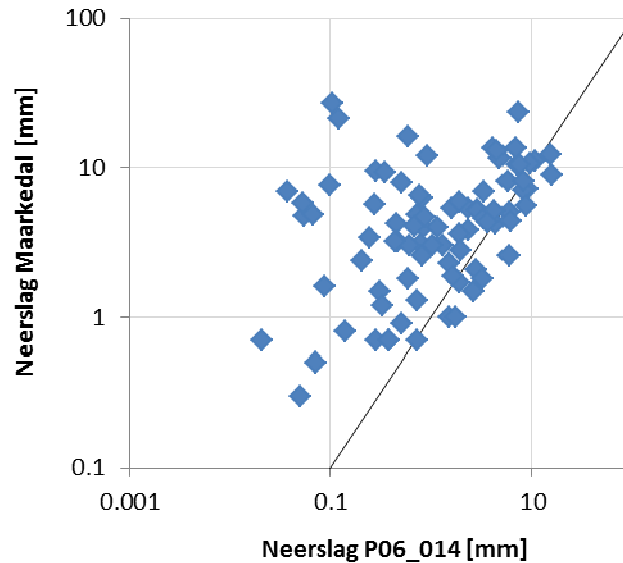
Vergelijking van de cumulatieve neerslagvolumes, maar beperkt tot de geselecteerde gebeurtenissen, geeft systematisch hogere neerslagvolumes voor de pluviograaf aan de meetgoot in vergelijking met de VMM-pluviograaf (Figuur 113). Dit deed in eerste instantie denken aan een mogelijke overschatting van de neerslagintensiteiten aan de meetgoot, of een onderschatting door de VMM-pluviograaf. Verdere analyse met een vergelijking van de cumulatieve neerslagvolumes over de volledige periode (Figuur 114) geeft aan dat er voor de meeste perioden geen systematische verschillen bestaat. Enkel tijdens de lente en de vroege zomer van 2008 blijkt de pluviograaf aan de meetgoot systematisch lagere neerslagvolumes te registreren. De nota's bij de meetcampagnes maken op 16/06/2008 ook volgende melding van een verstopping van de pluviograaf voor de voorafgaandelijke periode (vanaf 4/04/2008). Dit kan deze onderschatting verklaren. Voor de andere perioden zijn de cumulatieve neerslagvolumes geregistreerd door beide pluviografen wel vergelijkbaar. De lagere neerslagvolumes van de VMM-pluviograaf voor de perioden van de geselecteerde gebeurtenissen hebben dus waarschijnlijk te maken met de hogere neerslagwaarden boven het afstromingsgebied van de meetgoot, wat ook verklaart waarom deze perioden bemeten zijn. Dit wordt bevestigd in Figuur 115. Daarom zijn verder enkel de neerslagmetingen aan de meetgoot gebruikt.



*Figuur 113. Neerslagcumulatie over de geselecteerde gebeurtenissen: voor de pluviograaf aan de meetgoot te Maarkedal en voor de VMM-pluviograaf P06\_014.*



*Figuur 114. Neerslagcumulatie over de ganse periode 2007-2008: voor de pluviograaf aan de meetgoot te Maarkedal en voor de VMM-pluviograaf P06\_014.*



*Figuur 115. Neerslagvolume voor alle geselecteerde gebeurtenissen aan de meetgoot te Maarkedal in de periode dec. 2006 – nov. 2009: vergelijking pluviograaf aan de meetgoot versus de VMM pluviograaf P06\_014.*

Potentiële evapotranspiratiegegevens zijn opnieuw gebaseerd op de metingen van het VMM-meetnet te Liedekerke, gecorrigeerd met een lange-termijn volumecorrectiefactor (+10%) op basis van de KMI-gegevens te Ukkel.

Voor deze studie zijn de 1-minuut debiet- en neerslagmeetwaarden aan de meetgoot gebruikt voor elke gebeurtenis in de meetreeks.

Tabel 35 geeft een overzicht van de 137 geselecteerde gebeurtenissen.

*Tabel 35. Overzicht geselecteerde gebeurtenissen aan de meetgoot te Maarkedal in de periode dec. 2006 – nov. 2009.*

nr.	Begin-datum	Duur event [min]	10-min max. neerslag-volume meetgoot [mm]	Neerslag-volume meetgoot [mm]	Neerslag-volume P06_014 [mm]	Piek-debiet [l/s]	Totaal afstroom-volume [mm]
1	30-12-06	184	0.31	4.9	0.74	2	0.04
2	01-03-07	445	0.24	10.4	7.19	8	0.69
3	29-03-07	105	0.36	12.2	0.00	2	0.06
4	12-05-07	187	0.34	9.5	0.29	4	0.16
5	16-05-07	297	0.32	7.2	9.01	4	0.19
6	19-06-07	387	0.46	9.4	0.35	15	0.21
7	25-06-07	378	0.2	4	0.87	5	0.05
8	26-06-07	183	0.14	0	1.26	3	0.13
9	02-07-07	155	0.34	7.7	0.10	13	0.13
10	02-07-07	70	0.29	3.4	0.25	10	0.09
11	03-07-07	90	0.23	4.5	0.00	7	0.07
12	16-07-07	105	0.58	6.5	0.00	30	0.15
13	16-07-07	171	0.18	6.9	0.04	1.4	0.03
14	16-07-07	87	0.79	5.6	0.00	29	0.35
15	20-07-07	165	1.16	27.1	0.11	151	3.21
16	23-07-07	992	0.48	23.8	7.41	14	1.74



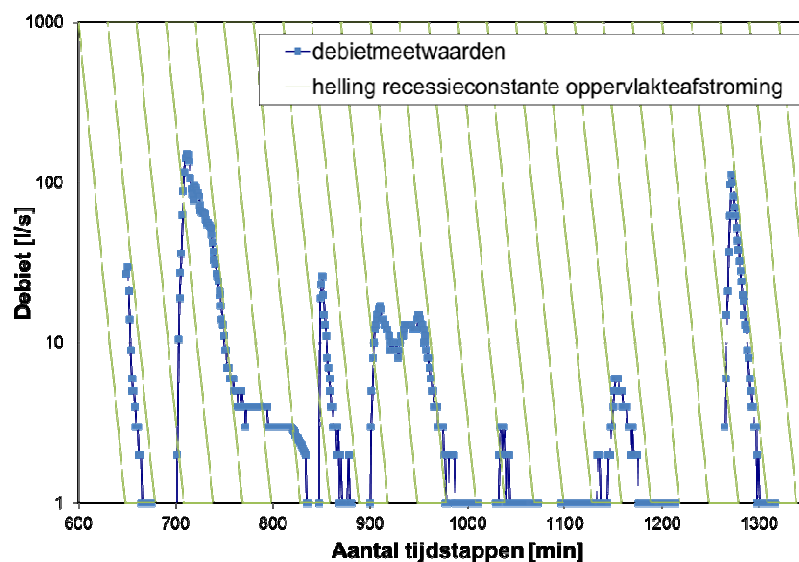
nr.	Begin- datum	Duur event [min]	10-min max. neerslag- volume meetgoot [mm]	Neerslag- volume meetgoot [mm]	Neerslag- volume P06_014 [mm]	Piek- debiet [l/s]	Totaal afstroom -volume [mm]
17	12-08-07	78	0.78	8.3	0.00	26	0.20
18	23-08-07	330	0.6	21.4	0.12	28	1.20
19	01-10-07	480	0.24	13.7	4.24	42	1.71
20	03-10-07	149	0.12	4.4	0.00	17	0.80
21	09-10-07	420	0.16	11.6	4.82	25	1.65
22	13-11-07	360	0.09	4.2	0.46	2	0.24
23	21-11-07	345	0.05	4.8	0.06	2	0.21
24	30-11-07	599	0.13	11.2	10.64	5	0.59
25	01-12-07	111	0.1	1.7	1.95	3	0.08
26	02-12-07	329	0.09	2.6	5.89	15	0.63
27	02-12-07	85	0.01	0	0.01	3	0.09
28	03-12-07	435	0.06	5.4	2.38	4	0.69
29	06-12-07	260	0.07	5.1	6.07	3	0.37
30	06-12-07	179	0.04	3	1.33	4	0.31
31	07-12-07	223	0.11	5.3	2.98	13	1.15
32	05-01-08	325	0.08	8.2	5.84	5	0.45
33	05-01-08	670	0.08	5.2	2.97	7	0.48
34	07-01-08	530	0.1	3.8	2.37	10	0.50
35	09-01-08	148	0.04	1.3	0.74	2	0.06
36	10-01-08	593	0.02	4.7	0.87	2	0.42
37	12-01-08	103	0.02	0.7	0.29	3	0.09
38	15-01-08	287	0.04	4	1.17	3	0.25
39	15-01-08	180	0.05	3.2	0.48	5	0.45
40	15-01-08	78	0.04	0.5	0.07	2	0.06
41	17-01-08	180	0.11	1.5	0.32	7	0.17
42	18-01-08	210	0.04	1.8	0.61	4	0.21
43	24-01-08	215	0.05	2.3	1.53	2	0.07
44	31-01-08	66	0.04	0.7	0.75	3	0.05
45	05-02-08	195	0.07	3.1	0.81	6	0.26
46	06-02-08	90	0.04	0.7	0.39	3	0.07
47	01-03-08	120	0.35	4.2	4.49	20	0.38
48	03-03-08	230	0.08	4.9	0.07	2	0.05
49	10-03-08	300	0.13	7.1	8.28	21	1.16
50	11-03-08	380	0.06	4.6	3.42	5	0.35
51	16-03-08	270	0.06	5.6	8.71	3	0.23
52	20-03-08	615	0.07	8.9	15.99	6	0.64
53	22-03-08	210	0.06	2.6	0.83	7	0.29
54	22-03-08	195	0.08	1.9	1.67	2	0.12
55	24-03-08	480	0.06	5.2	4.36	4	0.59
56	28-03-08	280	0.06	4.3	3.70	6	0.29
57	30-03-08	285	0.18	5.4	1.65	6	0.27
58	02-06-08	120	0.6	12.1	0.95	112	0.94
59	07-08-08	138	0.36	10.9	0.00	29	0.43
60	07-08-08	120	0.23	3	0.62	5	0.13
61	07-08-08	125	0.21	5.7	0.28	7	0.24
62	08-08-08	87	0.22	2.4	0.21	1	0.05
63	08-08-08	90	0.28	3.6	1.97	7	0.14
64	12-08-08	223	0.44	8	0.51	1	0.12
65	14-08-08	139	0.52	5.8	0.05	4	0.11
66	03-09-08	80	0.51	5.8	0.00	2	0.04
67	11-09-08	83	0.45	7.3	0.00	5	0.08
68	12-09-08	340	0.09	6.9	3.44	1	0.10

nr.	Begin- datum	Duur event [min]	10-min max. neerslag- volume meetgoot [mm]	Neerslag- volume meetgoot [mm]	Neerslag- volume P06_014 [mm]	Piek- debiet [l/s]	Totaal afstroom -volume [mm]
69	01-10-08	120	0.3	6.3	0.84	8	0.23
70	03-10-08	370	0.25	16.1	0.61	18	0.64
71	05-10-08	450	0.12	10.8	9.44	2	0.23
72	26-10-08	705	0.13	12.2	15.34	29	4.61
73	01-11-08	1050	0.06	8.2	8.25	12	2.98
74	07-11-08	71	0.05	0.8	0.00	1	0.04
75	09-11-08	570	0.09	4.4	6.21	7	0.48
76	10-11-08	315	0.18	6.6	0.79	18	0.96
77	11-11-08	686	0.2	10.4	7.65	22	3.41
78	16-11-08	510	0.02	0.9	0.52	3	0.28
79	18-11-08	180	0.04	0.7	0.38	1	0.08
80	21-11-08	270	0.05	1.2	0.34	1	0.10
81	21-11-08	390	0.08	3.2	0.45	6	0.52
82	21-11-08	1395	0.29	13.6	7.03	8	3.68
83	23-11-08	1439	0.31	12.3	4.58	18	11.41
84	30-11-08	570	0.02	1.5	2.71	1	0.25
85	30-11-08	331	0.02	1	1.55	2	0.29
86	01-12-08	390	0.03	0.8	0.14	3	0.35
87	02-12-08	900	0.04	3	1.04	6	0.89
88	02-12-08	465	0.05	2.1	2.88	5	0.65
89	04-12-08	450	0.02	1.8	3.33	5	0.57
90	04-12-08	1197	0.08	5.9	1.93	14	2.42
91	05-12-08	465	0.04	1	1.78	5	0.46
92	05-12-08	810	0.08	4.1	0.70	15	1.68
93	06-12-08	615	0.06	1.6	0.09	7	0.83
94	07-12-08	240	0.02	0.3	0.05	2	0.11
95	09-12-08	795	0.03	2.8	2.03	6	1.03
96	10-12-08	210	0.04	0.7	0.14	6	0.28
97	10-12-08	600	0.05	3.5	7.03	11	1.34
98	13-01-09	1035	0.04	5.9	8.36	7	4.05
99	17-01-09	495	0.08	1.6	2.36	9	0.70
100	18-01-09	30	0.11	6.7	3.49	21	3.78
101	19-01-09	480	0.03	3.3	5.67	5	0.60
102	19-01-09	795	0.16	3	3.53	31	1.05
103	22-01-09	240	0.03	2	1.84	3	0.18
104	23-01-09	45	0.07	22.6	23.73	18	8.29
105	05-02-09	465	0.05	2.3	2.12	7	0.71
106	06-02-09	219	0.09	5	4.53	16	0.96
107	09-02-09	198	0.07	19.8	18.08	15	5.34
108	11-02-09	1320	0.06	3.6	2.84	12	1.49
109	16-02-09	672	0.03	2.5	3.03	3	0.45
110	17-02-09	769	0.02	1.8	5.24	3	0.71
111	08-03-09	165	0.06	3.2	2.13	2	0.09
112	09-03-09	600	0.1	8.8	9.12	5	0.68
113	10-03-09	855	0.09	9.8	9.03	6	1.27
114	25-03-09	125	0.93	3.8	1.99	2	0.08
115	26-05-09	615	1.14	39.8	39.69	691	27.36
116	09-06-09	264	0.7	18.2	18.24	173	10.81
117	02-07-09	124	0.57	18.3	0.15	69	1.34
118	08-07-09	74	0.31	3.1	0.16	1	0.04
119	08-07-09	505	0.32	5.9	3.03	2	0.29
120	21-07-09	211	0.32	5.7	7.82	4	0.17

nr.	Begin- datum	Duur event [min]	10-min max. neerslag- volume meetgoot [mm]	Neerslag- volume meetgoot [mm]	Neerslag- volume P06_014 [mm]	Piek- debiet [l/s]	Totaal afstroom- volume [mm]
121	22-07-09	267	0.29	14.7	15.04	22	1.34
122	23-07-09	150	0.1	3.5	4.2	8	0.22
123	24-07-09	74	0.18	2.7	2.65	4	0.08
124	13-08-09	188	0.29	15.3	14.26	15	0.55
125	07-10-09	197	0.49	11.4	11.73	15	0.63
126	09-10-09	111	0.3	8.4	7.69	45	1.06
127	03-11-09	371	0.36	10.9	8.48	5	0.36
128	05-11-09	79	0.16	1.7	2.21	1	0.07
129	14-11-09	200	0.15	3.8	4.18	2	0.17
130	22-11-09	342	0.19	7	7.5	2	0.20
131	22-11-09	82	0.2	2.5	2.37	2	0.08
132	23-11-09	764	0.13	15.1	15.69	4	0.98
133	24-11-09	469	0.13	2.8	3.41	2	0.47
134	26-11-09	393	0.13	2.9	2.88	3	0.39
135	27-11-09	832	0.1	9.7	9.87	4	1.16
136	28-11-09	1014	0.66	6.7	4.46	3	1.25
137	29-11-09	122	0.17	0.8	1.03	2	0.09

#### 9.4.2 Bepaling concentratietijd o.b.v. debietmetingen

Op basis van de debietmetingen werd een recessieconstante gevonden voor de oppervlakteafstroming in de grootteorde van 7 tot 10 minuten; zie dezelfde lineaire daling in de  $\log(\text{debiet}) - \text{tijd}$  plot van Figuur 116 voor een aantal gebeurtenissen die uit de meetreeks werden geknipt en achter elkaar geplaatst. Hierna wordt voor de concentratietijd met de afgeronde waarde van 10 minuten gerekend.



Figuur 116. Bepaling recessieconstante oppervlakteafstroming o.b.v. debietmeetgegevens aan de Zakstraat te Nukerke-Maarkedal.



### 9.4.3 Berekening en analyse tijdsvariatie afvoercoëfficiënt

Voor elk van de geselecteerde gebeurtenissen in de periode dec. 2006 – nov. 2009 werd de afvoercoëfficiënt berekend, zowel de gemiddelde als de maximale afvoercoëfficiënt per gebeurtenis (Tabel 36). Daarnaast bevat Tabel 36 ook nog de deelstroomfilter-resultaten voor de Marie Borrebeek te Etikhove, de 30-minuten voorafgaandelijke neerslag en een inschatting van de bodembedekking van het studiegebied. Figuur 117 toont dat de gemiddelde runoff-coëfficiënt varieert tussen 0 en 0.45, met een sterke seizoensvariatie: gemiddeld hogere runoff-coëfficiënten in de wintermaanden en lagere in de zomermaanden.

Enkele gebeurtenissen in juni 2008 en in de periode mei – juni 2009 werden als onbetrouwbaar geklasseerd: de gebeurtenissen 83, 116, 117 en 118. De meetcampagne maakt melding van problemen met de meting en sedimentatie in de meetgoot in die periode (02/06/2008: “trechter regenmeter was verstopt, neerslag bereikte kantelsysteem niet en werd ook niet opgevangen in jerrycan, aangezien er enkel 15' waarden werden geregistreerd werden er geen stalen genomen; 26/05/2009: staalnameapparatuur volledig tilt geslaan, waterhoogte ongeveer 10cm tot in staalnamekast, geen betrouwbare debietmetingen; 9/06/2009: meetgoot volledig dichtgeslibd, gracht op- en afwaarts van meetgoot ook volledig dichtgeslibd”).

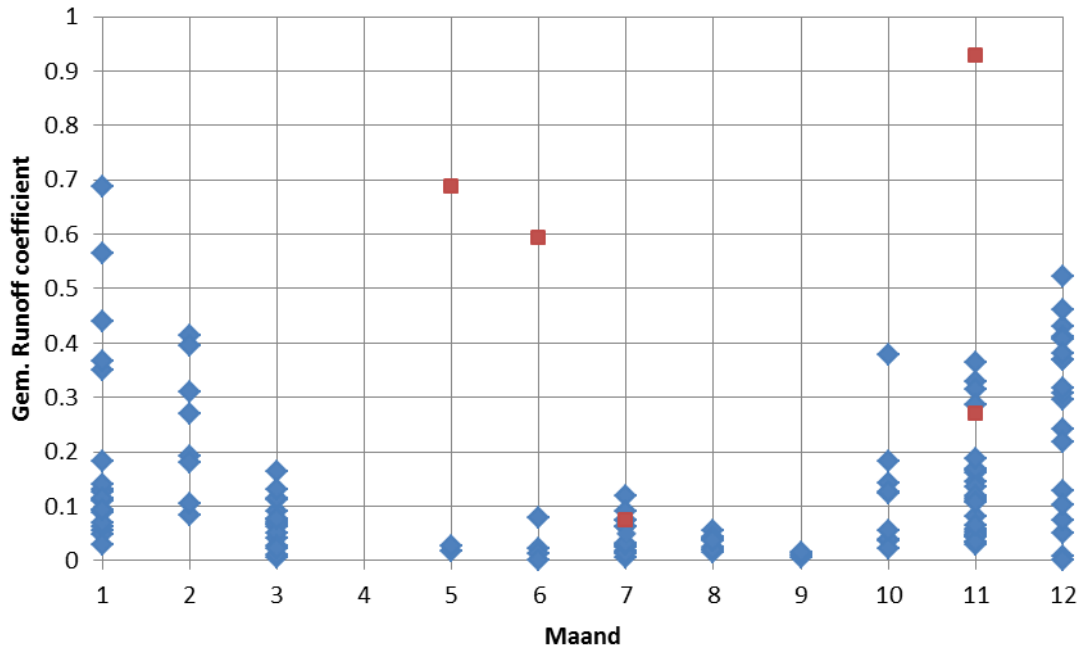
Tabel 36. Gebeurtenisspecifieke gemiddelde en maximale afvoercoëfficiënten aan de meetgoot te Maarkedal, gebeurtenisgemiddelde basisafvoer voor de Marie Barrebeek te Etikhove, voorafgaandelijke neerslag voor de pluviograaf aan de meetgoot en bodembedekking van het studiegebied, in de periode dec. 2006 – nov. 2009.

nr.	Gemiddelde runoff-coeff.	Maximale runoff-coeff.	Basisafvoer [m <sup>3</sup> /s]	Voorafg. 30-min neersl. [mm]	Bodembedekking [%]
1	0.01	0.01	-	0.13	-
2	0.07	0.03	0.089	0.08	61.22
3	0.00	0.01	0.018	0.32	60.30
4	0.02	0.01	0.020	0.20	49.30
5	0.03	0.01	0.020	0.16	48.60
6	0.02	0.03	0.013	0.27	42.67
7	0.01	0.03	0.012	0.07	41.63
8	-0.10	0.02	0.015	0.00	41.45
9	0.02	0.04	0.011	0.16	40.40
10	0.03	0.03	0.014	0.11	40.40
11	0.02	0.03	0.020	0.12	40.23
12	0.02	0.05	0.01	0.22	82.99
13	0.00	0.01	0.016	0.12	82.99
14	0.06	0.04	0.021	0.15	82.99
15	0.12	0.13	0.030	0.80	84.67
16	0.07	0.03	0.032	0.20	85.93
17	0.02	0.03	0.013	0.28	79.82
18	0.06	0.05	0.030	0.36	76.04
19	0.12	0.18	0.025	0.15	61.27
20	0.18	0.14	0.043	0.08	59.90
21	0.14	0.16	0.019	0.11	55.78
22	0.06	0.02	0.039	0.05	35.15
23	0.04	0.04	0.027	0.03	36.48
24	0.05	0.04	0.044	0.09	37.98
25	0.05	0.03	0.056	0.04	38.14
26	0.24	0.17	0.068	0.04	38.31
27	-0.10	0.30	0.095	0.00	38.31
28	0.13	0.07	0.108	0.03	38.47
29	0.07	0.04	0.044	0.05	38.97
30	0.10	0.10	0.052	0.04	38.97
31	0.22	0.12	0.067	0.06	39.14

nr.	Gemiddelde runoff-coeff.	Maximale runoff-coeff.	Basis-afvoer [m3/s]	Voorafg. 30-min neersl. [mm]	Bodem-bedekking [%]
32	0.06	0.06	0.020	0.06	43.97
33	0.09	0.09	0.049	0.05	43.97
34	0.13	0.10	0.041	0.05	44.30
35	0.05	0.05	0.032	0.02	43.63
36	0.09	0.10	0.030	0.02	43.30
37	0.13	0.15	0.039	0.02	42.63
38	0.06	0.08	0.028	0.03	41.62
39	0.14	0.10	0.035	0.04	41.62
40	0.11	0.05	0.042	0.02	41.62
41	0.11	0.06	0.033	0.05	40.95
42	0.12	0.10	0.031	0.03	40.62
43	0.03	0.04	0.021	0.03	38.61
44	0.07	0.08	0.020	0.02	36.27
45	0.08	0.09	0.020	0.06	34.59
46	0.11	0.08	0.028	0.02	34.26
47	0.09	0.06	0.021	0.14	26.23
48	0.01	0.03	0.021	0.06	25.56
49	0.16	0.16	0.046	0.12	23.21
50	0.08	0.08	0.070	0.03	22.88
51	0.04	0.05	0.041	0.04	21.82
52	0.07	0.09	0.039	0.04	20.97
53	0.11	0.12	0.062	0.05	20.54
54	0.06	0.03	0.067	0.03	20.54
55	0.11	0.07	0.071	0.05	20.12
56	0.07	0.10	0.052	0.04	19.27
57	0.05	0.03	0.046	0.09	18.85
58	0.08	0.19	0.014	0.36	31.57
59	0.04	0.08	0.011	0.23	92.44
60	0.04	0.02	0.018	0.10	92.44
61	0.04	0.03	0.020	0.15	92.44
62	0.02	0.00	0.022	0.07	92.44
63	0.04	0.03	0.020	0.12	92.44
64	0.01	0.00	0.011	0.14	92.44
65	0.02	0.01	0.013	0.18	92.44
66	0.01	0.00	0.012	0.19	92.44
67	0.01	0.01	0.012	0.23	92.44
68	0.01	0.01	0.017	0.06	92.44
69	0.04	0.03	0.017	0.16	97.93
70	0.04	0.07	0.025	0.17	96.12
71	0.02	0.02	0.034	0.07	91.72
72	0.38	0.22	0.019	0.09	50.32
73	0.36	0.20	0.017	0.04	42.88
74	0.05	0.02	0.015	0.03	35.44
75	0.11	0.08	0.016	0.07	32.96
76	0.14	0.10	0.019	0.09	31.72
77	0.33	0.11	0.045	0.11	30.48
78	0.32	0.15	0.019	0.01	24.28
79	0.12	0.03	0.017	0.02	21.80
80	0.08	0.02	0.016	0.03	18.08
81	0.16	0.08	0.033	0.05	18.08
82	0.27	0.03	0.082	0.04	18.08
83	0.93	0.06	0.091	0.12	15.60

nr.	Gemiddelde runoff-coeff.	Maximale runoff-coeff.	Basis-afvoer [m <sup>3</sup> /s]	Voorafg. 30-min neersl. [mm]	Bodem-bedekking [%]
84	0.17	0.05	0.027	0.01	14.36
85	0.29	0.10	0.027	0.01	12.74
86	0.43	0.10	0.027	0.01	12.74
87	0.30	0.15	0.027	0.03	12.67
88	0.31	0.10	0.033	0.03	12.59
89	0.32	0.25	0.034	0.02	12.59
90	0.41	0.18	0.050	0.04	12.44
91	0.46	0.13	0.062	0.02	12.44
92	0.41	0.19	0.068	0.05	12.36
93	0.52	0.12	0.074	0.03	12.29
94	0.37	0.10	0.072	0.01	12.21
95	0.37	0.20	0.041	0.02	12.06
96	0.41	0.15	0.040	0.02	11.98
97	0.38	0.22	0.046	0.04	11.98
98	0.69	0.18	0.023	0.03	9.39
99	0.44	0.11	0.019	0.03	9.09
100	0.56	0.19	0.033	0.06	9.01
101	0.18	0.17	0.042	0.03	8.94
102	0.35	0.19	0.052	0.06	8.94
103	0.09	0.10	0.033	0.02	8.71
104	0.37	0.26	0.103	0.06	8.63
105	0.31	0.14	0.017	0.02	7.64
106	0.19	0.18	0.023	0.07	7.57
107	0.27	0.21	0.070	0.05	7.34
108	0.41	0.20	0.077	0.05	7.19
109	0.18	0.10	0.067	0.02	7.11
110	0.39	0.15	0.031	0.01	6.81
111	0.03	0.03	0.016	0.05	6.73
112	0.08	0.05	0.020	0.06	5.28
113	0.13	0.07	0.030	0.06	5.21
114	0.02	0.00	0.030	0.10	5.13
115	0.69	0.61	0.056	0.50	3.99
116	0.59	0.25	0.022	0.28	57.62
117	0.07	0.12	0.009	0.51	75.07
118	0.01	0.00	0.011	0.10	97.32
119	0.05	0.01	0.013	0.08	91.95
120	0.03	0.01	0.011	0.12	91.95
121	0.09	0.08	0.016	0.15	80.33
122	0.06	0.08	0.020	0.07	79.43
123	0.03	0.02	0.017	0.08	78.54
124	0.04	0.05	0.014	0.24	77.64
125	0.06	0.03	0.013	0.21	59.76
126	0.13	0.15	0.013	0.23	10.57
127	0.03	0.01	0.016	0.19	8.78
128	0.04	0.01	0.016	0.06	39.07
129	0.05	0.01	0.012	0.08	42.07
130	0.03	0.01	0.012	0.08	-
131	0.03	0.01	0.015	0.08	-
132	0.06	0.03	0.021	0.08	-
133	0.17	0.02	0.033	0.03	-
134	0.13	0.02	0.020	0.05	-
135	0.12	0.04	0.030	0.08	-

nr.	Gemiddelde runoff-coeff.	Maximale runoff-coeff.	Basis-afvoer [m <sup>3</sup> /s]	Voorafg. 30-min neersl. [mm]	Bodem-bedekking [%]
136	0.19	0.06	0.038	0.03	-
137	0.11	0.10	0.040	0.02	-



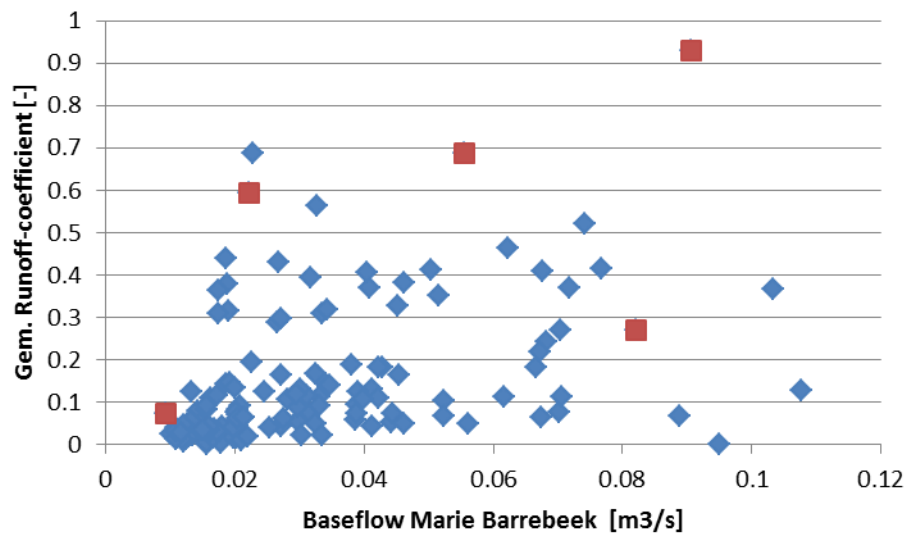
Figuur 117. Gemiddelde runoff-coëfficiënt voor alle opgemeten gebeurtenissen aan de meetgoot te Maarkedal in de periode dec. 2006 – nov. 2009, in functie van de maand van het jaar. De onbetrouwbare gebeurtenissen zijn aangegeven in het rood.

In vergelijking met de Heulen gracht (Droog Haspengouw) zijn de runoff-coëfficiënten voor Maarkedal groter. De bodemeigenschappen van het westelijk deel van Vlaanderen, inclusief de Bovenschelde (zie ook Figuur 27) zorgen ervoor dat het regenwater minder gemakkelijk in de bodem dringt. Het verklaart ook waarom het gebied een veel dichter (permanent watervoerend) waterlopenstelsel heeft. Het regenwater komt hierdoor stroomopwaarts snel terecht in één van de vele grachten of beekjes. In Droog Haspengouw daarentegen is het waterlopenstelsel niet zo dicht. Er zijn evenmin ondoordringbare lagen in de ondergrond. Ook uit debietmetingen langs de waterlopen (zie de regionale analyse in deel 3.4.3.1) blijkt dat de hoeveelheid oppervlakkig afstromend water in het gebied van de Bovenschelde een veelvoud is van dat in Droog Haspengouw.

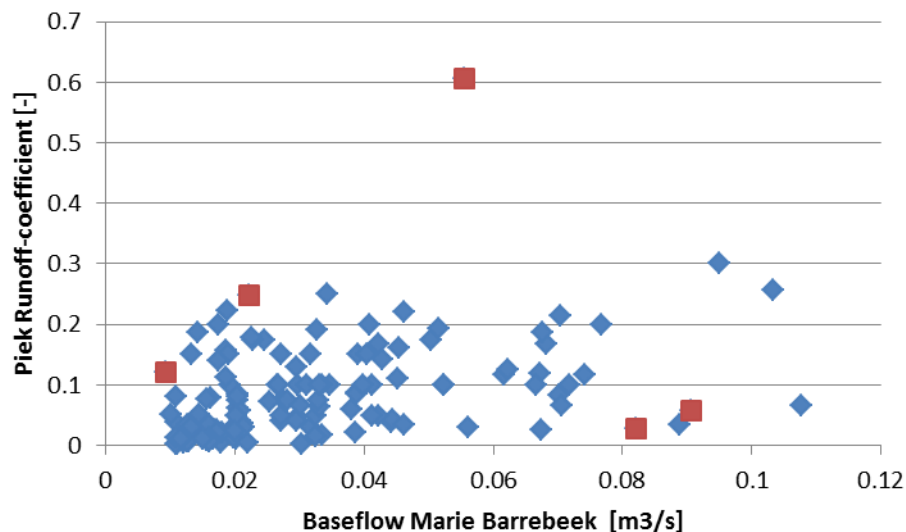
Merk ook op dat de waargenomen runoff-coëfficiënten in de meeste gevallen veel lager zijn dan de 0.68 die voor hellende akkers met zandleem- of leembodem wordt aangenomen bij ontwerpberoeeningen door het Provinciaal Centrum voor Milieuonderzoek van Oost-Vlaanderen.

Zoals voor de Heulen gracht werd - gelijkaardig aan de VHM-aanpak - op zoek gegaan naar afhankelijkheden tussen de runoff-coëfficiënt en tijdsvariabele verklarende variabelen. In eerste instantie werd het verzadigingsoverschot geanalyseerd. Hiervoor werd – zoals voor de Heulen gracht – de grootte van het baseflowdebiet van een meer afwaarts debietmeetstation in het stroomgebied gebruikt als indicator voor de verzadigingstoestand van de ondergrond. In dit geval werd het baseflowdebiet via de numerieke filter afgeleid uit de debietmeetreeks van de VMM-AOW limnigraaf (L06\_348) op de Marie Barrebeek te Etikhove. Voor deze limnigraaf zijn debietmetingen beschikbaar sinds 1/07/2002. Figuur 118 en Figuur 119 tonen aan dat er ook

voor Maarkedal geen afhankelijkheid gevonden kan worden tussen de gebeurtenisgemiddelde basisafvoer en de runoff-coëfficiënt (zowel voor de gemiddelde als de piekwaarde).



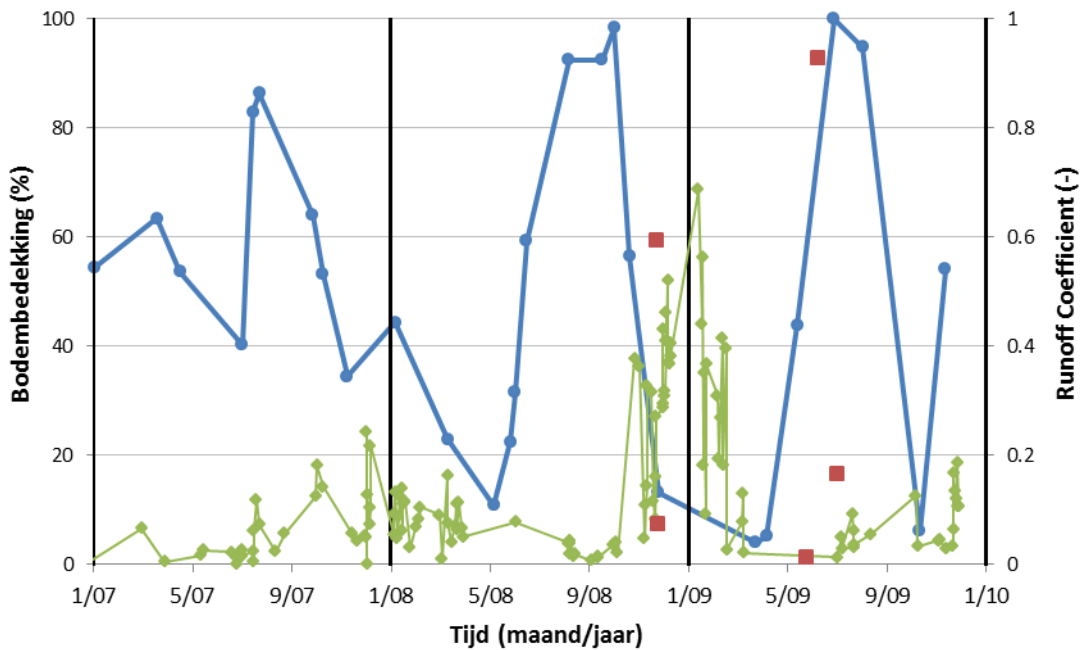
Figuur 118. Gemiddelde runoff-coëfficiënt voor alle opgemeten gebeurtenissen aan de meetgoot te Maarkedal versus de gemiddelde basisafvoer op de Marie Barrebeek te Etikhove. De onbetrouwbare metingen zijn in het rood aangeduid.



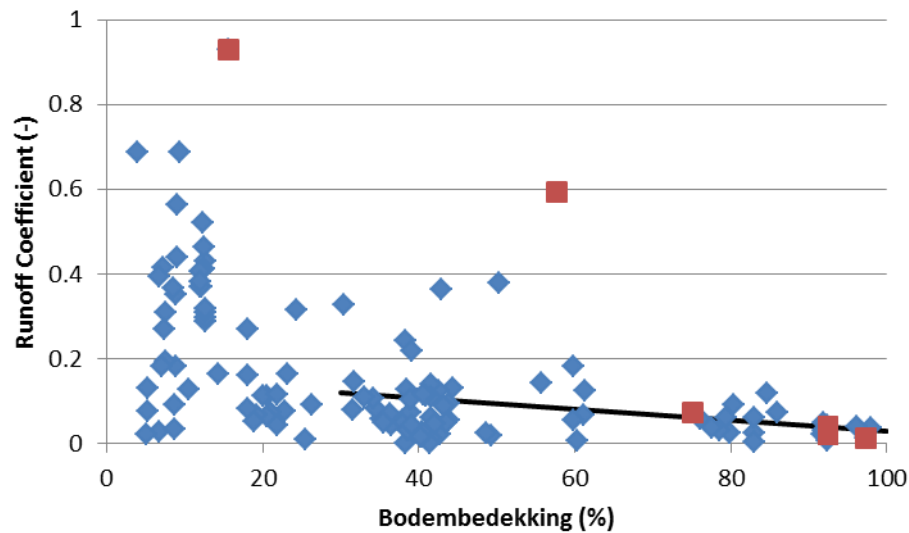
Figuur 119. Piek runoff-coëfficiënt voor alle opgemeten gebeurtenissen aan de meetgoot te Maarkedal versus de gemiddelde basisafvoer op de Marie Barrebeek te Etikhove. De onbetrouwbare metingen zijn in het rood aangeduid.

Naast het verzadigingsoverschot werd ook de invloed van de bodembedekking geanalyseerd. Voor de meetgoot te Maarkedal werd op onregelmatige tijdstippen een inschatting gemaakt van het landgebruik in de percelen van het toestroomgebied. Deze (ruwe en onvolledige) gegevens geven voor elk perceel welk gewas er geteeld werd en in welke mate deze gewassen de bodem bedekken. Op basis van deze gegevens is getracht een verband op te stellen tussen de bodembedekking en de runoff-coëfficiënt, zie Figuur 120 en Figuur 121. De totale bodembedekking van het toestroomgebied werd berekend als het gewogen gemiddelde van elk perceel. Tussen twee gekende waarden werd er lineair geïnterpoleerd. Er lijkt een dalend verband te bestaan tussen de runoff-coëfficiënt en de bodembedekking. Bij een

bodembedekking lager dan 20% is er echter een zeer grote spreiding zichtbaar, waardoor het verband weinig bruikbaar is. Deze spreiding lijkt zich vooral voor te doen tijdens winterperiodes, wat er op duidt dat er in de winter nog een aantal andere factoren moeten zijn die een belangrijke invloed hebben op de runoff-coëfficiënt.



*Figuur 120. Evolutie van bodembedekking (blauw) en runoff-coëfficiënt (groen) in de tijd, voor alle opgemeten gebeurtenissen aan de meetgoot te Maarkedal, tijdens de meetperiode dec. 2006 – nov. 2009. De onbetrouwbare punten zijn in het rood aangeduid.*



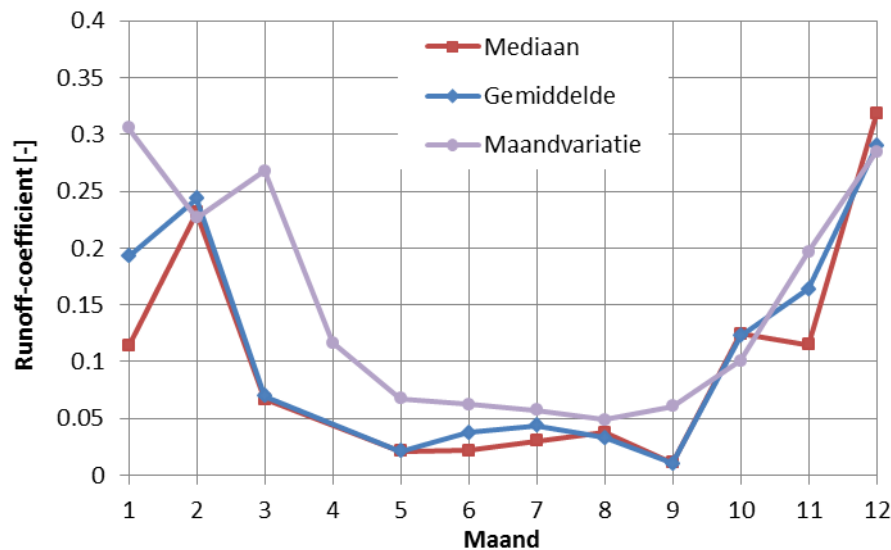
*Figuur 121. Runoff-coëfficiënt versus bodembedekking voor alle opgemeten gebeurtenissen aan de meetgoot te Maarkedal tussen dec.2006 en nov.2008. De onbetrouwbare gebeurtenissen zijn aangeduid in het rood.*

Bovenstaande analyse van de runoff-coëfficiënt toont duidelijk aan dat deze een sterke tijdsvariatie vertoont, maar het is zeer moeilijk om deze variatie in verband te brengen met een beperkt aantal meetbare of modelleerbare grootheden. Voor het verzadigings- en infiltratie

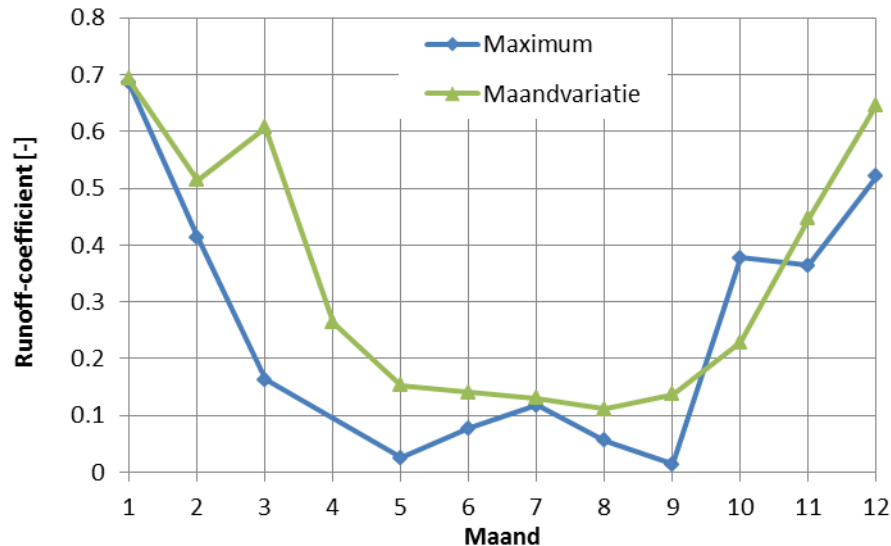
overschot kon er nauwelijks een verband gevonden worden en de bodembedekking is een moeilijk inschatbare parameter. Rekenen met een constante runoff-coëfficiënt van 0.68 (zoals gedaan wordt door het Provinciaal Centrum voor Milieuonderzoek van Oost-Vlaanderen) zal echter meestal leiden tot grote overschattingen van de benodigde buffercapaciteit. Daarom is een vergelijking gemaakt tussen de meetresultaten en de verbanden die afgeleid zijn in Figuur 27 tot en met Figuur 29 op basis van afwaartse debietmeetstations. Dit volgt op het idee dat de gemiddelde maandelijkse variatie verklaart wordt door de vele factoren die een invloed hebben op de runoff-coëfficiënt, zonder dat al deze invloeden expliciet gekwantificeerd zijn.

Voor deze concrete gevalstudie werd de maandvariatie voor het gebied Schelde-Leide-Dender-Zenne-Ijzer-Polders gebruikt en werd 0.15 als gemiddelde waarde gesteld (d.i. de gemiddelde waarde van de runoff-coëfficiënt voor alle opgemeten gebeurtenissen). Figuur 122 toont dat de gekozen maandvariatie een vrij gelijkaardig verloop vertoont met de opgemeten gebeurtenissen: hoge runoff-waarden in de wintermaanden en beduidend lagere in de zomermaanden. Voor de maanden januari tot maart bestaat er wel een afwijking t.o.v. meetwaarden.

Het gebruik van gemiddelde waarden zal echter leiden tot onderschattingen van de gebeurtenissen met de hoogste runoff-coëfficiënten, typisch die gebeurtenissen waarvoor de buffercapaciteit berekend dient te worden. Een andere mogelijkheid is om de maximale waarde van de verbanden uit Figuur 29 en Tabel 12 gelijk te stellen aan de maximale opgemeten waarde en het verband vervolgens te vergelijken met de maximale maandelijkse runoff-coëfficiënt. Dit is getoond in Figuur 123. De maximale runoff-coëfficiënt is gelijk aan 0.69, wat overeenkomt met de waarde die het Provinciaal Centrum voor Milieuonderzoek van Oost-Vlaanderen gebruikt. Voor de meeste maanden zal het verband hoger liggen dan de maximale opgemeten waarden en bijgevolg ook leiden tot een veiligere berekening. Voor de maand maart is er sprake van een sterke overschatting van de maximale waarde en voor oktober van een onderschatting.



*Figuur 122. Maandvariatie in de runoff-coëfficiënt voor de meetgoot te Nukerke: Mediaan (rood), gemiddelde waarde (blauw) van de opgemeten gebeurtenissen en het verband uit Figuur 29 (paars).*



Figuur 123. Maandvariatie runoff-coëfficiënt voor de meetgoot te Nukerke: Maximale opgemeten waarde per maand (blauw) en het verband uit Figuur 29 met 0.68 als maximale waarde (groen).

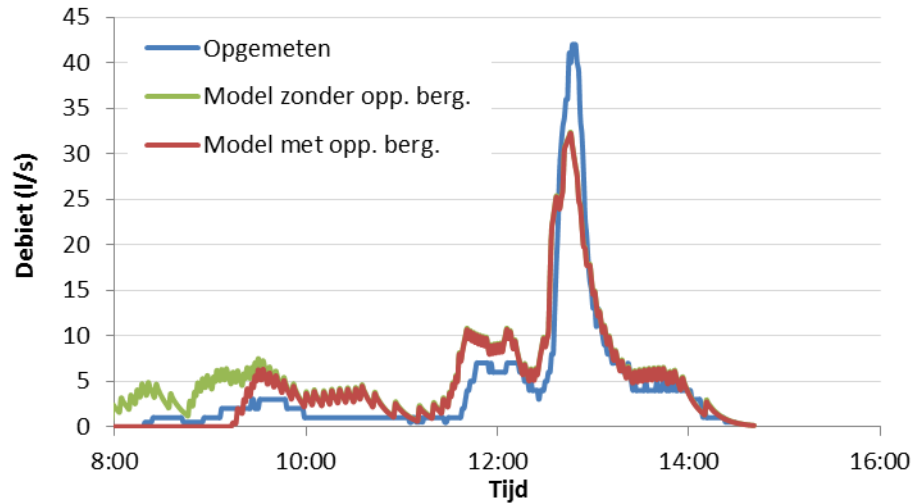
#### 9.4.4 Neerslagafvoermodel

In deze paragraaf wordt op basis van een aantal voorbeelden aangetoond dat het afstromingsdebiet naar de meetgoot gemodelleerd kan worden met behulp van een lineair reservoirmodel. Hierbij is verondersteld dat er ter plaatse van de meetgoot enkel sprake is van oppervlakteafstroming.

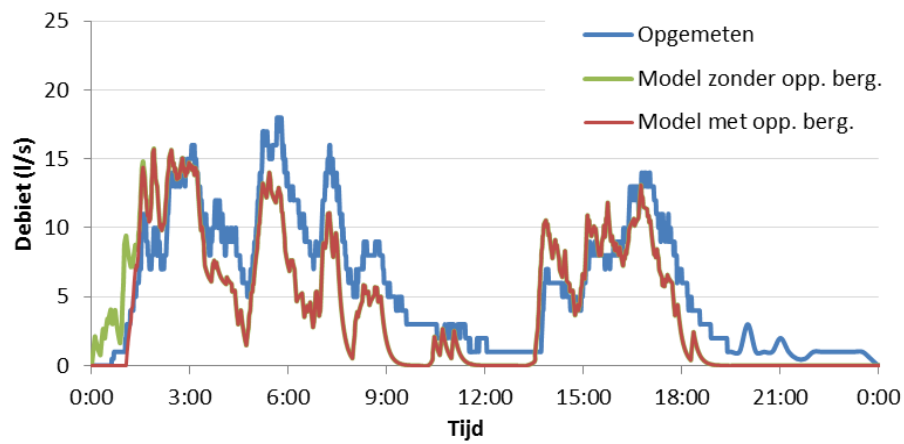
Eerder werd afgeleid dat de oppervlakteafstroming naar de meetgoot een concentratietijd heeft van 7 à 10 minuten. Deze is in het model gelijk gesteld aan 10 minuten. De runoff-coëfficiënt is niet bepaald op basis van de verbanden uit Figuur 29 en Tabel 12, maar de berekende waarde is gebruikt. Op die manier kan het voorspellingsvermogen van het model bekeken worden.

Figuur 124, Figuur 125 en Figuur 126 tonen een vergelijking van het opgemeten debiet aan de meetgoot en het gemodelleerde oppervlakteafstromingsdebiet, voor drie gebeurtenissen in verschillende perioden van het jaar. Telkens stelt de blauwe lijn het opgemeten debiet voor, terwijl de rode en groene lijnen het gemodelleerde debiet, respectievelijk met en zonder oppervlakteberging, voorstellen. De oppervlakteberging (telkens 1 of 2 mm) is ingevoerd om het effect van de bodemruwheid in te rekenen en zo te voorkomen dat er na elke kleine regenval directe afstroming zal zijn. Eens de oppervlakteberging overschreden is, heeft het hydrogram hetzelfde verloop.

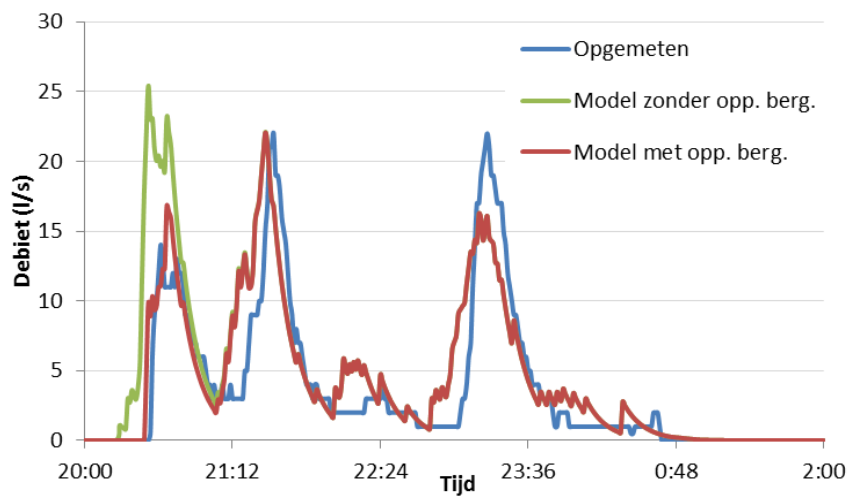




Figuur 124. Resultaat lineair reservoirmodel voor de oppervlakteafstroming aan de meetgoot te Maarkedal, voor de gebeurtenis van 01/10/2007.



Figuur 125. Resultaat lineair reservoirmodel voor de oppervlakteafstroming aan de meetgoot te Maarkedal, voor de gebeurtenis van 23/01/2009.



Figuur 126. Resultaat lineair reservoirmodel voor de oppervlakteafstroming aan de meetgoot te Maarkedal, voor de gebeurtenis van 22/07/2009.

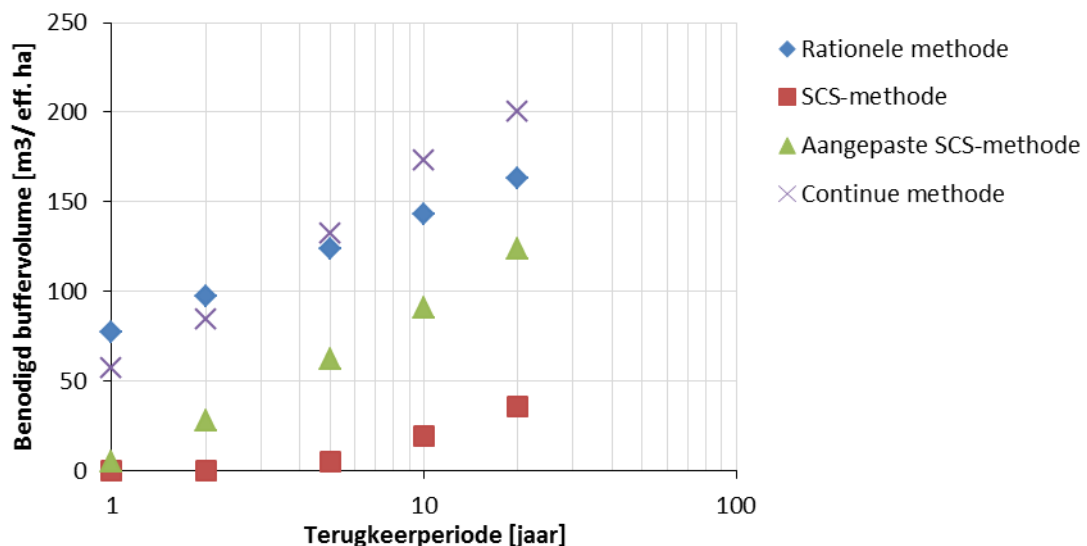
Het valt op dat in alle drie de gevallen de hoogte van de eerste piek goed benaderd wordt, maar dat de daarop volgende pieken telkens onderschat worden. Dit is te wijten aan het gebruik van een gebeurtenisgemiddelde runoff-coëfficiënt die constant verondersteld wordt gedurende één gebeurtenis. In werkelijkheid zal de runoff-coëfficiënt ook tijdens een regenbui variëren als gevolg van het verzadigings- en infiltratieoverschot, maar het is zeer moeilijk dit afdoende te kwantificeren. Daarnaast zal ook de hier meegerekende oppervlakteberging een invloed hebben, aangezien deze niet in rekening genomen wordt bij het bepalen van de runoff-coëfficiënt.

#### 9.4.5 Benodigde bergingscapaciteit

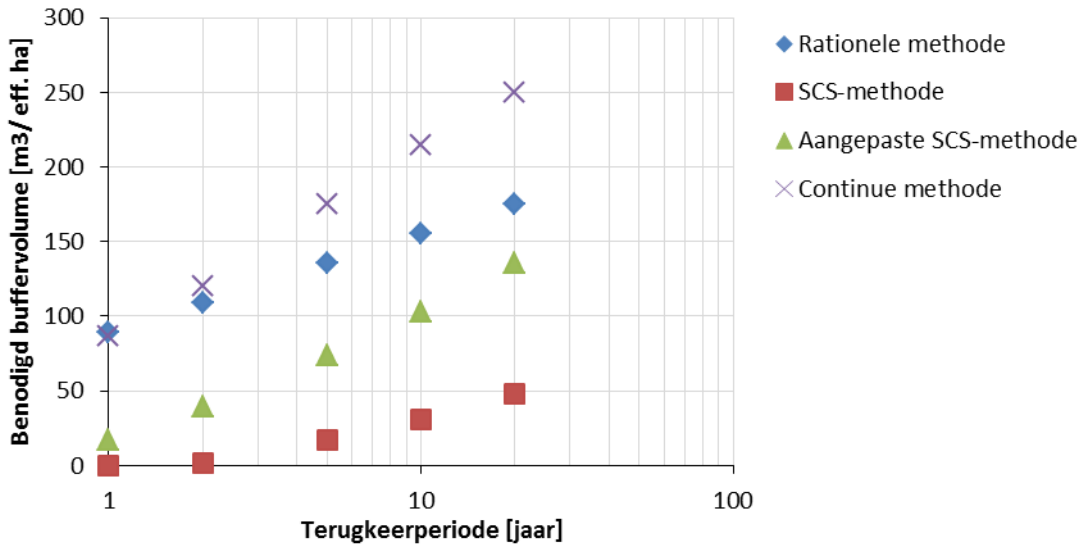
De terugkeerperiode (in aantal jaren) van overloop van een opvangsysteem met een bepaalde bergingscapaciteit werd volgens de continue simulatieaanpak voor een concentratietijd van 10 minuten reeds gerapporteerd in Deel 3.8.1; zie ook Bijlage B en Bijlage C.

Ook voor deze gevalstudie is een vergelijking gemaakt van het neerslagafstromingsvolume en de bijhorende benodigde bergingscapaciteit volgens de continue simulatieaanpak, de rationele methode, de SCS-methode en de aangepaste SCS-methode. Voor de SCS-methode werd opnieuw uitgegaan van een Curve Number van 88 voor akkerland.

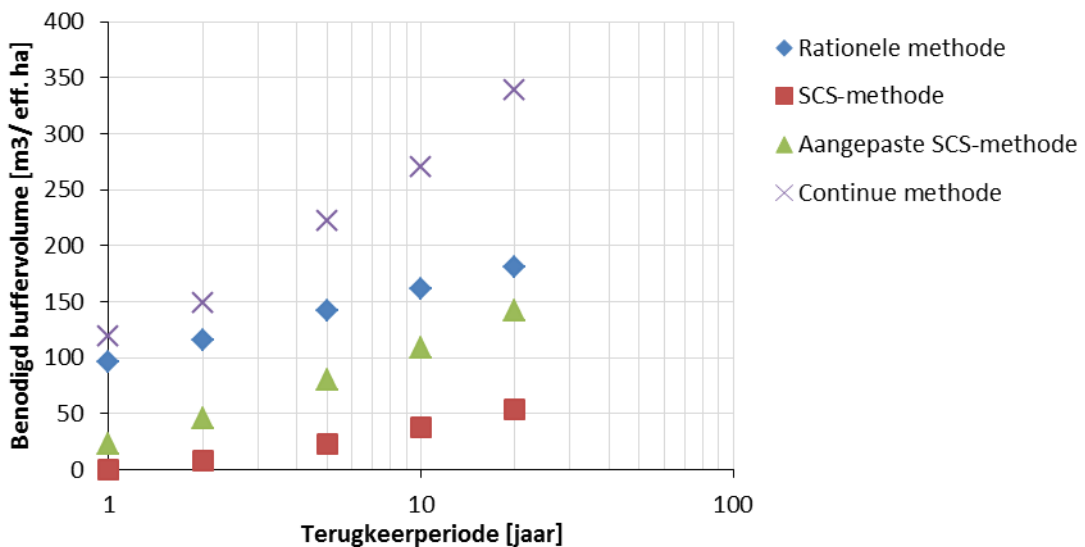
Gegeven de concentratietijd van 10 minuten, zijn de neerslagafstromingsvolumes per effectieve ha i.f.v. de terugkeerperiode voor de verschillende methodes dezelfde als voor de Nederhasselstraat te Ninove in Figuur 58. Op basis van deze neerslagafstromingsvolumes tonen Figuur 127, Figuur 128 en Figuur 129 de overeenkomstige benodigde bergingsvolumes per effectieve ha, voor verschillende doorvoerdebieten (20, 10 en 5 l/(s.ha)). De resultaten zijn sterk afhankelijk van de veronderstelde runoff-coëfficiënt. Er werd een runoff-coëfficiënt van 0.50 aangenomen, die overeenkomst met de runoff-coëfficiënt bij de hoogste piekafvoeren, dus bepalend is voor het al dan niet optreden van overloop. In vergelijking met de continue simulatiemethode, geven de SCS-methode en de rationele methode opnieuw sterke onderschattingen op van de benodigde bergingsvolumes. Tabel 37 lijst de benodigde bergingsvolumes op volgens de continue simulatiemethode, voor een terugkeerperiode van 20 jaar. Deze terugkeerperiode is gangbaar voor gebieden waar woningen bedreigd worden door de water- en modderstromen (zie Deel 3.3.5).



Figuur 127. Benodigd bergingsvolume, in  $m^3$  per effectieve ha, versus terugkeerperiode voor verschillende methodes, voor Maarkedal bij een constant doorvoerdebiet van 20 l/(s.ha) en een runoff-coëfficiënt van 0.5.



Figuur 128. Benodigd bergingsvolume, in  $m^3$  per effectieve ha, versus terugkeerperiode voor verschillende methodes, voor Maarkedal bij een constant doorvoerdebiet van 10 l/(s.ha) en een runoff-coëfficiënt van 0.5.



Figuur 129. Benodigd bergingsvolume, in  $m^3$  per effectieve ha, versus terugkeerperiode voor verschillende methodes, voor Maarkedal bij een constant doorvoerdebiet van 5 l/(s.ha) en een runoff-coëfficiënt van 0.5.

Tabel 37 vermeldt zowel het benodigd totaal bergingsvolume bij een runoff-coëfficiënt van 0.40 als bij een runoff-coëfficiënt van 0.68 die voor hellende akkers met zandleem- of leembodem wordt aangenomen bij ontwerpberekeningen door het Provinciaal Centrum voor Milieuonderzoek van Oost-Vlaanderen. De tabel geeft aan dat deze laatste runoff-coëfficiënt het benodigd bergingsvolume zou overschatten (met een factor 1.7). Dit toont het belang van een goede schatting van de runoff-coëfficiënt. Deze schatting is echter zeer onnauwkeurig indien geen debietmetingen beschikbaar zijn, en blijkt dus de zwakste schakel in de berekening van het benodigd bergingsvolume.

Tabel 37. Benodigd totaal bergingsvolume volgens de continue simulatieaanpak voor Maarkedal i.f.v. constant doorvoerdebiet, voor een terugkeerperiode van 20 jaar.

Gebied	Constant doorvoerdebiet [l/(s.ha)]	Totaal benodigd bergingsvolume [m <sup>3</sup> ]
Maarkedal, 6 ha, runoff-coëff. 0.40	20	588
	10	768
	5	972
Maarkedal, 6 ha, runoff-coëff. 0.68	20	1000
	10	1306
	5	1652

De invloed op de afwaartse waterloop is in dit geval niet onderzocht, omdat ze minder belangrijk is. Wateroverlast en modderstromen treden vooral onmiddellijk afwaarts van de gracht op, aan de overzijde van de Zakstraat.

#### 9.4.6 Sedimentopvang

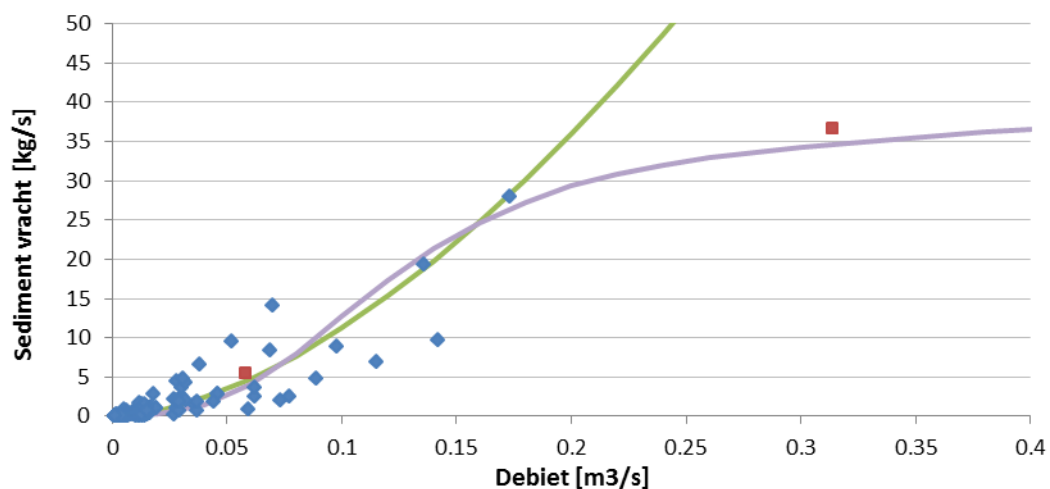
De effectiviteit van de sedimentopvang werd begroot volgens dezelfde methode als voor de Heulen gracht. De sedimenttoevoer werd gekwantificeerd op basis van de sedimentconcentratiemetingen aan de meetgoot. Figuur 130 geeft aan dat ook in dit geval een stijgend machtsverband wordt gevonden tussen het afstromingsdebiet en de sedimentvracht:

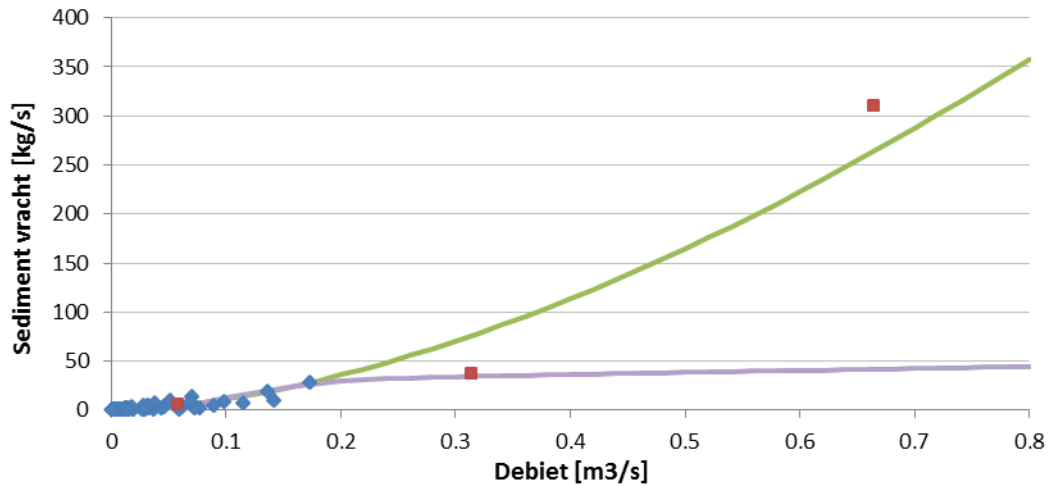
$$\text{sedimentvracht} \text{ [kg / s]} = a (q - q_{crit})^b$$

met  $a = 520$ ,  $b = 1.6$  en  $q_{crit} = 0.001 \text{ m}^3/\text{s}$  het debiet onder dewelke er geen bodemverlies optreedt. Het machtsverband is geldig tot een debiet van 0.2 of 0.7  $\text{m}^3/\text{s}$ , afhankelijk of de gebeurtenissen met onbetrouwbare metingen, zoals aangeduid in Figuur 130, al dan niet meegerekend worden. Net als voor de Heulen gracht is getracht een uitgebreid S-verband op te stellen, waarbij de onbetrouwbare meting (met een debiet van 0.65  $\text{m}^3/\text{s}$ ) niet is meegenomen:

$$\text{sedimentvracht} \text{ [kg / s]} = a \left( \exp((b + d (q - q_{crit})) (1 - \exp(-\frac{q - q_{crit}}{c}))) - 1 \right)$$

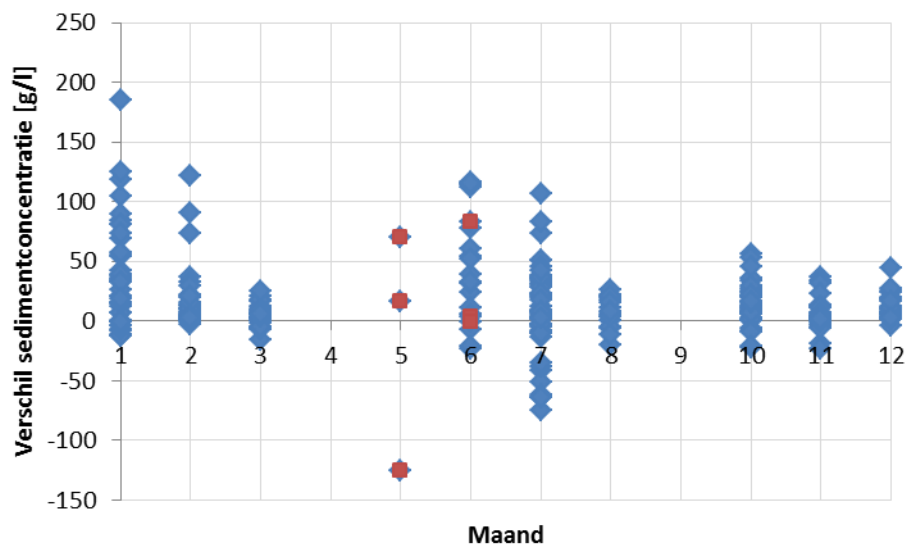
met  $a = 0.05$ ,  $b = 6.4$ ,  $c = 0.05$ ,  $d = 0.5$  en  $q_{crit} = 0.001 \text{ m}^3/\text{s}$ . De geldigheid van dit verband voor hogere debieten is echter twijfelachtig, omdat in de meetwaarden geen duidelijke verzadiging of afvlakking zichtbaar is.





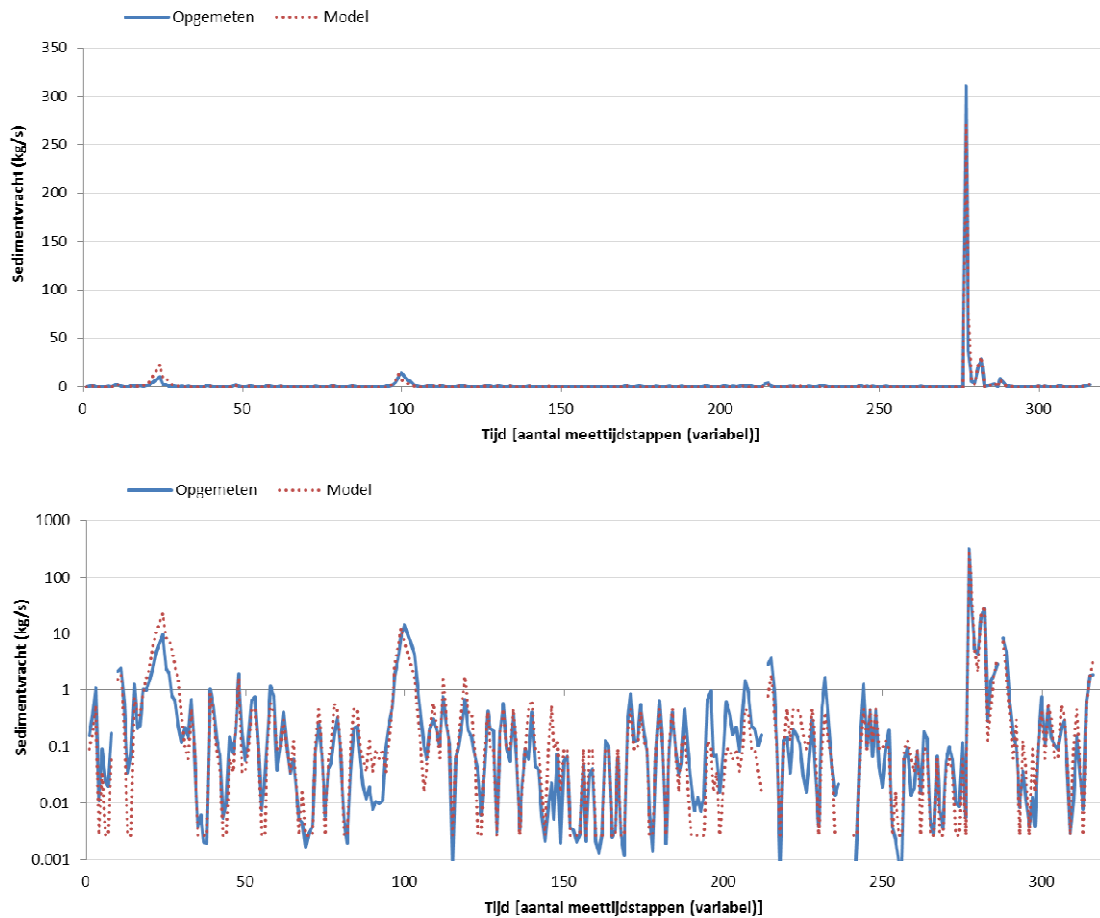
Figuur 130. Sedimentvrucht versus afstromingsdebiet voor alle opgemeten gebeurtenissen aan de meetgoot te Maarkedal, met bijhorende opgesteld machtsverband (groen) en uitgebreid S-verband (paars). De onbetrouwbare punten zijn aangegeven in het rood.

Naast de afhankelijkheid van de sedimentvrucht met het afstromingsdebiet is ook de seizoensafhankelijkheid (of dus onrechtstreeks de afhankelijkheid met de bodembedekking) onderzocht. Hiertoe werd het verschil berekend tussen de gemeten sedimentconcentratie en de sedimentconcentratie afgeleid van het machtsverband in Figuur 130, en geplotted versus de maand van het jaar (welke benaderend indicatief is voor de bodembedekking); zie Figuur 131. Er blijkt geen duidelijke seizoensafhankelijkheid voor te komen. Wel worden overwegend positieve verschillen (hogere sedimentconcentraties) gevonden voor de maanden januari en februari. Het is echter moeilijk om daar conclusies uit te trekken aangezien de metingen in deze twee maanden afkomstig zijn van eenzelfde jaar, en dit op een totale meetperiode van 3 jaar. Hierdoor zijn de metingen in die twee maanden afhankelijk van elkaar.

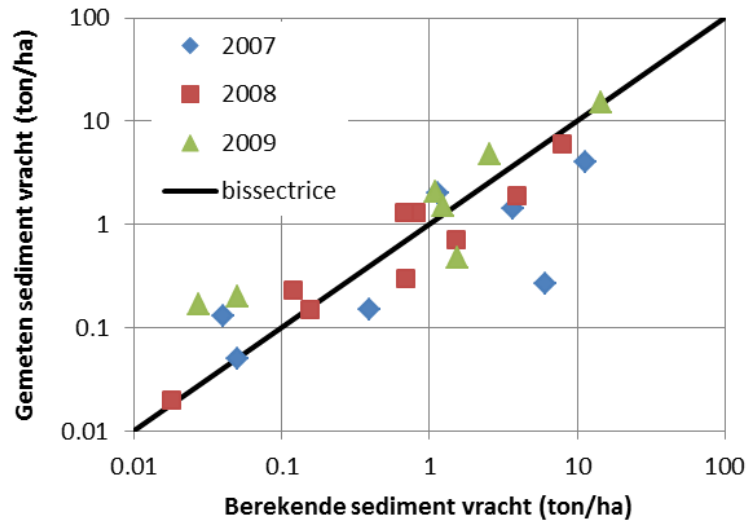


Figuur 131. Verschil tussen de gemeten sedimentconcentratie en de sedimentconcentratie afgeleid van het machtsverband voor alle opgemeten gebeurtenissen aan de meetgoot te Maarkedal in functie van de maand van het jaar.

Figuur 132 en Figuur 133 geven aan dat na toepassing van het machtsverband op de gemeten debieten aan de meetgoot een goede overeenstemming wordt bekomen tussen de berekende en de gemeten sedimentvrachten. Figuur 132 vergelijkt de meetpunten waarvoor het machtsverband is opgesteld, terwijl in Figuur 132 de berekende maandelijkse sedimentvracht is uitgezet tegen de gerapporteerde maandelijkse sedimentvracht. Maanden zonder sedimenttransport zijn in deze grafiek niet opgenomen vanwege de logaritmische schaal. Voor het jaar 2007 en de eerste maanden van 2008 ligt de gerapporteerde sedimentvracht systematisch onder de berekende. Dit is te wijten aan problemen met de staalnameapparatuur (positie van de aanzuigdarm, defecte hoogtemeter) waardoor een groot aantal stalen vals waren en de gerapporteerde sedimentvracht onder de werkelijke ligt (Eindrapport Provinciaal Centrum voor Milieuonderzoek, 2009).

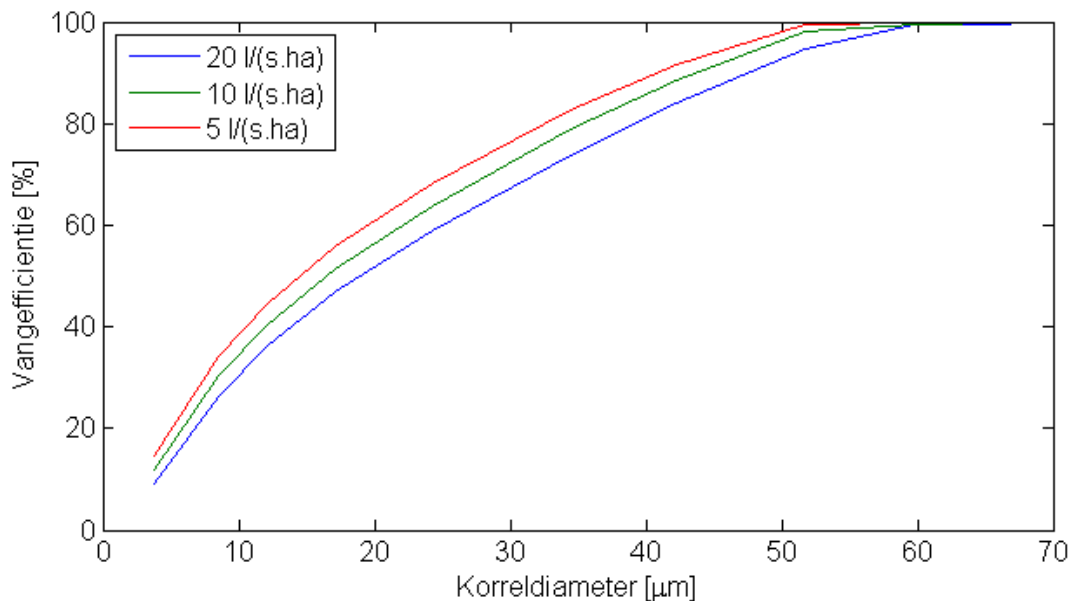


*Figuur 132. Gemeten versus gemodelleerde sedimentvracht, op basis van het opgemeten debiet aan de meetgoot te Maarkedal; (boven) normale schaal, (onder) log-schaal voor de ordinaat.*



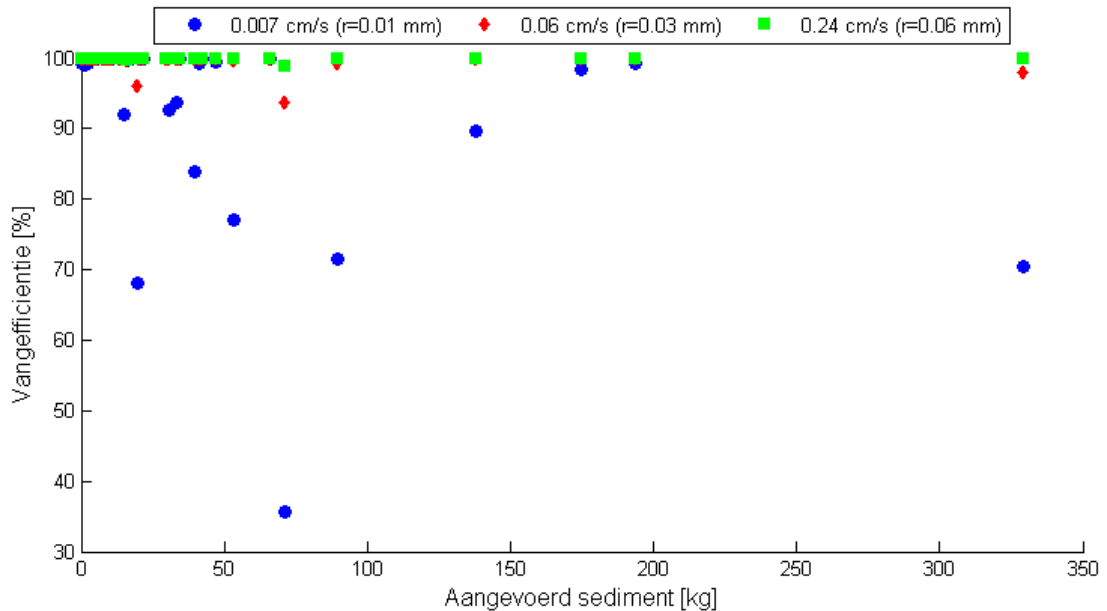
Figuur 133. Gerapporteerde maandelijkse sedimentvrucht (Eindrapport Provinciaal Centrum voor Milieuonderzoek, 2009) versus de berekende maandelijkse sedimentvrucht op basis van het debiet aan de meetgoot te Maarkedal.

Gebruik makend van het machtsverband om de sedimenttoevoer i.f.v. het afstromingsdebiet tijdsvariabel te simuleren in het continu simulatiemodel van het bufferbekken, werd voor verschillende deeltjesgroottes en bijhorende valsnelheden de vangefficiëntie berekend. Het resultaat hiervan is getoond in Figuur 134, waar ook de invloed van het constante doorlaatdebiet bekeken wordt. Het volume van het bufferbekken werd bepaald op basis van de waarden in Tabel 37 (bij een runoff-coëfficiënt van 0.40), waarbij een constante dijkhoogte van 0.7 m is verondersteld. De hydraulische efficiëntie werd vastgelegd op 0.7. De vangefficiëntie werd gedefinieerd als de verhouding van de totale hoeveelheid bezonken sediment t.o.v. de totale hoeveelheid aangevoerd sediment over de volledige simulatieperiode (december 2006 tot mei 2009). Net als voor de Heulen gracht zal de vangefficiëntie toenemen bij een stijgende valsnelheid (de tijd nodig voor bezinking wordt korter) en bij een daling van het doorvoerdebiet en dus ook bij een toename van het buffervolume (de verblijftijd in het bufferbekken wordt langer).



Figuur 134. Efficiëntie sedimentopvang voor een bufferbekken aan de meetgoot te Maarkedal, in functie van de valsnelheid en het doorvoerdebiet, voor de simulatieperiode van december 2006 tot juli 2009.

Figuur 134 toont de vangefficiëntie van de volledige simulatieperiode. Het is echter fout te veronderstellen dat deze efficiëntie constant zal zijn gedurende de volledige periode. Net zoals bij de Heulen gracht zal de vangefficiëntie dalen, naarmate de aangevoerde hoeveelheid sediment stijgt. Dit is getoond in Figuur 135, waar de vangefficiëntie geplot is per gebeurtenis in functie van de aangevoerde hoeveelheid sediment en de valsnelheid. Voor deze simulaties werd een bufferbekken van  $400 \text{ m}^3$ , met een dijkhoogte van  $0.7 \text{ m}$  verondersteld. Voor het aangevoerde sediment werd verondersteld dat het een constante korreldiameter heeft. De bijhorende valsnelheden zijn overgenomen uit Tabel 16. De hydraulische efficiëntie werd opnieuw vastgelegd op  $0.7$ . Een hogere valsnelheid zal eveneens leiden tot een betere vangefficiëntie.



*Figuur 135. Efficiëntie sedimentopvang voor een bufferbekken aan de meetgoot te Maarkedal, in functie van de valsnelheid en het aangevoerde sediment, voor de simulatieperiode van december 2006 tot juli 2009.*



## 10 Gevoeligheidsanalyse op basis van het knelpuntgebied Boesdaal te Linkebeek, Sint-Genesius-Rode en Beersel

Voor deelopdracht drie van het onderzoek zal de continue simulatiemethode onderworpen worden aan een gevoeligheidsanalyse, om zo een idee te krijgen over de invloed van de verschillende parameters op zowel het benodigde volume als de terugkeerperiode van overloop. Er zal hierbij gebruik gemaakt worden van een vijfde gevalstudie, nl. het knelpuntgebied Boesdaal in de provincie vlaams-Brabant.

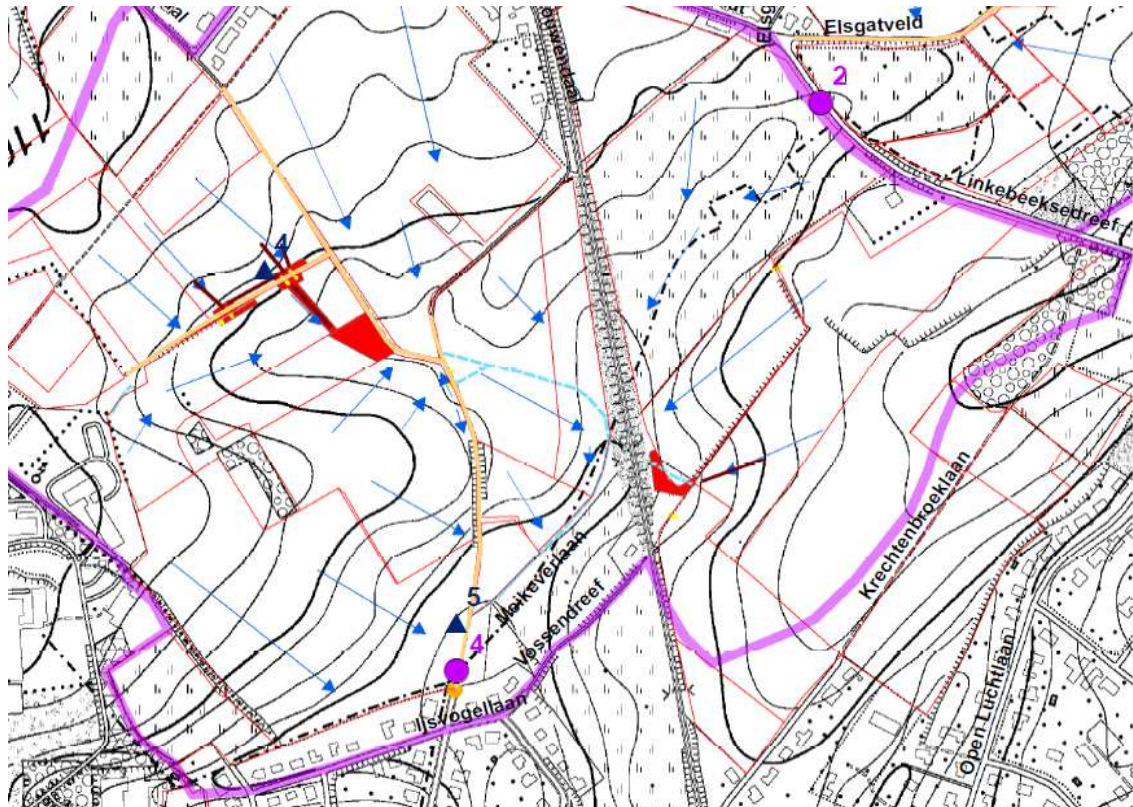
### 10.1 Gebiedsbeschrijving

Het volledige knelpuntgebied watert af naar de 'Hof ten Boesdaallaan', gelegen op de grens van de gemeenten Linkebeek, Sint-Genesius-Rode en Beersel. In de 'Hof ten Boesdaallaan' (verlengde van de veldweg; zie Figuur 136), ligt een dubbel rooster om het afspoelende water en sediment op te vangen. De opvangbak onder dit rooster dient zeer regelmatig geledigd te worden. Het water wordt afgevoerd naar de riolering van Sint-Genesius-Rode. Bij te hevige regenval stroomt water en modder naar de lager gelegen woonwijk, op grondgebied van de gemeente Sint-Genesius-Rode (Ijsvogellaan) (Figuur 137 en Figuur 138). Hier doet zich dus regelmatig water- en modderoverlast voor.

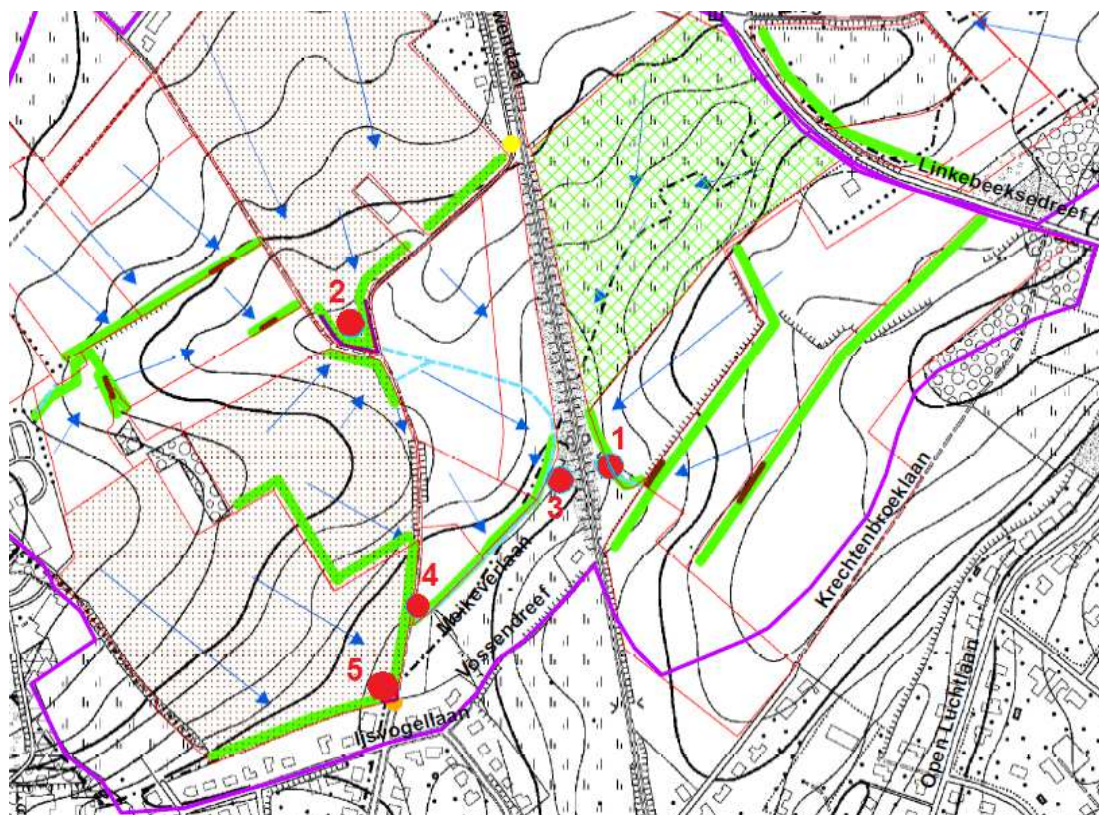


*Figuur 136. Situering van het knelpuntgebied Boesdaal. Boven links: geulen en sedimentatie; Boven rechts: dubbel rooster in 'Hof ten Boesdaallaan' (verlengde van de veldweg) om het afspoelende water en sediment op te vangen; Onder links: overlast in 'Hof ten Boesdaallaan'; Onder rechts: overlast op de Ijsvogellaan te Sint-Genesius-Rode.*





Figuur 137. Situering van het knelpuntgebied Boesdaal (Provincie Vlaams-Brabant, Infrastructuur/Waterlopen).



Figuur 138. Geplande maatregelen (rood: bufferbekkens, groen: grasbufferstroken) in het gemeentelijk erosiebestrijdingsplan van de gemeente Linkebeek (Provincie Vlaams-Brabant, Infrastructuur/Waterlopen).

Een groot deel van de oppervlakteafstroming is afkomstig van de akkers ten westen van de spoorweg in *Figuur 137* en *Figuur 138*. Om het stagnerend water en sediment van de velden af te voeren werden door een landbouwer grachten aangelegd dwars door het veld (richting spoorweg). Via een open aangelegd grachtje achter de huizen van de Meikeverlaan (Sint-Genesius-Rode) komt het water terecht in de roosters van Hof ten Boesdaallaan.

Een ander deel is afkomstig van akkers en weilanden ten oosten van de spoorweg (zie *Figuur 137* en *Figuur 138*). Het regenwater stroomt af naar een duiker onder de spoorweg, die aansluit op het grachtje achter de huizen van de Meikeverlaan. Op de graszone voor de duiker is er een kleine sedimentatiezone (enkel bij zachte neerslag is er sedimentatie).

Om de kans op water- en modderoverlast te verkleinen, is een erosieplan goedgekeurd en in uitvoering. Vijf erosiepoelen/bufferbekkens zijn gepland, waarvan één reeds uitgevoerd.

Ten oosten van de spoorweg wordt een buffering voorzien, net voor het water en sediment door de duiker onder de spoorweg stroomt. Het water uit de erosiepoel wordt vertraagd afgevoerd door de duiker. Deze buffering kan de eerste jaren echter niet uitgevoerd worden, omwille van plannen tot verbreding van de spoorwegbedding.

Ten westen van de spoorweg worden drie erosiepoelen gepland. Een eerste (nummer 3 in *Figuur 138*) is reeds uitgevoerd ter hoogte van een ruigte, ten westen van de spoorweg, waar de duiker uitkomt. Het water uit de bufferende erosiepoel (ongeveer 500 m<sup>3</sup>) wordt vertraagd (door middel van een knijpopening met diameter 15 cm) afgevoerd naar een riolering van Sint-Genesius-Rode (400 mm leiding). Een ander bufferbekken (nummer 4 in *Figuur 138*) is gepland op het einde van het grachtje achter de huizen van de Meikeverlaan (1760 m<sup>3</sup>), en een ander net voor het rooster in de Hof ten Boesdaallaan (nummer 5 in *Figuur 138*).

Op de akkers waar de oppervlakteafstroming vandaan komt is er een rotatie van wintergraan, aardappelen en maïs en soms bieten. Er zijn zeer weinig erosiegevoelige tot sterk erosiegevoelige teeltrotaties.

De doorstroom van de erosiepoelen/bufferbekkens zal afwateren naar de riolering van Linkebeek (voor de buffering ten oosten van de spoorweg) en Sint-Genesius-Rode (voor de buffering ten westen van de spoorweg). Het toelaatbaar doorvoerdebiet wordt in dit geval bepaald door de afvoercapaciteit van de riolering. De riolering mondt afwaarts uit in de Molenbeek (Zennebekken) en heeft regelmatig te kampen met overstromingen (vb. Beersel). De invloed op het afwaarts watersysteem vraagt dus een integrale rivier-rioleringsstudie. Zulke studie valt echter buiten het bestek van de huidige opdracht.

De gevalstudie beperkt zich hier tot het berekenen van de terugkeerperiode van overloop van de verschillende voorziene bufferbekkens. Daarnaast zal op basis van deze gevalstudie een gevoeligheidsanalyse uitgevoerd worden op de verschillende gebiedskarakteristieken, zoals de runoff-coëfficiënt en de concentratietijd, aangezien deze onbekend zijn voor dit gebied. Deze gevalstudie geeft met andere woorden een mooi voorbeeld voor het ontwerpen of narekenen van een bufferbekken.

## 10.2 Analyse met vaste parameterwaarden

Op basis van *Figuur 138* en een topografische kaart werd een ruwe schatting gemaakt van de toestroomoppervlakte van elk bufferbekken. Voor de bijhorende concentratietijd werd gebruik gemaakt van de empirische formules van deel 3.3.6. Het volume van elk bufferbekken is gekend op basis van de informatie aangeleverd door de provincie Vlaams-Brabant. Het doorvoerdebiet werd berekend met behulp van de diameter van de knijpopening en het maximale waterpeil in het bufferbekken. Deze waarden zijn samengevat in Tabel 38. Er is hierbij een onderscheid gemaakt tussen twee situaties, nl. het al dan niet verwezenlijkt zijn van de bufferbekkens 1 en 2.

Op basis van de waarden in Tabel 38 is eerst een analyse gemaakt van de overstortfrequentie van de drie bufferbekkens met vaste waarden voor de parameters. In een volgende stap (zie deel 10.3) is dan via een gevoeligheidsanalyse gekeken in welke mate het benodigde buffervolume en/of de overlooffrequentie zal wijzigen. De analyse beperkt zich tot situatie 2, daar er voor situatie 1 nog te weinig informatie beschikbaar is.

Tabel 38. Karakteristieken bufferbekkens in het knelpuntgebied Boesdaal.

Nr.	Situatie 1		Situatie 2		Volume [m <sup>3</sup> ]	Doorvoer-debiet [l/s]
	Opp. [ha]	Tc [min]	Opp. [ha]	Tc [min]		
1	21.3	30 - 40	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.	n.b.
2	7.5	20 - 30	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.	n.b.
3	Uitlaat bekken 1	n.v.t.	21.3	30 - 40	500	80
4	Uitlaat bekken 2 + 16	20 - 30	23.5	20 - 30	1760	520
5	9.3	10 - 15	9.3	10 - 15	1250	65

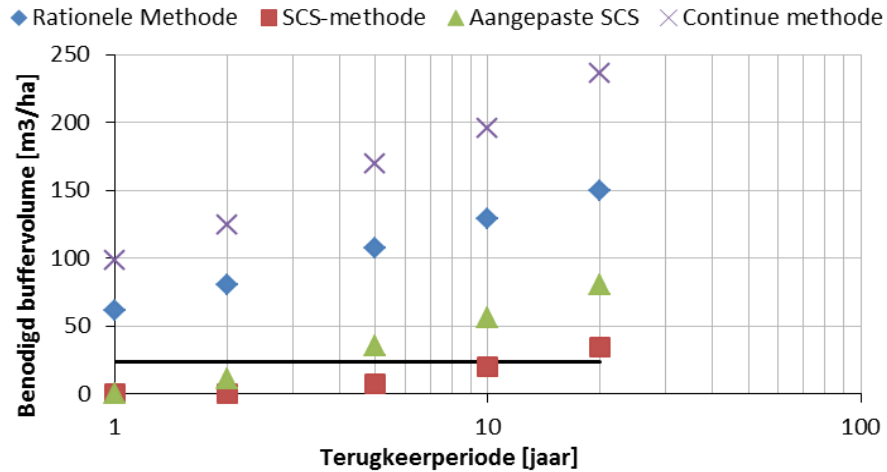
In eerste instantie is de benodigde buffercapaciteit voor de drie bufferbekkens berekend op basis van vaste waarden voor de verschillende parameters. Dit is gedaan met behulp van de vier methodes die ook in de andere gevalstudies werden toegepast, cfr. de delen 9.1 en 9.2. Voor de runoff-coëfficiënt werd een waarde van 0.6 aangenomen en voor het Curve Number een waarde van 84. Dit zijn de waarden die standaard gebruikt worden bij een ontwerp door de provincie Vlaams-Brabant. Aangezien de afvoer van de bufferbekkens via een knijpleiding gebeurt, werd gekozen voor een afvoer die via een vierkantswortel-relatie verband houdt met het gebufferde volume.

De benodigde buffercapaciteiten (in m<sup>3</sup> per ha) voor de drie bufferbekkens en voor de vier verschillende methodes zijn samengevat in Tabel 39 en onderling vergeleken in Figuur 139 tot en met Figuur 141. Overeenkomstig de eerdere analyses onderschatten de SCS-methode en de aangepaste variant in sterke mate de benodigde buffercapaciteit, in vergelijking met de rationele en de continue simulatiemethode. De nauwkeurigere continue simulatiemethode levert opnieuw de hoogste bergingsvolumes op en het verschil met de rationele methode neemt ook toe voor hogere terugkeerperiodes.

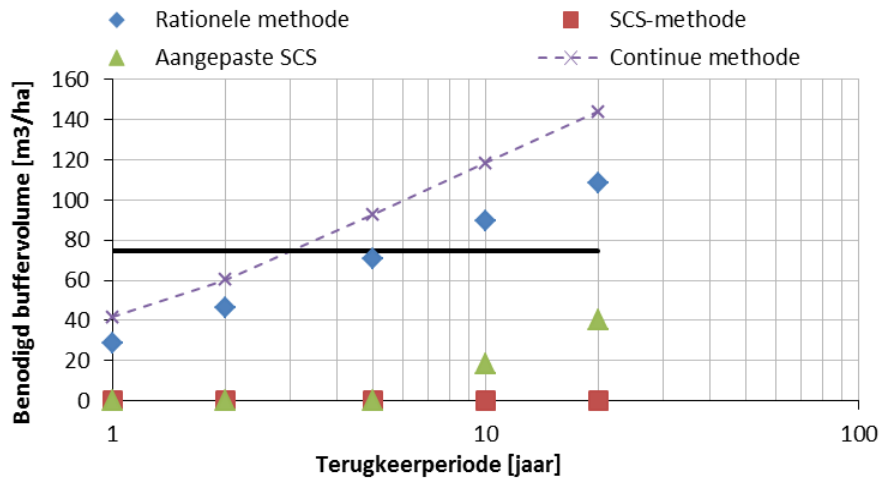
Tabel 39. Nodige en voorziene buffervolumes, in m<sup>3</sup> per ha, in functie van de terugkeerperiode van de overlaat voor de drie bufferbekkens in het knelpuntgebied Boesdaal.

	Bekken 3	Bekken 4	Bekken 5
<b>Rationele methode</b>			
1 jaar	61.4	28.5	57.5
2 jaar	80.4	46.3	73.1
5 jaar	107.8	70.8	94.0
10 jaar	128.9	89.6	109.9
20 jaar	150.1	108.4	125.8
<b>SCS-methode</b>			
1 jaar	0	0	0
2 jaar	0	0	0
5 jaar	7.4	0	1.8
10 jaar	19.6	0	9.2
20 jaar	34.4	0	18.2
<b>Aangepaste SCS-methode</b>			
1 jaar	0	0	0
2 jaar	11.4	0	7.2
5 jaar	34.9	0	25.0
10 jaar	56.2	18.6	41.0
20 jaar	80.8	40.4	59.3

<b>Continue simulatie methode</b>			
1 jaar	98.6	41.6	80.5
2 jaar	124.8	60.1	104.3
5 jaar	169.4	92.8	142.2
10 jaar	195.6	118.4	177.3
20 jaar	236.3	144.0	204.7
<b>Voorziene volume</b>			
	23.5	74.9	134.4

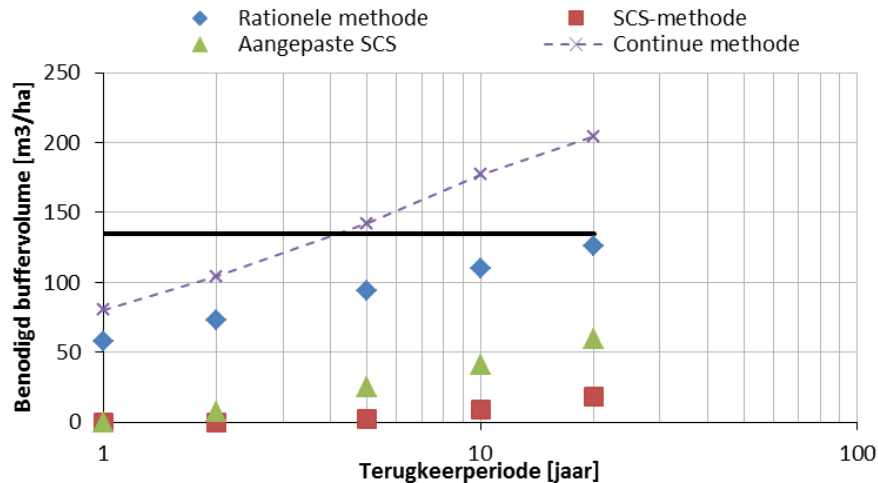


Figuur 139. Benodigd en voorziene (zwarte lijn) bergingsvolume (in m<sup>3</sup> per ha) voor bufferbekken 3, in functie van de terugkeerperiode voor verschillende methodes.



Figuur 140. Benodigd en voorziene (zwarte lijn) bergingsvolume (in m<sup>3</sup> per ha) voor bufferbekken 4, in functie van de terugkeerperiode voor verschillende methodes.

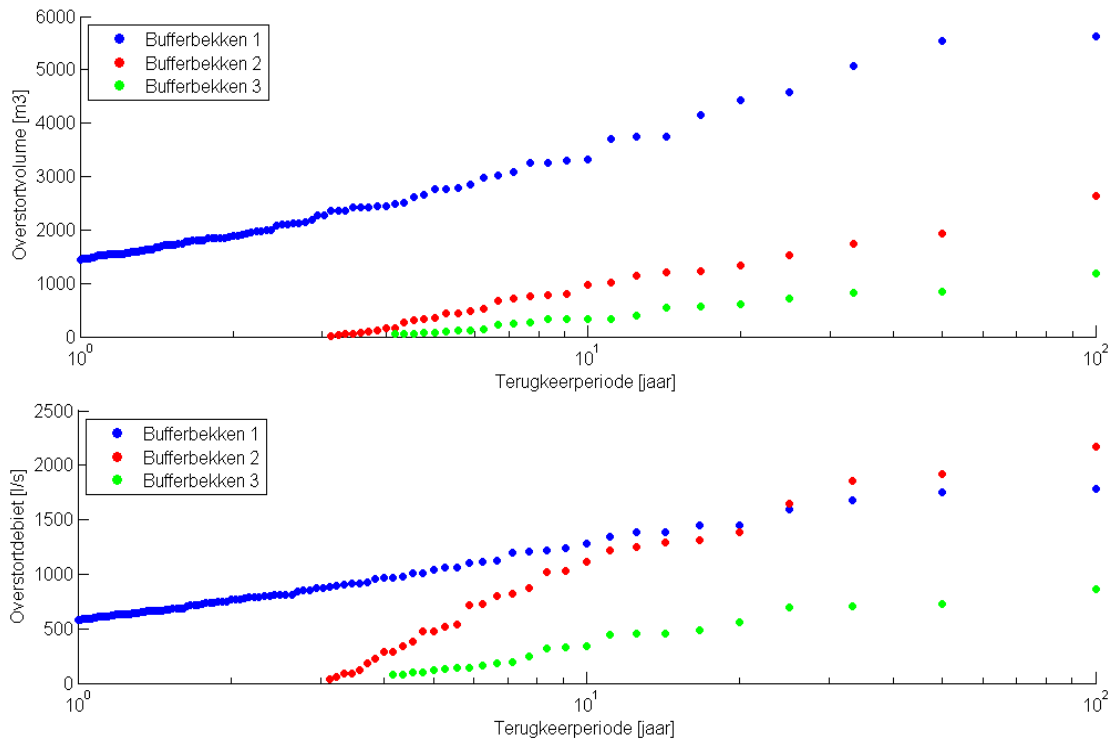




Figuur 141. Benodigd en voorziene (zwarte lijn) bergingsvolume (in m<sup>3</sup> per ha) voor bufferbekken 5, in functie van de terugkeerperiode voor verschillende methodes.

Naast het benodigde buffervolume per hectare is in Figuur 139 tot Figuur 141 ook het voorziene buffervolume per hectare aangegeven, met een zwarte lijn. Het snijpunt van deze zwarte lijn met de stippellijn, die de punten van de continue simulatiemethode verbindt, geeft al een eerste indicatie van de terugkeerperiode van overloop van de bufferbekkens. De terugkeerperiode van overloop kan ook expliciet berekend worden op basis van de concentratietijd, toestroomoppervlakte, buffervolume en doorvoerdebiet. Het resultaat van deze berekening (overloopvolumes en -debieten) voor de drie bufferbekkens is getoond in Figuur 142. Het aantal overstorten per bufferbekken en bijhorende terugkeerperiode is samengevat in Tabel 40. De terugkeerperiodes voor de bufferbekkens 4 en 5 ligt in de verwachtingen van de figuren hierboven. Ze liggen echter beduidend lager dan bij het ontwerp van de bekkens voorop werd gesteld. De provincie Vlaams-Brabant vertrekt nl. van een ontwerp bui met een terugkeerperiode van 10 jaar.

Voor het eerste bufferbekken wordt een groot aantal overstortgebeurtenissen geregistreerd, als gevolg van de grote toestroomoppervlakte (21.3 ha) en de beperkte doorvoer (80 l/s, dit is 3.8 l/(s.ha)). Deze resultaten dienen echter met een kritische blik bekeken te worden. In de berekeningen is namelijk verondersteld dat al het regenwater zonder oponthoud kan afstromen naar het bufferbekken. In werkelijkheid wordt dit bekken echter gevoed door het gebied ten oosten van de spoorweg en gevuld via een duiker onder de spoorwegbedding. Dit is vergelijkbaar met de situatie van de Heulen gracht in Velm, waar het meest opwaartse bufferbekken ook gevoed wordt door een duiker onder een weg. Omwille van die duiker zal een deel van het water geborgen worden in de weiden ten oosten van de spoorwegbedding en wordt het bufferbekken trager gevuld. De werkelijke terugkeerperiode zal dus hoger liggen dan de 0.07 jaar (ca. eenmaal per maand) die hier berekend werd. Een nauwkeurige berekening hiervan eist echter meer gedetailleerde informatie over zowel de duiker als het gebied ten oosten van de spoorwegbedding.



Figuur 142. Overloopvolume in  $m^3$  (boven) en piekoverloopdebiet in  $l/s$  (onder) versus terugkeerperiode voor de drie bufferbekkens van het knelpuntgebied Boesdaal.

Tabel 40. Aantal overstortgebeurtenissen en bijhorende empirische terugkeerperiode na doorrekening 100-jarige Ukkel neerslagreeks voor de drie bufferbekkens in het knelpuntgebied Boesdaal.

	bekken 3	bekken 4	bekken 5
<b>Aantal overstort gebeurtenissen</b>	1373	32	24
<b>Terugkeerperiode [jaar]</b>	0.073	3.125	4.167

### 10.3 Gevoeligheidsanalyse

Omwille van de onzekerheid op verschillende parameters die betrekking hebben op de berekening van het benodigde buffervolume en de terugkeerperiode zijn deze hierna onderworpen aan een gevoeligheidsanalyse. Er zal hierbij gekeken worden naar de concentratietijd, de waarde van een constante runoff-coëfficiënt of een variabele runoff-coëfficiënt en de invloed van klimaatscenario's. Wanneer naar de invloed van de wijziging van één van de parameters gekeken wordt, behouden de andere een constante waarde zoals die gegeven is in deel 10.2.

#### 10.3.1 Concentratietijd

De concentratietijd van de verschillende gebieden in Tabel 38 werd berekend met behulp van de empirische methodes uit deel 3.3.6, op basis van inschattingen van de oppervlakte en de helling van het gebied en het landgebruik. De resultaten van de verschillende formules vertonen echter een beduidende variatie en de waarde moet bovendien afgerond worden tot op 10 minuten om te kunnen gebruiken in de continue simulatiemethode. Tabel 41 geeft aan hoe sterk de benodigde buffercapaciteit varieert wanneer de concentratietijd met 10 minuten wijzigt. De vergelijking werd gemaakt voor een terugkeerperiode van 10 jaar, wat overeenkomt met de keuze voor de ontwerpbui die de provincie Vlaams-Brabant maakt. De werkelijke terugkeerperiode (op basis van de 100-jarige Ukkel neerslagreeks) werd eveneens berekend voor de verschillende concentratietijden.

De benodigde buffercapaciteit zal in beperkte mate dalen voor een toename van de concentratietijd. Dit strookt met de verwachtingen: wanneer de concentratietijd groter is, zal het langer duren vooraleer al het afstromende water het bufferbekken bereikt. Er is dus meer tijd beschikbaar om (een deel van) het water af te voeren. De mate van afname zal bijgevolg ook gerelateerd zijn aan het maximale doorvoerdebiet: hoe groter dit is, hoe sterker het benodigde volume zal afnemen. De afname blijft echter beperkt doordat de totale neertrashhoeveelheid niet verandert.

Omgekeerd aan de afname van het benodigde buffervolume zal de terugkeerperiode van overloop voor de huidige situatie in Boesdaal uiteraard toenemen. De toename is het grootst voor bufferbekken 4, omwille van het grote doorvoerdebiet. Bij bufferbekken 3 is de toename van de terugkeerperiode beperkt, al daalt het aantal overloopgebeurtenissen wel sterk (van 1433 voor een concentratietijd van 30 minuten, naar 1247 voor 60 minuten). Voor bufferbekken 5 is er geen verandering in de terugkeerperiode.

Tabel 41. Benodigde buffervolumes ( $V$ ) voor een terugkeerperiode van 10 jaar en berekende terugkeerperiode ( $T_p$ ), in functie van de concentratietijd van het toestroomgebied.

Concentratie-tijd [min]	Bekken 3		Bekken 4		Bekken 5	
	$V$ [m <sup>3</sup> /ha]	$T_p$ [jaar]	$V$ [m <sup>3</sup> /ha]	$T_p$ [jaar]	$V$ [m <sup>3</sup> /ha]	$T_p$ [jaar]
10	-	-	-	-	174.43	4.17
20	-	-	123.9	2.70	172.14	4.17
30	196.6	0.070	117.9	3.13	172.14	4.17
40	195.6	0.073	113.6	3.85	-	-
50	194.6	0.076	-	-	-	-
60	192.5	0.080	-	-	-	-

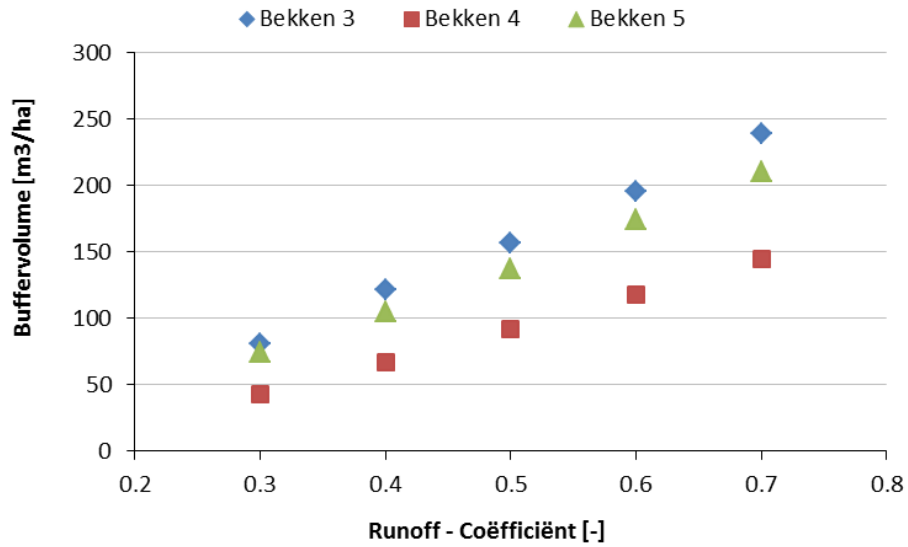
Algemeen kan besloten worden dat de invloed van het verkeerd inschatten van de concentratietijd (een verschil van tien minuten) slechts een beperkte invloed zal hebben op het benodigde buffervolume en de berekende terugkeerperiode.

### 10.3.2 Runoff-coëfficiënt

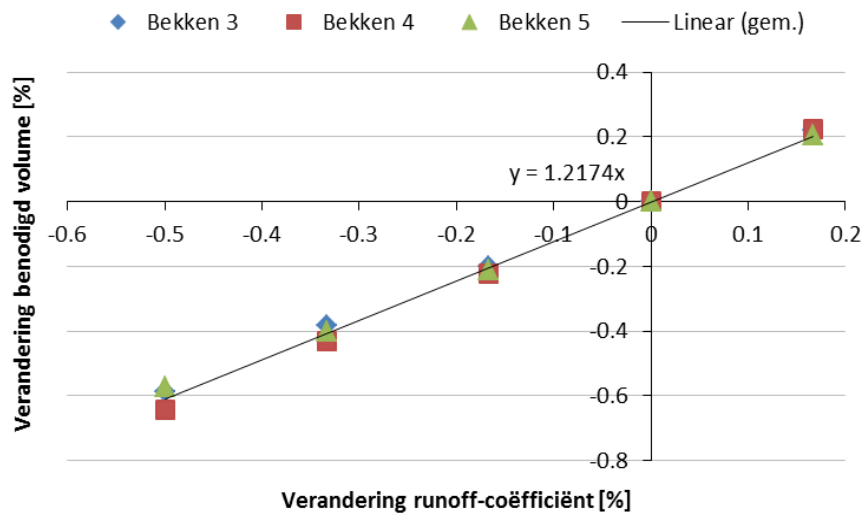
De Provincie Vlaams-Brabant gebruikt standaard een vaste waarde van 0.6 voor de runoff-coëfficiënt bij de berekening van het afstromingsvolume. Voor een leemhoudende bodem in (sterk) heuvelend gebied wordt in de code van goede praktijk voor erosiebestrijdingswerken voor weiden en akkerland een waarde aangeraden die tussen 0.2 en 0.7 ligt (zie ook Tabel 7). De gebruikte waarde van 0.6 ligt dus dicht in de buurt van de bovengrens, wat op zich geen probleem hoeft te zijn aangezien de bekken ontworpen zijn op extreme situaties.

Figuur 143 geeft aan hoe het benodigde buffervolume wijzigt in functie van de waarde van de runoff-coëfficiënt. Het is duidelijk en logisch dat het benodigde buffervolume stijgt met een toenemende runoff-coëfficiënt doordat het afstroomvolume toeneemt. In tegenstelling tot de concentratietijd zijn er voor het benodigde buffervolume wel grote verschillen zichtbaar, t.o.v. de initiële waarden, juist omdat de runoff-coëfficiënt in sterke mate het afstromingsvolume bepaalt. Het benodigde buffervolume wijzigt echter niet in dezelfde verhouding als de runoff-coëfficiënt, zoals Figuur 144 en Tabel 52 aantonen. Zo zal een daling van de runoff-coëfficiënt met 20% leiden tot een daling van het benodigde buffervolume met 25%. Omgekeerd zal een runoff-coëfficiënt die 10% hoger ligt, zorgen voor een toename van het benodigde buffervolume met 13%. Dit fenomeen kan toegeschreven worden aan het dynamisch gedrag van het bufferbekken: in geval van een groter bufferbekken zal het langer duren vooraleer het maximale debiet (dat via een vierkantswortelrelatie afhankelijk is van het volume) bereikt wordt, waardoor het water minder snel afgevoerd kan worden.





Figuur 143. Benodigde buffervolume voor de drie bufferbekkens in het knelpuntgebied Boesdaal, in functie van de runoff-coëfficiënt



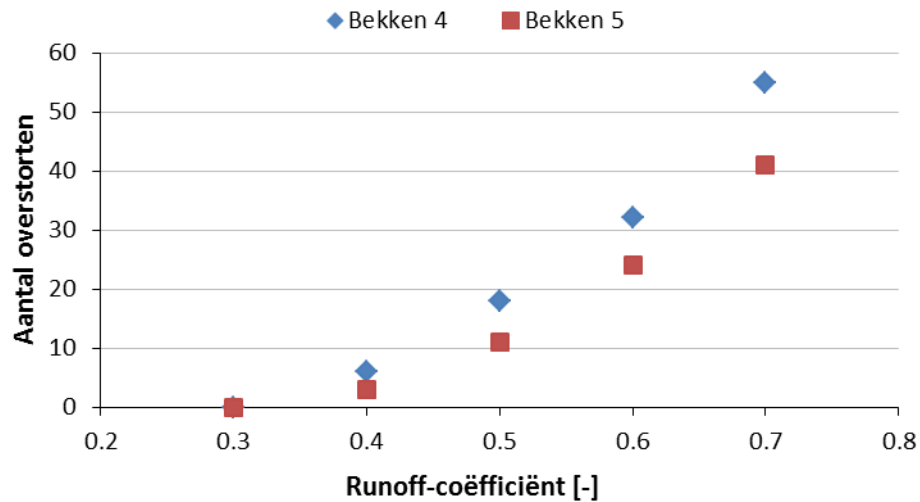
Figuur 144. Verandering benodigd buffervolume versus verandering runoff-coëfficiënt, t.o.v. de initiële waarden

Tabel 42. Procentuele verandering benodigd buffervolume ( $\Delta V$ ) versus verandering runoff-coëfficiënt ( $\Delta\phi$ ), t.o.v. de initiële waarden

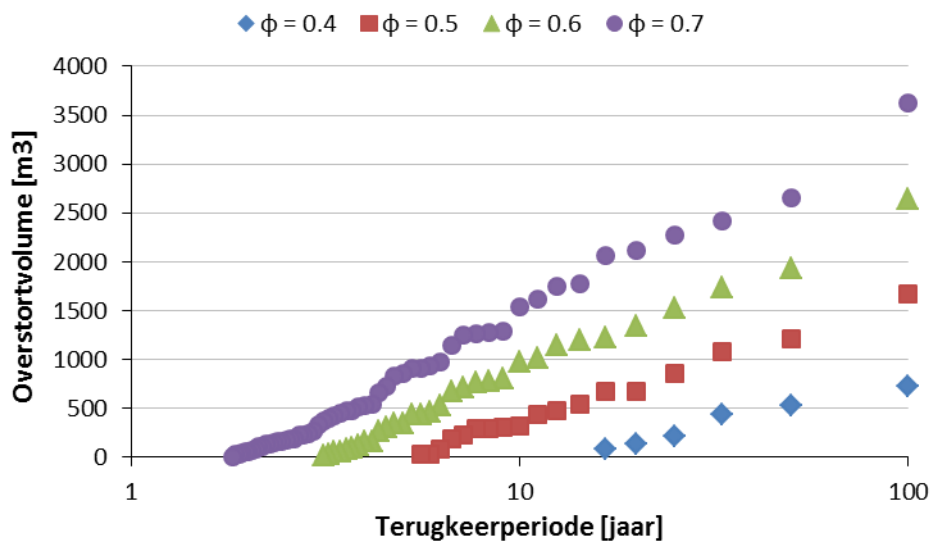
Runoff-coëfficiënt	$\Delta\phi$	$\Delta V$ Bekken 3	$\Delta V$ Bekken 4	$\Delta V$ Bekken 5	$\Delta V$ gemiddeld
0.3	-50	-59	-64	-57	-60
0.4	-33	-38	-43	-40	-41
0.5	-17	-20	-22	-21	-21
0.6	0	0	0	0	0
0.7	17	22	23	20	22

De beste manier om het dynamisch gedrag van het bufferbekken na te gaan is om de 100-jarige Ukkel neerslagreeks door te rekenen voor verschillende waarden van de runoff-coëfficiënt. Voor de drie bufferbekkens te Boesdaal werd dit uitgevoerd voor runoff-coëfficiënten variërend tussen 0.3 en 0.7. Figuur 146, Figuur 146 en Tabel 43 tonen dat het aantal

overloopegebeurtenissen zoals verwacht kan worden, stijgt met een toenemende runoff-coëfficiënt. De toename is bovendien niet lineair, maar eerder volgens een convex verband. Omwille van het grotere toestroomgebied zal de toename sterker zijn voor bufferbekkens nr. 4.



Figuur 145. Aantal overloopegebeurtenissen voor bufferbekkens 4 en 5 in het knelpuntgebied Boesdaal, in functie van de runoff-coëfficiënt.



Figuur 146. Overloopvolumes versus terugkeerperiode, in functie van de runoff-coëfficiënt voor bufferbekkens 4 in het knelpuntgebied Boesdaal.

Tabel 43. Aantal overloopegebeurtenissen en bijhorende terugkeerperiode ( $T_p$ ) voor de bufferbekkens in het knelpuntgebied Boesdaal, in functie van de runoff-coëfficiënt.

Runoff-coëfficiënt	Bekken 3		Bekken 4		Bekken 5	
	aantal	$T_p$ [jaar]	aantal	$T_p$ [jaar]	aantal	$T_p$ [jaar]
0.3	247	0.40	0	-	0	-
0.4	520	0.19	6	16.67	3	33.33
0.5	889	0.11	18	5.56	11	9.09
0.6	1373	0.07	32	3.13	24	4.17
0.7	1941	0.05	55	1.82	41	2.44

Tot nu toe werd voor de runoff-coëfficiënt een constante waarde verondersteld, die dicht in de buurt ligt van de maximale waarde voor dit type gebied. In werkelijkheid zal de runoff-coëfficiënt variëren als gevolg van een groot aantal wijzigende factoren (verzadigingsgraad bodem, verslumping, bodemgebruik, ...). Het rekenen met een constante waarde geeft bijgevolg een vertekend beeld van de werkelijk optredende situatie, bijvoorbeeld in de zomer wanneer de runoff-coëfficiënt typisch lager ligt dan in de wintermaanden. De convectieve zomeropwekkers, met hoge piekintensiteiten, zullen dan meestal aanleiding geven tot overstorten, terwijl dit in werkelijkheid niet het geval hoeft te zijn. In het rekeninstrument werd daarom de mogelijkheid voorzien om per maand een verschillende waarde in te geven voor de runoff-coëfficiënt. Het idee hierachter is dat de vele factoren die de runoff-coëfficiënt beïnvloeden niet expliciet gemodelleerd worden, maar dat hun invloed via een maandelijks gemiddelde toch in rekening gebracht wordt.

Voor deze analyse werd de maandelijks variatie van de runoff-coëfficiënt opgesteld op basis van Tabel 12 in deel 3.4.3.1. Het studiegebied behoort tot het stroomgebied van de Zenne en de maximale waarde van de runoff-coëfficiënt werd gelijk gesteld aan 0.6 en 0.7, wat overeenkomt met een gemiddelde waarde van respectievelijk 0.3 en 0.34. De overige parameters werden ongemoeid gelaten.

*Tabel 44. Maandelijks variatie runoff-coëfficiënt knelpuntgebied Boesdaal, met 0.6 en 0.7 als maximale waarde.*

Maandnr.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
<b>Geval 1</b>	0.60	0.44	0.52	0.23	0.13	0.12	0.11	0.10	0.12	0.20	0.39	0.56
<b>Geval 2</b>	0.70	0.52	0.61	0.27	0.15	0.14	0.13	0.11	0.14	0.23	0.45	0.65

De invloed van het laten variëren van de runoff-coëfficiënt is aanzienlijk. Bufferbekkens 4 en 5 ten westen van de spoorwegberm zullen in beide gevallen geen overloopgebeurtenissen meer vertonen. Voor bufferbekkens 3 daalt het aantal naar 304 voor een maximale waarde van 0.7 en naar 172 in geval van 0.6 als maximale waarde. Dit is beduidend lager dan het initiële aantal van 1373. Dit duidt erop dat de meeste overloopgebeurtenissen zich voordoen in de zomer en slechts een beperkt aantal in de winter. Voor bufferbekkens 4 en 5 geeft Tabel 43 aan dat dit pas zal gebeuren bij waarden van de runoff-coëfficiënt vanaf 0.3, terwijl de waarden in de zomermaanden in deze berekeningen niet hoger zijn dan 0.15. Deze waarden voor de runoff-coëfficiënt zijn echter gebaseerd op maandgemiddelde runoffvolumes, terwijl bij de eerdere gevalstudies (deel 9.3 en 9.4) reeds aangetoond is dat de runoff-coëfficiënt in kleinere opwaartse stroomgebiedjes in hellend gebied beduidend hoger kan zijn voor extreme zomerbuien. De precieze waarde van de runoff-coëfficiënt is dus zeer onzeker.

Bovenstaande analyses, zowel met een vaste runoff-coëfficiënt als met een variabele, tonen nogmaals aan dat de waarde van de runoff-coëfficiënt de belangrijkste parameter is bij het bepalen van de terugkeerperiode van overloop van een systeem en bij het berekenen van de benodigde buffercapaciteit. Het bepalen van een zo nauwkeurig mogelijke waarde is dus uitermate belangrijk om een zo realistisch mogelijk resultaat te bekomen.

### 10.3.3 *Klimaatscenario's*

In het rekeninstrument werden, naast de originele Ukkel-neerslagreeks, ook nog enkele reeksen voorzien die aangepast zijn volgens de Belgische klimaatscenario's. Meer informatie over hoe deze reeksen opgemaakt zijn, kan gevonden worden in deel 3.9 en Willems (2009a). Hier is een vergelijking gemaakt tussen de vier beschikbare reeksen: het huidige klimaat, het midden- en hoog/nat klimaatscenario en het hoog scenario voor de zomer, wat een sterke stijging van de extreme zomerbuien inhoudt. Deze laatste reeks is van belang, omdat eerder al gebleken is dat vooral zomeropwekkers verantwoordelijk zijn voor overloopgebeurtenissen. De parameters die het toestroomgebied beschrijven werden niet gewijzigd. Het aantal overloopgebeurtenissen en de bijhorende terugkeerperiodes voor de vier klimaatscenario's zijn samengevat in Tabel 45.

Tabel 45. Aantal overloopgebeurtenissen en bijhorende terugkeerperiode voor de bufferbekkens in het kneluntgebied Boesdaal, voor de verschillende klimaatscenario's.

klimaatscenario	Bekken 3		Bekken 4		Bekken 5	
	Aantal	Tp [jaar]	Aantal	Tp [jaar]	Aantal	Tp [jaar]
huidig	1373	0.073	32	3.125	24	4.167
midden	1531	0.065	47	2.128	42	2.381
hoog	1584	0.063	40	2.500	38	2.632
hoog in zomer	1694	0.059	107	0.935	99	1.010

Het mag niet verbazen dat de drie nieuwe klimaatscenario's een groter aantal overloopgebeurtenissen voorspellen dan de huidige neerslagreeks, aangezien deze vooral een toename van de neerslag inhouden. Wat echter wel opvalt is de mate waarin de aantallen toenemen: het midden-klimaatscenario vertoont voor bekken 4 en 5 namelijk meer overloopgebeurtenissen dan het hoge scenario. Dit wordt veroorzaakt doordat de hoge klimaatscenario's op twee manieren aangepast zijn: enerzijds een toename van de piekneerslagintensiteiten en anderzijds een sterke daling van het aantal regendagen in de zomer. Sommige buien, die in de andere scenario's wel aanleiding geven tot overloop, zullen dus krimpen of verdwijnen.

Het hoog klimaatscenario voor de zomer veroorzaakt een zeer sterke toename (tot 200 à 300%) van het aantal overloopgebeurtenissen, wat overeenkomt met de eerdere conclusie dat overloopgebeurtenissen zich vooral in de zomer zullen voordoen, als gevolg van de veronderstelde hoge runoff-coëfficiënt en de hoge(re) neerslagintensiteiten van convectieve zomeronweders.

#### 10.3.4 Knijphoogte en oppervlakteberging

Tot slot zijn er bij het doorrekenen van de 100-jarige Ukkel-neerslagreeks met behulp van de rekentool nog twee parameters die een invloed hebben op het aantal overstortgebeurtenissen: de hoogte van de knijpleiding en de oppervlakteberging.

De hoogte van de knijpleiding kan aangepast worden omdat deze zich niet altijd volledig onderaan het bufferbekken bevindt. De hoogte wordt relatief gedefinieerd, ten opzichte van de bodem van het bufferbekken. In de zone onder de knijpleiding kan het geërodeerde sediment dan veel beter bezinken. Tabel 46 toont aan dat het aantal overstortgebeurtenissen sterk kan toenemen door de knijpopening hoger te leggen. Deze toename wordt veroorzaakt doordat het hoger leggen van de doorvoerleiding overeenkomt met het verminderen van het bergingsvolume, aangezien het volume water onder de knijphoogte niet weg kan. Een knijphoogte op 50 % van de totale hoogte komt dus overeen met een halvering van het beschikbare buffervolume. Dit blijkt ook uit een eenvoudig voorbeeld: wanneer het buffervolume verdubbeld wordt, bij een knijphoogte van 50 %, wordt nagenoeg hetzelfde aantal overstortgebeurtenissen bekomen als bij het oorspronkelijke volume met de doorvoerleiding helemaal onderaan.

Tabel 46. Aantal overloopgebeurtenissen en bijhorende terugkeerperiode voor de bufferbekkens in het kneluntgebied Boesdaal, voor verschillende knijphoogtes.

Knijphoogte [%]	Bekken 3		Bekken 4		Bekken 5	
	Aantal	Tp [jaar]	Aantal	Tp [jaar]	Aantal	Tp [jaar]
0	1373	0.07	32	3.13	24	4.17
15	1662	0.06	46	2.17	33	3.03
30	2066	0.05	69	1.45	65	1.54
50	2779	0.04	118	0.85	155	0.65

Uit de gevalstudies van de Heulen gracht (deel 9.3) en Maarkedal (deel 9.4) is gebleken dat de beste modelresultaten bekomen worden wanneer 1 of 2 mm oppervlakteberging in rekening wordt genomen. Deze oppervlakteberging zorgt ervoor dat niet elke kleine bui tot neerslagafstroming leidt. In Tabel 47 wordt aangegeven hoe het aantal overstortgebeurtenissen daalt voor een hogere oppervlakteberging. De invloed van het inrekenen van een oppervlakteberging is dat een eerste gedeelte van de bui niet leidt tot oppervlakteafstroming, waardoor het totale afstroomvolume en dus ook het aantal overstortgebeurtenissen daalt. Deze invloed hiervan is kleiner voor de hogere pieken dan voor de lagere. De daling is dan ook het grootst voor bufferbekkens met een groot aantal overstortgebeurtenissen.

*Tabel 47. Aantal overloopgebeurtenissen en bijhorende terugkeerperiode voor de bufferbekkens in het kneluntgebied Boesdaal, voor verschillende knijphoogtes.*

Oppervlakte-Berging [mm]	Bekken 3		Bekken 4		Bekken 5	
	Aantal	Tp [jaar]	Aantal	Tp [jaar]	Aantal	Tp [jaar]
0	1373	0.07	32	3.13	24	4.17
1	1021	0.10	28	3.57	21	4.76
2	896	0.11	24	4.17	17	5.88
3	808	0.12	23	4.35	16	6.25

## 11 Aanbevelingen m.b.t. bijkomende monitoring

Op basis van de voorgaande gevalstudies, en de gevoeligheidsanalyse (die deel uitmaakt van deze deelopdracht 3) mag het duidelijk zijn dat een nauwkeurigere kennis van de runoff-coëfficiënt en de verklarende variabelen ervan tot een meer accurate schatting van het benodigde bergingsvolume zullen leiden. Vooral het tijdsvariabele karakter van de runoff-coëfficiënt op basis van zijn verklarende variabelen is hierbij van belang, aangezien er duidelijke verschillen bestaan tussen zomer- en winterperiodes. Het is niet alleen de waarde van de runoff-coëfficiënt die verschilt in zomer en winter, maar ook de intensiteit en duur van de neerslag. Beiden zullen bijgevolg een grote invloed hebben op de overloopfrequentie van een bufferbekken. Hierna volgen een aantal voorstellen om de kennis over het tijdsvariabele karakter van de runoff-coëfficiënt te verhogen op basis van meetcampagnes.

### 11.1 Meetgoten

De meest nauwkeurige en eenvoudige manier om de tijdsvariatie van de runoff-coëfficiënt te bestuderen blijft het gebruik van meetgoten, zoals aan de Heulengracht en in Maarkedal. Door gedurende enkele jaren zowel neerslag als afstromingsdebieten te meten kan men een goed idee krijgen van de evolutie van de runoff-coëfficiënt in de tijd.

Aan het gebruik van dergelijke meetgoten zijn echter enkele nadelen verbonden. De resultaten van de meetgoot zullen enkel een nauwkeurig beeld geven van de tijdsvariatie van de runoff-coëfficiënt voor dat specifieke gebied. Er zijn echter te veel variabelen (o.a. bodemgebruik, terreinhelling, bodemtype, grondwaterstand ...) die een invloed hebben op de runoff-coëfficiënt en die gebiedsgebonden zijn. Het is dus zeer moeilijk om de analyse voor een bepaald toestroomgebied te extrapoleren naar een ander gebied, tenzij op basis van de hiervoor genoemde variabelen gebieden kunnen afgebakend worden met gelijkaardige gebiedseigenschappen. Elk van deze "homogene gebieden" zou dan voorzien kunnen worden van een meetgoot. Dit vraagt in ieder geval een groot aantal meetgoten verspreid over Vlaanderen. De voornaamste vraag hierbij is of dit realistisch en kostenefficiënt is, gezien hun hoge installatie- en onderhoudskost.

Een tweede nadeel is dat meetgoten enkel de oppervlakteafstroming registreren, terwijl de runoff-coëfficiënt ook sterk bepaald wordt door o.a. de verzadigingsgraad van de bodem, het bodemgebruik en de bodemberwerking. Bijkomende continue metingen zijn dus nodig om deze factoren afdoende te registreren en zo de tijdsvariatie van de runoff-coëfficiënt te verklaren.

### 11.2 Neerslagsimulaties

In het 2005 voerden Evrard et al. (2007c) gedurende een aantal maanden van het jaar neerslagsimulaties uit in het gebied van de Heulen gracht. De simulaties werden uitgevoerd op een groot aantal percelen, met een variatie in bodemgebruik, verslempingsgraad, oppervlakteruwheid en bedekkingsgraad. Deze simulaties hadden als doel de runoff-coëfficiënt en de kans op het voorkomen van modderstromen in functie van de karakteristieken van de bodem te bepalen. Uiteindelijk leverde dit een tabel op die per gewas en per maand een gemiddelde waarde voor de runoff-coëfficiënt geeft. Wanneer het relatieve aandeel van de verschillende teelten doorheen het jaar gekend is, kan een tijdsvariante runoff-coëfficiënt berekend worden.

Gelijkaardige analyses op andere bodemtypes en locaties kunnen een goed idee geven van de tijdsvariatie van de runoff-coëfficiënt. De simulaties dienen dan wel een groot bereik aan verschillende bodemtypes, bodemgebruiken, hellingen, stroomgebieden en dergelijke meer te bestrijken. Deze kunnen immers een belangrijk effect hebben op de runoff-coëfficiënt, zoals blijkt uit de verschillende gevalstudies.

Daarnaast moet er ook gelet worden op welke manier de neerslagsimulaties uitgevoerd worden. Evrard (2007c) maakte gebruik van een intensiteit van 60 mm/h gedurende 30 minuten, omdat dit overeenkwam met het optreden van de modderstromen die bestudeerd werden. Wanneer er enkel naar de runoff-coëfficiënt gekeken wordt is het beter dat de neerslagsimulaties

representatief zijn voor de neerslag in een bepaalde maand. In plaats van een constante neerslagintensiteit voor alle maanden is het nauwkeuriger om in de wintermaanden simulaties uit te voeren met een lange duur en een lagere intensiteit en in de zomer kortere buien met een hogere intensiteit. Op die manier wordt het gedrag van de bodem gesimuleerd onder meer reële omstandigheden.

Een derde aandachtspunt is dat de neerslagsimulaties uitgevoerd werden op zeer kleine gebiedjes (met een maximum van 1 m<sup>2</sup>). Deze kleine gebiedjes zijn echter niet representatief voor toestroomgebieden met afmetingen van enkele hectaren. Verschillende studies (o.a. Cerdan et al. (2004) voor leemgronden in Normandië en Stomph et al. (2002) op laboratoriumschaal) toonden aan dat de runoff-coëfficiënt daalt voor grotere toestroomgebieden of langere afstanden. Door het grotere stroomgebied komen immers meer factoren in beeld en ontstaat er ruimtelijke uitmiddeling. Onderweg zullen er verschillende factoren, bijvoorbeeld plasvorming, voor zorgen dat het water tegengehouden wordt. Het is dus niet evident om een verband op te stellen dat de runoff-coëfficiënt van een volledig toestroomgebied koppelt aan de resultaten van de neerslagsimulaties.

Naast de kleine neerslagsimulatoren die tot enkele vierkante meter kunnen bestrijken bestaan er ook grotere simulatoren met een bereik tot ca. 100 m<sup>2</sup>. Deze simulatoren zijn echter zeer groot, duur en onpraktisch in hun gebruik, wat er toe leidt dat ze slecht op één site tegelijkertijd gebruikt kunnen worden, aangezien metingen nodig zijn gedurende het jaar. Ook hier geldt echter dat de besproeide gebieden te klein zijn om extrapolatie naar stroomgebieden te verantwoorden (Hudson, 1993).

### 11.3 Bestaande bufferbekkens

Een derde mogelijkheid voor het inschatten van de runoff-coëfficiënt is het opmeten van waterpeilen in reeds bestaande bufferbekkens. Wanneer de oppervlakte van het toestroomgebied en het doorvoerdebiet gekend zijn kan de methodiek van de continue methode in de omgekeerde richting toegepast worden. Het uitgaande debiet kan namelijk gerelateerd worden aan het waterpeil in het bufferbekken (zie de formules in delen 3.6.2 en 3.7.4). Integratie van het doorvoer- en overloopdebiet over de tijd levert dan een schatting op van het afstroomvolume.

Gelijkaardig aan het gebruik van meetgoten zal de runoff-coëfficiënt deels bepaald worden door de karakteristieken van het toestroomgebied, wat extrapolatie naar andere gebieden moeilijk maakt. Een voldoende groot aantal metingen en het afleiden van verbanden met gebiedseigenschappen voor verschillende “homogene” gebieden kan hiervoor een mogelijke oplossing zijn.

### 11.4 Besluit

Een algemeen nadeel van de drie beschreven methodes is dat de metingen uitgevoerd moeten worden over een lange periode. Dit moet minstens één (hydrologisch) jaar zijn om de volledige tijdsvariatie van de runoff-coëfficiënt te bemeten. Nauwkeuriger is echter om de metingen gedurende meerdere jaren uit te voeren, aangezien individuele jaren kunnen afwijken van de lange-termijn neerslagstatistieken. Op lange termijn kunnen dergelijke metingen de nauwkeurigheid van het inschatten van de runoff-coëfficiënt dus in belangrijke mate verhogen.

## 12 Rekeninstrument

Om de toepassing van de continue simulatiemethode te ondersteunen werd door de uitvoerder van de studie een rekeninstrument ontwikkeld. Ze laat toe om voor een bepaald buffervolume de terugkeerperiode van overloop(volume) te berekenen, of om voor een bepaalde gewenste terugkeerperiode de benodigde bergingscapaciteit te berekenen. Ook wordt de rationale methode, de SCS-methode en de aangepaste SCS-methode toegepast, en vergeleken met de resultaten van de continue simulatiemethode. Ze creëert de figuren die bij de gevalstudies werden opgemaakt, zoals Figuur 58, Figuur 59, Figuur 60, Figuur 61, enz.

Bijlage D bevat de handleiding bij het gebruik van het rekeninstrument.



## 13 Referenties

- Auerswald, K., Winter, F., Disse, M., 2012. "Statistical approach to a better prediction of surface runoff", *Geophysical Research Abstracts*, vol. 14, EGU2012-664.
- Bergström, S., 1995. "The HBV model". In: Singh, V.P. (Ed.), "Computer models of watershed hydrology"; Highland Ranch, CO, USA: Water Resources Publications; 1995; 443-76.
- Berlamont, J., 1992. "Hydraulica", Acco, Leuven, 472 p.
- Berlamont, J., 2004. "Rioleringen", Acco, Leuven, 420 p.
- Biesemans, J., 2000. "Erosion modelling as support for land management in the Loess Belt of Flanders". Doctoraatsthesis, Universiteit Gent, 260 p.
- Braskerud, B.C., 2001. "Sedimentation in small constructed wetlands. Retention of particles, phosphorus and nitrogen in streams from arable watersheds. PhD dissertation, 2001:10, Agric. Univ. of Norway, Ås, Norway.
- Breuer, L., Huisman, J.A., Willems, P., Bormann, H., Bronstert, A., Croke, B.F.W., Frede, H., Gräff, T., Hubrechts, L., Jakeman, A.J., Kite, G.W., Lanini, J., Leavesley, G., Lettenmaier, D.P., Lindström, G., Seibert, J., Sivapalan, M., Viney, N.R., 2009. "Assessing the impact of land use change on hydrology by ensemble modelling (LUCHEM) I: Model intercomparison of current land use", *Advances in Water Resources*, vol. 32, nr. 2, 129-146.
- Bultot, F., Coppens, A., Dupriez, G., 1983. "Estimation de l'évapotranspiration potentielle en Belgique". *Publications/publicaties série/serie A*, No/Nr 112, Institut Royal Météorologique de Belgique - Koninklijk Meteorologisch Instituut van België, 28 p.
- Burnash, R.J.C, 1995. "The NWS River Forecast System - Catchment Modeling". In: *Computer models in watershed hydrology*, V.P. Singh (Ed.), Water Resources.
- Cabus, P. 2008. "River flow prediction through rainfall-runoff modelling with a probability-distributed model (PDM) in Flanders, Belgium". *Agricultural Water Management*, vol. 95, 859-868.
- Cabus, P., De Jongh, I., 2007. "Hydrologisch modelleren op onbemeten stroomgebieden: Een eenvoudig modelconcept op basis van PDM en waargenomen maximale afvoercoëfficiënten". *Tijdschrift Water, Thema Congres Watersysteemkennis 2006/2007: Modellen voor integraal waterbeheer in Vlaanderen*, vol. 32, 55-59.
- Cerdan O, Le Bissonnais Y, Govers G, Lecomte V, Van Oost K, Couturier A, King C, Dubreuil N. 2004. Scale effect on runoff from experimental plots to catchments in agricultural areas in Normandy. *Journal of Hydrology* 299: 4 –14.
- Chang, C., 1992. "Physically based flood prediction model aided by a Geographical Information Systems, PhD dissertation, Department of Civil Engineering, The University of Calgary, Calgary, Alberta, Canada.
- Chen, C., 1975. "Design of sediment retention basins", *Proc. nat. symp. on urban hydrl. and sedim. control*, University of Kentucky, Lexington, July 28-31, 285-298.
- Chow, V.T., 1964. "Handbook of applied hydrology; a compendium of water-resources technology". McGraw-Hill, New York, 1494 p.
- Chow, V.T., Maidment, D.R., Mays, L.W., 1988. "Applied hydrology". McGraw-Hill, New York, USA, 570 p.
- Clarke, R., 1994. *Statistical modelling in hydrology*. John Wiley & Sons, Chichester, 412p.
- Crawford, N.H., Linsley, R.K., 1966. "Digital simulation in hydrology: Stanford watershed model IV", *Tech. Rep. 39, Dep. of Civ. Eng., Stanford Univ., Stanford, USA*.
- Croke, B.F.W., Jakeman, A.J., 2004. "A catchment moisture deficit module for the IHACRES rainfall-runoff model". *Environmental Modelling and Software*, 19, 1-5.
- Dawdy, D.R., O'Donnell, T. 1965. "Mathematical models of catchment behaviour". *Proc. ASCE HY.4, J. Hyd. Div. paper 4410*, 91-123.

- De Cock, W., Vaes, G., Blom, P., Berlamont, J., 1998. "The efficiency of a storage sedimentation tank : numerical simulation and physical modelling". Preprints of papers of the Int. Conference UDM'98 on Developments in urban drainage modelling, Imperial College of Science, Technology and Medicine, London.
- Delbeke, L., 2000. "Extreme neerslag in Vlaanderen, Nieuwe IDF-curven gebaseerd op langdurige meetreeksen van neerslag". Rapport studie in opdracht van AMINAL – Afdeling Water.
- Demarée, G., 1985. "Intensity-Duration-Frequency relationships of point precipitation at Uccle, 1934 - 1983", Koninklijk Meteorologisch Instituut, Ukkel, serie A, nr. 116, Ukkel, België.
- Demarée, G., De Corte, M., Derasse, S., Devorst, M., Trapenard, Ch., 1998. "Een kranige honderdjarige : de Hellmann-Fuess pluviograaf van het Koninklijk Meteorologisch Instituut te Ukkel", Water, nr. 100, mei/juni 1998.
- De Smedt, F., 1999. "Two- and three dimensional flow of groundwater", Chapter 3 in J.W. Delleur (ed.), The Handbook of Groundwater Engineering, CRC Press, 3.1-3.27.
- De Smedt, F., 2006. "Two- and three dimensional flow of groundwater", Chapter 4 in J.W. Delleur (ed.), The Handbook of Groundwater Engineering - second edition, CRC Press, 4.1-4.36.
- De Vleeschauwer, K., Weustenraad, J., Willems P., 2012. "Vergelijking van buffering op- en afwaarts langs de riolering en waterloop. Een kwantitatieve studie voor Turnhout", WT-Afvalwater, jaargang 12, nr.5, 346-359.
- Engman, E.T., 1986. "Roughness Coefficients for Routing Surface Runoff", Journal of Irrigation and Drainage Engineering - ASCE, vol. 112, nr. 1, 39-53.
- Evrard, O., Persoons, E., Vandaele, K., van Wesemael, B., (2007a). Effectiveness of erosion mitigation measures to prevent muddy floods : a case study in the Belgian Loam belt, Agriculture, Ecosystems and Environment, vol. 118, 149-158.
- Evrard, O., Bielders, Ch., Vandaele, K., van Wesemael, B., (2007b). Spatial and temporal variation of muddy floods in central Belgium, offsite impacts and potential control measures. Catena, vol. 70, 443-454.
- Evrard, O., Vandaele, K., Bielders, C., van Wesemael, B., (2007c). Seasonal evolution of runoff generation on agricultural land in the Belgian loess belt and implications for muddy flood triggering. Earth Surface Processes and Landforms
- Evrard, O., Vandaele, K., van Wesemael, B., Bielders, C. L., 2008. "A grassed waterway and earthen dams to control muddy floods from a cultivated catchment of the Belgian loess belt", Geomorphology, vol. 100, 419-428.
- Evrard, O., Cerdan, O., van Wesemael, B., Chauvet, M., Le Bissonnais, Y., Raclot, D., Vandaele, K., Andrieux, P., Bielders, C., 2009. "Reliability of an expert-based runoff and erosion model: Application of STREAM to different environments", Catena, vol. 78, 129-141.
- Fifield, J., 2001. "Designing for effective sediment and erosion control on construction sites". Forester Press, Santa Barbara, CA.
- Giron, E., Joachain, H., Degroof, A., Hecq, W., Coninx, I., Bachus, K., Dewals, B.J., Ernst, J., Piroton, M., Staes, J., Meire, P., De Smet, L., De Sutter, R., 2010. "Towards an integrated decision tool for adaptation measures - Case study: floods – ADAPT". Final report, Research Programme Science for a Sustainable Development, Belgian Science Policy, Brussels, 124p.
- Govers, G., 1991. "Rill erosion on arable land in Central Belgium: Rates, controls and predictability", Catena, vol. 18, nr. 2, p. 133-155.
- Hoesein, A.A., Pilgrim, D.H., Titmarsh, G.W., Cordery, I., 1989. "Assessment of the US Conservation Service method for estimating design floods", New Directions for Surface Water Modeling, Proc. Baltimore Symposium, May 1989; IAHS Publ. no. 181.
- Horn, D.L., Schwab, G.O., 1963. "Evaluation of rational runoff coefficients for small agricultural watersheds". ASAE Trans. 6(3), 195-198, 201.
- Hudson, N. W., 1993, "Field measurement of soil erosion and runoff", FAO, Rome.

- Huisman, J.A., Breuer, L., Bormann, H., Bronstert, A., Croke, B.F.W., Frede, H., Gräff, T., Hubrechts, L., Jakeman, A.J., Kite, G.W., Lanini, J., Leavesley, G., Lettenmaier, D.P., Lindström, G., Seibert, J., Sivapalan, M., Viney, N.R., Willems, P., 2009. "Assessing the impact of land use change on hydrology by ensemble modelling (LUCHEM) III: Scenario analysis", *Advances in Water Resources*, vol. 32, nr. 2, 159-170.
- Izzard, C.F., 1946. *Hydraulics of runoff from developed surfaces*. Proceedings of the Highway Research Board, vol. 26, 129-150.
- Jakeman, A.J., Littlewood, I.G., Whitehead, P.G., 1990. "Computation of the instantaneous unit hydrograph and identifiable component flows with application to two small upland catchments". *Journal of Hydrology*, 117, 275-300.
- Keifer, C.J., Chu, H.H., 1957. "Synthetic storm pattern for drainage design". *Journal of the Hydraulics Division, Proceedings ASCE*, vol. 83, nr. HY4.
- Kerby, W.S., 1959. "Time of concentration for overland flow". *Civil Engineering*, vol. 29, nr. 3, 60.
- Kirpich, Z.P., 1940. "Time of concentration of small agricultural watersheds". *Civil Engineering*, vol. 10, nr. 6, 362.
- Kluck, J., 1997. "The design of optimally functioning combined sewer overflow settling facilities". Doctoraatsthesis, TU Delft, Nederland.
- Lindström, G., Johansson, B., Persson, M., Gardelin, M., Bergström, S., 1997. "Development and test of the distributed HBV-96 hydrological model". *Journal of Hydrology*, vol. 201, 272-88.
- Moore, R.J., 1985. The probability-distributed principle and runoff production at point and basin scales. *Hydrological Sciences Journal*, vol. 30, 273-297.
- Moore, R.J., Clarke, R.T., 1981. A distribution function approach to rainfall-runoff modeling. *Water Resources Research*, vol. 17, nr. 5, 1367-1382.
- Muzik, I., Chang, C., 1992. "Physically-based estimates of flood probabilities". In: *Proceedings of the 45th Annual Conference of the Canadian Water Resources Association* (ed. by D. Shrubsole), Kingston, Ontario, 18.1 - 18.10.
- Nielsen, S.A., Hansen, E., 1973. "Numerical simulation of the rainfall-runoff process on a daily basis". *Nordic Hydrology*, vol. 4, 171-190.
- Notebaert, B., Govers, G., Verstraeten, G., Van Oost, K., Ruyschaert, G., Poesen, J., Van Rompaey, A., 2006. "Verfijnde erosiekaart Vlaanderen: eindrapport". KU Leuven - Onderzoeksgroep Fysische en Regionale Geografie, voor Afdeling Land.
- NRCS, 2010. "National Engineering Handbook", Section 4: Hydrology, U.S. Department of Agriculture, National Resources Conservation Service, Washington D.C., USA., Beschikbaar op: <http://directives.sc.egov.usda.gov/viewerFS.aspx?hid=21422>
- Ntegeka, V., Willems, P., 2008. "Trends and multidecadal oscillations in rainfall extremes, based on a more than 100 years time series of 10 minutes rainfall intensities at Uccle, Belgium", *Water Resources Research*, 44, W07402.
- O'Connor, K.M., Goswami, M., Liang, G.C., Kachroo, R.K., Shamseldin, A.Y., 2001. "The development of the 'Galway Real-Time River Flow Forecasting System (GFFS)", *Proceedings of the 19th European Regional Conference of ICID*, Czech Republic.
- Ogrosky, H.O., Mockus, V., 1964. "Hydrology of agricultural lands". In: *Handbook of applied hydrology*, Ven te Chow, ed., McGraw-Hill Book co., New York, Section 21, 97 p.
- Persson, J., Somes, N.L.G., Wong, T.H.F., 1999. "Hydraulic efficiency of constructed wetlands and ponds". *Water Science and Technology*, vol. 40, nr. 3, 291-300.
- Pilgrim, D.H., McDermott, G.E., Mittelstadt, G.E., 1989. "Development of the rational method for flood design for small rural basins in Australia", *Proc. Int. Conference on Channel Flow and Catchment Runoff: Centennial of Manning's Formula and Kuichling's Rational Formula*. University of Virginia, Charlottesville VA, 51-60.

- Provinciaal centrum voor milieuonderzoek, 2009. "Eindrapport sedimentmeetstation te Maarkedal", Provinciaal centrum voor milieuonderzoek, Provincie Oost-Vlaanderen, 21 p.
- Refsgaard, J.C., Storm, B., 1995a. "Construction, calibration and validation of hydrological models". In: "Distributed Hydrological Modelling" (Eds. M.B. Abbott & J.C. Refsgaard), Kluwer Academic, 41-54.
- Refsgaard, J.C., Storm, B., 1995b. "MIKE SHE". In: "Computer Models of Watershed Hydrology" (Eds. V.P. Singh), Water Resources Publications, 809-846.
- Renard, K.G., Foster, G.R., Weesies, G.A., McCool, D.K., Yoder, D.C., 1997. "Predicting soil erosion by water - A guide to conservation planning with the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE)", Agriculture Handbook, Vol. 703, Washington D.C., U.S.D.A.-Agricultural Research Service.
- Salles, C., Poesen, J., Sempere-Torres, D., 2002. "Kinetic energy of rain and its functional relationship with intensity". *Journal of Hydrology*, 257, 256-270.
- Schiettecatte, W., Gabriels, D., Van Meirvenne, M., Biesemans, J., 1999. "Simulatie van erosiebestrijdingsmaatregelen aan de hand van het RUSLE model: Een case-studie in het stroomgebied van de Maarkebeek (Oost-Vlaanderen)". @wel – Water, Vol. 2, 1-8.
- Schmidt, J., 1996. "Entwicklung und Anwendung eines physikalisch begründeten Simulationsmodells für die Erosion geeigneter, landwirtschaftlicher Nutzflächen". *Berliner Geographische Abhandlungen*, vol. 61, Institut für Geographische Wissenschaften der FU, Berlin, 148 p.
- Schwab, G.O., Fangmeier, D.D., Elliot, W.J., Frevert, R.K., 1993. "Soil and water conservation engineering". Fourth Edition, John Wiley and Sons, Inc., New York, 507 p.
- Sivapalan, M., Ruprecht, J.K., Viney, N.R., 1996. Water and salt balance modelling to predict the effects of land-use changes in forested catchments.1. Small catchment water balance model", *Hydrological Processes*, 10, 393-411.
- Stomph, T.J., De Ridder, N., Steenhuis, T.S., Van De Giesen, N.C., 2002. "Scale effects of hortonian overland flow and rainfall-runoff dynamics: Laboratory validation of a process-based model". *Earth Surface Processes and Landforms* 27, 847-855.
- Témez, J.R., 1978. Cálculo hidrometeorológico de caudales máximos en pequeñas cuencas naturales, Ministerio de Obras Públicas y Urbanismo, Dirección General de Carreteras, España.
- Tourbier, J., Westmacott, R., 1974. "Water resources protection measures in land development – a handbook". National Technical Information Service, U.S. Department of Commerce, Delaware, Newark, Delaware, 237 p.
- USDA, 1986. "Urban hydrology for small watersheds", Technical Release 55, United States Department of Agriculture.
- Vaes, G., Willems, P., Berlamont, J., 1994a. Intensiteit,duur,frequentie-relaties voor Ukkel (1967-1993, tijdstap 10 minuten). Intern rapport, Afdeling Hydraulica KU Leuven.
- Vaes, G., Willems, P., Berlamont, J., 1994b. Een kritische kijk op IDF-relaties. *Water*, nr. 79, 229-236.
- Vaes, G., Willems, P., Berlamont, J., 1996. "IDF-relaties en composietbuizen voor het ontwerp van rioleringen", Intern rapport Afdeling Hydraulica, KU Leuven, mei 1996.
- Vaes, G., Willems, P., Berlamont, J., 1998. "Composietbuizen voor grote buiduren". Rapport studie in opdracht van AMINAL.
- Vaes, G., Bouteligier, R., Luyckx, G., Willems, P., Berlamont, J., 2004. "Toelichting bij de Code van goede praktijk voor het ontwerp van rioleringssystemen", Rapport van de studie in opdracht van AMINAL/VMM Afdeling Water, april 2004.
- Vandaele, K., De Vrieze, M., Swerts, M., Vandekerckhove, L., 2002. "Kleinschalige erosiebestrijdingswerken - Een praktijkvoorbeeld", D/2002/3241/052, Soresma nv voor Vlaamse Overheid, AMINAL, Afdeling Land, 42 p.

Vandaele, K., Priemen, P., Lammens, J., van Wesemael, B., Swerts, M., 2004. Beperken van water- en modderoverlast door aanleg van kleine dammen in landbouwgebied, case-studie te Sint-Truiden, Tijdschrift Water, maart-april, 9 p.

Vandaele, K., Evrard, O., Swerts, M., Lammens, J., Priemen, P., van Wesemael, B., De Vrieze, M., 2007. Effect van erosiebestrijdingsmaatregelen in deelbekken Melsterbeek systematisch gemeten. Tijdschrift Water, speciaal nummer Congres Watersysteemkennis 2006-2007, 8 p.

Vandekerckhove, L., 2010. "Erosiebestrijdingswerken - Code van goede praktijk: Gemeentelijke inrichtingswerken in het kader van het Erosiebesluit". D/2010/3241/089, Vlaamse Overheid, Departement Leefmilieu, Natuur en Energie, Afdeling Land en Bodembescherming, Ondergrond, Natuurlijke Rijkdommen, 16 p.

Vandekerckhove, L., Swerts, M., Leyman, N., Mennens, K., Neven, H., Desmet, J., De Vrieze, M., 2001. "Code van goede praktijk voor het opmaken van een gemeentelijk erosiebestrijdingsplan", D/2001/3241/252, Vlaamse Overheid, AMINAL, Afdeling Land, 83 p.

Van Dyck, J., 2007. "Probabilistisch Ontwerp". Cursustekst KU Leuven – Departement Burgerlijke Bouwkunde.

Van Hoestenbergh, T., Voet, M., Eylebosch, J., Cabus, P., 2008. "Sedimentexport door onbevaarbare waterlopen in Vlaanderen: metingen 2003-2007". Vlaamse Milieumaatschappij, Erembodegem. 126 p.

Vanneuville, W., Maeghe, K., De Maeyer, Ph., Mostaert, F., 2003. Risicobenadering bij waterbeheersingsplannen, U.Gent Vakgroep Geografie, in opdracht van Ministerie van de Vlaamse Gemeenschap – afdeling Waterbouwkundig Laboratorium en Hydrologisch onderzoek.

Van Oost, K., Govers, G., Desmet, P.J.J., 2000. "Evaluating the effects of changes in landscape structure on soil erosion by water and tillage". Landscape Ecology, vol. 15, nr. 6, 579-591.

Van Rompaey, A.J.J., Govers, G., Van Oost, K., Van Muysen, W., Poesen, J., 2000. "Bodemerosiesnelheden op landbouwpercelen in Vlaanderen". Rapport bij kaartbladen (1:50 000): "Watererosie per landbouwperceel", "Bewerkingserosie per landbouwperceel" en "Totale erosie per landbouwperceel". Ministerie van de Vlaamse Gemeenschap, AMINAL, afdeling Land.

Van Rompaey, A., Verstraeten, G., Van Oost, K., Govers, G., Poesen, J., 2001. "Modelling mean annual sediment yield using a distributed approach". Earth Surface Processes and Landforms, vol. 26, nr. 11, 1221-1236.

Vansteenkiste, T., Holvoet, K., Willems, P., Vanneuville, W., Ven Eerdenbrugh, K., Mostaert, F., 2009. "Effect van klimaatwijzigingen op afvoerdebieten in hoog- en laagwatersituatie en op de globale waterbeschikbaarheid: Deelrapport 3 - Literatuuroverzicht hydrologische modellering van laagwaterscenario's", WL Rapporten, Projectnr. 706/13a\_1, Waterbouwkundig Laboratorium: Antwerpen & KU Leuven, december 2009, 59 p.

Vansteenkiste, T., Pereira, F., Willems, P., Mostaert, F., 2011. "Effect of climate change on the hydrological regime of navigable water courses in Belgium. Subreport 2 – Climate change impact analysis by conceptual models". WL Rapporten, 706\_18. Waterbouwkundig Laboratorium and K.U.Leuven: Antwerpen, Conceptnota, December 2011, 57 p.

Vansteenkiste, T., Pereira, F., Willems, P., Mostaert, F., 2012a. "Effect of climate change on the hydrological regime of navigable water courses in Belgium. Subreport 3 – Climate change impact analysis by distributed models". WL Rapporten, 706\_18. Waterbouwkundig Laboratorium and K.U.Leuven: Antwerpen, Conceptnota, February 2012, 71 p.

Vansteenkiste T., Pereira F., Willems P., Mostaert F., 2012b. "Effect of climate change on the hydrological regime of navigable water courses in Belgium. Subreport 5 – Comparison of lumped and distributed models in the climate change impact assessment". WL Rapporten, project 706\_18, Waterbouwkundig Laboratorium & K.U.Leuven, August 2012, 33 p.

Vansteenkiste T., Pereira F., Willems P., Mostaert F., 2012c. "Effect of climate change on the hydrological regime of navigable water courses in Belgium. Subreport 6 - Urban expansion impact analysis by distributed models". WL Rapporten, 706\_18. Waterbouwkundig Laboratorium and K.U.Leuven: Antwerpen, September 2012, 17 p.

Verbist, K., Cornelis, W.M., Schiettecatte, W., Oltenfreiter, G., Van Meirvenne, M., Gabriels, D., 2007. The influence of a compacted plow sole on saturation excess and runoff. *Soil and Tillage Research*, 96, 292-302.

Verstraeten, G., 2000. "Modderlast, sedimentatie in wachtbekkens en begroting van de sedimentexport naar waterlopen in Midden-België", Doctoraatsthesis Faculteit Wetenschappen, KU Leuven.

Verstraeten, G., Van Oost, K., Van Rompaey, A., Poesen, J., Govers, G., 2001. Integraal land- en waterbeheer in landelijke gebieden met het oog op het beperken van erosie en modderoverlast (proefproject gemeente Gingelom). Eindrapport Laboratorium voor Experimentele Geomorfologie, KU Leuven, 64 p.

Verstraeten, G., Van Oost, K., Van Rompaey, A., Poesen, J., Govers, G., 2002. "Evaluating an integrated approach to catchment management to reduce soil loss and sediment pollution through modelling". *Soil Use and Management*, vol. 18, 386-394.

Viessman, W., Lewis, G.L., 2003. "Introduction to hydrology", Fifth Edition, Prentice-Hall.

Viney, N.R., Bormann, H., Breuer, L., Bronstert, A., Croke, B.F.W., Frede, H., Gräff, T., Hubrechts, L., Huisman, J.A., Jakeman, A.J., Kite, G.W., Lanini, J., Leavesley, G., Lettenmaier, D.P., Lindström, G., Seibert, J., Sivapalan, M., Willems, P., 2009. "Assessing the impact of land use change on hydrology by ensemble modelling (LUCHEM) II: Ensemble combinations and predictions", *Advances in Water Resources*, vol. 32, nr. 2, 147-158.

VMM, 1996. "Krachlijnen voor een geïntegreerd rioleringsbeleid in Vlaanderen: Code van goede praktijk voor de aanleg van openbare riolen en individuele voorbehandelingsinstallaties", Vlaamse MilieuMaatschappij, Erembodegem.

Voet, M., 1991. "Frequentieanalyse van hoogwaterafvoeren in het limnimetrisch net van de Landelijke Waterdienst". Rapport van AMINAL, Bestuur Landinrichting en -beheer, Vlaamse Landmaatschappij.

Willems, P., 2000. "Compound intensity/duration/frequency-relationships of extreme precipitation for two seasons and two storm types", *Journal of Hydrology*, vol. 233, 189 – 205.

Willems, P., 2007. "Waterloopmodellering", Aangepaste versie "Algemene methodologie voor het modelleren van de waterafvoer in bevaarbare waterlopen in Vlaanderen (2000)", Richtlijn voor het Waterbouwkundig Laboratorium van de Vlaamse Overheid.

Willems, P. 2009a. "Actualisatie en extrapolatie van hydrologische parameters in de nieuwe Code van Goede Praktijk voor het Ontwerp van Rioleringsystemen", Rapport van de studie in opdracht van VMM – Afdeling Operationeel Waterbeheer, september 2009.

Willems, P., 2009b. "A time series tool to support the multi-criteria performance evaluation of rainfall-runoff models", *Environmental Modelling & Software*, 24(3), 311-321.

Willems, P., 2011. "Evaluatie en actualisatie van de IDF-neerslagstatistieken te Ukkel", Aanvulling bij de studie "Actualisatie en extrapolatie van hydrologische parameters in de nieuwe Code van Goede Praktijk voor het Ontwerp van Rioleringsystemen (KU Leuven voor VMM, sept. 2009)", oktober 2011, 14 p.

Willems, P., 2012. "Parsimonious rainfall-runoff model construction supported by time series processing and validation of hydrological extremes", *Journal of Hydrology*, [ingediend]

Willems, P., Yiou, P., 2010. "Multidecadal oscillations in rainfall extremes", *Geophysical Research Abstracts*, Vol. 12, EGU2010-10270.

Willems, P., Vrac, M., 2011. "Statistical precipitation downscaling for small-scale hydrological impact investigations of climate change", *Journal of Hydrology*, 402, 193–205.

Willems, P., Guillou, A., Beirlant, J., 2007. "Bias correction in hydrologic GPD based extreme value analysis by means of a slowly varying function", *Journal of Hydrology*, 338, 221-236.

Willems P., Bandy J. et al., 2002. "Methodologie ter hydrologische modellering van Vlaamse hydrografische (sub)bekkens en de afleiding van maatgevende hydrogrammen", Richtlijn voor AMINAL – Afdeling Water, mei 2002, 309 p.

- Willems, P., Ntegeka, V., Berlamont, J., 2007. "Analyse van trends en meerjarige schommelingen in de neerslagextremen op basis van de meer dan 100 jaar 10 minuten neerslag te Ukkel", *Rioleringswetenschap*, jaargang 7, nr. 26, juni 2007, 45-53.
- Willems, P., Arnbjerg-Nielsen, K., Olsson, J., Nguyen, V.T.V., 2011. "Climate change impact assessment on urban rainfall extremes and urban drainage: methods and shortcomings", *Atmospheric Research*, 103, 106-118.
- Willems, P., Vaes, G., Delbeke, L., Qvick, A., Popa, D., De Lannoy, G., Verhoest, N., De Troch, F., Dauwe, B., 2002. "Een ruimtelijk neerslagmodel voor Vlaanderen", Rapport door Laboratorium voor Hydraulica K.U.Leuven en Laboratorium voor Hydrologie en Waterbeheer U.Gent i.s.m. KMI en IMDC, Richtlijn voor het Ministerie van de Vlaamse Gemeenschap, Administratie Wetenschap en Innovatie, oktober 2002, 340 p.
- Willems, E., Dierckx, J., Gijsbers, B., Willems, P., Timmerman, A., 2005. "Nieuwe calibratie en validatiestudie rond het SENTWA model teneinde een beter onderbouwing te geven aan de in het model gebruikte coëfficiënten, parameters, factoren en formules", Rapport door Bodemkundige Dienst van België en KU Leuven – Afdeling Hydraulica voor Vlaamse Milieumaatschappij, 164 p.
- Willems, P., Deckers, P., De Maeyer, Ph., De Sutter, R., Vanneuville, W., Brouwers, J., Peeters, B., 2009. "Klimaatverandering en waterhuishouding". Wetenschappelijk rapport, MIRA 2009 & NARA 2009, Vlaamse Milieumaatschappij en Instituut voor Natuur- en Bosonderzoek, [www.milieurapport.be](http://www.milieurapport.be) en [www.nara.be](http://www.nara.be)
- Willems, P., Ntegeka, V., Baguis, P., Roulin, E., 2010. "Climate change impact on hydrological extremes along rivers and urban drainage systems". Final report for Belgian Science Policy Office, K.U.Leuven – Hydraulics Section & Royal Meteorological Institute of Belgium, December 2010, 110 p.
- Wischmeier, W.H., Johnson, C.B., Cross, B.V., 1971. "A soil erodibility nomograph for farmland and construction sites." *Journal of Soil and Water Conservation*, vol. 26, 189-193.
- Wischmeier, W.H., Smith, D.D., 1978. "Predicting rainfall erosion losses, a guide to conservation planning". *Agriculture Handbook*, vol. 537, Washington DC, United States Department of Agriculture.
- Yen, B.C., Chow, V.T., 1980. "Design hyetograph for small drainage structures". *J. Hyd. Div. Am. Soc. Civil Eng.*, vol. 106, nr. HY6, 1055-1976.
- Zema, D.A., Bingner, R.L., Denisi, P. Govers, G., Licciardello, F., Zimbone, S.M., 2012. "Evaluation of runoff, peak flow and sediment yield for events simulated by the AnnAGNPS model in a Belgian agricultural watershed, *Land Degradation & Development*, vol. 23, 205-215.

## Bijlage A: Neerslagstatistieken

Hierna worden de ontwerpneerslagwaarden (in mm/h) opgelijst volgens de meest recente IDF-verbanden van Willems (2011), voor de meest gangbare concentratietijden en terugkeerperioden voor kleinschalige opvangsystemen.

Concentratietijd:	Terugkeerperiode [jaar]:				
	20	10	5	2	1
10 minuten	112.19	100.33	88.47	72.79	60.94
15 minuten	82.75	73.37	64.00	51.62	42.30
20 minuten	66.75	58.82	50.89	40.44	32.64
30 minuten	49.34	43.07	36.81	28.62	22.69
40 minuten	39.80	34.50	29.22	22.38	17.64
50 minuten	33.68	29.03	24.40	18.51	14.60
1 uur	29.38	25.20	21.06	15.88	12.58
2 uur	17.40	14.64	12.02	9.10	7.43
3 uur	12.77	10.64	8.72	6.73	5.59
4 uur	10.24	8.50	6.99	5.48	4.60
5 uur	8.63	7.15	5.93	4.70	3.97
6 uur	7.50	6.22	5.19	4.16	3.52



## **Bijlage B: Terugkeerperiode van overloop volgens continue simulatiemethode**

Volgende tabellen geven de terugkeerperiode (in aantal jaren) van overloop van een kleinschalig opvangsysteem, in functie van het geïnstalleerde buffervolume en doorvoerdebiet, dat constant is of lineair afhankelijk van het geborgen volume of afhankelijk van de vierkantswortel van het geborgen volume, en de meest gangbare concentratietijden van 10, 20, 30, 40, 50 en 60 minuten (huidig klimaat, 10-min Ukkel-reeks 1901-2000).

**Concentratietijd = 10 minuten, constant doorvoerdebiet:**

Maximale berging [m <sup>3</sup> /ha]:	constant doorvoerdebiet [l/(s.ha)]:									
	50	40	30	25	20	15	10	5	2	1
10	0.26	0.19	0.12	0.10	0.08	0.06	0.04	0.02	0.01	0.01
20	0.38	0.30	0.21	0.17	0.14	0.10	0.07	0.04	0.02	0.02
30	0.54	0.41	0.32	0.26	0.21	0.16	0.11	0.06	0.03	0.02
40	0.79	0.57	0.41	0.36	0.29	0.22	0.16	0.08	0.04	0.03
50	1.10	0.81	0.57	0.47	0.38	0.31	0.21	0.11	0.05	0.03
60	1.43	1.08	0.76	0.63	0.51	0.39	0.28	0.15	0.06	0.04
70	1.82	1.39	1.02	0.83	0.67	0.50	0.35	0.19	0.08	0.05
80	2.56	1.75	1.25	1.06	0.85	0.66	0.45	0.25	0.10	0.06
90	3.33	2.33	1.61	1.32	1.08	0.83	0.56	0.31	0.12	0.07
100	4.00	2.94	2.08	1.69	1.30	1.04	0.70	0.36	0.15	0.08
110	4.55	3.70	2.50	2.22	1.69	1.23	0.83	0.46	0.18	0.09
120	5.00	4.35	3.33	2.63	2.00	1.59	1.03	0.54	0.22	0.11
130	6.67	4.76	3.70	3.23	2.56	1.89	1.30	0.66	0.27	0.13
140	6.67	5.88	4.35	4.00	3.03	2.44	1.67	0.78	0.32	0.15
150	7.14	6.67	5.00	4.35	3.85	2.63	2.04	0.90	0.36	0.16
160	12.50	7.14	5.88	5.00	4.35	3.13	2.38	1.03	0.43	0.18
170	20.00	8.33	7.14	5.88	4.76	3.70	2.78	1.22	0.50	0.21
180	20.00	14.29	7.14	6.67	5.26	4.17	3.13	1.43	0.55	0.24
190	20.00	16.67	9.09	7.14	6.25	5.26	3.45	1.79	0.63	0.27
200	25.00	20.00	11.11	10.00	7.69	5.26	4.00	2.27	0.71	0.30
210	33.33	20.00	14.29	11.11	9.09	7.14	4.17	2.27	0.83	0.34
220	33.33	33.33	16.67	14.29	11.11	7.69	4.76	2.63	0.94	0.38
230	50.00	33.33	20.00	16.67	12.50	9.09	5.88	3.13	1.05	0.42
240	>50	33.33	25.00	20.00	16.67	10.00	6.67	3.33	1.19	0.47
250	>50	33.33	33.33	25.00	20.00	12.50	7.14	4.00	1.39	0.52
260	>50	>50	33.33	25.00	20.00	20.00	7.69	4.55	1.61	0.58
270	>50	>50	33.33	25.00	25.00	20.00	10.00	5.56	1.82	0.65
280	>50	>50	>50	50.00	25.00	20.00	11.11	5.88	2.27	0.71
290	>50	>50	>50	>50	33.33	25.00	16.67	7.14	2.56	0.79
300	>50	>50	>50	>50	33.33	33.33	16.67	7.14	2.78	0.88
310	>50	>50	>50	>50	50.00	33.33	16.67	7.69	3.13	0.97
320	>50	>50	>50	>50	>50	50.00	16.67	10.00	3.45	1.09
330	>50	>50	>50	>50	>50	50.00	25.00	10.00	3.85	1.28
340	>50	>50	>50	>50	>50	50.00	33.33	10.00	4.55	1.41
350	>50	>50	>50	>50	>50	>50	50.00	11.11	4.55	1.49
360	>50	>50	>50	>50	>50	>50	50.00	12.50	4.55	1.59
370	>50	>50	>50	>50	>50	>50	50.00	14.29	5.88	1.72
380	>50	>50	>50	>50	>50	>50	>50	16.67	5.88	2.00
390	>50	>50	>50	>50	>50	>50	>50	16.67	6.25	2.17
400	>50	>50	>50	>50	>50	>50	>50	16.67	6.67	2.22
450	>50	>50	>50	>50	>50	>50	>50	50.00	11.11	3.70
500	>50	>50	>50	>50	>50	>50	>50	>50	20.00	7.14

**Concentratietijd = 10 minuten, lineaire doorvoerrelatie:**

Maximale berging [m <sup>3</sup> /ha]:	max. doorvoerdebiet [l/(s.ha)]:									
	50	40	30	25	20	15	10	5	2	1
10	0.04	0.04	0.03	0.03	0.03	0.03	0.02	0.01	0.01	0.01
20	0.09	0.08	0.07	0.06	0.06	0.05	0.04	0.02	0.02	0.01
30	0.15	0.13	0.11	0.10	0.09	0.07	0.05	0.03	0.02	0.02
40	0.23	0.20	0.17	0.15	0.13	0.11	0.08	0.04	0.03	0.02
50	0.32	0.28	0.24	0.21	0.18	0.15	0.11	0.06	0.03	0.02
60	0.42	0.38	0.33	0.29	0.25	0.20	0.14	0.07	0.04	0.03
70	0.55	0.49	0.40	0.37	0.32	0.26	0.18	0.10	0.05	0.03
80	0.70	0.63	0.52	0.47	0.41	0.32	0.23	0.12	0.06	0.04
90	0.93	0.78	0.67	0.58	0.50	0.40	0.28	0.15	0.07	0.04
100	1.16	0.99	0.83	0.75	0.62	0.48	0.33	0.18	0.08	0.05
110	1.49	1.25	1.06	0.90	0.79	0.61	0.42	0.22	0.09	0.05
120	1.82	1.56	1.22	1.10	0.95	0.75	0.50	0.27	0.10	0.06
130	2.27	1.96	1.56	1.32	1.18	0.91	0.58	0.32	0.12	0.06
140	3.03	2.50	2.04	1.75	1.35	1.10	0.71	0.37	0.14	0.07
150	3.45	3.13	2.44	2.13	1.72	1.32	0.87	0.43	0.16	0.08
160	3.85	3.70	2.86	2.50	2.13	1.59	1.01	0.51	0.18	0.08
170	4.76	3.85	3.33	3.13	2.78	1.89	1.16	0.58	0.20	0.09
180	5.56	4.35	4.00	3.57	3.03	2.27	1.39	0.70	0.24	0.10
190	6.25	5.26	4.55	4.17	3.57	2.78	1.79	0.78	0.27	0.11
200	6.67	5.56	5.00	4.55	4.00	3.23	2.04	0.89	0.29	0.12
210	7.69	6.25	5.56	5.26	4.55	3.70	2.50	1.00	0.34	0.12
220	10.00	6.67	5.88	5.56	4.76	4.17	2.78	1.14	0.37	0.14
230	14.29	10.00	7.69	6.25	5.26	4.17	3.23	1.25	0.42	0.15
240	14.29	12.50	7.69	7.69	6.67	5.00	3.33	1.43	0.48	0.16
250	16.67	14.29	10.00	9.09	7.69	5.26	4.00	1.59	0.54	0.17
260	20.00	16.67	10.00	10.00	9.09	6.67	4.17	1.75	0.61	0.18
270	20.00	20.00	14.29	12.50	10.00	7.69	5.26	2.00	0.68	0.19
280	33.33	20.00	20.00	12.50	12.50	10.00	6.67	2.27	0.74	0.20
290	50.00	25.00	20.00	14.29	14.29	10.00	7.14	2.78	0.81	0.22
300	>50	33.33	20.00	14.29	14.29	12.50	7.14	2.94	0.88	0.24
310	>50	>50	25.00	25.00	14.29	12.50	8.33	4.17	1.01	0.26
320	>50	>50	50.00	25.00	16.67	12.50	10.00	4.35	1.08	0.28
330	>50	>50	50.00	33.33	20.00	16.67	11.11	4.35	1.18	0.30
340	>50	>50	>50	50.00	25.00	20.00	12.50	4.76	1.25	0.32
350	>50	>50	>50	>50	25.00	20.00	14.29	4.76	1.45	0.35
360	>50	>50	>50	>50	33.33	25.00	14.29	6.25	1.69	0.38
370	>50	>50	>50	>50	>50	25.00	16.67	6.67	2.00	0.41
380	>50	>50	>50	>50	>50	33.33	16.67	6.67	2.13	0.43
390	>50	>50	>50	>50	>50	33.33	20.00	7.14	2.13	0.47
400	>50	>50	>50	>50	>50	50.00	20.00	7.14	2.22	0.51
450	>50	>50	>50	>50	>50	50.00	20.00	7.14	2.27	0.55
500	>50	>50	>50	>50	>50	>50	25.00	7.14	2.50	0.59

**Concentratietijd = 10 minuten, vierkantsw. doorvoerrelatie:**

Maximale berging [m <sup>3</sup> /ha]:	max. doorvoerdebiet [l/(s.ha)]:									
	50	40	30	25	20	15	10	5	2	1
10	0.04	0.04	0.04	0.04	0.03	0.03	0.02	0.02	0.01	0.01
20	0.10	0.10	0.08	0.08	0.07	0.06	0.04	0.03	0.02	0.01
30	0.18	0.16	0.14	0.13	0.11	0.09	0.07	0.04	0.02	0.02
40	0.28	0.25	0.21	0.19	0.16	0.13	0.10	0.05	0.03	0.02
50	0.38	0.35	0.30	0.26	0.23	0.18	0.13	0.07	0.04	0.03
60	0.51	0.46	0.39	0.35	0.31	0.25	0.18	0.10	0.05	0.03
70	0.70	0.61	0.50	0.45	0.39	0.32	0.23	0.12	0.06	0.04
80	0.97	0.81	0.65	0.56	0.48	0.41	0.29	0.15	0.07	0.04
90	1.12	1.05	0.83	0.75	0.62	0.49	0.36	0.20	0.08	0.05
100	1.54	1.25	1.05	0.91	0.80	0.64	0.43	0.24	0.10	0.06
110	2.04	1.59	1.25	1.15	0.99	0.76	0.54	0.29	0.12	0.07
120	2.44	2.08	1.67	1.43	1.19	0.98	0.63	0.36	0.14	0.07
130	3.23	2.56	2.00	1.69	1.52	1.20	0.81	0.43	0.17	0.08
140	3.70	3.23	2.78	2.27	1.89	1.41	0.99	0.50	0.20	0.09
150	4.76	3.70	3.13	2.86	2.27	1.82	1.18	0.60	0.24	0.11
160	5.26	4.17	3.70	3.03	2.70	2.08	1.43	0.68	0.27	0.12
170	5.56	4.76	4.00	3.57	3.13	2.56	1.72	0.78	0.31	0.13
180	6.25	6.25	4.76	4.17	3.57	2.94	1.96	0.91	0.36	0.14
190	6.67	6.67	5.26	4.76	4.17	3.45	2.38	1.10	0.42	0.16
200	9.09	6.67	6.25	5.26	4.76	3.85	2.78	1.23	0.47	0.18
210	12.50	8.33	6.25	5.88	5.26	4.17	3.23	1.47	0.53	0.19
220	16.67	12.50	7.69	6.25	5.88	4.35	3.85	1.56	0.61	0.21
230	20.00	16.67	10.00	9.09	7.69	5.00	4.17	1.82	0.68	0.23
240	20.00	16.67	12.50	9.09	8.33	7.14	4.76	2.17	0.76	0.26
250	25.00	16.67	16.67	11.11	9.09	8.33	5.56	2.63	0.89	0.28
260	33.33	20.00	20.00	16.67	10.00	9.09	6.67	2.86	0.97	0.31
270	33.33	33.33	20.00	20.00	16.67	9.09	7.14	3.23	1.08	0.34
280	50.00	33.33	20.00	20.00	16.67	12.50	7.69	3.70	1.14	0.36
290	>50	50.00	20.00	20.00	20.00	14.29	7.69	4.17	1.39	0.39
300	>50	>50	50.00	20.00	20.00	14.29	10.00	4.35	1.49	0.43
310	>50	>50	50.00	25.00	25.00	14.29	11.11	4.76	1.64	0.48
320	>50	>50	>50	50.00	25.00	20.00	11.11	5.00	1.79	0.54
330	>50	>50	>50	>50	33.33	25.00	11.11	5.88	2.08	0.60
340	>50	>50	>50	>50	50.00	33.33	14.29	5.88	2.38	0.65
350	>50	>50	>50	>50	>50	33.33	20.00	7.69	2.63	0.69
360	>50	>50	>50	>50	>50	50.00	20.00	10.00	2.86	0.76
370	>50	>50	>50	>50	>50	>50	20.00	11.11	3.33	0.88
380	>50	>50	>50	>50	>50	>50	20.00	11.11	3.70	0.95
390	>50	>50	>50	>50	>50	>50	20.00	11.11	3.85	1.02
400	>50	>50	>50	>50	>50	>50	25.00	11.11	4.35	1.08
450	>50	>50	>50	>50	>50	>50	>50	20.00	6.67	1.39
500	>50	>50	>50	>50	>50	>50	>50	33.33	10.00	1.96

**Concentratietijd = 20 minuten, constant doorvoerdebiet:**

Maximale berging [m <sup>3</sup> /ha]:	constant doorvoerdebiet [l/(s.ha)]:									
	50	40	30	25	20	15	10	5	2	1
10	0.48	0.34	0.20	0.16	0.11	0.08	0.05	0.02	0.01	0.01
20	0.69	0.45	0.31	0.23	0.18	0.13	0.08	0.04	0.02	0.02
30	0.94	0.62	0.41	0.35	0.26	0.18	0.12	0.06	0.03	0.02
40	1.30	0.84	0.55	0.45	0.36	0.26	0.17	0.08	0.04	0.03
50	1.75	1.12	0.75	0.59	0.45	0.35	0.23	0.12	0.05	0.03
60	2.44	1.59	1.04	0.77	0.61	0.45	0.30	0.15	0.06	0.04
70	3.03	1.96	1.22	1.03	0.76	0.56	0.38	0.20	0.08	0.05
80	3.85	2.63	1.69	1.23	1.00	0.70	0.47	0.26	0.10	0.06
90	4.55	3.33	2.08	1.64	1.23	0.93	0.58	0.32	0.12	0.07
100	5.00	3.85	2.63	2.00	1.59	1.16	0.76	0.37	0.15	0.08
110	5.56	4.55	3.33	2.63	1.92	1.49	0.87	0.47	0.18	0.09
120	6.25	5.56	3.85	3.03	2.38	1.69	1.15	0.54	0.23	0.11
130	7.14	5.56	4.35	3.57	2.78	2.17	1.37	0.68	0.27	0.13
140	9.09	6.67	5.26	4.17	3.33	2.56	1.72	0.79	0.33	0.15
150	16.67	7.14	5.56	4.76	4.00	2.70	2.04	0.91	0.37	0.16
160	20.00	11.11	7.14	5.88	4.76	3.23	2.50	1.04	0.44	0.19
170	20.00	14.29	7.14	6.67	5.26	4.00	2.86	1.27	0.50	0.21
180	25.00	16.67	10.00	7.14	6.25	4.55	3.13	1.49	0.55	0.24
190	33.33	20.00	11.11	10.00	6.67	5.26	3.85	1.89	0.65	0.27
200	33.33	20.00	14.29	11.11	9.09	5.26	4.17	2.27	0.71	0.30
210	33.33	33.33	16.67	12.50	11.11	7.14	4.17	2.33	0.84	0.34
220	>50	33.33	25.00	14.29	11.11	8.33	5.00	2.63	0.95	0.38
230	>50	33.33	25.00	20.00	14.29	10.00	6.25	3.13	1.06	0.43
240	>50	>50	33.33	25.00	20.00	11.11	6.67	3.33	1.19	0.47
250	>50	>50	33.33	25.00	20.00	16.67	7.14	4.17	1.39	0.52
260	>50	>50	50.00	25.00	20.00	20.00	9.09	4.55	1.64	0.58
270	>50	>50	>50	25.00	25.00	20.00	10.00	5.56	1.82	0.66
280	>50	>50	>50	>50	25.00	20.00	14.29	5.88	2.38	0.72
290	>50	>50	>50	>50	33.33	25.00	16.67	7.14	2.56	0.80
300	>50	>50	>50	>50	50.00	33.33	16.67	7.69	2.78	0.89
310	>50	>50	>50	>50	>50	50.00	16.67	7.69	3.13	0.99
320	>50	>50	>50	>50	>50	50.00	20.00	10.00	3.45	1.11
330	>50	>50	>50	>50	>50	50.00	25.00	10.00	3.85	1.30
340	>50	>50	>50	>50	>50	>50	33.33	10.00	4.55	1.41
350	>50	>50	>50	>50	>50	>50	50.00	12.50	4.55	1.49
360	>50	>50	>50	>50	>50	>50	50.00	12.50	4.55	1.59
370	>50	>50	>50	>50	>50	>50	50.00	14.29	5.88	1.79
380	>50	>50	>50	>50	>50	>50	>50	16.67	5.88	2.00
390	>50	>50	>50	>50	>50	>50	>50	16.67	6.25	2.17
400	>50	>50	>50	>50	>50	>50	>50	16.67	6.67	2.22
450	>50	>50	>50	>50	>50	>50	>50	50.00	11.11	3.70
500	>50	>50	>50	>50	>50	>50	>50	>50	20.00	7.14

**Concentratietijd = 20 minuten, lineaire doorvoerrelatie:**

Maximale berging [m <sup>3</sup> /ha]:	max. doorvoerdebiet [l/(s.ha)]:									
	50	40	30	25	20	15	10	5	2	1
10	0.07	0.07	0.07	0.06	0.05	0.03	0.02	0.02	0.01	0.01
20	0.20	0.16	0.11	0.09	0.07	0.06	0.04	0.02	0.02	0.01
30	0.31	0.21	0.16	0.13	0.11	0.08	0.06	0.03	0.02	0.02
40	0.38	0.29	0.22	0.19	0.15	0.12	0.08	0.04	0.03	0.02
50	0.47	0.38	0.30	0.25	0.21	0.16	0.11	0.06	0.03	0.02
60	0.58	0.49	0.38	0.33	0.28	0.22	0.15	0.08	0.04	0.03
70	0.75	0.61	0.47	0.42	0.35	0.27	0.19	0.10	0.05	0.03
80	0.97	0.77	0.59	0.51	0.43	0.35	0.24	0.12	0.06	0.04
90	1.20	0.97	0.78	0.64	0.53	0.42	0.29	0.15	0.07	0.04
100	1.52	1.22	0.95	0.81	0.68	0.52	0.34	0.18	0.08	0.05
110	1.92	1.59	1.16	1.00	0.83	0.66	0.43	0.22	0.09	0.05
120	2.38	1.85	1.47	1.25	1.01	0.81	0.51	0.27	0.10	0.06
130	2.86	2.44	1.79	1.49	1.27	0.99	0.60	0.33	0.12	0.06
140	3.45	2.94	2.22	1.89	1.49	1.18	0.74	0.38	0.14	0.07
150	4.00	3.45	2.56	2.33	1.82	1.39	0.90	0.44	0.16	0.08
160	4.55	3.85	3.23	2.78	2.27	1.64	1.02	0.52	0.18	0.08
170	5.26	4.35	3.70	3.33	2.94	1.96	1.18	0.59	0.20	0.09
180	6.25	5.26	4.17	3.70	3.23	2.38	1.45	0.70	0.24	0.10
190	6.67	5.56	4.76	4.35	3.70	3.03	1.85	0.80	0.27	0.11
200	8.33	6.25	5.26	5.00	4.00	3.57	2.17	0.89	0.30	0.12
210	9.09	7.69	5.88	5.26	4.55	3.85	2.56	1.01	0.34	0.13
220	12.50	9.09	7.14	5.56	5.00	4.17	2.86	1.14	0.38	0.14
230	16.67	11.11	7.69	7.69	5.88	4.17	3.23	1.27	0.43	0.15
240	20.00	12.50	9.09	7.69	7.14	5.26	3.45	1.43	0.49	0.16
250	20.00	20.00	10.00	9.09	8.33	5.88	4.00	1.64	0.55	0.17
260	20.00	20.00	12.50	10.00	9.09	6.67	4.17	1.85	0.62	0.18
270	33.33	20.00	20.00	12.50	11.11	8.33	5.26	2.04	0.68	0.19
280	50.00	25.00	20.00	14.29	12.50	10.00	7.14	2.27	0.74	0.20
290	50.00	33.33	20.00	14.29	14.29	10.00	7.14	2.78	0.81	0.22
300	>50	>50	25.00	16.67	14.29	12.50	7.69	2.94	0.88	0.24
310	>50	>50	25.00	25.00	14.29	12.50	8.33	4.17	1.01	0.26
320	>50	>50	50.00	25.00	16.67	14.29	10.00	4.35	1.08	0.28
330	>50	>50	>50	33.33	25.00	16.67	11.11	4.35	1.18	0.30
340	>50	>50	>50	50.00	25.00	20.00	12.50	4.76	1.27	0.32
350	>50	>50	>50	>50	25.00	20.00	14.29	4.76	1.49	0.35
360	>50	>50	>50	>50	50.00	25.00	14.29	6.67	1.69	0.38
370	>50	>50	>50	>50	>50	25.00	16.67	6.67	2.00	0.41
380	>50	>50	>50	>50	>50	33.33	20.00	7.14	2.13	0.44
390	>50	>50	>50	>50	>50	50.00	20.00	7.14	2.13	0.47
400	>50	>50	>50	>50	>50	50.00	20.00	7.14	2.22	0.51
450	>50	>50	>50	>50	>50	>50	33.33	12.50	3.23	0.72
500	>50	>50	>50	>50	>50	>50	>50	20.00	5.00	0.93

**Concentratietijd = 20 minuten, vierkantsw. doorvoerrelatie:**

Maximale berging [m <sup>3</sup> /ha]:	max. doorvoerdebiet [l/(s.ha)]:									
	50	40	30	25	20	15	10	5	2	1
10	0.06	0.06	0.07	0.07	0.06	0.04	0.03	0.02	0.01	0.01
20	0.26	0.20	0.14	0.11	0.09	0.07	0.05	0.03	0.02	0.01
30	0.38	0.28	0.20	0.17	0.14	0.11	0.07	0.04	0.02	0.02
40	0.48	0.38	0.28	0.24	0.20	0.15	0.10	0.06	0.03	0.02
50	0.62	0.49	0.38	0.33	0.27	0.21	0.14	0.07	0.04	0.03
60	0.81	0.62	0.47	0.41	0.35	0.28	0.19	0.10	0.05	0.03
70	1.06	0.83	0.61	0.51	0.44	0.35	0.24	0.13	0.06	0.04
80	1.30	1.08	0.79	0.67	0.54	0.44	0.30	0.16	0.07	0.04
90	1.79	1.27	1.02	0.86	0.69	0.55	0.37	0.20	0.09	0.05
100	2.08	1.72	1.25	1.05	0.88	0.67	0.45	0.25	0.10	0.06
110	2.86	2.08	1.56	1.28	1.10	0.83	0.57	0.30	0.12	0.07
120	3.57	2.78	1.82	1.56	1.43	1.02	0.65	0.36	0.14	0.07
130	4.17	3.33	2.44	2.08	1.59	1.27	0.85	0.44	0.17	0.08
140	4.76	3.70	2.94	2.50	2.00	1.56	1.04	0.51	0.20	0.09
150	5.26	4.17	3.33	2.94	2.38	1.89	1.23	0.60	0.24	0.11
160	5.56	5.26	3.85	3.45	2.86	2.13	1.45	0.69	0.28	0.12
170	6.67	5.88	4.55	4.17	3.23	2.63	1.72	0.79	0.31	0.13
180	7.69	6.67	5.00	4.76	3.70	3.23	2.04	0.93	0.36	0.14
190	10.00	6.67	5.88	5.00	4.35	3.70	2.38	1.11	0.42	0.16
200	14.29	9.09	6.25	5.88	5.00	4.00	2.94	1.23	0.48	0.18
210	16.67	12.50	7.69	6.25	5.56	4.17	3.33	1.47	0.53	0.19
220	20.00	14.29	10.00	7.69	6.25	4.55	3.85	1.61	0.61	0.21
230	25.00	16.67	11.11	9.09	8.33	6.67	4.17	1.85	0.68	0.23
240	25.00	20.00	14.29	10.00	8.33	7.69	4.76	2.17	0.76	0.26
250	33.33	25.00	20.00	14.29	9.09	8.33	5.56	2.78	0.90	0.29
260	33.33	25.00	20.00	20.00	12.50	9.09	6.67	2.86	0.98	0.31
270	50.00	33.33	20.00	20.00	16.67	10.00	7.14	3.23	1.08	0.34
280	> 50	50.00	20.00	20.00	20.00	12.50	7.69	3.70	1.14	0.37
290	> 50	> 50	50.00	20.00	20.00	14.29	8.33	4.17	1.39	0.39
300	> 50	> 50	50.00	25.00	20.00	14.29	10.00	4.35	1.52	0.44
310	> 50	> 50	> 50	33.33	25.00	14.29	11.11	4.76	1.64	0.49
320	> 50	> 50	> 50	> 50	25.00	20.00	11.11	5.00	1.79	0.55
330	> 50	> 50	> 50	> 50	50.00	33.33	11.11	5.88	2.08	0.60
340	> 50	> 50	> 50	> 50	50.00	33.33	14.29	5.88	2.38	0.65
350	> 50	> 50	> 50	> 50	> 50	33.33	20.00	7.69	2.63	0.70
360	> 50	> 50	> 50	> 50	> 50	50.00	20.00	10.00	2.86	0.78
370	> 50	> 50	> 50	> 50	> 50	> 50	20.00	11.11	3.33	0.89
380	> 50	> 50	> 50	> 50	> 50	> 50	20.00	11.11	3.85	0.97
390	> 50	> 50	> 50	> 50	> 50	> 50	20.00	11.11	4.00	1.02
400	> 50	> 50	> 50	> 50	> 50	> 50	25.00	11.11	4.35	1.08
450	> 50	> 50	> 50	> 50	> 50	> 50	> 50	20.00	6.67	1.39
500	> 50	> 50	> 50	> 50	> 50	> 50	> 50	33.33	10.00	1.96

**Concentratietijd = 30 minuten, constant doorvoerdebiet:**

Maximale berging [m <sup>3</sup> /ha]:	constant doorvoerdebiet [l/(s.ha)]:									
	50	40	30	25	20	15	10	5	2	1
10	0.85	0.52	0.32	0.22	0.15	0.10	0.06	0.03	0.01	0.01
20	1.20	0.75	0.43	0.33	0.23	0.16	0.09	0.04	0.02	0.02
30	1.69	1.01	0.57	0.43	0.32	0.22	0.14	0.06	0.03	0.02
40	2.17	1.28	0.79	0.56	0.42	0.30	0.19	0.09	0.04	0.03
50	2.86	1.85	1.02	0.75	0.52	0.40	0.25	0.12	0.05	0.03
60	3.85	2.22	1.28	1.01	0.72	0.49	0.33	0.16	0.06	0.04
70	4.55	2.86	1.67	1.25	0.95	0.64	0.41	0.21	0.08	0.05
80	5.56	3.57	2.22	1.59	1.19	0.81	0.51	0.27	0.10	0.06
90	5.88	4.17	2.70	1.92	1.52	1.04	0.64	0.33	0.13	0.07
100	6.25	5.26	3.23	2.63	1.79	1.33	0.78	0.38	0.16	0.08
110	7.14	5.56	3.85	2.94	2.27	1.56	0.95	0.49	0.19	0.09
120	10.00	6.67	4.35	3.85	2.63	1.96	1.27	0.56	0.23	0.11
130	11.11	7.14	5.00	4.17	3.23	2.50	1.52	0.70	0.28	0.13
140	20.00	10.00	5.88	4.76	4.00	2.63	1.89	0.81	0.33	0.15
150	20.00	11.11	7.14	5.26	4.55	3.13	2.17	0.93	0.37	0.17
160	20.00	14.29	8.33	6.25	5.00	3.85	2.50	1.05	0.44	0.19
170	33.33	20.00	11.11	7.14	5.56	4.35	3.03	1.28	0.50	0.21
180	33.33	20.00	12.50	11.11	6.67	5.26	3.33	1.59	0.56	0.24
190	33.33	25.00	14.29	11.11	9.09	5.26	3.85	1.92	0.65	0.27
200	50.00	33.33	16.67	12.50	11.11	6.67	4.17	2.27	0.72	0.30
210	>50	33.33	25.00	14.29	11.11	8.33	4.17	2.44	0.86	0.34
220	>50	50.00	25.00	20.00	14.29	9.09	5.56	2.70	0.96	0.38
230	>50	>50	33.33	20.00	16.67	10.00	6.25	3.13	1.06	0.43
240	>50	>50	33.33	25.00	20.00	12.50	7.14	3.57	1.20	0.47
250	>50	>50	50.00	25.00	20.00	16.67	7.14	4.17	1.45	0.52
260	>50	>50	>50	33.33	25.00	20.00	9.09	4.76	1.64	0.58
270	>50	>50	>50	>50	25.00	20.00	10.00	5.56	1.89	0.66
280	>50	>50	>50	>50	33.33	20.00	14.29	5.88	2.38	0.74
290	>50	>50	>50	>50	50.00	25.00	16.67	7.14	2.56	0.81
300	>50	>50	>50	>50	>50	33.33	16.67	7.69	2.78	0.89
310	>50	>50	>50	>50	>50	50.00	16.67	7.69	3.13	0.99
320	>50	>50	>50	>50	>50	50.00	20.00	10.00	3.45	1.11
330	>50	>50	>50	>50	>50	50.00	33.33	10.00	3.85	1.32
340	>50	>50	>50	>50	>50	>50	33.33	10.00	4.55	1.41
350	>50	>50	>50	>50	>50	>50	50.00	12.50	4.55	1.49
360	>50	>50	>50	>50	>50	>50	50.00	12.50	4.55	1.59
370	>50	>50	>50	>50	>50	>50	>50	14.29	5.88	1.79
380	>50	>50	>50	>50	>50	>50	>50	16.67	5.88	2.04
390	>50	>50	>50	>50	>50	>50	>50	16.67	6.25	2.17
400	>50	>50	>50	>50	>50	>50	>50	16.67	6.67	2.22
450	>50	>50	>50	>50	>50	>50	>50	50.00	11.11	3.70
500	>50	>50	>50	>50	>50	>50	>50	>50	20.00	7.14



**Concentratietijd = 30 minuten, lineaire doorvoerrelatie:**

Maximale berging [m <sup>3</sup> /ha]:	max. doorvoerdebiet [l/(s.ha)]:									
	50	40	30	25	20	15	10	5	2	1
10	0.07	0.09	0.11	0.09	0.07	0.05	0.03	0.02	0.01	0.01
20	0.39	0.29	0.18	0.13	0.10	0.07	0.04	0.02	0.02	0.01
30	0.52	0.35	0.22	0.18	0.13	0.10	0.06	0.03	0.02	0.02
40	0.61	0.41	0.29	0.23	0.18	0.13	0.09	0.05	0.03	0.02
50	0.75	0.52	0.37	0.31	0.25	0.18	0.12	0.06	0.03	0.02
60	0.89	0.64	0.45	0.38	0.31	0.23	0.15	0.08	0.04	0.03
70	1.09	0.81	0.57	0.47	0.39	0.30	0.20	0.10	0.05	0.03
80	1.35	1.00	0.71	0.60	0.47	0.37	0.25	0.12	0.06	0.04
90	1.69	1.25	0.87	0.73	0.58	0.44	0.30	0.15	0.07	0.04
100	2.08	1.61	1.11	0.92	0.74	0.55	0.36	0.19	0.08	0.05
110	2.56	2.00	1.37	1.16	0.89	0.69	0.45	0.23	0.09	0.05
120	3.23	2.33	1.67	1.39	1.16	0.84	0.53	0.27	0.11	0.06
130	3.57	2.78	2.08	1.64	1.35	1.05	0.62	0.33	0.12	0.06
140	4.17	3.33	2.44	2.13	1.54	1.23	0.76	0.39	0.14	0.07
150	5.00	3.85	2.94	2.44	1.96	1.47	0.93	0.45	0.16	0.08
160	5.26	4.35	3.57	3.13	2.50	1.69	1.05	0.52	0.18	0.08
170	6.67	5.00	4.00	3.57	3.03	2.04	1.25	0.60	0.21	0.09
180	6.67	5.56	4.76	3.85	3.33	2.70	1.52	0.70	0.24	0.10
190	8.33	6.25	5.00	4.55	3.85	3.13	1.92	0.80	0.27	0.11
200	11.11	7.14	5.88	5.00	4.17	3.70	2.38	0.89	0.30	0.12
210	12.50	10.00	6.67	5.56	4.55	4.00	2.56	1.03	0.34	0.13
220	16.67	11.11	7.69	7.14	5.56	4.17	2.94	1.14	0.38	0.14
230	20.00	14.29	8.33	7.69	6.67	4.55	3.23	1.30	0.43	0.15
240	20.00	20.00	9.09	8.33	7.69	5.26	3.57	1.43	0.49	0.16
250	20.00	20.00	11.11	9.09	8.33	6.25	4.17	1.64	0.55	0.17
260	25.00	20.00	16.67	11.11	11.11	7.14	4.17	1.89	0.62	0.18
270	50.00	20.00	20.00	14.29	11.11	8.33	5.88	2.08	0.68	0.19
280	50.00	33.33	20.00	14.29	14.29	10.00	7.14	2.38	0.74	0.20
290	>50	50.00	20.00	14.29	14.29	11.11	7.14	2.78	0.81	0.22
300	>50	>50	25.00	20.00	14.29	12.50	7.69	3.03	0.89	0.24
310	>50	>50	50.00	25.00	16.67	12.50	8.33	4.17	1.01	0.26
320	>50	>50	50.00	33.33	20.00	16.67	10.00	4.35	1.08	0.28
330	>50	>50	>50	33.33	25.00	16.67	11.11	4.35	1.18	0.30
340	>50	>50	>50	>50	25.00	20.00	12.50	4.76	1.27	0.32
350	>50	>50	>50	>50	33.33	25.00	14.29	4.76	1.49	0.35
360	>50	>50	>50	>50	50.00	25.00	14.29	6.67	1.69	0.38
370	>50	>50	>50	>50	>50	25.00	16.67	6.67	2.00	0.41
380	>50	>50	>50	>50	>50	33.33	20.00	7.14	2.13	0.44
390	>50	>50	>50	>50	>50	50.00	20.00	7.14	2.13	0.47
400	>50	>50	>50	>50	>50	50.00	20.00	7.14	2.22	0.52
450	>50	>50	>50	>50	>50	>50	33.33	12.50	3.23	0.72
500	>50	>50	>50	>50	>50	>50	>50	20.00	5.00	0.93

**Concentratietijd = 30 minuten, vierkantsw. doorvoerrelatie:**

Maximale berging [m <sup>3</sup> /ha]:	max. doorvoerdebiet [l/(s.ha)]:									
	50	40	30	25	20	15	10	5	2	1
10	0.06	0.07	0.12	0.11	0.08	0.06	0.03	0.02	0.01	0.01
20	0.48	0.35	0.22	0.17	0.12	0.08	0.05	0.03	0.02	0.01
30	0.65	0.44	0.29	0.22	0.17	0.12	0.08	0.04	0.02	0.02
40	0.81	0.54	0.37	0.31	0.24	0.17	0.11	0.06	0.03	0.02
50	1.02	0.71	0.47	0.39	0.31	0.24	0.15	0.08	0.04	0.03
60	1.20	0.90	0.60	0.49	0.39	0.30	0.20	0.10	0.05	0.03
70	1.59	1.14	0.78	0.63	0.49	0.38	0.25	0.13	0.06	0.04
80	2.13	1.37	0.97	0.79	0.60	0.47	0.32	0.16	0.07	0.04
90	2.44	1.79	1.20	0.99	0.81	0.58	0.40	0.21	0.09	0.05
100	3.03	2.22	1.54	1.27	0.98	0.73	0.48	0.25	0.10	0.06
110	4.00	2.70	1.79	1.52	1.23	0.88	0.58	0.30	0.12	0.07
120	4.17	3.13	2.22	1.82	1.54	1.12	0.69	0.37	0.14	0.08
130	5.00	4.00	2.94	2.27	1.75	1.37	0.88	0.45	0.17	0.08
140	5.56	4.35	3.33	2.86	2.17	1.64	1.11	0.51	0.20	0.09
150	6.67	5.00	3.85	3.23	2.56	1.92	1.27	0.60	0.24	0.11
160	7.14	5.88	4.55	3.70	3.23	2.33	1.52	0.70	0.28	0.12
170	8.33	6.67	5.00	4.35	3.45	2.94	1.75	0.79	0.31	0.13
180	11.11	7.69	5.56	5.00	4.35	3.33	2.13	0.94	0.37	0.15
190	12.5	11.11	6.25	5.26	4.76	3.85	2.5	1.15	0.43	0.16
200	16.67	11.11	8.33	5.88	5.26	4.17	3.03	1.23	0.48	0.18
210	20.00	14.29	10.00	7.69	5.88	4.35	3.45	1.52	0.54	0.19
220	25.00	20.00	11.11	9.09	8.33	4.76	4.00	1.67	0.61	0.21
230	33.33	20.00	14.29	9.09	8.33	7.14	4.35	1.89	0.69	0.24
240	33.33	20.00	20.00	14.29	8.33	7.69	5.56	2.27	0.76	0.26
250	33.33	25.00	20.00	16.67	9.09	8.33	5.56	2.78	0.90	0.29
260	50.00	33.33	20.00	20.00	12.5	10.00	6.67	2.94	0.98	0.31
270	> 50	50.00	20.00	20.00	20.00	12.5	7.69	3.23	1.08	0.34
280	> 50	50.00	25.00	20.00	20.00	12.5	7.69	3.70	1.14	0.37
290	> 50	> 50	50.00	20.00	20.00	14.29	8.33	4.17	1.39	0.39
300	> 50	> 50	> 50	25.00	20.00	14.29	10.00	4.35	1.52	0.44
310	> 50	> 50	> 50	> 50	25.00	16.67	11.11	4.76	1.64	0.50
320	> 50	> 50	> 50	> 50	33.33	20.00	11.11	5.00	1.79	0.55
330	> 50	> 50	> 50	> 50	50.00	33.33	11.11	5.88	2.17	0.60
340	> 50	> 50	> 50	> 50	> 50	33.33	16.67	5.88	2.38	0.65
350	> 50	> 50	> 50	> 50	> 50	33.33	20.00	7.69	2.63	0.71
360	> 50	> 50	> 50	> 50	> 50	50.00	20.00	10.00	2.86	0.78
370	> 50	> 50	> 50	> 50	> 50	> 50	20.00	11.11	3.33	0.89
380	> 50	> 50	> 50	> 50	> 50	> 50	20.00	11.11	3.85	0.97
390	> 50	> 50	> 50	> 50	> 50	> 50	20.00	11.11	4.00	1.02
400	> 50	> 50	> 50	> 50	> 50	> 50	25.00	11.11	4.35	1.08
450	> 50	> 50	> 50	> 50	> 50	> 50	> 50	20.00	6.67	1.39
500	> 50	> 50	> 50	> 50	> 50	> 50	> 50	33.33	10.00	1.96

**Concentratietijd = 40 minuten, constant doorvoerdebiet:**

Maximale berging [m <sup>3</sup> /ha]:	constant doorvoerdebiet [l/(s.ha)]:									
	50	40	30	25	20	15	10	5	2	1
10	1.45	0.80	0.42	0.31	0.20	0.12	0.07	0.03	0.01	0.01
20	2.04	1.15	0.58	0.41	0.29	0.19	0.10	0.04	0.02	0.02
30	2.70	1.49	0.81	0.54	0.40	0.27	0.15	0.07	0.03	0.02
40	3.45	1.96	1.05	0.76	0.52	0.34	0.21	0.09	0.04	0.03
50	4.17	2.50	1.30	1.00	0.65	0.45	0.28	0.13	0.05	0.03
60	5.56	3.13	1.72	1.23	0.92	0.55	0.36	0.17	0.07	0.04
70	6.25	3.85	2.27	1.64	1.12	0.74	0.45	0.22	0.08	0.05
80	6.67	4.55	2.70	1.89	1.43	0.96	0.54	0.28	0.10	0.06
90	7.14	5.56	3.33	2.56	1.69	1.20	0.68	0.34	0.13	0.07
100	11.11	6.67	4.00	2.94	2.04	1.49	0.83	0.41	0.16	0.08
110	11.11	7.14	4.55	3.70	2.56	1.72	1.05	0.50	0.19	0.09
120	14.29	8.33	5.00	4.35	2.86	2.13	1.30	0.58	0.23	0.11
130	20.00	11.11	6.67	4.76	3.70	2.56	1.64	0.72	0.28	0.13
140	25.00	11.11	7.14	5.26	4.55	2.78	2.00	0.83	0.33	0.15
150	33.33	14.29	11.11	6.25	5.00	3.33	2.27	0.95	0.37	0.17
160	33.33	20.00	11.11	8.33	5.26	4.17	2.70	1.08	0.44	0.19
170	33.33	25.00	11.11	11.11	6.67	4.35	3.13	1.35	0.51	0.21
180	50.00	33.33	14.29	11.11	9.09	5.26	3.57	1.67	0.56	0.25
190	>50	33.33	16.67	12.50	11.11	5.88	4.17	2.00	0.66	0.27
200	>50	33.33	25.00	14.29	11.11	7.69	4.17	2.27	0.72	0.31
210	>50	50.00	25.00	20.00	12.50	8.33	5.00	2.50	0.87	0.34
220	>50	>50	33.33	20.00	16.67	10.00	6.25	2.78	0.96	0.38
230	>50	>50	33.33	25.00	16.67	11.11	6.25	3.13	1.08	0.44
240	>50	>50	50.00	25.00	20.00	16.67	7.14	3.70	1.22	0.47
250	>50	>50	>50	25.00	20.00	16.67	9.09	4.35	1.47	0.52
260	>50	>50	>50	>50	25.00	20.00	10.00	5.00	1.64	0.58
270	>50	>50	>50	>50	33.33	20.00	10.00	5.56	1.89	0.66
280	>50	>50	>50	>50	50.00	20.00	16.67	5.88	2.38	0.74
290	>50	>50	>50	>50	>50	33.33	16.67	7.14	2.56	0.81
300	>50	>50	>50	>50	>50	50.00	16.67	7.69	2.78	0.89
310	>50	>50	>50	>50	>50	50.00	16.67	8.33	3.33	0.99
320	>50	>50	>50	>50	>50	50.00	25.00	10.00	3.57	1.11
330	>50	>50	>50	>50	>50	>50	33.33	10.00	4.00	1.32
340	>50	>50	>50	>50	>50	>50	33.33	10.00	4.55	1.41
350	>50	>50	>50	>50	>50	>50	50.00	12.50	4.55	1.49
360	>50	>50	>50	>50	>50	>50	50.00	12.50	4.55	1.61
370	>50	>50	>50	>50	>50	>50	>50	16.67	5.88	1.79
380	>50	>50	>50	>50	>50	>50	>50	16.67	5.88	2.08
390	>50	>50	>50	>50	>50	>50	>50	16.67	6.25	2.17
400	>50	>50	>50	>50	>50	>50	>50	20.00	6.67	2.22
450	>50	>50	>50	>50	>50	>50	>50	50.00	11.11	3.70
500	>50	>50	>50	>50	>50	>50	>50	>50	20.00	7.14

**Concentratietijd = 40 minuten, lineaire doorvoerrelatie:**

Maximale berging [m <sup>3</sup> /ha]:	max. doorvoerdebiet [l/(s.ha)]:									
	50	40	30	25	20	15	10	5	2	1
10	0.10	0.13	0.17	0.14	0.10	0.06	0.03	0.02	0.01	0.01
20	0.66	0.45	0.26	0.19	0.13	0.08	0.05	0.03	0.02	0.01
30	0.95	0.53	0.31	0.23	0.16	0.11	0.07	0.04	0.02	0.02
40	1.03	0.61	0.36	0.29	0.22	0.15	0.10	0.05	0.03	0.02
50	1.16	0.73	0.45	0.36	0.28	0.20	0.13	0.06	0.03	0.02
60	1.33	0.93	0.57	0.44	0.35	0.26	0.16	0.08	0.04	0.03
70	1.67	1.10	0.69	0.54	0.43	0.32	0.21	0.10	0.05	0.03
80	1.96	1.28	0.87	0.67	0.54	0.39	0.26	0.13	0.06	0.04
90	2.44	1.72	1.06	0.85	0.66	0.48	0.31	0.16	0.07	0.04
100	2.78	1.96	1.35	1.08	0.79	0.60	0.38	0.19	0.08	0.05
110	3.33	2.33	1.59	1.30	1.03	0.72	0.46	0.23	0.09	0.05
120	3.85	2.94	1.85	1.56	1.30	0.92	0.56	0.28	0.11	0.06
130	4.55	3.33	2.33	1.82	1.47	1.14	0.66	0.34	0.12	0.06
140	5.00	4.00	2.86	2.33	1.67	1.30	0.81	0.39	0.14	0.07
150	5.88	4.76	3.45	2.56	2.08	1.52	0.96	0.45	0.16	0.08
160	6.67	5.26	4.00	3.45	2.63	1.85	1.10	0.53	0.18	0.08
170	6.67	5.56	4.55	3.85	3.23	2.13	1.30	0.62	0.21	0.09
180	10.00	5.88	4.76	4.35	3.45	2.70	1.59	0.70	0.24	0.10
190	11.11	7.69	5.56	5.00	3.85	3.33	1.96	0.80	0.27	0.11
200	12.50	9.09	6.25	5.56	4.35	3.70	2.38	0.91	0.30	0.12
210	14.29	11.11	7.69	6.67	5.26	4.00	2.56	1.06	0.34	0.13
220	20.00	14.29	8.33	7.14	6.25	4.17	2.94	1.15	0.38	0.14
230	20.00	16.67	9.09	8.33	7.14	5.00	3.23	1.30	0.44	0.15
240	20.00	20.00	12.50	9.09	8.33	5.56	3.85	1.43	0.49	0.16
250	25.00	20.00	14.29	11.11	9.09	6.67	4.17	1.67	0.55	0.17
260	50.00	20.00	20.00	12.50	11.11	8.33	4.35	1.89	0.63	0.18
270	50.00	25.00	20.00	14.29	12.50	9.09	6.25	2.13	0.68	0.19
280	>50	33.33	20.00	14.29	14.29	10.00	7.14	2.44	0.75	0.20
290	>50	>50	25.00	20.00	14.29	11.11	7.14	2.78	0.81	0.22
300	>50	>50	33.33	25.00	14.29	12.50	7.69	3.23	0.89	0.24
310	>50	>50	50.00	25.00	16.67	14.29	9.09	4.17	1.01	0.26
320	>50	>50	>50	33.33	20.00	16.67	10.00	4.35	1.08	0.28
330	>50	>50	>50	50.00	25.00	16.67	11.11	4.55	1.18	0.30
340	>50	>50	>50	>50	25.00	20.00	12.50	4.76	1.27	0.33
350	>50	>50	>50	>50	33.33	25.00	14.29	4.76	1.54	0.35
360	>50	>50	>50	>50	>50	25.00	16.67	6.67	1.69	0.39
370	>50	>50	>50	>50	>50	25.00	16.67	6.67	2.00	0.42
380	>50	>50	>50	>50	>50	33.33	20.00	7.14	2.13	0.44
390	>50	>50	>50	>50	>50	50.00	20.00	7.14	2.13	0.47
450	>50	>50	>50	>50	>50	50.00	20.00	7.14	2.22	0.52
500	>50	>50	>50	>50	>50	>50	33.33	12.50	3.33	0.73

**Concentratietijd = 40 minuten, vierkantsw. doorvoerrelatie:**

Maximale berging [m <sup>3</sup> /ha]:	max. doorvoerdebiet [l/(s.ha)]:									
	50	40	30	25	20	15	10	5	2	1
10	0.08	0.10	0.18	0.16	0.11	0.07	0.04	0.02	0.01	0.01
20	0.83	0.54	0.31	0.23	0.16	0.10	0.06	0.03	0.02	0.01
30	1.11	0.65	0.38	0.30	0.21	0.15	0.09	0.04	0.02	0.02
40	1.32	0.81	0.48	0.37	0.29	0.20	0.12	0.06	0.03	0.02
50	1.61	1.04	0.60	0.46	0.36	0.26	0.17	0.08	0.04	0.03
60	2.00	1.20	0.76	0.59	0.45	0.33	0.21	0.10	0.05	0.03
70	2.50	1.59	1.00	0.74	0.55	0.42	0.27	0.13	0.06	0.04
80	2.78	1.89	1.20	0.93	0.71	0.52	0.34	0.17	0.07	0.04
90	3.33	2.38	1.56	1.22	0.91	0.65	0.41	0.22	0.09	0.05
100	4.17	2.78	1.82	1.52	1.12	0.78	0.51	0.25	0.10	0.06
110	4.76	3.33	2.22	1.72	1.41	1.01	0.60	0.31	0.12	0.07
120	5.26	3.85	2.70	2.08	1.67	1.27	0.75	0.37	0.15	0.08
130	6.25	4.55	3.23	2.63	1.96	1.45	0.93	0.47	0.17	0.08
140	6.67	5.00	4.00	3.03	2.33	1.75	1.15	0.53	0.20	0.10
150	7.69	6.25	4.55	3.57	2.78	2.08	1.32	0.61	0.24	0.11
160	11.11	6.67	5.00	4.17	3.33	2.44	1.54	0.71	0.28	0.12
170	11.11	8.33	5.56	5.00	3.70	3.13	1.85	0.81	0.31	0.13
180	14.29	11.11	6.25	5.26	4.35	3.45	2.22	0.96	0.37	0.15
190	16.67	11.11	7.69	5.88	5.00	3.85	2.50	1.16	0.43	0.16
200	20.00	14.29	10.00	7.69	5.88	4.17	3.13	1.25	0.49	0.18
210	25.00	20.00	11.11	8.33	7.14	4.55	3.57	1.52	0.54	0.20
220	33.33	20.00	12.50	9.09	8.33	5.56	4.00	1.67	0.61	0.21
230	33.33	20.00	16.67	11.11	8.33	7.14	4.55	1.92	0.70	0.24
240	50.00	33.33	20.00	16.67	9.09	8.33	5.56	2.33	0.77	0.27
250	50.00	33.33	20.00	20.00	12.50	8.33	5.88	2.78	0.91	0.29
260	> 50	50.00	20.00	20.00	14.29	10.00	6.67	3.03	0.98	0.32
270	> 50	50.00	25.00	20.00	20.00	12.50	7.69	3.33	1.08	0.35
280	> 50	> 50	50.00	20.00	20.00	12.50	7.69	3.85	1.14	0.37
290	> 50	> 50	50.00	25.00	20.00	14.29	8.33	4.35	1.41	0.39
300	> 50	> 50	> 50	33.33	25.00	14.29	10.00	4.76	1.52	0.45
310	> 50	> 50	> 50	> 50	25.00	16.67	11.11	4.76	1.67	0.50
320	> 50	> 50	> 50	> 50	33.33	20.00	11.11	5.00	1.79	0.55
330	> 50	> 50	> 50	> 50	50.00	33.33	12.50	5.88	2.17	0.60
340	> 50	> 50	> 50	> 50	> 50	33.33	20.00	6.67	2.38	0.65
350	> 50	> 50	> 50	> 50	> 50	33.33	20.00	7.69	2.70	0.72
360	> 50	> 50	> 50	> 50	> 50	50.00	20.00	10.00	2.86	0.78
370	> 50	> 50	> 50	> 50	> 50	> 50	20.00	11.11	3.33	0.89
380	> 50	> 50	> 50	> 50	> 50	> 50	20.00	11.11	3.85	0.97
390	> 50	> 50	> 50	> 50	> 50	> 50	25.00	11.11	4.00	1.02
450	> 50	> 50	> 50	> 50	> 50	> 50	33.33	11.11	4.35	1.08
500	> 50	> 50	> 50	> 50	> 50	> 50	> 50	20.00	6.67	1.39

**Concentratietijd = 50 minuten, constant doorvoerdebiet:**

Maximale berging [m <sup>3</sup> /ha]:	constant doorvoerdebiet [l/(s.ha)]:									
	50	40	30	25	20	15	10	5	2	1
10	2.38	1.30	0.60	0.40	0.26	0.15	0.08	0.03	0.02	0.01
20	3.03	1.72	0.85	0.56	0.36	0.23	0.12	0.05	0.02	0.02
30	3.85	2.22	1.11	0.74	0.48	0.30	0.17	0.07	0.03	0.02
40	4.76	2.86	1.49	1.00	0.63	0.40	0.23	0.10	0.04	0.03
50	6.25	3.57	1.79	1.23	0.85	0.52	0.30	0.13	0.05	0.03
60	6.67	4.17	2.22	1.61	1.06	0.65	0.39	0.17	0.07	0.04
70	7.14	5.26	2.86	1.85	1.43	0.84	0.48	0.23	0.08	0.05
80	11.11	6.67	3.57	2.50	1.69	1.06	0.59	0.29	0.10	0.06
90	11.11	6.67	4.17	3.03	2.00	1.43	0.77	0.34	0.13	0.07
100	14.29	7.14	4.76	3.57	2.56	1.64	0.89	0.43	0.16	0.08
110	16.67	11.11	5.56	4.55	2.78	1.89	1.20	0.52	0.19	0.09
120	25.00	11.11	6.67	4.76	3.57	2.50	1.39	0.60	0.24	0.11
130	33.33	14.29	7.14	5.26	4.55	2.63	1.69	0.74	0.28	0.13
140	33.33	16.67	11.11	6.25	5.00	3.33	2.04	0.88	0.33	0.15
150	50.00	25.00	11.11	9.09	5.26	3.57	2.50	0.99	0.38	0.17
160	50.00	33.33	11.11	11.11	6.25	4.35	2.94	1.12	0.45	0.19
170	>50	33.33	14.29	11.11	9.09	4.76	3.33	1.37	0.51	0.22
180	>50	33.33	16.67	12.50	11.11	5.26	3.57	1.69	0.57	0.25
190	>50	50.00	20.00	16.67	11.11	7.14	4.17	2.13	0.67	0.28
200	>50	>50	25.00	16.67	12.50	8.33	4.17	2.33	0.73	0.31
210	>50	>50	33.33	20.00	16.67	10.00	5.56	2.50	0.88	0.35
220	>50	>50	33.33	25.00	16.67	11.11	6.25	2.86	0.96	0.39
230	>50	>50	50.00	25.00	20.00	12.50	6.67	3.23	1.09	0.45
240	>50	>50	>50	33.33	20.00	16.67	7.14	3.85	1.23	0.47
250	>50	>50	>50	50.00	25.00	20.00	9.09	4.35	1.47	0.53
260	>50	>50	>50	>50	25.00	20.00	10.00	5.26	1.64	0.60
270	>50	>50	>50	>50	33.33	20.00	12.50	5.56	1.89	0.66
280	>50	>50	>50	>50	>50	25.00	16.67	6.67	2.38	0.74
290	>50	>50	>50	>50	>50	33.33	16.67	7.14	2.63	0.81
300	>50	>50	>50	>50	>50	50.00	16.67	7.69	2.78	0.93
310	>50	>50	>50	>50	>50	50.00	20.00	8.33	3.33	1.00
320	>50	>50	>50	>50	>50	>50	25.00	10.00	3.70	1.11
330	>50	>50	>50	>50	>50	>50	33.33	10.00	4.00	1.32
340	>50	>50	>50	>50	>50	>50	33.33	10.00	4.55	1.41
350	>50	>50	>50	>50	>50	>50	50.00	12.50	4.55	1.49
360	>50	>50	>50	>50	>50	>50	>50	14.29	4.55	1.64
370	>50	>50	>50	>50	>50	>50	>50	16.67	5.88	1.79
380	>50	>50	>50	>50	>50	>50	>50	16.67	5.88	2.08
390	>50	>50	>50	>50	>50	>50	>50	16.67	6.25	2.17
400	>50	>50	>50	>50	>50	>50	>50	20.00	6.67	2.22
450	>50	>50	>50	>50	>50	>50	>50	50.00	11.11	3.70
500	>50	>50	>50	>50	>50	>50	>50	>50	20.00	7.14

**Concentratietijd = 50 minuten, lineaire doorvoerrelatie:**

Maximale berging [m <sup>3</sup> /ha]:	max. doorvoerdebiet [l/(s.ha)]:									
	50	40	30	25	20	15	10	5	2	1
10	0.11	0.14	0.25	0.20	0.14	0.08	0.04	0.02	0.01	0.01
20	1.18	0.71	0.36	0.25	0.17	0.10	0.06	0.03	0.02	0.01
30	1.64	0.84	0.41	0.29	0.21	0.13	0.08	0.04	0.02	0.02
40	1.72	0.90	0.48	0.35	0.26	0.17	0.10	0.05	0.03	0.02
50	1.79	1.08	0.58	0.43	0.32	0.22	0.14	0.06	0.03	0.02
60	2.04	1.27	0.70	0.52	0.39	0.28	0.17	0.08	0.04	0.03
70	2.38	1.54	0.85	0.65	0.48	0.35	0.22	0.10	0.05	0.03
80	2.78	1.79	1.06	0.80	0.58	0.43	0.27	0.13	0.06	0.04
90	3.23	2.08	1.35	1.02	0.74	0.51	0.32	0.16	0.07	0.04
100	3.70	2.56	1.61	1.23	0.88	0.64	0.40	0.20	0.08	0.05
110	4.35	3.03	1.79	1.54	1.19	0.75	0.48	0.24	0.09	0.05
120	4.76	3.45	2.13	1.72	1.39	0.99	0.57	0.28	0.11	0.06
130	5.26	4.00	2.63	2.08	1.52	1.20	0.68	0.34	0.12	0.06
140	5.88	4.55	3.33	2.50	1.82	1.33	0.84	0.40	0.14	0.07
150	6.67	5.00	3.70	2.94	2.38	1.59	0.99	0.46	0.16	0.08
160	10.00	5.56	4.35	3.57	2.86	1.89	1.16	0.54	0.18	0.08
170	11.11	5.88	4.76	4.35	3.23	2.33	1.32	0.63	0.21	0.09
180	11.11	9.09	5.56	4.76	3.70	2.94	1.69	0.71	0.24	0.10
190	14.29	10.00	5.88	5.00	4.17	3.33	2.04	0.82	0.27	0.11
200	16.67	11.11	7.69	5.88	4.35	3.70	2.44	0.92	0.31	0.12
210	20.00	12.50	8.33	7.14	5.56	4.17	2.63	1.09	0.34	0.13
220	20.00	16.67	8.33	8.33	6.67	4.55	3.03	1.15	0.39	0.14
230	20.00	20.00	11.11	8.33	7.69	5.00	3.33	1.33	0.44	0.15
240	25.00	20.00	14.29	10.00	8.33	5.56	3.85	1.45	0.50	0.16
250	50.00	20.00	20.00	12.50	10.00	7.14	4.17	1.69	0.56	0.17
260	>50	25.00	20.00	12.50	11.11	8.33	4.76	1.89	0.63	0.18
270	>50	33.33	20.00	14.29	12.50	9.09	7.14	2.17	0.68	0.19
280	>50	50.00	20.00	16.67	14.29	11.11	7.14	2.44	0.75	0.21
290	>50	>50	33.33	20.00	14.29	11.11	7.14	2.78	0.81	0.22
300	>50	>50	33.33	25.00	14.29	12.50	7.69	3.33	0.90	0.25
310	>50	>50	50.00	33.33	20.00	14.29	10.00	4.35	1.01	0.26
320	>50	>50	>50	50.00	25.00	16.67	10.00	4.35	1.08	0.28
330	>50	>50	>50	>50	25.00	16.67	11.11	4.55	1.18	0.30
340	>50	>50	>50	>50	25.00	25.00	12.50	4.76	1.27	0.33
350	>50	>50	>50	>50	50.00	25.00	14.29	4.76	1.54	0.35
360	>50	>50	>50	>50	>50	25.00	16.67	6.67	1.72	0.39
370	>50	>50	>50	>50	>50	25.00	16.67	6.67	2.00	0.42
380	>50	>50	>50	>50	>50	33.33	20.00	7.14	2.13	0.44
390	>50	>50	>50	>50	>50	50.00	20.00	7.14	2.13	0.47
450	>50	>50	>50	>50	>50	50.00	20.00	7.14	2.22	0.52
500	>50	>50	>50	>50	>50	>50	33.33	12.50	3.33	0.73

**Concentratietijd = 50 minuten, vierkantsw. doorvoerrelatie:**

Maximale berging [m <sup>3</sup> /ha]:	max. doorvoerdebiet [l/(s.ha)]:									
	50	40	30	25	20	15	10	5	2	1
10	0.10	0.12	0.25	0.22	0.16	0.09	0.05	0.02	0.01	0.01
20	1.45	0.84	0.41	0.29	0.20	0.12	0.07	0.03	0.02	0.01
30	1.79	1.03	0.51	0.37	0.26	0.17	0.10	0.04	0.02	0.02
40	1.96	1.18	0.63	0.46	0.33	0.23	0.13	0.06	0.03	0.02
50	2.44	1.47	0.78	0.57	0.42	0.29	0.18	0.08	0.04	0.03
60	2.86	1.75	1.04	0.70	0.52	0.37	0.23	0.11	0.05	0.03
70	3.33	2.04	1.20	0.89	0.63	0.47	0.29	0.13	0.06	0.04
80	3.85	2.56	1.56	1.10	0.83	0.55	0.35	0.17	0.07	0.04
90	4.76	2.94	1.79	1.49	1.02	0.71	0.43	0.22	0.09	0.05
100	5.26	3.57	2.13	1.69	1.35	0.83	0.55	0.26	0.10	0.06
110	6.25	4.17	2.70	1.96	1.59	1.12	0.64	0.32	0.12	0.07
120	6.25	4.76	3.23	2.50	1.79	1.33	0.80	0.38	0.15	0.08
130	7.69	5.26	3.85	2.86	2.17	1.52	0.99	0.48	0.17	0.08
140	11.11	6.25	4.35	3.57	2.56	1.85	1.16	0.53	0.21	0.10
150	11.11	6.67	5.00	4.17	3.33	2.22	1.33	0.61	0.24	0.11
160	11.11	11.11	5.56	5.00	3.57	2.63	1.64	0.71	0.28	0.12
170	14.29	11.11	5.88	5.26	4.00	3.23	1.89	0.81	0.31	0.13
180	20.00	11.11	7.69	5.56	4.76	3.70	2.22	0.97	0.38	0.15
190	20.00	14.29	9.09	7.14	5.26	4.00	2.70	1.18	0.43	0.16
200	25.00	20.00	11.11	8.33	6.25	4.35	3.23	1.28	0.49	0.18
210	33.33	20.00	12.50	9.09	8.33	5.00	3.57	1.54	0.55	0.20
220	33.33	20.00	16.67	11.11	8.33	6.25	4.00	1.69	0.62	0.21
230	50.00	25.00	20.00	14.29	8.33	7.69	5.00	1.96	0.70	0.24
240	> 50	33.33	20.00	16.67	11.11	8.33	5.56	2.33	0.77	0.27
250	> 50	50.00	20.00	20.00	12.50	10.00	6.67	2.78	0.91	0.29
260	> 50	> 50	25.00	20.00	14.29	11.11	7.14	3.03	0.98	0.32
270	> 50	> 50	33.33	20.00	20.00	12.50	7.69	3.45	1.08	0.35
280	> 50	> 50	50.00	20.00	20.00	14.29	8.33	4.00	1.16	0.37
290	> 50	> 50	> 50	25.00	20.00	14.29	9.09	4.35	1.41	0.40
300	> 50	> 50	> 50	> 50	25.00	16.67	11.11	4.76	1.52	0.45
310	> 50	> 50	> 50	> 50	33.33	20.00	11.11	4.76	1.69	0.50
320	> 50	> 50	> 50	> 50	33.33	20.00	11.11	5.00	1.79	0.55
330	> 50	> 50	> 50	> 50	> 50	33.33	14.29	5.88	2.17	0.61
340	> 50	> 50	> 50	> 50	> 50	33.33	20.00	6.67	2.44	0.65
350	> 50	> 50	> 50	> 50	> 50	50.00	20.00	8.33	2.70	0.72
360	> 50	> 50	> 50	> 50	> 50	> 50	20.00	10.00	2.86	0.78
370	> 50	> 50	> 50	> 50	> 50	> 50	20.00	11.11	3.33	0.89
380	> 50	> 50	> 50	> 50	> 50	> 50	20.00	11.11	3.85	0.97
390	> 50	> 50	> 50	> 50	> 50	> 50	25.00	11.11	4.00	1.02
450	> 50	> 50	> 50	> 50	> 50	> 50	50.00	11.11	4.35	1.08
500	> 50	> 50	> 50	> 50	> 50	> 50	> 50	20.00	6.67	1.39



**Concentratietijd = 60 minuten, constant doorvoerdebiet:**

Maximale berging [m <sup>3</sup> /ha]:	constant doorvoerdebiet [l/(s.ha)]:									
	50	40	30	25	20	15	10	5	2	1
10	3.45	1.82	0.86	0.53	0.32	0.19	0.09	0.03	0.02	0.01
20	4.55	2.44	1.12	0.72	0.45	0.27	0.14	0.05	0.02	0.02
30	5.26	3.03	1.56	1.00	0.58	0.36	0.19	0.08	0.03	0.02
40	6.67	3.85	1.82	1.25	0.78	0.47	0.26	0.10	0.04	0.03
50	9.09	4.55	2.22	1.61	1.02	0.58	0.33	0.14	0.05	0.03
60	11.11	5.56	2.86	1.85	1.35	0.74	0.43	0.18	0.07	0.04
70	11.11	6.25	3.70	2.33	1.61	0.96	0.52	0.23	0.09	0.05
80	14.29	7.14	4.17	2.86	1.92	1.28	0.66	0.30	0.11	0.06
90	20.00	11.11	4.76	3.70	2.38	1.59	0.81	0.35	0.13	0.07
100	25.00	11.11	5.88	4.17	2.63	1.82	1.03	0.44	0.16	0.08
110	25.00	12.50	6.67	4.76	3.57	2.13	1.27	0.53	0.19	0.09
120	33.33	14.29	9.09	5.56	4.17	2.63	1.52	0.62	0.24	0.11
130	33.33	20.00	11.11	6.25	5.00	2.86	1.89	0.76	0.29	0.13
140	>50	25.00	11.11	11.11	5.26	3.33	2.27	0.88	0.34	0.15
150	>50	33.33	12.50	11.11	5.56	4.17	2.63	1.01	0.38	0.17
160	>50	33.33	16.67	11.11	9.09	4.55	3.13	1.18	0.46	0.19
170	>50	50.00	20.00	12.50	11.11	5.26	3.45	1.37	0.51	0.22
180	>50	>50	20.00	16.67	11.11	7.14	3.85	1.72	0.57	0.25
190	>50	>50	25.00	16.67	12.50	8.33	4.17	2.17	0.68	0.28
200	>50	>50	33.33	20.00	14.29	8.33	4.55	2.33	0.74	0.31
210	>50	>50	33.33	20.00	16.67	10.00	6.25	2.56	0.89	0.35
220	>50	>50	50.00	25.00	20.00	12.50	6.25	2.86	0.97	0.39
230	>50	>50	>50	33.33	20.00	16.67	6.67	3.33	1.10	0.45
240	>50	>50	>50	50.00	20.00	16.67	9.09	4.00	1.27	0.47
250	>50	>50	>50	>50	25.00	20.00	9.09	4.35	1.49	0.53
260	>50	>50	>50	>50	33.33	20.00	10.00	5.26	1.64	0.60
270	>50	>50	>50	>50	>50	20.00	12.50	5.88	1.92	0.66
280	>50	>50	>50	>50	>50	33.33	16.67	6.67	2.38	0.74
290	>50	>50	>50	>50	>50	50.00	16.67	7.14	2.63	0.82
300	>50	>50	>50	>50	>50	50.00	16.67	7.69	2.86	0.93
310	>50	>50	>50	>50	>50	50.00	20.00	10.00	3.33	1.01
320	>50	>50	>50	>50	>50	>50	33.33	10.00	3.70	1.11
330	>50	>50	>50	>50	>50	>50	33.33	10.00	4.00	1.32
340	>50	>50	>50	>50	>50	>50	33.33	12.50	4.55	1.41
350	>50	>50	>50	>50	>50	>50	50.00	12.50	4.55	1.49
360	>50	>50	>50	>50	>50	>50	>50	14.29	4.76	1.64
370	>50	>50	>50	>50	>50	>50	>50	16.67	5.88	1.79
380	>50	>50	>50	>50	>50	>50	>50	16.67	6.25	2.08
390	>50	>50	>50	>50	>50	>50	>50	16.67	6.25	2.17
400	>50	>50	>50	>50	>50	>50	>50	20.00	6.67	2.22
450	>50	>50	>50	>50	>50	>50	>50	50.00	12.50	3.70
500	>50	>50	>50	>50	>50	>50	>50	>50	20.00	7.14

**Concentratietijd = 60 minuten, lineaire doorvoerrelatie:**

Maximale berging [m <sup>3</sup> /ha]:	max. doorvoerdebiet [l/(s.ha)]:									
	50	40	30	25	20	15	10	5	2	1
10	0.14	0.18	0.35	0.26	0.18	0.10	0.05	0.02	0.01	0.01
20	1.75	1.06	0.51	0.33	0.21	0.12	0.06	0.03	0.02	0.01
30	2.44	1.32	0.54	0.36	0.25	0.15	0.08	0.04	0.02	0.02
40	2.63	1.49	0.61	0.44	0.30	0.20	0.11	0.05	0.03	0.02
50	2.86	1.64	0.76	0.53	0.37	0.25	0.15	0.07	0.03	0.02
60	2.86	1.72	0.91	0.63	0.45	0.31	0.18	0.09	0.04	0.03
70	3.03	1.92	1.09	0.79	0.54	0.37	0.24	0.11	0.05	0.03
80	3.85	2.08	1.39	0.98	0.67	0.46	0.28	0.13	0.06	0.04
90	4.17	2.78	1.61	1.16	0.81	0.57	0.34	0.16	0.07	0.04
100	5.00	2.94	1.82	1.47	1.03	0.69	0.43	0.20	0.08	0.05
110	5.00	3.57	2.08	1.67	1.35	0.83	0.51	0.24	0.09	0.05
120	5.56	4.35	2.56	1.89	1.49	1.10	0.57	0.29	0.11	0.06
130	6.25	4.76	3.03	2.50	1.72	1.25	0.72	0.34	0.12	0.06
140	11.11	5.00	3.85	2.70	2.08	1.43	0.88	0.40	0.15	0.07
150	11.11	5.56	4.35	3.45	2.50	1.69	1.00	0.47	0.16	0.08
160	11.11	6.67	4.55	4.00	3.13	2.04	1.20	0.55	0.18	0.08
170	11.11	9.09	5.56	4.55	3.33	2.44	1.43	0.64	0.21	0.09
180	14.29	10.00	5.56	5.00	3.85	3.03	1.72	0.72	0.25	0.10
190	16.67	11.11	7.14	5.26	4.35	3.45	2.17	0.83	0.27	0.11
200	20.00	12.50	8.33	7.14	4.76	3.85	2.50	0.93	0.31	0.12
210	20.00	16.67	8.33	8.33	6.67	4.17	2.70	1.10	0.35	0.13
220	25.00	20.00	10.00	8.33	7.14	4.76	3.13	1.19	0.39	0.14
230	25.00	20.00	14.29	10.00	8.33	5.56	3.45	1.37	0.44	0.15
240	50.00	20.00	16.67	11.11	9.09	5.56	3.85	1.45	0.50	0.16
250	>50	25.00	20.00	12.50	10.00	7.69	4.17	1.69	0.56	0.17
260	>50	33.33	20.00	14.29	12.50	9.09	5.00	1.96	0.63	0.18
270	>50	33.33	20.00	14.29	12.50	9.09	7.14	2.22	0.68	0.19
280	>50	>50	25.00	20.00	14.29	11.11	7.14	2.50	0.75	0.21
290	>50	>50	33.33	20.00	14.29	12.50	7.69	2.86	0.81	0.22
300	>50	>50	50.00	25.00	14.29	14.29	7.69	3.45	0.90	0.25
310	>50	>50	>50	50.00	20.00	14.29	10.00	4.35	1.01	0.26
320	>50	>50	>50	50.00	25.00	16.67	11.11	4.35	1.08	0.28
330	>50	>50	>50	>50	25.00	20.00	11.11	4.55	1.18	0.30
340	>50	>50	>50	>50	25.00	25.00	12.50	4.76	1.27	0.33
350	>50	>50	>50	>50	>50	25.00	14.29	4.76	1.56	0.36
360	>50	>50	>50	>50	>50	25.00	16.67	6.67	1.72	0.39
370	>50	>50	>50	>50	>50	25.00	20.00	6.67	2.00	0.42
380	>50	>50	>50	>50	>50	50.00	20.00	7.14	2.13	0.44
390	>50	>50	>50	>50	>50	50.00	20.00	7.14	2.13	0.48
450	>50	>50	>50	>50	>50	50.00	20.00	7.14	2.22	0.53
500	>50	>50	>50	>50	>50	>50	33.33	12.50	3.45	0.74

**Concentratietijd = 60 minuten, vierkantsw. doorvoerrelatie:**

Maximale berging [m <sup>3</sup> /ha]:	max. doorvoerdebiet [l/(s.ha)]:									
	50	40	30	25	20	15	10	5	2	1
10	0.13	0.15	0.37	0.30	0.20	0.11	0.05	0.02	0.01	0.01
20	2.22	1.33	0.56	0.37	0.25	0.15	0.08	0.03	0.02	0.01
30	2.86	1.56	0.68	0.46	0.31	0.20	0.11	0.05	0.02	0.02
40	2.94	1.75	0.85	0.57	0.39	0.25	0.15	0.06	0.03	0.02
50	3.33	1.92	1.05	0.69	0.49	0.32	0.19	0.08	0.04	0.03
60	4.17	2.22	1.25	0.89	0.59	0.40	0.24	0.11	0.05	0.03
70	4.55	2.78	1.61	1.08	0.75	0.51	0.31	0.14	0.06	0.04
80	5.00	3.23	1.85	1.47	0.96	0.64	0.37	0.18	0.07	0.04
90	5.56	3.85	2.04	1.61	1.22	0.75	0.46	0.23	0.09	0.05
100	6.67	4.35	2.78	1.89	1.45	0.93	0.56	0.26	0.11	0.06
110	10.00	5.00	3.03	2.38	1.69	1.23	0.66	0.33	0.12	0.07
120	11.11	5.56	3.85	2.70	2.00	1.41	0.85	0.40	0.15	0.08
130	11.11	6.25	4.55	3.57	2.56	1.64	1.04	0.49	0.18	0.08
140	11.11	8.33	5.00	3.85	2.70	2.04	1.22	0.55	0.21	0.10
150	14.29	11.11	5.26	4.76	3.45	2.38	1.41	0.63	0.24	0.11
160	16.67	11.11	5.56	5.00	3.85	2.78	1.69	0.72	0.28	0.12
170	20.00	11.11	8.33	5.56	4.35	3.33	2.08	0.83	0.32	0.13
180	20.00	16.67	9.09	6.67	5.00	3.70	2.38	1.00	0.38	0.15
190	33.33	16.67	11.11	8.33	5.88	4.17	2.86	1.18	0.44	0.17
200	33.33	20.00	12.50	9.09	7.69	4.35	3.23	1.33	0.49	0.18
210	50.00	20.00	16.67	10.00	8.33	5.56	3.70	1.54	0.55	0.20
220	> 50	25.00	16.67	14.29	8.33	7.14	4.35	1.69	0.62	0.21
230	> 50	33.33	20.00	16.67	11.11	7.69	5.26	2.00	0.70	0.24
240	> 50	50.00	20.00	20.00	11.11	8.33	5.56	2.38	0.77	0.27
250	> 50	> 50	20.00	20.00	12.50	10.00	6.67	2.78	0.91	0.29
260	> 50	> 50	25.00	20.00	20.00	11.11	7.14	3.03	0.99	0.32
270	> 50	> 50	50.00	20.00	20.00	12.50	7.69	3.57	1.08	0.35
280	> 50	> 50	> 50	25.00	20.00	14.29	8.33	4.00	1.16	0.38
290	> 50	> 50	> 50	50.00	20.00	14.29	10.00	4.35	1.41	0.40
300	> 50	> 50	> 50	> 50	25.00	16.67	11.11	4.76	1.54	0.45
310	> 50	> 50	> 50	> 50	33.33	20.00	11.11	4.76	1.69	0.50
320	> 50	> 50	> 50	> 50	> 50	25.00	11.11	5.00	1.79	0.55
330	> 50	> 50	> 50	> 50	> 50	33.33	14.29	5.88	2.17	0.61
340	> 50	> 50	> 50	> 50	> 50	33.33	20.00	7.14	2.44	0.65
350	> 50	> 50	> 50	> 50	> 50	50.00	20.00	8.33	2.70	0.72
360	> 50	> 50	> 50	> 50	> 50	> 50	20.00	10.00	2.86	0.79
370	> 50	> 50	> 50	> 50	> 50	> 50	20.00	11.11	3.33	0.89
380	> 50	> 50	> 50	> 50	> 50	> 50	20.00	11.11	3.85	0.97
390	> 50	> 50	> 50	> 50	> 50	> 50	25.00	11.11	4.00	1.02
450	> 50	> 50	> 50	> 50	> 50	> 50	50.00	11.11	4.35	1.09
500	> 50	> 50	> 50	> 50	> 50	> 50	> 50	25.00	6.67	1.39

## **Bijlage C: Benodigde bergingscapaciteiten volgens continue simulatiemethode**

Op basis van interpolatie in de tabellen van Bijlage B geven volgende tabellen een overzicht van de benodigde bergingscapaciteit i.f.v. de terugkeerperiode (in aantal jaren) van overloop en het doorvoerdebiet, dat constant is of lineair afhankelijk van het geborgen volume of afhankelijk van de vierkantswortel van het geborgen volume, en de meest gangbare concentratietijden van 10, 20, 30, 40, 50 en 60 minuten (huidig klimaat, 10-min Ukkel-reeks 1901-2000).

**Concentratietijd = 10 minuten, constant doorvoerdebiet:**

constant doorvoer debiet [l/(s.ha)]:	Terugkeerperiode van overloop [jaar]:					
	0.5	1	2	5	10	20
50	28	47	73	120	156	183
40	36	57	85	133	173	210
30	46	69	98	150	195	230
25	52	77	106	160	200	240
20	59	86	120	175	214	251
15	70	98	132	187	240	274
10	85	119	149	222	270	325
5	115	158	194	264	333	406
2	170	226	274	365	447	490
1	246	313	380	476	544	618

**Concentratietijd = 10 minuten, lineaire doorvoerrelatie:**

constant doorvoer debiet [l/(s.ha)]:	Terugkeerperiode van overloop [jaar]:					
	0.5	1	2	5	10	20
50	66	93	125	173	220	270
40	71	100	131	187	230	273
30	79	107	139	200	254	294
25	83	115	146	206	260	305
20	90	122	157	227	270	330
15	102	135	173	240	284	341
10	120	159	199	268	320	433
5	159	210	270	352	442	458
2	243	309	370	500	587	633
1	397	512	641	828	916	1070

**Concentratietijd = 10 minuten, vierkantsw. doorvoerrelatie:**

constant doorvoer debiet [l/(s.ha)]:	Terugkeerperiode van overloop [jaar]:					
	0.5	1	2	5	10	20
50	59	82	109	153	203	235
40	63	88	118	172	215	260
30	70	97	130	186	230	262
25	75	104	136	195	247	287
20	82	111	143	204	260	294
15	91	121	157	230	273	320
10	106	141	181	243	300	373
5	140	185	236	320	360	440
2	205	263	328	412	499	570
1	312	387	505	615	690	800

**Concentratietijd = 20 minuten, constant doorvoerdebiet:**

constant doorvoer debiet [l/(s.ha)]:	Terugkeerperiode van overloop [jaar]:					
	0.5	1	2	5	10	20
50	11	32	54	100	141	162
40	23	47	71	114	158	200
30	37	58	88	136	180	214
25	44	69	100	152	190	230
20	53	80	112	166	203	250
15	65	93	127	185	230	267
10	83	115	149	220	270	320
5	115	158	192	264	330	411
2	170	225	273	364	441	493
1	246	311	380	472	544	618

**Concentratietijd = 20 minuten, lineaire doorvoerrelatie:**

constant doorvoer debiet [l/(s.ha)]:	Terugkeerperiode van overloop [jaar]:					
	0.5	1	2	5	10	20
50	53	81	112	167	214	246
40	61	91	123	177	224	262
30	73	103	135	194	250	280
25	79	110	142	200	260	304
20	87	120	155	220	265	324
15	98	131	171	238	282	342
10	119	158	195	269	320	394
5	157	209	268	352	433	472
2	242	309	370	501	593	633
1	398	512	641	802	916	1063

**Concentratietijd = 20 minuten, vierkantsw. doorvoerrelatie:**

constant doorvoer debiet [l/(s.ha)]:	Terugkeerperiode van overloop [jaar]:					
	0.5	1	2	5	10	20
50	41	67	98	144	190	220
40	50	76	108	157	203	240
30	62	89	123	180	220	254
25	69	97	128	190	240	276
20	76	106	140	200	253	287
15	85	119	155	223	270	320
10	104	138	179	243	300	373
5	139	183	236	320	360	435
2	204	262	327	415	499	565
1	311	386	502	610	688	795

**Concentratietijd = 30 minuten, constant doorvoerdebiet:**

constant doorvoer debiet [l/(s.ha)]:	Terugkeerperiode van overloop [jaar]:					
	0.5	1	2	5	10	20
50	-	15	37	74	125	149
40	-	30	54	97	140	178
30	26	49	76	130	166	204
25	36	60	91	146	177	225
20	48	72	105	160	193	243
15	61	89	121	176	230	268
10	79	112	143	216	270	320
5	111	156	192	263	330	411
2	170	224	272	364	441	491
1	246	311	378	472	544	618

**Concentratietijd = 30 minuten, lineaire doorvoerrelatie:**

constant doorvoer debiet [l/(s.ha)]:	Terugkeerperiode van overloop [jaar]:					
	0.5	1	2	5	10	20
50	28	66	98	150	196	228
40	48	80	110	170	210	243
30	65	96	128	190	246	294
25	72	103	137	200	256	300
20	83	114	151	215	255	320
15	96	128	169	237	280	340
10	116	156	192	266	320	394
5	157	208	266	352	433	470
2	242	309	370	498	593	629
1	396	511	640	799	901	1058

**Concentratietijd = 30 minuten, vierkantsw. doorvoerrelatie:**

constant doorvoer debiet [l/(s.ha)]:	Terugkeerperiode van overloop [jaar]:					
	0.5	1	2	5	10	20
50	21	49	77	130	176	210
40	37	64	95	150	186	231
30	52	81	116	170	210	259
25	61	90	125	180	232	281
20	71	101	136	194	255	289
15	83	115	152	221	260	320
10	102	135	177	235	300	364
5	138	183	234	320	360	435
2	203	262	326	415	499	565
1	311	386	502	610	688	795

**Concentratietijd = 40 minuten, constant doorvoerdebiet:**

constant doorvoer debiet [l/(s.ha)]:	Terugkeerperiode van overloop [jaar]:					
	0.5	1	2	5	10	20
50	-	-	19	56	97	130
40	-	15	41	85	125	160
30	16	38	65	120	147	194
25	28	50	82	136	165	216
20	38	64	99	150	184	245
15	56	82	117	177	220	267
10	76	108	140	210	259	315
5	110	155	190	260	328	400
2	168	224	272	364	441	490
1	246	311	377	472	540	618

**Concentratietijd = 40 minuten, lineaire doorvoerrelatie:**

constant doorvoer debiet [l/(s.ha)]:	Terugkeerperiode van overloop [jaar]:					
	0.5	1	2	5	10	20
50	17	35	81	140	180	235
40	25	64	102	154	205	249
30	54	87	124	183	233	271
25	66	97	133	190	245	290
20	77	109	148	207	255	320
15	92	123	166	230	280	340
10	114	153	191	264	320	423
5	157	206	265	352	433	470
2	242	309	370	501	592	631
1	405	511	640	800	915	1059

**Concentratietijd = 40 minuten, vierkantsw. doorvoerrelatie:**

constant doorvoer debiet [l/(s.ha)]:	Terugkeerperiode van overloop [jaar]:					
	0.5	1	2	5	10	20
50	14	25	60	116	156	200
40	18	48	83	140	175	216
30	42	70	105	160	200	264
25	53	83	118	170	226	260
20	65	95	131	190	243	280
15	78	110	147	215	260	320
10	99	133	174	234	300	367
5	135	182	232	320	360	435
2	203	262	326	415	499	565
1	311	386	502	610	688	795



**Concentratietijd = 50 minuten, constant doorvoerdebiet:**

constant doorvoer debiet [l/(s.ha)]:	Terugkeerperiode van overloop [jaar]:					
	0.5	1	2	5	10	20
50	-	-	-	42	77	115
40	-	-	26	68	107	145
30	-	26	56	104	137	190
25	16	40	73	126	153	210
20	32	58	90	140	173	233
15	48	78	112	177	210	258
10	72	104	139	206	260	310
5	108	151	187	257	329	400
2	168	223	272	364	441	490
1	246	310	377	472	540	618

**Concentratietijd = 50 minuten, lineaire doorvoerrelatie:**

constant doorvoer debiet [l/(s.ha)]:	Terugkeerperiode van overloop [jaar]:					
	0.5	1	2	5	10	20
50	13	18	59	126	160	221
40	15	46	88	150	190	238
30	42	78	117	173	226	258
25	58	89	128	190	240	290
20	72	104	143	206	250	310
15	89	120	163	230	274	334
10	112	151	189	261	319	423
5	155	204	264	352	433	470
2	240	309	370	500	592	630
1	405	510	640	800	910	1055

**Concentratietijd = 50 minuten, vierkantsw. doorvoerrelatie:**

constant doorvoer debiet [l/(s.ha)]:	Terugkeerperiode van overloop [jaar]:					
	0.5	1	2	5	10	20
50	12	15	41	95	136	188
40	14	27	69	126	157	211
30	29	58	97	150	194	238
25	44	76	111	160	216	270
20	58	89	126	184	236	283
15	74	106	144	210	250	309
10	96	131	174	230	294	377
5	133	181	231	320	360	435
2	202	262	326	415	499	565
1	310	386	502	610	688	795

**Concentratietijd = 60 minuten, constant doorvoerdebiet:**

constant doorvoer debiet [l/(s.ha)]:	Terugkeerperiode van overloop [jaar]:					
	0.5	1	2	5	10	20
50	-	-	-	27	53	90
40	-	-	12	55	87	130
30	-	17	45	92	124	175
25	-	30	64	112	137	205
20	24	49	82	130	163	229
15	43	71	107	168	210	257
10	68	99	133	203	260	310
5	106	149	186	257	319	400
2	168	223	272	362	433	490
1	246	309	377	472	540	618

**Concentratietijd = 60 minuten, lineaire doorvoerrelatie:**

constant doorvoer debiet [l/(s.ha)]:	Terugkeerperiode van overloop [jaar]:					
	0.5	1	2	5	10	20
50	12	15	23	105	137	202
40	13	19	78	140	180	230
30	19	66	108	164	220	259
25	47	81	122	180	230	290
20	66	99	138	201	250	310
15	84	116	159	222	275	330
10	108	150	186	260	310	424
5	154	204	262	352	432	470
2	240	309	370	500	592	630
1	396	510	640	800	910	1055

**Concentratietijd = 60 minuten, vierkantsw. doorvoerrelatie:**

constant doorvoer debiet [l/(s.ha)]:	Terugkeerperiode van overloop [jaar]:					
	0.5	1	2	5	10	20
50	11	13	18	80	110	180
40	12	16	54	110	145	205
30	16	47	89	140	185	243
25	34	67	102	160	210	256
20	51	82	120	180	226	279
15	69	102	139	206	250	310
10	94	128	168	226	290	377
5	131	180	230	320	360	435
2	202	261	326	415	499	565
1	310	386	502	610	688	795

## Bijlage D: Invloed klimaatopwarming

Tabel 48. Terugkeerperiode (in aantal jaren) van overloop van het opvangsysteem in functie van zijn buffervolume en doorvoerdebiet (bij een **constante doorvoerrelatie** en een concentratietijd van 10 minuten), voor het **hoog-klimaatscenario**.

Maximale berging [m <sup>3</sup> /ha]:	constant doorvoerdebiet [l/(s.ha)]:									
	50	40	30	25	20	15	10	5	2	1
10	0.24	0.17	0.12	0.10	0.08	0.06	0.04	0.02	0.01	0.01
20	0.36	0.27	0.19	0.15	0.13	0.10	0.07	0.03	0.02	0.02
30	0.48	0.39	0.28	0.23	0.18	0.14	0.10	0.05	0.03	0.02
40	0.63	0.48	0.38	0.32	0.26	0.20	0.14	0.07	0.03	0.03
50	0.87	0.64	0.48	0.41	0.34	0.26	0.18	0.09	0.04	0.03
60	1.12	0.87	0.61	0.52	0.42	0.33	0.23	0.12	0.05	0.04
70	1.37	1.04	0.80	0.65	0.52	0.41	0.29	0.15	0.07	0.04
80	1.67	1.30	0.92	0.79	0.66	0.49	0.36	0.18	0.08	0.05
90	2.00	1.56	1.12	0.92	0.78	0.60	0.41	0.22	0.09	0.06
100	2.78	1.92	1.35	1.15	0.88	0.68	0.51	0.27	0.11	0.07
110	3.45	2.38	1.64	1.41	1.11	0.79	0.58	0.32	0.12	0.07
120	3.85	3.23	2.17	1.64	1.33	1.01	0.65	0.39	0.15	0.08
130	4.76	3.70	2.56	2.13	1.67	1.20	0.74	0.45	0.17	0.09
140	5.88	4.00	3.13	2.63	1.96	1.43	0.91	0.52	0.20	0.10
150	5.88	4.55	3.70	3.03	2.38	1.69	1.06	0.60	0.23	0.12
160	6.25	5.56	4.00	3.33	2.86	2.08	1.22	0.68	0.27	0.13
170	7.14	6.25	4.55	3.85	3.03	2.44	1.54	0.76	0.31	0.14
180	7.69	6.25	5.00	4.00	3.57	2.78	1.79	0.85	0.35	0.16
190	7.69	7.14	5.26	4.76	4.00	3.13	2.04	0.93	0.39	0.17
200	9.09	7.14	5.56	5.00	4.55	3.57	2.22	1.04	0.43	0.19
210	12.50	8.33	6.25	5.56	4.55	4.00	2.56	1.16	0.48	0.21
220	12.50	8.33	7.14	6.25	5.26	4.17	3.13	1.28	0.56	0.23
230	20.00	10.00	7.69	6.67	5.88	4.35	3.45	1.49	0.61	0.25
240	20.00	12.50	8.33	6.67	6.67	4.55	3.70	1.64	0.65	0.28
250	20.00	20.00	11.11	8.33	6.67	5.26	3.70	1.96	0.74	0.30
260	25.00	20.00	12.50	10.00	6.67	5.88	3.85	2.13	0.79	0.31
270	25.00	20.00	14.29	12.50	7.69	6.25	4.17	2.38	0.89	0.35
280	33.33	25.00	14.29	14.29	11.11	7.14	5.00	2.63	0.98	0.39
290	33.33	25.00	20.00	14.29	14.29	9.09	5.88	2.86	1.08	0.41
300	33.33	25.00	20.00	16.67	14.29	10.00	6.67	2.86	1.16	0.44
310	50.00	33.33	25.00	16.67	14.29	11.11	8.33	3.33	1.22	0.48
320	>50	33.33	25.00	20.00	16.67	14.29	8.33	3.70	1.32	0.52
330	>50	50.00	25.00	20.00	16.67	14.29	8.33	4.35	1.41	0.55
340	>50	>50	33.33	25.00	20.00	14.29	9.09	4.55	1.67	0.58
350	>50	>50	50.00	33.33	20.00	14.29	12.50	4.76	1.92	0.62
360	>50	>50	50.00	50.00	20.00	16.67	12.50	5.56	2.04	0.68
370	>50	>50	>50	50.00	25.00	20.00	12.50	6.25	2.13	0.73
380	>50	>50	>50	>50	50.00	25.00	14.29	6.67	2.33	0.79
390	>50	>50	>50	>50	50.00	25.00	16.67	6.67	2.56	0.86
400	>50	>50	>50	>50	>50	33.33	20.00	8.33	2.94	0.93
450	>50	>50	>50	>50	>50	50.00	20.00	9.09	3.23	0.99
500	>50	>50	>50	>50	>50	50.00	20.00	10.00	3.33	1.03

Tabel 49. Terugkeerperiode (in aantal jaren) van overloop van het opvangsysteem in functie van zijn buffervolume en doorvoerdebiet (bij een **lineaire doorvoerrelatie** en een concentratietijd van 10 minuten), voor het **hoog-klimaatscenario**.

Maximale berging [m <sup>3</sup> /ha]:	lineair doorvoerdebiet [l/(s.ha)]:									
	50	40	30	25	20	15	10	5	2	1
10	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.02	0.02	0.01	0.01	0.01
20	0.08	0.08	0.07	0.06	0.06	0.05	0.03	0.02	0.02	0.01
30	0.14	0.12	0.11	0.10	0.09	0.07	0.05	0.03	0.02	0.02
40	0.21	0.18	0.16	0.14	0.12	0.10	0.07	0.04	0.02	0.02
50	0.29	0.26	0.21	0.19	0.17	0.13	0.09	0.05	0.03	0.02
60	0.39	0.33	0.28	0.25	0.21	0.17	0.12	0.06	0.04	0.03
70	0.48	0.43	0.36	0.32	0.27	0.21	0.15	0.08	0.04	0.03
80	0.58	0.51	0.43	0.39	0.33	0.26	0.18	0.09	0.05	0.03
90	0.74	0.64	0.54	0.48	0.41	0.32	0.22	0.11	0.06	0.04
100	0.87	0.74	0.63	0.56	0.48	0.37	0.26	0.13	0.06	0.04
110	1.06	0.89	0.71	0.63	0.56	0.44	0.30	0.15	0.07	0.04
120	1.27	1.04	0.88	0.76	0.63	0.51	0.36	0.18	0.08	0.05
130	1.54	1.27	1.02	0.91	0.72	0.56	0.42	0.20	0.09	0.05
140	1.92	1.47	1.20	1.05	0.86	0.71	0.49	0.24	0.10	0.06
150	2.38	2.08	1.45	1.20	1.09	0.78	0.55	0.29	0.12	0.06
160	2.78	2.33	1.69	1.49	1.23	0.90	0.61	0.33	0.13	0.07
170	3.33	2.78	2.22	1.79	1.45	1.04	0.71	0.38	0.14	0.07
180	3.70	3.33	2.63	2.08	1.72	1.22	0.79	0.42	0.16	0.08
190	4.17	3.57	2.94	2.44	1.89	1.47	0.90	0.47	0.17	0.09
200	4.17	4.00	3.13	2.86	2.08	1.61	1.00	0.54	0.19	0.09
210	4.76	4.17	3.70	3.03	2.50	1.72	1.12	0.60	0.21	0.10
220	5.56	4.76	4.00	3.85	2.94	2.08	1.25	0.67	0.23	0.10
230	7.14	5.26	4.17	4.17	3.57	2.38	1.37	0.75	0.25	0.11
240	7.14	5.56	4.76	4.17	3.70	2.86	1.64	0.83	0.27	0.12
250	7.69	5.88	5.00	4.76	3.85	3.13	1.85	0.93	0.30	0.12
260	8.33	6.67	5.88	5.00	4.35	3.33	2.00	1.01	0.33	0.13
270	8.33	8.33	6.25	5.56	4.76	3.57	2.22	1.10	0.35	0.14
280	9.09	8.33	6.67	6.25	5.26	4.00	2.56	1.16	0.38	0.15
290	11.11	9.09	7.14	7.14	6.25	4.35	2.63	1.27	0.41	0.16
300	14.29	11.11	7.14	7.14	6.67	5.26	3.23	1.37	0.44	0.16
310	14.29	12.50	9.09	8.33	7.14	5.56	3.57	1.47	0.49	0.18
320	14.29	14.29	11.11	8.33	7.69	6.67	3.70	1.64	0.52	0.18
330	16.67	14.29	12.50	8.33	8.33	7.14	4.35	1.89	0.56	0.20
340	16.67	16.67	14.29	8.33	8.33	7.14	4.76	2.00	0.59	0.20
350	25.00	16.67	14.29	14.29	8.33	7.14	4.76	2.13	0.65	0.22
360	25.00	20.00	16.67	14.29	9.09	7.69	5.00	2.38	0.69	0.23
370	33.33	25.00	16.67	16.67	12.50	9.09	5.26	2.44	0.71	0.24
380	50.00	33.33	25.00	16.67	12.50	9.09	5.88	2.56	0.77	0.25
390	50.00	50.00	25.00	25.00	16.67	14.29	5.88	2.70	0.85	0.27
400	50.00	50.00	25.00	25.00	16.67	14.29	6.67	3.03	0.89	0.27
450	50.00	50.00	50.00	25.00	25.00	16.67	7.14	3.57	0.95	0.28
500	>50	50.00	50.00	50.00	33.33	16.67	8.33	3.70	1.08	0.30

Tabel 50. Nodige buffervolumes (in  $m^3/ha$ ) in functie van het maximaal doorvoerdebiet en de terugkeerperiode van de overlaat voor een **constante doorvoerrelatie** bij een concentratietijd van 10 minuten en het **hoog-klimaatscenario** (Willems, 2009).

constant doorvoer debiet [l/(s.ha)]:	Terugkeerperiode van overloop [jaar]:					
	0.5	1	2	5	10	20
50	32	55	90	132	203	250
40	41	68	102	155	230	270
30	51	84	117	180	246	300
25	59	94	127	200	260	330
20	68	105	141	216	277	360
15	81	120	158	245	300	370
10	99	146	188	280	343	420
5	137	196	251	353	420	490
2	212	282	357	470	570	680
1	315	412	522	638	750	794

Tabel 51. % toename (t.o.v. de huidige ontwerp-code) in nodige buffervolumes (in  $m^3/ha$ ) in functie van het maximaal doorvoerdebiet en de terugkeerperiode van de overlaat voor een **constante doorvoerrelatie** bij een concentratietijd van 10 minuten en het **hoog-klimaatscenario** (Willems, 2009).

constant doorvoer debiet [l/(s.ha)]:	Terugkeerperiode van overloop [jaar]:					
	0.5	1	2	5	10	20
50	+17%	+13%	+20%	+15%	+35%	+33%
40	+18%	+15%	+17%	+19%	+38%	+30%
30	+12%	+18%	+16%	+22%	+31%	+29%
25	+13%	+18%	+15%	+26%	+31%	+35%
20	+14%	+20%	+16%	+27%	+29%	+38%
15	+12%	+16%	+14%	+28%	+27%	+30%
10	+11%	+19%	+16%	+27%	+27%	+30%
5	+11%	+18%	+17%	+24%	+22%	+20%
2	+17%	+20%	+20%	+21%	+23%	+24%
1	+21%	+26%	+31%	+28%	+29%	+19%

Tabel 52. Nodige buffervolumes (in  $m^3/ha$ ) in functie van het maximaal doorvoerdebiet en de terugkeerperiode van de overlaat voor een **lineaire doorvoerrelatie** bij een concentratietijd van 10 minuten en het **hoog-klimaatscenario** (Willems, 2009).

constant doorvoer debiet [l/(s.ha)]:	Terugkeerperiode van overloop [jaar]:					
	0.5	1	2	5	10	20
50	72	107	142	213	285	344
40	79	117	149	225	295	360
30	86	128	166	250	315	374
25	93	136	177	260	343	384
20	103	146	196	275	363	404
15	119	167	218	297	382	430
10	142	200	260	360	426	500
5	194	258	340	463	570	660
2	313	414	525	667	825	854
1	529	713	930	>1000	>1000	>1000

Tabel 53. % toename (t.o.v. de huidige ontwerp-code) in nodige buffervolumes (in  $m^3/ha$ ) in functie van het maximaal doorvoerdebiet en de terugkeerperiode van de overlaat voor een **lineaire doorvoerrelatie** bij een concentratietijd van 10 minuten en het **hoog-klimaatscenario** (Willems, 2009).

constant doorvoer debiet [l/(s.ha)]:	Terugkeerperiode van overloop [jaar]:					
	0.5	1	2	5	10	20
50	+51%	+37%	+28%	+34%	+44%	+43%
40	+38%	+35%	+23%	+31%	+38%	+39%
30	+25%	+28%	+23%	+33%	+36%	+34%
25	+24%	+27%	+23%	+31%	+40%	+31%
20	+22%	+25%	+26%	+29%	+39%	+29%
15	+24%	+26%	+24%	+23%	+28%	+20%
10	+20%	+26%	+26%	+29%	+25%	+22%
5	+16%	+17%	+21%	+24%	+27%	+24%
2	+21%	+25%	+28%	+27%	+33%	+18%
1	+22%	+30%	+39%			

## Bijlage E: Handleiding rekeninstrument

### 0. Systeemvereisten

Het rekeninstrument werd ontwikkeld in de MATLAB (MathWorks, 2012a) softwareomgeving en vervogtens omgevormd naar een executable file, zodat het ook gedraaid kan worden op computers waarop MATLAB niet geïnstalleerd is. Om dit mogelijk te maken moet echter eerst versie 7.17 van de MATLAB Compiler Runtime (MCR) geïnstalleerd zijn. De installatie file hiervan is bijgevoegd bij de systeembestanden: MCR\_R2012a\_win32\_installer.exe voor 32-bit besturingssystemen en MCR\_R2012a\_win64\_installer.exe voor 64-bit besturingssystemen. Dubbelklik op het correcte bestand en volg de instructies van de installatie wizard.

Wanneer de MCR geïnstalleerd is, kan het rekeninstrument gestart worden door op het icoontje (BCEtool.exe) te klikken. Let ook hier goed op dat versie gekozen wordt die compatibel is met het besturingssysteem. Na het starten van het programma zal eerst een zwart commandoprompt venster verschijnen en ca. 15 seconden later worden het KU Leuven logo en het rekeninstrument zichtbaar.

### 1. Berekening benodigd bergingsvolume

Het eerste tabblad ("Buffercapaciteit") van het rekeninstrument laat toe om het afstroomvolume en het benodigde bergingsvolume te berekenen met vier verschillende methodes (Rationele methode, SCS-methode, aangepaste SCS-methode en continue methode). De verschillende resultaten kunnen vervolgens ook onderling vergeleken worden. Ter verduidelijking zal de gevalstudie van de Jonker Janlaan te Attenhoven gebruikt worden als demonstratie. Voor deze gevalstudie zijn de volgende parameters van belang:

- Oppervlakte: 83 ha
- Concentratietijd: 30 min (berekend met de methode van Kirpich)
- Runoff-coëfficiënt: 0.43 (op basis van een gewogen gemiddelde van de verschillende types landgebruik, voornamelijk akkerland met een runoff-coëfficiënt van 0.4)
- Doorvoerdebiet: 1.5 m<sup>3</sup>/s (dit is het maximale afvoerdebiet van het ontvangende rioleringsstelsel)
- Curve Number: 88 (volgens Tabel 2 en Tabel 3 in bijlage A)

De berekening gebeurt in vier stappen:

- 1) In het eerste kader linksboven dienen vijf karakteristieken van het afstroomgebied ingevuld te worden (Figuur 147):
  - De concentratietijd (in minuten). Deze kan berekend worden met behulp van de verschillende empirische methodes in het derde tabblad (zie deel 3.3.6). Voor een goede overeenkomst bij de rationele en continue methode dient deze waarde afgerond te worden naar 10 minuten. De gevoeligheidsanalyse toonde aan dat het effect van het afronden op het benodigde volume beperkt is.
  - Runoff-coëfficiënt: hiervoor wordt verwezen naar de tabellen in bijlage B, die waarden voorstellen in functie van het landgebruik.
  - Curve Number (voor de SCS- en aangepaste SCS-methode): waarden voor deze parameter kunnen gevonden worden in bijlage A.
  - Het doorvoerdebiet (in l/s): hiervoor dient de maximale waarde ingevuld te worden, dus de waarde die van toepassing is wanneer het bufferbekken volledig gevuld is.
  - De oppervlakte van het toestroomgebied (in ha), op die manier kan het doorvoerdebiet dimensieloos gemaakt worden (cfr. de tabellen in bijlage B).

Let ook goed op om geen negatieve getallen en/of tekst in te vullen.

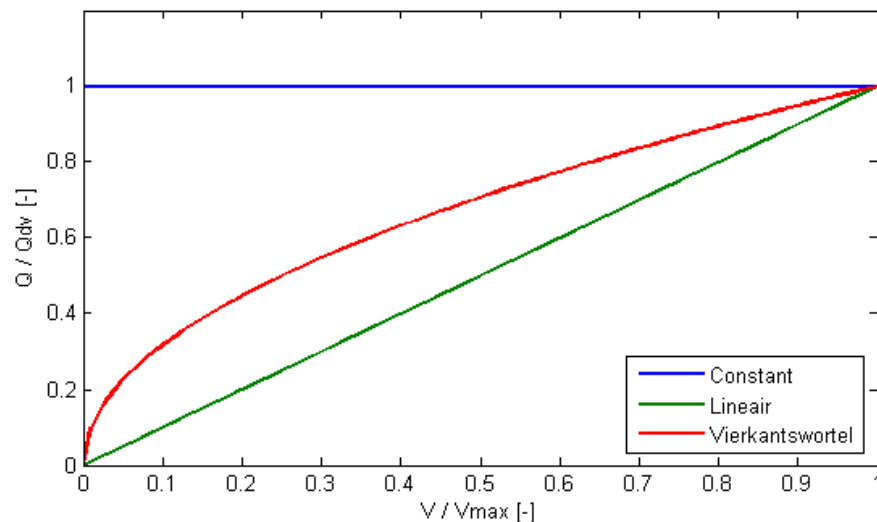
Karakteristieken afstroomgebied		
Concentratietijd:	30	[min]
Runoff - coëfficiënt:	0.43	[-]
Curve Number:	88	[-]
Doorvoerdebiet:	1500	[l/s]
Oppervlakte:	83	[ha]

Figuur 147. Benodigde gebiedskarakteristieken

- 2) Vervolgens dient een keuze gemaakt te worden over de doorvoerrelatie tussen een constant debiet (typisch voor wervelventielen), een debiet dat lineair gerelateerd is aan het volume en een debiet dat via een vierkantswortel relatie verband houdt met het volume (in het geval van knijpopeningen). De vierkantswortel relatie is de meest realistische voor gravitair leegstromende systemen. De andere twee vormen de twee uitersten, waarbij een constante doorvoer voor de snelste leegloop zorgt en de lineaire doorvoerrelatie voor de traagste. Het doorvoerdebiet dat in de vorige stap werd gedefinieerd komt overeen met de maximale waarde, wanneer het volume dus gelijk is aan het maximale volume (zie Figuur 149).

Doorvoerrelatie (Continue methode)		
<input type="radio"/> Constant	<input type="radio"/> Lineair	<input checked="" type="radio"/> Vierkantswortel

Figuur 148. Keuze van doorvoerrelatie.



Figuur 149. Verhouding van het optredende debiet tot het maximale debiet, in functie van het volume in het bufferbekken en de gekozen doorvoerrelatie.

- 3) In de derde stap dient de buiduur gekozen te worden, vanuit het menu in de derde kader (zie Figuur 150). Voor berekeningen als deze komt de buiduur typisch overeen met de concentratietijd van het toestroomgebied. Vervolgens worden in de onderstaande tabel de ontwerpneerslagwaarden van de meest recente IDF-verbanden van Willems (2011) opgelijst, voor vijf verschillende terugkeerperioden. De middelste



kolom bevat uurlijkse neerslagintensiteiten, terwijl de rechtse kolom daggemiddelde neerslagintensiteiten bevat (voor de aangepaste SCS-methode). De waarden in deze tabel zijn niet manueel aanpasbaar.

Neerslagkarakteristieken

Buiduur:  [min]

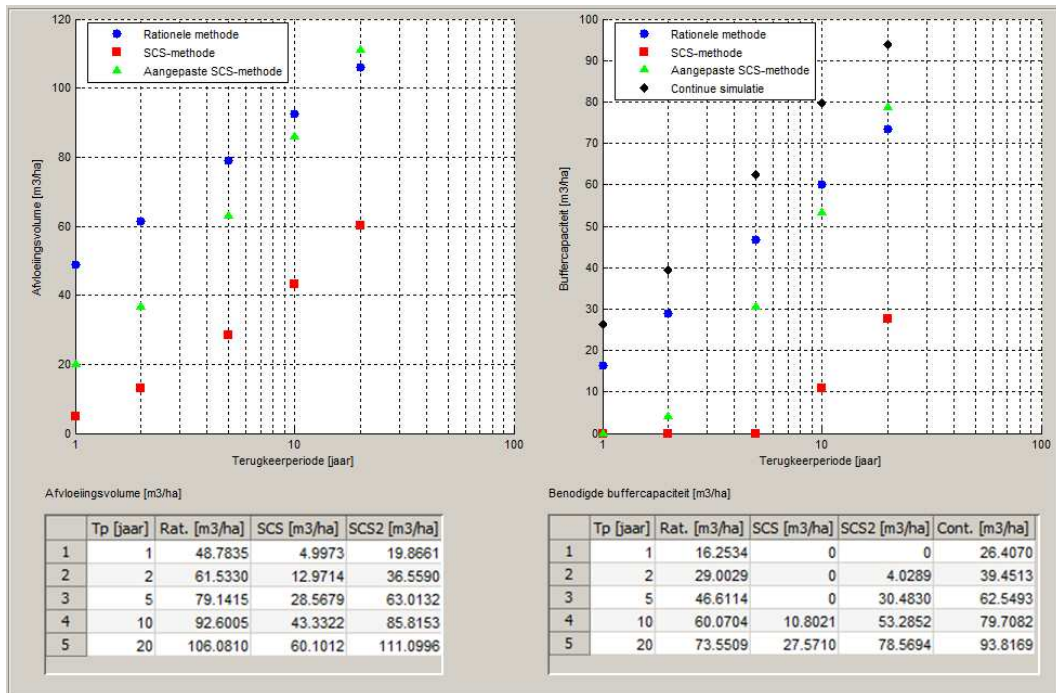
	Tp [jaar]	i [mm/h]	N [mm]
1	1	22.6900	1.4679
2	2	28.6200	1.7044
3	5	36.8100	2.0454
4	10	43.0700	2.3438
5	20	49.3400	2.7060

Figuur 150. Keuze neerslagkarakteristieken

- 4) Tot slot moet er nog een keuze gemaakt worden over de eenheid waarin de resultaten uitgedrukt zullen worden. Er kan hier een keuze gemaakt worden tussen  $\text{m}^3$  per ha,  $\text{m}^3$  per effectieve ha en het totale volume. De buffervolumes worden intern berekend via interpolatie in (uitgebreidere) tabellen die in bijlage B van het rapport te vinden zijn. Deze zijn uitgedrukt in  $\text{m}^3$  per effectieve ha en kunnen bijgevolg gezien worden als de afstromende en benodigde volumes indien het volledige gebied een runoff-coëfficiënt gelijk aan 1 zou hebben. De benodigde volumes per ha bekomt men dan na vermenigvuldiging met de runoff-coëfficiënt. Om de totale volumes te bekomen wordt dit vervolgens nog eens vermenigvuldigd met de oppervlakte.

Wanneer de vier bovenstaande stappen doorlopen zijn, kunnen de berekeningen gestart worden door op de "Berekenen"-knop te klikken. De resultaten worden dan getoond in de twee grafieken en tabellen in het rechtse gedeelte. De linkse grafiek en tabel geven het afstromingsvolume voor vijf terugkeerperioden, terwijl de benodigde bergingsvolumes getoond worden in de rechtse grafiek en tabel (zie Figuur 151). Voor de continue methode worden geen afstromingsvolumes weergegeven aangezien dit concept hier niet van toepassing is. Er wordt namelijk gerekend met een langdurige tijdreeks en niet met afzonderlijke events, zoals dat wel het geval is bij de drie andere methodes.

De resultaten van de berekening (uitgedrukt in  $\text{m}^3$  per ha of per effectieve ha) gaan uit van de veronderstelling dat de horizontale oppervlakte van het bufferbekken nagenoeg constant is over de hoogte van het bufferbekken. Op die manier kan het doorvoerdebiet eenvoudig gerelateerd worden aan het volume in het bufferbekken, zonder dat de oppervlakte gekend hoeft te zijn. Sterker nog, het benodigde volume blijft hetzelfde ongeacht de horizontale oppervlakte van het bufferbekken, aangezien het maximale doorvoerdebiet bepaald wordt door het maximale waterpeil in het bekken. Indien de veronderstelling van een constante horizontale oppervlakte niet geldig is voor het bufferbekken (wat in praktijk voorkomt, doordat bekkens dikwijls gevormd worden door aarden dammen loodrecht op de afstromingsrichting) blijven de hier bekomen waarden aan de veilige kant, aangezien de uitgevoerde berekening conservatiever is.

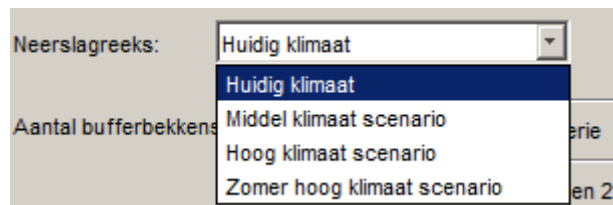


Figuur 151. Resultaten eerste tabblad BCE-tool: Afstromingsvolumes (links) en benodigde buffervolumes (rechts) voor de gevalstudie van de Jonk Janlaan te Attenhoven, beiden uitgedrukt in m³/ha.

## 2. Berekening terugkeerperiode

In het tweede tabblad kan de omgekeerde berekening gemaakt worden: voor een bepaald ontwerp van bufferbekken (volume, doorvoerdebit, relatieve knijphoogte, doorvoerrelatie en toestroomoppervlakte) kan op basis van de 100-jarige neerslagreeks te Ukkel de terugkeerperiode van overstort(volume) berekend worden. De berekening verloopt via de volgende stappen:

- Keuze van de neerslagreeks waarmee de continue simulatie zal uitgevoerd worden. Hiervoor zijn er vier mogelijkheden: de 100-jarige Ukkel neerslagreeks zoals ze opgemeten is, de 100-jarige Ukkel neerslagreeks die aangepast is aan het midden of hoog klimaatscenario of de neerslagreeks waarbij de perturbatie voor het hoog klimaatscenario enkel toegepast is op de zomermaanden. Dit laatste houdt in dat de neerslag in de wintermaanden nagenoeg ongewijzigd is, maar dat tijdens de zomer de neerslagintensiteit zal toenemen, terwijl het aantal buien afneemt. De keuze van de neerslagreeks gebeurt met behulp van het dropdownmenu links boven (zie Figuur 152).



Figuur 152. Keuze van neerslagreeks voor de continue simulatiemethode

- Ingeven van het aantal bufferbekkens (één tot vier) en hun onderlinge schikking (in serie of parallel). In geval van bufferbekkens in serie zal het doorvoer- en overloopdebit van het eerste bekken dienen als invoer van het volgende bekken. Eventueel kan hier ook nog een extra neerslagafstromingsdebit bij opgeteld worden. De situatie aan de Heulengracht met drie achtereenvolgende aarden dammen is hier een mooi voorbeeld van. Bufferbekkens in parallel hebben geen invloed op elkaar: Een

deel van het toestroomgebied watert af naar het ene bekken, terwijl het andere deel naar het andere bekken stroomt. Dit is bijvoorbeeld het geval in het knelpuntgebied Boesdaal.

- 3) Vervolgens dienen de karakteristieken van het afstroomgebied ingegeven te worden voor elk bufferbekken (zie Figuur 153). Deze karakteristieken zijn: de concentratietijd (te kiezen uit een menu als een veelvoud van 10 minuten), de toestroomoppervlakte, het werkelijke bergingsvolume (in  $m^3$  en dus niet in  $m^3$  per ha), de relatieve knijphoogte (uitgedrukt in procenten t.o.v. de totale diepte van het bekken), het doorvoerdebiet en bijhorende doorvoerrelatie (constant, lineair of vierkantswortel). In geval van twee of meer bufferbekkens in serie kan een extra afstromingsdebiet toegevoegd worden door een toestroomoppervlakte groter dan nul te kiezen. Indien hier de waarde nul ingevuld wordt, is het instroomdebiet van het tweede bufferbekken gelijk aan de som van het doorvoer- en het overstortdebiet van het eerste bufferbekken. Indien een waarde groter dan 0 gekozen wordt, moet een concentratietijd gekozen worden die geldig is voor de extra toevoerende oppervlakte. En dus niet van de totale toevoerende oppervlakte.

The screenshot shows a software window titled 'Afstroomgebied'. At the top, there is a dropdown menu for 'Neerslagreeks' set to 'Huidig klimaat'. Below this, there is a control for 'Aantal bufferbekkens' set to 2, with radio buttons for 'Serie' (selected) and 'Paralleel'. The main area is a table with four columns for 'Bekken 1', 'Bekken 2', 'Bekken 3', and 'Bekken 4'. The rows are: 'Concentratietijd [min]' (30, 10, 10, 10), 'Toestroomoppervlakte [ha]' (1, 0.5, empty, empty), 'Bergingsvolume [m3]' (50, 100, empty, empty), 'Knijphoogte [%]' (0, 0, empty, empty), 'Doorvoerdebiet [l/s]' (15, 10, empty, empty), and 'Doorvoerrelatie' (Vierka..., Vierka..., Const..., Const...). At the bottom left, there is a checkbox for 'Oppervlakteberging:' with an empty input field and '[mm]'. At the bottom right, there is a 'Done!' label and an 'Execute' button.

Figuur 153. Ingeven van de gebiedskarakteristieken ter berekening van de terugkeerperiode van overstort.

- 4) Aangeven of er rekening gehouden moet worden met oppervlakteberging, bij het berekenen van het neerslagafstromingsdebiet. Indien de oppervlakteberging wordt meegerekend, moet dit links onderaan in Figuur 153 aangevinkt worden en moet een waarde (in mm) ingegeven worden. Uit de gevalstudies van de Heulen gracht en Maarkedal blijkt dat een oppervlakteberging van 1 à 2 mm meer betrouwbare resultaten geeft.
- 5) Invullen van de runoff-coëfficiënt. Hierbij heeft de gebruiker de keuze tussen een constante waarde of een waarde die maandelijks varieert. Op die manier kunnen de verschillende invloeden op de runoff-coëfficiënt (bodembedekking, bodemruwheid, verzadigingsgraad, ...) toch nog enigszins in rekening gebracht worden. Deze maandelijks variatie moet dan wel zelf bepaald worden en manueel ingevoerd worden. In geval van een constante waarde dient deze ingevuld te worden in de textbox, in geval van een variabele waarde moet de tabel ingevuld worden. Figuur 154.

Runoff-Coëfficiënt

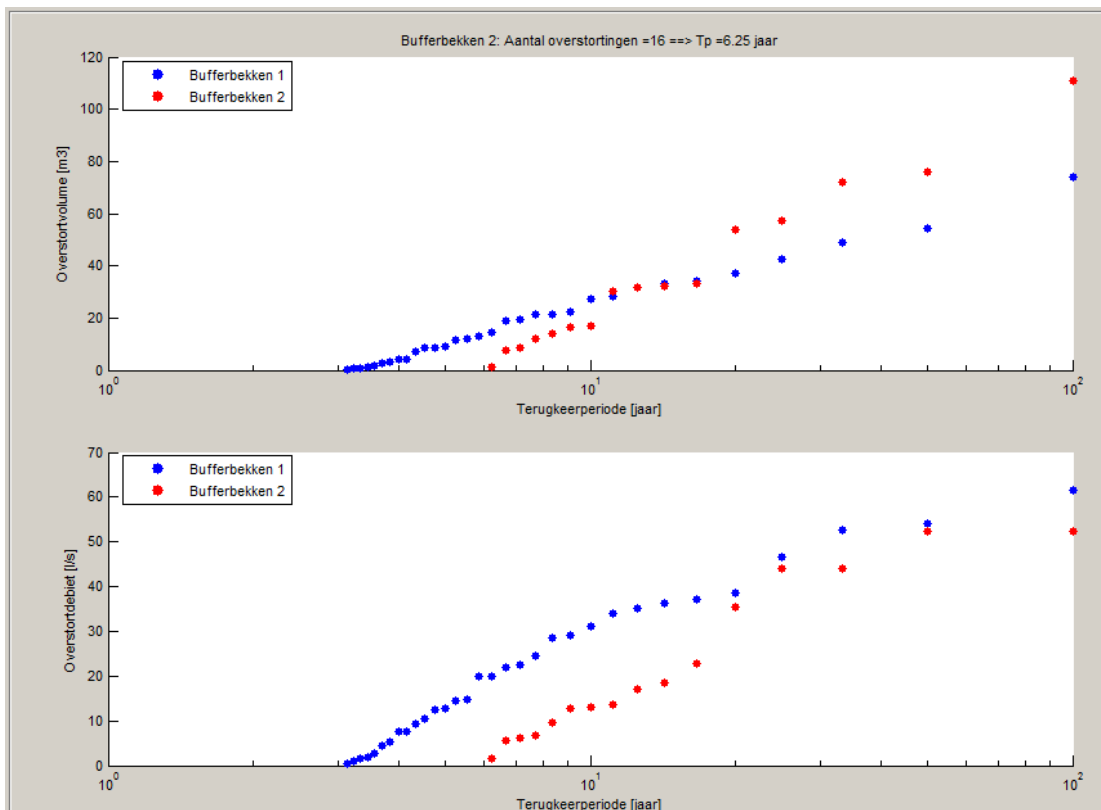
Constant:

Variabel:

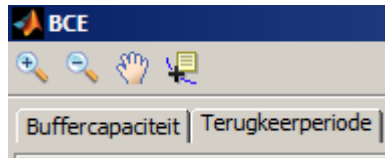
	Maand	Runoff-Coëf. [-]	Maand	Runoff-Coëf. [-]
	1	0	7	0
	2	0	8	0
	3	0	9	0
	4	0	10	0
	5	0	11	0
	6	0	12	0

Figuur 154. Ingeven runoff-coëfficiënt, met een keuze tussen een constante waarde en een maandelijks variërende waarde.

Wanneer de vijf stappen doorlopen zijn, kunnen de berekeningen gestart worden door op de "Execute"-button te klikken. De 100 jarige Ukkel neerslagreeks zal dan doorgerekend worden in het continue neerslagafstromingsmodel en het model van het bufferbekken. De resultaten worden getoond in de grafieken in het rechtse gedeelte. De bovenste grafiek toont de terugkeerperiode van overstort en het bijhorende volume (in m<sup>3</sup>), terwijl in de onderste grafiek de maximale overloopdebieten (in l/s) uitgezet zijn in functie van de terugkeerperiode. Zowel de overstortvolumes als de maximale overloopdebieten zijn gerangschikt van groot naar klein. Dit houdt niet expliciet in dat een overloopvolume met een bepaalde terugkeerperiode ook leidt tot een maximaal overloopdebiet met dezelfde terugkeerperiode! Bovenaan de grafiek wordt ook aangegeven hoe dikwijls het meest afwaartse bufferbekken zal overlopen en de bijhorende terugkeerperiode (in jaar). (Figuur 155). Met behulp van de knoppen in de werkbalk links bovenaan (zie ook Figuur 156) kan men respectievelijk inzoomen, uitzoomen, verslepen en de waarden aflezen.



Figuur 155. Resultaten tweede tabblad BCE-tool: Overstortvolume en maximale overloopdebieten versus terugkeerperiode voor twee bufferbekkens.



Figuur 156. Knoppen in de werkbalk om respectievelijk in en uit te zoomen, de figuur te verslepen en de waarden af te lezen.

### 3. Berekening concentratietijd

In de twee voorgaande berekeningen werd telkens gevraagd naar de concentratietijd van het afstromingsgebied. Er zijn verschillende (vooral) empirische methodes voorhanden om de concentratietijd van een toestroomgebied te berekenen. In het derde gedeelte van het rekeninstrument kan de concentratietijd uitgerekend worden met al deze methodes en onderling vergeleken worden. Hiervoor moeten een aantal parameters ingevuld worden:

1) Gebiedsspecifieke parameters:

- Afstroomafstand  $L$  in m: de maximale afstand die het regenwater moet afleggen om tot aan het bufferbekken te geraken.
- Helling van het terrein  $S$  in m/m
- Netto neerslag  $i$  in mm/h: Deze mag gelijk gesteld worden aan de intensiteit van de ontwerpneerslag (zie IDF-verbanden in bijlage A). Deze zal echter ook afhankelijk zijn van de concentratietijd, waardoor de berekening van de concentratietijd iteratief zal moeten verlopen. Men veronderstelt eerst een bepaalde concentratietijd en neemt de hierbij horende neerslagintensiteit om een nieuwe concentratietijd te berekenen. Indien beide waarden voldoende dicht bij elkaar liggen is de berekening voltooid.
- Runoff-coëfficiënt  $\phi$ . Waarden hiervoor kunnen gevonden worden in de tabellen in bijlage B.

2) Methode specifieke parameters. Hiervoor wordt verwezen naar deel 3.3.6 van het verslag bij de studie, waar de verschillende formules eveneens opgelijst staan.

Wanneer deze parameters ingevuld zijn, kunnen de concentratietijden berekend worden door op de 'Berekenen' knop te klikken. Wanneer niet alle parameters horende bij een bepaalde methode ingevuld zijn, zal hiervoor geen resultaat berekend worden. Het resultaat van de berekeningen kan in de tabel links onderaan gevonden worden.

Resultaten		
Bereken		
	Methode	Conc. tijd [min]
1	Wet van Manning	44.4236
2	Kirpich (1940)	13.2015
3	Kerby (1959)	42.2858
4	Giff & Symons (1968)	64.8460
5	Izzard (1946)	265.2103
6	Temez (1978)	17.5800

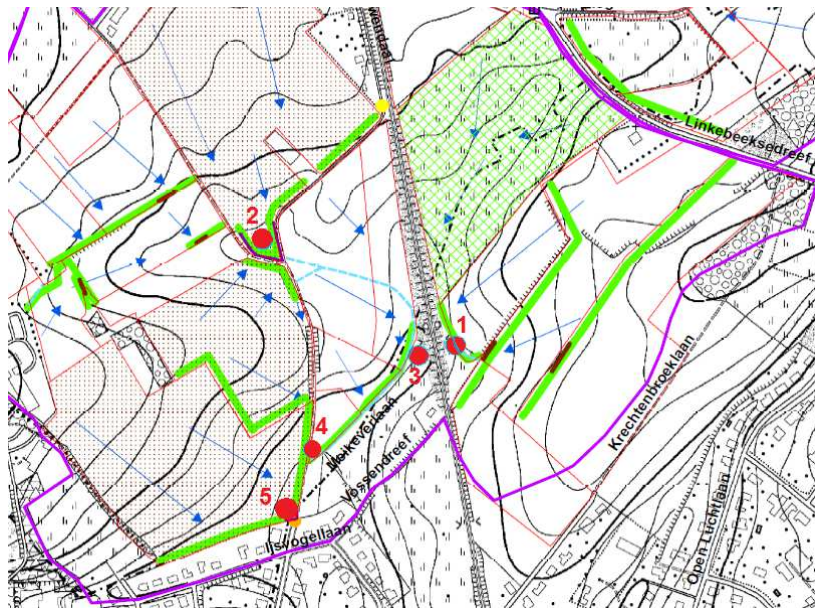
Figuur 157. Resultaten berekening concentratietijd



## 4. Enkele praktijkvoorbeelden

### 4.1 Knelpunt gebied Boesdaal

Voor het knelpuntgebied Boesdaal zal enkel gekeken worden naar bufferbekken nr. 5 (zie Figuur 158). Op basis van DOV en onderstaande figuur kan nagenoeg alle benodigde informatie over het afstroomgebied afgeleid worden. Het gebied heeft een oppervlakte van ca. 9.3 ha, een helling van  $20 \text{ m} / 290 \text{ m} = 0.069 \text{ m/m}$  en het wordt voornamelijk gebruikt als akkerland. Uit de ontwerpplannen van bufferbekken 5 kan verder nog afgeleid worden dat het een volume heeft van  $1250 \text{ m}^3$ , een maximaal waterpeil van 0.9 m en een knijpopening van 150 mm. Tot slot kan nog aangegeven worden dat de provincie Vlaams-Brabant bij het ontwerp uitgaat van een runoff-coëfficiënt van 0.6.



Figuur 158. Topografische kaart knelpuntgebied Boesdaal, met afstromingsrichtingen (blauwe pijlen) en erosie maatregelen (grasbufferstroken (groen) en bufferbekkens (rood))

### Concentratietijd

Als initiële waarden voor de berekening van de concentratietijd kan vertrokken worden van: een afstromingsafstand  $L$  van 300 m, een terrehelling  $S$  van 0.07 m/m, een nettoneerslag  $i$  van 60 mm/h en een runoff-coëfficiënt van 0.6. Voor de methode specifieke parameters geldt: Manningcoëfficiënt van 0.25 (akker), een vertragscoëfficiënt van 0.2 (ruw bodemoppervlak) en een retardatiefactor van 88. De resultaten van de verschillende berekeningsmethoden zijn samengevat in Figuur 159. Er is een duidelijke spreiding zichtbaar op de waarde van de concentratietijd, tussen 5 en 38 minuten. Er zal daarom verder gerekend worden met een gemiddelde waarde van 20 minuten.

	Methode	Conc. tijd [min]
1	Wet van Manning	37.1306
2	Kirpich (1940)	4.2729
3	Kerby (1959)	20.3270
4	Giff & Symons (1968)	15.4699
5	Temez (1978)	12.9432
6	SCS methode	37.6949

Figuur 159. Resultaten berekening concentratietijd bufferbekken 5.

### Benodigd buffervolume

In het eerste tabblad van de tool kan nagegaan worden welk volume de continue methode aanraadt voor bufferbekken 5, voor een bepaalde terugkeerperiode. Hiervoor dient het volgende ingevuld te worden in de overeenkomstige vakjes:

- Concentratietijd: 20 minuten (zie hierboven)

- Runoff-Coëfficiënt: 0.6 (cfr. de aannames van de provincie)
- Curve Number van 84 of 88 (afhankelijk van de toestand van het oppervlak)
- Het maximale doorvoerdebiet kan gevonden worden via vergelijking (1) voor knijpopeningen: 60 l/s (met een debietscoëfficiënt van 0.8)
- Oppervlakte: 9.3 ha
- Doorvoerrelatie: via een vierkantswortel verband
- Buiduur: 20 minuten (gelijk aan de concentratietijd)

Nadat alles ingevuld is en er op de 'Berkenen'-knop geklikt is, zouden de resultaten moeten overeenkomen met de waarden in de tabel hieronder.

Tp [jaar]	Afstromingsvolume [m <sup>3</sup> /ha]			Benodigd buffervolume [m <sup>3</sup> /ha]			
	Rationele Methode	SCS- methode	Aangepaste SCS-meth.	Rationele Methode	SCS- methode	Aangepaste SCS-meth.	Continue methode
1	65.3	0.3	4.2	57.5	0	0	80.5
2	80.9	2.8	14.9	73.1	0	7.2	104.3
5	101.8	9.5	32.7	94.0	1.8	25.0	142.2
10	117.6	16.9	48.7	109.9	9.2	41.0	177.3
20	133.5	25.9	67.0	125.8	18.2	59.3	204.7

#### Terugkeerperiode van overloop

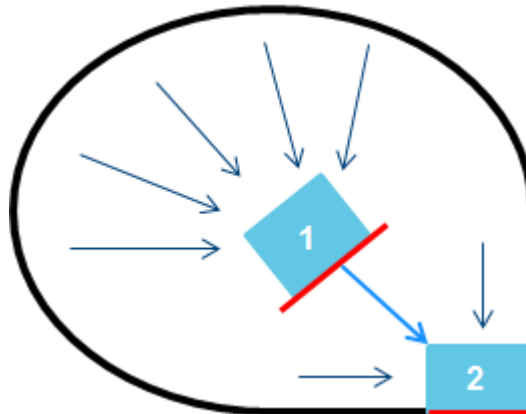
Aangezien bufferbekken 5 al ontworpen is, kan met behulp van het tweede tabblad van de rekentool nagegaan worden wat de terugkeerperiode van overloop is, volgens de continue simulatie methode. De volgende gegevens dienen hiervoor ingevuld te worden:

- Neerslagreeks: huidig klimaat
- Aantal bufferbekkens: 1 (aanvinken van serie of parallel heeft hier bijgevolg geen effect)
- Concentratietijd: 20 min
- Toestroomoppervlakte: 9.3 ha
- Bergingsvolume: 1250 m<sup>3</sup>
- Knijphoogte: 0 % (De knijpleiding bevindt zich volledig onderaan in de dam)
- Doorvoerdebiet: 60 l/s (dit is het maximale debiet, bij een volledig gevuld bufferbekken)
- Doorvoerrelatie: vierkantswortel
- Oppervlakteberging: 1 mm (waarden tussen 0 en 2 mm zijn realistisch)
- Runoff-coëfficiënt: constant met een waarde van 0.6 (cfr. de aannames van de provincie Vlaams-Brabant)

Door op de 'Berekenen'-knop te klikken wordt de 100 jarige Ukkel neerslagreeks nu doorgerekend. Dit leidt tot een totaal van 21 overstortingen, wat over een periode van 100 jaar overeenkomt met een terugkeerperiode van 4.76 (= 100 / 21) jaar. Voor elk van deze overstortgebeurtenissen wordt het overgestorte volume (in totale m<sup>3</sup>) geplot in de bovenste grafiek. Deze volumes zijn hier gerangschikt van groot naar klein, waardoor het grootste volume een terugkeerperiode van overstort van 100 jaar (=100 / 1) krijgt.

#### 4.2 Meerdere bufferbekkens

In een tweede voorbeeld zal een hypothetisch voorbeeld bekeken worden van een stroomgebiedje waarin twee bufferbekkens gebouwd zijn (zie Figuur 160). Het meest opwaartse bufferbekken (met een volume van 1300 m<sup>3</sup> en een maximaal doorvoerdebiet van 60 l/s) heeft een toestroomoppervlakte van ca. 10 ha en een bijhorende concentratietijd van 20 minuten. Het afwaartse bufferbekken (1000 m<sup>3</sup> en 50 l/s) heeft een toestroomoppervlakte van slechts 4 ha, met een concentratietijd van 10 minuten, en ontvangt ook nog het doorvoer- en overloopdebiet van het meer opwaarts gelegen bufferbekken.

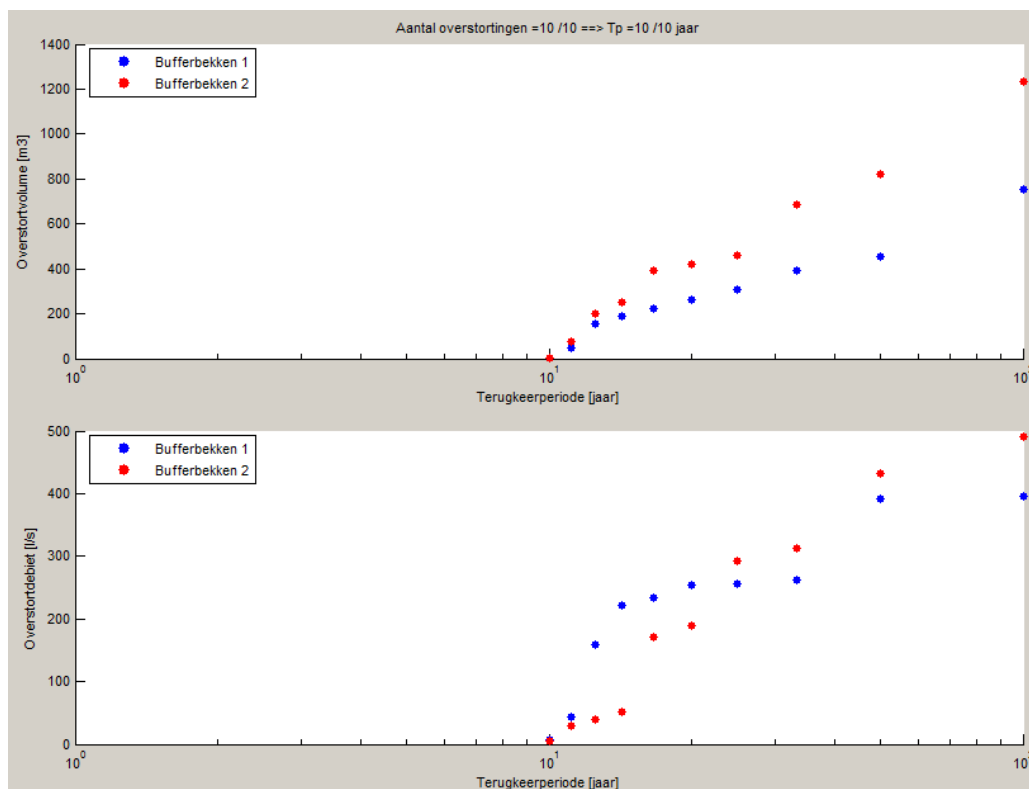


Figuur 160. Schematische voorstelling van stroomgebiedje met twee bufferbekkens

Om de terugkeerperiode van overloop van beide bufferbekkens te kennen dienen de gegevens als volgt ingevuld te worden. Hierbij verwijst het eerste getal telkens naar bufferbekken 1 en het tweede naar bufferbekken 2.

- Aantal bufferbekkens: 2 in serie (aangezien het doorvoer- en overloop debiet van het eerste naar het tweede bufferbekken stroomt).
- Concentratietijd: 20 minuten voor bekken 1 en 10 minuten voor bekken 2.
- Toestroomoppervlakte: 10 ha en 4 ha
- Bergingsvolume: 1300 m<sup>3</sup> en 1000 m<sup>3</sup>
- Knijphoogte: beiden 0 %
- Doorvoerdebiet: 60 l/s en 50 l/s, met beiden een vierkantswortel doorvoerrelatie
- Oppervlakteberging van 2 mm
- Constante runoff-coëfficiënt van 0.5.

Na doorrekenen van de 100 jaar Ukkel neerslagreeks levert dit voor beide bufferbekkens een terugkeerperiode op van 10 jaar (zie Figuur 161)



Figuur 161. Overloopvolumes en –piekdebieten voor de twee bufferbekkens uit Figuur 160





