

***Modellering van de sedimentaanvoer naar de
waterlopen, het effect van erosiebestrijdingsmaatregelen
en het transport van sediment in de onbevaarbare
waterlopen***

Bestek nr. WAT/L 2012 S 0005 X

Voortgangsrapport 5

Deel 1: luik bodem

Revisie eindrapport bodem



COLOFON

Opdracht:

Modellering van de sedimentaanvoer naar de waterlopen, het effect van erosiebestrijdingsmaatregelen en het transport van sediment in de onbevaarbare waterlopen
Bestek nr. WAT/L 2012 S 0005 X
Voortgangsrapport 3

Opdrachtgever:

Vlaamse Milieumaatschappij
afdeling Operationeel Waterbeheer
Koning Albert II laan 20 bus 16
1000 BRUSSEL

Auteur:

Antea Belgium nv
Roderveldlaan 1
2600 Antwerpen

T : +32(0)3 221 55 00
F : +32 (0)3 221 55 01
www.anteagroup.be
BTW: BE 414.321.939
RPR Antwerpen 0414.321.939
IBAN: BE81 4062 0904 6124
BIC: KREDBEBB

Antea Group is gecertificeerd volgens ISO9001

Identificatienummer:

2252433016

Datum:

07/06/2016

status / revisie:

rapport v0

Vrijgave:

Renaat De Sutter, Contract Manager

Controle:

Thomas Van Hoestenbergh, Projectleider

Projectmedewerkers:

Bram Ferket, adviseur
Jeroen Degerickx (KULeuven)
Marijn Van de Broek (KULeuven)

© Antea Belgium nv 2016

Zonder de voorafgaande schriftelijke toestemming van Antea Group mag geen enkel onderdeel of uittreksel uit deze tekst worden weergegeven of in een elektronische databank worden gevoegd, noch gefotokopieerd of op een andere manier vermenigvuldigd.

INHOUD

1	INLEIDING	7
2	MODELSELECTIE	9
2.1	<i>Eerste selectie</i>	9
2.2	<i>Evaluatie openLISEM</i>	10
2.2.1	Modelbeschrijving	10
2.2.2	Kalibratie op de Heulengracht	12
2.2.3	Validatie.....	17
2.3	<i>Evaluatie Curve Number model</i>	18
2.4	<i>Vergelijking modellen</i>	21
3	BESCHRIJVING SEDIMENTEXPORTMODEL	23
3.1	<i>Inleiding</i>	23
3.2	<i>Detail methode basismodel</i>	24
3.2.1	Afstroming: aangepaste Curve Number methode	24
3.2.2	Erosie en sedimentatie: WaTEM/SEDEM	28
3.2.3	Verdeling sediment over hydrogram	33
3.2.4	Korrelgrootteverdeling sediment	33
3.2.5	Afwijkingen van basialgoritmes	34
3.3	<i>Benodigde input basismodel</i>	36
3.4	<i>Overzicht output basismodel</i>	42
3.5	<i>Lange termijnversie van het CN_WS model</i>	44
3.6	<i>Vereenvoudigde versie van het CN_WS model</i>	45
4	VALIDATIE EN TOEPASSING VAN HET MODEL.....	47
4.1	<i>Inleiding</i>	47
4.2	<i>Gebruikte inputdata</i>	47
4.3	<i>Validatie bemeten stroomgebieden (Sedimentmeetnet)</i>	50
4.3.1	Algemene evaluatie voor alle beschikbare bekkens	50
4.3.2	Detailanalyse voor de bekkens in zuid Limburg	58
4.4	<i>Gevoeligheidsanalyse</i>	67
4.5	<i>Validatie ruimtelijke erosie- en sedimentatiepatronen</i>	71
4.6	<i>Evaluëren van erosiebestrijdingsmaatregelen met het model</i>	73
4.7	<i>Toepassing op 1^{ste} categorie waterlopen</i>	78
4.8	<i>Toepassing op Vlaamse hydrografische bekkens</i>	79
5	SUGGESTIES VOOR VERVOLGONDERZOEK	81
6	BESLUIT	83
	BIJLAGEN	85

TABELLEN

Tabel 2-1	Minimaal benodigde variabelen die in kaartvorm in openLISEM moeten worden ingevoerd	11
Tabel 2-2	Inputparameters van openLISEM voor oppervlakkige afstroming gerelateerd aan landgebruik	13
Tabel 2-3	Infiltratieparameters voor de Green and Ampt infiltratiemodule (Takken et al., 1999).	14
Tabel 2-4	Eigenschappen van de neerslag evenementen in de Heulengracht gebruikt voor kalibratie	14
Tabel 3-1	Verhouding model/meting van totale sedimentoutput voor een aantal evenementen en stroomgebieden uit het Demerbekken.....	31
Tabel 3-2	Speciale klassen in perceelskaart	37
Tabel 3-3	Debietscoëfficiënt (C_d) in functie van de oppervlaktecontractie (A_0/A_1).	41

Tabel 4-1 Bodemerosiviteitsfactor ($\text{kg h MJ}^{-1} \text{mm}^{-1}$) in functie van bodemtextuur in Vlaanderen.	48
Tabel 4-2 Variatie van de gewasfactor (C-factor) in functie van de maand voor enkele gewassen.	49
Tabel 4-3 Algemene kenmerken van de bemeten stroomgebieden gebruikt voor de validatie van het CN_WS model.	50
Tabel 4-4 Overeenkomst tussen model- en meetresultaten voor alle gesimuleerde evenementen voor de totale hoeveelheid afstroming en de totale sedimentvracht aan de uitlaat van het stroomgebied, in functie van de verhouding tussen de gemeten afstroming en neerslag.	51
Tabel 4-5 Overeenkomst tussen model- en meetresultaten voor de totale hoeveelheid afstroming en de totale sedimentvracht over een periode van één jaar aan de uitlaat van het stroomgebied..	57
Tabel 4-6 Totale afstroming van water (m^3) en totale sedimentoutput (kg) voor de simulaties met en zonder erosiebestrijdingsmaatregelen (EBM) in de Heulengracht en de Molenbeek te Velm.	78
Tabel 4-7 Totale jaarlijkse sedimentoutput voor de gesimuleerde 1 ^{ste} categorie waterlopen.....	78
Tabel 4-8 Totale sedimentoutput voor een karakterisitek zomer- en winterevenement voor de gesimuleerde Vlaamse hydrografische bekkens.	80
Tabel 4-9 Sedimentbalans van een volledig jaar en sedimentoutput aan uitlaat voor de gesimuleerde Vlaamse hydrografische bekkens.	80

FIGUREN

Figuur 2-1 Conceptuele illustratie van hoe de totale fout van een model een functie is van zowel modelcomplexiteit als de fout geassocieerd met de inputvariabelen.....	10
Figuur 2-2 Flowchart van de huidige structuur van openLISEM.	12
Figuur 2-3 In openLISEM kan een gridcel uit meerdere types bodembedekking bestaan, waarbij voor elk type de relatieve bedekkingsgraad per gridcel moet worden ingevoerd.	12
Figuur 2-4 Verhouding van gesimuleerde over gemeten totale afstromingsvolumes voor verschillende combinaties van K_{sat} , Ψ en Manning's n voor het evenement van 14/06/2006.....	15
Figuur 2-5 Model efficiëntie (ME) in functie van variaties in verzadigde hydraulische conductiviteit (K_{sat}).	15
Figuur 2-6 Model efficiëntie (ME) in functie van variaties in Hydraulic suction at the wetting front (ψ).	16
Figuur 2-7 Modefficiënties voor kalibratie en validatiedata voor de Green and Ampt infiltratiemodule door Van den Putte et al. (2013)	17
Figuur 2-8 Hydrograaf voor het evenement van 14/06/2006 zoals bepaald op basis van de gekalibreerde parameters voor de vijf overige evenementen.	18
Figuur 2-9 Neerslag, gemeten en gesimuleerd debiet voor het evenement van 07/01/1999 in Ganspoel.	19
Figuur 2-10 Gesimuleerd astromingspatroon voor het neerslagevenement van 19/05/1997 in Ganspoel	20
Figuur 2-11 Gemeten en gesimuleerde hoeveelheid afstroming (m^3) voor evenementen in de Heulengracht.....	20
Figuur 2-12 Neerslag, gemeten en gesimuleerd debiet voor het evenement van 29/05/2006 in de Heulengracht.....	21
Figuur 2-13 Neerslag, gemeten en gesimuleerd debiet met zowel het aangepaste CN model als openLISEM voor het evenement van 29/05/2006 in de Heulengracht.	21

Figuur 3-1 Schema van algemene workflow in tijdsafhankelijke en ruimtelijk expliciete Curve Number model.....	24
Figuur 3-2 Schema van bepaling doelcellen in aangepaste Curve Number model.....	25
Figuur 3-3 Voorbeeld van de intekening van een dam in de vereiste raster input laag.....	40
Figuur 3-4 Illustratie van variabelen A_0 en A_1 voor de bepaling van de debietscoëfficiënt van een dam.....	40
Figuur 3-5 Toekenning van een waarde aan de broncel (x) in functie van de verplichte afstromingsrichting voor geleidende dammen en grachten.....	41
Figuur 4-1 Afwijking tussen modelresultaat en meting voor totale afstroming voor alle gesimuleerde zomerevenementen in alle bemeten stroomgebieden in functie van de grootte van het stroomgebied.....	53
Figuur 4-2 Voorbeelden van gesimuleerde hydrogrammen (afstromingsdebiet in functie van de tijd) voor verschillende evenementen.....	55
Figuur 4-3 Voorbeelden van gesimuleerde sedigrammen (sedimentvracht in functie van de tijd) voor verschillende evenementen.....	56
Figuur 4-4 Voorbeeld van gesimuleerd hydrogram en sedigram voor een periode van één jaar voor het stroomgebied Velm.....	57
Figuur 4-5 De ratio van de gemodelleerde over gemeten totale afstroming versus bekkengrootte voor 167 gesimuleerde neerslagevents in de bekkens van zuid Limburg (Borlo, Herks, Kerniel, Mielen, Molenbeek, Muizen en Piringen) voor het jaar 2008.....	59
Figuur 4-6 Afstromingsratio (de verhouding van de totale hoeveelheid afstroming ten opzichte van de totale hoeveelheid neerslag) voor alle events ten opzichte van de grootte van de bekkens in Zuid Limburg voor neerslag events in 2008.....	60
Figuur 4-7 De verhouding van de gesimuleerde tot de gemeten totale afstroming in functie van de gemeten runoff ratio voor de gesimuleerde events in de bekkens in zuid Limburg voor het jaar 2008.....	61
Figuur 4-8 Gemodelleerde ten opzichte van gemeten oppervlakkige afstroming voor het bekken van Heks (1146 ha).....	62
Figuur 4-9 Gemodelleerde ten opzichte van gemeten oppervlakkige afstroming voor het bekken van Molenbeek (3049 ha).....	62
Figuur 4-10 Neerslag, gemeten en gesimuleerde oppervlakkige afstroming voor het bekken van Borlo (31/01/2008).....	63
Figuur 4-11 Neerslag, gemeten en gesimuleerde oppervlakkige afstroming voor het bekken van Heks (06/02/2008).....	64
Figuur 4-12 Neerslag, gemeten en gesimuleerde oppervlakkige afstroming voor het bekken van Molenbeek (20/03/2008).....	65
Figuur 4-13 Gemodelleerde versus gemeten sedimentvracht voor verschillende neerslagevenementen in het bekken van Mielen voor het jaar 2008.....	66
Figuur 4-14 gemodelleerde versus gemeten sedimentvracht voor verschillende neerslagevenementen in het bekken van Muizen voor het jaar 2008.....	67
Figuur 4-15 Gevoeligheid van de modelresultaten voor afstroming ten opzichte van de CN waarde voor een karakteristiek zomerevenement in Velm.....	68
Figuur 4-16 Gevoeligheid van de modelresultaten voor afstroming ten opzichte van twee inputparameters van bufferende dammen/bufferbekkens (hoogte knijpopening en buffervolume) voor een karakteristiek zomerevenement in Velm.....	68

Figuur 4-17 Gevoeligheid van de modelresultaten voor afstroming en sedimentvracht ten opzichte van de perceelsconnectiviteit voor een karakteristiek zomerevenement in Velm.	70
Figuur 4-18 Gevoeligheid van de modelresultaten voor afstroming en sedimentvracht ten opzichte van de aanwezigheid van rioleringen voor een karakteristiek zomerevenement in Velm.	71
Figuur 4-19 Gemeten (rood) en gesimuleerde (groen) erosie- (links) en sedimentatiepatronen (rechts) in het Ganspoel bekken voor drie events.	72
Figuur 4-20 Illustratie van het fictief bietenveld dat werd gebruikt voor de evaluatie van de effecten van verschillende EBM.	73
Figuur 4-21 Effect van een 20 m brede grasbufferstrook op de afstroming van water van een fictief bietenveld voor een karakteristiek zomerevent.	74
Figuur 4-22 Effect van een 10 m en 20 m brede grasbufferstrook op de afstroming van water van een fictief bietenveld voor een karakteristiek winterevent.	74
Figuur 4-23 Effect van een grasgang op afstroming van water van een fictief bietenveld voor een karakteristiek zomerevent.	74
Figuur 4-24 Effect van een aarden dam op de afstroming van water van een fictief bietenveld voor een karakteristiek zomerevent.	75
Figuur 4-25 Effect van een plantaardige dam op de afstroming van water van een fictief bietenveld voor een karakteristiek zomerevent.	75
Figuur 4-26 Erosie- en sedimentatiepatroon in een fictief bietenveld zonder (links) en met (rechts) een geleidende dam voor een karakteristiek zomerevent.	76
Figuur 4-27 Effecten van bufferende dammen/bufferbekkens en grasbufferstroken/grasgangen op de afstroming van water in de Heulengracht en Velm (Molenbeek) voor een karakteristiek zomerevent.	77
Figuur 4-28 Voorbeeld van ruimtelijke output gegenereerd door het vereenvoudigd model voor een klein deelgebied uit het stroomgebied van de Melsterbeek: (a) erosie (groen) – sedimentatie (geel – oranje – rood) in mm; (b) sediment export naar waterlopen in m ³	79

BIJLAGEN

Bijlage 1	Overzichtstabel voor elk geselecteerd model
Bijlage 2	Resultaten voor oppervlakkige afstroming voor bekkens in zuid Limburg (2008)
Bijlage 3	Resultaten voor totale sedimentproductie voor bekkens in zuid Limburg (2008)
Bijlage 4	Referenties

1 Inleiding

Opmerking: Het voorliggende document is een heruitgave van het eindrapport luik bodem (daterend van december 2014). Deze heruitgave is gebeurd naar aanleiding van een grondige herziening van het sedimentexportmodel (CN_WS), het model dat gecreëerd is naar aanleiding van dit project en gebruikt is voor de simulaties voorgesteld in dit rapport.

In de beheersing van de sedimentproblematiek in Vlaanderen is een vermindering van de sedimentaanvoer ten gevolge van bodemerosie cruciaal. Erosiebestrijding vormde de laatste 10 jaar het speerpunt van het Vlaamse bodembeschermingsbeleid. Erosiebestrijdingsmaatregelen (EBM) worden bij voorkeur zo brongericht mogelijk ingezet en richten zich zowel op het verminderen van de sedimentaanvoer naar de waterlopen als op het behoud van bodemkwaliteit en het verminderen van modderoverlast op het land.

Naast de EBM worden maatregelen in en naast de waterloop zelf genomen, zoals de aanleg van oeverzones, de aanleg van sedimentvangen en de ruiming van de waterlopen.

Een doordacht beleid inzake bodemerosie en de sedimentproblematiek vraagt een goede kennis van de processen die zich afspelen op het land en in de waterloop en van de link tussen beiden. Er is dan ook nood aan rekenmodellen die een goede inschatting geven van bodemerosie en sedimentatie op het land, de aanvoer van sediment naar de waterlopen en de stroomafwaartse beweging van dit sediment in de waterlopen ten gevolge van processen van sedimentatie en resuspensie.

Deze modellen moeten in staat zijn volgende berekeningen uit te voeren:

- Bodemerosie en sedimenttransport door een stroomgebied van een waterloop modelleren, inclusief het effect van erosiebestrijdingsmaatregelen (luik Bodem);
- Het gedrag van het geëxporteerde sediment in de waterloop modelleren (luik Water);
- De overgang van sediment van 'bodem' naar 'water' modelleren (luik Koppeling bodem – water).

Antea Group en KULeuven werken deze modellen samen uit in een meerjarige opdracht, die aangevat is in februari 2013. In de voorbije periode werd het luik bodem volledig uitgewerkt door KULeuven. In dit eindrapport wordt dan ook een volledig overzicht van dit bodemluik gegeven. Dit eindrapport vormt tegelijk een samenvatting van en aanvulling op de drie voortgangsverslagen die tijdens de voorbije periode zijn verschenen. Doorheen dit rapport zal dan ook sporadisch naar deze voortgangsverslagen verwezen worden voor meer details. Het luik Water van dit project wordt verder uitgewerkt door ANTEA tot het einde van het project.

Specifiek werd in het luik Bodem gestreefd naar de ontwikkeling van een rekenmodel dat in staat is om de processen bodemerosie en sedimentatie op het land in kaart te brengen en tevens de effecten van verschillende types erosiebestrijdingsmaatregelen (EBM) op deze processen te begroten. Concreet werden volgende doelen gesteld:

- Het model moet zowel bodemerosie, sedimenttransport en sedimentatie ruimtelijk verdeeld weergeven, samen met de hoeveelheid bodemmateriaal die via oppervlakkige afstroming de waterloop of een kunstmatig oppervlak bereikt. Deze processen moeten gevisualiseerd kunnen worden op een kaart.
- Het model moet voor elk punt in het landschap kunnen weergeven hoeveel de potentiële en effectieve bodemerosie op die plaats bedraagt, zowel voor een gegeven evenement als op jaarbasis.
- Het model moet weergeven hoeveel sediment er jaarlijks per hydrografisch bekken van het land naar de waterlopen wordt verplaatst.
- Het model moet hydrogrammen (afstroming in functie van de tijd) en sedigrammen (sedimentvracht in functie van de tijd) kunnen genereren voor het grensvlak tussen land en

water en voor elk willekeurig punt op het land of in de waterloop, zowel op jaar- als evenementbasis.

- Het model moet de aangeleverde hoeveelheid sediment per tijdseenheid en per waterloopsegment kunnen berekenen.
- Eventueel moet het model kunnen worden aangepast om de selectiviteit in korrelgrootte van het geërodeerde en gesedimenteerde materiaal te berekenen.
- Het model dient toepasbaar te zijn op verscheidene ruimtelijke schalen, gaande van kleine stroomgebieden (< 10 km²) tot volledige hydrografische bekkens (ca. 600 – 1700 km²).
- Tot slot is een van de voornaamste doelstellingen van het model het evalueren van bestaande en potentiële EBM. Tot de belangrijkste EBM die in rekening moeten kunnen worden gebracht behoren niet-kerende bodembewerking, groenbedekkers, teeltkeuze, grasbufferstroken, aarden dammen met erosiepoelen, plantaardige dammen, geleidende dammen, bufferbekkens en grachten. De invloed van deze maatregelen op oppervlakkige afstroming, bodemerosie en sedimentexport naar de waterloop moet kunnen worden begroot. Via scenario-analyse moet het model de gebruiker in staat stellen om voor een gegeven stroomgebied te bepalen welke de meest aangewezen EBM zijn en waar deze best in het landschap kunnen worden geïmplementeerd.

Om bovenstaande doelstellingen te bereiken, werden achtereenvolgens volgende stappen ondernomen, die elk verder zullen worden toegelicht in het vervolg van dit rapport. Ten eerste (**\$2**) werden verscheidene reeds bestaande afstromings- en erosiemodellen (zowel fysisch gebaseerde als empirische) tegenover elkaar gezet in een vergelijkende analyse teneinde het meest geschikte model voor deze toepassing te selecteren. In een tweede stap (**\$3**) werd het geselecteerde model zodanig aangepast dat aan alle opgelegde voorwaarden kon worden voldaan. Tot slot (**\$4**) werd dit uiteindelijke model gevalideerd aan de hand van gedetailleerde metingen afkomstig van het Sedimentmeetnet en toegepast op stroomgebieden van verschillende grootteorde. Dit eindrapport wordt afgesloten met enkele suggesties voor mogelijk vervolgonderzoek (**\$5**) en een besluit (**\$6**).

2 Modelselectie

De toegenomen wetenschappelijk kennis omtrent erosie gedurende de laatste decennia heeft geleid tot de ontwikkeling van een zeer uitgebreid gamma aan afstromings- en erosiemodellen. Deze gaan van relatief eenvoudige statistisch-empirische modellen tot zeer complexe proces-gebaseerde modellen. De eerste groep modellen berekent de hoeveelheid afstroming en erosie aan de hand van een empirisch afgeleide relatie tussen neerslagintensiteit en afstroming/erosiehoeveelheid, waar de tweede groep modellen berust op een fysische basis om (zoveel mogelijk) natuurlijke processen mathematisch na te bootsen. De uiteindelijke modelselectie is verlopen in twee stadia. In eerste instantie werd een algemene screening uitgevoerd op een ruime set van potentiële modellen (§2.1). Uit deze eerste selectieronde werden twee modellen weerhouden, namelijk één fysisch gebaseerd model (openLISEM; §2.2) en één empirisch model (Curve Number model in combinatie met WaTEM/SEDEM; §2.3). Deze twee modellen werden vervolgens uitvoerig getest en vergeleken, waarna werd besloten om verder te gaan met de combinatie van het Curve Number model en WaTEM/SEDEM (§2.4).

2.1 Eerste selectie

Op basis van zowel de aanwezige kennis aan de KULeuven als een literatuurstudie zijn verschillende modellen geselecteerd die in een eerste fase onderzocht zijn op hun toepasbaarheid in het kader van dit project. Wat betreft de empirische modellen zijn dit (1) WaTEM/SEDEM en (2) SPADS, voor de proces-gebaseerde modellen zijn dit (3) MCST, (4) openLISEM, (5) PESERA en (6) SWAT. Tijdens de vergelijking werd rekening gehouden met onder meer de volgende factoren: fysische basis, ruimtelijke en temporele resolutie, welke afstromings- en erosieprocessen worden gesimuleerd, capaciteit om EBM te simuleren en korrelgrootteverdeling van het sediment te bepalen, hoe en waar het model reeds werd gekalibreerd en gevalideerd, rekentijd, benodigde input, model output en opmerkingen op basis van ervaring binnen de KULeuven. Een ander belangrijk gegeven waarmee rekening moet worden gehouden bij de modelselectie is het feit dat een toenemende modelcomplexiteit vanaf een bepaald punt zal leiden tot een toenemende fout, als gevolg van een toenemende onzekerheid op de inputvariabelen (Van Rompaey & Govers, 2002). Dit wordt geïllustreerd in *Figuur 2-1*, waarin duidelijk wordt dat de fout van modeloutput zowel afhankelijk is van de complexiteit van het model als de fout geassocieerd met de inputvariabelen. Dit toont aan dat een evenwicht gevonden moet worden tussen modelcomplexiteit enerzijds en de beschikbare inputdata anderzijds.

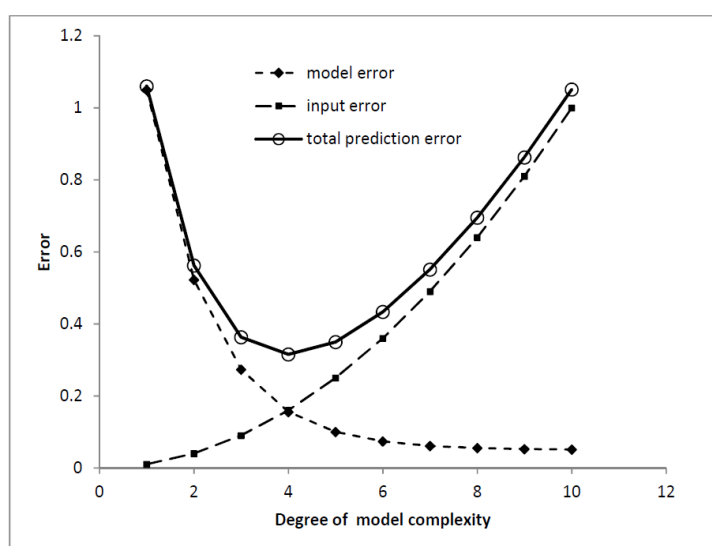
In Bijlage 1 wordt voor elk van bovenstaande modellen een overzichtstabel weergegeven van de voornaamste kenmerken. Voor een meer gedetailleerde beschrijving van deze modellen wordt verwezen naar Voortgangsrapport 1 en de aangehaalde literatuur in Bijlage 1. Op basis van deze tabellen en de expertise aanwezig aan KULeuven werd één fysisch gebaseerd model en één empirisch model weerhouden voor een meer uitgebreide testfase.

Na de vergelijking van de verschillende *proces-gebaseerde modellen* is gekozen om in eerste instantie met openLISEM verder te werken. In vergelijking met bijvoorbeeld SWAT en MCST, die beiden ook op fysische principes berusten, blijft de structuur van openLISEM relatief eenvoudig. Hiermee wordt gehoopt een evenwicht te vinden tussen de modelcomplexiteit en benodigde hoeveelheid inputdata (*Figuur 2-1*). Verder levert openLISEM een output die voldoet aan de noden van dit project, namelijk de berekening van aparte hydrogrammen en sedigrammen. openLISEM is reeds succesvol toegepast op delen van de Belgische leemstreek. Tot slot is er bij het 'Waterschap Roer en Overmaas' reeds een 15-tal jaren ervaring met de evaluatie en implementatie van EBM aan de hand van openLISEM en is deze instantie bereid haar kennis met ons te delen.

Wat betreft de *empirische modellen* zijn er weinig of geen alternatieven voor WaTEM/SEDEM, met het oog op de benodigde output. Dit model is in het verleden vaak toegepast op (delen van) Vlaanderen en is hiervoor dan ook grotendeels succesvol gevalideerd. Het model heeft de mogelijkheid om berekeningen op alle gewenste ruimtelijke schaalniveaus te maken. Het heeft de capaciteit om sediment doorheen het landschap te leiden en kan zo de ruimtelijke verdeling van erosie en depositie, alsook de aanlevering van sediment naar de waterloop, berekenen. Hoewel het

model ontworpen is voor lange termijn berekeningen, kan het ook worden toegepast om evenementen te simuleren, mits een juiste invoer van de parameters op het moment van de bui. Het model is bovendien relatief eenvoudig, vereist weinig gedetailleerde input en kan dus relatief eenvoudig aangepast worden voor de simulatie van EBM. Tot slot vormt ook de aanwezige ervaring met dit model binnen de afdeling geografie van de KULeuven een extra stimulans om met dit model verder te werken.

Aangezien WaTEM/SEDEM enkel erosie en sedimentatie simuleert en niets zegt over afstroming is een bijkomend (empirisch) model nodig voor de berekening van afstroming. Hier werd gekozen voor een afstromingsmodel dat eerder aan de KULeuven werd ontwikkeld, namelijk een aangepaste versie van het Curve Number model (Van Oost, 2003). Dit model werd gekozen omdat het weinig inputdata vereist, goed gedocumenteerd is en reeds breed toegepast werd, zowel in Vlaanderen als andere delen van de wereld. Bovendien levert het een output die goed past binnen de noden van dit project (ruimtelijk en temporeel verdeeld) en houdt het rekening met de voornaamste bodem- en gewaskarakteristieken en ruimtelijke configuratie van het landschap.



Figuur 2-1 Conceptuele illustratie van hoe de totale fout van een model een functie is van zowel modelcomplexiteit als de fout geassocieerd met de inputvariabelen (Van Rompaey & Govers, 2002)

2.2 Evaluatie openLISEM

2.2.1 Modelbeschrijving

openLISEM is een ruimtelijk verdeeld erosie- en depositiemodel dat wordt gekenmerkt door een uitgebreide fysische basis waarbij verschillende deelprocessen van zowel oppervlakkige afstroming als watererosie worden gesimuleerd voor alleenstaande neerslagevenementen. Het model werd doorheen de jaren meermaals aangepast. Een recente beschrijving van openLISEM kan worden gevonden in Baartman et al. (2012) en Sanchez-Moreno et al. (2013).

Om alle processen die worden gesimuleerd door openLISEM aan te drijven is een zeer omvangrijke hoeveelheid inputparameters nodig, zoals weergegeven in *Tabel 2-1*. De meeste parameters dienen in kaartvorm (raster) te worden ingevoerd. Hierdoor kan de gebruiker kiezen of hij deze parameters ruimtelijk verdeeld of constant voor het hele bekken invoert.

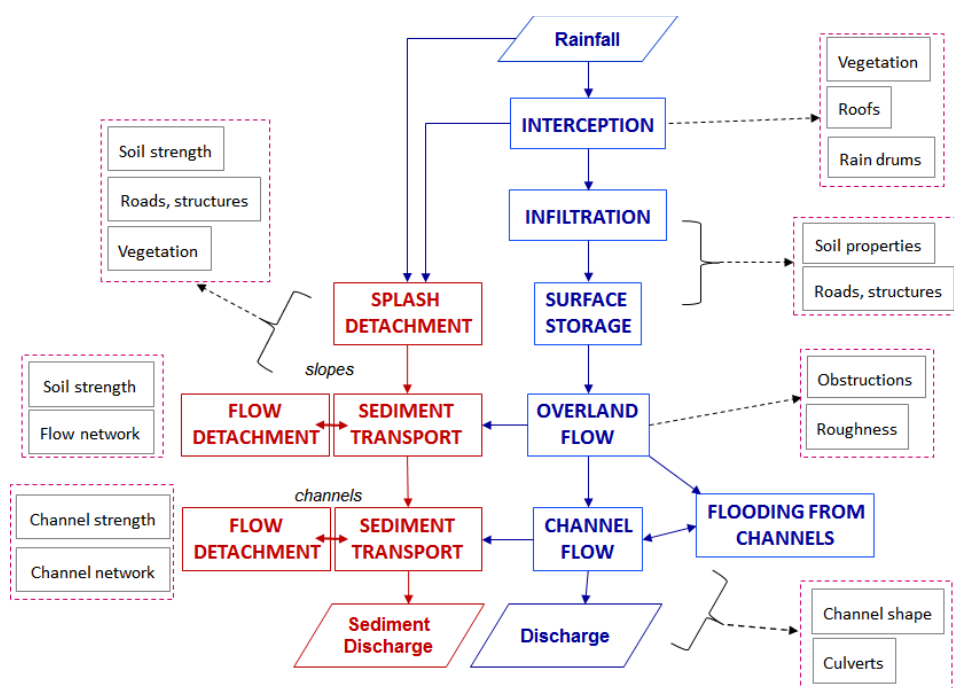
Tabel 2-1 Minimaal benodigde variabelen die in kaartvorm in openLISEM moeten worden ingevoerd.

Naam	Opmerking
Bekkeneigenschappen	
Lokale afstromingsrichting	1 - 9
Grenzen van het bekken	0 - 1
ID's van de regenval meters	1 - ...
Hellingsgradiënt	Sinus van de helling
Locatie van de uitlaat van het bekken	
Digitaal hoogte model	m
Vegetatie	
Leaf area index	
Fractie bodembedekking door vegetatie	0 - 1
Hoogte van de vegetatie	m
Eigenschappen van het bodemoppervlak	
Manning's n	
Random ruwheid	cm
Fractie bodembedekking door stenen	0 - 1
Fractie korstvorming	0 - 1
Breedte van wegen	m
Infiltratie eigenschappen	
Verzadigde hydraulische conductiviteit	mm/uur
Verzadigd volumetrisch bodemvochtgehalte	0 - 1
Initieel volumetrisch bodemvochtgehalte	0 - 1
Druk van het bodemvocht aan het vochtfront	cm
Bodemdiepte	mm
Erosie- en depositie gerelateerde eigenschappen	
Aggregaatstabiliteit	
Cohesie van onbedekte bodem	kPa
Cohesie door wortels	kPa
Mediane korrelgroottediameter	µm

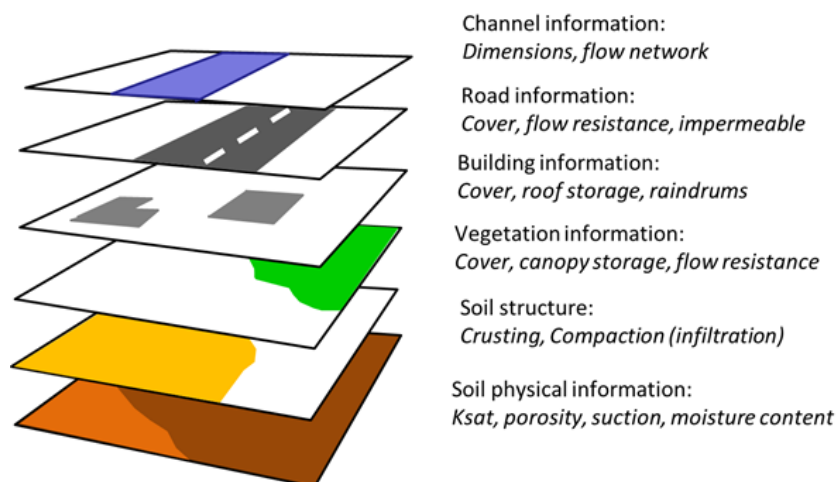
De enige tijdsvariabele input die openLISEM vereist is de neerslag, op basis waarvan de andere processen worden aangedreven. Hoe deze verschillende deelprocessen met elkaar interageren is weergegeven in [Figuur 2-2](#). De neerslag kan ofwel opgevangen worden door de vegetatie en eventueel via doorval of rechtstreeks het bodemoppervlak bereiken. De neerslag die het bodemoppervlak bereikt kan een bijdrage leveren aan spaterosie en vervolgens infiltreren, aan het oppervlak blijven staan in plassen of oppervlakkig afstromen. Het deel van de regenval dat afstroomt wordt doorheen de tijd door het landschap geleid aan de hand van een kinematische golfvergelijking waarbij rekening wordt gehouden met de bodembedekking van elke gridcel. De snelheid waarmee het water afstroomt wordt berekend aan de hand van de formule van Manning.

Een belangrijke eigenschap van openLISEM is dat het model in staat is om per gridcel meerdere types bodembedekking en hun respectievelijke bedekkingspercentages in rekening te brengen. Zo kan een gridcel zowel bestaan uit bijvoorbeeld een weg, een deel bos en een deel akker. Dit is conceptueel weergegeven in [Figuur 2-3](#).

OpenLISEM genereert een omvangrijke output, waarvan de belangrijkste kaarten met ruimtelijke patronen van afstroming, erosie en depositie zijn. Verder berekent openLISEM hydrogrammen en sedigrammen met een hoge temporele resolutie, hoeveelheden erosie door spat en oppervlakkige afstroming en de hoeveelheid erosie per landgebruik.



Figuur 2-2 Flowchart van de huidige structuur van openLISEM. Blauwe rechthoeken geven waterprocessen weer, rode rechthoeken geven erosieprocessen weer. Deze processen worden beïnvloed door de factoren in de roze rechthoeken. (bron: Victor Jetten)



Figuur 2-3 In openLISEM kan een gridcel uit meerdere types bodembedekking bestaan, waarbij voor elk type de relatieve bedekkingsgraad per gridcel moet worden ingevoerd. (bron: Victor Jetten)

2.2.2 Kalibratie op de Heulengracht

Deze sectie geeft een samenvatting van de resultaten van de kalibratie van openLISEM, zoals weergegeven in voortgangsrapport 2. Hier zullen enkel de voornaamste testen en conclusies worden besproken, voor een uitgebreide versie van de modelkalibratie van openLISEM wordt verwezen naar voortgangsrapport 2 (sectie 2.2).

Studiegebied

Als studiegebied werd gekozen voor de Heulengracht in Velm, een onderdeel van het stroomgebied van de Molenbeek. Dit is een droge vallei gekenmerkt door een hoog aandeel landbouwpercelen en een beperkte oppervlakte bos en boomgaarden. Dit kleine bekken (zo'n 210 ha) wordt gekenmerkt door een grote erosieproblematiek en is het brongebied van de modder die de dorpskern van Velm

regelmatig bereikt (Evrard et al., 2008). Omwille hiervan zijn in dit bekken vele EBM zoals grasbufferstroken, grasgangen en bufferbekkens toegepast tijdens de voorbij jaren.

Data

Een belangrijke reden om openLISEM te evalueren in de Heulengracht is de grote beschikbaarheid van data. Enerzijds zijn er neerslag- en afvoerdata beschikbaar voor zeer veel neerslagevenementen. Anderzijds is openLISEM in het verleden toegepast voor een bekken gelegen in dezelfde streek (Heks, Tongeren) op zo'n 15 km van het bekken van de Heulengracht, wat het mogelijk maakt om bepaalde inputparameters voor openLISEM uit deze studie af te leiden (Takken et al., 1999).

Om de interpretatie van de resultaten van openLISEM tijdens een eerste evaluatie zo eenvoudig mogelijk te houden, wordt voor de simulaties enkel gebruikt gemaakt van data uit de periode vóór de aanleg van het bufferbekken stroomopwaarts van de meetgoot (mei 2006 tot februari 2007). Er werd gewerkt met een ruimtelijke resolutie van 20m en een tijdstap van 15 seconden. Aangezien de erosiecomponent van openLISEM afhankelijk is van de gesimuleerde afstroming, wordt hier in een eerste stap enkel gekeken naar de afstromingscomponent van het model.

Om simulaties uit te voeren met openLISEM is een uitgebreide set van inputparameters nodig. Om alle benodigde inputkaarten aan te maken, wordt een tabel gecreëerd waarbij aan elk landgebruik (gebaseerd op de Mestbank teeltgegevens 2006) een set inputvariabelen wordt toegewezen (*Tabel 2-2*). Verder vraagt openLISEM ook gegevens over de toestand van het bodemoppervlak voor elke gridcel: graad van korstvorming, percentage stenen aan de oppervlakte, percentage gecompacteerd bodem etc. Aangezien voor deze parameters geen data beschikbaar zijn, werd gekozen om deze parameters niet in rekening te brengen en voor al deze parameters een nulwaarde in te voeren.

Tabel 2-2 Inputparameters van openLISEM voor oppervlakkige afstroming gerelateerd aan landgebruik (op basis van (Takken et al., 1999)).

	LAI	PER	CH	n	RR	Wheel
Wegen	0,00	0,00	0,00	0,01	0,01	0,00
Stallen en gebouwen	0,00	0,00	0,00	0,01	0,50	0,00
Bos	11,00	0,95	15,00	0,30	0,86	0,00
Waterwegen	0,00	0,00	0,00	0,01	0,01	0,00
Grasland	1,86	0,95	0,05	0,23	0,70	0,00
Braak	0,00	0,00	0,00	0,12	0,97	4,00
Witloof	0,10	0,06	0,05	0,12	1,16	1,28
Maïs	0,15	0,07	0,25	0,08	1,41	2,25
Suikerbiet	0,50	0,18	0,15	0,12	1,16	1,28
Gewassen hoge bedekking*	1,50	0,47	0,50	0,14	0,90	0,48
Aardappelen	0,40	0,24	0,20	0,14	4,67	0,46
Wortel	0,10	0,12	0,10	0,12	1,16	1,28
Boomgaard	10,00	0,95	10,00	0,30	0,73	0,00
Houtproductie	11,00	0,95	15,00	0,30	0,83	0,00
Andere	0,25	0,13	0,15	0,12	1,91	1,31

* wintergraan, wintergerst, haver, koolzaad en vlas

Voor de testen die met openLISEM werden uitgevoerd, wordt infiltratie gesimuleerd met de Green and Ampt infiltratiemodule. De inputkaarten voor deze module werden opnieuw aangemaakt op basis van Takken et al. (1999) (*Tabel 2-3*). Tijdens de kalibratie werden de Ksat (verzadigde hydraulische conductiviteit) en ψ (psi, suction at the wetting front) parameterwaarden geoptimaliseerd. Deze parameters werden gekozen aangezien openLISEM zeer gevoelig is aan de waarden voor deze parameters.

Tabel 2-3 Infiltratieparameters voor de Green and Ampt infiltratiemodule (Takken et al., 1999).

Parameter	Waarde
Ksat*	23,5 mm h ⁻¹
PSI*	100 cm
THETA1	0,10
THETAS	0,40
SOILDEP**	500 mm

* Deze waarden worden geoptimaliseerd tijdens de kalibratie

** Niet gebaseerd op Takken et al. (1999)

Het volledige bekken van de Heulengracht is gekenmerkt door de bodemklasse droge leem, dus is het gerechtvaardigd om de verschillende inputparameters van het model constant te houden voor het hele bekken. Deze parameters worden immers grotendeels bepaald door bodemkenmerken.

Alle afstromings- en erosieprocessen in openLISEM worden aangestuurd door de verdeling van neerslagintensiteit per tijdstap. Voor deze input wordt gebruikt gemaakt van de neerslagdata die in het bekken van de Heulengracht werden opgemeten (Watering Sint-Truiden). De eigenschappen van de gebruikte neerslag evenementen zijn weergegeven in [Tabel 2-4](#). Het feit dat de kalibratie gebeurt op basis van slechts vijf neerslagevenementen is te wijten aan (1) de korte meetperiode voor de aanleg van het bekken en (2) onrealistische data die voor andere evenementen in deze periode werden opgemeten (Meert & Willems, 2013).

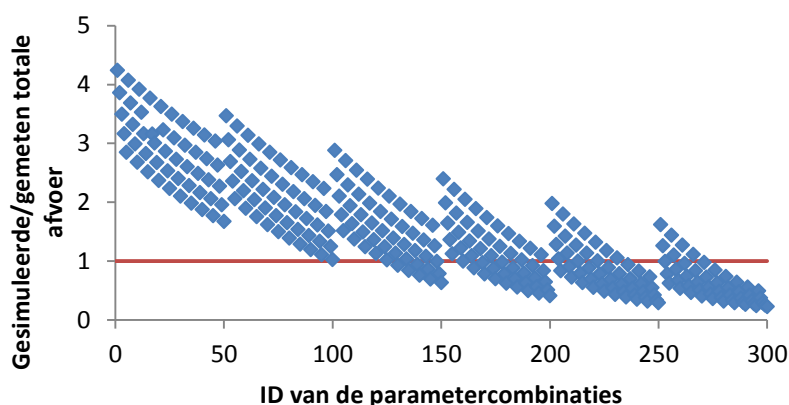
Tabel 2-4 Eigenschappen van de neerslag evenementen in de Heulengracht gebruikt voor kalibratie

Datum	Neerslaghoeveelheid (mm)	Duur (min)	Opgemeten afstroming (m ³)
21/05/2006	16,2	370	1885
29/05/2006	14,5	540	1995
14/06/2006	19,7	180	3097
19/08/2006	7,9	40	470
21/08/2006	23,4	300	5012

Kalibratie van openLISEM

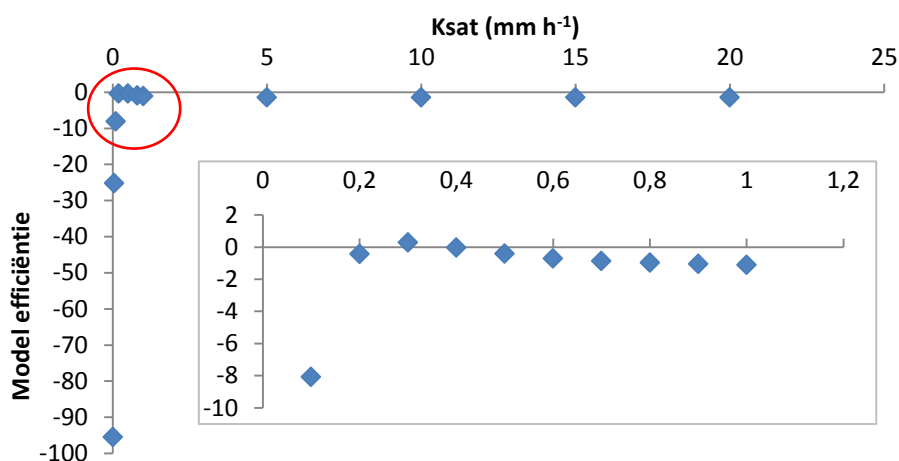
Voor de kalibratie van openLISEM werden twee verschillende strategieën toegepast: 1) er werd één evenement gekalibreerd op basis van drie kalibratieparameters en 2) er werd voor de vijf evenementen gekalibreerd, waarbij zowel één als twee parameters werden gekalibreerd. Als maat van correctheid werd de modefficiëntie (ME) gebruikt (Nash & Sutcliffe, 1970).

Om na te gaan of de structuur van openLISEM geschikt is om de evenementen in de Heulengracht correct te simuleren, werd één evenement, van 14 juni 2006, gekalibreerd aan de hand van Ksat (verzadigde hydraulische conductiviteit van de bodem), Ψ (hydraulic suction at the wetting front) en Manning's n (ruwheidscoëfficiënt). In totaal werden 300 combinaties van Ksat, Ψ en Manning's n uitgetest. Ksat werd gevarieerd tussen 0,5 en 1,5 mm h⁻¹ in stappen van 0,2 mm h⁻¹, Ψ tussen 22 en 40 cm in stappen van 2 cm en Manning's n tussen 0,5 en 1,5 in stappen van 0,25. Dit deel van de parameter ruimte werd gekozen na enkele eerste testen voor een groter bereik te hebben uitgevoerd. Als maat van correctheid werd de verhouding van gesimuleerd over gemeten totaal afstromingsvolume berekend, zoals weergegeven in [Figuur 2-4](#). Hieruit blijkt dat een verkeerde keuze van parameterwaarden voor Ksat, Ψ en/of Manning's n aanleiding kan geven tot resultaten die sterk afwijken van de werkelijkheid. Verder is ook te zien dat verschillende combinaties van deze drie parameters (elk punt in de grafiek stelt een andere combinatie van de drie parameters voor) kunnen leiden tot een optimaal resultaat (equifinaliteit). Wanneer het model moet worden toegepast op een ander gebied waar geen data voorhanden zijn, zal het dus niet duidelijk zijn met welke combinatie van modelparameters zal moeten worden gewerkt. Wanneer de hydrograaf voor één van deze optimale combinaties wordt vergeleken met de gemeten hydrograaf (zie [Figuur 2-6](#) in voortgangsrapport 2), is te zien dat beide hydrografen relatief goed overeen komen. Dit wijst erop dat openLISEM in het algemeen goed in staat is de belangrijkste processen die verantwoordelijk zijn voor oppervlakkige afstroming voor dit evenement te simuleren.



Figuur 2-4 Verhouding van gesimuleerde over gemeten totale afstromingsvolumes voor verschillende combinaties van K_{sat} , ψ en Manning's n voor het evenement van 14/06/2006. De rode lijn geeft de situatie weer wanneer de gesimuleerde hoeveelheden gelijk zijn aan de gemeten waarde.

Verder werden er ook kalibraties uitgevoerd op basis van de vijf geselecteerde evenementen, waarbij in eerste instantie enkel werd gekalibreerd op basis van K_{sat} . Hierbij werden de andere parameters constant gehouden, zoals hierboven vermeld (Tabellen 2-2 en 2-3). Op basis van waarden die werden bepaald door Takken et al. (1999) en voorbeelden aangereikt door de ontwikkelaars van openLISEM, werd K_{sat} gevarieerd tussen van 0,01 tot 20 mm h^{-1} . De resultaten van deze simulaties worden weergegeven in de grote grafiek van [Figuur 2-5](#) en tonen aan dat het totale afgestroomde watervolume het meest gevoelig is aan K_{sat} waarden tussen 0,1 en 1 mm h^{-1} . De kleine grafiek in [Figuur 2-5](#) geeft een gedetailleerde analyse van de invloed van K_{sat} op de ME weer in dit bereik. De optimale K_{sat} waarde bevindt zich in het bereik 0,1 – 1 mm h^{-1} en is bepaald op 0,3 mm h^{-1} . De gevoeligheid van het model aan deze parameter (zoals getoond in [Figuur 2-5](#)) wijst op het belang van een correct gekozen K_{sat} . Er is ook te zien dat de model efficiëntie voor de optimale K_{sat} slechts 0,27 bedraagt. Dit kan erop wijzen dat de aanpak waarbij enkel K_{sat} wordt gevarieerd te simplistisch is en dat er ruimte voor verbetering is.

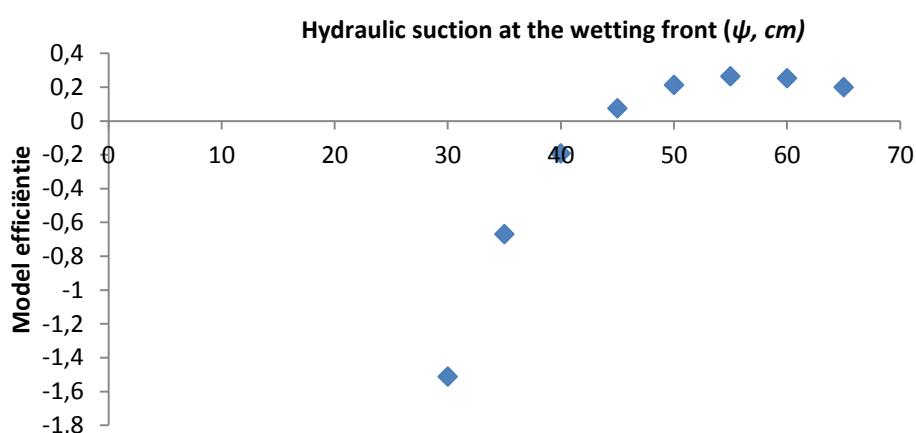


Figuur 2-5 Model efficiëntie (ME) in functie van variaties in verzadigde hydraulische conductiviteit (K_{sat}). De kleine grafiek geeft een detail weer van de rode cirkel in de grote grafiek.

Daarom wordt in een volgende stap ook ψ gevarieerd. Het dient te worden opgemerkt dat K_{sat} en ψ niet volledig van elkaar kunnen worden losgekoppeld, aangezien beiden immers een tegengesteld effect op infiltratiesnelheden hebben. Wanneer zowel K_{sat} als ψ werden gevarieerd, werd gevonden dat er slechts enkele combinaties van beide parameters resulteerden in een positieve ME (zie figuur 2-8 in voortgangsrapport 2). Verder werd ook gevonden dat er meerdere combinaties van K_{sat} en ψ zijn die resulteren in een maximale ME. Om de optimale combinatie van beide parameters te bepalen, werd in een volgende stap K_{sat} constant gehouden op 0,5 mm h^{-1} en werd ψ verder

gevarieerd. De resultaten van deze analyse zijn weergegeven in *Figuur 2-6*, die aantoont dat een optimale combinatie van K_{sat} en ψ respectievelijk $0,50 \text{ mm h}^{-1}$ en 55 cm opleveren, maar dat de ME zeer gevoelig is aan de gekozen waarde van ψ . Verder blijkt ook dat wanneer er slechts twee parameters worden gevarieerd er reeds sprake is van equifinaliteit.

Verskillende combinaties van K_{sat} en ψ resulteren dus in een maximale ME van $0,26$. Dit is een lage waarde die mogelijks het gevolg kan zijn van een andere, verkeerd geschatte parameter die het infiltratieproces beïnvloedt. Daarom wordt nagegaan in welke mate de bodemdiepte een effect heeft op het totale afgestroomde volume. De resultaten van deze analyses tonen dat wanneer de bodem dieper is dan 10 cm de ME ongeveer constant blijft op $0,26$ (voor de figuur wordt verwezen naar voortgangsrapport 2, *Figuur 2-10*). Een mogelijke verklaring voor het feit dat er bij een diepere bodem niet meer infiltratie plaatsvindt (zoals men zou verwachten) is dat het grootste deel van de afstroming het gevolg is van 'infiltration excess overland flow': afstroming als gevolg van het feit dat de neerslagintensiteit hoger is dan de infiltratiecapaciteit van de bodem en er dus niet meer neerslag in de bodem kan infiltreren.



Figuur 2-6 Model efficiëntie (ME) in functie van variaties in Hydraulic suction at the wetting front (ψ). Op basis van de aftoetsing van de parameterruimte werd K_{sat} gelijkgesteld aan $0,5 \text{ mm h}^{-1}$.

De maximale modefficiëntie die werd behaald voor de verschillende kalibraties, is opvallend laag ($0,26$). Hiervoor kunnen verschillende redenen geïdentificeerd worden die te maken hebben met zowel de gebruikte data als het model zelf:

- In openLISEM moeten zeer veel parameters worden ingegeven. Het is mogelijk dat deze fouten bevatten of niet volledig toepasbaar zijn op de evenementen die hier worden gesimuleerd. Er zijn voor de Heulengracht echter geen data voorhanden waaruit voor elk evenement het gewas en bodemeigenschappen kunnen worden afgeleid, waardoor met algemene data gewerkt is.
- De data waarop werd gekalibreerd, namelijk afvoer gemeten in de meetgoot, zijn niet foutenvrij.
- Ook de neerslagdata die werden gebruikt, bevatten fouten. Neerslag die werd opgemeten op slechts één punt, werd gelijkmatig verdeeld over het hele bekken. Bij gebrek aan andere data is dit echter de enige manier om neerslag te simuleren zonder bijkomende aannames te maken.
- Om de invloed van het bufferbekken niet in rekening te brengen, werd enkel gebruik gemaakt van neerslagevenementen die plaatsvonden vóór de aanleg ervan. Voor deze periode waren slechts gegevens van vijf goed bemeten evenementen beschikbaar (Meert & Willems, 2013). Bovendien zijn deze evenementen verspreid over de periode mei - augustus, een periode waarin belangrijke evoluties in bodem- en gewaseigenschappen kunnen optreden die niet in rekening konden worden gebracht in het model, aangezien de gebruikte datasets geen informatie bevatten aangaande de temporele variatie van de parameters. Omwille van het feit dat het opzoeken van aangepaste data voor alle gewasklassen voor elke evenement zeer veel

tijd in beslag zou nemen, is gekozen om hier geen nadruk op te leggen tijdens deze eerste modevaluatie.

De lage modefficiënties zoals hier gevonden zijn echter niet uitzonderlijk. Ook Van den Putte et al. (2013) behaalden zeer lage modefficiënties voor hun kalibratie- en validatiedatasets voor de Greens and Ampt module op basis van de totale afstromingscoëfficiënt (*Figuur 2-7*), ondanks het feit dat er in totaal data voor 298 neerslagevenementen beschikbaar waren. Uit deze figuur blijkt ook dat een eenvoudig regressiemodel betere voorspellingen van de afstromingscoëfficiënt genereerde dan de fysisch-gebaseerde Green and Ampt module.

ME and RMSE for the total runoff coefficient predicted using the GAML model and different parameterization methods (see text for symbols). VALs is the validation dataset for spring/summer data and VALw is the validation dataset for winter data.

Dataset	N	GAML model (<i>fit1</i>)		GAML model (<i>fit2</i>)		GAML model (<i>fit3</i>)		MR model	
		ME	RMSE	ME	RMSE	ME	RMSE	ME	RMSE
VALs	65	0.20	0.17	0.32	0.15	-0.38 ^a	0.26 ^a	0.44	0.14
VALw	41	-0.37	0.24	-0.14	0.22	-0.27 ^b	0.35 ^b	0	0.20

^a $N = N - 1$, F -curve could not be fitted for 1 observation.

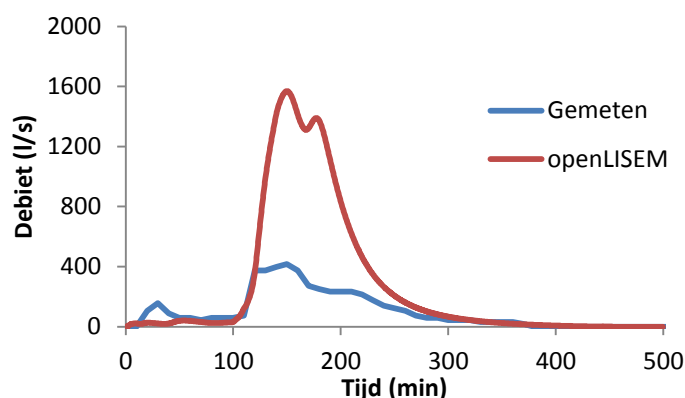
^b $N = N - 1$, F -curve could not be fitted for 2 observations.

Figuur 2-7 Modefficiënties voor kalibratie en validatiedata voor de Green and Ampt infiltratiemodule door Van den Putte et al. (2013): fit1: op basis van Ksat en PSI; fit2: op basis van Ksat; fit3: op basis van 4 vrije parameters, MR: meervoudig regressiemodel (uit Van den Putte et al. (2013)).

Uit deze sectie blijkt dat het kalibreren van een fysisch-gebaseerd afstromingsmodel niet steeds eenvoudig is. Er zijn vaak meerdere combinaties van parameterwaarden die een maximale ME opleveren, waardoor het niet duidelijk is met welke parameterwaarden gewerkt moet worden. Dit bemoeilijkt de toepassing van het model op bekken waar geen kalibratie voor kan worden uitgevoerd. Verder moet in gedachten worden gehouden dat de Heulengracht een bekken is waar zeer veel gegevens voor beschikbaar zijn. Het kalibreren van het model voor een bekken waar dit niet het geval voor is, zal dus nog moeilijker verlopen.

2.2.3 Validatie

In deze sectie wordt nagegaan in welke mate de parameters die in de vorige sectie werden bepaald, kunnen worden gebruikt om andere evenementen te simuleren. In voortgangsrapport 2 werd eerst getest of de optimale parameters bepaald op basis van een evenement kunnen worden gebruikt om een ander evenement te simuleren. Dit bleek niet zo te zijn (zie voortgangsrapport 2, sectie 2.2.3.2). Daarom werd het model eerst gekalibreerd op basis van vijf evenementen, en vervolgens toegepast op een zesde evenement (van 14 juni 2006). De resultaten van deze analyse zijn weergegeven in *Figuur 2-8*. Hier is te zien dat de timing van de piekafvoer goed wordt gesimuleerd, maar dat de totale hoeveelheid afstromend water die het bekken verlaat zeer sterk wordt overschat. Deze analyses tonen dat parameterwaarden die bekomen worden aan de hand van de kalibratie van openLISEM op basis van bepaalde evenementen, niet zonder problemen kunnen worden overgebracht naar andere evenementen. Er is dus een meer uitgebreide dataset van evenementen nodig om openLISEM voldoende te kunnen kalibreren. Een andere reden is dat verschillende fysische (bodem-)processen een verschillende invloed op afstroming hebben in verschillende seizoenen (Van den Putte et al., 2013). Ook het feit dat openLISEM gedetailleerde input vereist over bekkeneigenschappen die niet gemeten kunnen worden voor elk gesimuleerd evenement (bv. mate van korstvorming, aggregaatstabiliteit, ...) draagt bij aan de onzekerheid die geassocieerd is met de simulaties. Verder moet in gedachten worden gehouden dat hier enkel afstroming werd gesimuleerd, terwijl het doel van dit project is om hierbovenop ook erosie en depositie van sediment te simuleren. De structuur van openLISEM is zo dat deze processen gesimuleerd worden op basis van de hydrologische simulaties. Dit betekent dat de totale fout op de erosieprocessen het resultaat is van twee foutenbronnen: 1) de fout geassocieerd met het berekenen van de hydrologische processen en 2) de fout die ontstaat wanneer de erosieparameters worden berekend op basis van de hydrologische eigenschappen.



Figuur 2-8 Hydrograaf voor het evenement van 14/06/2006 zoals bepaald op basis van de gekalibreerde parameters voor de vijf overige evenementen.

Zelfs indien het mogelijk is om openLISEM succesvol te kalibreren voor een bepaald stroomgebied (wat zeker mogelijk is indien er voldoende inputdata voorhanden zijn), is er geen garantie dat de optimale parameters voor dit stroomgebied kunnen worden gebruikt om evenementen in andere bekkens te simuleren. Om dit na te gaan werden in voortgangsrapport 2 analyses uitgevoerd waarbij optimale parametersets, zoals bepaald in bekkens gelijkaardig aan dat van de Heulengracht, werden gebruikt om evenementen in de Heulengracht te simuleren. Deze resultaten zullen hier niet in detail besproken worden, maar concreet zijn de volgende parametersets gebruikt:

- Parameters zoals bepaald in Nederlands Limburg door het Waterschap Roer en Overmaas.
- Infiltratieparameters voor de Green and Ampt infiltratiemodule zoals bepaald door Van den Putte et al. (2013) op basis van veldmetingen uitgevoerd in de Vlaamse Leemstreek.

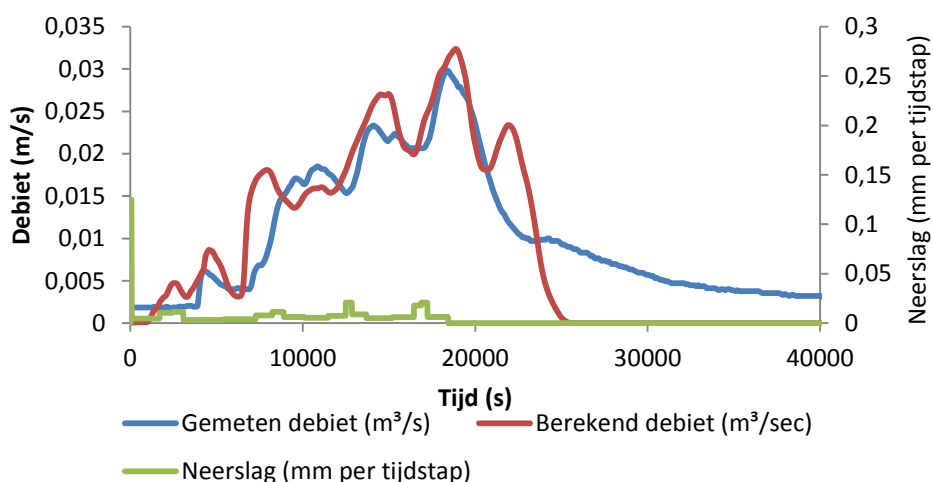
Deze parametersets leveren goede resultaten in de bekkens waarvoor ze zijn geoptimaliseerd. Zonder in detail te treden kan worden gesteld dat deze parametersets echter geen goede resultaten opleveren voor simulaties van neerslagevenementen in de Heulengracht. Dit wijst er sterk op dat optimale parametersets zoals bepaald voor de Heulengracht zeker niet zonder meer kunnen worden toegepast op andere bekkens in de Vlaamse leemstreek. De details omtrent deze analyses kunnen worden nagelezen in voortgangsrapport 2 (sectie 2.2.4).

Op basis van de uitgevoerde analyses kunnen verschillende conclusies omtrent de toepasbaarheid van openLISEM worden getrokken in het kader van dit project. Een eerste conclusie is dat het niet mogelijk is om alle benodigde input data te verzamelen op bekkenschaal, zelfs niet voor een bekken waar reeds veel data voor beschikbaar zijn, zoals de Heulengracht. Er is aangetoond dat het niet mogelijk is om parameterwaarden die werden bepaald voor een bekken zonder herkalibratie, toe te passen op een ander bekken. Ook parameterwaarden op basis van veldmetingen moeten worden herschaald vooraleer ze gebruikt kunnen worden voor simulaties. De winst die behaald wordt door veel processen in rekening te brengen en een model te gebruiken dat fysisch zo correct mogelijk is, wordt in vele gevallen teniet gedaan door onzekerheid en fouten geassocieerd met de inputdata (Van Rompaey & Govers, 2002). Op basis van de uitgevoerde simulaties kan worden besloten dat dit het geval is voor openLISEM.

2.3 Evaluatie Curve Number model

Voor een uitvoerige beschrijving van de originele CN methode wordt verwezen naar voortgangsrapport 2 (sectie 2.3.2). Verderop in dit rapport (sectie 3.2.1) wordt ook een beschrijving gegeven van het aangepaste CN model, gebruikt voor de hieronder weergegeven resultaten (zowel aanpassingen uitgevoerd door Van Oost (2003) als in het kader van dit project). In de huidige sectie wordt de toepassing van dit afstromingsmodel op de bekkens van Ganspoel en de Heulengracht kort besproken. Voor gedetailleerde resultaten wordt verwezen naar voortgangsrapport 2 (sectie 2.3.4). De data die werden gebruikt voor Ganspoel (114 ha) zijn afkomstig uit Van Oost (2003), de data voor de simulaties in de Heulengracht werden hierboven reeds besproken.

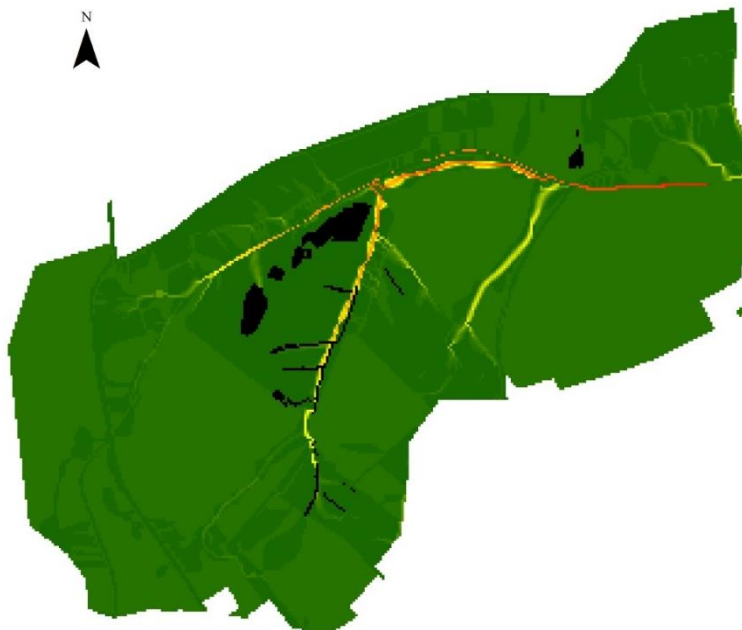
Op basis van de modelkalibratie werd een optimale ME (0,30; bekomen via vergelijking van gemeten en gesimuleerde totale afstromingsvolumes) gevonden bij een α -waarde van 0,8 en een β -waarde van 0,04. Deze lage ME zou onder meer te wijten kunnen zijn aan een beperkte variatie tussen de groottes van de gesimuleerde evenementen, aangezien de ME stijgt bij een stijging van deze factor. De voornaamste outputgegevens van het hydrologisch model in het kader van dit project zijn de gesimuleerde hydrogrammen. Door de beperkte tijd was het niet mogelijk een validatie uit te voeren van het CN model op basis van de dataset voor Ganspoel, waardoor de hydrogrammen die in deze sectie worden getoond zijn verkregen op basis van de kalibratiedataset. Een voorbeeld van zowel een gemeten als berekend hydrogram is weergegeven in *Figuur 2-9*. Voor andere voorbeelden van gesimuleerde hydrogrammen wordt verwezen naar voortgangsrapport 2.



Figuur 2-9 Neerslag, gemeten en gesimuleerd debiet voor het evenement van 07/01/1999 in Ganspoel. Het gesimuleerde debiet werd bekomen met de aangepaste versie van het CN model.

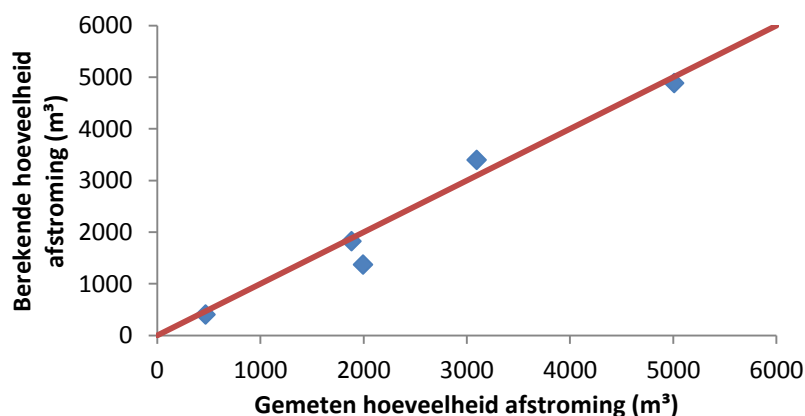
Buiten hydrogrammen is het aangepaste CN model ook in staat om een ruimtelijk verdeelde output te genereren, namelijk de totale hoeveelheid afstromend water per gridcel. Aan de hand hiervan kunnen de belangrijkste stroompaden van het water worden gelokaliseerd en kunnen de gebieden waar de meeste oppervlakkige afstroming wordt gegenereerd, worden geïdentificeerd. Deze output kan verder goed worden aangewend om het ruimtelijke effect van verschillende EBM te analyseren. Een voorbeeld van zo'n afstromingskaart is weergegeven in *Figuur 2-10*. Aan deze kaart zijn ook de locaties van opgemeten geulen toegevoegd, zoals opgemeten op het terrein na de storm (Van Oost et al., 2005). Het feit dat gemeten en berekende locaties van geconcentreerde afstroming niet perfect op elkaar liggen, is te wijten aan onnauwkeurigheden in het DTM en de mogelijkheid dat sommige kleine landschapselementen niet in rekening worden gebracht bij de routing van het water doorheen het bekken. Over het algemeen kan dus worden gesteld dat het model de ruimtelijke afstromingspatronen goed weergeeft voor dit bekken.

Afstromingspatroon voor Ganspoel (19/05/1997)



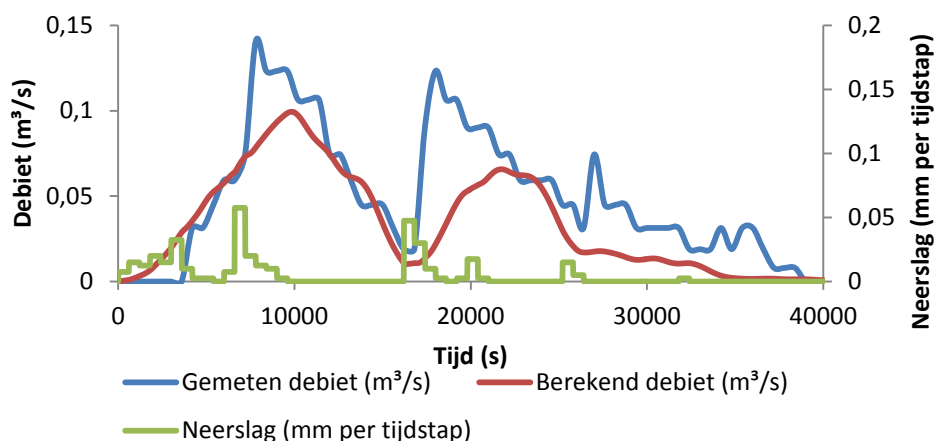
Figuur 2-10 Gesimuleerd afstromingspatroon voor het neerslagevenement van 19/05/1997 in Ganspoel (groen, geel, oranje, rood).. De zwarte pixels zijn opgemeten geultjes en ravijnen na het evenement.

Analoog aan de simulaties voor Ganspoel werd de aangepaste versie van het CN model ook toegepast op de Heulengracht. Na kalibratie bedragen de optimale α - en β -waarden respectievelijk 0,4 en 0,05 bij een ME van 0,95. Het feit dat de ME aanzienlijk hoger is dan bij de simulaties voor Ganspoel, kan onder meer te wijten zijn aan het feit dat de variatie van de verschillende gemeten afstromingshoeveelheden hier groter is. De totale hoeveelheden oppervlakkige afstroming voor de Heulengracht worden zeer goed voorspeld door het aangepaste CN model, zoals getoond in [Figuur 2-11](#).



Figuur 2-11 Gemeten en gesimuleerde hoeveelheid afstroming (m³) voor evenementen in de Heulengracht

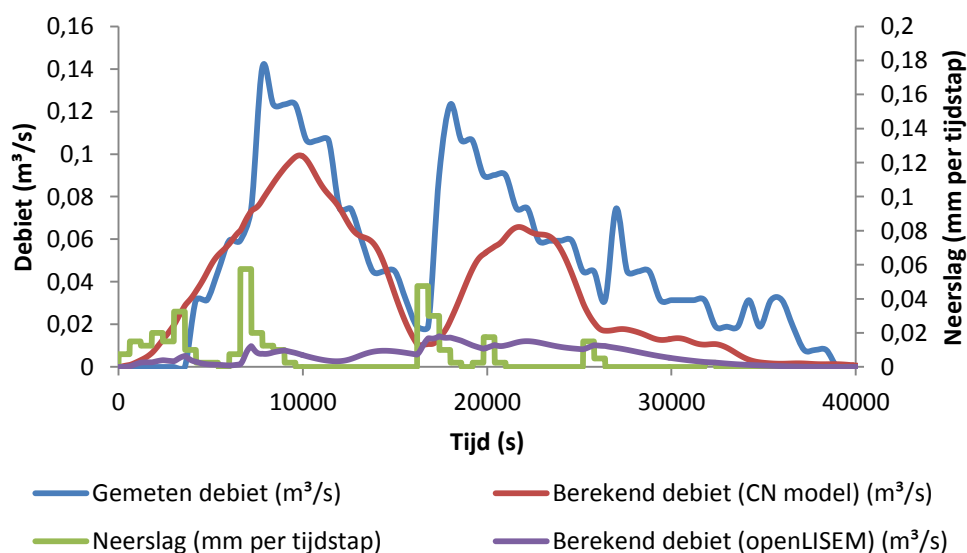
Daarnaast wordt ook de vorm van de gemeten hydrogrammen goed benaderd door het model, zoals weergegeven in [Figuur 2-12](#). Het dient nogmaals te worden benadrukt dat de resultaten die hier worden getoond komen uit de kalibratiedataset. Wanneer echter de optimale parameterwaarden voor α - en β werden bepaald op basis van vier andere evenementen, werden dezelfde waarden bekomen, waardoor het berekende hydrogram dus hetzelfde zal zijn.



Figuur 2-12 Neerslag, gemeten en gesimuleerd debiet voor het evenement van 29/05/2006 in de Heulengracht. Het gesimuleerde debiet werd bekomen met de aangepaste versie van het CN model.

2.4 Vergelijking modellen

Om een directe vergelijking tussen de gesimuleerde hydrogrammen door openLISEM en het CN model te maken, wordt het hydrogram uit bovenstaande figuur opnieuw getoond samen met het hydrogram voor dit evenement zoals gesimuleerd door openLISEM (*Figuur 2-13*). De hoeveelheid afstroming wordt sterk onderschat door openLISEM en ook de vorm van het hydrogram benadert deze van het gemeten hydrogram niet. In vergelijking met de simulatie van andere evenementen met de twee modellen is dit zeker geen uitzondering, hoewel niet alle simulaties met openLISEM even problematisch zijn. Desalniettemin is dit een voorbeeld van de robuustheid van een model met een klein aantal vrije parameters, zoals het CN model, ten opzichte van een model met een groot aantal vrije parameters en andere inputparameters, zoals openLISEM.



Figuur 2-13 Neerslag, gemeten en gesimuleerd debiet met zowel het aangepaste CN model als openLISEM voor het evenement van 29/05/2006 in de Heulengracht.

Op basis van deze vergelijking werd gekozen om in het vervolg van het project verder te werken met het CN model, in combinatie met WaTEM/SEDEM. De motivering voor deze keuze is dat het CN model minder input data vereist, minder vrije modelparameters heeft en het in de wetenschappelijke literatuur reeds vaak is aangetoond dat empirische modellen vaak even goed en zelfs beter presteren dan complexe proces-gebaseerde modellen, juist omwille van het feit dat voor deze laatste soort modellen vaak niet voldoende inputdata voorhanden zijn. Hoewel weinig input

data zijn vereist, worden toch de belangrijkste factoren die het afstromingsproces beïnvloeden in rekening gebracht door het CN model (bedekkingsgraad en verslemping van de bodem, intensiteit en duur van de neerslagbui, antecedente neerslag). De aangepaste versie van het CN model, zoals hier geëvalueerd, biedt daarom een goede basis voor het simuleren van oppervlakkige afstroming in grote bekkens. Daarbovenop voldoet dit model aan de noden van dit project. De voornaamste doelen omvatten immers dat de effecten van EBM kunnen worden geëvalueerd en dat de hoeveelheden water en sediment die de waterloop bereiken tijdens en vlak na een regenbui, kunnen worden gesimuleerd. Om dit te doen is het niet noodzakelijk om te weten wat er exact met elke fractie neerslag gebeurt, maar wel om de belangrijkste processen op een correcte manier te vatten in het model.

In bovenstaande vergelijkende analyse werd enkel gekeken naar de simulatie van afstroming. Het betrouwbaar simuleren van oppervlakkige afstroming is immers een voorwaarde voor het correct berekenen van ruimtelijk verdeelde erosie- en sedimentatieprocessen. Vanwege de tegenvallende prestaties van openLISEM op het vlak van afstroming, leek het ons daarom niet opportuun om dit model verder te evalueren naar erosie en sedimentatie. De toepasbaarheid en performantie van WaTEM/SEDEM voor de simulatie van erosie en depositie is bovendien reeds vaak aangetoond (vb. Verstraeten, 2006; Verstraeten et al., 2006a) en behoeft hier verder geen betoog.

3 Beschrijving sedimentexportmodel

3.1 Inleiding

Op basis van de modevaluatie werd besloten om voor de simulatie van sedimentexport naar de onbevaarbare waterlopen twee reeds bestaande modellen aan te passen en te combineren, namelijk een temporeel en ruimtelijk verdeelde versie van het Curve Number (CN) model en het WaTEM/SEDEM (WS) model. Dit betekent dat beide modellen worden aangestuurd vanuit eenzelfde Windows interface en gelijktijdig worden uitgevoerd voor hetzelfde gebied om tot het gewenste resultaat te komen. Het finale sedimentexportmodel wordt in wat volgt aangeduid als het CN_WS model. In het algemeen worden in het CN_WS model volgende stappen doorlopen voor de simulatie van sedimentexport als gevolg van een regenbui:

- De CN methode wordt gebruikt om de afstroming in functie van tijd en ruimte te simuleren. Voor elke gedefinieerde uitlaat van het stroomgebied (en voor elk riviersegment indien gewenst) wordt een hydrogram (stroomsnelheid in functie van de tijd) gegenereerd. Bovendien wordt de totale afstroming per pixel op kaart weergegeven;
- Het WS model wordt gebruikt om de totale sedimentvracht te begroten die toekomt aan elke uitlaat van het stroomgebied (en in elk riviersegment indien gewenst) als gevolg van de gehele regenbui. Dit model is niet tijdsafhankelijk, maar wel ruimtelijk verdeeld. Zowel het potentiële bodemverlies, de effectieve hoeveelheid erosie/sedimentatie als de sedimentexport naar waterlopen worden per pixel op kaart weergegeven;
- De output van beide submodellen wordt gecombineerd: de totale sedimentvracht aan elke uitlaat (en per riviersegment indien gewenst) wordt verdeeld over de overeenkomstige hydrogrammen om tot een sedigram (sedimentconcentratie en sedimentvracht in functie van de tijd) te komen voor elke uitlaat (en voor elk riviersegment) in het stroomgebied.

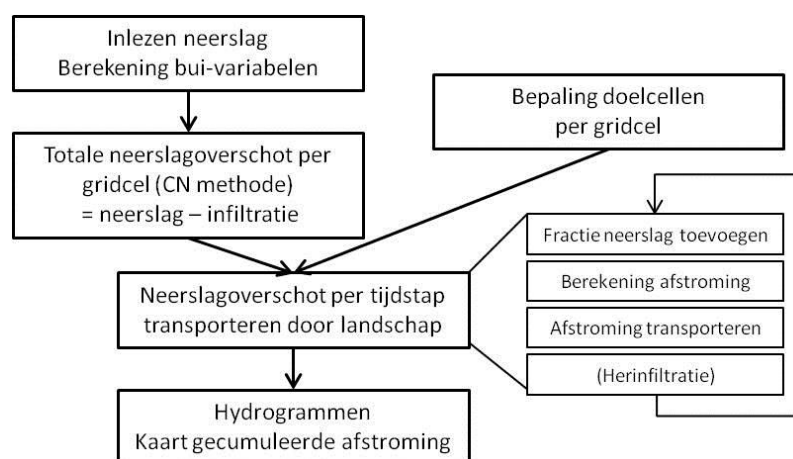
De details van het CN_WS model worden verder besproken in §3.2 t.e.m.3.2. Naast dit model, waarin één regenbui wordt gesimuleerd, werd ook een modelversie ontwikkeld die dezelfde berekeningen kan uitvoeren voor een langere periode (tot maximaal één jaar). De details hiervan worden verder besproken in §-o. Van beide modelversies werd bovendien een vereenvoudigde versie ontwikkeld waarin enkel de totale sedimentvracht aan elke uitlaat wordt berekend zonder tijdsafhankelijke afstromingsberekeningen (enkel stap 2 in bovenstaand overzicht). Deze eenvoudige versie kan typisch worden gebruikt voor de simulatie van grote gebieden (1^e categorie waterlopen, hydrografische bekkens). Voor meer details wordt verwezen naar §3.6.

Alle hogervermelde modelversies van het CN_WS model zijn geschreven in FreePascal met behulp van het opensource softwarepakket Lazarus. Voor de ruimtelijke weergave van data (input en output) wordt gewerkt met rasters van het IDRISI formaat (.rst) met bijbehorend metadata bestand (.RDC). Deze rasters kunnen zowel via IDRISI als via QGIS worden aangemaakt en worden gelezen via IDRISI, QGIS en ArcGIS. Het model is ontworpen en gekalibreerd voor een ruimtelijke resolutie van 20x20 m² en wordt daarom best ook op deze resolutie toegepast. Het is immers niet gegarandeerd dat de empirische relaties voor een resolutie van 20 m ook gelden voor een resolutie van 5 m. De ontwikkeling van een model dat toepasbaar is op 5 m resolutie data zou een volledig nieuwe kalibratie van het WS model vereisen, hetgeen buiten de mogelijkheden van dit project viel.

3.2 Detail methode basismodel

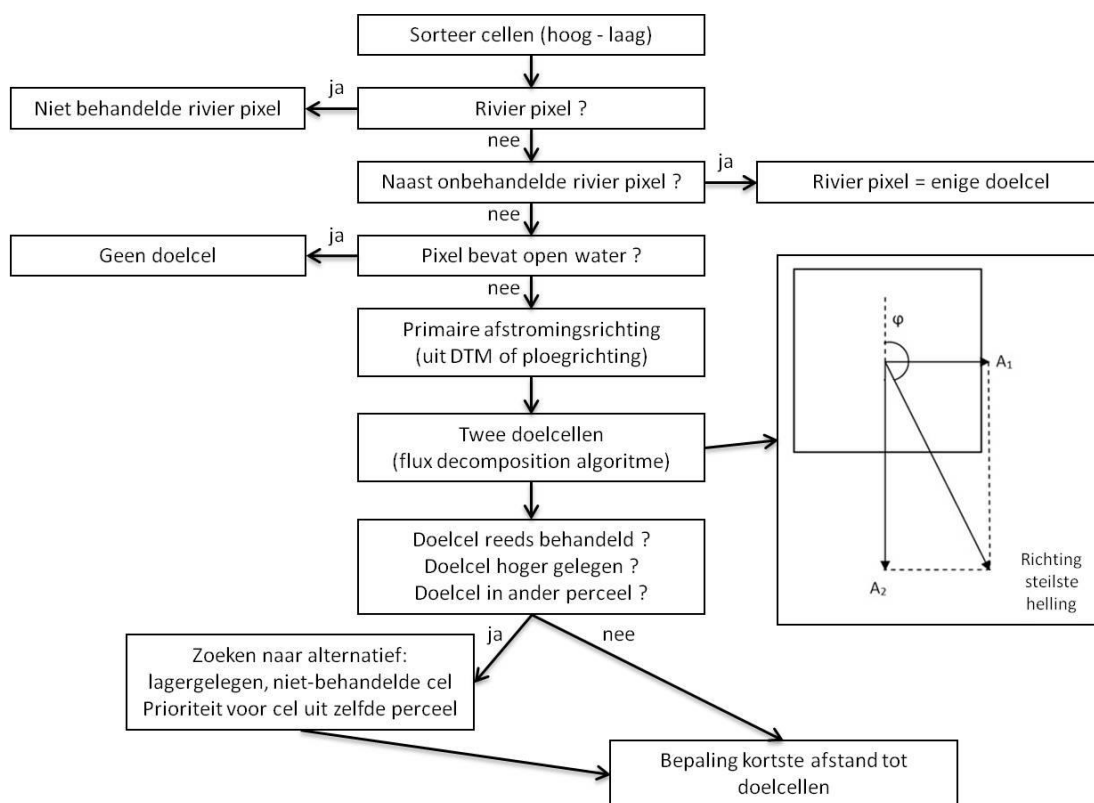
3.2.1 Afstroming: aangepaste Curve Number methode

Voor een algemene beschrijving van de oorspronkelijke Curve Number methoden wordt verwezen naar Voortgangsrapport 2. In het CN_WS model wordt gebruik gemaakt van de ruimtelijk verdeelde en tijdsafhankelijke versie van de CN methode (Van Oost, 2003), die toelaat om hydrogrammen te genereren en een ruimtelijk beeld te krijgen van de afstromingspatronen in een stroomgebied. Dit model werd op zijn beurt verder aangepast om expliciet rekening te houden met verscheidene EBM en rioleringen. De algemene *workflow* van dit model is weergegeven in *Figuur 3-1*, waarvan de verschillende stappen hieronder worden verklaard. Voor meer informatie omtrent de ingebrachte uitzonderingen wordt verwezen naar §3.2.5.



Figuur 3-1 Schema van algemene workflow in tijdsafhankelijke en ruimtelijk expliciete Curve Number model.

- De neerslaggegevens worden ingelezen en indien nodig geïnterpoleerd naar de tijdstap waarin de berekeningen zullen uitgevoerd worden. Vervolgens wordt uit deze data de totale hoeveelheid neerslag, de duur van de bui en I10 berekend. Deze laatste variabele staat voor de maximale neerslagintensiteit gedurende 10 minuten en wordt gebruikt bij de bepaling van de hoeveelheid afstroming per gridcel (zie verder). Voor de berekening wordt de neerslagreeks omgezet naar een temporele resolutie van 1 minuut, waarna voor elke minuut de neerslagintensiteit voor de volgende 10 minuten wordt berekend en de maximale waarde wordt geselecteerd. Tot slot wordt voor elke tijdstap de fractie van de neerslag ten opzichte van de totale neerslag bepaald;
- Per gridcel worden maximaal twee doelcellen vastgelegd, i.e. de cellen waarnaar het overtollige water zal afstromen. De bepaling van de doelcellen wordt schematisch voorgesteld in *Figuur 3-2* en hieronder verder verklaard.



Figuur 3-2 Schema van bepaling doelcellen in aangepaste Curve Number model.

- Alle gridcellen worden gesorteerd volgens hun hoogte en worden doorlopen van hoog naar laag, dit om te verhinderen dat water wordt overgebracht naar een cel die reeds behandeld werd door het algoritme;
- Indien de gridcel in kwestie een rivierpixel is, kan het overtollige water enkel afstromen naar een nabijgelegen rivierpixel. In eerste instantie wordt onder de buurcellen gezocht naar lager gelegen rivierpixels die nog niet werden behandeld door het algoritme. Indien meer dan één cel aan deze criteria voldoen, wordt de hoogste van de lager gelegen riviercellen geselecteerd. Wanneer geen cellen werden gevonden, wordt de zoekradius systematisch vergroot totdat een onbehandelde rivierpixel wordt gevonden;
- Indien de gridcel in kwestie naast een lager gelegen rivierpixel is gelegen, wordt deze riviercel als enige doelcel geselecteerd;
- In het geval dat de broncel open water bevat (vb. vijver, met uitzondering van een rivier), worden alle fluxen vanuit deze cel gelijkgesteld aan nul (al het water/sediment dat hier toekomt, blijft in deze cel);
- In de overige gevallen worden de doelcellen als volgt geselecteerd:
 - De primaire afstromingsrichting voor de pixel wordt bepaald aan de hand van de hellingsrichting, op zijn beurt berekend uit het DTM, of wordt (indien door de gebruiker gewenst) bepaald in functie van de ploegrichting met behulp van het *Tillage Controlled Runoff Pattern* model van Takken et al. (2001). Dit laatste model berekent de kans dat afstroming zal verlopen volgens de richting van de helling aan de hand van onderstaande formules. Indien deze kans kleiner is dan 0,5 wordt de afstroming bepaald door de ploegrichting.

$$\text{logit}(p) = -5,92 + 0,133 * s + 0,102 * \alpha - 0,417R_0$$

$$p = \frac{e^{\text{logit}(p)}}{1 + e^{\text{logit}(p)}}$$

Met p = de kans dat afstroming in de richting van de helling zal plaatsvinden, S = hellingsgraad (%), α = de hoek tussen de hellingsrichting en ploegrichting (in graden) en R_0 = de georiënteerde ruwheid (=hoogte van microreliëf in cm).

- Het *flux decomposition* algoritme (zie [Figuur 3-2](#); Desmet & Govers, 1996) wordt gebruikt om twee kardinale doelcellen (buurcellen met uitzondering van de diagonale) te identificeren op basis van de primaire afstromingsrichting. Dit algoritme bepaalt tevens de fracties water die deze doelcellen ontvangen (voorgesteld door de lengte van vectoren A1 en A2 in [Figuur 3-2](#) **Fout! Verwijzingsbron niet gevonden.**);
 - Er wordt nagegaan of de geselecteerde doelcellen reeds zijn behandeld door het algoritme en of deze hoger of op gelijke hoogte zijn gelegen dan de broncel. Indien voor een doelcel aan één van deze voorwaarden wordt voldaan, wordt deze vervangen door een andere cel in een volgende stap;
 - Indien een doelcel tot een ander perceel behoort in vergelijking met de broncel, wordt eerst nagegaan of er nog een lager gelegen, niet behandelde buurcel bestaat binnen hetzelfde perceel als de broncel. Zo ja, wordt deze cel geselecteerd. Hiermee wordt rekening gehouden met de preferentiële afstroming van water langsheen perceelsgrenzen. De overgang tussen twee percelen vormt immers vaak een obstakel voor het afstromende water en sediment. Indien toch een perceelsgrens wordt overschreden, hetgeen slechts zal gebeuren op het laagste punt van een perceel, wordt de flux naar deze cel vermenigvuldigd met de perceelsconnectiviteit. In het algoritme wordt hier een uitzondering gemaakt voor grasbufferstroken, grasgangen en graszones: de perceelsgrens met deze constructies wordt zo snel mogelijk overschreden door het afstromende water, aangezien deze maatregelen in werkelijkheid ook zodanig worden ingepland dat water en sediment preferentieel over, en niet naast, deze zones zal stromen;
 - Indien in de voorgaande stappen geen doelcel werd gevonden, wordt de zoekradius systematisch verder uitgebreid tot een geschikte cel wordt gevonden (i.e. een lager gelegen, niet behandelde cel). Ook hier wordt rekening gehouden met de perceelsconnectiviteit indien nodig.
- Na de selectie van de doelcellen wordt de afstand van de broncel tot het middelpunt van elk van deze cellen berekend aan de hand van de ruimtelijke resolutie.

Voor kardinale cellen:

$$x = res * N$$

Voor diagonale cellen:

$$x = \sqrt{(res * N_x)^2 + (res * N_y)^2}$$

Met x = afstand van broncel tot doelcel (m); res = ruimtelijke resolutie (m); N , N_x en N_y = het aantal cellen dat de doelcel verwijderd is van de broncel in de kardinale, horizontale en verticale richting.

- Het totale neerslagoverschot (= neerslag - infiltratie) ten gevolge van de volledige regenbui wordt berekend voor elke gridcel met behulp van de CN methode. Volgens de originele CN methode, wordt de hoeveelheid afstroming berekend met volgende formule:

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

Met R^* = de totale hoeveelheid afstroming (mm), P = de totale hoeveelheid neerslag (mm), I_a = de initiële abstractie en S = de potentiële bergingscapaciteit van de bodem. Hierbij staat de initiële abstractie voor de hoeveelheid neerslag die moet vallen alvorens er afstroming kan plaatsvinden (vb. opslag in oppervlakkige plassen, opvang door vegetatie). Deze wordt berekend als fractie van S :

$$I_a = \lambda * S$$

λ wordt traditioneel gelijkgesteld met 0,2 ondanks vele kritieken (vb. Ponce & Hawkins, 1996). Omwille van praktische redenen werd geopteerd om in de plaats van S (die in principe kan variëren van 0 tot oneindig) te werken met de curve number (CN), een getal dat varieert van 0 tot 100:

$$S = \frac{25400}{CN} - 254$$

Voor deze CN waarde bestaan talrijke opzoektabelen in functie van landgebruik, bodemtype en hydrologische toestand van de bodem (NRCS, 2010). Eén van de mogelijke kritieken op deze CN methode is dat er per combinatie van landgebruik en bodemtype slechts één CN waarde voorhanden is en dat er m.a.w. geen rekening kan worden gehouden met variabele bodemeigenschappen tussen verschillende neerslagevenementen. Van Oost (2003) loste dit probleem op door het CN getal afhankelijk te maken van de bodembedekkingsgraad en de verslempingsgraad van de bodem:

$$CN = CN_{max} - \left(\left(\frac{Cc}{100} \right) * c_1 \right) + \left(\left(\frac{Cr}{5} \right) * c_2 \right)$$

Waarbij CN = de gecorrigeerde CN waarde, CN_{max} = de CN waarde zoals bepaald uit de standaardtabellen, Cc = bodembedekkingsgraad (%), Cr = de verslempingsgraad (een getal variërend van 0 tot 5, volgens de classificatie van Govers (1986)), c_1 en c_2 coëfficiënten. Voor c_2 wordt een constante waarde van 3 aangenomen. c_1 wordt zodanig bepaald dat de berekende CN waarde gelijk is aan de minimale CN waarde bij een bedekkingsgraad van 100%. Deze minimale waarde (CN_{min}) wordt bepaald aan de hand van volgende formule (Hawkins et al., 1985):

$$CN_{min} = \frac{CN_{max}}{2,281 - 0,01281 * CN_{max}}$$

Een andere correctie ingevoerd door Van Oost (2003) houdt in dat bij de berekening van de effectieve afstroming ook rekening wordt gehouden met de hoeveelheid neerslag gevallen in een 5-daagse periode vóór het eigenlijke evenement (AR_5 , in mm) en met de maximale 10-minuten neerslagintensiteit (I_{10} , in $mm\ h^{-1}$):

$$R = (R^* * \left(\frac{I_{10}}{10}\right)^\alpha) + (AR5 * \beta)$$

Hierbij zijn α en β kalibratieparameters. Bovenstaande formule geldt enkel wanneer de neerslag (P) groter is dan de initiële abstractie (I_a). Indien niet aan deze voorwaarde is voldaan, vindt infiltratie plaats, hetgeen berekend wordt aan de hand van de duur van de bui (D , in minuten):

$$I_{pot} = (P - I_a) * \left(\frac{D}{1440}\right)$$

I_{pot} komt overeen met de totale hoeveelheid water (niet afkomstig van neerslag) die nog kan infiltreren en wordt in de volgende stap gebruikt bij de berekening van herinfiltratie. Voor een rivierpixel wordt tot slot aangenomen dat geen infiltratie plaatsvindt en bijgevolg alle neerslag bijdraagt aan afstroming.

- De overtollige neerslag die niet meteen kan infiltreren (= som van de positieve neerslagoverschotten over het gehele grid), wordt vervolgens per tijdstap doorheen het landschap getransporteerd. Aan elke cel wordt per tijdstap een fractie van het totale neerslagoverschot voor die cel toegevoegd. Deze fractie varieert per tijdstap en is afhankelijk van de neerslagverdeling doorheen de tijd (bepaald in stap 1). Deze hoeveelheid water wordt bij de reeds overtollige hoeveelheid water in de cel geteld (= overtollig water dat niet getransporteerd kon worden tijdens vorige tijdstappen). Dan wordt bepaald hoeveel van het totaal beschikbare water in deze cel (R_{tot}) kan afstromen naar zijn doelcellen gedurende één tijdstap:

$$R(t) = R_{tot} * \left(\frac{v * \Delta t}{x}\right)$$

Met $R(t)$ = afstroming naar doelcel in 1 tijdstap (m^3); R_{tot} = totale hoeveelheid beschikbaar water voor afstroming naar doelcel (m^3); v = snelheid afstroming ($m s^{-1}$); Δt = lengte tijdstap (s) en x = afstand tussen bron- en doelcel (m).

Deze hoeveelheid water wordt afgetrokken van de beschikbare hoeveelheid water in de broncel. Nadat voor alle gridcellen deze effectieve afstroming is bepaald, wordt deze bijgeteld bij de totale hoeveelheid water beschikbaar in de doelcellen (aangezien een cel water kan ontvangen van meerdere broncellen). Indien de infiltratiecapaciteit van de doelcel nog niet is bereikt, zal het water eerst infiltreren. Het water dat overblijft na infiltratie zal in een volgende tijdstap aanleiding kunnen geven tot afstroming vanuit deze cel.

- Wanneer een uitlaat wordt bereikt, wordt de afstroming naar deze cel in een aparte variabele opgeslagen. Na afloop van de berekeningen wordt hieruit het afstromingsdebiet in functie van de tijd bepaald (= hydrogram). Indien door de gebruiker gewenst, wordt deze hydrogram omgezet naar een zelf gekozen tijdstap. Tijdens bovenstaande procedure wordt bovendien per tijdstap voor elk van de riviersegmenten bijgehouden hoeveel water hierin terechtkomt via neerslag en vanaf het omringende land. Op basis van deze gegevens wordt op het einde van de procedure het instromingsdebiet in functie van de tijd berekend voor elk segment. Tot slot wordt voor elke tijdstap de cumulatieve afstroming per pixel berekend (= afstroming uit vorige tijdstappen + input door neerslag + input via afstroming vanuit hoger gelegen cellen). Deze raster wordt, samen met de totale afstroming per uitlaat, na het doorlopen van alle tijdstappen als output weggeschreven.

3.2.2 Erosie en sedimentatie: WaTEM/SEDEM

In het CN_WS model wordt gebruik gemaakt van een aangepaste versie van het WaTEM/SEDEM model voor de berekening van de totale hoeveelheid watererosie, bewerkingserosie, sedimentdepositie en sedimentexport ten gevolge van het volledige neerslagevenement. Voor een beschrijving van het oorspronkelijke model wordt verwezen naar voortgangsverslag 1.

De hoeveelheid watererosie ten gevolge van een regenbui wordt per gridcel berekend aan de hand van de aangepaste versie van de RUSLE (Revised Universal Soil Loss Equation) vergelijking (Renard et al., 1997):

$$RUSLE = R * K * LS * C * P$$

Met RUSLE = bodemverlies door geul- en intergeulerosie (kg m^{-2}), R = regenvalerosiviteitsfactor ($\text{MJ mm m}^{-2} \text{ h}^{-1}$), K = bodemerosiviteitsfactor ($\text{kg h MJ}^{-1} \text{ mm}^{-1}$), LS = topografische hellings- en lengtefactor (-), C = gewas- en bedrijfsvoeringsfactor (-) en P = erosiebeheersingsfactor (-).

De K factor, C factor en P factor dienen elk te worden ingegeven door de gebruiker in de vorm van een raster dataset. De R factor wordt, in tegenstelling tot de oorspronkelijke versie van het WS model, door het model berekend aan de hand van de neerslaggegevens volgens de methode beschreven in Verstraeten et al. (2006b):

- De neerslagserie wordt geconverteerd naar een temporele resolutie van 10 minuten door inter- of extrapolatie;
- Per tijdstap wordt de kinetische energie van de neerslag berekend:

$$e_r = \frac{KE}{i_r} = 11,12 * i_r^{0,31}$$

Met e_r = energie neerslag voor tijdstap r ($\text{J m}^{-2} \text{ mm}^{-1}$), KE = kinetische energie ($\text{J m}^{-2} \text{ h}^{-1}$), i_r de regenintensiteit in tijdstap r (mm h^{-1});

- De totale kinetische energie voor het gehele neerslagevenement wordt bepaald via een lineaire combinatie van de hoeveelheid neerslag met de neerslagenergie per tijdstap:

$$E = \sum_{r=1}^o e_r * \Delta V_r$$

Met E = de totale energie voor de volledige regenbui (J m^{-2}), o = het aantal tijdstappen voor het evenement en ΔV_r de hoeveelheid neerslag in tijdstap r (mm);

- De R factor wordt berekend in functie van de totale kinetische energie en de neerslagintensiteit:

$$R = \frac{E * I_{30}}{10^{-6}}$$

Met I_{30} de maximale regenintensiteit binnen een periode van 30 min in mm h^{-1} .

De LS factor, die staat voor het gecombineerde effect van hellingsgraad (S) en –lengte (L) wordt voor elke gridcel berekend aan de hand van volgende formules:

$$LS = L * S$$

$$S = -1,5 + \frac{17}{1+2,718281828^{2,3-(6,1*\sin(Sl))}} \quad (\text{Nearing, 1997})$$

$$L = \frac{(A+res^2)^{exp+1}-A^{exp+1}}{X^{exp}*res^{exp+2}*22,13^{exp}} \quad (\text{Desmet \& Govers, 1996})$$

$$X = \text{abs}(\cos(asp)) + \text{abs}(\sin(asp))$$

Met Sl = hellingsgraad (radialen), asp = hellingsrichting (radialen), res = ruimtelijke resolutie (m), A = de *upstream area*, ofwel de totale grondoppervlakte die potentieel bijdraagt aan de sedimentflux in een bepaalde gridcel, en exp = de lengte-exponent.

Voor de berekening van de *upstream area* worden alle gridcellen systematisch doorlopen van hoog naar laag en wordt telkens een deel van de grondoppervlakte (bepaald door de ruimtelijke resolutie) doorgegeven aan één of twee doelcellen. De fractie van de oppervlakte die wordt doorgegeven wordt bepaald door de parcel trapping efficiency van de broncel en de perceelconnectiviteit tussen bron- en doelcel. De doelcellen voor elke gridcel zijn dezelfde zoals bepaald in de afstromingsmodule van het model (zie [Figuur 3-2](#)).

Voor de berekening van de lengte-exponent van de LS factor (exp) werd hier gekozen voor de aangepaste formulering van Van Oost (2003) om een overschatting van de sedimentatie in de droge valleien te voorkomen, naar aanbeveling van Petrlc (2013):

$$exp = 0,3 + \left(\frac{A}{A_{ref}}\right)^c \quad \text{voor } A < A_{ref}$$

$$exp = 0,72 \quad \text{voor } A \geq A_{ref} \quad (\text{Van Oost, 2003})$$

Met $A_{ref} = 10.000$ ha

Deze lengte-exponent werd in de oorspronkelijke versie van het WS model enkel berekend in functie van de hellingsgraad, met een lage waarde voor de LS factor beneden aan de helling en dus veel sedimentatie op deze plaats tot gevolg:

$$exp = \frac{B}{B + 1}$$

$$B = \frac{\frac{\sin(Sl)}{0,0896}}{(3 * \sin(Sl)^{0,8}) + 0,56}$$

Volgens de nieuwe methode is de lengte-exponent echter geen functie van de hellingsgraad, maar van de grootte van het toestroomgebied (*upstream area*, A). Deze aanpassing zorgt ervoor dat sediment niet langer vast komt te zitten onderaan de helling, maar sneller doorheen een vallei zal getransporteerd worden. Na enkele tests met beide berekeningswijzen bleek dat de methode van Van Oost (2003) de modelperformantie met betrekking tot voorspelling van totale sedimentoutput van een stroomgebied gevoelig verhoogde ten opzichte van de oorspronkelijke methode ([Tabel 3-1](#)).

Tabel 3-1 Verhouding model/meting van totale sedimentoutput voor een aantal evenementen en stroomgebieden uit het Demerbekken. "Oude versie" staat voor de modelversie van WaTEM/SEDEM waarbij de lengte-exponent werd berekend in functie van de hellingsgraad. "Nieuwe versie" staat voor de nieuwe modelversie waarin de lengte-exponent wordt berekend in functie van de toestroomoppervlakte. Opmerking: dit zijn niet de meest recente resultaten (zie hiervoor Tabel 4-4 in §4.3)

Bekken	Seizoen	Evenement	Oude versie	Nieuwe versie
Velm	Winter	01/02/2008	0,61	1,07
Velm	Winter	06/02/2008	1,40	2,47
Velm	Zomer	04/06/2008	0,35	0,63
Velm	Zomer	28/07/2008	0,81	1,32
			0,62	1,05
Wellen	Winter	01/02/2008	0,22	0,33
Wellen	Winter	06/02/2008	0,75	1,15
Wellen	Zomer	04/06/2008	0,24	0,38
Wellen	Zomer	28/07/2008	1,84	2,90
			0,66	1,04
Borlo	Winter	01/02/2008	0,48	0,99
Borlo	Winter	06/02/2008	0,93	1,90
Borlo	Zomer	04/06/2008	0,35	0,67
Borlo	Zomer	28/07/2008	0,58	1,24
			0,50	1,04
Kerniel	Winter	01/02/2008	0,06	0,07
Kerniel	Winter	06/02/2008	0,30	0,36
Kerniel	Zomer	04/06/2008	0,06	0,07
Kerniel	Zomer	28/07/2008	0,16	0,22
			0,11	0,15
Muizen	Winter	01/02/2008	0,19	0,36
Muizen	Winter	06/02/2008	0,26	0,48
Muizen	Zomer	04/06/2008	0,59	1,14
			0,40	0,77
Mielen	Winter	01/02/2008	0,05	0,09
Mielen	Winter	06/02/2008	0,08	0,14
Mielen	Zomer	04/06/2008	0,09	0,18
Mielen	Zomer	28/07/2008	2,72	5,59
			0,21	0,42
Neerwinden	Winter	01/02/2008	4,13	8,99
Neerwinden	Winter	06/02/2008	1,84	4,01
Neerwinden	Zomer	04/06/2008	0,38	0,77
Neerwinden	Zomer	28/07/2008	72,41	150,15
			1,31	2,72
Heks	Zomer	04/06/2008	0,16	0,26
Heks	Zomer	28/07/2008	0,16	0,25
			0,18	0,25
Piringen	Winter	01/02/2008	0,03	0,04
Piringen	Winter	06/02/2008	0,29	0,38
Piringen	Zomer	04/06/2008	5,28	7,04
Piringen	Zomer	28/07/2008	0,23	0,29
			0,25	0,32
Totaal			0,49	0,80

Voor de eigenlijke berekening van watererosie, sedimentatie en sedimentexport, worden volgende stappen door het model doorlopen:

- Alle gridcellen worden doorlopen van hoog naar laag;
- De RUSLE vergelijking wordt toegepast: dit resulteert in een waarde voor het potentiële bodemverlies in kg m^{-2} ;

- De transportcapaciteit, i.e. de maximale hoeveelheid sediment die door een gridcel kan worden getransporteerd, wordt berekend. Deze variabele is recht evenredig met de potentiële hoeveelheid watererosie:

$$Tc = kTc * RUSLE * c$$

Met Tc = transportcapaciteit (kg), kTc = transportcoëfficiënt (m), $RUSLE$ = potentiële bodemverlies zoals bepaald in vorige stap ($kg\ m^{-2}$) en c = correctiefactor (m) voor omzetting naar dimensie van een gridcel:

$$c = (res * |\sin(asp)|) + (res * |\cos(asp)|)$$

Met res = ruimtelijke resolutie in m en asp de hellingsrichting in radialen.

De waarde voor kTc dient door de gebruiker voor elke gridcel te worden ingegeven in de vorm van een raster dataset (alternatief = automatische aanmaak van deze kaart obv standaardwaarden, zie §3.3);

- Het berekende potentiële bodemverlies wordt omgezet van $kg\ m^{-2}$ naar m^3 door te vermenigvuldigen met de oppervlakte van de gridcel en te delen door de bulkdensiteit van de bodem;
- Ook de transportcapaciteit wordt omgezet naar m^3 door te delen door de bulkdensiteit van de bodem;
- De gegenereerde hoeveelheid sediment in de gridcel wordt, samen met de hoeveelheid sediment afkomstig van hoger gelegen cellen, getransporteerd doorheen het landschap. Hier zijn twee opties mogelijk:
 - o Indien de totale hoeveelheid sediment groter is dan de transportcapaciteit, wordt slechts een deel (= de transportcapaciteit) van het inkomende sediment getransporteerd naar de doelcellen. Het teveel aan inkomend sediment zal in dit geval sedimenteren in deze gridcel en er zal verder geen bijkomende erosie optreden;
 - o Indien daarentegen de transportcapaciteit groter is dan de totale hoeveelheid sediment in de gridcel, wordt al het inkomende sediment samen met al het gegenereerde sediment doorgegeven aan de volgende cellen. In dit geval is de netto watererosie in deze cel dus gelijk aan de potentiële hoeveelheid bodemverlies zoals bepaald in een eerdere stap;
- Per gridcel wordt de hoeveelheid sedimentatie (geval 1) en erosie (geval 2) bijgehouden in een raster dataset, dewelke aan het einde van de berekeningen weggeschreven wordt. Het transport van sediment doorheen het landschap gebeurt aan de hand van dezelfde algemene principes zoals beschreven voor afstroming (*Figuur 3-2*). In tegenstelling tot het transport van water, wordt het transport van sediment enkel gemodelleerd over land en niet doorheen de rivier;
- Wanneer een export cel, i.e. een rivierpixel, een pixel met een andere vorm van open water of een pixel gelegen buiten het studiegebied, wordt bereikt, wordt de inkomende hoeveelheid sediment in deze pixel weggeschreven in de variabele sediment export. Deze variabele wordt op het einde van de procedure weggeschreven als Idrisi raster;
- Voor elke uitlaat wordt de totale inkomende sedimentvracht bepaald. Voor een uitlaat gelegen in een rivier wordt deze berekend als de som van al het sediment dat in alle hoger gelegen rivierpixels stroomt;

- Ten slotte wordt ook voor elk riviersegment de som berekend van al het instromende sediment.

Naast de berekening van geul- en intergeulerosie ten gevolge van een neerslagevenement, wordt WaTEM/SEDEM ook gebruikt voor een inschatting van de jaarlijkse bewerkingserosie. Dit gebeurt aan de hand van de algoritmes vermeld in Van Oost et al. (2000). Bewerkingserosie wordt in het algemeen bepaald door de verandering in hellingsgraad, eerder dan door de hellingsgraad zelf. Hierdoor ontstaat een typisch patroon van erosie op convexiteiten en depositie in concaviteiten in het landschap. De bewerkingserosie wordt concreet berekend met volgende formules:

$$A_{\text{til}} = \frac{k_{\text{til}} * \sin(SI) * \text{res} * X}{BD}$$

$$X = \text{abs}(\cos(\text{asp})) + \text{abs}(\sin(\text{asp}))$$

Hierin zijn A_{til} = bewerkingserosie ($\text{m}^3 \text{ jaar}^{-1}$), k_{til} = transportcoëfficiënt voor bewerkingserosie ($\text{kg m}^{-1} \text{ jaar}^{-1}$), SI = de hellingsgraad (radialen), res = de ruimtelijke resolutie (m), BD = bulkdensiteit van de bodem (kg m^{-3}) en asp = hellingsrichting (radialen).

Het gegenereerde sediment wordt doorheen het perceel getransporteerd via een vereenvoudigde versie van het *flux decomposition* algoritme (zie §3.2.1), aangezien bewerkingserosie beperkt blijft binnen de grenzen van een perceel. Omwille van deze reden zal het sediment dat via bewerkingserosie wordt gegenereerd ook niet bijdragen aan de sedimentoutput naar de waterlopen toe. De berekende hoeveelheid erosie of depositie per pixel wordt ten slotte omgezet naar mm met behulp van de oppervlakte van de pixel en wordt weggeschreven in een Idrisi raster.

3.2.3 Verdeling sediment over hydrogram

Na de berekening van de totale sedimentexport voor elke uitlaat en elk riviersegment (zie §3.2.2), wordt deze hoeveelheid sediment verdeeld over het overeenkomstige hydrogram ter bepaling van een sedigram, i.e. de sedimentconcentratie en sedimentvracht in functie van de tijd. Hier werd gekozen voor een lineaire verdeling, hetgeen goede resultaten opleverde (zie §4.3). In een eventuele opvolging van dit project kan nog de mogelijkheid worden onderzocht voor het gebruik van een alternatieve verdeling (vb. exponentieel).

Voor elke uitlaat en elk riviersegment wordt per tijdstap de fractie van afstroming ten opzichte van de totale afstroming bepaald. Deze fractie wordt vervolgens voor elke tijdstap vermenigvuldigd met de totale sedimentvracht aan de respectievelijke uitlaat of het respectievelijk riviersegment. De sedimentconcentratie wordt dan als volgt berekend uit deze tijdsreeks van sedimentvracht:

$$SC = \frac{SV * 1000}{R * 1000}$$

Met SC = sedimentconcentratie (g l^{-1}), SV = sedimentvracht (kg) en R = afstroming (m^3).

Zowel de sedimentvracht als de sedimentconcentratie in functie van de tijd worden weggeschreven in een tekstbestand.

3.2.4 Korrelgrootteverdeling sediment

Na de bepaling van de sedimentconcentratie in functie van de tijd kan, indien door de gebruiker gewenst, voor elke uitlaat een schatting worden gemaakt van het kleigehalte van het sediment dat op deze plaats toekomt. Dit gebeurt aan de hand van een klei-aanrijdingsfactor, die functie is van de gemiddelde sedimentconcentratie:

$$ER = 1 + 0,7732 e^{-0,0508 \times SC} \quad (\text{Wang et al., 2010})$$

Waarbij ER = klei-aanrijksfactor (-) en SC = sedimentconcentratie (g l^{-1}).

Klei zal in het algemeen omwille van zijn kleine gemiddelde korrelgrootte relatief sneller afspoelen in vergelijking met leem of zand. Bij een groot neerslagevent zal dit relatieve verschil tussen de groottefracties echter kleiner zijn omwille van de grote kracht waarmee het sediment wordt weggespoeld. De fractie klei in het sediment (% klei_{sediment}) wordt berekend in functie van de klei-aanrijksfactor en het gemiddelde kleigehalte van de oorspronkelijke bodem (% klei_{bodem}):

$$\% \text{ klei}_{\text{sediment}} = \% \text{ klei}_{\text{bodem}} \times ER$$

Voor elke uitlaat wordt het gemiddelde kleigehalte van het sediment weggeschreven in een tekstbestand.

3.2.5 Afwijkingen van basisalgoritmes

Voor enkele constructies met een grote potentiële invloed op het transport van water en sediment doorheen het landschap werden enkele uitzonderingen in het model ingebouwd om zo goed mogelijk met deze constructies rekening te kunnen houden. Deze worden hieronder kort overlopen.

- Bufferbekkens, bufferende dammen:

Bufferbekkens en bufferende dammen hebben een grote invloed op de dynamiek van afstromend water doorheen het landschap. Deze constructies vormen tijdelijke stockageplaatsen voor afstromend water, dat vervolgens vertraagd via een knijpopening wordt afgevoerd. Dit vertraagde afstromingsmechanisme voor water wordt daarom expliciet in rekening gebracht door het model. De hiervoor gebruikte methode is gebaseerd op het rapport van Meert & Willems (2013) en stoelt op volgende principes:

- Water zal pas uit het bufferbekken/dam stromen van zodra het zogenaamde 'dode volume', i.e. het volume water onder de knijpopening, wordt overschreden. Deze variabele wordt voor elk bufferbekken en dam aan de start van de afstromingsberekeningen bepaald aan de hand van volgende formule:

$$V_{\text{dood}} = \left(\frac{H_{\text{opening}}}{H_{\text{dam}}} \right) * V_{\text{bekken}}$$

Met V_{dood} = het dode volume (m^3), H_{opening} = de hoogte van de knijpopening boven het maaiveld (m), H_{dam} = de hoogte van de dam boven het maaiveld en ter hoogte van de knijpopening en V_{bekken} = het totaal bergingsvolume van het bufferbekken/achter de dam (m^3);

- Indien het watervolume in de buffer/achter de dam groter is dan dit dode volume, maar kleiner dan het totale bergingsvolume, zal het water alleen via de knijpopening verder stromen volgens volgende formule:

$$R(t) = \left(Q_{\text{max}} * \sqrt{\frac{V(t)}{V_{\text{bekken}} - V_{\text{dood}}}} \right) * \Delta t$$

Met $R(t)$ = de hoeveelheid afstroming gedurende tijdstap t (m^3), Q_{max} = het maximale uitstromingsdebiet ($\text{m}^3 \text{ s}^{-1}$), $V(t)$ = het volume water aanwezig in het bekken/achter de dam op tijdstap t (m^3) en Δt = de tijdstap van het model (s). Q_{max} wordt voor ieder bekken/dam bepaald voor de start van de afstromingsberekeningen aan de hand van onderstaande formule:

$$Q_{\text{max}} = C_d * A_0 * \sqrt{2 * g * (H_{\text{dam}} - H_{\text{opening}})}$$

Hierin is C_d = de afstromingscoëfficiënt (-), A_0 = de doorsnede van de knijpopening (m^2) en g = de valversnelling ($=9,81 m s^{-2}$). De afstromingscoëfficiënt is een soort correctiefactor en staat voor de verhouding van de eigenlijke afstroming ten opzichte van de theoretische afstroming. Deze waarde kan voor elk bufferbekken/dam verschillen;

- In het geval dat het volume in het bufferbekken/achter de dam groter is dan zijn maximale bergingsvolume zal het water zowel via de knijpopening ($R_{opening}$) als via de overloop ($R_{overloop}$) afstromen:

$$R = R_{opening} + R_{overloop}$$

$$R_{opening} = Q_{max} * \Delta t$$

$$R_{overloop}(t) = C_d * B_{dam} * \sqrt{g} * h(t)^{3/2} * \Delta t$$

Met B_{dam} = de breedte van de overloop (m) en h = de opwaartse waterhoogte ten opzichte van de overstortdrempel (m). Deze laatste wordt als volgt bepaald:

$$h(t) = \frac{V(t) - V_{bekken}}{A_{bekken}}$$

Met A_{bekken} = de grondoppervlakte van het bufferbekken/achter de bufferende dam (m^2), dat benaderd wordt door:

$$A_{bekken} = \frac{V_{bekken}}{H_{dam}}$$

Gedurende de loop van de afstromingsberekeningen wordt voor elk bufferbekken/bufferende dam de hoeveelheid water bijgehouden die via de overloop verder stroomt. Na het doorlopen van de procedure wordt voor elke constructie een totaal gemaakt over alle tijdstappen en wordt deze waarde weggeschreven in een tekstbestand. Deze informatie kan een indicatie leveren voor de efficiëntie van deze erosiebestrijdende maatregelen.

Naast dit aangepast afstromingsalgoritme, wordt ook het afstromingspatroon in de onmiddellijke omgeving van de bufferbekkens/dammen aangepast. Alle pixels die tot de constructie behoren, inclusief hun hoger gelegen buurcellen, stromen rechtstreeks af naar de centrale bufferpixel, i.e. de pixel die de knijpopening van de constructie bevat. Deze pixel krijgt op zijn beurt slechts één doelcel toegewezen, namelijk zijn laagst gelegen buurcel. Bovendien krijgt iedere bufferpixel een lage CN waarde van 71 toegewezen om hun bufferende vermogen voor water in rekening te brengen.

Tot slot wordt de buffering van sediment rechtstreeks in rekening gebracht via de zogenaamde *sediment trapping efficiency*, die voor elke constructie kan worden ingegeven door de gebruiker. Deze parameter geeft aan welk percentage van het inkomende sediment effectief wordt opgehouden door de constructie.

- Geleidende dammen

Geleidende dammen zijn constructies die hoofdzakelijk de afstromingsrichting van water en sediment bepalen, maar slechts weinig invloed hebben op de effectieve buffering. De doelcellen van elke pixel die tot een geleidende dam behoort, worden daarom niet bepaald door het algoritme gebaseerd op de hellingsrichting (zoals beschreven in §3.2.1), maar dient door de gebruiker te worden ingegeven (§3.3). Vermits doorgaans rondom een geleidende dam een kleine grasstrook wordt aangelegd, krijgen de pixels een typische CN waarde en C factor toegewezen voor grasland, respectievelijk 71 en 0,01.

- **Grachten**

De invloed van grachten op water- en sedimenttransport doorheen het landschap is vergelijkbaar met deze van de geleidende dammen. Daarom dient ook voor dit soort constructies de afstromingsrichting voor elke pixel te worden ingegeven door de gebruiker (§3.3). Met het begrip gracht worden in dit model enkel de grachten aangeduid waarin zich permanent water bevindt. Daarom wordt aan deze constructies standaard een CN waarde van 98 en een C factor van 0 toegekend. Droogstaande grachten kunnen best als geleidende dam worden gesimuleerd.

- **Rioleringen**

In het CN_WS model kan ook rekening worden gehouden met de aanwezigheid van rioleringen, die het water en sediment versneld ondergronds afvoeren naar de rivier en/of naar een waterzuiveringsinstallatie. Concreet wordt dit in eerste instantie in het model ingebracht via een aanpassing van de selectie van de doelcellen voor elke pixel die een toegang tot een riool bevat. De twee eerder geselecteerde doelcellen worden met elkaar vergeleken en diegene met de grootste bijdrage aan afstroming wordt weerhouden als eerste doelcel. Voor de tweede doelcel wordt op zoek gegaan naar de dichtstbijzijnde, lager gelegen rivierpixel die nog niet is behandeld door het algoritme. De fractie van het instromende water en sediment dat effectief in het riool belandt, wordt bepaald door de vangefficiëntie. Voor elk van de rioolpixels dient deze waarde als input voor het model te worden voorzien. Na de selectie van de doelcellen wordt de kortste afstand van de rioolpixel tot de rivierpixel berekend aan de hand van de eerder vermelde formules (zie §3.2.1). Voor de berekening van de tijdsafhankelijke afstroming via het riool worden dezelfde principes gebruikt als voor de overige pixels: per tijdstap wordt bepaald hoeveel water kan worden getransporteerd in functie van de te overbruggen afstand en de snelheid van het water. De snelheid van water in een riool wordt standaard gelijkgesteld aan 1 m s^{-1} . Vermits voor het transport van het sediment doorheen het landschap gebruik wordt gemaakt van dezelfde doelcellen als voor de afstromingsberekeningen, wordt ook hier expliciet rekening gehouden met de aanwezigheid van de riolering.

In tweede instantie wordt een fractie van het water en sediment dat in het riool terecht komt weggeleid uit het stroomgebied naar een waterzuiveringsinstallatie. Deze fractie wordt volledig bepaald door de gebruiker (via input) en komt dus niet meer in de waterloop terecht. De totale hoeveelheden water en sediment die op deze manier uit het systeem verdwijnen, worden op het einde van de simulatie weggeschreven in een tekstbestand.

3.3 **Benodigde input basismodel**

In wat volgt wordt de vereiste input voor het model kort overlopen. Alle gebruikte raster data dienen hetzelfde aantal rijen en kolommen te bevatten en dezelfde ruimtelijke resolutie te bezitten. Voor meer gedetailleerde informatie en concrete richtlijnen voor de aanmaak van deze input data wordt verwezen naar de handleiding van het CN_WS model.

- **Algemene input:**

- **Digitaal hoogte model (DTM)** (raster, type real): Het DTM moet reeds gecorrigeerd zijn voor zogenaamde putten (*pits*, lokale minima in het DTM) en vlakke stukken om te verhinderen dat water of sediment op deze plaatsen foutief accumuleert. Deze correctie kan uitgevoerd worden met het "Fill sinks" algoritme van SAGA GIS, onderdeel van QGIS;
- **Perceelskaart** (raster, type real): In dit raster worden de verschillende landbouwpercelen aangeduid met een uniek oplopend nummer. De perceelsgegevens van de mestbank of de ALV percelenkaart kunnen hier gebruikt worden als basisdata

voor de aanmaak van deze kaart. Verder bevat dit raster nog een aantal speciale klassen (zie

- Tabel 3-2);
- **Neerslag**: Dit is een tekstbestand (tab delimited) bestaande uit twee kolommen, zonder de namen van de kolomvariabelen. De eerste kolom bevat de tijd in minuten, beginnend van 0, en de tweede kolom geeft de neerslag weer in mm;
- **Antecedente neerslag gedurende 5 dagen (AR5)**: De totale hoeveelheid neerslag gedurende de 5 dagen voor de start van de modellering (in mm). Deze variabele wordt gebruikt als proxy voor het initieel bodemvochtgehalte;
- **R factor**: De gebruiker krijgt hier de mogelijkheid om het model te runnen voor een periode van een jaar met een zelf gedefinieerde R factor of regenvalerosiviteitsfactor ($\text{MJ}\cdot\text{mm}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}\cdot\text{jaar}^{-1}$). Deze optie is enkel beschikbaar in de vereenvoudigde versie van het model (zie §3.6);
- **Bulkdensiteit**: Een gemiddelde waarde voor de bulkdensiteit van de bodem in kg m^{-3} . Deze wordt gebruikt voor de omrekening van de hoeveelheid afgespoelde bodem van m^3 naar kg;
- **Stroomsnelheid**: Een gemiddelde stroomsnelheid van de rivier in het studiegebied in m s^{-1} ;
- **Rioleringen** (raster, type real) (optioneel): Indien door de gebruiker gewenst, kan in het model rekening gehouden worden met rioleringen die water en sediment versneld afvoeren naar de rivier (zie §3.2.5). In dit geval dient een raster dataset te worden voorzien waarvan enkel pixels die een ingang naar een riool bevatten verschillend zijn van nul. De specifieke waarde van deze pixels moet gelijk zijn aan de vangefficiëntie van het riool aanwezig in deze pixel, i.e. de verhouding van de hoeveelheid water die in het riool stroomt ten opzichte van de hoeveelheid water die toekomt in de pixel (waarde tussen 0 en 1). Naast het raster dient ook nog een algemene waarde te worden gespecificeerd die aangeeft welk percentage van het water/sediment dat in de riool terechtkomt, uiteindelijk zal geleid worden naar een waterzuiveringsinstallatie en dus niet in de waterloop zal terechtkomen

Tabel 3-2 Speciale klassen in perceelskaart.

Landgebruik	Waarde in perceelskaart
Rivier	-1
Wegen, bebouwing	-2
Bos	-3
Weide	-4
Open water (excl. rivieren)	-5
Grasbufferstrook / grasgang	-6

- **Input voor berekeningen afstroming (CN model)**:

- **CN kaart** (raster, type real): Raster met waarden van de Curve Number voor elke pixel. Dit is een getal tussen 0 en 100 en is een maat voor de infiltratiecapaciteit van de bodem, onder andere afhankelijk van bodemcondities en landgebruik. De berekening van de Curve Number werd reeds verduidelijkt in §3.2.1;
- **Kalibratieparameters α en β** : Dimensieloze parameters gebruikt voor de berekening van de hoeveelheid afstroming per pixel (zie formule in §3.2.1);

- **Ploegr richting en georiënteerde ruwheid** (rasters, type integer) (optioneel): Indien door de gebruiker gewenst, kan bij de bepaling van de afstromingsrichting rekening worden gehouden met de ploegr richting (zie §3.2.1). De ploegr richting wordt uitgedrukt in graden ten opzichte van het noorden. De georiënteerde ruwheid staat voor de hoogte van het microreliëf ten gevolge van het ploegen en wordt uitgedrukt in cm;
 - **Perceelsconnectiviteit**: Een maat voor de efficiëntie waarmee water en sediment worden opgehouden aan perceelsranden, uitgedrukt in percent. Hier dienen twee waarden gespecificeerd te worden, namelijk één voor de overgang naar akkerland en één voor de overgang naar bos/grasland.
- **Input voor erosie/sedimentatie berekeningen (WS model):**
- **K factor** (raster, type integer): Raster met de bodemerosiviteitsfactor ($\text{kg h MJ}^{-1} \text{mm}^{-1}$) uit de RUSLE vergelijking voor elke pixel. Deze factor wordt voornamelijk bepaald door bodemtextuur;
 - **C factor** (raster, type real): Raster met de waarde voor de gewasfactor uit de RUSLE vergelijking (waarde tussen 0 en 1) voor elke pixel. Deze wordt voornamelijk bepaald door de aard van het gewas en zijn bedekkingsgraad op het moment van de bui;
 - **P factor** (raster, type real): Raster met de waarde voor de erosiebestrijdingsfactor uit de RUSLE vergelijking (waarde tussen 0 en 1) voor elke pixel;
 - **kTc** (raster, type integer): Raster met de waarde van de transportcapaciteitscoëfficiënt (m) voor elke pixel. Deze variabele wordt gebruikt in de berekening van de hoeveelheid sediment die effectief kan worden doorgegeven aan een volgende pixel (zie §3.2.2). Indien door de gebruiker gewenst, kan deze kaart automatisch door het model aangemaakt worden op basis van twee in te voeren parameters:
 - 1) **kTc low**: Standaardwaarde voor kTc die zal worden toegekend aan percelen met een lage transportcapaciteit voor sediment (vb. bossen, graslanden);
 - 2) **kTc high**: Standaardwaarde voor kTc die zal worden toegekend aan percelen met een hoge transportcapaciteit (vb. akkerland);
 - 3) **kTc limit**: Waarde tussen 0 en 1. Elk perceel met een C factor groter dan deze waarde zal de kTc high waarde toegekend krijgen, de overige percelen krijgen de kTc low waarde toegekend.

Tijdens de aanmaak van de kTc kaart wordt automatisch een kTc waarde van 9999 toegekend aan wegen, bebouwing en rivieren, terwijl open water een kTc waarde van 0 krijgt. Indien de kTc kaart automatisch door het model wordt gemaakt, wordt deze kaart weggeschreven als "kTcmap.rst" zodat de gebruiker kan controleren welke input uiteindelijk werd gebruikt;
 - **ktil** (raster, type integer): Raster met de waarde van de transportcoëfficiënt voor bewerkingserosie in $\text{kg m}^{-1} \text{jaar}^{-1}$ voor elke pixel (zie §3.2.2). Indien door de gebruiker gewenst, kan deze kaart automatisch door het model aangemaakt worden op basis van twee in te voeren parameters:
 - 1) **Standaard waarde ktil**: Standaard waarde voor ktil die zal worden toegekend aan elke pixel onder landbouw;

- 2) **Ktil limiet:** Waarde tussen 0 en 1. Elk perceel met een C factor groter dan deze waarde zal de standaard ktil waarde toegekend krijgen. Voor de overige percelen wordt ktil gelijkgesteld aan nul.

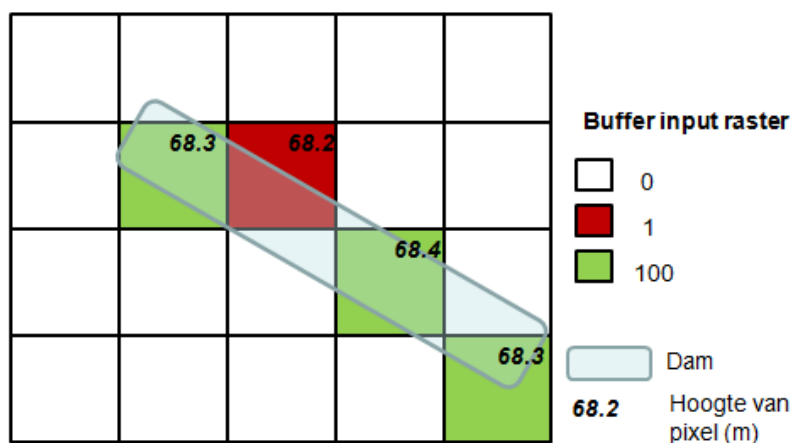
Indien voor deze optie wordt gekozen, wordt de aangemaakte kaart weggeschreven als "ktilmap.rst" ter controle door de gebruiker;

- **Kleigehalte moedermateriaal:** De gebruiker krijgt de mogelijkheid om een schatting te laten maken van het kleigehalte van het sediment aan elke uitlaat. Een gemiddelde waarde van het kleigehalte van de bodem in het stroomgebied dient in dit geval te worden gespecificeerd.
- **Parcel trapping efficiency (PTEF):** De parcel trapping efficiency geeft aan hoeveel een bepaalde pixel bijdraagt tot watererosie in vergelijking met de referentie (= standaard, kaal akkerland). Een waarde van 0 betekent dat de pixel evenveel bijdraagt in vergelijking met de referentie. Een waarde van 75 betekent dat de pixel in kwestie 75% minder bijdraagt in vergelijking met de referentie. In het model dienen drie standaardwaarden gespecificeerd te worden, één voor akkerland, één voor bos en één voor weide. Op basis van deze 3 waarden en de perceelskaart wordt automatisch een PTEF-kaart aangemaakt, die wordt weggeschreven als "PTEFmap.rst".

- **Erosiebestrijdingsmaatregelen (EBM):**

In deze sectie van het inputformulier kunnen een aantal specifieke EBM gedefinieerd worden. Op welke manier met deze constructies precies rekening wordt gehouden in het model, werd reeds verduidelijkt in §3.2.5.

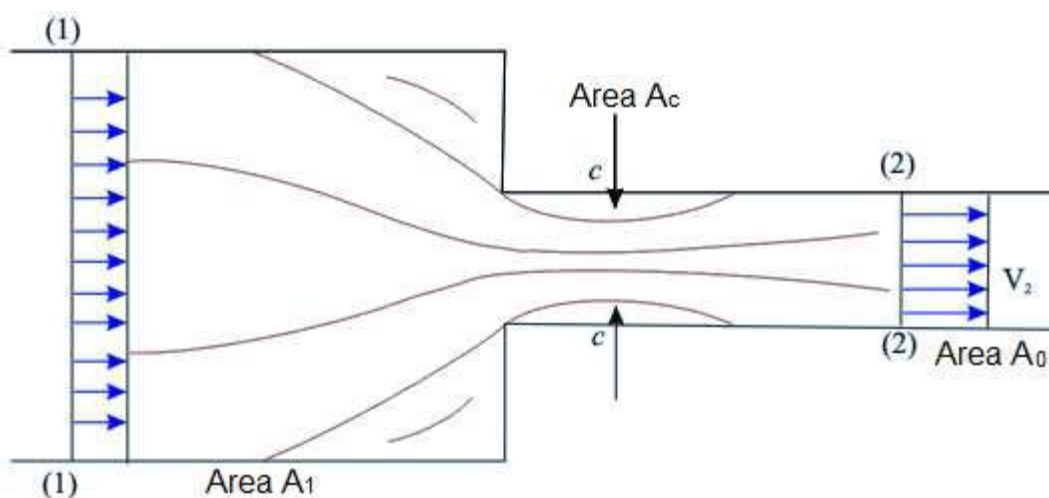
- **Bufferbekkens / aarden dammen / plantaardige dammen:** Indien aanwezig dient volgende bijkomende input data te worden voorzien:
 - Kaart met de locatie van deze constructies (raster, type integer): Enkel pixels die tot een bufferbekken of dam behoren, krijgen een waarde verschillend van nul. Elk bufferbekken of dam wordt met een uniek, oplopend nummer aangeduid, beginnend van 1. Indien het bufferbekken of de dam uit meerdere pixels bestaat, dan dienen al deze bijkomende pixels aangeduid te worden met eenzelfde getal, dat groter dient te zijn dan het totaal aantal bufferbekkens en dammen in het stroomgebied. Voor elke constructie wordt een ander dergelijk nummer, of extension ID, gebruikt. De laagst gelegen cel van de gehele constructie dient het oplopende unieke volgnummer te bevatten. Een voorbeeld hiervan wordt weergegeven in *Figuur 3-3*. Belangrijk is dat de bufferbekkens en dammen gelegen zijn op de zogenaamde *main drainage lines*, zo niet zal het afstromende water en sediment niet door deze constructies worden opgehouden. De gebruiker kan zich hiervan verzekeren door na een eerste simulatie met het model de outputkaart met de totale afstroming per pixel te raadplegen en indien nodig de locatie van de dammen aan te passen. Ook belangrijk is dat de bufferbekkens en dammen voldoende breed worden ingetekend om te vermijden dat water en sediment langsheen deze constructies stromen. Tot slot worden deze constructies best niet ingetekend in een voorname sedimentatiezone omdat het effect van deze maatregelen dan uiterst klein zal zijn;



Figuur 3-3 Voorbeeld van de intekening van een dam in de vereiste raster input laag.

- Aantal buffers: Het totaal aantal bufferbekkens en dammen aanwezig in het stroomgebied;
- Voor elk bufferbekken/dam:
 - Hoogte van de dam (m) gemeten ten opzichte van het maaiveld en ter hoogte van de knijpopening;
 - Hoogte van de knijpopening (m) ten opzichte van het maaiveld;
 - Doorsnede van de knijpopening (m^2);
 - Totaal volume van het bufferbekken/achter de dam (m^3);
 - Debietscoëfficiënt * (-);
 - Breedte van de overloop (m);
 - Efficiëntie waarmee de constructie sediment opvangt (%);
 - *Extension ID*: het unieke ID waarmee alle bijkomende pixels worden aangeduid die tot deze constructie behoren (deze bedraagt 100 in het voorbeeldje uit [Figuur 3-3](#)).

* De debietscoëfficiënt wordt bepaald in functie van de diameter van de knijpopening (A_0) relatief ten opzichte van de wateroppervlakte in het opvangsysteem onmiddellijk opwaarts van de knijpopening (A_1) (zie [Figuur 3-4](#), [Tabel 3-3](#); Meert & Willems, 2013).



Figuur 3-4 Illustratie van variabelen A_0 en A_1 voor de bepaling van de debietscoëfficiënt van een dam.

Tabel 3-3 Debietscoëfficiënt (C_d) in functie van de oppervlaktecontractie (A_0/A_1).

A_0/A_1	0,0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0
C_d	0,00	0,32	0,45	0,55	0,63	0,71	0,77	0,84	0,89	0,95	1,00

- **Geleidende dammen:** Indien aanwezig dient een raster te worden ingeladen waarin alleen pixels die behoren tot een geleidende dam een waarde verschillend van nul krijgen. De waarde van de pixel wordt bepaald door de richting waarin water en sediment gedwongen moeten afvloeien vanuit deze pixel (zie *Figuur 3-5*). Bijvoorbeeld: indien water en sediment vanuit de broncel (x) naar de buurcel gelegen ten noorden van de broncel afstromen, dan krijgt de broncel waarde 1 in deze raster dataset. Een belangrijke randvoorwaarde hierbij is dat water en sediment niet gedwongen kunnen worden om naar een pixel te stromen die hoger is gelegen dan de broncel. Dit dient steeds door de gebruiker te worden nagegaan;

8	1	2
7	x	3
6	5	4

Figuur 3-5 Toekenning van een waarde aan de broncel (x) in functie van de verplichte afstromingsrichting voor geleidende dammen en grachten.

- **Grachten:** Indien aanwezig dient ook hier een raster te worden ingeladen die de afstromingsrichting weergeeft voor de grachten (zie hoger bij geleidende dammen). Grachten worden apart behandeld omdat deze een andere CN waarde en een andere C factor krijgen toegewezen door het model in vergelijking met geleidende dammen.
- **Opties voor model output:**
- **Uitlaat van het stroomgebied:** De gebruiker kan de uitlaat van het stroomgebied automatisch laten bepalen aan de hand van het DTM en de perceelskaart. In dit geval wordt in eerste instantie de laagst gelegen rivierpixel geselecteerd. Indien er zich geen rivier in het studiegebied bevindt, dan wordt de pixel met de grootste *upstream area*, de totale grondoppervlakte die potentieel bijdraagt aan de afstroming in een pixel, geselecteerd. De uiteindelijk geselecteerde pixel wordt weggeschreven als Idrisi raster (Outlet.rst) zodat de gebruiker kan zien welke uitlaat gebruikt wordt door het model. Als alternatief kan de gebruiker ook zelf een raster dataset ingeven (type integer) met hierin de locatie van één of meerdere uitlaten. Deze raster bestaat uit nullen, behalve op de locatie van een uitlaat, waar de cel een uniek oplopend nummer bevat (1 - <aantal uitlaten>);
 - **Tijdstap voor modelberekeningen:** De hier geselecteerde tijdstap dient aan het zogenaamde Courant criterium te voldoen om de stabiliteit van het model te garanderen. Dit criterium limiteert de waarde van de tijdstap (Δt in sec) in functie van de ruimtelijke resolutie (res in m) en de stroomsnelheid van het water over land (voor deze laatste wordt een standaard waarde van $0,3 \text{ m s}^{-1}$ aangenomen doorheen het model; Govers, 1992):

$$\Delta t \leq \frac{res}{v}$$

- **Eindtijd van model:** Aantal minuten dat het model moet doorgerekend worden. Dit dient een veelvoud te zijn van de eerder geselecteerde tijdstap;
- **Tijdstap output:** De gebruiker krijgt hier de optie om de resultaten (afstroming, sedimentconcentratie en sedimentvracht) in functie van de tijd om te zetten naar een door hem/haar geselecteerde tijdstap, met als doel om de vergelijking met bestaande metingen te vergemakkelijken;
- **Riviersegmenten:** Hier krijgt de gebruiker de mogelijkheid aangeboden om de output niet alleen voor de uitla(a)t(en) te bepalen, maar ook per VHA riviersegment. Indien gewenst dient hier een raster dataset (type integer) opgeladen te worden met een uniek oplopend nummer voor elk riviersegment en een waarde nul voor alle overige cellen;
- **Keuze outputkaarten:** De gebruiker kan selecteren welke output kaarten hij/zij wenst. Deze worden verder besproken in §3.4.

3.4 Overzicht output basismodel

In wat volgt wordt kort alle output van het CN_WS model overlopen die wordt bekomen na het simuleren van één neerslagevenement.

- **Tekstbestanden:**

- **Clay content sediment.txt:** Gemiddeld kleigehalte (%) van het sediment dat toekomt aan elke uitlaat;
- **Discharge.txt:** Debiet ($\text{m}^3 \text{s}^{-1}$) in functie van de tijd (hydrogram) voor elke uitlaat;
- **Discharge_VHA.txt:** Debiet ($\text{m}^3 \text{s}^{-1}$) van het instromende water afkomstig van het land in functie van de tijd voor elk riviersegment;
- **Sediment concentration.txt:** Concentratie aan sediment (g l^{-1}) in functie van de tijd (sedigram) voor elke uitlaat;
- **Sediment concentration_VHA.txt:** Concentratie aan sediment (g l^{-1}) dat toekomt vanaf het land in functie van de tijd (sedigram) voor elk riviersegment;
- **Sediment.txt:** Sedimentvracht (kg) in functie van de tijd voor elke uitlaat;
- **Sediment_VHA.txt:** Sedimentvracht (kg) dat toekomt vanaf het land in functie van de tijd voor elk riviersegment;
- **Sewer output water.txt:** Totale hoeveelheid water (m^3) die het stroomgebied verlaat via de riolering en dus niet in de waterloop terecht komt;
- **Sewer output sediment.txt:** Totale hoeveelheid sediment (kg) die het stroomgebied verlaat via de riolering en dus niet in de waterloop terecht komt;
- **Spillover per buffer:** Per buffer de totale hoeveelheid water (m^3) die de buffer verliet via de overloop;
- **Total discharge.txt:** De totale hoeveelheid water (m^3) die passeert aan elke uitlaat ten gevolge van de regenbui.

- **Total sediment.txt:** In dit bestand wordt de sedimentbalans over het volledige gebied weergegeven (in kg). Deze bestaat uit: totale hoeveelheid erosie, totale hoeveelheid depositie, hoeveelheid sediment geëxporteerd naar rivieren, hoeveelheid sediment geëxporteerd via de randen van het gebied, de hoeveelheid sediment dat achterblijft in bufferbekkens en de hoeveelheid sediment dat achterblijft in open water. Tot slot wordt ook voor elke uitlaat de totale hoeveelheid sediment weergegeven die er passeert.
- **Raster bestanden:**
- **AspectMap.rst:** Hellingsrichting uitgedrukt in radialen. Dit is een tussentijds resultaat dat berekend wordt uit het DTM en gebruikt wordt voor de bepaling van het afstromingspatroon doorheen het landschap;
 - **LS.rst:** LS factor uit de RUSLE vergelijking voor de berekening van erosie/sedimentatie waarin zowel hellingslengte als hellingsgraad zijn verwerkt. Deze factor wordt door het model berekend uit de variabele *upstream area* (zie verder) volgens de methode voorgesteld door Desmet & Govers (1996);
 - **Remap.rst:** Totale hoeveelheid afstroming (= neerslag – infiltratie) die gegenereerd wordt per pixel als gevolg van de regenbui. Dit wordt berekend met behulp van de CN methode;
 - **RUSLE.rst:** Resultaat van de RUSLE vergelijking, oftewel het potentieel bodemverlies, per pixel uitgedrukt in kg m^{-2} ;
 - **SediExport_kg.rst:** Totale hoeveelheid sediment (kg) die terechtkomt in rivieren, waterpartijen of dat het studiegebied verlaat aan de rand. Dit wordt berekend door de erosie gegenereerd per pixel (WATEREROS.rst) te leiden doorheen het landschap;
 - **SediIn_kg.rst:** Inkomend sediment per gridcel uitgedrukt in kg;
 - **SediOut_kg.rst:** Uitgaand sediment per gridcel uitgedrukt in kg;
 - **SLOPE.rst:** Hellingsgraad uitgedrukt in radialen. Dit wordt berekend uit het DTM en gebruikt voor de bepaling van de LS factor van de RUSLE vergelijking;
 - **TILEROS.rst:** Hoeveelheid bewerkingserosie uitgedrukt in mm jaar^{-1} . Het gaat hier dus om een inschatting voor een volledig jaar en niet enkel voor de duur van de regenbui. Een negatieve waarde duidt op erosie, terwijl een positieve waarde staat voor sedimentatie;
 - **Total runoff.rst:** Totale hoeveelheid afstroming die wordt gegenereerd in elke pixel tijdens de volledige duur van de regenbui, uitgedrukt in m^3 . Deze waarde is de som van de hoeveelheid neerslag en de hoeveelheid water afkomstig van hoger gelegen pixels, verminderd met de infiltratie in die pixel;
 - **UPAREA.rst:** Totale grondoppervlakte (m^2) van alle pixels die potentieel bijdragen aan de stroming van water en sediment in elke pixel. Dit wordt berekend met behulp van het *flux decomposition routing* algoritme en wordt gebruikt in de berekening van de LS factor van de RUSLE vergelijking;
 - **WATEREROS (kg per gridcel).rst:** Totale hoeveelheid erosie/sedimentatie per pixel uitgedrukt in kg. Deze variabele wordt bepaald door een combinatie van het potentiële bodemverlies, de totale hoeveelheid sediment die toekomt van

hogergelegen locaties en de transportcapaciteit. Een negatieve waarde duidt op erosie, terwijl een positieve waarde staat voor sedimentatie.

- **WATEREROS (mm per gridcel).rst:** Volledig analoog aan de vorige outputkaart, maar deze keer wordt erosie/depositie uitgedrukt in mm.

3.5 Lange termijnversie van het CN_WS model

Zoals reeds aangegeven in de inleiding werd een modelversie gemaakt die in staat is om het effect van meerdere regenbuien na elkaar te begroten voor een maximale periode van één jaar. De gebruiker dient hierbij de neerslag data in te geven voor de gehele periode. Belangrijk hierbij is dat de neerslaginput dient te starten op de eerste dag van een maand, om 0u00. Op basis van de neerslagdata identificeert het model de verschillende regenbuien, waarna elke bui apart wordt gesimuleerd met behulp van het CN_WS model. De output van elke bui wordt dan apart weggeschreven en vervolgens opgeteld bij de vorige om tot de finale model output te komen.

Aangezien voor deze modelversie meer input is vereist in vergelijking met de versie voor één evenement, werd hiervoor een aparte user interface gemaakt. Concreet verschilt de input tussen beide versies op volgende punten:

- **Locatie CN_WS model.exe:** Bestandslocatie van het CN_WS model (DOS versie, zonder Windows interface!), dat voor elke bui zal worden uitgevoerd;
- **Perceelskaart:** De gebruiker krijgt hier de optie om twee perceelskaarten op te laden voor het geval waarbij twee verschillende jaren betrokken zijn in de simulatie (vb. simulatie van september 2010 tot maart 2011);
- **5 day antecedent rainfall (AR5):** Deze variabele dient niet te worden ingegeven, maar wordt in deze modelversie berekend voor elke regenbui uit de neerslaggegevens;
- **Stroomsnelheid:** In de plaats van één waarde, dient de gebruiker hier een tekstbestand (tab delimited) in te laden met voor elke maand een waarde voor de gemiddelde stroomsnelheid in de waterlopen. Dit bestand bevat één kolom met 12 waarden, i.e. de stroomsnelheid voor januari t.e.m. december in $m s^{-1}$;
- **Eerste maand van simulatie:** Startmaand van de simulatie dient te worden ingegeven zodat het model de juiste maand en het juiste seizoen voor elke bui kan selecteren;
- **Start jaar van simulatie:** Start jaar van de simulatie dient te worden ingegeven zodat het model kan rekening houden met schrikkeljaren;
- **CN kaart:** De CN waarde is sterk afhankelijk van onder meer bodembedekking en verslempingsgraad, dewelke op hun beurt sterke seizoenale variatie kunnen vertonen, voornamelijk op landbouwpercelen. Daarom kan de gebruiker een CN kaart ingeven voor elk hydrologisch seizoen (maart – mei, juni – augustus, september – november en december - februari). Indien de simulatie betrekking heeft op meerdere jaren (vb. september 2010 – maart 2011) kunnen per seizoen twee CN kaarten ingegeven worden;
- **C factor:** Om dezelfde redenen als hierboven aangegeven voor de CN waarde, kunnen ook voor de C factor acht verschillende rasters worden ingegeven, twee voor elk hydrologisch seizoen;
- **kTc en ktil:** Ook voor deze twee variabelen, die zijn gelinkt aan de perceelskaart en dus variëren van jaar tot jaar, kunnen twee kaarten worden ingegeven indien de simulatie zich afspeelt in meer dan één jaar;

- **Eindtijd model:** Hier dient één waarde te worden ingegeven die zal gelden voor elk neerslagevenement, ongeacht de duur van de bui.

Na het inlezen van de input worden volgende stappen doorlopen door het model:

- Alle regenbuien worden geïdentificeerd: een bui start van zodra er neerslag valt en eindigt wanneer in een periode van zes uur geen neerslag valt. Indien de totale hoeveelheid neerslag tijdens een bui kleiner is dan 1,27 mm, wordt aangenomen dat deze bui geen erosie kan veroorzaken (Verstraeten et al., 2006b) en wordt deze bijgevolg genegeerd door het model;
- Voor elke bui worden achtereenvolgens volgende stappen doorlopen:
 - o De neerslag data van de bui wordt weggeschreven in een tekstbestand (Rain input event.txt);
 - o De *5 day antecedent rainfall* (AR5) wordt berekend;
 - o De maand, het seizoen en het jaar waarin de bui plaatsvindt worden bepaald aan de hand van de tijdsreeks in de originele neerslag data;
 - o Op basis van voorgaande stap wordt de correcte input voor de bui geselecteerd (stroomsnelheid, perceelskaart, CN kaart, C factor, kTc, ktill);
 - o Een .ini bestand wordt geschreven voor de bui dat als input zal dienen voor het CN_WS model;
 - o Een .cmd bestand wordt geschreven met hierin de opdracht om het CN_WS model uit te voeren met het zonet gecreëerde .ini bestand;
 - o Het .cmd bestand wordt geopend en het CN_WS model wordt uitgevoerd;
 - o De model output wordt ingelezen en gezamenlijk weggeschreven in één tekstbestand (Output event x.txt);
 - o De output van de bui wordt bij de resultaten van voorgaande buien gevoegd;
- De finale model output wordt weggeschreven in tekstbestanden met bestandsnaam eindigend op “_longterm.txt”, vb. Discharge_longterm.txt.

3.6 Vereenvoudigde versie van het CN_WS model

De toepassing van het CN_WS model op grote stroomgebieden of hydrografische bekkens en voor lange periodes kan snel zeer rekenintensief worden omwille van de kleine tijdstap die standaard gebruikt wordt voor de tijdsafhankelijke afstromingsberekeningen (typisch 15 seconden). Daarom werd ook een vereenvoudigde versie van het model voorzien. De gebruiker kan in het beginscherm van het CN_WS model aanduiden of hij/zij al dan niet wil werken met dit vereenvoudigde model. Deze optie werd zowel in de standaard versie als de lange termijnversie van het model ingebouwd.

Concreet houdt dit in dat de tijdsafhankelijke afstromingsberekeningen worden overgeslagen door het model en enkel de totale sedimentvracht aan elke uitlaat en, indien gewenst, per riviersegment, worden bepaald aan de hand van de aangepaste WaTEM/SEDEM module (§3.2.2). Door het vereenvoudigde model worden met andere woorden geen hydrogrammen of sedigrammen gegenereerd, maar enkel de totale sedimentvracht die aankomt per uitlaat en per riviersegment als gevolg van de volledige regenbui. Deze modelversie levert dus geen enkele informatie omtrent afstroming van water in het stroomgebied (vb. kaarten met totale neerslagoverschot en totale

afstroming per pixel worden niet berekend). Deze vereenvoudiging heeft ook tot gevolg dat het gemiddelde kleigehalte van het sediment niet kan worden geschat, aangezien dit rechtstreeks afhankelijk is van de sedimentconcentratie, die op zijn beurt een inschatting van de afstroming vereist. Verder werden geen vereenvoudigingen toegepast op het WaTEM/SEDEM gedeelte van het model, wat betekent dat deze zijn volle functionaliteit behoudt. Zo kan nog steeds op dezelfde manier de impact van verschillende EBM worden nagegaan, weliswaar enkel op erosie/sedimentatie.

Tot slot werd bij de vereenvoudigde versie van het standaard CN_WS model nog een bijkomende optie voorzien, namelijk het werken met een zelf gekozen R factor voor de simulatie van een volledig jaar. In dit geval dienen geen neerslaggegevens te worden ingegeven door de gebruiker, alleen een R factor uitgedrukt in $\text{MJ mm ha}^{-1} \text{ h}^{-1} \text{ jaar}^{-1}$. Deze optie kan worden gebruikt om snel en op eenvoudige wijze een idee te krijgen van de ruimtelijke patronen van erosie/sedimentatie in een stroomgebied en een algemene inschatting te bekomen van de totale sedimentvrucht op één of meerdere punten als gevolg van de neerslag tijdens een typisch jaar. Wanneer deze optie wordt gebruikt, dient de gebruiker dan ook een kaart met jaargemiddelde C factoren in te geven. Deze modelversie is qua in- en output te vergelijken met de oorspronkelijke versie van WaTEM/SEDEM waarop dit model is gebaseerd, met het verschil dat in het CN_WS model op een meer expliciete wijze kan rekening worden gehouden met EBM.

4 Validatie en toepassing van het model

4.1 Inleiding

Na de initiële kalibratie van het CN model voor Ganspoel en de Heulengracht (§2.3) werd verder geen kalibratie uitgevoerd voor het afstromingsgedeelte van het CN_WS model. Vermits aan het erosie- en sedimentatiegedeelte van het model enkele aanpassingen werden gedaan in vergelijking met de eerdere versie van WaTEM/SEDEM (zie §3.2.2), werd dit model opnieuw gekalibreerd door Hanne De Brue (De Brue, 2016). In dit project werd de nadruk gelegd op validatie van het CN_WS model aan de hand van alle stroomgebieden opgenomen in het Sedimentmeetnet (Van Hoestenbergh et al., 2008), zie §4.3. Vervolgens werd voor het bekken van Velm een kleine gevoeligheidsanalyse uitgevoerd om de gebruiker een eerste idee te geven van de impact van verschillende inputvariabelen op de modeloutput (§0). Voor het kleine gebied Ganspoel werd nagegaan of de erosie- en sedimentatieprocessen op het land correct ruimtelijk worden gemodelleerd (§4.5). Verder werd de concrete implementatie en de impact van verschillende EBM geïllustreerd aan de hand van een fictief landbouwperceel en de stroomgebieden van de Heulengracht en Velm (§4.6). Ten slotte werd de vereenvoudigde versie van het CN_WS model toegepast op een aantal 1^e categorie waterlopen (§4.7) en op alle Vlaamse hydrografische bekkens (§4.8). Vooraleer echter dieper in te gaan op de resultaten van de uitgevoerde simulaties, wordt eerst de gebruikte inputdata en aannames overlopen (§4.2).

4.2 Gebruikte inputdata

In wat volgt worden kort de bronnen en aannames aangehaald die werden gebruikt voor de aanmaak van de inputdata gebruikt voor alle uitgevoerde simulaties. Voor een uitgebreide beschrijving van de procedures waarmee de data werden aangemaakt, wordt verwezen naar de aparte handleiding van het CN_WS model.

- **DTM:** Een DTM van Vlaanderen met een ruimtelijke resolutie van 20 m werd gebruikt voor de simulaties. Als basis werd hiervoor het digitaal terreinmodel van het NGI gebruikt, niveau 2 (zie Van Rompaey et al., 2000). Dit DTM werd gecorrigeerd voor pits met behulp van het Fill sinks algoritme van SAGA GIS (onderdeel van QGIS);
- **Perceelskaart:** De perceelskaart werd opgebouwd via een overlay van verschillende datalagen die, indien nodig, eerst werden verrasterd naar een ruimtelijke resolutie van 20 m. De gebruikte lagen zijn, in volgorde van prioriteit:
 - o VHA riviersegmenten (jaar 2013);
 - o Wegen (uit het grootschalig referentiebestand van AGIV);
 - o Grasbufferstroken/grasgangen (zowel uit beheersovereenkomsten van VLM als de datalagen met gerealiseerde erosiebestrijdingsmaatregelen afkomstig van ALBON en land-en-water.be);
 - o Perceelsgegevens van de mestbank voor het jaar 2008 / ALV perceelskaart voor het jaar 2013;
 - o Bosreferentielaag van het jaar 2000 (AGIV);
 - o Bodembedekkingsbestand (AGIV).
- **Neerslaggegevens en antecedente neerslag:** Neerslag gemeten in meetstation van Velm (Demerbekken) en Maarke-Kerkem (Bovensheldebekken). Data afkomstig van de website waterinfo.be;
- **Bulkdensiteit bodem:** Standaard aanname van 1350 kg m⁻³;
- **Stroomsnelheid in waterlopen:** Standaard aanname van 0,3 m s⁻¹ (overeenstemmend met aanname van stroomsnelheid over land gebruikt door het model);

- **Rioleringen:** Enkel in het stroomgebied bepaald door het meetstation te Velm werd het effect van rioleringen nagegaan. Data met de locatie van alle slokkers in de gemeenten Gingelom en Sint-Truiden werden verkregen via Infrac;
- **CN waarden:** Deze werden berekend via de formules vermeld in §3.2.1 aan de hand van volgende databronnen en aannames (zie ook handleiding CN_WS model voor meer informatie):
 - o **CNmax:** Waarden afkomstig uit de standaard tabellen van de Natural Resources Conservation Service van de USDA (NRCS, 2010) en uit Van Oost (2003). Voor alle simulaties werd, tenzij expliciet vermeld, CN waarden geselecteerd van de hydrologische bodemgroep C (bodems met fijne texturen);
 - o **Verslempingsgraad:** Op basis van data uit Evrard et al. (2008);
 - o **Bodembedekkingsgraad:** Op basis van data uit Ruyschaert (2005) en Verbist et al. (2004).
- **Kalibratieparameters α en β :** Deze werden bepaald aan de hand van de kalibratie van het model op de Heulengracht (zie §2.3): $\alpha = 0,4$ en $\beta = 0,05$;
- **Perceelsconnectiviteit:** Standaard wordt voor de overgang naar akkerland een perceelsconnectiviteit aangenomen van 90% (10% van het water en sediment worden opgehouden aan de perceelgrens), terwijl de waarde voor overgang naar bos/grasland standaard op 30% wordt gezet (70% wordt opgehouden aan de grens; Notebaert et al., 2006);
- **K factor:** Deze raster dataset werd bekomen via het classificeren van de bodemkaart van Vlaanderen (AGIV) met behulp van informatie omtrent de link tussen bodemtextuur en de K factor (Notebaert et al., 2006). De K factor van klei vormt hierop een uitzondering, vermits Notebaert et al. zelf aangeven dat deze te hoog werd ingeschat. Deze K factor werd daarom aangepast aan de hand van Römkens et al. (1996). De uiteindelijke set van K factoren wordt weergegeven in Tabel 4-1.

Tabel 4-1 Bodemerosiviteitsfactor ($\text{kg h MJ}^{-1} \text{mm}^{-1}$) in functie van bodemtextuur in Vlaanderen.

Code bodemkaart	Bodemtextuur	K factor	Bron
A	Leem	42	Notebaert et al., 2006
L	Zandleem	40	Notebaert et al., 2006
P	Licht zandleem	25	Notebaert et al., 2006
S	Lemig zand	20	Notebaert et al., 2006
Z	Zand	12	Notebaert et al., 2006
E	Lichte klei	20	Römkens et al., 1996
U	Zware klei	20	Römkens et al., 1996
G	Stenige leem	25	Eigen aanname
I	Zeer stenig materiaal	0	Eigen aanname
V	Veen	12	Eigen aanname
	Antropogeen	0	Eigen aanname
M	Mergel	20	Eigen aanname
N	Krijt	20	Eigen aanname
X	Landduin	12	Eigen aanname

- **C factor:** De raster dataset met C factoren werd bekomen via het classificeren van de perceelskaart. Voor elk perceel werd de C factor bepaald in functie van het gewas en de maand waarin het neerslagevenement plaatsvond. Als basisdata hiervoor werd de set van C factoren afkomstig van ALBON gebruikt. Voor gewassen met een duidelijke variatie in de C factor doorheen het jaar, werden deze waarden aangepast op basis van simulaties van enkele voorname gewassen met het C factor model van prof. Gert Verstraeten (KULeuven).

De maandelijkse variatie van de C factor wordt voor deze gewassen weergegeven in Tabel 4-2;

Tabel 4-2 Variatie van de gewasfactor (C-factor) in functie van de maand voor enkele gewassen.

Gewas	Jan	Feb	Maa	Apr	Mei	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov	Dec	Gemiddelde
Aardappelen	0,50	0,55	0,75	0,70	0,75	0,30	0,10	0,07	0,07	0,20	0,35	0,40	0,40
Bieten	0,45	0,55	0,70	0,80	0,75	0,40	0,07	0,07	0,10	0,15	0,20	0,35	0,38
Maïs	0,35	0,50	0,60	0,70	0,85	0,60	0,35	0,35	0,35	0,25	0,30	0,30	0,46
Wintergraan	0,40	0,35	0,30	0,25	0,15	0,10	0,10	0,10	0,05	0,10	0,70	0,55	0,26
Witloof	0,60	0,70	0,75	0,80	0,85	0,55	0,15	0,10	0,25	0,35	0,45	0,55	0,51
Wortel	0,30	0,40	0,55	0,70	0,90	0,80	0,60	0,40	0,20	0,10	0,15	0,20	0,44

- **P factor:** Deze variabele wordt standaard op 1 gezet voor elke pixel, vermits reeds op een alternatieve, meer fysisch gebaseerde, manier rekening wordt gehouden met de verschillende soorten EBM in het model;
- **kTc:** Deze inputkaart werd eveneens gecreëerd via een classificatie van de perceelskaart, waarbij akkerland een waarde van 21 m krijgt toegewezen en bos/grasland een waarde van 7 m. Deze aannames zijn gebaseerd op de kalibratie uitgevoerd door Hanne De Brue (De Brue, 2016). Verder wordt de waarde 0 m toegekend aan alle vormen van open water met uitzondering van rivieren (bv. vijver, meer) zodat uit deze gesloten systemen geen sediment kan stromen. Tot slot krijgen rivieren, wegen en bebouwde oppervlakte een waarde van 9999 om aan te duiden dat sediment hier zeer gemakkelijk wordt doorgegeven;
- **ktil:** Deze inputkaart werd automatisch aangemaakt via het CN_WS model. Deze procedure bestaat uit een classificatie van de perceelskaart waarbij alle percelen met een C factor groter dan 0,01 (typische waarde voor grasland) een standaard waarde van $600 \text{ kg m}^{-1} \text{ jaar}^{-1}$ (Van Oost et al., 2000) kregen toegewezen. Voor andere percelen werd aangenomen dat hier geen bewerkingserosie plaatsvindt en is kttil met andere woorden gelijk aan nul;
- **PTEF:** Voor de parcel trapping efficiency werden de standaardwaarden gebruikt zoals vermeld in de handleiding van het WaTEM/SEDEM model, zijnde 0 voor akkerland en 75 voor zowel bos als weide;
- **Bufferbekkens/bufferende dammen:** Deze werden handmatig omgezet naar een raster bestand aan de hand van de ruimtelijke data i.v.m. gerealiseerde EBM afkomstig van ALBON en land-en-water.be. Voor de inputparameters per bufferbekken/bufferende dam werden volgende aannames gemaakt op basis van persoonlijke mededelingen van Karel Vandaele (land-en-water.be), prof. Gert Verstraeten (KULeuven) en Pieter Meert (KULeuven):
 - o Volume bufferbekken: schatting aan de hand van de dimensies van de ingetekende elementen in de originele shapefiles;
 - o Hoogte dam = 1 m voor bufferbekkens en 1,5 m voor bufferende dammen;
 - o Hoogte knijpopening = 0 m;
 - o Doorsnede knijpopening = $0,03 \text{ m}^2$ voor aarden dammen en $0,07 \text{ m}^2$ voor plantaardige dammen (voor plantaardige dammen werd een grotere waarde gekozen in vergelijking met aarden dammen om rekening te houden met de hogere doorlaatbaarheid voor water; deze waarde is een aanname en is niet gebaseerd op data);
 - o Discharge coefficient = 0,6;
 - o Breedte overloop = 7 m;
 - o Sediment trapping efficiency = 75%.
- **Geleidende dammen/grachten:** Ook deze elementen werden handmatig omgezet naar een raster bestand aan de hand van de ruimtelijke informatie rond gerealiseerde maatregelen van ALBON en land-en-water.be;

- **Uitlaat van stroomgebied:** Deze werd handmatig aangeduid op basis van de ligging van het meetstation (coördinaten afkomstig van www.waterinfo.be) en, indien nodig, gecorrigeerd na een eerste simulatie op basis van de kaart met totale afstroming (de uitlaat wordt op de plaats gelegd in de rivier met maximale afstroming);
- **Tijdstap voor modelberekeningen:** Standaard wordt een tijdstap van 15 seconden gebruikt.

4.3 Validatie bemeten stroomgebieden (Sedimentmeetnet)

4.3.1 Algemene evaluatie voor alle beschikbare bekken

De performantie van het CN_WS model werd getest via de simulatie van vier neerslagevenementen (twee in de zomer en twee in de winter) voor elk bemeten stroomgebied uit het Sedimentmeetnet (Van Hoestenbergh et al., 2008). De te simuleren neerslagevenementen werden gekozen op basis van de aanwezigheid van een duidelijke neerslagpiek en een duidelijke respons voor zowel afstroming als sedimentafvoer. De stroomgebieden behoren tot het Demerbekken en het Bovenscheldebekken en verschillen onderling sterk in grootte en hoeveelheid afstroming (zie [Tabel 4-3](#)). De simulaties voor het Demerbekken werden uitgevoerd voor het jaar 2008, terwijl voor het Bovenscheldebekken gekozen werd voor de periode oktober 2013 – oktober 2014.

Tabel 4-3 Algemene kenmerken van de bemeten stroomgebieden gebruikt voor de validatie van het CN_WS model.

Naam stroomgebied	Waterloop	Bekken	Grootte stroomgebied (ha)	Gemiddelde baseflow (m ³ s ⁻¹)
Velm	Molenbeek	Demer	3049	0,072
Wellen	Herk	Demer	10717	0,263
Borlo	Molenbeek	Demer	336	0,000
Kerniel	St.-Annabeek	Demer	171	0,005
Muizen	Cicindria	Demer	1599	0,024
Mielen-boven-Aalst	Melsterbeek	Demer	859	0,011
Neerwinden	Waarbeek	Demer	257	0,000
Heks	Herkebeek	Demer	1115	0,038
Piringen	Fonteinbeek	Demer	773	0,035
Leupegem	Maarkebeek	Bovenshelde	5032	0,168
Etikhove	Marie Borrebeek	Bovenshelde	271	0,019
Donderij	Molenbeek	Bovenshelde	389	0,028
Broekbeek	Broekbeek	Bovenshelde	209	0,018
Maarke-kerkem	Maarkebeek	Bovenshelde	2803	0,090
Vaanbuikbeek	Vaanbuikbeek	Bovenshelde	220	0,021
Huise	Wallebeek	Bovenshelde	486	0,034

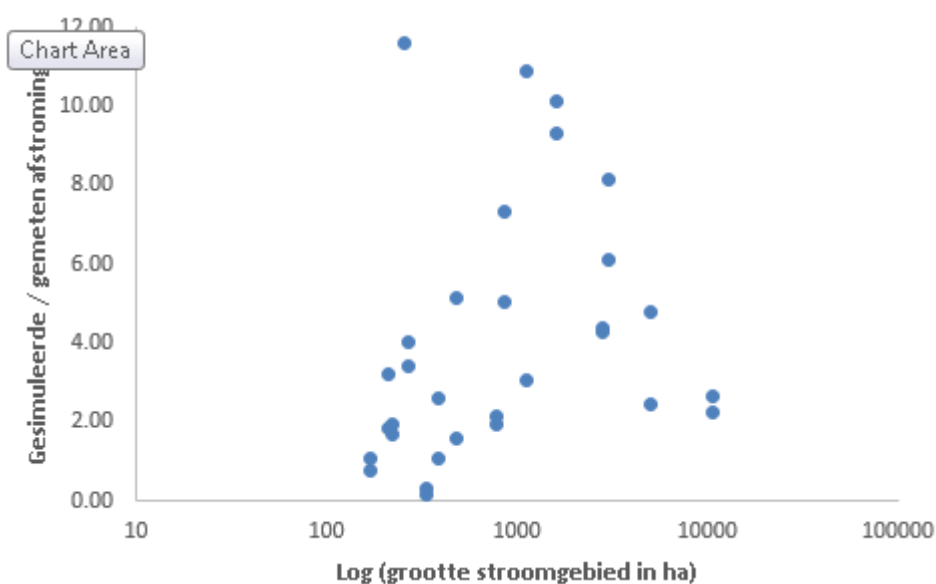
Vooraleer de modelresultaten konden worden vergeleken met de metingen, diende de zogenaamde *baseflow*, i.e. de continue stroming in een waterloop afkomstig van het grondwater, verwijderd te worden uit de gemeten hydrograaf, vermits dit niet door het CN_WS model wordt gesimuleerd. Hiervoor werd de tool WETSPRO (Willems, 2009) gebruikt. In [Tabel 4-4](#) wordt de overeenkomst tussen de model- en meetresultaten, voor zowel de totale hoeveelheid afstroming als de totale sedimentvracht aan de uitlaat van het bekken, voor alle gesimuleerde evenementen weergegeven.

Tabel 4-4 Overeenkomst tussen model- en meetresultaten voor alle gesimuleerde evenementen voor de totale hoeveelheid afstroming en de totale sedimentvracht aan de uitlaat van het stroomgebied, in functie van de verhouding tussen de gemeten afstroming en neerslag. De gemiddelde waarden stellen gewogen gemiddelden voor op basis van de totale hoeveelheid water en sediment. *Meest recente resultaten (juni 2016).*

Stroomgebied	Seizoen	Evenement	Model / meting (afstroming)	Model / meting (sediment)	Afstroming / neerslag
Velm	Winter	01/02/2008	2,14	2,17	0,028
Velm	Winter	06/02/2008	3,02	5,01	0,029
Velm	Zomer	04/06/2008	8,13	1,55	0,021
Velm	Zomer	28/07/2008	6,10	3,81	0,030
Gemiddelde			5,91	2,83	0,027
Wellen	Winter	01/02/2008	0,59	0,83	0,079
Wellen	Winter	06/02/2008	0,77	2,86	0,081
Wellen	Zomer	04/06/2008	2,26	0,97	0,076
Wellen	Zomer	28/07/2008	2,65	7,26	0,051
Gemiddelde			1,95	2,60	0,072
Borlo	Winter	01/02/2008	0,32	1,69	0,019
Borlo	Winter	06/02/2008	0,17	3,23	0,042
Borlo	Zomer	04/06/2008	0,16	1,79	0,069
Borlo	Zomer	28/07/2008	0,33	3,55	0,032
Gemiddelde			0,21	2,76	0,040
Kerniel	Winter	01/02/2008	0,22	0,21	0,133
Kerniel	Winter	06/02/2008	0,34	1,07	0,105
Kerniel	Zomer	04/06/2008	1,07	0,17	0,130
Kerniel	Zomer	28/07/2008	0,78	0,49	0,103
Gemiddelde			0,79	0,34	0,118
Muizen	Winter	01/02/2008	1,44	0,77	0,047
Muizen	Winter	06/02/2008	1,94	1,04	0,051
Muizen	Zomer	04/06/2008	9,34	3,00	0,020
Muizen	Zomer	28/07/2008	10,12	-	0,020
Gemiddelde			6,37	1,92	0,034
Mielen	Winter	01/02/2008	0,63	0,14	0,063
Mielen	Winter	06/02/2008	0,72	0,23	0,079
Mielen	Zomer	04/06/2008	5,02	0,29	0,036
Mielen	Zomer	28/07/2008	7,36	10,57	0,017
Gemiddelde			3,55	0,75	0,049
Neerwinden	Winter	01/02/2008	3,87	20,17	0,012
Neerwinden	Winter	06/02/2008	3,52	9,00	0,018
Neerwinden	Zomer	04/06/2008	11,61	2,78	0,013
Neerwinden	Zomer	28/07/2008	71,68	576,75	0,002
Gemiddelde			14,57	9,67	0,011
Heks	Winter	01/02/2008	0,38	-	0,049
Heks	Winter	06/02/2008	0,37	-	0,068
Heks	Zomer	04/06/2008	10,92	2,03	0,012
Heks	Zomer	28/07/2008	3,08	1,63	0,027
Gemiddelde			3,15	1,71	0,039
Piringen	Winter	01/02/2008	0,18	0,16	0,269
Piringen	Winter	06/02/2008	0,24	1,40	0,283
Piringen	Zomer	04/06/2008	2,14	25,20	0,098
Piringen	Zomer	28/07/2008	1,96	1,06	0,096
Gemiddelde			1,22	1,17	0,187
Leupegem	Winter	23/12/2013	0,52	0,29	0,362
Leupegem	Winter	27/12/2013	0,40	0,14	0,387
Leupegem	Zomer	10/08/2014	4,77	27,41	0,036
Leupegem	Zomer	25/08/2014	2,46	3,29	0,055
Gemiddelde			0,84	0,78	0,210
Etikhove	Winter	23/12/2013	0,49	0,19	0,512
Etikhove	Winter	27/12/2013	0,46	0,14	0,452

Etikhove	Zomer	28/06/2014	3,44	40,60	0,046
Etikhove	Zomer	09/07/2014	4,01	15,10	0,072
Gemiddelde			0,98	0,51	0,271
Donderij	Winter	23/12/2013	0,36	0,24	0,605
Donderij	Winter	27/12/2013	0,36	0,15	0,508
Donderij	Zomer	10/08/2014	2,62	3,74	0,073
Donderij	Zomer	25/08/2014	1,08	2,05	0,139
Gemiddelde			0,59	0,60	0,331
Broekbeek	Winter	23/12/2013	0,76	0,77	0,259
Broekbeek	Winter	27/12/2013	0,63	0,52	0,246
Broekbeek	Zomer	10/08/2014	3,22	14,44	0,056
Broekbeek	Zomer	25/08/2014	1,83	5,65	0,077
Gemiddelde			1,11	2,015	0,160
Maarke-kerkem	Zomer	02/06/2008	4,37	8,87	0,115
Maarke-kerkem	Zomer	03/08/2008	4,26	4,25	0,121
Maarke-kerkem	Winter	21/11/2008	0,90	0,49	0,043
Maarke-kerkem	Winter	09/12/2008	0,63	-	0,024
Gemiddelde			1,66	3,59	0,076
Vaanbuikbeek	Zomer	02/06/2008	1,94	0,91	0,164
Vaanbuikbeek	Zomer	03/08/2008	1,67	-	0,206
Vaanbuikbeek	Winter	21/11/2008	0,50	2,54	0,068
Vaanbuikbeek	Winter	09/12/2008	0,27	1,77	0,043
Gemiddelde			0,77	0,95	0,120
Huise	Zomer	02/06/2008	1,61	0,61	0,234
Huise	Zomer	03/08/2008	5,14	24,53	0,447
Huise	Winter	21/11/2008	0,50	0,33	0,119
Huise	Winter	09/12/2008	0,21	0,07	0,020
Gemiddelde			0,69	0,54	0,205
Totaal gemiddelde			1,49	1,38	-

Uit *Tabel 4-4* blijkt dat de gemeten afstroming in het algemeen goed wordt gesimuleerd door het model en vaker wordt overschat dan onderschat. Deze overschatting kan door verschillende factoren worden veroorzaakt. Zo wordt in de uitgevoerde simulaties geen rekening gehouden met de riolering, die een gedeelte van het water ondergronds kan afvoeren naar een ander bekken. Het potentiële effect van de riolering wordt in de gevoeligheidsanalyse (§0) verder nagegaan. De gemeten afstroming wordt voornamelijk overschat in stroomgebieden gelegen in het Demerbekken en dan vooral in de zomer. Een mogelijke verklaring hiervoor zou kunnen zijn dat de CN waarden voor dit stroomgebied en dit seizoen in het algemeen te hoog werden ingeschat. Ook dit zal in §0 verder onderzocht worden. Een welgekend probleem bij de simulatie van afstroming in grotere gebieden is het zogenaamde schaaleffect. Dit betekent dat een stroomgebied niet simpelweg kan beschouwd worden als de som van alle individuele velden in het gebied. Vermits een afstromingsmodel vaak wordt gekalibreerd op basis van gedetailleerde data binnen kleine gebieden, kan dit tot afwijkingen leiden bij de simulatie van grotere gebieden (Cerdan et al, 2004). Uit *Figuur 4-1* kan worden afgeleid dat dit schaaleffect in beperkte mate speelt, maar dat dit zeker niet de hoofdverklaring kan vormen voor de geobserveerde afwijkingen tussen model en metingen.

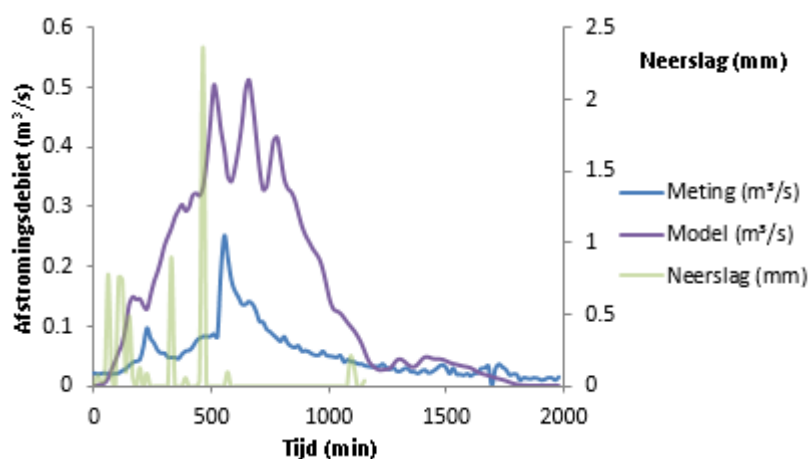


Figuur 4-1 Afwijking tussen modelresultaat en meting voor totale afstroming voor alle gesimuleerde zomerevenementen in alle bemeten stroomgebieden in functie van de grootte van het stroomgebied.

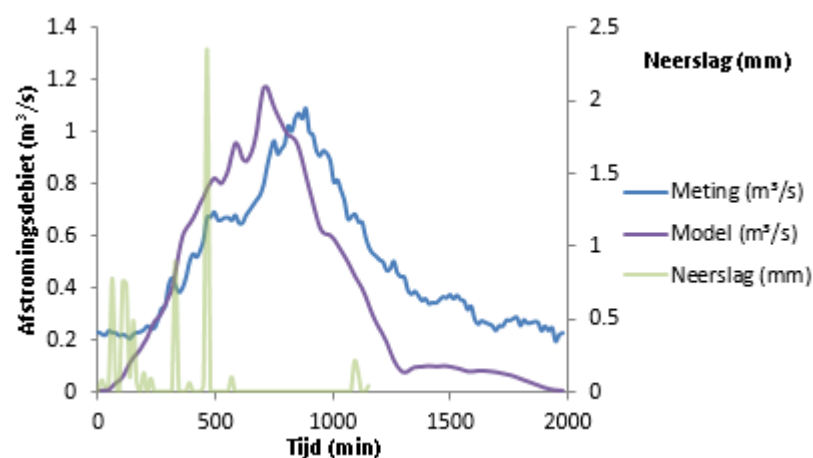
Een laatste mogelijke verklaring voor de afwijkingen in de modelresultaten kan gevonden worden in de onnauwkeurigheid van de gebruikte neerslagdata. Alle simulaties per hydrografisch bekken werden uitgevoerd op basis van de neerslag gemeten in één meetstation. Voor stroomgebieden die ver gelegen zijn van dit meetstation zijn deze gegevens waarschijnlijk niet geheel representatief (zie Voortgangsrapport 3, [Figuur 2-12](#)). Het probleem van de neerslagdata kan bovendien duidelijk worden aangetoond door voor elk evenement de verhouding tussen de gevallen neerslag en de effectief gemeten afstroming aan de uitlaat van het stroomgebied te berekenen (zie [Tabel 4-4](#)). Theoretisch bedraagt deze waarde (afstroming/neerslag) slechts enkele procenten en zou deze niet sterk mogen variëren binnen hetzelfde seizoen voor eenzelfde gebied. In realiteit zien we echter duidelijke afwijkingen met duidelijke gevolgen voor de modelperformantie. Een uitzonderlijk kleine waarde voor de verhouding afstroming/neerslag duidt erop dat er in werkelijkheid minder neerslag viel in vergelijking met de gemeten neerslag. Deze hogere neerslaginput geeft op zijn beurt aanleiding tot een sterke overschatting van de afstroming door het model. Het omgekeerde geldt in geval van onderschatting door het model. Dit alles duidt op het belang van nauwkeurige en representatieve inputgegevens voor een goede modelsimulatie. Voor toekomstige kalibraties is het daarom ook aangewezen om enkel met evenementen te werken die ongeveer eenzelfde afstroming/neerslag verhouding hebben. Hierdoor wordt een extra onzekere factor uit de kalibratie verwijderd. Tot slot worden nog enkele voorbeelden van gesimuleerde hydrogrammen weergegeven in [Figuur 4-2](#). Hieruit blijkt dat de modelresultaten in het algemeen goed de neerslagdynamiek volgen. Hetzelfde kan echter niet steeds gezegd worden van de gemeten hydrogrammen, hetgeen wijst op de inherente onzekerheid in de meetgegevens, zowel neerslag als afstroming.

Uit [Tabel 4-4](#) blijkt dat de totale sedimentvracht aan de uitlaat van het bekken gemiddeld genomen in goed door het model wordt voorspeld, ondanks de soms sterke afwijkingen tussen modelresultaten en metingen voor individuele neerslagevenementen. Het model presteert vooral goed voor de gebieden waar WaTEM/SEDEM in het verleden uitvoerig getest en gekalibreerd werd (Velm, Wellen, Borlo, Muizen). De sterkst afwijkende resultaten vinden we terug voor Neerwinden en Mielen. De resultaten voor het Bovenscheldebekken, te beschouwen als een onafhankelijke validatie van het WS model, dat hoofdzakelijk werd gekalibreerd via data uit Zuid-Limburg, zijn veelbelovend. Naar analogie met afstroming zien we ook hier dat de totale sedimentvracht vooral wordt overschat in de zomer en onderschat in de winter. In [Figuur 4-3](#) worden enkele specifieke voorbeelden van gesimuleerde sedigrammen weergegeven. Hieruit blijkt dat de lineaire verdeling van de totale sedimentvracht over het gesimuleerde hydrogram, zoals uitgevoerd door het CN_WS model, in het algemeen tot goede resultaten leidt (i.e. overeenkomst tussen pieken).

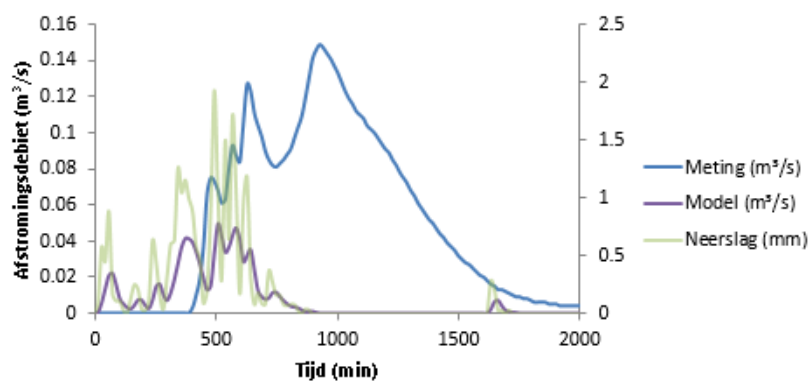
In vergelijking met andere modellen die de afstroming van water en sediment kunnen simuleren ten gevolge van een regenbui doet ons CN_WS model zeker niet onder, en in veel gevallen zelfs beter (zie Jetten et al., 1999). De matige validatieresultaten in Jetten et al. (1999) duiden op de grote onnauwkeurigheid die typisch geassocieerd is met het simuleren van individuele buien. Tegenover de modellen aangehaald in dit onderzoek heeft het CN_WS model bovendien het grote voordeel dat het in staat is om de relatieve impact van EBM op afstroming van water en sediment op een eenvoudige manier te simuleren. Dit laatste wordt verder gedemonstreerd in §4.6.



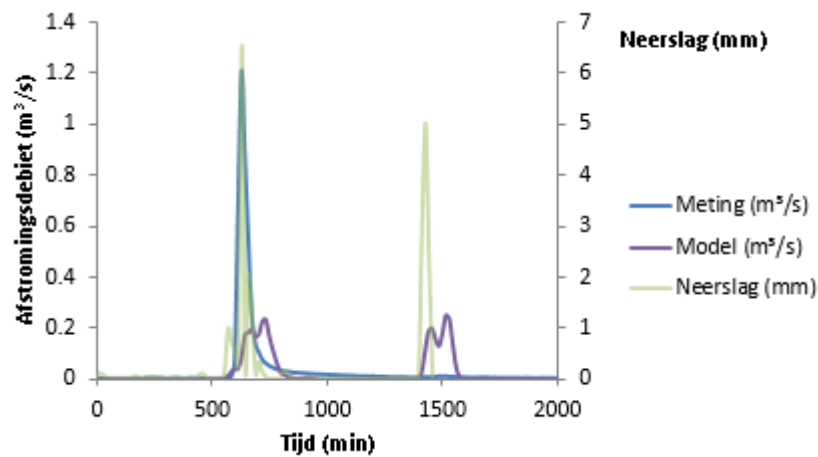
(a) Velm – Februari 2008. $R^2 = -12,58$; RMSE = 0,16.



(b) Wellen – Februari 2008. $R^2 = 0,26$; RMSE = 0,22.

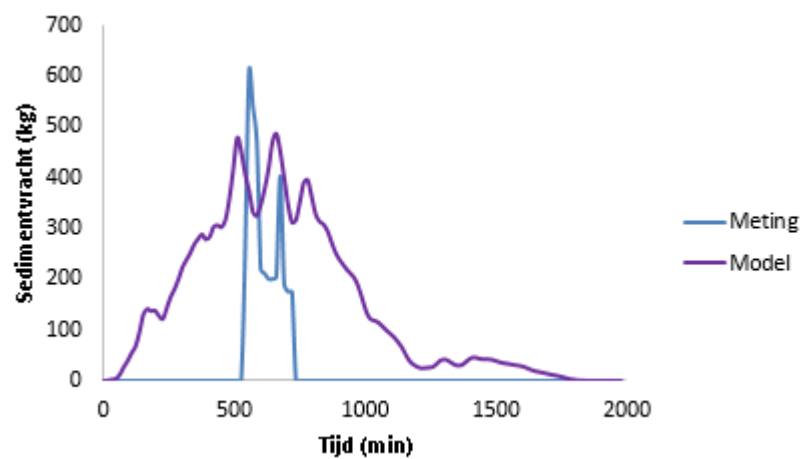


(c) Borlo – Juni 2008. $R^2 = -0,42$; RMSE = 0,05.

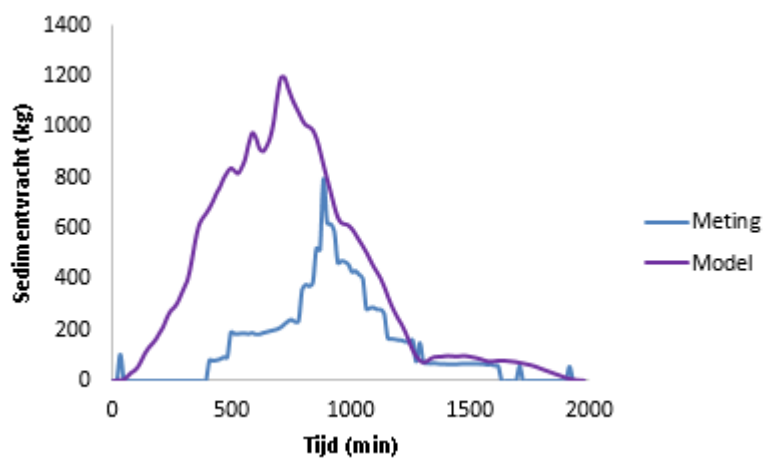


(d) Kerniel – Juli 2008. $R^2 = 0,11$; RMSE = 0,12.

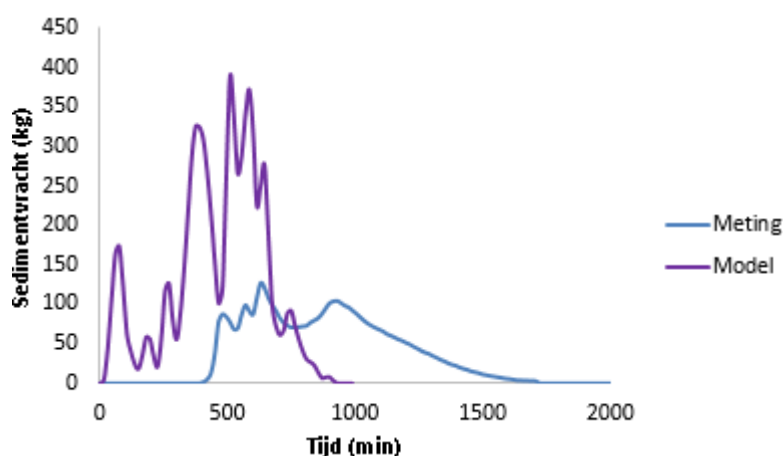
Figuur 4-2 Voorbeelden van gesimuleerde hydrogrammen (afstromingsdebiet in functie van de tijd) voor verschillende evenementen.



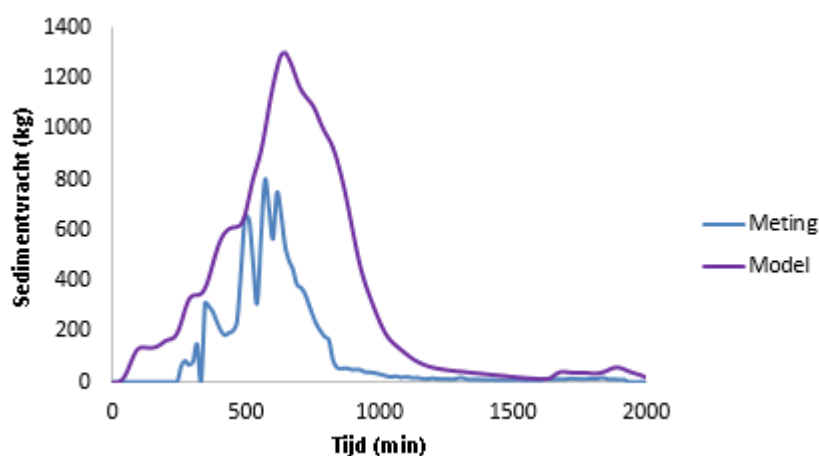
(a) Velm – Februari 2008. $R^2 = -2,11$; RMSE = 174,66.



(b) Wellen – Februari 2008. $R^2 = -4,59$; RMSE = 390,75.



(c) Borlo – Juni 2008. $R^2 = -4,76$; RMSE = 85,90.



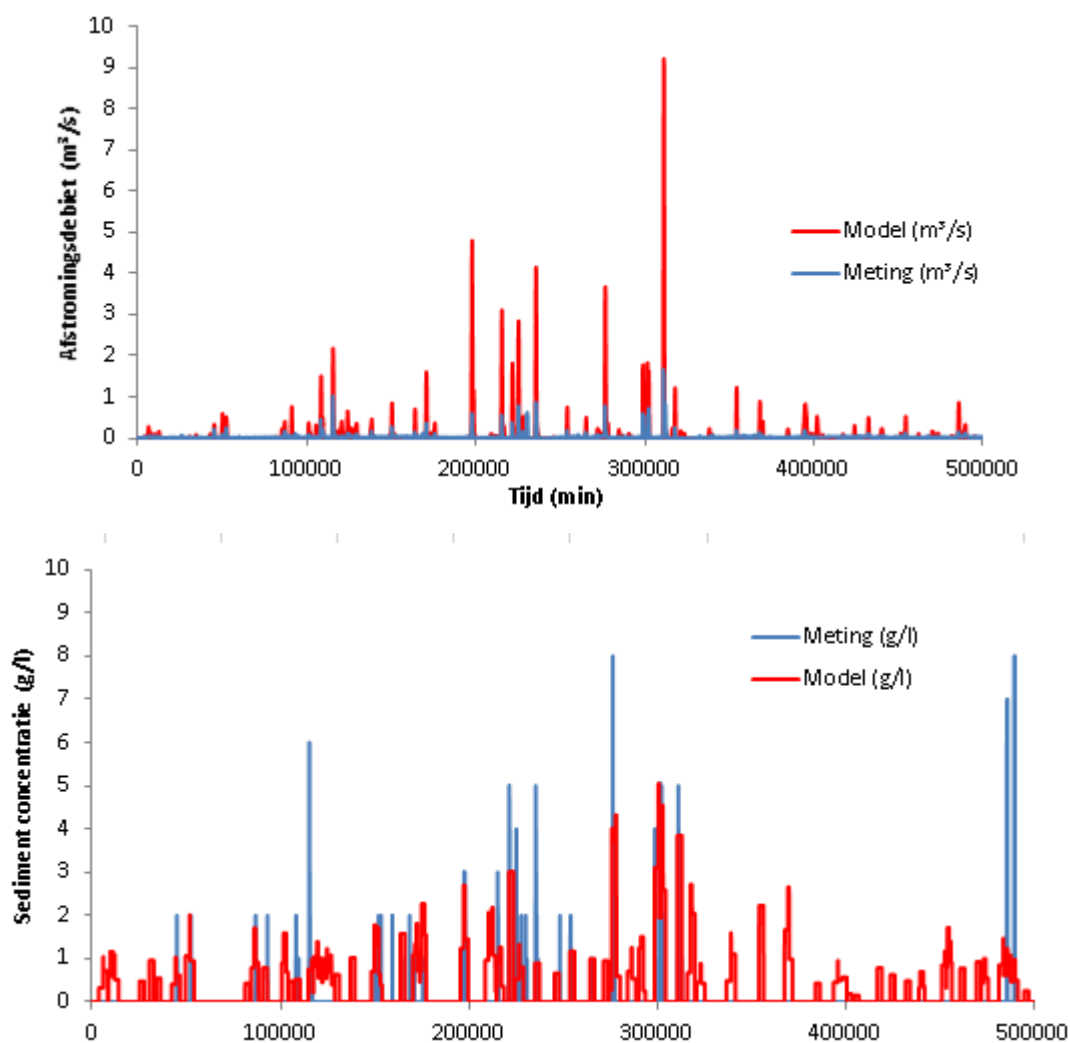
(d) Muizen – Juni 2008. $R^2 = -1,94$; RMSE = 276,26.

Figuur 4-3 Voorbeelden van gesimuleerde sedigrammen (sedimentvracht in functie van de tijd) voor verschillende evenementen.

Verder werd ook de lange termijnversie van het CN_WS model (§-o) toegepast op elk bemeten stroomgebied voor de periode van 1 jaar. De afwijking tussen model en meting voor de totale afstroming en sedimentoutput wordt weergegeven in [Tabel 4-5](#) en ziet er in het algemeen zeer goed uit, met uitzondering van een aantal kleinere gebieden zoals Kerniel en Neerwinden. Een voorbeeld van een hydrogram en sedigram voor Velm wordt getoond in [Figuur 4-4](#). Er dient gewezen te worden op het feit dat voor deze simulaties gewerkt werd met ruwe data uit het sedimentmeetnet. Dit wil zeggen dat er events in rekening worden gebracht waarvoor de gemeten data niet overeenkomt met de realiteit door bijvoorbeeld verschillen in neerslagkarakteristieken tussen het meetstation en de bekkens, zoals hierboven besproken.

Tabel 4-5 Overeenkomst tussen model- en meetresultaten voor de totale hoeveelheid afstroming en de totale sedimentvracht over een periode van één jaar aan de uitlaat van het stroomgebied. *Meest recente resultaten (juni 2016).*

Stroomgebied	Periode	Model / meting (afstroming)	Model / meting (sediment)
Velm	Jan 2008 – Dec 2008	2,43	5,17
Wellen	Jan 2008 – Dec 2008	1,10	3,55
Borlo	Jan 2008 – Dec 2008	0,15	2,20
Kerniel	Jan 2008 – Dec 2008	0,37	0,21
Muizen	Jan 2008 – Dec 2008	3,68	2,27
Mielen	Jan 2008 – Dec 2008	1,65	0,76
Neerwinden	Jan 2008 – Dec 2008	15,14	47,18
Heks	Jan 2008 – Dec 2008	0,89	0,46
Piringen	Jan 2008 – Dec 2008	0,53	0,75
Leupegem	Okt 2013 – Sept 2014	1,12	2,45
Etikhove	Okt 2013 – Sept 2014	0,97	1,36
Donderij	Okt 2013 – Sept 2014	0,84	1,22
Broekbeek	Okt 2013 – Sept 2014	1,05	5,12
Maarke-kerkem	Jan 2008 – Dec 2008	1,07	1,09
Vaanbuikbeek	Jan 2008 – Dec 2008	0,58	1,77
Huise	Jan 2008 – Dec 2008	0,63	0,54



Figuur 4-4 Voorbeeld van gesimuleerd hydrogram en sedigram voor een periode van één jaar voor het stroomgebied Velm.

Tot slot werd de lange termijnversie van het CN_WS model nog toegepast op twee stroomgebieden die geen deel uitmaken van het Sedimentmeetnet, namelijk Mangelbeek (5337 ha) en Kerkebeek (6366 ha). Voor het stroomgebied van de Mangelbeek werd de periode januari – oktober 2008 gesimuleerd (periode met gedetailleerde meetgegevens voor water). De overeenkomst tussen model en meting voor de afstroming van water, uitgedrukt aan de hand van de ratio model/meting, bedraagt hier 0,73. De totale sedimentoutput voor de gesimuleerde periode bedraagt 696.595 kg. Voor het stroomgebied van de Kerkebeek werd het jaar 2008 volledig doorgerekend. Er werd een totale sedimentoutput van 2.683.367 kg bekomen door het model. Voor de Kerkebeek zijn er geen gedetailleerde meetgegevens beschikbaar. Echter, uit de geruimde hoeveelheden sediment uit de zandvang op de Kerkebeek in 2012 kan echter wel een inschatting worden gemaakt van de totale jaarlijkse sedimentoutput, vermits deze zandvang ook in 2011 werd geruimd. De geruimde hoeveelheid in 2012 bedroeg 678 m³, oftewel 881.400 kg, wat een verhouding model/meting van 3,04 oplevert. De resultaten zullen wel ter beschikking gesteld worden van Antea voor een verdere analyse van sedimenttransport doorheen de waterloop.

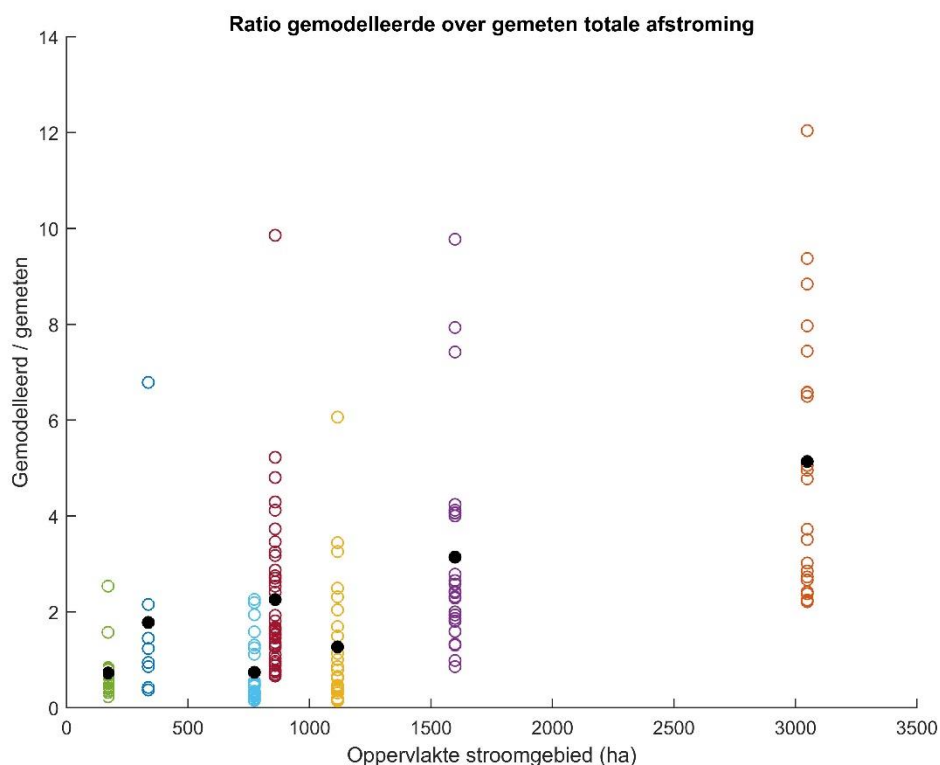
4.3.2 Detailanalyse voor de bekkens in zuid Limburg

4.3.2.1 Algemene trends in oppervlakkige afstroming

Zoals besproken in de vorige paragraaf zijn er voor meerdere neerslagevents discrepanties tussen de neerslagdata en data van afstroming uit de stroomgebieden. Daarom werd alle beschikbare data van neerslag en oppervlakkige afstroming uit 2008 voor alle bekkens in zuid Limburg in detail geanalyseerd en werden enkel neerslagevents weerhouden waarvoor een realistische afstromingsratio (de ratio van de totale afstroming over de totale neerslag) een realistische waarde heeft (0 – 10%).

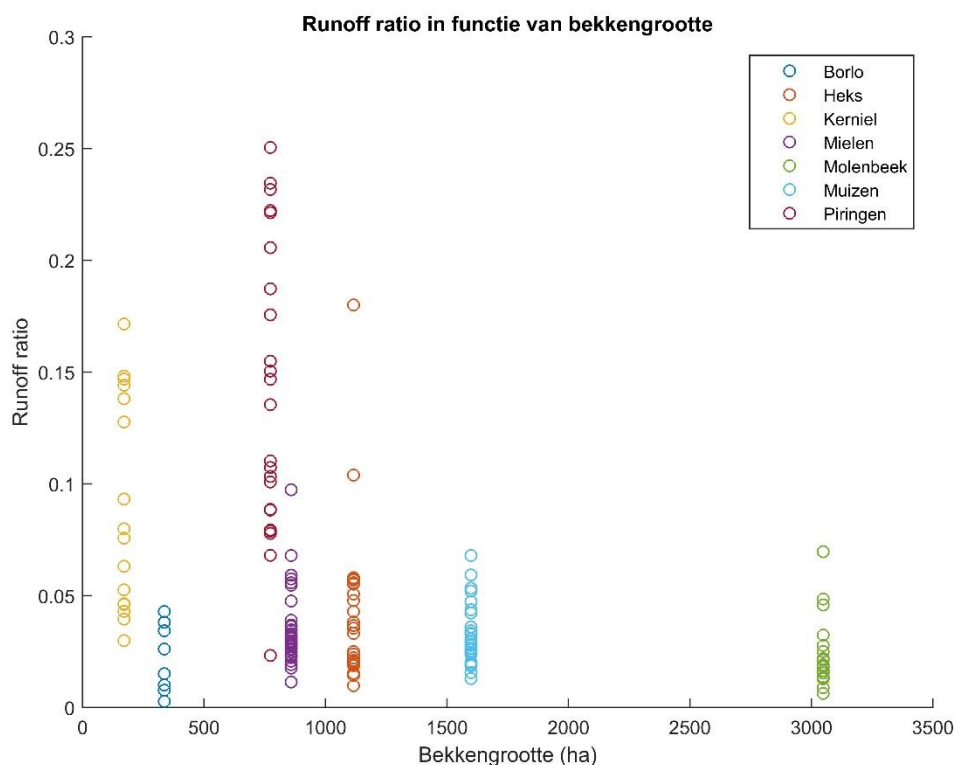
Op basis van deze analyses bleek dat er stroomgebieden waren waarvoor geen enkel realistische combinatie van neerslag – afstroming werd geregistreerd (Neerwinden en Wellen). Voor de andere bekkens (Borlo, Herks, Kerniel, Mielen, Molenbeek, Muizen en Piringen) werd de data voor alle realistische afstromingsevents in 2008 (167 events in totaal) verzameld en gebruikt voor een gedetailleerde analyse van de simulaties van CN_WS. Voor de analyses werden de kalibratieparameters gebruikt zoals eerder bepaald (alpha = 0,4 en beta = 0,05). De metingen die gebruikt werden voor de analyses zijn gecorrigeerd voor baseflow, zoals besproken in de vorige paragraaf. De overige inputdata is identiek aan de data die werd gebruikt voor de analyses in de vorige paragraaf, waarbij zowel de C-factoren als CN-waarden werden gevarieerd per seizoen.

De resultaten van alle simulaties voor de totale hoeveelheid gemodelleerde oppervlakkige afstroming door CN_WS worden weergegeven als de ratio van gemodelleerde tot gemeten afstroming in [Figuur 4-5](#). Hier is deze maat voor alle events weergegeven in functie van de grootte van de bekkens. Een waarde groter dan 1 duidt dus op een overschatting van de gemodelleerde oppervlakkige afvoer, een waarde kleiner dan 1 op een onderschatting. Op basis van [Figuur 4-5](#) kunnen verschillende observaties worden gemaakt. Ten eerste kan worden gezien dat het model de gesimuleerde hoeveelheid afstroming gemiddeld vaker overschat dan onderschat. Ten tweede wordt deze overschatting groter met de bekkengrootte (de zwarte bollen geven de gemiddelde ratio per bekken weer). Verder is er per bekken een grote variabiliteit in de ratio van gemodelleerde over gemeten afstroming. De variabiliteit neemt ook toe met de bekkengrootte.



Figuur 4-5 De ratio van de gemodelleerde over gemeten totale afstroming versus bekkengrootte voor 167 gesimuleerde neerslagevents in de bekkens van zuid Limburg (Borlo, Herks, Kerniel, Mielen, Molenbeek, Muizen en Piringen) voor het jaar 2008.

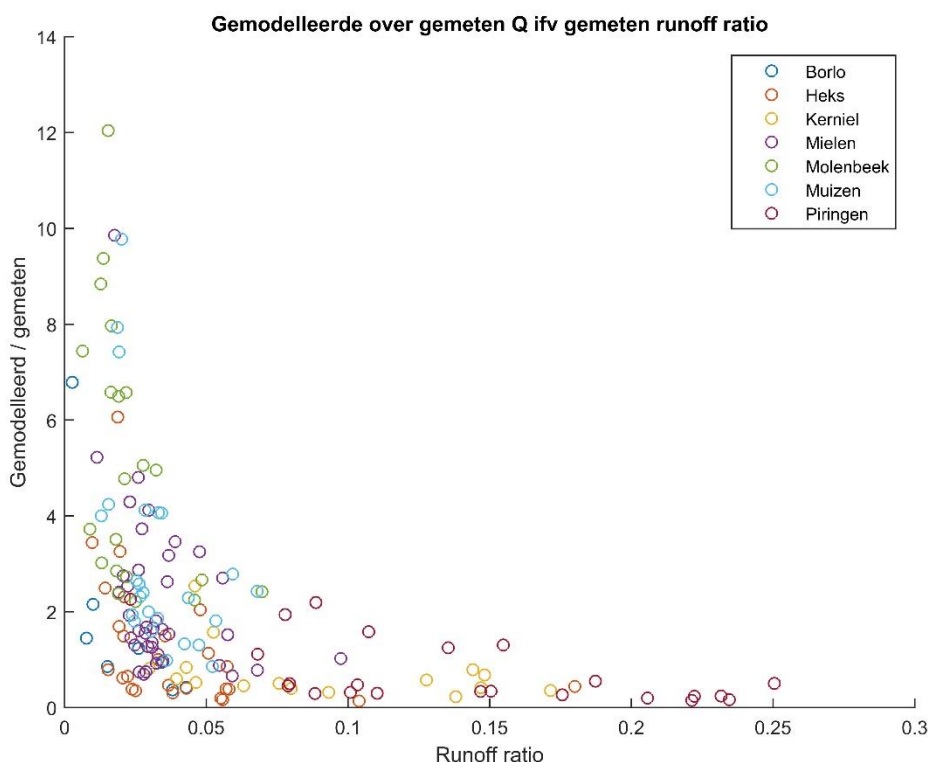
Uit *Figuur 4-5* blijkt dat de gemiddelde gesimuleerde afstroming de gemeten afstroming benadert voor bekkens die kleiner zijn dan 1500 ha (15 km²). Voor grotere bekkens is er echter een duidelijke overschatting van de gesimuleerde afstroming door CN_WS ten opzichte van de metingen. Deze observatie is niet verwonderlijk. In de eerste plaats zijn er in grote stroomgebieden relatief meer belangrijke mechanismen die zorgen voor de evacuatie van water uit de stroomgebieden bovenop oppervlakkige afstroming. Een voorbeeld hiervan is de afvoer van water via rioleringen, die in deze simulaties niet in rekening is gebracht. Een andere oorzaak is het feit dat de connectiviteit tussen hellingen en waterlopen afneemt met een toenemende bekkengrootte, waardoor de verliezen van water langheen het stroompad groter zijn in vergelijking met kleinere bekkens. Als gevolg van deze effecten neemt de ratio van de totale afstroming tot totale neerslag dan ook af met toenemende bekkengrootte (Cerdan et al. 2004). Dit is ook het geval voor de bekkens in Zuid Limburg, zoals getoond in *Figuur 4-6*.



Figuur 4-6 Afstromingsratio (de verhouding van de totale hoeveelheid afstroming ten opzichte van de totale hoeveelheid neerslag) voor alle events ten opzichte van de grootte van de bekken in Zuid Limburg voor neerslag events in 2008.

Om meer inzicht te krijgen in de mechanismen die verantwoordelijk zijn voor de overschatting van de gesimuleerde hoeveelheid afstroming wordt de verhouding van gesimuleerde tot totale afstroming weergegeven in functie van de gemeten afstromingsratio's (verhouding van de totale hoeveelheid afstroming tot de totale hoeveelheid neerslag) (Figuur 4-7). De afstromingsratios die worden weergegeven in deze grafiek zijn gebaseerd op metingen door het sedimentmeetnet. Deze figuur geeft duidelijk weer dat de neerslag events die sterk worden overschat allen gekenmerkt zijn door een lage afstromingsratio. Zo is te zien dat alle events die met een factor 3 of meer worden overschat door CN_WS gekenmerkt zijn door afstromingsratios kleiner dan 0.05. Verder toont deze figuur dat bijna alle events die worden overschat door een factor 4 of meer afkomstig zijn uit de grootste stroomgebieden (Muizen en Molenbeek). Een overschatting van het model is te wijten aan het feit dat het model veel oppervlakkige afstroming simuleert terwijl in het bekken de drempelwaarde voor het optreden van oppervlakkige afstroming niet is overschreden. Dit wordt in het model niet volledig in rekening gebracht voor de grootste bekken. Dit komt omdat de parameters die worden gebruikt, zoals het curve getal, bepaald zijn voor een kleine oppervlakte en hier lineair worden herschaald naar zeer grote gebieden. Verder is het mogelijk dat de overschatting gedeeltelijk te wijten is aan meetfouten in het veld of aan een overschatting van de hoeveelheid baseflow die is afgetrokken van de hydrogrammen waarmee de resultaten werden vergeleken.

Op basis van deze resultaten blijkt dat het model de hoeveelheid afstroming op event-basis goed simuleert voor kleine bekken (< 15 km²). Voor grotere stroomgebieden wordt de hoeveelheid oppervlakkige afstroming echter gemiddeld overschat. Aangezien de gemiddelde overschatting bekend is voor bekken van verschillende grootte kan een correctiefactor in functie van de grootte van het stroomgebied hier een oplossing bieden. Echter, in een volgende studie kan hier op worden ingespeeld en kunnen verschillende mechanismen die verantwoordelijk zijn voor de geobserveerde patronen worden toegevoegd aan het model of kunnen de correctiefactoren meer accuraat worden geschat.

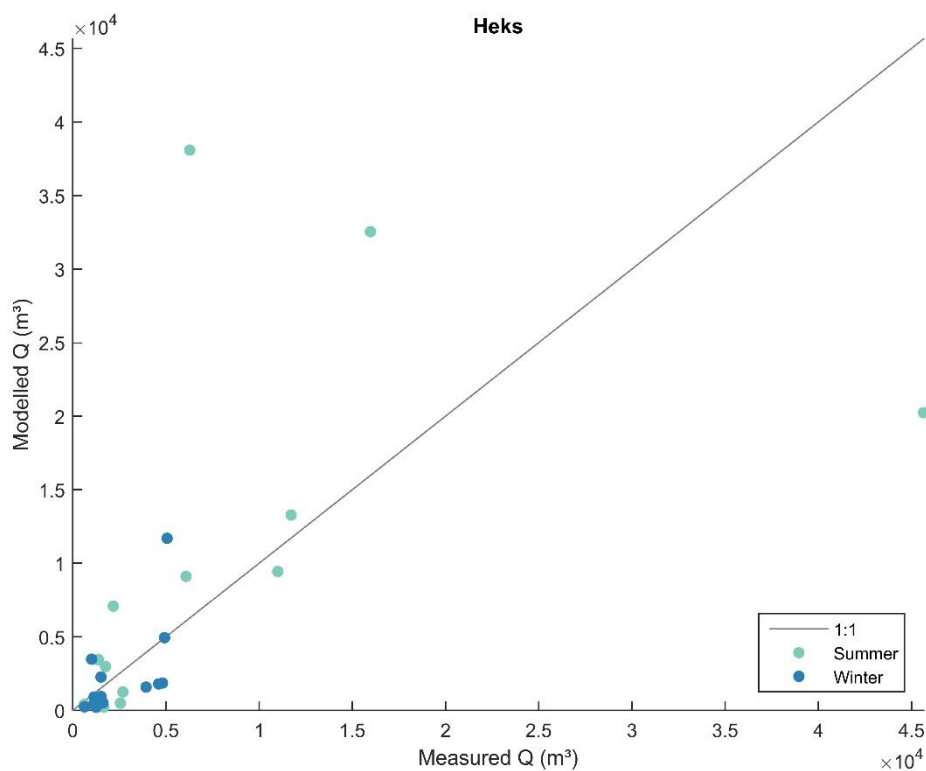


Figuur 4-7 De verhouding van de gesimuleerde tot de gemeten totale afstroming in functie van de gemeten runoff ratio voor de gesimuleerde events in de bekken in zuid Limburg voor het jaar 2008.

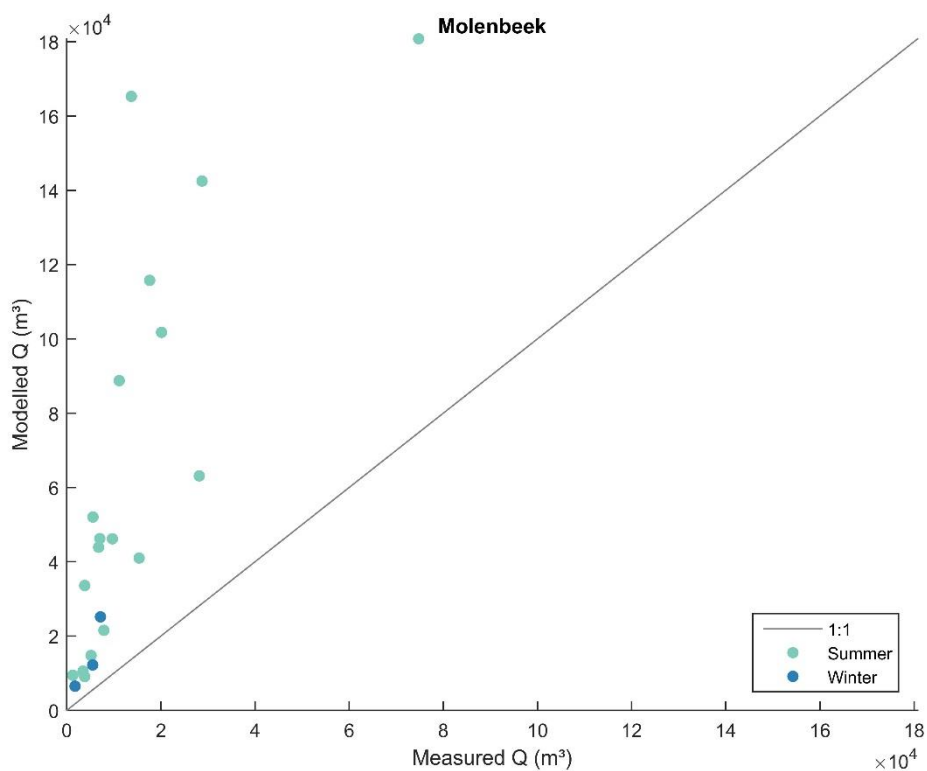
4.3.2.2 Oppervlakkige afstroming op bekvenschaal

Naast de resultaten voor alle bekken samen kunnen er uit de resultaten per bekken verschillende conclusies worden getrokken met betrekking tot de performantie van CN_WS. In [Figuur 4-8](#) [Figuur 4-9](#) worden representatieve resultaten voor twee stroomgebieden weergegeven (Heks en Molenbeek), de resultaten voor de alle bekken zijn weergegeven in Bijlage 2.

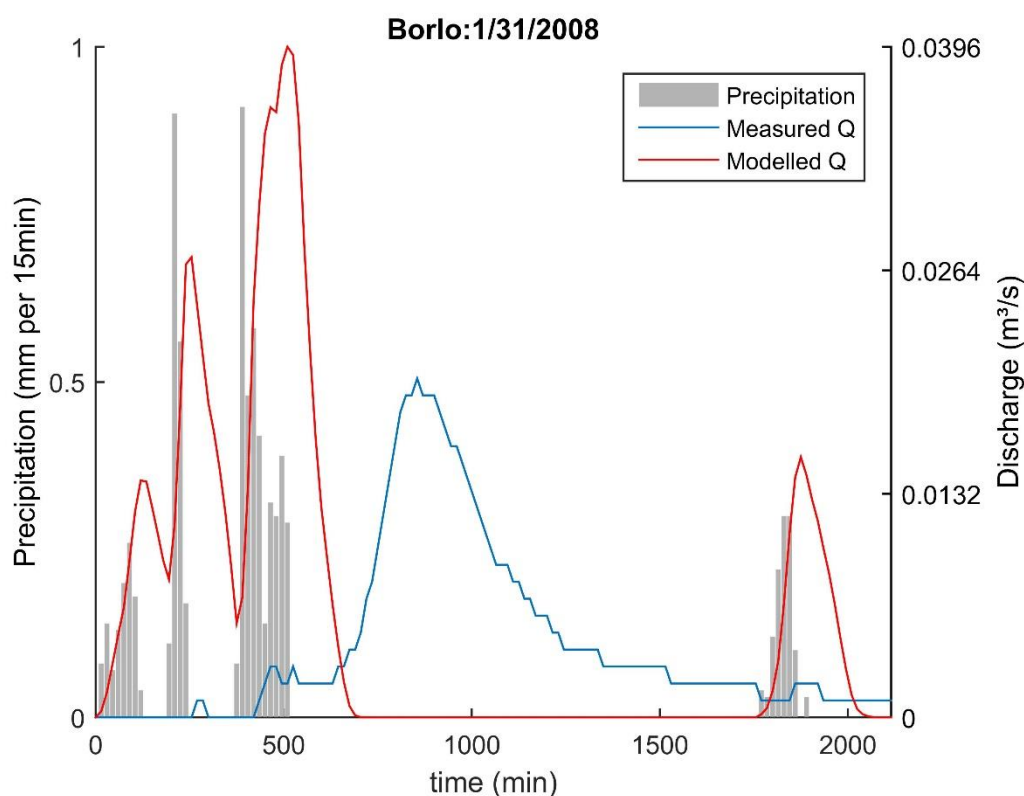
Voor het (relatief) kleine bekken van Heks ligt de gemodelleerde hoeveelheid afstroming dicht bij de 1:1 lijn, met uitzondering van enkele grote events. In de Molenbeek is er echter een sterke overschatting van de totale hoeveelheid afstroming voor alle events. Dit is een groot bekken (30.5 km²) waar veel interne opslag van water en afvoer via andere mechanismen (bv. rioleringen) plaatsvinden. Verder toont deze grafiek dat de totale hoeveelheid oppervlakkige afstroming in het bekken van de Molenbeek relatief ongevoelig is aan de totale hoeveelheid neerslag, aangezien voor bijna alle events een gelijkaardige hoeveelheid afstroming werd gemeten (0-30 000 m³ op één uitschieter na), ten opzicht van gesimuleerde hoeveelheden tot 160000 m³ per event. Dit toont weer dat het model goede resultaten voor oppervlakkige afstroming levert voor kleine bekken, terwijl de totale hoeveelheden voor grote bekken worden overschat.



Figuur 4-8 Gemodelleerde ten opzichte van gemeten oppervlakkige afstroming voor het bekken van Heks (1146 ha). De gesimuleerde events vonden plaats in 2008.

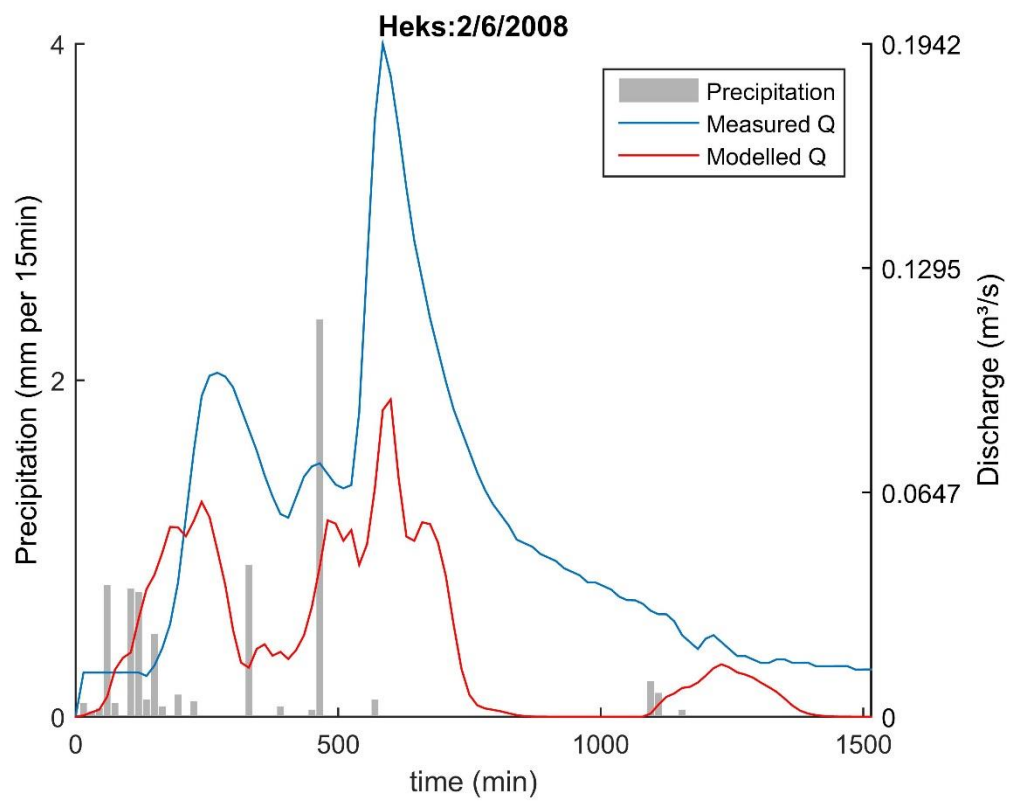


Bovenop de totale hoeveelheid afstroming kan ook het verloop van oppervlakkige afstroming doorheen de tijd worden geëvalueerd. Daarom zijn verschillende gesimuleerde hydrogrammen weergegeven in [Figuur 4-10](#), [Figuur 4-11](#) [Figuur 4-12](#). [Figuur 4-10](#) toont een voorbeeld van een neerslagevenement waarbij de gemeten hydrograaf niet goed wordt benaderd door de gesimuleerde hydrograaf. De gesimuleerde hydrograaf simuleert echter wel wat zou worden verwacht op basis van de neerslag die in het meetstation werd gemeten voor dit evenement. Dit is een voorbeeld van een verkeerde modelsimulatie als gevolg van incorrecte input data.

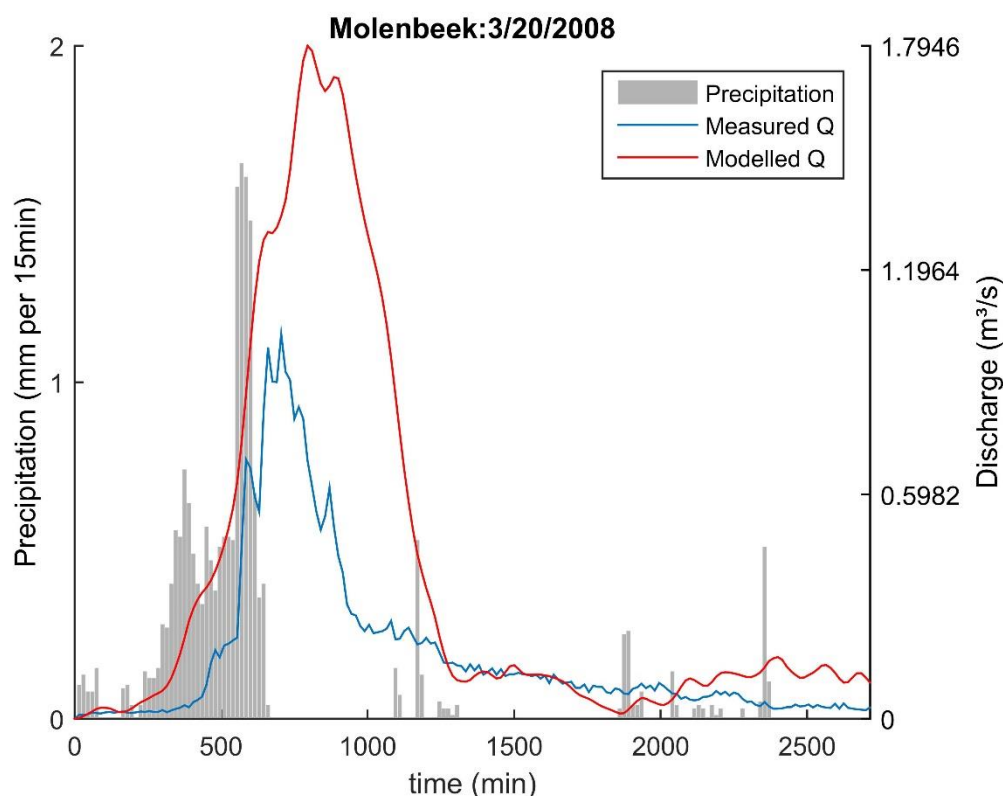


[Figuur 4-10](#) Neerslag, gemeten en gesimuleerde oppervlakkige afstroming voor het bekken van Borlo (31/01/2008)

[Figuur 4-11](#) [Figuur 4-12](#) zijn voorbeelden van hydrografen waarbij de dynamiek van de afstroming goed wordt gesimuleerd (bijvoorbeeld de verschillende afstromingspieken en de tijd tot maximale afstroming) maar waarbij de totale hoeveelheid afstroming niet correct wordt gesimuleerd. Dit is het geval voor een groot aandeel van alle gesimuleerde afstromingsevents. Dit wijst er duidelijk op dat het hydrologisch luik van CN_WS de dynamiek van oppervlakkige afstroming zeer goed vat, maar dat er nog verbeterd kan worden aan de hoeveelheid totale afstroming die wordt gesimuleerd voor grote bekkens.



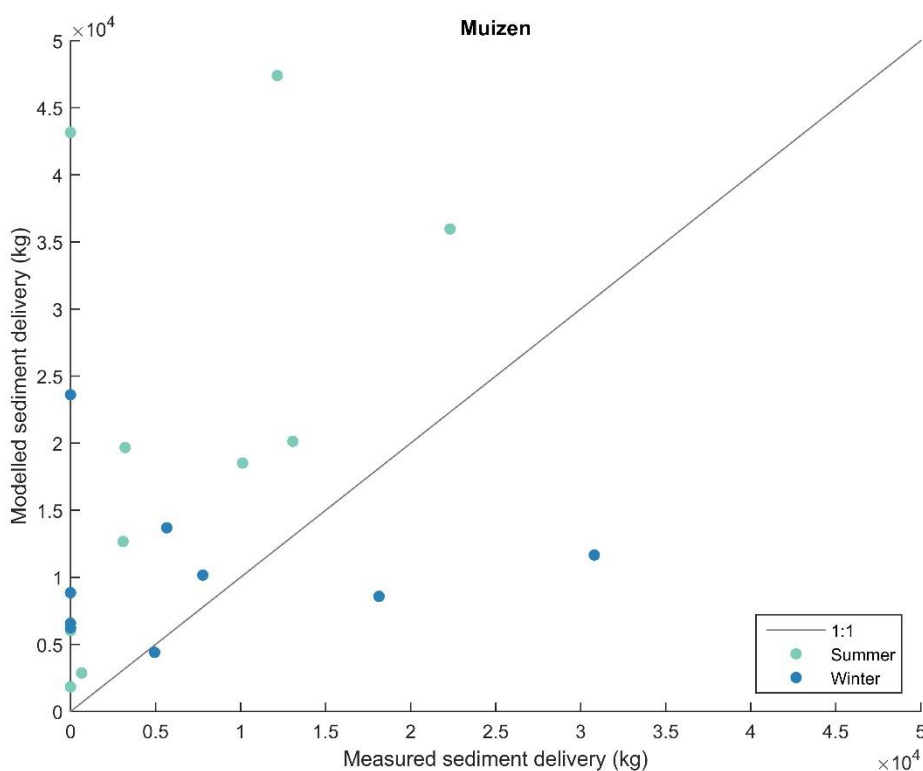
Figuur 4-11 Neerslag, gemeten en gesimuleerde oppervlakkige afstroming voor het bekken van Heks (06/02/2008)



Figuur 4-12 Neerslag, gemeten en gesimuleerde oppervlakkige afstroming voor het bekken van Molenbeek (20/03/2008)

4.3.2.3 Sedimentaanvoer op bekkenschaal

Ook het sedimentluik van het CN_WS model kan worden geëvalueerd aan de hand van de 167 simulaties die zijn uitgevoerd voor de bekkens van zuid Limburg. Om deze evaluatie te maken zijn per bekken de verhoudingen gemodelleerd over gemeten totale sedimentvracht op eventbasis weergegeven. *Figuur 4-13* en *Figuur 4-14* geven de resultaten voor twee bekkens weer, de overige grafieken worden getoond in bijlage 3. Op basis van deze figuren is het duidelijk dat er verschillende afstromingsevenementen zijn waarvoor geen sediment wordt gemeten aan de uitlaat van het bekken. Dit is ook het geval voor andere meetpunten van het sedimentmeetnet in zuid Limburg (zie bijlage 3). Aangezien het gaat om 0-waarden, in plaats van zeer lage metingen, terwijl er wel degelijk neerslag werd bemeten tijdens deze events, kan er van worden uitgegaan dat het gaat om meetfouten. Daarom kunnen er vragen worden gesteld over de betrouwbaarheid van de overige metingen. Hiervoor wordt verwezen naar Van Hoestenbergh et al. (2008).



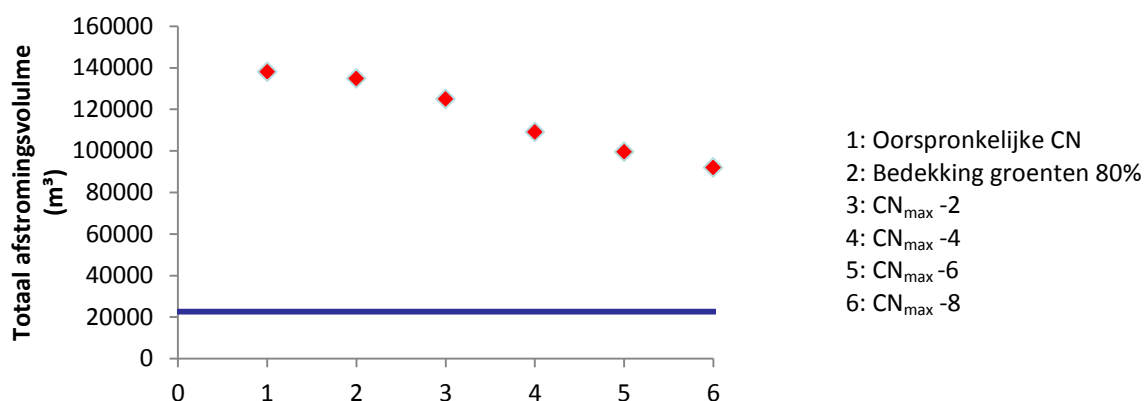
Figuur 4-14 gemodelleerde versus gemeten sedimentvracht voor verschillende neerslagevenementen in het bekken van Muizen voor het jaar 2008. Lichte cirkels zijn evenementen in de lente en zomer (maart tot augustus, donkere cirkels zijn evenementen in de herfst en winter (september tot februari). De grijze lijn is de 1:1 lijn.

4.4 Gevoeligheidsanalyse

Zoals aangekondigd in de vorige sectie, werd voor één bemeeten stroomgebied (Velm) een gevoeligheidsanalyse uitgevoerd met als hoofddoelstelling te kijken hoe de overschatting van afstroming in de zomer kan beperkt worden. Het karakteristieke zomerevenement van 28/07/2008 werd geselecteerd voor deze analyse. Er werd gekeken naar vier verschillende factoren, waarvan werd vermoed dat ze een significante invloed zouden hebben op de afstroming.

- CN waarde

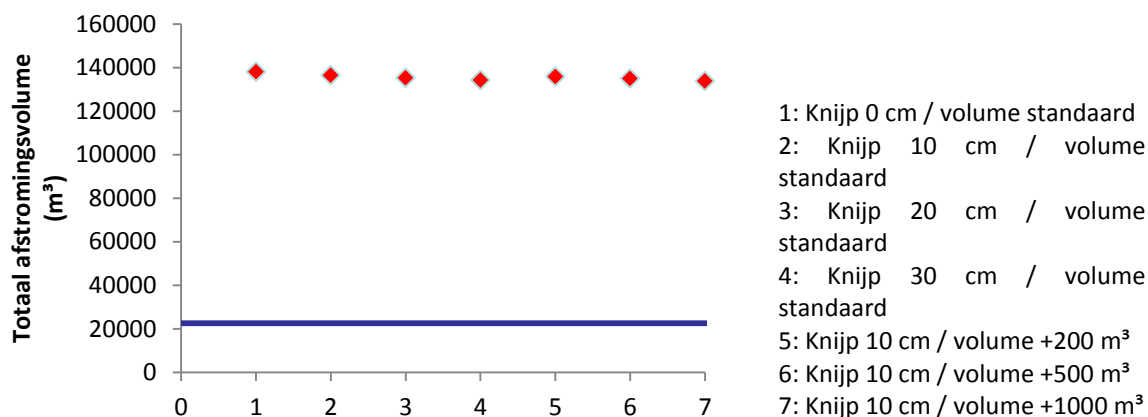
In een eerste aanpassing werd de bodembedekkingsgraad van groenten in de zomer systematisch verhoogd van 60% naar 80%, hetgeen beter overeenkomt met de gerapporteerde waarden door Verbist et al. (2004). Vervolgens werd de CN_{max} waarde (zie §3.2.1) voor alle landgebruiken systematisch verlaagd tot 8 eenheden, telkens in stappen van 2 eenheden. De verlaging tot 8 eenheden stemt overeen met de overschakeling van hydrologische bodemgroep C (fijne texturen, gematigde infiltratie) naar B (fijne texturen, goede infiltratie). De resultaten (*Figuur 4-15*) tonen dat de afstromingsresultaten inderdaad zeer gevoelig zijn aan de gekozen CN waarde en dat de overschakeling naar hydrologische bodemgroep B de overschatting van afstroming voor een typisch zomerevenement kan halveren. De keuze voor bodemgroep B lijkt in deze streek ook gerechtvaardigd, vermits de kalkrijke ondergrond vaak een goede infiltratie van water toelaat.



Figuur 4-15 Gevoeligheid van de modelresultaten voor afstroming ten opzichte van de CN waarde voor een karakteristiek zomerevenement in Velm. De lijn stelt de gemeten waarde voor dit evenement voor, terwijl de punten de modelresultaten weergeven.

- Inputparameters van bufferende dammen/bufferbekkens

Het effect van twee inputparameters op de totale gesimuleerde afstroming werd nagegaan, namelijk de hoogte van de knijpopening (hoe hoger, hoe meer water permanent in de bufferbekkens kan worden gestockeerd) en het volume van de buffer (verhoging buffercapaciteit). Geen van beide variabelen bleek een significant effect te hebben op de totale afstroming gemeten aan de uitlaat van het stroomgebied (*Figuur 4-16*). Deze constructies hebben immers voornamelijk een impact op de timing van afstroming (vorm van het hydrogram), eerder dan op het totale volume (zie §4.6).

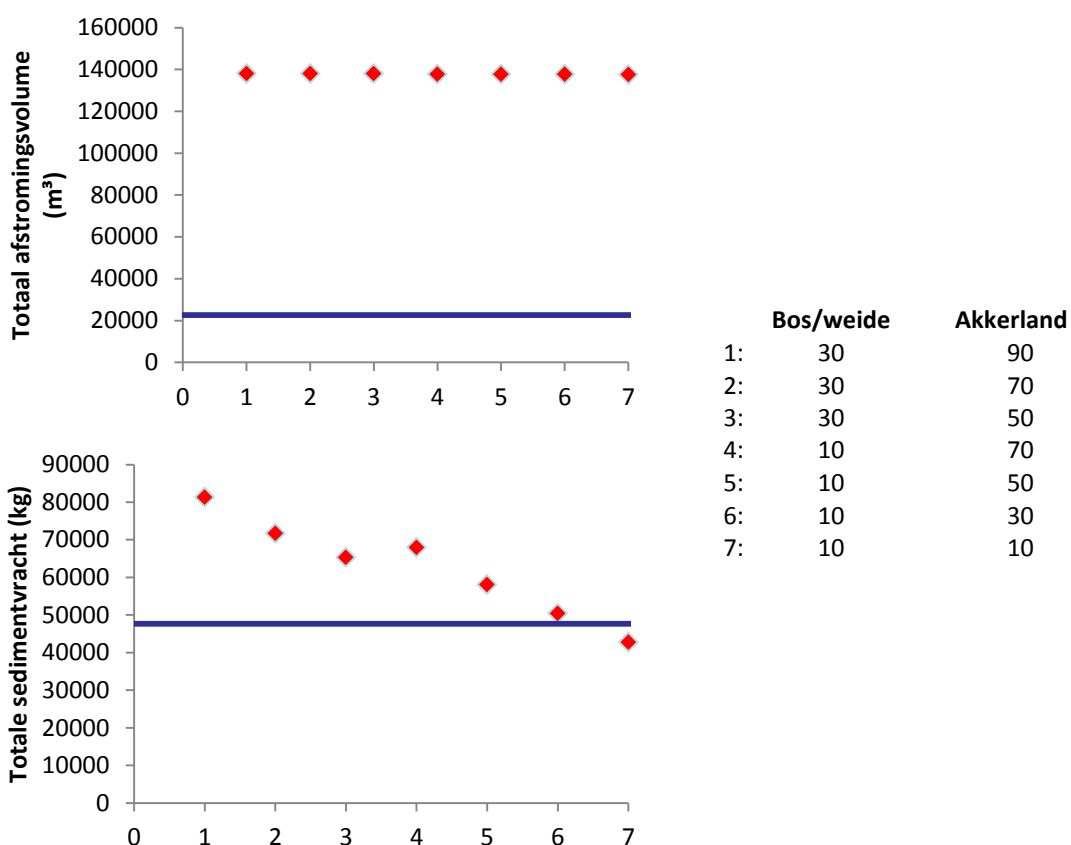


Figuur 4-16 Gevoeligheid van de modelresultaten voor afstroming ten opzichte van twee inputparameters van bufferende dammen/bufferbekkens (hoogte knijpopening en buffervolume) voor een karakteristiek zomerevenement in Velm. De lijn stelt de gemeten waarde voor dit evenement voor, terwijl de punten de modelresultaten weergeven.

- Perceelsconnectiviteit

De perceelsconnectiviteit is een variabele waarover veel discussie bestaat, vermits moeilijk te bepalen is welke waarde deze variabele moet aannemen. Standaard werd in onze simulaties een waarde van 30 gebruikt voor de overgang akkerland – bos/weide en 90 voor overgang akkerland – akkerland. In *Figuur 4-17* wordt aangetoond dat een verandering van deze waarden geen merkbaar effect heeft op de totaal voorspelde afstroming, maar wel een sterke impact heeft op de voorspelde sedimentvracht. Een relatief groot deel van het sediment dat aankomt aan de

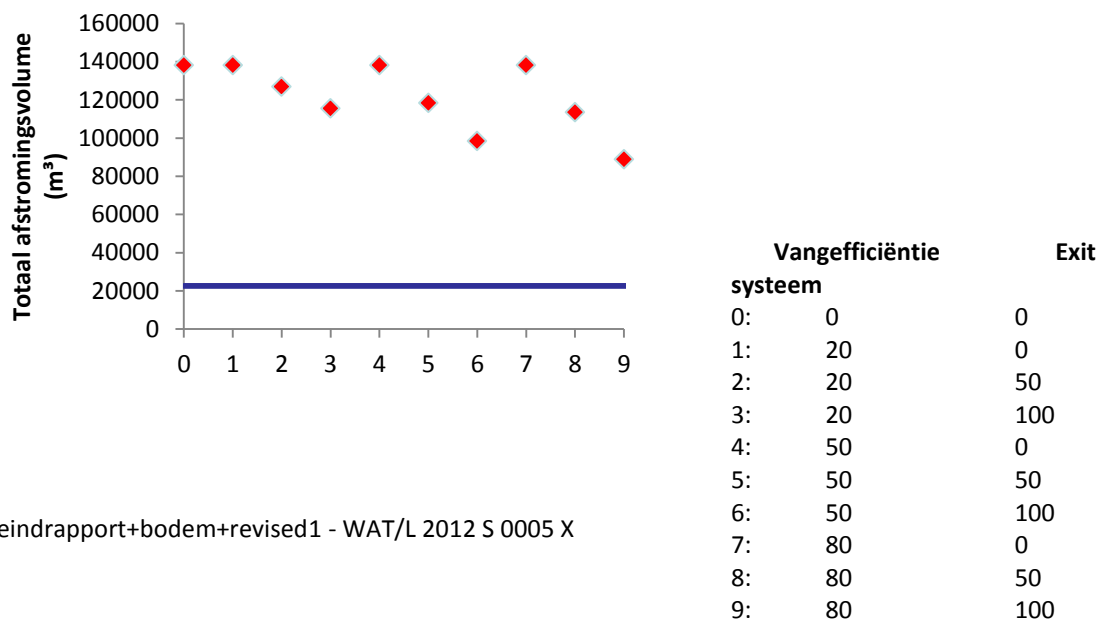
uitlaat van een stroomgebied wordt immers gegeneerd op de hellingen ver weg van de uitlaat. Dit sediment dient dus een hele weg af te leggen door het stroomgebied, waardoor de perceelsconnectiviteit een grote rol kan spelen. Water daarentegen wordt over het ganse stroomgebied gegeneerd. Het grootste aandeel water aan de uitlaat van het stroomgebied is afkomstig van plaatsten dicht bij die uitlaat, aangezien neerslag die verderop valt meer kansen zal krijgen om onderweg te infiltreren. Hierdoor blijft de afstroming relatief ongevoelig tegenover de perceelsconnectiviteit.

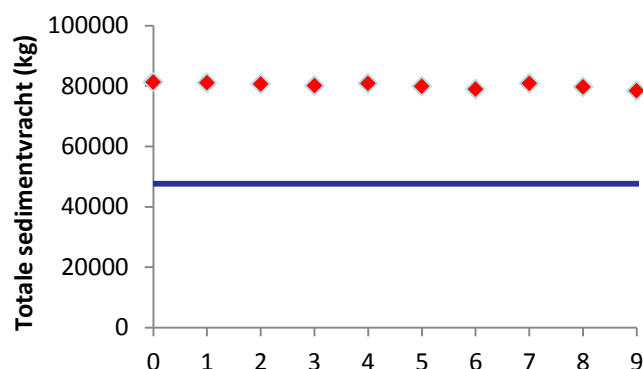


Figuur 4-17 Gevoeligheid van de modelresultaten voor afstroming en sedimentvracht ten opzichte van de perceelsconnectiviteit voor een karakteristiek zomerevenement in Velm. De lijn stelt de gemeten waarde voor dit evenement voor, terwijl de punten de modelresultaten weergeven.

- **Aanwezigheid van rioleringen**

Rioleringen werden in het model ingebracht met verschillende aannames omtrent hun vangefficiëntie en de relatieve hoeveelheid water/sediment dat via de rioleringen uit het systeem wordt geleid. De resultaten in *Figuur 4-18* tonen dat de gesimuleerde afstroming vooral gevoelig is aan de laatste parameter, terwijl de vangefficiëntie nauwelijks een invloed heeft. De aanwezigheid van rioleringen heeft daarenboven geen invloed op de gesimuleerde sedimentvracht aan de uitlaat van het gebied. Dit is te verklaren doordat sediment typisch gegenereerd wordt op plaatsen buiten dorpen en steden, daar waar zich nauwelijks of geen toegangen tot rioleringen bevinden. Dit geldt echter niet voor water.



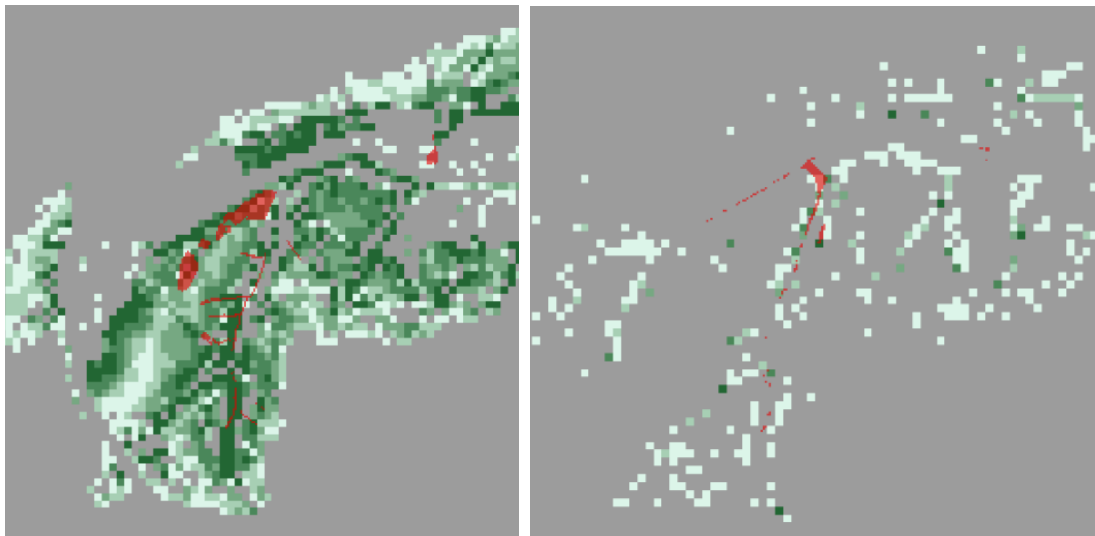


Figuur 4-18 Gevoeligheid van de modelresultaten voor afstroming en sedimentvracht ten opzichte van de aanwezigheid van rioleringen voor een karakteristiek zomerevenement in Velm. De lijn stelt de gemeten waarde voor dit evenement voor, terwijl de punten de modelresultaten weergeven.

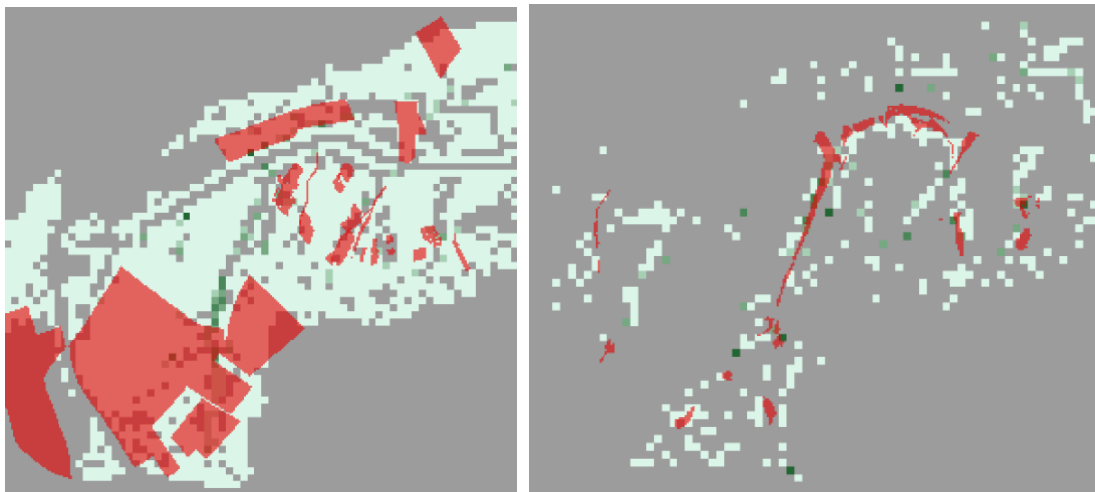
Als conclusie kan worden gesteld dat de overschatting van de afstroming in de zomer best kan worden aangepakt via een aanpassing van de CN waarde. Deze variabele is immers de enige variabele die seizoensafhankelijk is. De inbreng van bijvoorbeeld rioleringen zal ook bij simulaties in de winter leiden tot een lagere inschatting van totale afstroming. Dit is echter ongewenst, vermits uit *Tabel 4-4* bleek dat afstroming vaak werd onderschat in de winter. Dit is ook één van de voornaamste redenen waarom werd gekozen om de kalibratieparameters α en β constant te houden in deze gevoeligheidsanalyse, ondanks het feit dat deze ook een belangrijk effect hebben op de afstroming. In het algemeen geldt dat deze parameters best niet te veel gevarieerd worden, vermits deze geen duidelijke fysische betekenis hebben. Tot slot dient nog opgemerkt te worden dat deze sectie geenszins tot doel had om een volledige gevoeligheidsanalyse van het CN_WS model uit te voeren. Hiervoor zouden immers meerdere evenementen in meerdere bekkens moeten getest worden. Wel geven deze eerste resultaten een indicatie van welke inputvariabelen best verder onderzocht worden in eventueel vervolgonderzoek om de performantie van het CN_WS model te verhogen.

4.5 Validatie ruimtelijke erosie- en sedimentatiepatronen

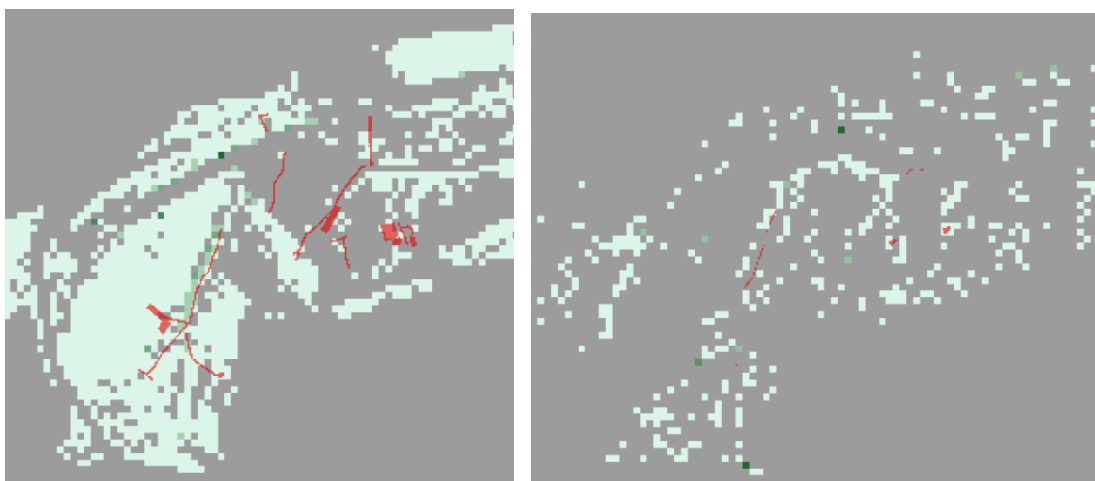
Zoals aangekondigd in de inleiding werd aan de hand van enkele veldmetingen in het bekken van Ganspoel (Van Oost *et al.*, 2005) nagegaan of het CN_WS model in staat is op een correcte manier de erosie- en sedimentatiepatronen op het land weer te geven. Hiervoor werden drie neerslagevenementen gesimuleerd waarvoor uitgebreide terrein surveys werden uitgevoerd, i.e. mei 1997, juni 1998 en november 1998. De vergelijking tussen gemeten en gemodelleerde erosie en depositie wordt weergegeven in *Figuur 4-19*. Uit deze figuur kan worden geconcludeerd dat de voornaamste zones van erosie en depositie wel degelijk door het model worden geïdentificeerd.



Mei 1997



Juni 1998

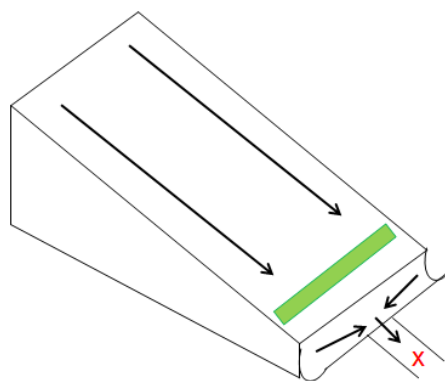


November 1998

Figuur 4-19 Gemeten (rood) en gesimuleerde (groen) erosie- (links) en sedimentatiepatronen (rechts) in het Ganspoel bekken voor drie events.

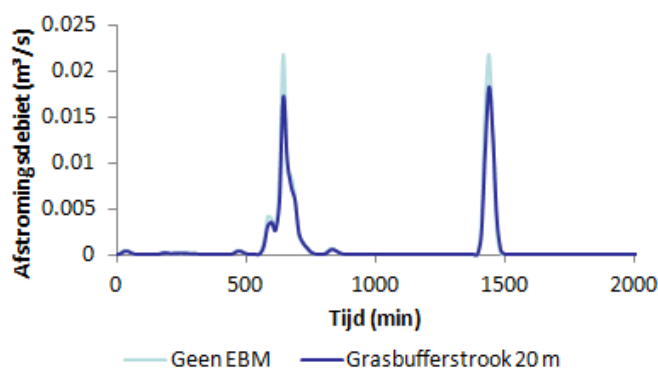
4.6 Evalueren van erosiebestrijdingsmaatregelen met het model

Met het CN_WS model kan het effect van alle courant gebruikte EBM op water- en sedimentexport naar waterlopen worden nagegaan. Hieronder wordt kort overlopen hoe deze in het model kunnen worden ingebracht. Tevens wordt de efficiëntie van elke EBM kort aangetoond aan de hand van een voorbeeld. Hiervoor werd een fictief bietenveld gecreëerd op een uniforme helling van 5%. Onderaan de helling werd een gracht aangelegd, zodat de totale water- en sedimentexport van het veld, met en zonder EBM, kon worden geëvalueerd (zie [Figuur 4-20](#)).

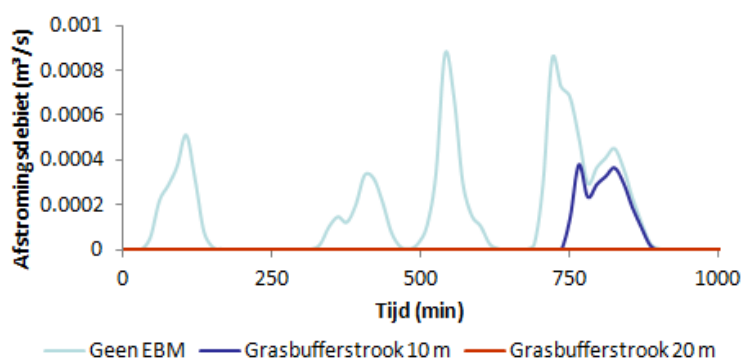


Figuur 4-20 Illustratie van het fictief bietenveld dat werd gebruikt voor de evaluatie van de effecten van verschillende EBM. De pijlen geven de afstromingsrichting aan. De output werd gemeten op de plaats van het rode kruisje. De groene rechthoek duidt de locatie van een grasbufferstrook of bufferende dam aan.

- **Grasbufferstroken:** Deze stroken dienen als apart perceel ingetekend te worden in de perceelskaart met code -6. Via de toekenning van een lage CN waarde (standaard 74 voor grasland), en dus een hoge infiltratiecapaciteit, en een lage C factor (standaard 0,01 voor grasland) aan deze percelen wordt het bufferend vermogen van deze stroken voor resp. water en sediment in rekening gebracht. Deze toekenning dient zelf door de gebruiker uitgevoerd te worden tijdens de aanmaak van de CN en C factor raster. Grasbufferstroken zorgen typisch voor een significante verhoging van sedimentatie (voor het fictieve bietenveld daalde de totale sedimentoutput ten gevolge van een typisch zomerevent van 979 kg naar 21 kg na het voorzien van een 20 m brede grasbufferstrook) en hebben een minder groot effect op afstroming van water (zie [Figuur 4-21](#)). Verschillende breedtes van grasbufferstroken kunnen gesimuleerd worden via een lineaire herschaling van de CN waarde en C factor voor deze grasbufferpixels (vb. voor een 10 m brede grasbufferstrook gelegen naast een bietenveld in de winter (CN waarde = 86) wordt de CN waarde voor de grasbuffer = $(0.5 \cdot 86) + (0.5 \cdot 74) = 80$). Ter illustratie wordt in [Figuur 4-22](#) het effect van een 10 m en 20 m brede grasbufferstrook op de afstroming van water na een karakteristiek winterevent vergeleken.

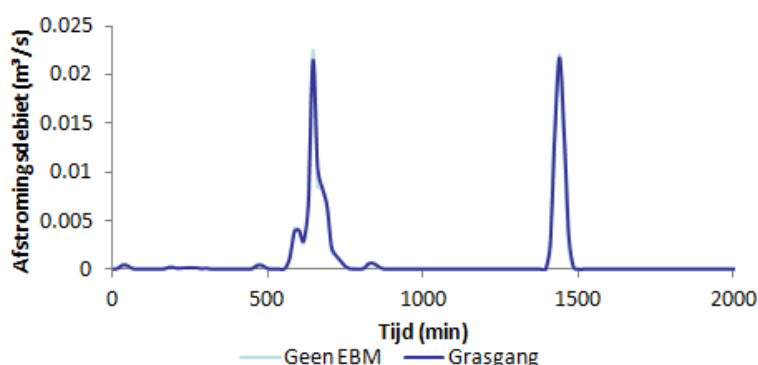


Figuur 4-21 Effect van een 20 m brede grasbufferstrook op de afstroming van water van een fictief bietenveld voor een karakteristiek zomerevent.



Figuur 4-22 Effect van een 10 m en 20 m brede grasbufferstrook op de afstroming van water van een fictief bietenveld voor een karakteristiek winterevent.

- **Grasgangen:** Deze structuren worden op dezelfde wijze ingebracht in het model als grasbufferstroken (zie hoger) en zijn ook vooral efficiënt in het afvangen van sediment. Ter illustratie werd in het fictief bietenveld een thalweg gesimuleerd, waarin al dan niet een grasgang werd geplaatst. De totale sedimentoutput daalde dankzij de grasgang van 416 kg naar 36 kg. Het effect op de afstroming van water is echter zeer beperkt (*Figuur 4-23*).



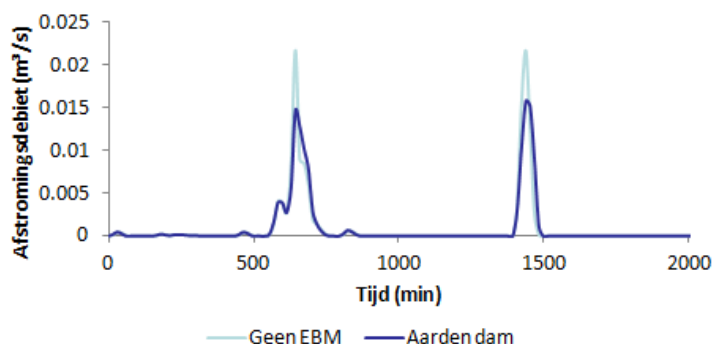
Figuur 4-23 Effect van een grasgang op afstroming van water van een fictief bietenveld voor een karakteristiek zomerevent.

- **Bufferbekkens / aarden dammen:** Bufferbekkens en aarden dammen dienen apart te worden ingegeven in het model (zie §3.3 voor de vereiste inputparameters). Voor een volledige beschrijving van de manier waarmee in het model rekening wordt gehouden met deze structuren, wordt verwezen naar §3.2.5. Ter illustratie werd onderaan het fictief bietenveld een aarden dam geplaatst over de volledige breedte van het veld met volgende inputparameters:

- Volume = 500 m³
- Hoogte dam = 1,5 m
- Hoogte knijpopening = 0 m
- Doorsnede knijpopening = 0,03 m²
- Discharge coefficient = 0,6
- Breedte overloop = 7 m
- Sediment trapping efficiency = 75 %

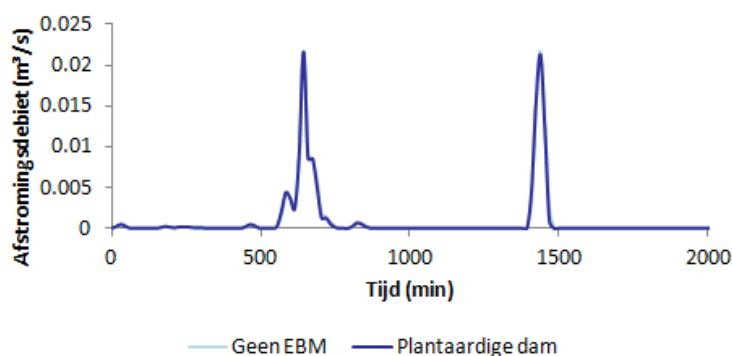
Het effect van deze aarden dam op de afstroming van water wordt in *Figuur 4-24* weergegeven. De totale sedimentoutput van het bietenveld daalde dankzij de aarden dam

van 980 kg naar 445 kg. Een aarden dam heeft in vergelijking met een grasbufferstrook dus minder effect op de afvang van sediment, maar een groter effect op de afstroming van water. In realiteit zal een aarden dam steeds aangelegd worden in combinatie met een graszone, wat ervoor zal zorgen dat de efficiëntie met betrekking tot sedimentafvang verder toeneemt.



Figuur 4-24 Effect van een aarden dam op de afstroming van water van een fictief bietenveld voor een karakteristiek zomerevent.

- **Plantaardige dammen:** Deze constructies dienen als een speciaal geval van aarden dammen te worden behandeld. De grotere doorlatendheid van deze constructies voor water kan worden nagebootst door de doorsnede van de knijpopening te vergroten. Ter illustratie werd een plantaardige dam gesimuleerd in het fictieve bietenveld met een knijpopening van 0,07 m² doorsnede (*Figuur 4-25*). In vergelijking met de aarden dam zien we nauwelijks een effect op de afstroming van water. De afvang van sediment wordt daarentegen volledig bepaald door de sediment trapping efficiency, die gelijkaardig is voor aarden en plantaardige dammen, en blijft daarom ongewijzigd.

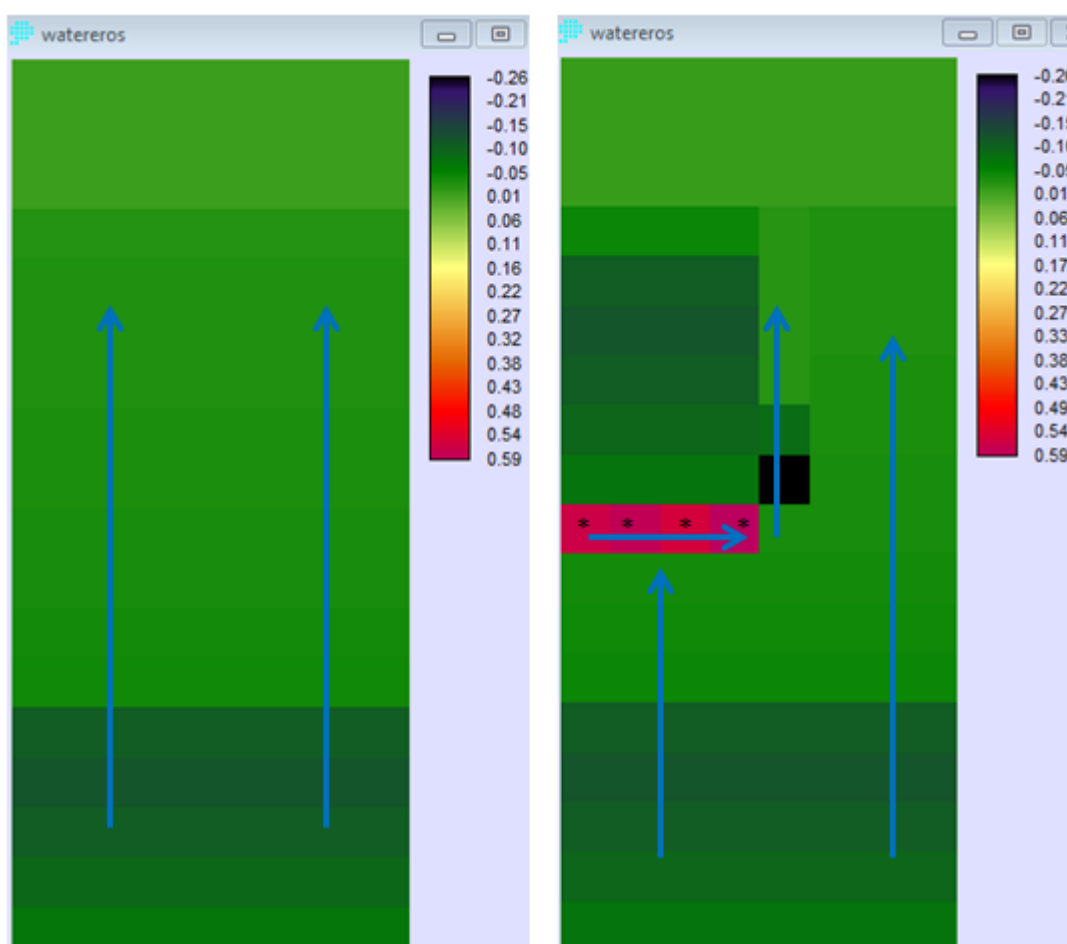


Figuur 4-25 Effect van een plantaardige dam op de afstroming van water van een fictief bietenveld voor een karakteristiek zomerevent.

- **Niet-kerende bodembewerking:** De effecten van niet-kerende bodembewerking (en andere teelttechnische erosiebestrijdingsmaatregelen) kan volledig in rekening worden gebracht door een aanpassing van de CN waarde en C factor voor de overeenkomstige percelen. Voor niet-kerende bodembewerking zijn de effecten op afstroming van water en op erosie in kaart gebracht door Leys et al. (2010). Niet-kerende bodembewerking heeft typisch een groot effect op erosie (daling tot 80 %) en een gering effect op afstroming van water (daling rond 20 %). Concreet kan dit effect door het model worden gesimuleerd door een reductie van de C factor met 80 % en een daling van de CN waarde met 1 à 2 eenheden.
- **Geleidende dammen:** Net zoals bufferende dammen dienen ook geleidende dammen apart te worden ingegeven door de gebruiker (zie §3.3). De manier waarop geleidende dammen

in het model zijn verwerkt, werd reeds beschreven in §3.2.5. Deze constructies bepalen voornamelijk de afstromingsrichting van water en sediment en kunnen hierdoor ook het erosie- en sedimentatiepatroon wijzigen. Zo zien we in het linkse deel van *Figuur 4-26* dat het er op een uniforme helling na een tijd een evenwicht ontstaat tussen het potentiële bodemverlies en de transportcapaciteit, waardoor de netto erosie constant blijft. Dit evenwicht wordt in het rechtse deel van *Figuur 4-26* duidelijk verstoord door de aanwezigheid van de geleidende dam, waardoor er hellingafwaarts van de dam weer meer erosie kan optreden tot een nieuw evenwicht wordt ingesteld.

- **Grachten:** Grachten worden op dezelfde manier behandeld als geleidende dammen, met uitzondering van de CN waarde en C factor die hen wordt toegewezen (zie §3.2.5). Dit resulteert in eenzelfde wijziging van de afstromingsrichting en erosie- en sedimentatiepatroon in vergelijking met de geleidende dammen. De verschillen in CN waarde en C factor hebben evenwel een kleine wijziging in de totale afstroming van water en sediment tot gevolg (niet getoond).

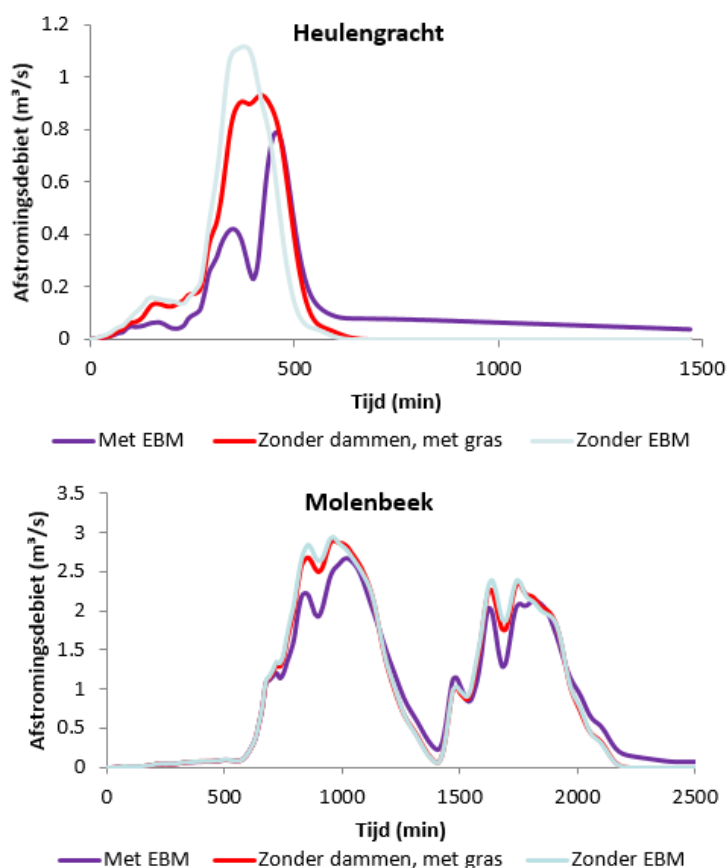


Figuur 4-26 Erosie- en sedimentatiepatroon in een fictief bietenveld zonder (links) en met (rechts) een geleidende dam voor een karakteristiek zomerevent. De geleidende dam is ingetekend in de pixels aangeduid met *. Positieve waarden staan voor netto sedimentatie, negatieve waarden voor netto erosie. De blauwe pijlen duiden de afstromingsrichting aan.

Tot slot werd de impact geëvalueerd van de twee meest frequent gebruikte EBM, namelijk bufferende dammen/bufferbekkens en grasbufferstroken, en dit in twee stroomgebieden in Zuid-Limburg: Heulengracht (210 ha) en het bekken van de Molenbeek te Velm (3049 ha). Hiervoor werden afstroming van water en sediment gesimuleerd met en zonder de bestaande bufferende dammen/bufferbekkens (2 in Heulengracht en 28 in Velm) en grasbufferstroken/grasgangen. De

simulaties werden uitgevoerd voor een typisch zomerevenement en voor een heel jaar (laatste enkel voor Velm). De resultaten worden weergegeven in [Figuur 4-27](#) (water) en [Tabel 4-6](#) (water en sediment).

Uit de verschillen tussen “Met EBM” en “Zonder dammen, met gras” in [Figuur 4-27](#) kan worden afgeleid dat de implementatie van bufferbekkens/bufferende dammen in het model wel degelijk een belangrijk effect heeft op de afstroming van water. Dit effect is drieledig: (1) de afstroming komt wat later op gang vanwege het bufferend vermogen van het bekken/de dam, (2) de afstromingspiek ligt lager wanneer rekening wordt gehouden met de buffers en (3) de dalende flank van de hydrograaf daalt vanaf een bepaald moment minder steil vanwege de vertraagde uitstroom van water uit de buffers. Deze uitstroom is evenredig met het volume water in het bekken en neemt duidelijk af in functie van de tijd. De relatief kleine impact van de buffers op de afstroming in de Molenbeek kan worden verklaard door: (1) de lagere concentratie aan buffers in vergelijking met de Heulengracht en (2) door de aanname dat de knijpopening zich situeert ter hoogte van het maaiveld, wat betekent dat de buffers meteen beginnen leeglopen van zodra water binnenkomt. Het effect van grasbufferstroken en grasgangen op de afstroming van water (verschil tussen “Zonder dammen, met gras” en “Zonder EBM” in [Figuur 4-27](#)) is, zoals eerder vermeld, beperkt. We zien een kleine daling in de piekafvoer, wat te verklaren is door de hogere infiltratiecapaciteit van grasland ten opzichte van akkerland. Daarentegen zijn de grasbufferstroken duidelijk efficiënter met betrekking tot de afvang van sediment in vergelijking met de bufferbekkens en bufferende dammen ([Tabel 4-6](#)).



Figuur 4-27 Effecten van bufferende dammen/bufferbekkens en grasbufferstroken/grasgangen op de afstroming van water in de Heulengracht en Velm (Molenbeek) voor een karakteristiek zomerevent. “Met EBM” staat voor de situatie met de bestaande grasbufferstroken,/grasgangen en bufferende dammen/bufferbekkens. Bij “Zonder EBM” werden al deze elementen verwijderd. “Zonder dammen, met gras” staat voor de situatie zonder bufferende dammen/bufferbekkens en met grasbufferstroken/grasgangen.

Tabel 4-6 Totale afstroming van water (m³) en totale sedimentoutput (kg) voor de simulaties met en zonder erosiebestrijdingsmaatregelen (EBM) in de Heulengracht en de Molenbeek te Velm. *De absolute waarden van deze modelresultaten zijn niet conform de laatste modelversie van CN_WS. Deze werden niet aangepast aangezien het hier vooral gaat om de relatieve verschillen.*

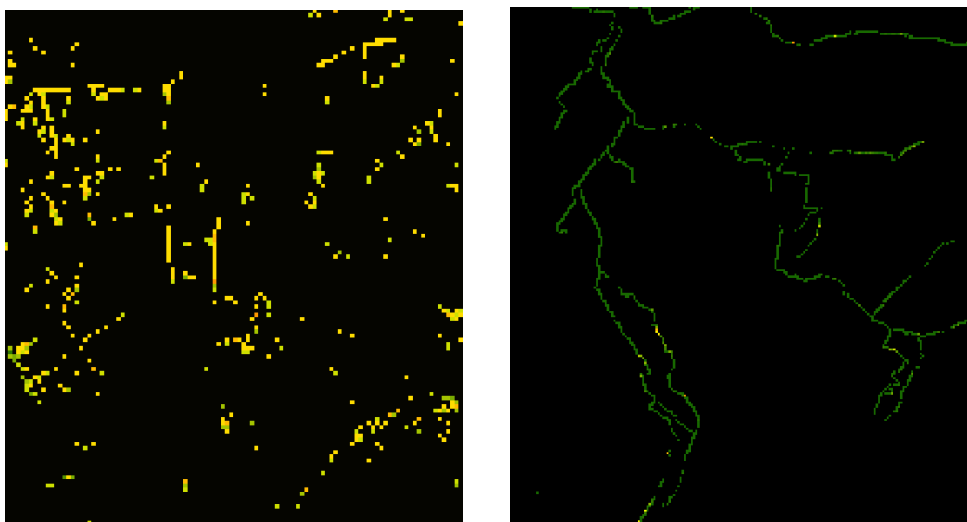
	Met alle bestaande EBM	Zonder dammen, met grasbufferstroken	Zonder EBM
Heulengracht, zomerevent			
Afstroming water (m ³)	16.674	17.914	18.322
Sedimentoutput (kg)	98	98	392
Velm, zomerevent			
Afstroming water (m ³)	138.000	140.779	142.589
Sedimentoutput (kg)	81.285	81.184	97.292
Velm, jaar 2008			
Afstroming water (m ³)	2.382.311	2.408.514	2.485.643
Sedimentoutput (kg)	1.206.316	1.213.011	1.460.916

4.7 Toepassing op 1^{ste} categorie waterlopen

De vereenvoudigde versie van het model werd toegepast op alle 1^{ste} categorie waterlopen die deel uitmaken van het Sedimentmeetnet (Melsterbeek, Herk, Mombeek, Kleine Gete, Maarkebeek en Zwalm) voor een volledig jaar, d.i. 2008 voor de waterlopen behorende tot het Demerbekken en 2013 voor het Bovenscheldebekken. Bij deze simulaties werd zoveel mogelijk rekening gehouden met de aanwezige EBM (inclusief individuele dammen). Om zoveel mogelijk fouten in de ruimtelijke verdeling van water en sediment te voorkomen, werd voor deze gebieden een andere perceelskaart gemaakt waaruit de 9^{de} categorie waterlopen werden weggelaten. De simulatieresultaten (zowel van elke individuele bui als over de totale periode) zullen verder ter beschikking worden gesteld van Antea, die op basis van deze data het transport van sediment doorheen de waterloop zal simuleren om tot een finaal resultaat te komen. In [Tabel 4-7](#) wordt de totale sedimentoutput voor elke 1^{ste} categorie waterloop weergegeven. Vermits het vereenvoudigd model werd gebruikt voor de doorrekening van de 1^{ste} categorie waterlopen werd er geen tijdsafhankelijke output gegenereerd. Wel krijgt de gebruiker een idee van de ruimtelijke spreiding van de erosie- en sedimentatieprocessen via de geproduceerde kaarten (zie vb. in [Figuur 4-28](#)).

Tabel 4-7 Totale jaarlijkse sedimentoutput voor de gesimuleerde 1^{ste} categorie waterlopen. *Meest recente resultaten (juni 2016).*

Waterloop	Jaar simulatie	Sedimentoutput (ton)
Melsterbeek	2008	14.244
Herk	2008	21.692
Mombeek	2008	6.397
Kleine Gete	2008	7.333
Maarkebeek	2013	9.532



(a) Erosie - sedimentatie

(b) Sedimentexport

Figuur 4-28 Voorbeeld van ruimtelijke output gegenereerd door het vereenvoudigd model voor een klein deelgebied uit het stroomgebied van de Melsterbeek: (a) erosie (groen) – sedimentatie (geel – oranje – rood) in mm; (b) sediment export naar waterlopen in m³.

4.8 Toepassing op Vlaamse hydrografische bekken

Voor de toepassing van het vereenvoudigd model op de Vlaamse hydrografische bekken werd een bijkomende vereenvoudiging doorgevoerd. Er werd namelijk niet meer expliciet rekening gehouden met elke individuele aarden dam of andere EBM. De aanmaak van al deze inputdata zou immers te tijdrovend zijn geweest. Het model werd doorgerekend met één uitlaat per hydrografisch bekken. Bovendien werd het model niet doorgerekend voor een heel jaar, maar voor één karakteristiek zomerevenement en één karakteristiek winterevenement. Deze events werden als volgt geselecteerd:

- Voor bekken in de omgeving van de Bovenschelde: goed bemeten event waarbij grootste sedimentexport is opgetreden in Maarkebeek (= grootste bemeten stroomgebied in Bovenscheldebekken) voor de winter van 2013, namelijk 23/12/2013. Vermits geen zomermetingen voor 2013 beschikbaar zijn, werd hier gekozen voor een groot evenement, namelijk 27/07/2013.
- Voor bekken in de omgeving van de Demer: goed bemeten event waarbij grootste sedimentexport is opgetreden in Wellen (= grootste bemeten stroomgebied in Demerbekken) voor de zomer en winter van 2008, respectievelijk 28/07/2008 en 01/02/2008.

De totale sedimentoutput voor elk gesimuleerd bekken wordt weergegeven in [Tabel 4-8](#). Ook nu weer zullen de gedetailleerde simulatieresultaten (waarbij de output werd berekend per PDM gebied) verder ter beschikking worden gesteld van Antea.

Vervolgens werd de bijkomende optie in het CN_WS model om de jaarlijkse sedimentoutput van een stroomgebied te berekenen op basis van een door de gebruiker ingegeven R factor getest (zie §-o). Voor deze test werd enerzijds de lange termijnversie van het model toegepast op het bekken van de Bovenschelde voor een periode van één jaar (2013) en anderzijds het vereenvoudigd model doorgerekend met een R factor van 880 MJ mm ha⁻¹ h⁻¹ jaar⁻¹ (= lange termijngemiddelde van Ukkel voor de periode 1898-2004; Notebaert et al., 2006). Voor deze laatste simulatie werd een nieuwe kaart met jaargemiddelde C factoren aangemaakt op basis van de standaardwaarden voorzien door ALBON (zie ook handleiding van het model). De totale sedimentoutput bekomen met de lange termijnversie van het model bedroeg 60.689 ton sediment per jaar, terwijl de simulatie met de zelf

gekozen R factor een waarde opleverde van 53.789 ton sediment per jaar. Uit deze resultaten kan worden besloten dat het model eenvoudig kan worden toegepast om snel een goede inschatting te bekomen van de jaarlijkse sedimentoutput uit een stroomgebied, zonder daarvoor elk individueel event in dat jaar door te moeten rekenen.

Tabel 4-8 Totale sedimentoutput voor een karakterisitek zomer- en winterevenement voor de gesimuleerde Vlaamse hydrografische bekken. *Meest recente resultaten (juni 2016).*

Hydrografisch bekken	Jaar	Seizoen	Sedimentoutput (ton)
Demerbekken	2008	Zomer	6.048
		Winter	242
Bovensheldebekken	2013	Zomer	15.779
		Winter	920
Denderbekken	2013	Zomer	13.356
		Winter	759
Dijlebekken	2008	Zomer	3.092
		Winter	127
Netebekken	2008	Zomer	1.256
		Winter	48
Leiebekken	2013	Zomer	12.864
		Winter	733
Ijzerbekken	2013	Zomer	16.336
		Winter	928
Brugse polders	2013	Zomer	3.748
		Winter	200
Maasbekken	2008	Zomer	1.385
		Winter	56

Tot slot werden de overige Vlaamse hydrografische bekken doorgerekend voor een volledig jaar met behulp van het vereenvoudigde model en een gemiddelde R factor van $880 \text{ MJ mm ha}^{-1} \text{ h}^{-1} \text{ jaar}^{-1}$. De volledige sedimentbalans voor deze simulaties wordt weergegeven in *Tabel 4-9*. De grootte-orde van deze resultaten komt goed overeen met eerdere simulaties met WaTEM/SEDEM uit 2006 (Beel *et al.*, 2006). Een gedetailleerde vergelijking van beide sets resultaten houdt echter geen steek, gezien het feit dat een ander model werd gebruikt (i.e. verouderde WaTEM/SEDEM versie) en simulaties werden gedaan voor andere jaren (tussen 2006 en 2008-2013 zijn er in Vlaanderen redelijk wat grasbufferstroken bijgekomen bijvoorbeeld).

Tabel 4-9 Sedimentbalans van een volledig jaar en sedimentoutput aan uitlaat voor de gesimuleerde Vlaamse hydrografische bekken. Hoeveelheden uitgedrukt in ton. *Meest recente resultaten (juni 2016).*

Hydrografisch bekken	Jaar	Erosie	Depositie	Sediment export rivier	Sediment export rand bekken	Depositie open water	Sediment output uitlaat
Demerbekken	2008	607.830	530.566	74.628	2.142	494	74.626
Bovensheldebekken	2013	322.034	266.074	53.790	2.084	87	53.789
Denderbekken	2013	347.821	301.111	45.316	1.254	140	45.311
Dijlebekken	2008	441.327	398.113	39.662	2.904	648	39.657
Netebekken	2008	72.594	56.522	15.595	363	114	15.594
Leiebekken	2013	227.428	180.165	44.701	2.407	155	44.687
Ijzerbekken	2013	276.100	215.059	56.808	1.578	370	56.336
Brugse polders	2013	68.842	51.662	14.434	605	149	12.421
Maasbekken	2008	137.296	114.120	17.298	5.549	329	17.108

5 **Suggesties voor vervolgonderzoek**

In dit project werd een nieuw sedimentexportmodel ontwikkeld uit de combinatie van twee bestaande modellen en vervolgens uitvoerig getest. Uiteraard blijft er nog ruimte voor verbetering. Daarom formuleren we in deze sectie enkele suggesties voor mogelijk vervolgonderzoek.

- In het algemeen zou een verdere kalibratie van het model op stroomgebieden van verschillende grootteordes zeker ten goede komen aan de prestaties van het model. Zo kan gekeken worden in welke mate schaafeffecten verantwoordelijk zijn voor afwijkingen tussen model en metingen. Specifiek voor de afstromingsmodule kan gekeken worden naar de optimale parameterwaarden voor α en β en hun relatie met de grootte van het stroomgebied. Voor het erosie- en sedimentatiegedeelte kan verder gebouwd worden op het werk van De Brue (De Brue, 2016) voor de kalibratie van kTc (transportcapaciteitscoëfficiënt), maar dit keer ook in functie van het seizoen. Hetzelfde geldt voor de C-factor. Een gedetailleerde kalibratie van beide variabelen zou wel een uitgebreide meetcampagne vereisen.
- De berekening van de hoeveelheid afstroming wordt sterk bepaald door de bedekkingsgraad die op zijn beurt weer bepaald wordt door de toestand van het gewas op het moment van de regenbui. Het inschatten van deze laatste dient nu te gebeuren door de operator. Het zou zeker mogelijk zijn om een eenvoudig gewasgroeimodel te gebruiken om de gewastoestand te voorspellen. Een dergelijk model zou de gewastoestand (en dus ook de bedekkingsgraad) benaderend voorspellen op basis van het weersverloop tijdens het groeiseizoen. Dit kan generiek gebeuren (voor gemiddelde weerssituaties) of specifiek voor een bepaald jaar/datum.
- In dit project werd voor de simulatie van regenbuien in verschillende seizoenen steeds gewerkt met een constante K-waarde (bodemosiviteitsfactor), enkel afhankelijk van bodemtextuur. Het is echter aannemelijk te veronderstellen dat andere, meer seizoensafhankelijke bodemeigenschappen ook een invloed uitoefenen op deze factor. Meer onderzoek is nodig om deze seizoensafhankelijkheid van de K-factor te identificeren en vervolgens in te brengen in het model.
- Tijdens de toetsing van de gesimuleerde ruimtelijke erosie- en sedimentatiepatronen voor het stroomgebied Velm met de terreinkennis en –ervaring van de lokale erosiecoördinator (Karel Vandaele, land-en-water.be) werd vastgesteld dat, voor dit stroomgebied, de sedimentatie in droge valleien allicht wordt overschat. Op basis van deze observatie werd de berekening van de LS factor in het model aangepast, naar een aanbeveling van Petric (2013), zie §3.2.2. In een vervolgproject zou hier nog dieper op kunnen worden ingegaan. Hierbij moet echter worden vermeden dat het model enkel wordt afgesteld op basis van de resultaten en observaties uit één stroomgebied. Dit zal immers leiden tot een significante daling in de voorspellende kracht van het model voor andere gebieden. De verzameling van een voldoende grote dataset omtrent de ruimtelijke patronen van erosie en sedimentatie in verschillende gebieden is daarom een eerste cruciale stap voor verder onderzoek.
- Een ander belangrijk element voor verder onderzoek is de verzameling van gedetailleerde veldgegevens over de concrete impact van verschillende EBM op erosie, sedimentatie en afstroming van water. Deze data zou goed gebruikt kunnen worden voor de parameterisatie van de verschillende EBM in het CN_WS model en voor validatie-doeleinden.

- Verder kan in een eventuele opvolging van dit project de mogelijkheid worden onderzocht voor het gebruik van een alternatieve verdeling van sediment over het hydrogram. Momenteel gebeurt dit in het model lineair, wat goede resultaten opleverde. In theorie verwachten we echter dat in de meeste gevallen de sedimentpiek vóór de afstromingspiek ligt en zou bijvoorbeeld een exponentiële verdeling tot betere resultaten kunnen leiden (zie ook Voortgangsrapport 2, sectie 2.3.6.2).
- In het huidige model wordt water zowel in functie van ruimte als tijd gesimuleerd. Erosie- en sedimentatieprocessen worden onafhankelijk hiervan gemodelleerd en enkel in functie van ruimte. Een volgende logische stap zou dus kunnen zijn om het transport van sediment rechtstreeks te koppelen aan watertransport en mee als een dynamisch gegeven te simuleren. Dit vereist wel het ontwerpen en testen van een nieuwe modelstructuur: het kalibreren van een dergelijke structuur kan eventueel vergemakkelijkt worden door niet enkel veldgegevens te gebruiken maar door er bv. ook voor te zorgen dat de totale sedimenthoeveelheid voor een evenement overeenkomt met deze voorspeld door WATEM/SEDEM.
- In het CN_WS model bestaat de optie om de kleifractie van het sediment in te schatten. Dit gebeurt op een eenvoudige wijze op basis van een aanrijdingsfactor (afhankelijk van de sedimentconcentratie) en de kleiconcentratie in het oorspronkelijk geërodeerd bodemmateriaal. Een andere mogelijkheid is om dit ook meer dynamisch te modelleren, zoals bijvoorbeeld in de *metals* versie van WaTEM/SEDEM, dat gebruikt wordt om het transport van contaminanten doorheen het landschap te modelleren (Jordan et al., 2009).
- Tot slot kan nog gewerkt worden aan de verdere oprijving van de gebruiksvriendelijkheid van het model. Hierbij wordt gedacht aan een gedeeltelijke automatisatie van de aanmaak van de nodige inputdata voor aarden dammen/bufferbekkens/plantaardige dammen. Momenteel dient de gebruiker per dam de laagst gelegen cel handmatig te selecteren en alle bijbehorende cellen handmatig een ander ID toe te kennen. Dit zou in de toekomst geautomatiseerd kunnen worden. Ook de aanmaak van inputdata voor grachten/geleidende dammen zou eventueel nog verder geautomatiseerd kunnen worden.

6 **Besluit**

In dit rapport werden de finale resultaten van het projectluik Bodem voorgesteld. Het algemene doel van dit luik was de ontwikkeling van een sedimentexportmodel, dat de aanvoer van water en sediment naar onbevaarbare waterlopen kan simuleren in functie van tijd en ruimte. Dit model zal in een latere fase van het project gekoppeld worden aan een sedimenttransportmodel, ontwikkeld door Antea, dat de dynamiek van het sediment in de waterloop modelleert.

In een eerste fase werden verschillende potentiële modellen, die als basis konden dienen voor de ontwikkeling van de gewenste tool, geëvalueerd en getest. Uiteindelijk werd gekozen voor de combinatie van twee empirische modellen, namelijk een aangepaste versie van het Curve Number model voor de simulatie van afstroming en het WaTEM/SEDEM model voor de simulatie van erosie en sedimenttransport. De belangrijkste argumenten voor deze keuze waren de relatief eenvoudige modelstructuur, de beperkte hoeveelheid benodigde inputdata en het feit dat beide modellen reeds talloze keren succesvol waren toegepast in Vlaanderen en daarbuiten. Daarnaast mag echter ook vermeld worden dat deze modellen een aantal functionaliteiten bieden die bestaande modellen niet bieden (zie lager).

Beide geselecteerde modellen werden zodanig aangepast en gecombineerd totdat het eindresultaat (genaamd CN_WS model) aan de vooropgestelde functionaliteit voldeed. Het CN_WS model is in staat om voor stroomgebieden van verschillende grootteorde hydrogrammen en sedigrammen te genereren, zowel op één of meerdere door de gebruiker gekozen locaties als per riviersegment, en dit zowel voor één enkel neerslagevenement als voor een maximale periode van één jaar. Bovendien krijgt de gebruiker ook een goed idee van de afstromings- en erosiedynamiek doorheen het bekken via kaarten. Een belangrijk pluspunt van dit model, in vergelijking met andere, bestaande modellen, is ten slotte dat het toelaat om het effect van verschillende erosiebestrijdingsmaatregelen (bufferende en geleidende dammen, bufferbekkens, grasbufferstroken, grasgangen, grachten, conservation tillage, groenbedekkers en andere teeltechnische maatregelen) op afstroming en sedimentexport eenvoudig te simuleren. Het uiteindelijke model werd in een gebruiksvriendelijke Windows interface geïmplementeerd en voorzien van een uitgebreide handleiding met een beschrijving van zowel de aanmaak van de vereiste input data als van het gebruik van het model zelf.

Na een kalibratiefase aan de hand van gedetailleerde data uit stroomgebieden gelegen in het Demer- en Bovenscheldebekken, werd het model uitgebreid toegepast op alle bemeten stroomgebieden in het Demer- en Bovenscheldebekken. Deze onafhankelijke validatie leidde tot veelbelovende resultaten die de toepasbaarheid en performantie van het CN_WS model mooi illustreren. Zowel de afstroming als totale sedimentvracht aan de uitlaat van het bekken werden voor verscheidene neerslagevenementen en voor een gehele periode van een jaar met een aanvaardbare tot hoge nauwkeurigheid voorspeld, zeker in vergelijking met gelijkaardige, vaak veel complexere, modellen. De afwijkingen tussen metingen en simulatieresultaten kunnen te wijten zijn aan een veelheid van factoren (schaaleffecten, onnauwkeurigheid input data, ontbreken van elementen in het model, onjuiste aannames), waarbij moeilijk te bepalen valt welk van deze factoren de voornaamste is. De uitgevoerde gevoeligheidsanalyse geeft de gebruiker alvast een goed idee welke factoren een wezenlijk effect kunnen hebben op de modelresultaten (CN waarde, perceelsconnectiviteit, aanwezigheid rioleringen).

Vervolgens werd het CN_WS model toegepast op de 1^{ste} categorie waterlopen in het Demer- en Bovenscheldebekken, alsook op alle Vlaamse hydrografische bekkens. Ook hier werden realistische eindresultaten bekomen, wat aangeeft dat het CN_WS model wel degelijk op gebieden van sterk uiteenlopende grootteorde kan worden toegepast. De gedetailleerde resultaten van deze simulaties worden overgemaakt aan Antea voor de simulatie van de sedimentdynamiek in de waterlopen.

Tot slot werden op basis van de opgedane ervaringen tijdens de ontwikkeling van het CN_WS model nog enkele suggesties gedaan voor mogelijk vervolgonderzoek. Dankzij de relatief eenvoudige

modelstructuur kan het model immers relatief snel en eenvoudig aangepast worden op basis van nieuwe inzichten verworven na verdere toepassing en toetsing aan bestaande of nieuwe datasets.

BIJLAGEN

Bijlage 1 - Overzichtstabel voor elk geselecteerd model

Bijlage 2 - Resultaten voor oppervlakkige afstroming voor bekkens in zuid Limburg (2008)

Bijlage 3 - Resultaten voor totale sedimentproductie voor bekkens in zuid Limburg (2008)

Bijlage 4 - Referenties

Bijlage 1 *Overzichtstabel voor elk geselecteerd model*

1) WaTEM/SEDEM

Empirisch of proces-gebaseerd?	Ruimtelijk verdeeld, empirisch erosie- en sedimentatiemodel
Welke processen worden in rekening gebracht?	Simuleert watererosie (RUSLE), bewerkingserosie, sedimenttransport en –depositie
Met welk algoritme wordt sediment getransporteerd?	Flux decomposition algoritme
Mogelijkheid tot berekening korrelgrootteverdeling?	Ja, aan de hand van empirisch afgeleide aanrijksfactoren voor verschillende korrelgroottefracties
Welk ruimtelijk schaalniveau?	Oorspronkelijke resolutie van 20x20 m., maar mogelijk voor 5x5 m mits herkalibratie Zowel voor individuele velden als grote bekkens
Welke temporele resolutie? (Event-/jaarbasis?)	Lange termijn: het model berekent de gemiddelde jaarlijkse erosie
Mogelijk om EBM in rekening te brengen?	Ja, het effect van de meeste EBM gebruikt in Vlaanderen kan kwantitatief worden ingeschat
Hoe en waar gekalibreerd en gevalideerd?	Zeer uitgebreid gekalibreerd en gevalideerd voor de Belgische leemstreek, maar ook voor andere gebieden wereldwijd
Rekentijd?	Beperkt
Welke inputparameters zijn nodig?	Beperkt aantal. DTM, perceelskaart, R factor, C-factoren, K-factoren, kTc waarden, ktil waarden
Welke output wordt gegenereerd?	Kaarten met per pixel de gemiddelde jaarlijkse erosie of depositie, hoeveelheid sediment die de waterloop bereikt (per riviersegment), evt. korrelgroottes
Modelopbouw/programmeertaal?	Eenvoudige structuur. Oorspronkelijk in Delphi 5, nu ook in Lazarus (FreePascal)
Mogelijkheid tot het vereenvoudigen van het model?	Model moet worden uitgebreid voor event-gebaseerde berekeningen. Formules hiervoor bestaan reeds. Broncode model is beschikbaar dus vrij aan te passen
Bijkomende opmerkingen	Veel ervaring met dit model aan KULeuven
Referenties	Van Oost et al. (2000) Van Rompaey et al. (2001)

2) SPADS (SPAtially Distributed Scoring model)

Empirisch of proces-gebaseerd?	Empirisch erosiemodel
Welke processen worden in rekening gebracht?	Aan de hand van een score (gebaseerd op de USLE) wordt een index berekend: $\text{Index} = V \cdot T \cdot L \cdot R \cdot G \cdot Di$. Aan de hand van een empirisch afgeleide relatie wordt deze index omgezet in de sedimentproductie van het hele bekken
Met welk algoritme wordt sediment getransporteerd?	Geen transport van sediment
Mogelijkheid tot berekening korrelgrootteverdeling?	Neen
Welk ruimtelijk schaalniveau?	De input kan worden ingegeven in gridcellen SPADS kan worden toegepast op relatief grote bekkens
Welke temporele resolutie? Event-/jaarbasis?	SPADS berekent de gemiddelde jaarlijkse sedimentproductie
Mogelijk om EBM in rekening te brengen?	Zeer beperkt: per variabele (bv. vegetatie en topografie) kunnen maar 3 klassen worden gedefinieerd
Hoe en waar gekalibreerd en gevalideerd?	61 stroomgebieden in Spanje
Rekentijd?	Beperkt
Welke inputparameters zijn nodig?	Vegetatie, topografie, lithologie, regenval, ravijnen en afstand van elke cel tot de meest nabije stroom. Elke factor wordt ingegeven als een waarde tussen 1 en 3
Welke output wordt gegenereerd?	Een erosie index per gridcel en gemiddeld voor het volledige stroomgebied, op basis waarvan de totale sedimentproductie wordt berekend
Modelopbouw/programmeertaal?	-
Mogelijkheid tot het vereenvoudigen van het model?	Beperkt, het is al een zeer eenvoudig model
Bijkomende opmerkingen	Het model kan relatief goed de totale sedimentproductie van stroomgebieden berekenen, maar is te eenvoudig om de ruimtelijke verdeling van erosie correct weer te geven. Het is ook niet in staat om sedimenttransport of -depositie te simuleren
Referenties	De Vente et al. (2008)

3) MCST (Multi Class Sediment Transport model)

Empirisch of proces-gebaseerd?	Proces-gebaseerd, ruimtelijk verdeeld erosie- en sedimentatiemodel
Welke processen worden in rekening gebracht?	Uitgebreide fysische basis: grootte-selectieve sediment depositie en niet-selectieve erosie, erosie van eerder gesedimenteerde deeltjes, hydrogram berekend adhv kinematische golfvergelijking, verschil tussen sheet en geul afvoer obv kritische schuifspanning, berekening van effectief debiet, ...
Met welk algoritme wordt sediment getransporteerd?	Gebaseerd op het TCRP model (Takken et al., 2001): houdt rekening met ploegrichting. Bovendien wordt voor niet-geconcentreerde stroming een multiple-flow en voor geul stroming een single-flow algoritme gebruikt. Water wordt getransporteerd met de kinematische golf vergelijking
Mogelijkheid tot berekening korrelgrootteverdeling?	Ja, het model simuleert depositie van verschillende korrelgrootteklassen gebaseerd op de gemiddelde valsnelheid van elke klasse. Erosie is niet grootte-selectief
Welk ruimtelijk schaalniveau?	Geen vermelding van gebruikte resolutie Toegepast op velden van o.a. 3; 3,7 en 0,7 ha
Welke temporele resolutie? Event-/jaarbasis?	Simulatie van individuele stormen
Mogelijk om EBM in rekening te brengen?	Ja, het effect van de meeste EBM (bv. grasbufferstroken, oogstresidu's, ...) kan goed worden weergegeven
Hoe en waar gekalibreerd en gevalideerd?	Enkel voor kleine bekkens getest in Belgische leemstreek en Duitsland
Rekentijd?	Relatief lang
Welke inputparameters zijn nodig?	Relatief veel en moeilijk meetbare input. O.a. topografische informatie, sediment densiteit, valsnelheid per grootte-klasse, drempelwaarde voor her-suspensie, curve number, regenval intensiteit, antecedent bodemvochtgehalte, landgebruik, bodembedekking, bodemruwheid, hydraulische ruwheid, ...
Welke output wordt gegenereerd?	Kaarten van o.a. debiet per tijdstap, effectief debiet, locaties van geul en niet-geconcentreerde erosie, netto erosie en – depositie, sediment grootte-verdeling van deposities en van sediment dat het bekken verlaat.
Modelopbouw/programmeertaal?	-
Mogelijkheid tot het vereenvoudigen van het model?	-
Bijkomende opmerkingen	Model is heel gevoelig aan bv. het curve number Model simuleert enkel primaire deeltjes, geen aggregaten
Referenties	Van Oost et al. (2004) Fiener et al. (2008)

4) openLISEM (Limburg Soil Erosion Model)

Empirisch of proces-gebaseerd?	Proces-gebaseerd, ruimtelijk verdeeld erosie- en sedimentatiemodel
Welke processen worden in rekening gebracht?	Het model simuleert regenval, interceptie, oppervlakkige opslag en afstroming, infiltratie, erosie in geconcentreerde (geul) en niet-geconcentreerde afstroming en sedimentatie op vlaktes en in kanaaltjes
Met welk algoritme wordt sediment getransporteerd?	Oorspronkelijk enkel routing obv topografie, later ook obv ploegrichting en andere lineaire landschapselementen. Water wordt getransporteerd met de kinematische golf vergelijking
Mogelijkheid tot berekening korrelgrootteverdeling?	Neen
Welk ruimtelijk schaalniveau?	Bekkens tussen 1 ha en $\pm 100 \text{ km}^2$ Mogelijk voor een resolutie van 5 x 5 m.
Welke temporele resolutie? Event-/jaarbasis?	Het model is ontworpen om stormen te simuleren
Mogelijk om EBM in rekening te brengen?	Ja, de parameterwaarden kunnen worden aangepast voor bepaalde EBM
Hoe en waar gekalibreerd en gevalideerd?	Het model wordt intensief toegepast in Nederlands Limburg Voor bepaalde velden in de Belgische Leemstreek (Ganspoel en een bekken nabij Tongeren)
Rekentijd?	Relatief lang
Welke inputparameters zijn nodig?	Veel en moeilijk meetbaar. Topografische informatie, ruimtelijke verdeling van o.a. regenval (intensiteit), locatie van kanaaltjes, fractie bodembedekking, random bodemruwheid, fractie stenigheid aan het oppervlak, breedte van bandensporen en wegen, verzadigde conductiviteit, intieel en verzadigd bodemvocht, suction head at wetting front, bodemtextuur aan het oppervlak.
Welke output wordt gegenereerd?	Aparte hydrogrammen en sedigrammen, totale oppervlakkige afvoer, totaal bodemverlies, piekafvoer, ruimtelijke verdeling van erosie, depositie en oppervlakkige afvoer.
Modelopbouw/programmeertaal?	Open source
Mogelijkheid tot het vereenvoudigen van het model?	-
Bijkomende opmerkingen	Het model heeft problemen met lange stormen, omdat veranderingen van bodemkarakteristieken tijdens eens storm niet in rekening worden gebracht. Voor kalibratie zijn gegevens van individuele stormen nodig Problemen met depositie aan vegetatiebarrières en naast wegen
Referenties	De Roo et al. (1996a, b) http://www.itc.nl/lisem/

5) PESERA (Pan European Soil Erosion Risk Assessment)

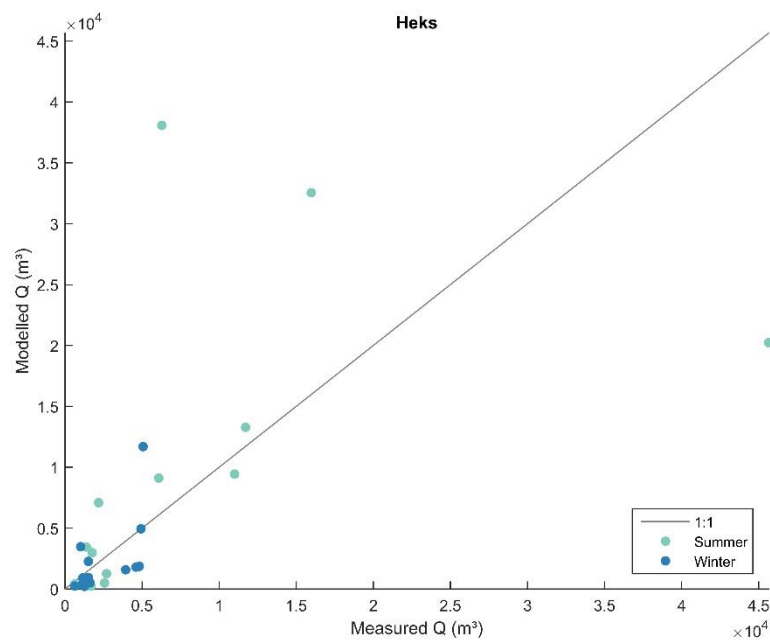
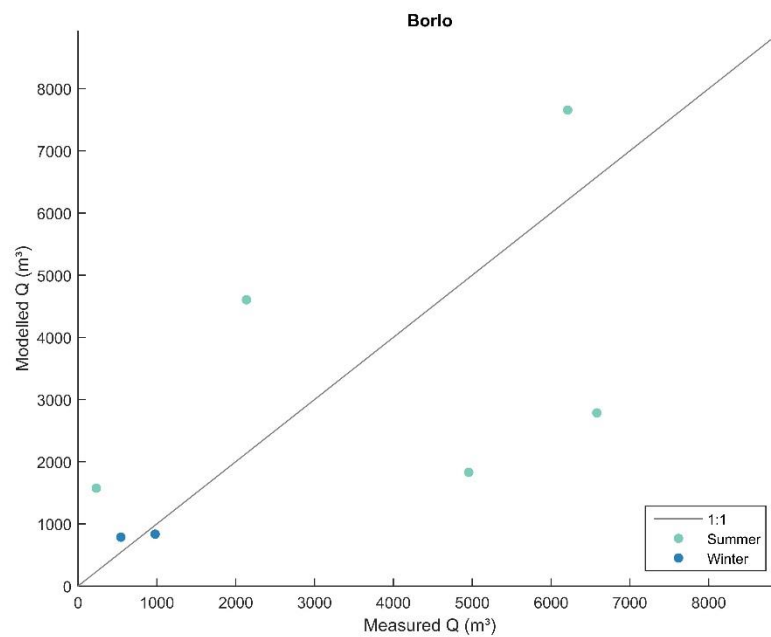
Empirisch of proces-gebaseerd?	Proces-gebaseerd, ruimtelijk verdeeld erosiemodel
Welke processen worden in rekening gebracht?	Erosie wordt per pixel berekend aan de hand van de erodeerbaarheid van de bodem, topografie en afvoer. Verder worden bodemvocht, ondiep grondwater, grondwaterstroming, interceptie, evapotranspiratie, plantengroei, bodemvorst, ... in rekening gebracht
Met welk algoritme wordt sediment getransporteerd?	Het model simuleert geen transport van sediment.
Mogelijkheid tot berekening korrelgrootteverdeling?	Neen
Welk ruimtelijk schaalniveau?	Het model is ontwikkeld voor gebruik op Europese schaal, met een resolutie van 1 km ² . Volgend de auteurs zijn gridcellen tot ± 100 m resolutie mogelijk.
Welke temporele resolutie? Event-/jaarbasis?	Het model berekent de lange termijn gemiddelde erosie met een tijdstap van 1 maand.
Mogelijk om EBM in rekening te brengen?	Zeer beperkt, gegeven de lage resolutie.
Hoe en waar gekalibreerd en gevalideerd?	Voor een groot deel van Europa.
Rekentijd?	?
Welke inputparameters zijn nodig?	Maandelijkse klimaatdata, landgebruiks- en gewasgegevens, bodemparameters en een DTM (een totaal van 128 datalagen is nodig).
Welke output wordt gegenereerd?	Maandelijkse output per gridcel: erosie, runoff, soil water deficit, hoeveelheid interceptie, biomassa in vegetatie, % bedekking door vegetatie en massa organisch bodemmateriaal.
Modelopbouw/programmeertaal?	Excel of Fortran
Mogelijkheid tot het vereenvoudigen van het model?	?
Bijkomende opmerkingen	Het model gaat ervan uit dat al het materiaal dat per gridcel wordt geërodeerd ook een rivier bereikt. Geen mogelijkheid om een gedetailleerde weergave van erosie- en sedimentatiepatronen te berekenen.
Referenties	Kirby et al. (2008)

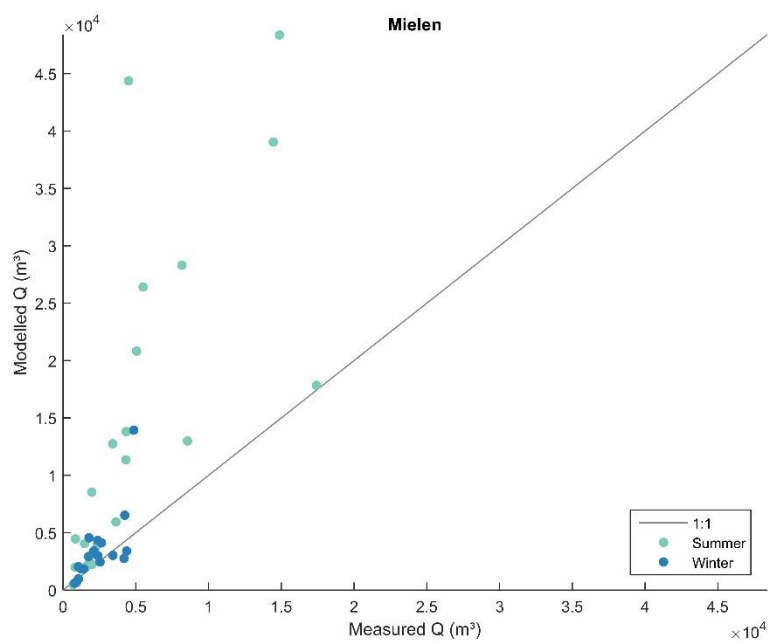
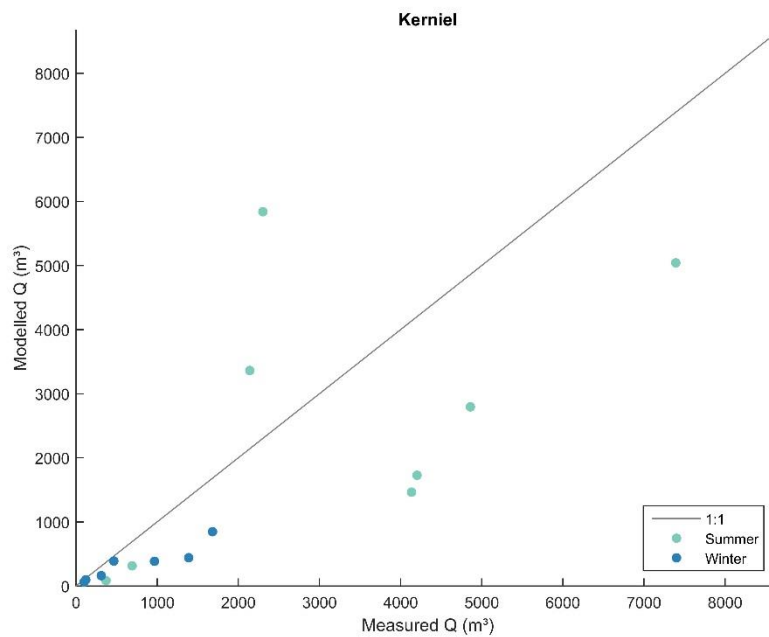
6) SWAT (Soil and Water Assessment Tool)

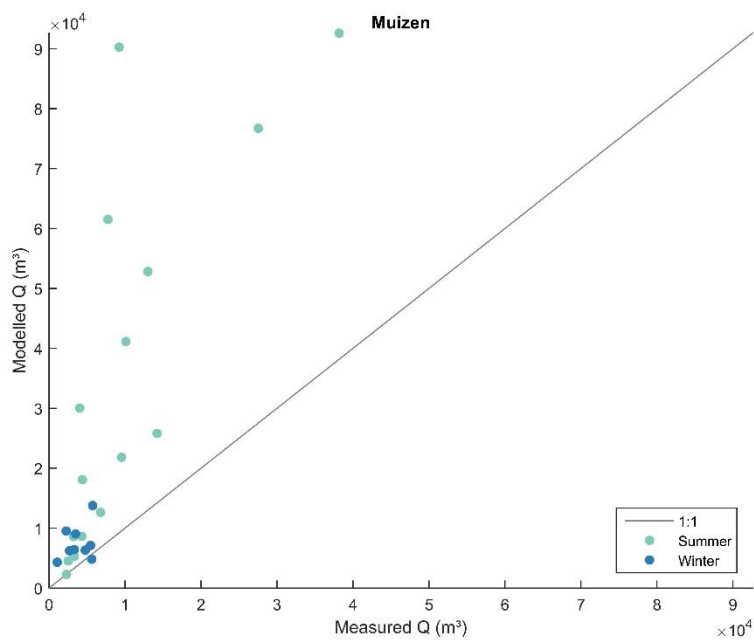
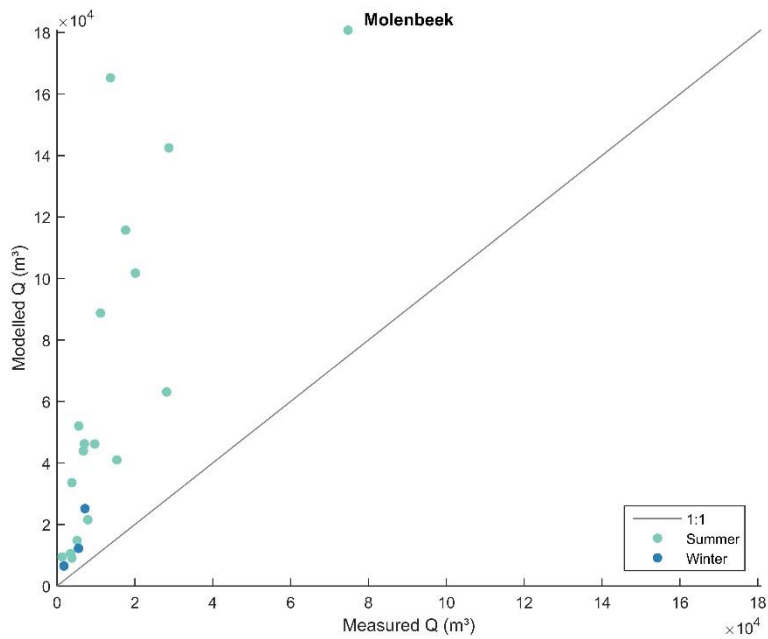
Empirisch of proces-gebaseerd?	Proces-gebaseerd, semi-ruimtelijk erosiemodel voor grote bekkens
Welke processen worden in rekening gebracht?	Het model verdeelt het landschap in bekkens, subbekkens en Hydrologische respons eenheden (HRUs), waarbinnen erosie wordt berekend aan de hand van de runoff erosiviteit (Modified USLE, MUSLE). Het model berekent runoff (obv. curve number), evapotranspiratie, percolatie, return flow en laterale grondwaterstroming. De hydrologie wordt berekend adhv neerslag, temperatuur, instraling, windsnelheid en relatieve vochtigheid. Verder houdt het model rekening met de bodemtemperatuur en plantengroei.
Met welk algoritme wordt sediment getransporteerd?	Stroming van water, sediment, nutriënten en polluenten naar rivieren en stroming in waterlopen worden gesimuleerd
Mogelijkheid tot berekening korrelgrootteverdeling?	Neen
Welk ruimtelijk schaalniveau?	SWAT simuleert water en sedimenttransport voor zeer grote bekkens (tot sub-continentaal niveau)
Welke temporele resolutie? Event-/jaarbasis?	Het model simuleert erosie over een lange termijn (tijdstep van 1 dag). Omdat er met de runoff erosiviteit wordt gewerkt kunnen er ook voorspelling voor individuele stormen worden gedaan
Mogelijk om EBM in rekening te brengen?	Beperkt, afhankelijk van de schaal van de hydrologische respons eenheden. SWAT simuleert voornamelijk het effect van management technieken.
Hoe en waar gekalibreerd en gevalideerd?	Voor verschillende grote bekkens in de USA (bv. Ohio River en Arkansas-White-Red River) en China (Gele rivier)
Rekentijd?	?
Welke inputparameters zijn nodig?	Op HRU niveau: landgebruik, bodemeigenschappen (o.a. textuur, bulkdensiteit, verzadigde hydraulische conductiviteit), gegevens over management (o.a. gewasdata en ploegmethode) en topografie. Op sub-bekken niveau: klimaatdata (o.a. temperatuur en neerslag), puntdata van nutriënten (optioneel), ...
Welke output wordt gegenereerd?	Totale hoeveelheid afstroming, sediment, nutriënten en pesticiden die over het land een bepaalde rivier bereiken.
Modelopbouw/programmeertaal?	?
Mogelijkheid tot het vereenvoudigen van het model?	?
Bijkomende opmerkingen	?
Referenties	Arnold et al. (1998) Neitsch et al. (2005) Santhi et al. (2008)

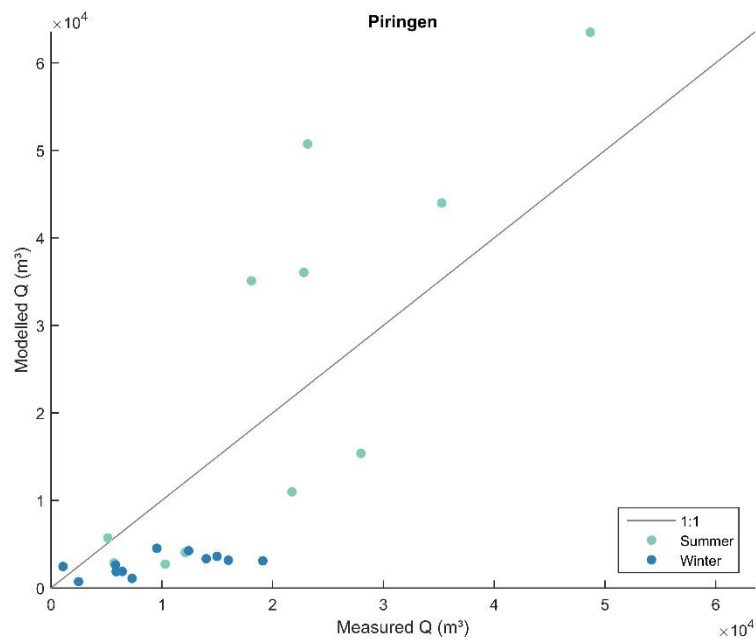
Bijlage 2 Resultaten voor oppervlakkige afstroming voor bekkens in zuid Limburg (2008)

Deze grafieken tonen de gemeten versus de gesimuleerde totale afstroming (m^3) voor geselecteerde neerslagevenementen in zuid Limburg voor het jaar 2008. De neerslagevenementen zijn geselecteerd uit de data van het sedimentmeetnet op basis van hun realistische afstromingsratios (0-10%).





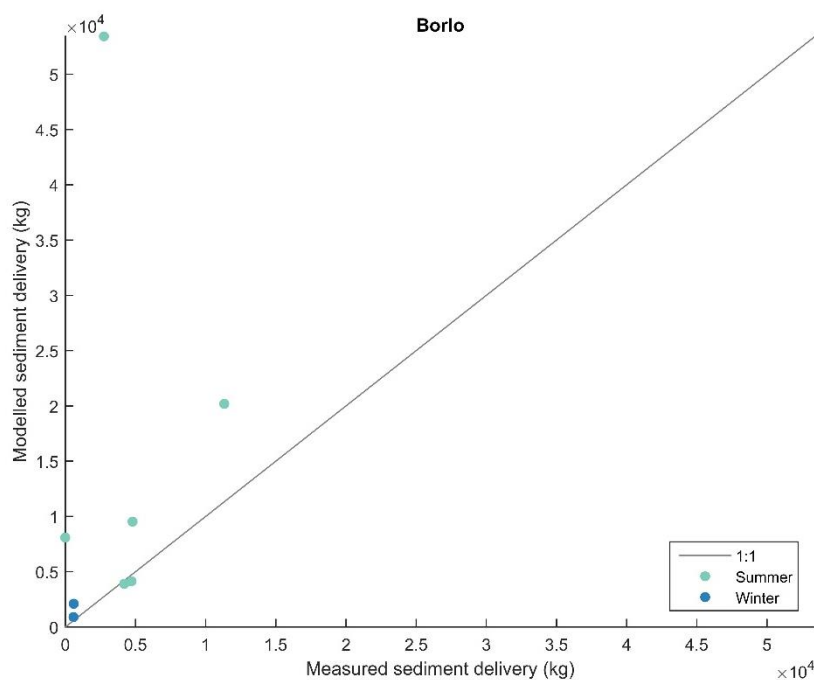




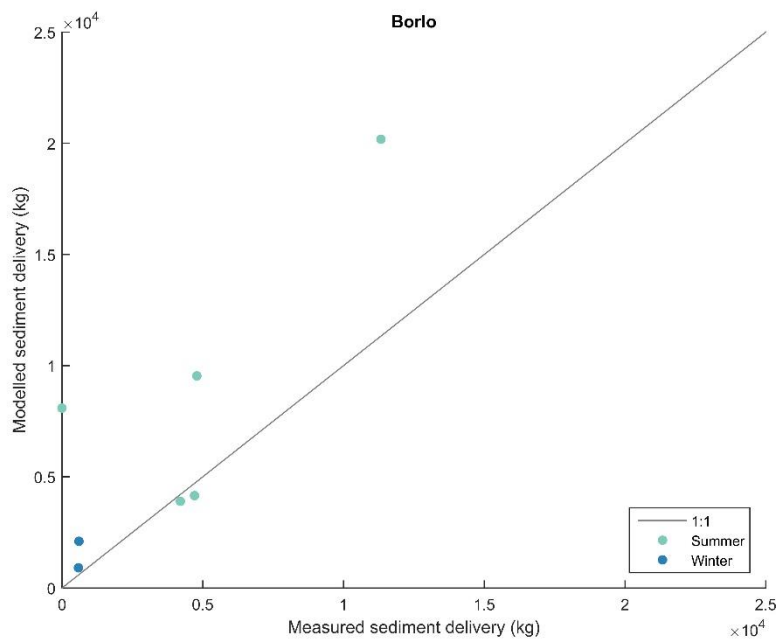
Bijlage 3 Resultaten voor totale sedimentproductie voor bekkens in zuid Limburg (2008)

Deze grafieken tonen de gemeten versus de gesimuleerde totale sedimentvracht (kg) voor geselecteerde neerslagevenementen in zuid Limburg voor het jaar 2008. De neerslagevenementen zijn geselecteerd uit de data van het sedimentmeetnet op basis van hun realistische afstromingsratios (0-10%). Per bekken worden twee grafieken getoond: één voor alle gesimuleerde events en één waarin enkel de kleinste events worden getoond.

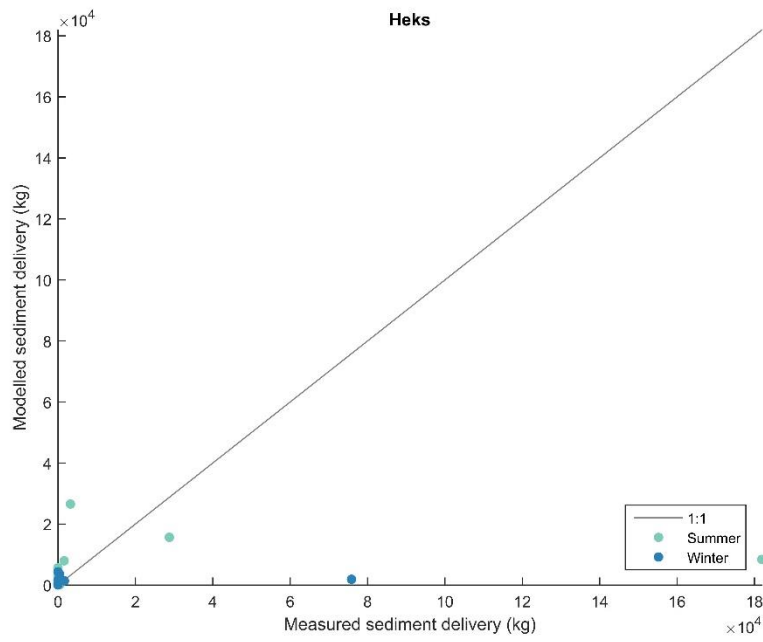
Borlo: alle events



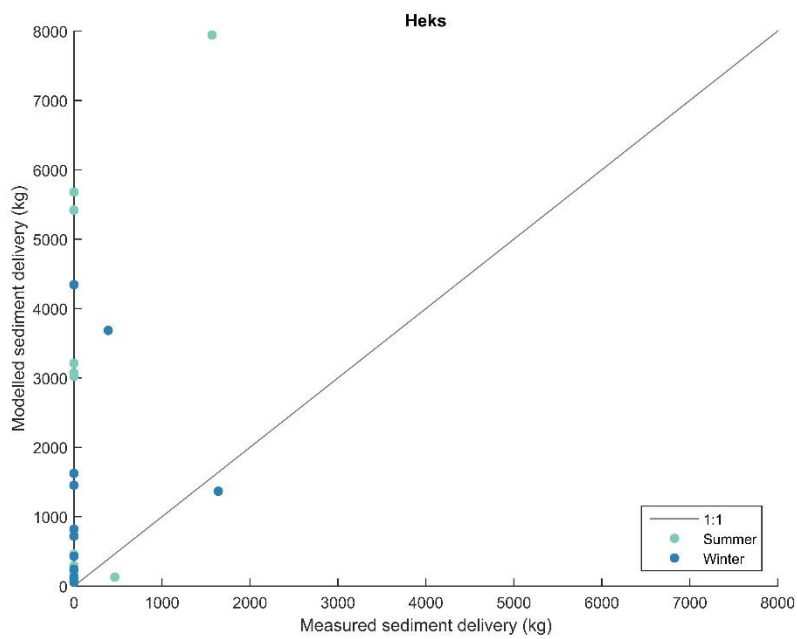
Borlo: enkel de kleinste events



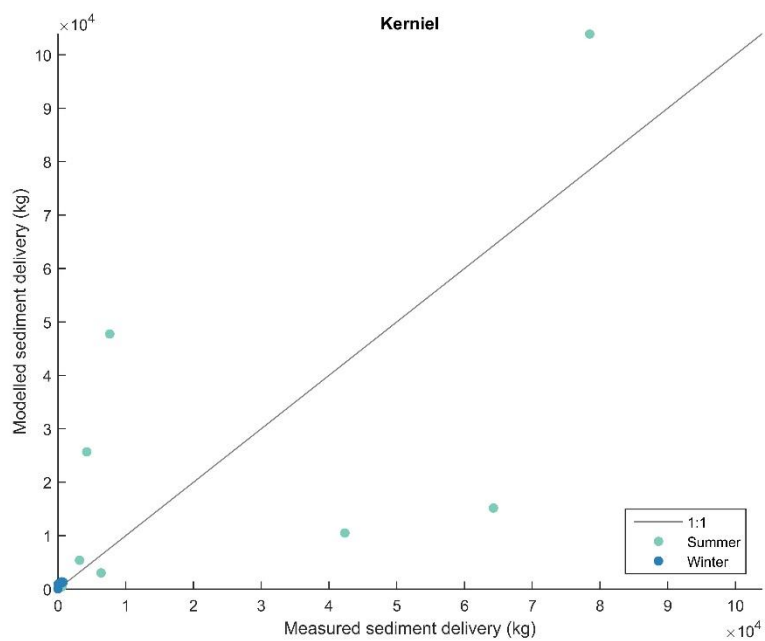
Heks: alle events



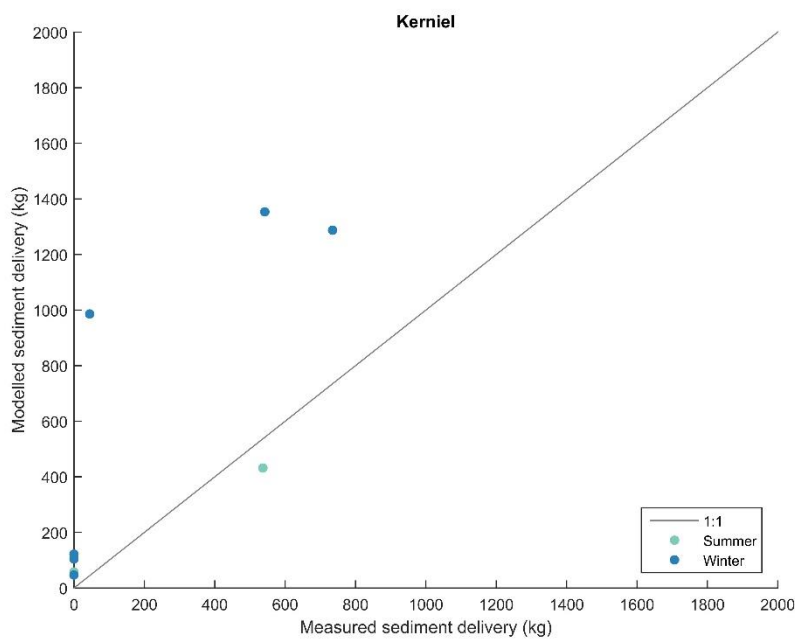
Heks: enkel de kleinste events



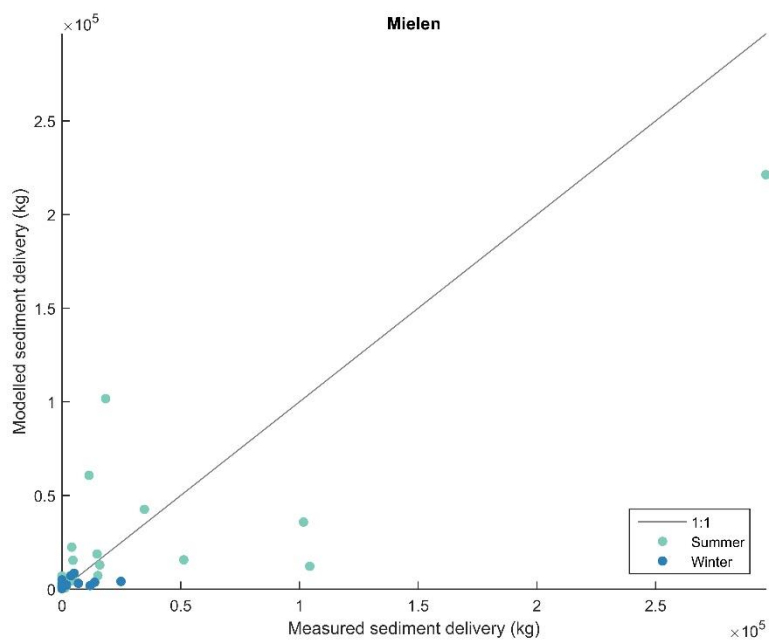
Kerniel: alle events



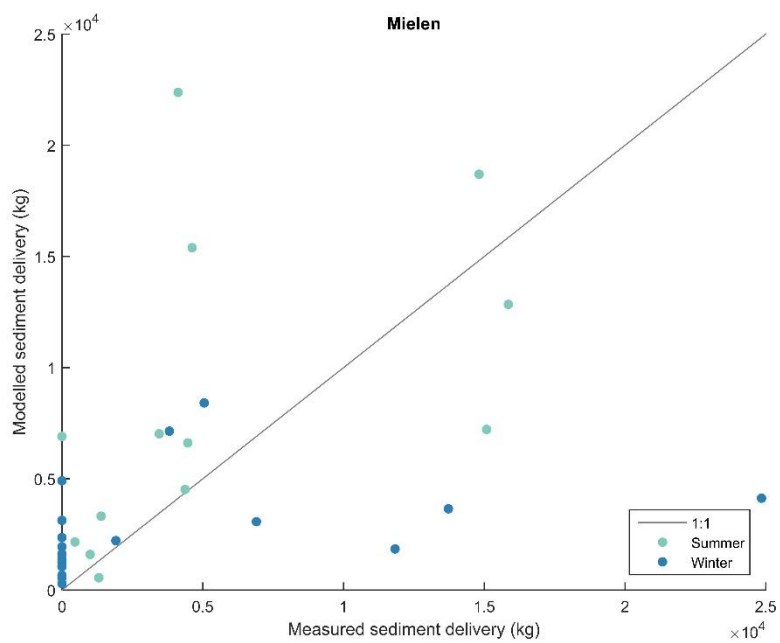
Kerniel: enkel de kleinste events



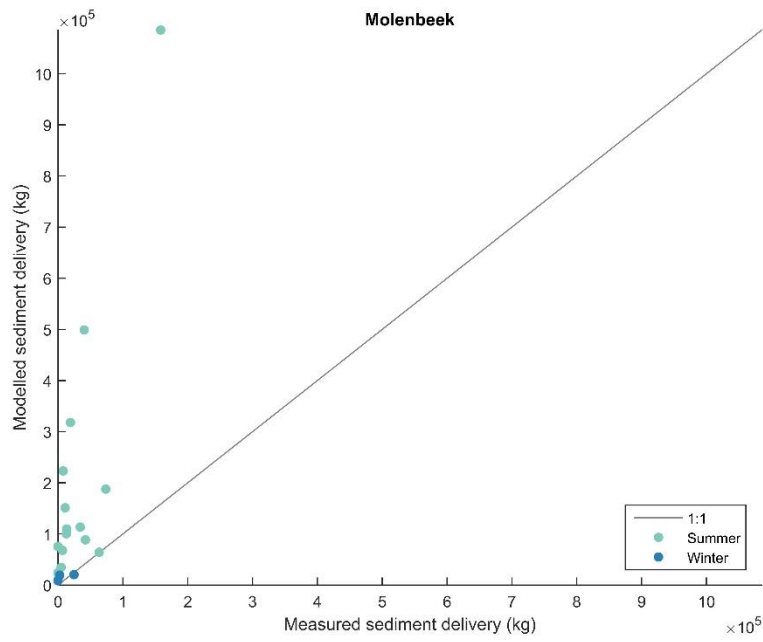
Mielen: alle events



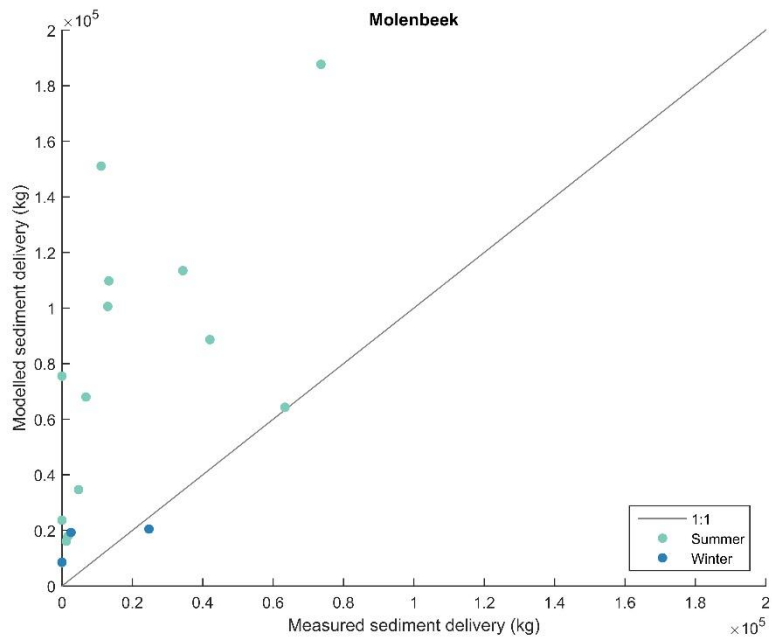
Mielen: enkel de kleinste events



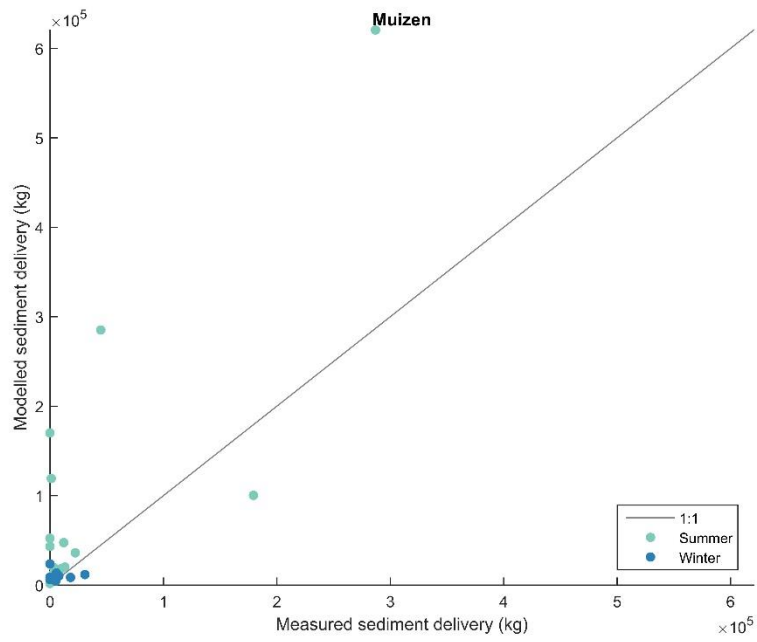
Molenbeek: alle events



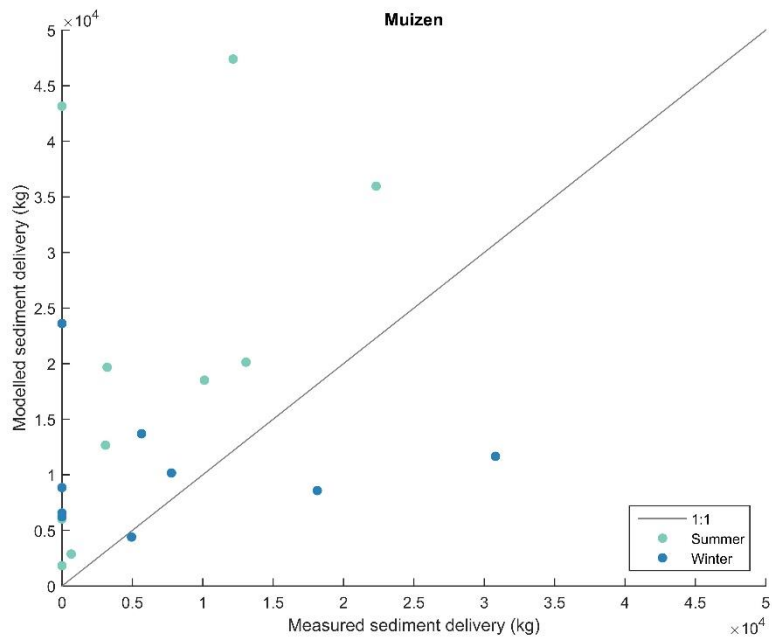
Molenbeek: enkel de kleinste events



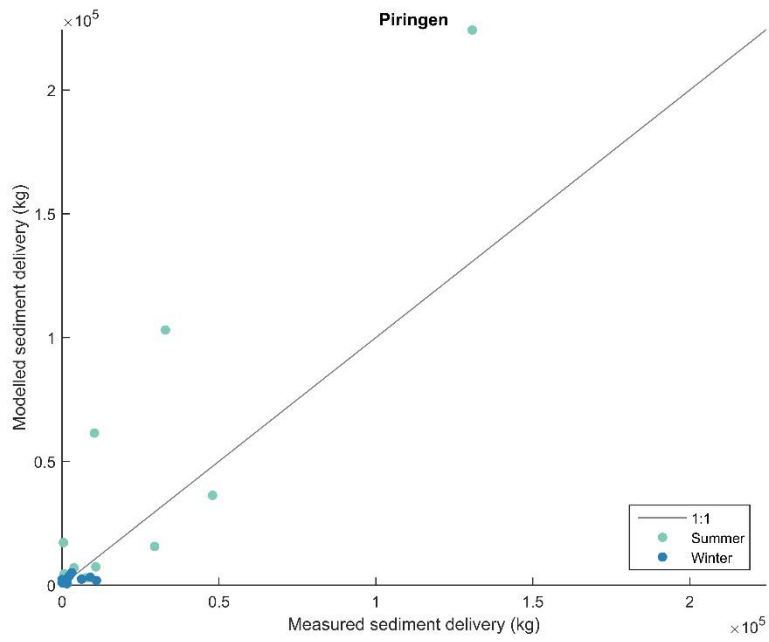
Muizen: alle events



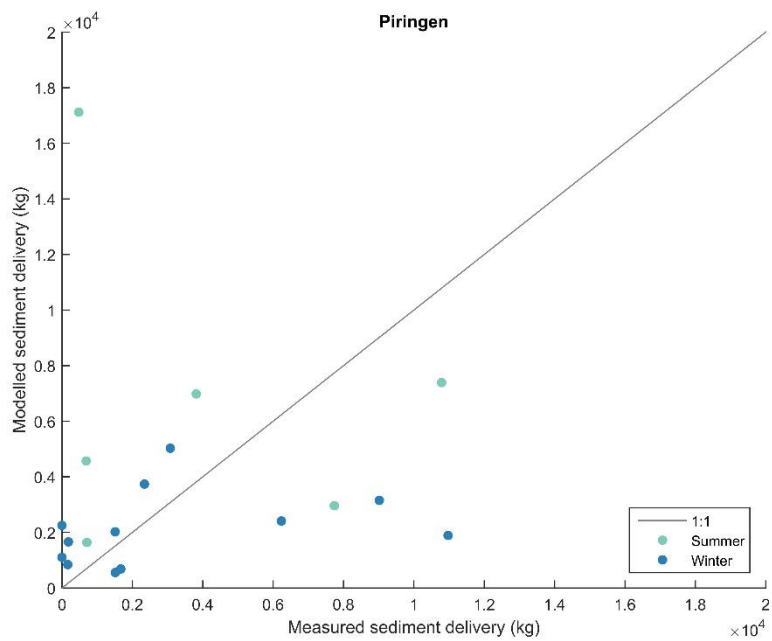
Muizen: enkel de kleinste events



Piringer: alle events



Piringer: enkel de kleinste events



Bijlage 4 Referenties

- Arnold J. G., Srinivasan R., Muttiah R. S., Williams J. R., 1998, Large area modeling and assessment part 1: model development, *Journal of the American Water Resources Association* 34 (1): 73 – 89.
- Baartman J.E.M., Jetten V.G., Ritsema C.J., de Vente J., 2012, Exploring effects of rainfall intensity and duration on soil erosion at the catchment scale using openLISEM: Prado catchment, SE Spain, *Hydrological Processes*, 26: 1034-1049.
- Beel A., Govers G., Notebaert B., 2006, Scenario's voor de reductie van erosie en sedimentaanvoer in Vlaanderen, MIRA rapport 2006.
- 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.
- De Brue H., 2016, Modelling the long-term evolution of anthropogenic land cover and environmental impact in the Central Belgian Loess belt. PhD Thesis, KU Leuven, 172p.
- De Roo A. P. J., Wesseling C. G., Ritsema C. J., 1996a, LISEM: a single-event physically based hydrological and soil erosion model for drainage basins. I: theory, input and output, *Hydrological Processes* 10: 1107 – 1117.
- De Roo A. P. J., Wesseling C. G., Ritsema C. J., 1996b, LISEM: a single-event physically based hydrological and soil erosion model for drainage basins. II: sensitivity analysis, validation and application, *Hydrological Processes* 10: 1119 – 1126.
- De Vente J., Poesen J., Verstraeten G., Van Rompaey A., Govers G., 2008, Spatially distributed modelling of soil erosion and sediment yield at regional scales in Spain, *Global and Planetary Change* 60: 393 – 415.
- Desmet P.J.J., Govers G., 1996, A GIS procedure for automatically calculating the USLE LS factor on topographically complex landscape units, *Journal of Soil and Water Conservation* 51 (5): 427 – 433.
- Evrard O., Vandaele K., Bielders C. & van Wesemael B., 2008, Seasonal evolution of runoff generation on agricultural land in the Belgian loess belt and implications for muddy flood triggering, *Earth Surface Processes and Landforms*, 33, 1285 – 1301.
- Fiener P., Govers G., Van Oost K., 2008, Evaluation of a dynamic multi-class sediment transport model in a catchment under soil-conservation agriculture, *Earth Surface Processes and Landforms* 33 (11): 1639 – 1660.
- Govers G., 1992, Relationship between discharge, velocity and flow area for rills eroding loose, non-layered materials, *Earth Surface Processes and Landforms*, 17: 515-528.
- Govers G., 1986, Mechanismen van akkererosie op lemige bodems, unpublished PhD thesis, Faculteit Wetenschappen, KU Leuven.
- Hawkins R.H., Hjelmfelt Jr. A.T., Members ASCE, Zevenbergen A.W., 1986, Runoff probability, storm depth and curve numbers, *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 111: 330-340.
- Jetten V., de Roo A. & Favis-Mortlock D., 1999, Evaluation of field-scale and catchment-scale soil erosion models, *Catena*, 37: 521 – 541.
- Jordan G., Van Rompaey A., Somody A., Fügedi U., Farsang A., 2009, Spatial modelling of contamination in a catchment area impacted by mining: a case study of the Recsk copper mine, Hungary, *Land Contamination & Reclamation*, 17 (3-4): 413 - 420.
- Kirby M. J., Irvine B. J., Jones R. J. A., Govers G., The PESERA team, 2008, The PESERA coarse scale erosion model for Europe. I. – Model rationale and implementation, *European Journal of Soil Science* 59: 1293 – 1306.

Leys A., Govers G., Giljins K., Berckmoes E. & Takken I., 2010, Scale effects on runoff and erosion losses from arable land under conservation and conventional tillage: the role of residue cover, *Journal of Hydrology*, 390: 143 – 154.

Meert P. & Willems P., 2013, Evaluatie van berekeningsmethoden voor het bepalen van de benodigde buffercapaciteit van kleinschalige opvangsystemen in het kader van erosiebestrijding, Eindrapport voor Vlaamse Overheid – Departement LNE, KU Leuven, 246 pp.

Nash J.E., Sutcliffe I.V., 1970, River flow forecasting through conceptual models Part I - A discussion of principles, *Journal of Hydrology*, 10: 282-290.

Nearing M.A., 1997, A single, continuous function for slope steepness influence on soil loss, *Soil Science Society of America Journal*, 61: 917-919.

Neitsch S.L., Arnold J.G., Kiniry J.R., Williams J.R., 2005, Soil and water assessment tool theoretical documentation, Version 2005, Grassland, Soil and Water Research Laboratory, Agricultural Research Service, Texas, USA.

Notebaert B., Govers G., Verstraeten G., Van Oost K., Ruyschaert G., Poesen J., Van Rompaey A., 2006, Verfijnde erosiekaart Vlaanderen: eindrapport, Onderzoeksgroep Fysische en Regionale Geografie, KU Leuven, 73 pp.

NRCS, 2010, Chapter 9 Hydrologic Soil-Cover Complexes, *National Engineering Handbook Part 630 Hydrology*, 20 pp.

Petric K., 2013, Interregionale samenwerking rond het toepassen van een vernieuwde techniek bij de evaluatie van erosiebestrijding. Onderzoeksrapport, Departement Leefmilieu, Natuur en Energie van de Vlaamse Overheid, 78 pp.

Ponce V.M. & Hawkins R.H., 1996, Runoff Curve Number: has it reached maturity?, *Journal of Hydrologic Engineering*, 1: 11-19.

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 703*, USDA, Washington D.C.

Römkens M.J.M., Young R.A., Poesen J.W.A., McCool D.K. El-Swaify S.A. & Bradford J.M., 1996, Chapter 3: Soil erodibility factor (K). In: *Predicting Soil Erosion by Water: A Guide to Conservation Planning With the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE)* (eds. Renard K.G., Foster G.R., Weesies G.A., McCool D.K. & Yoder D.C.). USDA.

Ruyschaert G., 2005, Spatial and temporal variability in soil losses due to crop harvesting, unpublished PhD thesis, Faculty of Sciences, KU Leuven.

Sanchez-Moreno J.F., Jetten V., Mannaerts C.M., de Pina Tavares J., 2013, Selecting best mapping strategies for storm runoff modeling in a mountainous semi-arid area, *Earth Surface Processes and Landforms*, 39, 1030-1048.

Santhi C., Kannan N., Arnold J.G., Di Luzio M., 2008, Spatial calibration and temporal validation of flow for regional scale hydrologic modeling, *Journal of the American Water Resources Association (JAWRA)* 44: 829-846.

Takken I., Beuselinck L., Nachtergaele J., Govers G., Poesen J., Degraer G., 1999, Spatial evaluation of a physically-based distributed erosion model (LISEM), *Catena*, 37: 431-447.

Takken I., Govers G., Jetten V., Nachtergaele J., Steegen A., Poesen J., 2001, Effects of tillage on runoff and erosion patterns, *Soil & Tillage Research* 61(1-2): 55-60.

Van den Putte A., Govers G., Leys A., Langhans C., Clymans W., Diels J., 2013, Estimating the parameters of the Green-Ampt infiltration equation from rainfall simulation data: Why simpler is better. *Journal of Hydrology*, 476: 332-344.

Van Hoestenbergh T., Voet M., Eylebosch J., Cabus P., 2008, Sedimentexport door onbevaarbare waterlopen in Vlaanderen – Metingen 2003-2007, VMM, 131 pp.

- Van Oost K., Govers G., Desmet P., 2000, Evaluating the effects of changes in landscape structure on soil erosion by water and tillage, *Landscape Ecology* 15: 577 – 589.
- Van Oost K., 2003, Spatial modeling of soil redistribution processes in agricultural landscapes, unpublished PhD thesis, Faculty of Sciences, KU Leuven.
- Van Oost K., Beuselinck L., Hairsine P. B., Govers G., 2004, Spatial evaluation of a multi-class sediment transport and deposition model, *earth Surfaces Processes and Landforms* 29: 1027 – 1044.
- Van Oost K., Govers G., Cerdan O., Thauré D., Van Rompaey A., Steegen A., Nachtergaele J., Takken I. Poesen J., 2005, Spatially distributed data for erosion model calibration and validation: The Ganspoel and Kinderveld datasets, *Catena*, 61: 105-121.
- Van Rompaey A., Govers G., Waumans T., Van Oost K., Poesen J. & Desmet J., 2000, Een regionale bodemerosiekaart voor Vlaanderen. @WEL, 3, 6 pp.
- 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* 26: 1221 – 1236.
- Van Rompaey A., Govers G., 2002, Data quality and model complexity for regional scale soil erosion prediction, *International Journal of Physical Information Science* 16: 663 – 680.
- Verbist K., Schiettecatte W. & Gabriels D., 2004, Computermodel RUSLE C-factor, eindrapport, vakgroep Bodembeheer en bodemhygiëne, UGent, 92 pp.
- Verstraeten G., 2006, Regional scale modelling of hillslope sediment delivery with SRTM elevation data, *Geomorphology*, 81: 128-140.
- Verstraeten G., Poesen J., Gillijns K., Govers G., 2006a, The use of riparian vegetated filter strips to reduce river sediment loads: an overestimated control measure?, *Hydrological Processes*, 20: 4259-4267.
- Verstraeten G., Poesen J., Demarée G., Salles C., 2006b, Long-term (105 years) variability in rain erosivity as derived from 10-min rainfall depth data for Ukkel (Brussels, Belgium): Implications for assessing soil erosion rates, *Journal of Geophysical Research*, 111, D22109.
- Wang Z., Govers G., Steegen A., Clymans W., Van den Putte A., Langhans C., Merckx R., Van Oost K., 2010, Catchment-scale carbon redistribution and delivery by water erosion in an intensively cultivated area. *Geomorphology*, 124: 65-74.
- Willems P., 2009, A time series tool to support the multi-criteria performance evaluation of rainfall-runoff models, *Environmental Modelling & Software*, 24(3), 311-321.