

***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 2: luik water



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

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:

2252433031

Datum:

07/06/2016

status / revisie:

Revisie 00

Vrijgave:

Renaat De Sutter, Contract Manager

Controle:

Bram Ferket, Projectleider

Ivan Rocabado, Account Manager

Projectmedewerkers:

Danitza Salazar, adviseur

Karen De Boeck, adviseur

Lucia Candela, technisch assistent

Claudio Cardoso, technisch assistent

© 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	8
2	ICM v6.0.5	9
3	MAARKEBEEK	15
3.1	MODEL INPUT (CNWS OUTPUT).....	15
3.2	OPBOUW ICM MODEL.....	19
3.2.1	Conversie RS model + Opwaartse uitbreiding.....	19
3.2.2	Hydrodynamische performantie.....	22
3.3	KALIBRATIE EN VALIDATIE SEDIMENTTRANSPORTMODEL.....	28
3.3.1	Meetdata.....	28
3.3.2	Terreinkennis.....	32
3.3.3	Kalibratie- en validatieperiode.....	33
3.3.4	Kalibratieproces.....	38
3.3.5	Finale STM Maarkebeek.....	47
3.4	INPUTS CNWS_v2016A.....	65
3.5	BESLUIT.....	71
BIJLAGEN	73	
BIJLAGE 1	THEORETISCHE ACHTERGROND ICM	74
BIJLAGE 2	ICM-KUL SEDIMENTTRANSPORTVERGELIJKING	78
BIJLAGE 3	ACTIVE LAYER CONCEPT ICM	82

TABELLEN

<i>Tabel 3-1</i>	Overzicht van VHA segmenten in het Maarkebeek model met overeenkomstig PDM subcatchment, schaalfactor en ICM break node.	17
<i>Tabel 3-2</i>	Overeenkomst tussen model- (CNWS) en meetresultaten voor alle gesimuleerde evenementen voor de totale hoeveelheid afstroming en de totale sedimentvracht aan de uitlaat van het stroomgebied. De gemiddelde waarden stellen gewogen gemiddelden voor op basis van de totale hoeveelheid water en sediment.	33
<i>Tabel 3-3</i>	Overeenkomst tussen model- en meetresultaten voor de totale hoeveelheid afstroming en de totale sedimentvracht over een periode van één jaar (2013) aan de uitlaat van het stroomgebied.	34
<i>Tabel 3-4</i>	Initiële parameterset voor het ICM sedimenttransportmodel Maarkebeek.	39
<i>Tabel 3-5</i>	Finale parameterset voor het ICM sedimenttransportmodel Maarkebeek.....	47
<i>Tabel 3-6</i>	Sedimentvracht voor de periode 01/10/2013-30/09/2014 op de meetlocaties in de Maarkebeek: gemeten door het VMM Sedimentmeetnet, gesommeerde opwaartse model input (= CNWS output) en gesimuleerd met het ICM model.	48
<i>Tabel 3-7</i>	Gesimuleerde en gemeten depositie op geselecteerde locaties in de Maarkebeek.	55

<i>Tabel 3-8</i> Overeenkomst tussen model- (CNWS) en meetresultaten voor de totale hoeveelheid afstroming en de totale sedimentvracht aan de uitlaat van het stroomgebied tijdens vier events. De gemiddelde waarden stellen gewogen gemiddelden voor op basis van de totale hoeveelheid water en sediment.	61
<i>Tabel 3-9</i> Overeenkomst tussen CNWS- 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. Model v2016a in rood.....	65
<i>Tabel 3-10</i> 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. Model v2016a in rood.	66
<i>Tabel 3-11</i> Sedimentvracht voor de periode 01/10/2013-30/09/2014 op de meetlocaties in de Maarkebeek: gemeten door het VMM Sedimentmeetnet, gesommeerde opwaartse model input (= CNWS v2016a output) en gesimuleerd met het ICM model.....	66

FIGUREN

<i>Figuur 3-1</i> Stroomgebied (paars) Maarkebeek: 1e (rood), 2e (groen), 3e (roze) en 9e (blauw) VHA categorie, en de meetposten (rode cirkels) van het sedimentmeetnet (VMM).....	15
<i>Figuur 3-2</i> Effect van herrekening sedimentconcentratie o.b.v. debiet geïllustreerd voor 2 VHA segmenten (groen: VHA 4028921, rood: VHA 4028920, stippellijn: originele SSC, volle lijn: herrekende SSC, donkerblauw: CNWS debiet, lichtblauw: PDM basisafvoer).	17
<i>Figuur 3-3</i> Maarkebeek: 1e (rood), 2e (groen), 3e (roze) en 9e (blauw) VHA categorie, de VHA deelstroomgebieden (zwart) en de PDM subcatchments (rood)	19
<i>Figuur 3-4</i> IWRS netwerk Maarkebeek	20
<i>Figuur 3-5</i> ICM netwerk Maarkebeek (boven) en Break nodes voor input per VHA (onder)	21
<i>Figuur 3-6</i> Locaties voor vergelijking RS en ICM model	23
<i>Figuur 3-7</i> Gesimuleerd debiet t.h.v. maa002a.1 (afwaarts) door IWRS (blauw) en ICM (rood).....	23
<i>Figuur 3-8</i> Gesimuleerd debiet t.h.v. maa038.1 (meetpunt Leupegem) door IWRS (blauw) en ICM (rood) en het gemeten debiet (zwart)	24
<i>Figuur 3-9</i> Gesimuleerd debiet t.h.v. maa066a.2 (monding Nederaalbeek) door IWRS (blauw) en ICM (rood)	24
<i>Figuur 3-10</i> Gesimuleerd debiet t.h.v. maa112a.1 (Maarkedal) door IWRS (blauw) en ICM (rood)	25
<i>Figuur 3-11</i> Gesimuleerd debiet t.h.v. maa148.1 (opwaarts) door IWRS (blauw) en ICM (rood)	25
<i>Figuur 3-12</i> Gesimuleerd debiet t.h.v. mbo19b.1 (meetpunt Marie-Borrebeek) door IWRS (blauw) en ICM (rood) en gemeten debiet (zwart)	26
<i>Figuur 3-13</i> Maximaal gesimuleerd waterpeil langsheen de Maarkebeek door IWRS (rood) en ICM (groen)	27
<i>Figuur 3-14</i> Gesimuleerde overstromingen bij maximaal waterpeil langsheen de Maarkebeek door IWRS (zwart) en ICM (oranje)	28
<i>Figuur 3-15</i> Gemeten debieten op de vier meetlocaties in het stroomgebied van de Maarkebeek	29
<i>Figuur 3-16</i> Gemeten SSC op de vier meetlocaties in het stroomgebied van de Maarkebeek	29
<i>Figuur 3-17</i> Door ARW gepeilde meetlocaties langsheen de Maarkebeek (1-8).....	30

<i>Figuur 3-18</i> Periodieke peiling thv een meetraai in de woelkom van de Borgtmolen.....	31
<i>Figuur 3-19</i> Gemeten afvoer tijdens event kerstperiode 2013 (bron: Waterinfo.be)	32
<i>Figuur 3-20</i> Debiet op meetlocatie Leupegem: meting (zwart), InfoWorks RS (geel), ICM met PDM totaaldebiet (rood) en ICM met CNWS runoff en PDM basisafvoer (blauw) voor de volledige kalibratie/validatie periode.....	35
<i>Figuur 3-21</i> Debiet op meetlocatie Leupegem: meting (zwart), InfoWorks RS (geel), ICM met PDM totaaldebiet (rood) en ICM met CNWS runoff en PDM basisafvoer (blauw) voor de events van midden oktober en begin november 2013	35
<i>Figuur 3-22</i> Debiet op meetlocatie Etikhove: meting (zwart), InfoWorks RS (geel), ICM met PDM totaaldebiet (rood) en ICM met CNWS runoff en PDM basisafvoer (blauw) voor de volledige kalibratie/validatie periode.....	36
<i>Figuur 3-23</i> Debiet op meetlocatie Etikhove: meting (zwart), InfoWorks RS (geel), ICM met PDM totaaldebiet (rood) en ICM met CNWS runoff en PDM basisafvoer (blauw) voor de events van midden oktober en begin november 2013	36
<i>Figuur 3-24</i> Debiet op meetlocatie Maarke-Kerkem: meting (zwart), ICM met PDM totaaldebiet (rood) en ICM met CNWS runoff en PDM basisafvoer (blauw) voor de volledige kalibratie/validatie periode	37
<i>Figuur 3-25</i> Debiet op meetlocatie Maarke-Kerkem: meting (zwart), ICM met PDM totaaldebiet (rood) en ICM met CNWS runoff en PDM basisafvoer (blauw) voor de events van midden oktober en begin november 2013	37
<i>Figuur 3-26</i> Debiet op meetlocatie Nukerke: meting (zwart), ICM met PDM totaaldebiet (rood) en ICM met CNWS runoff en PDM basisafvoer (blauw) voor de volledige kalibratie/validatie periode.....	38
<i>Figuur 3-27</i> Debiet op meetlocatie Nukerke: meting (zwart), ICM met PDM totaaldebiet (rood) en ICM met CNWS runoff en PDM basisafvoer (blauw) voor de events van midden oktober en begin november 2013	38
<i>Figuur 3-28</i> Sedimentconcentratie op de Marie-Borrebeek te Etikhove: meting (blauw) en gesimuleerd in ICM met licht verschillende erosion/deposition limits (groen en rood) d.m.v. de KUL (boven), Ackers-White (midden) en Velikanov (onder) sedimenttransportvergelijking.....	41
<i>Figuur 3-29</i> Gesimuleerde SSC SF1 en SF2 t.h.v. meetlocatie Leupegem met een initiële parameterset	42
<i>Figuur 3-30</i> Gesimuleerde SSC SF1 en SF2 t.h.v. een opwaarts waterloopje met een initiële parameterset: het verschil in US en DS SSC SF1 duidt op een belangrijke onmiddellijke depositie van het inputmateriaal, de hoge pieken in DS SSC SF2 duiden op belangrijke erosie en mobilisatie van beddingmateriaal.....	42
<i>Figuur 3-31</i> Gesimuleerde depositie t.h.v. een opwaarts waterloopje met een initiële parameterset: zeer grote en onmiddellijke depositie van het suspensiemateriaal (max van 0.9*Conduit depth wordt snel bereikt)	43
<i>Figuur 3-32</i> Gesimuleerde sedimentvracht afwaarts de Maarkebeek met een parameterset uit de tweede kalibratiefase	44
<i>Figuur 3-33</i> Gesimuleerde SSC in de Marie-Borrebeek te Etikhove met een parameterset uit de derde kalibratiefase.....	45
<i>Figuur 3-34</i> Afvoer en SSC in de Marie-Borrebeek te Etikhove: gemeten (onder) en gesimuleerd met een drievoud van de oorspronkelijke pollutograph (boven)	46
<i>Figuur 3-35</i> Gesimuleerde SSC in de Maarkebeek te Leupegem met het PDM totaal debiet als input per VHA segment (zwart) en de combinatie CNWS runoff met PDM basisafvoer als input per VHA segment (rood)	47

<i>Figuur 3-36</i> Gesimuleerde (finaal model) en gemeten afvoer en SSC in de Maarkebeek te Leupegem	50
<i>Figuur 3-37</i> Gesimuleerde (finaal model) en gemeten afvoer en SSC in de Marie-Borrebeek te Etikhove	50
<i>Figuur 3-38</i> Gesimuleerde (finaal model) en gemeten afvoer en SSC in de Donderij te Nukerke	51
<i>Figuur 3-39</i> Gesimuleerde (finaal model) en gemeten afvoer en SSC in de Broekbeek te Maarke-Kerkem	51
<i>Figuur 3-40</i> Gesimuleerde zones met depositie met het finale ICM Maarkebeek: algemeen (boven), zone Borgtmolen-Gansbeekstraat (onder-links) en zone Nonnemolen (onder-rechts)	52
<i>Figuur 3-41</i> River reach results table met average sediment depth at the end of the simulation (in m) gesimuleerd met het finale ICM sedimentmodel Maarkebeek	53
<i>Figuur 3-42</i> River reach sediment depth (US=opwaarts en DS=afwaarts) gesimuleerd met het finale ICM sedimentmodel Maarkebeek voor de woelkom Borgtmolen (boven-links), opwaarts Nonnemolen (boven-rechts), afwaarts Nonnemolen (onder-links) en afwaarts Gansbeekstraat (onder-rechts)	54
<i>Figuur 3-43</i> Dwarsprofiel van depositiezone opwaarts de Nonnemolen: 17/10/2013 (oranje), 13/11/2013 (roze) en 06/01/2015 (zwart)	56
<i>Figuur 3-44</i> Depositiezone opwaarts de Nonnemolen met depositie aan rechterzijde	56
<i>Figuur 3-45</i> Gemeten debiet op de Maarkebeek te Leupegem, 1/10/2014-06/01/2015 (bron: Waterinfo.be).....	57
<i>Figuur 3-46</i> Variabele geometrie van de woelkom aan de Borgtmolen: 26/03/2013 (linksboven) en 03/06/2013 (rechtsboven), 27/12/2013 (linksonder) en 05/02/2014 (rechtsonder).....	58
<i>Figuur 3-47</i> Op- en afwaarts dwarsprofiel van de woelkom aan de Borgtmolen	58
<i>Figuur 3-48</i> Op- en afwaarts dwarsprofiel van de woelkom aan de Borgtmolen, met 1.5m verlaagde bedding	58
<i>Figuur 3-49</i> River reach sediment depth (US=opwaarts en DS=afwaarts) gesimuleerd met het finale ICM sedimentmodel Maarkebeek voor de woelkom Borgtmolen.....	59
<i>Figuur 3-50</i> Deelstroomgebied Marie-Borrebeek: 2e (groen), 3e (roze) en 9e (blauw) VHA categorie, PDM subcatchments (rood) en de meetpost te Etikhove (rode cirkel) van het sedimentmeetnet (VMM)	60
<i>Figuur 3-51</i> Gesimuleerde en gemeten afvoer en SSC in de Marie-Borrebeek te Etikhove	61
<i>Figuur 3-52</i> Gemeten (blauw) en met CNWS gesimuleerde (paars) runoff en sedimentvracht tijdens de winterevents van 23/12/2013 (boven) en 27/12/2013 (tweede van boven) en de zomerevents van 28/06/2014 (tweede van onder) en 09/07/2014 (onder).....	62
<i>Figuur 3-53</i> Gesimuleerde en gemeten afvoer en SSC in de Marie-Borrebeek te Etikhove met gecorrigeerde SSC inputs en PDM totale afvoer.....	63
<i>Figuur 3-54</i> Gesimuleerde en gemeten afvoer en SSC in de Marie-Borrebeek te Etikhove met gecorrigeerde SSC en afvoer inputs per VHA segment.....	64
<i>Figuur 3-55</i> Gesimuleerde (finaal model) en gemeten afvoer en SSC in de Maarkebeek te Leupegem	67
<i>Figuur 3-56</i> Gesimuleerde (finaal model) en gemeten afvoer en SSC in de Marie-Borrebeek te Etikhove	67
<i>Figuur 3-57</i> Gesimuleerde (finaal model) en gemeten afvoer en SSC in de Donderij te Nukerke	68
<i>Figuur 3-58</i> Gesimuleerde (finaal model) en gemeten afvoer en SSC in de Broekbeek te Maarke-Kerkem	68

Figuur 3-59 Gesimuleerde zones met depositie met het finale ICM Maarkebeek: algemeen (boven), zone Borgtmolen-Gansbeekstraat (onder-links) en zone Nonnemolen (onder-rechts)69

Figuur 3-60 River reach results table met average sediment depth at the end of the simulation (in m) gesimuleerd met het finale ICM sedimentmodel Maarkebeek70

1 *Inleiding*

Dit vijfde Voortgangsrapport bespreekt de kalibratie en validatie van de gedetailleerde sedimenttransportmodellen voor de bemeten stroomgebieden van het VMM Sedimentmeetnet.

In de eerste sectie wordt de InfoWorks ICM (Innovyze Ltd.) v6.0.5 besproken, waarin belangrijke aanpassingen werden uitgevoerd voor sedimenttransportmodellering in open waterlopen. De verschillende functionaliteiten en outputmogelijkheden worden toegelicht.

Vervolgens wordt de validatie en kalibratie van het pilootgebied Maarkebeek uitvoerig besproken. Eerst wordt het vertalen van CNWS output naar ICM input behandeld. Vervolgens komt de opbouw van het ICM model aan bod, incl. conversie uit IWRS en een evaluatie van de hydrodynamische performantie. Na een overzicht van de meetgegevens en terreinkennis die beschikbaar zijn voor dit stroomgebied wordt de kalibratie- en validatieperiode geselecteerd. De belangrijkste stappen in de kalibratie van het model worden toegelicht alvorens het finale ICM sedimenttransportmodel van de Maarkebeek uitvoerig wordt besproken.

In Voortgangsrapport 1, 2 en 3 werd de toepassing van InfoWorks ICM (Innovyze Ltd.) besproken als sedimenttransportmodel voor de Vlaamse onbevaarbare waterlopen. ICM bleek robuuster en meer compatibel te zijn dan IWRS maar had minder mogelijkheden m.b.t. sedimenttransportmodellering in rivieren. Volgens de aanbevelingen van Antea Group werden door Innovyze de nodige aanpassingen gedaan om aan dit laatste tegemoet te komen. In juni 2015 werd ICM v6 gereleased met nieuwe functionaliteiten voor sedimenttransportmodellering in rivieren (zie Bijlage 3):

- Definitie van een initiële sedimentlaag, lokaal aanpasbaar
- Implementatie van het 'active layer' concept (cfr. IWRS) met lokaal aanpasbare 'active layer depth'
- Implementatie van sediment 'sorting' en 'grading' (cfr. IWRS)
- Definitie van erosie en depositie limieten, lokaal aanpasbaar

Deze aanpassingen werden door Antea Group uitvoerig getest en gedebugd.

Innovyze heeft deze aanpassingen uitgevoerd volgens een lijst met prioritering opgesteld door Antea Group. Volgende suggesties worden opgenomen bij de ontwikkeling van toekomstige modelversies:

- Mogelijkheid tot modelleren van meer dan twee sedimentfracties
- Bijkomende sedimenttransportvergelijkingen
- Aanpassing van de bed updating methode voor river reaches: erosie/depositie enkel in de natte sectie en niet verspreid over het volledige dwarsprofiel
- Bijkomende generieke modeloutput (vb. sedimentbalans)

Kalibratie en validatie van de sedimentmodellen gebeurde in ICM v6.0.5. Voor meer basisinformatie over ICM wordt verwezen naar Voortgangsrapport 1, 2 en 3, Bijlage 1 en de ICM Help. Hieronder worden de parameters en functionaliteiten voor sedimenttransportmodellering toegelicht.

Model parameters: water quality & sediment <i>Dit zijn algemene parameters voor het volledige rivienetwerk.</i>	
Deposition limit	Proportie van waterdiepte die max. kan opgevuld worden door depositie in een conduit.
Bed D50	D50 van de korrelgrootteverdeling van het bedmateriaal (overruled door grading).
Bed specific gravity	Specifieke dichtheid van het bedmateriaal.
Erosion/Deposition model	Sedimenttransportvergelijking (Bijlage 1): <ul style="list-style-type: none"> - Velikanov - Ackers-White - KUL model (Bijlage 2)
Active layer depth method (1D)	Methode voor bepaling van de dikte van de Active layer (Bijlage 3): <ul style="list-style-type: none"> - Explicit: dikte in [m] - D50: veelvoud van D50 - D90: veelvoud van D90
D50 of SF1 (SF2)	D50 van de korrelgrootteverdeling van fractie 1 (2).
Specific gravity SF1 (SF2)	Specifieke dichtheid van fractie 1 (2)
1D settling velocity SF1 (SF2)	Valsnelheid van fractie 1 (2). Indien blanco wordt deze met de D50 berekend volgens de wet van Stokes.
Alpha deposition SF1 (SF2)	Parameter KUL model

Beta deposition SF1 (SF2)	Parameter KUL model
Gamma deposition SF1 (SF2)	Parameter KUL model
Alpha erosion SF1 (SF2)	Parameter KUL model
Beta erosion SF1 (SF2)	Parameter KUL model
Gamma erosion SF1 (SF2)	Parameter KUL model
Critical erosion efficiency SF1 (SF2)	Parameter Velikanov model
Critical deposition efficiency SF1 (SF2)	Parameter Velikanov model
<i>Composite parameters</i>	<i>Vervangen de SF1/SF2 parameters wanneer beiden als 'dependent' worden gemodelleerd.</i>
River reach object properties <i>Dit zijn locatie-specifieke parameters/functionaliteiten per river reach</i>	
Sediment depth	Hoogte van een niet-erodeerbare sedimentlaag die kan toegevoegd worden om het effect op de doorstroomcapaciteit te simuleren (standaard is deze nul).
US sediment grading	Grading profiel aan opwaartse rand van de river reach. Meerdere profielen kunnen in de 'grading' tab worden gedefinieerd. Elk profiel geeft aan wat de proporties van SF1 en SF2 zijn in het bedmateriaal (SF1+SF2=100%).
DS sediment grading	Idem US sediment grading, aan de afwaartse rand van de river reach (indien verschillend profiel dan US wordt er geïnterpoleerd).
Limit erosion by en Erosion depth/level limit	Erosie van de bedding kan verhinderd worden door: <ul style="list-style-type: none"> - Depth: erodeerbare diepte - Level: reach te eroderen tot bepaald niveau (uitgedrukt in verticaal referentiesysteem, vb. m TAW) - Depth and Level: combinatie van bovenstaande (strengste is bepalend) - Unlimited: ongelimiteerde erosie mogelijk
Limit deposition depth en deposition limit	Mogelijkheid om depositie te beperken tot een bepaalde hoogte boven de oorspronkelijke bedding.
Bed updating	Update van de beddinghoogte volgens erosie/depositie: <ul style="list-style-type: none"> - Invert: erosie/depositie enkel in natte sectie (maar erosie onder originele bedding onmogelijk in dit geval) - Uniform: erosie/depositie uniform over de volledige dwarssectie
Active layer depth / Active layer depth factor	Dikte active layer (bij explicit method) / factor voor dikte active layer (bij D50/D90 method)
Limit erosion rate en max erosion rate	Mogelijkheid om een maximale erosiesnelheid (hoogte/tijd) in te snellen.

Limit deposition rate en max deposition rate	Mogelijkheid om een maximale depositiesnelheid (hoogte/tijd) in te snellen.
Run en QM parameters i.v.m. sediment <i>Deze parameters worden in het Run venster van een simulatie ingesteld</i>	
Pollutograph	Tabel die tijdreeksen bevat van die sedimentconcentraties die aan het netwerk worden toegevoegd via break nodes.
Use QM	Optie om waterkwaliteitsmodellering (incl. sediment) in te schakelen.
SF1, SF2	Te modelleren sedimentfracties
Dependent sediment fractions	SF1 en SF2 on/afhankelijk modelleren.
Erosion/Deposition affects hydraulics	Wijzigingen in geometrie in rekening brengen tijdens de hydrodynamische berekeningen.

Opmerking: Innovyze raadt aan om waterkwaliteits simulaties uit te voeren met een tijdstap van 15s (of kleiner) Deze tijdstap werd in onderliggende studie toegepast. Een belangrijke voorwaarde waaraan voldaan moet worden om te vermijden dat de simulatieresultaten tijdstapafhankelijk zijn is:

$$Dikte\ active\ layer \geq\ tijdstap * max\ erosion\ rate$$

Water quality and sediment parameters Object Properties (R/O)		
[-] Bed depth calculation		
Max iterations - bed depth	20	
Relative tolerance - bed depth	0.05000000	
Deposition limit	0.900	
Bed d50 (mm)	0.150	
Bed specific gravity	2.600	
[+] Colebrook-White		
[-] 1D erosion/deposition model		
Erosion/deposition model	KUL	
Active layer depth method (1D)	Explicit	
[+] 2D erosion/deposition model		
[+] 2D bed load model		
[-] Sediment fraction 1		
d50 of sf1 (mm)	0.025	
Specific gravity of sf1	2.600	
1D Settling velocity of sf1 (m/hr)		
Alpha deposition for sf1	1.00000	
Beta deposition for sf1	1.000	
Gamma deposition for sf1	0.500	
Alpha erosion for sf1	0.50000	
Beta erosion for sf1	1.000	
Gamma erosion for sf1	5.000	
Density of sf1 (kg/m ³)		
2D sf1 settling velocity calculation	User	
2D sf1 settling velocity (m/hr)		
Porosity of sf1		
Skin roughness parameter of sf1		
Angle of repose of sf1 (degree)		
[-] Sediment fraction 2		
d50 of sf2 (mm)	0.150	
Specific gravity of sf2	2.600	
1D Settling velocity of sf2 (m/hr)		
Alpha deposition for sf2	1.00000	
Beta deposition for sf2	1.000	
Gamma deposition for sf2	0.250	
Alpha erosion for sf2	0.50000	
Beta erosion for sf2	1.000	
Gamma erosion for sf2	7.000	
Density of sf2 (kg/m ³)		
2D sf2 settling velocity calculation	User	
2D sf2 settling velocity (m/hr)		
Porosity of sf2		
Skin roughness parameter of sf2		
Angle of repose of sf2 (degree)		

River reach Object Properties (R/O)

Link definition

US node ID	maa017
DS node ID	maa060b
Link suffix	1
Link type	RRReach
Asset ID	
System type	Other
Branch ID	

Cross section

River sections	----
Sediment depth (mm)	0

Long section

Length (m)	83.3
Inflow (m ³ /s)	0.00000
US headloss type	Fixed
DS headloss type	Fixed
US headloss coefficient	0.00
DS headloss coefficient	0.00
US invert level (m AD)	9.947
DS invert level (m AD)	9.980
US sediment grading	Down_maa120a
DS sediment grading	Down_maa120a
Limit erosion by	Depth
Erosion depth limit (m)	0.500
Limit deposition depth	
Deposition limit (m)	5.000
Bed updating	Uniform
Active layer depth (m)	0.00020
Limit erosion rate	
Max erosion rate (mm/hr)	0.100
Limit deposition rate	

QM Parameters

Select Pollutants and Sediment Fractions to Model

Model	Dissolved	SF1	SF2
BOD	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
COD	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
TKN	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
NH4	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
TPH	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
PL1	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
PL2	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
PL3	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
PL4	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
DO	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
NO2	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
NO3	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
PH	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
SAL	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
TW	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
COL	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
ALG	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
SI	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

Dependent sediment fractions QM (0 means use minor time-step)
 Erosion/deposition affects hydraulics
 Override event buildup time Buildup time (hours)
 Model macrophytes
 Model hydrogen sulphide Oxygen demand
 Model 2D erosion-deposition Native washoff routing
 Model 2D bed load

AnteaGroup Model Parameters

we re-runs using updated network

Read subevent UCWI & evaporation
 Read subevent NAPI (New UK Method)
 Get start time from rainfall event

Start running from state time
 Initial conditions 1D/2D
 Catchment initial conditions

Simulate runoff only
 Apply rainfall smoothing
 Summary (PRN) results
 Exit if initialisation incomplete in (minutes)
 Exit if initialisation fails
 Initialise by level fill-in from outfalls
 Use QM
 Pipe sediment data

State saving
 Save state at: 14/05/2008

Parameters
 Start: 00:00 01/01/2008
 End: 15:00 14/05/2008
 Time step: 240
 Timestep: 1

Inflow: MEL_PDMb_QCNWS_15min_2016020...
 Ground infiltration
 Trade waste
 Level: L_GET_MEL_sed_5min_ht
 Regulator
 Pollutograph

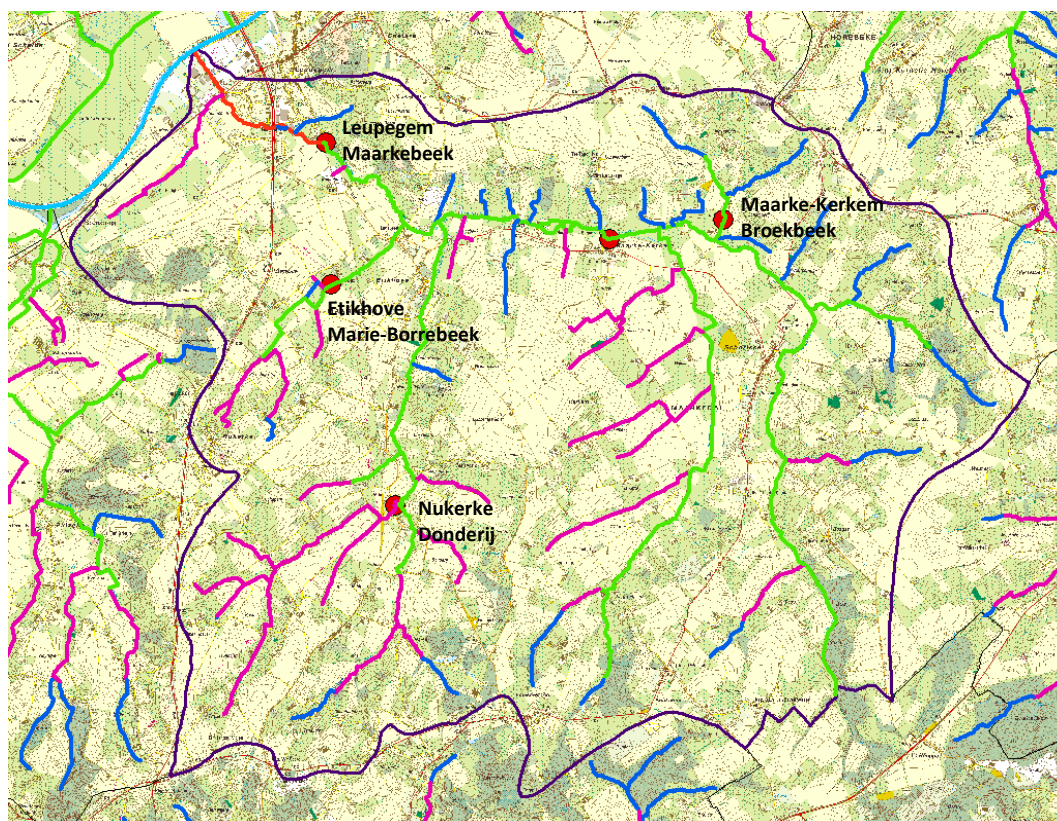
Personal objects to be gauged
 Gauging list

ICM geeft voor elke run een veelheid aan outputs. Voor elke locatie in het netwerk, zowel op niveau van river reach als nodes en sections, kunnen tijdreeksen van verschillende outputvariabelen weergegeven worden in tabelvorm en grafieken. Het is mogelijk om verschillende variabelen in dezelfde plot te visualiseren en om de resultaten voor verschillende locaties en simulaties (en zelfs meetreeksen) en dezelfde plot weer te geven. In de grafieken kan handig gezoomd worden. Daarnaast kunnen per tabellen aangemaakt worden die tijdsafhankelijke en globale (vb. min. en max. voor volledige simulatie) outputvariabelen weergeven voor alle river reaches of nodes in dezelfde lijst.

De betekenis van de outputvariabelen spreekt voor zich en wordt bovendien goed uitgelegd in de ICM Help. Hieronder wordt een beperkt overzicht gegeven van de belangrijkste en meest gebruikte outputvariabelen i.v.m. sedimenttransport:

Graph en Grid van tijdsafhankelijke outputvariabelen	
<i>Deze worden gevisualiseerd door met de cursor op de gewenste river reach, node of section te klikken (voor reaches wordt steeds de opwaartse, US, en afwaartse, DS, rand weergegeven)</i>	
Concentration SF1 (SF2)	SSC van SF1 (SF2)
Mass flow SF1 (SF2)	Sedimentvracht van SF1 (SF2). Geeft naast het dynamisch verloop ook het cumulatieve totaal.
Sediment depth	Dikte van de depositielaag bovenop de oorspronkelijke bedding
Bed offset (section)	Erosie onder de oorspronkelijke bedding
Mass of SF1 (SF2) in deposited layer (section)	Massa van SF1 (SF2) material in de depositielaag bovenop de oorspronkelijke bedding
Grid voor alle nodes of river reaches met ogenblikkelijke (afspelen tijdverloop mogelijk) en globale (per simulatie) outputvariabelen	
Total mass of SF1 (SF2) from points inflows (nodes)	Geeft per break node de massa sediment van SF1 (SF2) die over de gehele simulatie via de pollutograph in het netwerk terecht komt.
(US/DS) Max concentration SF1 (SF2)	Maximale SSC van SF1 (SF2) tijdens de simulatie per node en per river reach.
Average sediment depth at end of simulation (river reach)	Gemiddelde dikte van de depositielaag bovenop de oorspronkelijke bedding voor de volledige simulatie per river reach.
Max US/DS sediment depth (river reach)	Maximale dikte van de depositielaag bovenop de oorspronkelijke bedding voor de volledige simulatie per river reach.

3 *Maarkebeek*



Figuur 3-1 Stroomgebied (paars) Maarkebeek: 1e (rood), 2e (groen), 3e (roze) en 9e (blauw) VHA categorie, en de meetposten (rode cirkels) van het sedimentmeetnet (VMM)

3.1 *Model input (CNWS output)*

In het vierde Voortgangsrapport (ref. 2252433019) werd de toepassing van het CNWS model besproken voor de bemeten deelstroomgebieden van het VMM sedimentmeetnet, met als afwaartse randen de meetlocaties. Tevens werd het vereenvoudigde CNWS model toegepast op de volledige bemeten stroomgebieden.

I.s.m. KUL werden voor het volledige stroomgebied van de Maarkebeek de nodige inputkaarten (vb. CN kaart per seizoen) aangemaakt zodat de detailversie van CNWS kon worden toegepast voor de geselecteerde simulatieperiode, i.e. 01/10/2013-30/09/2014. Het CNWS model berekende de oppervlakkige runoff (Q) en bijhorende sedimentconcentratie (SSC) voor alle VHA segmenten van 1^e, 2^e en 3^e categorie. De totale sedimentvracht voor de simulatieperiode bedraagt 6203 ton.

De outputbestanden van het CNWS model die omgezet dienen te worden naar inputs voor het ICM model zijn "Discharge_VHA_year.txt" (tijdreeks van runoff per river segment) en "Sediment concentration_VHA_year.txt" (tijdreeks van SSC per river segment). Deze bestanden moeten uiteindelijk omgezet worden (zie hieronder) naar respectievelijk een inflow file en een pollutograph die de nodige inputs voor het ICM model aan het riviernetwerk linken via break nodes.

In eerste instantie werd met een GIS bepaald met welk VHA segment elk gesimuleerd river segment (CNWS input kaart) overeenstemt. Vervolgens werd elk VHA segment van 1^e, 2^e en 3^e categorie in een tabel gelinkt aan een ICM break node in het midden van het segment. Waar nodig, werden break nodes aan het ICM netwerk toegevoegd. Voor segmenten aan de opwaartse randen van het riviernetwerk werd een break node aan de opwaartse grens gekozen.

Aangezien het CNWS model enkel oppervlakkige runoff berekent, moest hieraan nog de basisafvoer worden toegevoegd voor elk VHA segment. Hiervoor werd gebruik gemaakt van de hydrologische PDM modellen in het InfoWorks RS model van de Maarkebeek. Eerst werd voor elk PDM subcatchment zowel de baseflow als de total flow geëxporteerd uit RS. In een GIS werd nagegaan in welk PDM subcatchment het deelstroomgebied van elk VHA segment van 1^e, 2^e en 3^e categorie ligt (*Figuur 3-3*). In sommige gevallen bevindt het VHA deelstroomgebied zich in meerdere PDM subcatchments (grenzen vallen niet mooi samen) en werd het toegewezen aan het PDM subcatchment waarin het grootste deel van de oppervlakte van het deelstroomgebied ligt. Voor elk VHA deelstroomgebied is de oppervlakte gekend. De oppervlakte van deelstroomgebieden van 9^e categorie werd toegekend aan de deelstroomgebieden van 3^e categorie waarmee ze verbonden zijn. Op die manier werd elk VHA deelstroomgebied in het stroomgebied van de Maarkebeek gelinkt aan een PDM subcatchment. Tenslotte werd een schaalfactor berekend als de proportie van de oppervlakte van het deelstroomgebied in het totale overeenkomstige PDM subcatchment. Dit resulteerde uiteindelijk in *Tabel 3-1*. Voor elk VHA segment van 1^e, 2^e en 3^e categorie kon dan met deze schaalfactor een basisafvoer berekend worden uit de baseflow van de PDM subcatchments.

Met dezelfde schaalfactor werd ook de PDM total flow herschaald per VHA segment. Dit laat toe om de PDM debieten toe te passen in het ICM model wanneer er problemen zouden zijn met de CNWS debieten. De PDM total flow dient herschaald te worden naar elk VHA segment (en dus niet één instroomlocatie per PDM zoals in RS) omdat het model in staat moet zijn om een sedimentinput (een SSC bij een bepaald debiet) per VHA segment te simuleren.

In Python werd een script geschreven om de CNWS output in te lezen, om per VHA segment de PDM baseflow en total flow (van het juiste subcatchment) te herschalen, de Q en SSC per segment te linken aan de juiste break node en dit in het juiste ICM inputformaat te gieten. De SSC uit CNWS wordt in dit script herrekend om finaal de correcte sedimentvracht ($SL = Q * SSC$) te bekomen:

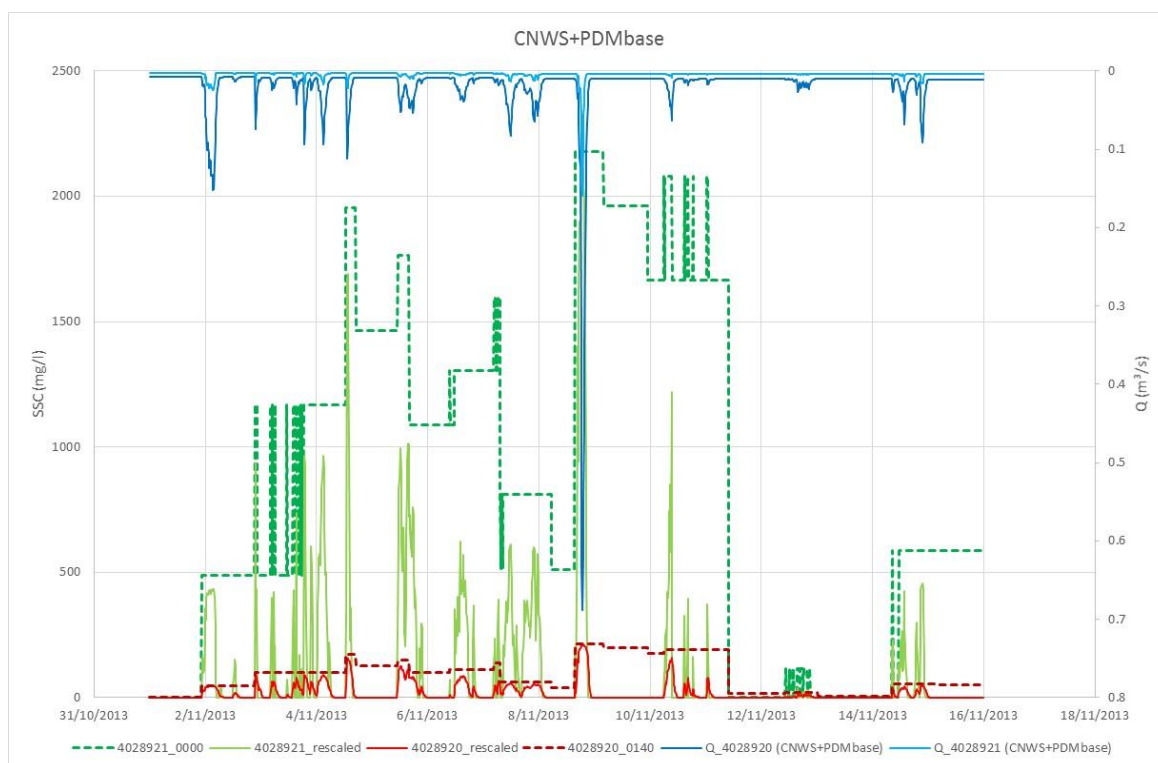
1/ $Q = \text{CNWS runoff} + \text{PDM baseflow}$:

$$SSC' = \text{CNWS runoff} / (\text{CNWS runoff} + \text{PDM baseflow}) * SSC_{\text{cnws}}$$

2/ $Q = \text{PDM total flow}$:

$$SSC'' = \text{CNWS runoff} / \text{PDM totalflow} * SSC_{\text{cnws}}$$

Het effect van deze herrekening wordt geïllustreerd in *Figuur 3-2*. De groene en rode stippellijnen geven de SSC weer zonder bovenstaande herrekening. De constante SSC per afvoerpiek is een gevolg van de lineaire verdeling van de sedimentvracht over het runoff hydrogram in CNWS (zie Voortgangsrapport 4). De herrekening zorgt dus voor een realistischer verloop van de SSC, met een piek die mooi samenvalt met de afvoerpiek. Daarnaast gaat de herrekening een overschatting van de sedimentvracht tegen. Zonder de herrekening werd door het toevoegen van de PDM basisafvoer immers foutief meer sediment in het model gebracht dan door het CNWS model wordt berekend.



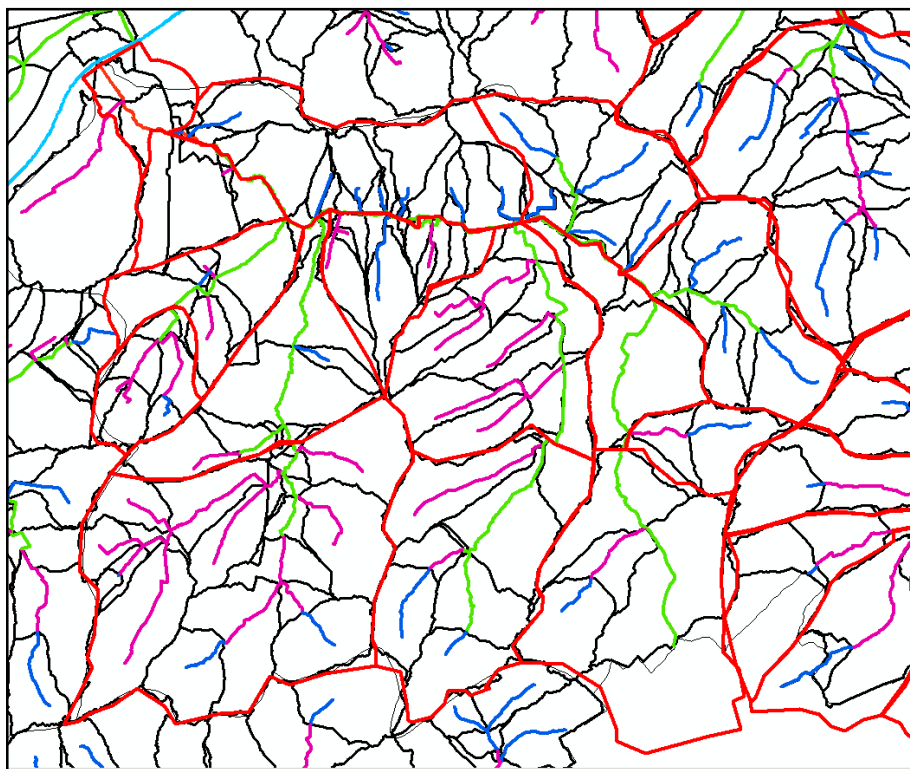
Figuur 3-2 Effect van herrekening sedimentconcentratie o.b.v. debiet geïllustreerd voor 2 VHA segmenten (groen: VHA 4028921, rood: VHA 4028920, stippellijn: originele SSC, volle lijn: herrekenende SSC, donkerblauw: CNWS debiet, lichtblauw: PDM basisafvoer).

Tabel 3-1 Overzicht van VHA segmenten in het Maarkebeek model met overeenkomstig PDM subcatchment, schaalfactor en ICM break node.

VHA ID	PDM subcatchment	Scale factor	ICM break node
4028882	BN_MAnedop	0.045697102	4028882_0300
4028908	BN_MAnedop	0.047679061	4028908_0000
4028912	BN_MAnedop	0.010920474	4028912_0080
4028913	BN_MAnedop	0.144165242	4028913_0000
4028920	BN_MAnedop	0.00249379	4028920_0140
4028921	BN_MAnedop	0.032104605	4028921_0000
4028922	BN_MAnedop	0.01424722	4028922_0000
4028935	BN_MAnedop	0.109281835	4028935_0000
4028947	BN_MAnedop	0.007774853	4028947_0180
4028948	BN_MAnedop	0.021104794	4028948_0240
4028976	BN_MABroek	0.407253178	4028976_0000
4029011	BN_MAborgt	0.044704255	4029011_0000
4029026	BN_MApauaf	0.128380759	4029026_0000
4029032	BN_MApauaf	0.124820906	4029032_0000
6030328	BN_MAspoor	0.159637097	maa034a
6030329	BN_MAspoor	0.541454428	maa015
6030330	BN_MAgans	0.837782134	maa029
6030331	BN_MAschap	0.01557435	maa022
6030332	BN_MApauop	0.26282628	6030332_0000
6030333	BN_MApauop	0.004858278	6030364_0500
6030334	BN_MAkastl	0.185061465	maa144
6030335	BN_MAmboaf	0.036775367	6030335_0000
6030336	BN_MAnedop	0.069478768	6030336_0700
6030337	BN_MAnedaf	0.176755089	6030337_0000
6030338	BN_MAmboaf	0.18011597	6030338_0000
6030339	BN_MAmboaf	0.083653744	mbo022
6030340	BN_MAmboaf	0.00651496	mbo026b

6030341	BN_MAmboop	0.350623636	6030341_0000
6030342	BN_MAbroek	0.270017198	6030342_0080
6030343	BN_MAmboop	0.208262563	6030343_0000
6030344	BN_MAmboop	0.104076575	6030344_0000
6030345	BN_MAmboop	0.180522529	6030345_0340
6030346	BN_MAkromb	0.26188584	maa154
6030347	BN_MAsteeen	0.912563706	6030347_0000
6030348	BN_MAsteeen	1.508646866	6030348_0000
6030349	BN_MAkastl	0.759936759	maa178_int30
6030350	BN_MAnedaf	0.260157381	ned017
6030351	BN_MApauaf	0.083888429	6030351_0560
6030352	BN_MApauaf	0.123704726	pau016
6030353	BN_MApauop	0.191283189	6030353_0000
6030354	BN_MAnedop	0.18527291	6030354_0000
6030355	BN_MAnedop	0.103832441	6030355_0000
6030356	BN_MAnedop	0.10297865	6030356_0000
6030357	BN_MAnedaf	0.42759123	ned041
6030358	BN_MAnedop	0.063161918	6030358_0000
6030359	BN_MAnedop	0.008341884	6030359_0160
6030360	BN_MAnedop	0.01053624	6030360_0180
6030361	BN_MApauaf	0.067106484	6030361_0320
6030362	BN_MApauaf	0.101599	6030362_0000
6030363	BN_MApauaf	0.249252468	6030363_0980
6030364	BN_MApauop	0.10042099	6030364_0000
6030365	BN_MApauaf	0.102333158	6030365_0000
6030366	BN_MApauaf	0.06859811	6030366_0000
6030367	BN_MApauaf	0.227861391	6030367_0000
6030368	BN_MApauaf	0.072370058	pau032
6030369	BN_MAgans	0.019711027	maa066
6030370	BN_MAnedaf	0.030763831	maa063
6030371	BN_MAmboaf	0.005182592	6030371_0040
6030372	BN_MAnedaf	0.013634011	6030372_0060
6030373	BN_MAnedaf	0.019089483	ned050
6030374	BN_MAnedaf	0.049982871	maa060a
6030375	BN_MAspoor	0.019397447	maa040
6030376	BN_MAmboaf	0.398774629	mbo011
6030377	BN_MAgans	0.211331104	maa048
6030378	BN_MAgans	0.034507224	maa038
6030379	BN_MAborgt	0.235377227	maa074
6030380	BN_MAborgt	0.318774232	maa080
6030381	BN_MAgans	0.040177609	maa078
6030382	BN_MAgans	0.015596965	maa070
6030383	BN_MAborgt	0.192766904	6030383_0000
6030384	BN_MAborgt	0.020046479	6030384_0000
6030385	BN_MAborgt	0.059892762	6030385_0080
6030386	BN_MAbroek	0.085879453	maa127
6030387	BN_MAgans	0.094600487	maa122
6030388	BN_MAgans	0.000426873	maa120
6030389	BN_MAborgt	0.058354229	maa098
6030390	BN_MAborgt	0.264219871	maa082
6030391	BN_MAgans	0.152888164	maa115
6030392	BN_MApauaf	0.070143135	pau005
6030393	BN_MAkromb	0.291521888	6030393_0000
6030394	BN_MAkromb	0.307528946	6030394_0240
6030395	BN_MAbroek	0.114246404	6030504_0280
6030396	BN_MAschap	2.379495987	6030396_0000
6030401	BN_MApauop	0.002204578	6030401_0060
6030402	BN_MApauop	0.155040313	pau037
6030464	BN_MApauaf	0.173006388	6030464_0620
6030501	BN_MAsteeen	0.16330482	maa197
6030502	BN_MAkromb	0.053028202	6030502_0060
6030503	BN_MAkromb	0.026328409	6030503_0140

6030504	BN_MAbroek	0.011928685	6030504_0140
6030505	BN_MAborgt	0.111969612	maa107
6030506	BN_MAborgt	0.068114643	maa102
6030507	BN_MAgans	0.060064663	maa087
6030508	BN_MAnedaf	0.080193431	6030508_0240
6030509	BN_MAnedaf	0.009504642	6030509_0060
6030510	BN_MAmboop	0.085751158	6030510_0220
6030511	BN_MAmboaf	0.372182466	mbo028a
6030512	BN_MAschap	0.241258204	maa003



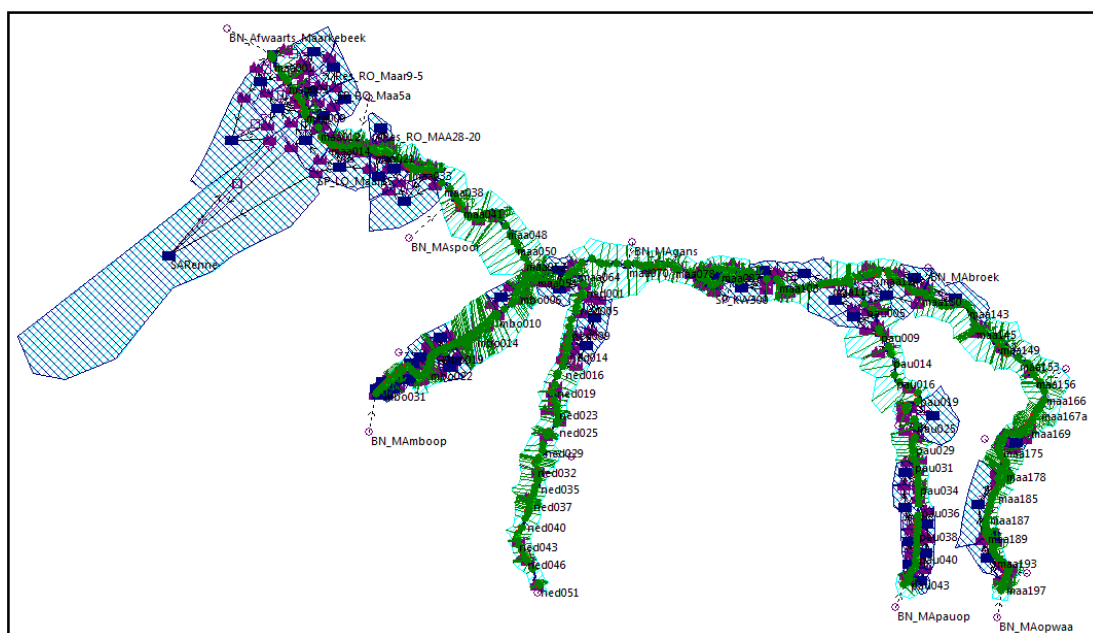
Figuur 3-3 Maarkebeek: 1e (rood), 2e (groen), 3e (roze) en 9e (blauw) VHA categorie, de VHA deelstroomgebieden (zwart) en de PDM subcatchments (rood)

3.2 Opbouw ICM model

3.2.1 Conversie RS model + Opwaartse uitbreiding

Het InfoWorks RS (v16.0.2) model van de Maarkebeek werd via de VMM Citrix aangeleverd door de Opdrachtgever: Network N_MAA_AT_v3.1-Copy (*Figuur 3-4*), Event ABT_MAA_AT_v3.1-Copy en Logic Control ABT_MAA_AT_v3.1-Copy.

Het RS model werd gerund voor de volledige simulatieperiode (01/10/2013-30/09/2014). Op die manier waren de nodige tijdreeksen beschikbaar van de PDM modellen en simulatieresultaten langsheen het netwerk voor controle van de omzetting naar ICM.



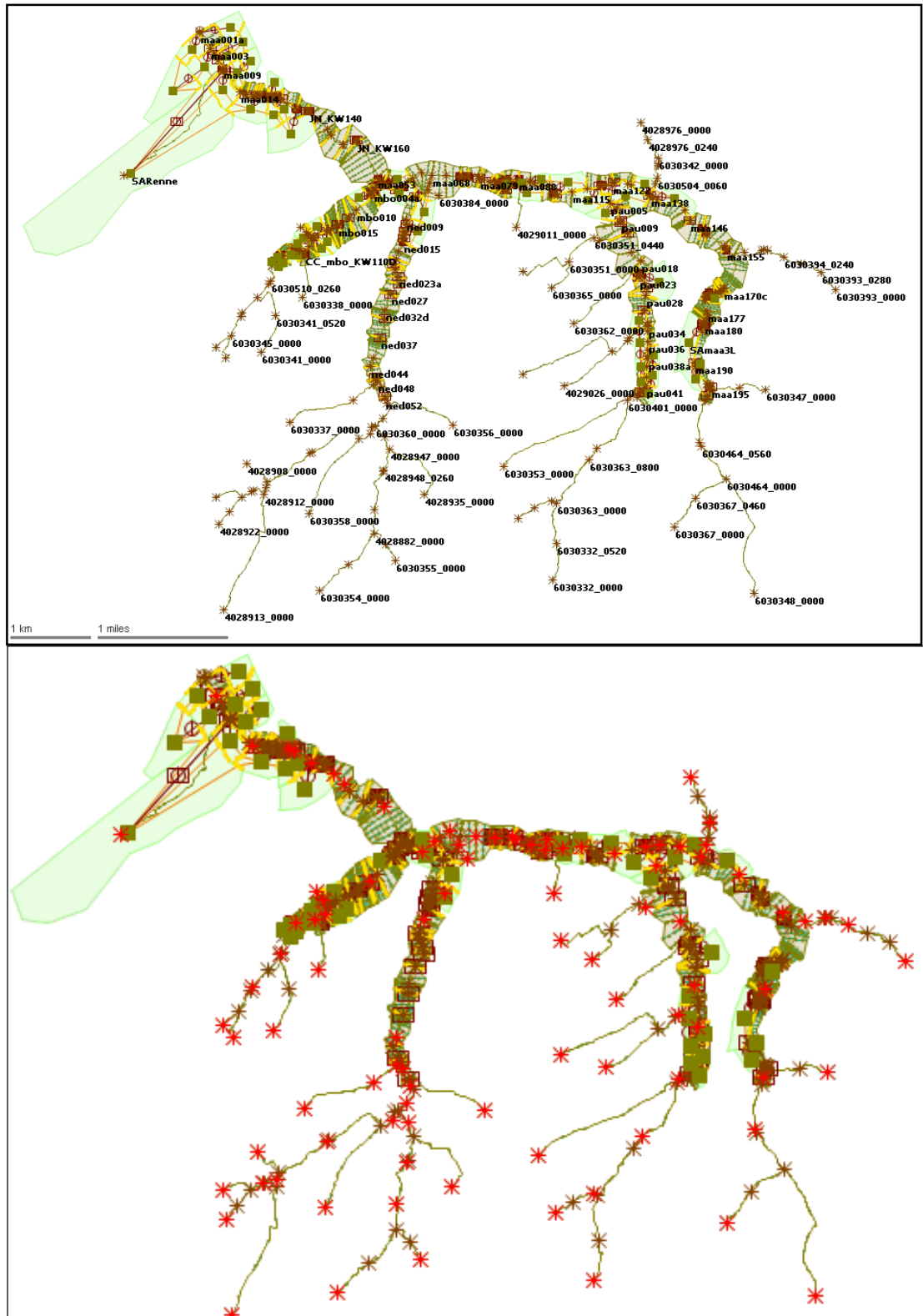
Figuur 3-4 IWRS netwerk Maarkebeek

Het RS model werd opwaarts uitgebreid zodat alle 1^e, 2^e en 3^e categorie VHA segmenten in het netwerk opgenomen zijn. Hiervoor werden trapezoïdale dwarsprofielen toegepast (ditch channels met diepte 1m, oeverbreedte 1m, beddingbreedte 0.34m en tussenafstand 20m), verticaal gegeoreferend o.b.v. het DHM met een uniforme helling per VHA segment (zie Voortgangsrapport 2).

Vervolgens werd het RS model omgezet naar een ICM model. Hiervoor werden volgende stappen doorlopen (de gedetailleerde methodologie is geen onderwerp van onderliggende studie):

1. In IWRS:
 - a. Verwijderen van subcatchments, boundary nodes en flood mapping objects
 - b. Verwijderen van junction nodes en connectivities en aanpassen links
 - c. Verwijderen copied/interpolated sections en aanpassen links
 - d. Verwijderen van artificiële stabiliteitsstructuren
 - e. Verwijderen van blockages, culverts, abstractions, etc.
 - f. Check 'lateral' en 'inline' spill units
2. In ICM:
 - a. Corrigeren verbinding tussen netwerk en conduits
 - b. Aanpassen flapped orifices
 - c. Controle section panels
 - d. Merge river reaches
 - e. Naamgeving flood plain sections – irregular weirs
 - f. Aanpassen van geografisch niet correcte bank lines
 - g. Definitie outfall
 - h. Aanpassingen symmetrical conduits en bridges
 - i. Aanmaken RTC rules

Figuur 3-5 toont het geconverteerde Maarkebeek model in ICM, inclusief de opwaartse uitbreiding. De bruine sterretjes zijn break nodes. De Q en SSC input werden in ICM ingeladen als respectievelijk inflow file en pollutograph. Per VHA is er een break node waaraan de juiste Q en SSC input wordt toegevoegd.



Figuur 3-5 ICM netwerk Maarkebeek (boven) en Break nodes voor input per VHA (onder)

3.2.2 Hydrodynamische performantie

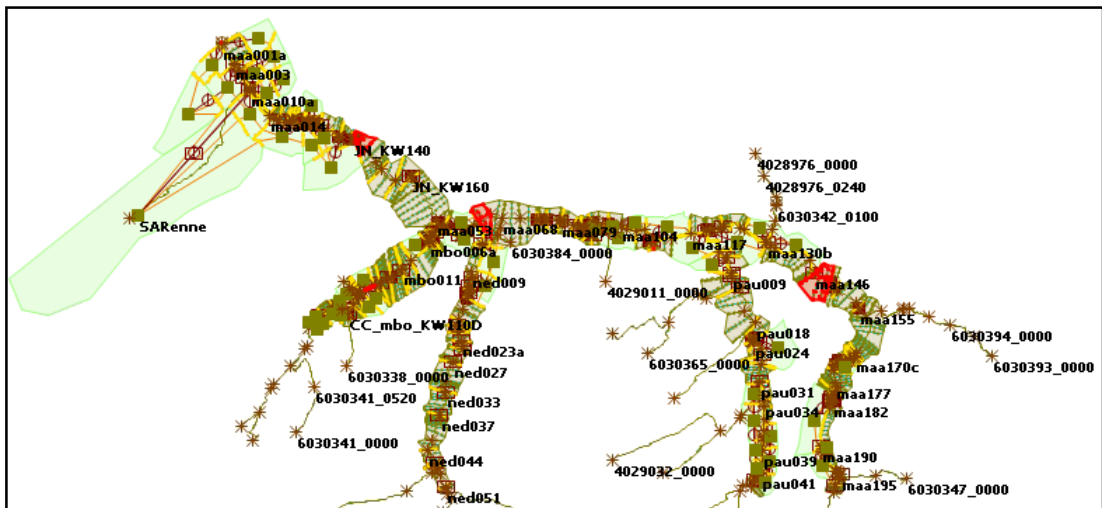
Na omzetting van het RS model naar ICM werd de hydrodynamische performantie van het omgezette model nagegaan. Hiertoe werden de simulatieresultaten voor de periode 01/01/2013-31/12/2014 vergeleken met het RS model. Hiervoor werd niet het netwerk zoals in [Figuur 3-5](#) toegepast maar wel een versie zonder opwaartse uitbreidingen (zoals RS model). Bovendien werd de PDM total flow niet gelinkt aan de break nodes per VHA, maar aan de break nodes die overeenstemmen met de locatie waar in het RS netwerk de PDM boundaries aan het netwerk gekoppeld zijn. Op die manier zijn het RS en ICM model zo gelijkaardig mogelijk opgebouwd en kan de vergelijking correct verlopen. De volumebalans doen kloppen was hierbij de focus, aangezien het reproduceren van overstromingen (peilen) geen doel is van onderliggende opdracht en waterpeilen van ondergeschikt belang zijn t.o.v. debieten bij sedimenttransportmodellering ($SL = Q \cdot SSC$).

Ondanks het feit dat het waterpeil de natte sectie in de waterloop bepaalt en dus ook een invloed heeft op de stroomsnelheid, die op haar beurt erosie/depositie beïnvloedt, benadrukken we het grotere belang van het correct modelleren van debieten tov waterpeilen. ICM lost numeriek een continuïteitsvergelijking op. Hierbij is dus de water- en sedimentbalans van belang. Deze balans wordt bepaald door enerzijds de sedimentconcentratie (SSC) en anderzijds het debiet (Q). Het is dus hoofdzaak om het debiet juist te modelleren om ook de sedimentprocessen goed te kunnen in kaart brengen. Beperkte verschillen in het waterpeil hebben een veel kleiner effect op de sedimentbalans (en de stroomsnelheid) dan verschillen in Q. Bovendien is het waterpeil géén variabele in de sedimentologische vergelijkingen in ICM.

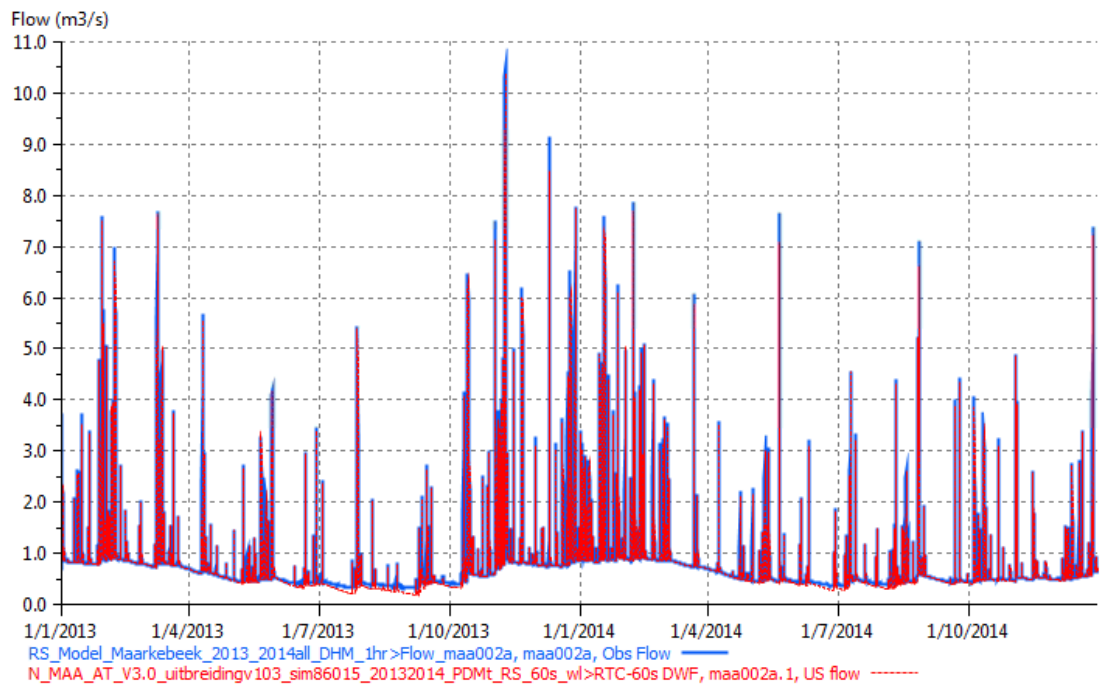
[Figuur 3-6](#) toont zes locaties verspreid in het riviernetwerk waarvoor het gesimuleerde debiet vergeleken wordt voor RS en ICM in [Figuur 3-7](#) t.e.m. [Figuur 3-12](#). Over het algemeen wordt een goede overeenkomst waargenomen tussen beide modellen, zowel qua vorm en grootte van de afvoerpieken. Voornamelijk in de meer afwaartse locaties zijn de afvoermaxima iets lager in ICM t.o.v. RS. [Figuur 3-8](#) en [Figuur 3-12](#) tonen duidelijk aan dat de verschillen tussen de modelresultaten en metingen van een hogere grootteorde zijn. Daarom kan de model performantie voor onderliggende opdracht als voldoende beschouwd worden.

De geringe verschillen in gesimuleerde debieten (en bijgevolg waterpeilen – hier niet getoond) kunnen door verschillende factoren verklaard worden, waarbij de eerste duidelijk de belangrijkste is:

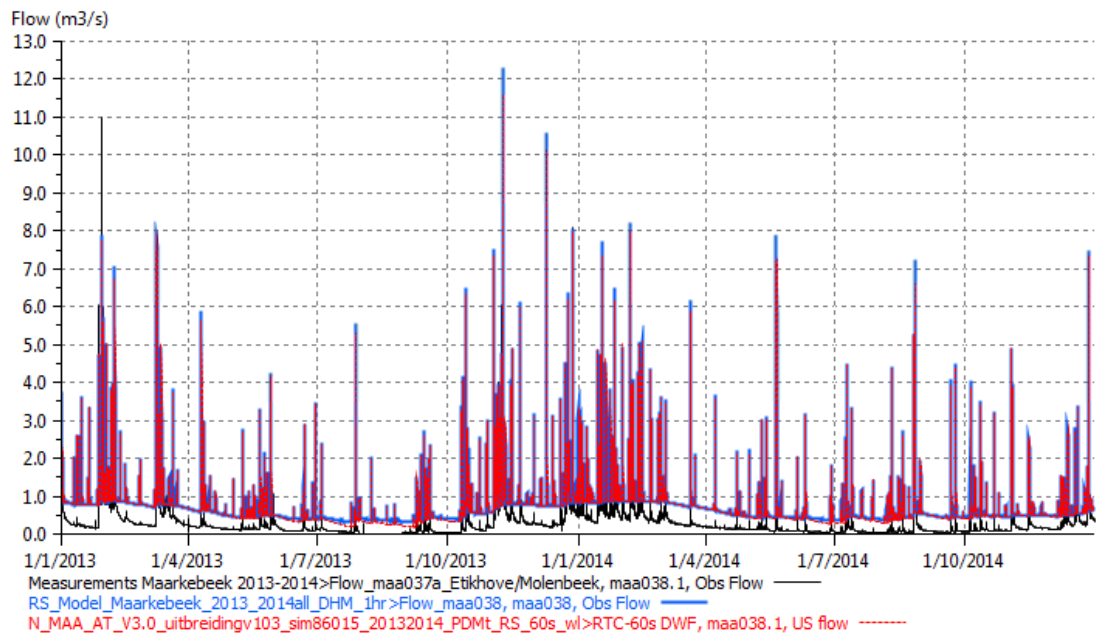
- Overstromingen van oevers worden in ICM anders gesimuleerd dan in RS. In RS wordt een bepaalde dwarssectie gelinkt aan een oever langsheen een bepaald traject. Het waterpeil van deze dwarssectie bepaald aldus of een oever al dan niet overstroomt naar een storage area. In ICM dient de oever correct geografisch gerefereerd te zijn en wordt het waterpeil langsheen een volledig riviertraject in rekening gebracht om te bepalen of de oever al dan niet overstroomt. De overstroming vindt dus op de juiste locatie plaats en op basis van het juiste lokale waterpeil. Dit is een duidelijk conceptueel verschil tussen RS en ICM en dit leidt onvermijdelijk tot afwijkingen tussen beide modelresultaten. Dit verklaart ook waarom vnl. een kleine afwijking te zien is in de afvoermaxima en waarom deze afwaarts groter zijn dan opwaarts.
- Net als in het waterkwaliteitsmodel werd de regeling van kunstwerken in RS in vereenvoudigde vorm vertaald naar ICM.
- Niet optimaal omgezette discharge coëfficiënten voor structuren in ICM: Deze coëfficiënten worden automatisch geconverteerd volgens door Innovyze speciaal hiervoor opgestelde formules. Doch zijn de hydrodynamische berekeningen in RS en ICM verschillend zodat een verdere ijking van deze coëfficiënten nodig kan zijn. Dit zou echter t.o.v. metingen dienen te gebeuren en niet t.o.v. RS simulatieresultaten. Dit valt buiten het kader van onderliggende opdracht.



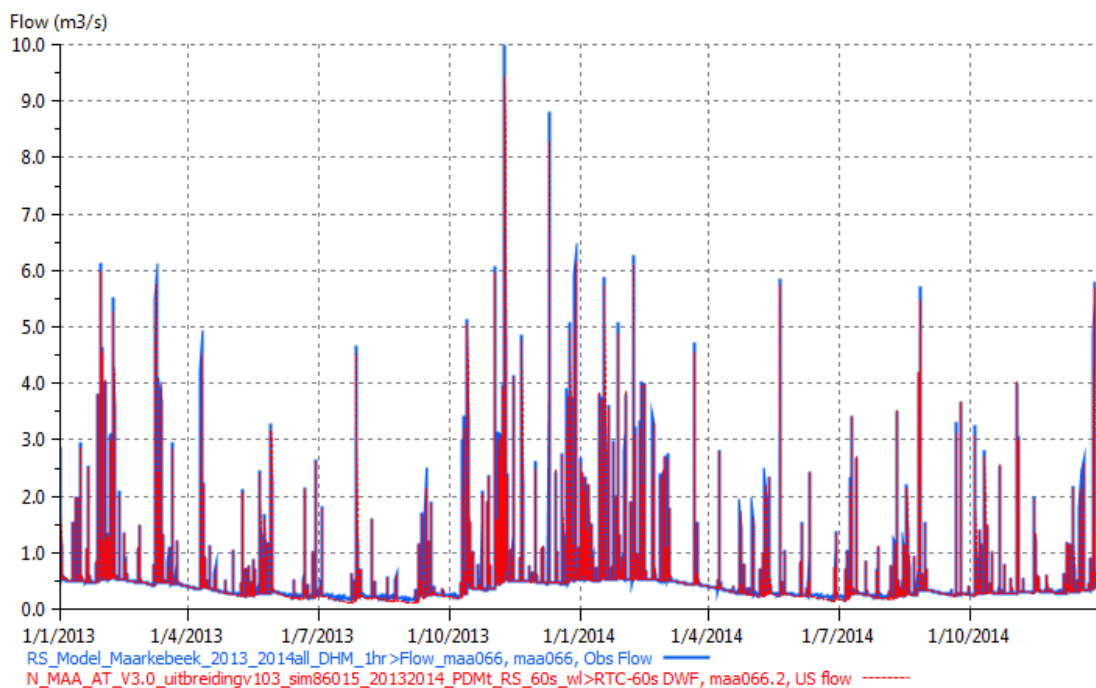
Figuur 3-6 Locaties voor vergelijking RS en ICM model



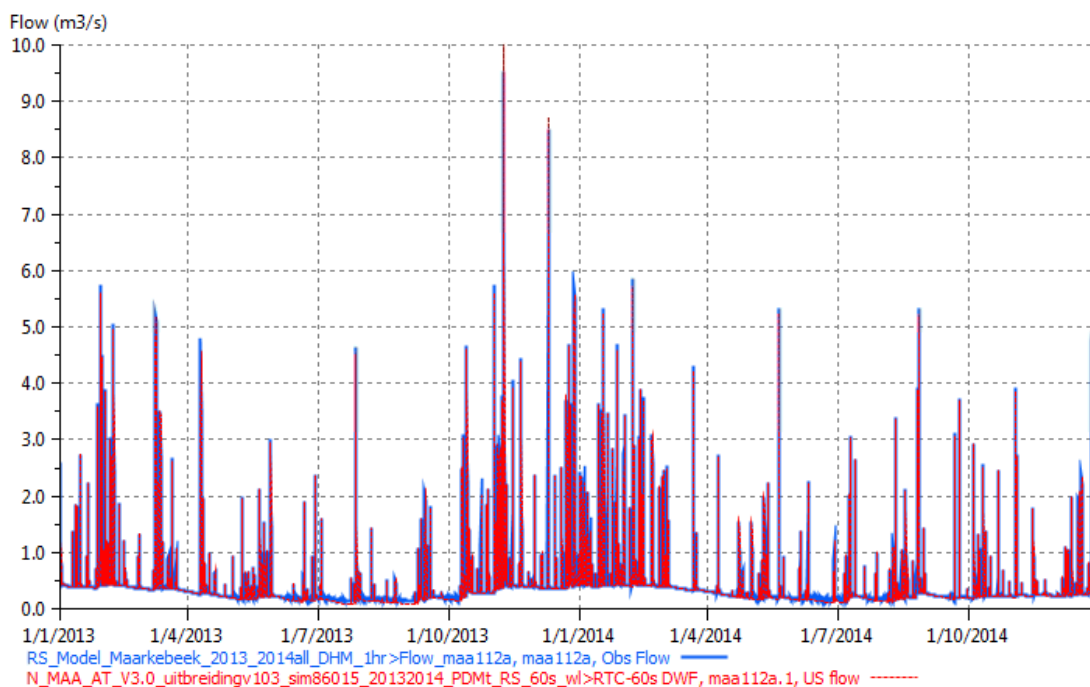
Figuur 3-7 Gesimuleerd debiet t.h.v. maa002a.1 (afwaarts) door IWRS (blauw) en ICM (rood)



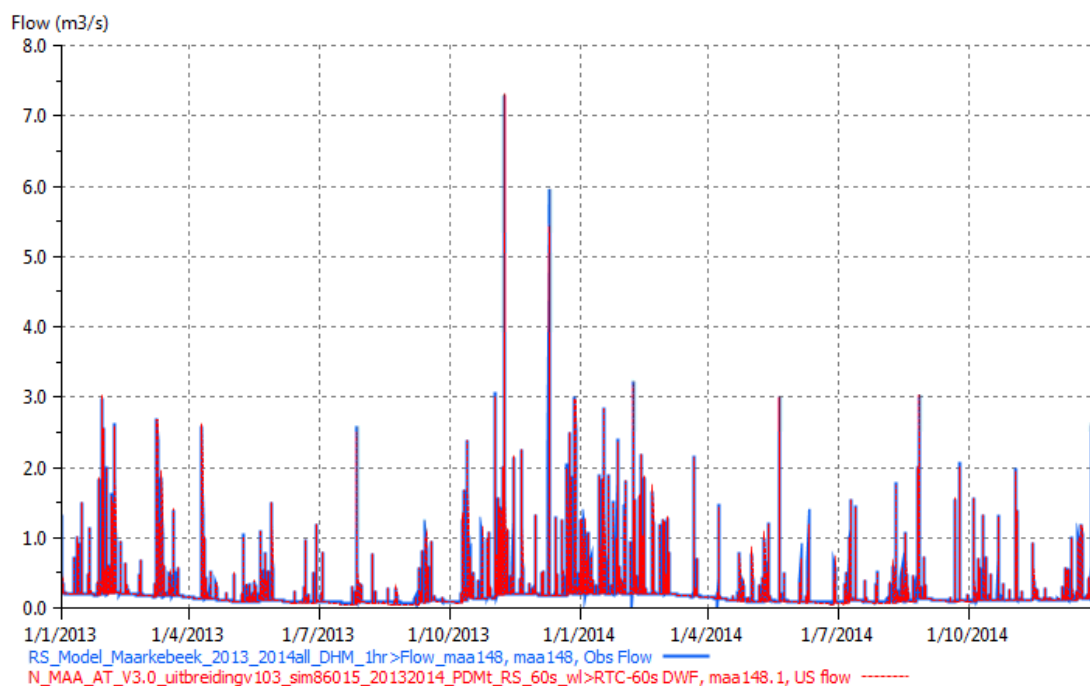
Figuur 3-8 Gesimuleerd debiet t.h.v. maa038.1 (meetpunt Leupegem) door IWRS (blauw) en ICM (rood) en het gemeten debiet (zwart)



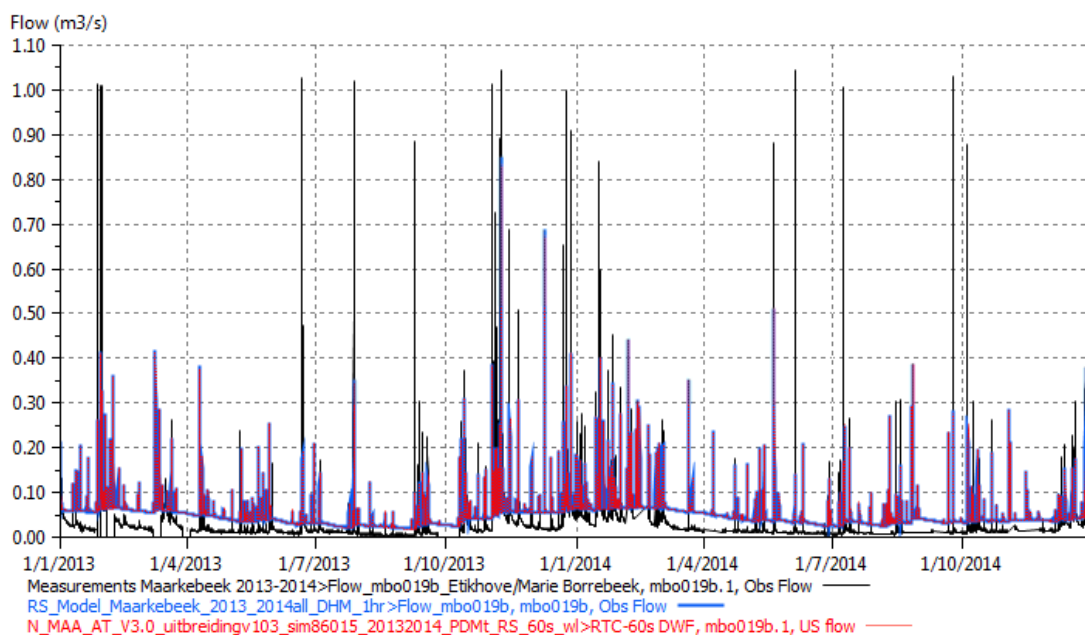
Figuur 3-9 Gesimuleerd debiet t.h.v. maa066a.2 (monding Nederaalbeek) door IWRS (blauw) en ICM (rood)



Figuur 3-10 Gesimuleerd debiet t.h.v. maa112a.1 (Maarkedal) door IWRS (blauw) en ICM (rood)

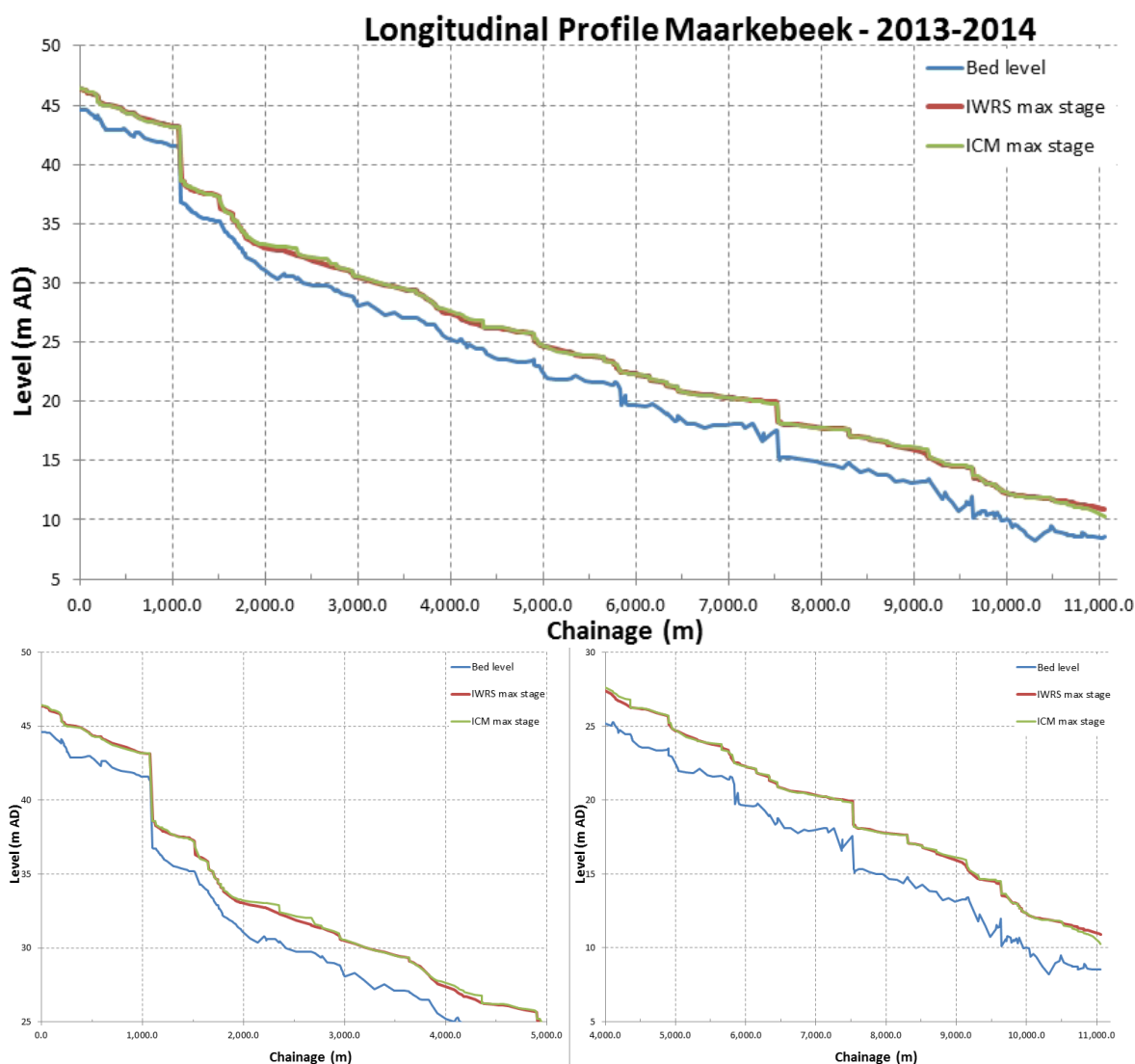


Figuur 3-11 Gesimuleerd debiet t.h.v. maa148.1 (opwaarts) door IWRS (blauw) en ICM (rood)



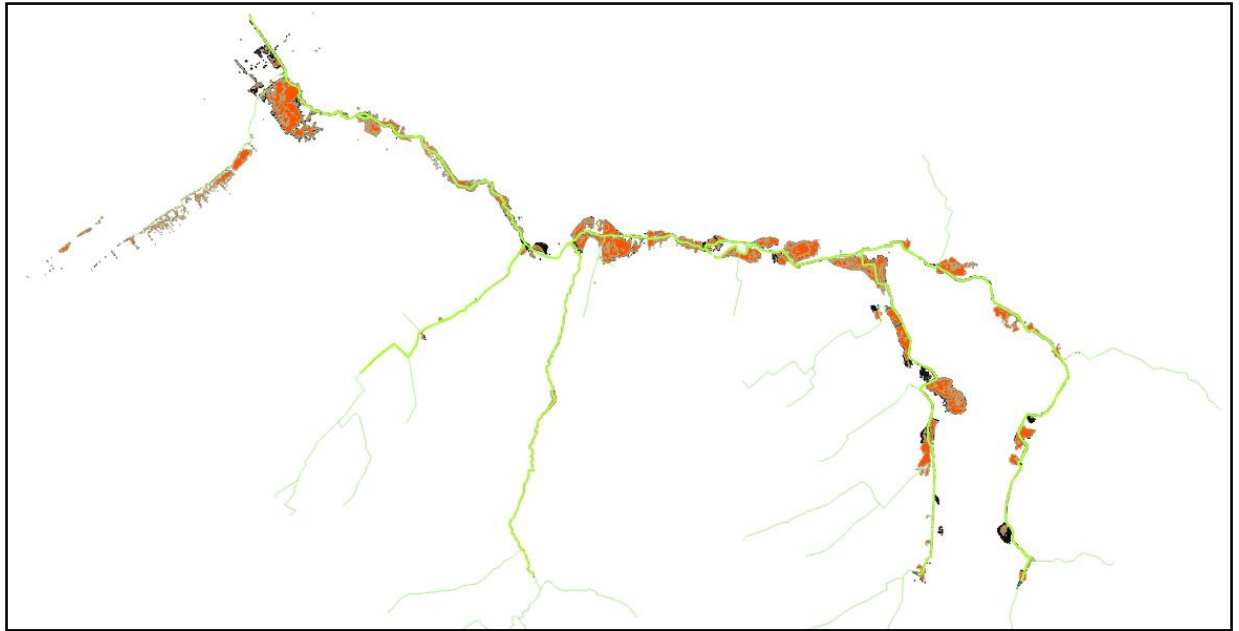
Figuur 3-12 Gesimuleerd debiet t.h.v. mbo19b.1 (meetpunt Marie-Borrebeek) door IWRS (blauw) en ICM (rood) en gemeten debiet (zwart)

Figuur 3-13 geeft het langspoorprofiel weer van het maximaal gesimuleerde waterpeil langs de Maarkebeek met het RS en ICM model. Aanvankelijk werden ter hoogte van enkele waterbouwkundige constructies opstuwings in ICM gegenereerd die in RS niet of in mindere mate werden aangenomen. Op aanraden van Innovyze werden daarom enkele discharge coëfficiënten aangepast waarmee dit probleem werd opgelost. Over het algemeen kan een goede overeenkomst worden waargenomen.



Figuur 3-13 Maximaal gesimuleerd waterpeil langsheen de Maarkebeek door IWRS (rood) en ICM (groen)

In *Figuur 3-14* worden de met RS en ICM gesimuleerde maximale overstromingen langs de Maarkebeek voor de periode 2013-2014 weergegeven. Ook hier is er een goede gelijkens tussen beide modellen. Kleine verschillen worden veroorzaakt door het conceptuele verschil in simulatie van overstroming van oevers tussen RS en ICM (zie boven). In RS werd een maximale overstroomde zone gesimuleerd op 08/11/2013 22:00, voor ICM was dit 09/11/2013 01:00.



Figuur 3-14 Gesimuleerde overstromingen bij maximaal waterpeil langsheen de Maarkebeek door IWRS (zwart) en ICM (oranje)

3.3 Kalibratie en validatie sedimenttransportmodel

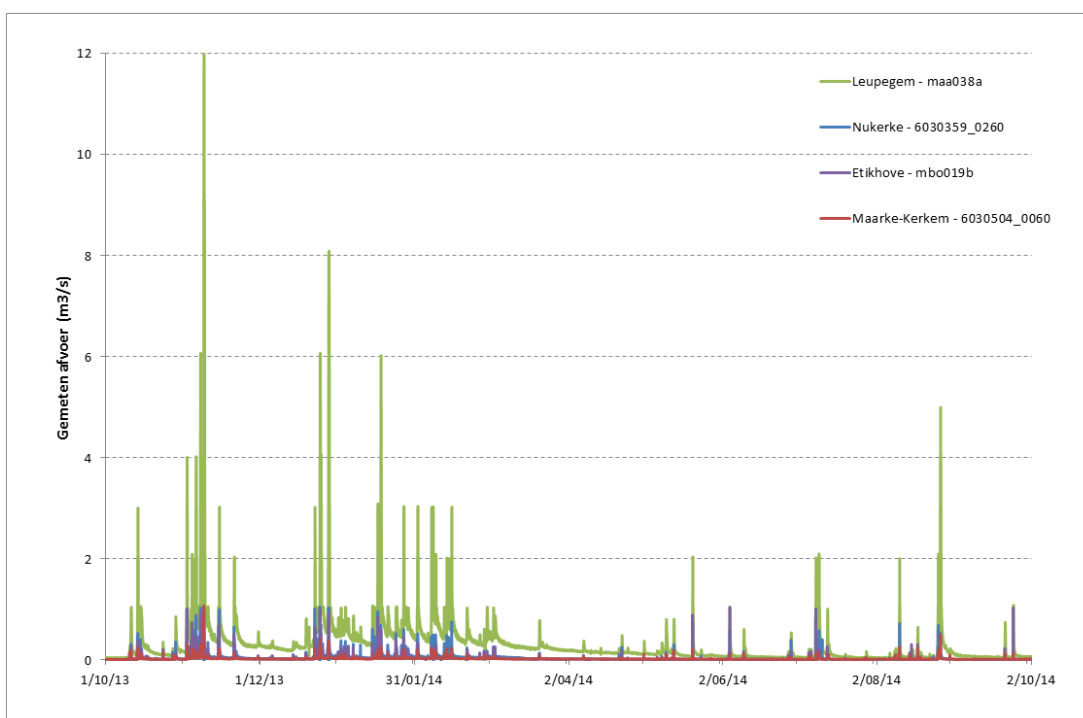
3.3.1 Meetdata

Figuur 3-15 en *Figuur 3-16* tonen de gemeten debieten en sedimentconcentraties t.h.v. de vier meetlocaties die tijdens de simulatieperiode actief waren (*Figuur 3-1*). Te Leupegem waren geen SSC gegevens beschikbaar tijdens lage afvoeren, vermoedelijk omdat de sensor dan onvoldoende diep in de waterkolom zit.

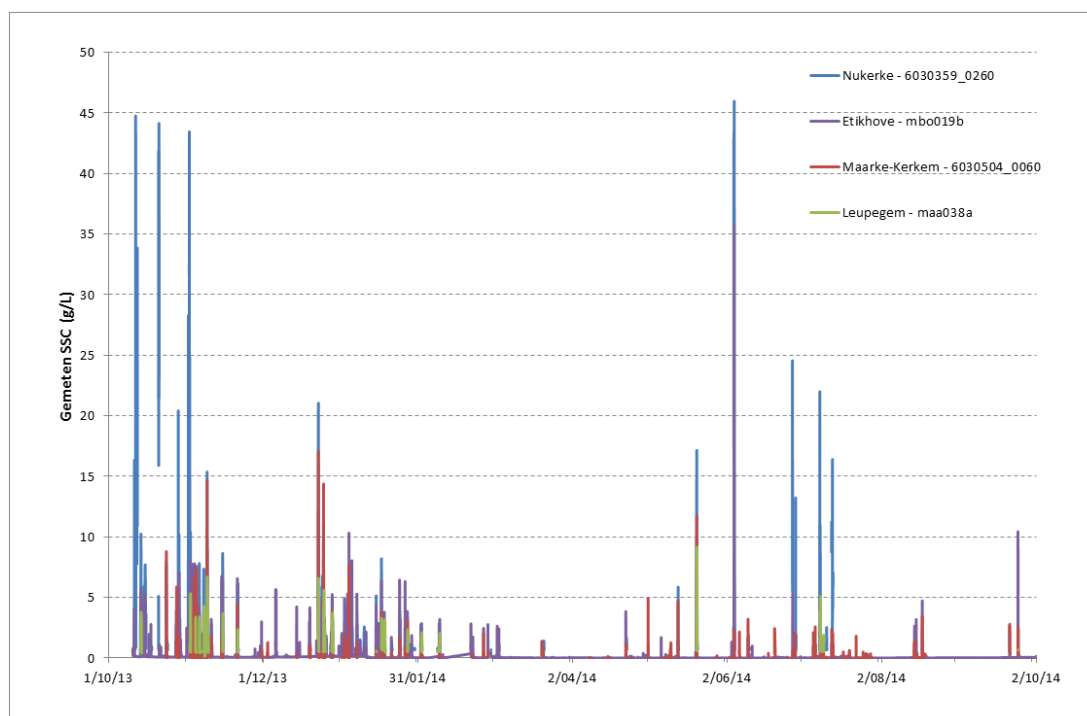
De hoogste afvoeren werden uiteraard gemeten aan de afwaartse meetpost te Leupegem. De grootste events waren deze van begin november 2013 en eind december 2013. De hoogste sedimentconcentraties werden gemeten te Nukerke en Maarke-Kerkem, de meest opwaartse meetlocaties. Naar afwaarts toe worden deze concentraties verdund en is er minder input via bodemerrosie op het aangrenzende land zodat de SSC in de waterloop afneemt. De hoogste SSC werd geregistreerd tijdens een event in juni 2014. Het betreft allicht een kortstondig maar hevig onweer, waarbij veel bodemerrosie maar relatief weinig oppervlakkige afvoer werd veroorzaakt. In het algemeen waren de sedimentconcentraties duidelijk groter tijdens oktober 2013 tot januari 2014 dan tijdens de rest van de simulatieperiode.

De SSC meetdata is bepaald a.d.h.v. continue turbiditeitsmetingen en waterstalen die op SSC werden geanalyseerd. De kwaliteit van de correlatie is niet bekend (r^2 , hysteresis, effecten korrelgrootte, etc.). Het is bekend dat dergelijke continue SSC metingen onderhevig zijn aan een bepaalde onzekerheid. Tijdens kalibratie en validatie van de gemodelleerde sedimentconcentraties is het belangrijk om rekening te houden met de onzekerheid op de gemeten absolute SSC waarden.

Er dient opgemerkt te worden dat voor kalibratie van het ICM sedimentmodel Maarkebeek de meetlocaties te Leupegem en Etikhove als belangrijkste werden geacht. Dit omdat de overige meetlocaties zich bevinden in de gebieden die bij de opwaartse uitbreiding van het model op vereenvoudigde wijze in het model werden toegevoegd. Omwille van de vereenvoudiging is het aangewezen om deze locaties minder in detail te bestuderen dan de meetlocaties die op meer realistische wijze gemodelleerd worden.



Figuur 3-15 Gemeten debieten op de vier meetlocaties in het stroomgebied van de Maarkebeek



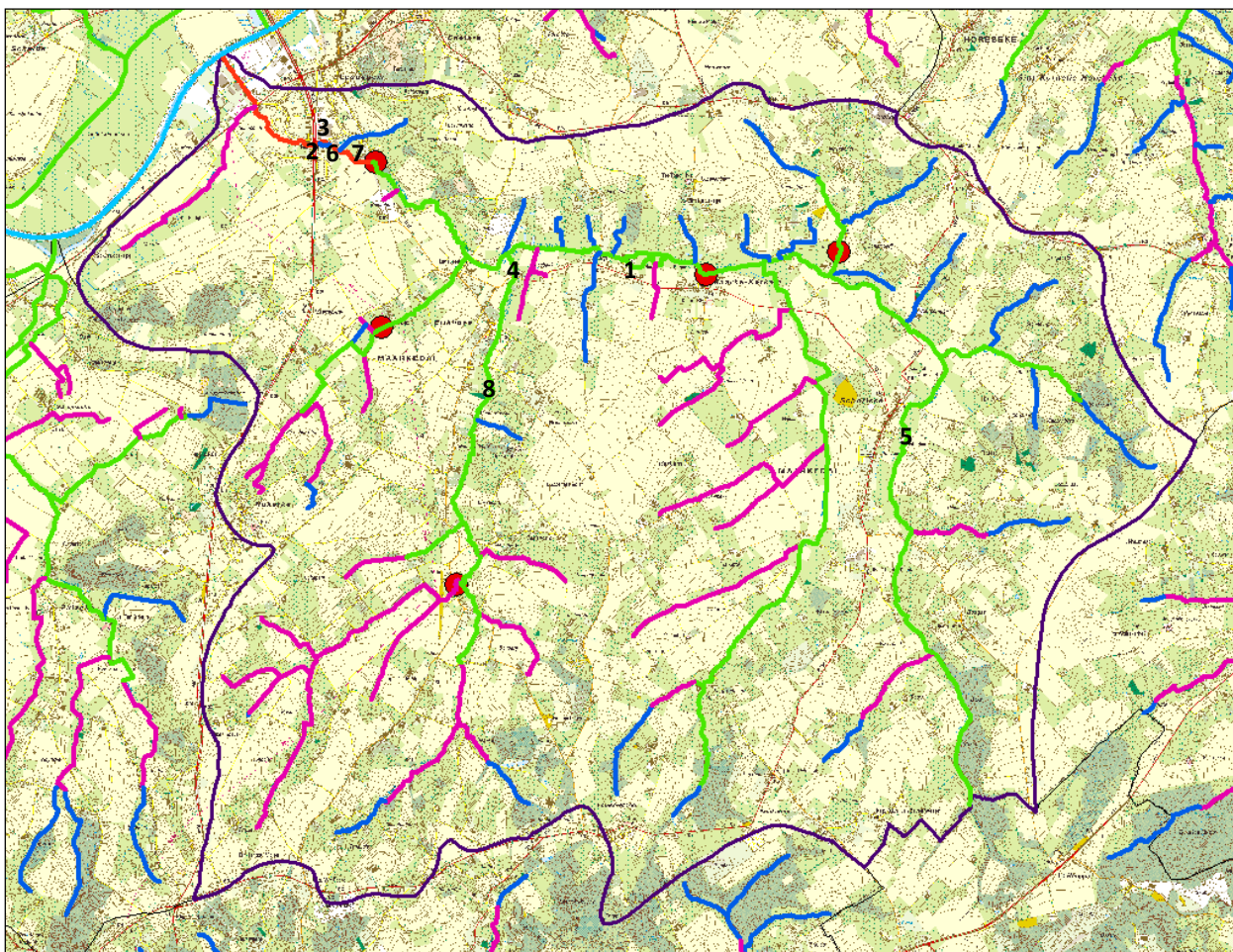
Figuur 3-16 Gemeten SSC op de vier meetlocaties in het stroomgebied van de Maarkebeek

Gedurende de jaren 2013-2015 heeft VMM-ARW verschillende surveys uitgevoerd langsheen de Maarkebeek op potentiële aanslibbingslocaties. Op deze locaties werd een inpeiling uitgevoerd in een bepaalde zone en dezelfde meetraaien werden op latere tijdstippen herhaald. Aldus kon de aanslibbing opgevolgd worden in de tijd. Het exact herhalen van een bepaalde meetraai is geen evidentie, vandaar dat een bepaalde onzekerheid in acht dient te worden genomen. Voorts speelt ook de nauwkeurigheid van de verticale GPS metingen (+/- 3cm) een rol.

Figuur 3-17 toont de geselecteerde meetlocaties:

1. Woelkom afwaarts de Borgtmolen (Figuur 3-18)
2. Zone afwaarts de Nonnemolen
3. Zone opwaarts de Nonnemolen
4. Gansbeekstraat
5. Kasteelmolen
6. Vistrap Nonnemolen
7. Bocht opwaarts Nonnemolen
8. GOG Nederaalbeek

Om praktische redenen (cfr. technische overleggen met ARW) werden enkel de eerste vijf locaties meermaals gepeild.



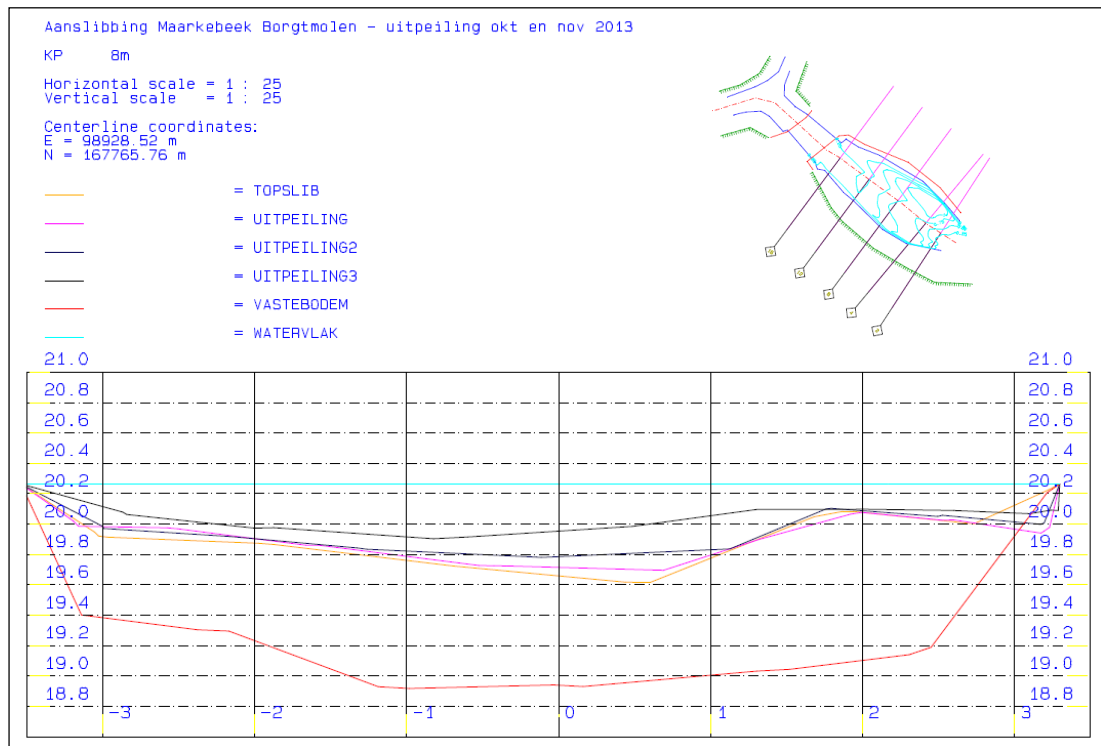
Figuur 3-17 Door ARW gepeilde meetlocaties langsheen de Maarkebeek (1-8)

Op volgende momenten werd een peiling uitgevoerd:

1. Baseline survey 02/06/2013 (inpeiling): locatie 1 en 2
2. Survey 01/08/2013 (uitpeiling 1): locatie 1, 2 en 3
3. Survey 17/10/2013 (uitpeiling 2): locatie 1, 2, 3, 4 en 5
4. Survey 13/11/2013 (uitpeiling 3): locatie 1, 2, 3, 4 en 5
5. Survey 09/12/2014 (uitpeiling 4): locatie 1
6. Survey 06/01/2015 (uitpeiling 5): locatie 1, 2, 3, 4 en 5

Dit liet een evaluatie van volgende periodes toe:

1. Baseline vs. Uitpeiling 1: 2 maanden met 2 kleine events
2. Uitpeiling 2 vs. Uitpeiling 3: 1 maand met grote event november 2013
3. Uitpeiling 4 vs. Uitpeiling 5: 1 maand met medium events
4. Uitpeiling 3 vs. Uitpeiling 5: meer dan 1 jaar met medium events



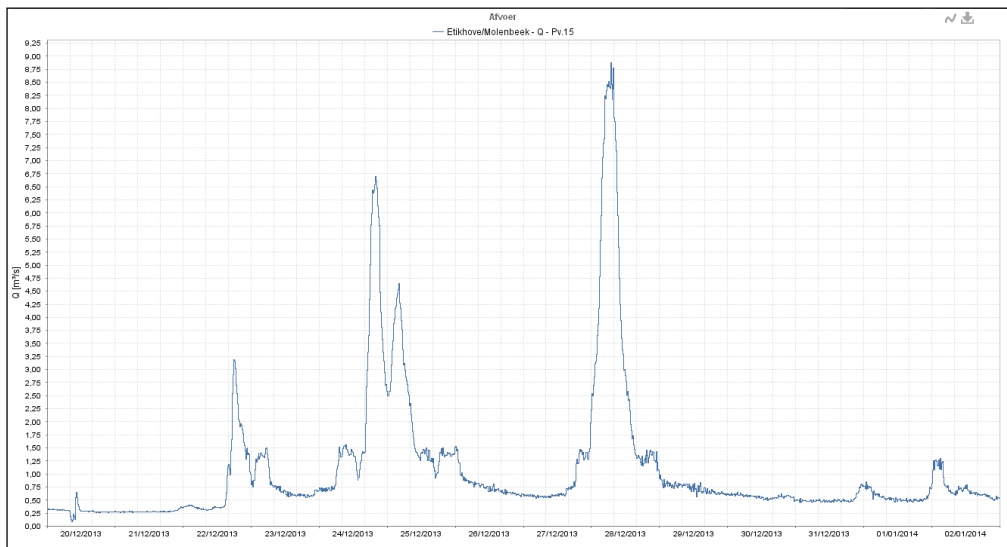
Figuur 3-18 Periodieke peiling thv een meetraai in de woelkom van de Borgtmolen

Tijdens deze periodes werden volgende depositiehoogtes geobserveerd:

1. Baseline vs. Uitpeiling 1
Afwarts Borgtmolen: enkele lokale wijzigingen maar geen duidelijke algemene erosie of depositie
Afwarts Nonnemolen: 10-20cm depositie
2. Uitpeiling 2 vs. Uitpeiling 3
Afwarts Nonnemolen: 5 cm erosie
Opwaarts Nonnemolen: 20-30 cm erosie bedding maar gelijkmatige depositie op talud
Afwarts Borgtmolen: 5 cm depositie
Gansbeekstraat: 20-30 cm erosie of bed bedding
Kasteelmolen: 10 cm erosie bedding
3. Uitpeiling 4 vs. Uitpeiling 5
Afwarts Borgtmolen: 30 cm depositie
4. Uitpeiling 3 vs. Uitpeiling 5
Afwarts Borgtmolen: 20 cm depositie
Afwarts Nonnemolen: 10 cm depositie
Opwaarts Nonnemolen: 20 cm depositie
Gansbeekstraat: 30 cm depositie
Kasteelmolen: 10 cm depositie

Na contacteren van de betrokken Gemeentes en Provincie Oost-Vlaanderen bleek dat er enkel t.h.v. de Borgtmolen regelmatig dient te worden gebaggerd: in mei 2013 werd 110 m³ aanslibbing afgegraven en in juli 2014 71 m³.

Op 28/12/2013 deed zich een aanzienlijke event voor op de Maarkebeek (*Figuur 3-19*). Volgens de overstromingsvoorspeller dreigde het waakpeil overschreden te worden (achteraf bleek een lagere max. waterstand). Anteagroup heeft vlak voor (27/12/2013) en na (29/12/2013) deze event een kwalitatieve meetcampagne uitgevoerd om een inschatting te maken van het effect van deze event op de sedimentatie in de Maarkebeek.



Figuur 3-19 Gemeten afvoer tijdens event kerstperiode 2013 (bron: Waterinfo.be)

Volgende observaties werden gemaakt (zie ook Voortgangsrapport 2):

- Woelkom Borgtmolen: Waterpeil (Hydronet) en waterdiepte (peilstok) gelijk voor en na event. Op eerste zicht dus geen bijkomende depositie. Toch grotere inzinking in slibbodem dan voorheen (minder geconsolideerd). Dus mogelijks wegspoeling oude sliblaag en depositie nieuwe en/of opmenging oude sliblaag. Tong met depositiemateriaal tot (0.5m) boven waterniveau is verder verhoogd, vnl. met grof materiaal (korrelgrootteanalyse van staal gaf d50 van 128 μ m). Gemiddeld kon voor de ganse woelkom de depositie op 5cm worden geschat.
- Omgeving van Borgtmolen was overstromd (via bypass). Dit resulteerde in een sliblaag van ongeveer 5cm over een oppervlakte van ongeveer 200 m². Hierbij betrof het vnl. fijn materiaal (d50 van 47 μ m), dat allicht te fijn is om te bezinken in de waterloop.
- Opwaarts Nonnemolen: duidelijk opgehoogde slibafzetting (5-10 cm) op de taluds.
- Vistrap Nonnemolen: duidelijk opgehoogde slibafzetting (enkele cm) op de taluds.
- Afwaarts Nonnemolen: duidelijk opgehoogde slibafzetting (5 cm) in de waterloop en op de taluds (fijner materiaal dan opwaarts de Nonnemolen).

3.3.2 Terreinkennis

Antea Group voerde drie terreinbezoeken uit naar het stroomgebied van de Maarkebeek i.k.v. onderliggend project:

1. 11/04/2013: selectie aanslibbingslocaties en algemene verkenning
2. 02/06/2013: inpeiling aanslibbingslocaties door ARW
3. 27 en 29/12/2013: kwalitatieve metingen voor en na event

Deze terreinbezoeken en algemene kennis van het gebied opgedaan door Thomas Van Hoestenberghen en Nele Van Ransbeeck (VMM) i.k.v. het sedimentmeetnet lieten toe om een goed beeld te vormen van de sedimentologische processen in het stroomgebied van de Maarkebeek.

De Maarkebeek wordt gekenmerkt door een zandige bedding (D50 100 à 150 µm) en leming suspensiemateriaal. Het lempakket in deze regio is relatief dun (enkele meters) en door erosie in de rivierbedding volledig verdwenen. Het lemige suspensiemateriaal is afkomstig van bodemerrosie op het land en heeft volgens meetstalen uit het sedimentmeetnet (VMM) een D50 tussen 10 en 20 µm. Aangezien deze D50 bepaald is op suspensiemateriaal, is het aannemelijk om te veronderstellen dat de D50 van het erosiemateriaal dat in de waterloop terecht komt iets hoger is. De grovere deeltjes zullen immers bezinken en/of zich via bedtransport stroomafwaarts verplaatsen. Volgens de masterthesis van Bruno Vander Linden (Evaluatie van kleinschalige erosiedammen in de Vlaamse Ardennen, UGent, 2011) en de staalnames van het sedimentmeetnet ligt de bovengrens van dit materiaal boven 50 µm.

Hoge sedimentafvoeren vallen samen met hoge debieten op de waterloop en hoe verder opwaarts hoe meer de SSC piek zich beperkt tot de stijgende flank van het hydrogram. Het fijne transportmateriaal dat dan in de waterloop terecht komt wordt op relatief korte termijn grotendeels uit het stroomgebied getransporteerd. Er is met andere woorden weinig depositie in de waterloop. Bovendien blijkt uit de metingen dat tijdens grote wassen aanslibbing (gedeeltelijk) opnieuw in suspensie wordt gebracht. Er is een beperkte beddingerosie, maar dit zandige materiaal beweegt zich trager dan het suspensiemateriaal doorheen de waterloop en bovendien is de sedimentvracht een grootteorde kleiner. De bedding van de Maarkebeek is dus vrij stabiel. De bovenloopjes (opwaarts) vertonen nauwelijks of geen erosie of depositie en zijn permanente waterlopen.

Tijdens de kalibratie van het ICM sedimentmodel voor de Maarkebeek werd getracht om deze processen zo goed mogelijk te reproduceren. Gezien de grote onzekerheden die gepaard gaan met sedimenttransportmodellering, is het van groot belang om de juiste dynamieken te simuleren, eerder dan modelparameters zodanig aan te passen dat gemodelleerde sedimentconcentraties zo exact mogelijk de metingen benaderen. Dat laatste is natuurlijk een kwaliteitscriterium, maar geen doel op zich. Twee modellen met verschillende parametersets kunnen immers beiden tot goede SSC modelresultaten leiden, maar doen dat niet noodzakelijk via dezelfde processen.

3.3.3 Kalibratie- en validatieperiode

Zoals reeds besproken werd de periode 01/10/2013-30/09/2014 als kalibratie- en validatieperiode geselecteerd. De inputs (Q en SSC) werden gegenereerd met het CNWS model. [Tabel 3-2](#) en [Tabel 3-3](#) geven een indicatie van de kwaliteit van deze inputs voor de bemeten deelstroomgebieden van de Maarkebeek op event resp. jaarlijkse basis. Hieruit blijkt dat er in de winter in het algemeen een onderschatting is van Q en SL door CNWS terwijl er in de zomer een overschatting is. Op jaarlijkse basis zijn de gecumuleerde metingen en modelresultaten voor afstroming bijna gelijk. De jaarlijkse sedimentvracht op de meest afwaartse meetlocatie (Leupegem) wordt door het model gereproduceerd. Aan de meer opwaartse meetlocaties wordt de sedimentvracht onderschat door CNWS, behalve voor de Broekbeek waar er een overschatting is.

Tabel 3-2 Overeenkomst tussen model- (CNWS) en meetresultaten voor alle gesimuleerde evenementen voor de totale hoeveelheid afstroming en de totale sedimentvracht aan de uitlaat van het stroomgebied. De gemiddelde waarden stellen gewogen gemiddelden voor op basis van de totale hoeveelheid water en sediment.

Stroomgebied	Seizoen	Model / meting (afstroming)	Model / meting (sediment)
Leupegem	Winter	0,52	0,52
Leupegem	Winter	0,40	0,08
Leupegem	Zomer	4,77	8,95
Leupegem	Zomer	2,46	1,08
Gemiddelde		0,84	0,46

Etikhove	Winter	0,49	0,12
Etikhove	Winter	0,46	0,07
Etikhove	Zomer	3,44	14,93
Etikhove	Zomer	4,01	5,17
Gemiddelde		0,98	0,23
Donderij	Winter	0,36	0,17
Donderij	Winter	0,36	0,10
Donderij	Zomer	2,63	1,14
Donderij	Zomer	1,08	0,62
Gemiddelde		0,59	0,26
Broekbeek	Winter	0,76	1,14
Broekbeek	Winter	0,63	0,34
Broekbeek	Zomer	3,22	5,14
Broekbeek	Zomer	1,83	2,05
Gemiddelde		1,11	1,26
Maarke-kerkem	Winter	0,90	0,37
Maarke-kerkem	Winter	0,63	-
Maarke-kerkem	Zomer	4,37	4,81
Maarke-kerkem	Zomer	4,26	1,59
Gemiddelde		1,66	2,27

Tabel 3-3 Overeenkomst tussen model- en meetresultaten voor de totale hoeveelheid afstroming en de totale sedimentvracht over een periode van één jaar (2013) aan de uitlaat van het stroomgebied.

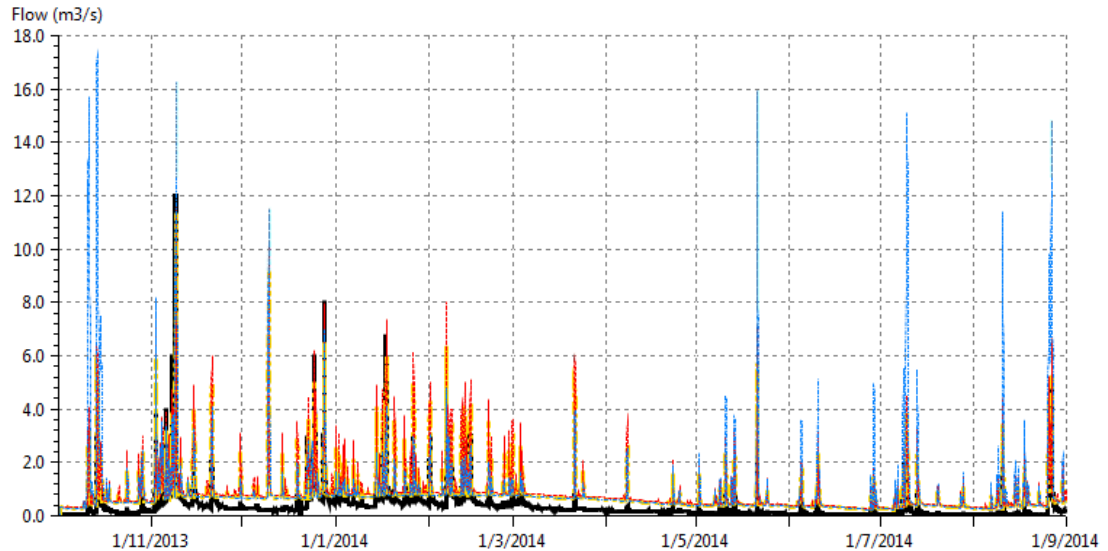
Stroomgebied	Model / meting (afstroming)	Model / meting (sediment)
Leupegem	1,09	1,01
Etikhove	0,93	0,54
Donderij	0,82	0,62
Broekbeek	1,02	2,50
Maarke-kerkem	1,04	0,68

Het spreekt voor zich dat de kwaliteit van het ICM sedimentmodel in belangrijke mate afhankelijk is van de kwaliteit van de inputs. CNWS berekent een sedimentvracht en verdeelt deze (lineair) over het berekende runoff hydrogram om de sedimentconcentratie te bekomen. Wanneer de gemeten en gesimuleerde afvoer en/of sedimentvracht dus verschillen, zal onvermijdelijk ook de gesimuleerde SSC afwijken van de metingen. Hierop wordt verder nog teruggekomen.

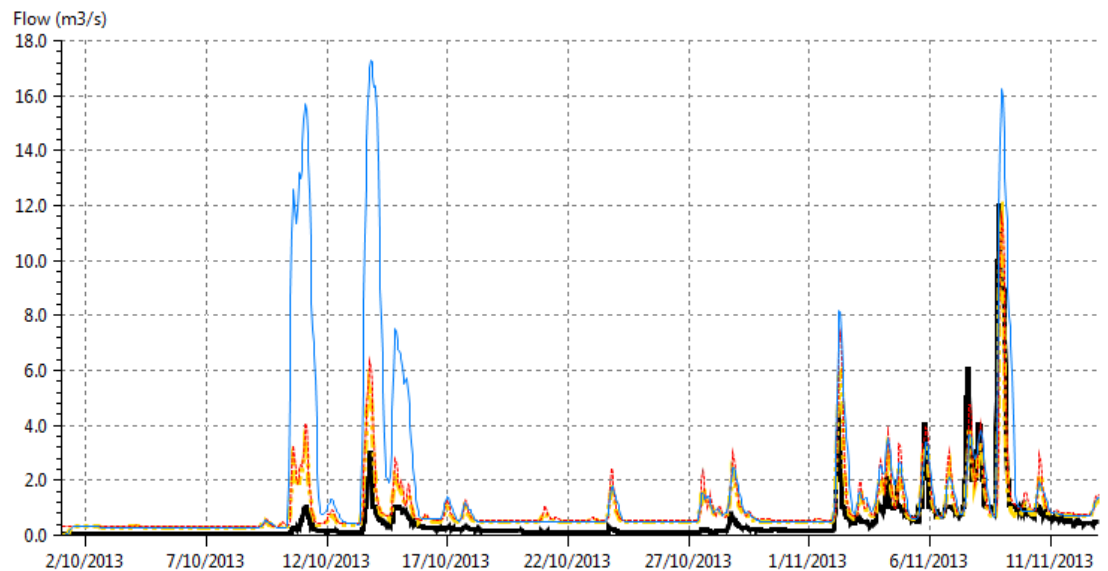
In *Figuur 3-20* tot *Figuur 3-27* worden de gemeten en gesimuleerde afvoer weergegeven voor de meetlocaties. Zowel de in ICM gesimuleerde afvoer gebruik makende van het CNWS debiet en (herschaalde) PDM basisafvoer als input per VHA segment (incl. opwaartse uitbreidingen) als de in ICM gesimuleerde afvoer gebruik makende van het herschaalde PDM totaaldebiet als input per VHA segment (incl. opwaartse uitbreidingen) worden in de figuren getoond. Dit toont aan dat er per event inderdaad significante verschillen kunnen zijn tussen afvoermetingen en modelresultaten. Het PDM totaaldebiet lijkt tot betere resultaten te leiden dan de combinatie CNWS runoff en PDM basisafvoer. Toch zijn er duidelijk aanzienlijke verschillen tussen de gemeten en gesimuleerde PDM totale afvoer, zowel m.b.t. afvoerpieken als droge periodes. Dit heeft een onvermijdelijke invloed op de sediment gerelateerde resultaten. De events van begin november 2013 en de kerstperiode 2013 werden aanvankelijk als kalibratie- en validatie-event geselecteerd, aangezien dit de grootste events zijn (in termen van debiet en sedimentvracht) en de gemodelleerde afvoer er vrij goed aansluit bij de metingen. Voor de event 14/10/2013 wordt het debiet sterk overschat waardoor deze event niet geschikt is voor kalibratie van het model. In werkelijkheid werd steeds de periode 1/10/2013-31/12/2013 gesimuleerd, om het model voldoende "op te warmen" en de resultaten voor beide events tegelijkertijd te kunnen evalueren. Daarnaast werden, vnl. in latere kalibratiestadia, ook geregeld simulaties voor de volledige periode 01/10/2013-30/09/2014 uitgevoerd.

Voor de periode 01/10/2013-30/09/2014 bedraagt de totale SL berekend met CNWS voor de Maarkebeek 6203 ton. Wanneer de inputs in ICM voor dezelfde periode gesommeerd worden, geeft

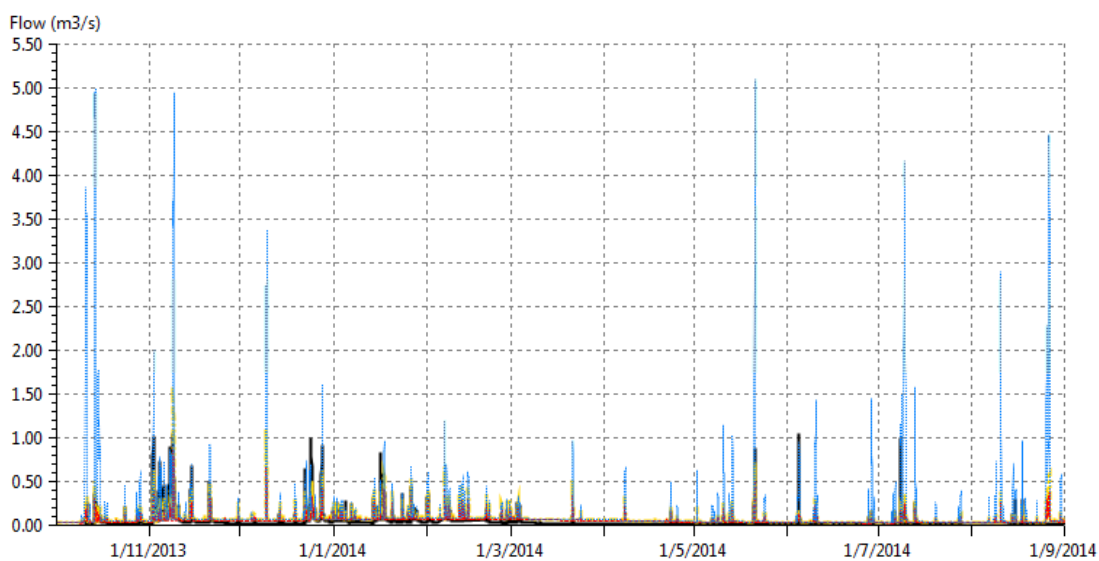
dit 5902 ton. Het verschil in beide tonnages is te wijten aan afronding in de inputfiles en het verschil in tijdstap in inputs (15min) en berekening (15s). Voor de subperiode 1/10/2013-31/12/2013 bedroeg de totale sedimentinput 1750 ton.



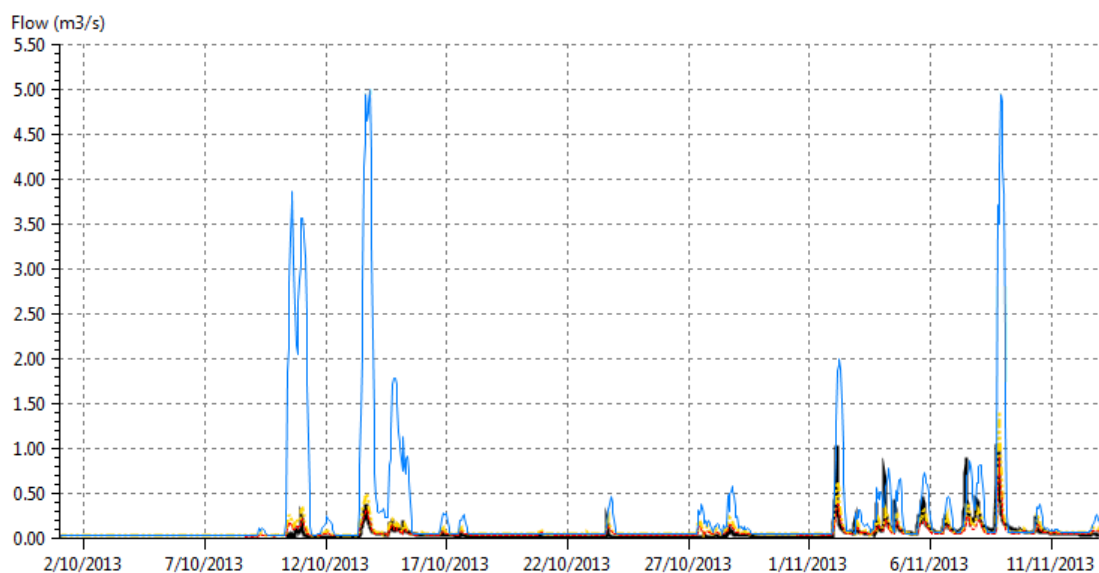
Figuur 3-20 Debiet op meetlocatie Leupegem: meting (zwart), InfoWorks RS (geel), ICM met PDM totaaldebiet (rood) en ICM met CNWS runoff en PDM basisafvoer (blauw) voor de volledige kalibratie/validatie periode



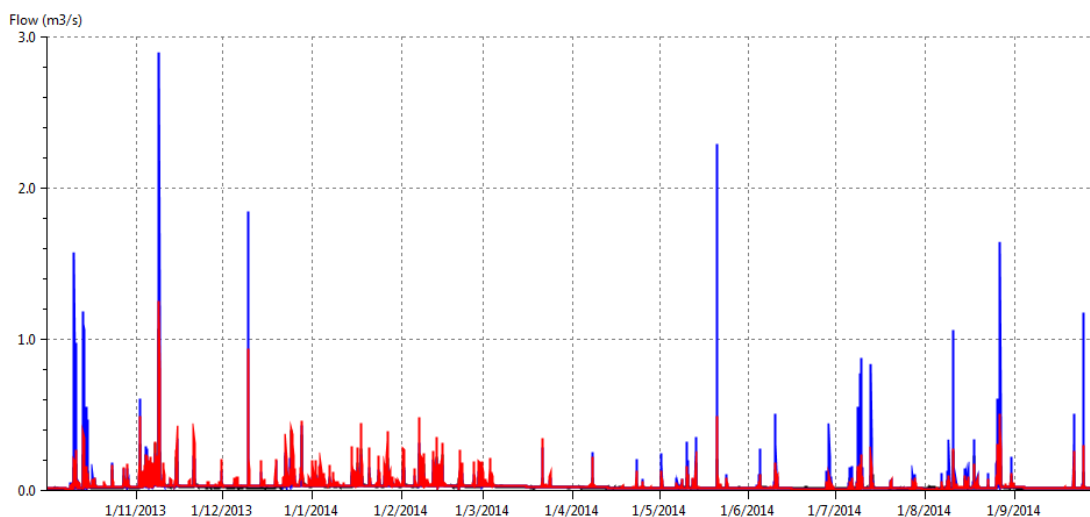
Figuur 3-21 Debiet op meetlocatie Leupegem: meting (zwart), InfoWorks RS (geel), ICM met PDM totaaldebiet (rood) en ICM met CNWS runoff en PDM basisafvoer (blauw) voor de events van midden oktober en begin november 2013



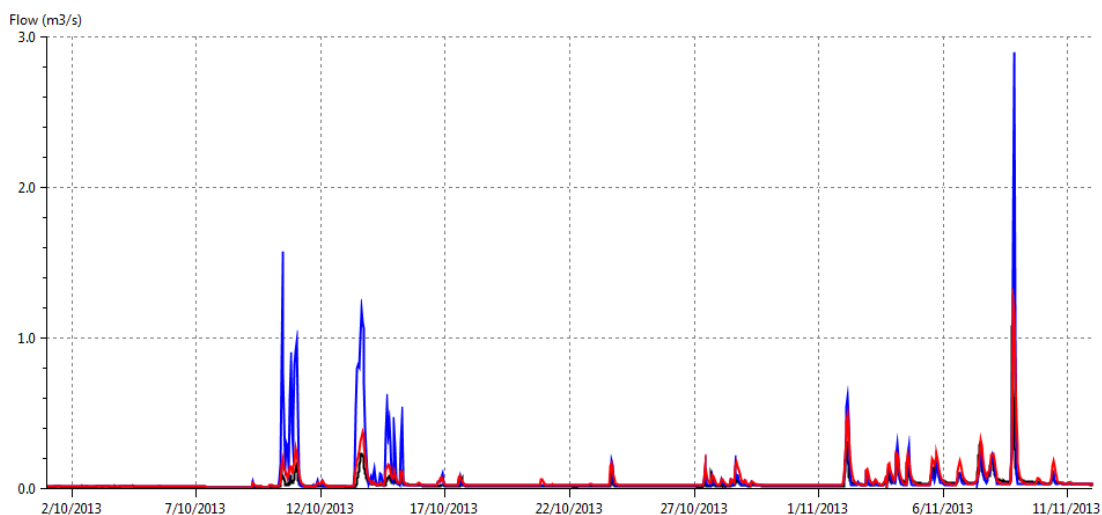
Figuur 3-22 Debiet op meetlocatie Etikhove: meting (zwart), InfoWorks RS (geel), ICM met PDM totaaldebiet (rood) en ICM met CNWS runoff en PDM basisafvoer (blauw) voor de volledige kalibratie/validatie periode



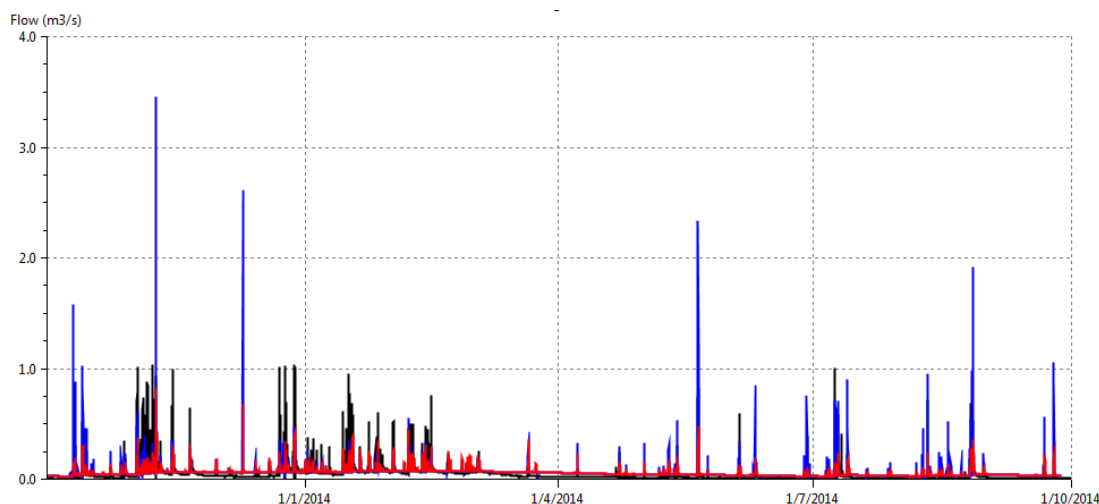
Figuur 3-23 Debiet op meetlocatie Etikhove: meting (zwart), InfoWorks RS (geel), ICM met PDM totaaldebiet (rood) en ICM met CNWS runoff en PDM basisafvoer (blauw) voor de events van midden oktober en begin november 2013



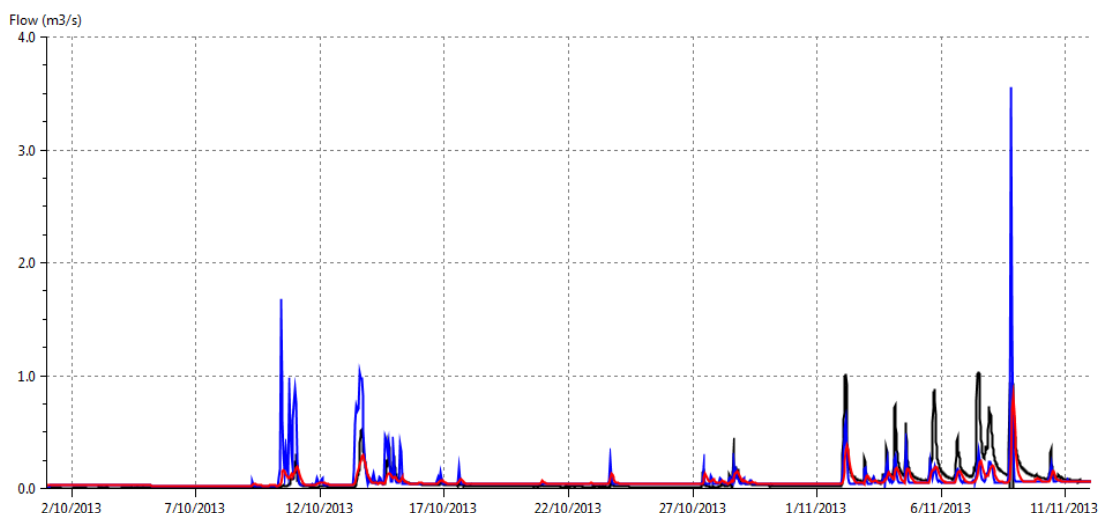
Figuur 3-24 Debiet op meetlocatie Maarke-Kerkem: meting (zwart), ICM met PDM totaaldebiet (rood) en ICM met CNWS runoff en PDM basisafvoer (blauw) voor de volledige kalibratie/validatie periode



Figuur 3-25 Debiet op meetlocatie Maarke-Kerkem: meting (zwart), ICM met PDM totaaldebiet (rood) en ICM met CNWS runoff en PDM basisafvoer (blauw) voor de events van midden oktober en begin november 2013



Figuur 3-26 Debiet op meetlocatie Nukerke: meting (zwart), ICM met PDM totaaldebiet (rood) en ICM met CNWS runoff en PDM basisafvoer (blauw) voor de volledige kalibratie/validatie periode



Figuur 3-27 Debiet op meetlocatie Nukerke: meting (zwart), ICM met PDM totaaldebiet (rood) en ICM met CNWS runoff en PDM basisafvoer (blauw) voor de events van midden oktober en begin november 2013

3.3.4 Kalibratieproces

Tijdens de kalibratie en validatie van het ICM sedimentmodel Maarkebeek werden zeer veel simulaties (>200) uitgevoerd. Dit stroomgebied was immers de pilootstudie binnen onderliggend project. Er werd veel aandacht besteed aan het grondig bestuderen van de functionaliteiten, opties en parameters m.b.t. sedimentmodellering in ICM. Telkens werd het effect op gesimuleerde SSC, erosie/depositie, sedimentvracht, enz. nagegaan (voor een gevoeligheidsanalyse wordt verwezen naar Voortgangsrapport 2). Het zou niet zinvol zijn om al deze simulaties in dit rapport te bespreken. Daarom zal de bespreking zich beperken tot de belangrijkste stappen in het proces. In oktober 2015 werd een technische nota "2252433027_Calibration_ICM_sediments_Maarkebeek_v20.doc" aan VMM bezorgd, gevolg door een tweede nota "2252433027_Calibration_ICM_sediments_Maarkebeek_v20_v01" in januari 2016, die een vervolg was op de eerste nota. Voor meer informatie en resultaten van de tussenstappen kunnen deze nota's geraadpleegd worden. Bovendien zijn alle simulaties te raadplegen via de Citrix ICM link.

Tijdens de simulaties ter kalibratie en validatie van het model werd vooral op volgende resultaten gelet (en vergeleken met metingen/terreinkennis):

- Grootte-orde en dynamisch verloop van sedimentconcentraties ter hoogte van de meetlocaties
- Grootte-orde en tijdstip van aanslibbing op de geselecteerde depositiezones
- Grootte-orde van de sediment outflux uit het stroomgebied
- Stabiliteit van de bedding, zowel in de opwaartse als afwaartse zones

Algemene instellingen:

- Als "Active layer depth method" werd steeds "explicit" toegepast, aangezien dit rechtstreeks toelaat om een specifieke dichtheid voor de active layer in te stellen.
- Voor de Maarkebeek werden steeds zowel SF1 als SF2 gesimuleerd, aangezien er een duidelijk verschil is in bedmateriaal en suspensiemateriaal afkomstig van landerosie (zie hoger). De pollutograph (sediment input) heeft echter enkel betrekking op SF1. Via een grading profiel werd ingesteld dat de rivierbedding (hoofdzakelijk) uit SF2 bestaat.
- SF1 en SF2 werden als "independent" gemodelleerd, aangezien de parameters van de sedimenttransportvergelijkingen dan apart in te stellen zijn. Bij "dependent" sediment fracties worden de "composite parameters" immers toegepast voor beide fracties.
- Als "bed updating" werd steeds "uniform" geselecteerd, aangezien de andere optie (invert) geen erosie onder de oorspronkelijke bedding toelaat.
- De "erosion/deposition affect hydraulics" optie werd gedeactiveerd. Voor deze functionaliteit is immers een zeer strenge stabiliteit van het model vereist. Volgens Innovyze is het onmogelijk om dat niveau te bereiken voor een model van dergelijke omvang en de duur van de te simuleren tijdsperiode met uiteenlopende condities. Indien gewenst kan men wel de geometrie van dwarssecties manueel aanpassen om dit effect in de hydrodynamische berekeningen op te nemen. Daarnaast kan men ook een "sediment depth" voor elke river reach definiëren.

Een initiële parameterset werd opgesteld o.b.v. terreinkennis en default waarden volgens Innovyze. Deze parameterset wordt weergegeven in Tabel 3-4.

Tabel 3-4 Initiële parameterset voor het ICM sedimenttransportmodel Maarkebeek.

Parameter	Waarde	Opmerking
D50 SF1	0.015	Fijn inputmateriaal (KGV sedimentmeetnet)
Specific gravity SF1	2.5	Standaardwaarde
1D settling velocity SF1	/	Automatisch berekend met wet van Stokes
KUL alpha deposition SF1	1	Standaardwaarde
KUL beta deposition SF1	1	Standaardwaarde
KUL gamma deposition SF1	1	Standaardwaarde
KUL alpha erosion SF1	1	Standaardwaarde
KUL beta erosion SF1	1	Standaardwaarde
KUL gamma erosion SF1	1	Standaardwaarde
D50 SF2	0.1	Zandig beddingmateriaal (KGV geschat o.b.v. staalname terreinbezoek kerst 2013)
Specific gravity SF2	2.5	Standaardwaarde
1D settling velocity SF2	/	Automatisch berekend met wet van Stokes
KUL alpha deposition SF2	1	Standaardwaarde
KUL beta deposition SF2	1	Standaardwaarde
KUL gamma deposition SF2	1	Standaardwaarde
KUL alpha erosion SF2	1	Standaardwaarde
KUL beta erosion SF2	1	Standaardwaarde

KUL gamma erosion SF2	1	Standaardwaarde
US/DS Sediment grading	100% SF2	Bedding bestaat volledig uit SF2 materiaal
Active layer depth	0.0005	Standaardwaarde
Erosion depth limit	/	
Deposition limit	/	
Max erosion rate	/	
Max deposition rate	/	

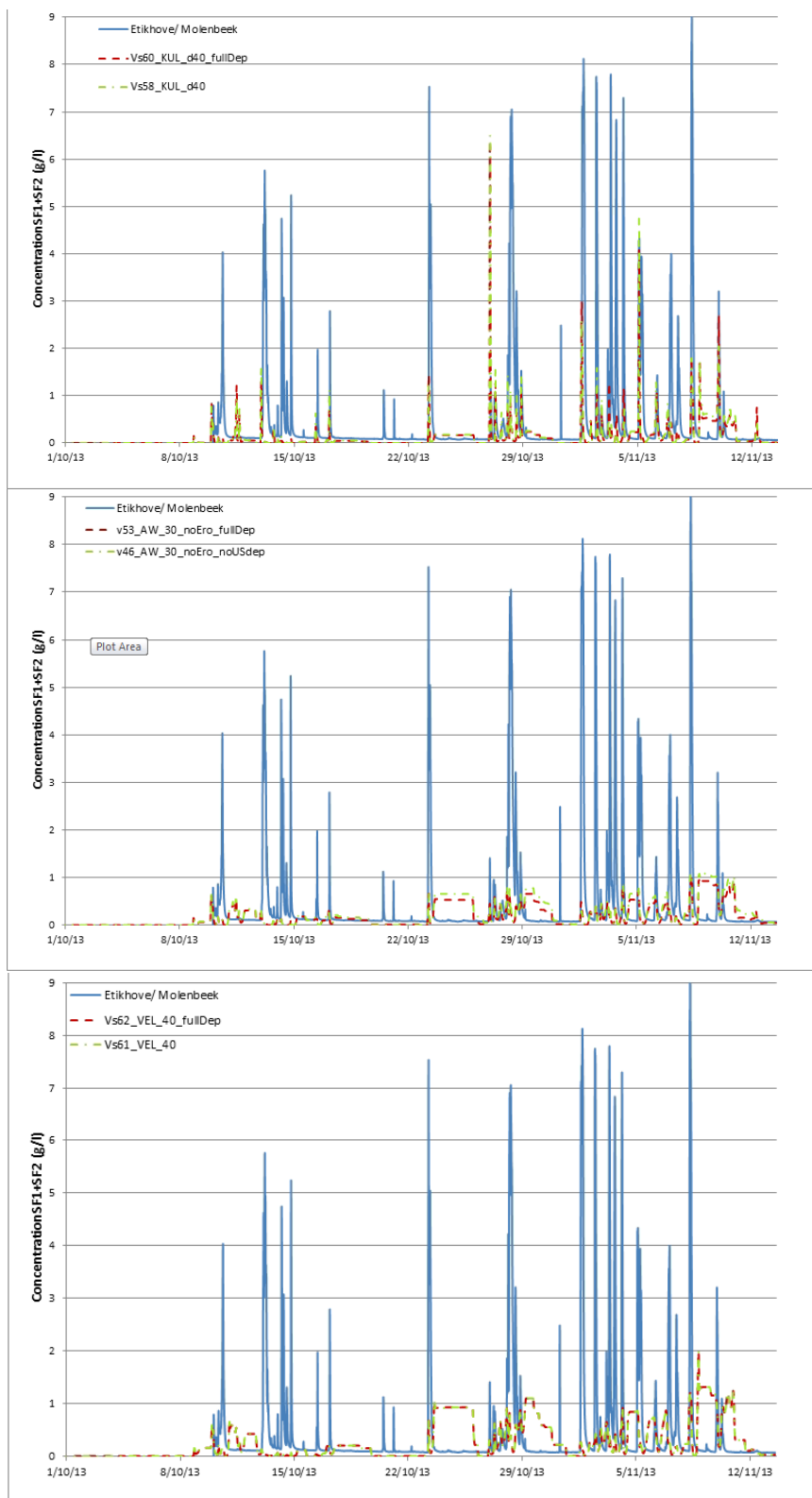
Met de initiële parametersets werden ook de drie verschillende sedimenttransportvergelijkingen in ICM uitvoerig getest. Het KUL model kwam hier duidelijk naar voor als het model dat het beste het dynamische verloop van de SSC reproduceert (illustratie [Figuur 3-28](#)). Daarnaast is het KUL model fysisch zinvol opgebouwd (erosie/depositie gebaseerd op schuifspanning), waar de overige modellen een eerder eenvoudige, empirische structuur hebben. Het KUL model heeft ook duidelijke kalibratieparameters, die handig kunnen gebruikt worden om het model af te ijken (zie Bijlage 2):

- De gamma parameters voor erosie en depositie zijn een factor in de berekening van de kritische schuifspanningen voor erosie resp. depositie. Zij bepalen dus in belangrijke mate onder welke stromingscondities er erosie kan plaatsvinden (erosiviteit) dan wel depositie. Daarnaast kan ook duidelijk een zone in stromingscondities gedefinieerd worden waarin erosie noch depositie kunnen plaatsvinden.
- De alpha en beta parameters voor erosie en depositie bepalen niet wanneer erosie of depositie kan plaatsvinden, maar hebben een belangrijke invloed op de grootte van beide processen wanneer ze effectief gesimuleerd worden. Beiden versterken de flux in depositie/erosie waarbij het effect van alpha onafhankelijk is van de stromingsconditie, terwijl het effect van beta hiervan wel afhankelijk is.

Daarom werd tijdens het kalibratie- en validatieproces hoofdzakelijk gebruik gemaakt van het KUL model. Bij elke belangrijke doorbraak werd echter opnieuw het Velikanov en Ackers-White model bijkomend getest. Het KUL model hield echter steeds stand als duidelijk meest performante model.

Aanvankelijk waren de gesimuleerde sedimentconcentraties ter hoogte van de meetlocaties veel te hoog. Bovendien waren deze gesimuleerde SSC hoog en constant tijdens periodes van lage afvoer. Dit wordt geïllustreerd in [Figuur 3-29](#). Daarnaast was ook de gesimuleerde sedimentvracht veel te hoog. Tevens bleek uit de resultaten dat er zeer veel erosie van het beddingmateriaal plaatsvond. Verdere analyse toonde zelfs aan dat deze beddingerosie in belangrijke mate plaatsvond in de opwaartse uitbreidingen van het rivierennetwerk ([Figuur 3-30](#)). Daarnaast bleek dat het SF1 inputmateriaal hoofdzakelijk achterbleef in dezelfde opwaartse uitbreidingen als depositie ([Figuur 3-31](#)). Het suspensiemateriaal afwaarts bestond dan ook grotendeels uit SF2 (bedding) materiaal. Hieruit konden een aantal nodige aanpassingen worden afgeleid:

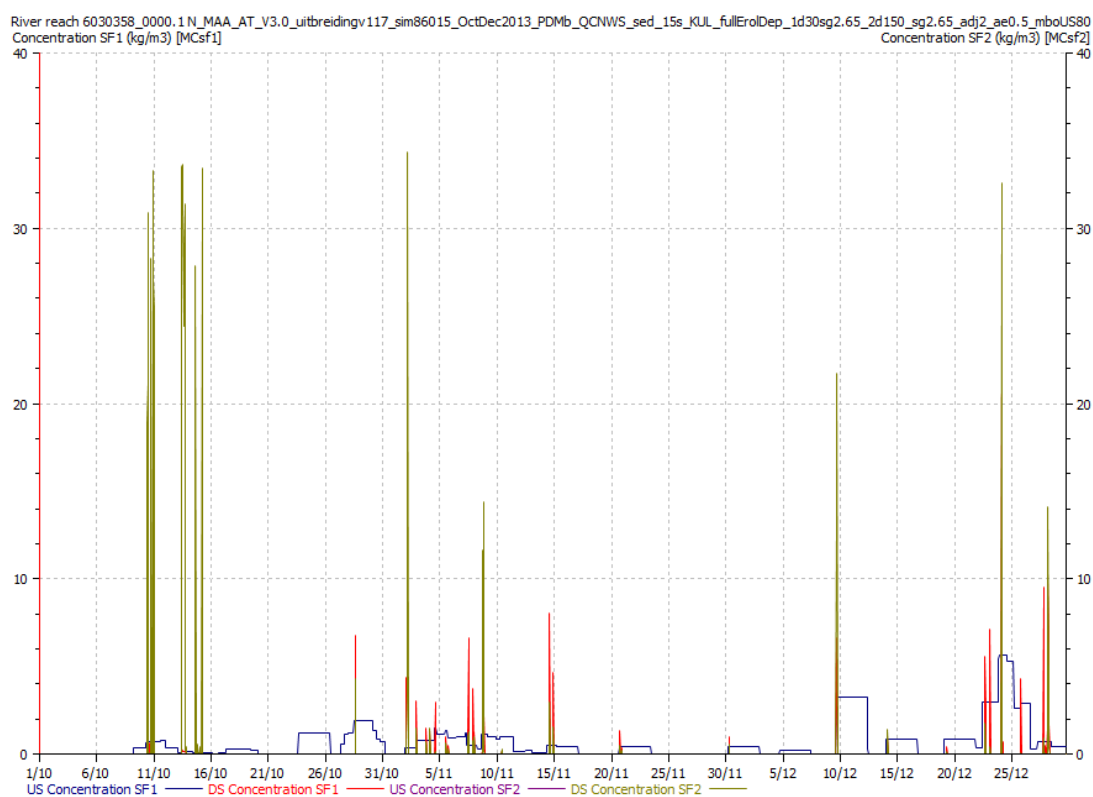
- Het beddingmateriaal (SF2) moest minder mobiel/erosiegevoelig gemaakt worden (verhoging gamma erosion).
- Het SF1 materiaal diende mobieler te worden gemaakt (aanpassing KUL parameters).
- De bedding in de opwaartse waterloopjes van de Maarkebeek is stabiel: er is nauwelijks erosie of depositie. Het is daarom aangewezen om een "erosion depth limit" van 0m en een "deposition depth limit" van 0m voor de vereenvoudigde opwaartse uitbreidingen in te stellen. Dit laat het model toe om het inputmateriaal in deze waterloopjes naar afwaarts te routen zonder dat er erosie van de bedding of depositie van het suspensiemateriaal optreedt, hetgeen dicht aanleunt bij de realiteit.



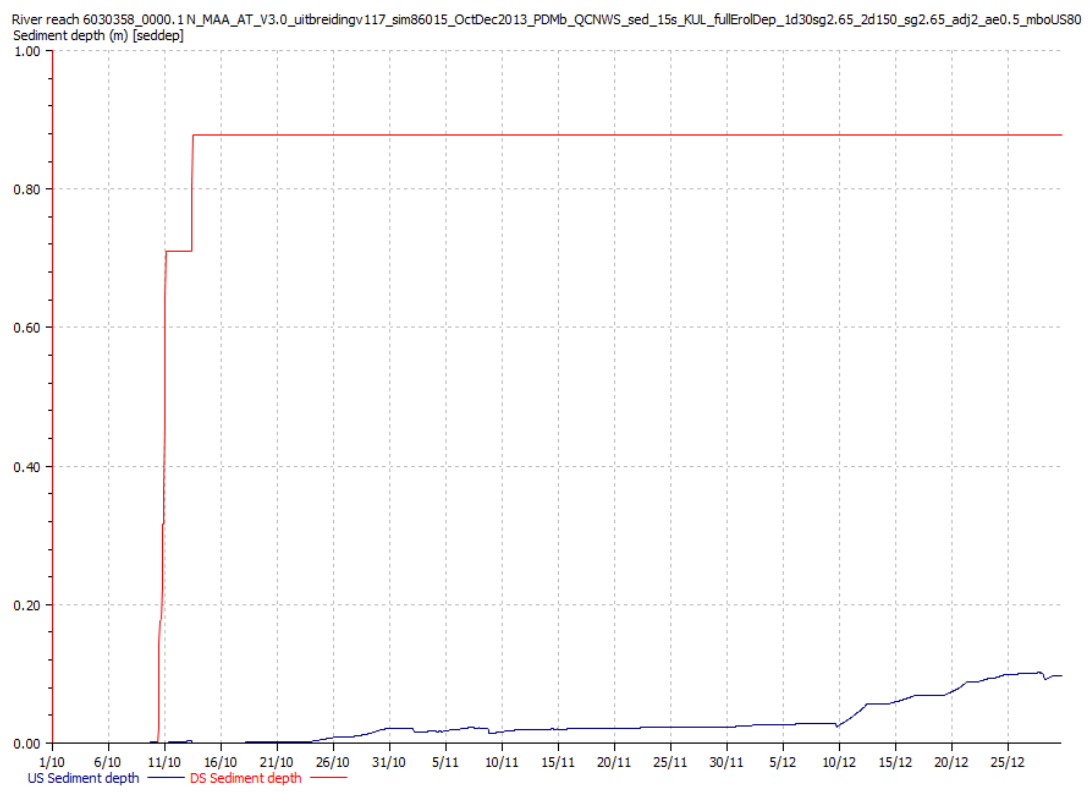
Figuur 3-28 Sedimentconcentratie op de Marie-Borrebeek te Etikhove: meting (blauw) en gesimuleerd in ICM met licht verschillende erosie/deposition limits (groen en rood) d.m.v. de KUL (boven), Ackers-White (midden) en Velikanov (onder) sedimenttransportvergelijking



Figuur 3-29 Gesimuleerde SSC SF1 en SF2 t.h.v. meetlocatie Leupegem met een initiële parameterset



Figuur 3-30 Gesimuleerde SSC SF1 en SF2 t.h.v. een opwaarts waterloopje met een initiële parameterset: het verschil in US en DS SSC SF1 duidt op een belangrijke onmiddellijke depositie van het inputmateriaal, de hoge pieken in DS SSC SF2 duiden op belangrijke erosie en mobilisatie van beddingmateriaal



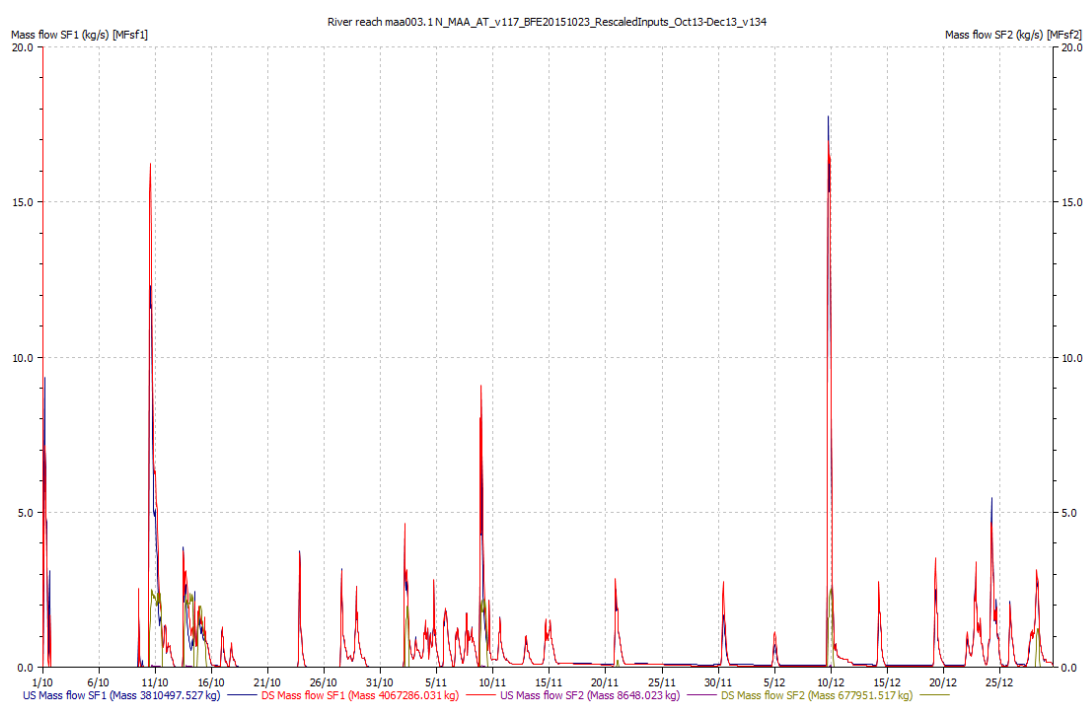
Figuur 3-31 Gesimuleerde depositie t.h.v. een opwaarts waterlooppje met een initiële parameterset: zeer grote en onmiddellijke depositie van het suspensiemateriaal (max van 0.9*Conduit depth wordt snel bereikt)

In een tweede kalibratiefase werden de opwaartse uitbreidingen voorzien van een “erosion depth limit” en een “deposition depth limit” van 0m. Daarnaast werd de “gamma erosion” van SF2 verschillende keren verhoogd om de bedding minder mobiel te maken. Aangezien 100% SF2 als beddingmateriaal niet realistisch is, werd voor alle zijlopen en voor de Maarkebeek opwaarts van de samenvloeiing met de Pauwelsbeek een verdeling 20% SF1 en 80% SF2 toegekend.

Dit leidde tot een significante verbetering in de modelresultaten. De blokkering van erosie en depositie leidde tot een realistische routing afwaarts van het inputmateriaal. Het dynamische verloop van sedimentconcentraties en –vrachten sloot goed aan bij de afvoerhydrogrammen (Figuur 3-32). De concentratie (en vracht) van het zandige beddingmateriaal (SF2) nam significant af en werd een grootteorde kleiner dan SF1 (zoals gewenst). In het algemeen werden de sedimentologische processen dus een pak realistischer gemodelleerd. Enkele processen dienden echter nog verder verfijnd te worden:

- De depositie in het netwerk is nihil, ook aan de geselecteerde locaties.
- De totale afwaartse sedimentvracht is te groot. In realiteit is de netto sedimentbalans in de Maarkebeek ongeveer nul (influx = outflux). Er is dus teveel beddingerosie die een teveel aan outflux genereert.

In een derde kalibratiefase werd een oplossing gezocht voor bovenstaande punten. De D50 van het materiaal (15µm) werd vnl. geschat o.b.v. analyses op het suspensiemateriaal op de afwaartse meetlocatie Leugegem. Er kan verondersteld worden dat het inputmateriaal in werkelijkheid grover is en dat de grovere korrels in verhouding meer bezinken. De 15µm zijn dan eigenlijk een onderschatting. In §3.3.2 werd besproken dat de bovengrens van de KGV voor Maarkebeek zich boven de 50µm bevindt. De D50 (SF1) vergroten tot 25µm leek aanvaardbaar en zal tot meer depositie leiden. Daarnaast werd getracht de erosie van de bedding te reduceren door te variëren met de “active layer” dikte, de “max erosion rate” en de KUL parameters.



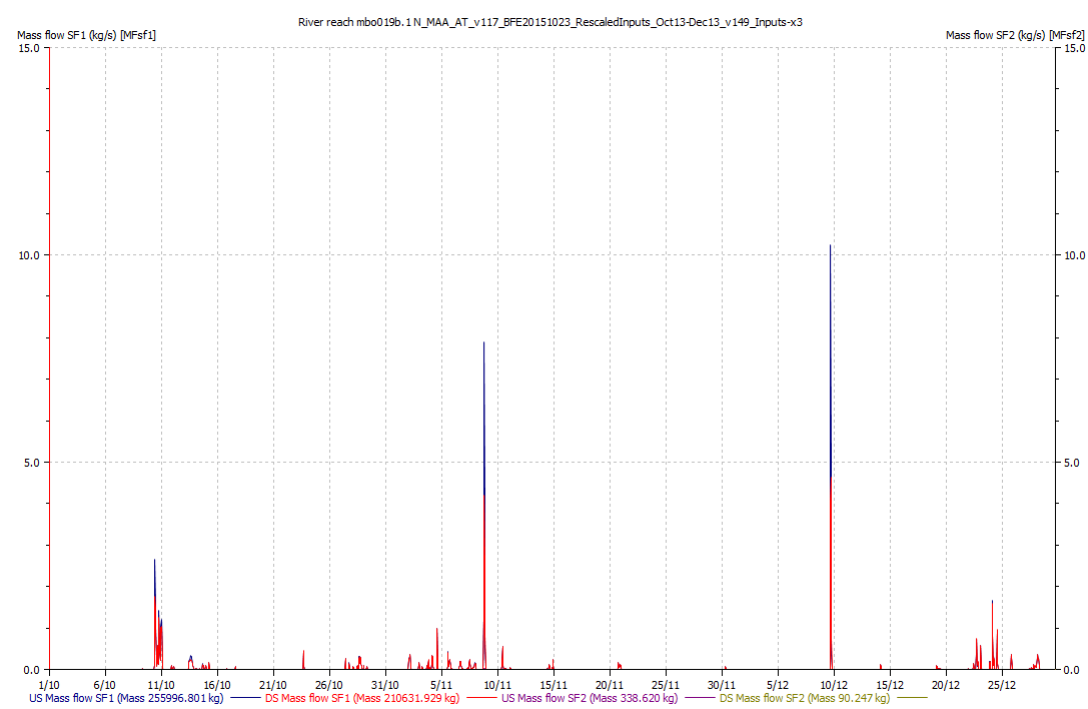
Figuur 3-32 Gesimuleerde sedimentvracht afwaarts de Maarkebeek met een parameterset uit de tweede kalibratiefase

De simulaties in de derde kalibratiefase vertoonden inderdaad meer depositie en de beddingerosie werd grondig ingeperkt, zodat de sedimentbalans voor het stroomgebied beter klopte. Echter bleek dat de gesimuleerde SSC op de meetlocaties significant lager was dan de metingen. Er werden verschillende simulaties uitgevoerd met aangepaste KUL parameters om de SSC pieken te vergroten, maar dit bleek onvoldoende. Bovendien was het belangrijk om de sedimentbalans correct te houden (IN = UIT), hetgeen de aanpassingsmogelijkheden voor de KUL parameters beperkte.

Wanneer de CNWS performantie wordt beschouwd in de kalibratie/validatieperiode 01/10/2013-31/12/2013, blijkt het CNWS model de sedimentvrachten tijdens de twee events in deze periode ruim te onderschatten, voor enkele locaties zelfs met een factor groter dan 10. Er kan dus aangenomen worden dat de gesimuleerde SSC door het ICM model te laag zijn omdat de inputconcentraties (pollutograph) te laag zijn. Er werden enkele testen uitgevoerd waarbij het drie- en vijfvoud van de inputs werd toegediend, waarbij opnieuw enkele KUL parameters werden gevarieerd. Zonder dat het dynamische gedrag van de sedimentprocessen wijzigde (dit zat immers al vrij goed) leidde dit effectief tot hogere SSC waarden.

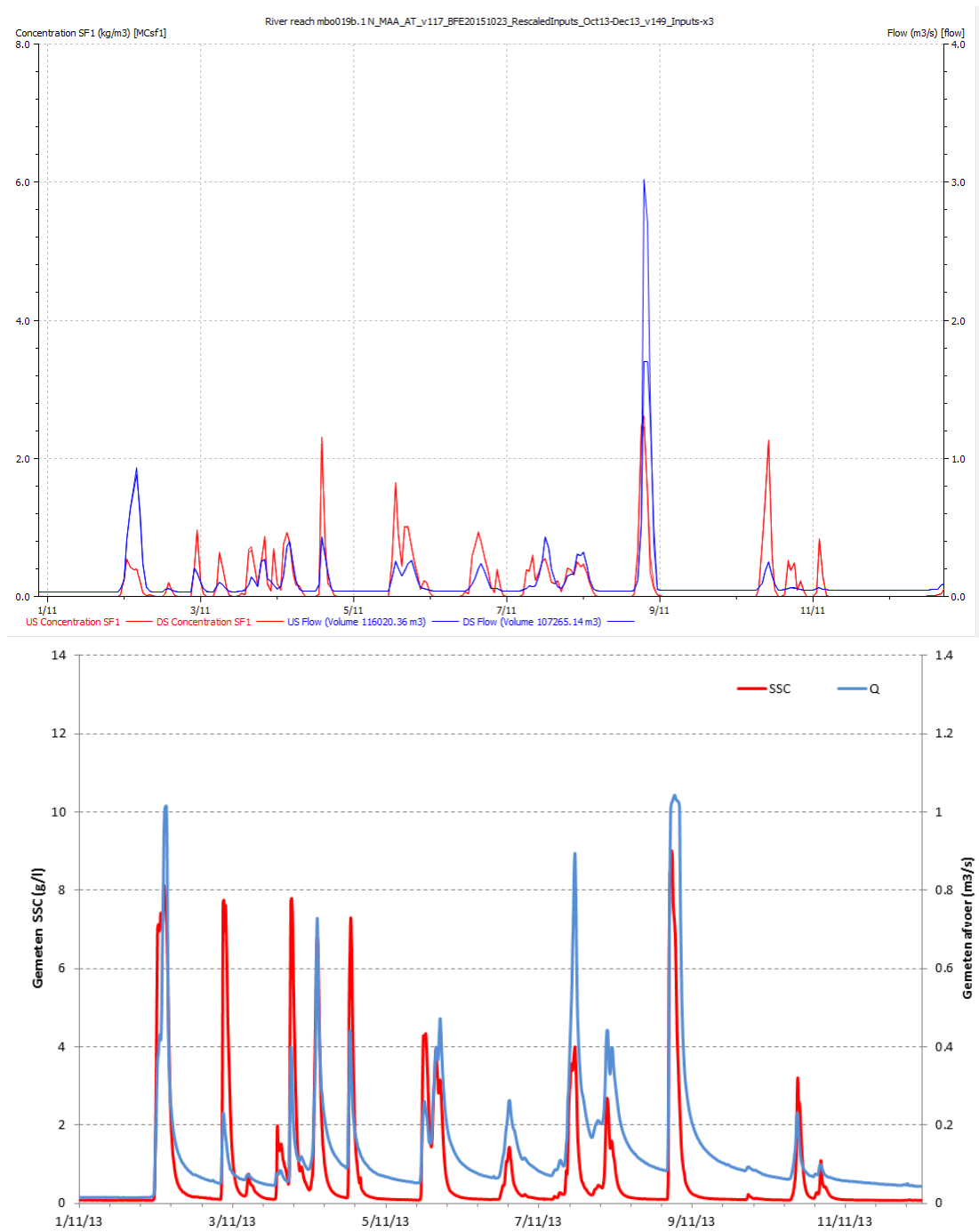
Figuur 3-33 geeft de gesimuleerde SSC weer op de Marie-Borrebeek te Etikhove met een drievoud van de originele pollutograph. Als we dit vergelijken met de metingen (*Figuur 3-16*) zien we dat de gesimuleerde SSC te laag zijn. Dit is geen gevolg van depositie: de opwaartse sedimentinput (262 192 kg) is quasi gelijk aan de sedimentvracht die het meetpunt passeert (255 997 kg). Daarnaast is het dynamische verloop van het sedigram t.o.v. het hydrogram vergelijkbaar met de metingen (*Figuur 3-34*). De gesimuleerde pieken lijken iets smaller (gevolg van de lineaire verdeling in CNWS), maar de verschillen zijn beperkt. De onderschatting van de gemodelleerde sedimentconcentraties tijdens de periode 01/10/2013-31/12/2013 is dus hoofdzakelijk een gevolg van een onderschatting van de gesimuleerde sedimentvrachten door CNWS. Het ICM model lijkt de sedimentologische processen goed te modelleren, maar kan niet voor te lage inputs compenseren.

Bij veel simulaties was zowel de sedimentconcentratie als de depositie te laag. Aanpassen van de KUL parameters leidde meestal tot verbetering van slechts één van beide variabelen. Er is een duidelijke trade-off tussen het modelleren van suspensie en depositie. Een onderschatting van beide processen terwijl de sedimentbalans en het dynamische verloop goed zit, duidt duidelijk op een tekort aan (input) sedimentmateriaal.

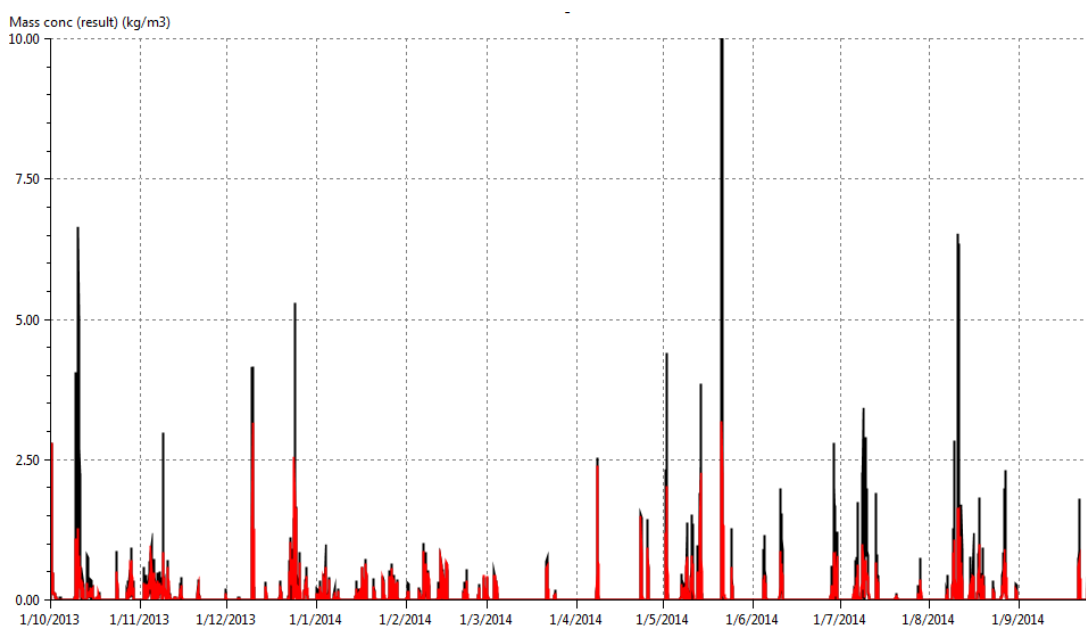


Figuur 3-33 Gesimuleerde SSC in de Marie-Borrebeek te Etikhove met een parameterset uit de derde kalibratiefase

In latere kalibratiefases werden ook simulaties uitgevoerd voor de volledige periode 01/10/2013-30/09/2014. Aangezien CNWS op jaarbasis wel een goede inschatting van de sedimentexport geeft (*Tabel 3-2*) en de zomerevents overschat worden (*Tabel 3-3*), diende in dit geval de oorspronkelijke pollutograph (CNWS output per VHA segment) opnieuw gebruikt te worden. Tevens werden deze simulaties uitgevoerd met het PDM totale debiet als input i.p.v. de combinatie CNWS runoff met PDM basisafvoer, aangezien de eerste input een betere benadering geeft van de gemeten debieten (zie §3.3.3). Het toepassen van het PDM totale debiet leidde tot iets betere resultaten m.b.t. totale afwaartse sedimentvrucht en depositie in de geselecteerde locaties. Daarnaast sloten de gesimuleerde SSC ook beter aan bij de metingen. Een verbetering van de kwaliteit van de input (debiet) data leidde dus duidelijk tot een verbetering in modelresultaten.



Figuur 3-34 Afvoer en SSC in de Marie-Borrebeek te Etikhove: gemeten (onder) en gesimuleerd met een drievoud van de oorspronkelijke pollutograph (boven)



Figuur 3-35 Gesimuleerde SSC in de Maarkebeek te Leupegem met het PDM totaal debiet als input per VHA segment (zwart) en de combinatie CNWS runoff met PDM basisafvoer als input per VHA segment (rood)

3.3.5 Finale STM Maarkebeek

3.3.5.1 Modelparameters

Tabel 3-5 geeft de finale parameterset voor het ICM sedimentmodel Maarkebeek. Dit finale model maakt gebruik van de PDM totale debieten als input.

Tabel 3-5 Finale parameterset voor het ICM sedimenttransportmodel Maarkebeek.

Parameter	Waarde
D50 SF1	0.025
Specific gravity SF1	2.6
1D settling velocity SF1	/
KUL alpha deposition SF1	1
KUL beta deposition SF1	1
KUL gamma deposition SF1	0.5
KUL alpha erosion SF1	0.5
KUL beta erosion SF1	1
KUL gamma erosion SF1	5
D50 SF2	0.15
Specific gravity SF2	2.6
1D settling velocity SF2	/
KUL alpha deposition SF2	1
KUL beta deposition SF2	1
KUL gamma deposition SF2	0.25
KUL alpha erosion SF2	0.5
KUL beta erosion SF2	1
KUL gamma erosion SF2	7
US/DS Sediment grading	Afwaarts Maarkebeek-Pauwelsbeek: 100% SF2

Zijlopen + opwaarts Pauwelsbeek: 80% SF2 + 20% SF1	
Active layer depth	0.0002
Erosion depth limit	Opwaartse uitbreiding: 0 Elders: 0.5
Deposition limit	Opwaartse uitbreiding: 0 Elders: /
Max erosion rate	0.1
Max deposition rate	/

3.3.5.2 Sedimenttransport

De sediment outflux uit het stroomgebied bedraagt 5813 ton. Dit is zeer gelijkaardig aan de totale input, i.e. 5902 ton, wat realistisch is voor de Maarkebeek. Er is immers relatief weinig depositie en erosie van de bedding in dit stroomgebied. Dit betekent niet dat er 5902-5813=89 ton inputmateriaal als depositie in de Maarkebeek achterblijft. Het model simuleert immers ook (zeer beperkt) beddingerosie en reallocatie van dit materiaal binnenin het stroomgebied.

Tabel 3-6 bevat de gemeten en gesimuleerde sedimentvrachten t.h.v. de meetlocaties alsook de model input die wordt toegevoegd opwaarts ervan (CNWS output). Zoals in §3.3.3 reeds besproken, voorspelt CNWS de gemeten sedimentvracht op jaarbasis goed te Leupegem, maar zijn er significante verschillen voor de meer opwaartse locaties (onderschatting voor deze periode). De gesimuleerde sedimentvracht moet dus eerder met de totale input dan met de gemeten sedimentvracht vergeleken worden. Als er te weinig (of teveel) sediment aan het model wordt toegevoegd, kan de gesimuleerde sedimentvracht immers niet correct zijn. Voor de meetlocaties in de opwaartse uitbreidingen, Donderij en Broekbeek, is de input gelijk aan het modelresultaat aangezien er in deze vereenvoudigde zijtakken geen erosie of depositie wordt gemodelleerd (hetgeen strookt met de realiteit). Te Etikhove is de gesimuleerde vracht iets lager dan de totale input. De sediment aanvoer wordt dus grotendeels getransporteerd, zoals in de realiteit, terwijl er een miniem aandeel bezinkt langsheen de Marie-Borrebeek (gesimuleerde depositie nihil) en een deel in suspensie blijft in de aanwezige watermassa. Te Leupegem is de gesimuleerde vracht iets hoger dan de input. Opwaarts van Leupegem wordt er dus wat beddingerosie gesimuleerd die extra sediment genereert. Dit sediment bezinkt verder afwaarts in enkele depositiezones (zie §3.3.5.3) zodat ook de sedimentbalans aan het uitstroompunt in de Schelde klopt (zie boven).

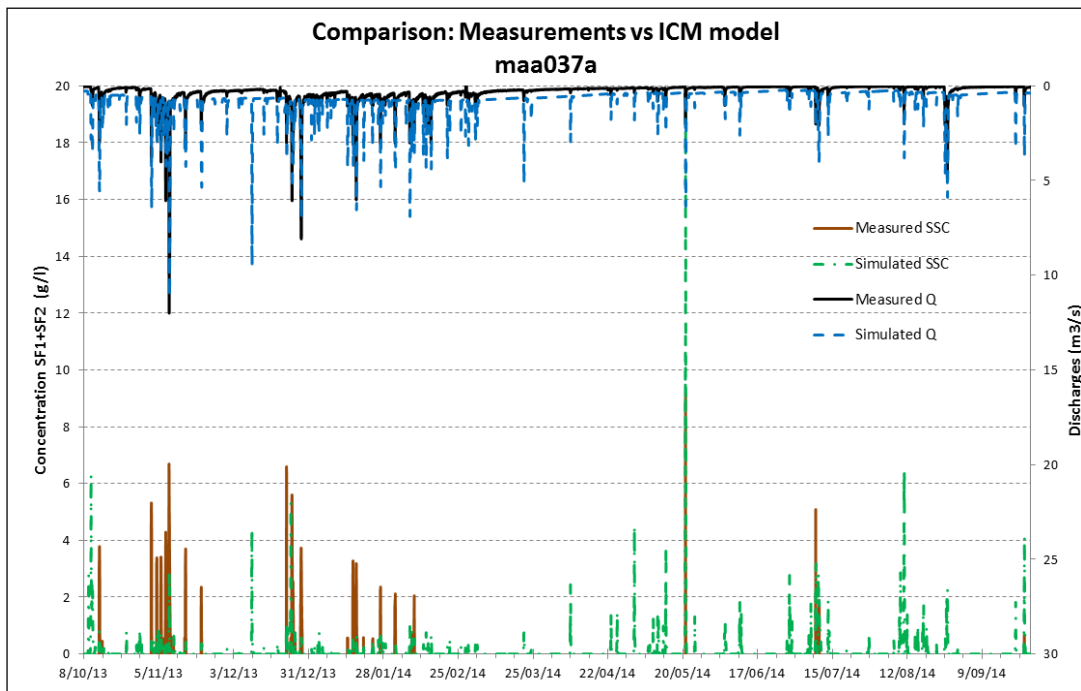
***Tabel 3-6* Sedimentvracht voor de periode 01/10/2013-30/09/2014 op de meetlocaties in de Maarkebeek: gemeten door het VMM Sedimentmeetnet, gesommeerde opwaartse model input (= CNWS output) en gesimuleerd met het ICM model.**

Meetlocatie	Sedimentvracht uit metingen (ton)	Sedimentvracht model input (CNWS) (ton)	Sedimentvracht modelresultaat (ton)
Leupegem - Maarkebeek	5918	5902	5813
Etikhove - Marie-Borrebeek	927	338	327
Maarke-Kerkem - Broekbeek	247	89	89
Nukerke - Donderij	1263	977	977

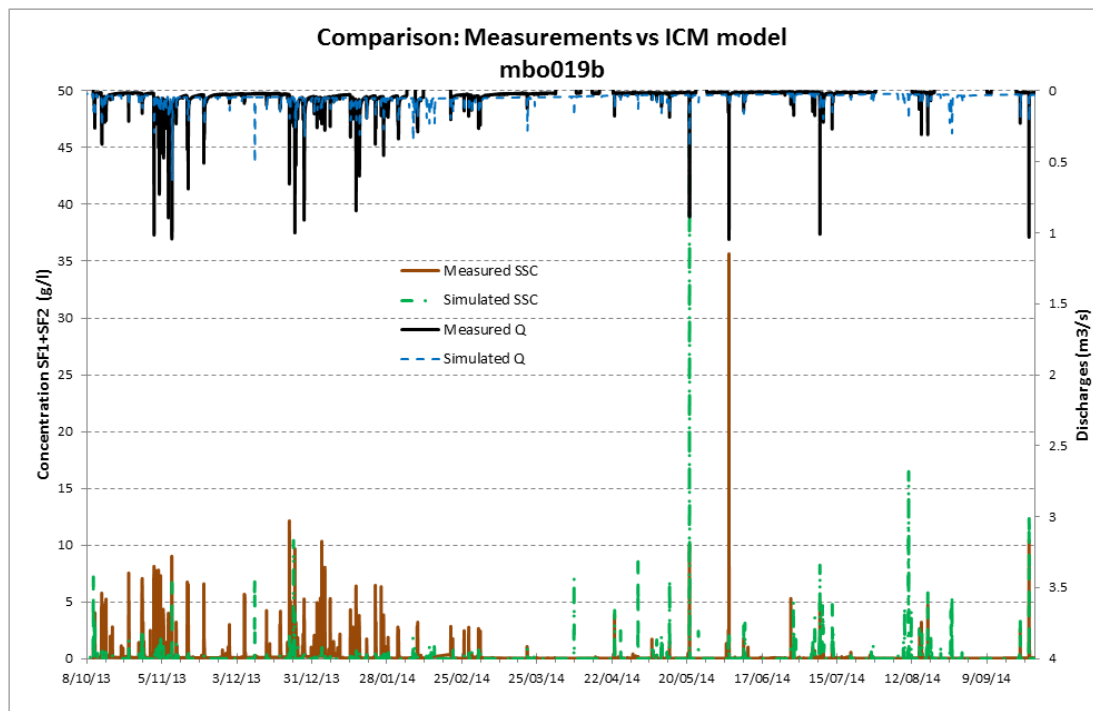
Zoals reeds besproken is er in de opwaartse uitbreidingen geen erosie of depositie, hetgeen nauw aansluit bij de realiteit.

Figuur 3-36 tot Figuur 3-38 geven de gemeten en gesimuleerde afvoeren en SSC weer voor de meetlocaties in de Maarkebeek:

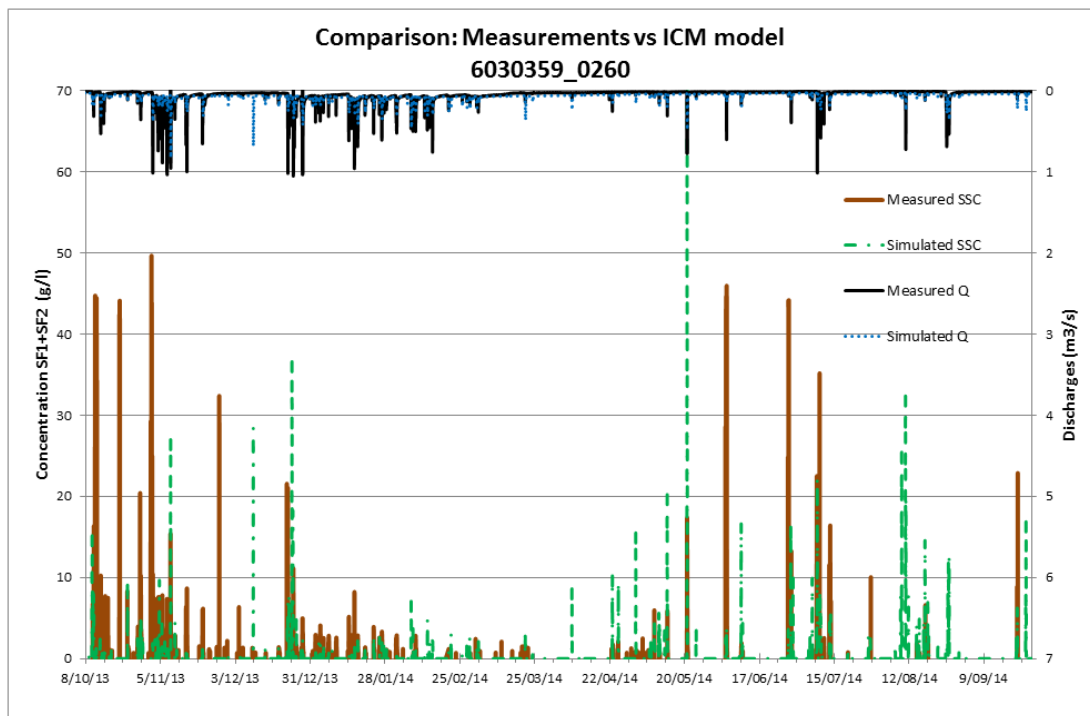
- Maarkebeek te Leupegem: als meest afwaartse meetlocatie geeft deze vergelijking in principe een soort samenvatting van de performantie van het ICM sedimentmodel Maarkebeek. De afvoer wordt vrij goed gemodelleerd, maar geregeld is de gesimuleerde afvoerpiek groter dan de overeenkomstige meting. Op deze momenten wordt ook de SSC door het model overschat. Hoewel de algemene sedimentbalans voor de totale periode mooi klopt (zie boven), zijn in het algemeen de gesimuleerde SSC in de winter te laag en de zomer te hoog. Men dient de grote onzekerheid op de gemeten SSC in rekening te brengen, maar de trend is duidelijk. Dit is een gevolg van de onderschatting resp. overschatting van de sedimentvracht door het CNWS model in deze periodes (zie §3.3.3 en §3.3.4). De jaarlijkse sedimentvracht wordt door CNWS goed voorspeld, maar in de winter is er duidelijk een onderschatting en vice versa voor de zomer. Dit leidt onvermijdelijk tot een onder- resp. overschatting van de SSC in het ICM model. Het dynamische verloop van de SSC pieken en de grootteordes zitten goed, maar in absolute termen lijden de gesimuleerde SSC aan de beperkingen in inputkwaliteit.
- Marie-Borrebeek te Etikhove en Donderij te Nukerke: de observaties voor deze locaties zijn analoog dan voor Leupegem in termen van SSC. Het afvoerdebiet wordt echter significant onderschat. De onderschatting van de CNWS sedimentvracht is bovendien groter dan te Leupegem in de winter en zet zich zelfs op jaarbasis door, terwijl ook voor de zomerevents de SL werd overschat. Dit alles leidt tot een onderschatting (sterker dan te Leupegem) van de gesimuleerde SSC in de winterperiode en in het algemeen een overschatting in de zomerperiode (minder sterk dan te Leupegem). Voor enkele zomerevents wordt de SSC overschat in de Donderij, hetgeen opnieuw een direct gevolg is van een overschatting door CNWS voor deze events (Tabel 3-2). Ook hier geldt de conclusie dat het model goed presteert in algemene termen, maar dat de (momentane) prestatie in belangrijke mate beperkt wordt door de kwaliteit van de input data (CNWS).
- Broekbeek te Maarke-Kerkem: de gesimuleerde afvoer overschat de metingen. De gesimuleerde SSC onderschat aanzienlijk de metingen, hoewel de SL door CNWS voor dit waterloopje werd overschat (Tabel 3-2). Dit kan gedeeltelijk verklaard worden door een verdunning van de SSC door de overschatting in afvoer. Doch presteert het ICM model hier duidelijk minder goed. Het stroomgebiedje van de Broekbeek is zeer klein, i.e. ongeveer 300 ha of 5% van het stroomgebied van de Maarkebeek. Bovendien is deze waterloop volledig geconfigureerd als een opwaartse uitbreiding, met sterk vereenvoudigde geometrie. De resultaten voor dit gebied zijn dus van gering belang en minder betrouwbaar. Het is dan ook niet zinvol om op basis van dit stukje waterloop de ICM parameters aan te passen.



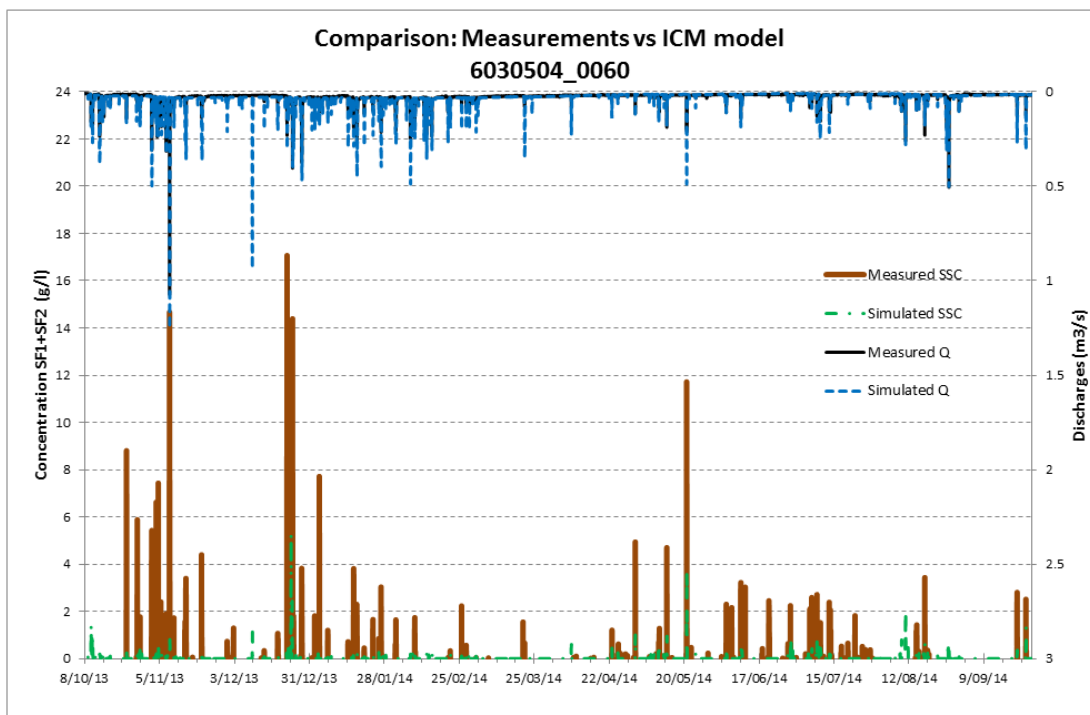
Figuur 3-36 Gesimuleerde (finaal model) en gemeten afvoer en SSC in de Maarkebeek te Leupegem



Figuur 3-37 Gesimuleerde (finaal model) en gemeten afvoer en SSC in de Marie-Borrebeek te Etikhove



Figuur 3-38 Gesimuleerde (finaal model) en gemeten afvoer en SSC in de Donderij te Nukerke



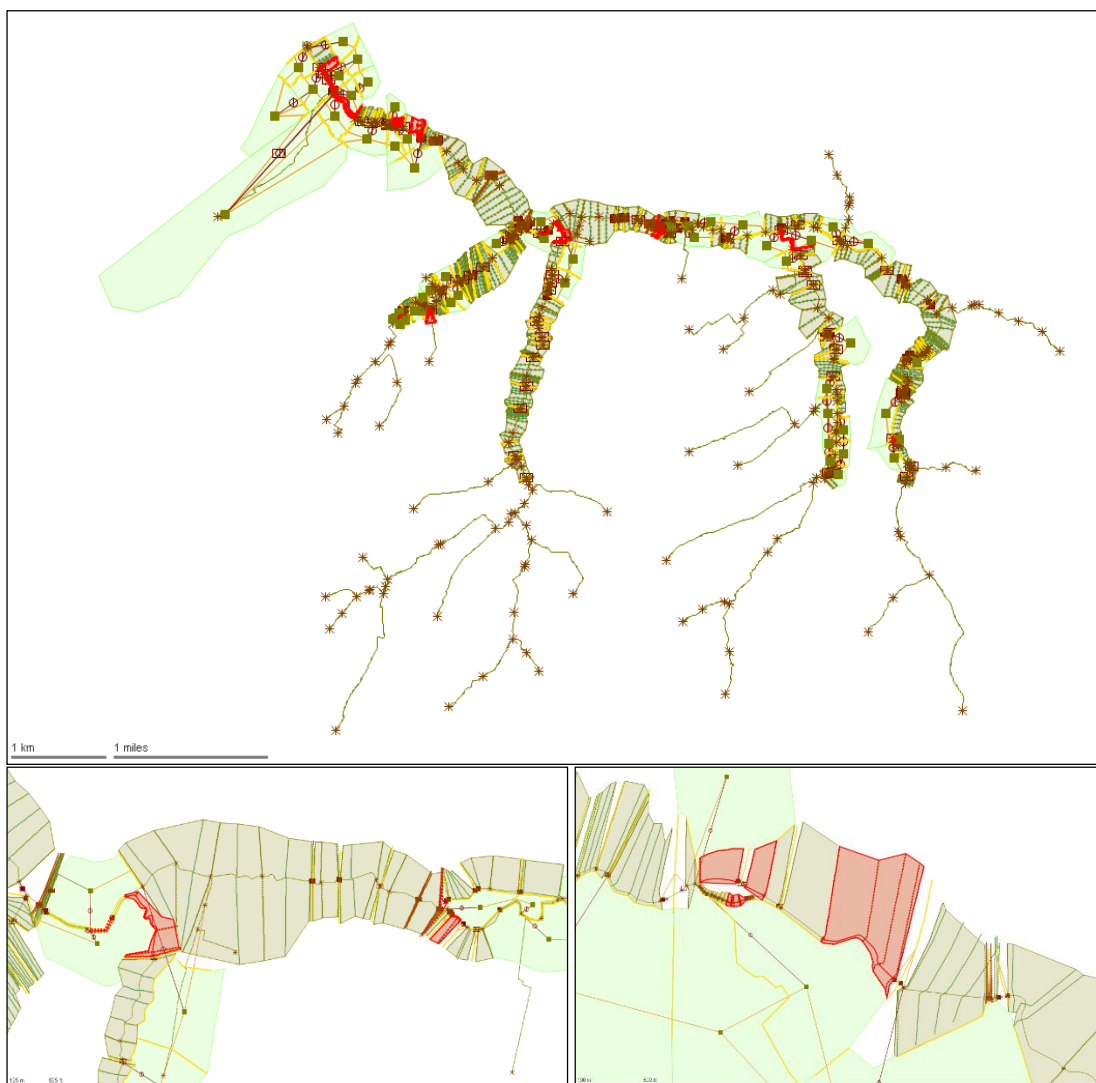
Figuur 3-39 Gesimuleerde (finaal model) en gemeten afvoer en SSC in de Broekbeek te Maarke-Kerkem

3.3.5.3 Depositie

Figuur 3-40 geeft de zones weer waarin het finale ICM model depositie simuleert. Het betreft vnl. enkele zones op de benedenloop van de Maarkebeek. In de kleine opwaartse zones die op de figuur zijn aangeduid, is de depositie vrijwel nihil (milimeters). De belangrijkste gesimuleerde zones met depositie zijn:

- Woelkom Borgtmolen
- Op- en afwaarts de Nonnemolen
- Vistrap Nonnemolen
- Bocht in Maarkebeek 200m opwaarts Nonnemolen
- Zone tussen monding Maarkebeek in Schelde en Nonnemolen
- Afwaarts Gansbeekstraat (bij monding Nederaalbeek in Maarkebeek)

Bovenstaande zones zijn eveneens de zones die geselecteerd werden als depositiezones tijdens de metingen door ARW en de terreinbezoeken. In de vistrap en de bocht opwaarts de Nonnemolen was het onmogelijk om repetitieve metingen uit te voeren, maar ook het model herkent deze zones duidelijk als depositiezones.



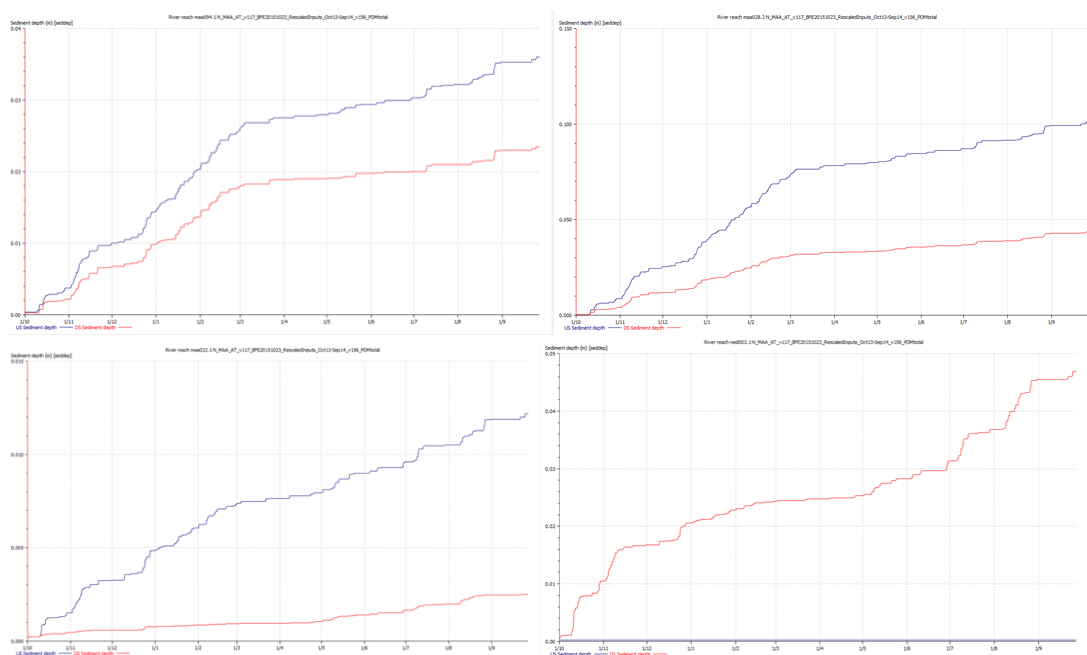
Figuur 3-40 Gesimuleerde zones met depositie met het finale ICM Maarkebeek: algemeen (boven), zone Borgtmolen-Gansbeekstraat (onder-links) en zone Nonnemolen (onder-rechts)

In de “river reach results table” kan per river reach de “average sediment depth at the end of the simulation” opgevraagd worden (*Figuur 3-41*). Aangezien we een volledig jaar simuleren, zou dit dus de gemiddelde jaarlijkse depositie per river reach moeten geven. Doch, ICM lost een massabalans op en gaat de bezinkende massa per modelknoop (dwarssectie) en per tijdstap uniform verdelen over de volledige breedte van het dwarsprofiel. Dit is uiteraard alleen realistisch wanneer de dwarssecties enkel het natte gedeelte van het dwarsprofiel weergeven. Dat is echter niet het geval. De natte sectie is immers variabel in de tijd en daarenboven zijn veel dwarsprofielen als uitgebreide dwarssecties gemodelleerd, waarbij deze naast de zomer- en winterbedding ook de aangrenzende (overstromings-)gebieden bevatten. De weergegeven sedimenthoogte is in dergelijke gevallen duidelijk een onderschatting van de hoogte die zou gesimuleerd worden wanneer de depositie zich beperkt tot de natte doorsnede. Deze beperking van het model werd doorgegeven aan Innovyze om te optimaliseren in toekomstige versies.

01/10/2013 00:00:00		Average sediment depth at start of initialisation (m)	Average sediment depth at end of simulation (m)	Surcharge state	Total mass of SF1 at start of initialisation (kg)	Total mass of SF1 at end of initialisation (kg)	Total mass of SF1 at end of simulation (kg)
	US node ID						
	vis03d	0.000	0.439	0.58	0.00	0.00	4.76
	vis04d	0.000	0.228	0.48	0.00	0.00	0.00
	maa026a	0.000	0.222	0.60	0.00	0.00	5.16
	maa014	0.000	0.096	0.23	0.00	0.00	286.05
	maa028	0.000	0.071	0.25	0.00	0.00	169.58
	maa094	0.000	0.051	0.11	0.00	0.00	62.22
	maa062a	0.000	0.009	0.46	0.00	0.00	94.11
	ned003	0.000	0.008	0.24	0.00	0.00	465.45
	maa022	0.000	0.006	0.29	0.00	0.00	840.67
	maa033a	0.000	0.004	0.28	0.00	0.00	1.59
	maa192f	0.000	0.004	0.20	0.00	0.00	133.95
	mbc025e	0.000	0.004	0.08	0.00	0.00	892.54
	maa007	0.000	0.003	0.44	0.00	0.00	49.46
	maa009	0.000	0.001	0.48	0.00	0.00	40.86
	pau005	0.000	0.001	0.21	0.00	0.00	695.74
	maa005	0.000	0.001	0.41	0.00	0.00	1362.82
	maa084a	0.000	0.001	0.11	0.00	0.00	88.42
	mbc031a	0.000	0.001	0.19	0.00	0.00	24.25
	maa002a	0.000	0.000	2.00	0.00	0.00	4.45
	maa003	0.000	0.000	0.38	0.00	0.00	122.30
	maa016	0.000	0.000	0.26	0.00	0.00	0.00
	maa017	0.000	0.000	0.16	0.00	0.00	0.00
	maa017a	0.000	0.000	0.16	0.00	0.00	0.00
	maa017f	0.000	0.000	0.16	0.00	0.00	0.00
	maa018a	0.000	0.000	0.18	0.00	0.00	0.00
	maa018c	0.000	0.000	0.18	0.00	0.00	0.00
	maa019	0.000	0.000	0.19	0.00	0.00	0.00
	maa028	0.000	0.000	0.25	0.00	0.00	0.00

Figuur 3-41 River reach results table met average sediment depth at the end of the simulation (in m) gesimuleerd met het finale ICM sedimentmodel Maarkebeek

Toch is bovenvermelde tabel zeker een hulpvolle tool om de zones te selecteren waar depositie wordt gesimuleerd. Via de “river reach graph – sediment depth” tool kunnen dan de depositiezones verder in detail bekeken worden a.d.h.v. de depositie aan op- en afwaartse zijde van de reach (*Figuur 3-42*). Dit is opnieuw een vereenvoudigde weergave. Enkel voor korte reaches, waar het dynamische gedrag van stroming en sediment weinig varieert in de lengterichting en waar bovendien de dwarsprofielen hoofdzakelijk de natte sectie omvatten, zijn deze plots een juiste weergave van de gesimuleerde depositie.



Figuur 3-42 River reach sediment depth (US=opwaarts en DS=afwaarts) gesimuleerd met het finale ICM sedimentmodel Maarkebeek voor de woelkom Borgtmolen (boven-links), opwaarts Nonnemolen (boven-rechts), afwaarts Nonnemolen (onder-links) en afwaarts Gansbeekstraat (onder-rechts)

Een juistere benadering is echter om de massabalans m.b.t. depositie te analyseren voor elke depositiezone. Dit kan op twee manieren:

- Grafiek/tabel per sectie van “mass in deposited layer” voor SF1 en SF2: door de waarde van deze variabele op de laatste tijdstap van de simulatie na te gaan, bekomt men de massa sediment (voor SF1 en SF2) die voor deze dwarssectie als depositie na 1 jaar wordt berekend.
- Grafiek per reach van de “mass flow” voor SF1 en SF2: hiermee bekomt men het dynamische verloop van de massa sediment die opwaarts in en afwaarts uit elke river reach stroomt, alsook het jaartotaal. Door de US mass flow te verminderen met de DS mass flow bekomt men de massa die als depositie na 1 jaar in de river reach achterblijft.

Beide methodes leiden tot hetzelfde resultaat. De eerste methode werkt op sectieniveau en laat daarom toe om de analyse iets meer in detail uit te voeren. Vooral in grote reaches kan dit nuttig zijn aangezien de depositie mogelijks verschillend is langsheen de reach. Analyse per sectie is wel arbeidsintensiever, hetgeen ook de onzekerheid door assumpties vergroot. De depositiezones in de Maarkebeek zijn gemodelleerd als korte reaches, vaak met slechts een sectie op- en afwaarts. De tweede methode is dan ook de aangewezen methode voor deze zones.

Vervolgens kan o.b.v. een schatting van de dichtheid van het depositiemateriaal het volume aan depositie berekend worden. Tijdens het Waterbodemonderzoek uitgevoerd door OVAM in 2013 werd de dichtheid bepaald op drie locaties in de woelkom van de Borgtmolen. Dit leidde tot een dichtheidswaarde van 1573 kg/m³. Door de oppervlakte van de beschouwde zone in rekening te brengen kan dan tenslotte dit volume omgerekend worden naar een schatting van de depositiehoogte.

Het spreekt voor zich dat er een bepaalde onzekerheid met deze methode verbonden is. De inschatting van de natte oppervlakte is niet eenvoudig o.b.v. enkele dwarsprofielen. Zeker voor relatief grote river reaches (vb. zone Gansbeekstraat) met variabele dwarsprofielen is dit geen sinecure. Daarnaast is het waterpeil niet constant, zodat de natte oppervlakte continu wijzigt in de tijd. Voor de zones bij de Borgt- en Nonnemolen zijn de reaches kort en de natte sectie relatief constant, waardoor de inschatting van de totale natte oppervlakte wel betrouwbaar kan uitgevoerd worden. Tenslotte is de schatting van de dichtheid wegens het zeer beperkte aantal data hierover een bron van onzekerheid.

Toch is bovenstaande methode een zinvolle aanvulling bij *Figuur 3-41* en *Figuur 3-42* aangezien een realistischer beeld van de depositiehoogte kan gevormd worden. Bovenstaande beschrijving van de onzekerheid in de analyse duidt aan dat enige voorzichtigheid bij interpretatie van de resultaten geboden is. De gesimuleerde depositiehoogtes dienen als dusdanig met metingen vergeleken te worden: het model moet de juiste grootteordes (en locaties) van aanslibbing reproduceren (en voorspellen), maar het is niet zinvol om de exacte absolute waarden te beschouwen. *Tabel 3-7* geeft het resultaat weer op de geselecteerde depositiezones in de Maarkebeek voor de gesimuleerde periode.

Tabel 3-7 Gesimuleerde en gemeten depositie op geselecteerde locaties in de Maarkebeek.

Locatie	Netto depositie	Netto depositie	Schatting gemiddelde natte oppervlakte	Hoogte depositie	Gemeten depositie
	Okt'2013-Sep'2014	Okt'2013-Sep'2014		Okt'2013-Sep'2014	13/11/2013-06/01/2015
	[ton]	[m ³]	[m ²]	[cm]	[cm]
Borgtmolen*	SF1: 4 SF2: 46	32	160	20	20
Nonnemolen opwaarts	SF1: 24 SF2: 163	119	330	36	20
Nonnemolen afwaarts	SF1: 31 SF2: 26	36	300	12	10
Gansbeekstraat	SF1: 68 SF2: 1	44	1750	2.5	30
Kasteelmolen	0	0	/	0	10

* zie verder voor detailanalyse

Aan de Borgtmolen is de gesimuleerde depositiehoogte gelijk aan de meting op jaarbasis. Dit is een uitstekend en belangrijk resultaat, aangezien deze locatie de belangrijkste aanslibbingszone van het stroomgebied is (zie §3.3.1). Ook afwaarts de Nonnemolen is er een grote overeenkomst tussen de gemeten en gesimuleerde depositiehoogte.

Opwaarts van de Nonnemolen wordt de gemeten grootteorde van depositiehoogte gereproduceerd door het model (tientallen cm) maar lijkt het model de depositie wat te overschatten. *Figuur 3-44* toont dat deze zone met lage stroomsnelheden (beperkte doorvoer naar Nonnemolen) een aanzienlijk sedimentpakket aan de rechterzijde bevat. Dit pakket is dynamisch (getuige het ontbreken van vegetatie), wat geïllustreerd wordt in *Figuur 3-43*: de event van begin november 2013 veroorzaakt vnl. ongeveer 20cm erosie van het aanwezige sediment, behalve uiterst rechts is er aanwas bovenop het bestaande pakket. Meer dan een jaar later (6/01/2015) lijkt er ongeveer 20cm depositie bijgekomen, maar het is zeer aannemelijk dat er eerder een opvolging van erosie en depositie plaatsvond doorheen de tijd. De modelsimulatie stopt op 30/09/2013 terwijl de uitpeiling plaatsvond op 6/01/2015. Tijdens de drie tussenliggende maanden deden zich enkele kleine en twee middelgrote events voor op de Maarkebeek (*Figuur 3-45*). Hierdoor kunnen we voor deze locatie het modelresultaat en de meting dus niet zomaar vergelijken.

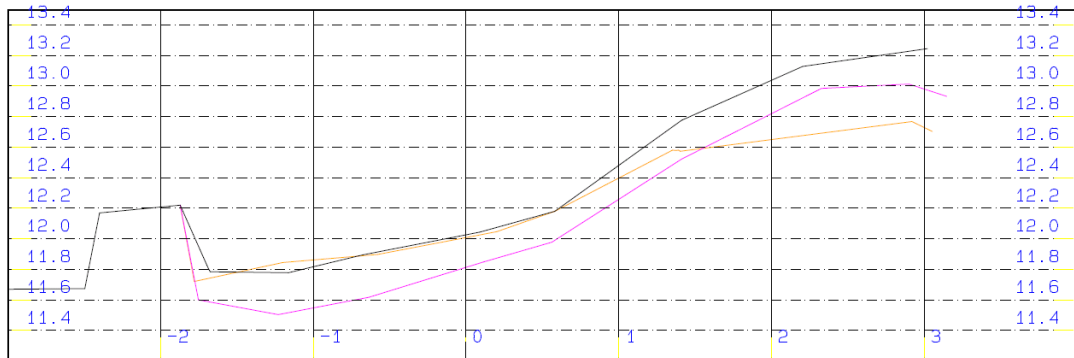
Aanslibbing Maarkebeek Nonnemolen opwaarts jan 2015

As 3m

Horizontal scale = 1 : 25
Vertical scale = 1 : 25

Centerline coordinates:
E = 96234.44 m
N = 168834.00 m

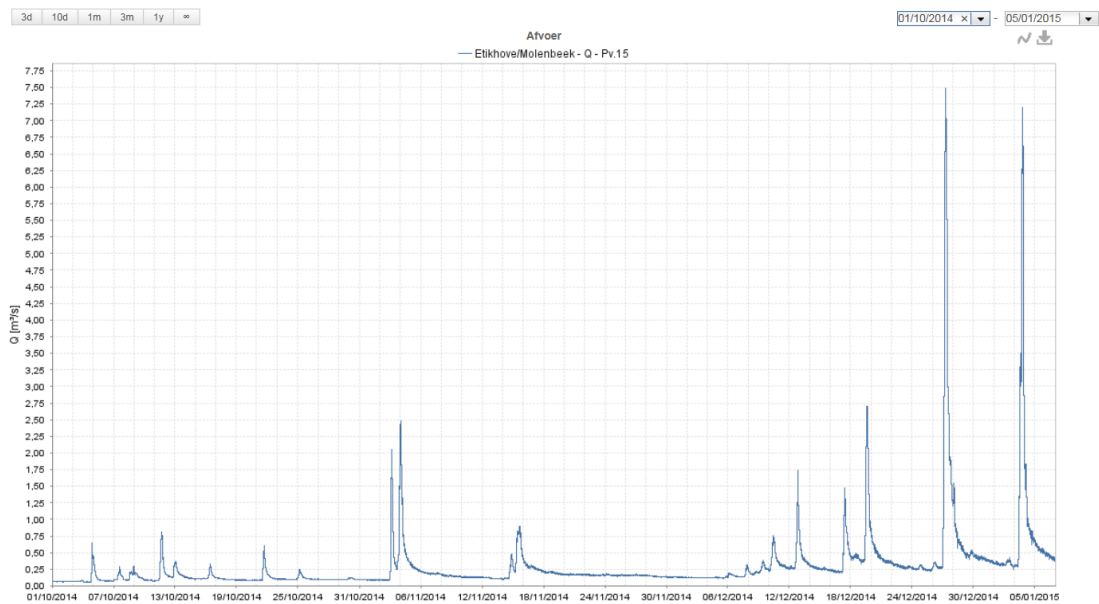
— = TOPSLIB
— = UITPEILING3
— = UITPEILING5
— = VASTEBODEM



Figuur 3-43 Dwarsprofiel van depositiezone opwaarts de Nonnemolen: 17/10/2013 (oranje), 13/11/2013 (roze) en 06/01/2015 (zwart)



Figuur 3-44 Depositiezone opwaarts de Nonnemolen met depositie aan rechterzijde



Figuur 3-45 Gemeten debiet op de Maarkebeek te Leupegem, 1/10/2014-06/01/2015 (bron: Waterinfo.be)

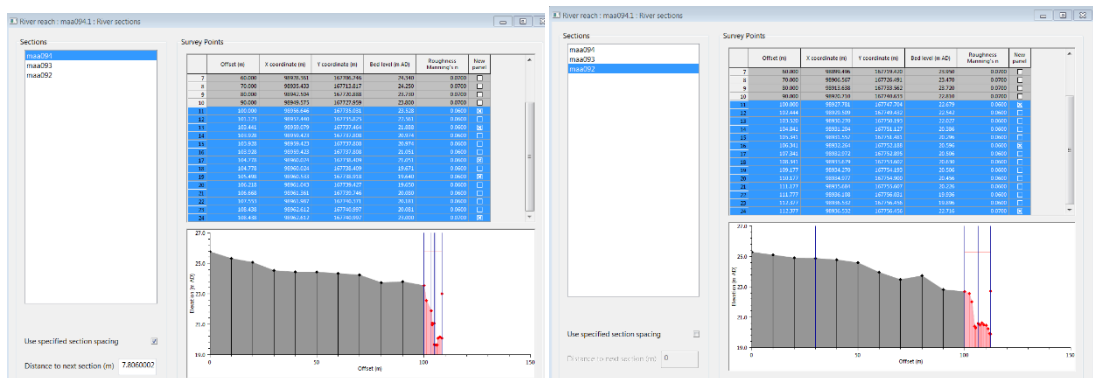
Voor de Gansbeekstraat en de Kasteelmolen onderschat het model de gemeten depositie. De depositiezone Gansbeekstraat is een lange zone in het model met sterk verschillende dwarsprofielen. Het was dan ook moeilijk om hier de natte oppervlakte voor de river reach te bepalen in bovenstaande analyse. De eerste berekeningsmethode (analyse per sectie) en [Figuur 3-42](#) tonen dat de depositie zich vnl. beperkt tot het afwaartse deel van de reach. Een herberekening voor de Gansbeekstraat volgens de eerste methode geeft voor het afwaartse deel een depositiehoogte van ongeveer 10cm (i.p.v. 2.5 cm voor de volledige reach met de tweede methode). Dit komt beter overeen met de metingen, maar lijkt nog steeds een onderschatting. Er dient natuurlijk rekening gehouden te worden met de beperkte modelperformantie t.g.v. matige inputkwaliteit zoals eerder besproken. Als het sedimenttransport niet correct gemodelleerd wordt, heeft dit uiteraard ook een effect op de modelperformantie in termen van depositie. Zoals eerder besproken presteert het model relatief goed in het afwaartse gedeelte van de Maarkebeek. Voor de afwaartse depositiezones (Nonnemolen, Borgtmolen) zijn de resultaten ook vrij goed. Meer opwaarts is de modelperformantie lager, wat duidelijk ook een effect heeft op de meer opwaartse depositiezones, Gansbeekstraat en Kasteelmolen. Daarnaast moet ook rekening gehouden worden met de geometrie van het rivierennetwerk. Het Maarkebeek IWRS model is opgebouwd met topografische metingen uit 2000 en 2009. Het is dus best mogelijk dat de geometrie van de zones Gansbeekstraat en Kasteelmolen niet meer zo accuraat is, waardoor het gesimuleerde hydrodynamische gedrag er niet meer volledig strookt met de realiteit en deze zones daarom in het model te weinig fungeren als "sedimentvang". Dat de geometrie van het rivierennetwerk een belangrijke invloed heeft op de gesimuleerde depositie wordt aangetoond door de hierna volgende analyse.

Vervolgens werd een gedetailleerde analyse uitgevoerd in de woelkom van de Borgtmolen, de belangrijkste depositiezone in de Maarkebeek. In mei 2013 werd er 110 m³ aanslibbing afgegraven en in juli 2014 71 m³. Er werd getracht om dit te reproduceren met het ICM sedimentmodel. [Figuur 3-46](#) illustreert hoe sterk de geometrie van deze zone wijzigt, binnen de periode van één jaar. Op 23/03/2013 is er een groot sedimentpakket waarneembaar op aan linkeroever. Dit is enkele maanden later verdwenen t.g.v. de baggerwerken mei 2013. Eind 2013 wordt er opnieuw een aanzienlijke aanslibbing vastgesteld, dat begin 2014 nog verder is aangegroeid.

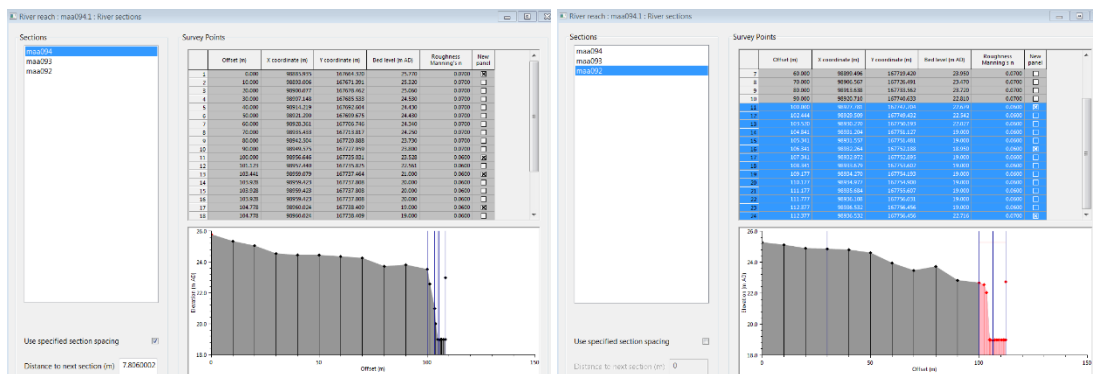
De natte oppervlakte van de woelkom aan de Borgtmolen bedraagt ongeveer 160 m². Een afgraving van 110 m³ in mei 2013 betekende dus een gemiddelde verlaging van de bedding met 1.5 m. [Figuur 3-47](#) en [Figuur 3-48](#) tonen hoe dit in het model werd geïmplementeerd (verlaging bedding tot 19 mTAW).



Figuur 3-46 Variabele geometrie van de woelkom aan de Borgmolen: 26/03/2013 (linksboven) en 03/06/2013 (rechtsboven), 27/12/2013 (linksonder) en 05/02/2014 (rechtsonder)



Figuur 3-47 Op- en afwaarts dwarsprofiel van de woelkom aan de Borgmolen



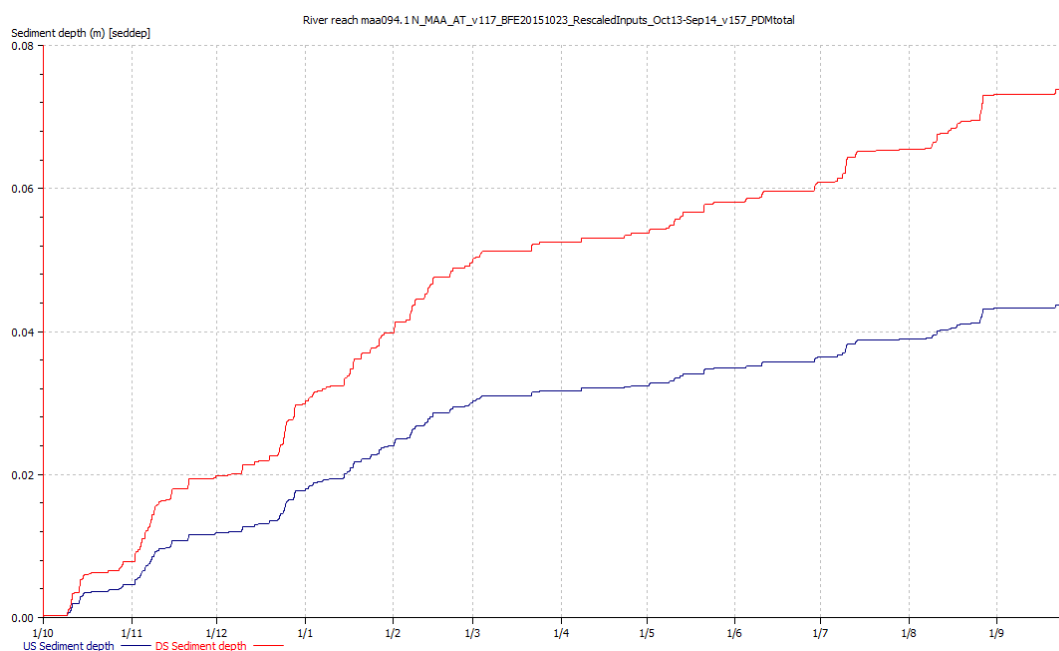
Figuur 3-48 Op- en afwaarts dwarsprofiel van de woelkom aan de Borgmolen, met 1.5m verlaagde bedding

Figuur 3-49 geeft de “river reach sediment depth” weer in de woekom aan de Borgtmolen, gesimuleerd voor 1/10/2013-30/09/2014 met de aangepaste geometrie. In vergelijking met *Figuur 3-42* leidt dit tot een verdubbeling van de depositiehoogte. Bovendien is er duidelijk een groter aandeel van SF2 in het depositiemateriaal dan SF1. Dit werd ook vastgesteld tijdens de event van kerstmis 2013: een D50 van 128 μm werd toen bepaald op een staal van het depositiemateriaal (zie §3.3.1). Dus duidelijk depositie van een zandige fractie, terwijl in overstroomde zones duidelijk fijner materiaal werd gevonden (D50 = 47 μm), dus het suspensiemateriaal had duidelijk een fijnere korrelgrootteverdeling.

Analyse van de “US en DS mass flow” gaf een depositie van 86 ton. Dit is dus duidelijk meer dan de 32 ton die met de originele geometrie werd gesimuleerd (*Tabel 3-7*). Het verdiepen van de bedding leidde er duidelijk toe dat de woekom sterker ging fungeren als sedimentvang. Deze 86 ton stemt overeen met een volume van 55 m^3 (densiteit van 1573 kg/m^3 voor stalen genomen in de woekom). Dit geeft een depositiehoogte van 34 cm. Dit verschilt duidelijk van de 4 à 8 cm in *Figuur 3-49* door de uniforme verdeling van de massa depositie over het volledige dwarsprofiel in ICM, dewelke duidelijk breder is dan de natte sectie in de woekom (*Figuur 3-47*).

In juli 2014 werd 71 m^3 aanslibbing weggegraven uit de woekom. Dit was dus de hoeveelheid depositie sinds mei 2013. Dit is een periode van 14 maanden die grotendeels samenvalt met de simulatieperiode (oktober 2013 – september 2014). Rekening houdend met het kleine verschil in timing en duurtijd is gesimuleerde depositie van 55 m^3 zeer gelijkaardig aan de gemeten depositie 61 m^3/jaar (71 $\text{m}^3/14$ maanden evenredig over 1 jaar verdeeld). Dit is een uitstekend resultaat.

In het algemeen kan besloten worden dat het ICM sedimentmodel van de Maarkebeek goed in staat is om de depositie van sediment realistisch te simuleren.



***Figuur 3-49* River reach sediment depth (US=opwaarts en DS=afwaarts) gesimuleerd met het finale ICM sedimentmodel Maarkebeek voor de woekom Borgtmolen**

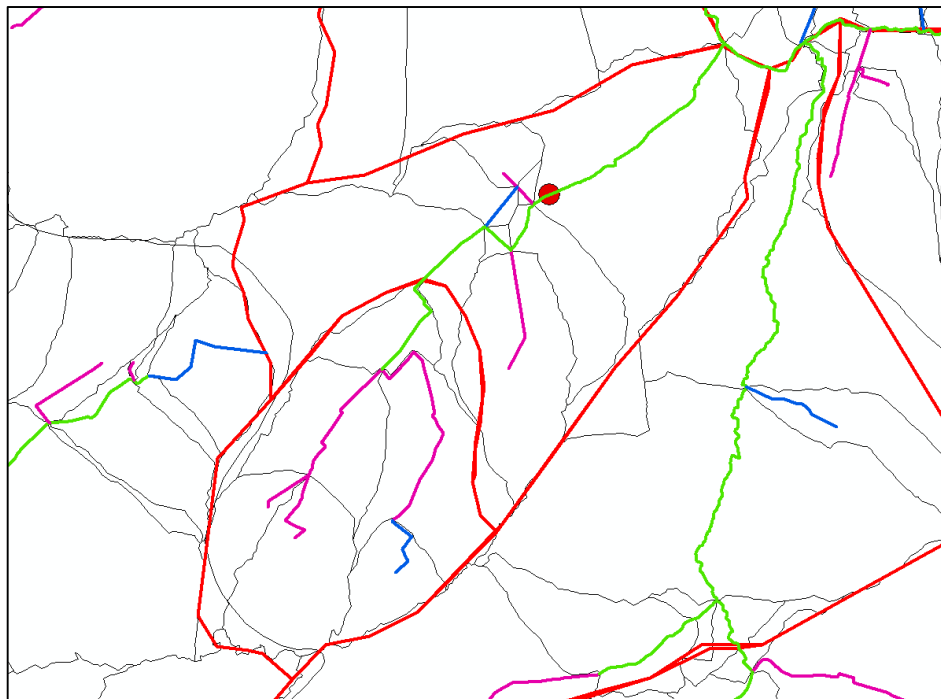
3.3.5.4 Modelperformantie en inputkwaliteit

In bovenstaande paragrafen werd besproken hoe het ICM sedimentmodel van de Maarkebeek in algemene termen goed presteert, maar dat de modelperformantie in belangrijke mate beperkt wordt door de matige kwaliteit van de inputs, i.e. CNWS afvoeren en sedimentvrachten. Wat volgt is een gedetailleerde analyse van het model voor het bemeten deelstroomgebied van de Marie-Borrebeek waarbij de inputs werden gecorrigeerd a.d.h.v. de metingen zodat de modelperformantie

onafhankelijk van de inputkwaliteit kon beoordeeld worden. De bedoeling is om na te gaan of de performantie van het ICM model een gevolg is van onvoldoende inputkwaliteit en/of onvoldoende kalibratie.

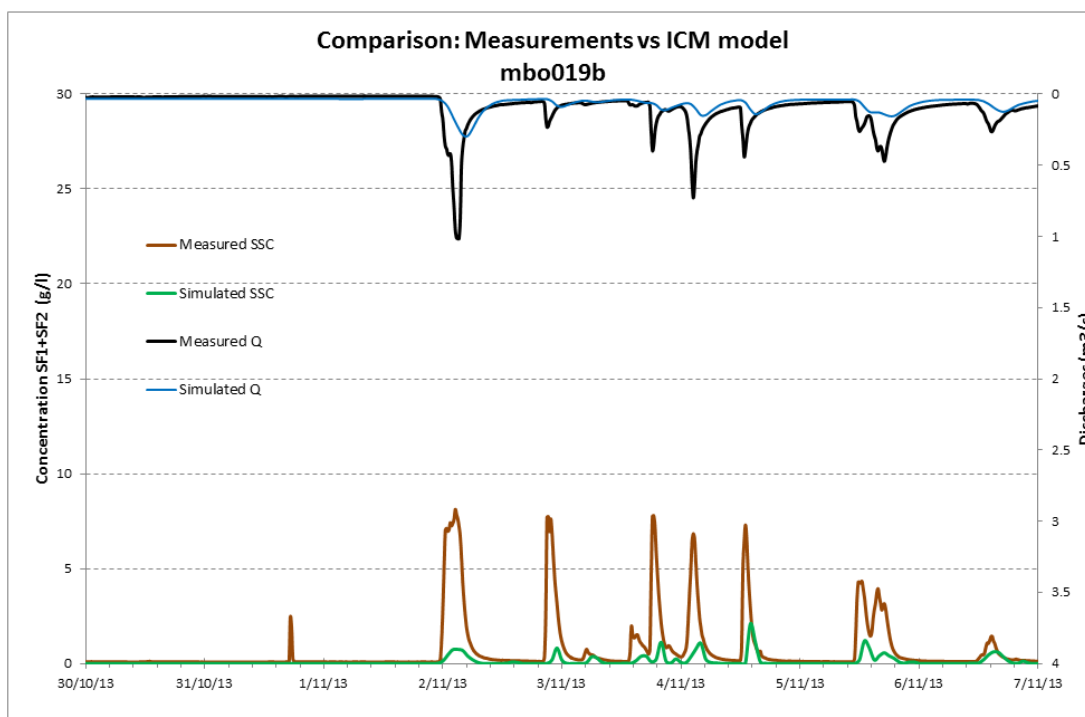
De selectie van de Marie-Borrebeek (*Figuur 3-50*) voor deze analyse heeft verschillende redenen:

- De beschikbaarheid van goede meetgegevens voor de volledige simulatieperiode 1/10/2013-30/09/2014.
- Het is een relatief klein gebied en daarom beheersbaar voor dergelijke analyse (geen complex van processen en effecten maar direct te interpreteren dynamiek).
- De meetlocatie ligt in het gedetailleerd gemodelleerde rivienetwerk en er zijn weinig opwaartse uitbreidingen in het deelstroomgebied. De vereenvoudigde geometrie van deze laatste leiden tot een onzekerheid in de modelresultaten die bij onderliggende analyse zoveel mogelijk uitgesloten moet kunnen worden.
- De meetlocatie ligt voldoende opwaarts. De kwaliteit van de CNWS outputs is duidelijk verschillend voor verschillende deelstroomgebieden (zie *Tabel 3-2*). Voor een meer afwaartse meetlocatie is het corrigeren van de inputs dus veel complexer (met bijhorende onzekerheden).
- Er is nauwelijks sedimentatie in de Marie-Borrebeek en dus wordt de sedimentinput bijna volledig omgerekend naar SSC via de sedimenttransportvergelijking. De kalibratie van de parameters van die vergelijking (of meerbepaald de analyse van de kwaliteit ervan) kan dus integraal gebeuren, zonder bias van sedimentatie.



Figuur 3-50 Deelstroomgebied Marie-Borrebeek: 2e (groen), 3e (roze) en 9e (blauw) VHA categorie, PDM subcatchments (rood) en de meetpost te Etikhove (rode cirkel) van het sedimentmeetnet (VMM)

Voor de detailanalyse werd het grootste event uit de simulatieperiode geselecteerd, i.e. de event van begin november 2013. *Figuur 3-51* geeft de modelresultaten en metingen weer voor deze event (detail uit *Figuur 3-37*). De event bestaat uit meerdere afvoer- en sedimentpieken. Zoals in §3.3.5.2 besproken wordt het debiet en de SSC duidelijk onderschat door het model. In Voortgangsrapport 4 werd reeds besproken dat de door CNWS gemodelleerde afvoer op de Marie-Borrebeek tijdens twee winter events ongeveer de helft van de metingen bedraagt en de door CNWS gemodelleerde sedimentvracht ongeveer een tiende van de metingen (*Tabel 3-8*). Daarnaast bleek ook de PDM totale afvoer de gemeten afvoer te onderschatten (*Figuur 3-23*).



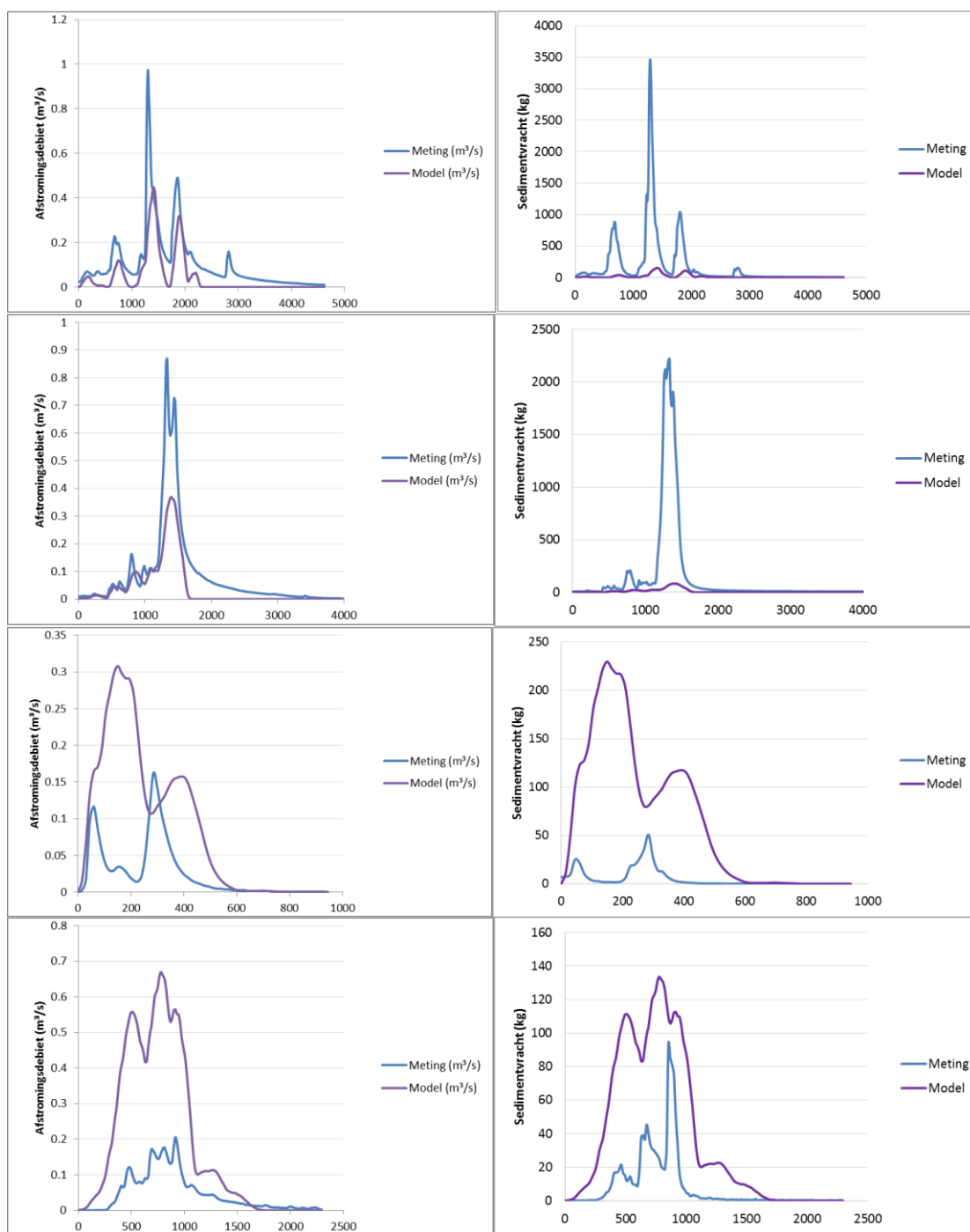
Figuur 3-51 Gesimuleerde en gemeten afvoer en SSC in de Marie-Borrebeek te Etikhove

Tabel 3-8 Overeenkomst tussen model- (CNWS) en meetresultaten voor de totale hoeveelheid afstroming en de totale sedimentvracht aan de uitlaat van het stroomgebied tijdens vier events. De gemiddelde waarden stellen gewogen gemiddelden voor op basis van de totale hoeveelheid water en sediment.

Stroomgebied	Event	Model / meting (afstroming)	Model / meting (sediment)
Etikhove	23/12/2013	0,49	0,12
Etikhove	27/12/2013	0,46	0,07
Etikhove	28/06/2014	3,44	14,93
Etikhove	09/07/2014	4,01	5,17
Gemiddelde		0,98	0,23

Uit [Figuur 3-51](#) blijkt dat de onder- (winter) of overschatting (zomer) van debiet en SSC niet constant is in de tijd. Zo is bijvoorbeeld voor de event 28/06/2014 de eerste gemodelleerde afvoerpiek ongeveer het driedubbele van de meting terwijl de grootte van de tweede piek wel goed wordt benaderd (met tijdsverschuiving). Dit duidt erop dat het toepassen van een correctiefactor op de inputs niet noodzakelijk tot de gewenste verbetering zal leiden doorheen het volledige tijdsverloop. Per event kan er algemeen een grotere overeenkomst zijn, maar individuele piekjes binnen een event kunnen nog steeds aan een (verschillende) over- of onderschatting onderhevig zijn.

De totale sedimentvracht tijdens de event (29/10/2013-05/11/2013) wordt door CNWS berekend als 6 ton. De sedimentvracht die bekomen wordt door de gemeten debieten te vermenigvuldigen met de gemeten SSC bedraagt 131 ton. De ratio meting/model geeft dus een correctiefactor van 22. De oorspronkelijke SSC modelinput per VHA werd daarom vermenigvuldigd met deze correctiefactor voor de VHA segmenten opwaarts van de meetlocatie te Etikhove.

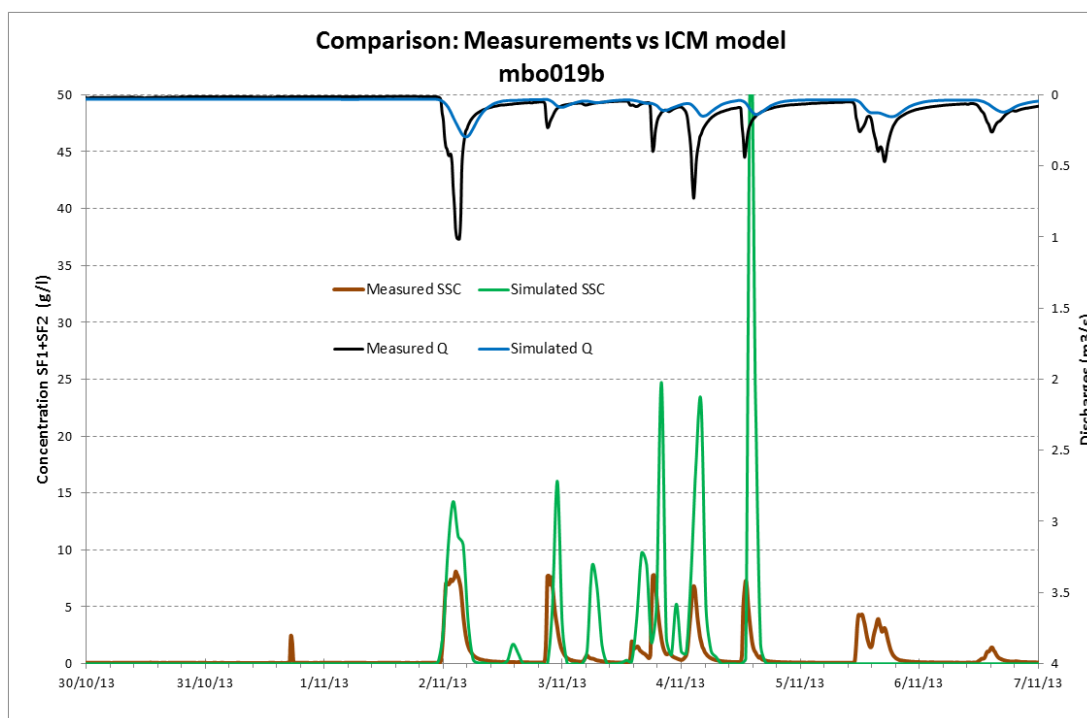


Figuur 3-52 Gemeten (blauw) en met CNWS gesimuleerde (paars) runoff en sedimentvracht tijdens de winterevents van 23/12/2013 (boven) en 27/12/2013 (tweede van boven) en de zomerevents van 28/06/2014 (tweede van onder) en 09/07/2014 (onder)

In een eerste scenario werden de gecorrigeerde input sedimentconcentraties toegepast met de PDM totale afvoer (i.e. de afvoer input in het finale ICM sedimentmodel van de Maarkebeek). De CNWS SSC output per VHA segment werd herschaald voor deze afvoer input zoals uitgelegd in §3.1. Bij deze inputs zijn we dus zeker dat de totale sedimentvracht die opwaarts van meetlocatie Etikhove in het model gebracht wordt, gelijk is aan de sedimentvracht die voor dit event aan het meetpunt werd gemeten (131 ton).

De totale sedimentvracht voor de event van november 2013 aan de meetlocatie Etikhove, gesimuleerd in het ICM model met deze aangepaste (SSC) inputs, bedroeg 128 ton. Dat is 3 ton lager dan de totale input en dus de gemeten sedimentvracht, maar het verschil (2%) is verwaarloosbaar. Deze sedimentmassa bevindt zich deels in suspensie in het watervolume opwaarts van het meetpunt en deels in een depositielaag. Deze laatste is minimaal en zou verder in de tijd eroderen; in de jaarsimulatie met het finale ICM model bleek de depositie op de Marie-Borrebeek immers nihil, hetgeen strookt met de realiteit.

Figuur 3-53 toont de gemeten en de met nieuwe inputs gesimuleerde debieten en SSC ter hoogte van meetlocatie Etikhove. De onderschatting van de gemeten debieten door de modelresultaten blijft uiteraard dezelfde. Aangezien de sedimentvracht nu wel correct is en de debieten te laag, leidt dit tot een overschatting van de gemeten SSC door het model. Toch wordt de SSC grootte-orde beter benaderd dan met de oorspronkelijk inputs (*Figuur 3-51*). De SSC overschatting is duidelijk niet constant in de tijd. Ze is beperkt op 2 en 3/11, groter in de nacht van 3 op 4/11 en maximaal op 4/11. Zoals bij *Figuur 3-52* besproken, is de over- of onderschatting van debiet en SSC door CNWS inderdaad niet constant in de tijd maar verschillend voor verschillende pieken binnen eenzelfde event. Ook al klopt de totale sedimentvracht nu voor het ganse event, individuele pieken kunnen nog steeds onder- of overschat worden.



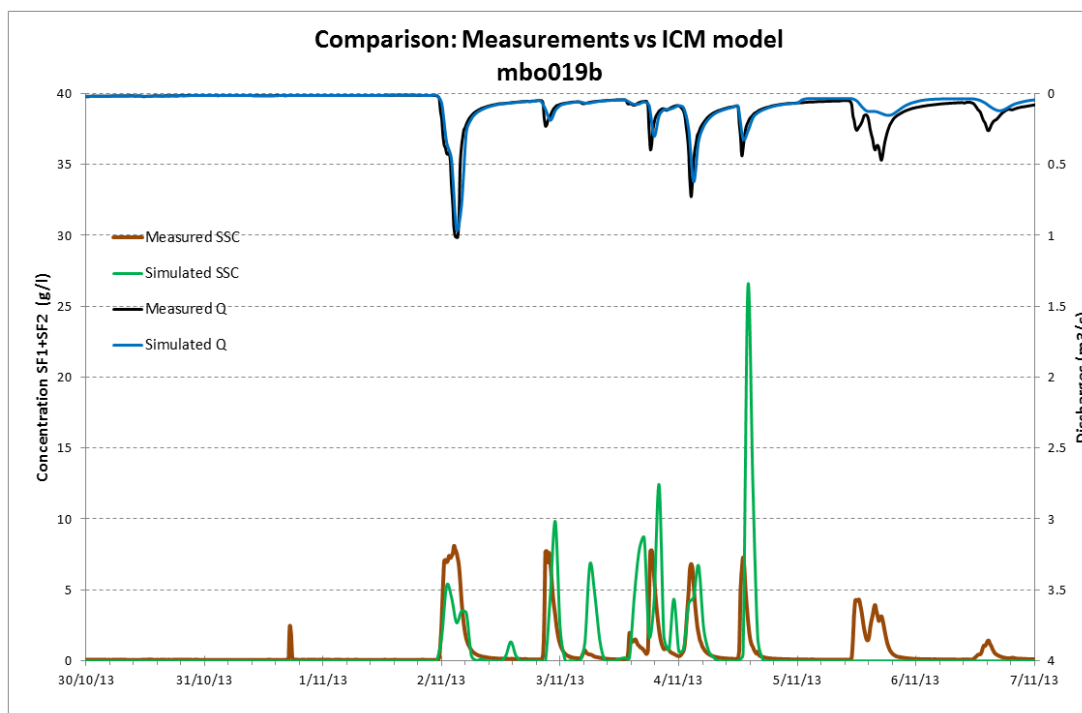
***Figuur 3-53* Gesimuleerde en gemeten afvoer en SSC in de Marie-Borrebeek te Etikhove met gecorrigeerde SSC inputs en PDM totale afvoer**

In een tweede scenario werden ook de afvoer inputs opwaarts van de meetlocatie Etikhove gecorrigeerd a.d.h.v. de metingen. De combinatie van verbeterde SSC input (om de juiste sedimentvracht toe te passen) en verbeterde afvoer input zou immers moeten leiden tot een verdere verbetering van de gemodelleerde SSC. Het gemeten hydrogram voor de betreffende event werd herschaald naar elk VHA segment opwaarts van de meetlocatie op basis van stroomgebiedsoppervlakte. Zo werd het model gevoed met het gemeten hydrogram, verdeeld over de verschillende VHA segmenten. De SSC input per VHA segment werd uiteraard nog herschaald voor deze afvoer input zoals uitgelegd in §3.1 zodat de totale sedimentvracht (131 ton) bleef kloppen. De gemeten en gesimuleerde afvoeren en SSC worden weergegeven in *Figuur 3-54*.

De totale sedimentvracht voor de event van november 2013 aan de meetlocatie Etikhove, gesimuleerd in het ICM model met deze aangepaste (SSC en afvoer) inputs, bedroeg 128 ton. Dat is 3 ton lager dan de totale input en dus de gemeten sedimentvracht, maar het verschil (2%) is verwaarloosbaar. Deze sedimentmassa bevindt zich deels in suspensie in het watervolume opwaarts van het meetpunt en deels in een depositielaag. Deze laatste is minimaal en zou verder in de tijd eroderen; in de jaarsimulatie met het finale ICM model bleek de depositie op de Marie-Borrebeek immers nihil, hetgeen strookt met de realiteit.

In *Figuur 3-54* zien we een zeer grote overeenkomst tussen de gemeten en gesimuleerde debieten. Enkele afvoerpieken worden licht onderschat. Door interne berging en routing is er een onvermijdelijk verschil tussen een gesimuleerd en gemeten hydrogram wanneer deze laatste opwaarts via verschillende instroompunten aan een hydraulisch model wordt toegevoegd. Aangezien zowel de debieten als de sedimentvracht grotendeels overeenkomen met de metingen, is dit ook het geval voor de SSC. De gesimuleerde SSC pieken vallen mooi samen met de metingen, hebben grotendeels dezelfde vorm en breedte (duur) en zijn van dezelfde grootte-orde. Dit is een uitstekend resultaat, rekening houdend met de grote onzekerheid die typisch met sedimenttransportmodellering is verbonden. De absolute waarden van de SSC pieken komen zelfs vrij goed overeen met de metingen. Algemeen is er een lichte overschatting, wat verklaard kan worden door de lichte onderschatting van de afvoerpieken en de correcte sedimentvracht. Dit is echter niet constant, maar verschillend voor individuele pieken, wat het gevolg is van een verschillende onder- of overschatting van individuele pieken door CNWS (vb. 4/11, zie boven).

Uit deze test blijkt duidelijk dat het ICM sedimentmodel van de Maarkebeek goed gekalibreerd lijkt te zijn en dat de matige modelperformantie hoofdzakelijk een gevolg is van de lage kwaliteit van de afvoer en SSC inputs uit CNWS. Gecorrigeerde inputs, waarbij model met het juiste hydrogram en sedigram wordt gevoed, leiden tot uitstekende modelresultaten en een grote overeenkomst tussen gemeten en gesimuleerde SSC. Idealiter wordt de input voor elke individuele piek en elk VHA segment gecorrigeerd, maar dit is praktisch niet haalbaar en bovendien zijn hiervoor onvoldoende meetgegevens beschikbaar.



Figuur 3-54 Gesimuleerde en gemeten afvoer en SSC in de Marie-Borrebeek te Etikhove met gecorrigeerde SSC en afvoer inputs per VHA segment

3.4 Inputs CNWS_v2016a

Op een later tijdstip dan bovenstaande analyses werd een nieuwe versie van het CNWS model ter beschikking gesteld. In deze versie zijn enkele bugs uit de code gehaald en na grondige controle kan deze modelversie als finaal worden beschouwd. Algemeen is de sedimentexport vergroot. Op vraag van de Opdrachtgever werden de CNWS outputs voor de simulatieperiode Oktober 2013 – September 2014 opnieuw gegenereerd met deze modelversie en werden ze als nieuwe inputs doorgerekend met het finale ICM sedimenttransportmodel van de Maarkebeek. Enkel de nieuwe sedimentexport werd hierbij beschouwd aangezien de CNWS afvoer nauwelijks wijzigde en hierboven reeds werd aangetoond dat het ICM model van de Maarkebeek beter presteert met de PDM totale afvoer als input.

De totale input sediment vracht berekend met CNWS voor de simulatieperiode bedraagt 14422 ton. Dit is 2.4 keer de sedimentexport met de eerder gebruikte CNWS versie. De totale sedimentvracht gesimuleerd met het ICM model aan het uitstroompunt van de Maarkebeek in de Bovenschelde bedraagt 13850 ton. Dit betekent dat de sedimentexport naar de Maarkebeek bijna volledig uit het stroomgebied wordt getransporteerd en dat er m.a.w. weinig beddingerosie en depositie plaatsvindt. Dit strookt met voorgaande simulaties en de realiteit.

Tabel 3-11 geeft het sedimentbudget weer op de vier meetlocaties in de Maarkebeek. Voor alle locaties is de CNWS sedimentexport zeer gelijkaardig aan het ICM sedimenttransport. Er vindt dus weinig depositie en beddingerosie plaats in de Maarkebeek. Te Etikhove en Maarke-Kerkem is de gemeten en gesimuleerde sedimentvracht gelijkaardig op jaarbasis, terwijl de sedimentexport wordt overschat te Leupegem (factor 2.4) en Nukerke (factor 1.9). Tabel 3-9 en Tabel 3-10 geven de performantie van het oude en nieuwe CNWS model weer op event en jaarbasis.

Tabel 3-9 Overeenkomst tussen CNWS- 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. Model v2016a in rood.

Stroomgebied	Seizoen	Evenement	Model / meting (afstroming)	Model / meting (sediment)	Afstroming / neerslag	Model / meting (afstroming)	Model / meting (sediment)
Leupegem	Winter	23/12/2013	0,52	0,15	0,362	0,52	0,29
Leupegem	Winter	27/12/2013	0,40	0,07	0,387	0,40	0,14
Leupegem	Zomer	10/08/2014	4,77	8,70	0,036	4,77	27,41
Leupegem	Zomer	25/08/2014	2,46	1,04	0,055	2,46	3,29
Gemiddelde			0,84	0,29	0,210	0,84	0,78
Etikhove	Winter	23/12/2013	0,49	0,08	0,512	0,49	0,19
Etikhove	Winter	27/12/2013	0,46	0,06	0,452	0,46	0,14
Etikhove	Zomer	28/06/2014	3,44	12,28	0,046	3,44	40,60
Etikhove	Zomer	09/07/2014	4,01	4,57	0,072	4,01	15,10
Gemiddelde			0,98	0,18	0,271	0,98	0,51
Donderij	Winter	23/12/2013	0,36	0,15	0,605	0,36	0,24
Donderij	Winter	27/12/2013	0,36	0,09	0,508	0,36	0,15
Donderij	Zomer	10/08/2014	2,63	1,10	0,073	2,62	3,74
Donderij	Zomer	25/08/2014	1,08	0,61	0,139	1,08	2,05
Gemiddelde			0,59	0,23	0,331	0,59	0,60
Broekbeek	Winter	23/12/2013	0,76	0,45	0,259	0,76	0,77
Broekbeek	Winter	27/12/2013	0,63	0,30	0,246	0,63	0,52
Broekbeek	Zomer	10/08/2014	3,22	4,24	0,056	3,22	14,44
Broekbeek	Zomer	25/08/2014	1,83	1,66	0,077	1,83	5,65
Gemiddelde			1,11	0,79	0,160	1,11	2,015
Maarke-kerkem	Zomer	02/06/2008	0,90	4,51	0,115	4,37	8,87
Maarke-kerkem	Zomer	03/08/2008	0,63	1,39	0,121	4,26	4,25
Maarke-kerkem	Winter	21/11/2008	4,37	0,30	0,043	0,90	0,49
Maarke-kerkem	Winter	09/12/2008	4,26	-	0,024	0,63	-
Gemiddelde			1,66	1,79	0,076	1,66	3,59

Tabel 3-10 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. Model v2016a in rood.

Stroomgebied	Periode	Model / meting (afstroming)	Model / meting (sediment)	Model / meting (afstroming)	Model / meting (sediment)
Leuepegem	Okt 2013 – Sept 2014	1,09	0,93	1,12	2,45
Etikhove	Okt 2013 – Sept 2014	0,93	0,45	0,97	1,36
Donderij	Okt 2013 – Sept 2014	0,82	0,51	0,84	1,22
Broekbeek	Okt 2013 – Sept 2014	1,02	1,97	1,05	5,12
Maarke-kerkem	Jan 2008 – Dec 2008	1,04	0,42	1,07	1,09

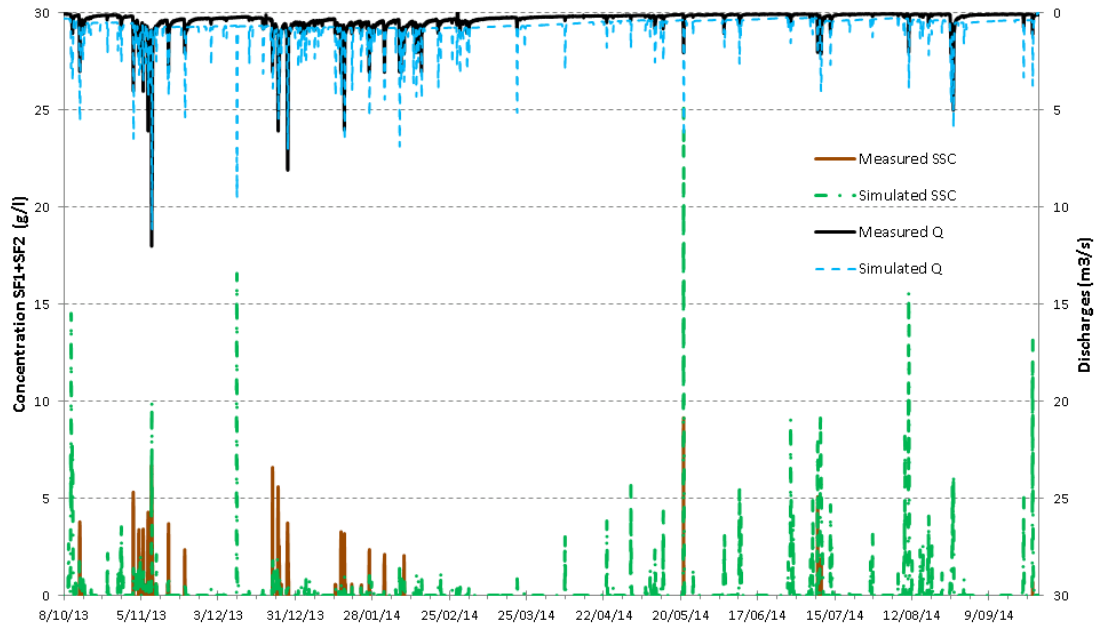
Tabel 3-11 Sedimentvracht voor de periode 01/10/2013-30/09/2014 op de meetlocaties in de Maarkebeek: gemeten door het VMM Sedimentmeetnet, gesommeerde opwaartse model input (= CNWS v2016a output) en gesimuleerd met het ICM model.

Meetlocatie	Sedimentvracht uit metingen (ton)	Sedimentvracht model input (CNWS) (ton)	Sedimentvracht modelresultaat (ton)
Leuepegem - Maarkebeek	5918	14333	13918
Etikhove - Marie-Borrebeek	927	1020	966
Maarke-Kerkem - Broekbeek	247	303	309
Nukerke - Donderij	1263	2395	2389

Figuur 3-55 tot en met *Figuur 3-58* vergelijken de gesimuleerde en gemeten sedimentconcentraties en debieten voor de simulatieperiode op de vier meetlocaties in de Maarkebeek. De conclusies zijn analoog aan §3.3.5.2:

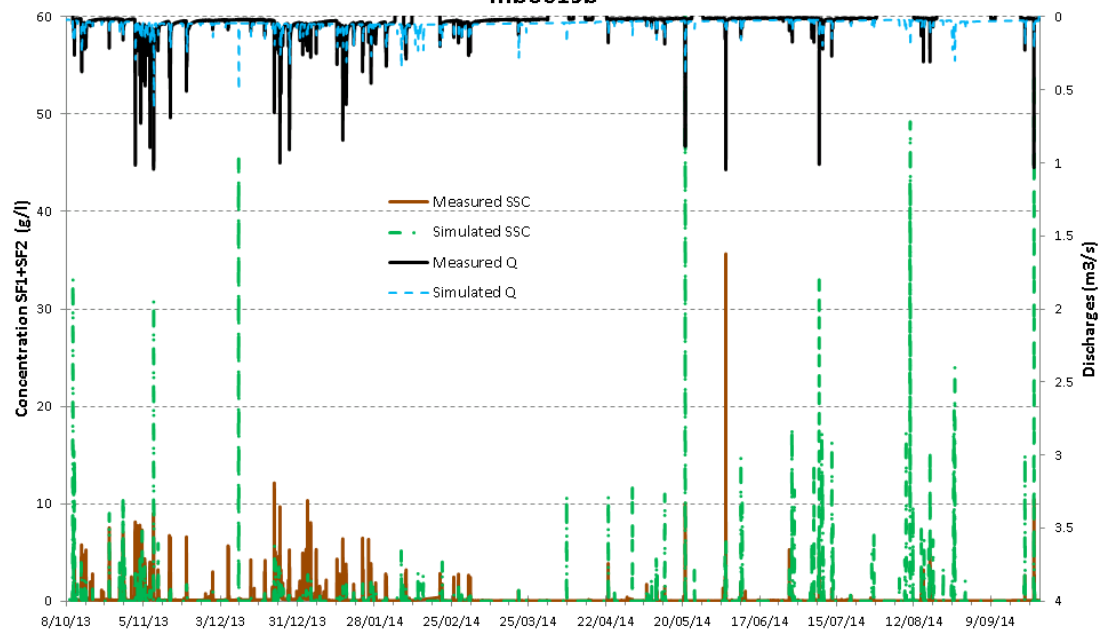
- Maarkebeek te Leuepegem: algemeen kan er een overschatting van de sedimentconcentraties worden waargenomen in vergelijking met de metingen. Dit is het gevolg van de overschatting van de sedimentexport door het CNWS model (*Tabel 3-11*). In vergelijking met de oorspronkelijke CNWS inputs is de onderschatting in de winter afgenomen en de overschatting in de zomer toegenomen hetgeen in overeenstemming is met *Tabel 3-9* en *Tabel 3-10*.
- Marie-Borrebeek te Etikhove en Donderij te Nukerke: hoewel de gemeten en gesimuleerde sedimentvracht op jaarbasis goed overeenstemmen, is er een duidelijke onderschatting van de sedimentconcentraties door het model in de winter en vice versa in de zomer. Het oorspronkelijke CNWS model onderschatte de sedimentexport op jaarbasis terwijl de nieuwe versie deze licht overschat. Analoog aan Leuepegem is de onderschatting in de winter afgenomen in vergelijking met de oorspronkelijke CNWS inputs terwijl de overschatting in de zomer is toegenomen. Dit volgt opnieuw rechtstreeks uit de kwaliteit van de input data (sedimentexport CNWS) (*Tabel 3-9* en *Tabel 3-10*).
- Broekbeek te Maarke-Kerkem: algemene toename van gemodelleerde sedimentconcentratie (cfr. *Tabel 3-11*). Analoge bevindingen als in §3.3.5.2.

Comparison: Measurements vs ICM model
maa037a



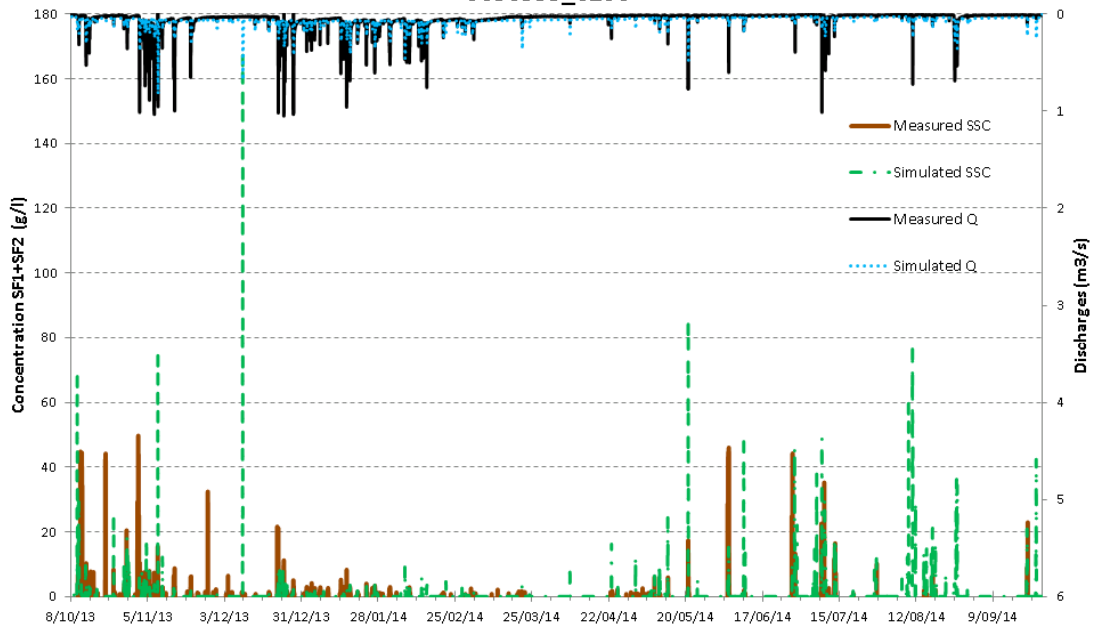
Figuur 3-55 Gesimuleerde (finaal model) en gemeten afvoer en SSC in de Maarkebeek te Leupegem

Comparison: Measurements vs ICM model
mbo019b



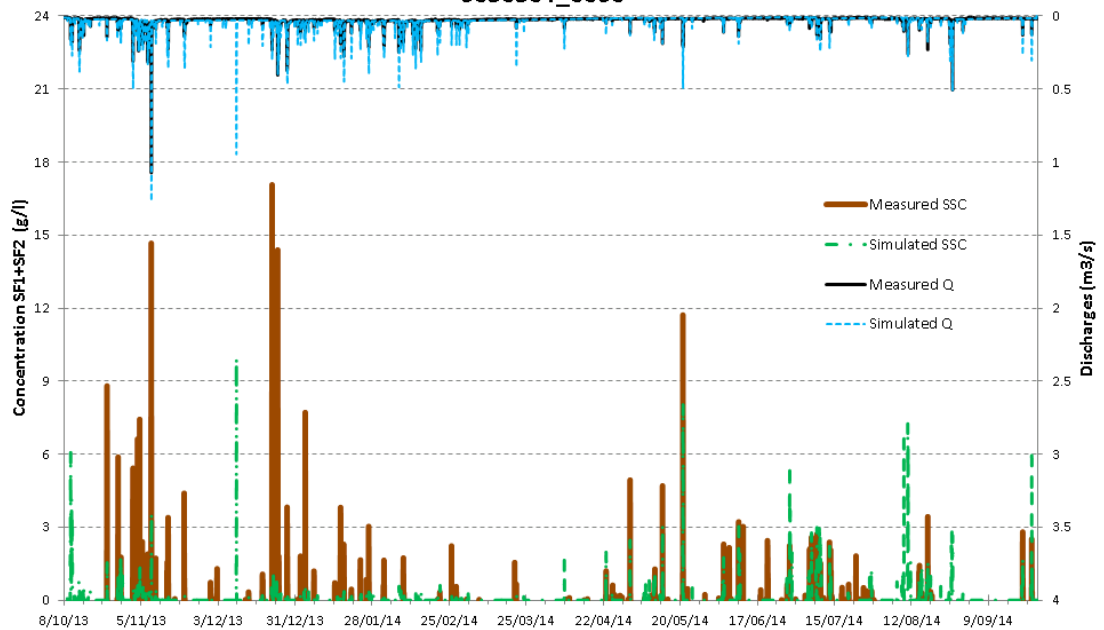
Figuur 3-56 Gesimuleerde (finaal model) en gemeten afvoer en SSC in de Marie-Borrebeek te Etikhove

Comparison: Measurements vs ICM model
6030359_0260



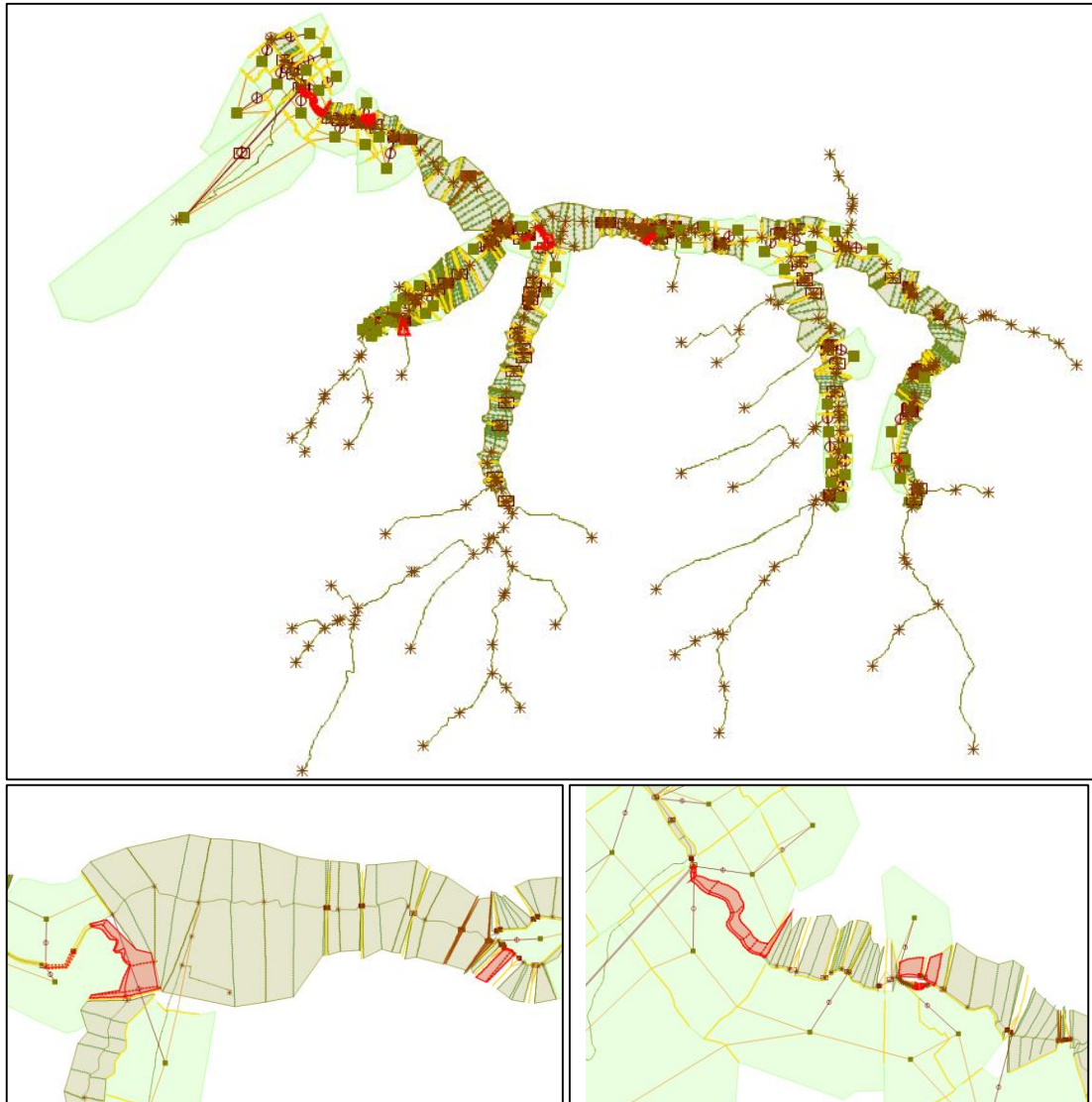
Figuur 3-57 Gesimuleerde (finaal model) en gemeten afvoer en SSC in de Donderij te Nukerke

Comparison: Measurements vs ICM model
6030504_0060



Figuur 3-58 Gesimuleerde (finaal model) en gemeten afvoer en SSC in de Broekbeek te Maarke-Kerkem

Figuur 3-59 en *Figuur 3-60* geven de gesimuleerde depositiezones resp. depositiehoogtes weer. Deze zijn bijna identiek aan de simulatie met oorspronkelijke CNWS outputs (§3.3.5.3). Dit geeft aan dat de sedimenttransport- en sedimentatieprocessen goed door het model worden gereproduceerd. Een grotere sedimentexport (afwaarts te Leupegem factor 2.4) leidt immers niet tot een toename in depositie. In het stroomgebied van de Maarkebeek is de depositie inderdaad beperkt en de sedimentexport wordt bijna volledig uit het stroomgebied getransporteerd.



Figuur 3-59 Gesimuleerde zones met depositie met het finale ICM Maarkebeek: algemeen (boven), zone Borgtmolen-Gansbeekstraat (onder-links) en zone Nonnemolen (onder-rechts)

01/10/2013 00:00:00					
	US node ID	Volume (m3)	Average sediment depth at start of initialisation (m)	Average sediment depth at end of simulation (m)	Surcharge state
	vis03d	167.0	0.000	0.439	0.55
	vis04d	58.1	0.000	0.228	0.44
	maa026a	85.9	0.000	0.222	0.57
	maa014	1848.9	0.000	0.097	0.19
	maa028	45.2	0.000	0.079	0.22
	maa094	94.5	0.000	0.056	0.18
	ned003	146.4	0.000	0.011	0.17
	maa022	86.0	0.000	0.010	0.22
	maa062a	310.9	0.000	0.010	0.39
	maa192f	27.2	0.000	0.010	0.17
	mbo025e	5.0	0.000	0.010	0.06
	maa007	512.6	0.000	0.005	0.41
	maa033a	425.0	0.000	0.004	0.25
	maa009	738.5	0.000	0.002	0.44
	pau005	276.4	0.000	0.002	0.18
	mbo031a	2.0	0.000	0.002	0.11
	maa005	620.6	0.000	0.001	0.38
	maa084a	23.3	0.000	0.001	0.07
	mbo032	5.5	0.000	0.001	0.06
	ned020	110.8	0.000	0.001	0.13
	4028882_0000	37.2	0.000	0.000	0.20
	4028882_0300	70.3	0.000	0.000	0.20
	4028908_0000	25.7	0.000	0.000	0.14
	4028912_0000	7.7	0.000	0.000	0.13
	4028912_0080	9.3	0.000	0.000	0.14
	4028912_0170	72.2	0.000	0.000	0.16
	4028913_0000	127.9	0.000	0.000	0.12
	4028920_0000	9.4	0.000	0.000	0.05
	4028920_0140	1.3	0.000	0.000	0.05
	4028920_0160	11.9	0.000	0.000	0.12
	4028921_0000	22.9	0.000	0.000	0.05
	4028922_0000	11.4	0.000	0.000	0.02
	4028922_0200	13.4	0.000	0.000	0.05
	4028925_0000	71.7	0.000	0.000	0.24

Figuur 3-60 River reach results table met average sediment depth at the end of the simulation (in m) gesimuleerd met het finale ICM sedimentmodel Maarkebeek

3.5 **Besluit**

Onderliggend rapport omschrijft de ontwikkeling van het hydraulische ICM sedimenttransportmodel van het stroomgebied van de Maarkebeek. Dit werd uitgevoerd in ICM modelversie 6.0.5, waarin door Innovyze de nodige aanpassingen werden gedaan voor modellering van sedimenttransport in open watersystemen. De software kan verder geoptimaliseerd worden in de toekomst op basis van enkele aanbevelingen uit deze studie.

De CNWS output (SSC en runoff per VHA segment) werd vertaald naar inputs voor het ICM model. Als schatter voor de basisafvoer werd het IWRS PDM model gebruikt. Op basis van de afstroomoppervlakte per VHA segment werden de PDM afvoeren herschaald. Zowel de combinatie CNWS runoff met PDM basisafvoer enerzijds als de totale PDM afvoer anderzijds werden als inputdebiet per VHA segment berekend. De CNWS output SSC werden geproportioneerd met deze afvoeren, zodat de CNWS sedimentvracht behouden bleef. Dit leidde ook tot een realistischer dynamisch verloop van de SSC in vergelijking met de lineaire verdeling over het hydrogram in CNWS. Al deze bewerkingen en het genereren van een geschikt inputformaat (pollutograph en inflowfile) voor ICM werden automatisch uitgevoerd d.m.v. een Python script.

Het IWRS model van de Maarkebeek werd omgezet naar ICM. De hydrodynamische performantie werd geëvalueerd door een vergelijking van IWRS en ICM debieten op verschillende locaties, lengteprofielen van maximale waterstand en overstromingskaarten. De focus hierbij was het reproduceren van de volumebalans uit RS in ICM, aangezien dit voor sedimentmodellering veel belangrijker is dan het reproduceren van waterpeilen. Beide modellen vertonen een goede overeenkomst, terwijl de verschillen een grootteorde kleiner zijn dan de verschillen met gemeten afvoeren. Het model van de Maarkebeek werd opwaarts nog uitgebreid voor alle VHA segmenten t.e.m. derde categorie met een vereenvoudigde geometrie. Elk VHA segment werd een break node toegewezen via dewelke SSC en afvoer inputs worden toegediend.

Aan de hand van meetgegevens (afvoer en SSC), opmetingen van aanslibbing en terreinbezoeken werd een goed beeld verkregen van de sediment gerelateerde processen in de Maarkebeek. Tijdens de kalibratie/validatie van het model werd getracht deze processen zo realistisch mogelijk te simuleren. Rekening houdend met de grote onzekerheid die typisch met sedimenttransportmodellering gepaard gaat, lag de focus vnl. op het benaderen van grootteordes eerder dan absolute meetwaarden en op het reproduceren van de juiste processen in het model, zoals de algemene sedimentbalans, depositiezones, verloop van de SSC langsheen de waterloop en in de tijd, etc. Zeer veel simulaties werden uitgevoerd waarbij verschillende parameters en modelopties uitvoerig werden getest. Het KUL model bleek duidelijk het dynamische verloop van de SSC beter te benaderen dan de andere sedimenttransportvergelijkingen. Via de grading optie en de KUL parameters werd getracht om de zandige, weinig erosieve bedding van de Maarkebeek in het model te brengen, in combinatie met fijner suspensiemateriaal afkomstig van erosie op het land. In de opwaartse uitbreidingen werden erosie en depositie in de rivierbedding uitgeschakeld aangezien dit in de realiteit niet aanwezig is in de Maarkebeek. Via de modelparameters werd het verloop van de SSC, de sediment outflux en de depositie geoptimaliseerd. De PDM totale afvoer bleek als input tot betere modelresultaten te leiden dan de combinatie CNWS runoff met PDM basisafvoer.

Uiteindelijk werd een finale parameterset voor de Maarkebeek bekomen waarvoor de modelresultaten in dit rapport in detail worden besproken. De outflux van sediment benaderde de totale input, hetgeen strookt met de realiteit in de Maarkebeek (weinig depositie en erosie van de bedding). In het afwaartse gedeelte wordt de afvoer licht overschat door het model, terwijl er in de opwaartse zones een duidelijke onderschatting van de afvoer is. In het algemeen wordt de SSC ter hoogte van de meetlocaties onderschat in de winter en overschat in de zomer. Dezelfde trends worden waargenomen in de CNWS outputs. De matige modelperformantie blijkt dus in sterke mate bepaald te worden door de matige kwaliteit van de inputs. Een detailanalyse voor het bemeten deelstroomgebied van de Marie-Borrebeek bevestigde dat met gecorrigeerde inputs de gesimuleerde SSC wel uitstekend door het model worden gereproduceerd. De kalibratie van het model werd dus goed uitgevoerd, maar de performantie van het model is zeer gevoelig aan de inputkwaliteit (garbage in = garbage out). De correctie van de inputs is echter praktisch niet haalbaar op stroomgebiedsniveau aangezien onvoldoende meetdata beschikbaar is - er zouden afvoer en SSC nodig zijn voor zeer veel

deelstroomgebieden of idealiter per VHA segment - en zou bovendien zeer arbeidsintensief zijn aangezien een correctie per event uitgevoerd dient te worden.

De modelkalibratie lijkt robuust en er kan verondersteld worden dat er geen bijkomende modelaanpassingen nodig is wanneer verbeterde inputs beschikbaar zouden zijn, terwijl de modeloutputs zouden verbeteren. Een validatie van het model is wel minstens nodig, maar geen herkalibratie aangezien de gesimuleerde processen realistisch zijn, de balansen goed zitten en de test met gecorrigeerde inputs leidde tot uitstekende resultaten. Daarnaast moet rekening gehouden worden met de grote spatiale en temporele schalen waarop gemodelleerd wordt en de hiermee gepaard gaande onzekerheid. Er dient hier nog opgemerkt te worden dat een model in principe enkel bruikbaar is binnen de periode/condities waarvoor het is gekalibreerd.

Het model voorspelt depositie op de juiste locaties. De directe ICM output geeft een vertekend beeld van de depositiehoogtes wegens een uniforme verdeling van de massa depositie over het volledige dwarsprofiel i.p.v. enkel de natte sectie. Het is aangewezen om de depositie in detail te analyseren op basis van de massabalans. Hieruit blijkt duidelijk dat de gemeten grootteordes van depositie worden gereproduceerd door het model. Dit is minder het geval voor de opwaartse depositiezones t.g.v. de algemeen lagere modelperformantie in de opwaartse delen van het model (i.v.m. inputkwaliteit). Er is ook duidelijk een effect van de geometrie van het modelnetwerk op depositie. Een analyse van de baggervolumes in de woelkom van de Borgtmolen toonde een zeer goede reproductie hiervan door het model aan.

Ondanks de matige modelperformantie t.g.v. de lage inputkwaliteit heeft het model zeker een praktisch nut: het reproduceert SSC grootteordes en dynamisch gedrag vrij correct alsook depositie in de waterloop en de sedimentbalans klopt. Het model laat ook een vlotte scenario-analyse van beleidsmaatregelen (vb. sedimentvang) toe. Het verbeteren van inputs (CNWS) op langere termijn zal tot verdere verbetering van het hydraulische luik leiden.

Een model is en blijft een poging tot reproductie van de werkelijkheid, maar onzekerheden moeten steeds goed indachtig gehouden worden bij vertaling naar de praktijk. Daarenboven is het algemeen bekend dat sediment export en transport modellering zeer complex is. Gezien de grote spatiale en temporele schalen (uniek in de academische wereld) waarvoor dit model wordt ontwikkeld, is het logisch dat het model meer afwijkingen vertoont hoe meer men geografisch en/of in de tijd inzoomt. Het was binnen onderliggend project onmogelijk om een model te produceren dat voor alle gebieden, alle meteorologische en sedimentologische condities en verschillende resoluties in ruimte en tijd zeer correct functioneert. Dat kan in de toekomst beslist nog verder geoptimaliseerd worden in andere projecten, waarvoor dit project als een zeer degelijke basis kan fungeren.

BIJLAGEN

- BIJLAGE 1** **THEORETISCHE ACHTERGROND ICM**
- BIJLAGE 2** **ICM-KUL SEDIMENTTRANSPORTVERGELIJKING**
- BIJLAGE 3** **ACTIVE LAYER CONCEPT ICM**

Bijlage 1 Theoretische achtergrond ICM

Conduit Model

WATER QUALITY

The conduit model is used to calculate the transport of suspended sediment and dissolved pollutant, and the erosion and deposition of sediment, in conduits. The transport process and the sediment erosion and deposition process are solved separately within each time step.

As with the hydraulic conduit model, a conduit is represented as a conceptual link of defined length between two nodes in the network. Control structures are treated as links of zero length in which no erosion or deposition takes place.

It is assumed that:

- The flow is one-dimensional in the conduit.
- The concentration of any suspended sediment and dissolved pollutant is fully mixed across the section of the conduit.
- The suspended sediment and dissolved pollutants are transported along the conduit with the local mean velocity of the flow.
- Dispersion of the suspended sediment and dissolved pollutant along the conduit is negligible.
- Erosion of sediment from the bed is instantaneous
- Deposition of suspended sediment depends on a settling velocity calculation.
- Deposition of suspended sediment does not affect the hydraulic calculations.

Transport

The equation describing the transport of the suspended sediment and the dissolved pollutant is based on conservation of mass. With the assumptions listed above, this leads to the *one-dimensional advection equation* as described in, for example, Cunge J A et al (1980).

$$\frac{dc}{dt} + u \frac{dc}{dx} = 0$$

where

c is the concentration (kg/m^3)

u is the flow velocity (m/s) - obtained from the hydraulic simulation

t is time (s)

x is the spatial co-ordinate (m).

The boundary condition at the upstream end required for this equation is generated by the Network Model.

The carrying capacity of the flow is calculated using one of the three erosion/deposition models available in InfoWorks ICM . See [Sediment Erosion and Deposition](#) for more details.

Numerical Techniques

The advection equation is solved in each conduit by the *Holly-Preissmann scheme* (Holly F.M. & Preissmann A. (1977)). This is a semi-Lagrangian method. It tracks conceptual parcels of pollutant in the flow.

The solution of the advection equation is known to be constant:

$$\frac{Dc}{Dt} = 0$$

along trajectories, X , given by:

$$\frac{dX}{dt} = u$$

This differential equation is solved for the trajectories by the *mid-point rule*:

$$X^n = X^{n+1} - \Delta t \cdot u^{n+1/2} (X(t^{n+1/2}))$$

with the velocities at the half time level generated by averaging the velocities at the two most recent time levels, and the position of the trajectory at the half time level generated by iteration. This gives a method which is second order in time.

Since the position of the foot of a trajectory at the previous known time level, X^n , does not generally coincide with a computational point, the value at the foot is generated by interpolation. The solution generated by this scheme is unconditionally stable - there is no restriction on the allowable size of the time step.

Cubic interpolation at the foot of a trajectory gives a solution which is third order in space but it can introduce unphysical oscillations to the numerical solution. This is avoided by the use of flux-corrected transport (FCT) (Boris J.P. and Book D.L. (1973)) - the local weighted averaging of two different numerical solutions to impose monotonicity.

The flux-corrected transport solution is not conservative. In the InfoWorks ICMwater quality model, conservation is recovered by the use of sub-optimal weights in the FCT local averaging. See Priestley A. (1993).

Sediment Erosion and Deposition

The erosion/deposition model to be used is set in the [Water Quality and Sediment Parameters](#) for the network.

The following assumptions and limitations apply to erosion and deposition of sediment:

- suspended sediment is assumed to be well mixed
- erosion of suspended sediment is instantaneous
- deposition is based on settling velocity
- cohesive forces are ignored
- no deposition is allowed to occur if the total sediment depth (active plus passive layer) is greater than a user defined percentage (up to 80%) of pipe depth. See [Sediment](#) for more information

InfoWorks ICM supports three different models for calculating erosion and deposition in pipes. These models are:

☑ Ackers White Model

The Ackers White algorithm is based on the Ackers-White theory (Ackers P. (1991)).

1. At each computational point along each pipe, a non-dimensional carrying capacity, C_v is calculated that represents the maximum concentration of a given sediment fraction that can be held within the flow. The equation used to calculate C_v is:

$$C_v = J \left(\frac{W_e R}{A} \right)^\alpha \left(\frac{d_{50}}{R} \right)^\beta \lambda_c^\gamma \left\{ \frac{|u|}{\sqrt{g(s-1)R}} - K \lambda_c^\gamma \left(\frac{d_{50}}{R} \right)^\varepsilon \right\}^m \quad (1)$$

where

λ_c is the composite friction factor which is calculated using the Colebrook-White formula (as described in Ackers J.C. et al (1994))

R is the hydraulic radius ($=A/P_o$) (m)

P_o is the wetted perimeter (m)

W_e is the effective bed width (m)

A is the cross sectional area of the flow (m²)

U is the local flow velocity (m/s)

The remaining parameters are all functions of the dimensionless grain size:

$$D_{gr} = d_{50} \left(\frac{g(s-1)}{v^2} \right)^{1/3} \quad (2)$$

where

v is the kinematic viscosity of water (m²/s)

g is the acceleration due to gravity (m/s²)

s is the specific gravity of the sediment fraction

d₅₀ is the average sediment particle size (m)

- The non-dimensional carrying capacity number is converted to a maximum concentration by

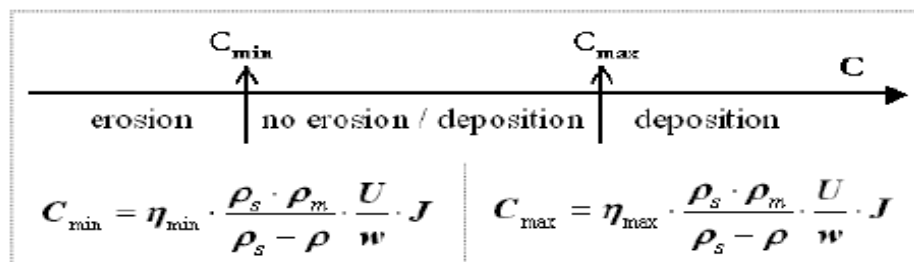
$$C_{max} = C_v \rho s \quad (3)$$

- If the actual concentration is greater than C_{max} then the excess sediment is deposited. If the actual concentration is less than C_{max} the bed is eroded until either $C_{max} = C_{actual}$ or all the bed has been eroded. Erosion is assumed to occur instantaneously while the rate of deposition is a function of the sediment settling velocity.
- All flow concentrations and bed masses are updated before the sediment is advected at the next timestep.

Velikanov Model

The Velikanov model is one of the algorithms available for calculating the erosion and deposition of sediment in pipes. The model was applied in this way based on research done by Anjou Recherche in France. Anjou Recherche is the main water operations research centre for Vivendi Water.

The Velikanov model determines two concentrations (C_{min} and C_{max}). If the flow concentration is below C_{min} then erosion occurs to achieve C_{min} if possible. If the flow concentration is above C_{max} then deposition occurs to achieve C_{max} if possible. If the flow concentration is between C_{min} and C_{max} then no erosion or deposition occurs.



The algorithm is described in Zug M. et al (1998). You are referred to this paper for full details of the model.

KUL Model

The KUL model was developed at the Katholieke Universiteit Leuven in Belgium and is described in Bouteligier R. et al (2002).

The KUL model determines two shear critical stress values (tau critical deposition and tau critical erosion). If the shear stress is below tau critical deposition then deposition occurs. If the shear stress is above tau critical erosion then erosion occurs. If the shear stress is between tau critical deposition and tau critical erosion then no erosion or deposition occurs. The rate of deposition or erosion depends on the shear stress.

Dependent Sediment Fractions

Multiple sediment fractions can be modelled **independently** or **dependently**. If multiple sediment fractions are modelled independently then the above algorithm is used for each sediment fraction. If the sediment fractions are modelled dependently then the following algorithm is used at the end of each water quality timestep.

1. Calculate the total load in the flow

$$c_T = \sum_{j \in \text{flow}} c_j$$

2. Calculate single representative d_{50} and s for the fractions in the flow as a weighted average based on the concentration of the fractions present in the flow

$$d_{50} = \frac{\sum_{j \in \text{flow}} c_j (d_{50})_j}{c_T} \qquad s = \frac{\sum_{j \in \text{flow}} c_j s_j}{c_T}$$

3. Calculate the flow capacity for the representative fraction using the carrying capacity equation above.
4. If $c_T > \rho_{sc}^*$ (flow capacity is exceeded) then deposition occurs, and the excess is spread between the fractions in the flow

$$c_i^{\text{new}} = \frac{c_i}{c_T} (c_T - \rho_{sc}^*)$$

5. If $c_T < \rho_{sc}^*$ (there is available flow capacity) then erosion occurs, and the available capacity is spread between the fractions on the bed

$$c_i^{\text{available}} = \frac{m_i}{\sum_{j \in \text{bed}} m_j} (\rho_{sc}^* - c_T)$$

Bijlage 2 ICM-KUL sedimenttransportvergelijking

Deposition-Erosion Criterion for Sediment Transport in Sewers based on Shear Stress Calculations

Authors: Ir. Raf Bouteligier, Dr. ir. Guido Vaes, Prof. dr. ir. Jean Berlamont

FACULTEIT TOEGEPASTE WETENSCHAPPEN
 DEPARTEMENT BURGERLIJKE BOUWKUNDE
 LABORATORIUM VOOR HYDRAULICA
 KASTEELPARK ARENBERG 40

B-3001 HEVERLEE
 Katholieke Universiteit Leuven on the Web



Katholieke
 Universiteit
 Leuven

Technical Paper

January 2002

The idea of the deposition – erosion criterion based on shear stress is that if the actual shear stress τ is below the critical shear stress value for deposition $\tau_{cr, deposition}$ i.e. if $\tau < \tau_{cr, deposition}$ then deposition will occur. If the actual shear stress value τ is in-between the critical shear stress value for deposition and the critical shear stress value for erosion, i.e. if $\tau_{cr, deposition} < \tau < \tau_{cr, erosion}$ then no erosion or deposition will occur and all suspended sediment is transported along the conduit. If the actual shear stress τ exceeds the critical maximal shear stress value for erosion $\tau_{cr, erosion}$ i.e. if $\tau > \tau_{cr, erosion}$ then erosion will occur.

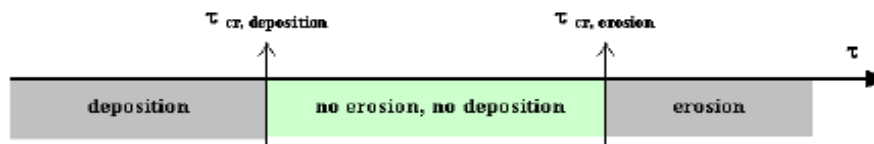


Figure 1: Illustration of the deposition – erosion criterion based on shear stress

Deposition - Erosion calculations can be made according to the following algorithm:

Calculation of the actual shear stress τ

The actual shear stress τ [N/m^2] can be calculated according to eq. (1):

$$\tau = \frac{\lambda_c}{8} \cdot \rho \cdot V^2 \quad (1)$$

where:

λ_c composite friction factor [-]

ρ density of water [kg/m^3]

V flow velocity [m/s]

Calculation of the critical shear stress values for deposition and erosion

Calculate the critical shear stress values for deposition according to eq. (2)

$$\tau_{cr, deposition} = \gamma_{deposition} \cdot g \cdot (s - 1) \cdot \rho \cdot d_{50} / 1000 \quad (2)$$

where:

$\gamma_{deposition}$ deposition parameter [-]
 g gravitational acceleration [m/s²]
 s specific sediment density [-]
 ρ density of water [kg/m³]
 d_{50} sediment particle size [mm]

Calculate the critical shear stress values for erosion according to eq. (3)

$$\tau_{cr, erosion} = \gamma_{erosion} \cdot g \cdot (s - 1) \cdot \rho \cdot d_{50} / 1000 \quad (3)$$

where:

$\gamma_{erosion}$ erosion parameter [-]
 g gravitational acceleration [m/s²]
 s specific sediment density [-]
 ρ density of water [kg/m³]
 d_{50} sediment particle size [mm]

Note: $\gamma_{deposition}$ can not exceed $\gamma_{erosion}$, i.e. $\gamma_{deposition} \leq \gamma_{erosion}$

Calculation of the deposition / erosion rate q_s

If $\tau < \tau_{cr, deposition}$ then deposition occurs. The deposition rate q_s [kg/s] can be calculated according to eq. (4)

$$q_s = -\alpha_{deposition} \cdot \left(\frac{\tau_{cr, deposition} - \tau}{\tau_{cr, deposition}} \right)^{\beta_{deposition}} \quad (4)$$

where:

τ actual shear stress [N/m²]
 $\tau < \tau_{cr, deposition}$ critical deposition shear stress [N/m²]
 $\alpha_{deposition}$ deposition parameter [kg/s] ($\alpha_{deposition} \geq 0$)
 $\beta_{deposition}$ deposition parameter [-] ($\beta_{deposition} \geq 1$)

Note: $q_s \leq 0$ (deposition)

$\alpha_{deposition} \geq 0$, maximal deposition rate (i.e. for τ equal to zero)

$\beta_{deposition} \geq 1$

Care must be taken that no more sediment will be deposited than the amount of sediment that is carried by the flow. Therefore the deposition rate q_s is limited according to eq. (5).

$$q_s \geq -C_{old} \cdot Q \quad (5)$$

where:

Cold concentration prior to deposition – erosion calculations [kg/m³]

Q flow [m³/s]

If $\tau_{cr, deposition} < \tau < \tau_{cr, erosion}$ then there will be no erosion and no deposition. All suspended sediment is transported and therefore q_s [kg/s] will be zero and C_{new} will be equal to C_{old} (see eq. 6).

If $\tau > \tau_{cr, erosion}$ then erosion occurs. The erosion rate q_s [kg/s] can be calculated according to eq. (6)

$$q_s = \alpha_{erosion} \cdot \left(\frac{\tau - \tau_{cr, erosion}}{\tau_{cr, erosion}} \right)^{\beta_{erosion}} \quad (6)$$

where:

τ actual shear stress [N/m²]

$\tau_{cr, erosion}$ critical erosion shear stress [N/m²]

$\alpha_{erosion}$ erosion parameter [kg/s]

$\beta_{erosion}$ erosion parameter [-]

Note: $q_s \geq 0$ (erosion)

$\alpha_{erosion} \geq 0$

$\beta_{erosion} \geq 1$

Care must be taken that no more sediment will be eroded than the amount of sediment that is stored in the bed. This is expressed by eq. (7).

$$q_s \cdot \Delta t \leq M_{bed} \quad (7)$$

where:

Δt timestep [s]

M_{bed} sediment mass stored in the bed [kg]

The sediment mass that is stored in the bed M_{bed} can be calculated according to eq. (8).

$$M_{bed} = A_{bed} \cdot \Delta x \cdot \rho \cdot s_b \quad (8)$$

where:

A_{bed} cross-sectional area of the sediment bed [m²]

Δx mesh size [m]

ρ density of water [kg/m³]

s_b bulk specific gravity [-]

The bulk specific gravity s_b can be calculated assuming a 60% void ratio (see eq. (9)).

$$s_b = \frac{\sigma + 0.6}{1.0 + 0.6} \quad (9)$$

Combining eq. (7) and eq. (8) results in an upper erosion limit expressed by eq. (10).

$$q_s \leq A_{bed} \cdot \rho \cdot s_b \cdot \frac{\Delta x}{\Delta t} \quad (10)$$

Calculation of the resulting sediment concentration in the flow

The new sediment concentration in the flow C_{new} (i.e. after deposition – erosion calculations) can be calculated according to eq. (11)

$$C_{new} = C_{old} + \frac{q_s}{Q} \quad (11)$$

where:

C_{old} original sediment concentration [kg/m³]

q_s deposition - erosion rate [kg/s]

Q flow [m³/s]

Six user editable parameters are introduced, three of which ($\alpha_{deposition}$ [kg/s]; $\beta_{deposition}$ [-]; $\gamma_{deposition}$ [-]) apply to deposition processes and three of which ($\alpha_{erosion}$ [kg/s]; $\beta_{erosion}$ [-]; $\gamma_{erosion}$ [-]) apply to erosion processes. An example of the application of these six parameters is shown in figure 2. Figure 3 shows an example of the deposition – erosion criterion in its most simple form, i.e. when $\alpha_{deposition} = \alpha_{erosion}$, $\beta_{deposition} = \beta_{erosion} = 1$ and $\gamma_{deposition} = \gamma_{erosion}$.

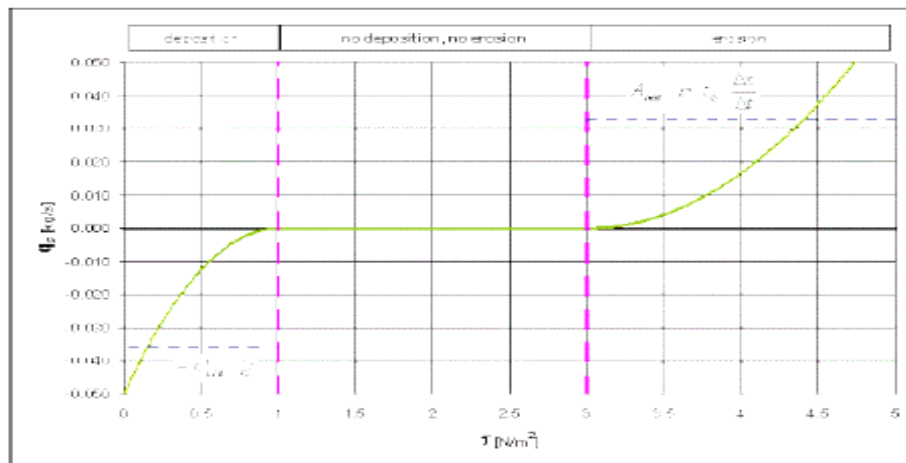
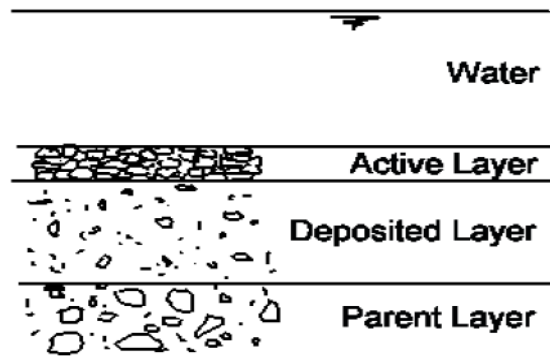


Figure 2: Example of the deposition – erosion rate criterion representing the deposition – erosion rate q_s as a function of the shear stress τ

Bijlage 3 Active layer concept ICM

River reach bed sediment

Bed sediment is treated as three separate layers: an active layer at the surface of the river bed, a deposited layer below it and the parent bed material below the deposited layer.



Active layer

The thickness of the active layer is set in the network as a factor of the d_{50} or d_{90} bed material size, or as an explicit thickness for each river reach. The method to be used is set in the **Active layer depth (1D)** field of the **Water Quality and Sediment Parameters**:

- **Explicit** - set active layer thickness to the value specified in the **Active layer depth** field of the river reach
- **D50** - calculate active layer thickness as d_{50} material size multiplied by **Active layer depth factor** specified for river reach
- **D90** - calculate active layer thickness as d_{90} material size multiplied by **Active layer depth factor** specified for river reach

As sediment is deposited in the active layer, an equal volume of material is transferred to the deposited layer below. If sediment deposited in the active layer exceeds the active layer thickness, material will be transferred directly to the deposited layer.

As sediment is eroded from the active layer, an equal volume of material will be transferred from the layer below (which may be the deposited layer, or the parent layer if net erosion has occurred). Material transferred is assumed to have the same composition as the layer from which it comes.

An upper limit can be imposed on the rate of erosion or deposition that can take place. To restrict rate of erosion/deposition, check the **Limit erosion rate** and/or **Limit deposition rate** option for the river reach and specify a **Max erosion rate** and/or **Max deposition rate**. The maximum deposition and erosion rates will be applied to each sediment fraction independently.

Default values for **Active layer depth**, **Active layer depth factor**, **Max erosion rate** and **Max deposition rate** are defined in the **User Defined Defaults** for River Reaches / Bridges.

Deposited layer

The deposited layer consists of material that has been deposited in the active layer and transferred downwards once the active layer reaches its specified maximum thickness.

The layer can shrink to zero thickness when all of its material is transferred into the active layer.

Parent layer

The parent layer is the river section bed. Its composition is specified by the **Sediment Gradings** referenced by the river reach sediment grading fields.

The parent layer will be eroded (if the erodible depth is non-zero) by transferring material into the active layer when the deposited layer thickness is zero.

No material will be added to the parent layer.