

**Advies voor algemeen  
functioneel ontwerp voor de  
6e-generatie modellen van  
RWS**





# **Advies voor algemeen functioneel ontwerp voor de 6e-generatie modellen van RWS**

Aukje Spruyt  
Tony Minns  
Mohamed Yossef  
David Kerkhoven  
Fimijn Zijl  
Menno Genseberger

1230071-011



## Titel

Advies voor algemeen functioneel ontwerp voor de 6e-generatie modellen van RWS

<b>Opdrachtgever</b>	<b>Project</b>	<b>Kenmerk</b>	<b>Pagina's</b>
Rijkswaterstaat Water, Verkeer en Leefomgeving	1230071-011	1230071-011-ZWS-0009	80

## Trefwoorden

D-HYDRO, D-Flow Flexible Mesh, zesde generatie, RWS, functioneel ontwerp, pilots

## Samenvatting




Dit rapport beschrijft een advies voor een landelijk afgestemd globaal functioneel ontwerp voor alle nieuwe zesde-generatie modelschematisaties voor RWS op basis van de D-Flow Flexible Mesh module binnen de D-HYDRO Suite. Dit ontwerp zal worden gebruikt als input voor het maken van een plan van aanpak per modelschematisatie en het definitief opstellen en afregelen van de modelschematisaties vanaf 2017.

Het algemeen functioneel ontwerp is opgesteld op basis van de resultaten van verschillende werksessies met zowel technisch inhoudelijk betrokkenen als verschillende stakeholders van binnen en buiten RWS, alsmede de resultaten van een drietal pilot-applicaties. Er is daarbij onderscheid gemaakt tussen het algemene conceptuele raamwerk en het technisch functioneel ontwerp.

Dit advies en de onderliggende rapporten van de pilot-applicaties zal begin 2017 worden besproken tijdens een aantal werksessies met RWS. Aan de hand hiervan wordt eventueel een tweede versie van dit rapport opgesteld, waarin de resultaten en aanbevelingen uit deze werksessies worden verwerkt.

## Referenties

-

Versie	Datum	Auteur	Paraaf	Review	Paraaf	Goedkeuring	Paraaf
1	dec 2016	Aukje Spruyt, Tony Minns, Mohamed Yossef David Kerkhoven, Firmijn Zijl, Menno Genseberger		Erik de Goede		Gerard Blom	

## Status

definitief



## Inhoud

<b>1</b>	<b>Inleiding</b>	<b>1</b>
1.1	Achtergrond	1
1.2	Doelstelling	1
1.3	Organisatie en werkwijze	1
1.4	Leeswijzer	3
<b>2</b>	<b>Conceptueel raamwerk</b>	<b>5</b>
2.1	Van de vijfde- naar zesde-generatie modelschematisaties	5
2.2	Waterlichamen	5
2.3	Toepassingen	6
2.4	Specifieke eisen aan het conceptueel ontwerp	8
2.4.1	Landelijk model	9
2.4.2	Overlapgebieden	10
2.4.3	Proces roosteraanpassing en -verfijning	10
2.4.4	Koppelen van modellen	11
2.4.5	Knippen van modellen	12
2.4.6	Buitenlandse modellen	12
2.5	Wettelijke en bestuurlijke kaders	12
2.5.1	Waterwet	13
2.5.2	Omgevingswet	14
2.5.3	Nieuwe normering	14
2.5.4	Kader Toepassing Netwerkmodellen Water en Scheepvaart	14
2.5.5	Beleidslijn Grote Rivieren	14
2.5.6	Rivierkundig Beoordelingskader (RBK)	14
2.5.7	Leggers	15
2.5.8	Ontgrondingenwet	16
2.5.9	Natuurwet	16
2.5.10	Verdragen met het buitenland	16
2.5.11	Europese kaders	16
<b>3</b>	<b>Technisch functioneel ontwerp</b>	<b>17</b>
3.1	Algemeen	17
3.2	Roosterresolutie	18
3.3	Numerieke aspecten	19
3.3.1	Tijdstap	19
3.3.2	Projectie bodem	19
3.3.3	Horizontale turbulentie	21
3.4	Kunstwerken en overlaten	22
3.4.1	D-RTC	22
3.4.2	Overlaten	22
3.5	Relevante processen	22
3.6	Kalibratie en validatie	23
3.7	Onzekerheidsanalyse	23
<b>4</b>	<b>Pilot-applicatie Rivieren</b>	<b>25</b>
4.1	Processen	25
4.2	Roostergeneratie en gridconvergentie	25

4.3	Numerieke instellingen en modelleeraspecten	26
4.4	Kalibratieprocedure	27
4.4.1	Kalibratie met aanpak vijfde-generatie modellen	28
4.4.2	Overgangstraject in kalibratie zomerbed	28
<b>5</b>	<b>Pilot-applicatie Zeeën en Estuaria</b>	<b>31</b>
5.1	Roostergeneratie	31
5.1.1	Roostergeneratie op basis van polygonen	31
5.1.2	Roostergeneratie op basis van automatische Courant verfijning	32
5.1.3	Verdere roosterverfijning	32
5.2	Rekentijden	32
5.2.1	Vergelijking met 5 <sup>e</sup> generatie WAQUA modellen	32
5.2.2	Invloed van roosterverfijning	33
5.3	Roosterconvergentie	33
5.4	Numerieke en fysische instellingen	34
5.4.1	Invloed van conveyance instellingen	34
5.4.2	Impact of bed-level type settings	35
5.4.3	Horizontale viscositeit	35
5.4.4	Nonlin2D	35
5.4.5	Implicietheid van de tijdsintegratie	35
<b>6</b>	<b>Pilot-applicatie Meren</b>	<b>37</b>
6.1	Inleiding	37
6.2	Processen	37
6.3	Roostergeneratie	37
6.4	Verificatie	38
6.5	Rekentijden	39
<b>7</b>	<b>Conclusies en aanbevelingen</b>	<b>41</b>
7.1	Conceptueel raamwerk	41
7.2	Technisch functioneel ontwerp	42
7.3	Pilot-applicaties	42
7.4	Prioritering en planning zesde generatie	42
<b>8</b>	<b>Referenties</b>	<b>45</b>
<b>Appendices</b>		
<b>A</b>	<b>Bijlage: Samenvatting Workshops D-HYDRO</b>	<b>A-1</b>
<b>B</b>	<b>Bijlage: Lijsten met toepassingen en processen</b>	<b>B-1</b>
<b>C</b>	<b>Bijlage: Lijst gebruikte numerieke basisinstellingen</b>	<b>C-1</b>
<b>D</b>	<b>Bijlage: Pilot-applicatie Kusten</b>	<b>D-1</b>
<b>E</b>	<b>Bijlage: Pilot-applicatie Rivieren</b>	<b>E-1</b>
<b>F</b>	<b>Bijlage: Pilot-applicatie Meren</b>	<b>F-1</b>



**G Good Modelling Practice**

**G-1**

**H Bijlage: Onzekerheidsanalyse**

**H-1**



## Lijst van acroniemen

Delft3D Flexible Mesh Suite	Geïntegreerd modelsysteem met ongestructureerde en gestructureerde roosters voor 1D2D3D modellering in open water. Opvolger van Delft3D v4.xx Suite.
Delft3D FM Suite	Afkorting van Delft3D Flexible Mesh Suite
D-HYDRO Suite	Nederlandse benaming voor Delft3D FM Suite voor gebruik in Nederland.
D-Flow Flexible Mesh	Module voor waterkwantiteit
D-Flow FM	Afkorting van D-Flow Flexible Mesh
D-Morphology	Module voor morfologie
D-Rainfall Runoff	Module voor de neerslagafvoermmodellering
D-Real Time Control	Module voor het aansturen van kunstwerken
D-RTC	Afkorting van D-Real Time Control
D-Water Quality	Module voor waterkwaliteit
D-Particle Tracking	Module voor modellering van deeltjes
Delft3D v4.xx Suite	Geïntegreerd modelsysteem met curvilineaire roosters voor 2D3D modellering in open water
Delta Shell	Geïntegreerd modelleerframework voor integratie van modellen, data en tools.
FEWS	Hydrologisch voorspelsysteem van Deltares
G6	Zesde generatie
NetCDF	Network Common Data Form; Internationale standaard voor in- en uitvoerfiles
OpenDA	Open Interface standaard voor modelkalibratie en data-assimilatie
OpenMI	Open Modelling Interface voor het koppelen van modelsystemen
Simona	Geïntegreerd modelsysteem voor 2D3D modellering in open water van Rijkswaterstaat. Afkorting van <b>S</b> imulatie <b>MO</b> dellen <b>NA</b> tte waterstaat.
SOBEK-RE	1D modelsysteem voor rivier toepassingen van Rijkswaterstaat
SOBEK-RUR	1D modelsysteem voor rivier toepassingen van Deltares. Hierbij staat "RUR" voor RiverUrbanRural, ook wel SOBEK 2 genoemd
SOBEK 3	Opvolger van SOBEK-RUR en SOBEK-RE voor rivier toepassingen. Geïntegreerd binnen het Delta Shell framework
WAQUA	2D modelsysteem dat onderdeel is van Simona



# 1 Inleiding

## 1.1 Achtergrond

Op 15 september 2015 is een mijlpaal gerealiseerd door de release van versie 1.0 van het softwarepakket D-HYDRO Suite. D-HYDRO is het modelleringsplatform van de toekomst voor hydrodynamica, morfodynamica, waterkwaliteit en golven (Deltares, 2016a,b,c). Deze software-suite wordt de vervanger voor het door RWS gebruikte Simona pakket en het SOBEK-RE softwarepakket. Het SOBEK-RE softwarepakket is de afgelopen jaren reeds vervangen door SOBEK 3, een onderdeel binnen de D-HYDRO suite. Er zijn al verschillende modelschematisaties opgezet in SOBEK 3 en deze modelschematisaties worden ook al gebruikt in diverse primaire processen bij RWS. Op den duur worden Simona (WAQUA en TRIWAQ) en Delft3D modelschematisaties vervangen door D-Flow Flexible Mesh modelschematisaties binnen de D-HYDRO Suite. Dit markeert de overgang van de gestructureerde rooster aanpak naar de flexibele-rooster modeleringsmogelijkheden in D-HYDRO.

Met het in gebruik nemen van D-HYDRO Suite stapt RWS over van modelschematisaties in de vijfde generatie naar modelschematisaties in de zesde generatie (G6).

Door RWS is aan Deltares gevraagd om de mogelijkheden te onderzoeken die de nieuwe software biedt en een uitgebreid functioneel ontwerp te leveren dat er voor zorgt dat met de bouw van de zesde-generatie modellen kan worden gestart. Dit functioneel ontwerp is bedoeld om de ontwikkeling (opzet, kalibratie en gebruik) van de eerste set modellen in goede banen te leiden. Deze eerste modellen zullen bestaan uit een model van een rivier, zee en meer. Nadat de eerste modellen zijn opgezet, zullen de richtlijnen opnieuw worden bekeken en indien nodig aangepast.

## 1.2 Doelstelling

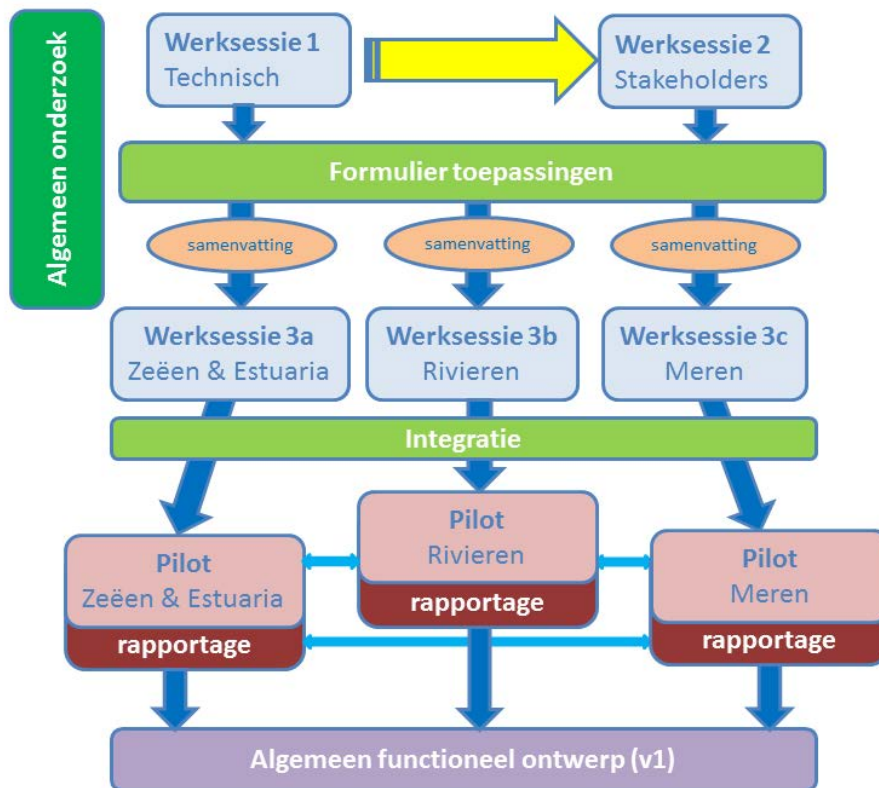
Het doel is een gedragen, landelijk afgestemd globaal functioneel ontwerp op te stellen voor alle nieuwe zesde-generatie modelschematisaties. Dit ontwerp kan worden gebruikt als input voor het maken van een plan van aanpak per modelschematisatie en het definitief opstellen en afregelen van de modelschematisaties vanaf 2017.

## 1.3 Organisatie en werkwijze

De organisatie van de totstandkoming van dit globaal functioneel ontwerp is weergegeven in Figuur 1.1. Voor het uitvoeren van deze studie is een aantal werksessies gehouden met betrokkenen om de eisen, wensen en verwachtingen van de zesde-generatie modelschematisaties van eindgebruikers en andere stakeholders in beeld te brengen.

Een eerste werksessie is op 20 januari 2016 gehouden bij Deltares met vier deelnemers van RWS-WVL en 19 deelnemers van Deltares. Tijdens deze werksessie is discussie gevoerd over de volgende onderwerpen:

- denken vanuit RWS toepassingen
- conceptueel ontwerp van een landelijk model
- technische aandachtspunten



Figuur 1.1 Organisatie opzetten algemeen functioneel ontwerp zesde generatie

Op 3 maart 2016 is een tweede werksessie gehouden bij Deltares met 16 deelnemers van Rijkswaterstaat, 2 deelnemers van WL-Antwerpen, 6 vertegenwoordigers van diverse adviesbureaus en 12 deelnemers van Deltares. Tijdens deze tweede werksessie is het accent gelegd op:

- denken vanuit de primaire processen bij RWS
- denken vanuit een landelijke benadering
- denken vanuit de wettelijke en beoordelingskaders

Een samenvatting van de belangrijkste uitkomsten en bevindingen van beide werksessies is bijgesloten in Bijlage A.

Tijdens deze werksessies is een keuze gemaakt om te beginnen met het opzetten van drie pilotschematisaties, te weten:

- Zeeën en estuaria (Bijlage D);
- Rivieren (zie Bijlage E);
- Meren (Bijlage F)

Het uitgangspunt hierbij is dat de basisinstellingen overal hetzelfde moeten zijn (zie Bijlage C). Desalniettemin hebben veel van deze instellingen en parameters een fysische betekenis en zijn deze afhankelijk van de lokale fysica en de onderliggende processen of de schematisatie. Bij het opzetten van de pilotschematisaties is zo veel mogelijk gebruik gemaakt van de basisinstellingen. De specifieke aspecten die bij iedere pilotschematisatie zijn aangepakt zijn beschreven in de relevante bijlagen. Eventuele afwijkingen van de basisinstellingen zijn beschreven en onderbouwd voor opname in het uiteindelijke functioneel ontwerp.

Nadat de eerste modelschematisaties opgezet zijn, zullen de richtlijnen opnieuw worden bekeken en indien nodig aangepast.

#### **1.4 Leeswijzer**

Dit rapport bestaat uit zeven hoofdstukken, waaronder deze inleiding. In hoofdstuk 2 wordt begonnen met het schetsen het conceptuele raamwerk voor de zesde generatie. Het algemeen technisch functioneel ontwerp wordt gegeven in hoofdstuk 3. Dit technisch functioneel ontwerp is met name gebaseerd op de resultaten van drie pilot-applicaties. De samenvattingen van het onderzoek in de pilot-applicaties voor Rivieren, Zeeën & Estuaria en Meren worden gegeven in respectievelijk hoofdstuk 4, 5 en 6. De uitgebreide rapportages van de resultaten van de pilot-applicaties zijn als bijlagen aan dit rapport toegevoegd (bijlage D, E en F). Ten slotte volgen de conclusies en aanbevelingen van het advies in Hoofdstuk 6.





## 2 Conceptueel raamwerk

### 2.1 Van de vijfde- naar zesde-generatie modelschematisaties

Het opzetten van nieuwe, zesde-generatie modelschematisaties start vanuit de gedachte dat er één landelijk-dekkend model voor heel Nederland wordt gemaakt. Alle modelschematisaties, die onderdeel uitmaken van het landelijke model, moeten naadloos op elkaar aansluiten. De overgang naar D-HYDRO Suite houdt in het opzetten van nieuwe modelschematisaties gebruikmakend van de nieuwe beschikbare mogelijkheden en concepten. De nieuwe mogelijkheden zijn stapsgewijs verkend door in eerste instantie gebruik te maken van de reeds opgedane ervaringen met het omzetten van enkele bestaande modelschematisaties naar D-HYDRO Suite. Op basis van deze omgezette modellen is gekeken naar wat er meer in de zesde-generatie bereikt zou kunnen worden (t.o.v. eerdere generaties). Het gebruik van D-HYDRO Suite biedt op sommige vlakken nieuwe kansen die niet bij Simona en/of Delft3D aanwezig waren (bijv. modelleerflexibiliteit, ongestructureerd rekenen, modelonafhankelijke invoer, etc.).

Met de ontwikkeling van de vijfde-generatie modelschematisaties is er voor gezorgd dat de verschillende modelgebieden fysiek op elkaar aansluiten en consistent zijn opgebouwd. Voor de zesde-generatie geldt eenzelfde eis. Vanwege rekentijden moet het landelijke model worden opgeknipt in logische eenheden, veelal watersystemen. Door te werken vanuit de gedachte van één landelijk model heeft dat ook consequenties voor de keuze en instelling van parameters. Hoewel het uitgangspunt is dat de basisinstellingen overal hetzelfde moeten zijn, hebben veel van de instellingen een fysische betekenis en zijn deze afhankelijk van de lokale fysica of schematisatie.

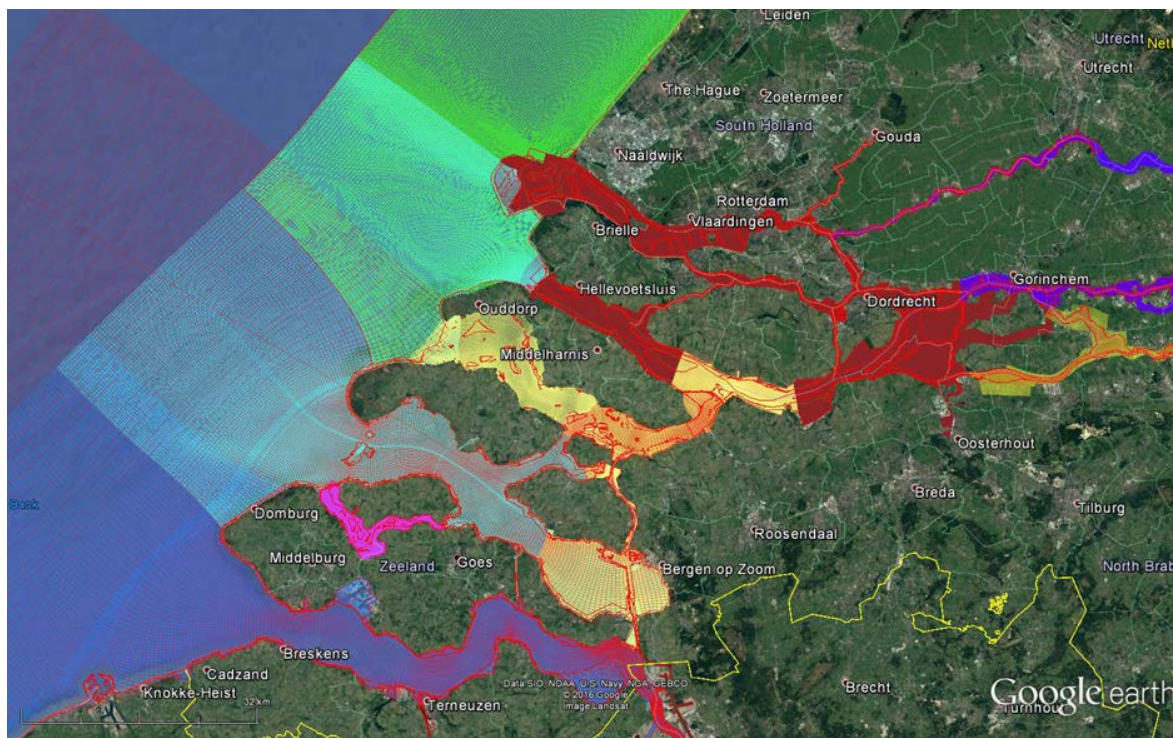
### 2.2 Waterlichamen

Binnen het RWS-beheergebied (vastgelegd in de Waterwet<sup>1</sup>) is een aantal waterlichamen geïdentificeerd. De belangrijkste waterlichamen in de vigerende vijfde-generatie modelschematisaties zijn:

- Continentale Plat (DCSM v6)
- Eems Dollard
- IJmuiden
- Lauwersmeer
- Volkerak Zoommeer
- Grevelingen
- Veerse Meer
- Oosterschelde
- Westerschelde en Zeeschelde
- Maas
- Rijntakken
- Rijn-Maasmonding (RMM)
- IJsselmeer-Vechtdelta
- Markermeer IJmeer Eem
- Veluwerandmeren
- Noordzeekanaal+Amsterdam-Rijnkanaal
- Twentekanal
- Midden Limburg en Noord-Brabantse kanalen

<sup>1</sup> [www.helpdeskwater.nl/onderwerpen/wetgeving-beleid/waterwet/kaarten/kaart-waterregeling/](http://www.helpdeskwater.nl/onderwerpen/wetgeving-beleid/waterwet/kaarten/kaart-waterregeling/)

Hoewel de modelschematisaties van deze waterlichamen ontwikkeld zijn om goed op elkaar aan te sluiten, is er door de jaren heen een verscheidenheid aan modelschematisaties ontstaan met enkele dubbelingen en overlap in schematisatiegebieden (zie Figuur 2.1).



Figuur 2.1 Voorbeeld van vijfde-generatie schematisaties in Zuidwest Nederland met veel overlap en dubbelingen

De huidige indeling van modelgrenzen is ook gegeven doordat bepaalde regionale diensten verantwoordelijk zijn voor een bepaald gebied en elke watersysteem zijn eigen specifieke eisen heeft. Daarnaast legt ook de beschikbaarheid van geschikte randvoorwaarden beperkingen op ten aanzien van de ligging van de modelgrenzen. De huidige modelgrenzen bieden dus een goed startpunt voor de zesde-generatie. Bij het opzetten van de nieuwe zesde-generatie modelschematisaties moet ook worden nagedacht over hoe groot de modelgebieden moeten zijn, waar de optimale locaties voor de nieuwe koppelranden zijn, en waar geschikte randvoorwaarden beschikbaar zijn. Dit kan leiden tot een ander aantal modelschematisaties voor de zesde generatie. Het denken vanuit een landelijk-dekkend rooster en schematisatie voor heel Nederland hoeft echter niet per se te resulteren in één (draaiend) landelijk model.

### 2.3 Toepassingen

De kernvraag bij het opstellen van de eisen en wensen aan de nieuwe modelschematisaties is:

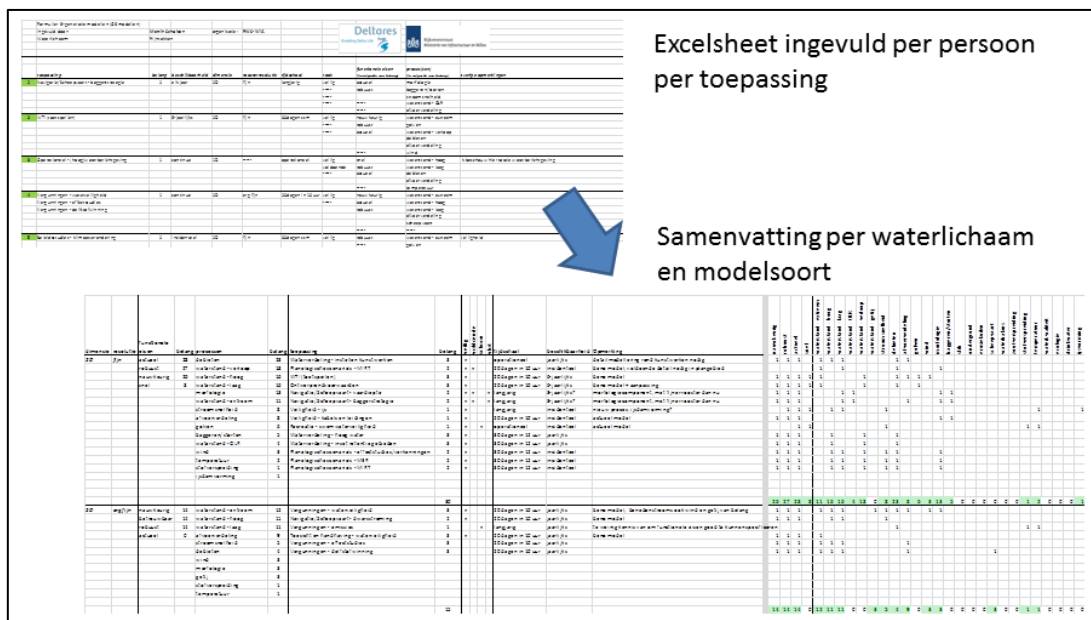
*“Wat zouden we in de zesde generatie anders willen (t.o.v. de vijfde generatie) en welke mogelijkheden biedt D-HYDRO Suite hierbij?”*

Bewust is gekozen om niet te gaan voor omzetten van de vijfde generatie, maar wel om de leerpunten en aandachtspunten uit de vijfde generatie mee te nemen bij het opzetten van de zesde-generatie modellen.

Elke toepassing stelt zijn eigen eisen aan de te gebruiken modellen. Deze eisen, wensen en verwachtingen zijn geïnventariseerd volgens een indeling langs de lijn van de RWS-missie:

- Veilig;
- Schoon;
- Voldoende;
- Vlot.

Hiervoor zijn eerst Excelsheets ingevuld per persoon en per toepassing en hiervan is vervolgens een samenvatting gemaakt per modelgebied, zie Figuur 2.2. De samenvatting van deze inventarisatie is te vinden in bijlage B en diende als input voor de pilots en hun specifieke werksessies. Op deze manier staan de toepassingen voor RWS centraal en worden de modellen hiervoor gebouwd, in plaats van dat er eerst een model wordt gemaakt en dat iedere toepassing hiervan gebruik moet maken (of het geschikt is of niet).



Figuur 2.2 Inventarisatie toepassingen RWS.

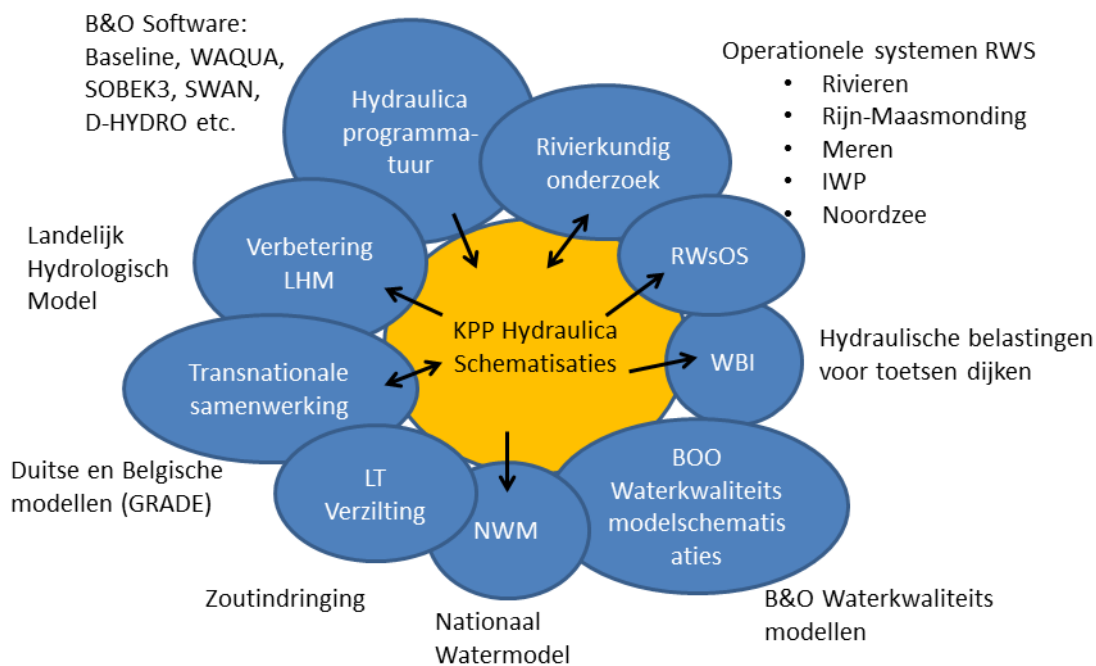
Daarnaast is tijdens de werksessies in januari en maart 2016 ook veel aandacht besteed aan specifieke eisen, wensen en trends m.b.t. de toepassingen. Hier volgt een lijst van een aantal specifieke punten die door meerdere groepen genoemd zijn.

- Denken vanuit de hoofdprocessen van RWS, t.w.
  - o Aanleg en onderhoud,
  - o Omgevings- en assetmanagement,
  - o Scheepvaartverkeersmanagement,
  - o Vergunningverlening,
  - o Watermanagement
- Denken vanuit waterlichamen en niet vanuit modellen
- Graag meer aandacht voor:
  - o waterkwaliteit (inclusief saliniteit, temperatuur, lozingen)
  - o morfologie (inclusief lokale ontgrondingen, suppleties, bodemdaling, zandwinning)
  - o dwarsstromen op schepen t.b.v. vergunningverlening
  - o statistische informatie (maxima, minima, frequenties van optreden, snel nauwkeurigheid kunnen testen)

- Welke eisen worden gesteld aan het afregelen en het kalibreren van modellen onder dynamische omstandigheden en met andere parameters dan alleen waterstanden?
- Meer aandacht voor sturing van kunstwerken t.b.v. waterverdeling en sluitmomenten van keringen

Alle individuele opmerkingen en vragen werden genoteerd in de verslagen van deze werksessies<sup>23</sup>.

De modelschematisaties die binnen KPP Hydraulica Schematisaties worden opgezet staan niet op zichzelf maar hebben een relatie met allerlei andere KPP projecten (zie Figuur 2.3). Tijdens de opzet van de zesde-generatie modellen dient vanuit deze projecten duidelijk gemaakt te worden wat hun eisen en wensen zijn aan de functionaliteit van deze modellen. Ook dient er binnen deze projecten rekening te worden gehouden dat de overgang naar de nieuwe generatie modellen (en bijbehorende nieuwe software) consequenties kan hebben voor de werkwijze en systemen zoals die nu gehanteerd worden. De planning voor de opzet van de zesde-generatie modellen dient daarom duidelijk met deze partijen te worden gecommuniceerd.



Figuur 2.3 Interactie van KPP Hydraulica Schematisaties met andere KPP projecten.

## 2.4 Specifieke eisen aan het conceptueel ontwerp

Tijdens de werksessies is ook specifiek aandacht besteed aan de volgende vragen:

- Hoe ziet het conceptuele framework van de zesde-generatie modellen eruit?
- Hoe willen we de verschillende modellen gebruiken en beheren?

In de volgende paragrafen wordt hierop verder ingegaan, mede op basis van de input vanuit de werksessies.

<sup>2</sup> 1230071-011-ZWS-0002-v2-v-SAMENVATTING- 6e generatie modelschematisaties in D-HYDRO

<sup>3</sup> 1230071-011-ZWS-0006-v-6e generatie modelschematisaties in D-HYDRO 2e workshop\_final

#### 2.4.1 Landelijk model

Het opzetten van nieuwe, zesde-generatie modelschematisaties start vanuit de gedachte dat er één landelijk-dekkend model voor heel Nederland wordt gemaakt.

Een aantal doelen waarvoor een “landelijk” model zou kunnen worden ingezet zijn:

- Genereren van randvoorwaarden (voor de deelmodellen);
- Waterverdelingsvraagstukken;
- Beleidsstudies (nesting en/of koppelen van detailmodellen)
- Koppeling aan landelijke database



*Figuur 2.4 Dekking van de huidige beschikbare Baseline schematisaties.*

Dit landelijke model van heel Nederland hoeft niet overal dezelfde dimensie en/of resolutie te hebben. Op dit moment is er bijvoorbeeld al een eerste opzet van een nieuw landelijk SOBEK-model (LSM-RW), waarin alle beschikbare SOBEK 3-schematisaties van RWS aan elkaar zijn gekoppeld. Dit is echter een 1D-model en het is de vraag of deze nauwkeurig genoeg is voor de generatie van randvoorwaarden voor de deelmodellen. Het is daarom wenselijk om een landelijk dekkend 2D-rooster en schematisatie te genereren. Op deze manier is er in ieder geval een totaal landelijk overzicht beschikbaar, zodat het veel makkelijker wordt om allerlei zaken consistent aan te pakken en is er ook aandacht voor de koppelings- en overlapgebieden. Dit hoeft alleen niet per se te resulteren in een (draaiend) landelijk 2D-model.

De onderliggende datastructuur van de huidige Baseline 5 is vooral gericht op de modelopzet volgens de vijfde generatie. Eén van de belangrijkste redenen dat er nog geen Baseline-schematisatie van heel Nederland bestaat, is dat deze heel groot zou worden qua opslagcapaciteit, en daardoor onwerkbaar wordt (binnen ArcGIS). Dit wordt met name veroorzaakt door de hoogte-informatie. Voor een overzicht van de nu beschikbare Baseline schematisaties, zie Figuur 2.4.

Met de overgang naar de zesde generatie wordt er ook gewerkt aan een nieuwe Baseline versie, waarin de database-structuur wordt herzien. Hierbij dient ook rekening te worden gehouden met het feit dat in D-HYDRO (bijna) alle modelinformatie voortaan in modelonafhankelijke (x/y)-coördinaten beschreven wordt.

Op dit moment wordt verkend in hoeverre het mogelijk is om wel een landelijke database op te zetten in Baseline. Deze verkenning genereert ook randvoorwaarden voor de opzet van de nieuwe Baseline structuur.

#### 2.4.2 Overlapgebieden

De huidige vijfde-generatie modellen overlappen elkaar in zogeheten overlapgebieden. Deze overlapgebieden zijn echter tussen de modellen zo veel mogelijk gelijk getrokken. Er zijn op dit moment een aantal zwakke punten gerelateerd aan de afregeling van de overgangsgebieden. Voorbeeld hiervan is de overgang van de Rijntakken en de Maas in het getijgebied. Dat gaat niet goed ten aanzien van de waterstanden, aangezien in de afregeling van de rivieren onvoldoende getij wordt meegenomen. Bij de meren speelt iets vergelijkbaars bij de overgang vanuit de IJssel naar de meren, waar wind(opzet) opeens een belangrijke rol gaat spelen.

Ook in de zesde-generatie modellen is het wenselijk om de modellen elkaar (gedeeltelijk) te laten overlappen, in ieder geval tijdens de opzet en afregeling. Dit is namelijk noodzakelijk omdat een goede afregeling alleen kan worden uitgevoerd als je ver genoeg van de rand van het model zit. Hierbij moet wel rekening worden gehouden met de tekortkomingen die in de vijfde-generatiemodellen aan het licht zijn gekomen. Om deze tekortkomingen te voorkomen kan worden gedacht aan een iteratieve aanpak.

*Voorbeeld:*

- 1 *Opzetten en afregelen modellen Rijntakken, Maas en Noordzee.*
- 2 *Opzetten en afregelen modellen Rijn-Maasmonding en IJssel-Vechtdelta.*
- 3 *Overlapgebieden opnieuw afregelen met gekoppelde modellen.*

#### 2.4.3 Proces roosteraanpassing en -verfijning

Vanuit RWS is er de wens om te komen tot een beheersbaar modellenpakket. Zomaar willekeurige roosteraanpassingen en verfijningen toestaan draagt daaraan niet bij. Elke roosteraanpassing genereert namelijk in principe een ander modelschematisatie. Het maakt hierbij echter wel uit of de modellen worden gebruikt in onderzoeksvragen of voor vergunningverlening. In het eerste geval is er duidelijk meer flexibiliteit mogelijk. Vanwege de flexibiliteit die D-HYDRO FM biedt wordt het nu echter wel veel makkelijker om rooster-*uitbreidingen* te realiseren.

Voor sommige toepassingen zullen gebruikers een lokale verfijning of aanpassing van het rooster moeten gebruiken voor specifieke, lokale problemen. RWS zal deze verfijnde modellen niet zelf opzetten

Er moet een protocol/kwaliteitshandboek worden opgesteld voor het toepassen van lokale verfijningen (en/of aanpassingen) om duidelijke richtlijnen voor beheerders en marktpartijen te geven t.b.v. kwaliteitsborging en modellenbeheer. Hierin zou informatie moeten worden opgenomen over de kwaliteitsborging van een uitgevoerde verfijning, en de eisen aan een eventuele herkalibratie van het model.

Daarnaast kan het ook wenselijk zijn om voor bepaalde gebieden wel vooropgezette verfijnde modellen te maken die voor specifieke toepassingen moeten worden gebruikt. Dit zorgt er voor dat bepaalde procedures op een eenduidige manier kunnen worden toegepast.

#### 2.4.4 Koppelen van modellen

De huidige vijfde-generatie modellen zijn apart van elkaar opgezet, maar de roosters zijn zodanig gegenereerd dat ze onderling op elkaar aansluiten. Dit is ook de insteek voor de zesde generatie. Er wordt in principe gedacht vanuit het opzetten van één rooster voor heel Nederland. Dit maakt het mogelijk om de modellen onderling te koppelen.

Naast de koppeling van gelijkwaardige modellen onderling is er ook een grote wens om modellen van verschillende dimensies en/of resoluties aan elkaar te kunnen koppelen. Op deze wijze kun je inzoomen op het gebied waarin je bent geïnteresseerd, terwijl de globale effecten ook worden meegenomen.

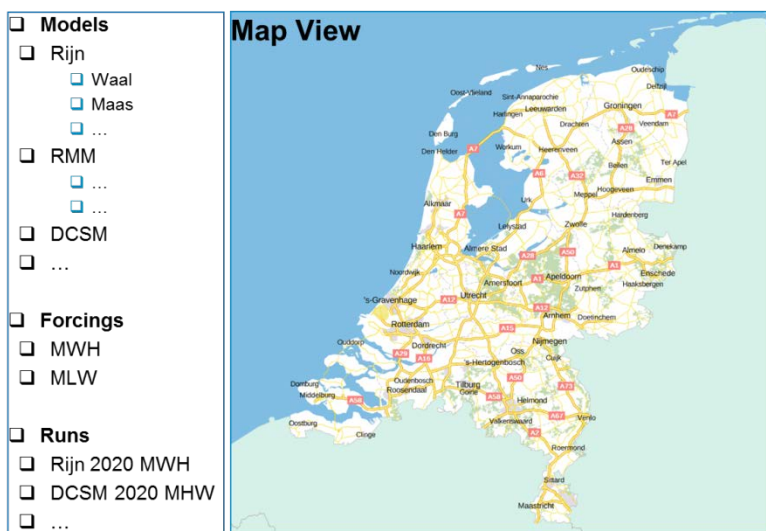
*Voorbeeld Zoutindringing bij IJmuiden: Je wilt een 3D-model gebruiken rond de sluizen en op het Noordzeekanaal. Daarna kan worden overgaan op een 2D-model. Als je ook de zoetwaterinname op de Lek en het effect hiervan op de scheepvaart wilt meenemen, dan kan er verder worden gekoppeld met een 1D model tot aan Lobith.*

Daarnaast is er ook de wens om lokaal bij objecten 3D kunnen rekenen. Hierbij valt te denken aan ontgrondingskuilen en stroming rondom overlaten en/of andere constructies.

Het verdient echter aanbeveling om eerst de (deel)modellen goed op te zetten. Hierbij moet echter wel rekening worden gehouden met de wens dat het model in een later stadium koppelbaar moet zijn. Je krijgt dan een lappendeken van (gekalibreerde) modellen (componenten) die makkelijk aan elkaar te koppelen zijn, zowel 1D als 2D (als 3D).

Als ultieme toekomst kan worden gedacht aan een systeem (in bijv. DeltaShell), waarin alle modellen beschikbaar zijn en het mogelijk is om zelf je totale model samen te stellen en verschillende scenario's door te rekenen (zie Figuur 2.5).

Er zijn echter nog wel een paar kanttekeningen met betrekking tot de software. In het huidige D-HYDRO pakket heeft de 3D-hydrodynamica nog een bèta-status. Voordat hier officiële modellen voor RWS mee gemaakt kunnen worden, dient dit in de standaard release te zijn opgenomen. Daarnaast is de huidige 1D-functionaliteit opgenomen in de aparte module SOBEK 3, welke niet direct koppelbaar is met D-Flow FM (alleen de zogeheten laterale koppeling is mogelijk). Binnen D-Flow FM is ook een 1D-component beschikbaar, maar deze heeft (nog) niet dezelfde functionaliteiten als SOBEK 3. Het is daarom wenselijk om hier in de komende tijd op in te zetten, zodat het koppelen van 1D-modellen met meer-dimensionale modellen binnen D-HYDRO inderdaad tot de mogelijkheden gaat behoren.



Figuur 2.5 Eventueel toekomstbeeld van een globaal systeem voor de aansturing van modellen.

## 2.4.5 Knippen van modellen

Naast het koppelen van modellen om een groter gebied te kunnen modelleren moet het ook mogelijk zijn om juist in te zoomen op een bepaald deel, door een model af te knippen. Dit is in principe in de huidige vijfde-generatie modellen ook al mogelijk, door ofwel het rooster aan te passen of het sectiebestand in Baseline (en daardoor de zogeheten enclosure). De randvoorwaarden die op de geknipte modellen worden opgelegd worden dan bij voorkeur gegenereerd door het totale model (indien er geen (goede) metingen beschikbaar zijn). Er dient te worden nagegaan of bij de opzet van de basis modellen niet al moet worden uitgegaan van een landelijke rooster en bijbehorende database en de basis modellen te zien als geknipte modellen uit het landelijke model.

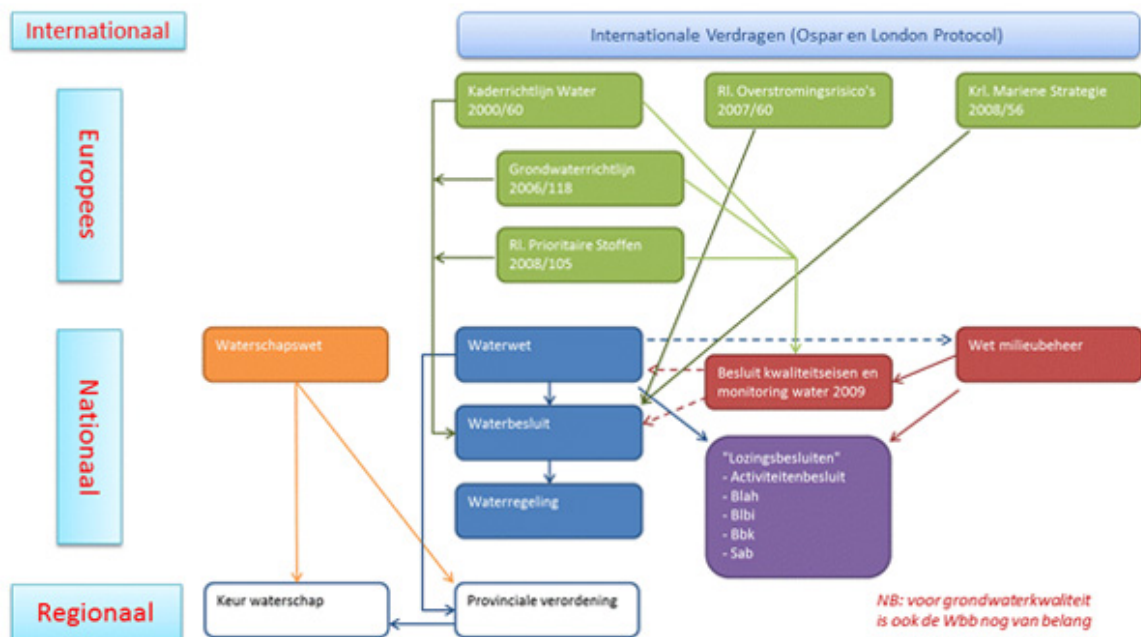
## 2.4.6 Buitenlandse modellen

Daarnaast zijn er aspecten ten aanzien van de koppelbaarheid met buitenlandse modellen, zoals bijvoorbeeld voor de Maas, de Schelde en de Rijn. Een aandachtspunt is hier onder andere de geo-referentie van schematisaties. Bij de samenwerking met buitenlandse partners geldt wel dat het noodzakelijk is om een koppeling tussen de modellen te kunnen bewerkstelligen, maar je kunt niet (zomaar) dezelfde werkwijze opleggen.

## 2.5 Wettelijke en bestuurlijke kaders

De modelschematisaties van RWS worden toegepast binnen allerlei wettelijke en bestuurlijke kaders (zie ook Figuur 2.1). Hiermee dient rekening te worden gehouden bij de opzet van de zesde-generatie modellen. In deze paragraaf worden een aantal belangrijke kaders genoemd en kort besproken. De informatie uit deze paragraaf is met name gebaseerd op de discussie die over dit onderwerp is gevoerd tijdens de algemene workshop op 3 maart 2016 (zie bijlage A).





Figuur 2.6 Overzicht van relevante regelgeving voor water (bron: [www.infomil.nl/onderwerpen/klimaat-lucht/handboek-water/wetgeving/schema](http://www.infomil.nl/onderwerpen/klimaat-lucht/handboek-water/wetgeving/schema))

Algemeen geldt dat voor RWS consistentie en reproduceerbaarheid van belang zijn en het kunnen aantonen hoe tot de resultaten is gekomen en of/hoe er met verschillende zaken rekening is gehouden. Elk van de wettelijk kaders stelt uiteindelijk eisen aan de uitlegbaarheid van de resultaten en over de bandbreedte die binnen het model noodzakelijk is.

### 2.5.1 Waterwet

Op 22 december 2009 is de Waterwet in werking getreden. Een achttal wetten is samengevoegd tot één wet, de Waterwet. De Waterwet regelt het beheer van oppervlaktewater en grondwater, en verbetert ook de samenhang tussen waterbeleid en ruimtelijke ordening. Daarnaast levert de Waterwet een belangrijke bijdrage aan kabinetsdoelstellingen zoals vermindering van regels, vergunningstelsels en administratieve lasten. Totdat de Omgevingswet in werking treedt- voorzien voor 2018 - blijft de Waterwet van kracht.

In het Waterbesluit wordt onder meer de vaststelling van een landelijke rangorde bij watertekorten, de zogenaamde verdringsreeks vastgelegd. Ook regelt het Waterbesluit procedurele en inhoudelijke aspecten van het nationale waterplan en het beheerplan voor de rijkswateren en enkele inhoudelijke aspecten van de plannen in verband met implementatie van de Kaderrichtlijn water en de Richtlijn overstromingsrisico's. Ook geeft het Waterbesluit aan voor welke oppervlaktewaterlichamen in beheer bij RWS er geen leggerplicht geldt. Een vergunningplicht en algemene regels zijn uitgewerkt voor het gebruik van rijkswaterstaatswerken, het onttrekken van grondwater en voor het lozen of onttrekken van water aan oppervlaktewater in beheer bij het Rijk.

De Waterregeling bevat regels over de organisatie van het waterbeheer, een aantal kaarten over de toedeling van beheer, de begrenzing van oppervlaktewaterlichamen en de aanwijzing van de drogere oevergebieden, alsmede regels voor gegevensverstrekking aan het Rijk op grond van Europese verplichtingen.

De Waterwet kent één watervergunning. Dit betekent dat één aanvraag volstaat, ook al zijn er verschillende overheden in beeld.

Ook het ontwikkelen van vegetatie valt onder de Waterwet vergunningsplicht. In principe wordt voor de watervergunning getoetst en beoordeeld in de ruimte van redelijkheid en billijkheid.

Daarnaast heeft RWS de wettelijke taak om operationele verwachtingen te maken voortvloeiend uit de taak dat burgers tijdig geïnformeerd moeten worden (zorgplicht). Impliciet is dit onderdeel van de Waterwet.

## 2.5.2 Omgevingswet

Met de Omgevingswet wil de overheid de regels voor ruimtelijke ontwikkeling vereenvoudigen en samenvoegen. De Omgevingswet wordt in 2018 van kracht. Er zijn wel voorbereiding aan de gang en RWS is penvoerder daarin. Er wordt toegewerkt naar Informatiehuizen, waarin de informatiestromen worden georganiseerd. Deltares is met RWS-Corporate in overleg om ook de kennis binnen deze Informatiehuizen te borgen daarbinnen.

## 2.5.3 Nieuwe normering

Vanaf 1 januari 2017 wordt de nieuwe normering vastgesteld. Dit heeft ook invloed op de manier waarop de beoordeling met behulp van modelschematisaties wordt uitgevoerd. Op dit moment wordt binnen RWS nog gekeken wat de nieuwe normering betekent in het kader van het Beheer en Onderhouds proces van RWS. Het kan zijn dat daar aanbevelingen uit voortkomen, waarmee rekening moet worden gehouden in de modellen. Mogelijk gaan stijgende en dalende waterstanden daarbij een rol spelen.

## 2.5.4 Kader Toepassing Netwerkmodellen Water en Scheepvaart

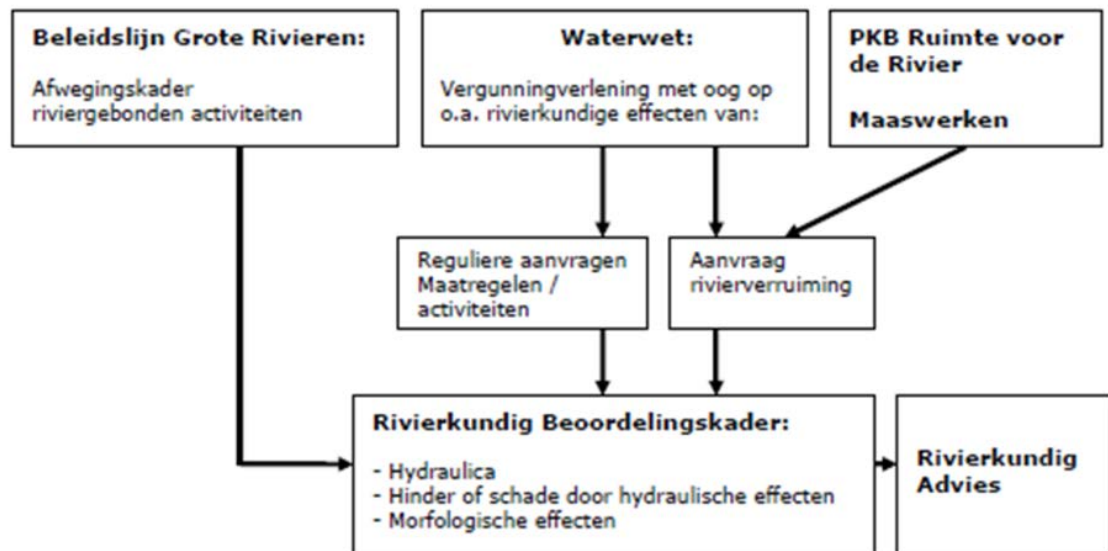
Dit kader schrijft voor welke modellen er voor de processen van RWS gebruikt moet worden. Hieronder vallen de modellen voor WBI, maar ook voor de vergunningverlening. De lijst wordt jaarlijks aangepast. De frequentie van deze aanpassing moet eigenlijk worden verhoogd en de modellen die in dit kader worden genoemd moeten beschikbaar gemaakt worden via de Helpdesk Water. Daarnaast wordt via de SLA modellen (overeenkomt tussen I&M en Deltares) vastgesteld welke modellen er beheerd en onderhouden worden bij Deltares.

## 2.5.5 Beleidslijn Grote Rivieren

Doelstelling van de Beleidslijn is om de beschikbare afvoer- en bergingscapaciteit van het rivierbed te behouden en ontwikkelingen tegen te gaan die de mogelijkheid tot rivierverruiming door verbreding en verlaging nu en in de toekomst feitelijk onmogelijk maken. De Beleidslijn stelt regels aan de toelaatbaarheid van activiteiten en indien toelaatbaar, aan de voorwaarden aan de uitvoering van deze activiteiten. Het Rivierkundig Beoordelingskader is deels een uitwerking van deze voorwaarden voor activiteiten die toelaatbaar én vergunningplichtig zijn.

## 2.5.6 Rivierkundig Beoordelingskader (RBK)

Initiatiefnemers die maatregelen willen nemen in het zomer- of winterbed van de Rijntakken, de Maas, de Rijn-Maasmonding of het Zwarte Water moeten hiervoor bij Rijkswaterstaat een vergunning aanvragen in het kader van de Waterwet (en soms de Ontgrondingenwet). Het Rivierkundig Beoordelingskader (RBK) voor ingrepen in de Grote Rivieren beoogt de behoefte om ingrepen in de rivier in het kader van de Waterwet op een eenduidige en uniforme manier rivierkundig te kunnen beoordelen (RWS, 2014). Dit beoordelingskader beperkt zich tot de aspecten water en sediment. Het RBK geldt momenteel voor de Rijntakken, de Maas, de Rijn-Maasmonding, de IJsseldelta en het Zwarte Water. De vigerende versie is 3.0 (binnenkort wordt deze vervangen door 4.0).



Figuur 2.7 Het Rivierkundig Beoordelingskader sluit aan op de Beleidslijn Grote Rivieren en is een handleiding bij het toetsen van maatregelen/activiteiten waarvoor in het kader van de Waterwet vergunningen worden aangevraagd (Bron: RWS, 2014)

Rivierkundige effecten worden beoordeeld op 3 hoofdthema's:

- 4 Hoogwaterveiligheid
- 5 Hinder of schade door hydraulische effecten
- 6 Morfologische effecten

Voor de verschillende gebieden wordt echter op verschillende effecten beoordeeld al naar gelang het fysisch karakter van het systeem. Een aandachtspunt is dat één van de beoordelingsonderdelen bij vergunningen de dwarsstroom op schepen is. Het gaat hierbij om de absolute getallen en niet om het verschil.

Enkele aanmerkingen op het huidige RBK:

- Berg- en retentie-effecten komen nu niet tot uiting in het RBK. Het zou mogelijk goed zijn om ook meer dynamische condities door te rekenen.
- Peilbesluiten zitten niet in het RBK, waardoor je dergelijke effecten nu niet doorrekent.

### 2.5.7 Leggers

Om Nederland te kunnen beschermen tegen hoogwater moeten rijkswaterstaatswerken als dijken, sluizen en vaarwegen aan bepaalde normen voldoen. Deze normen zijn vastgelegd in zogenoemde leggers.

- Legger rijkswaterstaatswerken

De Legger rijkswaterstaatswerken is een verzameling van kaarten waarop de normen voor rijkswaterstaatswerken staan beschreven. Bijvoorbeeld eisen voor de ligging, vorm, afmeting en constructie van deze objecten.

- Vegetatielegger

De Vegetatielegger bestaat uit overzichtskaarten en regels, die samen aangeven welke type begroeiing waar is toegestaan vanuit het oogpunt van hoogwaterveiligheid. De vegetatielegger is al opgenomen in de vijfde-generatie modelschematisaties van de Rijntakken, Maas, Rijn-Maasmonding en IJsselmeer, IJssel-Vecht Delta.

## 2.5.8 Ontgrondingenwet

De Ontgrondingenwet regelt het winnen van zand, grind, klei en andere materialen uit de Nederlandse bodem. Bedrijven die voor dat doel uit de rivierbedding of Noordzee grond willen winnen moeten bij Rijkswaterstaat een vergunning aanvragen op basis van de Ontgrondingenwet. Dit stelt geen specifieke eisen aan de modellen. Wel moet het mogelijk zijn om iets te kunnen zeggen in relatie tot de risico's van ontgroning. Beoordeling hiervan vindt niet alleen plaats bij RWS maar ook bij de Provincie.

## 2.5.9 Natuurwet

In het kader van de Natuurwet zijn er de Vogelrichtlijn, Habitatrichtlijn (en zwemwaterrichtlijn). Binnen dit kader worden modellen toegepast. Het is echter niet geheel duidelijk welke eisen dit aan de modellen stelt en of dit relevant is voor de zesde-generatie modelschematisaties.

## 2.5.10 Verdragen met het buitenland

Het water trekt zich niets aan van landsgrenzen, dus zijn er ook afspraken gemaakt met het buitenland over waterbeheer. Een voorbeeld hiervan is het Maasafvoeroverdrag tussen Nederland en Vlaanderen. Met dit verdrag wordt het beschikbare Maaswater zo goed mogelijk verdeeld bij lage afvoeren. Deze afspraken moeten ook terugkomen in de modellen.

## 2.5.11 Europese kaders

Naast Nederlandse kaders zijn er ook Europese kaders waarvoor verplichtingen gelden. Hieronder worden er een aantal genoemd:

- Kaderrichtlijn Water (KRW)
  - bescherming en verbetering van aquatische ecosystemen
  - duurzaam gebruik van water
  - Tot 2021 gaan er zeker alleen al in de Rijntakken 30 gebieden op de schop om te kunnen voldoen aan de KRW.
  - Noodzakelijk om te kunnen achterhalen waar de stoffen vandaan komen. De vraag is of de huidige KRW-verkenner fijn genoeg is om alle stoffen mee door te kunnen rekenen
- Kaderrichtlijn Mariene Strategie
  - bescherming en instandhouding van het mariene milieu
  - De meststoffenwetgeving komt vooral vanuit EZ. Hier is mogelijk een rol voor RWS in relatie tot lozingen en de gevolgen voor waterkwaliteit.
- Richtlijn Overstromingsrisico's
  - Europese Hoogwater richtlijnen
  - Opgenomen in de Waterwet
- OSPAR, Richtlijn Marine Spatial Planning
- INSPIRE
  - Richtlijn voor de eenduidige opslag voor data.
  - Alle modeluitvoer zou in principe daar al zo veel mogelijk in moeten voorzien

### 3 Technisch functioneel ontwerp

#### 3.1 Algemeen

Naast de eisen en wensen aan het conceptueel ontwerp (beschreven in het vorige hoofdstuk) zijn er verschillende technische aandachtspunten die in het functioneel ontwerp geadresseerd moeten worden. Deze zijn gemakshalve gegroepeerd als volgt:

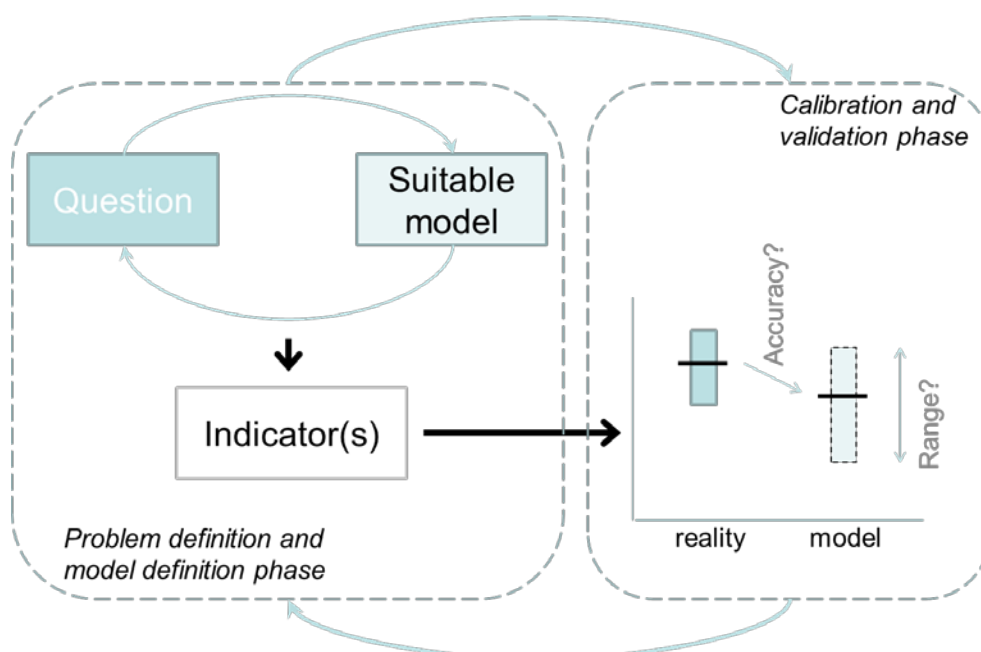
- Roosterresolutie
- Numerieke aspecten
- Kunstwerken en overlaten
- Relevante processen
- Kalibratie en validatie
- Onzekerheidsanalyse

Voor het opzetten van de zesde-generatie modelschematisaties moet er ook aandacht zijn voor “Good Modelling Practice”. Het handboek Good Modelling Practice (STOWA, 1999) is door Nederlandse partners opgezet. Het handboek is in het Engels gepubliceerd voor internationaal gebruik (o.a. door US EPA).

In Bijlage G wordt een beschrijving gegeven (in het Engels) over hoe Deltares aansluit bij de richtlijnen t.b.v. Good Modelling Practice (GMP). In deze bijlage is te zien dat GMP onderverdeeld kan worden in drie fases voor een studie die gebruik gaat maken van simulatiemodellen. Deze fases zijn:

1. Probleemdefinitie en modeldefinitie
2. Kalibratie- en validatiefase
3. Scenario's

Figuur 3.1 geeft een schematische weergave van de eerste twee fases in een studie volgens GMP.

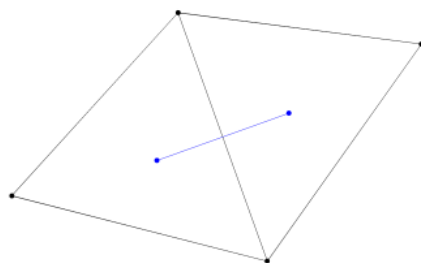


Figuur 3.1 Schematische weergave van de eerste twee fases in een studie volgens GMP

### 3.2 Roosterresolutie

Ondanks dat er met D-HYDRO gerekend kan worden met allerlei vormen van roostercellen (driehoek, vierkant/rechthoek, vijfhoek), verdient het de voorkeur om, indien mogelijk, zo veel mogelijk gebruik te maken van een curvilineair (of rechthoekig) rooster. De resultaten laten namelijk zien dat de nauwkeurigheid van de resultaten in het algemeen groter is bij gebruik van een curvilineair rooster, en ook dat de roosterconvergentie beter is (Deltares, 2016c). Daarnaast is het niet alleen de vorm van een rekencel, maar ook de grootte, de orthogonaliteit en de *smoothness* van de rekencellen bepalend voor de nauwkeurigheid.

Orthogonaliteit is gedefinieerd als de cosinus van de hoek  $\varphi$  tussen een flowlink (blauwe lijn in Figuur) en een netlink (zwarte lijn in Figuur). De *smoothness* van een rooster is gedefinieerd als de verhouding van de oppervlakken van twee naburige cellen. Idealiter zijn beide parameters gelijk aan 1 (d.w.z. de hoek  $\varphi = 90$  en de oppervlakken van de cellen zijn gelijk aan elkaar). Een 'ideale' setup is getoond in Figuur 3.2.



Figuur 3.2 Bijna ideale orthogonaliteit en smoothness bij twee naburige rekencellen – zwarte lijnen = netlink; blauwe lijn = flowlink

Het rooster dient zo veel mogelijk te worden uitgelijnd met de dominante stroomrichtingen (c.q. verhang). Het niet goed uitlijnen van het rooster kan een negatief effect op de nauwkeurigheid van de resultaten hebben (Deltares, 2016c). Dit betekent ook dat het rooster de bathymetrie en/of belangrijke constructies zo veel mogelijk moet volgen, voor zover zij het stroombeeld beïnvloeden. Voor toepassingen in rivieren, estuaria en/of kustgebieden leidt dit tot logische keuzes voor de roosteroriëntatie zoals in de Bijlage D en Bijlage E is beschreven. Voor toepassingen waarin de richting van de stroming en/of het verhang hier en daar in plaats en/of in tijd (sterk) variëren (bijv. in meren) kan van deze regel worden afgeweken (zie Bijlage F). De resultaten van de pilottoepassing in het Markermeer bevestigen bovendien dat de onnauwkeurigheden, die worden geïntroduceerd bij het gebruik van driehoekjes, minder is wanneer de bodemwrijving dominant is, zoals in ondiepe gebieden. Bovendien als de stroming klein is, zijn alle onnauwkeurigheden door het rooster ook klein.

Voor kusten, estuaria en rivieren wordt dus in de regel eerst een globaal curvilineair (of rechthoekig) rooster gemaakt, waarin lokaal verfijningen kunnen worden aangebracht. Voor rivieren moet het rooster het zomerbed zo veel mogelijk volgen en bij kusten en meren de kustlijn. Voor de overgang naar het verfijnde gebied wordt lokaal gebruik gemaakt van driehoekjes. Indien er meerdere niveaus van verfijning noodzakelijk zijn, kunnen deze beter niet meteen aansluitend plaatsvinden, maar is het beter om een aantal cellen tussen te voegen. De overgang moet dan niet in het interessegebied liggen.

Een aanvullende eis aan de roosterresolutie is de wens om hetzelfde rooster te gebruiken voor zowel het modelleren van waterstanden, morfologie en waterkwaliteit.

In de nabijheid van kunstwerken en/of keringen moet ook aan de volgende additionele eisen aan roosterresolutie en –oriëntatie worden voldaan:

- Aspectratio van het rooster moet zo veel mogelijk gelijk aan 1.0 zijn.
- Het rooster moet uitgelijnd worden met de kunstwerken. Het is belangrijk om de stromingsrichting door de openingen van de keringen de juiste roosteroriëntatie te geven.
- Bij bruggen e.d. moet het rooster de aanwezige brugpijlers goed reproduceren, en verder moet het rooster uitgelijnd worden met de openingen.

Aanvullende eisen aan het rooster in verschillende toepassingsgebieden worden uitgebreid beschreven in de relevante bijlage.

### 3.3 Numerieke aspecten

Er zijn verschillende (numerieke) parameters die gekozen kunnen worden. Vanuit Deltares is er een lijst beschikbaar met de standaardinstellingen die worden aangeraden. Zie voor de volledige lijst Bijlage C. Deze instellingen worden zo veel mogelijk aangehouden voor de op te zetten modelschematisaties voor RWS. Op een aantal belangrijke parameters wordt in deze paragraaf nog verder ingegaan.

#### 3.3.1 Tijdstap

In D-HYDRO wordt de berekening van advectieterm expliciet uitgevoerd. Dit introduceert een beperking van de rekentijdstap welke automatisch wordt ingesteld op basis van het Courant criterium. De modelleur heeft de mogelijkheid om instellingen te doen aan de maximale rekentijdstap (DTMAX) en het maximaal toelaatbare Courant criterium (CFLMAX). Voor een expliciet rekenschema mag het Courantgetal nooit groter dan 1 worden, anders wordt het schema instabiel met grote onnauwkeurigheden tot gevolg. De meest nauwkeurige oplossing wordt behaald met een Courantgetal gelijk aan 1, maar omdat er veel dynamiek en variabiliteit in een modelberekening is, wordt altijd een waarde onder 1 gehanteerd. Voor D-HYDRO wordt een Courantgetal waarde van onder 0,7 geadviseerd.

Daarnaast wordt ervoor gezorgd dat 'flooding and drying' met maximaal één cel per keer plaatsvindt. In gebieden met hogere snelheden (bijv. riviermodellen) is de automatische tijdstapbepaling meestal voldoende. Voor andere gebieden kan het nodig zijn de tijdstap te beperken een bovengrens in te stellen. Dit hangt ook samen met de tijdschalen van de processen die door het model moeten kunnen worden weergegeven. Verder is het altijd zaak om een convergentieonderzoek te doen naar de tijdstap, door handmatig de maximale tijdstap te verkleinen, totdat de resultaten niet meer significant veranderen.

#### 3.3.2 Projectie bodem

Een belangrijk onderdeel van het model betreft de schematisatie van de bodemhoogte in het model. Er zijn verschillende parameters die aangepast kunnen worden:

- Middelingstype: Hoe worden de gridonafhankelijke samples met een hoge resolutie geprojecteerd op het rekenrooster? Drie methoden zijn getest:
  - Gemiddelde
  - Dichtstbijzijnde
  - Diepste punt
- Bedleveltype: Waar wordt de bodemhoogte geprojecteerd op het rekenrooster? Twee methoden zijn getest:
  - Discretisatie op grid cellen (face)
  - Discretisatie op hoekpunten (node)

- Conveyance: Hoe wordt het doorstroomoppervlak berekend op de edges? Binnen de bodemhoogte discretisatie op hoekpunten zijn hiervoor drie methoden getest:
  - Gemiddelde van de hoekpunten
  - Analytische doorstroming met uniforme stroomsnelheid
  - Analytische doorstroming met stroomsnelheid op basis van de analytische waterdiepte

D-HYDRO werkt met bodemhoogtes en niet met bodemdieptes, zoals in Delft3D v4. In Simona kan de oriëntatie opgegeven worden (default is positive downwards). D-HYDRO werkt met bodemhoogtes en dus met een 'positive upward' oriëntatie.

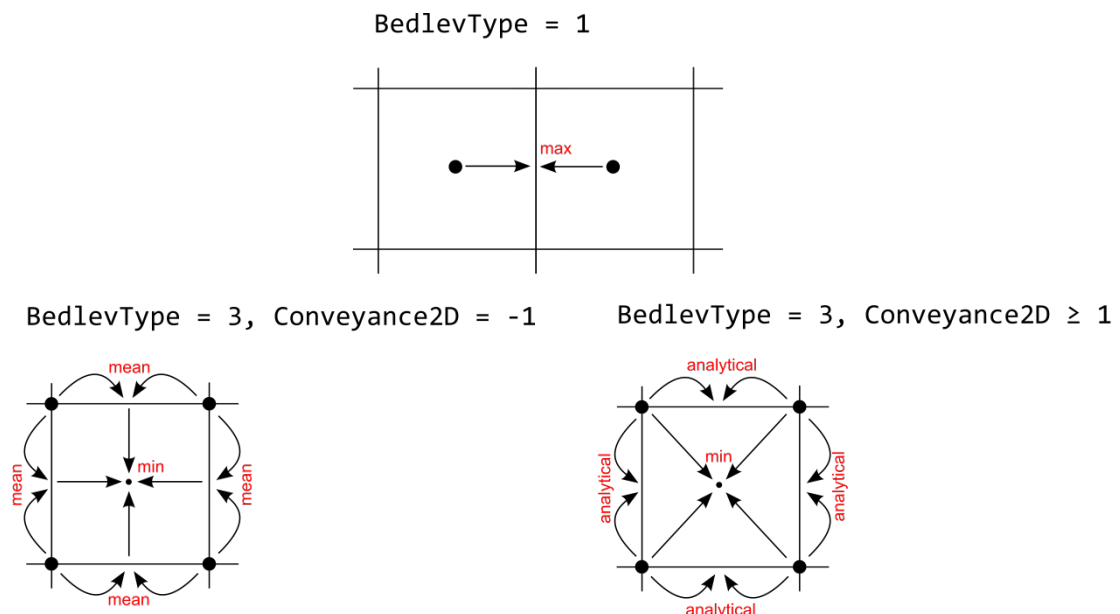
In D-HYDRO kan de discretisatie van de bodemhoogte volgens twee methodes worden geadmistriseerd. De overige bodemhoogte-definities in het model zijn afgeleiden. Ook hiervoor zijn diverse instellingen mogelijk (zie ook Figuur 3.3). Er worden vier methoden met elkaar vergeleken, hierbij dient de eerste methode als referentie. De bodemhoogte is het gemiddelde van de samples in de cel (AVERAGINGTYPE=1).

- Bedlevtype=1: Discretisatie van de bodemhoogte op grid cellen (face center)
  - Het doorstroomoppervlak (op edge) wordt berekend op basis van maximale bodemhoogte van de twee omliggende cellen.
- Bedlevtype=3: Discretisatie van de bodemhoogte op hoekpunten (nodes)
  - Conveyance2D=-1: Het doorstroomoppervlak (op edge) wordt berekend als het gemiddelde van de twee hoekpunten.
    - De bodemhoogte in de grid cel (face) wordt berekend als het minimum van de aangesloten edges.
  - Conveyance2D=1: Het doorstroomoppervlak (op edge) wordt analytisch berekend met hierin een uniforme stroomsnelheid.
    - De bodemhoogte in de grid cel (face) wordt berekend als het minimum van de hoekpunten.
  - Conveyance2D=3: Het doorstroomoppervlak (op edge) wordt analytisch berekend met hierin een stroomsnelheid afhankelijk van de lokale (analytische) waterdiepte.
    - De bodemhoogte in de grid cel (face) wordt berekend als het minimum van de hoekpunten.

Voor toepassing van morfologie is de keuze voor de administratie van bodemhoogtepunten cruciaal. Beide methoden bieden mogelijkheid om sedimenttransport en verandering in de bodemhoogte te berekenen. De rekenwijze en de herkomst van de morfologische module is echter verschillend.

- Bodemhoogte in grid cellen (Bedlevtype=1): Deze implementatie van de morfologie is overgenomen uit Delft3D. Het is de meest volledige implementatie en zowel binnen Delft3D als binnen D-HYDRO is validatie en verificatie van deze methode uitgevoerd.
- Bodemhoogte in hoekpunten (Bedlevtype=3): Deze is nog niet geïmplementeerd in D-HYDRO en wordt momenteel alleen als prototype getest. Er is geen validatie en verificatie van deze methode geweest. In 2017 zal verder onderzocht worden of deze ontwikkeling uiteindelijk een voordeel zou kunnen opleveren voor de zesde-generatie modelschematisaties.





Figuur 3.3 Schematische weergave hoe voor verschillende combinaties van BedlevType en Conveyance2D de bodemhoogte op de verschillende locaties van het rekenrooster wordt geprojecteerd

Voor rivieren is er de voorkeur om gebruik te maken van een discretisatie van de bodemhoogte op grid cellen vanwege de mogelijkheden die dit biedt voor de toepassing van een gevalideerde implementatie van de morfologie. Ook de verschillen in resultaten zijn voor rivieren niet erg groot voor de verschillende opties. De ervaring bij zeeën en kusten is dat de verschillen wel groter kunnen zijn en hiervoor wordt gepleit om hier nog verder onderzoek naar te doen. Dit wordt meegenomen in de verkenning in 2017 van het gebruik van Bedlevtype=3 in D-HYDRO.

### 3.3.3 Horizontale turbulentie

D-HYDRO lost de Navier-Stokes vergelijkingen op voor een niet-samendrukbare vloeistof. Over het algemeen is het rooster te grof en de tijdstap te groot om alle turbulente bewegingen te kunnen vatten. De turbulente processen zijn dan 'sub-grid'.

De horizontale eddy viscositeit en eddy diffusiteit wordt meestal geassocieerd met de bijdrage van horizontale turbulente bewegingen en forceringen die niet worden weergegeven op het rooster of door de Reynolds-gemiddelde ondiep-watervergelijkingen. De horizontale coëfficiënten worden verondersteld te bestaan uit drie delen:

- i. Een deel door moleculaire viscositeit
- ii. Een deel door '2D-turbulentie'
- iii. Een deel door '3D-turbulentie'

Voor de horizontale eddy viscositeit en eddy diffusiteit kan een constante (of ruimtelijke) achtergrondwaarde worden opgegeven. Het is binnen D-HYDRO nog niet mogelijk om gebruik te maken van HLES (Horizontal Large Eddy Simulation), een sub-grid model voor 2D-turbulentie. Wel is er een simpeler model beschikbaar, het zogeheten Smagorinsky model. Hiermee is het mogelijk om automatisch om te gaan met grote verschillen in celgrootte en mogelijk daarbij behorende stroomsnelheidsverschillen. Om deze reden wordt geadviseerd om gebruik te maken van de Smagorinsky-formulering. Er dient echter wel aanvullend onderzoek te gebeuren voor een optimale afregeling van de parameters.

### 3.4 Kunstwerken en overlaten

#### 3.4.1 D-RTC

De wens is om de sturing van kunstwerken vanuit D-RTC als aparte module mee te kunnen nemen. Op deze manier wordt het mogelijk om sturingen van kunstwerken te hergebruiken in verschillende modellen. Dit heeft als voordeel dat de consistentie tussen de modellen wordt vergroot en de kans op fouten wordt verminderd. Er zijn enkele eenvoudige tests uitgevoerd in 2016 om de algemene functionaliteit van D-RTC te testen. In 2017 zal een begin gemaakt worden met het opzetten van een zesde-generatie modelschematisatie waarin D-RTC opgenomen wordt voor de aansturing van keringen.

Daarnaast is het ook wenselijk om de te gebruiken coëfficiënten en werking van kunstwerken te bespreken met experts. Zodat deze op een betere manier in de modellen worden meegenomen dan in de vijfde generatie het geval is, waar meestal de default instellingen zijn toegepast.

#### 3.4.2 Overlaten

Vanwege de gebruikte roosterresolutie kunnen niet alle lijnelementen in de bodem worden meegenomen. Er wordt daarom, net als in de vijfde generatie, een subgrid aanpak toegepast waarin vaste kunstwerken (o.a. kribben en overlaten) als zogeheten 'weirs' in het model worden opgenomen. Bij de opbouw van het rooster moet er voor gezorgd worden dat deze elementen zo goed mogelijk op het rooster geprojecteerd kunnen worden.

Het gebruik van de numerieke overlaatformulering (Fixed Weir Type=6) wordt afgeraden omdat deze methode zorgt voor minder nauwkeurige resultaten wanneer er meerdere overlaten aansluiten op één gridcel. Bij voorkeur wordt gebruik gemaakt van de zogeheten 'Villemonte' formulering, aangezien deze meer flexibiliteit biedt in de modellering van overlaten dan de 'Tabellenboek'-formulering. De huidige resultaten die worden gevonden met de overlaatmodellering ondersteunen deze advies echter nog niet en dit wordt verder onderzocht en verbeterd in de software.

### 3.5 Relevante processen

In de huidige pilottoepassingen wordt alleen aandacht besteed aan de stroming (snelheden) en waterstanden. Bij het opzetten van de nieuwe zesde-generatie modelschematisaties moet er ook aandacht komen voor hydrologie (regenval en verdamping), morfologie, waterkwaliteit en ecologie.

Er zijn enkele eenvoudige testen uitgevoerd (o.a. voor de pilot voor de Waal) met het toevoegen van extra processen of randvoorwaarden, waarbij deze geen waarde hebben meegekregen, dus geen invloed zouden moeten hebben op de resultaten. Doel van deze testen is het verifiëren dat deze processen kunnen worden toegevoegd, en dat deze in toegevoegde vorm ook kunnen worden uitgeschakeld. Door uitvoering van deze testen kan bevestigd worden dat het model gekoppeld kan worden met modellen met andere belangrijke (en toegepaste) processen, zonder dat dit invloed heeft op de modelresultaten. De werking van een aantal processen is succesvol getest: Restart-bestanden, Zout, Temperatuur, Regen, Wind en Sediment. Met alle processen kan gerekend worden en kan het proces ook voor een deel van het model worden toegevoegd zonder dat dit resulteert in een verandering van de waterstanden. In veel gevallen zal dit wel resulteren in een toename van de rekentijd. Dit wordt veelal niet veroorzaakt door een afname van de gemiddelde rekentijdstep, maar door de extra modules die uitgerekend worden voor het proces. Bij de verdere ontwikkeling van de zesde-generatie modelschematisaties moet ook aandacht komen voor dit aspect om te voorkomen dat de rekentijd onacceptabel groot wordt.

### 3.6 Kalibratie en validatie

Bij het bouwen en opzetten van geavanceerde modellen is het vooral belangrijk om goed te kunnen valideren en om voldoende metingen daarvoor te hebben. Geavanceerdere modellen vragen waarschijnlijk ook andere kalibratiemethodieken en meer aandacht voor de metingen. De kalibratie hangt vooral op de beschikbaarheid van metingen. Dit huidige project richt zich echter niet op het verzamelen van meer metingen.

Bij het kalibreren van de zesde-generatie modelschematisaties zal gebruik worden gemaakt van OpenDA. Wel is er een wens om de onzekerheidsmarges van de metingen mee te nemen bij de kalibratie. Er is een begin gemaakt in 2016 met het toepassen van OpenDA in de pilottoepassingen (o.a. DCSM en Rivieren), maar dit moet in 2017 verder getest worden.

Er zal ook in toekomst aandacht moeten zijn voor andere manieren van datawinning. Zo zou het nuttig kunnen zijn om andere databronnen te gaan combineren, bijvoorbeeld met satellietdata. Het gebruik van satellietdata binnen RWS is nu nog niet gebruikelijk omdat er vraagtekens waren bij de nauwkeurigheid van de satelliet-afgeleide data. Het gebruik van de nieuwste satellieten en analysemethodes betekent dat er tegenwoordig veel meer vertrouwen is in de nauwkeurigheid en maakt het gebruik van satellietdata steeds aantrekkelijker.

### 3.7 Onzekerheidsanalyse

Er wordt sterk aangeraden om een onzekerheidsanalyse een integraal deel van het bouwen van de zesde-generatie modellen te laten maken (naast de gevoeligheidsanalyse die standaard wordt uitgevoerd). Vaak wordt men met deze vraag geconfronteerd, nadat de modellen zijn gemaakt en opgeleverd (specifiek vanuit het WBI-project). In zulke gevallen wordt de analyse op een versimpelde ad-hoc manier opgepakt (cf. Yossef, 2011<sup>§</sup>; Thijssen et al. 2013<sup>\*\*</sup>, and van der Mheen et al. 2014<sup>††</sup>), of er is een significant budget gemoeid voor een grondige analyse. Het is efficiënter om de onzekerheidsanalyse uit te voeren direct na de kalibratie van het model. Dit verbetert tevens het inzicht in de mogelijkheden en gevoeligheden van het model.

De noodzaak om een onzekerheidsanalyse uit te voeren is reeds in grote lijnen besproken met belanghebbenden tijdens de werksessies. Er is een gedeelde veronderstelling dat onzekerheidsanalyse een belangrijk onderdeel is en geïntegreerd moet worden in de modelcyclus. Er is een verkenning uitgevoerd naar de mogelijkheden om onzekerheidsanalyse uit te voeren met name voor rivieren. De volledige verkenning is opgenomen in bijlage H. Op basis van deze verkenning wordt aanbevolen om een onzekerheidsanalyse uit te voeren die antwoord geeft op de vraag: wat is de onzekerheid in de maatgevende waterstanden zoals voorspeld door het model ten gevolge van onzekerheid in de hydraulische ruwheid? Deze vraag wordt als haalbaar gezien in 2017 en wordt als zeer relevant gezien door medewerkers die aan het WBI project werken.

<sup>§</sup> Yossef 2011 *Behaviour of compound channel when predicting flood levels* (Deltares memo)

<sup>\*\*</sup> Thijssen Annegien [et al.] *Quantification of model uncertainty for WAQUA for the Upper Rivier Area - Deltares report 1207807-002-HYE [Report]. - 2013.*

<sup>††</sup> Mheen, M., Yossef M., Becker A. 2015 "Model uncertainty of IJVD WAQUA Model – WTI applications" (ref. 1209433-008)



## 4 Pilot-applicatie Rivieren

In dit hoofdstuk wordt ingegaan op het modelleren van rivieren met de D-HYDRO Suite door een pilot-applicatie voor de Rijntakken uit te voeren. Het doel van deze studie is het opdoen van ervaring met het opzetten van een nieuw D-Flow Flexible Mesh model, het kalibreren van dit model en het functioneren van het model in de nieuwe modelleromgeving.

Een uitgebreide rapportage van de resultaten van de pilot-applicatie rivieren is bijgevoegd in Bijlage E van dit rapport. Hieronder volgt een korte samenvatting van de belangrijkste bevindingen in deze toepassing

### 4.1 Processen

Er is een inventarisatie gedaan van toepassingen van de modellen voor RWS en de daar bijbehorende processen. Hieruit blijkt dat met name debieten, waterstanden en stroomsnelheid van belang zijn. Conclusie is verder dat de volgende processen niet worden meegenomen in de modellering van de rivieren omdat de invloed hiervan te gering is:

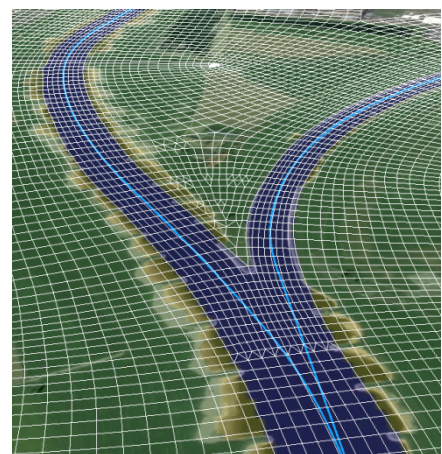
- Geen opwaaiing door globaal of lokaal windveld
- Geen zoutindringing
- Geen regen op het oppervlaktewater

De werking van deze processen is echter succesvol getest in de pilot. Met restart-bestanden, Zout, Temperatuur, Regen, Wind en Sediment kan gerekend worden en kan het proces ook voor een deel van het model worden toegevoegd zonder dat dit resulteert in een verandering van de waterstanden. In veel gevallen zal dit wel resulteren in een toename van de rekentijd. Dit wordt veelal niet veroorzaakt door een afname van de gemiddelde rekentijdstap, maar door de extra modules die uitgerekend worden voor het proces.

### 4.2 Roostergeneratie en gridconvergentie

Er is een nieuw rooster ontworpen voor het Rijntakken-model ten behoeve van deze pilot. Op basis van dit onderzoek zijn de volgende conclusies getrokken:

- Het rooster kon optimaal ontworpen worden door vooraf reeds te definiëren wat de gewenste dimensies zijn voor het zomer- en winterbed. Hieruit bleek dat een transitie van driehoekige roostercellen tussen zomer- en winterbed niet nodig was. Bij de bouw is daarnaast het aantal driehoekige roostercellen in het winterbed geminimaliseerd.
- Aangezien het rekenrooster direct effect heeft op de rekentijdstap is het belangrijk om te voorkomen dat kleine roostercellen de stroomsnelheid beïnvloeden. Uit de analyse van het rooster is gebleken dat enkel cellen in het zomerbed de rekensnelheid beperken en dat een optimalisatie van kleine cellen in het winterbed niet nodig is.
- Bij de Pannerdensche kop sluiten de roosterlijnen aan bij de splitsing. Bij de IJsselkop daarentegen niet. Daarom is rooster ter plekke verfijnd in dwarsrichting, waar bij de verfijning vierentwintig driehoeken geïntroduceerd zijn in het zomerbed. Deze driehoeken leveren nu echter een limitering voor de tijdstap op en er dient nog te worden nagegaan of deze overgang verbeterd kan worden.



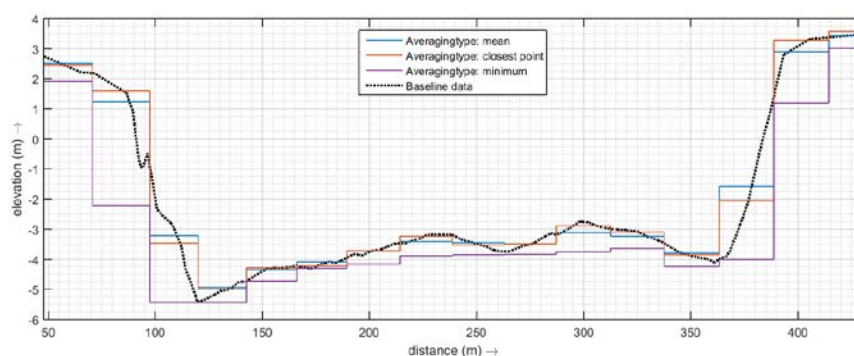
- Er zijn tevens drie rekenroosters ontworpen met een resolutie die een factor 0.5 (Finer), 2 (Medium) en 4 (Coarse) grover is dan het rekenrooster van het referentiemodel in beide richtingen. Er is in de rekenroosters Medium en Coarse een verlies in de nauwkeurigheid van de projectie van geometrische kenmerken. De verschillen met het referentie rekenrooster zijn desondanks klein en acceptabel. Voor de aanwezige verschillen kan bij een kalibratie gecorrigeerd worden. Voor de discretisatie van de bodemhoogte op hoekpunten is een goede eenduidige convergentie zichtbaar, voor de discretisatie op op grid cellen is dit niet het geval.

### 4.3 Numerieke instellingen en modelleeraspecten

Er is onderzoek gedaan naar een aantal specifieke numerieke instellingen en modelleer aspecten. Hieronder volgt een samenvatting van de bevindingen:

- Projectie bodem

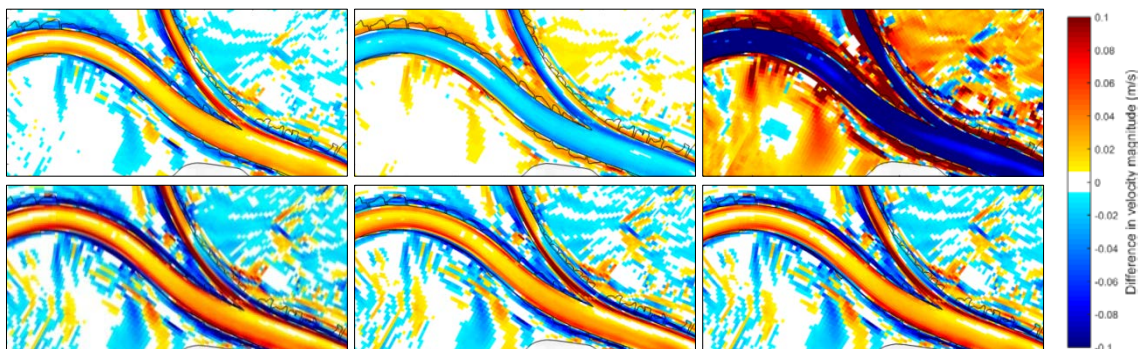
Er is een voorkeur om gebruik te maken van een discretisatie van de bodemhoogte op grid cellen vanwege de mogelijkheden die dit biedt voor de toepassing van een gevalideerde implementatie van de morfologie. Daarbij wordt ook aanbevolen om gebruik te maken van de methode "Gemiddelde" (Averagingtype=1). Hierdoor worden grote uitschieters in de bodemhoogte afgevlakt. Deze methode wijkt af van de huidige projectie van Baseline en vereist daarom aanpassing aan de software. Deze methode vereist hoge resolutie samples voor een nauwkeurige middeling.



Figuur 4.1 Verskil in bodemhoogte van de rivier in face centers bij verschillende middelmingsmethoden nabij rivierkilometer 939.

- Tijdstap**  
Wanneer door de instellingen van de modelleur de automatische rekestijdstap verder wordt verkleind dan in het referentiemodel, zijn de effecten op de resultaten nog zeer beperkt (maximaal 2 mm). De convergentie van de rekestijdstap is hiermee goed. De instelling van de parameter DTMAX (maximale rekestijdstap) heeft grote invloed op de rekestijd. Het is daarom belangrijk dat DTMAX groter wordt gekozen dan de rekestijdstap bij toepassing van het Courant criterium om zo de simulatie niet te beïnvloeden. Er wordt aanbevolen een grote DTMAX te gebruiken. Verder wordt aanbevolen gebruik te maken van de defaultwaarde van CFLMAX (0.7).
- Spiraalstroming**  
Rivierstroming in bochten is in principe driedimensionaal. Aan het wateroppervlak is de stroomrichting richting de buitenbocht en bij de bodem richting de binnenbocht. Dit fenomeen is met name belangrijk voor morfologische berekeningen. Om dit effect mee te kunnen nemen in 2D-modellen kan een spiraalstromingsmodel worden gebruikt (SecondaryFlow=1). Een berekening met spiraalstroming kan succesvol worden uitgevoerd, maar wanneer de spiraalstroming wordt meegenomen in de berekening van het momentum (BetaSpiral>0), dan zorgt dit voor instabiliteiten in het model.

- **Viscositeit**  
Een toename in de viscositeit leidt tot een afname van de stroomsnelheid in het zomerbed en een toename van de stroomsnelheid in het winterbed. Het gebruik van een viscositeits-formulering op basis van de formulering van Smagorinsky geeft de mogelijkheid om een keuze te maken voor een gridonafhankelijke coëfficiënt. Om deze reden wordt geadviseerd om gebruik te maken van de Smagorinsky-formulering. Er dient echter wel aanvullend onderzoek te gebeuren voor een optimale afregeling van de parameters.



Figuur 4.2 Het effect op de stroomsnelheid (m/s) van de verschillende viscositeitsberekeningen. Boven: Vicouv = 0.5, 1.5 en 5.0; Onder: Smagorinsky=0.10, Smagorinsky=0.15 en Smagorinsky=0.10 met Elder-formulering.

- **Wall roughness**  
Hoewel het effect klein is, wordt aanbevolen om gebruik te maken van ruwheid op basis van de gedeelte slip ( $i_{rov}=1$ ). Rapporten van eerder onderzoeken benadrukken de noodzaak van deze instelling voor een juiste berekening van de circulatie in kribvakken bij gebruik van een rekenrooster met een hogere resolutie in deelmodellen. Door gebruik te maken van  $i_{rov}=1$  wordt de fysica beter gerepresenteerd en kan de instelling gelijk blijven voor verschillende resoluties.
- **Knippen model**  
Er is geen verschil in de gesimuleerde waterstand tussen het verkleinen van het model met behulp van de rekenroosterbegrenzing of door het rekenrooster zelf te verkleinen. Er is echter wel een significant effect op de rekentijdstep en de totale rekentijd tussen beide methoden, in het voordeel van het bijsneden van het rooster.
- **Partitionering**  
Er is onderzoek gedaan naar de verschillende manieren waarop een berekening uitgevoerd kan worden door te variëren in (wijze van) partitioneren en in besturingssysteem. De conclusie is dat de wijze van rekenen geen gevolg heeft voor de resultaten van de simulatie. Een sequentiële simulatie is echter beduidend langzamer dan een parallelle simulatie op één machine. Hierbij is het raadzaam om het aantal partities gelijk te nemen aan het aantal cores per node. Aanbevolen wordt om altijd gepartitioneerd te rekenen. Wanneer meerdere nodes gebruikt worden voor de uitvoering van een berekening, dan is de afname in efficiency per node slechts beperkt. Hieruit kan geconcludeerd worden dat de schaling van de rekenperformance goed is.

#### 4.4 Kalibratieprocedure

Bij de kalibratie van de vijfde-generatie modellen is gebruik gemaakt van correcties van de ruwheid in het zomerbed als enige kalibratieparameter. De kalibratie streeft ernaar de waterstanden op enkele meetstations zo goed mogelijk te herproduceren in het model. Tussen de meetstations zijn kalibratietrajecten gedefinieerd waarin met een constante correctie is toegepast.

Dit kan ertoe leiden dat op de overgang van de kalibratietrajecten (op het meetstation) grote sprongen zijn in de zomerbedruwheid. Enerzijds zijn dergelijke sprongen in de ruwheid niet realistisch, anderzijds zorgt dit voor problemen wanneer het model gebruikt wordt voor morfologische studies. De scherpe overgang zal resulteren in een grote gradiënt in de sedimenttransportcapaciteit en leiden tot problemen van sedimentatie of erosie ter hoogte van de overgang. Derhalve zijn enkele alternatieve kalibratiemethoden onderzocht.

De meest onzekere parameters in de hydrodynamische riviermodellen zijn:

- Ruwheid zomerbed
- Ruwheid winterbed
- Horizontale eddy viscositeit

Dit zijn de parameters die gevarieerd zouden moeten worden om de modellen te kalibreren. Er wordt op dit moment maar van één grootte (waterstand) metingen gebruikt, daarom kan slechts één van de parameters gebruikt worden voor kalibratie.

De kalibratie van de horizontale eddy viscositeit hangt af van de beschikbaarheid van snelheidsmetingen. De horizontale eddy viscositeit beïnvloedt de vorm van het snelheidsprofiel in de doorsnede en specifiek de overgang van het snelheidsprofiel in de 'mixing layer'. Door de toepassing van Smagorinsky methode gaan we met weergave horizontale viscositeit op vooruit, doordat er dan meer fysica wordt meegenomen.

Door het gebrek aan metingen, is het niet mogelijk om de totale afvoer op te splitsen in de delen voor het zomerbed, kribvakken en winterbed. Daarom kunnen deze ook niet apart gekalibreerd worden. Als dit wel mogelijk zou zijn, zou dit een verbetering van de voorspellende waarde van het model ten gevolg hebben.

#### 4.4.1 Kalibratie met aanpak vijfde-generatie modellen

Allereerst is een kalibratie uitgevoerd volgens dezelfde methodiek zoals dit gebruikelijk is in de vijfde-generatie modellen. Op basis van deze kalibratie zijn de volgende voorlopige conclusies getrokken:

- Zowel de kalibratie op Midden als op Hoog zijn succesvol afgerond. Voor ieder station is het een gemiddeld verschil tot de metingen kleiner dan 5 mm.
- De ruwheid van het niveau Midden is voor de meeste trajecten 10 tot 20% afgenomen.
- De ruwheid van het niveau Hoog is voor de meeste trajecten 20 tot 60% afgenomen.
- Hier uit kan geconcludeerd worden dat gecorrigeerd moet worden voor een hogere ruwheid (en een groter verhang) in de berekening in D-HYDRO ten opzichte van WAQUA.

De uitkomsten van de kalibratie zijn echter wel afhankelijk van de gekozen instellingen in het model, zoals voor de schematisatie van de bodem, overlaten en viscositeit.

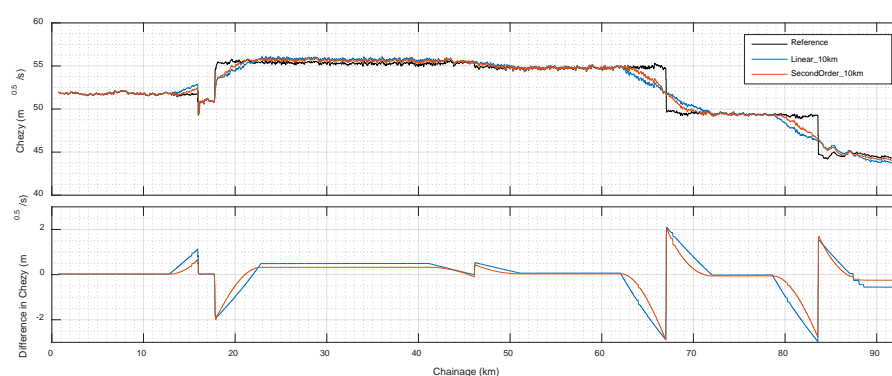
#### 4.4.2 Overgangstraject in kalibratie zomerbed

Omdat een plotselinge overgang in ruwheid in het zomerbed niet realistisch is en een negatief effect heeft op morfologische berekening, zijn enkele alternatieve kalibraties uitgevoerd waarbij gebruik gemaakt is van een geleidelijke overgang tussen ruwheidstrajecten (zie Figuur 2.1). Op basis van deze kalibraties zijn de volgende conclusies getrokken:

- Alle kalibraties zijn succesvol afgerond. Voor ieder station is het een gemiddeld verschil tot de metingen kleiner dan 5 mm.
- Uit een vergelijking van de alpha-waarden van de diverse kalibraties kan geconstateerd worden dat de toevoeging van een transitielengte slechts een beperkte invloed heeft op deze alpha-waarden.



- In alle gevallen gaat de ruwheid geleidelijk over van ruwheidstraject naar ruwheidstraject. Omdat er geen reden is om gebruik te maken van een twee orde transitie wordt voorgesteld om gebruik te maken van een lineair verloop.
- Omdat meetpunten op sommige riviertakken dicht bij elkaar liggen, wordt aanbevolen om een transitielengte van 5 km te gebruiken. Daar waar meetpunten nog dichter bij elkaar liggen (bijv. rond de stuwen), moet nog worden vastgesteld wat de beste oplossing is.
- Aanbevolen wordt om een transitie mee te nemen in de zomerbedruwheden. De aanpassing van de ruwheidsdefinitie, zoals dit nu in een Python-script gebeurt is, dient op een overzichtelijke manier overgenomen te worden in de officiële programmatuur (D-HYDRO / OpenDA). Hiervoor is nader onderzoek nodig.



Figuur 4.3 Chézy-waarden over de rivier-as bij gebruik van verschillende transities.

#### 4.4.3 Kalibratie winterbed bij hoge afvoeren

Bij hoge afvoeren stroomt een deel van de afvoer door het winterbed, maar wordt enkel gekalibreerd op zomerbed. Er zijn kalibraties onderzocht waarbij zowel zomer- als winterbed en waar enkel het winterbed zijn gebruikt voor de kalibratie van hoge. Op basis van deze kalibraties zijn de volgende conclusies getrokken:

- De kalibratie op zomerbed + winterbed is succesvol afgerond. Doordat in deze kalibratie een groter doorstroomoppervlak wordt gekalibreerd zijn de benodigde aanpassingen tot het niveau Midden kleiner dan wanneer enkel het zomerbed wordt gekalibreerd.
- De afvoer door het winterbed van de Waal is beperkt, waardoor de efficiency van een kalibratie op alleen winterbedruwheden beperkt is. In de resultaten is dit duidelijk te zien door de grote correcties die nodig zijn aan de winterbedruwheden om gemeten waterstanden te benaderen.
- Voor alle kalibraties van dit onderdeel is te zien dat er grote veranderingen zijn tussen de ruwheid van het niveau Midden (“bank full”) en het niveau Hoog (Piekafvoer 1995) waarin ook het winterbed mee stroomt. Deze verschillen kunnen veroorzaakt worden door de schematisatie van overlagen. Na verder onderzoek naar en mogelijke verbeteringen aan overlagen dienen deze resultaten geverifieerd te worden.
- Aanbevolen wordt om bij afvoerniveaus waar de waterstanden zich boven “bank full” bevinden, zowel het zomerbed en het winterbed te kalibreren. Dit zal ertoe leiden dat de verschillen in kalibratiecoëfficiënten tussen de afvoerniveaus zullen verkleinen.
- Aanbevolen wordt om uit te zoeken of het mogelijk is om direct aanpassingen te doen aan de intern berekende Chézy-ruwheid. Door eerst met de trachytopen ruwheidsformuleringen een lokale ruwheid in het zomer- en winterbed te berekenen en hier met een kalibratiecoëfficiënt een correctie op te laten doen. De implementatie van deze kalibratiecoëfficiënt in D-HYDRO is al gestart.

Dit nieuwe kalibratieconcept geeft nieuwe mogelijkheden voor de kalibratie die nader onderzocht dienen te worden. Hiervoor zijn de volgende stappen gedefinieerd:

- Definieer het zomerbed met een realistische ruwheid op basis van een fysisch realistische methode. Dit kan zowel ruimtelijk variërend als een functie van de sedimenteigenschappen zijn.
- Definieer het winterbed gelijk aan de huidige aanpak van trachytopen.
- Definieer de initiële kalibratiecoëfficiënten als een ruimte en tijdsafhankelijke variabele. De waarde van de coëfficiënten vóór kalibratie is 1.0.
- Kalibreer zomer- en winterbed gescheiden of gecombineerd voor ieder ruwheidstraject door de kalibratiecoëfficiënten aan te passen.

In deze aanpak is het ook mogelijk om de transities tussen de ruwheidstrajecten te beïnvloeden en ook om de winterbedruwheden aan te passen. De in deze pilot uitgevoerde onderzoeken kunnen daar herhaald worden.

## 5 Pilot-applicatie Zeeën en Estuaria

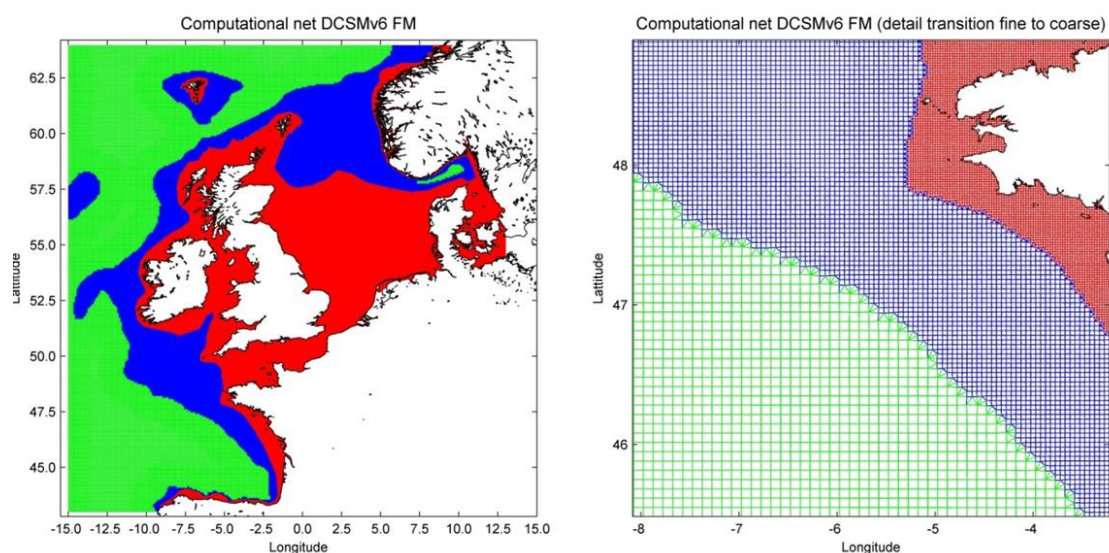
In dit hoofdstuk wordt ingegaan op het modelleren van zeeën en estuaria met de D-HYDRO Suite door een pilot-applicatie voor de Noordzee en aangrenzende wateren (Noordwest-Europees Continentaal Plat) uit te voeren. Het doel van deze studie is het opdoen van ervaring met het opzetten van een nieuw D-Flow Flexible Mesh model, het kalibreren van dit model en het functioneren van het model in de nieuwe modelleeromgeving.

Een uitgebreide rapportage van de resultaten van de pilotschematisatie Noordzee is bijgevoegd in Bijlage D van dit rapport. Hieronder volgt een korte samenvatting van de belangrijkste bevindingen in deze toepassing.

### 5.1 Roostergeneratie

#### 5.1.1 Roostergeneratie op basis van polygonen

Een van de voordelen van D-HYDRO boven WAQUA is de verbeterde mogelijkheden om de roosterresolutie aan te passen waar de lokale ruimteschalen dit vragen of mogelijk maken. Waar het 5<sup>e</sup> generatie WAQUA-DCSMv6 model met rechthoekige cellen en een uniforme roostergrootte werkte, zijn in deze pilot de diepere delen (<400m) met een factor 4 vergrofd (naar ~4 nm) ten opzichte van de oorspronkelijke DCSMv6 resolutie van 1nm (waarbij 'nm' staat voor 'nautical miles' en 1 nm overeenkomt met 1852 m). De resolutie in gebieden met een diepte van minder dan 100 m gelijk gebleven (~1 nm). De te vergroven gebieden zijn in deze aanpak gedefinieerd door middel van gladde polygonen langs isobaths (lijnen met gelijke diepte). De gebieden met verschillende roosterresoluties zijn verbonden met driehoeken (zie Figuur 5.1)



Figuur 5.1 Overzicht rekenrooster met variabele resolutie (groen: ~4 nm, blauw: ~2nm, rood:~1nm). Het rechter paneel toont een detail van de driehoekige rekencellen op de overgangen van resolutie.

## 5.1.2 Roostergeneratie op basis van automatische Courant verfijning

Naast de roostergeneratie waarbij gebruik is gemaakt van polygonen om de roosterverfijningen op te baseren, is er binnen deze pilot-applicatie Noordzee een rooster gemaakt met behulp van automatische Courant verfijning. Dit houdt in dat op basis van het Courant-criterium de ondiepere delen van het grid verder verfijnd worden. Het resultaat is dat de afmetingen van de rekencellen evenredig zijn met de wortel van de lokale waterdiepte.

## 5.1.3 Verdere roosterverfijning

Om verder onderzoek te doen naar de invloed van roosterverfijning op rekentijden en roosterconvergentie zijn er een aantal roosters gemaakt met toenemende verfijning in ondiepe delen van het model. Dit is gedaan op basis van de aanpak zoals beschreven in §5.1.1 (zie Tabel 5.1) en §5.1.2 (zie Tabel 5.2).

Tabel 5.1 Roosterresolutie op de verschillende dieptes voor DCSM-FM-v1

DCSM-FM-v1	DCSM-FM-v1-0.25nm				
	DCSM-FM-v1-0.5nm				
	DCSM-FM-v1-1nm				
Diepte	>400 m	400 – 100 m	100 – 25 m	25 - 6 m <sup>(1)</sup>	< 6 m <sup>(2)</sup>
ΔLon x ΔLat	6' x 4'	3' x 2'	1.5' x 1'	0.75' x 0.5'	0.375' x 0.25'
Afstand	~4nm (~7 km)	~2nm (~3,7 km)	1nm (~1,8 km)	0.5nm (~900m)	0.25nm (~450m)

(1) alleen verfijnd in zuidelijke Noordzee; (2) alleen verfijnd in Nederlandse estuaria en Waddenzee

Tabel 5.2 Roosterresolutie op de verschillende dieptes voor DCSM-FM-v2

DCSM-FM-v2	DCSM-FM-v2-0.25nm				
	DCSM-FM-v2-0.5nm				
	DCSM-FM-v2-1nm				
Diepte	>800 – 800 m	800 – 200 m	200 – 50 m	50 – 12.5 m	< 12.5 m
ΔLon x ΔLat	6' x 4'	3' x 2'	1.5' x 1'	0.75' x 0.5'	0.375' x 0.25'
Afstand	~4nm (~7 km)	~2nm (~3,7 km)	1nm (~1,8 km)	0.5nm (~900m)	0.25nm (~450m)

## 5.2 Rekentijden

Bij het maken van een model is een van de belangrijkste keuzes de afweging tussen rekentijd, resolutie en behaalde nauwkeurigheid. In deze paragraaf wordt een overzicht gegeven van de rekentijden, zowel in vergelijking met de 5<sup>e</sup> generatie WAQUA modellen van de Noordzee (DCSMv6 en DCSMv6-ZUNOV4) als voor enkele niveaus van verfijningen (zie Tabel 5.3).

### 5.2.1 Vergelijking met 5<sup>e</sup> generatie WAQUA modellen

Het direct omzetten van WAQUA-DCSMv6 naar D-HYDRO zorgt voor een vergroting van de rekentijd met ongeveer 25-30%. Echter, als er gebruik gemaakt wordt van het in de diepere delen vergroefde rooster (zie §5.1.1) dan verkleint de rekentijd met een factor 2,2 ten opzichte van het WAQUA model. Als ook de maximale rekentijdstap vergroot wordt (mogelijk gemaakt door de grotere cellen in de diepste delen) dan wordt de rekentijd verkleind met een factor 3,3 zonder veel aan nauwkeurigheid te verliezen.

Tabel 5.3 Overzicht van de resolutie, rekentijden, (gemiddelde en maximale) numerieke tijdstap en aantal elementen van de gebruikte rekenroosters. De berekeningen zijn uitgevoerd op het h6 cluster van Deltares en er is steeds gebruikt gemaakt van 6 nodes met 4 cores.

Model	Max. tijdstap	Resolutie (m)	Rekentijd (min/dag)	Rekentijd (uur/jaar)	(gemiddelde) tijdstap (s)	Aantal rekencellen
DCSMv6-ZUNOV4	WAQUA	4nm-0.15nm	5.4	33.5	60.0	1119,106
DCSMv6	WAQUA	1nm	1.3	8.3	120.0	859,217
DCSMv6-FM	Directe omzet.	1nm	1.7	10.6	120.0	859,217
DCSM-FM-v1-1nm	Dtmax=120s	4nm-1nm	0.6	3.7	120.0	358,970
DCSM-FM-v1-1nm	Dtmax=200s	4nm-1nm	0.4	2.5	197.0	358,970

## 5.2.2 Invloed van roosterverfijning

### Op basis van DCSM-FM-v1-1nm

Om te onderzoeken wat de impact van lokale roosterverfijning is op de rekentijd is, is DCSM-FM-v1-1nm lokaal stapsgewijs verfijnd (zie Tabel 5.1). Hieruit blijkt dat het mogelijk is om het model lokaal met een factor 2 (zuidelijke Noordzee) of 4 (Nederlandse estuaria en Waddenzee) te verfijnen zonder grote consequenties voor de rekentijd (+13% extra rekentijd bij factor 2 verfijning; +35% bij factor 4 verfijning; beide ten opzichte van het rooster zonder verfijning). De vergrote rekentijd hangt voornamelijk samen met het toegenomen aantal rekencellen. Deze beperkte toename in rekentijd steekt positief af bij die van DCSMv6-ZUNOV4 dat ongeveer vier maal langzamer rekent dan DCSMv6 (zie Tabel 5.3), terwijl de lokale verfijning slechts op enkele plekken meer is dan bij DCSM-FM-v1-0.25.

### Op basis van DCSM-FM-v2-1nm

Indien de roosterverfijning op basis van lokale diepte in het gehele modeldomein plaatsvindt (zie Tabel 5.2), neemt het aantal rekencellen sneller toe: met 80% (voorheen 13%) bij verfijning naar 0,5 nm en met 124% (voorheen 20%) bij verfijning naar 0,25 nm (beide ten opzichte van het rooster zonder verdere verfijning). In dit geval ligt de gemiddelde tijdstap waarmee het model met verfijning tot 0,25 nm rekent met bijna een factor twee lager dan in de voorgaande tests (58,9 s tegen 110,4 s). Dit kan te maken hebben met het grotere gebied waarin roosterverfijning is toegepast. Als in deze additioneel verfijnde gebieden hoge stroomsnelheden voorkomen kunnen deze zorgen voor een automatische beperking van de rekentijdstap. Als dit slechts enkele plekken ver van het primaire interessegebied zijn, zou overwogen kunnen worden om lokaal de verfijning achterwege te laten. Hoewel dit op enkele plekken al gedaan is, verdient het de aanbeveling om dit verder te onderzoeken.

## 5.3 Roosterconvergentie

Bij het maken van een model is het van belang dat het rekenrooster voldoende resolutie heeft. Op de Noordzee (en andere getij-gedomineerde gebieden) is dit onder andere van belang voor een correcte generatie van hogere harmonische getijcomponenten en een correcte representatie van getij-opzet interactie. Idealiter wordt een zodanig rooster gekozen dat verdere verfijning geen invloed meer heeft op de rekenresultaten (volledige roosterconvergentie).

Hier toe worden de resultaten behaald met drie verschillende roosters (op basis van DCSM-FM-v2; zie Tabel 5.2) met elkaar vergeleken. Dit is gedaan met bodemgegevens gespecificeerd op de hoekpunten en op de celmidden. De belangrijkste conclusies die hieruit getrokken kunnen worden zijn:

- Bij een verfijning van de minimale roostergrootte van 0,5 nm (~900 m) naar 0,25 nm (~450 m) zijn de verschillen tussen de twee berekeningen ook voor de kuststations nog substantieel (7-8 cm; ongeveer even groot als het verschil tussen de 5<sup>e</sup> generatie Noordzee modellen en metingen). Dit betekent dat er op die locaties nog geen volledige convergentie heeft plaatsgevonden.
- Hoewel nog niet geconvergeerd, zorgen opeenvolgende verfijningen voor een sterke verbetering in de representatie van getij, opzet en totale waterstand in de Nederlandse kustzone. Ook de gemiddelde fout in de M2 amplitude en fase neemt fors af (van -15 cm naar -3.9 cm en van 12.3° naar 1.5°).
- Verdere bestudering van de resultaten van de individuele stations laat zien dat de resultaten in locatie Platform K13a bij de verfijning van 0,5 nm naar 0,25 nm nog veranderen (en verbeteren). Dit is des te opvallender aangezien deze verfijningsstap ter plaatse geen invloed heeft op het rooster (deze verfijning vindt slechts in gebieden ondieper dan 12,5 m plaats). Dit zou betekenen dat de verandering van het getij veroorzaakt wordt door verandering van het getij in naastgelegen gebieden. Dit roept de vraag op in welke mate het niet-geconvergeerd zijn van de waterstanden langs de Nederlandse kust het gevolg is van gebrek aan lokale resolutie en in welke mate verbetering van het getij (door toegenomen resolutie) in naastgelegen gebieden een rol speelt. Het verdient de aanbeveling om dit in een vervolg verder te onderzoeken.

## 5.4 Numerieke en fysische instellingen

### 5.4.1 Invloed van conveyance instellingen

Een belangrijk onderdeel van een model betreft de schematisatie van de bodemhoogte op het rekenrooster. Bij specificatie van de bodemligging op de hoekpunten ('nodes') zijn er verschillende interpolatieopties om het doorstroomoppervlak (op de 'cell edge') en de hoogte ter plaatse van de celmidden ('face') te bepalen. Deze opties worden opgegeven met het keyword 'Conveyance2D'.

De invloed van deze instellingen op de rekentijd en berekende waterstanden is onderzocht door middel van een aantal gevoeligheidsberekeningen, waarin de instelling van deze parameter gewijzigd is ten opzichte van de standaardinstelling Conveyance2D=-1. Hieruit blijkt het volgende:

- Conveyance instellingen 1 en 3 geven zeer vergelijkbare resultaten in de Nederlandse kuststations. De verschillen tussen deze instellingen zijn groter in de Nederlandse estuariene en Waddenzee locaties. Vermoedelijk houdt dit verband met de meer variabele geometrie en bathymetrie in verhouding tot de lokale roosterresolutie.
- In beide gebieden zorgen conveyance instellingen 1 en 3 voor hogere M2 amplitudes en kleinere fases, wat meer vergelijkbaar is met de WAQUA resultaten dan de standaardinstelling.

Naar aanleiding van deze resultaten wordt aanbevolen om door middel van een zo objectief mogelijke test de optimale conveyance instelling te bepalen. Bij voorkeur is dit een test waarvoor een analytische oplossing bekend is. Het nadeel van het gebruiken van een 'real-life' testcase is dat er vele fenomenen en instellingen zijn die van invloed zijn op de voortplanting en dissipatie van het getij (zoals roosterresolutie, de kwaliteit van de bodemgegevens, de invloed van 'self-attraction and loading', etc.).

#### 5.4.2 Impact of bed-level type settings

Er zijn binnen D-HYDRO twee verschillende locaties van een roostercel waarop de bodemhoogte geprojecteerd kan worden:

- discretisatie op de celmidden ('faces'; Bedlevtype=1)
- discretisatie op de hoekpunten ('nodes'; Bedlevtype=3)

In alle berekeningen voor de Pilot-applicatie Zeeën en Estuaria wordt middeling van de samples in de cel ('gridcell averaging') gebruikt. In de hier gebruikte basis instellingen wordt de bodem op de hoekpunten opgegeven. Gevoeligheidsberekening met beide opties laten zien dat de keuze hiervan grote consequenties heeft voor de berekende waterstanden. Als gebruik gemaakt wordt van hoge resolutie bodemgegevens (EMODnet), dan wordt een verschil (RMSE) van gemiddeld 13-14 cm voor de Nederlandse kust gevonden. Dit geldt voor berekeningen met een rooster met minimale roosterafmeting van ~1 nm. Indien in ondiepe gebieden verfijnd wordt tot ~0,25 nm, dan neemt het verschil (RMSE) tussen beide bodemopties af tot 9-10 cm. Verder onderzoek met verder verfijnde roosters is nodig om te bepalen welke van de twee bodemopties de snelste roosterconvergentie heeft.

#### 5.4.3 Horizontale viscositeit

Er zijn berekeningen gemaakt met zowel een constante horizontale viscositeit (ruimtelijk variëren van 10 m<sup>2</sup>/s tot 160 m<sup>2</sup>/s, afhankelijk van de lokale roosterresolutie) als een tijd- en ruimtelijk afhankelijke horizontale viscositeit berekend met het Smagorinsky subgrid-model. Hieruit blijkt dat dit nauwelijks invloed heeft op de rekentijden en berekende waterstanden. Aangezien met gebruik van het Smagorinsky subgrid-model de noodzaak van het specificeren van een (celgrootte-afhankelijke) viscositeit wordt ondervangen, wordt voorgesteld om in de 6<sup>e</sup> generatie modellen gebruikte te maken van de Smagorinsky-formulering.

#### 5.4.4 Nonlin2D

Bij de optie Nonlin2D is er een niet-lineaire relatie tussen het volume van een rekencel en de waterstand. Normaliter wordt een lineaire relatie toegepast. Uit de vergelijking tussen de modelresultaten blijkt dat het gebruik van de Nonlin2D optie tot een verbetering van de waterstandsreproductie leidt (kleinere RMSE-waarden). Wanneer de modelresultaten per station worden bekeken, blijkt dat met name de waterstandsstations waar de omliggende bathymetrie variabel is ten opzichte van de roosterresolutie een verbetering in termen van RMSE-waarden laten zien. Voorts valt bij estuariene stations op dat hoewel het getij minder goed gerepresenteerd wordt dan in het originele WAQUA model, de opzet even goed weergegeven wordt. Echter, doordat het gebruik van Nonlin2D optie een grote (+67%) toename van de rekentijd tot gevolg heeft, kan de vraag worden gesteld wat bij toekomstige modelontwikkeling verstandiger is: het lokaal verhogen van de resolutie in gebieden waar dat tot betere resultaten leidt of het gebruiken van de Nonlin2D optie. Vermoedelijk is met de eerstgenoemde aanpak een vergelijkbare nauwkeurigheid tegen een lagere rekentijd mogelijk. Dit dient verder onderzocht te worden.

#### 5.4.5 Implicietheid van de tijdsintegratie

De parameter Teta0 geeft de waarde van  $\theta$  aan die gebruikt wordt in de numerieke tijdsintegratie en moet een waarde hebben tussen de 0.5 en 1. De waarde van  $\theta$  geeft aan in hoeverre de numerieke oplossing met een impliciete ( $\theta = 1$ ) of expliciete ( $\theta = 0$ ) methode wordt afgehandeld. Naast de standaardinstelling  $\theta=0.55$  is een berekening uitgevoerd met een waarde van  $\theta=0.51$ . Hieruit blijkt dat de verlaging in de gebruikte waarde voor Teta0 leidt tot een kleine verbetering van het getij. Dit hangt grotendeels samen met een toegenomen M2 amplitude.





## 6 Pilot-applicatie Meren

Een uitgebreide rapportage van de resultaten van de pilotschematisatie meren is bijgevoegd in Bijlage F van dit rapport. Hieronder volgt een korte samenvatting van de belangrijkste bevindingen in deze toepassing.

### 6.1 Inleiding

Voor de uitwerking van de zesde-generatie RWS modellen voor meren is toegespitst op het IJsselmeergebied. Binnen het IJsselmeergebied (bestaande uit IJsselmeer, Markermeer en randmeren) is een deelgebied gekozen voor de eerste pilot, namelijk het Markermeer. De reden is dat het Markermeer vooral windgedreven is, terwijl voor het IJsselmeer ook de afvoer (IJssel, spuien Afsluitdijk) dominant kan zijn. Hierbij is gewerkt aan “out of the box” verkenningen en hands-on cases. Bevindingen en vragen die daarbij opkwamen zijn besproken op de bijeenkomst van de klankbordgroep meren van 20 september. Op basis van de uitkomsten van deze bijeenkomst is in het najaar van 2016 een pilot-schematisatie voor het Markermeer uitgevoerd. Dit betreft het specifiek verder uitzoeken van aspecten voor de zesde-generatie RWS modelschematisaties. Resultaten hiervan zullen in januari 2017 met de klankbordgroep meren besproken worden. In dit hoofdstuk worden alvast de eerste, voorlopige bevindingen opgesomd.

### 6.2 Processen

Belangrijkste toepassingen in het IJsselmeergebied volgden uit de tijdens de startworkshop in januari ingevulde Excel formulieren. Voor de bijbehorende processen, typische ruimte/tijd schalen, belangrijkste grootheden op welke (uitvoer)lokatie is eerst globaal gekeken welke processen gebruikt worden en hoe deze aan elkaar gekoppeld worden:

1. Waterstanden, golfploop en overslag bij de dijken rondom het IJsselmeergebied : WBI en RWsOS Meren – wind als forcering van horizontale, dieptegemiddelde stroming (WAQUA), deze weer als randvoorwaarde voor (horizontale) golven (SWAN).
2. Waterverdeling door het IJsselmeergebied: nationaal watermodel – wind- en afvoergedreven 1-dimensionale stroming (SOBEK).
3. Zoutverspreiding door IJsselmeer: 3-dimensionale stroming incl. zout (Delft3D-FLOW).
4. Verspreiding van stoffen door calamiteiten in hele IJsselmeergebied: calamiteiten instrumentarium – stroombeelden van RWsOS Meren (zie 1).
5. Effectstudies slib en ecologie in het IJsselmeergebied: wind als forcering van 3-dimensionale stroming (Delft3D-FLOW) gekoppeld aan (horizontale) golven (SWAN), dit weer als randvoorwaarde voor slib, waterkwaliteit, ecologie (Delft3D-WAQ en HABITAT).

### 6.3 Roostergeneratie

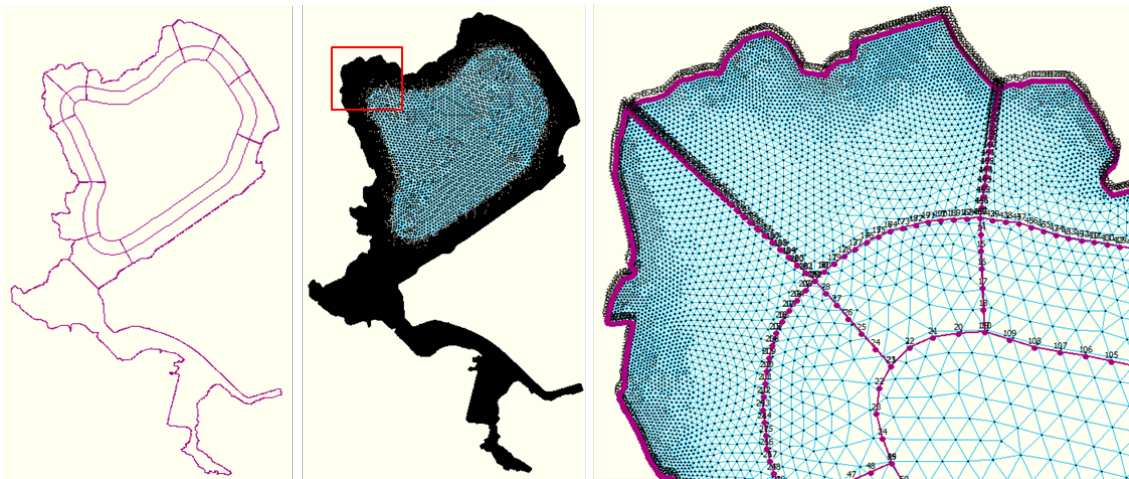
In de pilotschematisatie voor het Markermeer is uitgezocht of een rekenrooster bestaande uit driehoekige rekencellen geschikt is voor WBI, RWsOS Meren en het slibmodel (incl. nutriënten en algen). Het gebruik van driehoekige rekencellen is in de toekomst ook van belang voor de ongestructureerde versie van SWAN voor de daar bijbehorende golfmodellering. Er is nagegaan hoeveel rekenresolutie bij de kust vereist is.

Verder is gekeken hoe het aantal rekencellen verminderd kan worden door de rekencellen geleidelijk groter te maken richting het midden van het Markermeer. Dit is voor een lagere rekentijd.

Om de kwaliteit van de beschouwde roosters te beoordelen is gebruik gemaakt van een fijn uniform driehoekig rekenrooster met rekencellen van 50m (dit is redelijk vergelijkbaar met een fijn uniform vierkant rekenrooster). Bij het uitvoeren van de pilot is een stap voor stap aanpak gehanteerd waarbij het model steeds complexer gemaakt is:

- van een grove benadering van de rand naar het gebruik van gepaste roostercellen die de rand beter volgen,
- van een eenvoudige vaste windsnelheid en -richting naar een in de tijd variërende wind,
- van een uniforme diepte naar een reële diepte uit Baseline,
- van een uniform rekenrooster naar een niet uniform, geoptimaliseerd rekenrooster (zie Figuur 6.1).

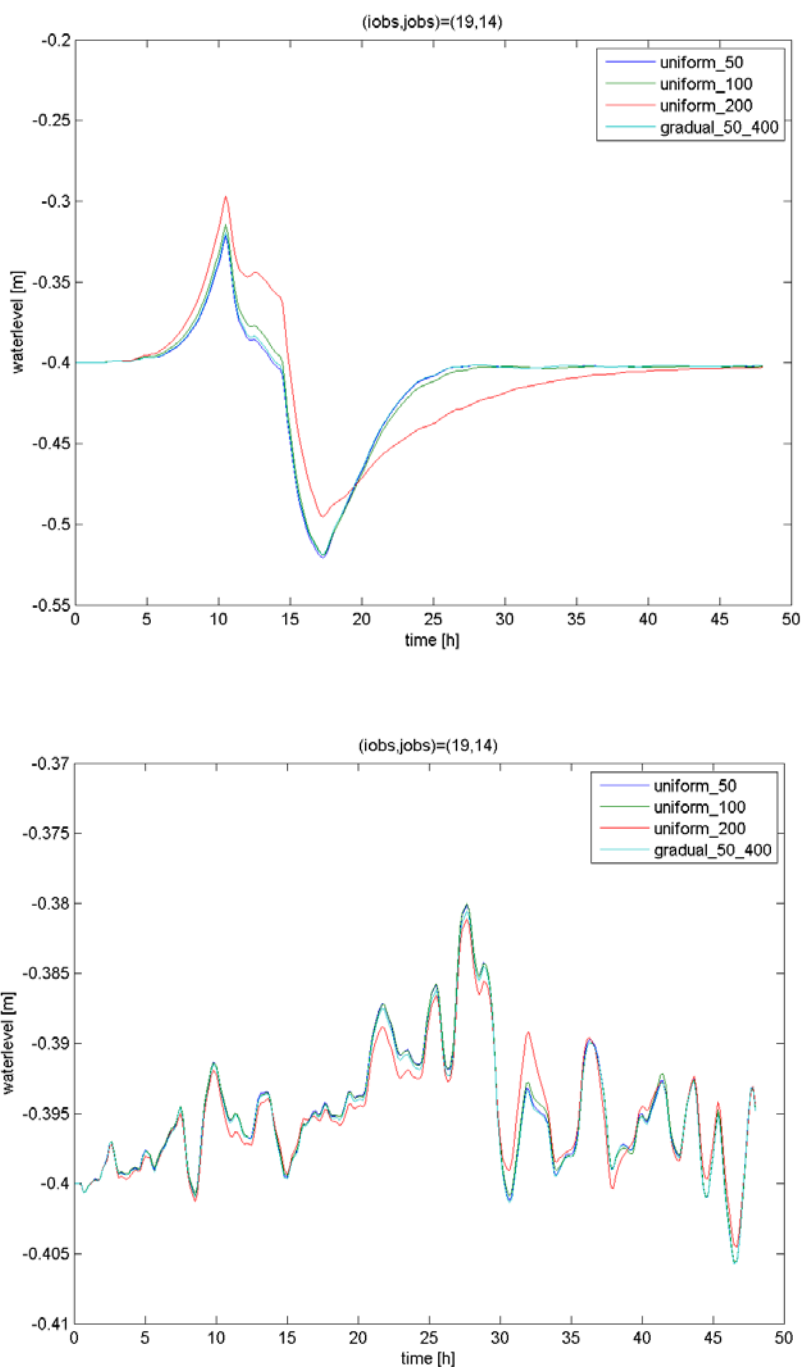
Het maken van een niet-uniforme rekenrooster (zoals in Figuur 6.2) vraagt wel om een te hanteren procedure. Dit is beschreven in een korte handleiding in de rapportage in bijlage F. Bij het toepassen van deze procedure is de ervaring dat het gebruik van driehoekige rekencellen handig is (t.o.v. rechthoekige rekencellen) bij het maken van kleine aanpassingen in het rekenrooster.



Figuur 6.1 Illustratie van de te hanteren procedure voor het maken van een niet uniform rekenrooster met driehoekige rekencellen

#### 6.4 Verificatie

Een rekenrooster met driehoekige rekencellen met bij de rand een resolutie van 50m en met een geleidelijke overgang naar 400m resolutie in het midden van het Markermeer lijkt zowel voor WBI, RWsOS Meren en slibmodel een geschikte mogelijkheid. Figuur 6.2 laat een illustratie daarvan zien. Hierin is te zien dat de resultaten van een rooster dat varieert van 50m tot 400m dezelfde resultaten (c.q. nauwkeurigheid) geeft als het fijnste rooster. Voor meer vergelijkingen, waaronder op raaien van kust naar kust dwars door het hele Markermeer zie de uitgebreide rapportage van de resultaten van de pilotschematisatie meren (Bijlage F).



Figuur 6.2 Illustratie van verificatie consistentie rekenroosters voor WBI (boven) en slibmodel (onder)

## 6.5 Rekentijden

Ten opzichte van een rekenrooster met driehoekige rekencellen met overal een resolutie van 50m heeft de niet-uniforme schematisatie (variërend van 50m naar 400m) een vier keer zo lage rekestijd door vier keer zo minder rekencellen.

Voor meer informatie (o.a. vergelijking met WAQUA model en indicatieve rekestijden) verwijzen we naar resultaten van de pilotschematisatie meren (in Bijlage F van dit rapport).



## 7 Conclusies en aanbevelingen

Dit rapport beschrijft een advies voor een landelijk afgestemd globaal functioneel ontwerp voor alle nieuwe zesde-generatie modelschematisaties voor RWS op basis van de D-Flow Flexible Mesh module binnen de D-HYDRO Suite. Dit ontwerp zal worden gebruikt als input voor het maken van een plan van aanpak per modelschematisatie en het definitief opstellen en afregelen van de modelschematisaties vanaf 2017.

Het algemeen functioneel ontwerp is opgesteld op basis van de resultaten van verschillende werksessies, met zowel technisch inhoudelijk betrokkenen als verschillende stakeholders van binnen en buiten RWS, alsmede de resultaten en conclusies van een drietal pilot-applicaties. Er wordt daarbij onderscheid gemaakt tussen het algemene conceptuele raamwerk en het technisch functioneel ontwerp.

De pilot-applicaties die zijn uitgevoerd binnen deze studie, worden gerapporteerd in drie aparte rapportages. In dit rapport zijn alleen de samenvatting en conclusies opgenomen.

Dit advies en de onderliggende rapporten van de pilot-applicaties zal begin 2017 worden besproken tijdens een aantal werksessies met RWS. Aan de hand hiervan wordt eventueel een volgende versie van dit rapport opgesteld, waarin de resultaten en aanbevelingen uit deze werksessies zijn verwerkt.

### 7.1 Conceptueel raamwerk

In het conceptueel raamwerk wordt met name ingegaan op de gedachte van één landelijk-dekkend model voor heel Nederland. Hierbij zijn de watersystemen leidend en niet de modellen of RWS-beheergrenzen. Er is bewust gekozen om niet te gaan voor het omzetten van de vijfde-generatie modellen, maar wel om de leerpunten en aandachtspunten opgedaan tijdens de ontwikkeling en gebruik van de vijfde generatie mee te nemen bij het opzetten van de nieuwe zesde-generatie modelschematisaties. Verder houdt de overgang naar nieuwe modelschematisaties en nieuwe software in, dat er gebruik kan worden gemaakt van nieuwe beschikbare mogelijkheden en concepten, maar ook dat er nieuwe methodieken voor modelontwikkeling kunnen worden toegepast.

Daarnaast wordt als startpunt voor de ontwikkeling van de zesde generatie de toepassingsgebieden binnen de primaire processen van RWS genomen. Op deze manier staat het gebruik voor de toepassingen van RWS vanaf het begin van de ontwikkeling centraal. De zesde-generatie modellen worden afgestemd op de functionele behoeften vanuit de praktijk wat in het verleden niet altijd het geval was. Er dient daarbij ook rekening te worden gehouden met het feit dat de overgang naar de nieuwe generatie modellen (en de bijbehorende nieuwe software) consequenties kan hebben voor modelgebruik binnen de verschillende toepassingsgebieden.

Er dient gelijktijdig met de opzet van de zesde-generatie modellen in de toekomst gekeken te worden op welke wijze het hele instrumentarium van modellen het beste beheerd en onderhouden kan worden. Dit in relatie tot de behoeften tot het onderling koppelen van modellen (ook 1D-2D-3D), lokale aanpassingen en/of verfijningen en ook de link met o.a. waterkwaliteit en morfologie.

Verder wordt er ingegaan op de wettelijke en bestuurlijke kaders waarin de modellen worden gebruikt. Hiermee dient namelijk rekening te worden gehouden bij de opzet van de zesde-generatie modellen.

## 7.2 Technisch functioneel ontwerp

Naast de eisen en wensen aan het conceptueel ontwerp zijn er verschillende algemene technische aandachtspunten die in het functioneel ontwerp geadresseerd moeten worden. Er is hierbij ingegaan op de volgende aspecten:

- Roosterresolutie
- Numerieke aspecten
- Kunstwerken en overlaten
- Relevante processen
- Kalibratie en validatie
- Onzekerheidsanalyse

Daarnaast wordt er ook aandacht besteed aan “Good Modelling Practice”. Voor de aanbevelingen voor het technisch ontwerp wordt verwezen naar de eerdere hoofdstukken in dit rapport.

## 7.3 Pilot-applicaties

Tijdens de werksessies is een keuze gemaakt om te beginnen met het opzetten van drie pilot-applicaties, te weten:

- Zeeën en estuaria (specifiek de Noordzee);
- Meren (specifiek het Markermeer);
- Rivieren (specifiek de Waal).

Met behulp van deze pilot-applicaties is ervaring opgedaan met het opzetten van een nieuw D-Flow Flexible Mesh model, het kalibreren van dit model en het functioneren van het model in de nieuwe modelleeromgeving. Hieruit zijn enkele conclusies en aanbevelingen naar voren gekomen. Deze ervaringen worden meegenomen in de opzet van de eerste officiële zesde-generatie modelschematisaties. De algemene conclusies uit deze pilot-applicaties zijn tevens opgenomen in het onderliggende technisch functioneel ontwerp. In dit rapport zijn echter alleen de samenvatting en conclusies van de drie pilot-applicaties opgenomen. Voor de complete verslaglegging van de pilots wordt verwezen naar de betreffende detailrapportages in de bijlagen.

Er zijn echter in deze pilots nog vragen over die niet beantwoord zijn en waarvoor geen nadere activiteiten zijn uitgevoerd in 2016. Tijdens de werksessies begin 2017 moet er besloten worden of en hoe deze vragen beantwoord moeten gaan worden, eventueel door het doen van extra pilot studies.

## 7.4 Prioritering en planning zesde generatie

De belangrijkste randvoorwaarde voor de prioritering van zesde-generatie modelschematisaties komt vanuit WBI2023, waarin de wens is uitgesproken om modellen voor alle watersystemen uiterlijk 2020 in D-HYDRO ter beschikking te hebben. Deze expliciete wens komt voort uit het feit dat het WBI vanaf 2023 nog maar eens in de twaalf jaar zal gaan worden vastgesteld (i.p.v. eens in de 6 jaar zoals nu het geval is). Anders zou er tot 2035 met de Simona software in dit kader moeten worden gerekend. Dit zou een efficiënte overgang naar D-HYDRO modellen en het uit beheer en onderhoud nemen van vijfde generatie software en modelschematisaties in de weg staan. Eind 2016 is nog geen prioritering van watersystemen bekend vanuit WBI2023.

Voor het opzetten van de modellen zal per watersysteem eerst een Plan van Aanpak (PvA) worden opgesteld. Hierin worden o.a. de definitieve keuzes voor de instellingen en de keuzes voor de kalibratiemethodiek en kalibratieperiode vastgelegd. Aan de hand van dit PvA kan worden gestart met de echte modellering.

De huidige planning voor het opzetten van de zesde-generatie modelschematisaties wordt hieronder weergegeven. In 2017 wordt gestart met de volgende modelschematisaties:

- Noordzee
- Oosterschelde (+ Veerse Meer)
- Maas
- Markermeer + Randmeren

Op deze manier wordt er vanuit elk van de pilotgebieden een model opgezet. Aan de hand van de ervaringen die hier worden opgedaan, kan het algemene functioneel ontwerp eventueel worden aangepast.

Voor 2018 staan vervolgens de volgende modelschematisaties (voorlopig) op het programma:

- Rijntakken
- Rijn-Maasmonding
- IJsselmeer, IJssel-Vecht Delta
- Grevelingen
- Volkerak Zoommeer
- Westerschelde

Voor de eerste twee watersystemen in deze lijst staat gepland dat het PvA voor het opzetten van deze modellen al in 2017 wordt gemaakt.

De hierboven genoemde planning gaat over de kalibratie en validatie van de modellen. In het vervolgtraject zullen deze modelschematisaties ook nog moeten worden geactualiseerd en moeten er eventueel ook nog beleidsmatige varianten (zogenoemde B&O-versies) worden gemaakt.

Hierbij moet wel worden opgemerkt dat er met de vijfde-generatie aanpak en de bijbehorende Simona software al jarenlang ervaring is opgebouwd. Met de overgang naar een nieuwe aanpak en software hopen we de nodige verbeteringen te kunnen doorvoeren. Hier is echter nog geen uitgebreide ervaring mee opgebouwd en er kunnen daarom een aantal verfijningsslagen nodig zijn om tot hetzelfde niveau te komen. Verder moeten er ook nog een aantal aanpassingen/verbeteringen worden gedaan in de te gebruiken software en tools (D-HYDRO, Baseline 6, OpenDA, etc.), voordat met de uiteindelijke modellering kan worden begonnen. Daarnaast zijn deze softwarepakketten nog volop in ontwikkeling. Dit zal allebei van invloed zijn op de uiteindelijke planning van de oplevering van de modelschematisaties.

Vanuit het conceptueel ontwerp drie pilottoepassingen zijn in ieder geval de volgende generieke vragen gesteld die in 2017 als eerst moeten worden geadresseerd:

- Er moeten nog beslissingen gemaakt worden over de precieze afbakening van de (basis)modellen en de omgang met overlapgebieden en koppelingen.
- Bij alle pilottoepassingen is er in eerste instantie gebruik gemaakt van de standaard numerieke instelling zoals beschreven in Bijlage C.

Een eerste stap in 2017 is het controleren of deze lijst nog aangepast dient te worden aan de hand van de nu opgedane praktijkervaring.

- Er wordt geadviseerd om gebruik te maken van de Smagorinsky-formulering voor alle toepassingen voor het meenemen van de horizontale viscositeit. Er dient echter wel aanvullend onderzoek te gebeuren voor een optimale afregeling van de specifieke parameters voor deze formulering.
- Voor rivieren is er de voorkeur om gebruik te maken van een discretisatie van de bodemhoogte op grid cellen vanwege de mogelijkheden die dit biedt voor de toepassing van een gevalideerde implementatie van de morfologie. Ook de verschillen in resultaten zijn voor rivieren niet erg groot voor de verschillende opties. De ervaring bij zeeën en kusten is dat de verschillen wel groter kunnen zijn en hiervoor wordt gepleit om hier nog verder onderzoek naar te doen.
- In 2017 zal een begin gemaakt worden met het opzetten van een zesde-generatie modelschematisatie waarin D-RTC opgenomen wordt voor de aansturing van keringen (bijvoorbeeld in Oosterschelde en de stuwen op de Maas). Daarnaast is het ook wenselijk om de te gebruiken coëfficiënten en werking van kunstwerken te bespreken met experts. Hierdoor kunnen deze op een betere manier in de modellen worden meegenomen dan in de vijfde generatie het geval is, waar meestal de default instellingen zijn toegepast.
- Bij het kalibreren van de zesde-generatie modelschematisaties zal gebruik worden gemaakt van OpenDA. Wel is er een wens om de onzekerheidsmarges van de metingen mee te nemen bij de kalibratie. Er is een begin gemaakt in 2016 met het toepassen van OpenDA in de piloottoepassingen (o.a. DCSM en Rivieren), maar dit moet in 2017 verder getest worden.
- Er moet worden besloten hoe er omgegaan wordt met onzekerheidsanalyses bij de zesde-generatie modelschematisaties. Er is voorgesteld om aandacht te besteden aan de vraag: *“wat is de onzekerheid van maatgevende waterstanden die met het model worden voorspeld ten gevolge van onzekerheid in de hydraulische ruwheid van het zomer- en winterbed?”* Deze vraag wordt als zeer relevant gezien voor het WBI traject en zal in overleg met medewerkers van het WBI project worden geadresseerd.
- Vanuit de piloottoepassing Rivieren is aanbevolen om beter te kijken naar de procedures rondom kalibratie van de ruwheden voor zomer- en winterbed (zie hoofdstuk 4.4)



## 8 Referenties

*Deltares (2016a). D-Flow Flexible Mesh – D-Flow FM in Delta Shell, User Manual, Versie 1.1.0, 24 juni 2016*

*Deltares (2016b). D-Flow Flexible Mesh – Technical Reference Manual. Versie 1.1.0, 24 juni 2016*

*Deltares (2016c). D-Flow Flexible Mesh – Validation Document. Versie 1.1.148, 11 maart 2016*

*RWS (2014) : Rivierkundig Beoordelingskader versie 3.0, 1 januari 2014.*

*STOWA, 1999, Good Modelling Practice Handbook; STOWA report 99-05, Dutch Dept. of Public Works, Institute for Inland Water Management and Waste Water Treatment, report 99.036, ISBN 90-5773-056-1*



## **A Bijlage: Samenvatting Workshops D-HYDRO**

Een samenvatting van de belangrijkste uitkomsten en bevindingen van de werksessies op 20 januari 2016 en 3 maart 2016 is bijgesloten als bestand:

*1230071-011-ZWS-0010-v2-v-Samenvatting werksessies D-HYDRO.pdf* (29 april 2016)



## **B Bijlage: Lijsten met toepassingen en processen**

De resultaten van de inventarisatie onder RWS betrokkenen zijn samengevat in de bijgevoegde Excel spreadsheet: *Samenvatting\_sheets\_RWS toepassingen.xlsx* (4 juli 2016)



## C Bijlage: Lijst gebruikte numerieke basisinstellingen

No.	MduGroup	MduName	Caption	Type	Default	Description
1	model	Program		String	D-Flow FM	Program name
2	model	Version		String		FM kernel Version
3	model	MDUFormatVersion		String	1.02	File format version (do not edit this)
4	model	GuiVersion		String		DeltaShell FM suite version
5	model	AutoStart	AutoStart: 0 1 2	0 1 2	0	Autostart simulation after loading MDU (0: no, 1: autostart, 2: autostartstop)
6	geometry	NetFile		FileName		Unstructured grid file *_net.nc
7	geometry	BathymetryFile		FileName		Bathymetry points file *.xyb
8	geometry	DryPointsFile		FileName		Dry points file *.xyz (third column dummy z values), or dry areas polygon file *.pol (third column 1/-1: inside/outside)
9	geometry	WaterLevIniFile		FileName		Initial water levels sample file *.xyz
10	geometry	LandBoundaryFile		FileName		Land boundaries file *.ldb, used for visualization
11	geometry	ThinDamFile		FileName		Polyline file *_thd.pli, containing thin dams
12	geometry	FixedWeirFile		FileName		Polyline file *_fxw.pliz, containing fixed weirs with rows x, y, crest level, left ground level, right ground level
13	geometry	StructureFile		FileName		File *.ini containing list of structures (pumps, weirs, gates and general structures)
14	geometry	VertplizFile		FileName		Vertical layering file *_vlay.pliz with rows x, y, Z, first Z, nr of layers, second Z, layer type
15	geometry	ProflocFile		FileName		Channel profile location file *_proflocation.xyz with rows x, y, z, profile number ref
16	geometry	ProfdefFile		FileName		Channel profile definition file *_profdefinition.def with definition for all profile numbers
17	geometry	ProfdefxyzFile		FileName		Channel profile definition file _profdefinition.def with definition for all profile numbers
18	geometry	Uniformwidth1D	Default 1D channel width	Double	2	Uniform width for channel profiles not specified by profloc

No.	MduGroup	MduName	Caption	Type	Default	Description
19	geometry	ManholeFile		FileName		File *.ini containing manholes
20	geometry	WaterLevIni	Initial water level	Double	0	Initial water level at missing s0 values
21	geometry	Bedlevuni	Uniform bed level	Double	-5	Uniform bed level used at missing z values if BedlevType > 2
22	geometry	Bedslope	Bed slope	Double	0	Bed slope inclination if BedlevType > 2
23	geometry	BedlevType	Bed level locations: cells faces nodes/MeanLev nodes/MinLev nodes/MaxLev nodes/MaxLevAtFaces	1 2 3 4 5 6	3	Bathymetry specification (1: at cell centers (from BathymetryFile), 2: at faces (from BathymetryFile), 3: at nodes, face levels mean of node values, 4: at nodes, face levels min. of node values, 5: at nodes, face levels max. of node values, 6: at nodes, face levels max. of cell center values)
24	geometry	Blmeanbelow		Double	-999	If not -999d0, below this level the cell center bed level is the mean of surrounding net nodes
25	geometry	Blminabove		Double	-999	If not -999d0, above this level the cell center bed level is the min. of surrounding net nodes
26	geometry	PartitionFile		FileName		Domain partition polygon file *_part.pol for parallel run
27	geometry	AngLat	Angle of latitude	Double	0	Angle of latitude S-N (deg), 0: no Coriolis
28	geometry	AngLon	Angle of longitude	Double	0	Angle of longitude E-W (deg), 0: Greenwich
29	geometry	Conveyance2D	Conveyance-2D type: R=HU R=H R=A/P K=analytic-1D conv K=analytic-2D conv	-1 0 1 2 3	-1	-1: R,HU,0: R,H, 1: R,A/P, 2: K,analytic-1D conv, 3: K,analytic-2D conv
30	geometry	Nonlin2D		0 1	0	Non-linear 2D volumes, only used if ibedlevtype=3 and Conveyance2D>=1
31	geometry	Sillheightmin	Weir treatment threshold	Double	0	Weir treatment only if both sills larger than this value (m)
32	geometry	Makeorthocenters	From circum- to orthocentres?	0 1	0	Switch from circumcentres to orthocentres in geominit (1: yes, 0: no)
33	geometry	Dcenterinside	Limit cell center	Double	1	Limit cell center (1.0: in cell, 0.0: on c/g)
34	geometry	Bamin		Double	1 . d-6	Minimum grid cell area, in combination with cut cells
35	geometry	OpenBoundaryTolerance		Double	3	Search tolerance factor between boundary polyline and grid cells, in cell size units
36	geometry	RenumberFlowNodes	Renumber Flow Nodes?	0 1	1	Renumber the flow nodes (1: yes, 0: no)
37	geometry	Kmx	Max nr of vertical layers	Integer	0	Maximum number of vertical layers
38	geometry	Layertype	Layer type:	1 2 3	1	Vertical layer type (1: all sigma, 2: all z, 3: use VertplizFile)



No.	MduGroup	MduName	Caption	Type	Default	Description
			Sigma Z Mixed			
39	geometry	Numtopsig	Nr of sigma layers in Z top layer	Integer	0	Number of sigma layers in top of z-layer model
40	geometry	SigmaGrowthFactor	Layer thickness growth factor	Double	1	Layer thickness growth factor from bed up
41	numerics	CFLMax	Max Courant nr	Double	0.7	Maximum Courant number
42	numerics	AdvecType	Advection type: None Wenneker Wenneker/q(uio-u) Perot q(uio-u) Perot q(ui-u) Perot/q(ui-u)-without itself Perot q(uio-u) fast	0 1 2 3 4 5 33	33	Advection type (0: none, 1: Wenneker, 2: Wenneker q(uio-u), 3: Perot q(uio-u), 4: Perot q(ui-u), 5: Perot q(ui-u) without itself
43	numerics	TimeStepType	Time step type: Transport Transport+vel. update full impl. step reduce Step Jacobi explicit	0 1 2 3 4	2	Time step handling (0: only transport, 1: transport + velocity update, 2: full implicit step-reduce, 3: step-Jacobi, 4: explicit)
44	numerics	Limtyphu	Water depth limiter type: None MinMod Van Leer Kooren Monotone Central	0 1 2 3 4	0	Limiter type for waterdepth in continuity eqn. (0: none, 1: minmod, 2: van Leer, 3: Kooren, 4: monotone central)
45	numerics	Limtypmom	Advection velocity limiter type: None MinMod Van Leer Kooren Monotone Central	0 1 2 3 4	4	Limiter type for cell center advection velocity (0: none, 1: minmod, 2: van Leer, 3: Kooren, 4: monotone central)
46	numerics	Limtypsa	Salinity transport limiter type: None MinMod Van Leer Kooren Monotone Central	0 1 2 3 4	4	Limiter type for salinity transport (0: none, 1: minmod, 2: van Leer, 3: Kooren, 4: monotone central)
47	numerics	TransportMethod		0 1	1	Transport method (0: Herman's method, 1: Sander's method)
48	numerics	Vertadvtypsal	Vertical salinity advection:	0 1 2 3 4 5 6	5	Vertical advection type for salinity (0: none, 1: upwind explicit, 2: central explicit, 3: upwind implicit, 4: central implicit, 5: central

No.	MduGroup	MduName	Caption	Type	Default	Description
			None Upwexpl Centrale xpl UpwimpL CentraLimpL CentraLimpL/UpwimpL-neg. higher order expl			implicit but upwind for neg. stratif., 6: higher order explicit, no Forester)
49	numerics	Icgsolver	Solver type: sobekGS_OMP sobekGS_OMPthreadsafe sobekGS sobekGS + Saadilud parallel/Uniform Saad parallel/Petsc parallel/GS	1 2 3 4 5 6 7	4	Solver type (1: sobekGS_OMP, 2: sobekGS_OMPthreadsafe, 3: sobekGS, 4: sobekGS + Saadilud, 5: parallel/global Saad, 6: parallel/Petsc, 7: parallel/GS)
50	numerics	Maxdegree	Max degree in Gauss elimination	Integer	6	Maximum degree in Gauss elimination
51	numerics	FixedWeirScheme	Fixed weir scheme: None Scheme1 Scheme2 Scheme3 Scheme4 Scheme5 Scheme6 Scheme8	0 1 2 3 4 5 6 8	0	Fixed weir scheme (0: none, 1: compact stencil, 2: whole tile lifted, full subgrid weir + factor, 6: semi-subgrid scheme, 8: tabellenboek)
52	numerics	FixedWeirContraction	Fixed weir contraction	Double	1	Fixed weir flow width contraction factor
53	numerics	FixedWeirfrictionscheme	Fixed weir friction scheme: hu Subgrid Weir	0 1	1	Fixed weir friction scheme (0: friction based on hu, 1: friction based on subgrid weir friction scheme)
54	numerics	Fixedweirtopwidth	Fixed weir top width	Double	3	Uniform width of the groyne part of fixed weirs
55	numerics	Fixedweirtopfrictcoef	Fixed weir top friction	Double	-999	Uniform friction coefficient of the groyne part of fixed weirs
56	numerics	Fixedweirtalud	Fixed weir talud	Double	0.25	Uniform talud slope of fixed weirs
57	numerics	IzbnDpos	Position of z boundary: D3Dflow On net boundary On specified polyline	0 1 2	0	Position of z boundary (0: D3Dflow, 1: on net boundary, 2: on specifiend polyline)
58	numerics	Tlfsmo	Boundary smoothing time	Double	0	Fourier smoothing time (s) on water level boundaries
59	numerics	Slopedrop2D	Drop losses threshold	Double	0	Apply drop losses only if local bed slope > Slopedrop2D, (<=0: no drop losses)

No.	MduGroup	MduName	Caption	Type	Default	Description
60	numerics	Chkadvd	Advection checks depth	Double	0.1	Check advection terms if depth < chkadvdp, => less setbacks
61	numerics	Teta0	Time integration theta	Double	0.55	Theta of time integration (0.5 < theta < 1)
62	numerics	Qhrelax	Relaxation on h(Q) boundaries	Double	1.d-2	Relaxation on Q-h open boundaries
63	numerics	Jbasqbnndownwindhs	Downwind cell h on Q-boundaries?	0 1	0	Water depth scheme at discharge boundaries (0: original hu, 1: downwind hs)
64	numerics	cstbnd	Use Delft-3D velocity handling	0 1	0	Delft-3D type velocity treatment near boundaries for small coastal models (1: yes, 0: no)
65	numerics	Maxitverticalforestersal	Max vertical Forester iterations for salinity	Integer	0	Forester iterations for salinity (0: no vertical filter for salinity, > 0: max nr of iterations)
66	numerics	Maxitverticalforestertem	Max vertical Forester iterations for temperature	Integer	0	Forester iterations for temperature (0: no vertical filter for temperature, > 0: max nr of iterations)
67	numerics	Jaorgsethu	Velocity reconstruction order	0 1	1	Velocity reconstruction scheme (0: setumod, sethu, setau sequence, 1: sethu, setau, setumod sequence (standard))
68	numerics	Turbulencemodel	Turbulence model: None Constant Algebraic k-eps k-tau	0 1 2 3 4	3	Turbulence model (0: none, 1: constant, 2: algebraic, 3: k-epsilon, 4: k-tau)
69	numerics	Turbulenceadvection	Turbulence advection: None horizontally explicit and vertically implicit	0 3	3	Turbulence advection (0: none, 3: horizontally explicit and vertically implicit)
70	numerics	AntiCreep	Use anti-creep	0 1	0	Include anti-creep calculation (0: no, 1: yes)
71	numerics	Maxwaterleveldiff	Water level threshold	Double	0	Upper bound (in m) on water level changes (<=0: no bounds)
72	numerics	Maxvelocitydiff	Velocity threshold	Double	0	Upper bound (in m/s) on velocity changes (<=0: no bounds)
73	numerics	EpsHu	Dry cell threshold	Double	1.d-4	Threshold water depth for wet and dry cells
74	numerics	SobekDFM_umin	Sobek-DFM umin	Double	0	Minimal velocity threshold for weir losses in Sobek-DFM coupling.
75	physics	UnifFrictCoef	Uniform friction coefficient	Double	2.3d-2	Uniform friction coefficient (0: no friction)
76	physics	UnifFrictType	Uniform friction type: Chezy Manning WhiteColebrook Z0	0 1 2 3	1	Uniform friction type (0: Chezy, 1: Manning, 2: White-Colebrook, 3: idem, WAQUA style)
77	physics	UnifFrictCoef1D	Uniform 1D friction	Double	2.3d-2	Uniform friction coefficient in 1D links (0: no friction)

No.	MduGroup	MduName	Caption	Type	Default	Description
			coefficient			
78	physics	UnifFrictCoefLin	Uniform linear friction coefficient	Double	0	Uniform linear friction coefficient for ocean models (m/s) (0: no friction)
79	physics	Umodlin	Linear friction Umod	Double	0	Linear friction umod, for ifrctyp=4,5,6
80	physics	Vicouv	Uniform horizontal eddy viscosity	Double	1	Uniform horizontal eddy viscosity (m2/s)
81	physics	Dicouv	Uniform horizontal eddy diffusivity	Double	1	Uniform horizontal eddy diffusivity (m2/s)
82	physics	Vicoww	Uniform vertical eddy viscosity	Double	5 . d-5	Uniform vertical eddy viscosity (m2/s)
83	physics	Dicoww	Uniform vertical eddy diffusivity	Double	0	Uniform vertical eddy diffusivity (m2/s)
84	physics	Vicwminb	Minimum buoyancy viscosity	Double	0	Minimum viscosity in prod and buoyancy term (m2/s)
85	physics	Smagorinsky	Smagorinsky factor	Double	0	Smagorinsky factor in horizontal turbulence
86	physics	Elder	Elder factor	Double	0	Elder factor in horizontal turbulence
87	physics	irov	Wall behaviour: Free Slip Partial Slip No slip	0 1 2	0	Wall roughness type (0: free slip, 1: partial slip using wall_ks)
88	physics	wall_ks	Wall ks for partial slip	Double	0	Nikuradse roughness for side walls
89	physics	Rhomean	Default water density	Double	1000	Average water density (kg/m3)
90	physics	Idensform	Density formula: Uniform Eckhart Unesco Baroclinic	0 1 2 3	1	Density calculation (0: uniform, 1: Eckard, 2: Unesco, 3: baroclinic case)
91	physics	Ag	Gravity	Double	9 . 81	Gravitational acceleration
92	physics	TidalForcing	Tide generating forces	0 1	0	Tidal forcing, if jsferic = 1 (0: no, 1: yes)
93	physics	Doodsonstart	Doodson start	Double	55 . 565	TRIWAQ: 55.565, D3D: 57.555
94	physics	Doodsonstop	Doodson stop	Double	375 . 575	TRIWAQ: 375.575, D3D: 275.555
95	physics	Doodsoneps	Doodson epsilon	Double	0	TRIWAQ = 0.0 400 cm/s , D3D = 0.03 60 cm/s
96	physics	Salinity	Salinity	0 1	0	Include salinity, (0: no, 1: yes)
97	physics	InitialSalinity	Initial salinity	Double	0	Uniform initial salinity concentration (ppt)
98	physics	Sal0abovezlev	Salt water level threshold	Double	-999	Vertical level (m) above which salinity is set 0

No.	MduGroup	MduName	Caption	Type	Default	Description
99	physics	DeltaSalinity	TODO	Double	-999	for testcases
100	physics	Backgroundsalinity	Background salinity	Double	30	Background salinity for eqn. of state (ppt)
101	physics	Temperature	Heat flux model: None Transport only Excess temperature Composite model	0 1 3 5	0	Include temperature (0: no, 1: only transport, 3: excess model of D3D, 5: composite (ocean) model)
102	physics	InitialTemperature	Initial temperature	Double	6	Uniform initial water temperature (degC)
103	physics	Secchidepth	Secchi depth	Double	2	Water clarity parameter (m)
104	physics	Stanton	Stanton number	Double	0.0013	Coefficient for convective heat flux
105	physics	Dalton	Dalton number	Double	0.0013	Coefficient for evaporative heat flux
106	physics	Backgroundwatertemperature	Background temperature	Double	6	Background water temperature for eqn. of state (deg C)
107	physics	SecondaryFlow	Secondary flow	0 1	0	Secondary flow (0: no, 1: yes)
108	physics	EffectSpiral	Spiral flow effect factor	Double	0	Weight factor of the spiral flow intensity on transport angle
109	physics	BetaSpiral	Spiral flow beta factor	Double	0	Weight factor of the spiral flow intensity on flow dispersion stresses
110	wind	ICdtyp	Wind drag coefficient type: Constant Smith & Banks (2 break points) Smith & Banks (3 break points) Charnock 1955 Whang 2005	1 2 3 4 5	2	Wind drag coefficient type (1: constant, 2: S&B 2 breakpoints, 3: S&B 3 breakpoints, 4: Charnock constant, 5: Whang)
111	wind	Cdbreakpoints	Break points wind drag coefficient	DoubleArray	$6.3d-4$ $7.23d-3$	Wind drag coefficient break points
112	wind	Windspeedbreakpoints	Break points wind speed	DoubleArray	0.100.	Wind speed break points (m/s)
113	wind	Rhoair	Air density	Double	1.2	Air density (kg/m3)
114	wind	PavBnd	Average air pressure on bounds	Double	0	Average air pressure on open boundaries (N/m2) (only applied if > 0)
115	wind	PavIni	Average initial air pressure	Double	0	Average air pressure for initial water level correction (N/m2) (only applied if > 0)

No.	MduGroup	MduName	Caption	Type	Default	Description
116	waves	Wavemodelnr	Wave model: None Fetch/depth limited hurdlestive Young-Verhagen SWAN Wave group forcing	0 1 2 3 4	0	Wave model nr. (0: none, 1: fetch/depth limited hurdlestive, 2: Young-Verhagen, 3: SWAN, 4: wave group forcing)
117	waves	WaveNikuradse	Wave friction Nikuradse ks coefficient	Double	0.01	Wave friction Nikuradse ks coefficient (m), used in Krone-Swart
118	waves	Rouwav	Friction model for wave stress: None Fredse (1984) Myrhaug and Slaattelid (1990) Huynh-Thanh and Temperville (1991) Grant and Madsen (1979) Davies et al. (1988) Bijker (1967) Christoffersen and Jonsson (1985) O'Connor and Yoo (1988) Van Rijn et al. (2004)	No FR84 MS90 HT91 GM79 DS88 BK67 CJ85 OY88 VR04	FR84	Friction model for wave induced shear stress
119	waves	Gamax	Max. wave/depth ratio	Double	1	Maximum wave height/water depth ratio
120	time	RefDate	Reference date	DateTime	20010101	Reference date (yyyymmdd)
121	time	Tzone	Time zone	Double	0	Time zone assigned to input time series
122	time	DtUser	User time step	Interval	300	Time interval (s) for external forcing update
123	time	DtNodal	Nodal update interval	Interval	0	Time interval (s) for updating nodal factors in astronomical boundary conditions
124	time	DtMax	Max. time step (s)	Double	30	Maximal computation timestep (s)
125	time	DtInit	Initial time step (s)	Double	1	Initial computation timestep (s)
126	time	Tunit	Time unit: hours minutes seconds	H M S	S	Time unit for start/stop times (H, M or S)
127	time	TStart	Start time	Double	0	Start time w.r.t. RefDate (in TUnit)
128	time	TStop	Stop time	Double	86400	Stop time w.r.t. RefDate (in TUnit)
129	restart	RestartFile		FileName		Restart netcdf-file, either *_rst.nc or *_map.nc

No.	MduGroup	MduName	Caption	Type	Default	Description
130	restart	RestartDateTime	Restart Time	DateTime		Restart date and time (YYYYMMDDHHMMSS) when restarting from *_map.nc
131	external forcing	ExtForceFile		FileName		Old format for external forcings file *.ext, link with tim/cmp-format boundary conditions specification
132	external forcing	ExtForceFileNew		FileName		New format for external forcings file *.ext, link with bc-format boundary conditions specification
133	trachytopes	TrtRou	Include trachytopes?: Yes (Y) No (N)	Y N	N	Include alluvial and vegetation roughness (trachytopes) (Y: yes, N: no)
134	trachytopes	TrtDef		FileName		File (*.ttd) containing trachytopes definitions
135	trachytopes	TrtL		FileName		File (*.arl) containing distribution of trachytopes definitions
136	trachytopes	TrtDt		Double	60	Trachytopes roughness update time interval (s)
137	****					
138	*					
139	GUIOnly	StartTime	Start Time	DateTime		Begin of simulation period
140	GUIOnly	StopTime	Stop Time	DateTime		End of simulation period
141	GUIOnly	UseTemperature	Temperature	0 1	0	Include temperature
142	*					
143	GUIOnly	WriteHisFile	Write His File	0 1	0	Write a history file
144	GUIOnly	HisOutputDeltaT	His output interval	Interval		Interval for writing His Output
145	GUIOnly	SpecifyHisStart	Specify His output start time	0 1	0	Start writing his output later then start of simulation
146	GUIOnly	HisOutputStartTime	His output start time	DateTime		No his output will be written before this time stamp
147	GUIOnly	SpecifyHisStop	Specify His output stop time	0 1	0	Stop writing his output before of simulation
148	GUIOnly	HisOutputStopTime	His output stop time	DateTime		No his output will be written after this time stamp
149	*					
150	GUIOnly	WriteMapFile	Write Map file	0 1	0	Write a map file
151	GUIOnly	MapOutputDeltaT	Map output interval	Interval		Interval for writing Map Output
152	GUIOnly	SpecifyMapStart	Specify Map output start time	0 1	0	Start writing map output later then start of simulation

No.	MduGroup	MduName	Caption	Type	Default	Description
153	GUIOnly	MapOutputStartTime	Map output start time	DateTime		No map output will be written before this time stamp
154	GUIOnly	SpecifyMapStop	Specify Map output stop time	0 1	0	Stop writing map output before of simulation
155	GUIOnly	MapOutputStopTime	Map output stop time	DateTime		No map output will be written after this time stamp
156	*					
157	GUIOnly	WriteRstFile	Write Rst file	0 1	0	Write restart files
158	GUIOnly	RstOutputDeltaT	Rst output interval	Interval		Interval for writing Rst Output
159	GUIOnly	SpecifyRstStart	Specify Rst output start time	0 1	0	Start writing restart files later then start of simulation
160	GUIOnly	RstOutputStartTime	Rst output start time	DateTime		No restart files will be written before this time stamp
161	GUIOnly	SpecifyRstStop	Specify Rst output stop time	0 1	0	Stop writing restart files before of simulation
162	GUIOnly	RstOutputStopTime	Rst output stop time	DateTime		No restart files will be written after this time stamp
163	*					
164	output	OutputDir	Output directory	String		Output directory of map-, his-, rst-, dat- and timings-files, default: DFM_OUTPUT_<modelname>. Set to . for current dir.
165	output	FlowGeomFile		FileName		Flow geometry NetCDF *_flowgeom.nc
166	output	ObsFile		FileName		Points file *.xyn with observation stations with rows x, y, station name
167	output	CrsFile		FileName		Polyline file *_crs.pli defining observation cross sections
168	output	HisFile		FileName		History output file *_his.nc in NetCDF format
169	output	HisInterval	His output interval	DoubleArray	300	History output times, given as 'interval' 'start period' 'end period' (s)
170	output	XLSInterval	XLS output interval	Interval	0	Interval (s) between XLS history
171	output	MapFile		FileName		Map file output file *_map.nc in NetCDF format
172	output	MapInterval	Map output interval	DoubleArray	1200	Map file output times, given as 'interval' 'start period' 'end period' (s)
173	output	RstInterval	Restart output interval	DoubleArray	86400	Restart file output times, given as 'interval' 'start period' 'end period' (s)
174	output	Slincinterval		Interval	0	Interval (m) in incremental file for water levels s1



No.	MduGroup	MduName	Caption	Type	Default	Description
175	output	WaqInterval	WAQ output interval	Interval	0	Interval (in s) between DELWAQ file outputs
176	output	StatsInterval	Statistics output interval	Interval	0	Interval (in s) between simulation statistics output
177	output	Writebalancefile	Write water balance file	0 1	0	Write balance file (1: yes, 0: no)
178	output	TimingsInterval	Timing statistics output interval	Interval	0	Timings statistics output interval
179	*output	TimeSplitInterval	Time splitting interval	Interval	0X	Time splitting interval, after which a new output file is started. value+unit, e.g. '1 M', valid units: Y,M,D,h,m,s.
180	output	MapFormat	Map file output format: NetCDF Tecplot Both U GRID(beta)	1 2 3 4	1	Map file format (1: NetCDF, 2: Tecplot, 3: NetCFD and Tecplot)
181	output	Wrihis_balance	Write mass balance totals	0 1	1	Write mass balance totals to his file (1: yes, 0: no)
182	output	Wrihis_structure_gen	Write general structure parameters	0 1	1	Write general structure parameters to his file (1: yes, 0: no)
183	output	Wrihis_structure_dam	Write dam parameters	0 1	1	Write dam parameters to his file (1: yes, 0: no)
184	output	Wrihis_structure_pump	Write pump parameters	0 1	1	Write pump parameters to his file (1: yes, 0: no)
185	output	Wrihis_structure_gate	Write gate parameters	0 1	1	Write gate parameters to his file (1: yes, 0: no)
186	output	Wrimap_waterlevel_s0	Write water levels for previous time step	0 1	1	Write water levels for previous time step to map file (1: yes, 0: no)
187	output	Wrimap_waterlevel_s1	Write water levels	0 1	1	Write water levels to map file (1: yes, 0: no)
188	output	Wrimap_velocity_component_u0	Write velocity component for previous time step	0 1	1	Write velocity component for previous time step to map file (1: yes, 0: no)
189	output	Wrimap_velocity_component_u1	Write velocity component	0 1	1	Write velocity component to map file (1: yes, 0: no)
190	output	Wrimap_velocity_vector	Write cell-center velocity vectors	0 1	1	Write cell-center velocity vectors to map file (1: yes, 0: no)
191	output	Wrimap_upward_velocity_component	Write upward velocity component	0 1	0	Write upward velocity component on cell interfaces (1: yes, 0: no)
192	output	Wrimap_density_rho	Write flow density	0 1	1	Write flow density to map file (1: yes, 0: no)

No.	MduGroup	MduName	Caption	Type	Default	Description
193	output	Wrimap_horizontal_viscosity_viu	Write horizontal viscosity	0 1	1	Write horizontal viscosity to map file (1: yes, 0: no)
194	output	Wrimap_horizontal_diffusivity_diu	Write horizontal diffusivity	0 1	1	Write horizontal diffusivity to map file (1: yes, 0: no)
195	output	Wrimap_flow_flux_q1	Write flow flux	0 1	1	Write flow flux to map file (1: yes, 0: no)
196	output	Wrimap_spiral_flow	Write spiral flow	0 1	1	Write spiral flow to map file (1: yes, 0: no)
197	output	Wrimap_numlimdt	Write the number of times a cell was Courant limiting	0 1	1	Write the number times a cell was Courant limiting to map file (1: yes, 0: no)
198	output	Wrimap_taucurrent	Write the shear stress	0 1	1	Write the shear stress to map file (1: yes, 0: no)
199	output	Wrimap_chezy	Write the chezy roughness	0 1	1	Write the chezy roughness to map file (1: yes, 0: no)
200	output	Wrimap_turbulence	Write vicww k and eps	0 1	1	Write vicww, k and eps to map-file (1: yes, 0: no)
201	output	Wrimap_wind	Write wind velocities	0 1	1	Write wind velocities to map file (1: yes, 0: no)
202	output	Wrimap_heat_fluxes	Write heat fluxes	0 1	0	Write heat fluxes to map file (1: yes, 0: no)
203	output	Richardsonoutput	Write Richardson numbers?	0 1	1	Write Richardson numbers (1: yes, 0: no)
204	output	MapOutputTimeVector	Specific Map output times	FileName		File (*.mpt) containing fixed map output times (s) w.r.t. RefDate
205	output	FullGridOutput	Full grid output	0 1	0	Full grid output mode (0: compact, 1: full time-varying grid data)
206	output	EulerVelocities	Full grid output	0 1	0	Euler velocities output (0: GLM, 1: Euler velocities)

## **D Bijlage: Pilot-applicatie Kusten**

Zie: *1230071-011-ZWS-0018-v1.0-r-Kustmodellen in D-HYDRO - Pilot-applicatie Noordzee\_signed.pdf*



## **E Bijlage: Pilot-applicatie Rivieren**

Zie: *1230071-011-ZWS-0017-v1.0-r-Riviermodellen in D-HYDRO - Pilot-applicatie Rijntakken\_def.pdf*



## **F Bijlage: Pilot-applicatie Meren**

Zie: *1230071-011-ZWS-0019-r-Merenmodellen in D-HYDRO - Pilot-applicatie Markermeer\_gereviewed\_CONCEPT.docx*





## G Good Modelling Practice

Foremost in Good Modelling Practice is the question the model has to address, or better: What is the answer the model has to provide or support (remembering that the professional judgement is the ultimate assessment)?

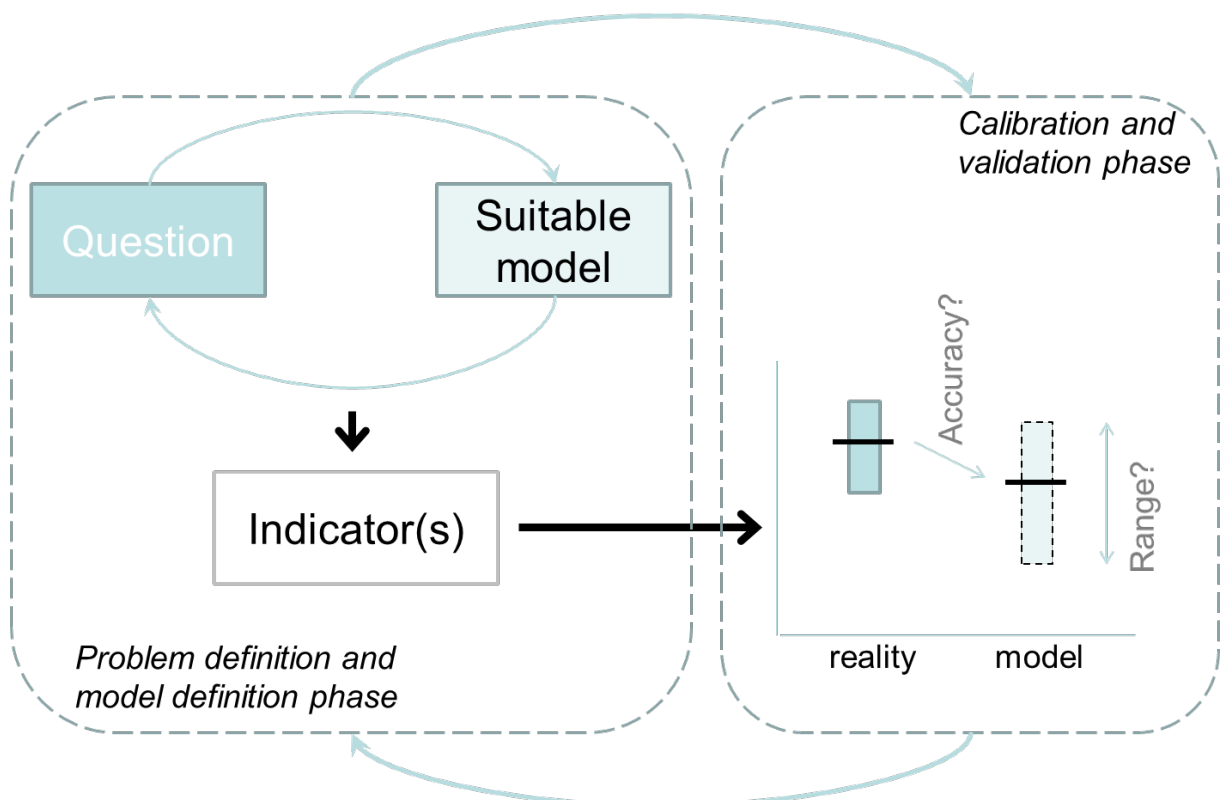
Each indicator that the model has to generate, is defined by six characteristics (note that there may be multiple indicators):

- |                       |   |
|-----------------------|---|
| • Parameter and unit  | e.g. Suspended Particulate Matter in $\text{g/m}^3$ |
| • Time                | e.g. "2014" or "May 12, 2014 14:15"                 |
| • Horizontal location | e.g. (x, y)   |
| • Vertical location   | e.g. "1 m below water surface" or "-3 m CD"         |
| • Statistics          | e.g. "Annual average" or "90% exceedance"           |
| • Required accuracy   | e.g. "trend plus or minus" or "<0.2 m/s"            |

GMP distinguishes three phases in each study that makes use of predictive models:

- 1) The problem definition and model definition phase
- 2) The model calibration and validation phase
- 3) The scenario phase

The problem definition and model definition phase and the model calibration and validation phase are schematically shown in Figure 1.



Figuur G.1 Schematic representation of the first two phases of a modelling study according to Good Modelling Practice

The key in the problem definition and model definition phase is the interaction between the party with the question and the party with the modelling tool. Together, these parties have to identify and define indicators that fulfil both the need for the answer and can be modelled accurately enough. Exchanging and managing realistic expectations is the crucial element in this phase.

When indicators are defined and mutually agreed upon, the model calibration and validation phase begins. The model will calculate the value of the indicator, e.g. the monthly average SPM concentration at a seawater intake. The purpose of calibration and validation is to establish model accuracy and model reliability on two aspects:

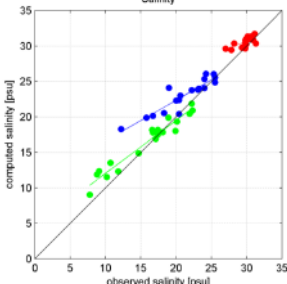
- The indicator value itself
- The processes and linkages leading to the indicator value, i.e. an effect chain approach

The latter is illustrated with an example. The SPM concentration at any location depends on several factors such as available fines, currents, waves etc. The simulated SPM concentration is considered reliable if the contribution of each factor is reliable. Calibration and validation must therefore not only look at the indicator value at a receptor location, but also at the path leading to this result.

The key concept of calibration and validation is comparison of model results against field measurements. By definition, this means that calibration and validation are always carried out for historic situations. Such a comparison is done visually by comparing model results with data points plotted on a map or time series. This step is essential to the modeller for understanding model behaviour and model performance, but is a subjective evaluation. Therefore, Deltares always performs an objective evaluation as well also referred to as goodness-of-fit. In an objective evaluation, model data and field data are compared by statistical means. There are many statistical methods available and it requires considerable expertise to select a suitable method. The goodness-of-fit method must match the definition of the indicator value, the data availability and the system understanding of the natural environment. Deltares has developed and continues to develop for the Netherlands government a working approach for goodness-of-fit and incorporated it in the Good Modelling Practice approach.

The most used methods for goodness-of-fit are briefly described in the following table.

<p>Root Mean Square Error (RMSE) and normalised Root Mean Square Error (nRMSE)</p> $RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\zeta_{sim,i} - \zeta_{obs,i})^2}$	<p>The RMSE represents the sample standard deviation of the differences between predicted values and observed values. The RMSE is normalised for example by division by the average to compare RMSE's at different locations or for different variables. An RMSE is mostly calculated when high frequency data is available such as water levels.</p>
<p>Standaarddeviatie (<math>\sigma</math>)</p> $\sigma = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n ((\zeta_{sim,i} - \zeta_{obs,i}) - GV)^2}$	<p>De standaarddeviatie is een maat voor de spreiding van het verschil rondom het gemiddeld verschil.</p>

<p>Gemiddeld verschil (bias)</p> $GV = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\zeta_{sim,i} - \zeta_{obs,i})$	<p>Bij het gemiddeld verschil kan een te hoog berekende waterstand een te laag berekende waterstand compenseren. In sommige gevallen kan dit gewenst zijn; het kan echter ook een vertekend beeld geven van de betrouwbaarheid van een model.</p>
<p>Verskil in piekwaterstand</p> $\Delta\zeta_{max} = \max(\zeta_{sim}) - \max(\zeta_{obs})$ $\Delta\zeta_{min} = \min(\zeta_{sim}) - \min(\zeta_{obs})$	<p>Voor de toepassing van het model in extreme (bijv. WTI) omstandigheden gaat de interesse uit naar de extreme waterstanden (zowel maxima als minima). Er wordt gekeken naar het verschil tussen de maximale (of minimale) gesimuleerde waterstand en de maximale (of minimale) gemeten waterstand Het gaat hierbij om het verschil tussen twee waarden op verschillende tijdstippen. Het voordeel van deze parameter is dat deze niet gevoelig is voor eventuele faseverschuivingen tussen de gesimuleerde en gemeten waterstanden. Het nadeel is dat het verschil in piekwaterstand gevoelig is voor eventuele uitschieters, omdat er gekeken wordt naar momentane waarden.</p>
<p>Linear regression / Correlation coefficient</p> 	<p>The correlation coefficient in a linear regression is a simple and straightforward measure for the match between two sets of numbers, in this case a measured variable and a modelled variable. Most used is Pearson's <math>R^2</math>. When relatively few data points are available, Spearman's rank correlation can be used.</p>

<p><b>Boxplot</b></p>	<p>Although technically not an objective comparison, Deltares make use of boxplot presentations to visualise a range of statistics for both measured data and modelled data. A boxplot typically includes the average or median and range values such as percentiles and standard deviation. The visual comparison can then combined with statistical tests on significance such as a p test.</p>
<p><b>Target diagram</b></p> <p><i>Bias = Difference in mean, normalised with standard deviation</i>  <i>RMSD = Root Mean Square of difference in variation, normalised with standard deviation</i></p>	<p>The target diagram plots together the root mean square difference, the average difference and the standard deviation of the difference. Besides, this diagram includes the sign of the difference of the standard deviations of the system and the reference.</p> <p>A deviation on the y-axis indicates to what extent the calculated average deviates from the measured average. A deviation on the x-axis indicates to what extent the calculated variation of an indicator deviates from the measured variation. Points within the inner circle are considered very good, and within the outer circle good. It is a visually powerful presentation, but relies strongly on system understanding and data and model knowledge to set up a good comparison.</p>
<p><b>Prediction skill</b></p>	<p>Skill in prediction is a scaled representation of forecast error that relates the prediction accuracy of a model to a reference, which can be data or another model.</p>

## H Bijlage: Onzekerheidsanalyse

*Dit memo is geschreven door Koen Berends ter opname in het 'Advies voor algemeen functioneel ontwerp voor de zesde-generatie modellen van RWS' en beschrijft de stappen die genomen kunnen worden voor het uitvoeren van een onzekerheidsanalyse.*

### H.1 Introductie

De hydraulische modellen die binnen D-HYDRO worden gebouwd beschrijven de werkelijkheid zo getrouw mogelijk. Desalniettemin wordt er noodzakelijkerwijs gebruik gemaakt van incomplete data, vereenvoudigingen en empirische benaderingen van de fysische processen. Een onzekerheidsanalyse kan gebruikt worden om de invloed van onzekerheid in invoer (zoals afvoerreeksen) of niet direct meetbare parameters (zoals hydraulische ruwheid) op modeluitkomsten af te schatten. Een onzekerheidsanalyse kan hierdoor helpen om het (afwijkende) modelresultaten beter te begrijpen.

Dit hoofdstuk beschrijft de stappen die genomen kunnen worden om een onzekerheidsanalyse uit te voeren met D-HYDRO modellen. Daartoe geven wij eerst een korte introductie in onzekerheid en onzekerheidsanalyse. Wij beschrijven de wetenschappelijke inzichten in dit onderwerp met speciale aandacht voor toepassingen in de rivierkunde.

Gevoeligheids- en onzekerheidsanalyse lijken veel op elkaar. Een definitie van onzekerheidsanalyse is *'kwantificatie van de mate van onzekerheid in modeluitvoer ten gevolge van onzekerheid in modelinvoer'*. Een nauwe verwant van onzekerheidsanalyse is *gevoeligheidsanalyse*, waarvoor een definitie is: *'Studie naar hoe onzekerheid in de modeluitvoer kan worden toegeschreven aan bronnen van onzekerheid in modelinvoer'* (Saltelli et al., 2008). De twee verschillen dus van elkaar in de vraag die ze beantwoorden. De methodieken die beide analyses gebruiken komen erg overeen. Wij focussen hier op onzekerheidsanalyse, maar zullen refereren aan gevoeligheidsanalyse bij de bespreking van de onzekerheidsbronnen.

Soms wordt gezegd dat onzekerheidsanalyse niet nodig is omdat hydraulische modellen fysisch realistisch zijn (Pappenberger en Beven, 2006). De noodzaak voor kalibratie waarschuwt hier echter tegen. Uit ervaring is gebleken dat de resultaten van de kalibratie afhankelijk zijn aan de gebruikte software versie<sup>7</sup>, de gekalibreerde periode<sup>8</sup> en resolutie van de onderliggende data<sup>9</sup>. Dit alleen demonstreert dat een puur fysische interpretatie van de kalibratieparameters onjuist is, en dat onzekerheid verondersteld moet worden, zeker voor toepassingen buiten het gekalibreerde bereik.

---

<sup>7</sup> Zie hiervoor de herkalibraties voor, bijvoorbeeld, SOBEK 3.2. ten opzichte van SOBEK 3.0 uitgevoerd binnen de 5<sup>e</sup> generatie KPP modelschematisaties

<sup>8</sup> Zie hiervoor de herkalibraties voor 2011 (Rijn) en 2014, 2015 (Maas) van recente SOBEK modellen met aanbevelingen voor herkalibraties voor WAQUA.

<sup>9</sup> Zie hiervoor de herkalibratie van WAQUA naar aanleiding van de 5x5 meter vegetatielegger.

## H.2 Samenvatting

Een onzekerheidsanalyse kan als volgt worden opgezet:

1. Formuleer de vraag
2. Selecteer de belangrijke bronnen van onzekerheid
3. Propageer de onzekerheidsbronnen door het model
4. Rapporteer over de resulterende onzekerheid in de modeluitvoer.

Het werk van Warmink et al. (2011, 2012, 2013) biedt een goed aanknopingspunt voor het uitvoeren van een onzekerheidsanalyse met een D-HYDRO model van een Nederlandse bovenrivier.

## H.3 Onzekerheidsanalyse

### H.3.1 Wat is onzekerheid?

In praktische zin, kan onzekerheid worden beschrijven als de waarschijnlijkheid van een bepaalde uitkomst, uitgedrukt in een waarde tussen 0 en 1, waarbij waarde nabij 0 'zeer onwaarschijnlijk' zijn en waardes nabij 1 'zeer waarschijnlijk'. Dit wordt vaak uitgedrukt in een (cumulatieve) kansdichtheidsfunctie of in kwantielen.

Er wordt vaak onderscheid gemaakt tussen zogenaamde voorspellingsonzekerheid en modelonzekerheid (Draper, 1995). Voorspellingsonzekerheid is de onzekerheid gegeven model(len) en metingen. Voorspellingsonzekerheid (*predictive uncertainty*) wordt in operationele voorspellingen afgeschat. Zie hiervoor bijvoorbeeld het recente werk van Jan Verkade (Verkade, 2015).

Modelonzekerheid is onzekerheid van modeluitkomsten gegeven onzekerheid in de definitie van het model. Er is geen wetenschappelijke consensus over te terminologie betreft wat wel en niet tot modelonzekerheid hoort. Wat vaak hieronder wordt geschaard is onzekerheid met betrekking tot de modelopzet of structuur, parameters, invoer en onderliggende code (zie bijvoorbeeld Walker, 2003).

### H.3.2 Stappen in een onzekerheidsanalyse

In het 'Good Modelling Practice Handbook' van o.a. STOWA, WL|Delft Hydraulics en RIZA werd onzekerheidsanalyse al opgenomen als onmisbaar element in modelontwikkeling (van Waveren et al., 1999). Sindsdien is de kennis en beschikbare methoden toegenomen. De volgende stappen zijn gebruikelijk in een onzekerheidsanalyse:

1. Formuleer de vraag waarop onzekerheidsanalyse antwoord geeft
2. Formuleer en selecteer de bronnen van onzekerheid, de mate van onzekerheid in deze bronnen. Deze keuze wordt idealiter ondersteund voor een gevoeligheidsanalyse.
3. Propageer de onzekerheid in de invoer door het model. Dit wordt vaak gedaan door middel van numerieke integratie.
4. Communicatie van de onzekerheid

### H.3.3 Formuleren van de vraag

**H.3.4** De vraag bepaalt de analyse. Net zoals er niet één model kan worden gemaakt die geschikt is voor alle vragen, volstaat één onzekerheidsanalyse niet om de algemene onzekerheid van een model af te schatten. Bovendien geldt ook hier het ‘garbage in- garbage out’ principe. Als bekende bronnen van onzekerheid (met opzet) worden genegeerd, of als de bandbreedte van de onzekerheid te nauw of te breed wordt ingeschat, kan men beter niet beginnen aan de analyse.

Een selectie uit relevante onzekerheidsanalyses uit de literatuur:

- **Wat is de onzekerheid in maatgevend hoogwater op de Waal ten gevolge van onzekerheid in beddingsvormruwheid?** (Warmink et al., 2012)
- **Wat is de onzekerheid van maatgevend hoogwater op de Waal ten gevolge van onzekerheid in zowel beddingsvormruwheid en vegetatieruwheid?** (Warmink et al., 2013)
- **Wat is de onzekerheid van inundatiegrafieken ten gevolge van onzekerheid in de randvoorwaarden?** (Pappenberger et al., 2006b)

**H.3.5** Deze vragen gaan uit van onzekerheidsanalyse zonder gebruik van historische gegevens (metingen). In paragraaf 3.7 behandelen wij een gecombineerde variant van onzekerheidsanalyse en kalibratie.

### H.3.6 Bronnen van onzekerheid

#### H.3.6.1 *Identificatie van de onzekerheidsbronnen*

In principe kunnen alle parameters, invoer en modelstructuren worden gezien als onzeker. Niet al deze bronnen zullen echter de zelfde gevoeligheid vertonen ten opzichte van de modeluitvoer. Het selecteren van de voornaamste bronnen van onzekerheid is een belangrijke stap en kan op verschillende wijzen worden uitgevoerd. Vanwege interactie tussen bronnen van onzekerheid wordt het sterk afgeraden gevoeligheidsanalyse een voor een (*one at a time, OTA*) uit te voeren. Hoewel dit de meest voorkomende gevoeligheidsanalyse is, geeft deze enkel in de meest simpele gevallen het juiste antwoord. Een volledige gevoeligheidsanalyse kan worden uitgevoerd op dezelfde manier als onzekerheidsanalyse: door gelijktijdige variatie van alle relevante invoerwaarden.

Indien mogelijk kan ook gebruik worden gemaakt van relevante literatuur op dit vlak. Voor de Nederlandse situatie hebben Warmink et al. (2011) een overzicht gemaakt van de meest relevante onzekerheden. Dit overzicht is tot stand gekomen door verschillende experts te bevragen. De uitkomsten zijn als volgt.

Voor onzekerheid met betrekking tot het voorspellen van het maatgevend hoogwater, werd als belangrijkste onzekerheidsbronnen aangewezen (1) de bovenstroomse afvoer en (2) de ruwheidsformule van het zomerbed. Voor ingreep-effect studies werd als voornaamste bronnen aangewezen (1) de bodemligging van de uiterwaard, (2) overlaatformulering, (3) discretisatie (rekenrooster) van het winterbed.

### H.3.6.2 Beschrijving van de onzekerheid van de onzekerheidsbronnen

De mate van onzekerheid van de onzekerheidsbronnen moet kwantitatief worden uitgedrukt. Vanwege het 'garbage-in, garbage-out' principe is het belangrijk dat deze kwantificatie zo objectief mogelijk geschied.

Voor een objectieve beschrijving van de onzekerheid in de bovenstroomse randvoorwaarde, kan bijvoorbeeld gebruik worden gemaakt van de statistiek die door GRADE berekend wordt. Met dit instrumentarium kan de waarschijnlijkheid – uitgedrukt in een kansdichtheid – worden berekend van de afvoer (in  $\text{m}^3\text{s}^{-1}$ ) die hoort bij een  $T=1250$  golf.

Voor de vegetatie- en beddingvormruwheid kan een vergelijking worden gemaakt tussen verschillende plausibele parameterswaarden uit de literatuur. Voor de meeste ruweidklassen staat immers niet één enkele ruweidswaarde, maar een bereik. Binnen dit bereik kan een kansdichtheid worden verondersteld; bijvoorbeeld een uniforme of normale verdeling. Niet enkel de parameterwaarden, ook de gebruikte ruweidformulering kan een bron van onzekerheid zijn. Het vergelijken van verschillende formuleringen en parameter waarden leidt tot een, mogelijk multimodale, beschrijving van de invoeronzekerheid. Voor beddingsvormruwheid en vegetatieruwheid geven Warmink et al. (2012) voor de Nederlandse situatie een uitgebreide analyse.

### H.3.7 Propogatie van onzekerheid & numerieke integratie

In simpele gevallen kunnen zowel de invoer- als uitvoeronzekerheid analytisch beschreven worden. In onze gevallen is dat niet mogelijk, en moet de uitvoeronzekerheid benaderd worden door numerieke integratie. De meest gebruikte methode is Monte Carlo simulatie, oorspronkelijk ontwikkeld tijdens het Manhattan project (Metropolis, 1987). Het heeft veel voordelen: het is niet intrusief (het programma behoeft geen aanpassing) en intuïtief. Dit werkt als volgt:

1. Neem willekeurige trekkingen uit alle onzekerheidsbronnen
2. Bereken de uitvoeronzekerheid
3. Controleer of de beschrijving van de uitvoeronzekerheid is geconvergeerd.

Er zijn verschillende manieren om een steekproef te nemen. De meest eenvoudige manier is de willekeurige steekproef (*Simple Random Sampling, SRS*). Het grote voordeel van deze methode is dat het *unbiased* is: de verwachtingswaarde van uitvoer convergeert naar de werkelijke waarde. Het nadeel is dat SRS een grote steekproef vereist. Voor de studie naar onzekerheid van de Waal in Warmink et al. (2012) was een steekproef van 500 trekkingen voldoende.

Er zijn andere methodes om een steekproef uit te voeren, waaronder de latijnse hyperkubus steekproef (*Latin Hypercube Sampling, LHS*) en pseudo-willekeurige steekproef (*Quasi-random sample*). Beide methoden hebben hun eigen voordelen en beperkingen. Er zijn ook andere methodieken, zoals Markovketen Monte Carlo (*Markov Chain Monte Carlo, MCMC*) die met name in de hydrologie succesvol is toegepast.

In het speciale geval van faalkansberekening, waarbij de interesse is gericht op een beperkt gebied van alle mogelijke uitkomsten (de zgn. faallijn of *limit state*) wordt gebruik gemaakt van technieken zoals *importance sampling* en *directional sampling*. Deze technieken worden bijvoorbeeld toegepast in het WBI.



**H.3.8 Communicatie van onzekerheid**

Onzekerheid wordt vaak uitgedrukt in termen van een (cumulatieve) kansdichtheid of in een waarschijnlijkheidsinterval. Deze statistieken beschrijven de waarschijnlijkheid van een modeluitkomst gegeven de onzekerheid in de invoer.

**H.3.9 Onzekerheid en kalibratie**

Onzekerheidsanalyse kan ook gecombineerd worden met kalibratie. Het uitgangspunt van deze combinatie is dat onzekerheden in de invoer ervoor kunnen zorgen dat het resultaat van kalibratie niet uniek is: dat niet met zekerheid kan worden gezegd dat de 'ware waarde' gevonden is. Door onzekerheden in de invoer mee te nemen in kalibratie kan de mate van zekerheid in het gekalibreerde resultaat (bv. de gekalibreerde ruwheden) worden gekwantificeerd.

De vraag die een dergelijke onzekerheidsanalyse beantwoord wijkt af van de eerder genoemde vragen. Een vraag die dan bijvoorbeeld gesteld kan worden is: *wat is de onzekerheid van geschatte ruwheidsparameters gegeven de metingen?* De meest gebruikte methodes die hiervoor gebruikt worden zijn GLUE (*Generalised Likelihood Uncertainty Estimation*) en DREAM (*Differential Evolution Adaptive Metropolis*). Voorbeelden van toepassingen zijn voornamelijk te vinden in de hydrologie.

**H.4 Conclusie en aanbeveling**

In het kader van bovenstaande uiteenzetting concluderen wij dat onzekerheidsanalyse een waardevolle en noodzakelijke stap is in het proces van het bouwen van het modelinstrumentarium. Het is noodzakelijk om het doel van de analyse helder te formuleren, omdat de gebruikte methodiek en het beoogde nut van het antwoord hier van af hangt.

Onze aanbeveling is om een onzekerheidsanalyse uit te voeren die zich richt op de volgende vraag: wat is de onzekerheid van maatgevende waterstanden die met het (beno) model worden voorspeld ten gevolge van onzekerheid in de hydraulische ruwheid van het zomer- en winterbed? Deze vraag helpt bij beantwoording van vragen in de context van WBI, ten aanzien van de onzekerheid van de modelvoorspelling en is haalbaar in het kader van de huidige *know-how*.

Wij raden een analyse naar kalibratieonzekerheid in dit stadium nog niet aan. In tegenstelling tot onze aanbevolen analyse is een eenduidige alomvattende methodiek niet beschikbaar en is ook niet duidelijk wat de waarde van de uitkomsten zal zijn. Desalniettemin zien wij die als een kandidaat die in een later stadium overwogen moet worden.

**H.5 Referenties**

Pappenberger, F. en Beven, K.J. (2006a), *Ignorance is bliss: Or seven reasons not to use uncertainty analysis*, Water Resources Research 42, W05302, doi:10.1029/2005WR004820

Pappenberger, F., Matgen, P., Beven, K.J., Henry, J.-B., Pfister, L., en de Fraipont, P. (2006b), *Influence of uncertain boundary conditions and model structure on flood inundation predictions*, Advances in Water Resources, 29(10):1430-1449

Saltelli, A., Ratto, M., Andres, T., Campolongo, F., Cariboni, J., Gatelli, D., Saisana, M., en Tarantola, S. (2008), *Global Sensitivity Analysis. The Primer*, John Wiley & Sons Ltd, ISBN 978-0-470-05997-5

Verkade, J. (2015), *Estimating real-time predictive hydrological uncertainty*, PhD Thesis, Technische Universiteit Delft, doi:10.4233/uuid:a7e8ac36-4bdb-4231-a11e-d46778b2ae4a

Walker, W.E., Harremoës, P., Rotmans, J., van der Sluijs, J.P., van Asselt, M.B.A., Janssen, P. en Kraymer von Krauss, M.P. (2003), *Defining uncertainty. A conceptual basis for uncertainty management in Model-Based decision support*, Integrated Assessment 4 (1): 5-17

Warmink, J.J., van der Klis, H., Booij, M.J. en Hulscher, S.J.M.H. (2011), *Identification and quantification of uncertainties in a hydrodynamic river model using expert opinions*, Water Resources Management, 25(2):601-622, doi:10.1007/s11269-010-9716-7

Warmink, J.J., Booij, M.J., van der Klis, H. en Hulscher, S.J.M.H. (2012), *Quantification of uncertainty in design water levels due to uncertain bed form roughness in the Dutch River Waal*, Hydrological Processes 27 (11): 1646-1663

Warmink, J.J., Straatsma, M.W., Huthoff, F., Booij, M.J., Hulscher, S.J.M.H. (2013), *Uncertainty of design water levels due to combined bed form and vegetation roughness in the Dutch river Waal*, Journal of Flood Risk Management, 6(4):302-318, doi:10.1111/jfr3.12014

van Waveren, R.H., Groot, S., Scholten, H., van Geer, F.C., Wosten, J.M.H., Koeze, R.D., Noort, J.J. (1999), *Good Modelling Practise Handbook*. STOWA report 99-05, ISBN 90-5773-056-1