
Het Sigmamodel

Een hydrodynamisch 1D model Mike11 van de Westerschelde en het Zeescheldebekken

Samenvattende beschrijving
ir. Willy Graré, AWZ; ir.D.Bulckaen, IMDC

Inhoud

1. Inleiding	2
2. Software voor HD modellering	3
3. Zone opgenomen in het model	4
4. Topografie en bathymetrie	5
5. modelschematisatie	6
5.1. Modelschematisatie van de Westerschelde	6
5.2. Modelschematisatie van de Zeeschelde	8
5.3. Modelschematisatie van de overstromingsgebieden	10
5.3.1. Algemeen	10
5.3.2. Typevoorbeeld overstromingsgebied	11
5.3.3. Voorbeeld GOG Kruikeke-Bazel-Rupelmonde	11
5.3.4. Voorbeeld Antwerpen	12
5.3.5. Meer details over de modelleringstechniek	12
5.4. Modelschematisatie hydraulische structuren	13
5.5. Randvoorwaarden van het model	14
5.6. Het Sigmamodel in cijfers	15
6. Robuustheidstests	16
7. Afijking van het model	17
7.1. Beschikbare randvoorwaarden	17
7.1.1. Gedigitaliseerde randvoorwaarden voor extreme gebeurtenissen	17
7.1.2. randvoorwaarde wind	17
7.1.3. Synthetische waarden	18
7.2. Afijking van ruwheden en structuren	19
7.2.1. Periode 1: Juni 2000	20
7.2.2. Periode 2: februari 1990	21
7.2.3. Periode 3: augustus 1996	23
7.2.4. Periode 4: juni 2002	25
7.3. calibratie, rekening houdend met wind	27
8. validatie van het model	29
9. modelgebruik, onzekerheden	32
10. conclusie	33
11. lopende studies met het model	34
11.1. Sedimenten en morfologie	34
11.2. Lopende berekeningen 2003 (studies "Actualisatie van het Sigmamodel")	34
11.3. vervolgtraject	34
11.3.1. inbouw van bressen	34
11.3.2. koppeling aan schade en slachtoffersmodule	34
11.3.3. schade- en slachtoffersberekeningen voor diverse Sigmascenario's	35



1. INLEIDING

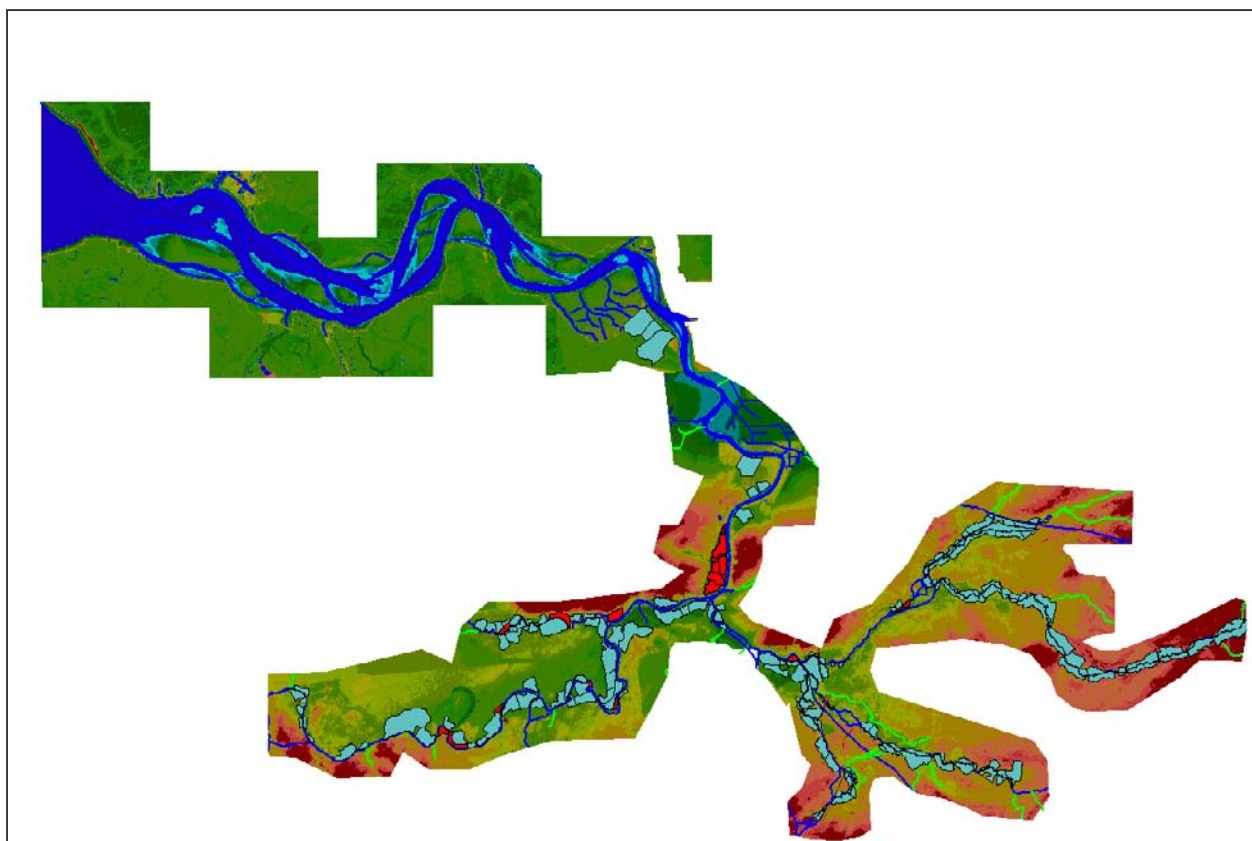
In het kader van de studies “Actualisatie van het Sigmaplan” werd in de periode 2002-2003 een ééndimensionaal model opgesteld van de Westerschelde – Zeeschelde (het “Sigmamodel”).

De Opdrachtgever van deze studie was het Ministerie van de Vlaamse Gemeenschap, Administratie Waterwegen en Zeewezen, Afdeling Zeeschelde.

In onderhavige nota wordt dit model summier beschreven en geïllustreerd.

De opbouw en afijking van het model werd nauwgezet opgevolgd door een Technische Werkgroep opgericht door de Opdrachtgever.

In de Technische werkgroep van 1 juli 2003 werd de afijking goedgekeurd.



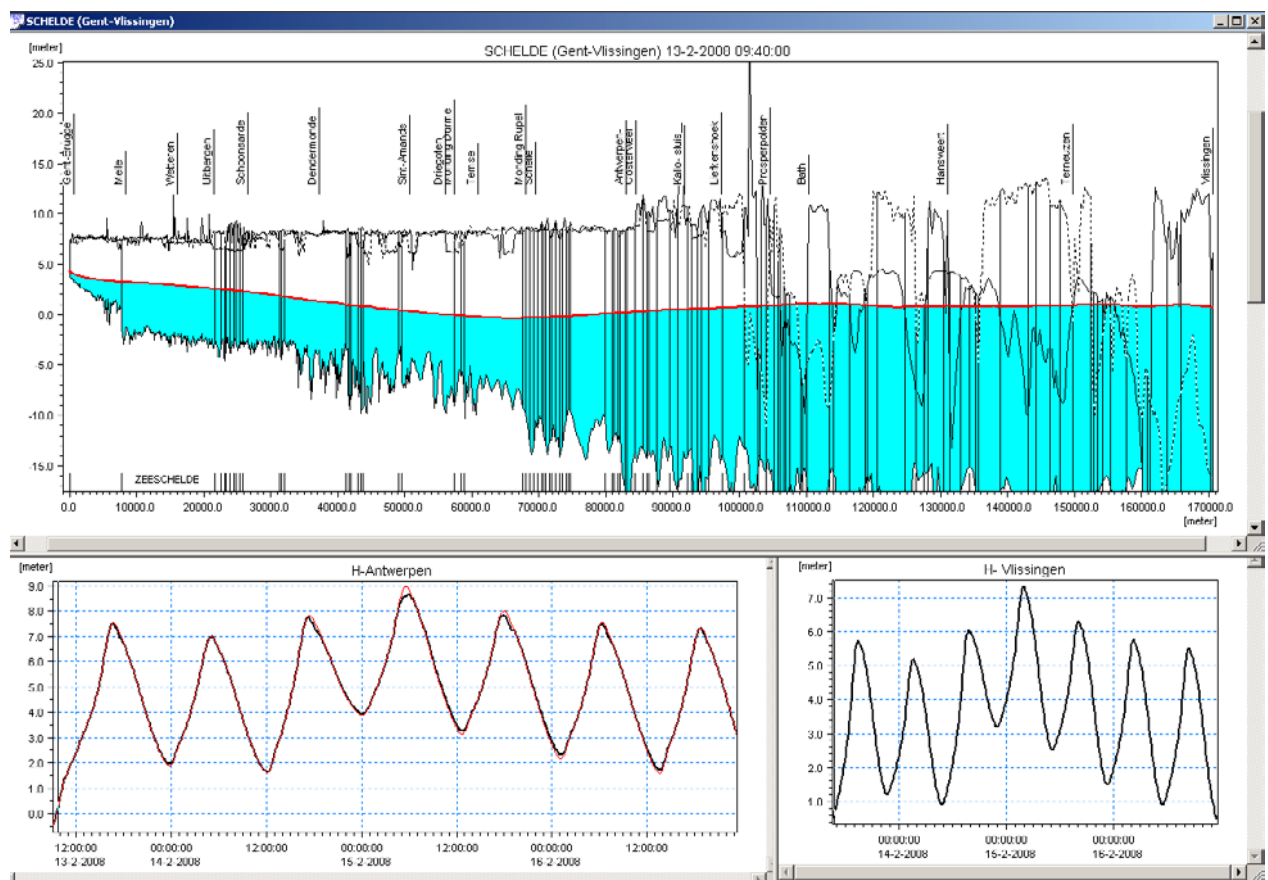
2. SOFTWARE VOOR HD MODELLERING

De hydrodynamische berekeningen werden uitgevoerd met het Mike11 model, meer bepaald met de modules HD (hydrodynamica) en STRUC (bewegbare structuren). Het model werd initieel opgebouwd in versie 2001B, in een later stadium werd overgegaan naar versie 2002B, omdat deze laatste een nieuw modelement biedt voor de schematisatie van pompen.

Bovenranden: debietberekening met de NAM module van MIKE11.

Voor de koppeling tussen het hydrodynamisch model en het DTM (Digitaal TerreinModel) van de al dan niet gewilde overstromingen werd gebruik gemaakt van de module Mike11GIS eveneens versie 2002B.

De modelleringssoftware werd ontwikkeld door het Deens DHI Water & Environment. De module Mike11GIS is geïntegreerd in de GIS software Arcview (versie 3.2), ontwikkeld door Esri.



3. ZONE OPGENOMEN IN HET MODEL

Het opgebouwd HD model van Schelde Rupel Durme dd. jan 2003 omvat:

- de volgende rivieren en rivierpanden:
 - Westerschelde vanaf Vlissingen tot de Belgische grens
 - Zeeschelde vanaf Belgische grens tot Gent (Merelbeke-Zwijnaarde-Gentbrugge).
 - Durme afwaarts Lokeren (bathy beschikbaar tot Daknam)
 - Rupel en Beneden-Nete
 - Kleine Nete afwaarts de limnigraaf Grobbendonk
 - Grote Nete afwaarts siphon onder Albertkanaal (Oosterlo)
 - Dijle afwaarts limnigraaf Wilssele-Wijgmaal
 - Zenne afwaarts Vilvoorde (vanaf bevaarbaar deel)
 - Kanaal Brussel-Rupel: niet (geen DP)
 - Demer afwaarts limnigraaf Aarschot
- alle kunstwerken binnen dit gebied die een hydraulische invloed kunnen hebben;
- alle bestaande en potentiële overstromingsgebieden (resp. aangeduid met “GOG’s” en “POG’s”), meestal gemodelleerd als parallelle takken.
- alle natuurlijk overstroombare gebieden binnen het studiegebied, meestal gemodelleerd als bakken, en opgesteld aan de hand van het DTM van de valleigebieden.



4. TOPOGRAFIE EN BATHYMETRIE

De gebruikte bathymetrie van de Westerschelde is anno 2000.

De gebruikte topografische informatie van de oevers Westerschelde zijn van GeoLoket Rijkswaterstaat 2001.

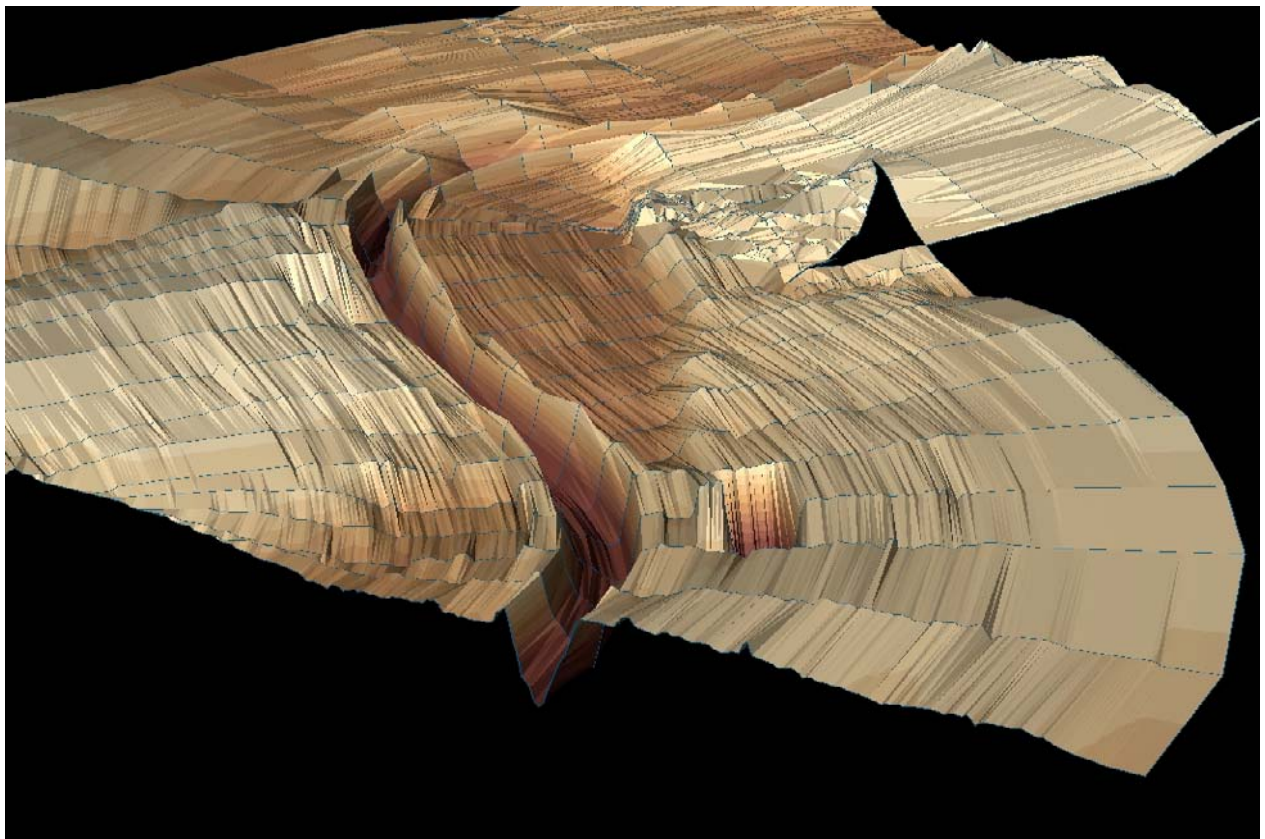
De bathymetrie van de Zeeschelde vanaf de Belgische grens tot Rupelmonde, de Rupel en de eerste km's van de Durme zijn anno 1999 en 2000.

De overige rivierbeddingen werden opgemeten in 2001.

Alle dijken op vlaams grondgebied werden opgemeten in 2001.

Het digitaal terreinmodel van de overstrombare gebieden opwaarts Antwerpen is eveneens anno 2001.

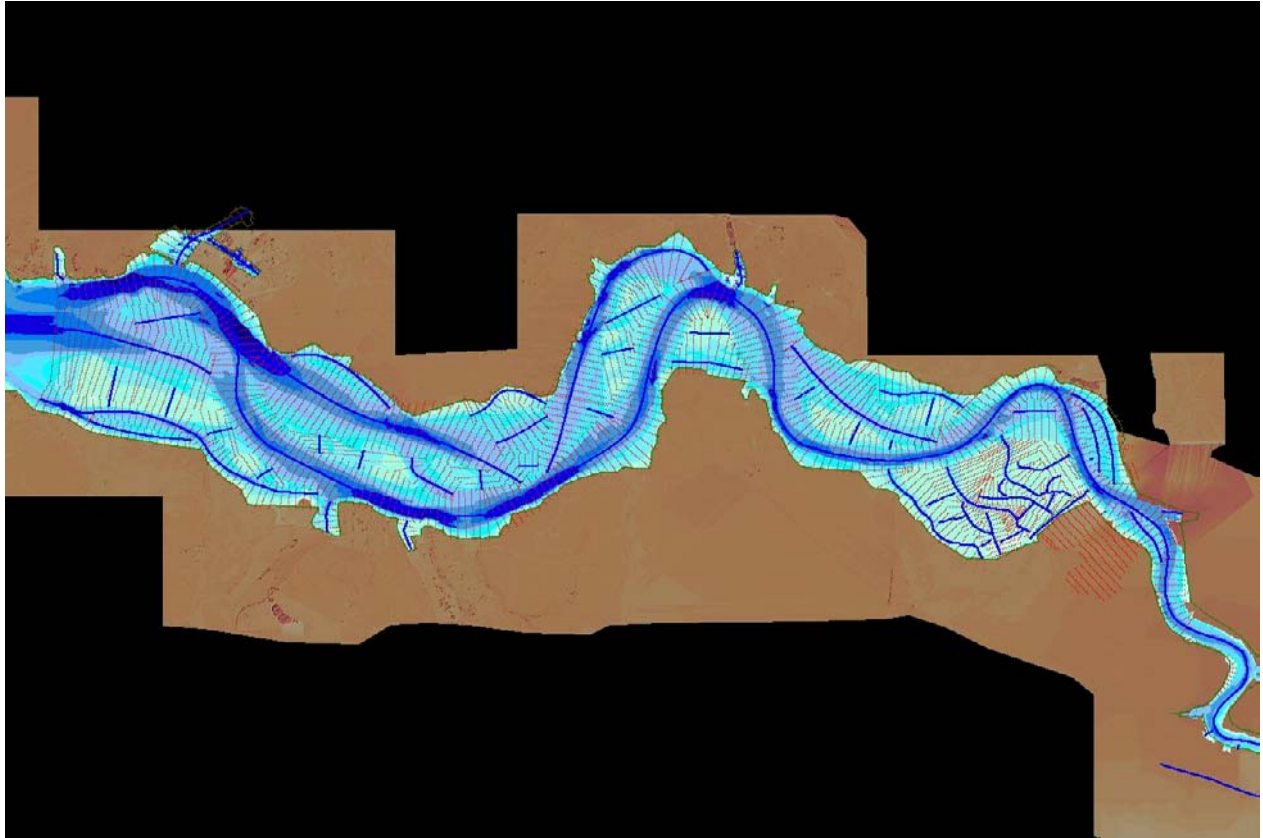
Al deze gegevens werden gecombineerd in een digitaal terreinmodel, van waaruit het numeriek model opgebouwd wordt.



5. MODELSCHEMATISATIE

5.1. Modelschematisatie van de Westerschelde

Voor de Westerschelde werd een meertakkenmodel opgebouwd. Alle geulen en platen werden in het model opgenomen.



Er werd voor geopteerd het hele traject van de Schelde vanaf Liefkenshoek tot aan de monding in de Noordzee (Vlissingen) voor te stellen volgens een quasi-2D-model waarbij de vloedscharen en de ebgeulen als afzonderlijke takken worden gemodelleerd onderling verbonden met zogenaamde 'link channels'. Deze 'link channels' stellen dan de dwarse geultjes voor die (via de zandplaten) de verschillende geulen onderling verbinden. Door deze quasi-2D aanpak kan expliciet rekening gehouden worden met de verschillende fenomenen die spelen bij eb en vloed (waarbij de scharen en geulen niet in dezelfde mate worden aangesproken).

De ebgeul tussen de Nederlands-Belgische grens en Vlissingen werd als één volledige tak (met de naam Westerschelde) in het model ingebouwd. De ebgeul in België krijgt de naam Zeeschelde2.

De vloedscharen werden elk als een aparte tak (of branch) gedefinieerd. Deze vloedscharen zijn van afwaarts naar opwaarts: de Schaar van de Spijkerplaat, Everingen, Schaar van de Waarde, Schaar van de Noord, Appelzak en Schaar van Ouden Doel.

Ook een groot aantal kleinere geulen (Springergeul, Thomasgeul, ...) en geultjes aanwezig in platen (Baarlandplaat, Brouwerplaat, ...) werden expliciet als aparte tak in het model ingebracht.

Het Verdrongen Land van Saeftinge bestaat uit drie hoofdgeulen die ook als aparte tak werden gemodelleerd: Speelmansgat, Kleinendijk en Saeftinger Ee. Ook de belangrijkste nevengeulen (Kleinendijk-Oost, Kleinendijk-Zuid) werden expliciet in het model gebracht.

De havens langsheen de Westerschelde, de havens van Vlissingen, Braakman en Terneuzen, werden mee opgenomen in het model. Vooral de haven van Vlissingen Oost

kan een belangrijke hoeveelheid water bergen. Deze haven staat in open verbinding met de Westerschelde en heeft een diepgang van –16 m.

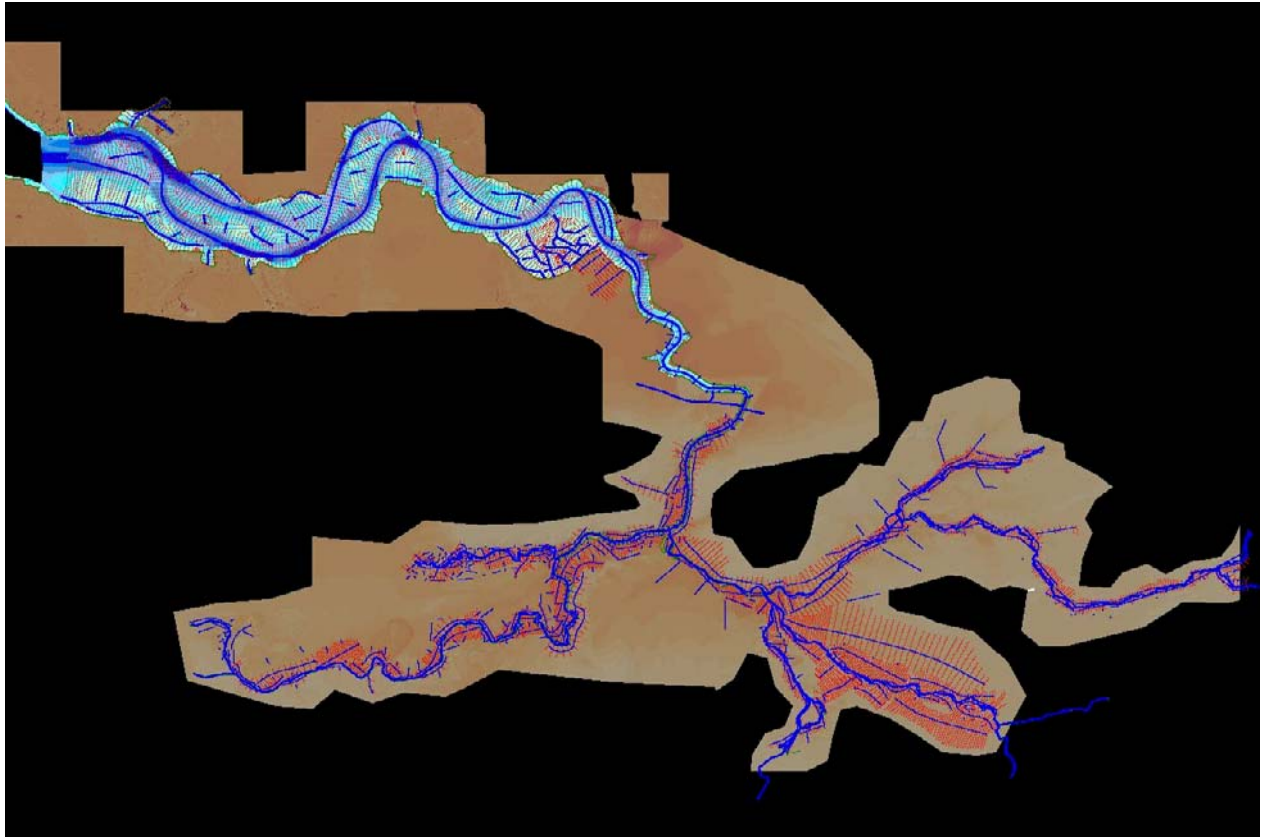
Langsheen de verschillende takken van het quasi-2D model van de Westerschelde werden met een tussenafstand van 300 meter dwarssecties onttrokken uit een digitaal terrein model waarin bathymetrische gegevens en maaiveldgegevens (voor de hoogte van de dijken) werden gecombineerd.

De bathymetrie werd opgemeten in 1999-2000 door de Meetinformatiedienst van de Directie Zeeland van Rijkswaterstaat. De metingen werden uitgevoerd door middel van echografie langsheen raaien met een onderlinge afstand van ongeveer 100 meter. De maaiveldgegevens zijn afkomstig van het Actueel Hoogtebestand Nederland (AHN) dat werd opgebouwd op basis van laseraltimetrie. Door de Meetkundige Dienst van Rijkswaterstaat werd het digitaal hoogtemodel (DHM) met een gridcelgrootte van 5 op 5 meter ter beschikking gesteld.

Omwille van de verwerkbaarheid van de gegevens werd het digitaal hoogtemodel van het maaiveld uigemiddeld tot een gridcelgrootte van 25 op 25 meter. Enkel voor de dijken langsheen de Westerschelde werd het detail van 5 op 5 meter behouden. Het hoogtemodel werd samengevoegd met de bathymetrische gegevens tot één groot DTM. Dit DTM werd getransformeerd naar Lambert 72 – coördinaten en de hoogtemetingen werden omgezet in m TAW.

5.2. Modelschematisatie van de Zeeschelde

Ongeveer vanaf de Belgische grens, wordt de stroomgeul met één tak gemodelleerd.



De gebruikte dwarssecties zijn een samenvoeging van de topografische opmetingen van de dijken, die in het kader van deze studie gebeurd is, en van bathymetrische opmetingen die grotendeels door het Bestuur geleverd werden. Deze samenvoeging is gebeurd in Deelopdracht I van deze studie. Voor de Zeeschelde werden over de volledige lengte dwarsprofielen bepaald met een tussenafstand van 100 meter. Om deze dwarsprofielen bruikbaar te maken voor het hydrodynamisch model, moest een uitgebreide kwaliteitscontrole uitgevoerd worden. Omwille van de gebruikte interpolatiemethode voor het aanmaken van de dwarsprofielen waren bepaalde dwarssecties onvolledig. Deze werden dan ook verwijderd, en zullen verder niet gebruikt worden in het model.

De voor een numeriek model benodigde tussenafstand tussen twee secties wordt bepaald door volgende factoren:

- de kombergingsbreedte van de waterloop
- de gemiddelde bodemhelling van de waterloop
- algemene stabiliteitscondities (uitgedrukt door het Courant getal)
- voldoende om de maatgevende golf (bv. het getij, het bovendebiet) weer te geven
- niet-lineariteiten in de verhanglijijn of in de dwarssectiegeometrie moeten nauwkeurig kunnen worden weergegeven
- de simulatietijd moet beperkt blijven (zeker van belang bij on-line berekeningen.)

De eerste vijf factoren geven een beperking van de tussenafstand naar boven toe, de laatste factor naar beneden toe. Gezien het feit dat de Zeeschelde relatief breed is, gekenmerkt wordt door een klein verhang en de lengte van de afvoergolven (en zeker die van de

getijgolf) relatief groot is, zullen de eerste vier factoren uit bovenstaande lijst geen maatgevende rol spelen. Niet-lineariteiten (plotse sectiewijzigingen) komen een aantal malen voor.

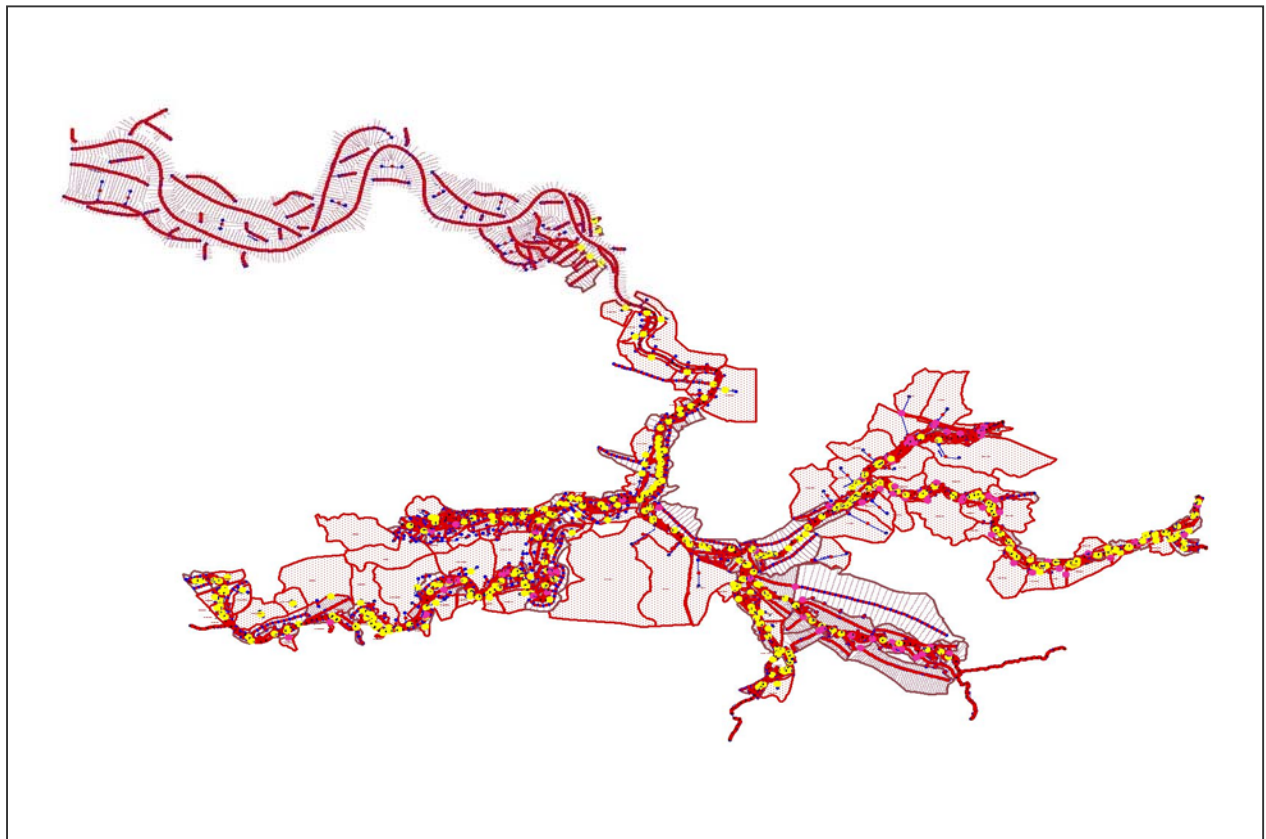
De tussenafstand tussen de dwarsprofielen werd ongeveer gelijk genomen aan de afstand tussen de dijken op linker- en rechteroever. Concreet betekende dit dat zolang de breedte van het dwarsprofiel kleiner dan 200 m was, de tussenafstand tussen de dwarssecties op 100 m genomen werd. Tussen de 200 en 300 m breedte werd een tussenafstand van 200 m genomen. Vanaf een breedte van 300 m werd zoveel mogelijk een tussenafstand van 300 m gebruikt.

5.3. Modelschematisatie van de overstromingsgebieden

5.3.1. Algemeen

In het model zijn eveneens ingebouwd:

- de 12 bestaande gecontroleerde overstromingsgebieden langs Zeeschelde, Durme en Rupel;
- het in aanbouw zijnde overstromingsgebied Kruibeke-Bazel-Rupelmonde
- 180 potentiële gecontroleerde overstromingsgebieden. Deze gebieden werden alle onderling afgewogen in een multicriteria-analyse. Met deze gebieden kunnen alternatieve Sigmaplannen uitgebouwd worden. In het model kunnen (combinaties van) deze gebieden naar believen geactiveerd of gedeactiveerd worden. Indien een dergelijk gebied aangelegd wordt (uitgetest in het model), wordt de dijk kant rivier verlaagd (overstroombare dijk), en wordt rond het gebied een ringdijk aangelegd. In het tegengestelde geval blijft dit gebied gewoon deel uitmaken van de overstroombare binnendijkse (landkant dijk) gebieden;
- alle overige gebieden die kunnen overstromen (grosso modo de gebieden onder de 10 meter lijn).



5.3.4. Voorbeeld Antwerpen



De modelschematisatie voor het gebied ter hoogte van Antwerpen wijkt af van de algemene principes die in de rest van het model gebruikt werden. Het stadscentrum van Antwerpen werd gemodelleerd als een Flood cell ipv een parallelle tak omdat te weinig nauwkeurige terreingegevens beschikbaar waren¹. Wel werden 4 zijdelingse overlaten van elks 1100 meter lang, gebruikt voor de overtopping op rechteroever te Antwerpen.

Op linkeroever werd het Galgenweel (POG 110_07) gemodelleerd als parallelle waterloop, terwijl Blokkersdijk als flood cell

gemodelleerd wordt omdat wanneer blokkersdijk als overstromingsgebied geactiveerd wordt, afgravingen nodig zijn, en dit in het model het eenvoudigst aan te passen wanneer gebruik gemaakt wordt van een Flood Cell. Het gebied tussen deze twee POG's (antwerpen-linkeroever) werd ook gemodelleerd als een Flood Cell SCH-LO17C) omwille van zijn vorm die het modelleren als parallelle waterloop moeilijk maakt.

5.3.5. Meer details over de modelleringstechniek

Er zijn in Mike11 vier mogelijkheden om deze overstromingsgebieden te beschrijven:

- Uitgebreide dwarsprofielen
De geometrie van de dwarsdoorsnede wordt langs linker- en/of rechteroever uitgebreid op basis van de topografie van het maaiveld. Het maaiveld krijgt daarbij over het algemeen een grotere ruwheid dan het zomerbed. Deze methode kan worden toegepast als winterbed en zomerbed steeds dezelfde waterhoogte hebben (er is geen zomerdijk aanwezig) en als de stroming in het winterbed niet verwaarloosbaar is.
- Berging
Aan linker- en of rechteroever van de dwarsdoorsnede wordt bijkomende berging toegekend. Deze methode kan worden toegepast als winterbed en zomerbed dezelfde waterhoogte hebben (er is geen zomerdijk aanwezig) en als de stroming in het winterbed verwaarloosbaar is.
- Parallele waterloop
Overstromingsgebieden met een 'sterke' stroming en waarbij de waterhoogte kan verschillen van de waterhoogte in de hoofdriever, kunnen in het model worden ingebracht als een riviertak, parallel aan de hoofdriever. De parallelle tak en de hoofdriever worden met elkaar verbonden door zijdelingse overlaten die de stroming over de dijk voorstellen. Deze overlaat wordt gedefinieerd door in het waterloppennetwerk een 'link channel' aan te brengen. Dit 'verbindingskanaal' wordt

¹ Momenteel (2003) is bij het Bestuur een opdracht lopende voor het opmaken van een nieuw DTM van het stedelijk gebied Antwerpen. Via de Technische Dienst van de Stad Antwerpen is een gedigitaliseerde hoogtelijnenkaart (gebaseerd op topokaarten 1953 en gecontroleerd met recente GIS kaarten 1/10000 van het NGI) ter beschikking gesteld. Indien het nieuw DTM nog niet beschikbaar is op het ogenblik dat overstromingsschade moet worden doorgerekend, is het aangewezen de huidige modelisatie alvast te verfijnen aan de hand van de gedigitaliseerde hoogtelijnenkaart 1953.

bepaald door de geometrie van de overlaat (dwarssectie), bijzondere ladingsverliezen en door de eventuele aanwezigheid van bijkomende berging. Door het regelen van deze bijkomende berging kan men er nauwkeurig op toe zien dat hetzelfde bergingsvolume niet tweemaal in het model wordt ingebracht.

- Reservoir

De 'link channel' kan ook worden gebruikt om een riviertak te verbinden met een reservoir in Mike11 'Flood Cell' genoemd. Het reservoir wordt dan gedefinieerd als bijkomende berging aan een fictieve dwarssectie. Deze methode wordt gebruikt als waterhoogte in winterbed en zomerbed verschillend (kunnen) zijn en als de stroming in het winterbed verwaarloosbaar is.

Voor de implementatie van de Schelde werd meestal gebruik gemaakt van de laatste twee mogelijkheden (parallele riviertakken en Flood Cells). Omwille van de aanwezigheid van dijken en verhoogde oevers in het algemeen (al of niet natuurlijk), ging de veronderstelling dat de waterhoogte in zomer- en winterbed dezelfde zou zijn, immers bijna nooit op. Voor de keuze of voor de voorstelling van het overstromingsgebied een parallele riviertak dan wel een Flood Cell werd gebruikt, werd nagegaan of de waterstroming in het overstromingsgebied al dan niet als verwaarloosbaar kan worden verondersteld. In geval van twijfel werd gekozen voor een schematisatie d.m.v. een parallele tak aangezien die zowel de stroming als de berging goed kan weergeven. De keuze tussen parallele tak en reservoir wordt ook bepaald door stabiliteitseisen. Als tussen overloopgebied en hoofdwaterloop meerdere zijdelingse overlaten (link channels) voorkomen, kunnen zich immers zogenaamde kortsluitstromen voordoen. Het water verplaatst zich dan sneller via het overloopgebied naar afwaarts dan via de hoofdwaterloop. De kans dat dit probleem zich voordoet wordt sterk teruggedrongen bij gebruik van parallele takken, aangezien die in tegenstelling tot flood cells wel een stromingsweerstand hebben. Daarom werd voor de modellering van de gebieden langsheen de hoofdwaterloop, waar ook veel link channels worden gebruikt, zoveel mogelijk gebruik gemaakt van parallele takken. De tussenafstand van de dwarssecties in de parallele takken werd groter gekozen dan die in de hoofdwaterloop. Voor de POG's is deze tussenafstand grootte-orde 2 x groter, voor de NOG's grootte-orde 5x groter. Dit stemt overeen met een gemiddelde tussenafstand van 200 m in de POG's en 500 m in de NOG's. De verder afgelegen gebieden werden als Flood Cell voorgesteld. Uiteraard werd, waar de fysische realiteit dit eiste, van deze regel afgeweken.

5.4. Modelschematisatie hydraulische structuren

In het model van de Zeeschelde en Westerschelde in de bestaande toestand komen volgende types structuren voor:

- bruggen
- duikers, uitwateringsstructuren
- sifons
- beweegbare structuren (Dijle en Zenne: kleppen)
- pompen

Gedurende de studies is gebleken dat de structuuralgorithmes vlug aanleiding geven tot instabiliteiten. Voorzichtigheid is dus geboden bij het gebruik ervan. Alleen structuren die werkelijk een impact hebben op de stroming mogen ingebouwd worden in het model.

Speciale structuren: gedurende de Sigmastudie worden volgende speciale structuren in het model ingebouwd:

- stormvloedkering te Antwerpen (Oosterweel)
- stormvloedkeringen te Mechelen en Lier

- verbinding Westerschelde- Oosterschelde (Overschelde) ter hoogte van Bath

5.5. Randvoorwaarden van het model

Volledig model:

windsnelheid en windrichting boven het wateroppervlak

Afwaarts:

Vlissingen: niveau in functie van de tijd

Opwaarts

De opwaartse randvoorwaarden zijn alle van het type debiet in functie van de tijd. Van alle opwaartse randen werden hydrologische modellen gemaakt aan de hand van de NAM module MIKE11, en afgeijkt aan de geobserveerde debieten. Op deze manier kunnen door middel van neerslagdata tot 20 jaar debietreeksen voor de bovenranden gegenereerd worden.

Voor de onbemeten zijbekkens, werden eveneens hydrologische modellen opgesteld. De modelparameters van deze modellen werden afgeleid uit correlaties tussen de gebieds- en hydrologische karakteristieken, en de modelparameters van de nabijgelegen bekkens waarvan wel hydrologische modellen beschikbaar zijn.

In de volgende plaatsen worden opwaartse randvoorwaarden ingevoerd:

Schelde

Merelbeke en Gentbrugge
Oudeschelde: te Zwijnaarde
Dender: te Dendermonde

Durme :

Durme-Noord	Randvoorwaarde onbemeten gebied
Durme-Zuid	Randvoorwaarde onbemeten gebied
Lokerenbeek	Randvoorwaarde onbemeten gebied
Zelebeek	Randvoorwaarde onbemeten gebied
Ledebeek	Randvoorwaarde onbemeten gebied
Durme	Opwaartse randvoorwaarde Durme te Lokeren

Rupel :

Kleine Molenbeek	gemeten-limnigraaf (Lizele)
Grote Molenbeek	gemeten-limnigraaf (Malderen)
KleineNete	gemeten-limnigraaf (Grobendonk)
Molenbeek	gemeten-limnigraaf (Molenbeek)
Grote Nete	berekend (076-086)
Grote Laak	gemeten-limnigraaf (Vorst)
Grote Nete	gemeten-limnigraaf (Wiekevorst)
Dijle	gemeten-limnigraaf (Wilsele-Wijgmaal)
Demer	gemeten-limnigraaf (Aarschot)
Dijle-Barebeek	gemeten-limnigraaf (Hofstade)
Benedendijle	gemeten-limnigraaf
Zenne	gemeten-limnigraaf (Vilvoorde)
Zenne	berekend (171-175)

Onbemeten bekkens Rupel :

Zwartebeek	Rupel-RO	Molenbeek(036)
Zielbeek	Benedennete –RO	Krekelbeek
Tappelbeek	Molenbeek (062)	Lier
Kleinelaak	Benedennete-LO	Rodelaak
Goorloop	Steenkensbeek	Molenbeek
Bergebeek	Wimp	Gestelbeek
Bevelsebeek	Dijle	Barebeek
Grote Laakbeek	Leibeek	Weesbeek
Barebeek	Vrouwvliet	Vunt
Winge	Demer (122)	Mechelen

5.6. Het Sigmamodel in cijfers:

290 km waterlopen in Vlaanderen, en 64 km Westerschelde (totaal 354 km)

In het model zijn volgende elementen ingebouwd:

11000 H punten

7200 Q punten

61 bruggen

1 stuw

3 sifons

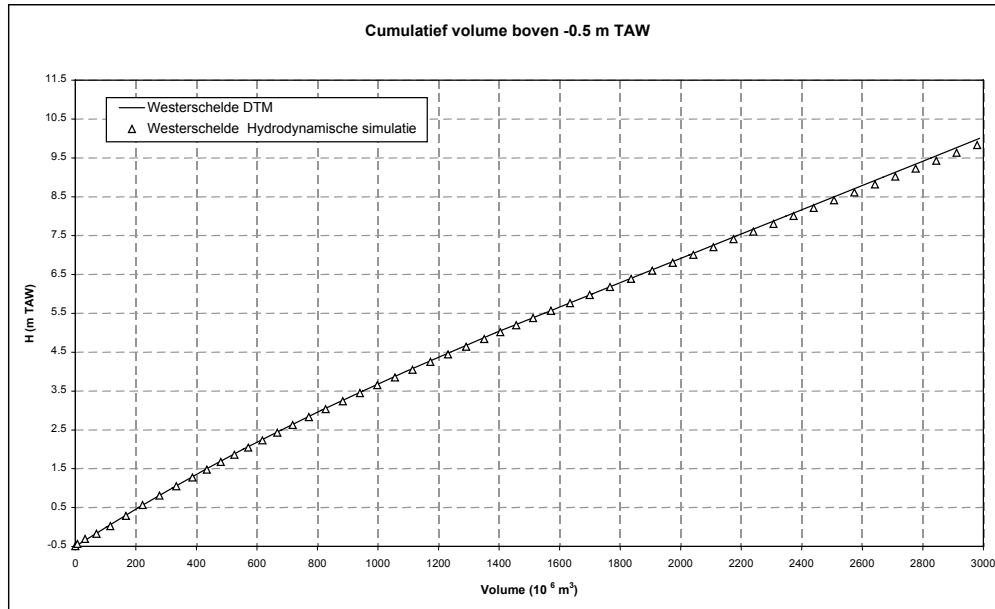
1 watermolen

51 pompen

400 verbindingsstructuren (ofwel duikers, ofwel toekomstige uitwateringsconstructies, ofwel overlaten)

6. ROBUUSTHEIDSTESTS

Het model werd gedetailleerd uitgetest op instabiliteiten. Daartoe werd o.a. een extreme variatie van waterstand te Vlissingen (van 0 tot 9 m in één tijdbeweging) gecombineerd met extreme bovendebieten.



De volumes in de Westerschelde werden vergeleken met de volumes rechtstreeks uit het digitaal terreinmodel van de rivierbedding.

7. AFIJING VAN HET MODEL

7.1. Beschikbare randvoorwaarden

7.1.1. Gedigitaliseerde randvoorwaarden voor extreme gebeurtenissen

Onderstaande tabel toont de beschikbare gedigitaliseerde events, met digitale informatie voor elk meetstation in het modelgebied, die gebruikt werden voor de afijking van het model (zie verder).

Waterpeilen	juni 2000	augustus 96	Sep-98	Dec-99	februari 90
Antwerpen (m TAW)	6	7.01	6.1	5.8	7.52
Antwerpen (jaar)	<1	1.7	<1	<1	9.8
Antwerpen (m TAW) - correct	6	7.023	6.0972	5.7967	7.656
Antwerpen (jaar) - correct	<1	1.8	<1	<1	15.8
Debietten (m3/s)	juni 2000	augustus 96	Sep-98	Dec-99	februari 90
Melle	100	200	64	373	90
Dender	42	63	33	150	55
Dijle	12.5	27.2	27.9	35.8	18.7
Zenne	59.4	126.2	65	91.7	40.5
Grote Nete	10	15.2	29.3	18.9	10.9
Kleine Nete	19	24.8	41.4	35.7	23.6
Demer	34	49.5	70.9	56.7	25.4

Debietten (T jaar)	juni 2000	augustus 96	Sep-98	Dec-99	februari 90
Melle	<	?	<	grootste	<
Dender	<	<	<	grootste	<
Dijle	<1	3	3	25	<1
Zenne	<1	7	<1	1	<1
Grote Nete	<1	<1	90	2	<1
Kleine Nete	<1	<1	3	1	<1
Demer	<1	<1	25	2	<1

De waterpeilen voor de stormvloed hebben een lage retourperiode.

Voor de bovendebietten zijn enkele hoge waarden te noteren voor sep98 en dec99.

Overigens beschikt het Sigmateam nog over tijgegevens voor de volgende extreme events: jan-feb 53(max HW +7.77 m TAW), nov 92 (+7.39m taw), nov 93 (+7.53m taw)

Verder zijn 10 minutenwaarden beschikbaar vanaf ong. 1986 tot ong. 2002 voor Vlissingen en de tijposten tussen Vlissingen en Antwerpen.

Windgegevens zijn beschikbaar via het KNMI voor het gebied van de Westerschelde, eveneens vanaf ongeveer 1986.

7.1.2. randvoorwaarde wind

De gebruikte windgegevens zijn afkomstig van het KNMI (<http://www.knmi.nl/>). Het betreft uurlijks gegevens van gemiddelde potentiële windsnelheden (over land en op 10 m hoogte) en van windrichtingen te Vlissingen. De meetreeks gaat bestrijkt de periode van 1959 tot 2000.

De gegevens werden met oog op de statistische analyse gecontroleerd en uitgemiddelde elke 6 uur. De ontbrekende periodes werden opgevuld volgens de volgende criteria:

- wanneer de onderbreking kleiner is dan 3 uur, kan een eenvoudige lineaire interpolatie volstaan
- wanneer de onderbreking groter is dan 3 uur en kleiner dan 24 uur, volstaat een lineaire interpolatie zolang het waarschijnlijk niet om extreme windsnelheden kan gaan, wat inhoudt dat de waarde voor en na het gat klein genoeg moet zijn (hiervoor werd 5 m/s genomen)

Op basis van bovenstaande criteria kon een ononderbroken tijdreeks voor windsnelheid en windrichting bekomen worden.

De windmodule in Mike11 maakt gebruik van werkelijk windsnelheden op 10 m boven een wateroppervlak. De gegevens te Vlissingen moesten dus getransformeerd worden. Hoe dit gebeurt wordt beschreven in Volume 1a van deze deelopdracht.

7.1.3. Synthetische waarden

7.1.3.1. Bovenranden

In elk van de bovenranden is, zoals reeds vermeld, een hydrologisch model, en een statistiek op de debieten beschikbaar.

Aan de hand van regengegevens kunnen reeksen van ongeveer 20 jaar berekend worden (1980-2002).

Het statistisch verband tussen hoge bovendebieten en stormtijden zal in de Sigmastudies Schelde (aanvullende statistiek "kans op overstroming" – najaar 2003) bestudeerd worden. Tevens is een studie lopende (Maatschappelijke Kosten Baten Analyse Sigmaplan, najaar 2003) om opwaartse randvoorwaarden te construeren volgens de theorie van de composietrandvoorwaarden (theorie opgesteld door KULeuven).

7.1.3.2. Afwaartse randen

Voor studies ivm ontwerpen van overstromingsgebieden, zijn tijden met een opeenvolging van maximale hoog- en laagwaters van belang.

Tot op heden worden hier type-getijden voor gebruikt.

- Meest gebruikt is het drietrapsgetij waarvan de hoogwaterstanden telkens 1.20 m hoger liggen, waarbij de vorm van elke getijgolf werd geconstrueerd uit de dalende tak van het voorafgaand stormtij en de stijgende tak van het buitengewoon stormtij van 3 januari 1976 (zie WLH rapport mod.440-13).
- Ten behoeve van de KBR studie, werden ook tijden gebruikt met een meer nadelige combinatie van opeenvolgende hoog- en laagwaters (zie WLH 2002 mod. 604-1)

Verder is er binnen de Sigmastudies(2003) een studie uitgevoerd om de windrichting, windsnelheid statistisch te analyseren, evenals de combinatie met stormopzetten te Vlissingen. Deze studie levert eveneens synthetische stormen (combinatie van duur en hoogte van de opzet met snelheid en richting van de wind) overeenkomend met een bepaalde kans op voorkomen te Vlissingen.

Tevens is een studie lopende (MKBA Sigmaplan, najaar 2003) om randvoorwaarden te Vlissingen te construeren volgens de theorie van de composietrandvoorwaarden.

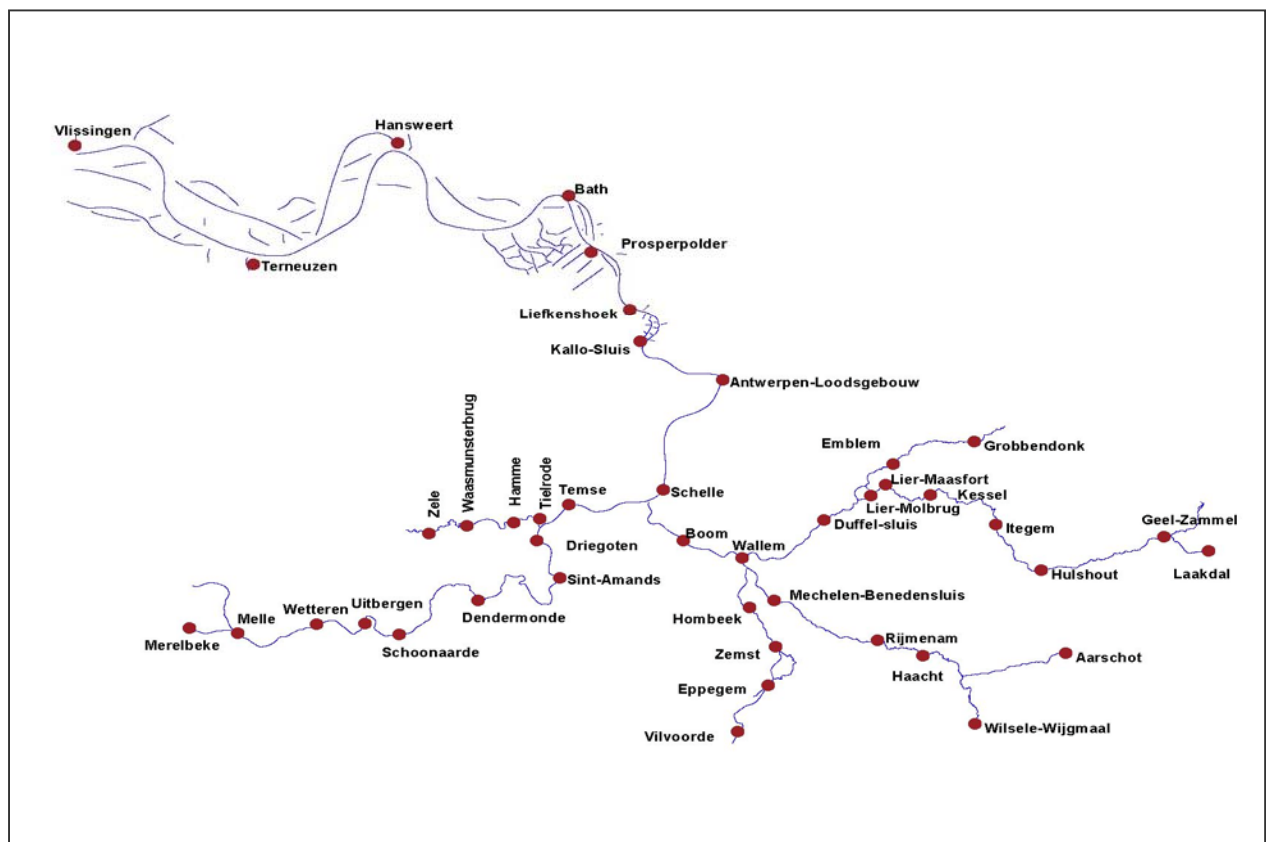
7.2. Afijking van ruwheden en structuren

Het numerieke model van de Schelde en haar zijlopen, zoals tot nog toe beschreven, bevat nog een aantal onbekenden of onzekerheden:

- De algemene ladingsverliezen
 - De ruwheid van de rivierbedding.
 - De ruwheid van de overstromingsgebieden.
- Bijzondere ladingsverliezen aan structuren
 - De waarde van van de bijzondere inlaat- en uitlaatverliezen aan 'culverts', stuwen en 'control structures'.

Deze onbekenden of onzekerheden kunnen worden opgevangen door het model af te ijken aan de werkelijkheid.

Voor deze afijking kunnen de waterstandsgegevens worden gebruikt van de volgende tijposten (zie prentje)



Het model werd eerst afgeijkt op het gewone getij van juni 2000 en juni 2002.

Vervolgens werd het gedrag met hoge bovendebieten gecontroleerd aan de hand van de stormen sept 98 en dec 99.

Uiteindelijk werden de volgende manningwaarden gevonden:

Naam tak	Chainage	Ruwheid
WESTERSCHELDE	1800 - 29400	0.025
WESTERSCHELDE	29400 - 37246	0.025
WESTERSCHELDE	37246 - 41400	0.025 - 0.027
WESTERSCHELDE	46505 - 53700	0.027
WESTERSCHELDE	62100 - 64964	0.027
ZEESCHELDE2	100 - 10129	0.029
ZEESCHELDE	10129 - 23010	0.024
ZEESCHELDE	23010 - 24630	0.024
ZEESCHELDE	37998 - 39500	0.024
ZEESCHELDE	46587 - 50195	0.024
ZEESCHELDE	51597 - 56908	0.025 - 0.026
ZEESCHELDE	70300 - 81058	0.027 - 0.028
ZEESCHELDE	86041 - 91499	0.029 - 0.030
ZEESCHELDE	99299 - 99799	0.031 - 0.035

Uit de tabel blijkt dat de ruwheid afneemt van aan de monding van de Schelde naar de Belgisch-Nederlandse grens, waarna ze terug toeneemt naar opwaarts toe. Daarenboven werd in een deel van het model gewerkt met een ruwheid die varieerde in functie van de waterdiepte. Onder het gemiddelde laagwaterpeil werd een hogere ruwheid voorzien dan erboven, waardoor de gesimuleerde laagwaters hoger werden. Alhoewel deze aanpassingen gedaan werden in het afwaartse deel van het model, was hun invloed enkel duidelijk merkbaar opwaarts van de monding van de Durme.

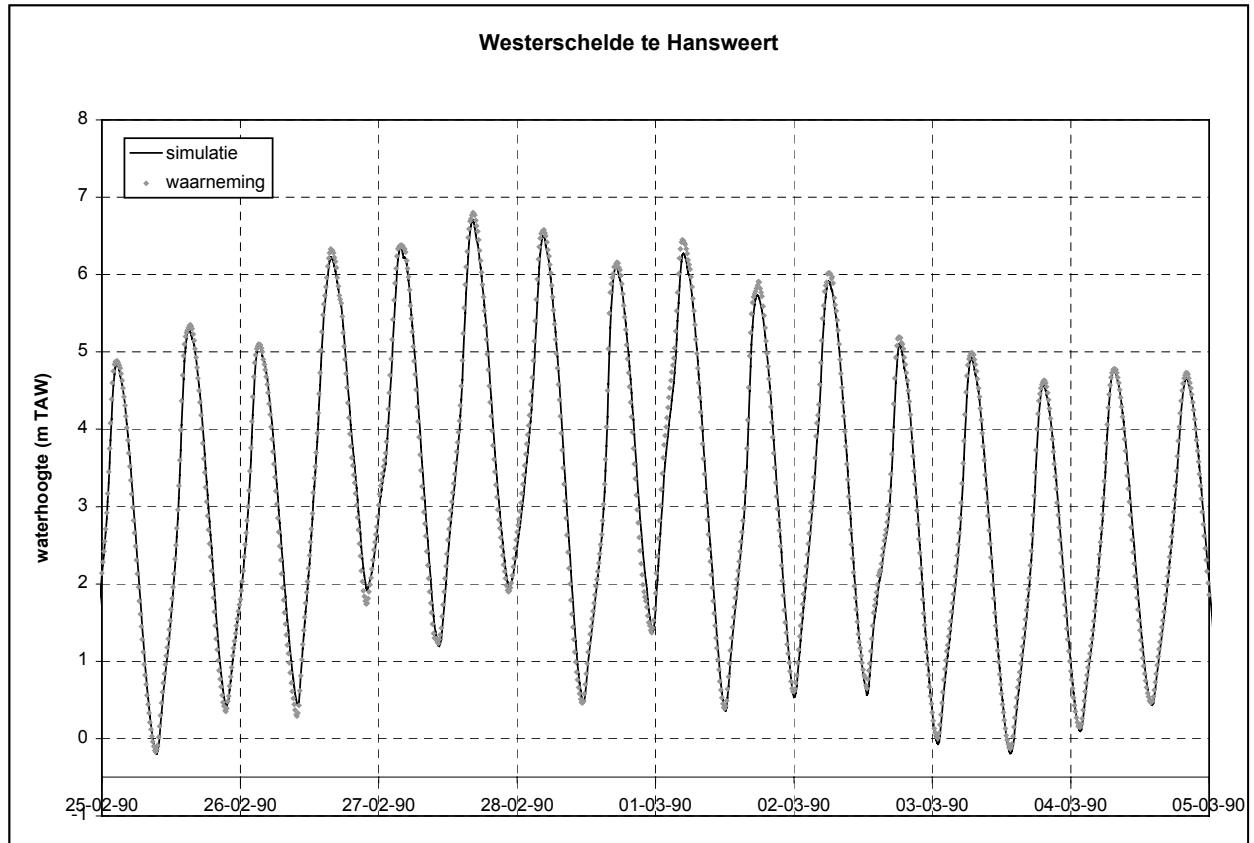
7.2.1. Periode 1: Juni 2000

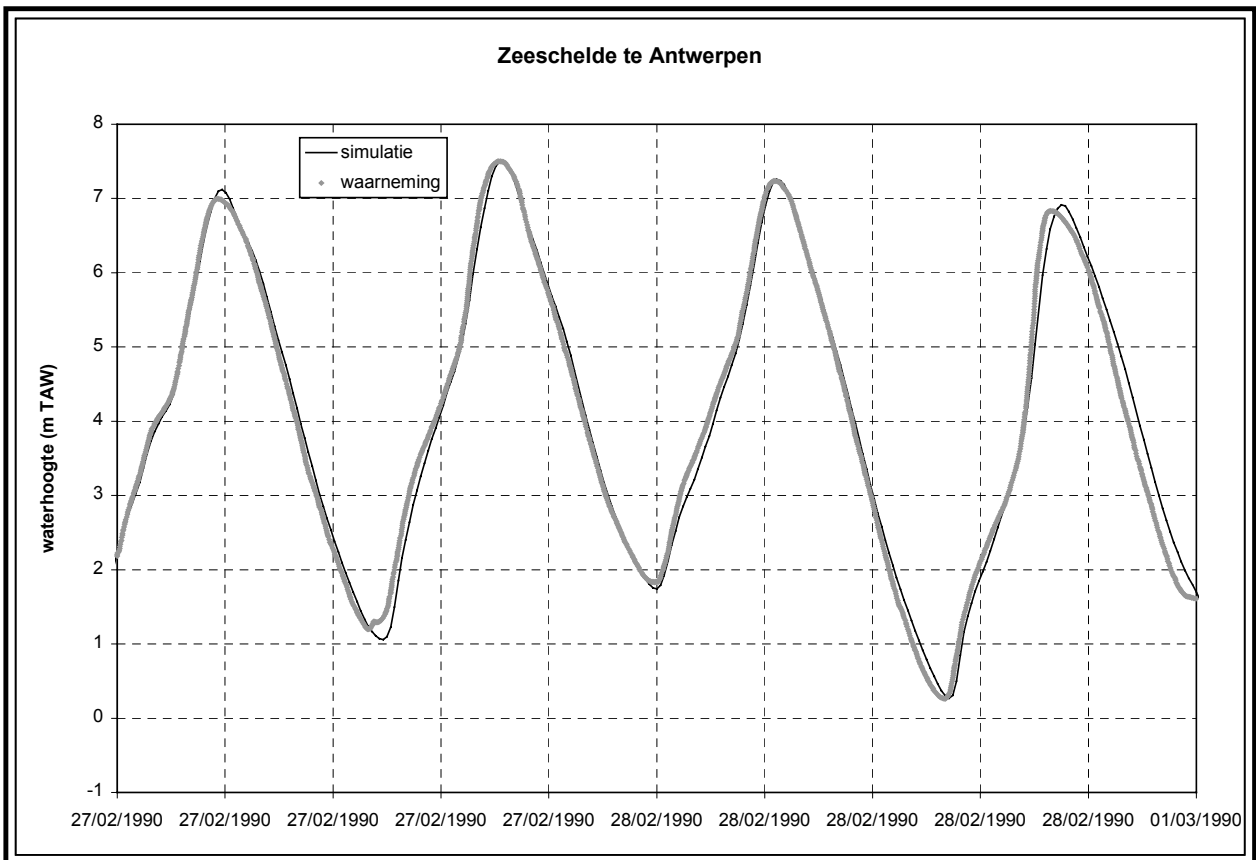
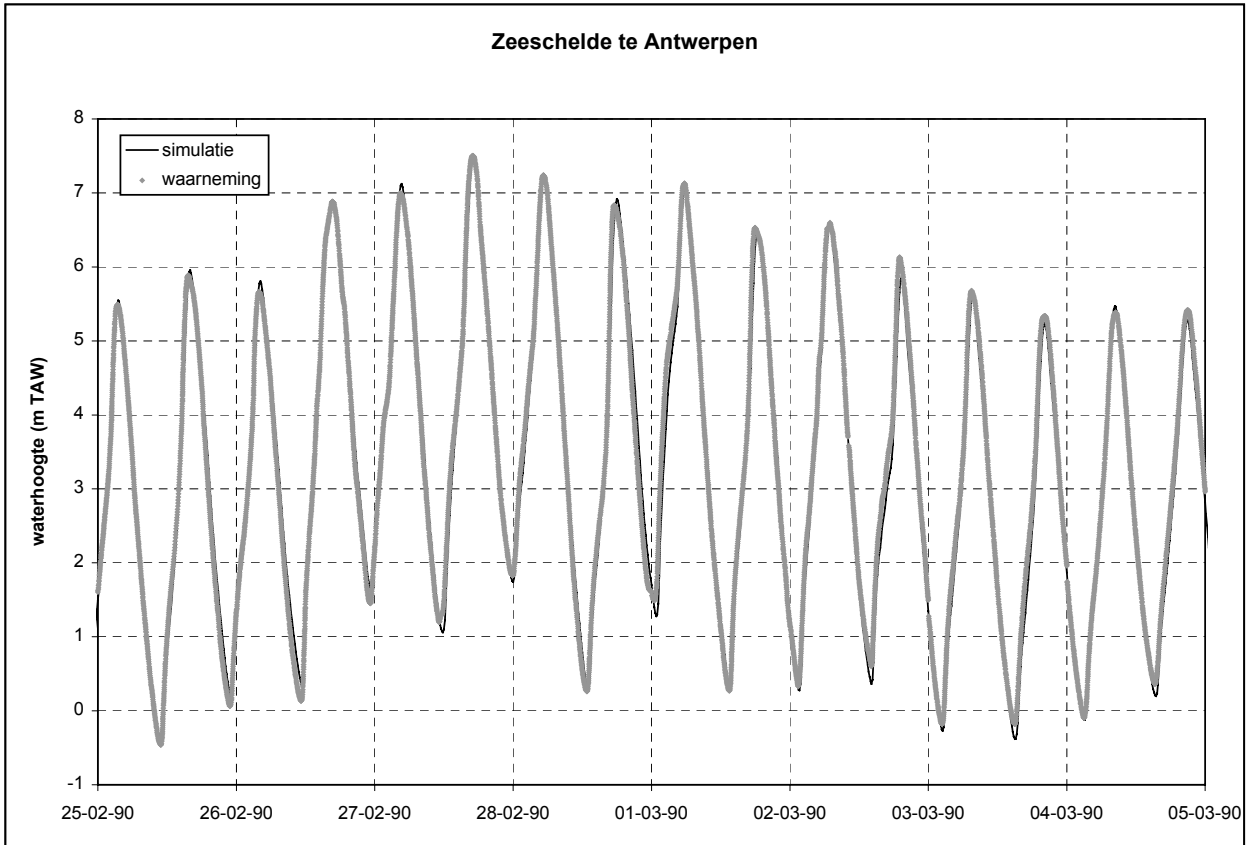
Deze periode was de basiskalibratieperiode voor het model. Globaal gezien zijn de resultaten goed. Opwaarts Dendermonde worden de hoogwaterpeilen wel wat overschat. Helemaal opwaarts, vanaf Wetteren is er eigenlijk niet echt een constante afwijking meer. De hoogwaterpeilen worden soms goed gesimuleerd en soms worden ze overschat. Hetzelfde geldt voor de laagwaterpeilen. Dit is zeer waarschijnlijk te wijten aan onnauwkeurigheden in de opwaartse randvoorwaarde. Als opwaartse randvoorwaarde werd te Merelbeke immers het daggemiddeld debiet van Melle opgelegd, wat vergeleken met de 10minutenwaarden van de afwaartse randvoorwaarde te Vlissingen veel minder nauwkeurig is, vooral in de temporale distributie van het debiet. Soms treden ook kleine faseverschuivingen op van de laagwaters. Dit is echter geen trend voor het volledige model, en zeker ook niet voor alle periodes.

7.2.2. Periode 2: februari 1990

Eens het model min of meer gekalibreerd was voor de referentieperiode werden ook periodes met stormtijden doorgerekend en moesten de ruwheidswaarden aangepast worden om toch over de volledige lengte tot goede resultaten te komen. Zoals de kalibratieresultaten aantonen, is dit met redelijk succes gelukt. Enkel opwaarts Wetteren zijn significant grotere afwijkingen op zowel laag als hoogwaters merkbaar. Mogelijke verklaring hiervoor is vooral de invloed van het bovendebiet van de Schelde, dat zowel een invloed kan hebben op de laagwaterpeilen als op de hoogwaterpeilen.

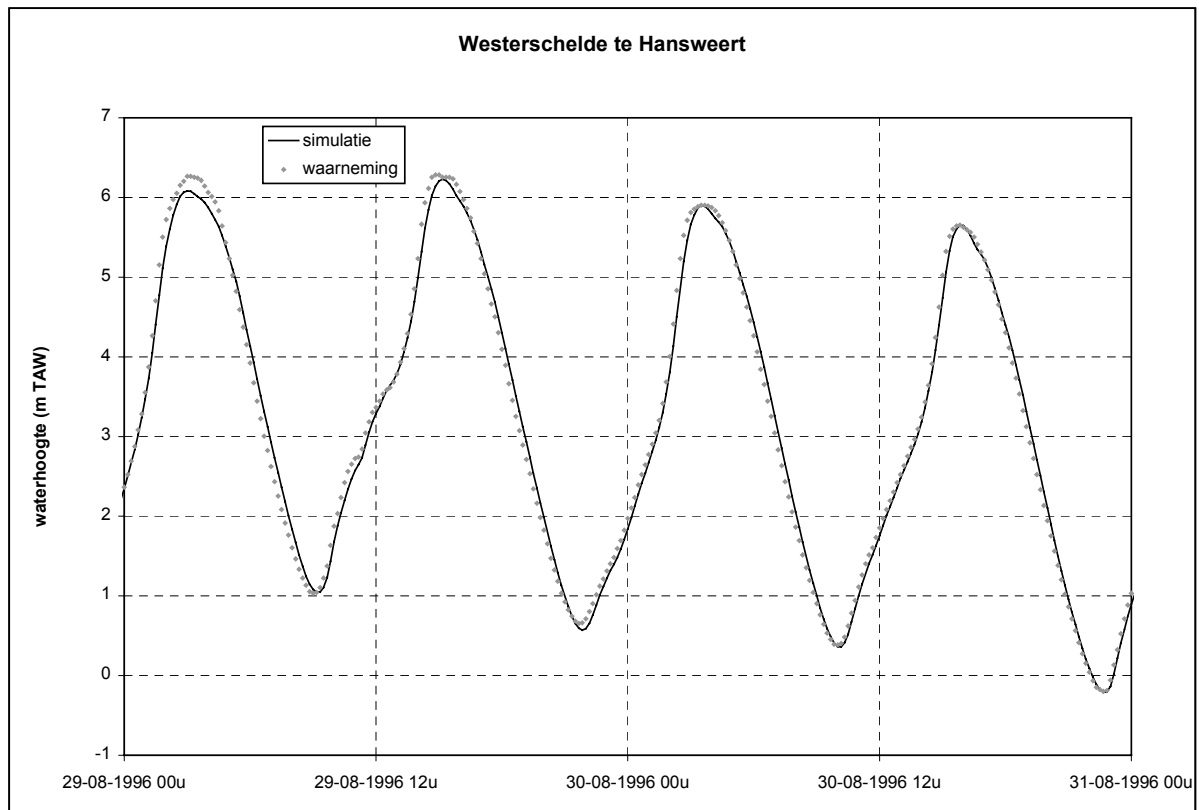
Toch is het enigszins raar dat de afwijkingen opwaarts te Wetteren en Melle voor deze periode toch groot zijn, aangezien in andere periodes (bijvoorbeeld augustus 1996), met nog hogere waterpeilen te Wetteren en Melle, de afwijkingen kleiner zijn.

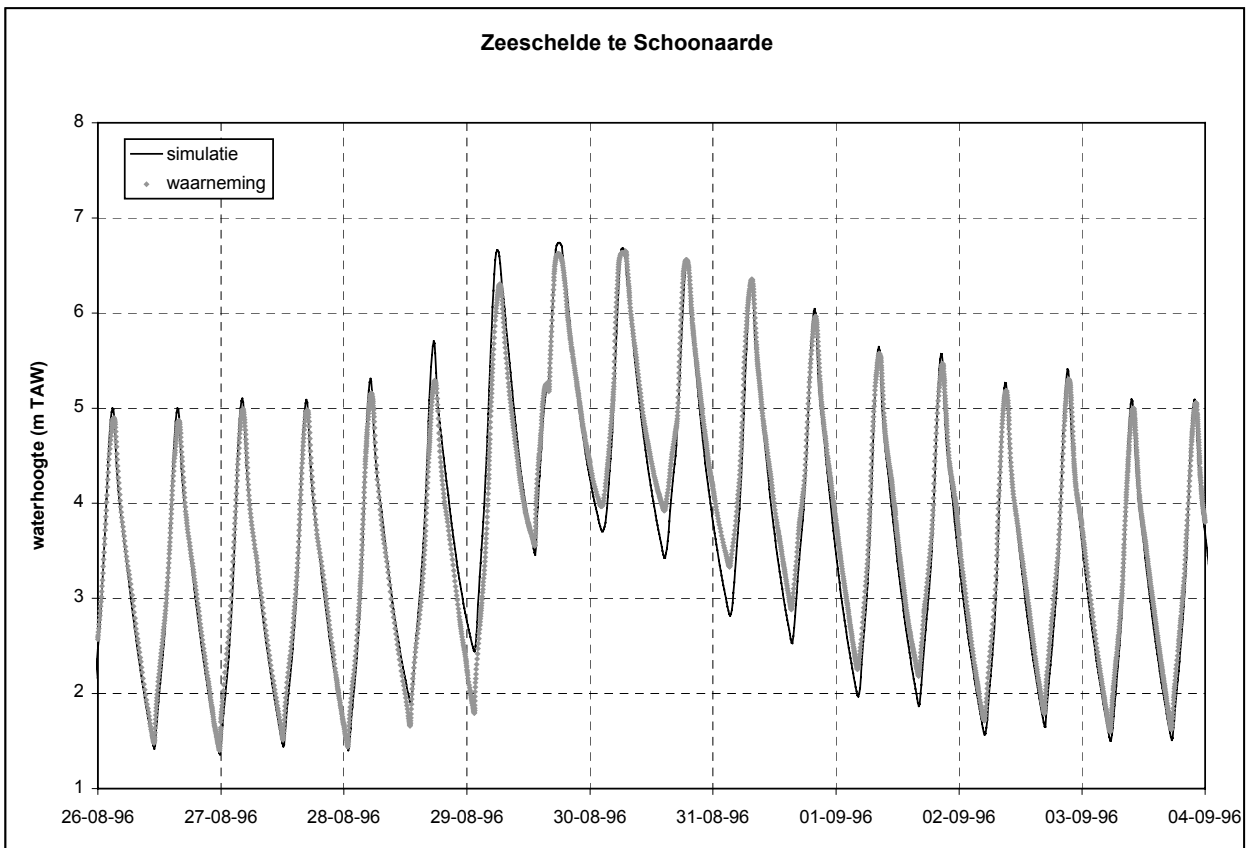
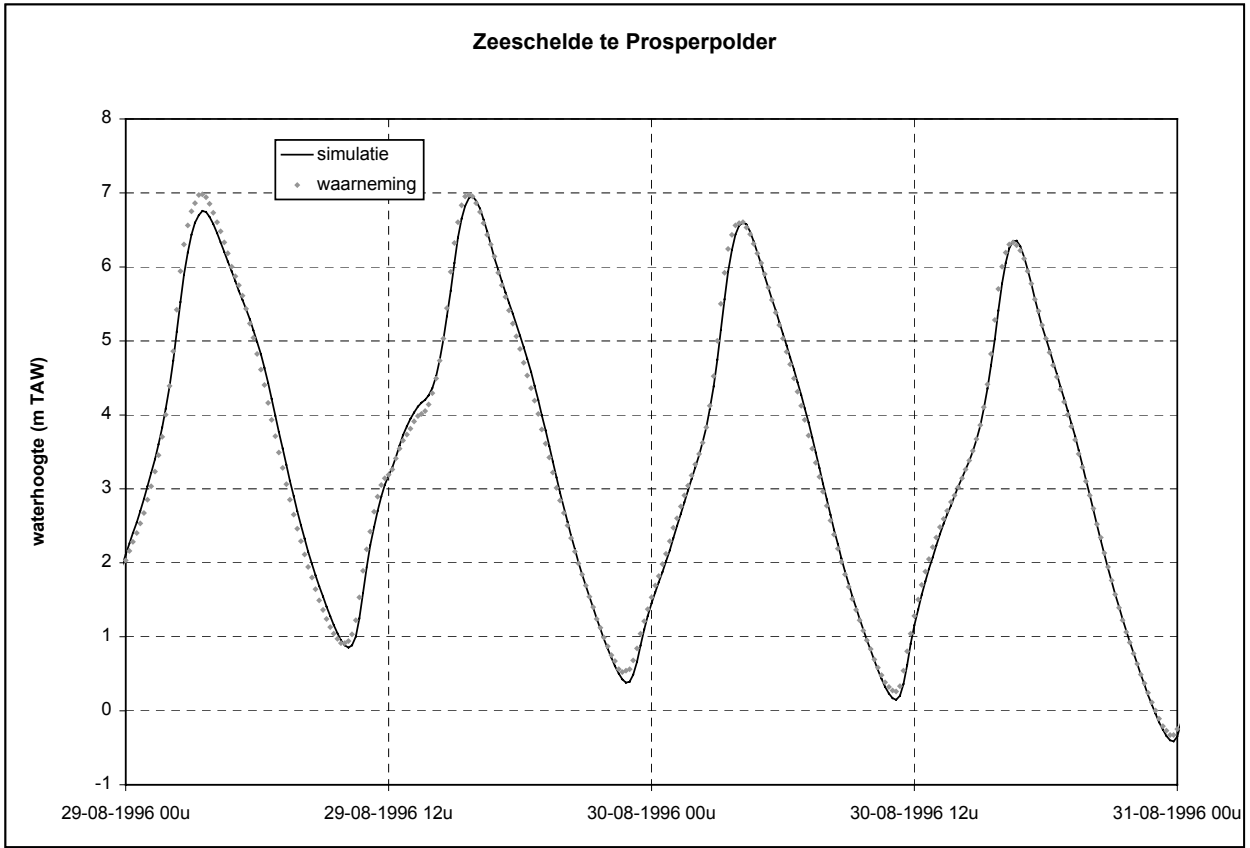




7.2.3. Periode 3: augustus 1996

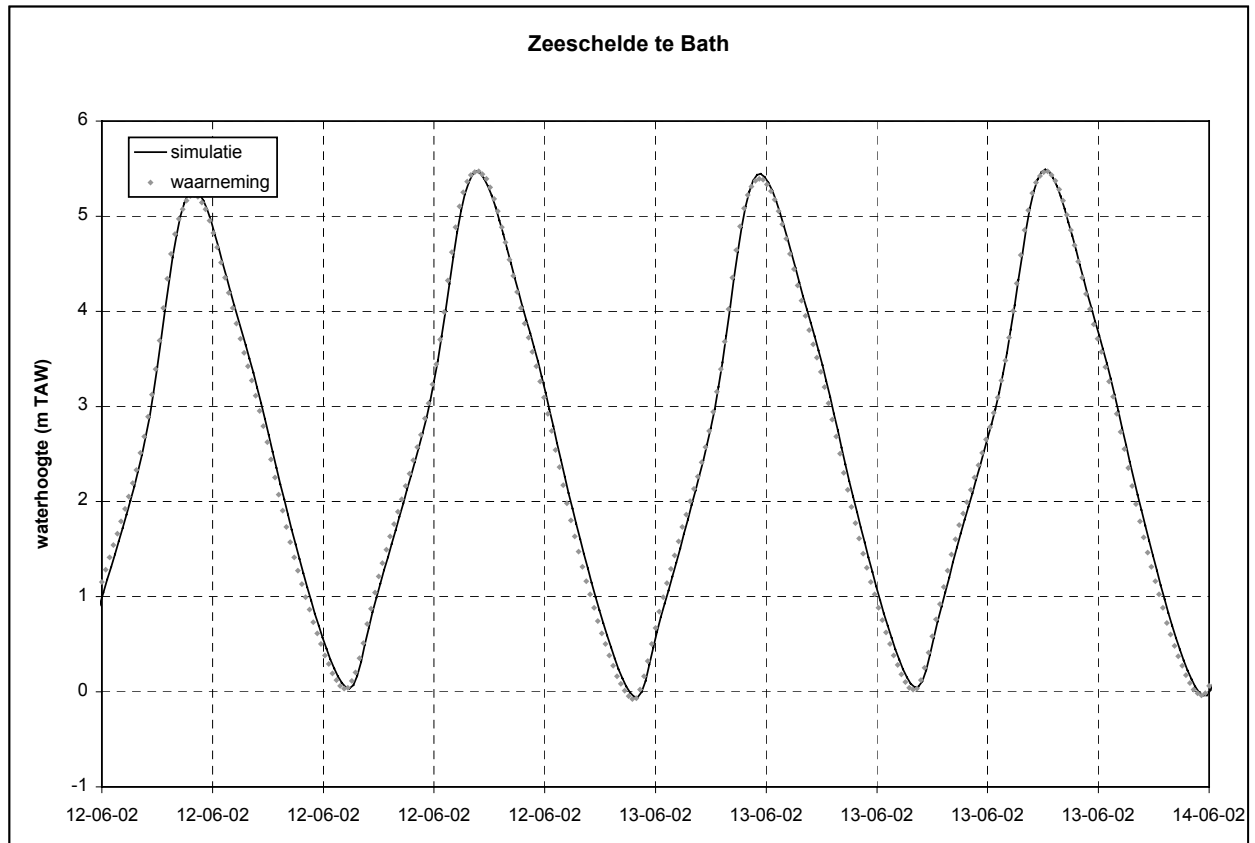
Een tweede stormtijperiode die voor de kalibratie van het model gebruikt werd was de periode rond het einde van augustus 1996. Deze periode kan gebruikt worden voor het kalibreren van het model op zowel stormtij als op de invloed van bovendebieten (op de Zenne het hoogst gemeten in de meer dan 20 jarige meetreeks) en ook het bovendebiet op de Schelde is vrij groot. Hierdoor zijn de waterpeilen opwaarts op de Zeeschelde ook hoger dan die van andere, vaak meer extremere stormtij. De kalibratiefiguren tonen zeer goede resultaten tot Sint-Amands, kleine afwijkingen in Dendermonde en Schoonaarde, en iets grotere afwijkingen in Wetteren en Melle. De afwijkingen op de laagwaterpeilen zijn het gevolg van de onnauwkeurigheid van de opgelegde bovenrand.

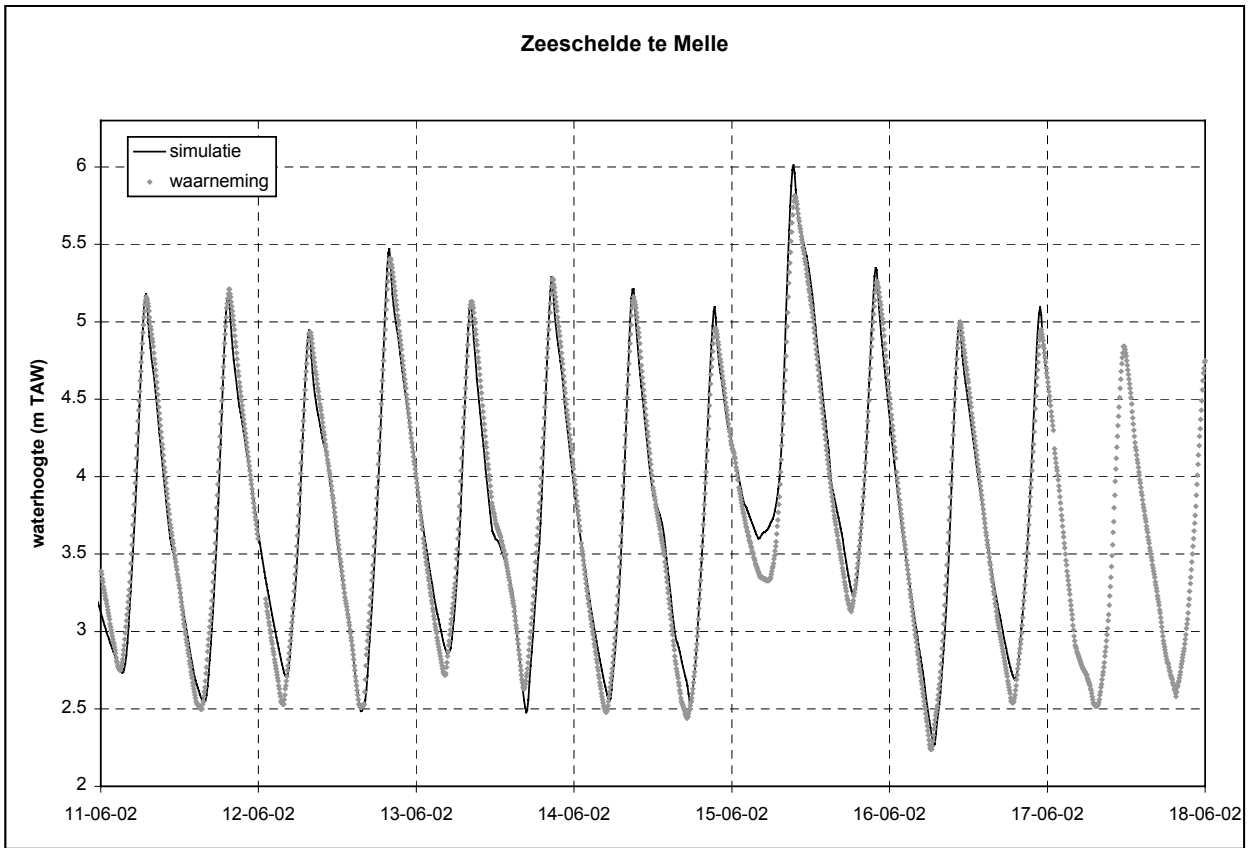
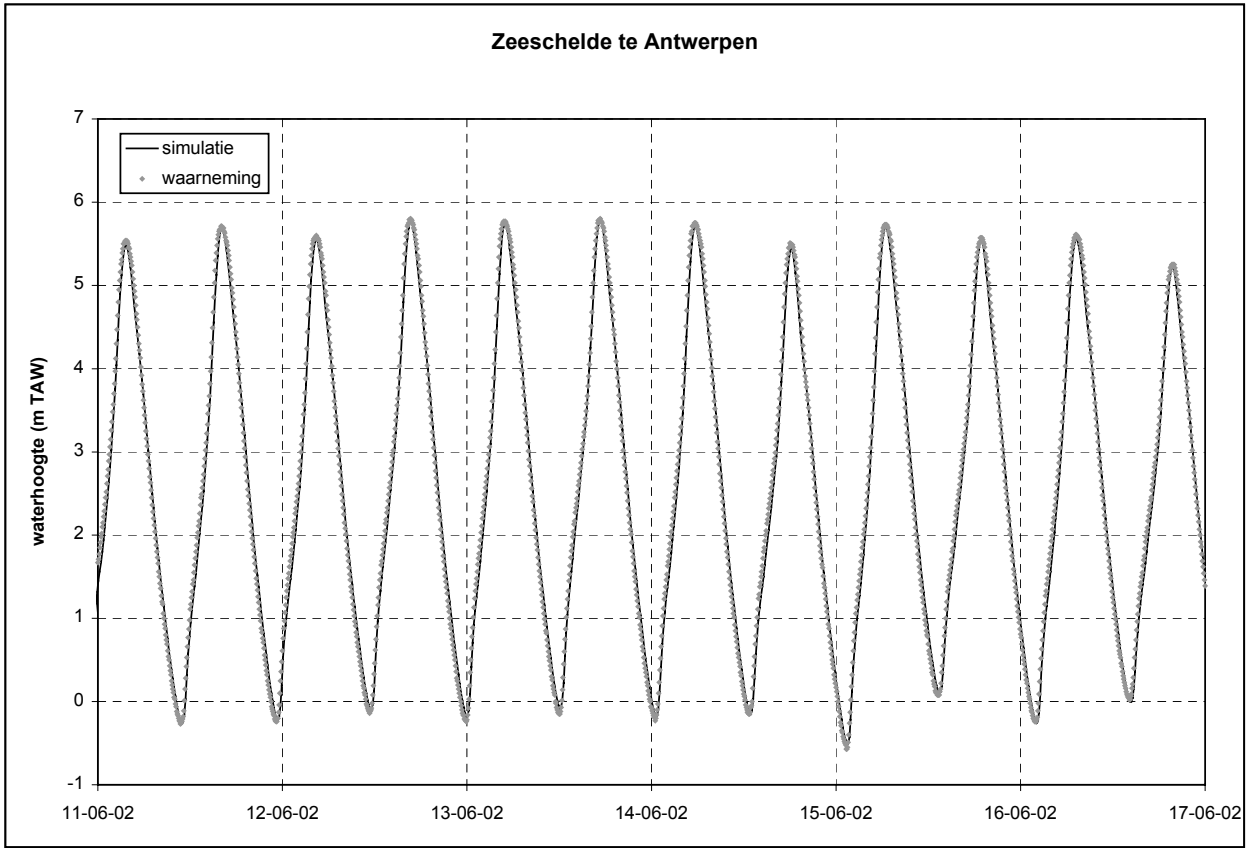




7.2.4. Periode 4: juni 2002

Deze periode behoort niet tot de algemene kalibratieperiodes voor de modellen. Ze werd wel met het volledige Schelde-Rupel-Durme model doorgerekend om de invloed van de opwaartse randvoorwaarde na te gaan. Als randvoorwaarde te Merelbeke werd immers de 5 minutelijkse debieten gebruikt die bepaald werden in de studie Densiteitsstromingen in het kader van LTV Schelde (WL Delft, IMDC, AMT, 2003). Deze zouden in principe veel nauwkeuriger de verdeling van de debieten in functie van de tijd moeten weergeven. De vergelijking van de modelresultaten en de meetwaarden op enkele locaties tonen dit ook aan. Vooral in de buurt van Melle kloppen zowel de laagwaters als de hoogwaters goed.





7.3. calibratie, rekening houdend met wind

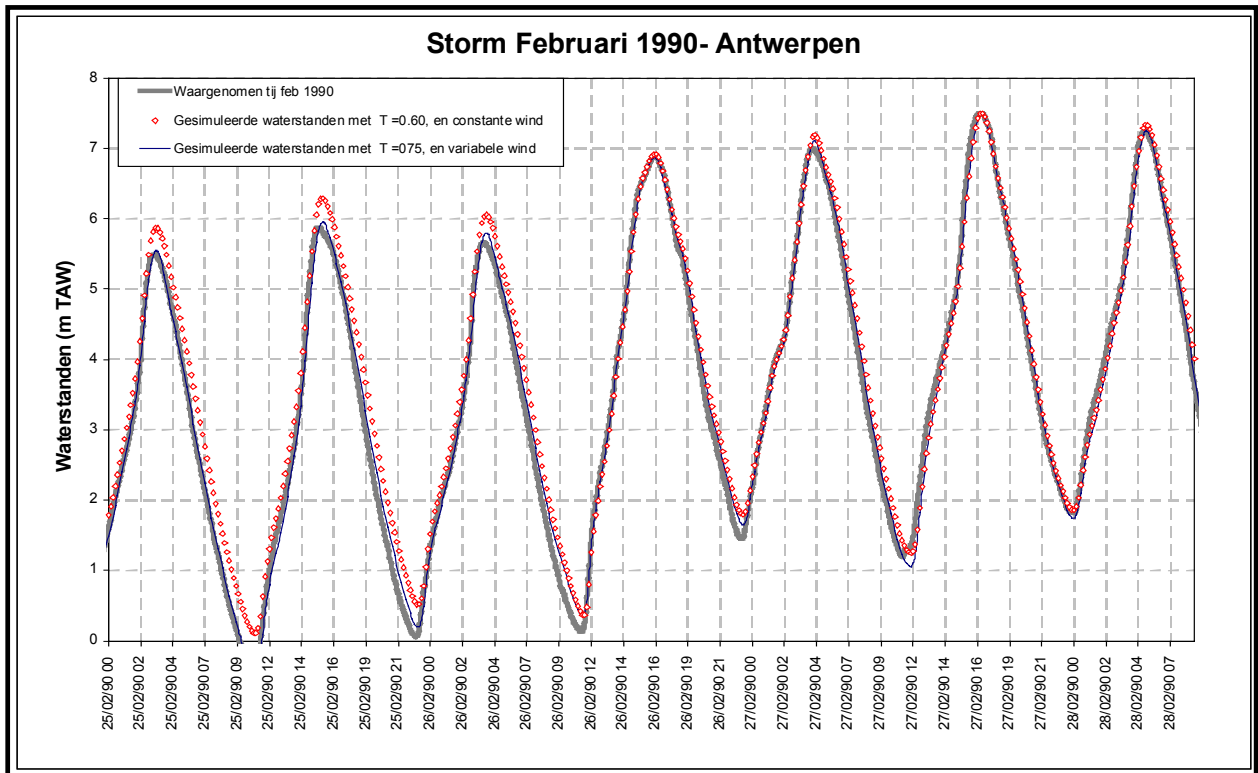
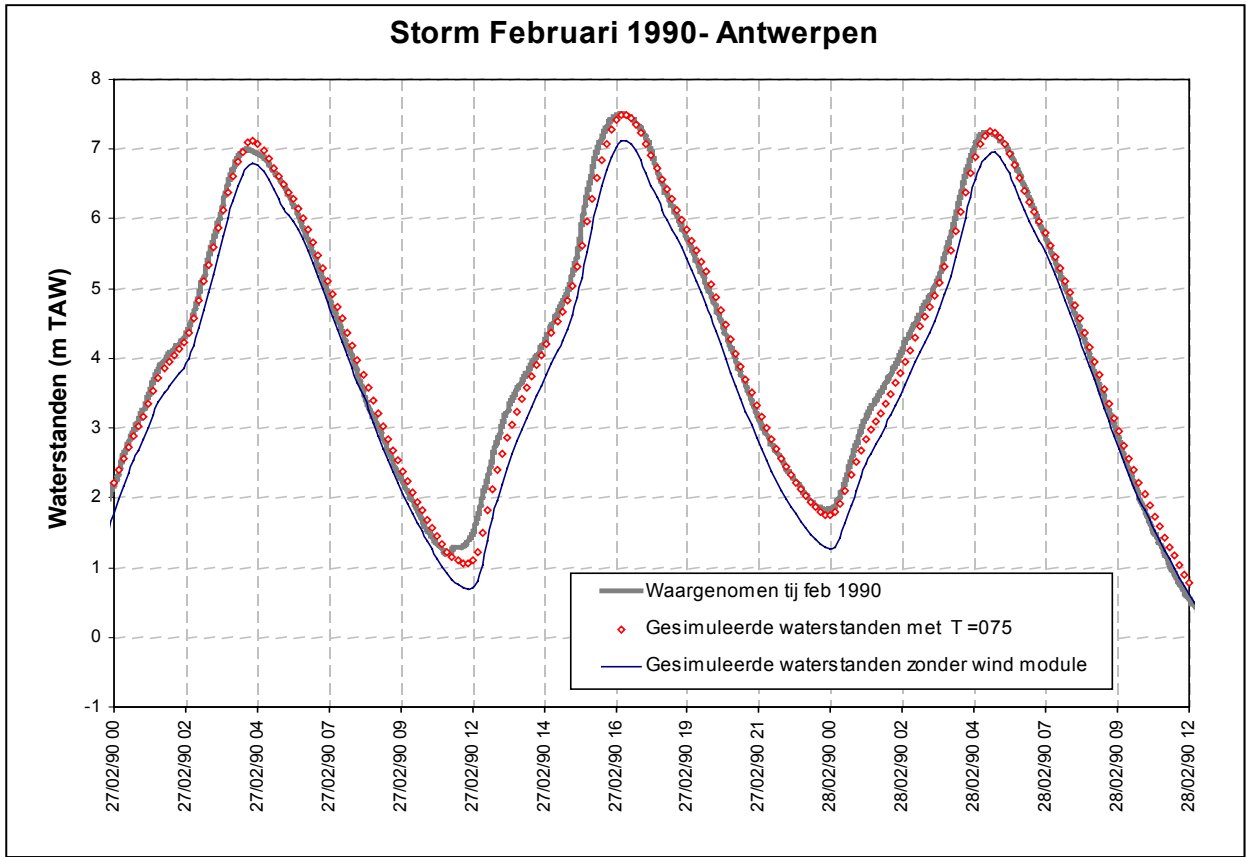
In de voorgaande kalibratie- en validatieberekeningen werd nog geen rekening gehouden met het effect van wind op het wateroppervlak van de Westerschelde. Dit was ook niet nodig, omdat de windsnelheden, met uitzondering van de event van februari 1990, beperkt bleven. In deze paragraaf wordt beschreven hoe de kalibratie/validatie werd vervolledigd door rekening te houden met de windinvloed. Dit gebeurde aan de hand van de event van februari 1990 en een groot aantal bijkomende periodes gekarakteriseerd door hoge windsnelheden.

De topografische factor is de te kalibreren factor in de windmodule. Deze waarde voor deze factor werd afgeleid voor twee verschillende gevallen:

- de situatie waarbij de waargenomen reeks van wind in Vlissingen wordt opgelegd.
- de situatie waarbij een constante windsnelheid wordt opgelegd

De eerste situatie is uiteraard de meest realistische, de tweede situatie werd gekalibreerd ten behoeve van de statistische studie op de Schelde (zie volume 1a van deze deelopdracht), waarbij het aantal vrijheidsgraden (o.a. de variatie van de wind in de tijd) beperkt moet blijven.

Voor de tijposten tot en met Antwerpen worden de gesimuleerde en waargenomen hoogwaters met elkaar vergeleken. Voor die events waar voldoende meetgegevens beschikbaar zijn (oktober '87, januari '90, februari '90, november '92, november '93, december '93, januari '94, augustus '96, mei '00, juni '00) worden in volume 2d de maximale waterstanden weergegeven in een langsprofiel van de Wester- en Zeeschelde, zodat een ruimtelijke interpretatie van de kalibratieresultaten mogelijk wordt. Ter vergelijking worden voor een aantal events (januari '90, februari '90, november '92, november '93, januari '94, augustus '96, juni '00) ook de resultaten zonder gebruik van de windmodule weergegeven. Diezelfde events werden gebruikt voor de kalibratie van de windmodule voor de aanname van een constant blijvende windsnelheid (ten behoeve van de statistische analyse). De beste resultaten werden bekomen door de topografische factor op 0.6 te stellen voor de 6-uur gemiddelde wind en op 0.5 bij de aanname van constante wind. Uit de figuren blijkt dat de resultaten bij gebruik van de windmodule beter zijn dan wanneer de windmodule niet wordt gebruikt. Het verschil kan voor de kalibratie-events oplopen tot 20 à 30 cm.

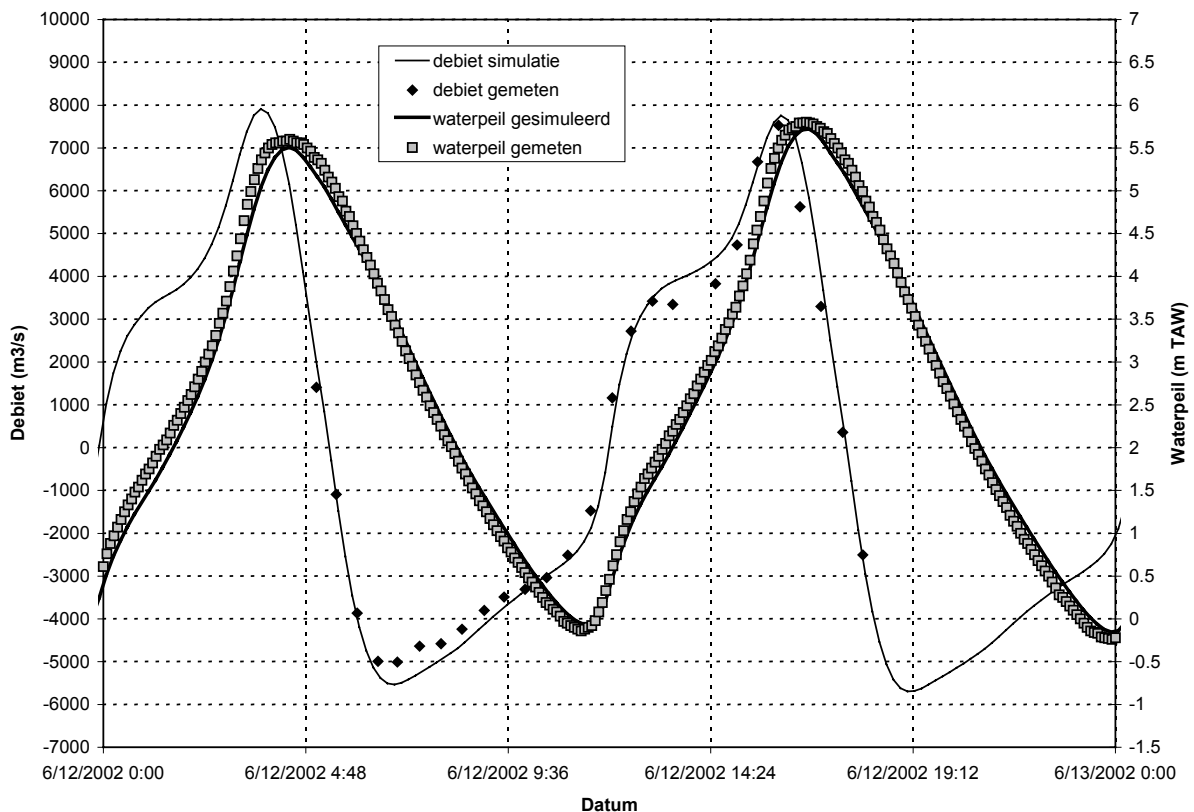


8. VALIDATIE VAN HET MODEL

De eb- en vloedvolumes te Antwerpen werden gecontroleerd door vergelijking met een dertienuursmeting (juni 2002).

Op het plaatje worden de berekende debietswaarden uit de 13uursmeting en de gemeten waterpeilen van de tijpost te Oosterweel vergeleken met simulatiewaarden van het hydrodynamisch model voor dezelfde periode. De gesimuleerde waterpeilen op hoogwater zijn 4 tot 5 cm lager dan de gemeten waardes. Bij vergelijking van de debieten vallen 2 kleine afwijkingen op, één bij de laagste ebdebieten en 1 in de stijgende flank van de vloeddebieten, waat het debiet een knik vertoont. Beide afwijkingen zijn waarschijnlijk het gevolg van het feit dat tijdens de 13 uren meting niet de volledige dwarssectie kan bemeten worden. Daarom is het logisch dat de gemeten debieten lager zijn dan de gesimuleerde debieten uit het model, die wel over de volledige dwarssectie berekend zijn. Correctie van de berekende 13uurs metingen naar het volledige dwarsprofiel is niet eenvoudig omdat per berekende waarde uit de 13 uren meting moet bepaald worden welk deel van het dwarsprofiel niet bemeten werd en hoe groot het debiet in dit deel was.

De afwijking van de eb- en vloedvolumes voor de beschouwde getijdencyclus is ongeveer 7 tot 8 % (, wat zeer klein is gezien de mogelijke onnauwkeurigheden in zowel het hydrodynamisch model als de 13 uren meting.



Voorts werd ook een vergelijking gemaakt tussen de gemiddelde eb- en vloedvolumes van de modelsimulaties (periode 12-16/06/2000) en de bestaande kubatuurberekeningen voor een gemiddeld tij van de periode 1971-1980 (WLH mod.405 rapport 2).

De grootteorde van de volumes komt overeen. Wel is een toename van het tijvolume merkbaar naar opwaarts op de Schelde toe in vergelijking met de kubatuurberekeningen.

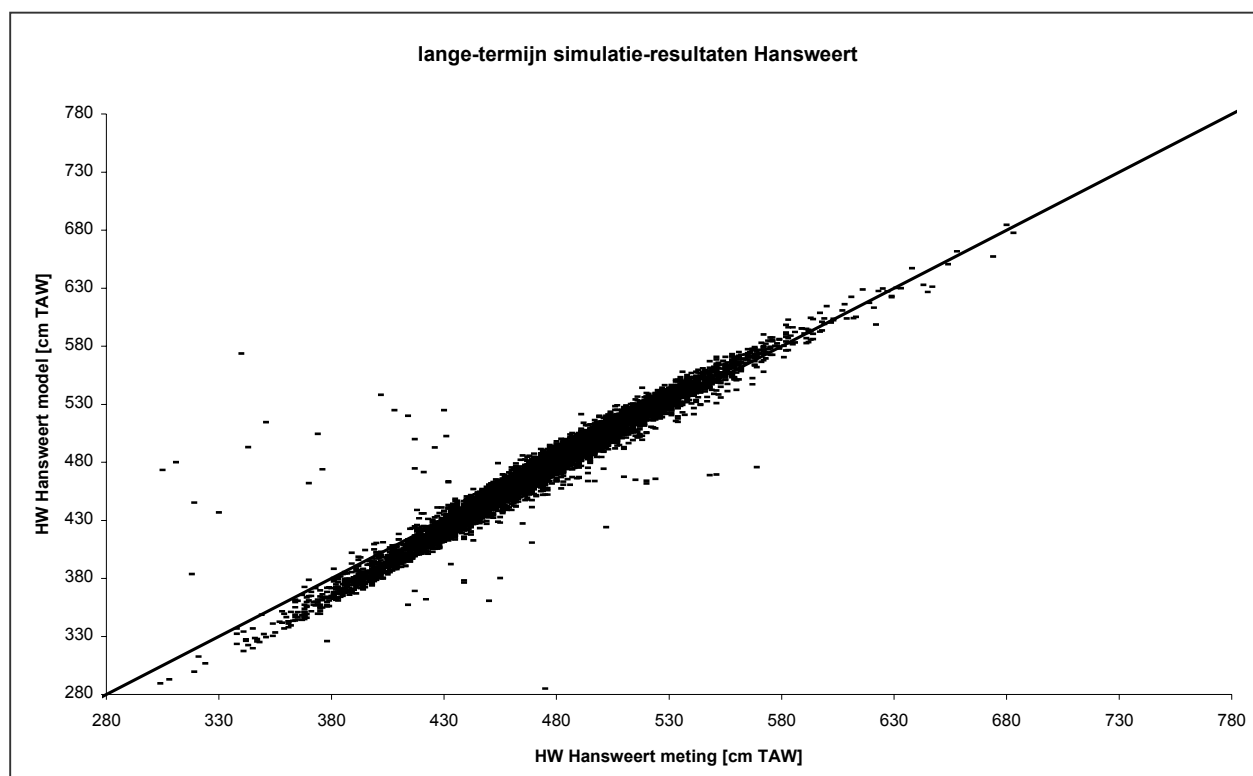
Deze toename is waarschijnlijk te wijten aan een combinatie van factoren:

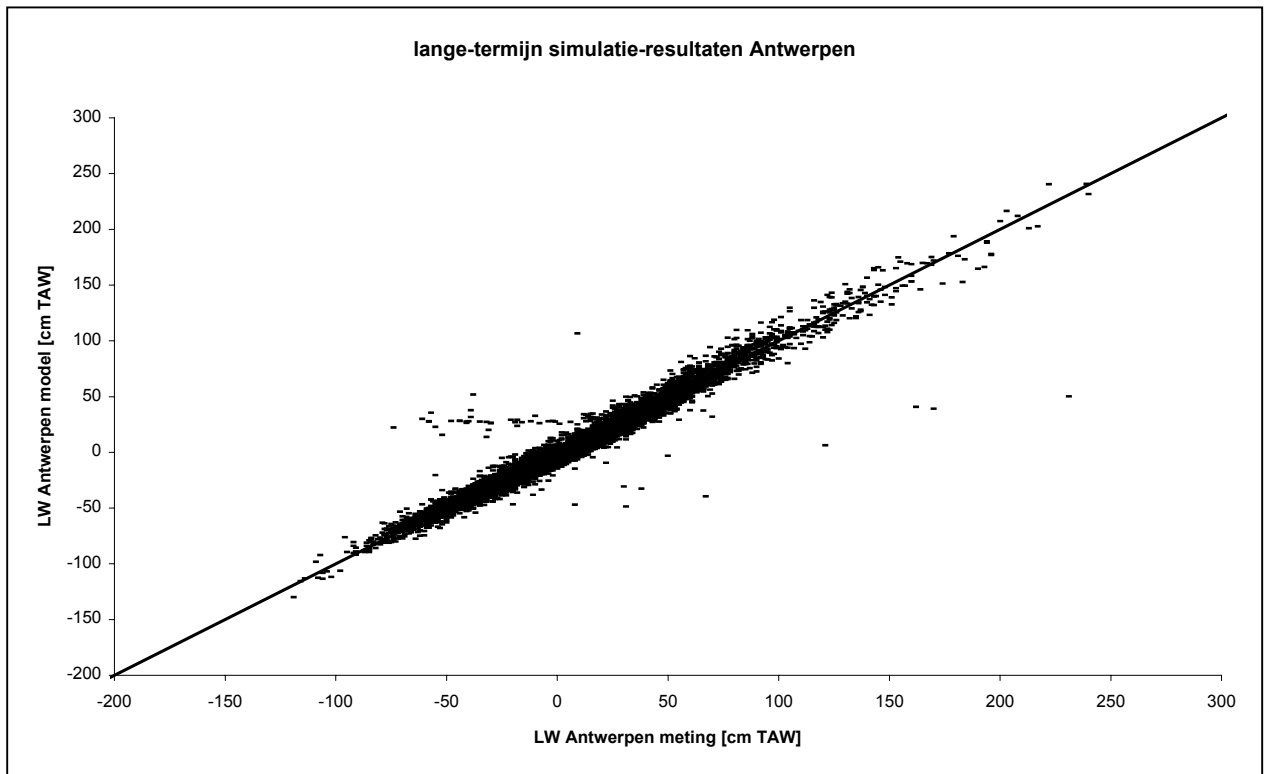
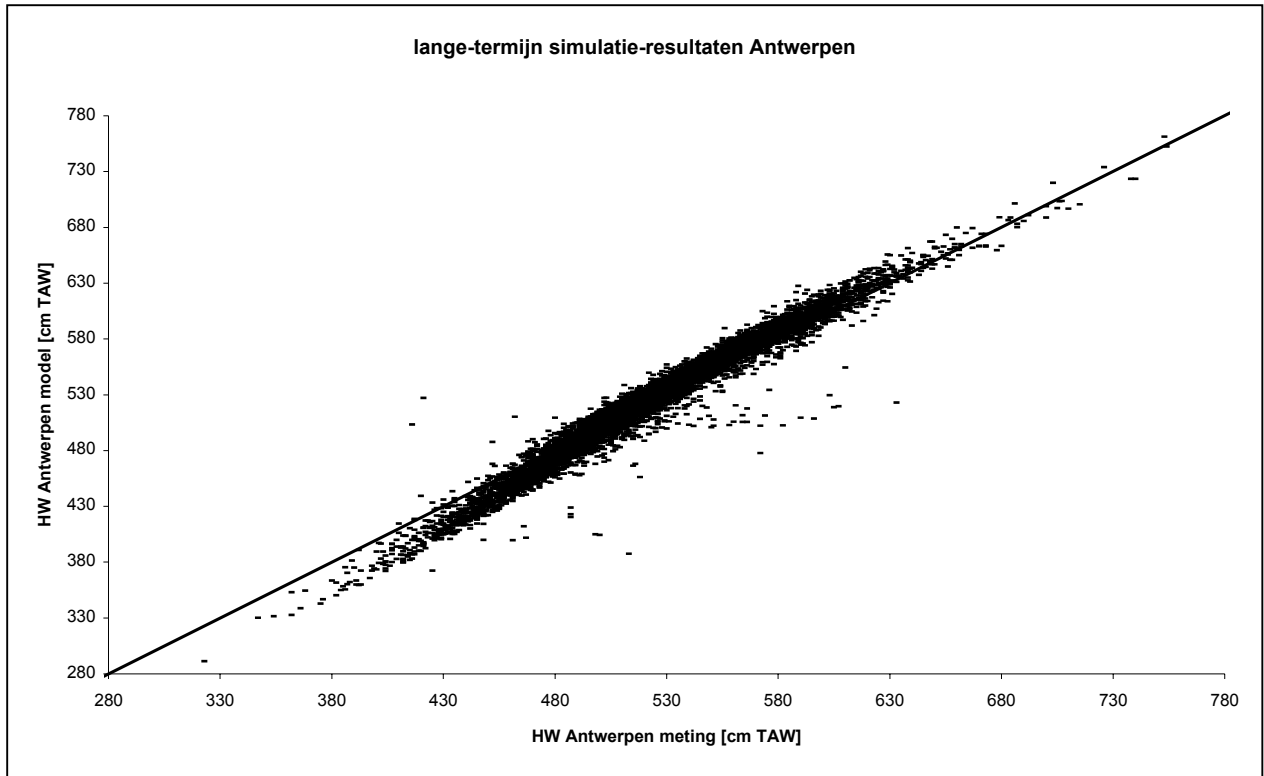
- De gebruikte bathymetrie verschilt
- Alhoewel het hoogwater en laagwaterpeil quasi gelijk zijn, kan de tijvorm toch verschillen

- De gebruikte methodologie voor het bepalen van de debieten verschilt. De huidige resultaten zijn het gevolg van modelsimulatie-resultaten in Mike 11 terwijl de kubatuurberekeningen gebaseerd zijn op andere wiskundige berekeningstechnieken

Er werd ook een lange periode doorgerekend (1984-2000). Berekende hoog- en laagwaterstanden werden vergeleken met de waargenomen en geregistreerde waarden. Over het algemeen kan worden gesteld dat de waargenomen en berekende waterstanden een goede overeenkomst vertonen, zeker wat betreft de hoge en gemiddelde hoogwaters en de laagwaters in het tijgebied. De overeenkomst wordt beter naarmate men zich van opwaarts naar afwaarts begeeft, d.w.z. naarmate de getijde-invloed toeneemt en dus de belangrijkste onzekerheden (o.a. op het bovendebiet) afnemen. Op de lage hoogwaters bestaan ook in het tijgebied afwijkingen die mogelijks te maken hebben met het niet in rekening brengen van het verschil in ruwheid tussen de eb- en vloedstroom.

(ps: de afwijkende punten zijn alle te verklaren door ofwel meetfouten, ofwel en vooral door opvullen van perioden met ontbrekende waarnemingen te Vlissingen).





9. MODELGEBRUIK, ONZEKERHEDEN

Voor de kalibratie- en validatieevents loopt het geïntegreerde Scheldemodel, d.w.z. het model van Zeeschelde en Westerschelde waaraan de modellen van Rupel en Durme gekoppeld werden, met een tijdstap van 5 minuten. Voor de maatgevende hydrogrammen dient de tijdstap te worden verkleind tot 2 minuten. Om stabiliteitsredenen werd de onderrelaxatieparameter op 0.55 gezet (t.o.v. 0.5 standaard) en de structuurlinearisatieparameter op 0.03 (t.o.v. 0.01 standaard). Voor alle andere runparameters werd van de standaardwaarden gebruik gemaakt. Hogere waarden voor de onderrelaxatiecoëfficiënt waren niet aangewezen, aangezien het grootste deel van het model tijgebonden is (Cunge et al., 1980).

Bij de opbouw van het model werden een aantal stabiliteitsproblemen vastgesteld, die als volgt werden opgelost:

- Problemen met de nieuwe BRIDGE modelementen. Deze elementen werden uiteindelijk niet gebruikt in het model.
- Problemen met de Qh-relaties van culverts: Als de geometrie van een culvert door een onvoldoend aantal punten wordt weergegeven, is de berekende Qh-relatie onnauwkeurig. Daarom werden voor een aantal culverts punten toegevoegd bij de definitie van de geometrie.
- Problemen bij het droogvallen van overloopgebieden. De door Mike11 automatisch aangebrachte Preissmansloten waren in sommige gevallen onvoldoende om stabiliteitsproblemen te voorkomen. Daarom werden een aantal secties in de overloopgebieden handmatig van een Preissmanslot voorzien.

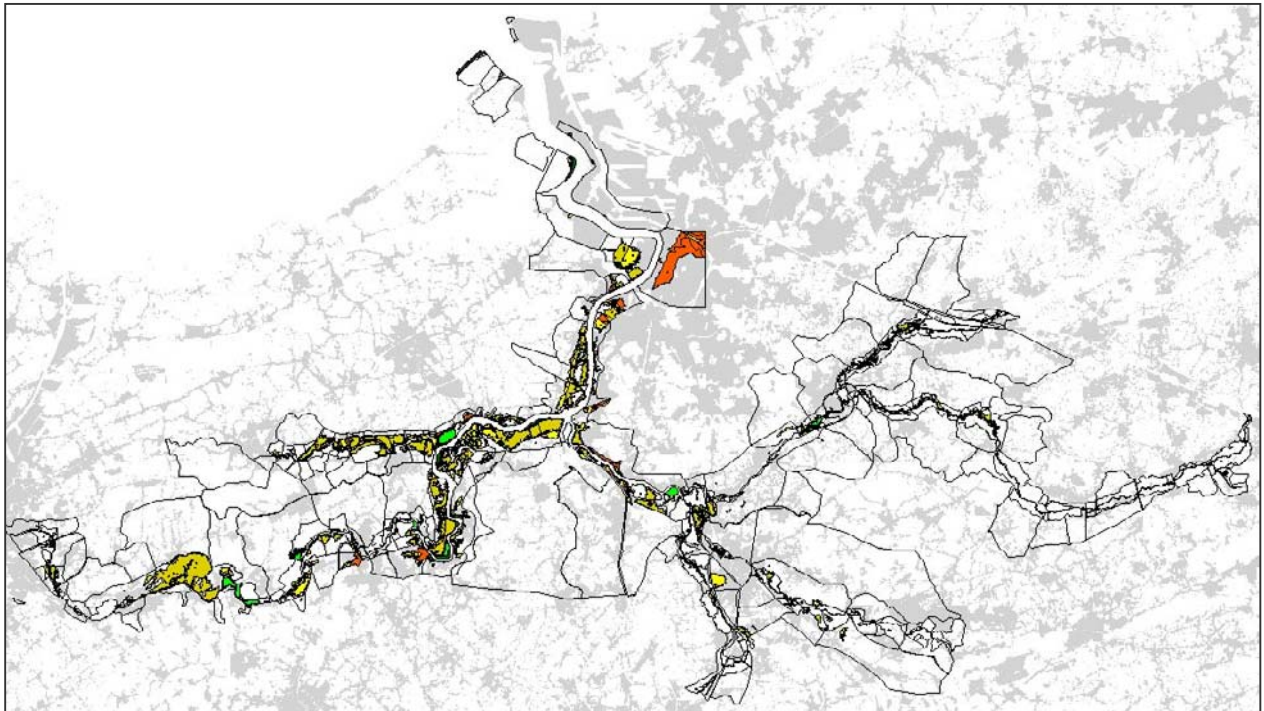
Vooraf ter hoogte van het Verdrongen land van Saeftinghe deden zich belangrijke instabiliteitsproblemen voor. Deze werden enerzijds veroorzaakt door de aanwezigheid van belangrijke zijkreken en anderzijds door de plotse bodemval tussen het 'Verdrongen Land' en de Westerschelde. Het eerste probleem werd opgelost door een verfijning van de schematisatie. Daarnaast werden de secties van de hoofdkreken voorzien van een handmatig aangebracht Preissmanslot en werd aan de overgang tussen elke kreek en de Westerschelde een fictieve overlaat geplaatst waarvan de geometrie overeenkomt met die van de meest afwaartse sectie van de kreek.

Het hydrodynamisch model van de Westerschelde houdt geen rekening met zoutgradiënten. Door de grotere dichtheid van zout water ten opzicht van zoet water (respectievelijk 1030 en 1000kg/m³) zouden de waterstanden in het opwaartse deel van de Zeeschelde opgestuwd kunnen worden. Benaderende berekeningen uitgevoerd door het WLH tonen aan dat de maximale waterstand in Antwerpen hierdoor in grootte-orde van 10 cm kan beïnvloed worden. Dit effect kan in de huidige versie van Mike11 niet worden meegenomen.

10. CONCLUSIE

De mogelijke overloopgebieden die in het hydrodynamisch model werden ingebracht zijn bijzonder uitgestrekt. Met het hydrodynamisch model kunnen dus zeer extreme gebeurtenissen (tot en met een terugkeerperiode van 10.000 jaar: zie bijvoorbeeld onderstaande figuur) nauwkeurig worden doorgerekend.

Evenwel dient opgemerkt dat de gesimuleerde overloopgebieden in de omgeving van Antwerpen en aan de monding van de Rupel in de Schelde gebaseerd zullen zijn op het voor dat doeleinde onnauwkeurige DTM van het NGI.



11. LOPENDE STUDIES MET HET MODEL

11.1. Sedimenten en morfologie

De deelmodellen van de Durme en Grote Nete worden momenteel (2003) aangepast voor gebruik in morfologische studies.

Hiervoor worden de modules Mike11 AD en CST van DHI gebruikt.

Met deze aangepaste modellen zullen de ingrepen die langs deze rivieren gepland worden, bestudeerd worden vanuit het oogpunt morfologie.

11.2. Lopende berekeningen 2003 (studies “Actualisatie van het Sigmaphan”)

- de doelstelling van deze berekeningen is het verschaffen van kwalitatieve inzichten voorafgaand aan de statistische interpretatie en aan de optimalisatie van maatregelen.
- inschatten van de huidige toestand: vanaf wanneer beginnen overstromingen, hoe spreiden ze zich in de overstroombare gebieden, tot hoever opwaarts is de invloed van een stormtij waar te nemen rekening houdend met het afschermend effect van de overstromingen op het opwaarts gebied;
- definiëren van de nuttige GOG's:
 - combinaties van haalbare POG's vastleggen waarvan het beschermingseffect steeds groter wordt in ruimte (retourperiode) en in tijd;
 - aanlegprioriteiten vastleggen;
 - cota's van overstroomdijken vastleggen;
- effect van een stormvloedkering te Antwerpen
 - op stormtij;
 - op tij met groot bovendebiet;
- effect van een Overschelde verbinding;
- mogelijke combinaties van maatregelen opstellen;
- De statistische uitwerking van de kans op overstroming (huidige toestand en toestand met GOG's in het Scheldebekken) en de overschrijdingslijn te Antwerpen zonder of met overstromingen;
- de berekeningen langs Durme en Grote Nete ten behoeve van de MalS studies;
- de berekeningen ten behoeve van de morfologische studies voor Durme en Grote Nete.

Het zoeken naar de *optimale* combinaties van beschermingsmaatregelen, het bepalen van het economisch optimum B/C en het bepalen van het gedifferentieerd bijhorend risico maakt geen deel uit van deze studie.

11.3. vervolgtraject

11.3.1. inbouw van bressen

Momenteel wordt het model aangepast zodanig dat, bij overloop over de dijk en wanneer de dijk een voldoende hoge faalindex heeft, een bres kan ontstaan. De faalindex wordt vooraf bepaald en is functie van een aantal kritische parameters die de faalkans beïnvloeden (ouderdom, dwarsdoorsnede dijk, bekleding dijk, helling dijk, lokale stroomsnelheden en golfklimaat, ...)

11.3.2. koppeling aan schade en slachtoffersmodule

Overstromingskaarten, stijgsnelheden, stroomsnelheden in het overstromingsgebied worden gekoppeld aan aan schade, slachtoffers en risicomodule.

11.3.3. schade- en slachtoffersberekingen voor diverse Sigmascenario's

Deze berekingen gebeuren in het kader van een Maatschappelijke Kosten Baten analyse van het Sigmaplan, aangevuld met een PLAN MER, waarbij gezocht wordt naar een optimale set van combinaties van maatregelen ter bescherming tegen overstromingen in het bekken van de Zeeschelde. Uitvoeringsperiode studies 2003-2004.

De berekingen zullen gebeuren:

- volgens een methode waarbij maatgevende randvoorwaarden die horen bij een bepaalde terugkeerperiode worden opgelegd (composietrandvoorwaarden);
- volgens een Monte Carlo methode (met afbakening van het gebied waarin de trekkingen gebeuren), de schade en slachtoffers statistisch bepaald worden.