

Het SCALWEST-model

**de berekening van water- en zoutbeweging en een
aanzet voor sedimenttransport in het Schelde-
estuarium
april 2000**

werkdokument RIKZ/OS/2000.814

auteurs: Harm Verbeek, Kees van der Male (RIKZ),
Maarten Jansen (ingenieursbureau Svašek)

Voorwoord	4
Samenvatting	5
1 Inleiding	6
1.1 Aanleiding van de bouw van het SCALWEST model	6
1.2 Uitgangspunten van het SCALWEST model	6
1.3 Inhoud van dit rapport	7
2 Modelgeometrie van Westerschelde en Zeeschelde	8
2.1 De bodemkaart	8
2.2 Het modelrooster	8
3 Afregelen 2D model	11
3.1 De eerste afregeling SCALWEST-fijn	11
3.2 De tweede afregeling SCALWEST-fijn	13
3.3 afregeling SCALWEST-grof	15
4 Verificatie 2D modellen	16
4.1 SCALWEST-fijn model	16
4.2 SCALWEST-grof model	17
5 Validatie 3D model	18
5.1 Aanleiding van de bouw van het 3D model TRISCAL	18
5.2 De betrouwbaarheid van het 3D model	18
6 Toepassingen	20
6.1 Waterbeweging	20
6.2 Zoutbeweging	20
6.3 Sedimenttransportberekeningen	21
6.3.1 Opzet berekening sedimenttransport	21
6.3.2 Toepassing Drempel van Valkenisse	22
6.3.3 Toepassing Drempel van Hansweert	22
6.4 Extreme waterstanden	22
7 Conclusies en aanbevelingen	24
7.1 Conclusies	24
7.2 Aanbevelingen	24
8 Referenties	25
9 Lijst met bijlagen	27

In opdracht van directie Zeeland heeft het RIKZ in 1997 en 1998 een nieuw tweedimensionaal waterbewegingsmodel van het Schelde-estuarium (Westerschelde, Zeeschelde, zijrivieren) gebouwd op basis van het SIMONA instrumentarium en in het kader van de projecten VERDIEPING en MOVE (MONitoring VERdieping). Na een ludieke prijsvraag met een taart als hoofdprijs heeft dit model de naam SCALWEST gekregen.

De bouw en afregeling is grotendeels uitgevoerd door Maarten Jansen met assistentie van Eddy Collard en Bram Blik (allen van Ingenieursbureau Svašek B.V.) in samenwerking met Harm Verbeek (als projectleider) en Kees van der Male (voor assistentie ten aanzien van modelbouw en -toepassingen).

Naast de auteurs hebben verschillende mensen bijgedragen aan dit product. Ten eerste wordt de hulp van Leen Dekker en Piet Lieveense van de directie Zeeland zeer gewaardeerd. Zij waren niet alleen eindgebruikers, maar ook kritische ontwikkelaars met veel ervaring. Voor de bouw van het rooster is samengewerkt met Gijs van Banning van Alkyon Hydraulic Consultants en verschillende medewerkers van het RIKZ in Den Haag. Enkele van de aansprekende toepassingen, welke in dit rapport gepresenteerd zijn, zijn gemaakt door de stagiaires Gerard Dam (Universiteit Twente), Michiel Schaap (Hogeschool Zeeland) en Koen Wouters (Technische Universiteit Delft).

Samenvatting

Het SCALWEST-model is een nieuw kromlijnijg 2D-waterbewegingsmodel van het Schelde-estuarium. Het model beslaat de Westerschelde vanaf de monding, de Beneden-Zeeschelde, de Boven-Zeeschelde en verschillende getijd-dominante zijrivieren. Er zijn twee versies van het SCALWEST-model gebouwd, namelijk met een grove en een fijne schematisatie.

Het SCALWEST-model is bedoeld om waterstanden, stroomsnelheden en zoutverdelingen te kunnen berekenen. De afregeling heeft voor gemiddelde omstandigheden plaatsgevonden en de controles zijn o.a. uitgevoerd voor stormomstandigheden. Dit leidt tot de conclusie dat het model qua waterstanden in de Westerschelde een gemiddelde fout van maximaal 0.05 m met een bijbehorende nauwkeurigheid van 0.05 m levert. Voor de Beneden-Zeeschelde is dit resp. 0.10 m en 0.10 m. Verder stroomopwaarts voldoet het model nog niet goed genoeg. De redenen hiervoor zijn het ontbreken van goede bathymetrische en hydrodynamische gegevens.

Op basis van het SCALWEST model is voor het oostelijk deel van de Westerschelde ook een 3D model gebouwd met de naam TRISCAL. Dit model is vooral bedoeld om inzicht te krijgen in de complexe stromingspatronen rond enkele drempelgebieden van de Westerschelde. Het verkregen inzicht is gebruikt bij de formulering van de morfologische processen en mechanismen, die zorgdragen voor de instandhouding van deze drempels binnen het zogenaamde Drempelonderzoek. Tevens is met behulp van TRISCAL een aanzet voor sedimenttransport modellering gemaakt.

Het SCALWEST blijkt bij een zeer diverse toepassingen van groot belang te zijn. Zo is het model gebruikt om bijvoorbeeld basisgegevens voor een abiotische groeirandvoorwaardenkaart aan te leveren (HABIMAP). Verder zijn met het model transportpaden van gestort materiaal bepaald (MER Baggerspeciéstort Westerschelde). Ook is gekeken hoe het model een extreme stormsituatie weergeeft (Crocusstorm 1990).

1 Inleiding

1.1 Aanleiding van de bouw van het SCALWEST model

Met het oog op de uitvoering van de 48'/43'-verdieping van de Westerschelde is in 1996 een plan gemaakt om de mogelijke wijzigingen in de grootschalige waterbeweging in het Schelde-estuarium te kunnen volgen (De Jong e.a., 1996). Als onderdeel van de studie zijn hypothesen opgesteld ten aanzien van de verwachte effecten. De geanalyseerde veranderingen in het estuarium na de eerste verdieping (verdieping '70-'75, o.a. beschreven in Vroon e.a., 1997) waren hierbij het uitgangspunt.

Om veranderingen goed te kunnen inschatten is de toestand van de Westerschelde aan het begin van de verdieping vastgelegd en beschreven (Mol e.a., 1997). Een onderdeel van deze beschrijving wordt gevormd door het hier beschreven SCALWEST-model, waarmee de waterbeweging om basis van de bodemligging in 1996 gereconstrueerd kan worden: de zogenaamde T_0 -schematisatie. Na realisatie van de verdieping zal een nieuwe bodemopname in 1999 gemaakt worden, die moet leiden tot de zogenaamde T_1 -schematisatie. Vervolgens zal de consolidatie-periode na de verdieping vastgelegd worden door nieuwe bodemopnames in 2002 en 2005. Met deze schematisaties kunnen er vergelijkingen gemaakt worden tussen de opgetreden situatie voor, tijdens en na de verdieping van de Westerschelde.

1.2 Uitgangspunten van het SCALWEST model

Het SCALWEST-model is een 2Dh-waterbewegingsmodel gebaseerd op het WAQUA-systeem (SIMONA, 1998). Er bestaan twee varianten van het SCALWEST-model: een grove en een fijne schematisatie. Het fijne model (hierna SCALWEST-fijn genoemd) is bedoeld voor gedetailleerd onderzoek en is een opvolger van het SCALDIS100-model (Dekker e.a., 1994). Het grove model (hierna SCALWEST-grof genoemd) is bedoeld voor directe advisering door middel van een snelle en relatief grove berekening en is als zodanig de opvolger van het SCALDIS400-model (Lieveense, 1994). Het SCALWEST-grof model is ook bedoeld voor het uitvoeren van gevoeligheidsonderzoek ten behoeve van de ontwikkeling van het SCALWEST-fijn model.

Tijdens de ontwikkeling van het SCALWEST model is ook een 3D-waterbewegingsmodel van het oostelijk deel van de Westerschelde gebouwd onder de naam TRISCAL. Dit model is bedoeld om inzicht te krijgen in de dominante 3D processen rond bijvoorbeeld de drempels in de Westerschelde. Mede op basis van dit inzicht zijn de morfologische processen en mechanismen die de vorming van drempels bepalen vastgesteld (Verbeek e.a., 1998^a). Resultaten van het 3D model zijn groot belang als gekeken wordt naar de modellering van sedimenttransport en morfologie (Verbeek, 1996; Verbeek & Langerak, 1998).

Voor de bouw van een nieuw model met een kromlijnij rooster in plaats van het aanpassen van het rechthoekige SCALDIS100 en SCALDIS400 aan de bodem van 1996 zijn de volgende redenen:

- met een kromlijnij rooster kan in de sterk gekromde geulen van de Westerschelde een betere doorstroming bereikt worden, waardoor er ook een betere voorspelling van de waterstanden gemaakt kan worden;
- een kromlijnij rooster biedt de mogelijkheid om te kiezen voor "fijn" waar dat nodig is en "grof" waar dat kan. Dit komt o.a. tot uiting in de stromingsrichting uitgerekte cellen en de verfijning van buitenbocht naar binnenbocht en de verfijning landinwaarts.

Verder is de grens van het model iets meer zeewaarts aangebracht, zodat ook toepassingen voor het mondingsgebied van de Westerschelde mogelijk zijn. Tevens wordt hierdoor aangesloten op de meest westelijke waterstandsstations Westkapelle, Vlake van de Raan en (later) Zeebrugge.

Voor de bouw van de hele serie WAQUA modellen vanaf het Continentale Plat tot in de verschillende estuaria zijn er binnen het RIKZ een aantal uitgangspunten vastgesteld (Van Dijk e.a., 1998). Hierdoor is er meer samenhang ontstaan tussen de verschillende gebiedsmodellen. Deze uitgangspunten zijn:

- het gebruik van een kromlijnij of curvilineair rooster;
- onderlinge sluiting van de modellen met naar de kust toe telkens een verdichting van 1:3.

Voor de Westerschelde leidde dit tot de volgende consequenties:

- het SCALWEST-grof model is onderdeel van het KUSTSTROOK-model;
- het SCALWEST-fijn model is een verdichting van 1:3 van het SCALWEST-grof model.

Aan de rekentijd van het resulterende model zijn de volgende streefwaarden gehangen: het SCALWEST-grof model zou 24 uur binnen 15 minuten kunnen berekenen (1 : 96) en het SCALWEST-fijn model zou 1 : 3 à 4 moeten kunnen halen (op het rekencluster met HP9000-machines). Verder is het model gericht op de grootschalige waterbeweging (stroming in de geulen) in de Westerschelde en de Beneden-Zeeschelde. Er wordt bij de afregeling niet direct gekeken naar de waterbeweging in het intergetijdengebied (Dam e.a., 1999). Tijdens de bouw van het SCALWEST model is vastgesteld dat de bestaande kombergingstak van de Zeeschelde (in het SCALDIS100 model) beter vervangen kan worden door een meer realistische schematisatie van de Zeeschelde met zijrivieren waar de getijwerking van belang is.

1.3 Inhoud van dit rapport

In hoofdstuk 2 wordt de bodemkaart en het rooster van het SCALWEST model gepresenteerd. In hoofdstuk 3 wordt de calibratie onder doottij en springtij omstandigheden weergegeven en hoofdstuk 4 behandelt de verificatie van het SCALWEST model onder gemiddeld tij en storm omstandigheden. Het TRISCAL model wordt gepresenteerd in hoofdstuk 5. Het SCALWEST model is in de afgelopen tijd voor verschillende toepassingen ingezet, waarvan enkele voorbeelden in hoofdstuk 6 genoemd zijn. Tot slot geeft hoofdstuk 7 enkele conclusies en aanbevelingen en staan in hoofdstuk 8 de referenties weergegeven.

2 Modelgeometrie van Westerschelde en Zeeschelde

2.1 De bodemkaart

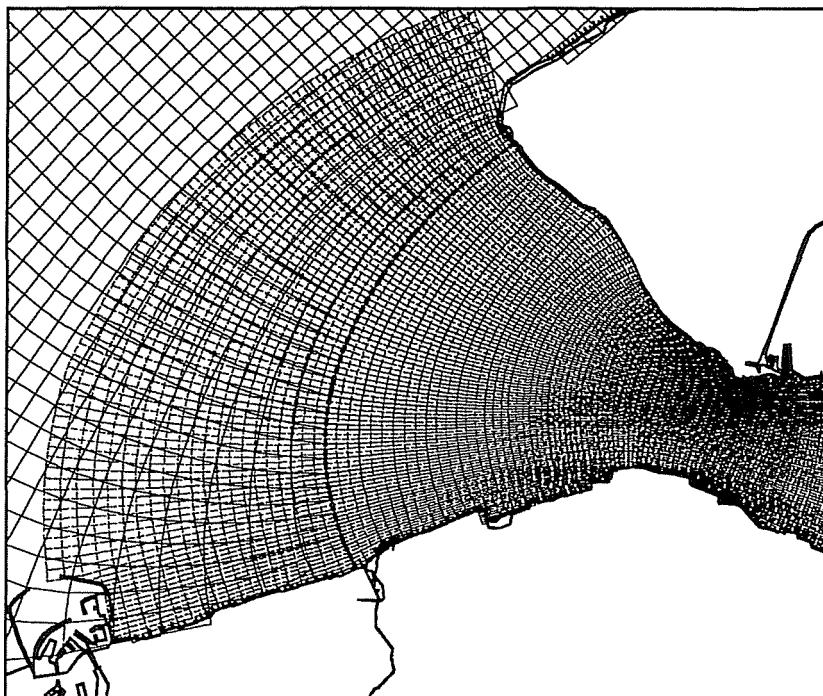
Als onderdeel van de T_0 -inventarisatie (Mol e.a., 1997), die aan de verdieping van de Westerschelde vooraf ging, is een totale bodemopname in 1996 gemaakt door de Meetdienst van directie Zeeland. Naast de standaard vaklodingen is extra aandacht besteed aan de ondiepe en droogvallende delen in het kader van het project Monitoring Verdieping (MOVE).

De vaklodingen zijn samengevoegd in een GIS-bestand van de Westerschelde met een resolutie van 20 x 20 m. Deze kaart, gepresenteerd in Bijlage 1, is de basis van het SCALWEST-model. De bodemgegevens van de Beneden-Zeeschelde zijn digitaal aangeleverd door de Antwerpse Zeehavendienst. Voor de Boven-Zeeschelde en de zijrivieren waren slechts enkele, deels verouderde bodemkaarten beschikbaar gesteld. Hier is deels gebruik gemaakt de bestaande 1D schematisatie, welke naar 2D omgezet is.

2.2 Het modelrooster

Het rooster van het SCALWEST-model sluit aan op het KUSTSTROOK-model, maar moet ook als stand-alone versie kunnen draaien op basis van gemeten waterstanden. Hiervoor zijn de waterstandstations Westkapelle, Vlakte van de Raan (in de monding van de Westerschelde) en Zeebrugge (na 1995) beschikbaar. Dit heeft implicaties voor de constructie van de rand van het model in zowel het SCALWEST model als het KUSTSTROOK model. Voor beide modellen is een nieuw rooster ontworpen (figuur 2.1, Banning, 1997^a).

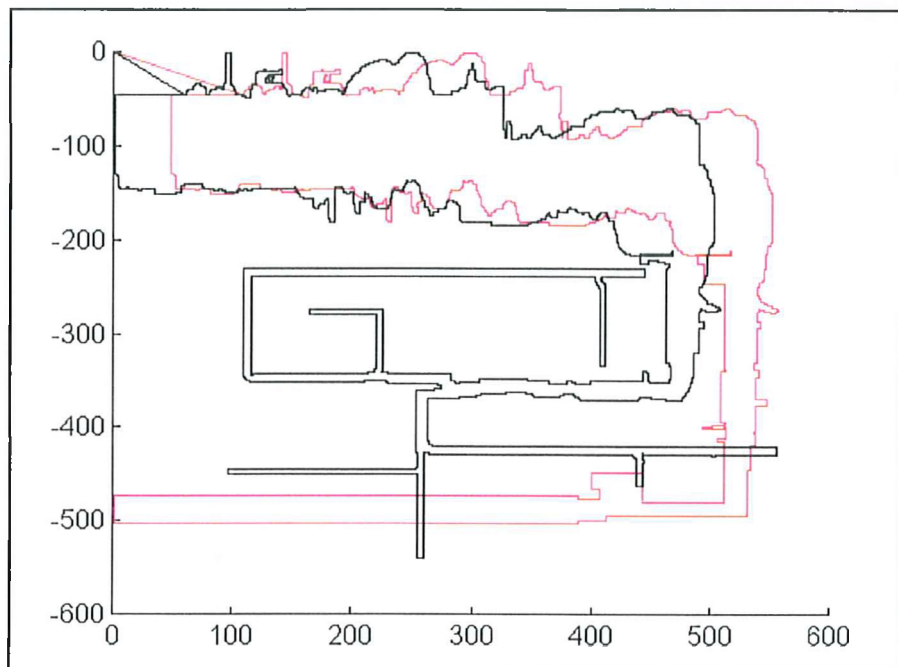
Figuur 2.1 Rooster SCALWEST bij de aansluiting op het KUSTSTROOK model



In het SCALDIS100 model bestond het oostelijke deel (vanaf Bath) reeds uit een kromlijinig rooster. Maar het deel bovenstrooms van Rupelmonde was hierbij als kombergingstak geschematiseerd. In eerste instantie is de Boven-Zeeschelde niet vervangen, maar op verzoek van de opdrachtgever is een meer realistische weergave gekozen. Mede door deze aanvullende vraag is er een geheel nieuw rooster ontworpen (figuur 2.2, Banning, 1998). Bij dit rooster is door het gebruik van omslagpunten geprobeerd de resulterende matrix zo klein mogelijk te houden in verband met geheugengebruik. Wel is de eis opgelegd dat elke riviertak minstens 3 cellen in de dwarsrichting moet hebben om een goede doorstroming te kunnen waarborgen.

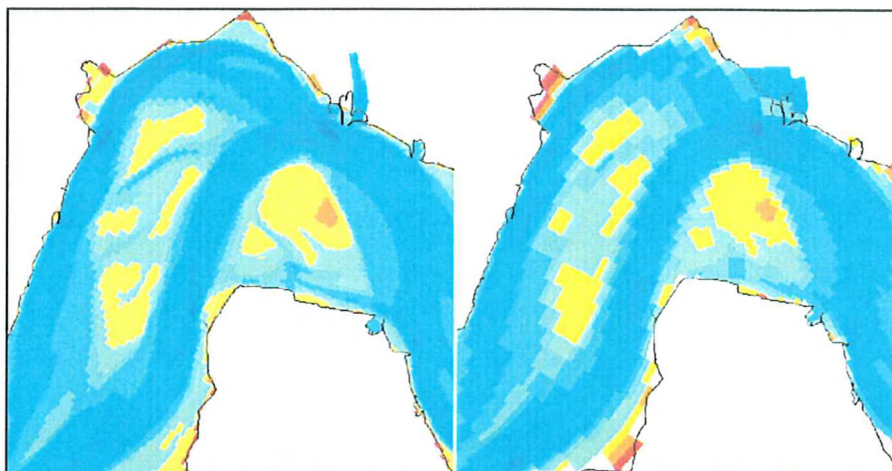
In Bijlage 2 zijn enkele roostereigenschappen (resolutie, Courantgetal, aspect ratio, orthogonaliteit) van het Westerschelde-deel van het SCALWEST model weergegeven. Hierin is duidelijk zichtbaar dat het rooster van zee naar rivier steeds fijnmaziger wordt. Verder valt op dat het rooster met de bochten meebuigt, waardoor de roostereigenschappen variabel zijn in de breedterichting. Het model voldoet grotendeels aan de gestelde voorwaarden.

Figuur 2.2 De Boven-Zeeschelde in het rooster van SCALWEST in de oude (rood) en nieuwe (zwart) situatie



Bij de ontwikkeling van het rooster van de Boven-Zeeschelde en haar zijrivieren zijn grote moeilijkheden opgetreden door het ontbreken van goede digitale bodemgegevens. Uiteindelijk is voor het gedeelte bovenstrooms van Tielrode / Dendermonde gebruik gemaakt van het 1D-model uit 1988 van de Zeeschelde, welke omgezet is in een eenvoudige 2D-schematisatie. De schematisatie is rond de knikpunten in het model aangepast, zodat een goede doorstroming mogelijk werd.

Figuur 2.3 Modelschematisatie SCALWEST-grof en SCALWEST-fijn bij Hansweert



Voor het SCALWEST-grof model is het rooster van het SCALWEST-fijn model met een factor 3 uitgedund. Aangezien de eerder genoemde eis voor de minimum roostereigenschappen ook geldt voor dit rooster is op de Zeeschelde en haar zijrivieren een uitdunning met een factor 2 toegepast (Jansen, 1998^b). Het resultaat voor de modelschematisatie is zichtbaar gemaakt in figuur 2.3 voor het gebied bij Hansweert.

3 Afregelen 2D model

3.1 De eerste afregeling SCALWEST-fijn

In 1997 is het SCALWEST-fijn model afgeregeld zonder dat de Boven-Zeeschelde aangepast was (Jansen, 1997^a). De afregelstrategie hierbij is gebaseerd op een gevoeligheidsonderzoek van de globale modelparameters. Door aanpassing van de bodemruwheid (Manning-waarde) is het uiteindelijke model afgeregeld, zodat de opeenvolgende waterstandsstations gerekend vanuit zee voldoen. Hiervoor wordt gebruik gemaakt van gegevens tijdens een doottij en een springtij met weinig wind. De andere modelparameters worden globaal (voor het hele model) afgeregeld. De gebruikte modelparameters voor deze versie staan in tabel 3.1

Tabel 3.1 modelparameters SCALWEST-fijn na eerste afregeling

aantal roosterpunten	82707 (waarvan 56357 beneden N.A.P.)
tijdstap	0.5 min
viscositeit	1 m ² /s
standaard bodemruwheid	0.022 m ^{-1/3} s (Manning)
kritische droogval	0.15 m
droogvalprocedure	1 (gemiddeld)
zout	Standaard zoutveld bij afvoer van 40 m ³ /s
diffusie	50 m ² /s
randvoorwaarden wind	Hansweert
randvoorwaarden zeerand	Vlakte van de Raan / Oostgat Noord/ Westkapelle

Voor de afregeling zijn een aantal meetperioden in 1996 met weinig wind geselecteerd (tabel 3.2). Naast het vertikaal getij (waterstanden) is ook het horizontaal getij (debieten) geanalyseerd in 3 dwarsraaien.

Tabel 3.2 metingen voor de eerste calibratie van SCALWEST-fijn met bijbehorende getijcoëfficiënt bij Vlissingen (getijcoëfficiënt van 1 is een getijslag van 3.86 m)

	getijcoëfficiënt [-]
27 april 1996: waterstanden	0.71
5 mei 1996: waterstanden	1.23
3/5 juli 1996: debiet bij Vlissingen in raai 9	1.20
30 september/1 oktober 1996: debiet bij Hansweert in raai 5A	1.15
14/15 oktober 1996: debiet bij Bath in raai 3	1.10
gem. doottij	0.78
gem. springtij	1.16

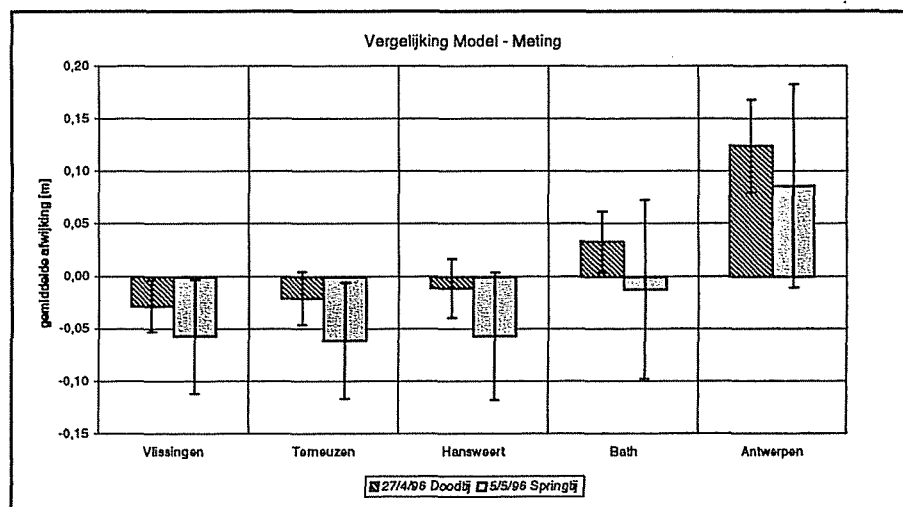
De resultaten van de calibratie op vertikaal getij worden in Bijlage 3 voor enkele stations (Vlissingen, Hansweert, Antwerpen) weergegeven samen met de afwijking (model - meting). In bijlage 4 worden de gecalibreerde debieten voor enkele raaien (raai 9, 5A en 3) weergegeven samen met de afwijking (model - meting). Zoals al aangegeven resulteert de calibratie in aanpassing van de bodem-ruwheid per sectie. In tabel 3.3 is het resultaat hiervan weergegeven. Door het ontbreken van de waterstandsgegevens bovenstrooms Antwerpen zijn hier de waarden uit het SCALDIS100 overgenomen. Deze waarden worden bij de tweede afregeling nader onderzocht en zonodig aangepast.

Tabel 3.3 bodemruwheid na eerste calibratie

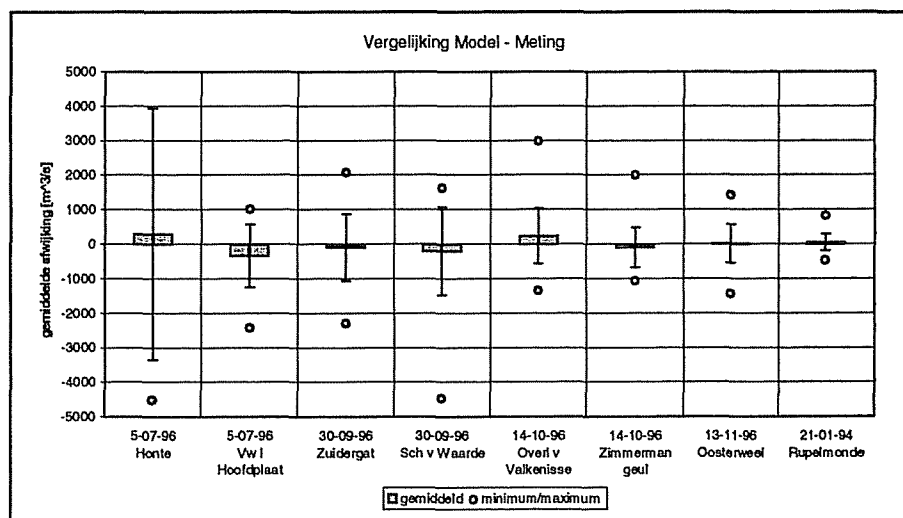
	Manning [$s/m^{1/3}$]	Chezy [$m^{1/2}/s$] (diepte 15 m)
Voordelta - Vlissingen	0.022	71
Vlissingen - Hansweert	0.026	60
Hansweert - Baalhoek	0.0265	59
Baalhoek - Bath	0.025	63
Bath - Prosperpolder	0.022	71
Prosperpolder - Antwerpen	0.020	78
Antwerpen - Rupelmonde	0.0155	101
Rupelmonde - Gent	0.0170	92

De resultaten van de calibratie op getijslag en fasehoek (figuur 3.1) geven aan dat de waterstanden in de Westerschelde met een gemiddelde fout van 5 cm en een nauwkeurigheid van 7 cm bepaald kunnen worden. De resultaten voor de debieten (figuur 4.2) met een gemiddelde fout van 250 m³/s en een nauwkeurigheid van 1000 m³/s bepaald kunnen worden. Hieruit volgt een nauwkeurigheid van de stroomsnelheid van minder dan 0.1 m/s. Uitzondering hierop is de debietmeting in de Honte, waar de tweede ebpiek (zie bijlage 4^a) voor een te grote afwijking zorgt.

Figuur 3.1 resultaten van de eerste calibratie van het verticaal getij (gemiddelde fout en standaard afwijking) voor enkele stations in de Westerschelde



Figuur 3.2 resultaten van de eerste calibratie van het horizontaal getij (gemiddelde fout en standaard afwijking) voor enkele dwarsraaien in de Westerschelde



Door Jansen (1997^a) worden na de eerste afregeling de volgende beperkingen van het SCALWEST-model aangegeven:

- Omdat in het model instabiliteiten bij Westkapelle ontstaan (door een stroming die schuin door een diepe geul loopt) is het model lokaal aangepast. Het stuk tussen het Oostgat (hoekpunt van het rooster) en Westkapelle (aan de kust) is dichtgezet zodat hier geen in- of uitstroming meer mogelijk is. Dit leidt overigens tot een kleiner debiet door het Oostgat.
- Het ontstaan van instabiliteiten bij Terneuzen (door het ontstaan van een neer tijdens kentering van vloed naar eb langs de oever) kunnen weg-gewerkt worden door lokaal de diepteligging in het model aan te passen.
- De instabiliteiten op het traject Perkpolder - Antwerpen (rond havenmonden en bij scherpe bochten in het model) zijn van tijdelijke, kortdurende aard en hebben weinig effect op de globale waterbeweging. Om dit weg te werken is de bodemligging aangepast. Ook kan gewerkt worden met een grotere viscositeit.

3.2 De tweede afregeling SCALWEST-fijn

Na het voltooiën van het rooster voor de Zeeschelde in 1998 is het SCALWEST-fijn model opnieuw afgeregeld, met name voor de Boven-Zeeschelde (Jansen, 1998^b). Ook is de bodem bij Terneuzen aangepast om de lokale instabiliteiten te verhelpen. De modelparameters voor deze versie staan in tabel 3.4. Omdat de Boven-Zeeschelde en de zijrivieren nu expliciet in het model opgenomen zijn, worden de rivierafvoeren nu ook per rivier opgelegd.

Tabel 3.4 modelparameters SCALWEST-fijn na tweede afregeling

aantal roosterpunten	74749
Tijdstap	0.5 min
Viscositeit	1 m ² /s
Waterstand zeerand	Zeebrugge / Vlakte van de Raan / Oostgat Noord
Rivierafvoer	Schelde bij Melle, Dender bij Dendermonde, Zenne bij Zemst, Dijle bij Mechelen, Nete bij Duffel sluis
Spuidebieten	Antwerpse Havendokken, Spuisluizen Bath, Sluizen Terneuzen

Bij de waterstandsrandvoorwaarde is het stuk tussen Oostgat Noord en Westkapelle dichtgezet om lokale rondstromingen te onderdrukken. Verder is de mogelijkheid om gebruik te maken van de waterstand bij Zeebrugge toegevoegd (overigens is dit niet uitgevoerd, in verband met onbetrouwbare waterstandsgegevens). Het model is nu met name voor het Belgische deel qua waterstand en debiet afgeregeld (tabel 3.5). Tevens is gekeken of de verbeteringen bij Terneuzen goed uitgevoerd zijn.

Tabel 3.5 metingen voor de tweede calibratie van SCALWEST-fijn met bijbehorende getijcoëfficiënt bij Vlissingen

	getijcoëfficiënt [-]
1/2 augustus 1996: instabiliteit Terneuzen	1.3
6 juni 1995: waterstand Zeeschelde bij doodtij	0.8
12/13 juni 1995: waterstand Zeeschelde bij springtij	1.2
21 januari 1994: debiet Rupelmonde	1.1
13 november 1996: debiet Oosterweel	1.2
14/15 oktober 1996: debiet Bath (raai 3)	1.1
gem. doodtij	0.78
gem. springtij	1.16

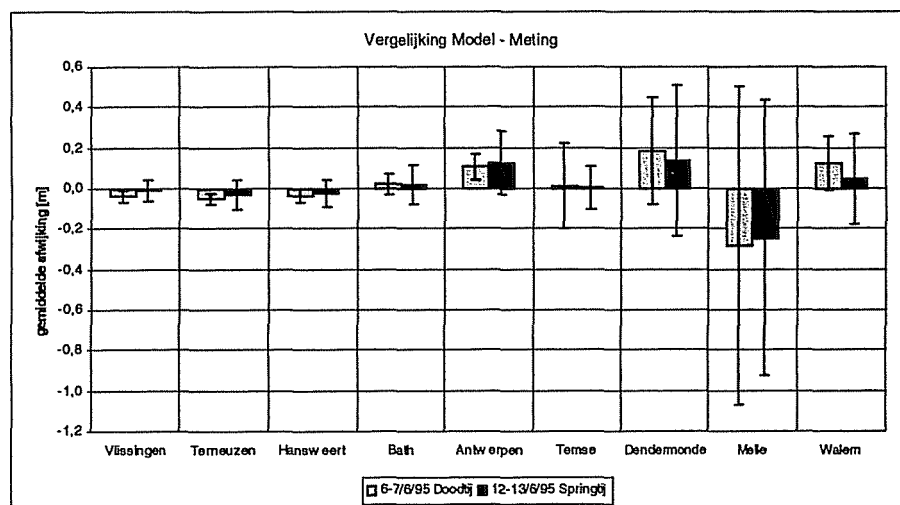
In Bijlage 5 worden de waterstanden tijdens doodtij en springtij op de Zeeschelde bij Antwerpen weergegeven en in Bijlage 6 gebeurt hetzelfde voor springtij bij Temse, Walem, Dendermonde en Melle. In Bijlage 7 wordt het debiet bij Rupelmonde en Oosterweel gepresenteerd. Uit de calibratie volgt een aanpassing van de bodemruwheid, met name in de Zeeschelde (tabel 3.6).

Tabel 3.6 bodemruwheid na tweede calibratie

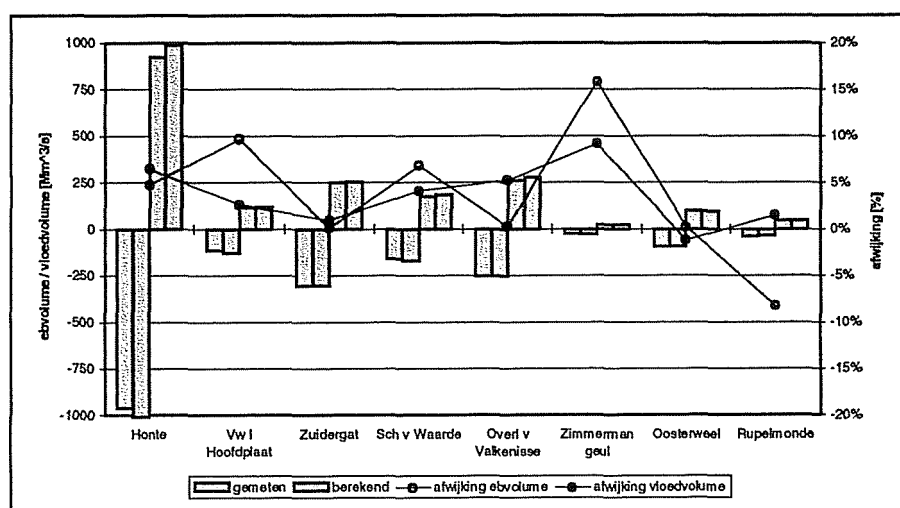
	Manning [$m^{-1/3}s$]	Chezy [$m^{1/2}/s$] (diepte 15 m)
Voordelta - Vlissingen	0.022	71
Vlissingen - Hansweert	0.026	60
Hansweert - Baalhoek	0.0265	59
Baalhoek - Bath	0.0252	62
Bath - Prosperpolder	0.024	65
Prosperpolder - Antwerpen	0.024	65
Antwerpen - Rupelmonde	0.024	65
Rupelmonde - Dendermonde	0.022	71
Dendermonde - Gent	0.0253	62
Rupel / Zenne / Dijle / Nete	0.024	65

De resultaten van de calibratie (figuur 3.3) geven aan dat de waterstand op de Zeeschelde tot Temse met een gemiddelde fout van 0.1 m en een nauwkeurigheid van 0.2 m bepaald kan worden. Opvallend hierbij is de grote afwijkingen bij Dendermonde en Melle. Door onvoldoende gegevens is het niet mogelijk gebleken dit te verbeteren. De debieten (figuur 3.2) zijn op 2 plaatsen in de Beneden-Zeeschelde bepaald en wel op sterk uiteenliggende data. Deze vergelijking is kwalitatief goed, maar kan niet goed in kwantitatieve zin voor de gehele Zeeschelde van toepassing verklaard worden. De komberging blijkt goed te voldoen, wat van belang is voor de getijvoortplanting.

Figuur 3.3 resultaten van de tweede calibratie van het verticaal getij (gemiddelde fout en standaard afwijking) voor enkele stations in de Westerschelde en Zeeschelde



Figuur 3.4 eb- enloedvolumina voor verschillende doorsneden in Westerschelde en Zeeschelde met de relatieve afwijking [%]



Voor het hele model zijn een aantal eb- en vloedvolumina vergeleken met de gemeten waarden (figuur 3.4). Bij deze vergelijking is ook de relatieve afwijking bepaald. Hieruit blijkt dat voor de hoofdgeul de afwijking minder dan 5% is (wat de nauwkeurigheid van de metingen is) en dat in de nevengeulen incidenteel (met name de Zimmermangeul) een waarde boven de 10% gevonden kan worden.

3.3 afregeling SCALWEST-grof

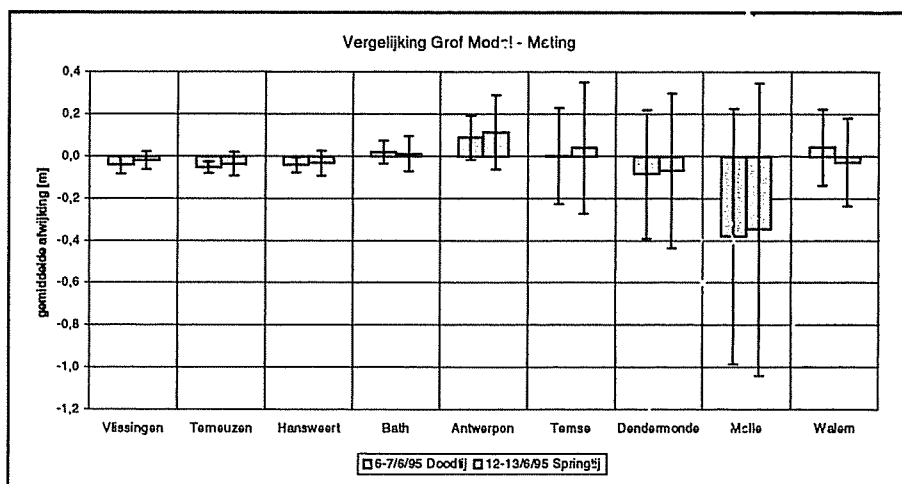
Het SCALWEST-grof model is een uitgedunde versie van het SCALWEST-fijn model. De 2 modellen zijn wel overeenkomstig qua bodemgegevens en randvoorwaarden. Voor het SCALWEST-grof model is door Jansen (1998^b) het Westerschelde-deel tot Antwerpen afgeregeld. Voor de calibratie is gebruik gemaakt van het getij op 4-6 mei 1996, waarmee ook het SCALWEST-fijn model is afgeregeld (zie beschrijving 3.1).

Tabel 3.7 modelparameters SCALWEST-grof

aantal roosterpunten	9357
tijdstap	1.0 min
viscositeit	5 m ² /s
standaard bodemruwheid	0.024 m ^{-1/3} s (Manning)
kritische droogval	0.15 m
droogvalprocedure	1 (gemiddeld)
randvoorwaarden zeerand	Vlakte van de Raan / Oostgat Noord/ Westkapelle

Later is het SCALWEST-grof model opnieuw afgeregeld, nadat het Zeeschelde deel gereed gekomen is. In Bijlage 8 staan de waterstanden voor enkele stations (Vlissingen, Hansweert, Antwerpen, Temse) voorgegeven. In figuur 3.5 wordt de gemiddelde afwijking en nauwkeurigheid getoond. Dit blijkt nagenoeg overeenkomstig te zijn met het SCALWEST-fijn model (zie figuur 3.3). Het verschil is dat Antwerpen beter geworden is en dat het bovenstrooms Rupelmonde slechter is.

Figuur 3.5 resultaten van de calibratie van het verticaal getij in SCALWEST-grof (gemiddelde fout en standaard afwijking) voor enkele stations



4 Verificatie 2D modellen

4.1 SCALWEST-fijn model

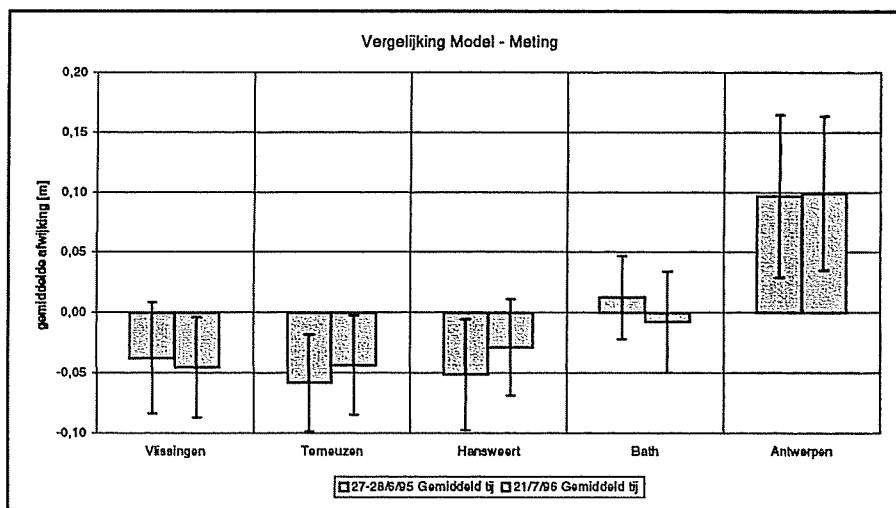
Het SCALWEST-fijn model is geverifieerd aan de hand van 2 situaties: een gemiddeld tij (getijcoëfficiënt van 1.0) en bij storm. In tabel 4.1 staan de verschillende situaties beschreven.

Tabel 4.1 metingen voor de verificatie van SCALWEST-fijn met bijbehorende getijcoëfficiënt bij Vlissingen

	getijcoëfficiënt [-]
20/21 juli 1996: waterstand bij gemiddeld tij Westerschelde	1.02
27/28 juni 1995: waterstand bij gemiddeld tij Zeeschelde	1.02
4/5 mei 1996: controle n.a.v. instabiliteit bij Terneuzen	1.23
28/29 augustus 1996: waterstand bij storm	1.22
28/29 oktober 1996: waterstand bij storm	1.14
gem. doottij	0.78
gem. springtij	1.16

Voor de verificatie bij gemiddeld tij is gebruik gemaakt van de situatie op 27/28 juni 1995 en op 20/21 juli 1996. Deze getij-omstandigheden gingen gepaard met weinig wind. De resultaten (figuur 4.1) geven dezelfde gemiddelde afwijkingen en nauwkeurigheden te zien zoals bij de calibratie reeds bepaald is.

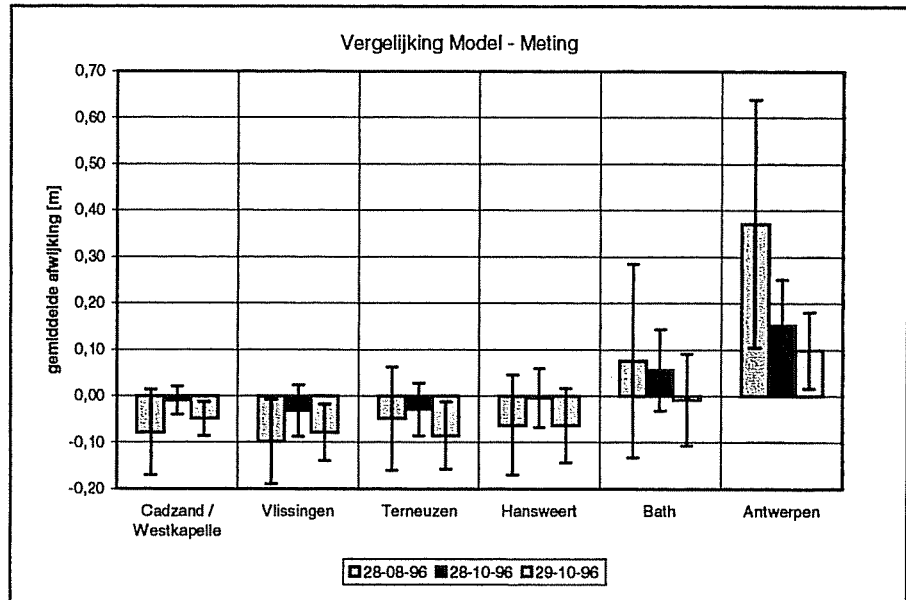
Figuur 4.1 resultaten van de verificatie van het verticaal getij tijdens gemiddeld tij (gemiddelde fout en standaard afwijking)



De verificatie bij storm is gedaan aan de hand van twee stormen op 28/29 augustus 1996 (een ruimtelijk sterk variabele storm) en 28/29 oktober 1996 (een ruimtelijk homogene storm). De windgegevens van deze stormperiodes staan gepresenteerd in Bijlage 9. Voor de Zeeschelde bovenstrooms Antwerpen zijn geen metingen beschikbaar. Voor dit deel van het model is slechts gekeken of de waterbeweging geen grote instabiliteiten vertoond. Dit bleek niet het geval te zijn.

In figuur 4.2 is het resultaat voor augustus en oktober 1996 weergegeven en in Bijlage 10 staat het verloop van de waterstand tijdens de storm in oktober 1996 weergegeven voor verschillende stations. Opvallend is hierbij de grote afwijking bij Antwerpen bij de augustus-storm. Deze verificatie is uitgevoerd bij een sterk variabele wind, zowel ruimtelijk als temporeel. De windinvoer met 10-minuten waarden op één station is hierbij niet voldoende gebleken. Dit kan verbeterd worden door gebruik te maken van een ruimtelijk variabele invoer van de wind, zoals aangetoond in Dam (1998).

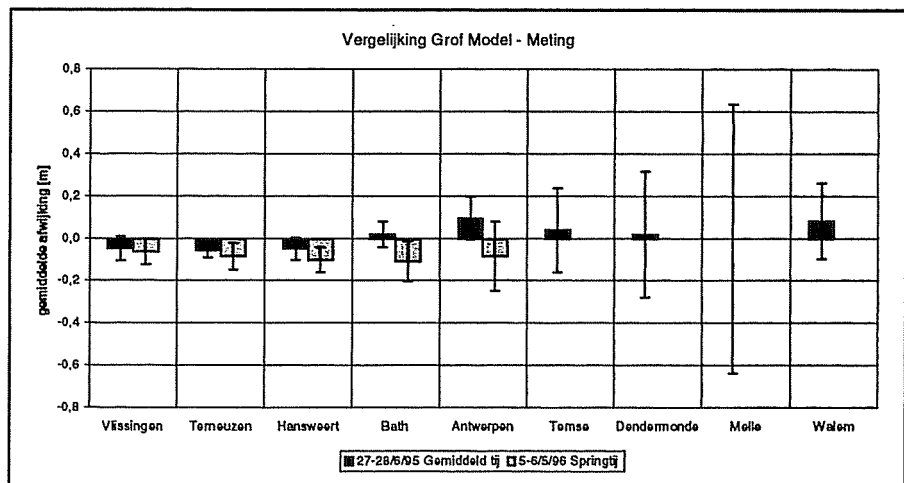
Figuur 4.2 resultaten van de verificatie van het verticaal getij tijdens storm (gemiddelde fout en standaard afwijking)



4.2 SCALWEST-grof model

Voor het SCALWEST-grof model is alleen een verificatie uitgevoerd bij gemiddeld tij. In figuur 4.3 is het resultaat hiervan weergegeven, waaruit blijkt dat bij gemiddeld tij ongeveer vergelijkbare afwijkingen optreden als bij springtij of doodtij.

Figuur 4.3 resultaten van de verificatie van het verticaal getij bij gemiddeld tij van SCALWEST-grof (gemiddelde fout en standaard afwijking)



Bij springtij en doodtij zijn ook verificatie gegevens bekend. In het project NAUTILUS is uitgebreider naar gekeken naar de effecten van storm op de waterstanden in de Westerschelde.

5 Validatie 3D model

5.1 Aanleiding van de bouw van het 3D model TRISCAL

Het ontwikkelen van een 3D versie van het gehele SCALWEST-model bleek te stuiten op een groot aantal praktische bezwaren (geheugenruimte, rekentijd, data-opslag). Omdat de interesse (zie hoofdstuk 6) met name in het oostelijk deel van de Westerschelde ligt is een detailmodel gemaakt. Hiervoor is eerst een uitsnede uit het SCALWEST-model gemaakt. Deze uitsnede beslaat het oostelijk deel van de Westerschelde tussen Baarland en Prosperpolder. In tabel 5.1 zijn de modelparameters weergegeven.

Tabel 5.1 Modelparameters 2Dh-uitsnede en TRISCAL

aantal roosterpunten	2Dh: 31838 3D: 62540 (volledige matrix van 265*236)
Tijdstap	0.5 min
Viscositeit	1 m ² /s
Wind	Hansweert
kritische droogval	0.15 m (variaties tot 0.75 m)
randvoorwaarden rivierrand	debiet op raai Hedwigepolder - Nieuw Westlandpolder
randvoorwaarden zeerand	waterstand op raai Baarland - Platen van Hulst

5.2 De betrouwbaarheid van het 3D model

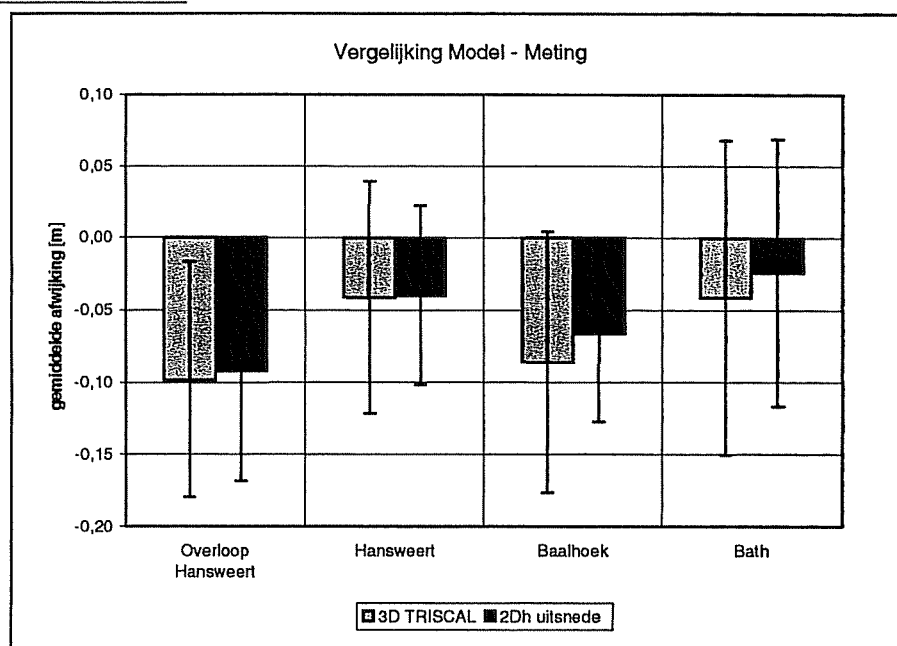
Om de betrouwbaarheid van het 3D model te kunnen beoordelen zijn 2 vergelijkingen gemaakt: (a) de onderlinge vergelijking tussen SCALWEST en TRISCAL en (b) de vergelijking met stroommetingen in het horizontale en verticale vlak (tabel 5.2)

Tabel 5.2 metingen voor de verificatie van TRISCAL met bijbehorende getijcoëfficiënt bij Vlissingen

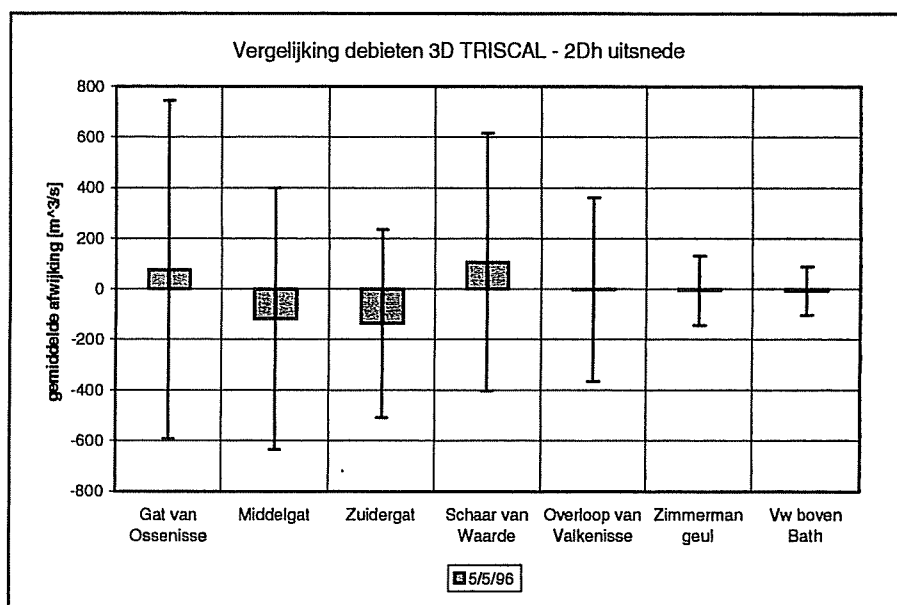
	getijcoëfficiënt [-]
26 april 1996	0.72
4/5 mei 1996	1.23
28/29 september 1996 (HF-radar metingen)	1.29
16/17 juni 1996 (ADCP-metingen)	1.20
gem. doodtij	0.78
gem. springtij	1.16

Voor de onderlinge vergelijking wordt in bijlage 11 het verschil in de waterstand tussen TRISCAL en het 2Dh uitsnede model getoond voor verschillende stations in het oostelijk deel van de Westerschelde. Bijlage 12 toont de vergelijking tussen de debieten door het Zuidergat en de Schaar van Waarde voor beide modellen. Figuur 5.1 toont de nauwkeurigheid van het verticaal getij in het TRISCAL model, waaruit blijkt dat deze vergelijkbaar is met het 2Dh-uitsnede model. Het horizontaal getij kent een afwijking van maximaal 100 m³/s en een nauwkeurigheid van 100-400 m³/s (figuur 5.2)

Figuur 5.1 Resultaten voor de controle van het verticaal getij in TRISCAL en 2Dh uitsnede model ten opzichte van metingen



Figuur 5.2 Resultaten voor de controle van het horizontaal getij in TRISCAL en 2Dh uitsnede model ten opzichte van elkaar



Het 3D-model is bij uitstek geschikt om realistische stroombeelden te produceren. Als voorbeeld wordt het stroompatroon in bovenste, middelste en onderste laag rond Hansweert wordt getoond in Bijlage 13. De betrouwbaarheid van deze stroomvelden zijn vergeleken met HF-radar metingen (Dam, 1997; Jansen, 1997^b) en ADCP-metingen (Jansen, 1998^a). Met behulp van ADCP-metingen kan een goede vergelijking voor het drempelgebied van Hansweert gemaakt worden. De hieruit afgeleide dieptegemiddelde stroomsnelheden staan gepresenteerd in Bijlage 14. Op een paar uitschieters na komt dit zowel qua stroomrichting als qua stroomsnelheid overeen.

6 Toepassingen

6.1 Waterbeweging

Er zijn in de afgelopen 2 jaar meerdere voorbeelden van de toepassing van het SCALWEST model ten aanzien van de waterbeweging uitgewerkt. Voor zowel de toepassing binnen vragen op het gebied van de hydrodynamica als meer in de richting van de koppeling met de ecologie zijn voorbeelden te melden. Hier wordt slechts een selectie gepresenteerd.

Een voorbeeld van de toepassing van het SCALWEST model ten behoeve van een vraag op het gebied van de hydrodynamica is in bijlage 15 een weergave te zien van de stroomrozen in het mondingsgebied van de Westerschelde. In dit figuur is het verschil tussen de bidirectionele stroming in de hoofdgeulen zoals de Wielingen en het Oostgat en de ronddraaiende stroming op de Vlakte van de Raan. Bij dit laatste is er ook amper sprake van een kentering.

Voor de toepassing binnen het drempelonderzoek (Verbeek e.a., 1998^a) was er behoefte aan inzicht in de stromingspatronen rond de Drempel van Hansweert. In bijlage 16 is het stromingspatroon rond maximum eb- en maximum vloed-stroming zichtbaar gemaakt. Op basis van deze beelden is goed te zien dat de eb met name via het Zuidergat komt en over het westelijke deel van de drempel stroomt, terwijl de vloed ook deels de Schaar van Waarde pakt en meer over het oostelijk deel van de drempel stroomt. Deze ontwijkende stroming is als één van de bepalende mechanismen in de drempelontwikkeling geïdentificeerd.

De toepassing in de richting van de ecologie zijn niet in dit werkdocument gepresenteerd, maar zijn zeker vermeldingswaardig. In Schaap & Touwen (1998) zijn ten behoeve van het project HABIMAP resultaten van het SCALWEST model ingevoerd in het GIS-systeem. Binnen HABIMAP kunnen hierdoor meerdere abiotische gegevens gekombineerd worden om een groei- en randvoorwaardenkaart te maken van (delen van) de Westerschelde. Hiervoor zijn met name de maximale stroomsnelheid (bij eb en vloed) en het reststroomveld (over een volledige doottij - springtij cyclus) opgenomen.

6.2 Zoutbeweging

Met behulp van het SCALWEST model is een initieel zoutveld gemaakt en dit is gepresenteerd in bijlage 17. Dit zoutveld is gemaakt vanuit een koude start, waarbij het noodzakelijk is om een periode van ongeveer een maand door te rekenen alvorens het zouttransport in het model is ingespeeld. Daarom is voor de beide SCALWEST modellen een initieel zoutveld vervaardigd. Dit zoutveld beschrijft de saliniteitsverdeling rond hoogwater bij een Scheldeafvoer van 40 m³/s. Het oorspronkelijke zoutveld is vervaardigd op basis van een simulatie met het E-WESTII model (Lievense, 1994).

6.3 Sedimenttransportberekeningen

6.3.1 Opzet berekening sedimenttransport

Voor de berekening van het sedimenttransport op basis van de SCALWEST-modellen is gebruik gemaakt van een offline-koppeling tussen WAQUA en MATLAB. De resultaten van de waterbeweging uit WAQUA zijn als stromingsvelden per half uur weggeschreven, welke ingelezen kunnen worden in MATLAB. Daarna is met MATLAB een eerste benadering van het sedimenttransport gemaakt (de zogenaamde initiële benadering).

Hiervoor zijn de volgende aannames gedaan:

- de sedimentverdeling over de verticale richting is overeenkomstig het Rouse-profiel. Dit houdt in dat er een balans is tussen valsnelheid en de turbulente uitwisseling.
- de horizontale advectie en diffusie worden verwaarloosd

De aannames voor de berekening van het sedimenttransport waren:

- bodemhellingseffecten worden niet meegenomen
- het sediment is niet-cohesief en uniform van grootte ($d_{50} = 240 \mu\text{m}$)
- bestortingen, pleisterlagen en veenbanken worden niet meegenomen

Als onderdeel van deze studie zijn door Wouters (1998) en door Jansen (1998^a) de verschillen tussen de 2Dh-waterbeweging (berekend met SCALWEST-fijn) en de 3D-waterbeweging (berekend met TRISCAL) geanalyseerd. Hierbij wordt onderscheid gemaakt tussen de primaire stroming (diepte-gemiddelde stroming op basis van het logaritmisch stromingsprofiel) en de secundaire stroming in dwars- en langsrichting. Dit onderscheid is van belang voor de analyse van de sedimenttransport patronen (Verbeek e.a., 1998^b).

Voor de berekening wordt het sedimenttransport gesplitst in bodemtransport en suspensie transport op basis van de formuleringen van Van Rijn (1984^a, 1984^b). Het bodemtransport Q_b [m^2/s] wordt weergegeven met:

$$Q_b = 0.1\sqrt{(s-1)g} (d_{50})^{1.5} D_*^{0.3} T^{1.5} \quad \text{voor } T \geq 3$$

Het suspensietransport wordt berekend op basis van een Rouse concentratie profiel, wat gebaseerd is op een parabolisch verloop van de diffusiecoëfficiënt. Volgens van Rijn (1993) is dit profiel:

$$C(z) = C_a \left(\frac{h-z}{z} \frac{a}{h-a} \right)^z$$

Het suspensiegetal Z is in hierin een maat voor de "volheid" van het concentratieprofiel. Een hoge waarde voor Z hoort bij een profiel met veel suspensie nabij de bodem en een lage waarde voor Z hoort bij een goed verdeelde suspensief. De waarde voor de referentieconcentratie C_a op hoogte a (hier wordt 0.2 m aangenomen) komt uit Van Rijn (1984^b):

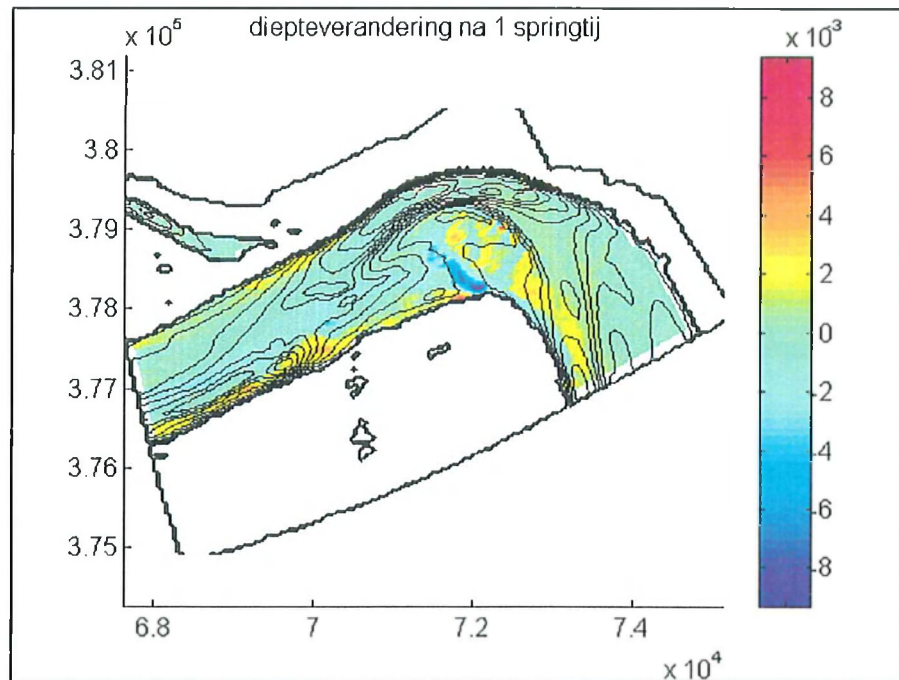
$$C_a = 0.015 \frac{d_{50}}{a} \frac{T^{1.5}}{D_*^{0.3}}$$

Met behulp van deze formules kan het initieel sedimenttransport op basis van de resultaten van SCALWEST / TRISCAL uitgerekend worden.

6.3.2 Toepassing Drempel van Valkenisse

Een eerste toepassing van de initiële sedimenttransport is gedaan voor de Drempel van Valkenisse (Wouters, 1998). Hierbij is uiteindelijk een eerste morfologische tijdstap uitgerekend, welke in figuur 6.1 gepresenteerd staat. Dit toont aan dat de aanzanding vooral op de Plaat van Saeftinghe en langs de rand hiervan plaatsvindt. Verder is er onregelmatig erosie/sedimentatie patroon op de overgang van het Nauw van Bath naar het Zuidergat zichtbaar, dat veroorzaakt wordt door de beperkingen van de initiële sedimenttransport berekeningen (geen morfologische terugkoppeling meegenomen).

Figuur 6.1 De berekende bodemverandering na 1 springtij (in m) berekend op basis van de initiële sedimenttransportberekening voor de Drempel van Valkenisse



6.3.3 Toepassing Drempel van Hansweert

Op basis van de uitkomsten van de studie naar de Drempel van Valkenisse is de berekeningsmethodiek verbeterd en uitgewerkt. De tweede toepassing is toen gemaakt voor de Drempel van Hansweert (Jansen, 1998^a; Verbeek e.a., 1998^b). Bij deze studie is met name gekeken naar de aanzanding op basis van de primaire en secundaire stroming. In bijlage 18 zijn de volledige (3D) berekening op basis van de resultaten van het TRISCAL-model (bijlage 18^a) en de individuele bijdragen van de secundaire stroming in dwars- en langsrichting (bijlage 18^b en 18^c) getoond. Hieruit blijkt dat de sedimenttransporten op basis van beide secundaire stroomcomponenten in belangrijke mate bijdrage aan de aanzanding van de drempel.

6.4 Extreme waterstanden

Niet alleen bij gemiddelde waterstanden, maar ook bij extreme waterstanden kan het SCALWEST model ingezet worden. Door Dam (1998) is de Crocus-stormvloedperiode uit 1990 doorgerekend om te zien hoe deze extreme situatie door het model werd weergegeven. Het bleek dat de hoogwaterstanden vrijwel altijd te laag berekend werden, zoals te zien is in bijlage 19. Dit was een belangrijke ontdekking, omdat op basis van modeluitkomsten de ontwerpeisen voor de dijken opgesteld worden. Bij het onderzoek is gekeken naar de mogelijke foutenbronnen, zoals de invoer van een variabel windveld (in tijd en ruimte), de verbeterde randvoorwaarden op

zee en de invloed van de ruwheid van de verschillende strata (geulen, intergetijdengebied, supragetijdengebied). In het kader van het project NAUTILUS is het onderzoek naar de extreme waterstanden verder opgepakt.

Een tweede toepassing met extreme waterstanden is door Schaap (1998) uitgewerkt voor een gecontroleerd overstromingsgebied ter hoogte van de Nederlands/Belgische grens (de Hedwigepolder). Hierbij is in het model een verbinding gemaakt van de rivier en de polder met behulp van een verlaagde overstromingsdijk en een uitlateringsluis (zie bijlage 20a). Met behulp van een aangepaste SCALWEST model is het vullen en het legen van deze polder berekend, waarbij gekeken is naar de verlaging van de waterstand op de rivier. De uitkomsten van de berekening is een waterstandsverlaging van 5,6 cm over het traject Bath - Antwerpen. Op deze wijze draagt een gecontroleerd overstromingsgebied bij aan de verbetering van de veiligheid in het Belgische deel van het estuarium.

7 Conclusies en aanbevelingen

7.1 Conclusies

Met de hier gepresenteerde SCALWEST-modellen blijkt het goed mogelijk om de bestaande SCALDIS100 en SCALDIS400 modellen te vervangen, waarbij de betrouwbaarheid en nauwkeurigheid verbeterd zijn. Dit komt met name door de toepassing van de kromlijnige bodemschematisatie en de geometrisch correcte wijze waarop de Boven-Zeeschelde en de zijrivieren zijn opgenomen.

Voor het onderzoek is het TRISCAL-model voor het oostelijk deel van de Westerschelde opgezet. Dit model is van groot belang bij het inzicht in de morfologische processen rond de drempels van de Westerschelde. De aanzet tot sedimenttransport modellering heeft ondertussen geleid tot een ander bruikbaar instrument. Het bleek namelijk niet goed mogelijk om binnen het SIMONA-instrumentarium een sedimenttransport model op te zetten. Daarom is in samenwerking met het WL een ander traject opgezet, waarbij gebruik gemaakt wordt van DELFT3D-mor.

De SCALWEST-modellen blijken voor verschillende toepassing van groot belang te zijn. Zo zijn er voorbeelden getoond voor:

- het kustonderzoek aan de Westerscheldemonding;
- het veiligheidsonderzoek door het aantakken van overstromingspolders rond de Belgisch/Nederlandse grens;
- het drempelonderzoek ter verkrijging van meer inzicht in de morfologische processen.

7.2 Aanbevelingen

Dit rapport toont nog enige gebreken aan de SCALWEST-modellen. Het belangrijkste probleem is het niet-beschikbaar zijn van een betrouwbare bodemligging van de Boven-Zeeschelde en de getij-ge domineerde zijrivieren. Hiervoor zijn betere en recente metingen nodig (in een digitaal format) op basis waarvan de afregeling sterk kan verbeteren. Mogelijk kan dit meegenomen worden bij de ontwikkeling van de T₁-schematisatie, welke na de 48'/43'-verdieping gebouwd moet worden.

Daarnaast is aangetoond dat het huidige SCALWEST-model niet goed voor extreme omstandigheden ingezet kan worden. Ondertussen is in het project NAUTILUS dit probleem opgepakt, door met name de introductie van een ruimtelijk variabel windveld en een betere afregelingsroutine.

8 Referenties

G.K.F.M. van Banning (1997), *Roostergeneratie Westerschelde, Kuststrook en Zuidelijke Noordzee*, deel 1: Roostergeneratie Westerschelde, Alkyon Hydraulic Consultants, rapport A100, februari 1997.

G.K.F.M. van Banning (1998), *Roostergeneratie Zeeschelde*, Alkyon Hydraulic Consultants & Research, rapport A100, januari 1998.

G. Dam (1997), *De vergelijking van HF-rada met andere stromingsgegevens*, stageverslag, Rijkswaterstaat, Rijksinstituut voor Kust en Zee, werkdocument RIKZ/OS-97.820x, juli 1997

G. Dam (1998), *De afregelprocedure van het SCALWEST-model onder stormvloedomstandigheden*, afstudeeronderzoek, Rijkswaterstaat, Rijksinstituut voor Kust en Zee, werkdocument RIKZ/OS-98.894x, december 1998.

G. Dam & M.H.P. Jansen (1999), *Het SCALWEST model in het intergetijden-gebied, een eerste verkenning naar afwijkingen tussen model en veldmetingen*, Ingenieursbureau Svašek, rapport 99321/1115, juli 1999.

L. Dekker, P. Lievense & c. van der Male (1994), *Calibratie en verificatie SCALDIS100*, Rijkswaterstaat, Rijksinstituut voor Kust en Zee, werkdocument RIKZ/AB-94.839x, oktober 1994.

R.P. van Dijk, R. Plieger & M.J. Soerdjballi (1998), *Rekenroosters van RWS basismodellen van Oceaan tot Nederlandse binnenwateren*, Rijkswaterstaat, Rijksinstituut voor Kust en Zee, werkdocument RIKZ/OS-98.140x, april 1998.

M.H.P. Jansen(1997^a), *Bouw, calibratie en verificatie SCALWEST, t.b.v. project Verdieping*, rapportage activiteit A, Ingenieursbureau Svašek, rapport 97210/1011, mei 1997.

M.H.P. Jansen(1997^b), *Bouw en validatie TRICSCAL, 3D model van de Westerschelde, t.b.v. project Verdieping*, rapportage activiteit B, Ingenieursbureau Svašek, rapport 97420/1011, mei 1997.

M.H.P. Jansen(1998^a), *Validatie TRICSCAL en aanzet sedimenttransport, t.b.v. project Verdieping*, rapportage activiteit C, Ingenieursbureau Svašek, rapport 97509/1011, januari 1998.

M.H.P. Jansen (1998^b), *Afbouw SCALWEST-modellen, t.b.v. project Verdieping*, rapportage activiteit D, Ingenieursbureau Svašek, rapport 98165/1047, juli 1998.

J. de Jong, G. Krijger, L. Nijse & S. Huijs (1996), *Beoordelling van de effecten van de verdieping 48' - 43'*, plan van aanpak - rapport 2, Project MOnitoring VErdieping Westerschelde, Rijkswaterstaat, Directie Zeeland

P. Lievense(1994), *Waterbewegingsmodel SCALDIS400*, Rijkswaterstaat, directie Zeeland, rapport AX 94.072, december 1994.

G. Mol, A.M. van Berchem & G.M. Krijger (1997), *De toestand van de Westerschelde aan het begin van de verdieping 48'/43'*, beschrijving van trends in de fysische, biologische en chemische toestand, Rijkswaterstaat, Rijksinstituut voor Kust en Zee, rapport RIKZ-97.049.

L.C. van Rijn (1984^a), *Sediment transport, Part I: bed load transport*, Journal of Hydraulic Engineering, 110, 10, 1431-1456.

L.C. van Rijn (1984^b), *Sediment transport, Part II: suspended load transport*, Journal of Hydraulic Engineering, 110, 11, 1613-1641.

L.C. van Rijn (1993), *Principles of sediment transport in rivers, estuaries and coastal seas*, Aqua Publications, Amsterdam.

M. Schaap (1998), *Hedwigepolder ingericht als gecontroleerd overstromingsgebied*, een verkennende studie, afstudeerrapport, Rijkswaterstaat, Rijksinstituut voor Kust en Zee, werkdocument RIKZ\OS-98.882x, september 1998.

M. Schaap & I.J. Touwen (1998), *Ruimtelijke variatie van hydrodynamische parameters van belang voor de verspreiding van macrobenthos in de Westerschelde*, Rijkswaterstaat, Rijksinstituut voor Kust en Zee, werkdocument RIKZ/OS-98.831x, mei 1998.

SIMONA (1998), *Technical documentation WAQUA*, SIMONA-report 98-01, Rijkswaterstaat, Rijksinstituut voor Kust en Zee & WL I delft hydraulics.

H. Verbeek (1996), *Morfologisch onderzoek van de Westerschelde, een zoektocht naar de mogelijkheden*, Rijkswaterstaat, Rijksinstituut voor Kust en Zee, werkdocument RIKZ/OS-96.814x, mei 1996.

H. Verbeek, F.T.G. Tank & M.D. Groenewoud (1998^a), *Drempels in de Westerschelde, natuur en mens samen aan het werk*, Rijkswaterstaat, Rijksinstituut voor Kust en Zee, rapport RIKZ-98.011.

H. Verbeek & A. Langerak (1998), *Modellen voor het morfologisch onderzoek van de Westerschelde*, Rijkswaterstaat, Rijksinstituut voor Kust en Zee, werkdocument RIKZ/OS-98.804x, december 1998.

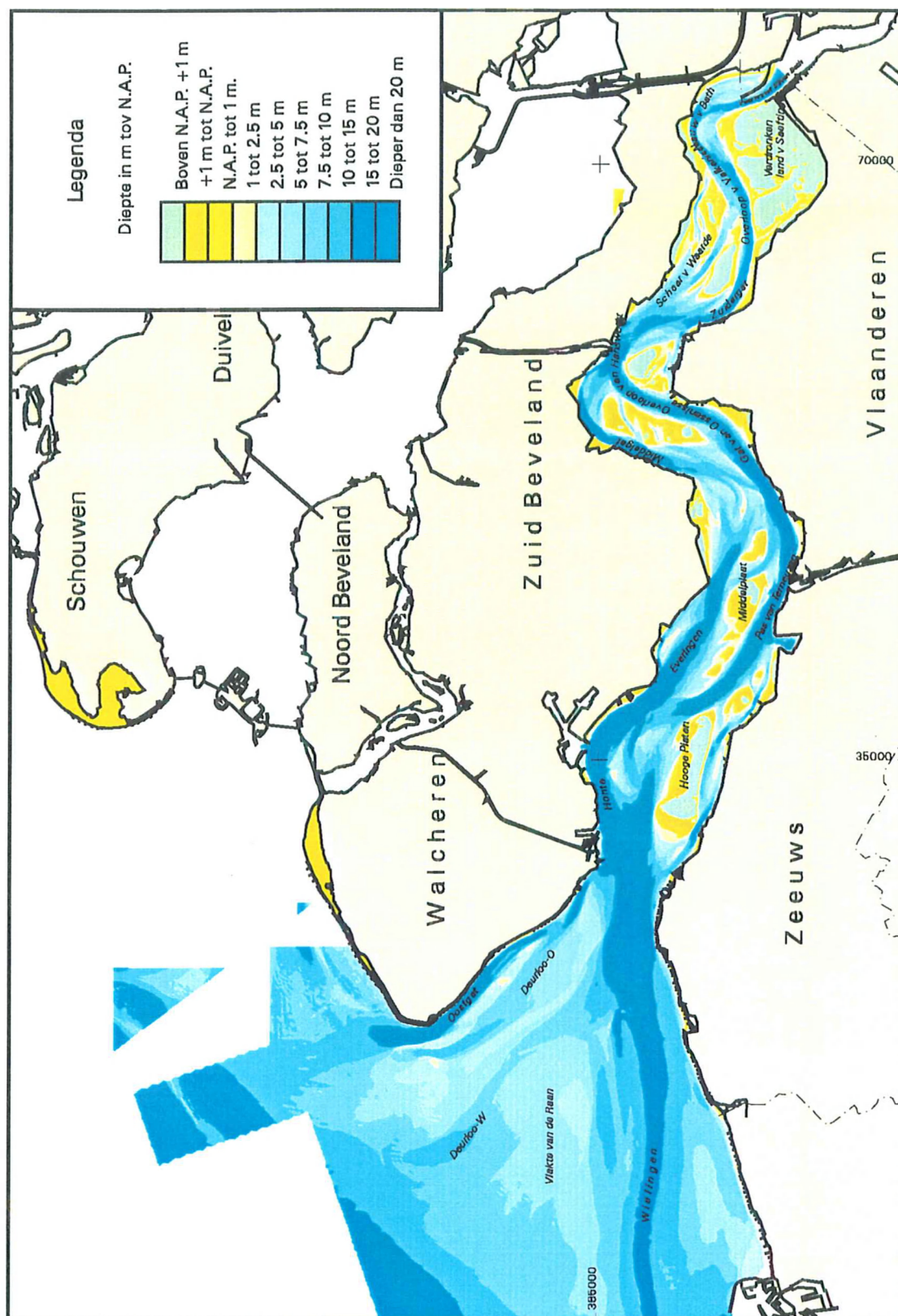
H. Verbeek, M.H.P. Jansen & C.A.H. Wouters (1998^b), *Adaptation of 2D sediment transport patterns using 3D hydrodynamic modelling*, Oceans'98, IEEE/OES conference, Nice, 5pp.

J.H. Vroon, C. Storm & J. Coosen (1997), *Westerschelde, stram of struis*, eindrapport van het Project Oostwest, een studie naar de beïnvloeding van fysische en verwante biologische patronen in een estuarium, Rijkswaterstaat, Rijksinstituut voor Kust en Zee, rapport RIKZ-97.023.

C.A.H. Wouters (1998), *Drempel van Valkenisse*, afstudeeronderzoek naar mechanismen die bijdragen aan de vorming van de Drempel van Valkenisse, Rijkswaterstaat, Rijksinstituut voor Kust en Zee, werkdocument RIKZ/OS-98.805x, februari 1998.

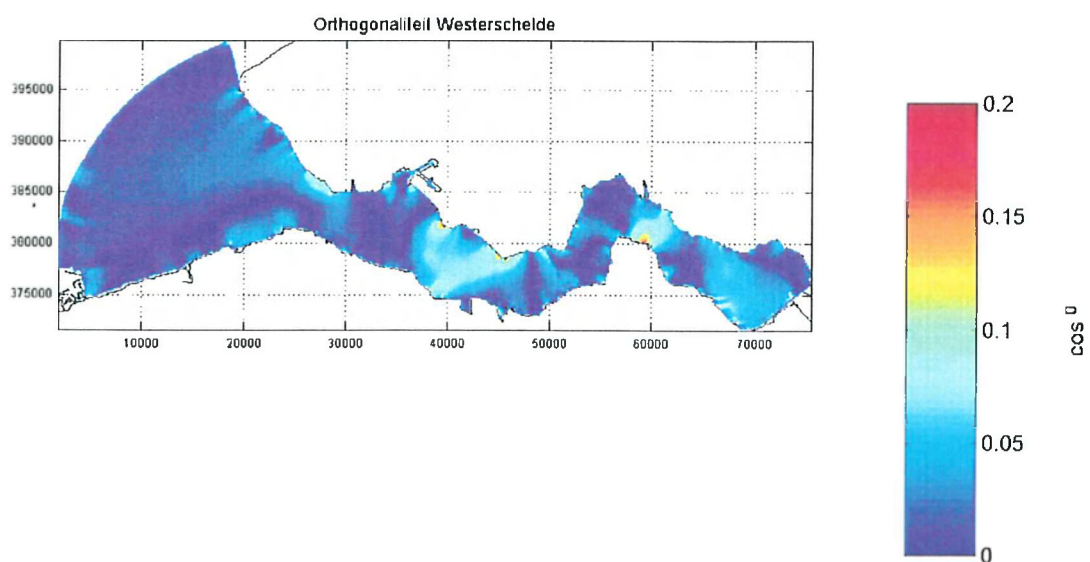
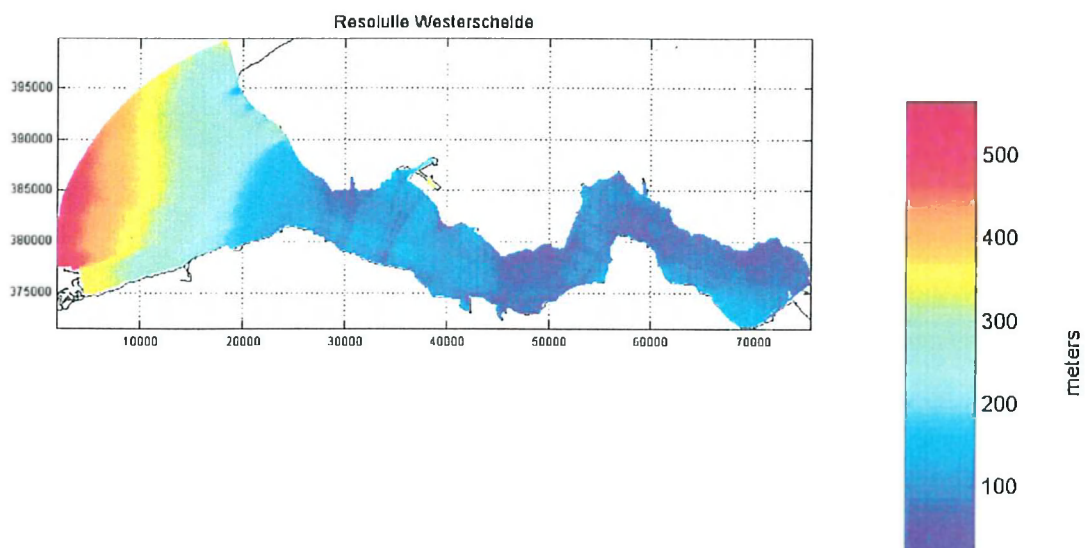
9 Lijst met bijlagen

1. Bodemkaart 1996 van de Westerschelde
2. Roostereigenschappen van SCALWEST-fijn (a) resolutie en orthogonaliteit en (b) aspect ratio en Courant-getal
3. Eerste afregeling SCALWEST-fijn: waterstanden bij (a) Vlissingen / (b) Hansweert / (c) Antwerpen tijdens springtij (5 mei 1996) en doortij (27 april 1996)
4. Eerste afregeling SCALWEST-fijn: debieten bij (a) raai 9: Honte en Vaarwater langs Hoofdplaat op 3 en 5 juli 1996 / (b) raai 5A: Zuidergat en Schaar van Waarde op 30 augustus en 1 oktober 1996 / (c) raai 3: Overloop van Valkenisse en Zimmermangeul op 14 en 15 oktober 1996
5. Tweede afregeling SCALWEST-fijn, waterstanden bij Antwerpen tijdens springtij (12-13 juni 1995) en doortij (6-7 juni 1995)
6. Tweede afregeling SCALWEST-fijn, waterstanden bij (a) Temse en Walem / (b) Dendermonde en Melle tijdens springtij (12-13 juni 1995)
7. Tweede afregeling SCALWEST-fijn, debieten bij Oosterweel op 13 november 1996 en bij Rupelmonde op 21 april 1994
8. Afregeling SCALWEST-grof, waterstanden bij (a) Vlissingen en Hansweert / (b) Antwerpen en Temse tijdens springtij (12 en 13 juni 1995)
9. Windgegevens Westerschelde gemeten bij Vlake van de Raan en Hansweert in augustus 1996 en oktober 1996
10. Verificatie SCALWEST-fijn, waterstanden tijdens storm op 28 en 29 oktober 1998 bij (a) Westkapelle en Vlissingen en (b) Hansweert en Antwerpen
11. Vergelijking TRISCAL (3D) en uitsnede SCALWEST (2Dh), waterstand bij Hansweert en Bath tijdens springtij op 5 mei 1996
12. Vergelijking TRISCAL (3D) en uitsnede SCALWEST (2Dh), debiet in Zuidergat en Schaar van Waarde tijdens springtij op 5 mei 1996
13. Stroombeelden in de bovenste, middelste en onderste laag tijdens (a) maximum vloed en (b) maximum eb
14. Verticaal gemiddelde stroomsnelheid voor ADCP-metingen en TRISCAL-berekeningen tijdens maximum vloed en maximum eb voor (a) raai B en (b) raai C bij Hansweert
15. Toepassing: stroomrozen in de Westerscheldemonding bij springtij
16. Toepassing: maximale stroomsnelheden bij Hansweert tijdens eb en vloed
17. Toepassing: zoutverdeling bij een gemiddelde rivierafvoer
18. Toepassing: initieel sedimenttransport voor de Drempel van Hansweert door (a) 3D suspensief transport, (b) transport ten gevolge van de secundaire dwarsstroming en (c) transport ten gevolge van de secundaire langsstroming voor de eb- en vloedsituatie
19. Toepassing: waterstand tijdens extreme stormvloed op 27 en 28 februari en 1 maart 1990 bij (a) Westkapelle en Vlissingen / (b) Hansweert en Antwerpen
20. Toepassing: vullen en legen van een gecontroleerd overstromingsgebied bij de Nederlands/Belgische grens met (a) bodemschematisatie van het overstromingsgebied en het vullen van de polder en (b) de kentering van de stroming en het legen van de polder

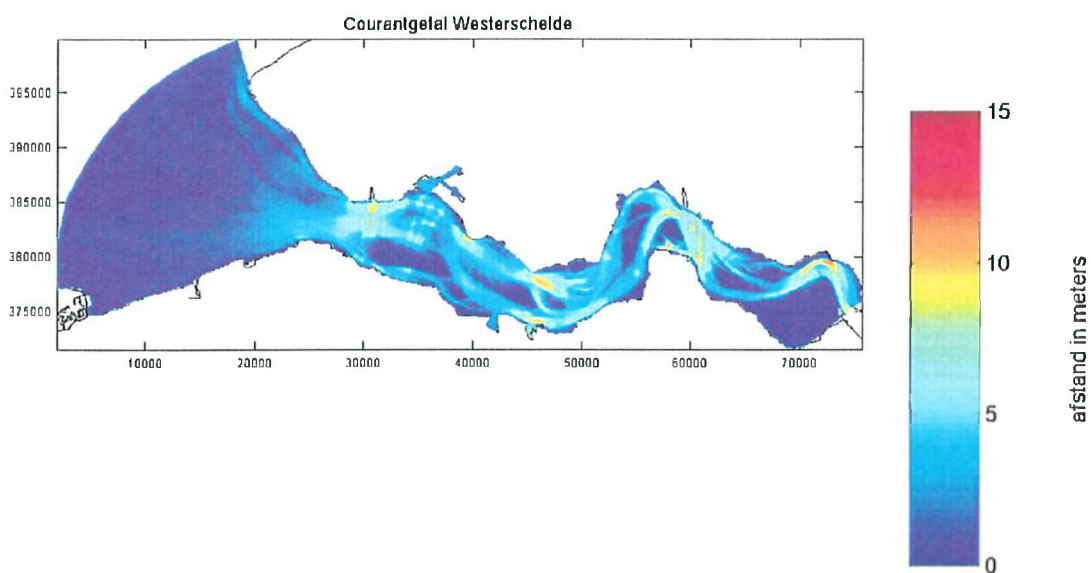
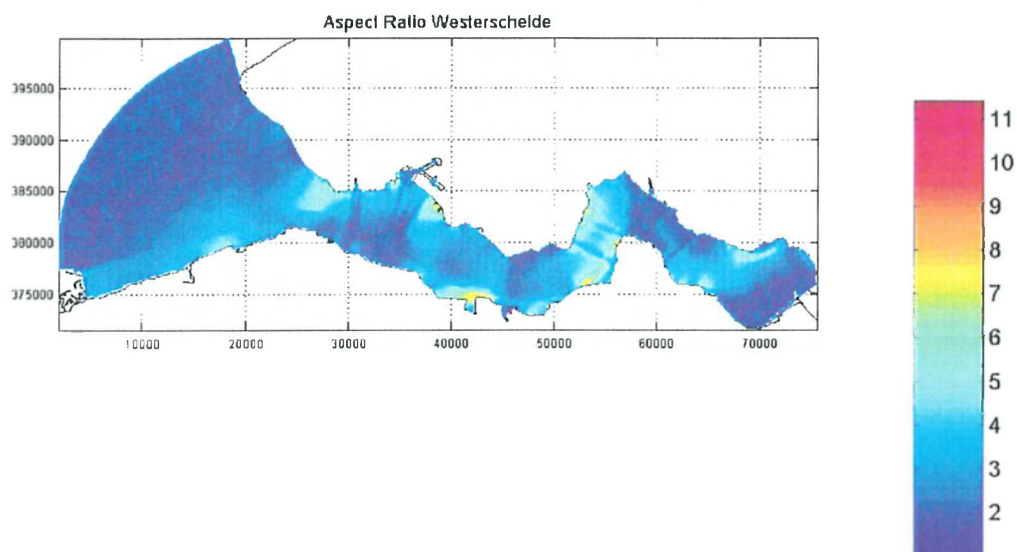


Bijlage 2. Roostereigenschappen van SCALWEST-fijn

(a) Resolutie en orthogonaliteit van het SCALWEST model (resolutie = wortel(oppervlak) [m]; orthogonaliteit = $\cos(\text{hoek rooster})$ [-])



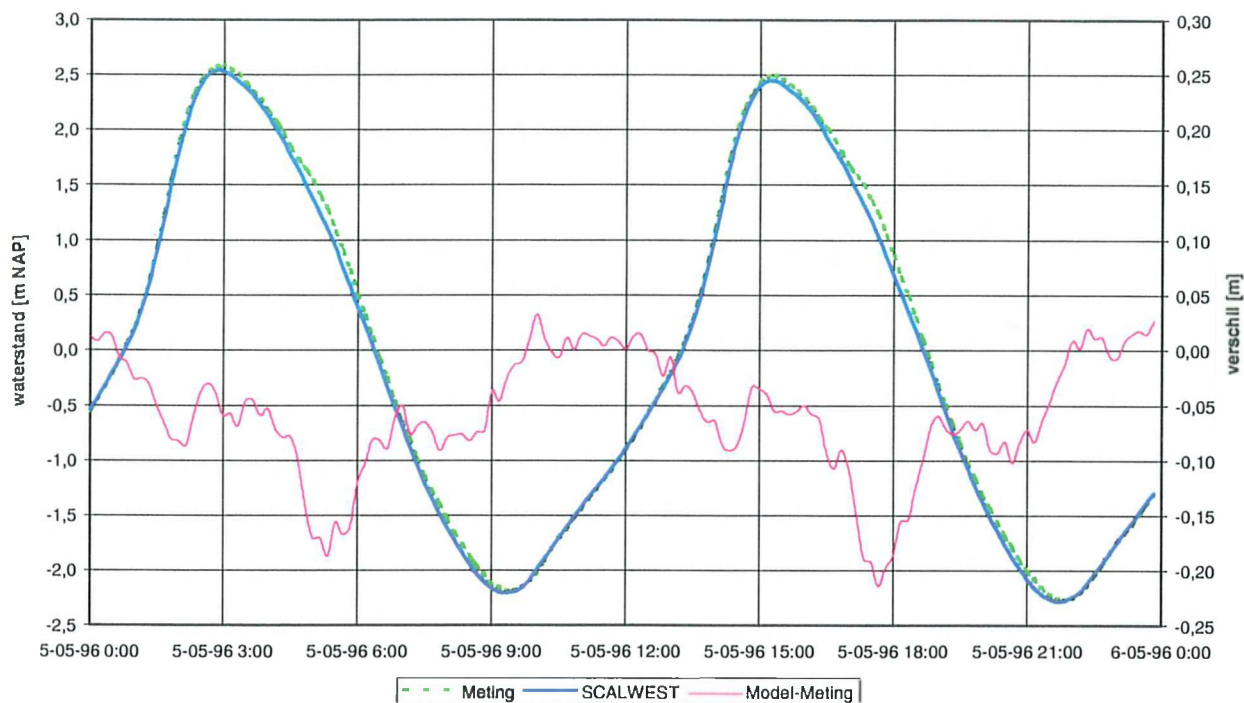
(b) Aspect ratio en Courant getal van het SCALWEST model (aspect ratio = lengte cel / breedte cel [-]; Courant getal = $2\Delta t \sqrt{2gh/\Delta x \Delta y}$ [-])



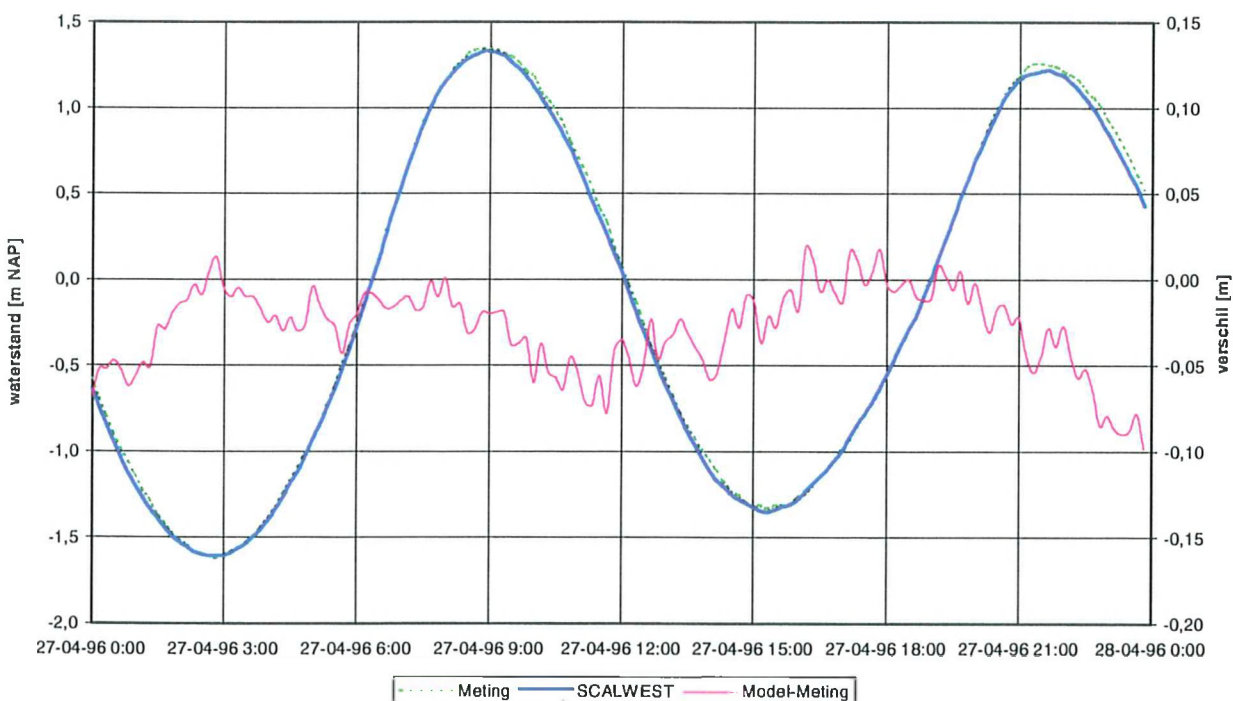
Bijlage 3. Eerste afregeling SCALWEST-fijn: waterstanden

(a) Waterstand bij Vlissingen tijdens springtij (5 mei 1996) en doottij (27 april 1996)

Springtij - Vlissingen

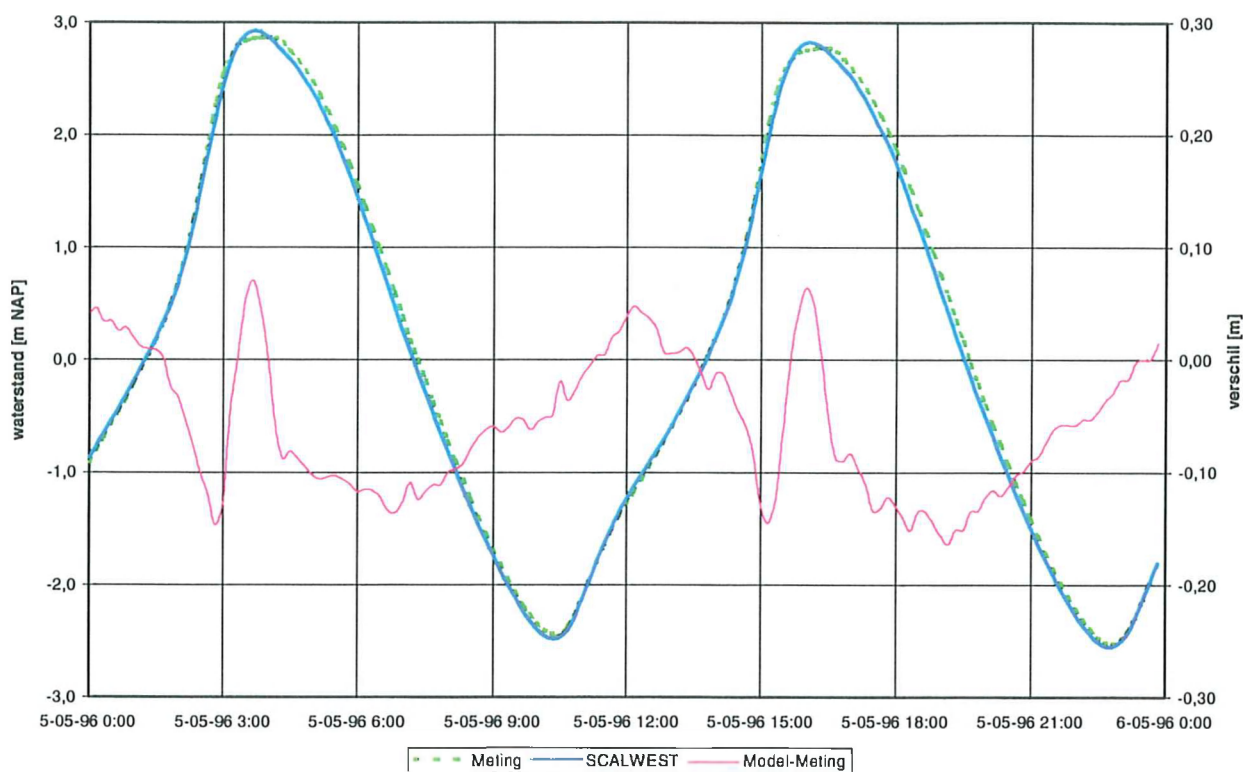


Doodtij - Vlissingen

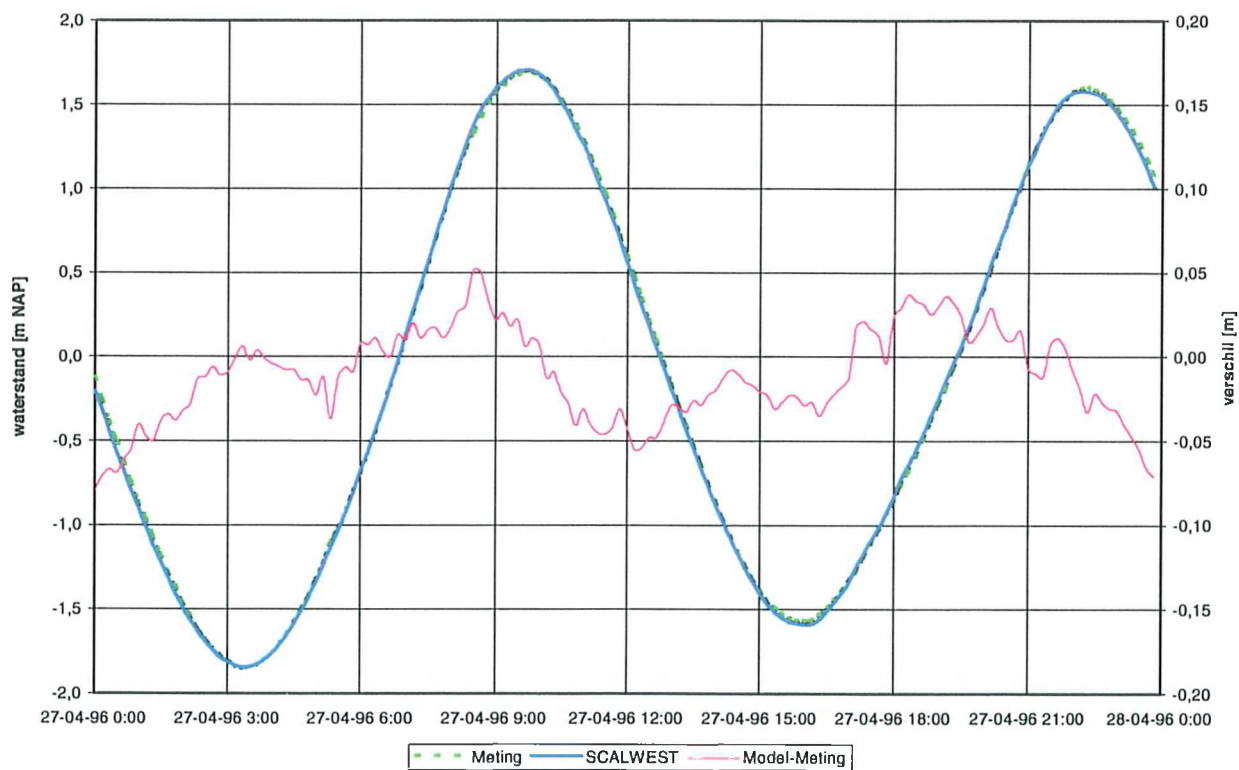


(b) Waterstand bij Hansweert tijdens springtij (5 mei 1996) en doodtij (27 april 1996)

Springtij - Hansweert

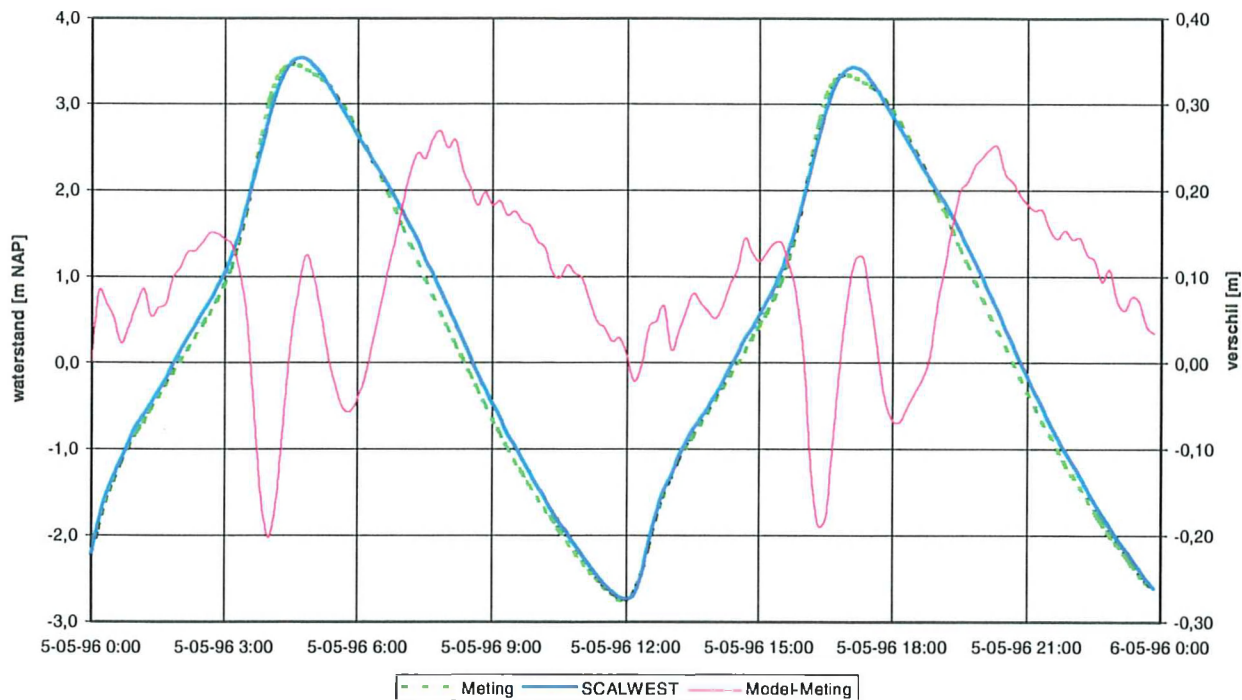


Doodtij - Hansweert

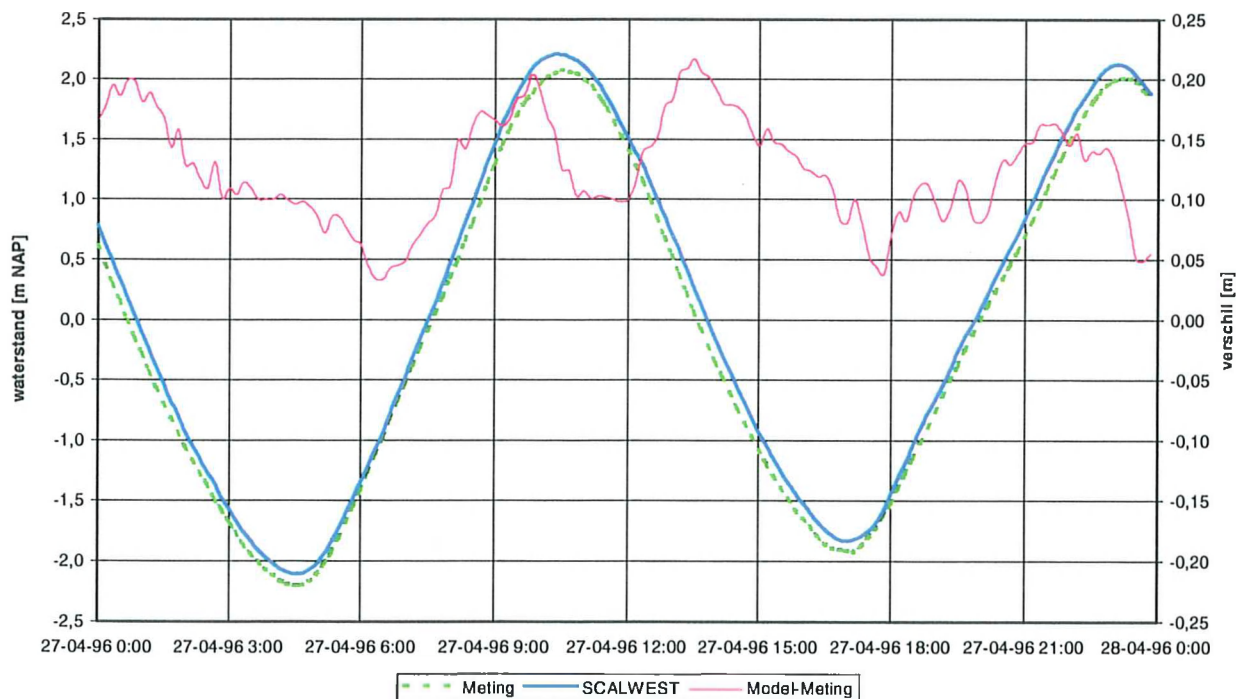


(c) Waterstand bij Antwerpen tijdens springtij (5 mei 1996) en doottij (27 april 1996)

Springtij - Antwerpen



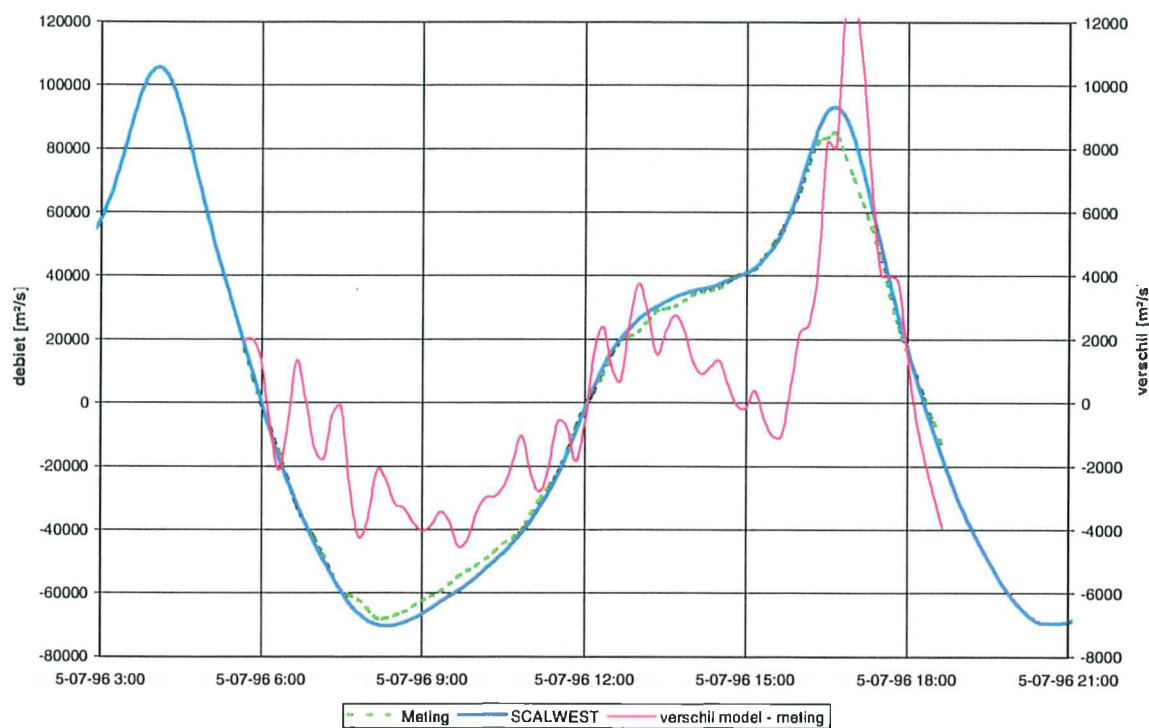
Doodtij - Antwerpen



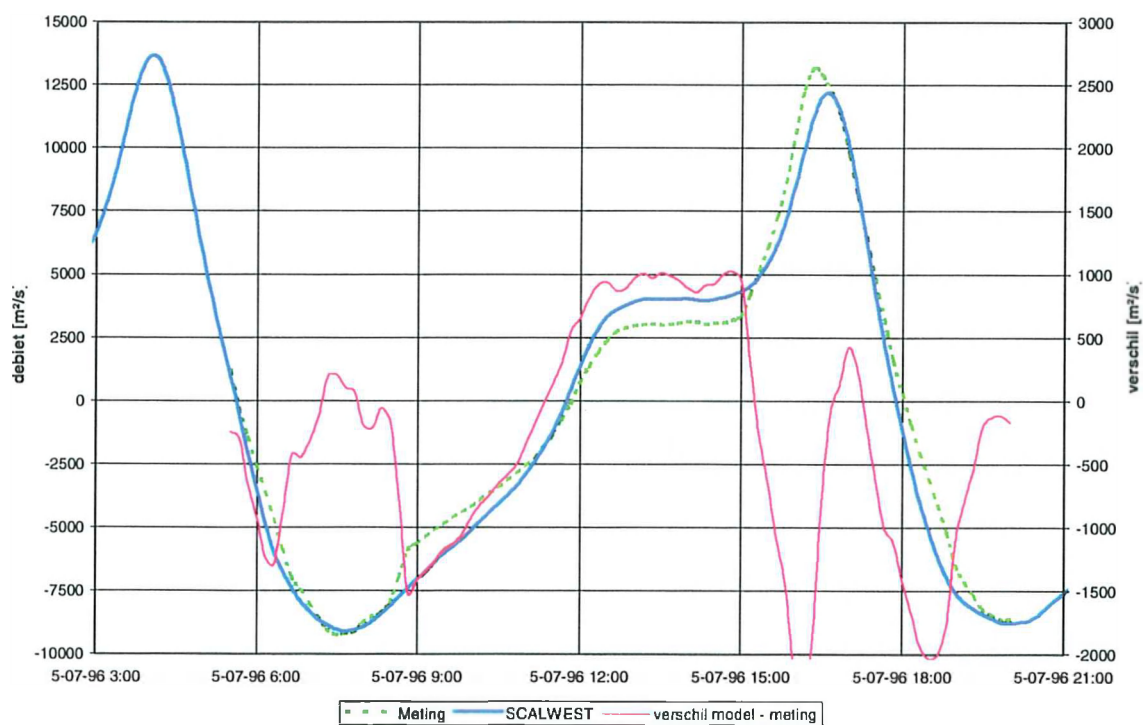
Bijlage 4. Eerste afregeling SCALWEST-fijn: debieten

(a) debieten bij raai 9: Honte en Vaarwater langs Hoofdplaat op 3 en 5 juli 1996

Debiet - Honte

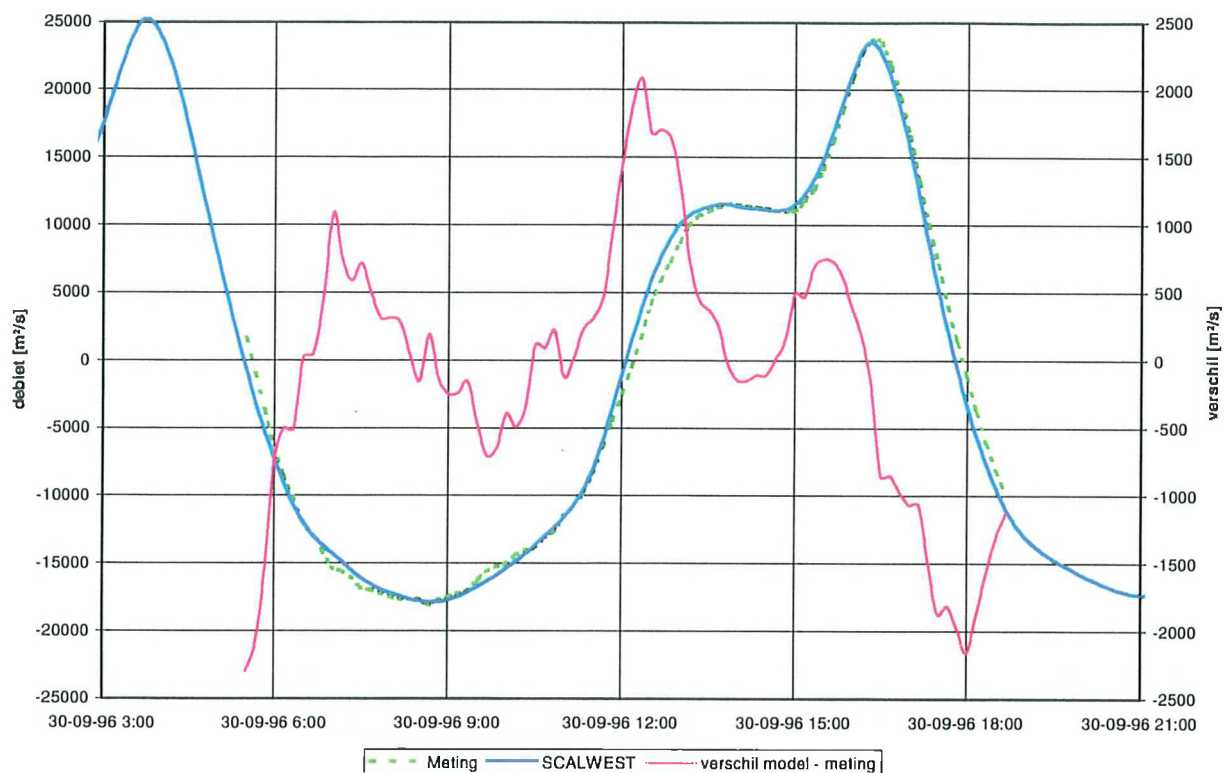


Debiet - Vaarwater langs Hoofdplaat

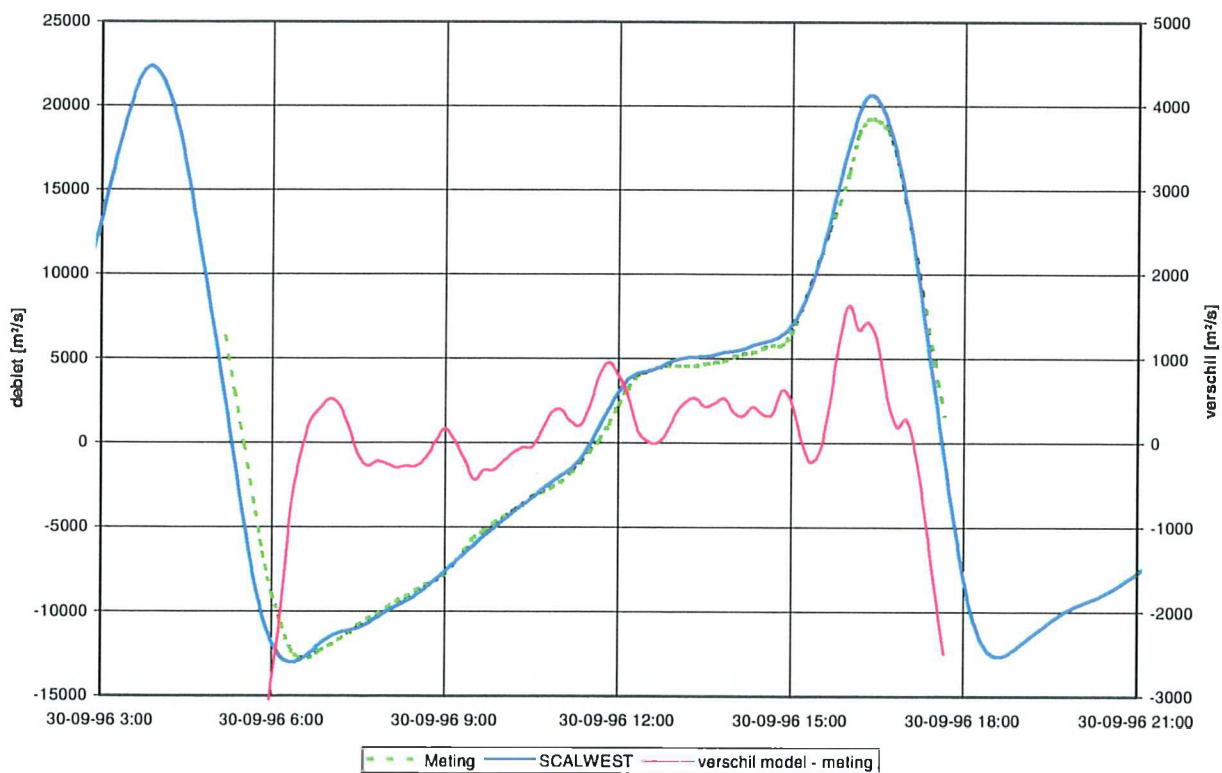


(b) debieten raai 5A: Zuidergat en Schaar van Waarde op 30 september en 1 september 1996

Debiet - Zuidergat

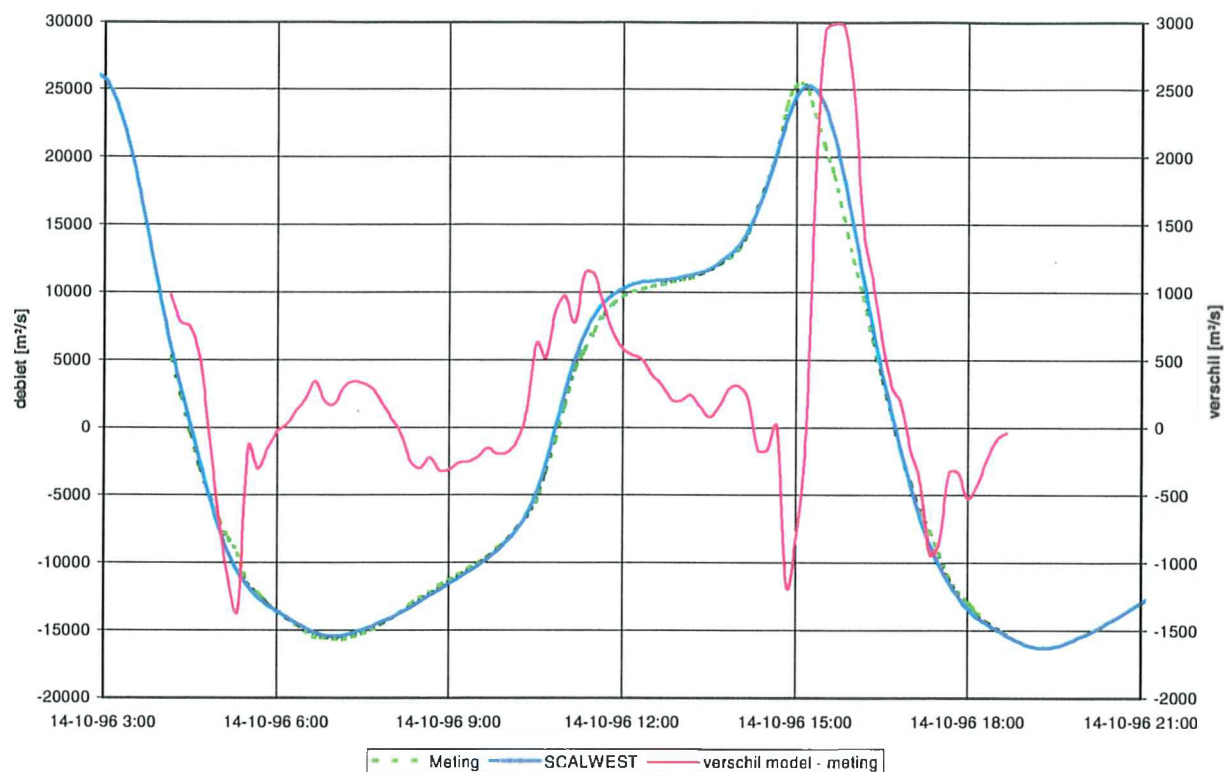


Debiet - Schaar van Waarde

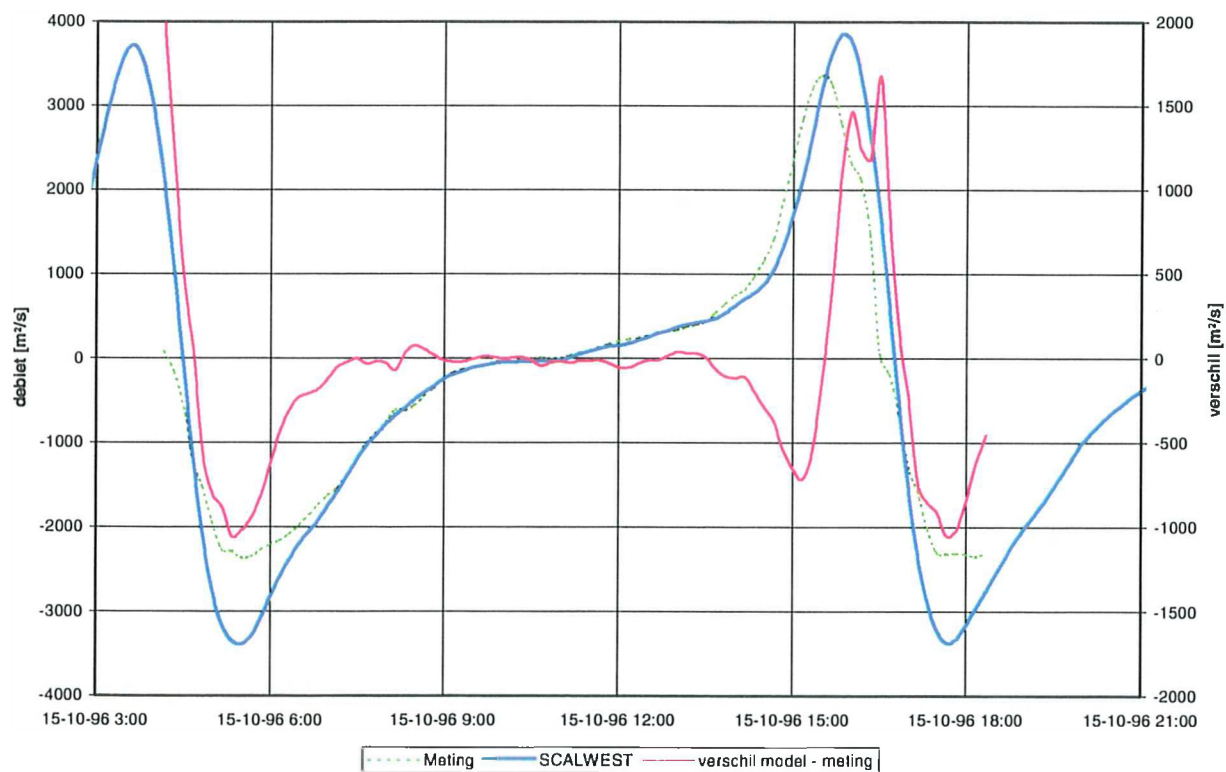


(c) debieten in raai 3: Overloop van Valkenisse en Zimmermangeul op 14 en 15 oktober 1996

Debiet - Overloop van Valkenisse



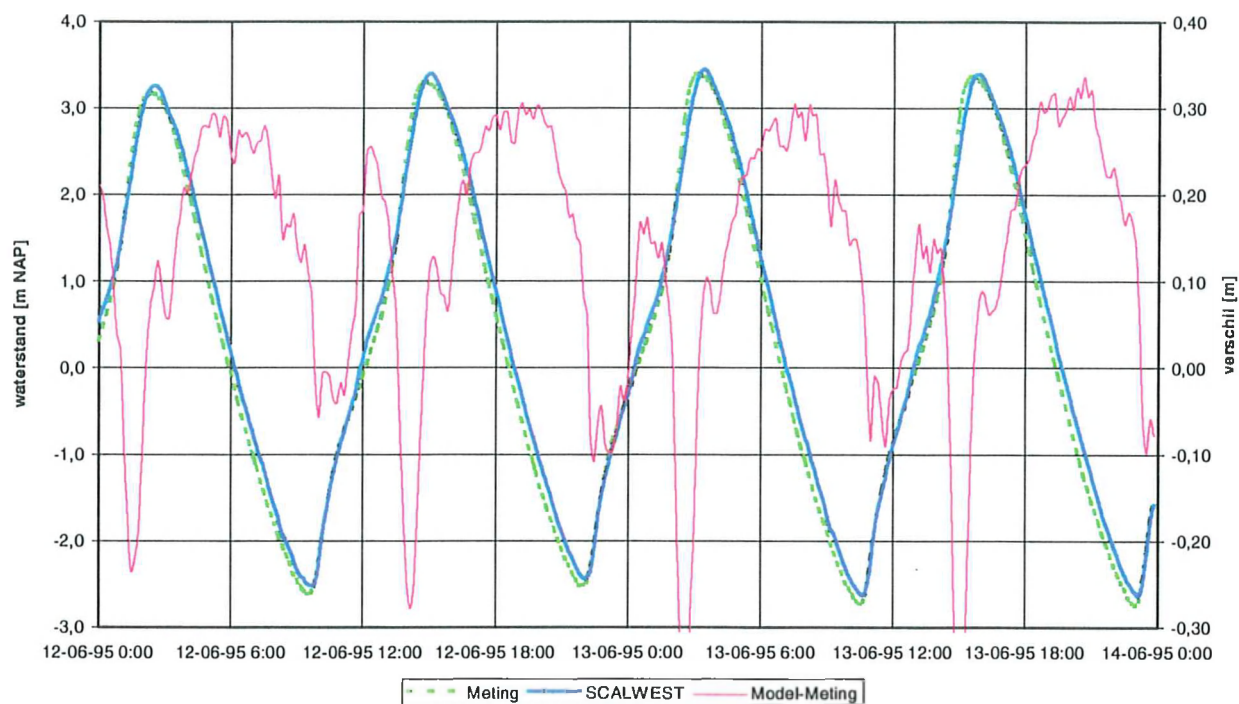
Debiet - Zimmermangeul



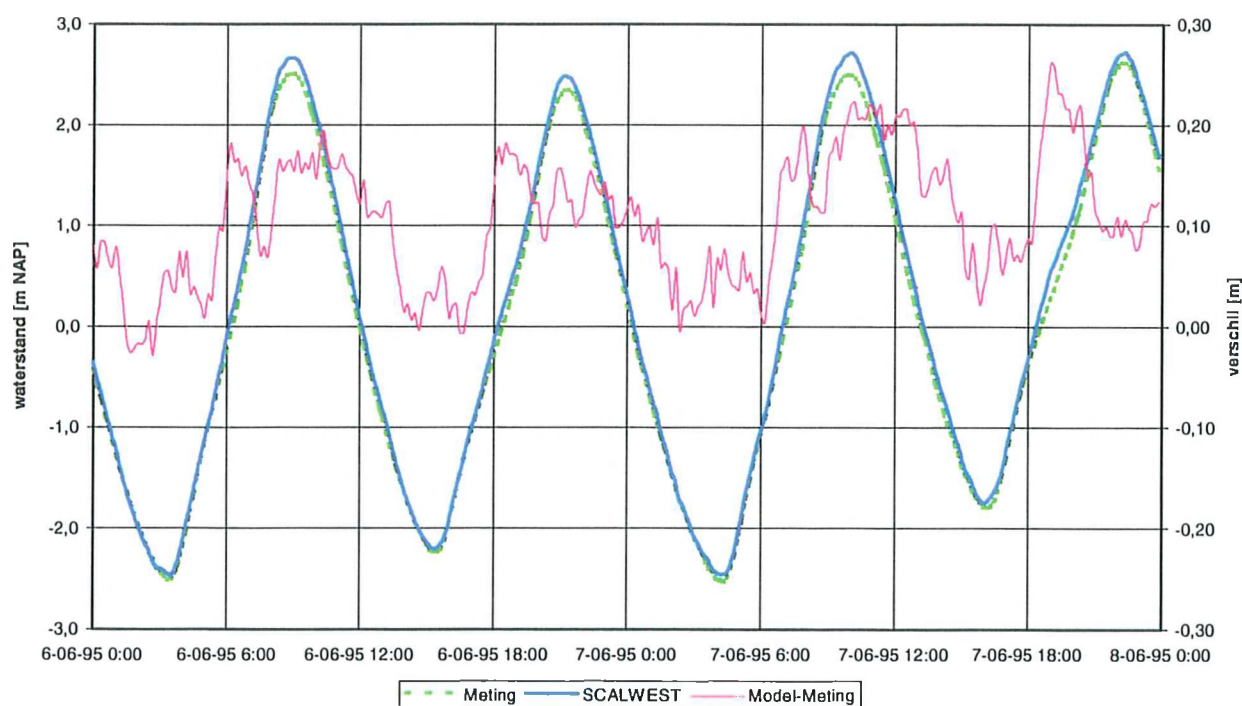
Bijlage 5. Tweede afregeling SCALWEST-fijn: waterstanden doottij en springtij

waterstand bij Antwerpen tijdens springtij (12-13 juni 1995) en doottij (6-7 juni 1995)

Springtij - Antwerpen

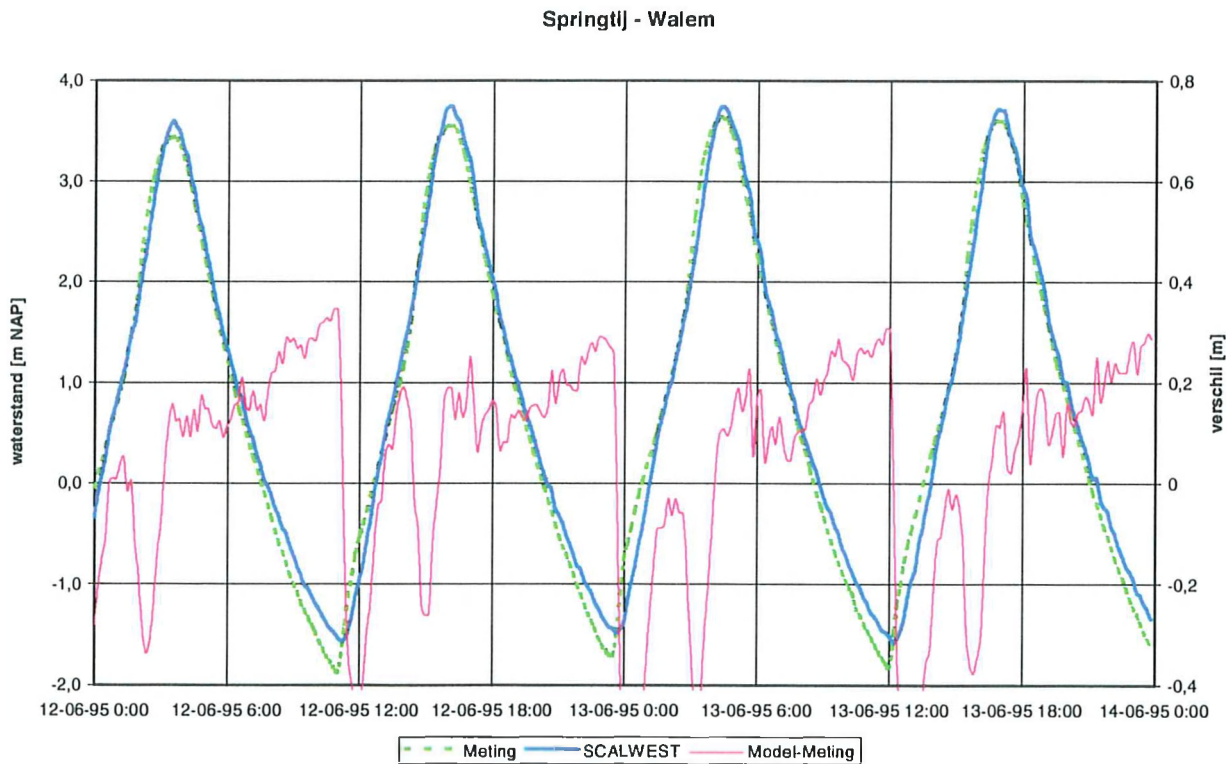
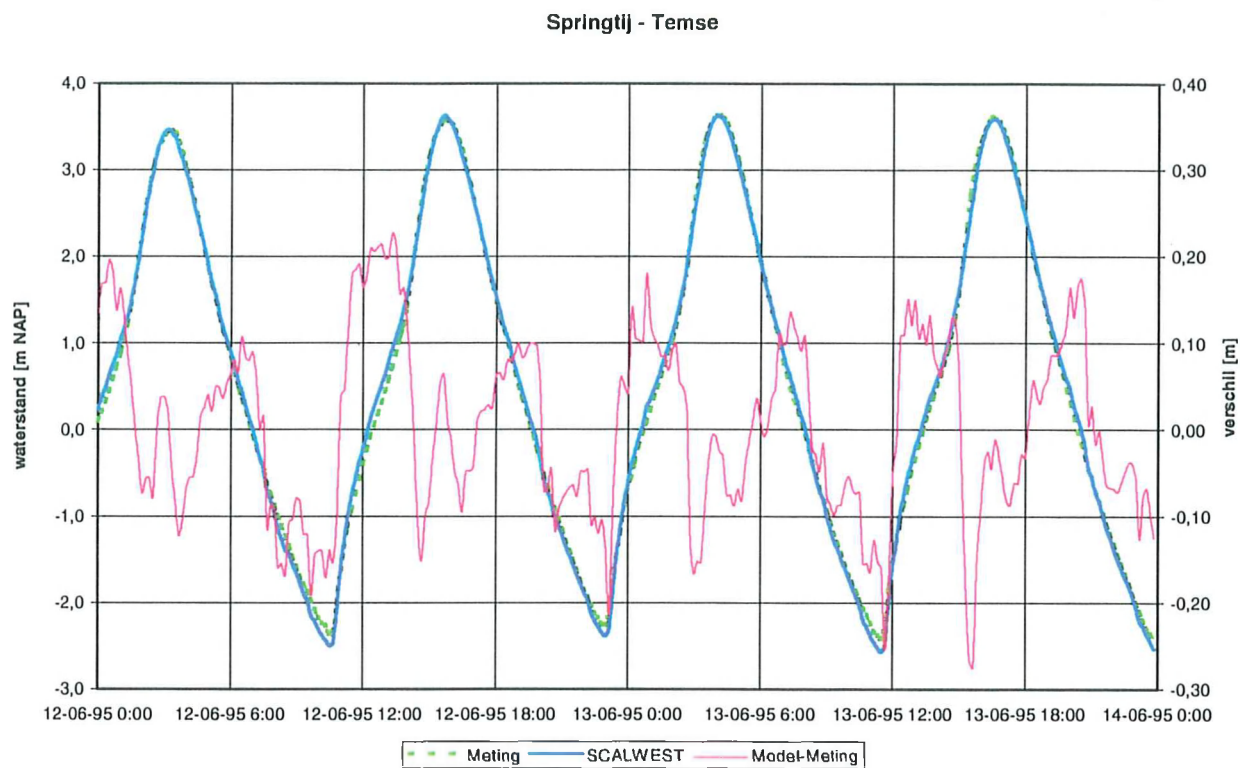


Dootij - Antwerpen



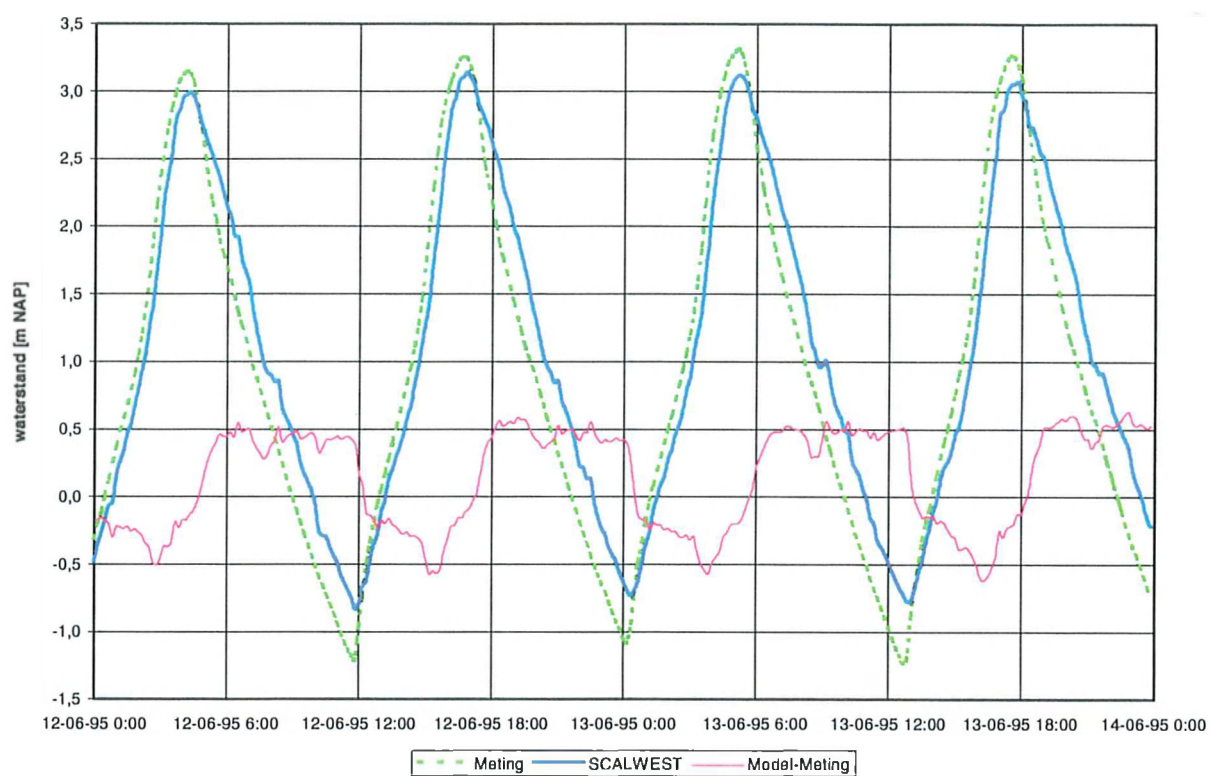
Bijlage 6. Tweede afregeling SCALWEST-fijn: waterstanden springtij

(a) waterstand bij Temse en Walem tijdens springtij (12-13 juni 1995)

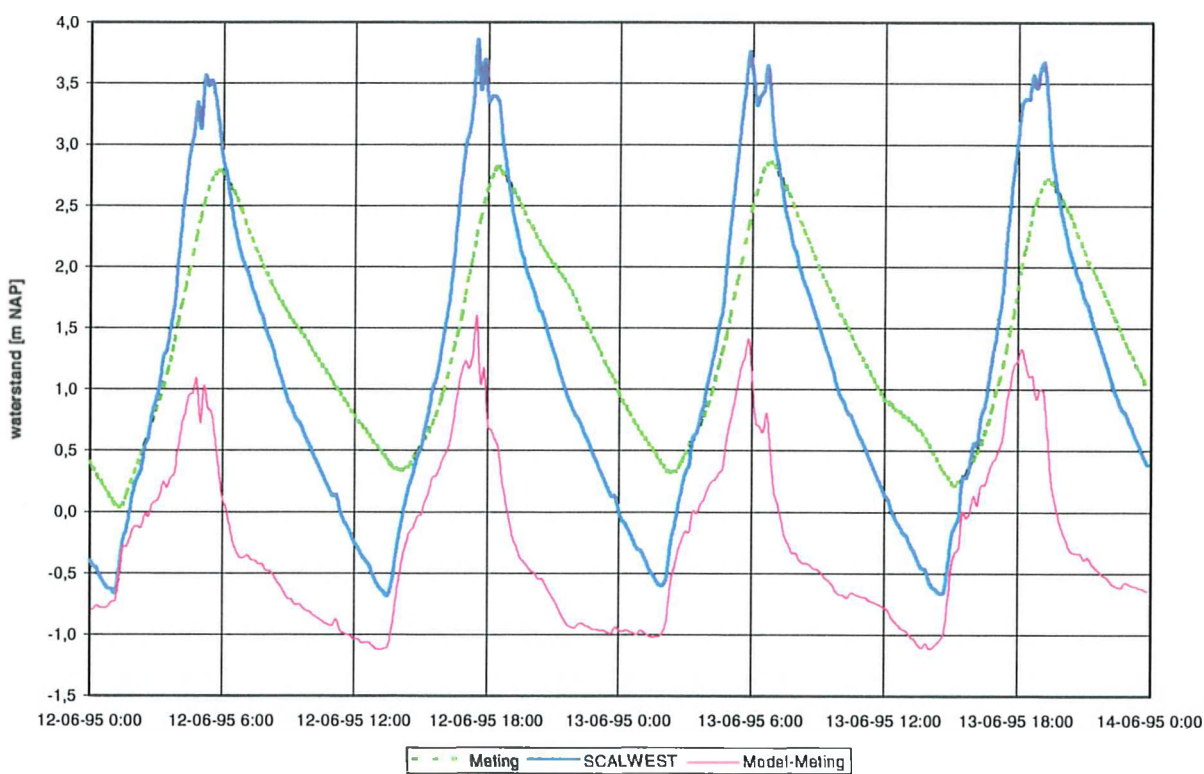


(b) waterstand bij Dendermonde en Melle tijdens springtij (12-13 juni 1995)

Springtij - Dendermonde

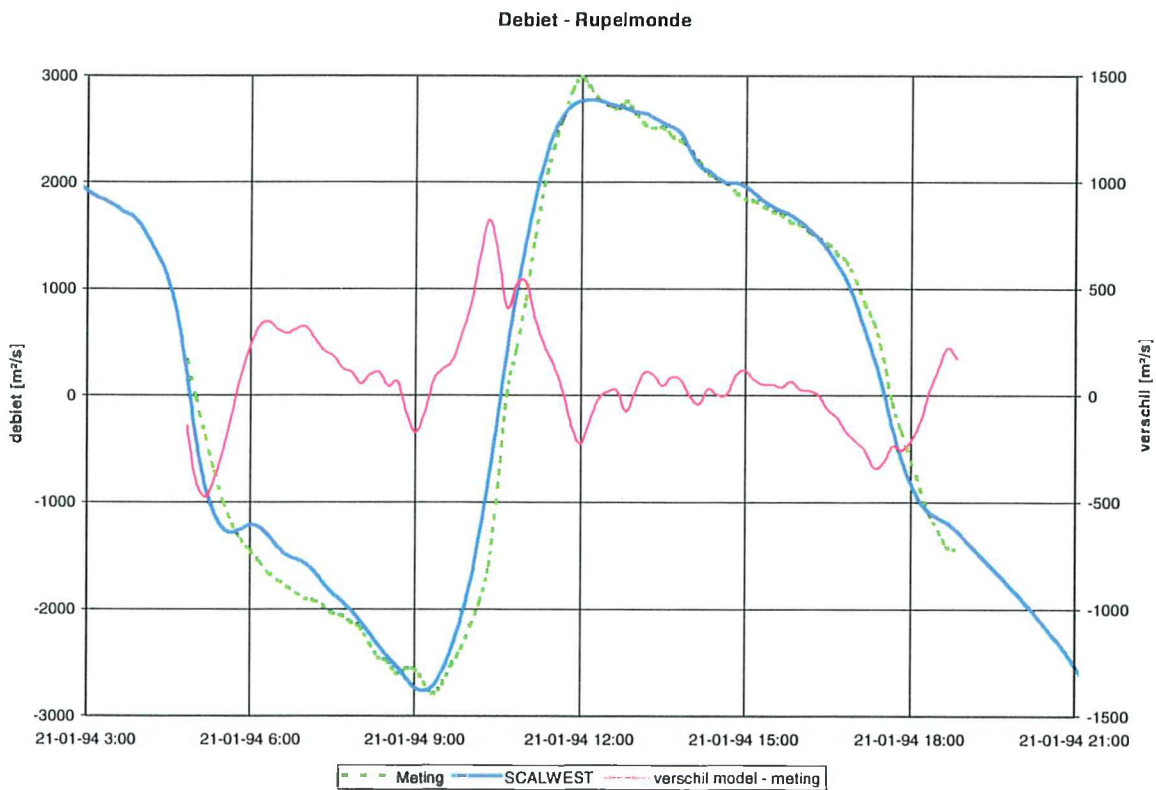
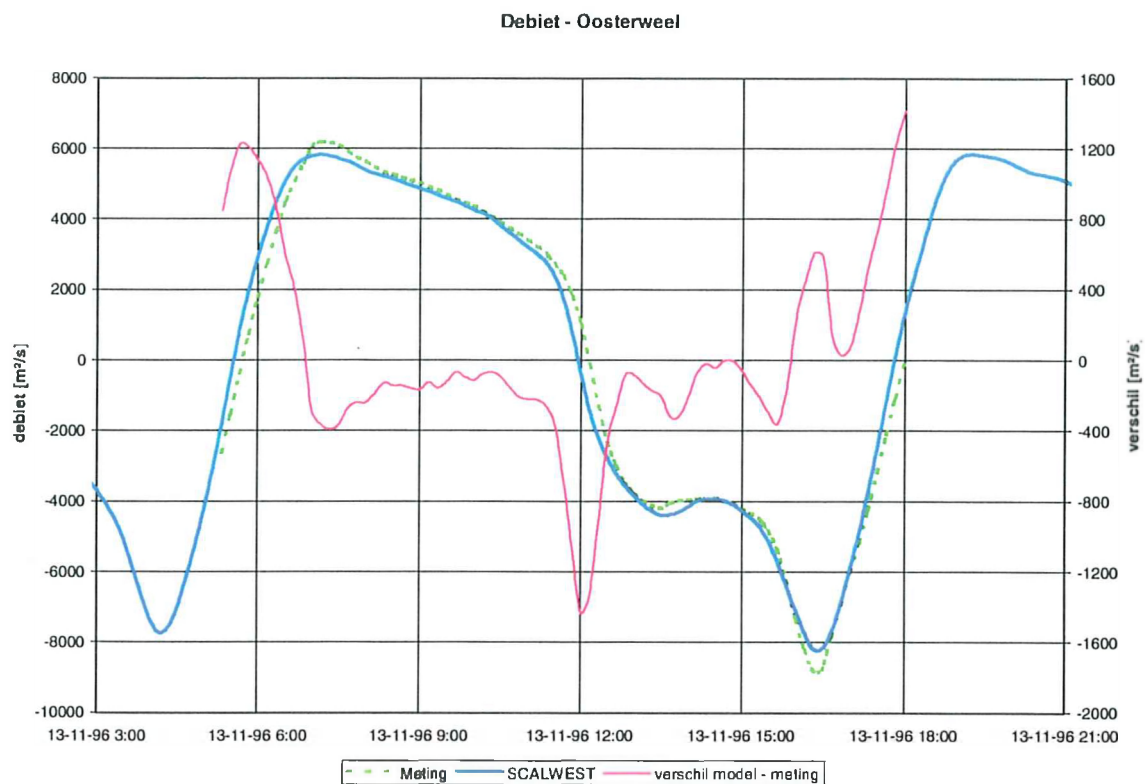


Springtij - Melle



Bijlage 7. Tweede afregeling SCALWEST-fijn: debieten

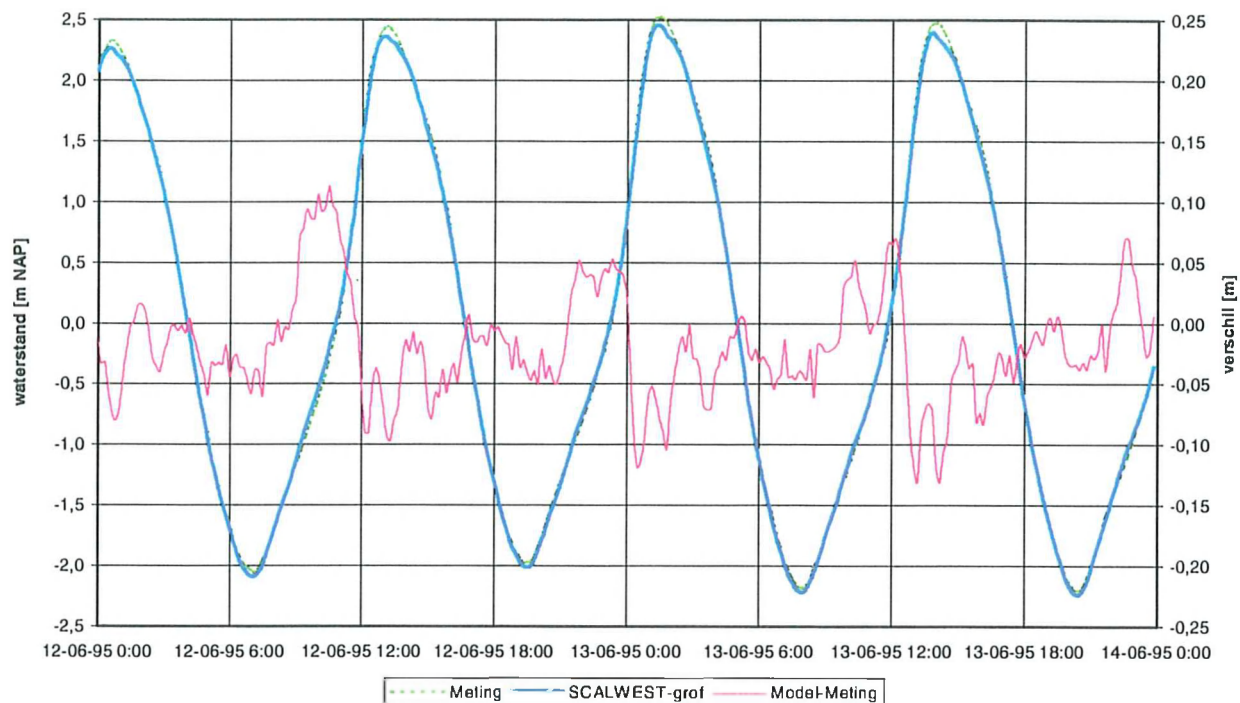
debieten bij Oosterweel op 13 november 1996 en bij Rupelmonde op 21 april 1994



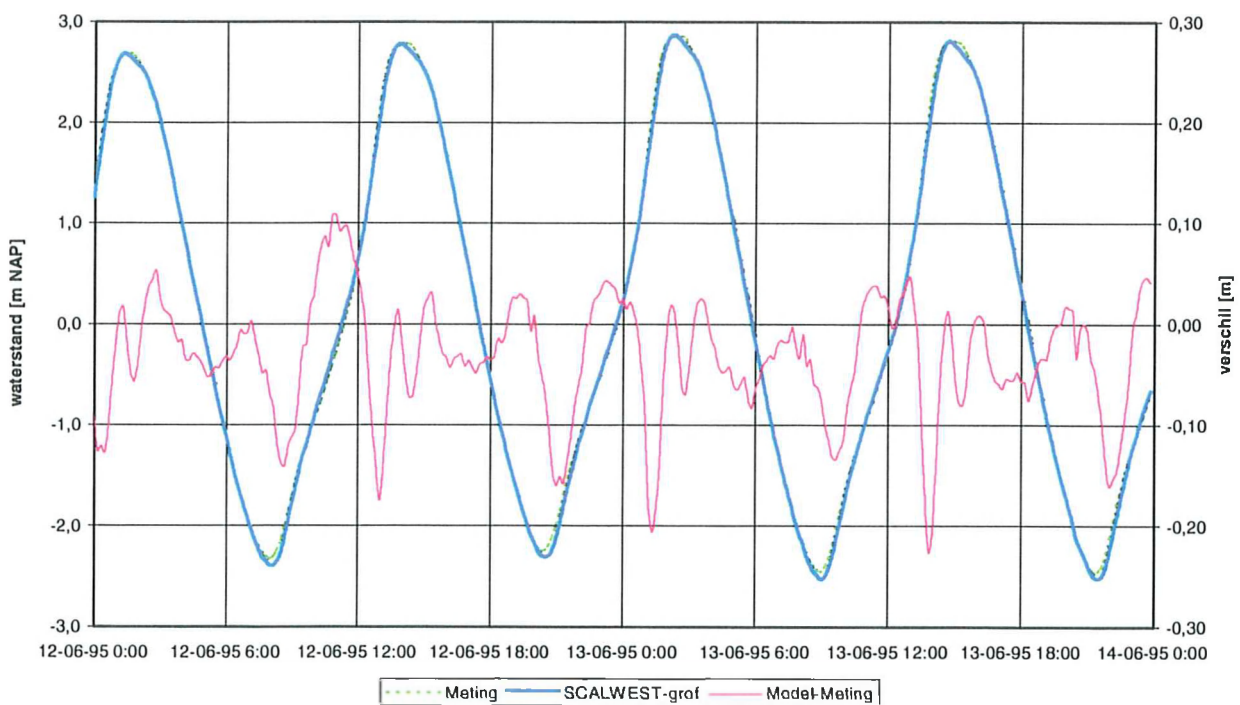
Bijlage 8. Afregeling SCALWEST-grof: waterstanden

(a) waterstanden bij Vlissingen en Hansweert tijdens springtij op 12 en 13 juni 1995

Springtij - Vlissingen

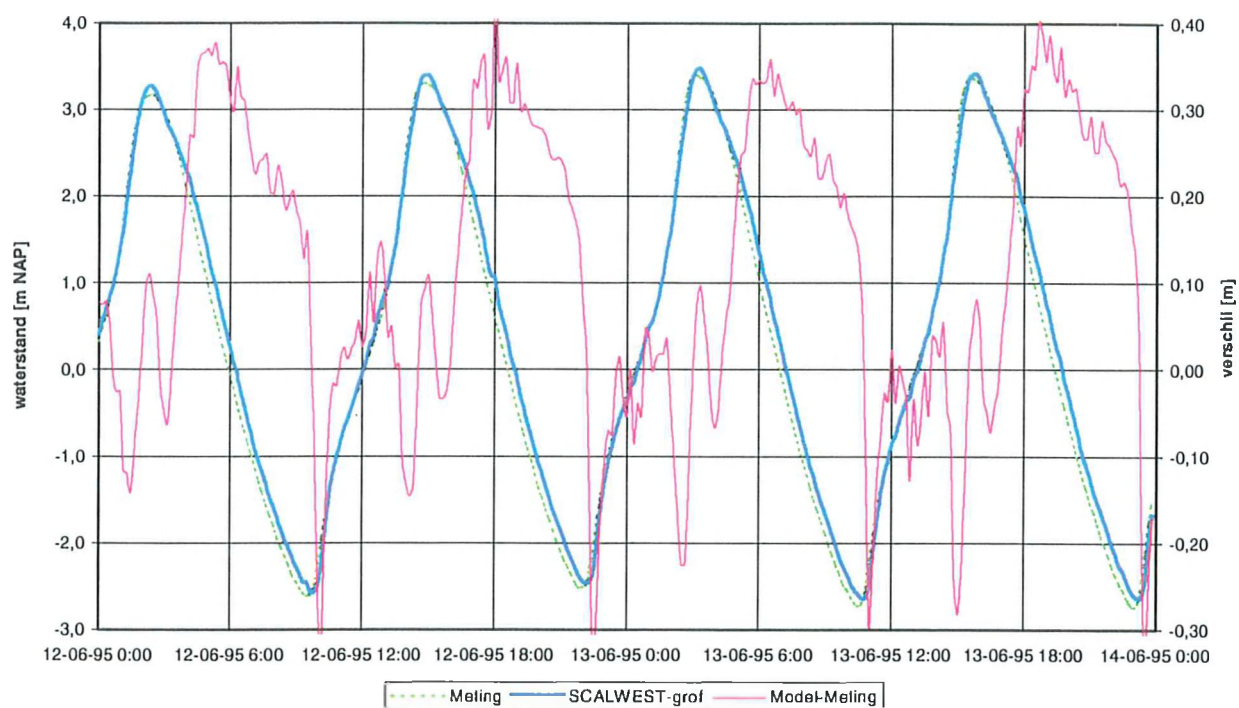


Springtij - Hansweert

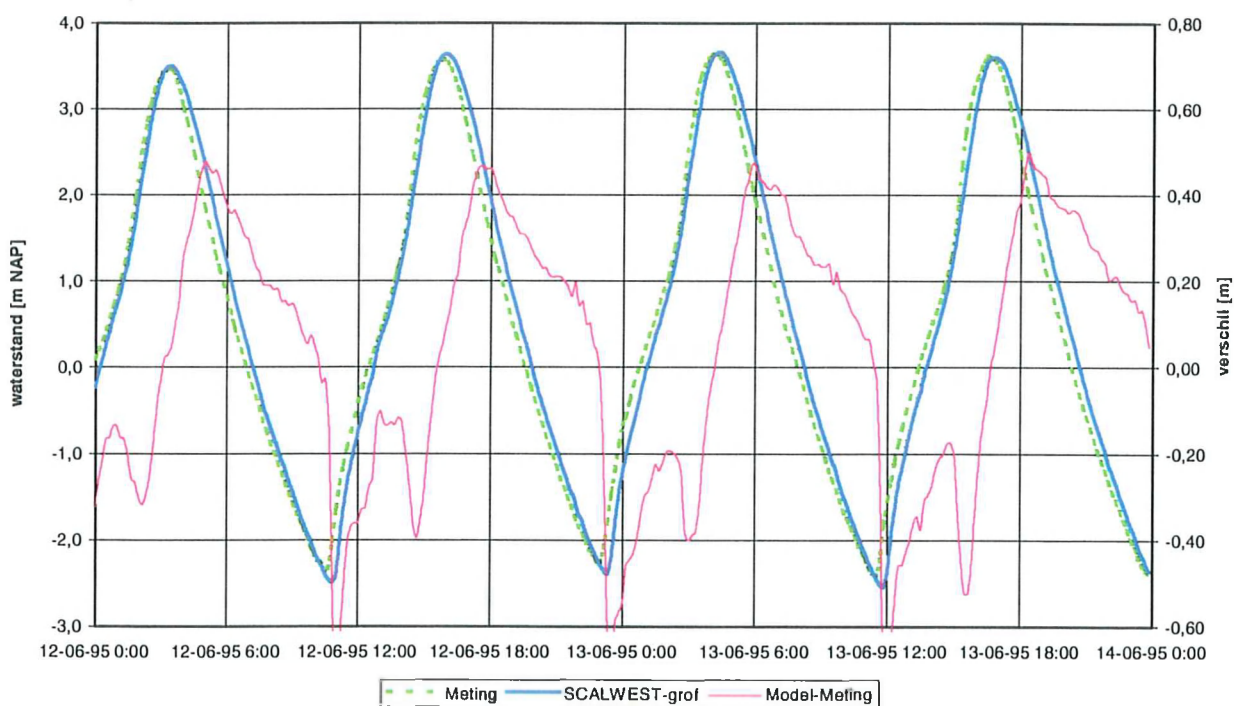


(b) waterstanden bij Antwerpen en Temse tijdens springtij op 12 en 13 juni 1995

Springtij - Antwerpen



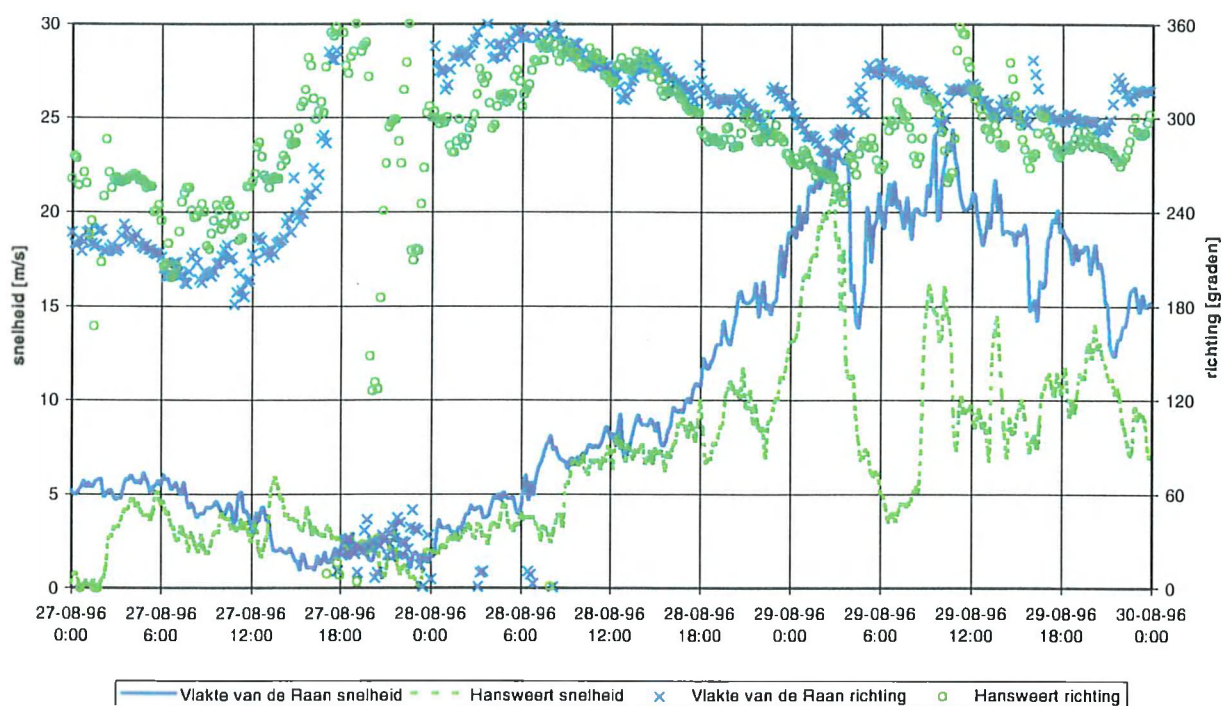
Springtij - Temse



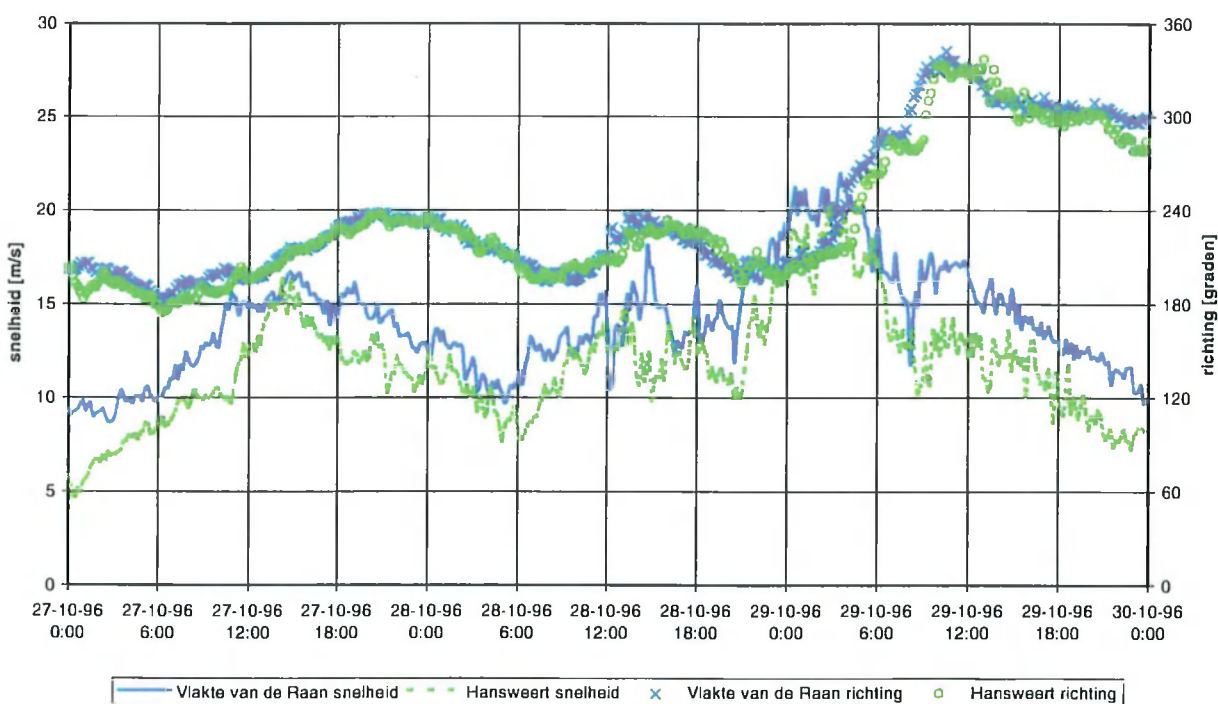
Bijlage 9. Windgegevens Westerschelde

wind bij Vlakte van de Raan en Hansweert in augustus en oktober 1996

Windgegevens Westerschelde



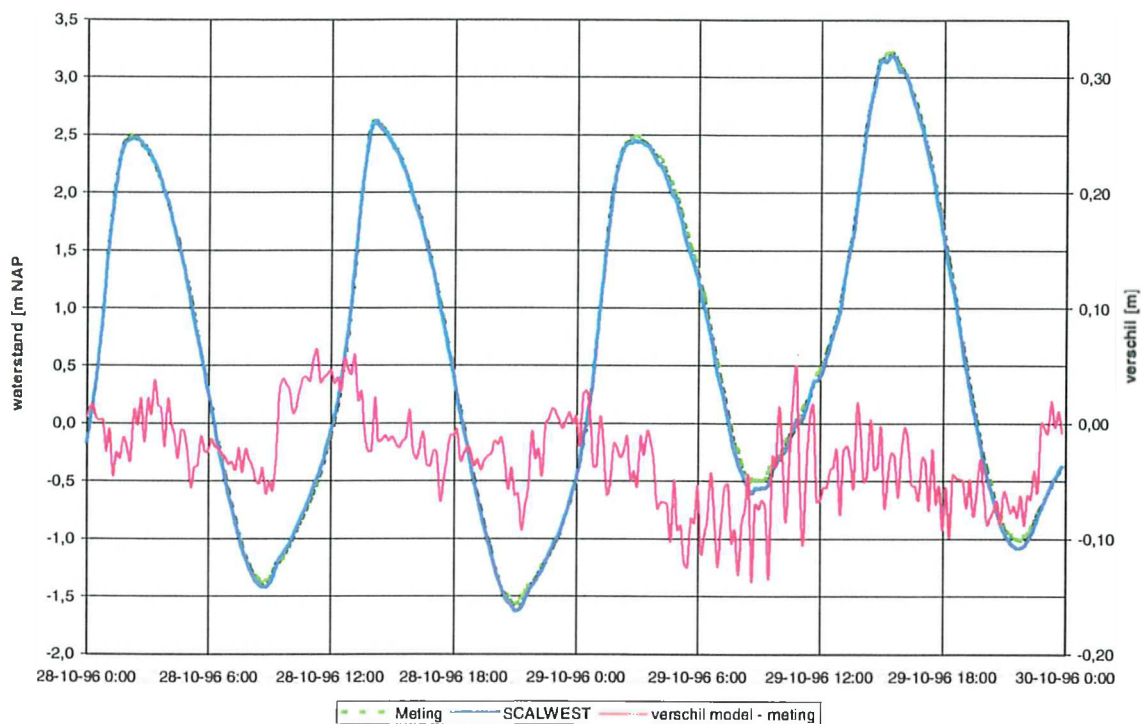
Windgegevens Westerschelde



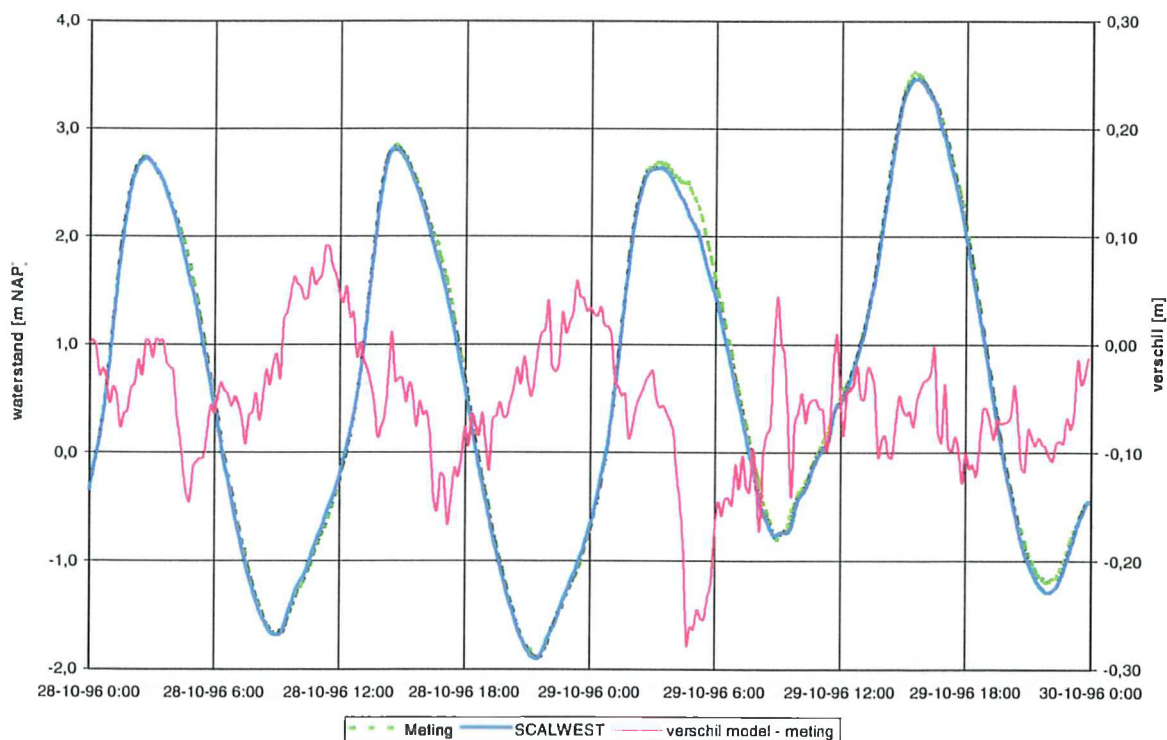
Bijlage 10. Verificatie SCALWEST-fijn: waterstanden tijdens storm

(a) waterstanden bij Westkapelle en Vlissingen tijdens storm op 28 en 29 oktober 1996

storm oktober 1996 - Westkapelle

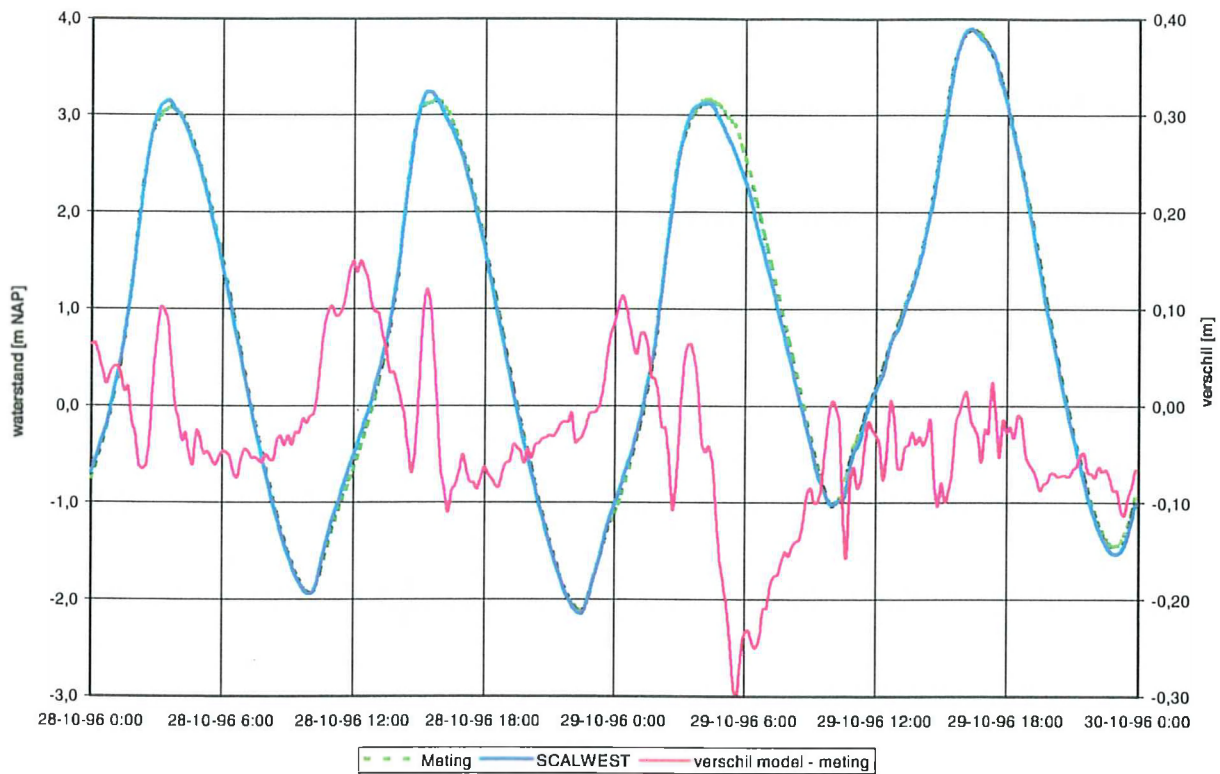


storm oktober 1996 - Vlissingen

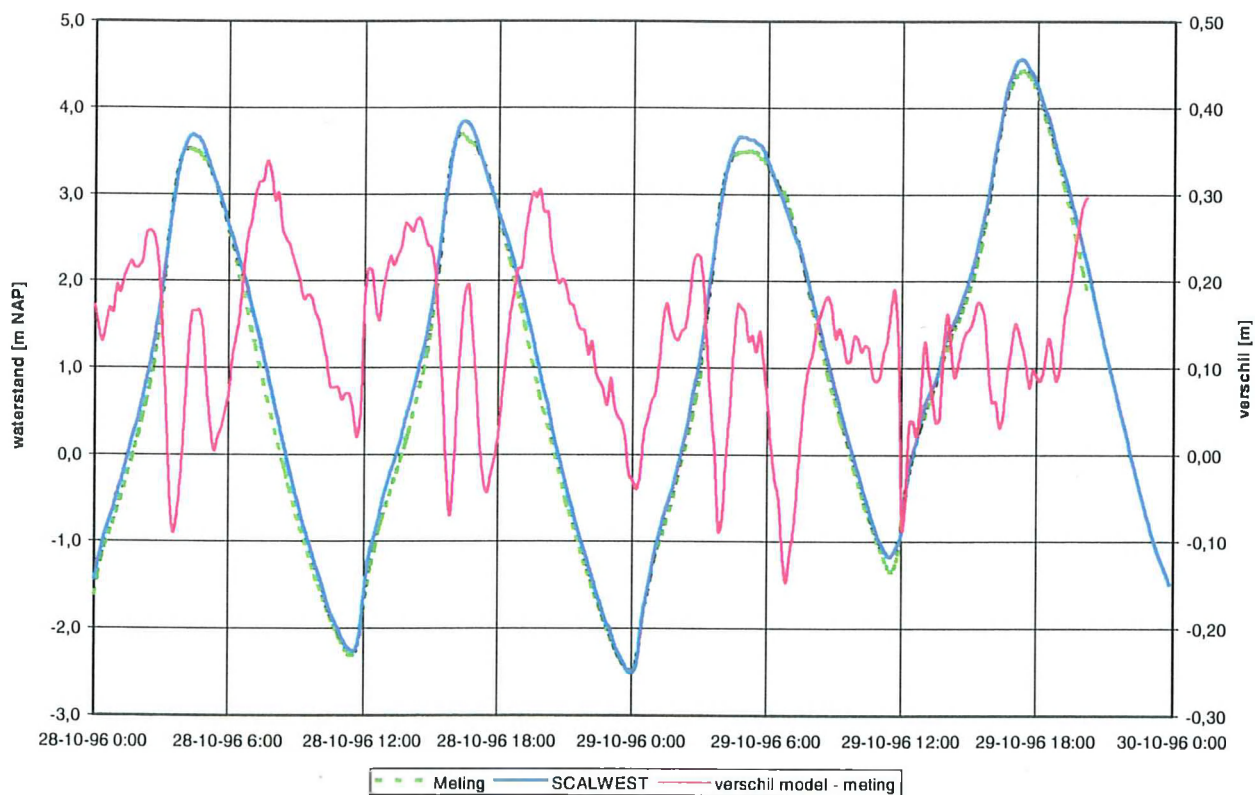


(b) waterstanden bij Hansweert en Antwerpen tijdens storm op 28 en 29 oktober 1996

storm oktober 1996 - Hansweert



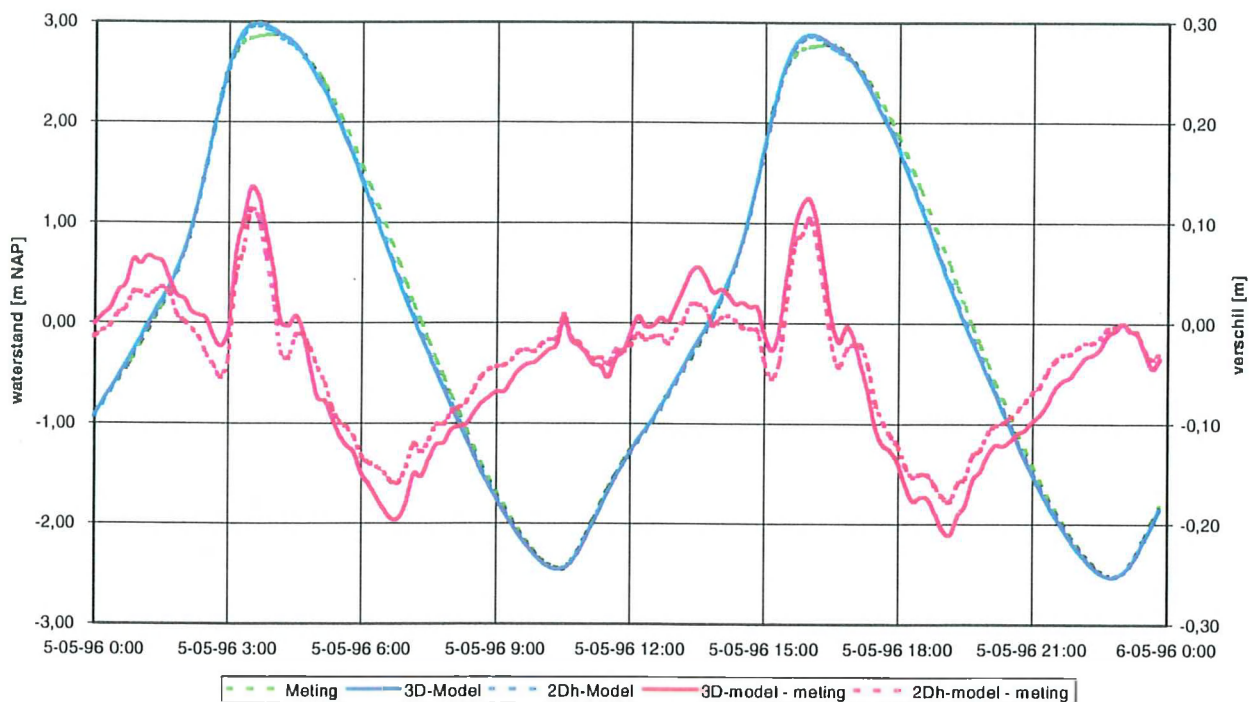
storm oktober 1996 - Antwerpen



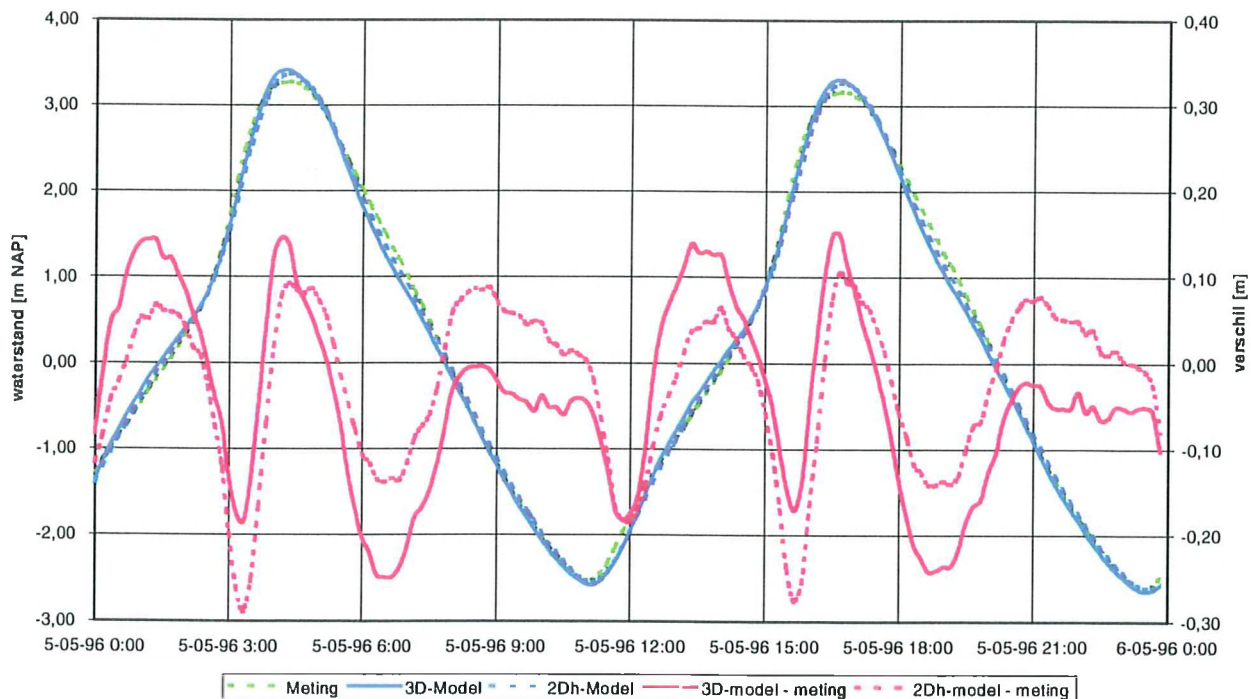
Bijlage 11. Vergelijking TRISCAL (3D) en uitsnede SCALWEST (2Dh): waterstanden

waterstanden bij Hansweert en Bath tijdens springtij op 5 mei 1996

Vergelijking 3D-model / 2Dh-model
Hansweert



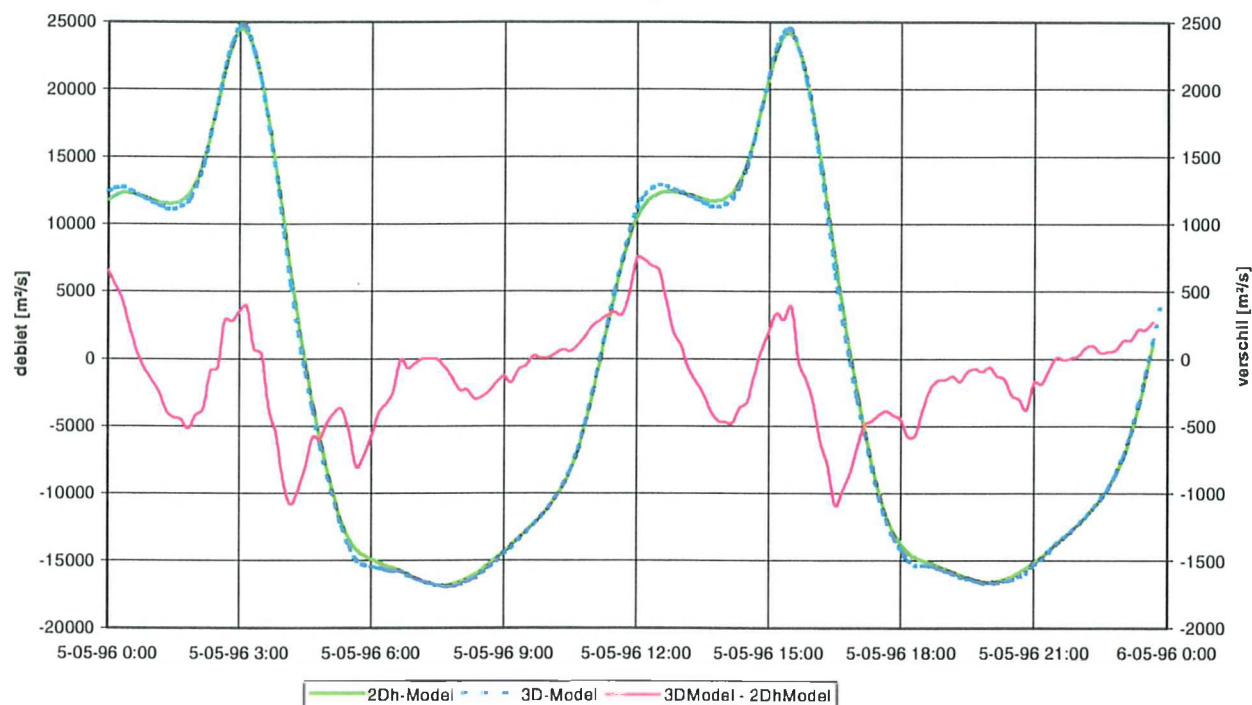
Vergelijking 3D-model / 2Dh-model
Bath



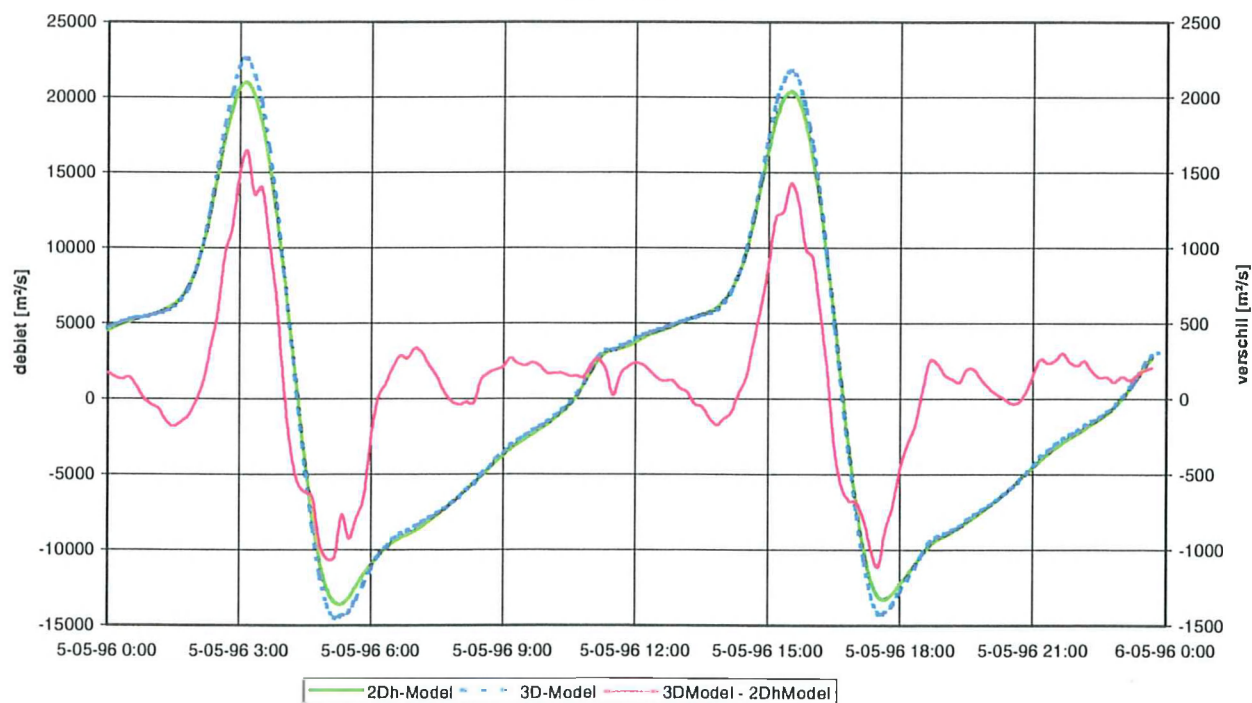
Bijlage 12. Vergelijking TRISCAL (3D) en uitsnede SCALWEST (2Dh): debieten

debieten in het Zuidergat en de Schaar van Waarde tijdens springtij op 5 mei 1996

Vergelijking 3D model - 2Dh model
Zuidergat

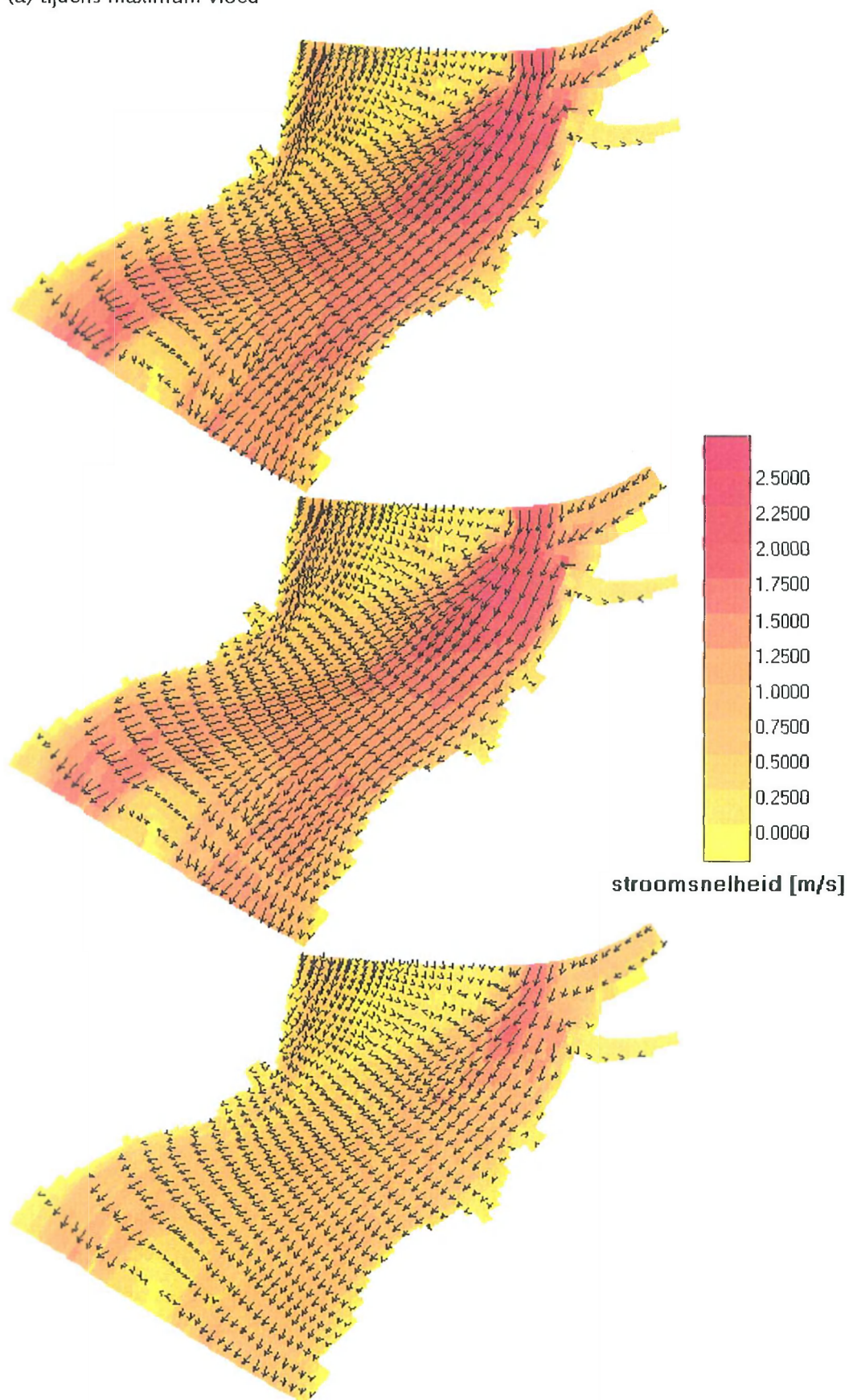


Vergelijking 3D model - 2Dh model
Schaar van Waarde

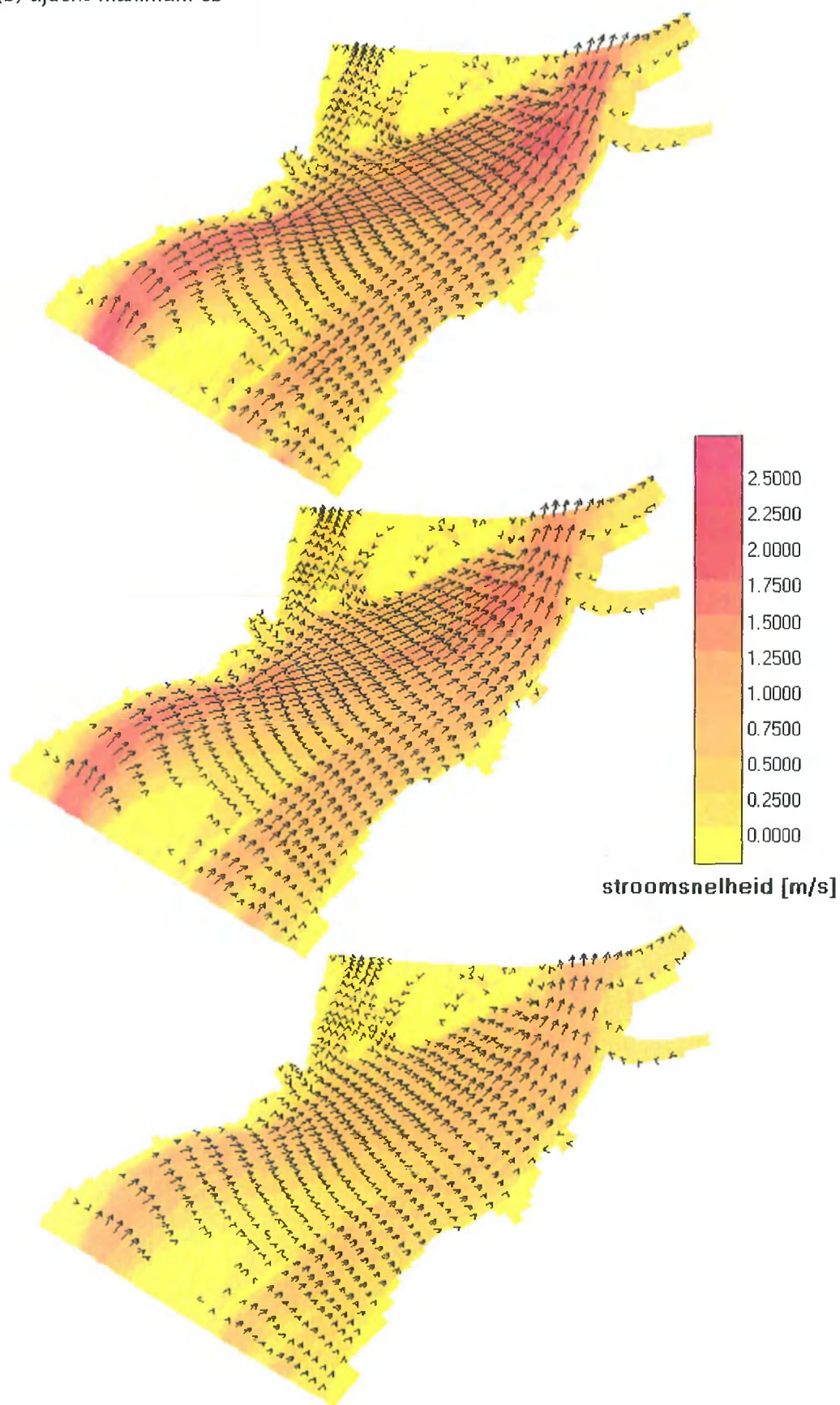


Bijlage 13. Stroombeelden in de bovenste laag (1), middelste laag (4) en onderste laag (7)

(a) tijdens maximum vloed

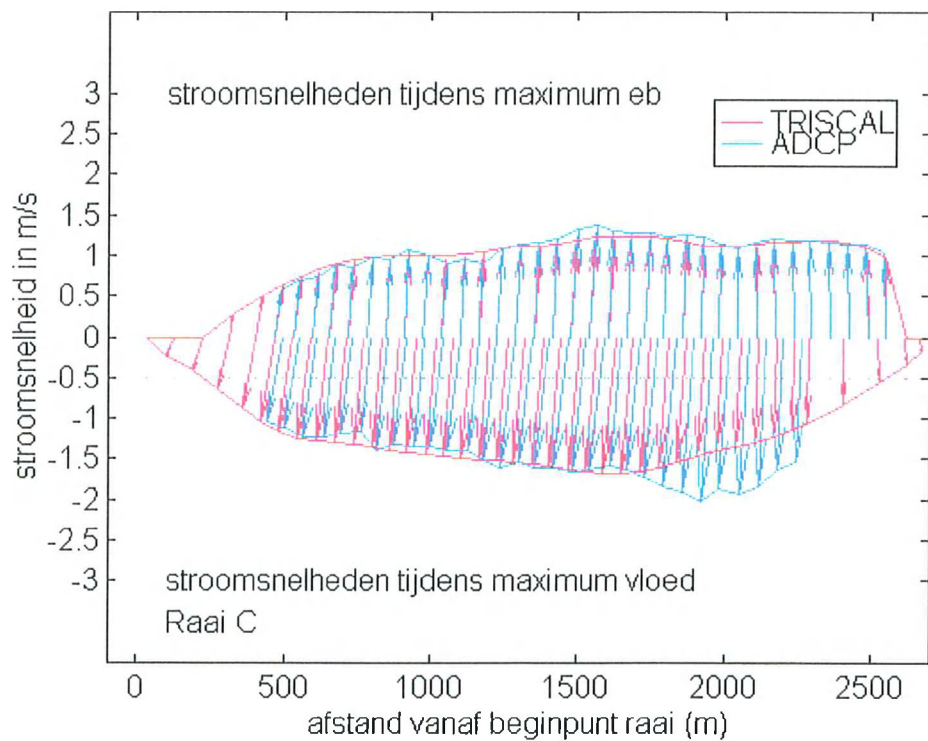
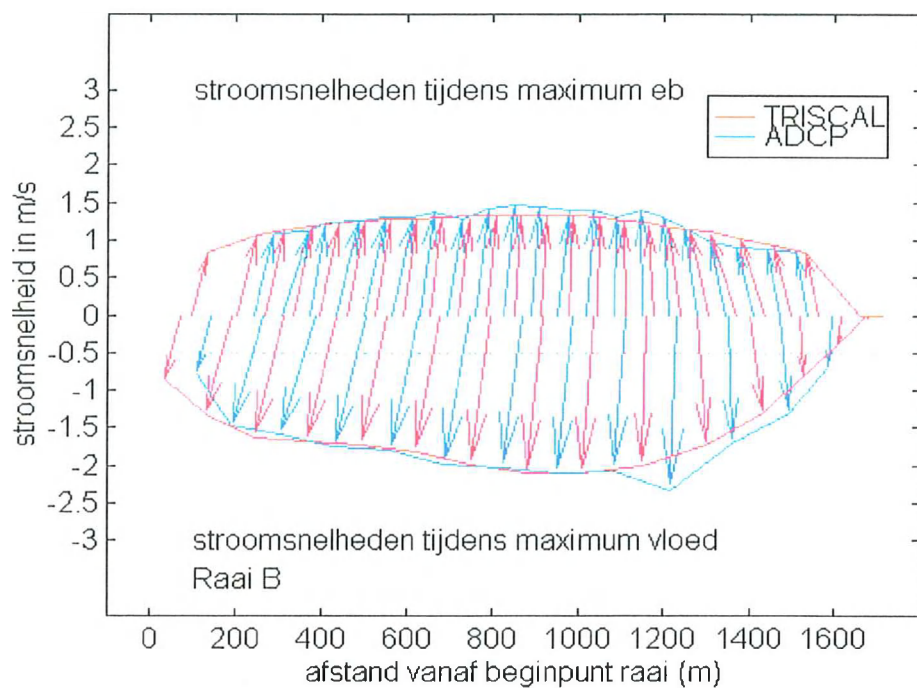


(b) tijdens maximum eb



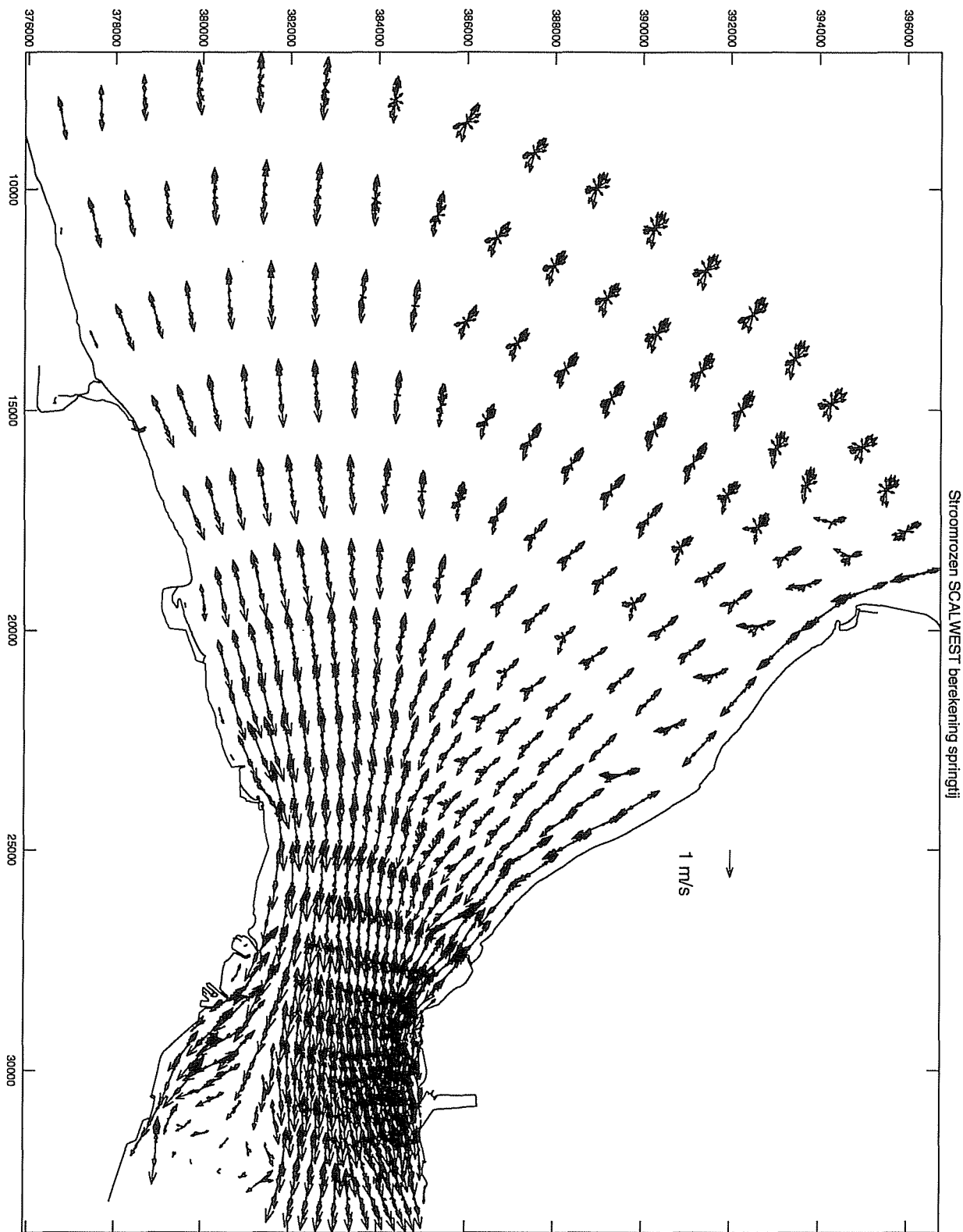
Bijlage 14. Verticaal gemiddelde stroomsnelheid voor ADCP-metingen en TRISCAL-berekeningen tijdens maximum vloed en maximum eb

(a) voor raai B en (b) voor raai C bij Hansweert



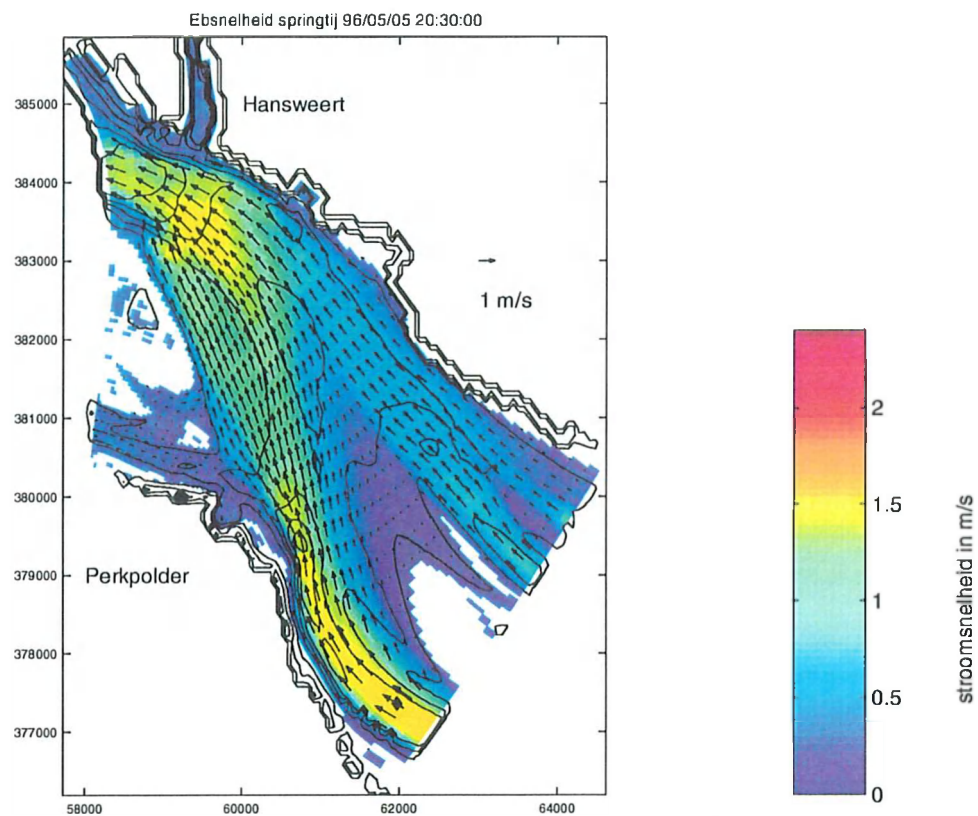
Bijlage 15. Toepassingen: stroomrozen in de Westerscheldedemonding

voor een berekening bij springtij

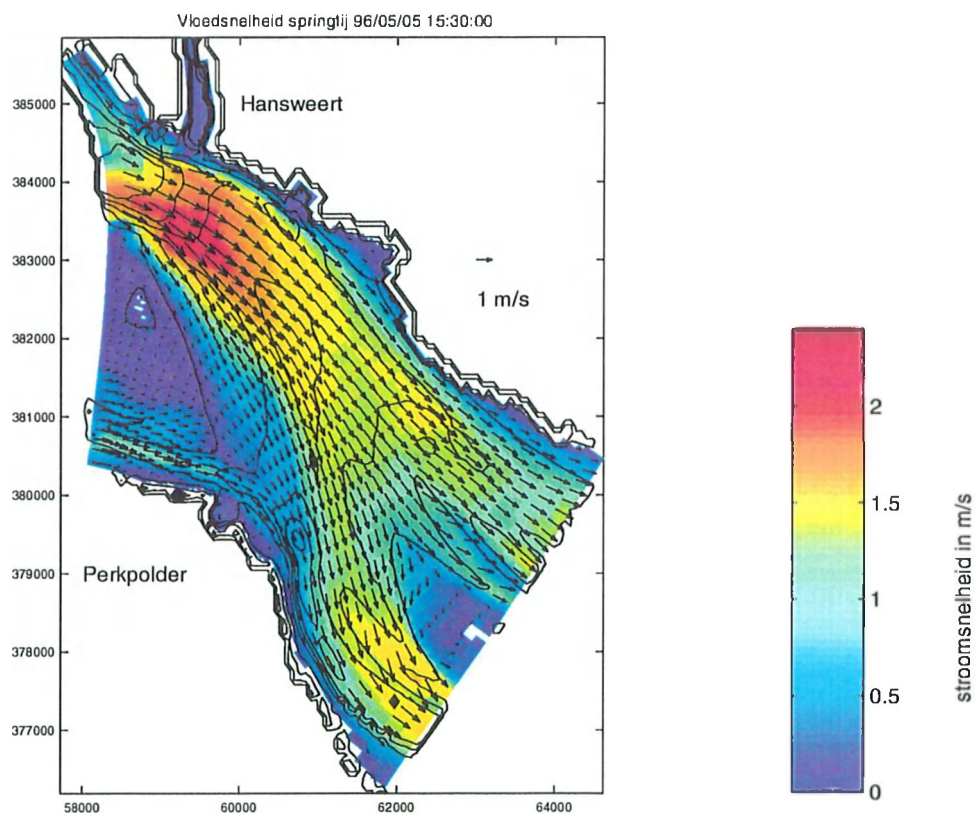


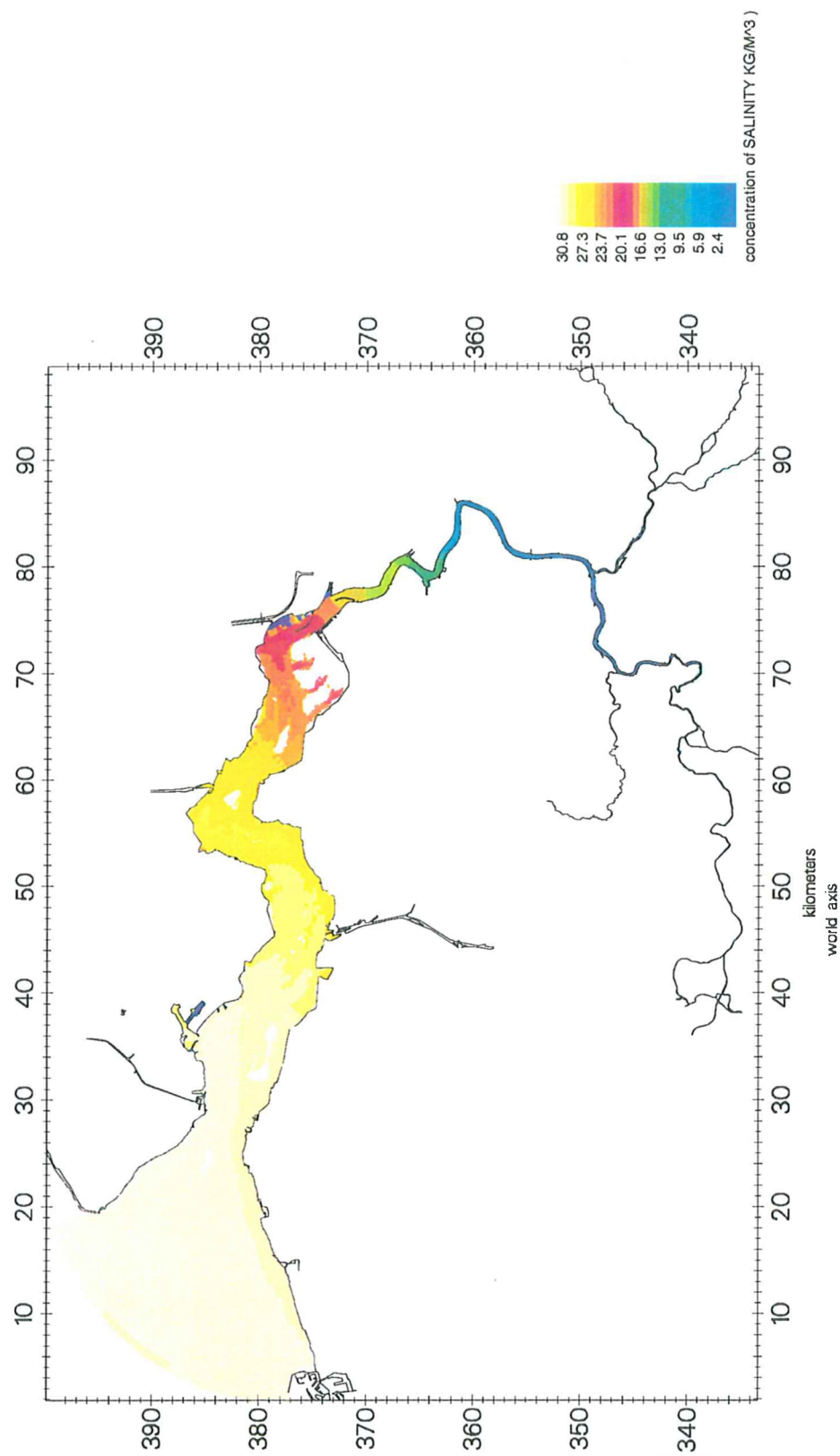
Bijlage 16. Toepassingen: maximale stroomsnelheden bij Hansweert tijdens eb en vloed

(a) maximum ebsnelheid



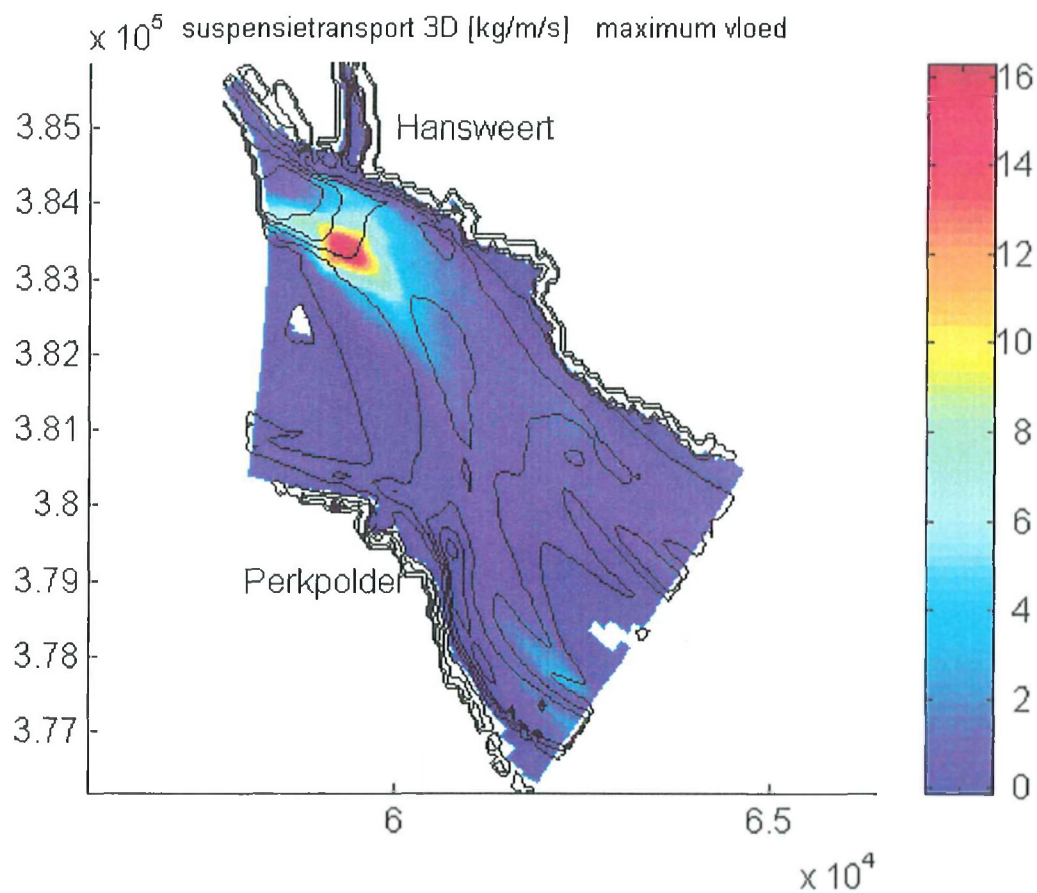
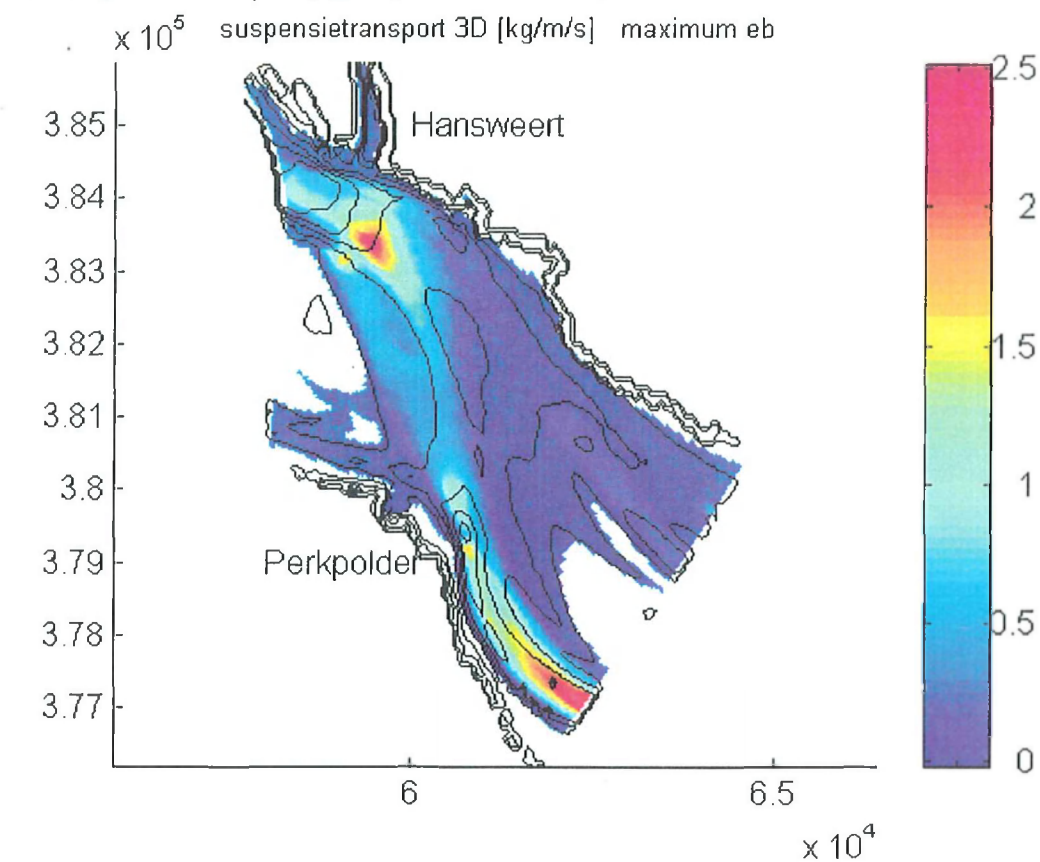
(b) maximum vloodsnelheid



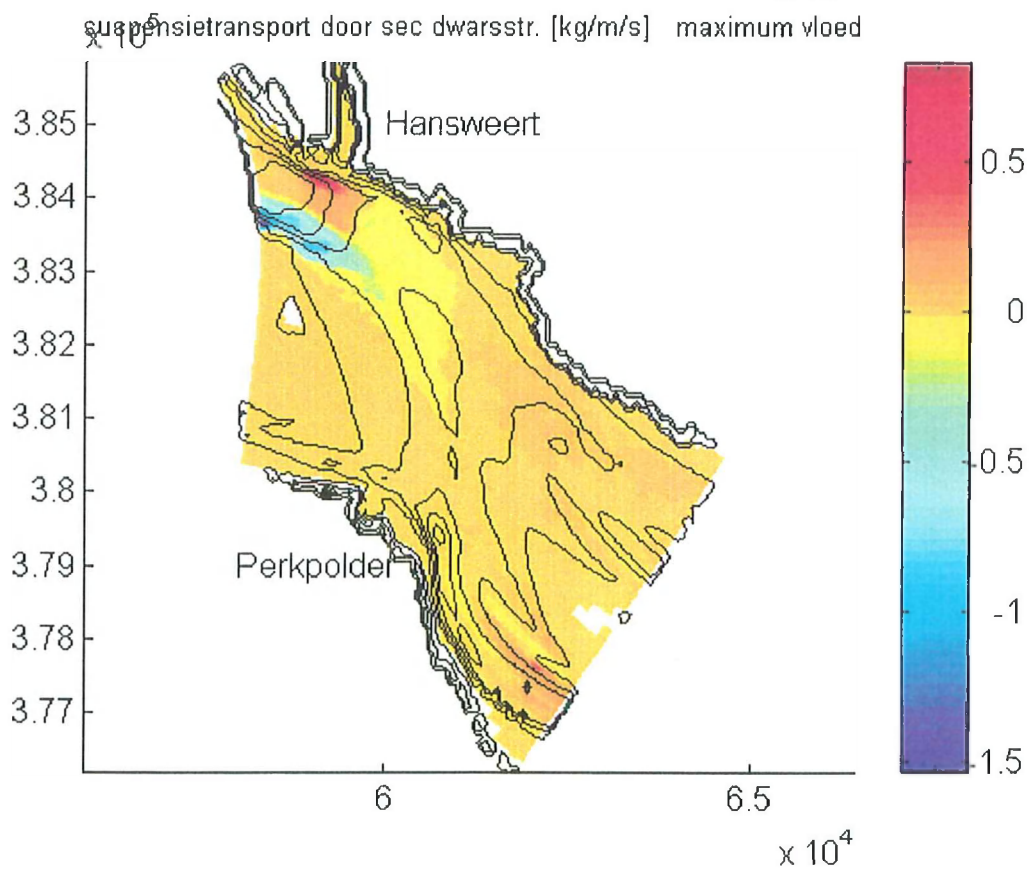
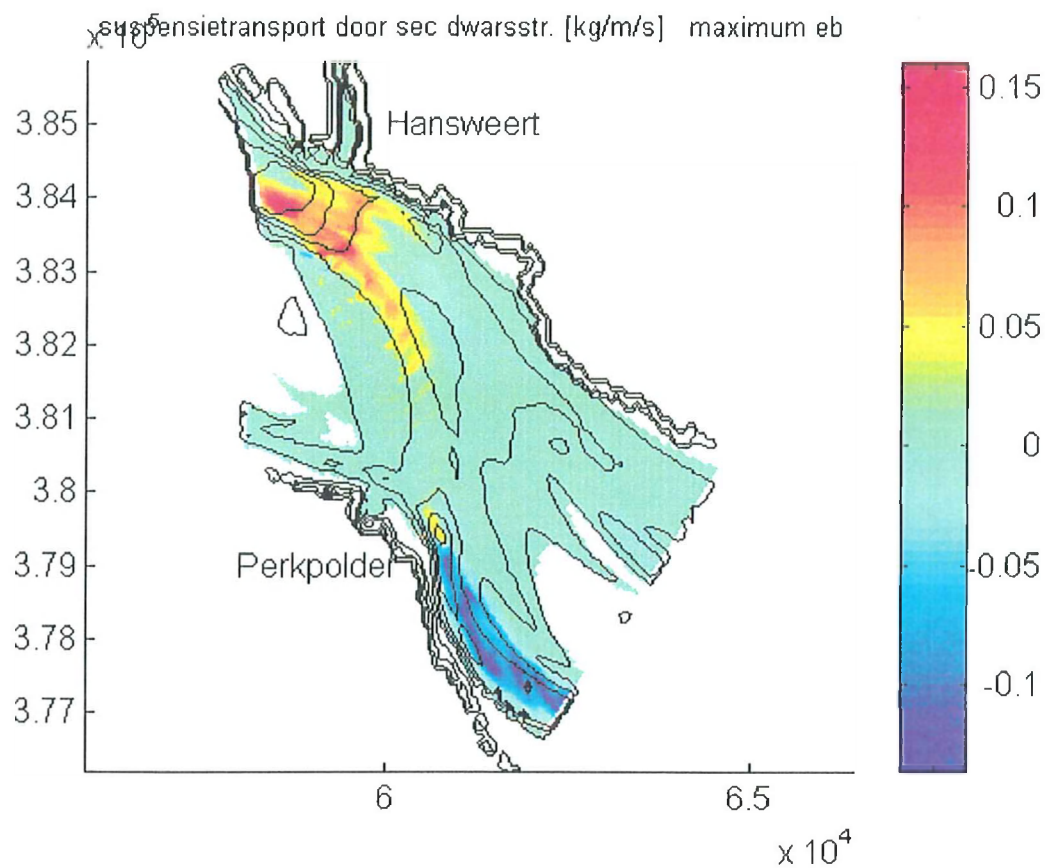


Bijlage 18. Toepassingen: initieel sedimenttransport voor de Drempel van Hansweert

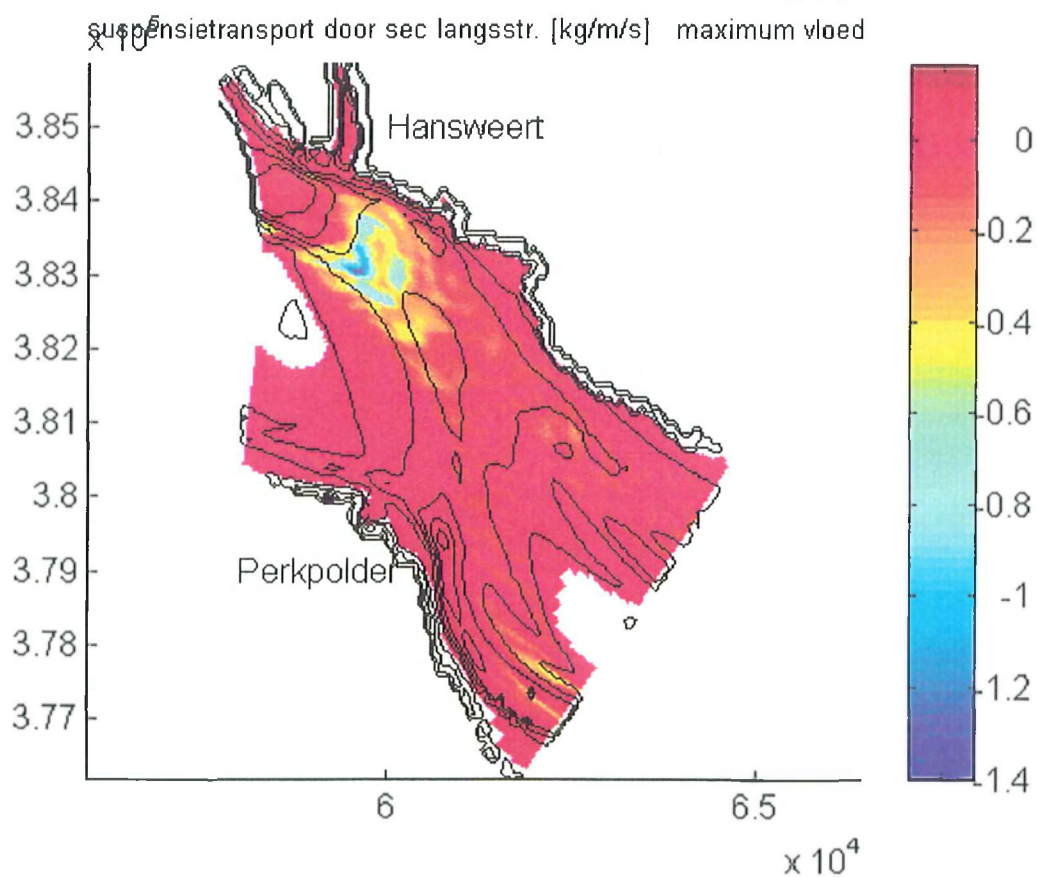
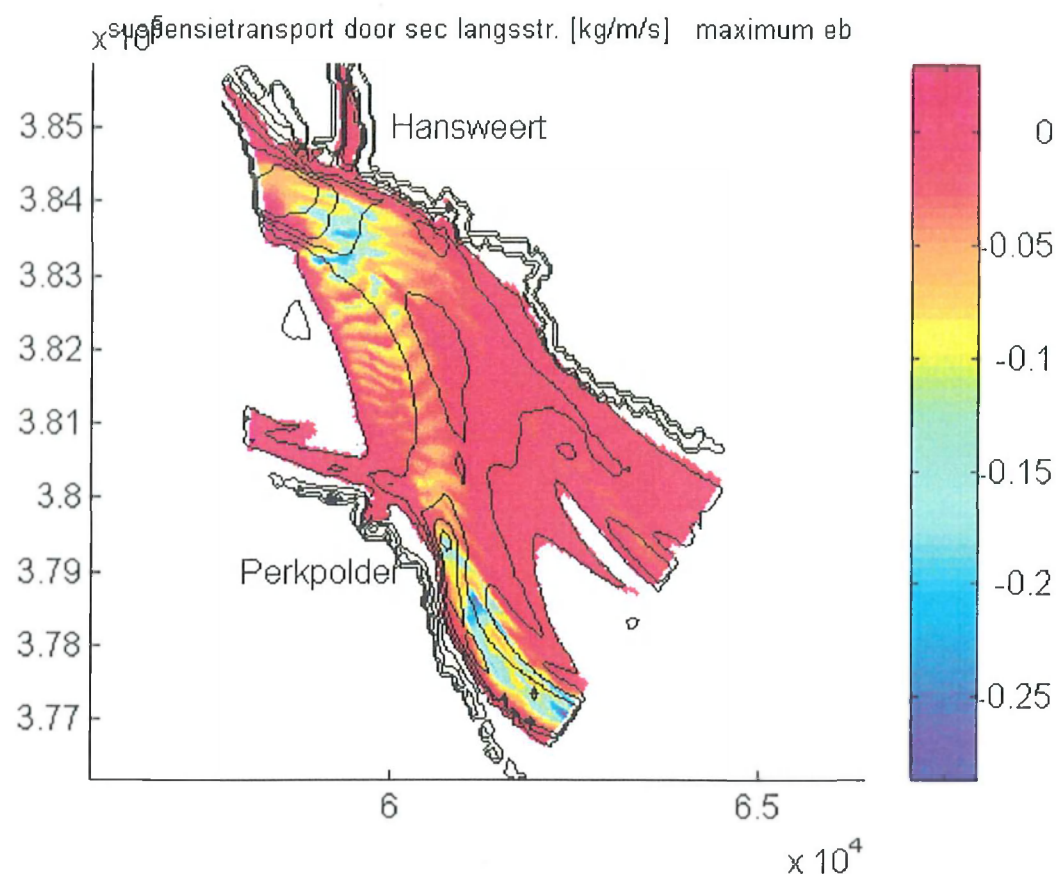
(a) 3D suspensief transport [kg/m³] voor eb en vloed



(b) suspensief transport [kg/m^3] ten gevolge van de secundaire dwarsstroming



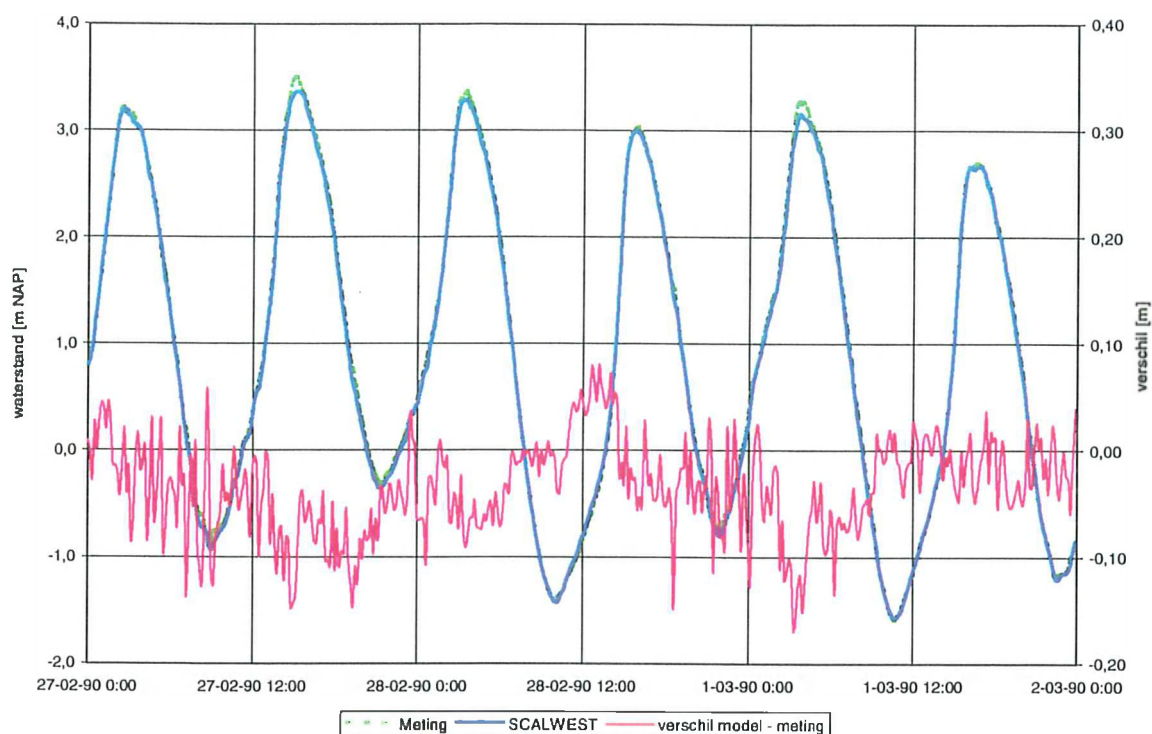
(c) suspensief transport [kg/m^3] ten gevolge van de secundaire langsstroming



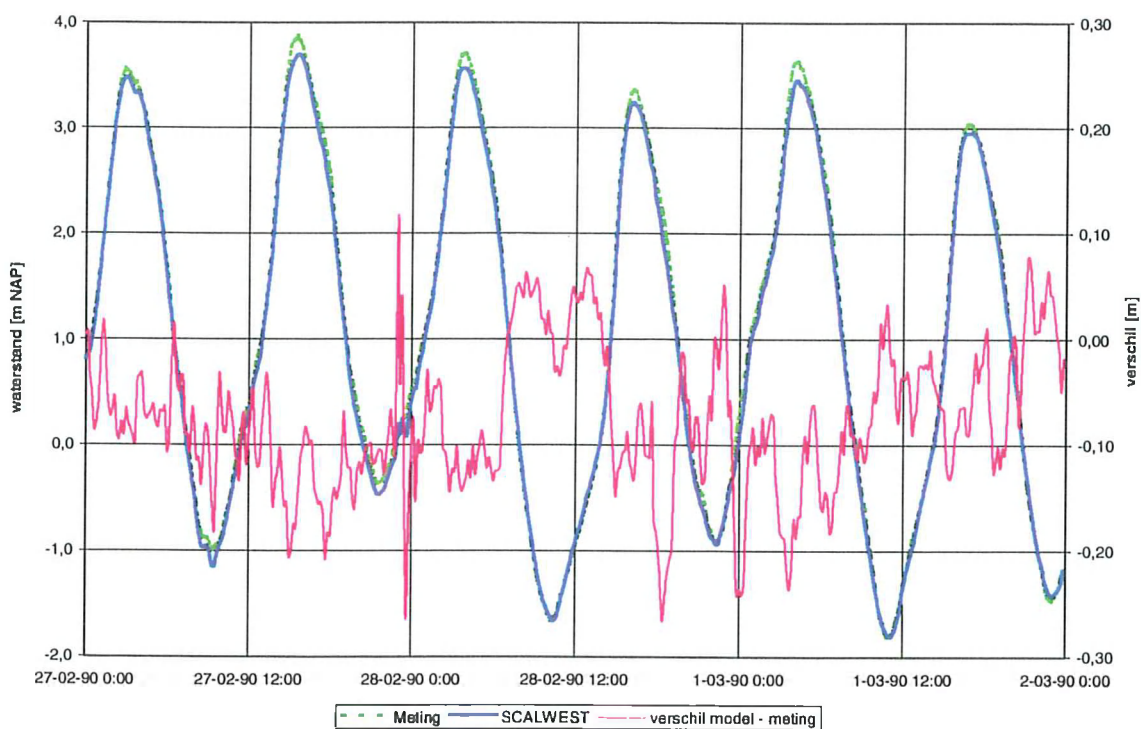
Bijlage 19. Toepassingen: waterstand tijdens extreme stormvloedomstandigheden

(a) waterstanden bij Westkapelle en Vlissingen op 27 en 28 februari en 1 maart 1990

Crocusstorm 1990 - Westkapelle

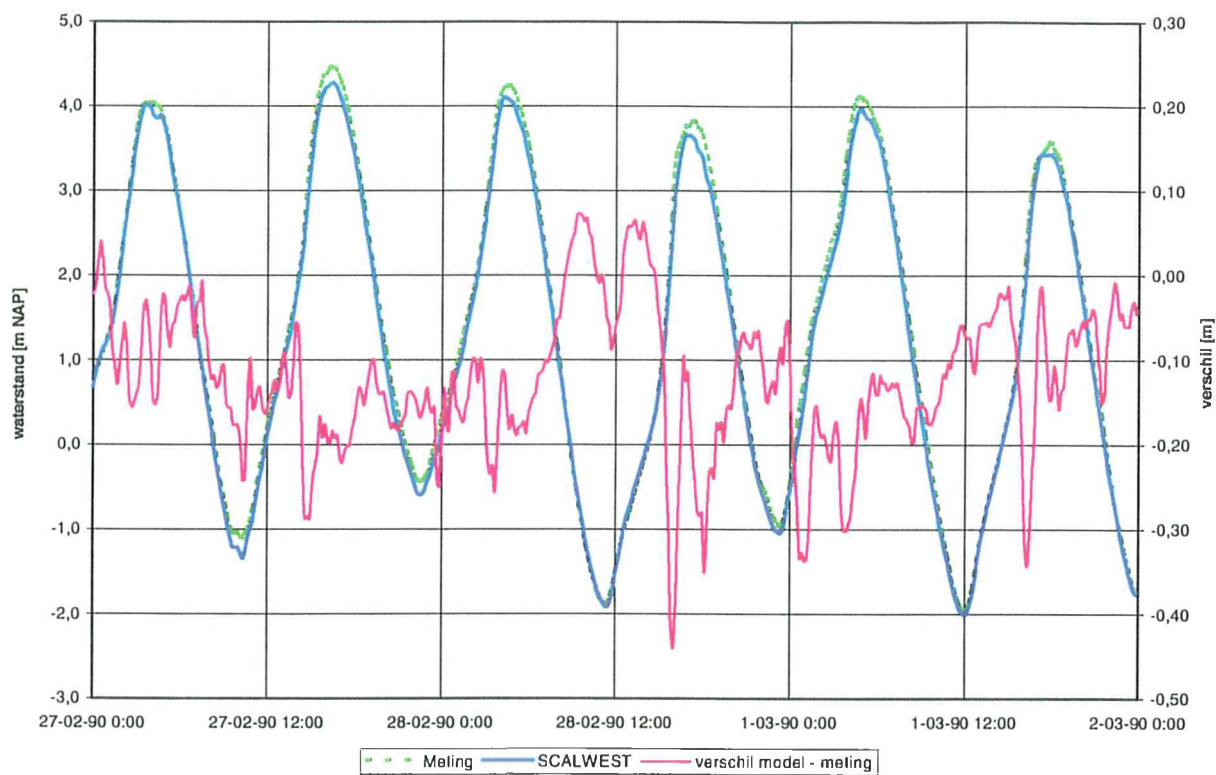


Crocusstorm 1990 - Vlissingen

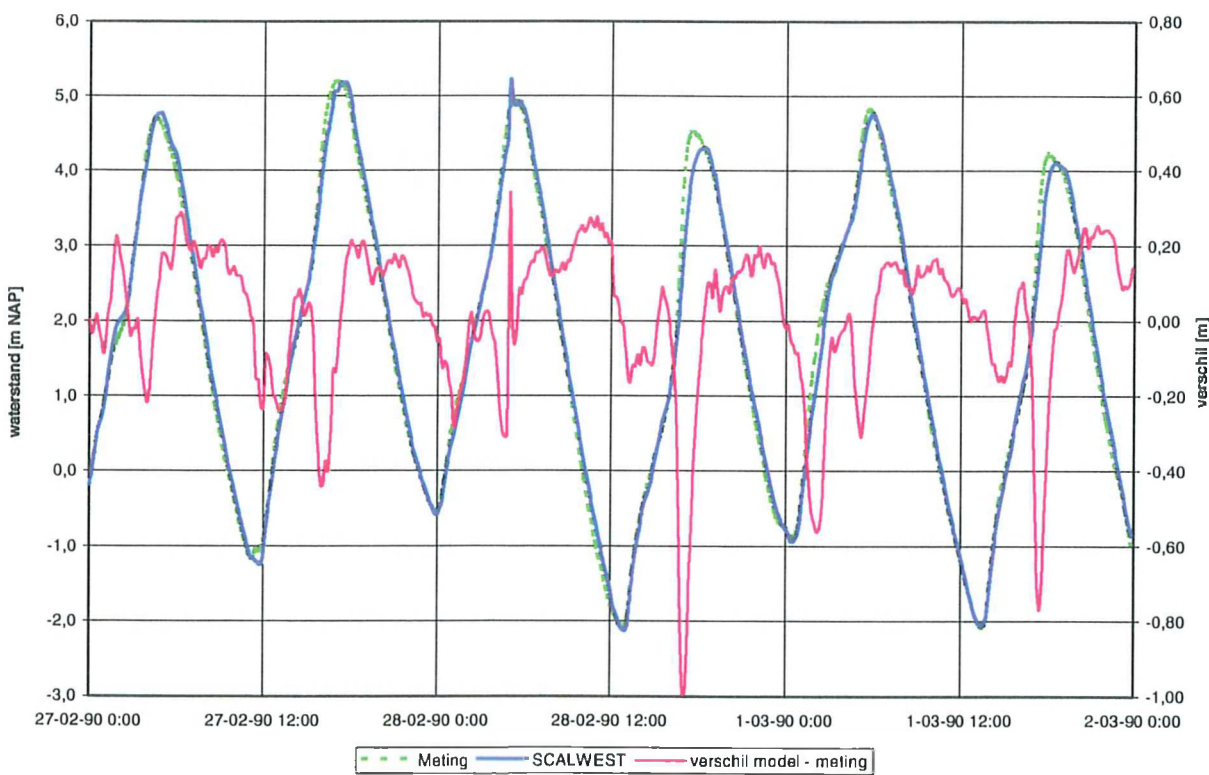


(b) waterstanden bij Hansweert en Antwerpen op 27 en 28 februari en 1 maart 1990

Crocusstorm 1990 - Hansweert

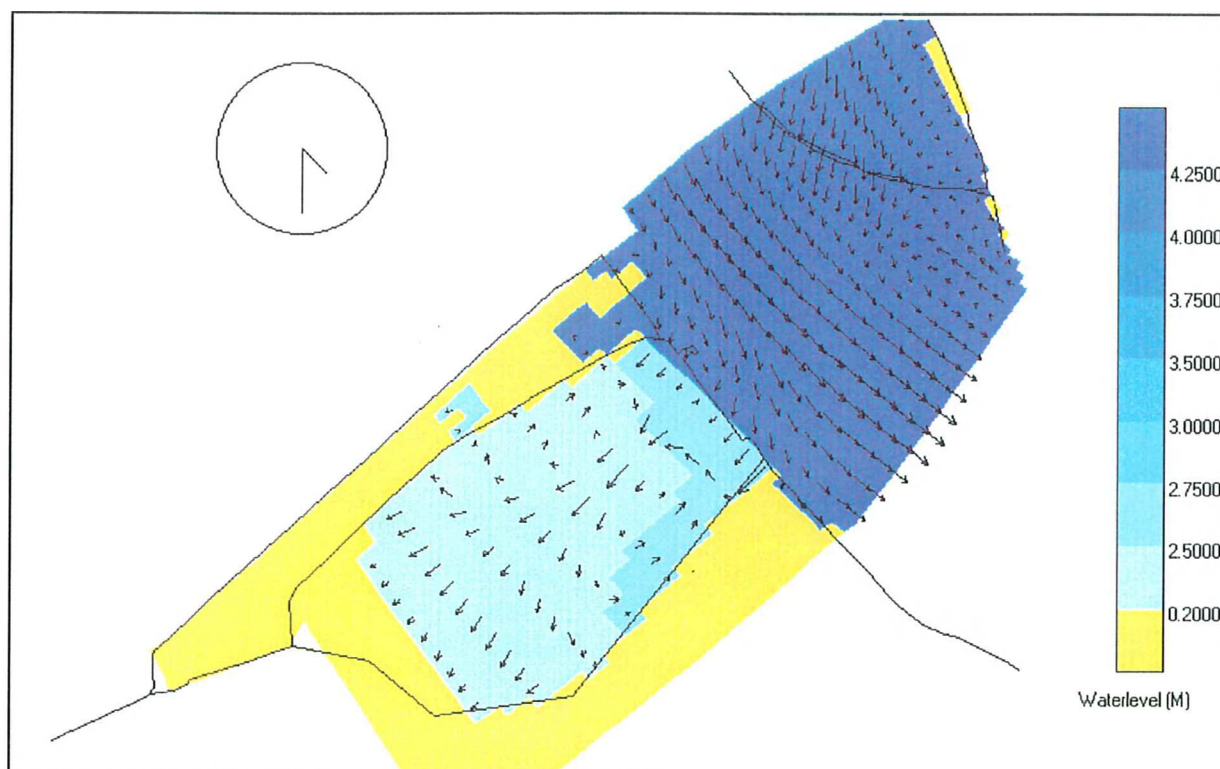
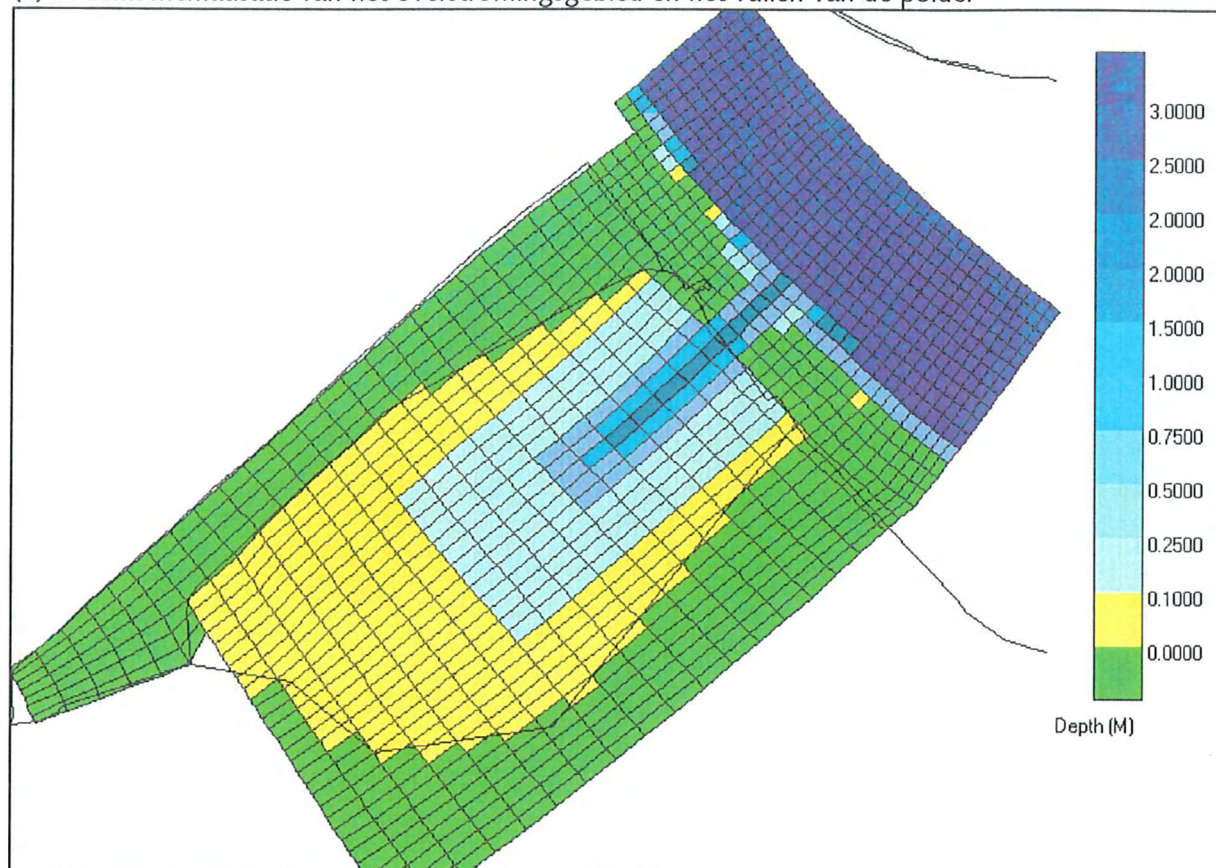


Crocusstorm 1990 - Antwerpen



Bijlage 20. Toepassingen: vullen en legen van een gecontroleerd overstromingsgebied bij de Nederlands/Belgische grens

(a) bodemschematisatie van het overstromingsgebied en het vullen van de polder



(b) de kentering van de stroming in de rivier en het legen van de polder

