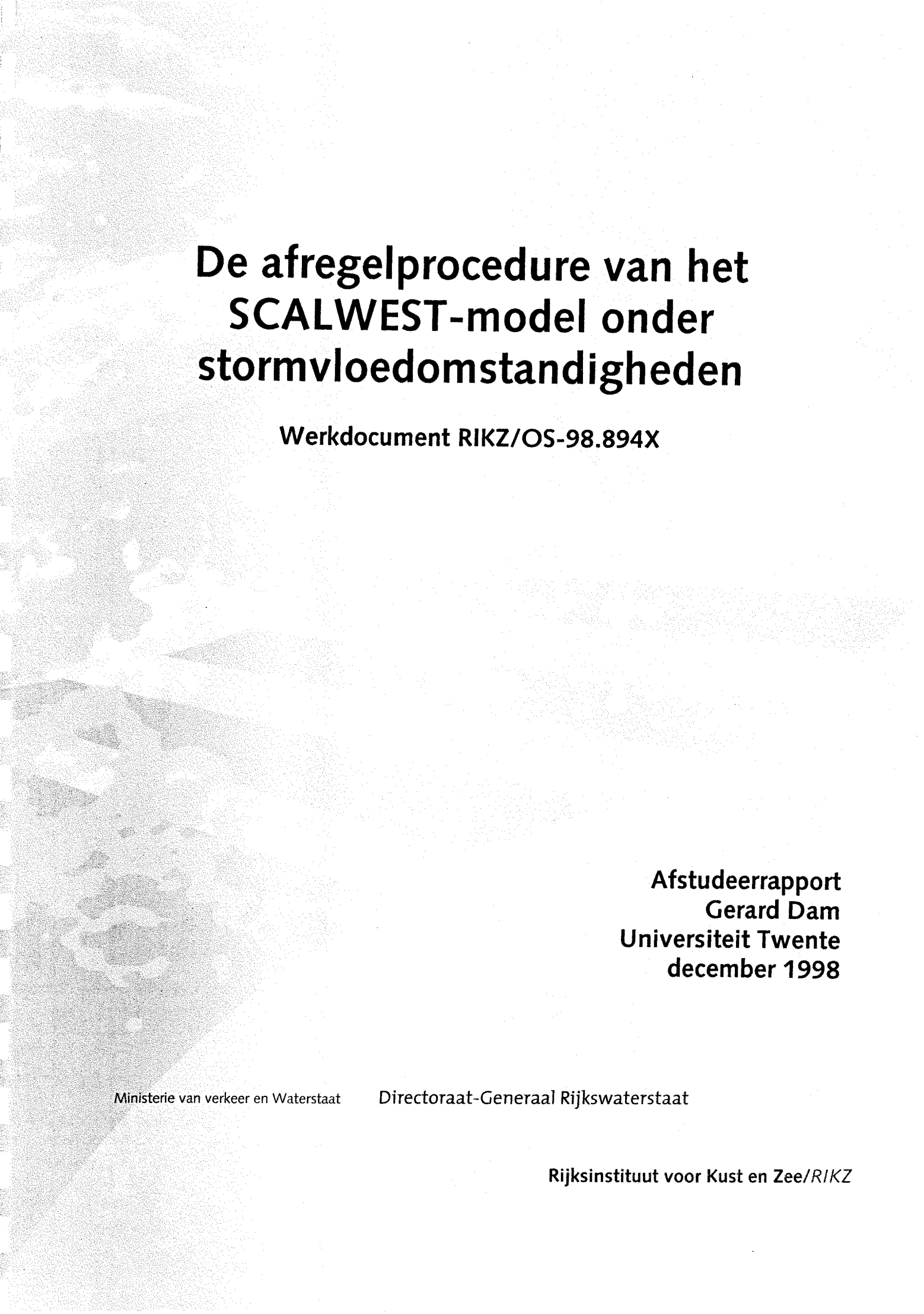




De afregelprocedure van het SCALWEST-model onder stormvloedomstandigheden

Werkdocument RIKZ/OS-98.894X

**Afstudeerrapport
Gerard Dam
Universiteit Twente
december 1998**

Ministerie van verkeer en Waterstaat

Directoraat-Generaal Rijkswaterstaat

Rijksinstituut voor Kust en Zee/RIKZ

De afregelprocedure van het SCALWEST-model onder stormvloedomstandigheden

Werkdocument RIKZ/OS-98.894X

Afstudeerrapport
Gerard Dam
Universiteit Twente
december 1998

Voorwoord

Dit verslag is geschreven als afstudeeropdracht van de opleiding Civiele Technologie & Management van de Universiteit Twente. Het is uitgevoerd bij het Rijksinstituut voor Kust en Zee (RIKZ) te Middelburg. Het probeert een antwoord te vinden op de vraag hoe het waterbewegingsmodel van de Westerschelde, SCALWEST genaamd, afgeregeld moet worden tijdens stormvloedomstandigheden, omdat tijdens een verificatie van het model tijdens stormvloed afwijkingen aan het licht kwamen.

Hierbij wil ik mijn afstudeercommissie bedanken: prof. dr. ir. C. B. Vreugdenhil (Universiteit Twente), dr. ir. J. S. Ribberink (Universiteit Twente) en drs. H. Verbeek (RIKZ). Verder wil ik bedanken ir. M. H. P. Jansen (Ingenieursbureau Svašek) en verder iedereen op het RIKZ die mij geholpen heeft.

Middelburg, december 1998

Samenvatting

Het SCALWEST-model is een 2Dh waterbewegingsmodel van de Westerschelde gebaseerd op WAQUA in SIMONA. Het bestaat uit een grof- en fijnmazig model. De modellen zullen voor verschillende doeleinden gebruikt gaan worden, onder andere voor de implementatie van beheersvraagstukken en de actuele voorspelling van waterstanden en stroomsnelheden. Het model is afgeregeld op een doottij en een gemiddeld springtij. Voor de verificatie van twee stormen kwamen afwijkingen aan het licht die onder normale omstandigheden niet voorkwamen. In dit rapport is gekeken hoe het SCALWEST-model moet worden afgeregeld onder stormvloedomstandigheden. Daartoe is eerst een eenvoudig getij-model van de Westerschelde gemaakt. Hiermee is inzicht verkregen in enkele parameters: bodemruwheid, diepte, lengte van het estuarium en windopzet.

Uit de run van het SCALWEST-model voor de Crocus-stormvloedperiode in 1990 blijkt dat er afwijkingen optreden. De hoogwaterstanden worden vrijwel altijd te laag berekend. De laagwaterstanden worden beter berekend. Een nader onderzoek naar de achterliggende oorzaken voor een betere afregeling is dus gerechtvaardigd.

Met het SCALWEST-grof model is een gevoeligheidsonderzoek uitgevoerd voor de stormvloedperiode in 1990. Uit dit onderzoek komt dat er gerekend moet worden met een variabel windveld om de resultaten te verbeteren. Uit het gevoeligheidsonderzoek blijkt verder dat het model gevoelig is voor de bodemruwheid en de windstresscoëfficiënt.

Als eerste is gerekend met een variabel windveld. De wind is aan de zeezijde vaak veel harder dan landinwaarts en dit heeft een groot effect op de opstuwing in de Westerschelde.

Uit de resultaten van de run met het variabele windveld blijkt dat er een verbetering plaatsvindt ten opzichte van run met de wind bij Hansweert, maar dat de hoogwaterstanden nog steeds te laag berekend worden. Dit is ook logisch omdat de run met wind bij de zeezijde (Vlakte van de Raan) al te lage hoogwaterstanden berekende. De laagwaterstanden worden overigens goed benaderd. De parameters van het windveld hebben weinig of geen invloed op de resultaten.

De afgeleide randvoorwaarde bij Zeebrugge is een andere bron van fouten. De afleiding vanuit het waterstandsstation Vlakte van de Raan is onder stormvloedomstandigheden niet geldig, zoals gebleken is uit een vergelijking van de afgeleide met de opgetreden waterstand voor een andere stormvloed.

De randvoorwaarde bij Zeebrugge is vervolgens aangepast door het verschil tussen de modeluitkomst (met het variabele windveld) en de meting bij Vlissingen bij de randvoorwaarde van Zeebrugge op te tellen. Uit de run met deze nieuwe randvoorwaarde blijkt dat de resultaten verbeteren. De hoogwaters worden beter benaderd, terwijl de laagwaters ongeveer gelijk blijven. Door een optimalisering van de randvoorwaarde kunnen de resultaten nog verder verbeterd worden. Er blijven dan echter wel afwijkingen in het middengedeelte van het model zitten.

Voor wat betreft de afregelprocedure van het SCALWEST-model kan de volgende werkwijze gehanteerd worden:

- | | |
|---|----------------|
| 1. (Fijn) Afregelen onder normale omstandigheden | Jansen, 1997a; |
| 2. (Ruw) Afregelen onder stormvloedomstandigheden | Dam, 1998; |
| 3. Afregelen m.b.v. wind en randvoorwaarden | Nog te doen. |

Omdat in de toekomst het onderzoek wordt voortgezet binnen het project NAUTILUS worden de volgende aanbevelingen gedaan voor het verbeteren van de resultaten onder stormvloedomstandigheden (stap 3 van de afregelprocedure):

- Omdat uit vorige onderzoek kwam dat de resultaten verslechterden met het gebruik van het variabele windveld, terwijl in dit onderzoek de resultaten verbeterden, is het wenselijk om verder te kijken naar de constructie van het variabele windveld.
- Een verbetering van de randvoorwaardeformulering bij Zeebrugge. Het is wenselijk om tijdens stormvloeden te rekenen met de gemeten waterstand bij Zeebrugge. Als deze metingen er niet zijn moet de afleiding vanuit de Vlakte van de Raan verbeterd worden. Als de Crocus-stormvloedperiode verder gebruikt gaat worden is het mogelijk om de randvoorwaarden met behulp van WAQAD of Kalman filtering te optimaliseren.
- Verder kan nog gekeken worden naar het gebruik van een knikfunctie. Dit houdt in dat de Cd-waarde afhankelijk wordt van de windsnelheid. Ook zou nog naar het afregeling van bodemruwheden per geul gekeken kunnen worden. Nu wordt er per sectie afgeregeld. In zo'n sectie zijn zowel platen, geulen, schorren etc. aanwezig.

Inhoudsopgave

1. INLEIDING.....	12
1.1 PROBLEEMSTELLING	12
1.2 PROBLEEMANALYSE	12
1.3 DOELSTELLING EN AFBAKENING	12
1.4 OPZET ONDERZOEK	13
1.5 OPZET VERSLAG	13
2. BESCHRIJVING VAN WAQUA.....	14
2.1 DE ONDIEPWATERVERGELIJKINGEN	14
2.2 HET WAQUA ROOSTER	15
3. DE SCALWEST-MODELLEN	16
3.1 GEBRUIK VAN HET SCALWEST-MODEL	16
3.1.1 <i>Aanleiding van de bouw van het SCALWEST-model.....</i>	16
3.1.2 <i>Het SCALWEST-model onder stormvloedomstandigheden.....</i>	16
3.2 BESCHRIJVING VAN DE SCALWEST-MODELLEN.....	17
3.2.1 <i>Uitgangspunten van het SCALWEST-model.....</i>	17
3.2.2 <i>Modelparameters.....</i>	17
3.2.3 <i>Beginvoorwaarden.....</i>	18
3.2.4 <i>Randvoorwaarden en windgegevens</i>	18
4. GEVOELIGHEIDSONDERZOEK MET HET GETIJ-MODEL.....	20
4.1 INLEIDING	20
4.2 HET GETIJMODEL	20
4.3 ANALYTISCHE BESCHRIJVING.....	21
4.4 GETIJ-MODEL: BASISRUN	23
4.5 GETIJ-MODEL: BODEMRUWHEID.....	23
4.6 GETIJ-MODEL: DIEPTE.....	23
4.7 GETIJ-MODEL: LENGTE.....	24
4.8 GETIJ-MODEL: WIND.....	24
4.9 CONCLUSIE VAN HET GEVOELIGHEIDSONDERZOEK MET HET GETIJ-MODEL	25
5. UITKOMST VAN HET SCALWEST-MODEL VOOR DE STORMVLOEDPERIODE	26
5.1 BESCHRIJVING VAN DE CROCUS-STORMVLOEDPERIODE	26
5.2 UITKOMST BASISRUN SCALWEST-FIJN MODEL	26
5.3 UITKOMST BASISRUN SCALWEST-GROF MODEL.....	27
5.4 CONCLUSIE	27
6. GEVOELIGHEIDSONDERZOEK MET HET SCALWEST-GROF MODEL VOOR DE CROCUS-STORMVLOEDPERIODE IN 1990.	28
6.1 WINDVELD.....	28
6.2 BODEMRUWHEID	28
6.3 WINDSCHUIFSPANNINGSCOËFFICIËNT	29
6.4 EDDY-VISCOSITEIT	30
6.5 DICHTHEID.....	30
6.6 ALFA-CHÉZY COËFFICIËNT.....	31
6.7 GROF- EN FIJNMAZIG MODEL	31
6.8 CONCLUSIE GEVOELIGHEIDSONDERZOEK SCALWEST-GROF	32
7. VARIABEL WINDVELD	34
7.1 INLEIDING	34
7.2 BESCHRIJVING PROCEDURE EN PARAMETERS	34
7.3 RESULTATEN.....	34
7.3.1 <i>Basisrun Variabel Windveld.....</i>	34
7.3.2 <i>Gevoeligheidsonderzoek parameters variabel windveld.....</i>	35
7.3.3 <i>Windstresscoëfficiënt.....</i>	36

7.3.4 10% <i>hardere wind</i>	36
7.4 CONCLUSIE	36
8. DE RANDVOORWAARDE BIJ ZEEBRUGGE.....	38
8.1 INLEIDING	38
8.2 VERGELIJKING AFGELEIDE EN OPGETREDEN WATERSTAND	38
8.3 WINDOPZET VAN STATIONS IN DE MOND VAN DE WESTERSCHELDE	38
8.4 AANPASSING VAN DE RANDVOORWAARDE BIJ ZEEBRUGGE	38
8.5 CONCLUSIE	39
9. DE AFREGELPROCEDURE.....	40
9.1 AFREGELPROCEDURE VAN HET SCALWEST-FIJN MODEL ONDER NORMALE OMSTANDIGHEDEN	40
9.2 AFREGELPROCEDURE VAN HET SCALWEST-MODEL ONDER STORMVLOEDOMSTANDIGHEDEN	40
9.3 WISKUNDIGE METHODE.....	40
9.4 CONCLUSIE	40
10. CONCLUSIE EN AANBEVELINGEN.....	42
10.1 CONCLUSIE	42
10.2 AANBEVELINGEN VOOR VERDER AFREGELEN VAN HET SCALWEST-MODEL VOOR STORMVLOEDEN	43
11. LITERATUURLIJST	46

Inhoudsopgave Bijlagen

Bijlage 1: Kaart van de Westerschelde met de gebruikte waterstand- en windstations.....	50
Bijlage 2: Diepte van de Westerschelde	51
Bijlage 3: Rooster van het SCALWEST-grof model	52
Bijlage 4: Rooster van het SCALWEST-fijn model	53
Bijlage 5: De 25 hoogste stormvloeden sinds 1825	55
Bijlage 6: Getij-model: Bodemruwheid.....	56
Bijlage 7: Getij-model: Bodemruwheid.....	57
Bijlage 8: Getij-model: Samenvatting bodemruwheid	58
Bijlage 9: Getij-model: Diepte.....	59
Bijlage 10: Getij-model: Diepte.....	61
Bijlage 11: Getij-model: Samenvatting diepte.....	62
Bijlage 12: Getij-model: Lengte	63
Bijlage 13: Getij-model: Lengte	64
Bijlage 14: Getij-model: Samenvatting lengte.....	65
Bijlage 15: Getij-model: Wind	66
Bijlage 16: Getij-model: Wind	67
Bijlage 17: Getij-model: Samenvatting wind	68
Bijlage 18: Getij-model: Windopzet.....	69
Bijlage 19: Getij-model: Windstoot.....	70
Bijlage 20: Analytische berekeningen.....	72
Bijlage 21: Opgetreden en astronomisch getij bij Vlissingen tijdens de Crocus-stormvloedperiode	73
Bijlage 22: Windgegevens tijdens de Crocus-stormvloedperiode.....	74
Bijlage 23: Basisrun: Uitkomst SCALWEST-fijn model.....	75
Bijlage 24: Basisrun: Uitkomst SCALWEST-grof model	78
Bijlage 25: Basisrun: Verschillen hoog-en laagwaterstanden van SCALWEST-grof	79
Bijlage 26: Basisrun: Opstuwing bij Bath met SCALWEST-grof	81
Bijlage 27: Basisrun: Gemiddelde afwijking en standaarddeviatie	82
Bijlage 28: Gevoeligheidsonderzoek: Bodemruwheid.....	83
Bijlage 29: Gevoeligheidsonderzoek: Windstresscoëfficiënt	84
Bijlage 30: Gevoeligheidsonderzoek: Maximale waterstanden bij verschillende windstresscoëfficiënten	85
Bijlage 31: Gevoeligheidsonderzoek: Eddy-viscositeitscoëfficiënt	86
Bijlage 32: Gevoeligheidsonderzoek: Zoutvelden	87
Bijlage 33: Gevoeligheidsonderzoek: Dichtheid	88
Bijlage 34: Gevoeligheidsonderzoek: Alfa-chézy-coëfficiënt	89
Bijlage 35: Gevoeligheidsonderzoek: Randvoorwaarden.....	90
Bijlage 36: Gevoeligheidsonderzoek: Grof- en fijnmazig model	91
Bijlage 37: Var. windveld: Windvelden met verschillende σ_0	93
Bijlage 38: Var. windveld: Windvelden met verschillende frac_{div}	95
Bijlage 39: Var. windveld: Uitkomsten SCALWEST-fijn.....	97
Bijlage 40: Var. windveld: Verschillen hoog-en laagwaterstanden.....	100
Bijlage 41: Var. windveld: Gemiddelde afwijking en standaarddeviatie	102
Bijlage 42: Var. windveld: Gemiddelde afwijking en standaarddeviatie van de runs boven 2,5 m+NAP103	102
Bijlage 43: Var. windveld: Gemiddelde afwijking en standaarddeviatie van de runs beneden 0 m NAP104	105
Bijlage 44: Var. windveld: Windstresscoëfficiënt = 0,0030	105
Bijlage 45: Var. windveld: 10% hardere wind	106
Bijlage 46: Aangepaste randvoorwaarde: Afgeleide en werkelijke waterstand bij Zeebrugge voor 26-29 augustus 1996.....	107
Bijlage 47: Aangepaste randvoorwaarde: Opzet van verschillende stations in de mond van de Westerschelde	108
Bijlage 48: Aangepaste randvoorwaarde: Uitkomst SCALWEST-fijn	109
Bijlage 49: Aangepaste randvoorwaarde: Verschillen hoog-en laagwaterstanden	110
Bijlage 50: Aangepaste randvoorwaarde: Gemiddelde afwijking en standaarddeviatie.....	112

1. Inleiding

1.1 Probleemstelling

Ter ondersteuning van het beleid van de Westerschelde zijn er in de afgelopen jaren numerieke stromingsmodellen ontwikkeld gebaseerd op WAQUA/SIMONA. De nieuwste 2Dh modellen van de Westerschelde zijn ontwikkeld door ingenieursbureau Svašek B.V. in opdracht van het Rijksinstituut voor Kust en Zee (RIKZ) te Middelburg en hebben de naam SCALWEST gekregen.

Er is zowel een grofmazige als een fijnmazige versie ontwikkeld (Jansen, 1997a). De grofmazige versie is een uitdunning van het fijne model met een factor 3 en is ontwikkeld om snelle berekeningen te kunnen maken. Een verdere beschrijving van WAQUA en het SCALWEST-model volgt respectievelijk in hoofdstuk 2 en 3. Het SCALWEST-model is gecalibreerd op een doottij en een springtij en geverifieerd voor een gemiddeld getij en 2 stormvloed. Tijdens de verificatie met de 2 stormen kwamen afwijkingen aan het licht (Jansen 1997a). Een onderzoek naar de reproductie nauwkeurigheid van de modellen onder stormvloedcondities is dus gerechtvaardigd. De vraag is hoe de modellen afgeregeld moeten worden onder stormvloedomstandigheden, omdat de modellen nu afgeregeld zijn voor gemiddelde omstandigheden (een doottij en een springtij).

De probleemstelling is dus:

Hoe moeten de SCALWEST-modellen afgeregeld worden onder stormvloedomstandigheden?

1.2 Probleemanalyse

Bij het verifiëren van het SCALWEST-model voor twee gemiddelde stormvloed kwamen afwijkingen aan het licht, die onder normale omstandigheden niet voorkwamen (Jansen, 1997a en 1998c). Voor de eerste verificatie die plaatsvond met de periode 28-29 augustus 1996 werden de gemeten waterstanden door het model niet goed weergegeven. De verschillen tussen het model en de metingen liepen op van 30 tot 40 cm. De tweede verificatie, voor de periode 28-29 oktober 1996, liet minder grote afwijkingen zien. De verschillen in deze periode liepen op tot maximaal 10 cm. Als reden voor de grote afwijkingen in de augustusstorm wordt genoemd dat de wind sterk varieerde over het gebied tijdens de periode, terwijl in het model voor de modellering van de wind een tijdreeks genomen wordt van een windstation. Hierbij wordt de wind per tijdstap uniform over het gebied opgelegd. In de oktoberstorm varieerde de wind minder en waren de afwijkingen in de waterstanden ook minder.

Zie onderstaande tabel voor de gemiddelde afwijkingen en de standaardafwijking van de gebruikte perioden (bepaald over de gehele periode).

	gem. afwijking Augustus 1996 (m)	standaardafwijking Augustus 1996 (m)	gem. afwijking Oktober 1996 (m)	standaardafwijking Oktober 1996 (m)
Cadzand	-0.08	0.09	-0.02	0.07
Vlissingen	-0.10	0.09	-0.06	0.06
Terneuzen	-0.05	0.11	-0.06	0.07
Hansweert	-0.06	0.11	-0.03	0.08
Baalhoek	0.01	0.17	-0.04	0.08
Bath	0.08	0.21	0.02	0.10
Antwerpen	0.37	0.27	0.13	0.09

Tabel 1-1: Gemiddelde afwijkingen en standaarddeviatie van de waterstand voor de twee stormen (Jansen, 1997a)

In een later stadium is besloten deze stormen met variabele windvelden door te rekenen om te kijken of de resultaten beter zouden worden (Jansen, 1998c). Uit deze studie blijkt dat de resultaten door het gebruik van een variabel windveld slechter worden, terwijl juist het tegenovergestelde verwacht werd. Hierop zal later nog teruggekomen worden.

1.3 Doelstelling en afbakening

De doelstelling van deze studie kan als volgt geformuleerd worden:

Een afregelprocedure ontwikkelen voor het SCALWEST-model onder stormvloedcondities.

Belangrijke deelvragen die daarbij moeten worden beantwoord zijn:

- Wat zijn de belangrijkste parameters in het model? (Voor welke parameters is het model gevoelig?)
- Hoe nauwkeurig is het model onder stormvloedcondities en welke factoren / parameters zijn verantwoordelijk voor de afwijkingen?
- Op welke wijze kan het model afgeregeld worden?

Er worden de volgende beperkingen opgelegd aan het onderzoek:

- Er worden alleen 2Dh WAQUA modellen gebruikt van de Westerschelde. Deze zijn: SCALWEST-grof en SCALWEST-fijn. Het onderzoek richt zich op beide modellen.
- Er wordt niet met het automatisch afregelen van modellen gerekend, de zogenaamde adjoint methode. Binnen WAQUA heet deze methode WAQAD (WAQUA-adjoint). Voor een verdere beschrijving van deze methode zie onder andere Hoofdstuk 10 en Mooij (1996).
- Mogelijke afregelparameters voor het SCALWEST-model zijn: bodemruwheid, viscositeitscoëfficiënt, alfa-chézy coëfficiënt, initieel zoutveld, randvoorwaarden en windschuifspanningscoëfficiënt. Ook kan nog naar een variabel windveld gekeken worden. Numerieke parameters zoals de tijdstap worden in dit onderzoek niet bekeken.
- Er zal alleen gekeken worden naar de Westerschelde en naar de Zeeschelde tot aan Antwerpen.
- Er wordt alleen naar waterstanden gekeken en niet naar stroomsnelheden, omdat dit de belangrijkste parameter is en omdat hiervan metingen beschikbaar zijn.
- Er wordt gerekend met een stormvloedperiode in 1990.

De afwijking onder normale omstandigheden bedraagt ongeveer 5 cm. Tijdens stormvloeden wordt gesteld dat de maximale afwijking 10 cm mag bedragen (Zie ook hoofdstuk 3).

1.4 Opzet onderzoek

De doelstelling van dit onderzoek is een afregelprocedure te ontwikkelen voor het SCALWEST-model onder stormvloedomstandigheden. In dit rapport zal op een bepaalde manier geprobeerd worden het model af te regelen. Aan het eind zal deze methode geëvalueerd worden om te kijken of andere modellen ook op deze manier afgeregeld kunnen worden.

Vanuit een fysische benadering wordt geprobeerd het model af te regelen, dat wil zeggen dat alle processen die tijdens stormvloeden mogelijk een rol spelen in de waterbeweging worden bekeken. Dit zal gedaan worden in twee stappen:

1. Aan de hand van een gevoeligheidsonderzoek met een eenvoudig model van de Westerschelde. Dit wordt gedaan om een eerste inzicht te krijgen in de dominante processen;
2. Aan de hand van een gevoeligheidsonderzoek met het SCALWEST-grof model voor een uitgekozen stormvloedperiode. Dit wordt gedaan om inzicht te krijgen in de processen die verantwoordelijk zijn voor de afwijkingen.

Op basis van de uitkomsten kunnen nu voorstellen gedaan worden om de modelresultaten te verbeteren. Vervolgens wordt het model met deze aanpassingen opnieuw doorgerekend om te kijken of de resultaten verbeteren.

De gevolgde methode zal vergeleken worden met de wiskundige methode. Hierbij wordt ook ingegaan op het nut van een eenvoudig model voor het afregelen van modellen.

1.5 Opzet verslag

De opzet van het verslag is als volgt: In hoofdstuk 2 wordt het simulatiesysteem WAQUA beschreven. Hoofdstuk 3 beschrijft de SCALWEST-modellen. In hoofdstuk 4 wordt het gevoeligheidsonderzoek van het eenvoudige getij-model behandeld. Hoofdstuk 5 behandelt de uitkomsten van het model voor de gebruikte stormvloedperiode. In hoofdstuk 6 wordt het gevoeligheidsonderzoek van het SCALWEST-grof model onder stormvloedomstandigheden beschreven en concludeert welke parameters verantwoordelijk zijn voor de grootste afwijkingen, hierbij wordt aangegeven wat hieraan te doen. Hoofdstuk 7 behandelt het eerste voorstel: het rekenen met een variabel windveld. In hoofdstuk 8 wordt gekeken naar de randvoorwaarde bij Zeebrugge. Hoofdstuk 9 behandelt de optimale afregelprocedure van het SCALWEST-model onder stormvloedomstandigheden. In hoofdstuk 10 volgt de conclusie en de aanbevelingen.

2. Beschrijving van WAQUA

WAQUA is een onderdeel van het Rijkswaterstaat modelleninstrumentarium SIMONA (Simulatie MOdellen voor de NATte waterstaat). Het is een simulatiesysteem dat zowel voor de simulatie van de waterbeweging als de waterkwaliteit gebruikt kan worden. Het is mogelijk om zowel stationaire als niet-stationaire stromingen, transporten van opgeloste stoffen en sediment, verdelingen van temperatuur en zoutconcentratie te berekenen (Praagman, 1996).

2.1 De ondiepwatervergelijkingen

De basis van WAQUA bestaat uit een rekenhart die de ondiepwatervergelijkingen numeriek oplost. De ondiepwatervergelijkingen bestaan uit de volgende partiële differentiaal vergelijkingen (EDS, 1996):

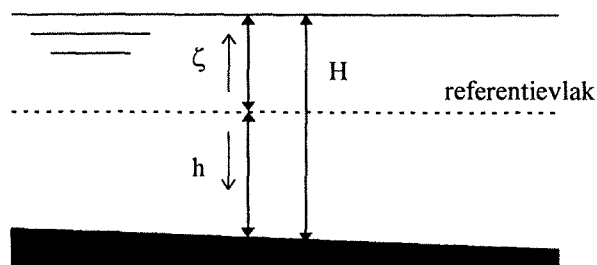
$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} - fu + g \frac{\partial \zeta}{\partial x} + gu \frac{\sqrt{u^2 + v^2}}{C^2(h + \zeta)} = \frac{\rho_a C_d W_x \sqrt{W_x^2 + W_y^2}}{\rho_w(h + \zeta)} + v \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) + \frac{1}{2} g \frac{H}{\rho_w} \frac{\partial \rho_w}{\partial x} \quad (2.1)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + fv + g \frac{\partial \zeta}{\partial y} + gv \frac{\sqrt{u^2 + v^2}}{C^2(h + \zeta)} = \frac{\rho_a C_d W_y \sqrt{W_x^2 + W_y^2}}{\rho_w(h + \zeta)} + u \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) + \frac{1}{2} g \frac{H}{\rho_w} \frac{\partial \rho_w}{\partial y} \quad (2.2)$$

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(Hu) + \frac{\partial}{\partial y}(Hv) = 0 \quad (2.3)$$

Waarin:

u, v	= Snelheidscomponenten van de diepte gemiddelde snelheid $\bar{u}$	[m/s]
ζ	= Waterstand boven referentievlak (Zie Figuur 2-1)	[m]
h	= Waterdiepte onder referentievlak	[m]
H	= $h + \zeta$	[m]
f	= Coriolis parameter	[s ⁻¹]
g	= Zwaartekrachtsversnelling	[ms ⁻²]
C	= Chézy-coëfficiënt (bodemruwheid)	[m ^{1/2} s ⁻¹]
W_x, W_y	= Componenten van de windsnelheid op het wateroppervlak $\bar{W}$	[m/s]
C_d	= Wind drag coëfficiënt	[-]
ρ_a, ρ_w	= Dichtheid van lucht en water	[kg m ⁻³]
ν	= Eddy-viscositeitscoëfficiënt	[m ² s ⁻¹]



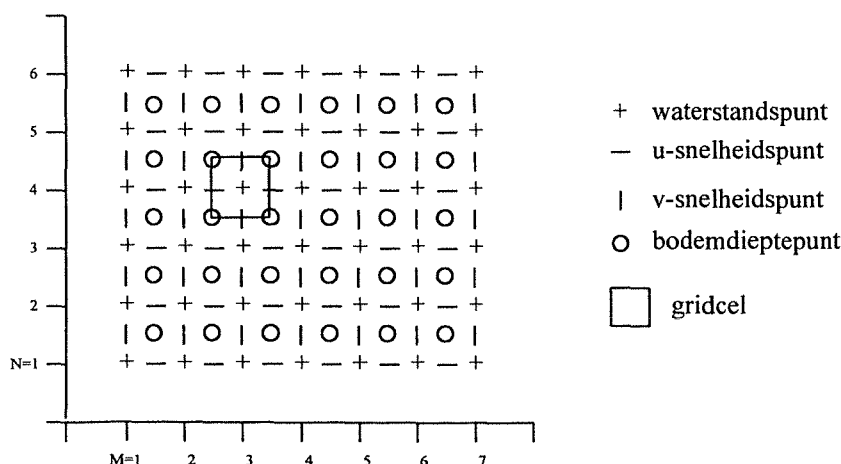
Figuur 2-1: Waterdieptes

De waterbeweging wordt mathematisch beschreven door de ondiepwatervergelijkingen in een gebied waarin de horizontale afmetingen vele malen groter zijn dan de verticale. In de Westerschelde is de maximale diepte ca. 35 meter, en de breedte 4 km. Er mag dus aangenomen worden dat de vergelijkingen geldig zijn voor dit gebied. Deze partiële differentiaalvergelijkingen geven voor elk punt in een gebied en op elk tijdstap aan wat de relatie is tussen de onbekende grootheden u , v en ζ . De u -en v -snelheden worden gemiddeld bepaald over de diepte.

2.2 Het WAQUA rooster

WAQUA benadert de waterbeweging in een bepaald gebied van interesse. Het gebied wordt schematisch weergegeven door middel van een rooster. Dit zijn kolomvormige volumes, waar door de randen water in en uit kan stromen.

De punten voor waterstand, diepte, u-snelheid en v-snelheid liggen verschoven ten opzichte van elkaar. Dit heet een versprongen rooster (staggered grid). Dit heeft voordelen ten opzichte van een niet-versprongen grid, zoals minder berekeningen, randvoorwaarden zijn eenvoudiger op te leggen en bepaalde oscillaties treden niet op (Stelling, 1984).



Figuur 2-2: Het WAQUA-rooster

De vergelijkingen die moeten worden opgelost met behulp van dit grid, impliceren een groot stelsel niet lineaire vergelijkingen. Voor WAQUA is een gewijzigde vorm toegepast, die bekend staat onder de naam ADI (Alternating Direction Implicit). Bij de ADI methode worden per tijdstap eerst alle u-snelheden opgelost en daarna alle v-snelheden. Het voordeel van deze methode is dat het model onvoorwaardelijk stabiel blijft, terwijl de hoeveelheid rekenwerk per punt sterk verminderd wordt. Het voert te ver om dieper op deze methode in te gaan (zie hiervoor Stelling 1984).

3. De SCALWEST-modellen

3.1 Gebruik van het SCALWEST-model

3.1.1 Aanleiding van de bouw van het SCALWEST-model

Naar aanleiding van de voorgenomen verdieping van de Westerschelde is in 1996 besloten om een plan te maken om de mogelijke wijzigingen in de waterbeweging te kunnen volgen en achteraf te beoordelen (Verbeek, 1996). De bouw van het SCALWEST-model is hier een onderdeel van. De waterbeweging kan op basis van de bodemligging van 1996 (zie Bijlage 2) gereconstrueerd worden. Na de uitvoering van de verdieping zal er een nieuwe bodemschematisatie gemaakt worden. Hiermee kunnen dan hypothesen getoetst worden die opgesteld zijn in het kader van het project MOVE (MONitoring VERdieping Westerschelde). Het model zal gebruikt worden indien men geen metingen heeft om de hypothesen te toetsen (van Kleef, 1997).

Naast de waterbeweging is er behoefte aan een koppeling van de waterbeweging met sedimenttransport en morfologische ontwikkelingen. Fysische processen zoals bochtstroming, divergentie/convergentie op drempels kunnen gedetailleerd berekend worden door het fijnmazige model. Ook is een 3D model van het oostelijk gedeelte van de Westerschelde gebouwd onder de naam TRISCAL om een beter beeld van de maatgevende processen te verkrijgen (Jansen 1997b en 1998a).

Hiernaast zal het SCALWEST-model ook gebruikt gaan worden voor andere onderzoeks- en beleidsvragen. Hierbij moet men denken aan:

- Bepalen van de invloed van maatregelen zoals:
 - Bagger- en stortwerkzaamheden;
 - Gecontroleerde overstromingsgebieden;
 - De stormvloedkering bij Oosterweel in de Zeeschelde.
- Bepalen van basispeilen voor de Westerschelde.
- Het on-line voorspellen van de waterstand door het Hydro Meteo Centrum Zeeland (HMCZ) met het SCALWEST-grof model.

3.1.2 Het SCALWEST-model onder stormvloedomstandigheden

Uit bovenstaande opsomming blijkt dat het model ook gebruikt zal gaan worden voor stormvloedomstandigheden. Onzekerheden in de uitkomst van het model kunnen gevolgen hebben voor het beleid. Een voorbeeld hiervan is het rapport van Schaap (1998). Hierin is een onderzoek gedaan naar Gecontroleerde Overstromings Gebieden (GOG). Hiertoe is de Hedwige polder geschematiseerd en toegevoegd aan het SCALWEST-fijn model als gecontroleerd overstromingsgebied. Vervolgens is een stormvloed doorgerekend (overigens dezelfde stormvloed als in dit rapport). Uit de uitkomsten blijkt dat er door het toevoegen van het GOG een verlaging van de waterstand optreedt van een aantal centimeters, meer dan bij een normale ontpoldering. Een van de aanbevelingen van het rapport is om het model af te regelen onder stormvloedomstandigheden om zodoende de resultaten van het onderzoek te verbeteren.

Het HMCZ van de Directie Zeeland zal voorspellingen gaan doen met het SCALWEST-grof model voor wat betreft waterstanden en stroomsnelheden. Het SCALWEST-grof model moet het SCALDIS400 model (de voorloper van het SCALWEST-grof model) uiteindelijk gaan vervangen (Jansen, 1997a). Het is de bedoeling dat het model on-line wordt gevoed met waterstandsgegevens van de rand en dan per 10 minuten wordt bijgewerkt, op basis hiervan wordt er een voorspelling uitgegeven (o.a. voor schepen). In het model zijn zes punten gekozen waar de stroomsnelheid wordt bepaald, onder andere bij de Sloehaven. Loodsen hebben belang bij deze on-line voorspelling van de stroomsnelheid.

Een andere toepassing van het model is dat er minimaal 3 keer per dag een voorspelling gedaan wordt van de waterstanden. Het model rekent hierbij 24 uur vooruit. Tijdens stormvloeden kan dit aantal voorspellingen oplopen. De modellen worden gevoed met waterstands- en windgegevens op basis van de verwachtingen van o.a. het KNMI. In de toekomst zal dit misschien vervangen gaan worden door uitkomsten van het CSM (Continental Shelf Model) en of KUSTSTROOK model. Het HMCZ waarschuwt de Stormvloedwaarschuwingsdienst (SVSD) als er waterstandsverhogingen in de regio Zeeland worden voorspeld, ook waarschuwt men bedrijven, overheden en waterschappen als de situatie kritiek wordt. De

afdeling Maritieme Schelde baseert zijn waarschuwingen voor de regio Antwerpen op de voorspellingen van het HMCZ.

Voor wat betreft de reproductienauwkeurigheid van het SCALWEST-model zijn er nog geen duidelijke afspraken gemaakt. In principe gaat men ervan uit dat het model de waterstanden en de stroomsnelheden zo goed mogelijk moet weergeven. Het RIKZ stelt vervolgens de nauwkeurigheid van het model vast. In het beleid en bij het HMCZ wordt vervolgens van deze nauwkeurigheid uitgegaan.

Tijdens de afregeling en de verificatie van het SCALWEST-model is gebleken dat onder normale omstandigheden de gemiddelde afwijking ongeveer 5 cm bedraagt (Jansen, 1997a). Een gemiddelde afwijking van 10 cm tijdens stormvloedomstandigheden moet dan haalbaar zijn (persoonlijke communicatie met H. Verbeek). Bij het vooruit voorspellen van de waterstand door het HMCZ zullen deze marges uiteraard groter worden, doordat de randvoorwaarde zelf een voorspelling is.

Wat de schade en of het risico is van een centimeter betere voorspelling van het model kan men moeilijk aangeven. Hieraan is ook nog geen aandacht besteed binnen het RIKZ.

Andere WAQUA modellen van de Nederlandse kust (RIJMAMO-model, KUSTSTROOK-model, Continental Shelf Model (CSM)) hebben ook met deze problematiek te maken. De beslissing om de stormvloedkering in de Nieuwe Waterweg te sluiten wordt gebaseerd op berekeningen met het WAQUA model van de Nederlandse kust. Een goede voorspelling is essentieel, omdat bij een foutieve voorspelling de gevolgen groot kunnen zijn. Bij het onterecht sluiten van de kering lijdt de scheepvaart economische schade en bij het niet sluiten van de kering, terwijl dit wel had moeten zijn de schade nog groter. Er is afgesproken dat het model binnen 15 cm de waterstand nauwkeurig moet kunnen voorspellen. Het gehele beleid is hierop gebaseerd. Als deze marge groter was geweest, dan had men een andere kering/sluitingsprocedure moeten ontwerpen.

3.2 Beschrijving van de SCALWEST-modellen

De SCALWEST-modellen zijn modellen van de Westerschelde gebaseerd op WAQUA in SIMONA. De SCALWEST-modellen bestaan uit een grof model en een fijn model. De SCALWEST-modellen omvatten de Westerschelde vanaf de Zeebrugge/Vlakte van de Raan/Westkapelle tot Gent (Zie Bijlage 1, 2, 3 en 4). De modellen hebben een kromlijng rooster, omdat hiermee de waterbeweging in de geulen beter berekend kan worden dan een rechtlijnig rooster. De gebruikte versie van het grofmazige model heeft de Zeeschelde vanaf de Rupelmonde (voorbij Antwerpen) geschematiseerd als een rechte bak. In de definitieve versie is de Zeeschelde kromlijng en realistisch tot Gent voor zowel het grofmazige als het fijnmazige model. De bodemdiepte is bepaald uit ARC/Info gegevens van de Westerschelde uit 1996, welke met behulp van lodingen bepaald zijn. Het grofmazige model is een uitdunning van het fijne model met een factor 3. Dit grofmazig model is gebouwd om snel berekeningen te doen, bijvoorbeeld ten behoeve van de scheepvaart bij het Hydro Meteo Centrum Zeeland (Jansen, 1997a).

3.2.1 Uitgangspunten van het SCALWEST-model

Voor de bouw van WAQUA modellen van de Nederlandse kust zijn een aantal uitgangspunten vastgelegd, hierdoor ontstaat meer samenhang tussen de modellen. De uitgangspunten zijn:

- Het gebruik van een kromlijng of curvilineair rooster;
- Onderlinge sluiting van de modellen naar de kust toe met telkens een verdichting van 1:3;
- 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.

3.2.2 Modelparameters

Het fijne model heeft 83000 roosterpunten en het grofmazige model heeft 9000 roosterpunten. De roosterafstand varieert van het fijne model in breedterichting van 10 m tot 400 m en in lengterichting van 40 m tot 700 m. Een periode van 24 uur kan met het SCALWEST-grof model in 20 minuten berekend worden, het SCALWEST-fijn model doet hier 4 uur over. De tijdstap is 0,5 min in het SCALWEST-fijn model en 1 min in het SCALWEST-grof model. De viscositeitscoëfficiënt is op 1 m²/s gezet. Er is gekozen voor een gemiddelde droogvalprocedure, omdat dit het model stabielier maakt dan dat gebruik wordt gemaakt van een maximale droogvalprocedure.

Er kan nog een α -chézy coëfficiënt gedefinieerd worden om de invloed van driedimensionale stroming ten gevolge van de zoet-zout gradient mee te nemen, de bodemruwheid wordt dan afhankelijk van de saliniteit. In het huidige SCALWEST-model is dit niet gebruikt, maar tijdens het gevoeligheidsonderzoek is hiermee wel gerekend. Zie Appendix 1 voor een beschrijving van de α -chézy coëfficiënt.

Het grofmazige model heeft naast de bodemruwheid en een andere bodemdimensionering dezelfde parameters als het fijne model. Voor de verschillende trajecten in de Westerschelde zijn de volgende bodemruwheden (Manning) bepaald voor het nieuwe fijne model (Jansen, 1998b):

Traject	n (m ^{-1/3} s)
Voordelta-Vlissingen	0,022
Vlissingen-Overloop van Hansweert	0,026
Overl.Hansweert- Baalhoek	0,0265
Baalhoek - Bath	0,0252
Bath - grens	0,024
grens- Antwerpen	0,024
Antwerpen-Rupelmonde	0,024
Rupelmonde- Dendermonde	0,022
Dendermonde-Gent	0,0253
Rupel/Zenne/Dijle/Nete	0,024

Tabel 3-1: Bodemruwheden

De Chézy-waarde wordt op elk gridpunt berekend volgens de volgende formule (EDS, 1996):

$$C = \frac{H^{\frac{1}{6}}}{n} \quad (3.1)$$

waarin:

C	= Chézy coëfficiënt	[m ^{1/2} / s]
H	= Diepte	[m]
n	= Manning's parameter	[m ^{-1/3} s]

WAQUA berekent de Chézy waarden op bepaalde intervallen. Deze intervallen zijn handmatig op te geven binnen het model. Voor het SCALWEST-model is dit om de 30 minuten.

3.2.3 Beginvoorwaarden

Er wordt gestart met een beginwaterstand van 1,50 m +NAP. Dit zorgt ervoor dat de meeste punten onder water staan, hierdoor gaat de droogvalprocedure goed functioneren. Er wordt een periode van 24 uur gebruikt om het model in te laten rekenen. Hierna zijn de resultaten betrouwbaar, omdat dan de verstoringen die met de beginvoorwaarde worden opgewekt zijn uitgewerkt.

Het initiële zoutveld wat gebruikt is komt overeen met een Schelde-afvoer van 40 m³/s. De gemiddelde Schelde afvoer is 60 m³/s. Er is ook een zoutveld beschikbaar met een Schelde afvoer van 160 m³/s. In deze zoutvelden is de saliniteit per gridpunt opgegeven.

3.2.4 Randvoorwaarden en windgegevens

De randvoorwaarde aan de zeezijde wordt gevormd door de lijn Zeebrugge -Vlakte van de Raan - Oostgat-Noord -Westkapelle. Op deze punten wordt een waterstandsrandvoorwaarde opgelegd. De waterstandsrandvoorwaarden worden bepaald uit de naburige waterstandsstations met behulp van een betrekkinglijn. Hiervoor is de M2 component van het getij van de twee punten met elkaar vergeleken. De M2 component van het getij is de belangrijkste component van het getij in de Westerschelde. Op basis van het verschil wordt een amplitude-factor en een faseverschuiving bepaald. Deze amplitude-factor en faseverschuiving worden toegepast op de gemeten waterstand om de waterstand in het andere station te bepalen. Op de tussenliggende punten op de rand wordt de waterstand geïnterpoleerd door het model.

Randvoorwaarde punt	Afkorting	Bepaald uit meetstation	Amplitude factor	Faseverschil (min.)
Zeebrugge	ZEEB	VR (Vlakte van de Raan)	1,10	-7,5
Vlakte van de Raan	VRO	VR	1,01	1,1
Oostgat Noord	WEKA	WKAP (Westkapelle)	0,94	-0,3
Westkapelle	WKAP	WKAP	1,00	0

Tabel 3-2: Randvoorwaardepunten

Omdat de rand Oostgat Noord - Westkapelle instabiliteiten veroorzaakte in het fijne model is deze rand dichtgezet. In het gebruikte grofmazige model is deze rand niet dichtgezet (het definitieve grofmazige SCALWEST-model wel). Voor de waterbeweging in het model maakt dit weinig uit.

De bovenrandvoorwaarde wordt gevormd door de afvoer van de Schelde en haar zijrivieren. In het model wordt dit opgegeven als een constant debiet. Daarnaast worden nog debieten in het model opgelegd bij de Antwerpse Havendokken, de spuisluizen bij Bath en de sluizen bij Terneuzen. Deze debieten zijn klein ten opzichte van de debieten die door de Westerschelde stromen ten gevolge van de getijbeweging (minder dan 1%). De reden dat de debieten in het model zijn meegenomen is dat ze van invloed zijn op het zoutgehalte in de Westerschelde.

De wind wordt in het model opgelegd door de metingen bij Hansweert te gebruiken. Dit meetstation staat ongeveer midden in het gebied en wordt geacht representatieve waarden te geven voor het gehele gebied. Hierbij wordt met een windstresscoëfficiënt gerekend van 0,0026. Deze Cd-waarde is bepaald voor Hansweert over een grote periode.

4. Gevoeligheidsonderzoek met het getij-model

4.1 Inleiding

Aan de hand van een eenvoudig bak-model met ongeveer de afmetingen van de Westerschelde kan de waterbeweging van het estuarium worden gesimuleerd. Het model bestaat uit een rechte bak met een open rand bij Vlissingen en een dichte rand bij Bath. De M2-component van het getij wordt op de open rand geplaatst en door het model gestuurd.

Het doel van dit getij-model is om inzicht te verkrijgen in enkele parameters en processen die een rol spelen in de Westerschelde. De verkregen inzichten kunnen gebruikt worden in het verdere onderzoek. Verderop in het onderzoek wordt gekeken in hoeverre een onderzoek met dit model kan bijdragen aan het afregelen van het SCALWEST-model onder stormvloedomstandigheden.

Er wordt gekeken naar de invloed van de voortplanting van de getijgolf in de rechte bak. De processen die hierbij een rol spelen zijn onder andere de bodemruwheid en de reflectie van de getijgolf tegen de dichte rand bij Bath.

Parameters die hierop invloed hebben en kunnen worden gesimuleerd in het model zijn:

- Bodemruwheid;
- Diepte;
- Lengte;
- Wind.

Het gevoeligheidsonderzoek zal zich op deze parameters richten.

In het model wordt een groot aantal processen niet weergegeven zoals: zoet-zout invloed, geometrie, viscositeit, etc. Dit zal in het volgende hoofdstuk aan de orde komen wanneer er een gevoeligheidsonderzoek gedaan wordt met het grofmazige SCALWEST-model.

Verder zullen de uitkomsten voor zover mogelijk vergeleken worden met analytische berekeningen volgens Van Rijn (1990). Dit is gedaan ter verificatie van het model. Het verschil tussen de analytische berekeningen en de modeluitkomsten is dat de analytische berekeningen uitgaan van gelineariseerde bodemwrijving, terwijl het model rekent met een kwadratische bodemwrijvingsterm. Verder kunnen er nog verschillen optreden als gevolg van numerieke onnauwkeurigheid van het getij-model.

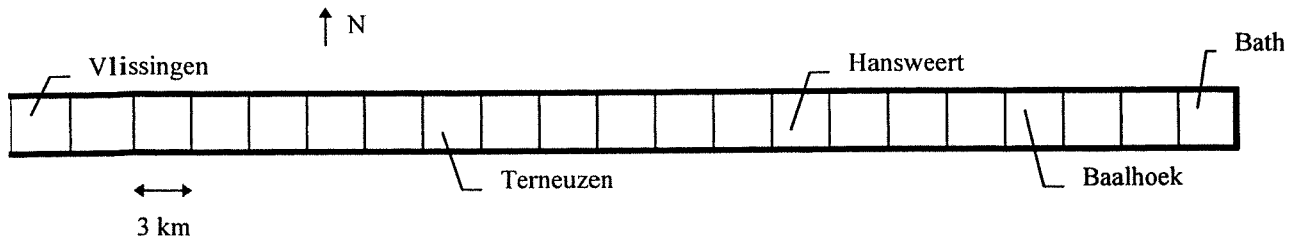
4.2 Het Getijmodel

Het model bestaat uit 21 vierkante gridcellen van 3 km. Het model is dus 63 km lang en 3 km breed. Overigens maakt de breedte niet uit voor de voortplanting van de getijgolf. De diepte is gezet op 8 meter, omdat dit ongeveer de gemiddelde diepte is van de Westerschelde. Aan het eind heeft het model een dichte rand. Dit is gedaan omdat de Schelde afvoer slechts een fractie is van het debiet ten gevolge van de getijbeweging.

In dit model zijn waterstandspunten gedefinieerd op de volgende gridcellen:

1. Gridcel 1,1 : Vlissingen (VLIS);
2. Gridcel 8,1 : Terneuzen (TERN);
3. Gridcel 14,1: Hansweert (HANS);
4. Gridcel 18,1: Baalhoek (BAAL);
5. Gridcel 21,1: Bath (BATH).

Op deze punten zal de waterstand bekeken worden in het onderzoek. Zie Figuur 4-1.



Figuur 4-1: Rooster van het getij-model

Bij Vlissingen wordt de M2 component van het getij opgelegd als randvoorwaarde. De M2 component bij Vlissingen heeft een amplitude van 1,749 m en een periode van ongeveer 12,37 uur ($1,41 \cdot 10^{-4}$ rad/s). De bodemruwheden worden opgegeven in Manning. De Chézy coëfficiënten worden hieruit berekend op elk gridpunt door formule (3.1).

Het model speelt eerst 24 uur in (ongeveer 2 getijden), dit om verstoringen die met de beginvoorwaarde in het model gegenereerd worden uit te laten werken (op tijdstip 0 zijn de waterstanden 0 en de snelheden 0). Hierna worden de resultaten weggeschreven voor een dag. Zie Appendix 2 voor de WAQUA-invoerfile van het model.

4.3 Analytische beschrijving

Aan de hand van analytische vergelijkingen kan de verandering van de amplitude aan het begin en het eind van een bassin berekend worden. Dit is gedaan ter verificatie van het getij-model.

In Van Rijn (1990) wordt een analytische oplossing afgeleid voor het berekenen van een staande golf in een estuarium met bodemwrijving. Hieronder volgt een afleiding van de gebruikte formules.

De continuïteitsvergelijking en de moment-vergelijking met bodemwrijving kunnen als volgt beschreven worden:

$$\frac{\partial h}{\partial t} + h_0 \frac{\partial \bar{u}}{\partial x} = 0 \quad (4.1)$$

$$\frac{\partial \bar{u}}{\partial t} + g \frac{\partial h}{\partial x} + \frac{g}{C^2 h_0} \bar{u}^2 = 0 \quad (4.2)$$

Een analytische oplossing kan verkregen worden door de bodemwrijvingsterm te lineariseren in $m \cdot \bar{u}$ (volgens Lorentz).

Waarin:

$$m = (8 \hat{g} \bar{u}) / (3\pi C^2 h_0) \quad (4.3)$$

De term $8/3\pi$ komt voort uit Fourier serie expansie.

m : bodemruwheid	$[s^{-1}]$;
g : zwaartekrachtsversnelling	$[m/s^2]$;
$\hat{u}$: maximale stroomsnelheid van het water in de opening	$[m/s]$;
C : Chézy waarde	$[m^{1/2} / s]$;
h_0 : diepte	$[m]$.

Op basis van de analytische oplossing kan een amplitude ratio beschreven worden, deze ratio geeft aan hoeveel de amplitude stijgt tussen het begin en eind van het estuarium.

$$fA = \frac{\hat{\eta}_{\text{eind}}}{\hat{\eta}_{\text{begin}}} = \frac{1}{[\cos^2(\alpha\ell) + \sinh^2(\beta\ell)]^{0.5}} \quad (4.4)$$

Waarin:

$$\alpha = \frac{\omega}{c_0 \sqrt{2}} [1 + (1 + (m/\omega)^2)^{0.5}]^{0.5}$$

$$\beta = \frac{\omega}{c_0 \sqrt{2}} [1 + (1 + (m/\omega)^2)^{0.5}]^{0.5}$$

$$c_0 = \sqrt{gh_0} \quad (\text{golfvoortplantingssnelheid})$$

ℓ = lengte van het bassin

[m];

ω = frequentie

[rad /s].

De maximale snelheid in de opening wordt berekend door de formule:

$$\hat{u} = c \frac{\hat{\eta}}{h_0} \quad (4.5)$$

Waarin:

c = golfvoortplantingssnelheid;

$\hat{\eta}$ = amplitude van de getijgolf.

Voor een amplitude van 1,749 meter en een diepte van 8 meter volgt dat de maximale snelheid 1,96 m/s is. De snelheid kan iteratief aangepast worden, maar dat is niet gebeurd.

In Bijlage 20 staan de uitkomsten van de analytische berekeningen. Er zijn berekeningen gemaakt met verschillende bodemruwheden, diepte en lengte. Bij de diepte en de lengte is de bodemruwheid vervolgens ook nog eens gevarieerd.

In de eerste figuur van Bijlage 20 is te zien dat bij een toenemende bodemruwheid de amplitude van de getijgolf wordt gedempt.

In de figuur voor de diepte is te zien dat bij ca. 4 meter diepte en geen wrijving er een resonantie-pek optreedt. Er treedt een resonantie-pek op als:

$$\omega \ell / c_0 = \pi / 2 \quad (4.6)$$

De resonantie diepte is dan te berekenen door:

$$c_0 = \frac{2 \cdot \omega}{\pi} \ell \rightarrow \sqrt{g \cdot h_0} = \frac{2 \cdot \omega}{\pi} \ell \rightarrow h_{\text{res}} = \frac{1}{g} \left(\frac{2 \cdot \omega}{\pi} \ell \right)^2 = \frac{1}{10} \left(\frac{2 \cdot 1,41 \cdot 10^{-4}}{3,14} 63000 \right)^2 = 3,2 \text{m}$$

Bij grotere wrijving neemt de amplitude-factor af en verschuift het maximum naar grotere dieptes.

De lengte heeft een resonantie-pek rond de 100 kilometer liggen bij geen bodemwrijving. Dit kan berekend worden door:

$$\ell_{\text{res}} = \frac{\pi \cdot c_0}{2 \cdot \omega} = \frac{3,14 \cdot \sqrt{10 \cdot 8}}{2 \cdot 1,41 \cdot 10^{-4}} = 99,6 \text{km}$$

De resonantie-pek ligt precies op een kwart golflengte. De golflengte is 398 km ($L = c_0 \cdot T = 9 \cdot 45000 = 400$ km). Als de bodemruwheid meegenomen wordt dan wordt de amplitude lager en verschuift het maximum naar een kortere lengte.

In werkelijkheid wordt de getijgolf opgeslingerd van Vlissingen tot Antwerpen. Na Antwerpen wordt de getijgolf gedempt en neemt de getijslag af.

4.4 Getij-model: Basisrun

Het gevoeligheidsonderzoek met het getij-model is uitgevoerd ten opzichte van een basisrun. De volgende parameters zijn gebruikt voor deze run:

Parameter	Basis
Bodemruwheid (Manning)	0,022 m ^{-1/3} s
Diepte	8 m
Lengte	63 km
Wind	0 m/s

Tabel 4-1: Gebruikte parameters van de basisrun

4.5 Getij-model: Bodemruwheid

De bodemruwheid is een van de belangrijkste parameters in een estuarium. Een getijgolf wordt gedempt door de bodemruwheid. Om te zien hoe gevoelig de Westerschelde is voor de bodemruwheid worden er ten opzichte van de basisrun (Manning=0,022 m^{-1/3} s) verschillende runs uitgevoerd met de volgende bodemruwheden:

Run	n	C op laagwater (6 meter)	C op hoogwater (10 meter)
Ruw 1	0,025	53,9	58,7
Basisrun	0,022	61,3	66,7
Ruw 2	0,019	71,0	77,3
Ruw 3	0,016	84,3	91,7

Tabel 4-2: Gebruikte bodemruwheden

De bijbehorende Chézy waarden zijn voor de duidelijkheid in de tabel gezet. Deze worden berekend met behulp van formule (3.1).

In Bijlage 6 en Bijlage 7 staan de resultaten van deze runs. Bij de Manning-waarde van 0,025 is te zien dat de getijgolf, die bij Vlissingen het estuarium binnenkomt, richting Terneuzen wordt gedempt. De bodemruwheid is hier verantwoordelijk voor. Na Terneuzen stijgt de amplitude van de getijgolf totdat deze de maximum waterstand bereikt in Bath. Dit is te verklaren door reflectie van de getijgolf tegen de dichte achterwand van het model.

Bij lagere Manning-waarden wordt de getijgolf minder gedempt, wat leidt tot hogere amplitudes van de verschillende waterstandsstations.

In Bijlage 8 staan de uitkomsten van de runs samengevat. Geconcludeerd kan worden dat bij een hogere bodemruwheid de amplitude van de getijgolf zal afnemen door demping. De analytische berekening laat een soortgelijk beeld zien, alleen is de getijslag veel minder groot. Het verschil kan verklaard worden door de gelineariseerde bodemwrijving.

Als de bodemruwheid toeneemt zal het ook langer duren voordat de getijgolf bij een bepaald waterstandsstation gearriveerd is. De bodemruwheid remt de getijgolf af.

4.6 Getij-model: Diepte

De diepte van het estuarium is een belangrijke parameter voor hoe de getijgolf zich voortplant. Hoe ondieper het estuarium hoe meer invloed de bodemruwheid zal hebben op de getijgolf. Daarnaast spelen nog processen zoals reflectie en resonantie een rol. Met het model zijn de volgende dieptes doorgerekend:

Run	Diepte (m)
Diepte 1	4
Basisrun	8
Diepte 2	12
Diepte 3	16
Diepte 4	20

Tabel 4-3: Gebruikte dieptes

Gekozen is voor deze dieptes omdat de geulen in de Westerschelde verschillende dieptes hebben, de diepste geulen hebben ongeveer een diepte van 20 meter.

Zie Bijlage 9 en Bijlage 10 voor de uitkomsten van deze runs. Bij een diepte van 4 meter is te zien dat de getijgolf na Vlissingen gedempt en vervormd wordt. Dit komt voornamelijk door de bodemwrijving. Na Hansweert neemt de amplitude van de getijgolf weer enigszins toe door reflectie van de golf.

Bij grotere dieptes wordt damping minder belangrijk doordat de bodemwrijving minder invloed heeft, zie ook formule 3.1. Reflectie wordt dan belangrijker. De run met een diepte van 12 meter heeft de hoogste amplitude bij de waterstandsstations. Bij nog grotere dieptes nemen de amplitudes weer af. Reflectie heeft blijkbaar een maximaal effect bij een diepte van 12 meter. Bij de analytische berekening ligt de maximum amplitude rond een diepte van 14 meter (Bijlage 20). De analytische berekening volgt de modeluitkomsten redelijk goed, alleen is de getijslag te laag (Zie Bijlage 11, 1^e figuur).

Als de diepte toeneemt zal de getijgolf eerder bij een waterstandsstation aangekomen zijn (Bijlage 11, 2^e figuur). De bodemruwheid is verantwoordelijk voor het afremmen van de getijgolf.

Samengevat kan gezegd worden dat bij verschillende dieptes verschillende processen een rol spelen. Bij een kleine diepte is de bodemruwheid belangrijk. Bij grotere dieptes overheerst reflectie.

4.7 Getij-model: Lengte

Omdat er discussie mogelijk is over welke afstand te kiezen voor de lengte van het estuarium is hiermee een aantal runs gedaan. De basisrun gaat uit van de lengte van het estuarium tot Bath, maar ook kan de lengte tot Antwerpen gekozen worden. Daarom zijn de volgende runs gedraaid:

Run	Lengte (km)
Lengte 1	51
Basisrun (tot Bath)	63
Lengte 2	75
Lengte 3 (tot Antwerpen)	87

Tabel 4-4: Gebruikte lengtes

In Bijlage 12 t/m Bijlage 14 staan de uitkomsten van deze runs. Binnen de gebruikte range dalen de waterstanden van de stations bij een grotere lengte van het estuarium. Dit is een oorzaak van de reflectie van de getijgolf tegen de dichte rand. Bij een lengte van 51 km is de amplitude het grootst. Bij deze run is de reflectie dus het grootst. De uitkomst van de analytische berekening is ook in Bijlage 14 gezet, hieruit blijkt dat de getijslag niet gehaald wordt door de analytische berekening, maar dat het patroon wel overeenkomt. In Bijlage 20 is te zien dat de maximale amplitude bij een lengte van zo rond de 30 km ligt (bij een ruwheid van $0,022 \text{ m}^{-1/3} \text{ s}$). Dit is een combinatie van bodemruwheid en reflectie.

De getijgolf is bij een lengte van 51 km eerder op een bepaald punt dan bij een langere lengte, zie Bijlage 13. Dit kan verklaard worden doordat de reflecterende golf bij een kortere lengte eerder terug is. Hierdoor komt de resulterende golf (inkomende + reflecterende golf) eerder in een punt aan. Tussen 75 en 87 km is bij Terneuzen geen faseverschil meer merkbaar, blijkbaar is de invloed van de reflecterende golf uitgewerkt door de bodemwrijving.

Concluderend kan gezegd worden dat de lengte van het estuarium van invloed is op de amplitude en fase van de getijgolf. Of de keuze om de Westerschelde te modelleren tot Bath correct is, is moeilijk te zeggen.

4.8 Getij-model: Wind

Omdat dit onderzoek zich richt op stormvloeden is ook gerekend met windopzet. In het model is met een constante windsnelheid gerekend uit het westen. Dit heeft een opzet van het water veroorzaakt zoals ook bij stormvloeden het geval is. Bij stormvloeden waait de wind ook ongeveer uit het westen. De volgende runs zijn gedaan:

Run	Wind (m/s)
Basisrun	0
Wind 1	10
Wind 2	20

Tabel 4-5: Gebruikte windsnelheden

In Bijlage 15 en Bijlage 16 is te zien dat de wind een opzet en een faseverschuiving veroorzaakt. Richting Bath wordt de opzet groter. Bij 20 m/s wordt er relatief gezien meer opgestuwd dan bij 10 m/s. Dit wordt verklaard door de formule van de windschuifspanning (Van Rijn, 1990):

$$\tau_s = \rho_a f_a W_{10}^2 \quad (4.7)$$

waarin:

- f_a = wrijvingscoëfficiënt ($\approx 0,001 - 0,002$);
 ρ_a = dichtheid van lucht ($\approx 1,25 \text{ kg/m}^3$);
 W_{10} = windsnelheid op 10 m boven de grond.

De kwadratische term voor de windsnelheid verklaard waarom er bij 20 m/s relatief meer opgezet wordt dan bij 10 m/s.

In Bijlage 17 is te zien dat de wind invloed heeft op de getijslag. Omdat er op laagwater meer opgestuwd wordt dan op hoogwater wordt de getijslag kleiner, dit effect is groter naarmate men verder landinwaarts komt. Dit effect zal hierna uitvoerig beschreven worden. Bij Terneuzen is het precies andersom, de getijslag wordt groter. Overigens zijn de verschillen kleiner dan gevonden met bijvoorbeeld de bodemruwheid. Ook te zien valt dat bij een grotere windsnelheid de getijgolf iets eerder in een bepaald punt aankomt. In werkelijkheid kan er ook een vervroeging van het hoog-en laagwater optreden ten opzichte van het astronomisch getij, doordat de wind indirect zorgt voor een versnelling van de voortplanting van het getij (Dillingh et al., 1993).

In Bijlage 18 staat de windopzet van de runs. Dit is berekend door de waterstand van de basisrun af te trekken van de runs met wind. Het valt op dat op laagwater de opzet hoger is dan op hoogwater, omdat de wind meer grip heeft op de kleinere massa water (zie de windterm in de ondiepwatervergelijkingen, waarin door de diepte wordt gedeeld).

De maximum opzet treedt echter niet op bij laagwater, maar een paar uur daarna. Daarom is onderzocht wat de reactietijd is tussen de wind en de wateropzet. Hiertoe is dezelfde run uitgevoerd, alleen is na 12 uur pas een constante wind over het gebied gezet (Zie Bijlage 19). Te zien is dat na 2 à 3 uur de verschillen tussen de run met constante wind en de run met de windstoot kleiner zijn geworden dan 10 cm. De reactietijd is dus 2 à 3 uur. Dit verklaart waarom de maximale opzetten een paar uur na laagwater optreden. Verder is in de opzet (Bijlage 18) te zien dat er op laagwater een kleine golf ontstaat en die zich voortplant tot Bath, vervolgens reflecteert en weer het estuarium uitloopt. De verklaring hiervoor is niet duidelijk, misschien omdat er een klein faseverschil in de runs zit.

4.9 Conclusie van het gevoeligheidsonderzoek met het Getij-model

Met behulp van het getij-model is een eerste inzicht verkregen in welke processen en parameters een rol spelen in de Westerschelde.

In onderstaande tabel zijn de verschillen in getij-amplitude tussen de run met de minimum en de maximum waarde van de parameter samengevat (meters). De minimum en maximum waarden zijn zo gekozen dat ze een vrij reëel beeld geven van de spreiding van de parameter. Het blijkt dat de verschillen tussen de parameters ongeveer in dezelfde orde grootte liggen. De diepte en de lengte liggen in dit onderzoek vast, er worden geen wijzigingen in de bodem en in het rooster aangebracht. De bodemruwheid en de wind zijn wel parameters waar het model op afgeregeld kan worden. Uit de tabel blijkt dat deze parameters ongeveer evenveel invloed hebben. Naast de bodemruwheid is het dus van groot belang om de wind goed in het model weer te geven.

Parameter	TERN	HANS	BAAL	BATH	Minimum	Maximum	
Bodemruwheid (m)	0,554	0,689	0,719	0,718	0,016	0,025	$\text{m}^{-1/3} \text{ s}$
Diepte (m)	0,446	0,509	0,583	0,604	8	20	meter
Lengte (m)	0,491	0,78	0,727	0,64	63	87	km
Wind (m)	0,317	0,519	0,644	0,746	0	20	m/s

Tabel 4-6: Afwijkingen van de amplitude bij variatie van de parameter (Max.-Min.)

5. Uitkomst van het SCALWEST-model voor de stormvloedperiode

5.1 Beschrijving van de Crocus-stormvloedperiode

Met het SCALWEST-model is de Crocus-stormvloedperiode (26 februari tot 2 maart 1990) doorgerekend. Tijdens deze periode kwamen waterstanden voor die behoren tot de hoogste van deze eeuw. Een combinatie van hoog springtij en een aantal achtereenvolgende (noordwester) stormen was hier verantwoordelijk voor. Bij Vlissingen traden 4 hoogwaters op die behoren tot de 25 hoogste sinds 1825 (Zie Bijlage 5). De hoogste waterstand (3,87 m + NAP) heeft een frequentie van voorkomen van 6 keer per 100 jaar (1 keer in de 17 jaar). De windopzet bij Vlissingen varieerde ongeveer van 1 tot 2 meter (Zie Bijlage 21). Het uitzonderlijke van deze periode is dat er een aantal hoge stormvloedten achter elkaar opgetreden zijn (Stormvloedwaarschuwingsdienst, 1990). In Bijlage 22 staat de gemeten windsnelheid en -richting bij Prosperpolder, Hansweert en de Vlake van de Raan. Te zien is dat op zee (Vlake van de Raan) de wind het hardst waait en verder afneemt naarmate men verder landinwaarts komt (Hansweert en Prosperpolder).

In dit hoofdstuk wordt de uitkomst van het SCALWEST-model beschreven. Getracht wordt aan te geven of er ontoelaatbare afwijkingen aan het licht komen en dus of het SCALWEST-model beter afgeregeld moet worden.

Het model is doorgerekend van 26 februari 00:00 tot 1 maart 23:50. 26 februari is gebruikt om het model in te laten spelen, de resultaten worden bekeken van 27 februari t/m 1 maart.

Er zal zowel met de wind bij de Vlake van de Raan als Hansweert gerekend worden.

In paragraaf 2 zullen de basisruns van het SCALWEST-fijn model beschreven worden. Paragraaf 3 behandelt vervolgens de uitkomsten van het grofmazige model. In paragraaf 4 volgt de conclusie.

5.2 Uitkomst basisrun SCALWEST-fijn model

Het fijnmazige model is zowel doorgerekend met de wind bij Hansweert (HAWI) als de Vlake van de Raan (VR). Er is uitgegaan van het nieuwe SCALWEST-fijn model, dat wil zeggen dat de Zeeschelde kromlijnijs geschematiseerd is (zie Bijlage 4).

Wegens instabiliteiten van de run met de wind bij de Vlake van de Raan kon 26 februari niet gebruikt worden als inspeelperiode. Hiervoor is 27 februari gebruikt, zodat er alleen van 28 februari en 1 maart uitkomsten zijn.

In Bijlage 23 staan de berekende waterstanden van deze runs bij verschillende waterstandstations. Ook staan de gemeten waarden in de grafiek. Hierin is te zien dat de VR-run de hoogwaterstanden beter benadert dan de HAWI-run. Toch zijn de hoogwaterstanden met de VR-run meestal lager dan de metingen. Alleen achter in het gebied worden de hoogwaterstanden te hoog, omdat de wind hier veel harder waait dan in werkelijkheid. De laagwaterstanden worden door de VR-run te hoog berekend. De laagwaterstanden worden beter benaderd door de HAWI-run. Dus kan gezegd worden dat de opgetreden getijslag door beide runs niet gehaald wordt.

In onderstaande tabel staan de gemiddelde afwijkingen en de standaarddeviaties van de runs met de metingen (bepaald over de drie dagen met waarden om de 10 minuten).

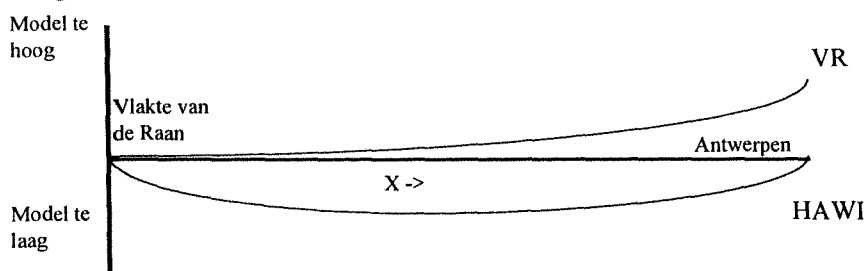
Model	WKAP	VLIS	TERN	HANS	BAAL	BATH	PROS	ANTW
gem. HAWI-fijn (m)	-0.04	-0.08	-0.12	-0.12	-0.12	-0.09	-0.02	0.01
gem. VR-fijn (m)	-0.02	-0.03	-0.04	-0.05	-0.03	0.01	0.10	0.15
stdev. HAWI-fijn (m)	0.05	0.07	0.09	0.09	0.12	0.14	0.15	0.20
stdev. VR-fijn (m)	0.04	0.07	0.11	0.10	0.15	0.17	0.19	0.25

Tabel 5-1: Gemiddelde afwijkingen en standaarddeviaties van het fijnmazige model t.o.v. de metingen

Uit de tabel blijkt dat gemiddeld de run met de wind bij de Vlake van de Raan betere resultaten geeft. Gemiddeld berekend het model de waterstanden te laag, behalve bij de VR-run in het oostelijk gedeelte van de Westerschelde. De standaarddeviaties lopen op naarmate men verder in het estuarium komt (en dus verder van de opgelegde zee-randvoorwaarde).

De wind bij Hansweert is gemiddeld lager dan bij de Vlake van de Raan, maar is hoger dan verder landinwaarts. Men zou dus verwachten dat de HAWI-run de waterstanden in het westelijk deel van de Westerschelde onderschat, bij Hansweert de fout maximaal is en verder landinwaarts zal afnemen (zie Figuur 5-1). De wind bij de Vlake van de Raan is het hardst van de drie meetstations in het gebied.

Landinwaarts is er dus teveel opstuwing door te harde wind. Verwacht wordt dus dat de afwijkingen met de metingen verder landinwaarts zullen oplopen (zie onderstaande figuur).



Figuur 5-1: Verwachte afwijkingen van de runs t.o.v. de metingen

Uit Tabel 5-1 blijkt dat de gemiddelde afwijkingen goed overeen komen met de verwachte afwijkingen van zowel de run met de wind bij de Vlakte van de Raan als Hansweert. Alleen de gemiddelde afwijkingen van de VR-run in het westelijk gedeelte zijn te laag ten opzichte van wat men logischerwijs verwacht.

5.3 Uitkomst basisrun SCALWEST-grof model

Ook met het SCALWEST-grof model is de periode doorgerekend met zowel de wind bij Hansweert als bij de Vlakte van de Raan. In Bijlage 24 staan de berekende waterstanden bij Vlissingen en Antwerpen. Onderstaande tabel geeft de gemiddelde afwijkingen en standaarddeviaties weer van de beide runs met de metingen.

Model	WKAP	VLIS	TERN	HANS	BAAL	BATH	PROS	ANTW
gem. HAWI-grof (m)	-0.04	-0.09	-0.12	-0.14	-0.16	-0.12	-0.04	-0.03
gem. VR-grof (m)	-0.03	-0.05	-0.05	-0.06	-0.05	-0.00	0.09	0.15
stdev. HAWI-grof (m)	0.05	0.08	0.10	0.12	0.15	0.19	0.24	0.23
stdev. VR-grof (m)	0.05	0.07	0.11	0.13	0.17	0.20	0.25	0.26

Tabel 5-2: Gemiddelde afwijkingen en standaarddeviaties van het grofmazige model t.o.v. de metingen

In Bijlage 25 staan de afwijkingen van de runs op hoog- en laagwater. De hoogwaterstanden worden door de HAWI-run vrijwel altijd te laag berekend. De afwijkingen nemen vanaf de zeerand toe naar het maximum bij Baalhoek. Hierna nemen de afwijkingen weer af richting Antwerpen. Een verklaring voor dit verschijnsel is in de vorige paragraaf gegeven (zie Figuur 5-1). De hoogst gevonden afwijking bedraagt ca. 40 cm en wordt gehaald tijdens het vierde hoogwater bij Baalhoek.

De afwijkingen van de hoogwaterstanden van de VR-run blijven vanaf de rand ongeveer gelijk tot Baalhoek. Het model berekent de afwijkingen meestal te laag. Na Baalhoek worden de afwijkingen sterk naar boven afgebogen. Dit komt hoogstwaarschijnlijk door de grotere wind dan in werkelijkheid het geval is. De vorm van de grafieken komen min of meer overeen met hetgeen beschreven is in de vorige paragraaf.

De laagwaterstanden worden door de run met de wind bij Hansweert redelijk goed berekend. Maximaal zijn de afwijkingen 15 cm te hoog en te laag.

De afwijkingen op laagwater met de VR-run lopen sterk op richting Antwerpen. In Antwerpen bedraagt de maximale fout ca. 40 cm. De verklaring voor het sterk oplopen van de afwijkingen is de hardere wind. Het oplopen van de afwijkingen is sterker op laagwater dan op hoogwater. Dit verschijnsel is in het vorige hoofdstuk beschreven, waarin gesteld werd dat de laagwaters gevoeliger zijn voor windopzet dan hoogwaters.

De periode is ook doorgerekend zonder wind. Nu kan de extra opstuwing van het water bepaald worden. In Bijlage 26 staat de opstuwing bij Bath samen met de windsnelheid. Te zien is dat de opstuwing en de windsnelheid sterk gecorreleerd zijn en dat er een faseverschil zit tussen de wind en de opstuwing van een paar uur. Dit faseverschil werd ook al in het vorige hoofdstuk gevonden.

5.4 Conclusie

In Bijlage 27 staan de gemiddelde afwijkingen en de standaarddeviatie van de runs nog eens grafisch samengevat. Gesteld kan worden dat de gevonden afwijkingen aanleiding geven om nader te kijken naar welke processen verantwoordelijk zijn voor deze afwijkingen en of de modelresultaten verbeterd kunnen worden door een aanpassing van het model. Het verschil tussen het grof- en fijnmazig model zal in het volgende hoofdstuk behandeld worden.

6. Gevoeligheidsonderzoek met het SCALWEST-grof model voor de Crocus-stormvloedperiode in 1990.

Het doel van het gevoeligheidsonderzoek is om meer inzicht in het gedrag van het model onder stormvloedomstandigheden te krijgen. De afregeling kan dan gericht gebeuren. Er wordt gerekend met het SCALWEST-grof model. Het gevoeligheidsonderzoek wordt uitgevoerd ten opzichte van een basisrun. Gekozen is voor de wind bij de Vlakte van de Raan, omdat deze betere resultaten geeft.

Het gevoeligheidsonderzoek met het SCALWEST-grof model richt zich op de volgende punten:

- Windveld (Hansweert of Vlakte van de Raan);
- Bodemruwheid;
- Windschuifspanningscoëfficiënt;
- Eddy-viscositeit;
- Dichtheid;
- α -chézy coëfficiënt;
- Grof- en fijnmazig model.

Binnen de reële grenzen wordt de parameter gewijzigd en wordt het model opnieuw doorgerekend. Het verschil tussen de waterstanden is dan een maat voor hoe gevoelig het model is voor die specifieke parameter. Voor elke parameter wordt het gemiddelde verschil en de standaarddeviatie bepaald van de doorgerekende periode tussen de runs met de uiterste parameters.

6.1 Windveld

In het SCALWEST-model wordt gerekend met een windinvoer van één van de meetstations. Dat wil zeggen dat er 10 minuten lang over het gehele gebied een constante windsnelheid en windrichting staat. Het SCALWEST-model rekent standaard met de wind gemeten bij Hansweert, maar ook een andere tijdreeks is mogelijk, zoals bijvoorbeeld de wind bij de Vlakte van de Raan. In dit geval is met beide tijdreeksen gerekend, om het effect van de grotere windsnelheid bij de Vlakte van de Raan te bekijken. De runs zijn al besproken in het vorige hoofdstuk en staan in Bijlage 24.

Run	Windstation
HAWI	Hansweert
VR	Vlakte van de Raan

Tabel 6-1: Gebruikte windinvoer

Uit de bijlage blijkt dat er grote verschillen zijn in waterstanden tussen de twee runs. De run met het windveld bij de Vlakte van de Raan berekent over de gehele periode hogere waterstanden dan de HAWI-run. Dit wordt veroorzaakt door de hogere windsnelheden, die zorgen voor een verdere opstuwing van het water in het model. De verschillen in windsnelheid (5 à 10 m/s) zorgen voor een verschil in waterstand van ongeveer 10 à 30 centimeter tussen de runs.

De gemiddelde verschillen en standaardafwijkingen van de waterstanden voor de drie dagen tussen de VR en de HAWI-run staan in onderstaande tabel:

	WKAP	VLIS	TERN	BAAL	BATH	PROS	ANTW
Gemiddeld verschil (m)	0,01	0,04	0,07	0,11	0,12	0,13	0,17
Standaarddeviatie (m)	0,02	0,04	0,07	0,07	0,07	0,07	0,09

Tabel 6-2: Gemiddeld verschil en standaarddeviatie door wijziging van de windinvoer (VR - HAWI)

Uit de tabel blijkt dat het gemiddeld verschil en de standaardafwijking oploopt richting Antwerpen. De verschillen lopen gemiddeld op tot 17 cm. Dus alleen al door het feit dat er met een andere wind wordt gerekend ontstaan verschillen die kunnen oplopen tot tientallen centimeters.

6.2 Bodemruwheid

Zoals uit het onderzoek met het getij-model bleek is de bodemruwheid één van de belangrijkste parameters in een estuarium. Het is dan ook logisch dat in een gevoeligheidsonderzoek de bodemruwheid niet mag ontbreken. Het SCALWEST-model is doorgerekend met een 20% hogere en lagere bodemruwheid.

Run	Verandering	Bodemruwheid bij Vlissingen
Bodemruwheid 1	- 20 %	0,021
Basisrun (VR)	0	0,026
Bodemruwheid 2	+ 20 %	0,031

Tabel 6-3: Gebruikte bodemruwheid

Uit Bijlage 28 blijkt dat de bodemruwheid de getijslag beïnvloed. Een hogere bodemruwheid zorgt voor een demping van het getij (kleinere getijslag), dit blijkt uit een lagere hoogwaterstand en een hogere laagwaterstand. Ook is er een faseverschil merkbaar, bij een hogere bodemruwheid komt het getij later aan, doordat de hogere bodemruwheid de getijgolf afremt. De uitkomsten zijn in overeenstemming met hetgeen gevonden is in het eenvoudige model uit het vorige hoofdstuk. De middenstand van het getij veranderd nauwelijks, zoals blijkt uit onderstaande tabel, waarin de gemiddelde verschillen tussen de run met de hogere en de run met de lagere bodemruwheid staan. De tabel is enigszins misleidend, doordat het gemiddeld verschil niet verandert.

	WKAP	VLIS	TERN	BAAL	BATH	PROS	ANTW
Gemiddeld verschil (m)	-0,04	-0,02	-0,01	-0,02	0,01	-0,01	0,00
Standaarddeviatie (m)	0,06	0,14	0,26	0,48	0,53	0,56	0,67

Tabel 6-4: Gemiddeld verschil en standaarddeviatie door wijziging van de bodemruwheid (Ruw1-Ruw2)

6.3 Windschuifspanningscoëfficiënt

Het model is doorerekend met 2 verschillende windschuifspanningscoëfficiënten.

Run	Windschuifspanningscoëfficiënt
Windcoëff. 1	0,0012
Basisrun (VR)	0,0026
Windcoëff. 2	0,0040

Tabel 6-5: Gebruikte windstresscoëfficiënten

De Cd-waarde van 0,0026 is bepaald voor een lange periode bij Hansweert. In Bijlage 29 staan de waterstandsgegevens van verschillende stations voor deze runs. Te zien is dat de run met de kleinste windschuifspanningscoëfficiënt (0,0012) duidelijk minder hoge waterstanden geeft. Een hogere windschuifspanningscoëfficiënt (0,0040) geeft hogere waterstanden. De coëfficiënt wordt belangrijker naarmate men verder in het estuarium komt. Op laagwater is het model gevoeliger voor deze coëfficiënt dan op hoogwater. Bij Antwerpen zijn de verschillen tussen de runs het grootst, doordat de wind het water in de Westerschelde verder heeft opgestuwd. Zie ook Bijlage 30 voor de maximale waterstanden voor de verschillende runs bij het tweede hoogwater. Het valt op dat bij de Cd-waarde van 0,0040 met de wind bij Hansweert de gemeten hoogwaterstanden goed worden benaderd in het eerste deel van het estuarium. Echter de laagwaterstanden zijn veel te hoog. In de lijn voor de Cd-waarde van 0,0040 met de wind bij de Vlake van de Raan is een punt niet weergegeven. Dit is een gevolg van instabiliteiten van het model op dat punt. Het is duidelijk dat bij een hogere windschuifspanningscoëfficiënt de middenstand van het getij hoger zal komen te liggen.

In onderstaande tabel staan de verschillen en standaarddeviaties tussen de run met windstresscoëfficiënt 0,0012 en 0,0040 (met de wind bij VR):

	WKAP	VLIS	TERN	BAAL	BATH	PROS	ANTW
Gemiddeld verschil (m)	0,07	0,13	0,18	0,25	0,38	0,39	0,47
Standaarddeviatie (m)	0,06	0,07	0,28	0,23	0,18	0,19	0,24

Tabel 6-6: Gemiddeld verschil en standaarddeviatie door wijziging van de windstresscoëfficiënt (Coëf. 2-Coëf. 1)

Uit de tabel blijkt dat er een groot verschil zit tussen de twee runs. Dit kan een belangrijke parameter van het model zijn onder stormvloedomstandigheden.

6.4 Eddy-viscositeit

Met behulp van de eddy-viscositeit is er 1 run uitgevoerd. De eddy-viscositeit is verhoogd naar 10.

Run	Eddy-viscositeit
Basisrun (VR)	1
Eddy 1	10

Tabel 6-7: Gebruikte eddy-viscositeitscoëfficiënten

Een hogere waarde voor de Eddy-viscositeit leidt tot een grotere energie-dissipatie, waardoor de getijgolf minder goed het estuarium kan binnendringen. Er treden in Antwerpen duidelijk hogere laagwaterstanden op (15 à 20 cm) dan met de basisrun (zie Bijlage 31), terwijl de hoogwaterstanden ongeveer gelijk blijven. De amplitude van het getij wordt dus minder, want er treedt energie-dissipatie op. Waarom de laagwaterstanden hoger zijn is niet duidelijk.

	WKAP	VLIS	TERN	BAAL	BATH	PROS	ANTW
Gemiddeld verschil (m)	0,00	0,00	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05
Standaarddeviatie (m)	0,01	0,01	0,06	0,03	0,04	0,04	0,08

Tabel 6-8: Gemiddeld verschil en standaarddeviatie door wijziging van de viscositeit (Eddy1-Basis)

Uit Tabel 6-8 blijkt dat de viscositeits-coëfficiënt weinig invloed heeft op de waterstand, de gemiddelde verschillen zijn maximaal 5 cm in Antwerpen. Geconcludeerd kan worden dat deze parameter van weinig invloed is, alleen verder in het estuarium op laagwater kan deze coëfficiënt een rol spelen.

6.5 Dichtheid

Om een wekenlange inspeeltijd van het model te voorkomen is het noodzakelijk voor de zoutbeweging om een gebiedsafhankelijke beginsituatie op te geven. Er zijn twee initiële zoutvelden beschikbaar voor het SCALWEST-model, met een Schelde afvoer van 40 m³/s en van 160 m³/s (De gemiddelde Schelde afvoer is 60 m³/s). Standaard wordt gerekend met een zoutveld behorende bij een Schelde afvoer van 40 m³/s. De zoutvelden zijn berekend met behulp van het E-WEST II model (Zie voor een verdere beschrijving Dekker, 1993). Zie Bijlage 32 voor deze initiële zoutvelden. In deze zoutvelden is de saliniteit per gridpunt bekend. De dichtheid wordt vervolgens berekend uit de saliniteit. Overigens is het debiet van de Schelde niet veranderd bij deze runs.

Run	Schelde afvoer
Basisrun (VR)	40 m ³ /s
Zoutveld 2	160 m ³ /s

Tabel 6-9: Gebruikte afvoeren van de Schelde

Uit Bijlage 33 blijkt dat bij een Schelde afvoer van 160 m³/s de waterstanden hoger zijn. Een Schelde afvoer van 160 m³/s zorgt ervoor dat de zout-zoet gradient tussen het begin en het eind van het estuarium groter is. Hierdoor stijgen ook de waterstanden. Hoe hoger de zoutgradient hoe hoger de waterstandsgradient, zoals volgt uit de vereenvoudigde moment-vergelijking (EDS, 1996):

$$g \frac{\partial \zeta}{\partial x} + \frac{1}{2} g \frac{h}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial x} = 0 \quad (4.1)$$

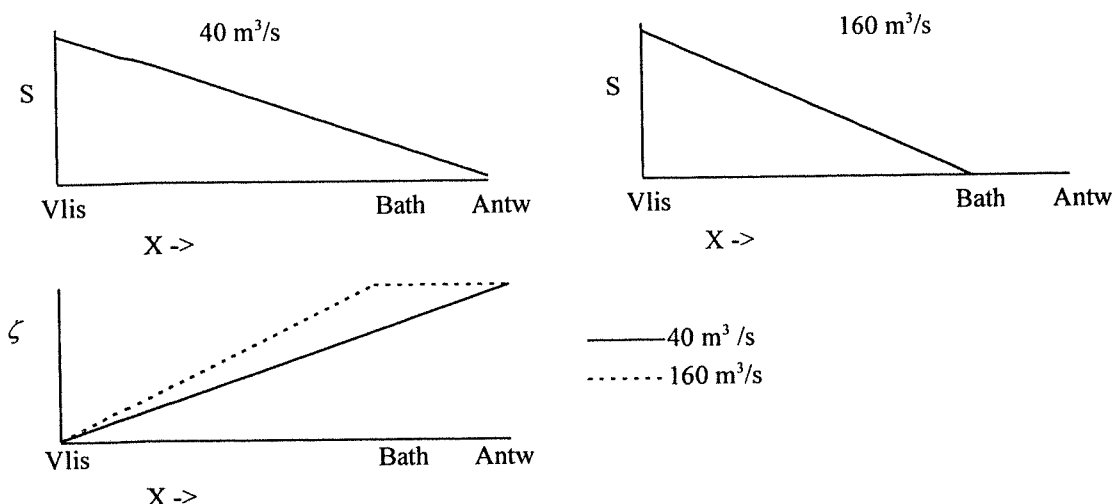
De uitschieters in de verschillen zijn een gevolg van kleine instabiliteiten van het model. In Tabel 6-10 staan de gemiddelde verschillen en standaarddeviaties tussen de twee runs:

	WKAP	VLIS	TERN	BAAL	BATH	PROS	ANTW
Gemiddeld verschil (m)	0,00	0,00	0,03	0,06	0,07	0,07	0,03
Standaarddeviatie (m)	0,01	0,01	0,06	0,02	0,02	0,02	0,03

Tabel 6-10: Gemiddeld verschil en standaarddeviatie door wijziging van de dichtheid (Zout2-Basis)

Uit de tabel blijkt dat rond Bath/Prosperpolder de verschillen het grootst zijn. Verderop richting Antwerpen neemt het verschil weer af. Dit komt omdat de zoutindringing bij 40 m³/s ongeveer tot Antwerpen reikt en

bij 160 m³/s tot Bath reikt (zie onderstaand figuur). Uit vergelijking 4.1 blijkt dat de waterstandsstijging afhankelijk is van deze gradient. Het verschil tussen de waterstanden is dan maximaal bij Bath.



Figuur 6-1: De zoutindringing en de waterstandsstijging ten gevolge van de zoutgradient

Geconcludeerd kan worden dat het initiële zoutveld invloed heeft op de waterstanden. Waarschijnlijk ligt het werkelijke zoutveld tijdens de stormvloedperiode dichterbij een Schelde afvoer van 40 m³/s dan bij 160 m³/s, omdat de zoutindringing bij een stormvloed hoger is. Deze afregelparameter zal dan ook verder niet gebruikt worden.

6.6 Alfa-chézy coëfficiënt

Met behulp van de α -chézy coëfficiënt is een run uitgevoerd. Deze coëfficiënt maakt de bodemruwheid afhankelijk van de zout-zoet gradient. Zie Appendix 1 voor een uitgebreide beschrijving van deze parameter. De periode is doorerekend met een α -chézy coëfficiënt van 50.

Run	α -chézy coëfficiënt
Basisrun (VR)	0
alfa-chézy 1	50

Tabel 6-11: Gebruikte α -chézy coëfficiënten

In Bijlage 34 is te zien dat de waterstanden niet veel afwijken van de basisrun, maar wel te zien is dat bij Antwerpen het verschil groter is dan bij Vlissingen (enkele centimeters). Zie ook Tabel 6-12. Blijkbaar heeft deze coëfficiënt weinig invloed op de waterbeweging in de Westerschelde. In het huidige model is deze parameter ook niet gebruikt.

	WKAP	VLIS	TERN	BAAL	BATH	PROS	ANTW
Gemiddeld verschil (m)	0,00	0,00	0,01	0,02	0,03	0,04	0,06
Standaarddeviatie (m)	0,01	0,01	0,09	0,02	0,02	0,02	0,04

Tabel 6-12: Gemiddeld verschil en standaarddeviatie door wijziging van de α -chézy coëfficiënt (Alfa1-Basis)

6.7 Grof- en fijnmazig model

Om de invloed van het fijnere grid en de vernieuwde schematisatie van de Zeeschelde te beschouwen is ook het verschil tussen beide modellen bekeken. De runs zijn al uitgevoerd in het vorige hoofdstuk, maar staan voor de duidelijkheid nog eens in Bijlage 36. De verschillen tussen het grof- en fijnmazige model staan in Tabel 6-13 voor zowel de wind bij Hansweert als de wind bij de Vlake van de Raan. Er is nauwelijks verschil tussen de gemiddelde verschillen met de wind bij de Vlake van de Raan of Hansweert. Het verschil loopt op richting Antwerpen. De spreiding is vrij groot in het oostelijk gedeelte.

	WKAP	VLIS	TERN	BAAL	BATH	PROS	ANTW
VR Gemiddeld verschil (m)	0.01	0.02	0.02	0.04	0.03	0.03	0.04
HAWI Gemiddeld verschil (m)	0.00	0.01	0.00	0.03	0.03	0.03	0.04
VR Standaarddeviatie (m)	0.03	0.03	0.07	0.07	0.10	0.12	0.13
HAWI Standaarddeviatie (m)	0.03	0.05	0.05	0.08	0.10	0.12	0.13

Tabel 6-13: Gemiddeld verschil en standaarddeviatie door vergelijking van het grof- met het fijnmazige model (Fijn-Grof)

Gesteld kan worden dat het in het westelijke deel vrij weinig uitmaakt of met het grofmazige-model of het fijnmazige model gerekend wordt voor de waterstanden. Richting Antwerpen worden de verschillen groter. Het fijnmazige model berekent de waterstanden gemiddeld beter. Dit zal waarschijnlijk komen door het fijnere grid en de betere schematisatie van de Zeeschelde.

6.8 Conclusie gevoeligheidsonderzoek SCALWEST-grof

Aan de hand van een gevoeligheidsonderzoek is geprobeerd aan te geven welke parameters verantwoordelijk kunnen zijn voor de gevonden afwijkingen. Uit het onderzoek blijkt dat er 4 parameters zijn die deze afwijkingen kunnen veroorzaken. Deze zijn:

- Windveld;
- Bodemruwheid;
- Windstresscoëfficiënt;

In onderstaande tabel zijn de gemiddelde verschillen en standaarddeviaties samengevat voor de gebruikte parameters:

Gemiddelde	WKAP	VLIS	TERN	BAAL	BATH	PROS	ANTW
wind VR-HAWI	0,01	0,04	0,07	0,11	0,12	0,13	0,17
bodemruwheid	-0,04	-0,02	-0,01	-0,02	0,01	-0,01	0,00
windstress coëf.	0,07	0,13	0,18	0,25	0,38	0,39	0,47
eddy-viscositeit coëf.	0,00	0,00	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05
dichtheid	0,00	0,00	0,03	0,06	0,07	0,07	0,03
a-chézy coëf.	0,00	0,00	0,01	0,02	0,03	0,04	0,06
grof-fijn model VR	0,01	0,02	0,02	0,04	0,03	0,03	0,04
grof-fijn model HAWI	0,00	0,01	0,00	0,03	0,03	0,03	0,04
Standaarddeviatie	WKAP	VLIS	TERN	BAAL	BATH	PROS	ANTW
wind VR-HAWI	0,02	0,04	0,07	0,07	0,07	0,07	0,09
bodemruwheid	0,06	0,14	0,26	0,48	0,53	0,56	0,67
windstress coëf.	0,06	0,07	0,28	0,23	0,18	0,19	0,24
eddy-viscositeit coëf.	0,01	0,01	0,06	0,03	0,04	0,04	0,08
dichtheid	0,01	0,01	0,06	0,02	0,02	0,02	0,03
α -chézy coëf.	0,01	0,01	0,09	0,02	0,02	0,02	0,04
grof-fijn model VR	0,03	0,03	0,07	0,07	0,10	0,12	0,13
grof-fijn model HAWI	0,03	0,05	0,05	0,08	0,10	0,12	0,13

Tabel 6-14: Gemiddelde afwijkingen en standaarddeviaties door wijziging van de gebruikte parameters (m)

Uit de tabel blijkt duidelijk dat de wind grote verschillen veroorzaakt. Zowel de verschillende wind-tijdreeksen als de windstresscoëfficiënt zijn belangrijke parameters. Het lijkt dan ook gerechtvaardigd om aan de windformulering in het model meer aandacht te besteden. In Jansen (1998c) is gerekend met een variabel windveld. De belangrijkste conclusie uit dat onderzoek is dat de resultaten slechter worden met gebruik van een variabel windveld. Dit is in tegenstelling tot hetgeen men verwachtte. In dit rapport zal ook worden gerekend met het variabele windveld, omdat uit het gevoeligheidsonderzoek komt dat dit wel belangrijk is en dus moet dit wel onderzocht worden.

In Hoofdstuk 7 zal dus gerekend worden met het variabele windveld. Nu al kan gesteld worden dat dit niet de enige fout in het model zal zijn, omdat de hoogwaterstanden door het gebruik van de wind bij de Vlake van de Raan al niet eens gehaald werden in het westelijk deel van het gebied. Het variabele windveld zal interpoleren tussen de harde wind bij de Vlake van de Raan en de minder harde wind landinwaarts. In het

westelijk deel zal de windsnelheid daarom alleen maar afnemen door het gebruik van het variabele windveld en dus ook de opstuwing. Het gevolg is dat de resultaten op hoogwater slechter worden dan de run met de wind bij de Vlakte van de Raan. Er moet dus nog een andere oorzaak zijn voor de gevonden afwijkingen op hoogwater.

Als mogelijk tweede oorzaak voor de afwijkingen kunnen de randvoorwaarden genoemd worden. Uit de vergelijking van de modelresultaten met de metingen bij Westkapelle en Vlissingen blijken dat er al grote afwijking zitten in de randvoorwaarde. Een fout in de randvoorwaarde werkt door in het gehele model. Hoofdstuk 8 besteedt hier meer aandacht aan.

In vergelijking met het Getij-model kan gezegd worden dat patronen overeenkomen. Processen zoals de bodemruwheid en de wind kunnen globaal gemodelleerd worden met het Getij-model.

7. Variabel windveld

7.1 Inleiding

In dit hoofdstuk zal worden gerekend met een variabel windveld. Uit de vorige hoofdstukken bleek dat de wind verantwoordelijk was voor een grote fout in het model. De wind aan de zeezijde is meestal aanzienlijk harder dan landinwaarts. Het gebied wat het model bestrijkt is blijkbaar te groot om een tijdreeks van één windstation op te leggen. Daarom wordt in dit hoofdstuk gerekend met een variabel windveld. In paragraaf 2 wordt de te volgen procedure beschreven. Paragraaf 3 beschrijft de uitkomsten. In paragraaf 4 volgt de conclusie.

7.2 Beschrijving procedure en parameters

De gebruikte programmatuur voor het gebruikte variabele windveld is oorspronkelijk ontwikkeld door het KNMI en is bedoeld om snel globale windvelden te maken ter grootte van Nederland. In een later stadium is deze programmatuur aangepast om gebruikt te gaan worden voor het SCALWEST-model (Jansen, 1998c). Het variabele windveld wordt met behulp van een aantal MATLAB scripts aangemaakt. Als invoer dienen tijdreeksen van windstations langs de Westerschelde. Normaal worden vijf stations gebruikt als invoer. In de gebruikte periode zijn echter maar 3 windstations operationeel geweest. Dit zijn de Vlake van de Raan, Hansweert en Prosperpolder. Dit laatste station is twee keer een aantal uren uitgevallen. Deze perioden zijn handmatig aangevuld. Zie Bijlage 22 voor de windsnelheden en windrichtingen van de gebruikte periode. Uit deze stations wordt geprobeerd het windveld te reconstrueren, door vanuit de gemeten wind te interpoleren naar het gedefinieerde grid. Daarbij wordt gebruik gemaakt van een Kalman filter. Het uiteindelijke resultaat is dat de vectoren (meestal) draaien rond een lagedrukgebied (tegen de wijzers van de klok in) en dat de vectoren landinwaarts afnemen. Er wordt over een periode van 60 minuten gemiddeld. Dit is gedaan om een te grote rekentijd te vermijden. Een gridafstand van 1 km wordt aangehouden voor het variabele windveld. Voor het interpoleren zijn een aantal parameters nodig. Deze zijn:

σ_0	=2,5	:standaarddeviatie fout in gemeten windsnelheden	[m/s];
σ_w	=20	:standaarddeviatie in eerste schatting	[m/s];
d_{rot}	=100000	:correlatielengte van het rotatiegedeelte van het windveld	[m];
d_{div}	=100000	:correlatielengte van het divergentiegedeelte van het windveld	[m];
$frac_{div}$	=0,25	:correlatie tussen metingen	[-].

In de opsomming hierboven staan de waarden die in Jansen (1998c) zijn gebruikt. De σ_0 en de $frac_{div}$ kunnen gevarieerd worden en zullen ook gebruikt worden voor een gevoeligheidsonderzoek.

De σ_0 is een maat voor de fout in de metingen. Naarmate de σ_0 groter is gaat het windveld globaler verlopen, omdat de afhankelijkheid van één enkele meting minder wordt. In dit onderzoek wordt met de waarden van σ_0 gerekend van 0,5, 2,5, en 5,0. Zie Bijlage 37 voor een aantal windvelden met deze verschillende waarden voor σ_0 .

De $frac_{div}$ geeft de afhankelijkheid tussen de metingen weer. Een waarde van 0 geeft aan dat de lucht onafhankelijk stroomt van de stations door het gebied. Een waarde van 0,5 zorgt ervoor dat de lucht van het ene naar het andere meetpunt stroomt. Voor dit onderzoek zijn de waarden 0,15, 0,25, en 0,5 voor $frac_{div}$ gebruikt. Zie Bijlage 38 voor de verschillende windvelden. Te zien is dat het op het eerste gezicht weinig verschil uitmaakt met welke parameter men rekent.

7.3 Resultaten

7.3.1 Basisrun Variabel Windveld

In Bijlage 39 staan de resultaten van de basisrun met als parameters van het variabele windveld $\sigma_0=2,5$ en $frac_{div}=0,25$. Te zien is dat de resultaten ten opzichte van de constante wind in Hansweert verbeterd in het westelijk deel van de Westerschelde. In het oostelijk gedeelte zitten de runs dichter op elkaar.

De afwijkingen van de modelresultaten ten opzichte van de metingen op hoog- en laagwater staan in Bijlage 40. Duidelijk te zien is dat de hoogwaterstanden nog steeds te laag worden berekend. In de onderste figuur van de bijlage is te zien dat er wel een verbetering van de resultaten plaatsvindt van de hoogwaterstanden.

De laagwaterstanden worden goed berekend in vergelijking tot de runs met de wind-tijdreeks. De afwijkingen op laagwater vallen zelfs binnen de gestelde range van 10 cm afwijking. Ook hier worden de laagwaterstanden verbeterd zoals uit de onderste figuur van de bijlage blijkt.

In Bijlage 41 staan de gemiddelde en standaarddeviatie van de modellen met de metingen. Te zien is dat gemiddeld ten opzichte van de run met de wind bij Hansweert de resultaten verbeteren met een variabel windveld, maar dat ten opzichte van de run met de wind bij de Vlake van de Raan de afwijking slechter wordt in het westelijk gedeelte van het estuarium. In het oostelijk gedeelte worden de afwijkingen van de run met de wind bij de Vlake van de Raan te groot doordat de windsnelheid in werkelijkheid daar veel lager is. De standaarddeviatie is met het variabel windveld wel het laagst van alle runs.

Om het verschil in de hoog-en laagwaterstanden nog eens nader te bekijken zijn de gemiddelde afwijkingen van de verschillende resultaten nog eens bekeken voor de waterstand boven 2,5 m en beneden 0 m NAP (Bijlage 42 en Bijlage 43). Te zien is dat de gemiddelde afwijking voor de waterstand boven 2,5 m NAP het laagst is bij de run met de wind bij de Vlake van de Raan. De run met de wind bij Hansweert vertoont de grootste gemiddelde afwijkingen. De gemiddelde afwijkingen van de run met het variabele windveld liggen tussen deze twee runs in, zoals ook verwacht mocht worden. De standaarddeviatie is ook hier het laagst bij een variabel windveld.

De gemiddelde afwijking voor de waterstand beneden 0 m NAP (Bijlage 43) laat zien dat het variabele windveld de beste resultaten levert. De gemiddelde afwijkingen van de run met de wind bij de Vlake van de Raan lopen op naar Antwerpen. De opstuwing is te hoog op laagwaterstanden. De run met de wind bij Hansweert toont slechtere resultaten dan het variabele windveld, maar betere dan met de VR-run. Bij het variabele windveld is de standaarddeviatie het kleinst.

Gezegd kan worden dat met het variabele windveld de hoogwaterstanden (nog) niet goed berekend worden, maar de laagwaterstanden wel.

7.3.2 Gevoeligheidsonderzoek parameters variabel windveld

De volgende runs zijn gedaan met verschillende windvelden:

Run	Model	σ_0	frac_{div}
basisrun	fijn/grof	2,5	0,25
σ_0 1	fijn	0,5	0,25
σ_0 2	fijn	5,0	0,25
frac_{div} 1	fijn	2,5	0,15
frac_{div} 2	grof	2,5	0,5

Tabel 7-1: Gebruikte instellingen voor σ_0 en frac_{div}

In Tabel 7-2 staan de resultaten tussen deze runs. De runs zijn vergeleken ten opzichte van de basisrun. Te zien is dat het weinig uitmaakt welke parameters men gebruikt. Hoogstens 1 à 2 cm gemiddeld met een vrij kleine spreiding. Dit komt waarschijnlijk omdat het windveld vrij stabiel is. In de bijlagen van de windvelden is al te zien dat de verschillende parameters weinig invloed hebben op de windvectoren. In Jansen (1998c) is het windveld veel gevoeliger voor de parameters. De run met $\text{frac}_{\text{div}} = 0,5$ is met het grofmazige model uitgevoerd omdat het fijne model instabiel werd. De resultaten hiervan zijn vergeleken met de basisrun van het grofmazig model.

Run	Model	σ_0	frac_{div}	WKAP	VLIS	TERN	HANS	BAAL	BATH	PROS	ANTW
Gemiddelde											
σ_0 1	fijn	0,5	0,25	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
σ_0 2	fijn	5,0	0,25	0,00	-0,01	-0,02	-0,02	-0,02	-0,02	-0,02	-0,02
frac_{div} 1	fijn	2,5	0,15	0,00	0,00	-0,01	-0,01	-0,01	-0,01	-0,01	-0,01
frac_{div} 2	grof	2,5	0,5	0,00	0,00	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
Standaarddeviatie											
σ_0 1	fijn	0,5	0,25	0,01	0,02	0,03	0,01	0,01	0,01	0,01	0,02
σ_0 2	fijn	5,0	0,25	0,01	0,02	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,02
frac_{div} 1	fijn	2,5	0,15	0,01	0,01	0,02	0,01	0,01	0,01	0,01	0,02
frac_{div} 2	grof	2,5	0,5	0,01	0,01	0,01	0,01	0,02	0,01	0,01	0,04

Tabel 7-2: Gemiddelde verschillen en standaarddeviaties door wijziging van de parameters van het variabele windveld (m)

7.3.3 Windstresscoëfficiënt

Een hogere windstresscoëfficiënt zorgt voor een hogere opstuwing van het water. Dit kan dus een mogelijke oplossing van het probleem zijn. Uit hoofdstuk 4 blijkt dat het een gevoelige parameter is. Met behulp van het variabele windveld is het model opnieuw doorgerekend met een C_d -waarde van 0,0030 (Zie Bijlage 44). Te zien is dat de hoogwaterstanden iets hoger komen te liggen, maar dat de laagwaterstanden veel hoger komen te liggen, terwijl juist de laagwaterstanden goed waren en de hoogwaterstanden te laag. Geconcludeerd kan worden dat een hogere C_d -waarde op deze manier niet een oplossing is voor het probleem.

7.3.4 10% hardere wind

Een andere mogelijkheid voor de afwijkingen is dat het windveld niet goed gereconstrueerd is. Door nu met 10% hogere windsnelheden te rekenen kan gezien worden of dit een beter resultaat geeft. In Bijlage 45 is te zien dat de gehele middenstand van het getij omhoog gaat, zoals te verwachten viel. Op laagwater is er meestal meer opstuwing dan op hoogwater. De resultaten verbeteren niet met het gebruik van een hardere wind. Verderop in het estuarium wordt het water teveel opgestuwd. Gesteld kan worden dat het model erg gevoelig is voor wind, maar dat er op dit moment geen reden is aan te nemen dat het windveld fout gereconstrueerd is.

7.4 Conclusie

Het variabele windveld zorgt voor een verbetering van de resultaten ten opzichte van de run met de wind bij Hansweert (de standaard wind-formulering in het model). Het windveld doet precies wat verwacht werd, de nauwkeurigheid zit tussen de twee runs met de wind als tijdreeks in. Maar omdat de run met de grootste wind (Vlakte van de Raan) de hoogwaterstanden al niet eens haalde, worden de hoogwaterstanden ook met een variabel windveld niet gehaald. De laagwaterstanden worden ten opzichte van de twee runs met de wind als tijdreeks wel goed berekend. De afwijkingen vallen zelfs binnen de gestelde afwijking van 10 cm. Een grotere C_d -waarde en een 10% hardere wind geven een verhoging van de middenstand van het getij. Dit zijn dus geen oplossingen van het probleem omdat alleen de hoogwaterstanden te laag worden berekend.

Er moet in ieder geval nog een oorzaak zijn voor de afwijkingen op hoogwater in het model. In het volgende hoofdstuk wordt de fout die geïntroduceerd wordt door de randvoorwaarden bekeken. De verwachting is dat hierin een grote verbetering te behalen is.

8. De randvoorwaarde bij Zeebrugge

8.1 Inleiding

Met het variabele windveld verbeteren de resultaten ten opzichte van de standaard windformulering. De laagwaterstanden worden goed berekend, maar de hoogwaterstanden worden nog steeds te laag berekend. In dit hoofdstuk wordt bekeken in hoeverre de randvoorwaarden deze fouten kunnen veroorzaken, en dan met name bij het randvoorwaardepunt Zeebrugge.

In hoofdstuk 5 is al aangetoond dat de randvoorwaarden invloed kunnen hebben op de waterstanden in het gehele estuarium. De reconstructie van het randvoorwaardepunt Zeebrugge uit het waterstandsstation Vlakte van de Raan is een mogelijke bron van fouten, omdat het randvoorwaardepunt ver weg ligt van het station Vlakte van de Raan. De waterstand bij Zeebrugge wordt gereconstrueerd door een faseverschuiving en een amplitudevergroting van het getij op basis van het M2 getij van de twee punten toe te passen (zie paragraaf 3.2.4).

Geprobeerd wordt via twee wegen inzicht in de afwijking van de randvoorwaarde te verkrijgen.

- Er wordt een stormvloedperiode bekeken waarvan metingen beschikbaar zijn van Zeebrugge. De verschillen tussen de afgeleide en werkelijke waterstand geven een indicatie van de fouten tijdens de Crocus-storm.
- Er wordt naar de opzet van verschillende stations in de mond van de Westerschelde gekeken tijdens de gebruikte periode, dit zegt mogelijk iets over de opzet in Zeebrugge.

Vervolgens wordt er op basis van deze uitkomsten een aanpassing voorgesteld van de randvoorwaarde bij Zeebrugge en wordt het model opnieuw doorgerekend. Gekeken wordt of de aanpassing een verbetering van de resultaten geeft.

8.2 Vergelijking afgeleide en opgetreden waterstand

Er zijn geen metingen beschikbaar van Zeebrugge voor de Crocus-stormvloedperiode. Van een andere stormvloedperiode (28 en 29 augustus 1996) zijn er wel metingen beschikbaar. De gemeten en de afgeleide waterstand bij Zeebrugge voor deze periode staan in Bijlage 46. Te zien is dat onder normale omstandigheden (26 en 27 augustus) de afgeleide waterstand op laagwater te hoog zijn (ca. 5 cm) en op de steile takken te laag (ca. 10 cm). Tijdens de storm is de afgeleide waterstand vrijwel geheel te laag. Op de steile takken van het getij zijn de afwijkingen het grootst, deze lopen op tot ca. 30 cm. Op de hoog- en laagwaters zijn de afwijkingen lager. Het verschil laat zien dat de M4 component en een extra opzet meegenomen moeten worden.

Gesteld kan worden dat de afleiding vanuit de Vlakte van de Raan duidelijke afwijkingen geeft ten opzichte van de gemeten waterstand. Tijdens de Crocus-stormvloedperiode zijn er nog hogere waterstanden opgetreden dan 28/29 augustus, het is dus best mogelijk dat de afwijkingen nog groter zijn.

8.3 Windopzet van stations in de mond van de Westerschelde

Er zijn van de periode astronomische gegevens bekend van de stations Vlakte van de Raan, Westkapelle en Vlissingen. Nu is het mogelijk de opzet te berekenen door de opgetreden van de astronomische waterstand af te trekken (zie Bijlage 47). Uit de bijlage blijkt dat er grote verschillen zijn in opzet tussen de drie stations in de mond van de Westerschelde. Het lijkt dan ook logisch dat de opzet van Zeebrugge ook sterk afwijkt van de opzet van de Vlakte van de Raan. De opzet bij Zeebrugge zal waarschijnlijk hoger zijn dan de Vlakte van de Raan, omdat het water richting land opgestuwd wordt. De afgeleide waterstand zal dan ook verschillen van de werkelijke waterstand.

8.4 Aanpassing van de randvoorwaarde bij Zeebrugge

Uit paragraaf 9.1 en 9.2 volgt dat de afgeleide waterstand bij Zeebrugge waarschijnlijk te laag is. Een maat voor de afwijking is de afwijking die gevonden is bij Vlissingen. Door de afwijking bij Vlissingen nu bij de randvoorwaarde van Zeebrugge op te tellen ontstaat waarschijnlijk een betere randvoorwaarde.

In Bijlage 48 staan de uitkomsten van deze run. Te zien is dat inderdaad een verbetering van de resultaten plaatsvindt, de hoogwaters worden beter berekend, terwijl de laagwaterstanden ongeveer gelijk blijven.

De afwijkingen op hoog- en laagwater staan in Bijlage 49. Te zien is dat de hoogwaterstanden nog steeds te laag berekend worden (bovenste grafiek), maar dat er een duidelijke verbetering plaatsvindt van de hoogwaterstanden ten opzichte van de run met (alleen) het variabele windveld (onderste grafiek).

De laagwaterstanden worden nog steeds goed berekend (bovenste grafiek), de verschillen met de run van het variabele windveld zijn klein.

In Bijlage 50 staan de gemiddelde afwijkingen en de standaarddeviatie van de run met de metingen. Geconstateerd kan worden dat er een duidelijke verbetering plaatsvindt voor de gemiddelde afwijking. De gemiddelde afwijkingen op hoogwater wordt ook een stuk verbeterd. De laagwaterstanden blijven ongeveer gelijk.

8.5 Conclusie

Het is duidelijk dat de randvoorwaarde zorgt voor een grote fout in het model. Uit een eerste schatting van de randvoorwaarde bij Zeebrugge blijkt dat er al grote verbeteringen van de resultaten plaatsvinden. De betrekking vanuit de Vlake van de Raan is blijkbaar niet meer geldig tijdens stormvloed. Er zullen hogere orde componenten en een extra opzet meegenomen moeten worden voor een betere randvoorwaardeformulering.

Bij de gemiddelde afwijkingen valt op dat de vorm van de grafiek vrijwel hetzelfde blijft. Bij de aangepaste randvoorwaarde verschuift de grafiek alleen. Blijkbaar werken afwijkingen in de randvoorwaarde door in het gehele model. Als de randvoorwaarde goed in het model zit, worden de hoogwaterstanden dus nog steeds te laag berekend in het middengedeelte van het estuarium, zoals blijkt uit Bijlage 50.

9. De afregelprocedure

9.1 Afregelprocedure van het SCALWEST-fijn model onder normale omstandigheden

Het SCALWEST-fijn model is afgeregeld voor normale omstandigheden. Hierbij is ook naar verschillende parameters gekeken. Het definitief fijn afregelen van het model is gebeurd aan de hand van de bodemruwheid. Hierbij is per sectie (tussen twee meetstations) de bodemruwheid iteratief aangepast, zodanig dat de berekende waterstand zo goed mogelijk overeenkomt met de opgetreden waterstand (Jansen, 1997a). De viscositeit wordt gebruikt voor de afregeling van de laagwaterstanden in de Zeeschelde. De afregeling is gedaan voor een bepaalde periode, en is later geverifieerd voor andere perioden.

9.2 Afregelprocedure van het SCALWEST-model onder stormvloedomstandigheden

In dit rapport is vanuit een eenzelfde fysische benadering geprobeerd het model af te regelen op stormvloeden. Gekeken is welke processen belangrijk zijn tijdens stormvloedomstandigheden. Vanuit dit gevoeligheidsonderzoek is aangegeven welke parameters beter geformuleerd moeten worden in het model. Uit het onderzoek komt dat naast de bodemruwheid (de afregelpara-meter bij uitstek) de externe factoren dominant zijn (waterstandsrandvoorwaarde en de wind). Overige processen in het model zijn volgens het gevoeligheids-onderzoek van ondergeschikt belang (zoet-zout invloed, viscositeit etc.). Naast een goede afregeling op de bodemruwheid is het dus van belang de wind en de goede waterstandsrandvoorwaarden mee te nemen in het model.

9.3 Wiskundige methode

Tegenwoordig kan men numerieke modellen ook automatisch laten afregelen door de zogenaamde adjoint-methode. Voor WAQUA heet deze methode WAQAD (WAQUA Adjoint). Allereerst wordt er een kostenfunctie gedefinieerd (Mooij, 1996):

$$J(p) = \frac{1}{2} \sum_{m,n,k} (h_{m,n}^k(p) - \hat{h}_{m,n}^k)^2 \quad (10.1)$$

Waarin:

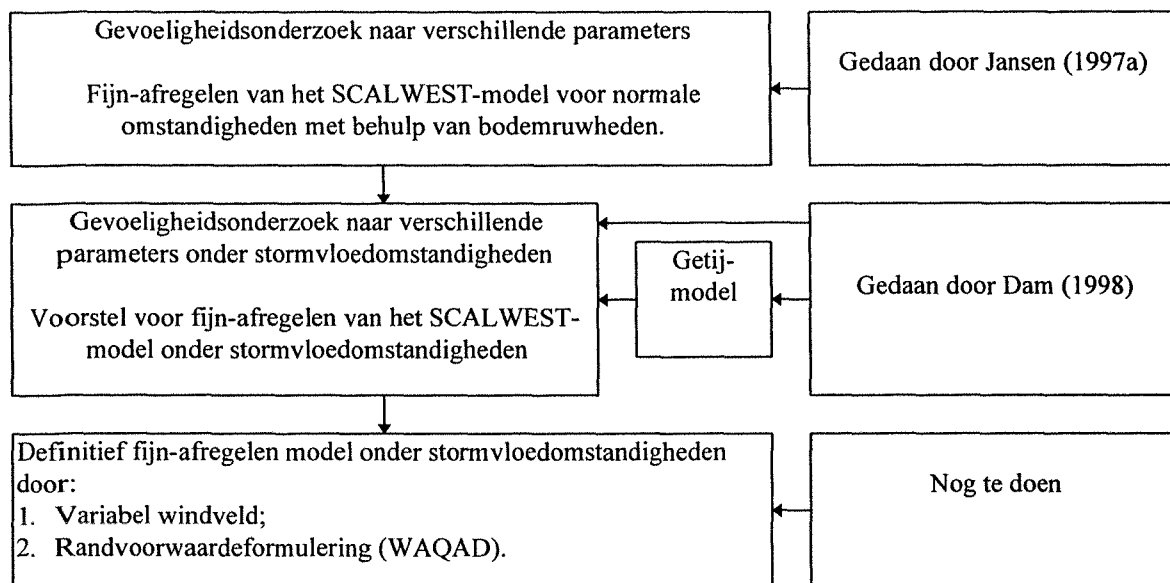
p =parameter;
 $h_{m,n}^k$ =berekende waarde;
 $\hat{h}_{m,n}^k$ =gemeten waarde;
 m,n =roostercoördinaat;
 k =tijdstap.

De kostenfunctie wordt bepaald over alle locaties en alle tijdstappen. Vervolgens wordt bij het afregelen geprobeerd deze kostenfunctie te minimaliseren. Daardoor wordt een optimale waarde van p bepaald. In principe is het mogelijk voor elke berekende waarde een kostenfunctie te bepalen. Nu wordt er alleen nog maar met waterstanden gerekend. Hiermee kunnen dan b.v. de randvoorwaarden, bodemligging en bodemruwheid worden gecalibreerd. Deze benadering kan men de wiskundige benadering noemen.

9.4 Conclusie

Gezegd kan worden dat voor het afregelen van modellen eerst inzicht verkregen moet worden in processen die in het gebied spelen met hulp van een gevoeligheids-onderzoek en of met een eenvoudig model (zoals het getij-model). De dominante processen kan men vervolgens verder gaan afregelen (b.v. met behulp van WAQAD). Een andere afregelprocedure is niet haalbaar.

Voor het SCALWEST-model kan dus de volgende afregelprocedure opgesteld worden:



Het model is eerst fijn afgeregeld op de bodemruwheid voor normale omstandigheden, vervolgens is in dit rapport een gevoeligheidsonderzoek gedaan en tenslotte moet het model fijn worden afgeregeld op punten die uit het gevoeligheidsonderzoek komen. In het geval van het SCALWEST-model moeten dus de wind en de randvoorwaarden verbeterd worden. De randvoorwaarden kunnen met behulp van WAQAD afgeregeld worden. Ook is het mogelijk om met het KUSTSTROOK-model optimale randvoorwaarden te genereren voor het SCALWEST-model met behulp van Kalman filtering.

Het onderzoek met het getij-model heeft opgeleverd dat er inzicht is verkregen in dominante processen (bodemruwheid, wind). Voor het afregelen van modellen is het echter ongeschikt, omdat er vaak in marges van tientallen centimeters gewerkt wordt, hiervoor is het getij-model te eenvoudig. Inzicht in processen is wel een eerste vereiste om een model af te regelen.

10. Conclusie en aanbevelingen

10.1 Conclusie

Het SCALWEST-model laat onder stormvloedomstandigheden afwijkingen zien. Een gevoeligheidsonderzoek toont aan dat de belangrijkste parameters de windformulering in het model en de randvoorwaarden zijn. Er is gerekend met een variabel windveld waardoor de resultaten beter werden ten opzichte van de standaard windformulering in het model, maar de hoogwaterstanden worden nog steeds te laag berekend. Hierna is de randvoorwaarde bij Zeebrugge aangepast waardoor het model opnieuw betere resultaten liet zien.

De run met de standaard-windformulering (Hansweert) laat zien dat de laagwaterstanden redelijk goed worden berekend, maar dat de hoogwaterstanden veel te laag berekend worden. Met de wind aan de zeezijde (Vlakte van de Raan), die doorgaans harder is dan landinwaarts, worden de laagwaterstanden verderop in het estuarium te hoog berekend, maar de hoogwaterstanden worden beter benaderd dan de standaard-windformulering.

Het gevoeligheidsonderzoek heeft zich gericht op de volgende parameters:

- Windveld (Hansweert of Vlakte van de Raan);
- Bodemruwheid;
- Windschuifspanningscoëfficiënt;
- Eddy-viscositeit;
- Dichtheid;
- α -chézy coëfficiënt;
- Grof- en fijnmazig model.

Uit het gevoeligheidsonderzoek komt dat onder stormvloedomstandigheden de wind een belangrijke parameter is in het model. Ook de bodemruwheid en de windstresscoëfficiënt zijn gevoelig. De reconstructie van de randvoorwaarde bij Zeebrugge vanuit de Vlakte van de Raan is mogelijk een oorzaak van de gevonden afwijkingen.

Als eerste is gerekend met een variabel windveld (Hoofdstuk 8). De windsnelheden zijn groot aan de zeezijde, maar nemen landinwaarts af. Het windveld is gereconstrueerd aan de hand van drie windstations. Uit de resultaten blijkt dat het variabele windveld precies doet wat verwacht werd, de afwijkingen zitten precies tussen de runs met de tijdreeksen in. Dit betekent dat de resultaten gemiddeld beter worden dan de standaard-windformulering (wind bij Hansweert), maar slechter dan de run met de wind bij de Vlakte van de Raan. Dit geldt voornamelijk voor het westelijk gedeelte van het estuarium, in het oostelijk gedeelte nemen de afwijkingen van de run met de wind bij de Vlakte van de Raan teveel toe. De hoogwaters worden nog steeds te laag berekend, maar de laagwaterstanden worden goed berekend.

De parameters van het windveld hebben nauwelijks invloed op de resultaten. Een verhoogde Cd-waarde en een 10% hardere wind bieden niet de oplossing voor het probleem.

Omdat er nog steeds afwijkingen op hoogwater voorkomen is naar de randvoorwaarde bij Zeebrugge gekeken (Hoofdstuk 9). Het waterstandspunt Zeebrugge wordt gereconstrueerd vanuit het waterstandsstation Vlakte van de Raan, wat een aantal kilometers verderop ligt. Hierin kunnen fouten ontstaan, doordat het getij vanuit de Vlakte van de Raan wordt gereconstrueerd door een faseverschuiving en een amplitudeverhoging op basis van het M2 getij toe te passen. Uit een vergelijking van metingen met de afgeleide waterstand van Zeebrugge voor een andere stormvloed blijkt dat de afgeleide waterstand onder de werkelijke waterstand ligt. Met een aanpassing van de randvoorwaarde is vervolgens het model opnieuw doorgerekend (ook met het variabele windveld). De resultaten worden opnieuw beter ten opzichte van de run met alleen het variabele windveld. Door de randvoorwaarde verder te optimaliseren kunnen de modeluitkomsten nog verder verbeterd worden. De afwijkingen op hoogwater in het middengedeelte van het estuarium zullen echter ook dan niet verdwijnen.

Het is dus duidelijk dat in twee stappen een grote verbetering van de uitkomsten van het model heeft plaatsgevonden voor deze periode:

1. Het variabele windveld;
2. De aangepaste randvoorwaarde bij Zeebrugge.

Voor wat betreft de afregelprocedure van het SCALWEST-model kan de volgende werkwijze opgesteld worden:

- | | |
|---|----------------|
| 1. (Fijn) Afregelen onder normale omstandigheden | Jansen, 1997a; |
| 2. (Ruw) Afregelen onder stormvloedomstandigheden | Dam, 1998; |
| 3. Afregelen m.b.v. wind en randvoorwaarden | Nog te doen; |

Een onderzoek met een simpel model van het gebied is nuttig voor het bepalen van de dominante parameters. Een afregelprocedure op basis van het getij-model is moeilijk, hiervoor is het getij-model te eenvoudig. Inzicht in de parameters is echter essentieel voor het afregelen van modellen.

10.2 Aanbevelingen voor verder afregelen van het SCALWEST-model voor stormvloeden

Nagegaan moet worden in hoeverre het afregelen moet doorgaan. Hoe nauwkeurig moet het model zijn? Hierbij moet rekening worden gehouden met de fouten van de waterstandsmetingen, lodingen en randvoorwaarden.

Indien men besluit om het SCALWEST-model nog verder af te regelen kunnen een aantal aanbevelingen worden gedaan (stap 3 van de afregelprocedure):

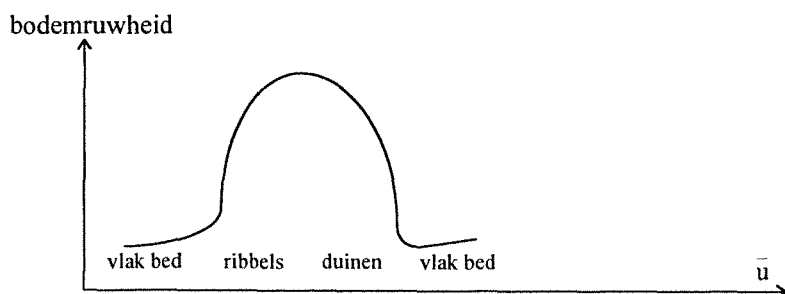
- Omdat uit het vorige onderzoek (Jansen, 1998c) kwam dat de resultaten verslechterden met het gebruik van het variabele windveld, terwijl in dit onderzoek de resultaten verbeterden, is een verdere studie naar het gebruik van variabele windvelden gerechtvaardigd.
- Een verbetering van de randvoorwaardeformulering bij Zeebrugge. Het is wenselijk om tijdens stormvloeden te rekenen met de gemeten waterstand bij Zeebrugge. Als deze metingen niet aanwezig zijn moeten hogere orde componenten (M4) en een extra opzet meegenomen worden.
- Als de Crocus-stormvloedperiode verder gebruikt gaat worden is het mogelijk om de randvoorwaarde bij Zeebrugge met behulp van WAQAD te optimaliseren. Ook kan gekeken worden naar de met het KUSTSTROOK model voorspelde waterstanden op de rand van het SCALWEST-model. Deze randvoorwaarde kan men optimaliseren met behulp van Kalman filtering.

Ook zal nog gekeken kunnen worden naar verbetering van de windstresscoëfficiënt. Hiervoor kan een knikfunctie gebruikt worden. Dit houdt in dat de C_d -waarde afhankelijk wordt van de windsnelheid. Ook zou in de toekomst een afregeling van bodemruwheden per geul kunnen plaatsvinden. Nu wordt er per sectie afgeregeld. In zo'n sectie zijn zowel platen, geulen, schorren etc. aanwezig. Al deze elementen hebben een verschillende bodemruwheid.

Verder moet vermeld worden dat het fijne model vaak instabiel wordt. Hieraan zal nog de nodige aandacht besteed moeten worden.

Ook moet in het achterhoofd gehouden worden dat een model maar een beperkte weergave van de werkelijkheid is. Een aantal processen die niet gemodelleerd kunnen worden in het model zijn (Leendertse et al., 1987):

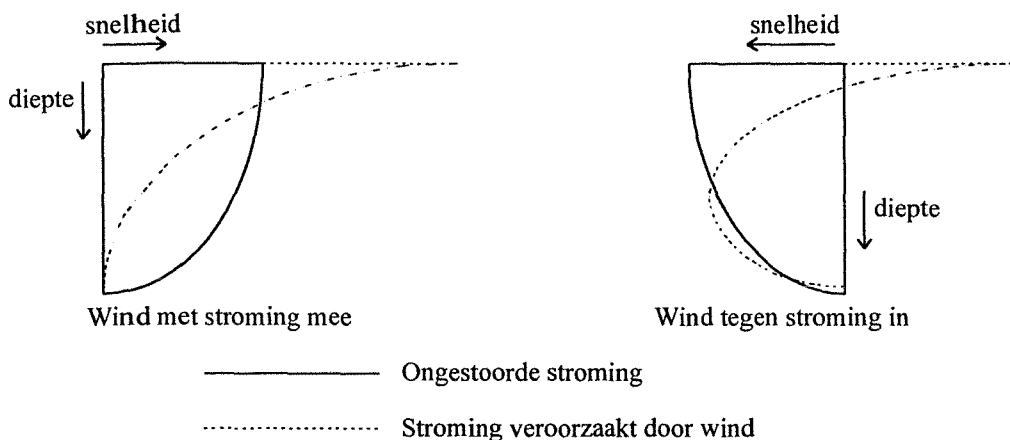
- Invloed hydraulische toestand. Bij stationaire stromingen blijkt de bodemruwheid afhankelijk te zijn van de stroomsnelheid. Bij toenemende snelheid verandert de beddingvorm van vlak naar duinvormig. Bij nog hogere snelheden treedt weer een vlak bed op gevolgd door antiduinen. Deze verschillende beddingvormen veroorzaken ook een variatie in bodemruwheid (zie Figuur 10-1)



Figuur 10-1: Invloed van de stroomsnelheid op de bodemruwheid

Voor getijstromingen kan dit van ook belang zijn, dit hangt onder andere af van de korreldiameter en het bodemmateriaal. Als de bodem fijnzandig is en als er golven aanwezig zijn dan kan zelfs het gehele patroon van vlak-bed naar duinvormig doorlopen worden binnen een getijcyclus. Dit kan dus best een oorzaak zijn van de gevonden afwijkingen in de Westerschelde tijdens stormvloedomstandigheden, dit proces zit niet in het huidige model.

- Invloed van wind op de bodemweerstand. De wind wekt een retourstroom op bij de bodem. Bij windsnelheden in dezelfde richting als de stroming blijkt de opgewekte retourstroom de snelheid boven de bodem te verminderen en daarmee schijnbaar de bodemruwheid. Bij windsnelheden tegen de richting van de stroming in treedt een tegengesteld effect op (Zie onderstaand figuur).



Figuur 10-2: Invloed van wind op de stromingsverdeling in de verticaal

Hierbij neemt de Chézy-waarde toe (bodemruwheid neemt af) bij wind mee en neemt af bij wind tegen (bodemruwheid neemt toe). Dit effect kan niet gemodelleerd worden binnen WAQUA. Mogelijk is dit effect verantwoordelijk voor het te laag berekenen van de hoogwaterstanden. Bij vloed neemt namelijk de bodemruwheid af, zoals uit bovenstaande blijkt, hierdoor zal de getijgolf minder dempen en dus zullen de hoogwaterstanden hoger zijn.

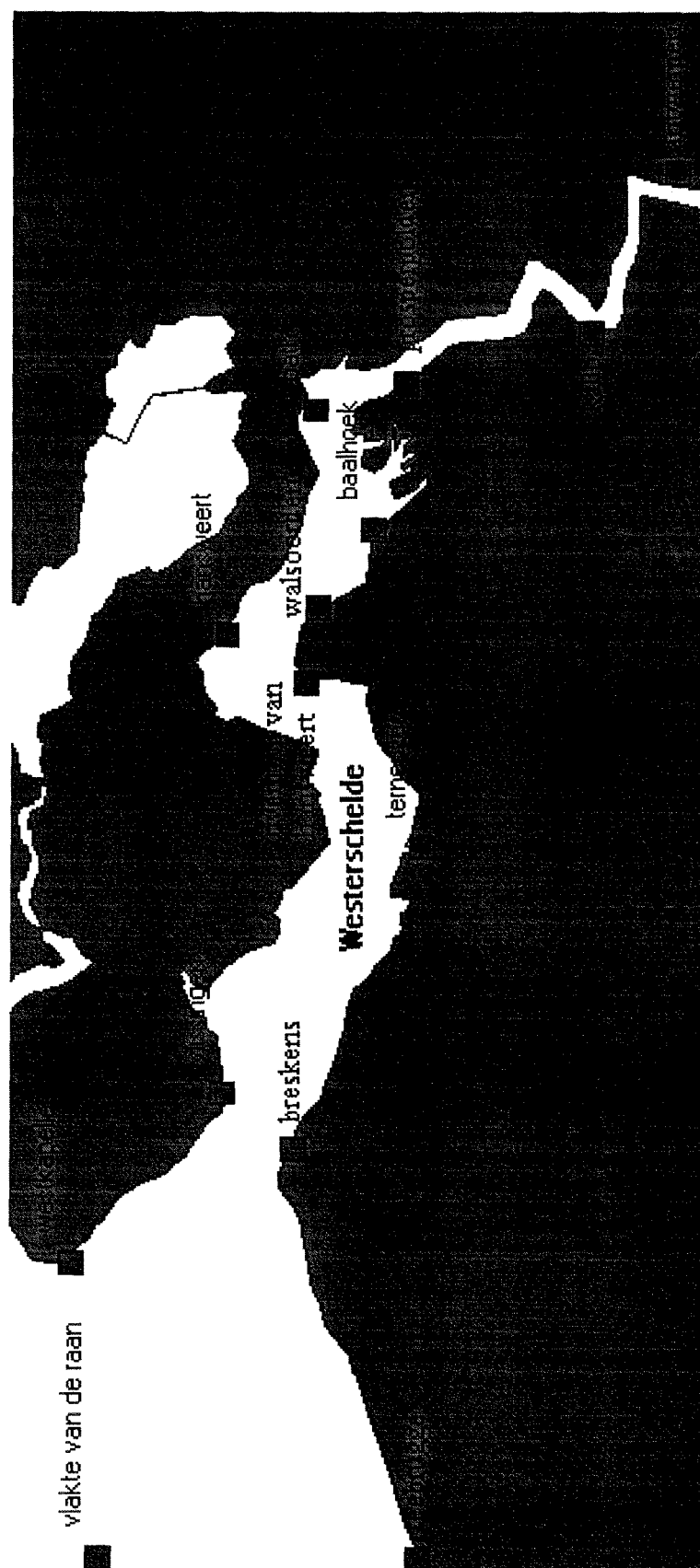
11. Literatuurlijst

- Dekker, L., *Scaldis, Modeloriëntatie, randvoorwaarden, beginvoorwaarden en metingen*. Memo. Rijkswaterstaat Directie Zeeland. September 1993.
- Dillingh, D., Haan, L., de, Helmers, R., Können, G. P., Malde, J., van, *De basispeilen langs de Nederlandse kust, Statistisch onderzoek*, Rijkswaterstaat, Rijkswaterstaat voor Kust en Zee, april 1993.
- EDS, *User's guide WAQUA*, SIMONA-rapportnr 92-10. Rijkswaterstaat/Rijkswaterstaat voor Kust en Zee, januari 1996.
- Jansen, M., *Bouw, calibratie en verificatie SCALWEST, rapportage activiteit A*, Ingenieursbureau Svašek B.V., mei 1997a.
- Jansen, M., *Bouw en Validatie TRISCAL, een 3D-model van de Westerschelde, rapportage activiteit B*, Ingenieursbureau Svašek B.V., september 1997b
- Jansen, M., *Validatie TRISCAL en aanzet sedimenttransport, rapportage activiteit C*, Ingenieursbureau Svašek B.V., januari 1998a
- Jansen, M., *Afbouw SCALWEST-modellen, rapportage activiteit D*, Ingenieursbureau Svašek B.V., juli 1998b
- Jansen, M., *Studie effect variabel windveld ten bate van project NAUTILUS*, Windvelden SCALWEST, Ingenieursbureau Svašek B.V., Juli 1998c.
- Kleef, A. W., van, *Beoordeling van de effecten van de verdieping 48' - 43'*. Plan van aanpak-rapport 2. Rijkswaterstaat/ Directie Zeeland, 1997.
- Leendertse, J. J., Verboom, G. K., Wiersma, A. K., Wybenga, J. H. A., Langerak, A., Dijkzeul, J. C. M., Stelling G. S., *Gebruik en toepassing van WAQUA*, juni 1987, Rijkswaterstaat - Waterloopkundig Laboratorium.
- Mooij, M. N. A., *Calibration of shallow water flow models using current velocities*, Rijkswaterstaat/ Rijkswaterstaat voor Kust en Zee, RIKZ/OS-96.140X, augustus 1996.
- Praagman, N., *Cursusboek Waqua-in Simona*, Ingenieursbureau SEPRA B.V., Rijkswaterstaat, juli 1996.
- Rijn, L. C. van, *Principles of fluid flow and surface waves in rivers, estuaries, seas and oceans*, 1990.
- Schaap, M., *Hedwigepolder ingericht als gecontroleerd overstromingsgebied, een verkennende studie*, Werkdocument RIKZ OS-98.882x, september 1998.
- Stelling, G. S., *On the construction of computational methods for shallow water flow problems*, Rijkswaterstaat, 1984.
- Stormvloedwaarschuwingdienst, *Verslag van de Crocus-stormvloedperiode, 26 februari t/m 2 maart 1990 (SR 63)*, Rijkswaterstaat, Dienst Getijdewateren, april 1990.
- Verbeek, H., *Morfologisch onderzoek van de Westerschelde, een zoektocht naar de mogelijkheden*. Werkdocument RIKZ OS-96.814x, mei 1996.

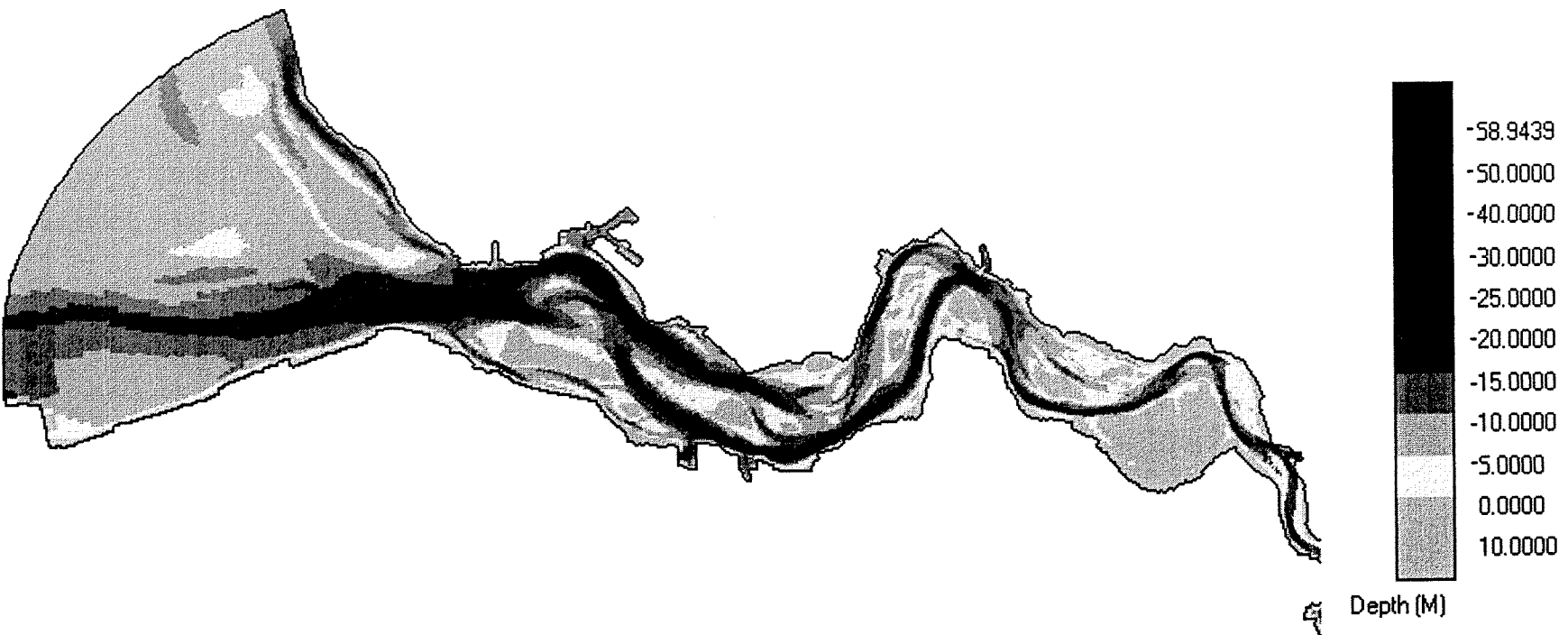
Inhoudsopgave Bijlagen

Bijlage 1: Kaart van de Westerschelde met de gebruikte waterstand- en windstations.....	48
Bijlage 2: Diepte van de Westerschelde	49
Bijlage 3: Rooster van het SCALWEST-grof model	50
Bijlage 4: Rooster van het SCALWEST-fijn model	51
Bijlage 5: De 25 hoogste stormvloedperioden sinds 1825	53
Bijlage 6: Getij-model: Bodemruwheid.....	54
Bijlage 7: Getij-model: Bodemruwheid.....	55
Bijlage 8: Getij-model: Samenvatting bodemruwheid	56
Bijlage 9: Getij-model: Diepte.....	57
Bijlage 10: Getij-model: Diepte.....	59
Bijlage 11: Getij-model: Samenvatting diepte.....	60
Bijlage 12: Getij-model: Lengte	61
Bijlage 13: Getij-model: Lengte	62
Bijlage 14: Getij-model: Samenvatting lengte.....	63
Bijlage 15: Getij-model: Wind	64
Bijlage 16: Getij-model: Wind	65
Bijlage 17: Getij-model: Samenvatting wind	66
Bijlage 18: Getij-model: Windopzet.....	67
Bijlage 19: Getij-model: Windstoot.....	68
Bijlage 20: Analytische berekeningen.....	70
Bijlage 21: Opgetreden en astronomisch getij bij Vlissingen tijdens de Crocus-stormvloedperiode	71
Bijlage 22: Windgegevens tijdens de Crocus-stormvloedperiode.....	72
Bijlage 23: Basisrun: Uitkomst SCALWEST-fijn model.....	73
Bijlage 24: Basisrun: Uitkomst SCALWEST-grof model	76
Bijlage 25: Basisrun: Verschillen hoog-en laagwaterstanden van SCALWEST-grof	77
Bijlage 26: Basisrun: Opstuwing bij Bath met SCALWEST-grof	79
Bijlage 27: Basisrun: Gemiddelde afwijking en standaarddeviatie	80
Bijlage 28: Gevoeligheidsonderzoek: Bodemruwheid.....	81
Bijlage 29: Gevoeligheidsonderzoek: Windstresscoëfficiënt	82
Bijlage 30: Gevoeligheidsonderzoek: Maximale waterstanden bij verschillende windstresscoëfficiënten	83
Bijlage 31: Gevoeligheidsonderzoek: Eddy-viscositeitscoëfficiënt	84
Bijlage 32: Gevoeligheidsonderzoek: Zoutvelden	85
Bijlage 33: Gevoeligheidsonderzoek: Dichtheid	86
Bijlage 34: Gevoeligheidsonderzoek: Alfa-chézy-coëfficiënt	87
Bijlage 35: Gevoeligheidsonderzoek: Randvoorwaarden	88
Bijlage 36: Gevoeligheidsonderzoek: Grof- en fijnmazig model	89
Bijlage 37: Var. windveld: Windvelden met verschillende σ_0	91
Bijlage 38: Var. windveld: Windvelden met verschillende frac_{div}	93
Bijlage 39: Var. windveld: Uitkomsten SCALWEST-fijn	95
Bijlage 40: Var. windveld: Verschillen hoog-en laagwaterstanden.....	98
Bijlage 41: Var. windveld: Gemiddelde afwijking en standaarddeviatie	100
Bijlage 42: Var. windveld: Gemiddelde afwijking en standaarddeviatie van de runs boven 2,5 m+NAP101	
Bijlage 43: Var. windveld: Gemiddelde afwijking en standaarddeviatie van de runs beneden 0 m NAP102	
Bijlage 44: Var. windveld: Windstresscoëfficiënt = 0,0030	103
Bijlage 45: Var. windveld: 10% hardere wind	104
Bijlage 46: Aangepaste randvoorwaarde: Afgeleide en werkelijke waterstand bij Zeebrugge voor 26-29 augustus 1996.....	105
Bijlage 47: Aangepaste randvoorwaarde: Opzet van verschillende stations in de mond van de Westerschelde	106
Bijlage 48: Aangepaste randvoorwaarde: Uitkomst SCALWEST-fijn	107
Bijlage 49: Aangepaste randvoorwaarde: Verschillen hoog-en laagwaterstanden	108
Bijlage 50: Aangepaste randvoorwaarde: Gemiddelde afwijking en standaarddeviatie.....	110

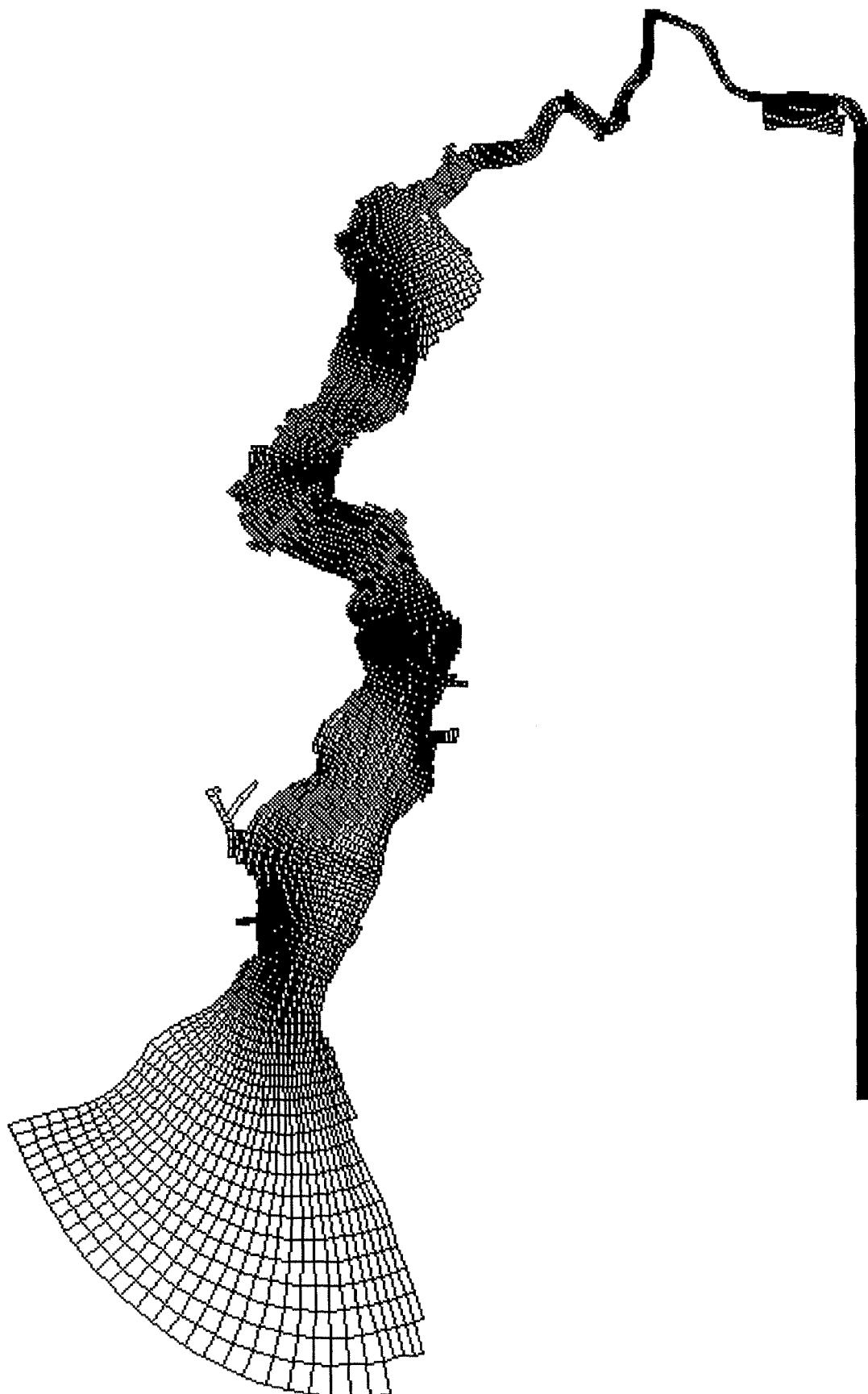
Bijlage 1: Kaart van de Westerschelde met de gebruikte waterstand- en windstations



Bijlage 2: Diepte van de Westerschelde

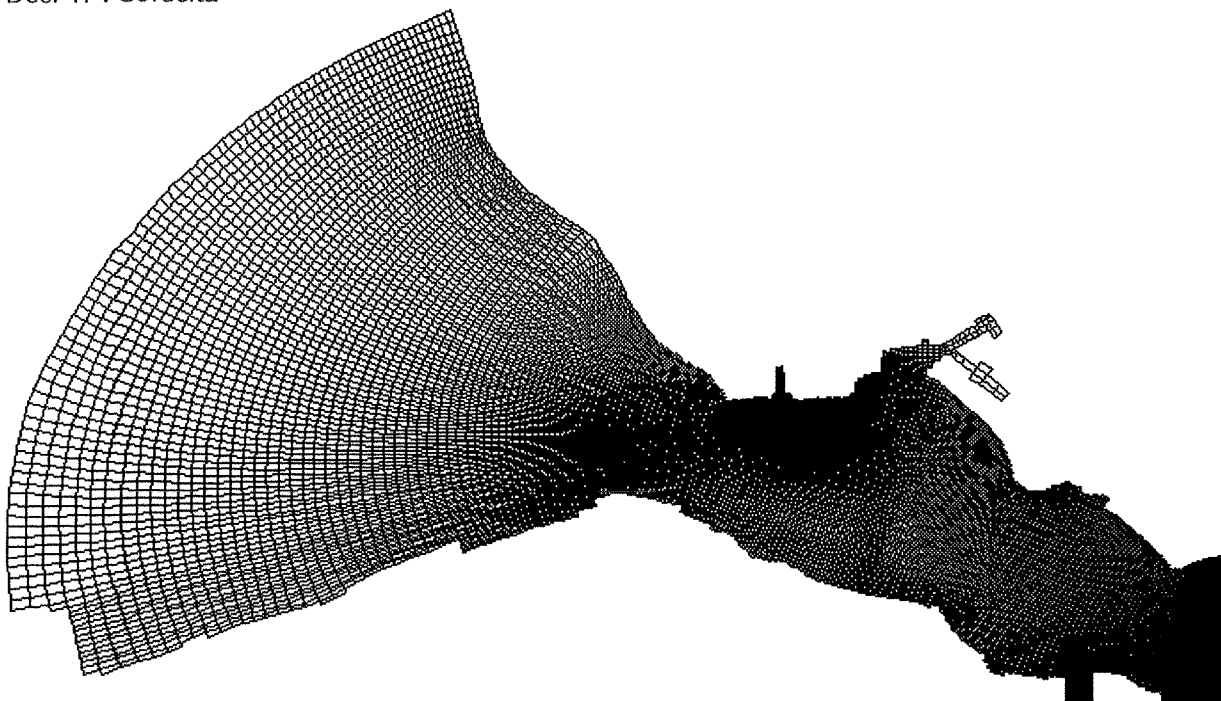


Bijlage 3: Rooster van het SCALWEST grof model

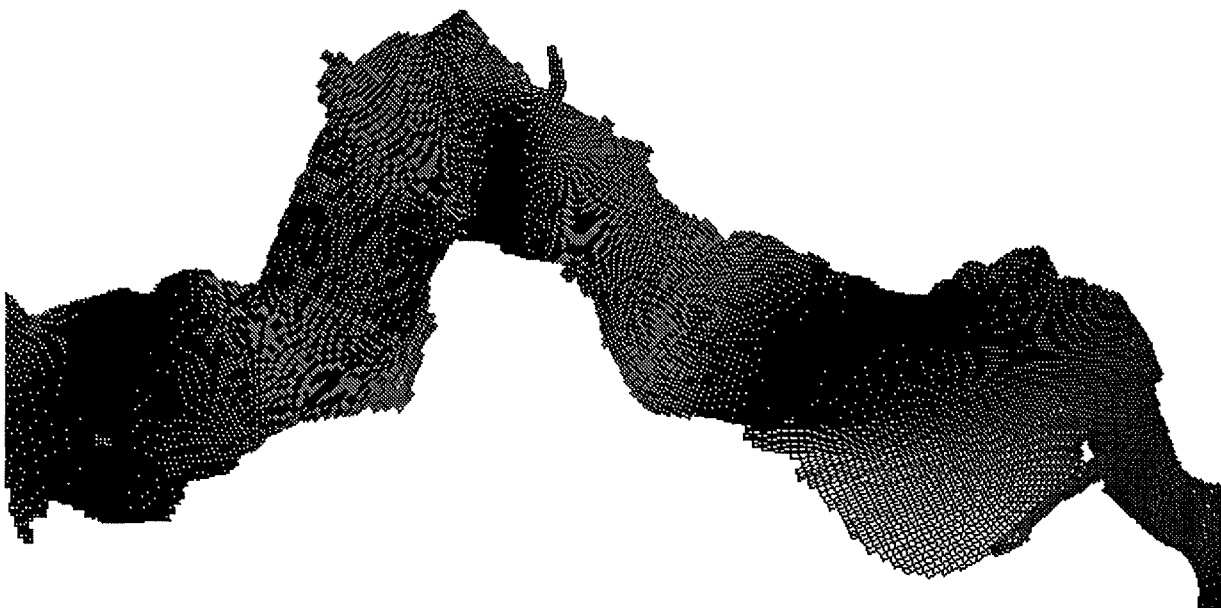


Bijlage 4: Rooster van het SCALWEST-fijn model

Deel 1: Voordelta

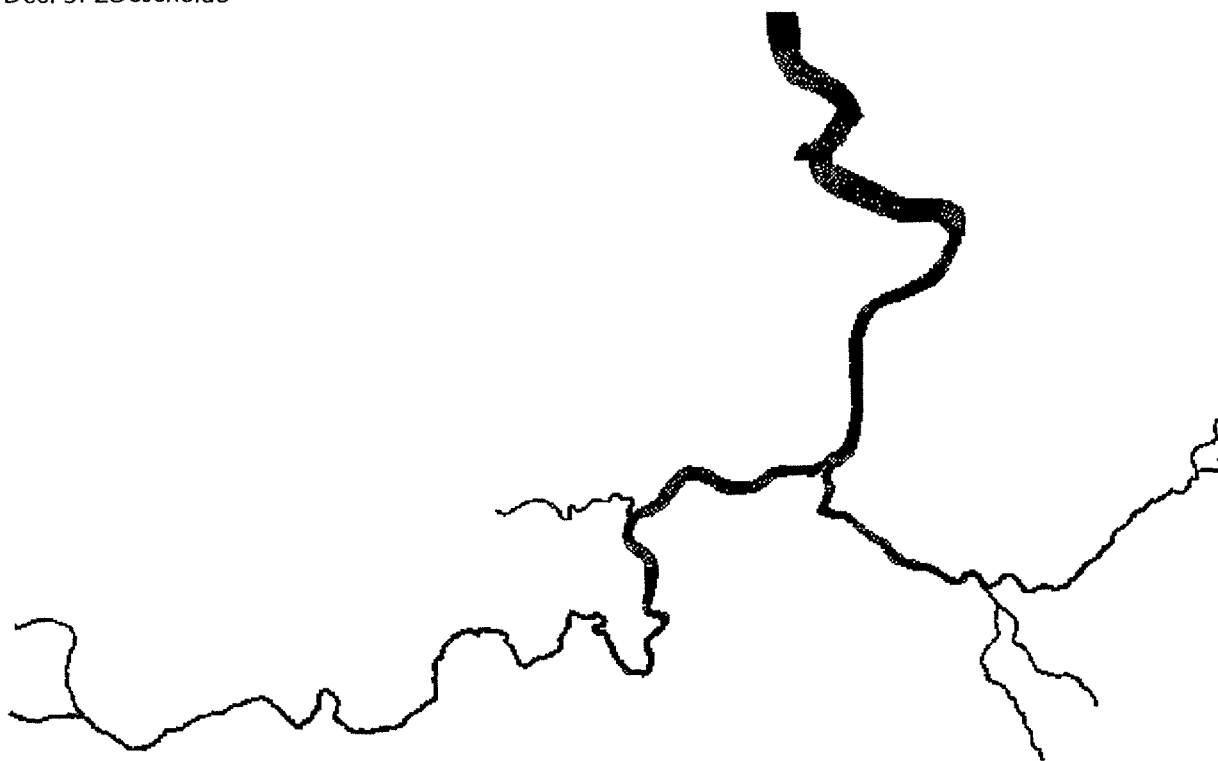


Deel 2: Middengedeelte



(Bijlage 4: vervolg)

Deel 3: Zeeschelde



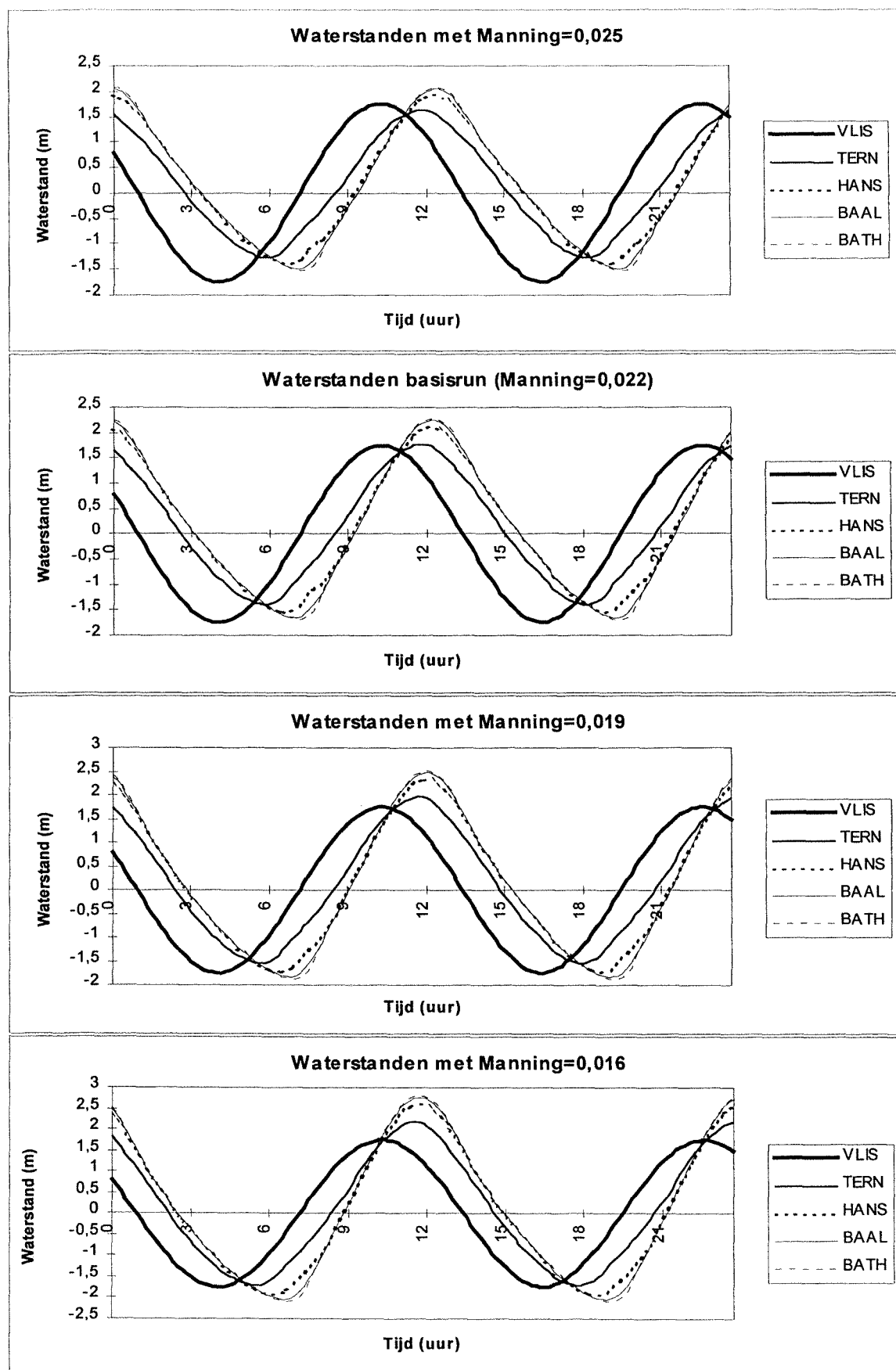
Bijlage 5: De 25 hoogste stormvloed en sinds 1825

Waterstanden in cm ten opzichte van NAP (bijgewerkt tot 30-10-1996).

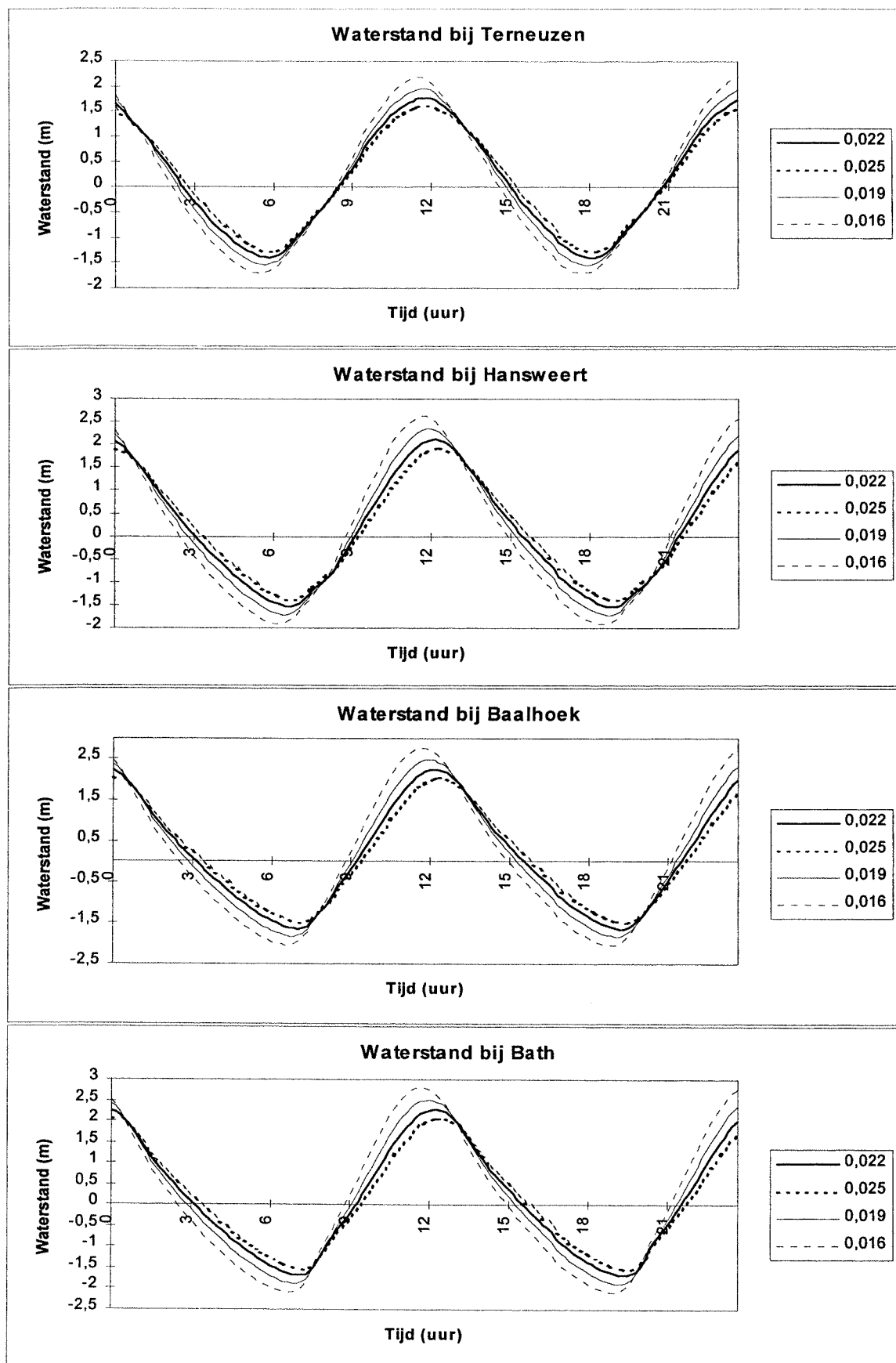
Bron: Hydro Meteo Centrum Zeeland

Nummer	Datum	Vlissingen	Terneuzen	Hansweert	Bath	Antwerpen
1	1-02-1953	455	496	507	560	-
2	3-01-1976	398	429	446	476	494
3	12-03-1906	392	427	460	483	-
4	27-02-1990	387	423	447	504	520
5	28-01-1994	387	427	441	482	501
6	30-01-1877	385	408	413	434	-
7	14-11-1993	384	414	450	501	519
8	1-03-1949	382	407	412	460	-
9	15-11-1977	378	413	425	460	480
10	29-11-1897	375	397	409	430	-
11	26-11-1928	374	400	425	468	-
12	16-11-1966	373	403	416	448	-
13	15-11-1993	372	405	410	448	470
14	2-02-1983	372	402	415	455	451
15	23-11-1930	370	413	415	475	-
16	28-02-1990	370	407	425	472	494
17	2-01-1995	369	406	414	451	474
18	21-03-1961	367	396	395	422	-
19	1-12-1936	366	390	391	426	-
20	10-12-1965	365	395	406	440	-
21	30-12-1904	365	385	401	-	-
22	1-03-1990	363	404	412	452	483
23	29-08-1996	360	396	398	454	469
24	26-01-1944	358	387	408	445	-
25	27-02-1990	356	387	405	451	471

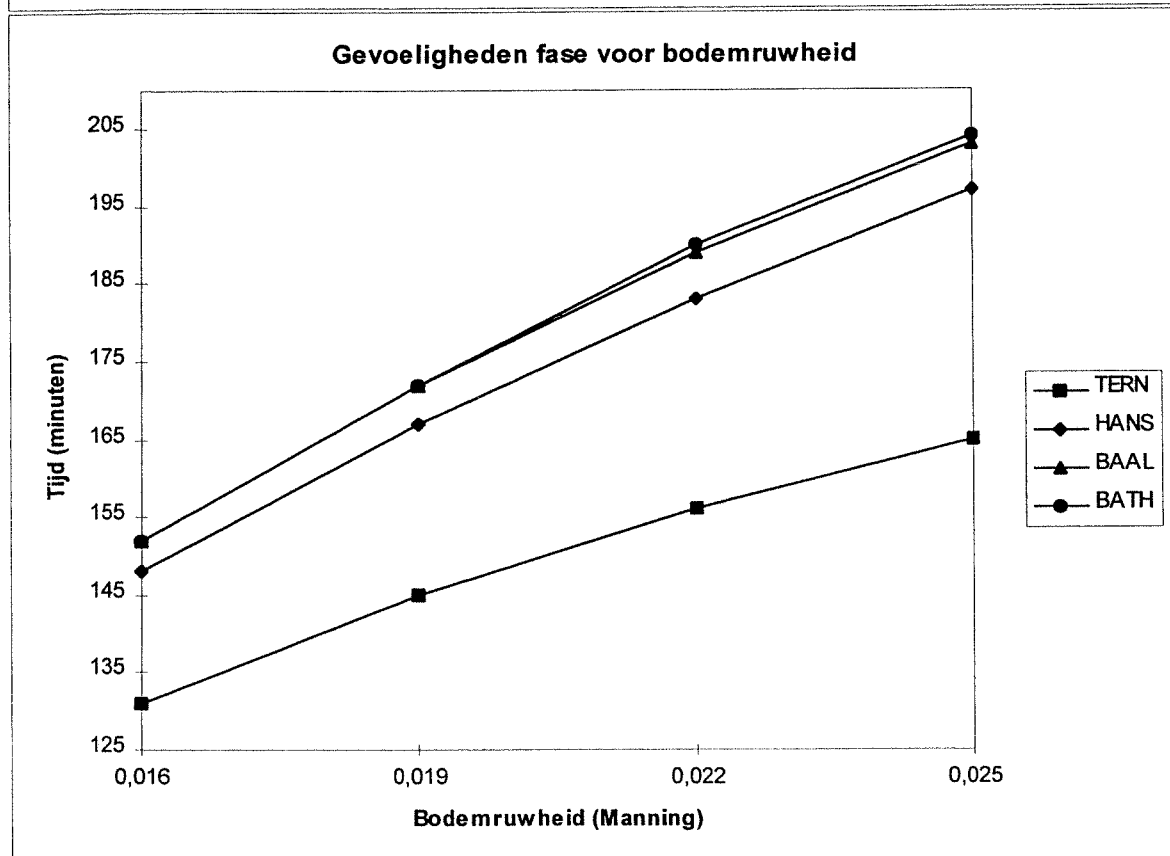
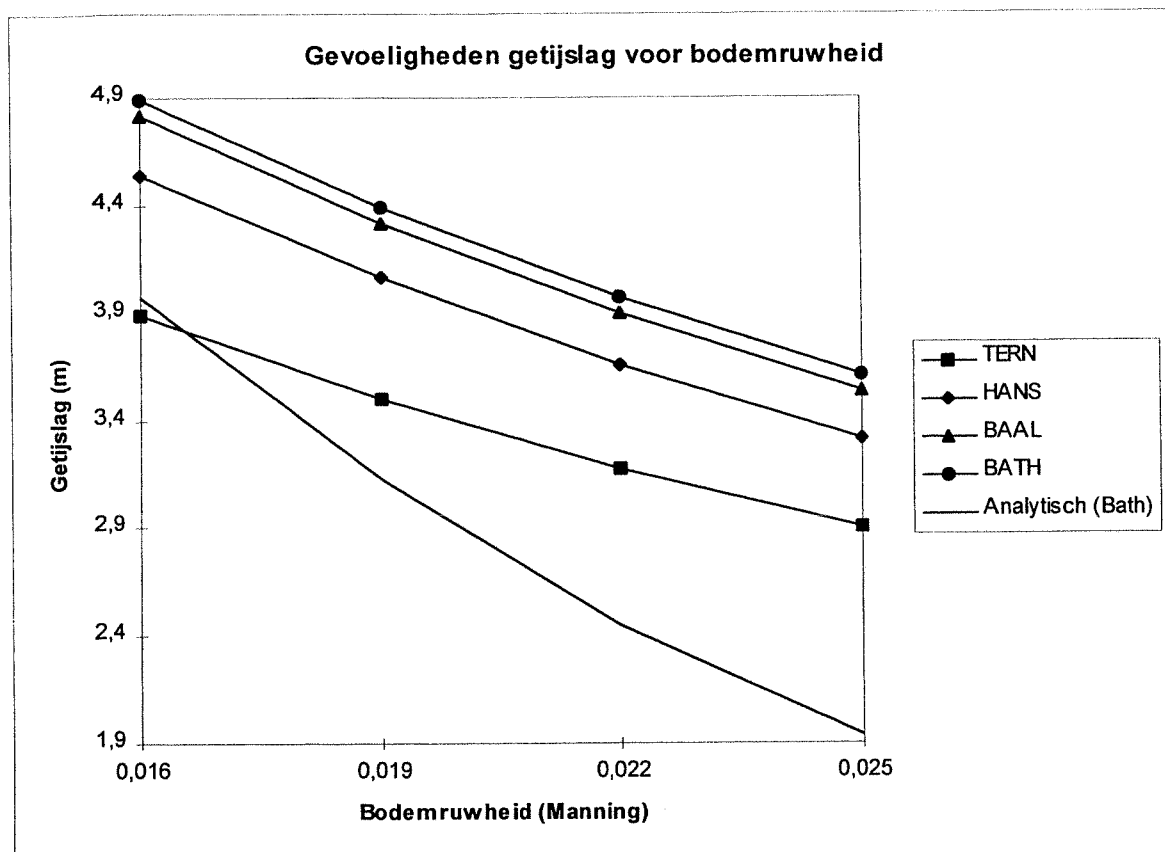
Bijlage 6: Getij-model: Bodemruwheid



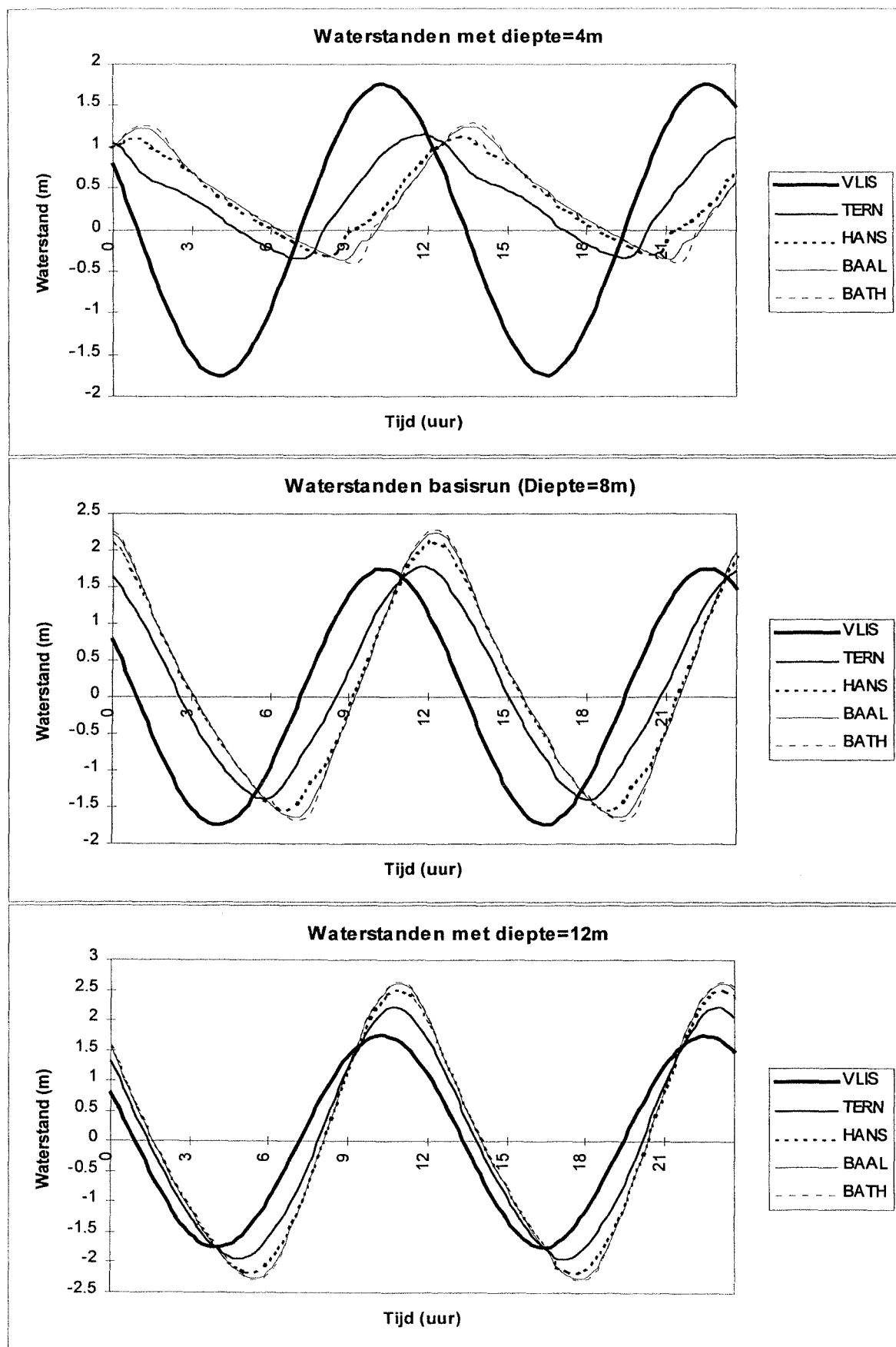
Bijlage 7: Getij-model: Bodemruwheid



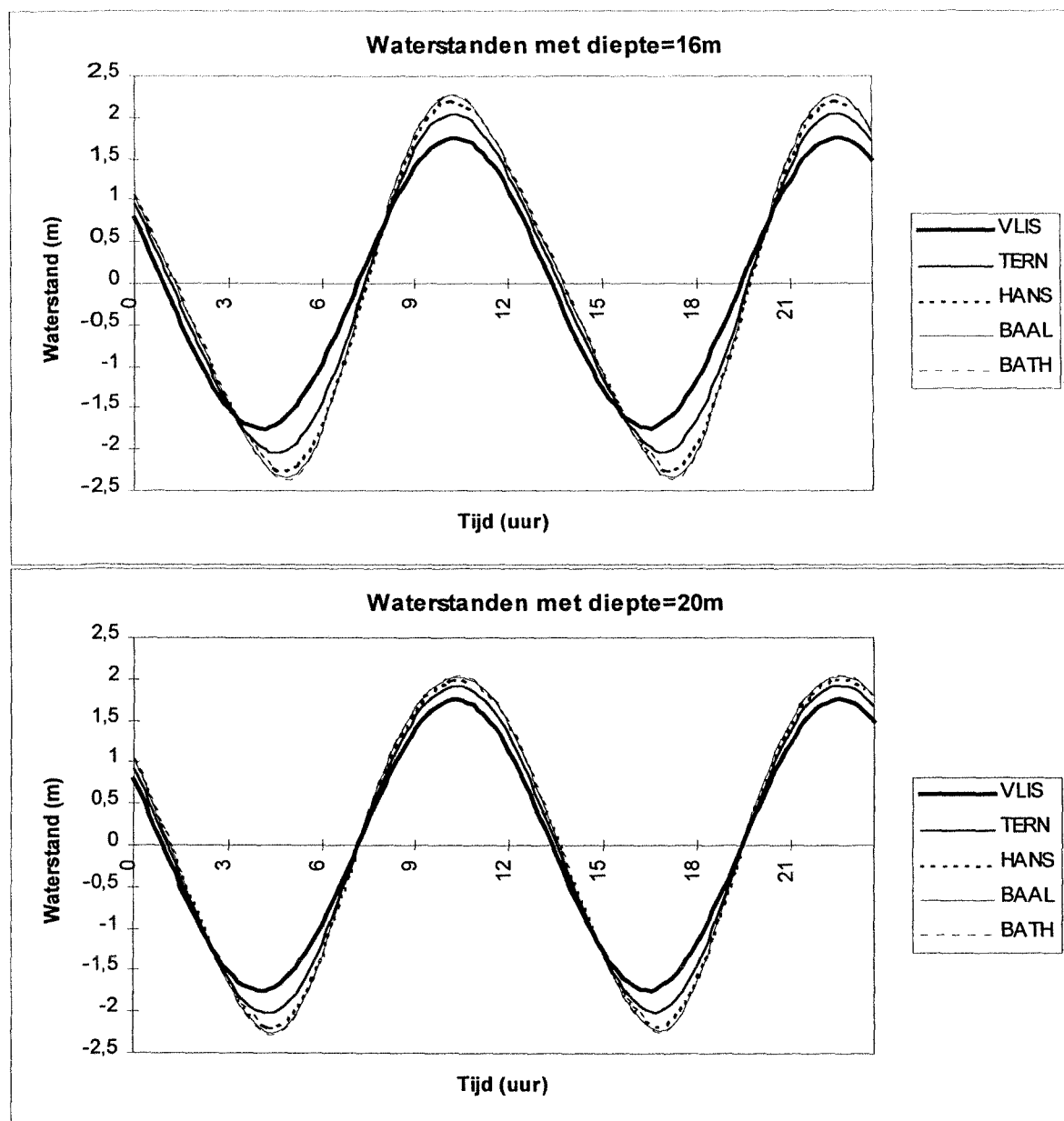
Bijlage 8: Getij-model: Samenvatting bodemruwheid



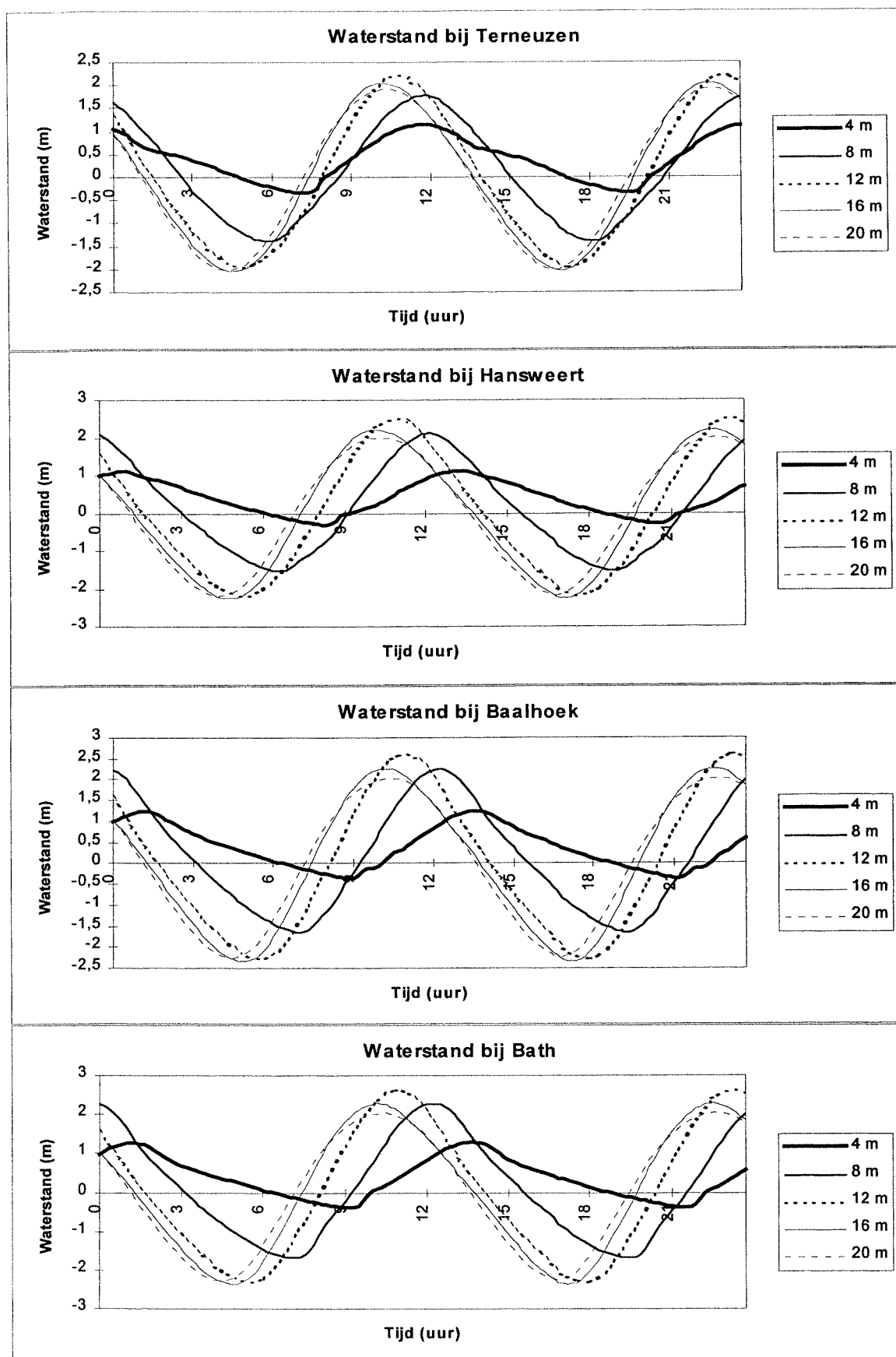
Bijlage 9: Getij-model: Diepte



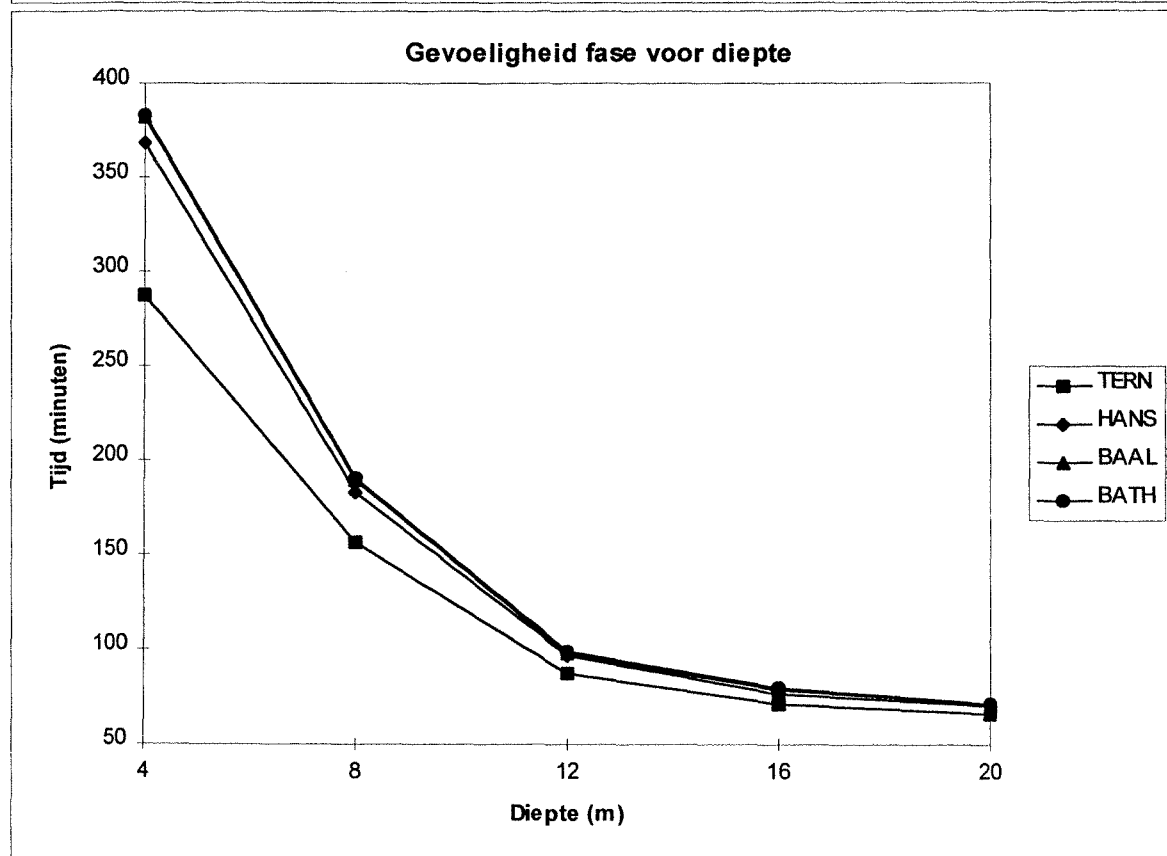
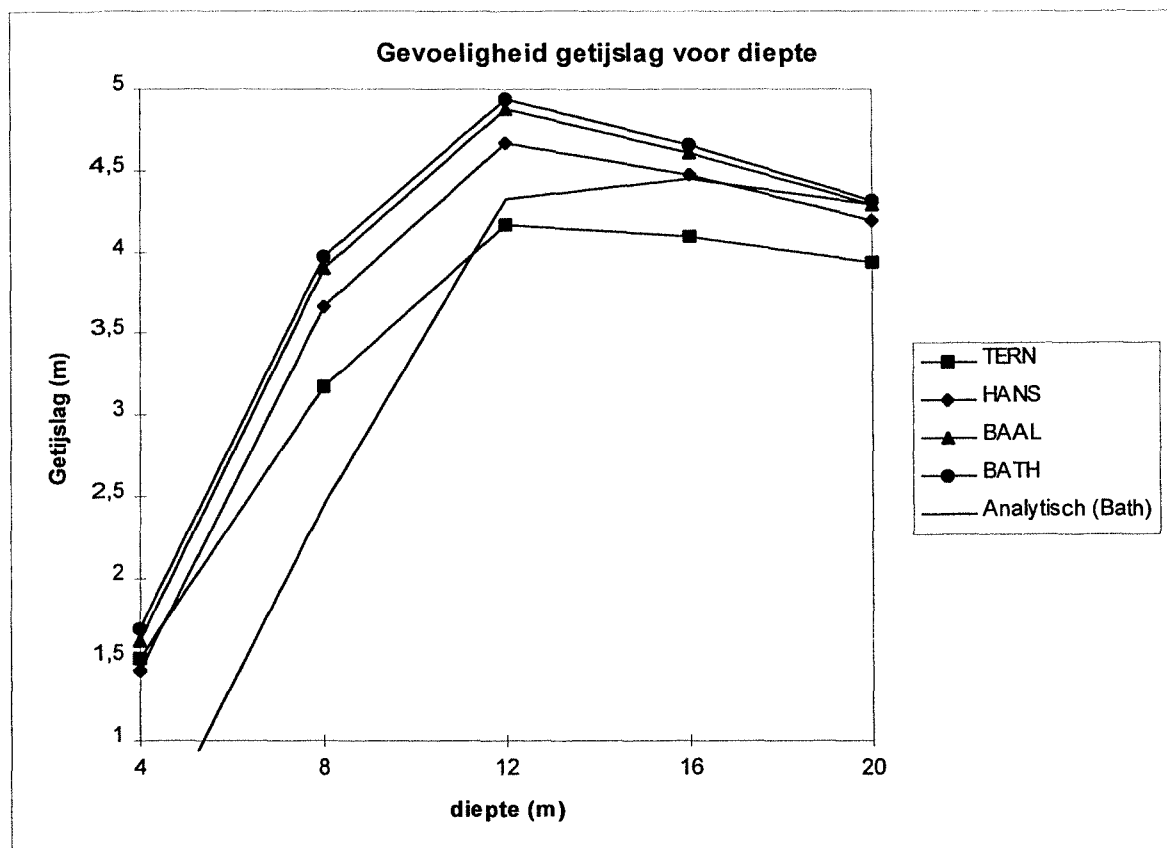
(Bijlage 9 vervolg)



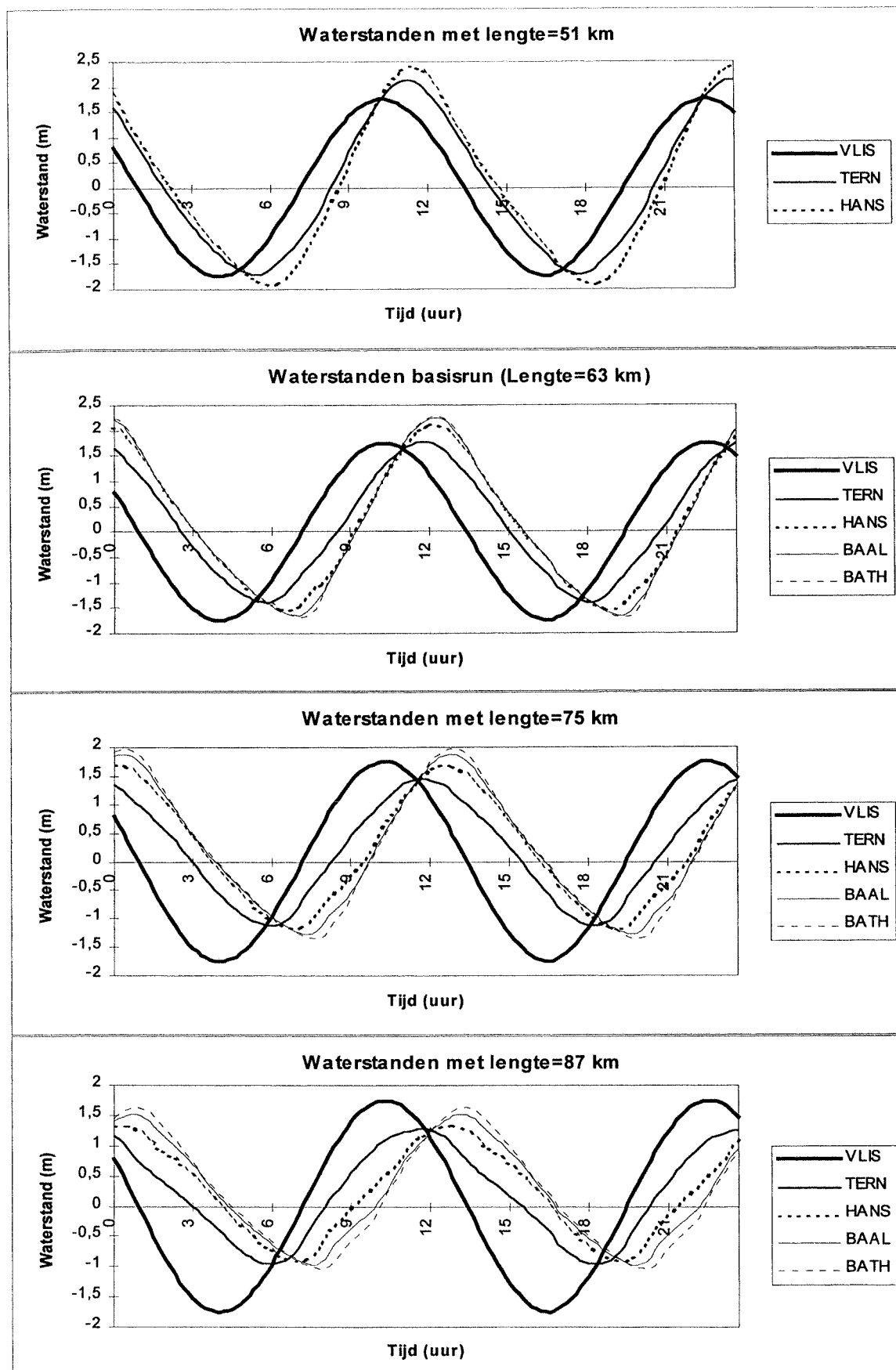
Bijlage 10: Getij-model: Diepte



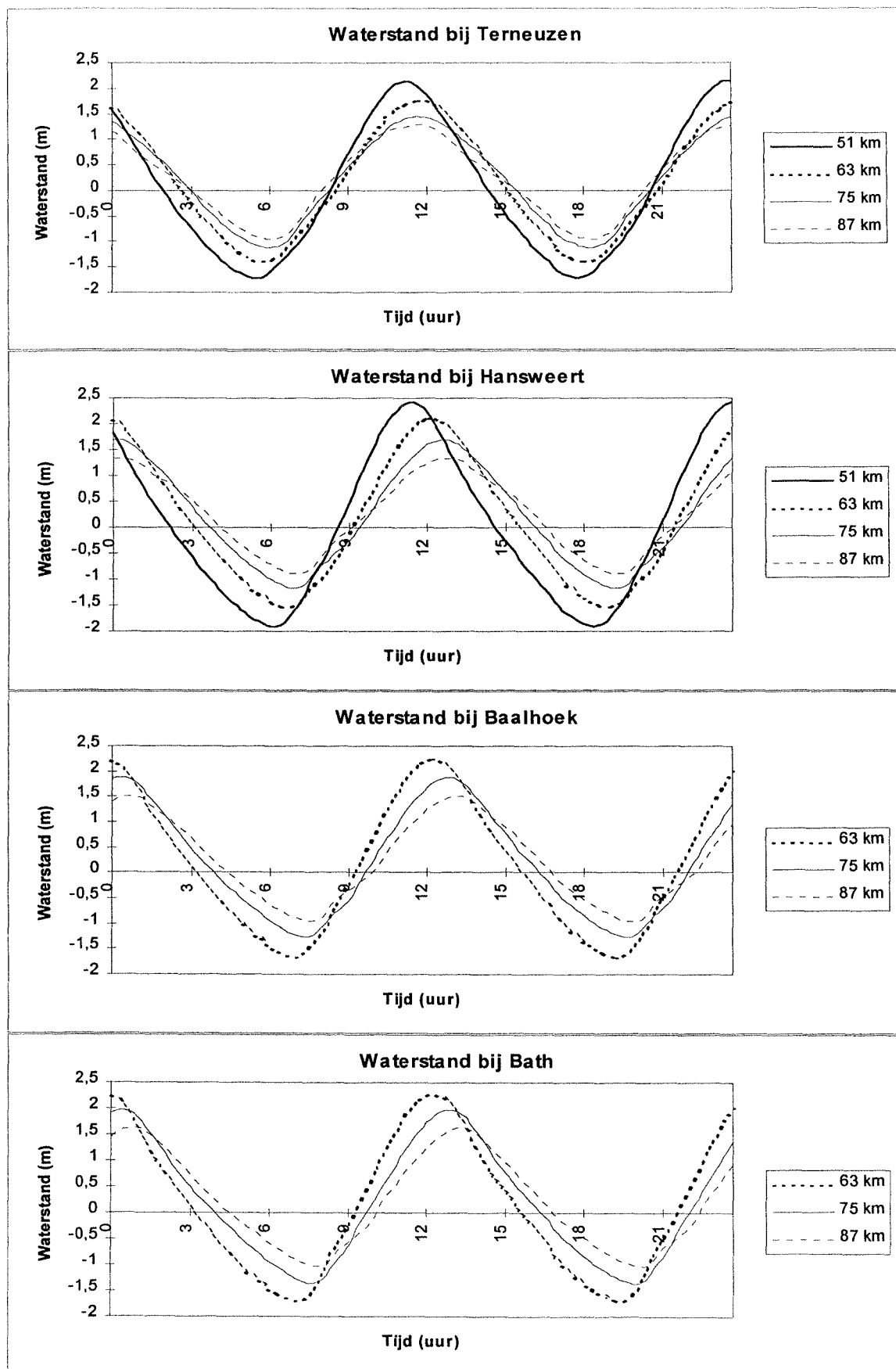
Bijlage 11: Getij-model: Samenvatting diepte



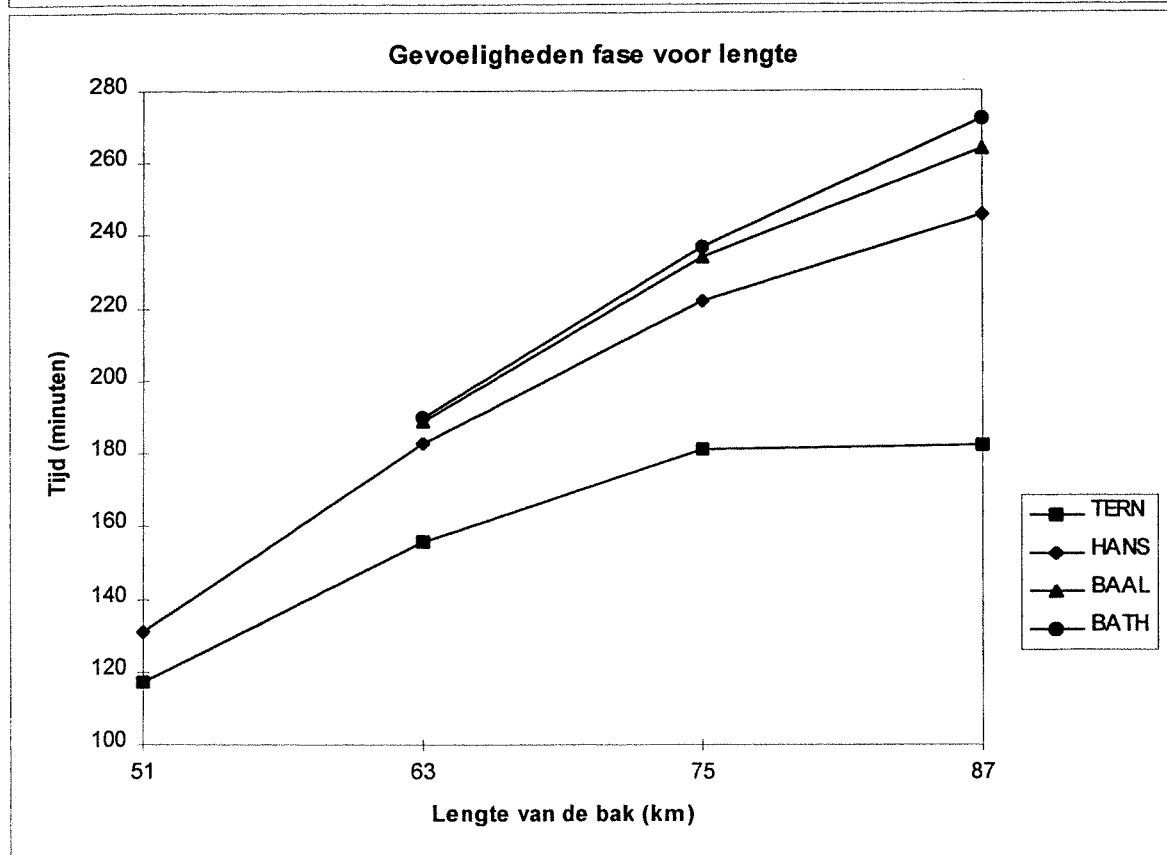
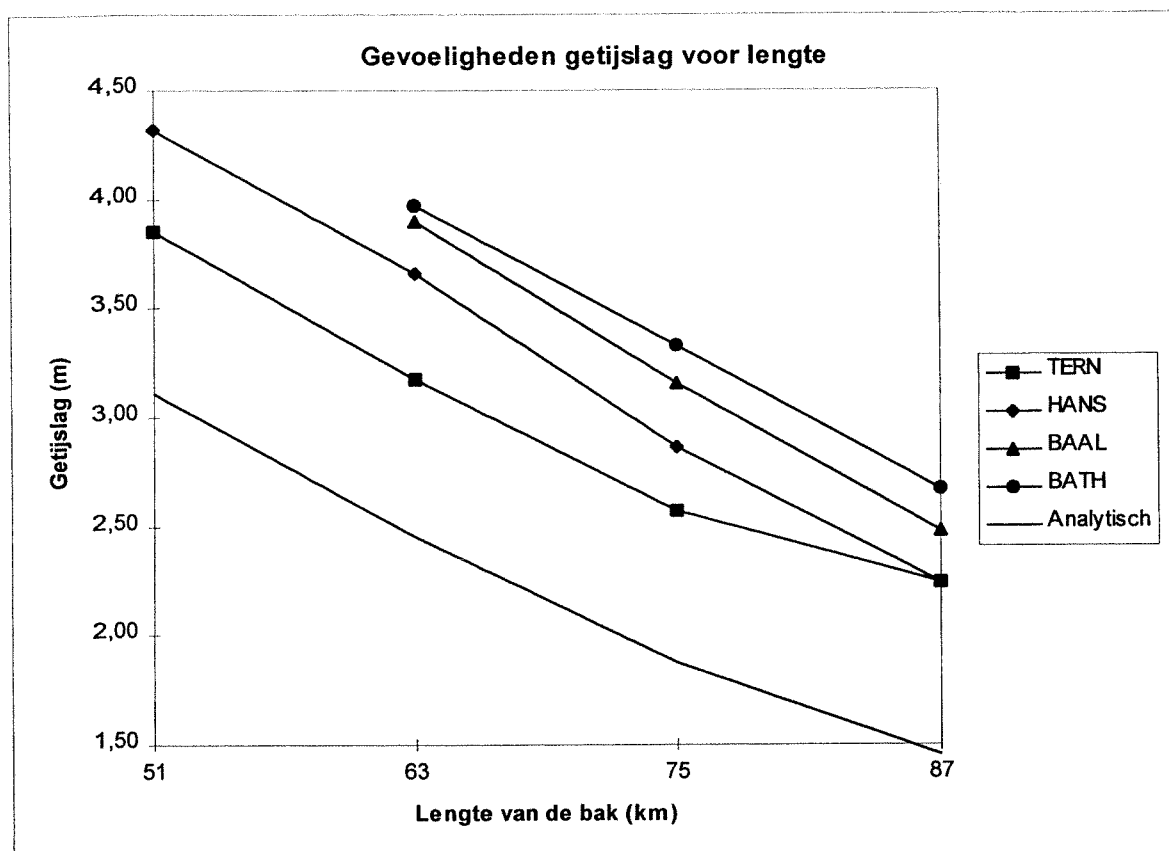
Bijlage 12: Getij-model: Lengte



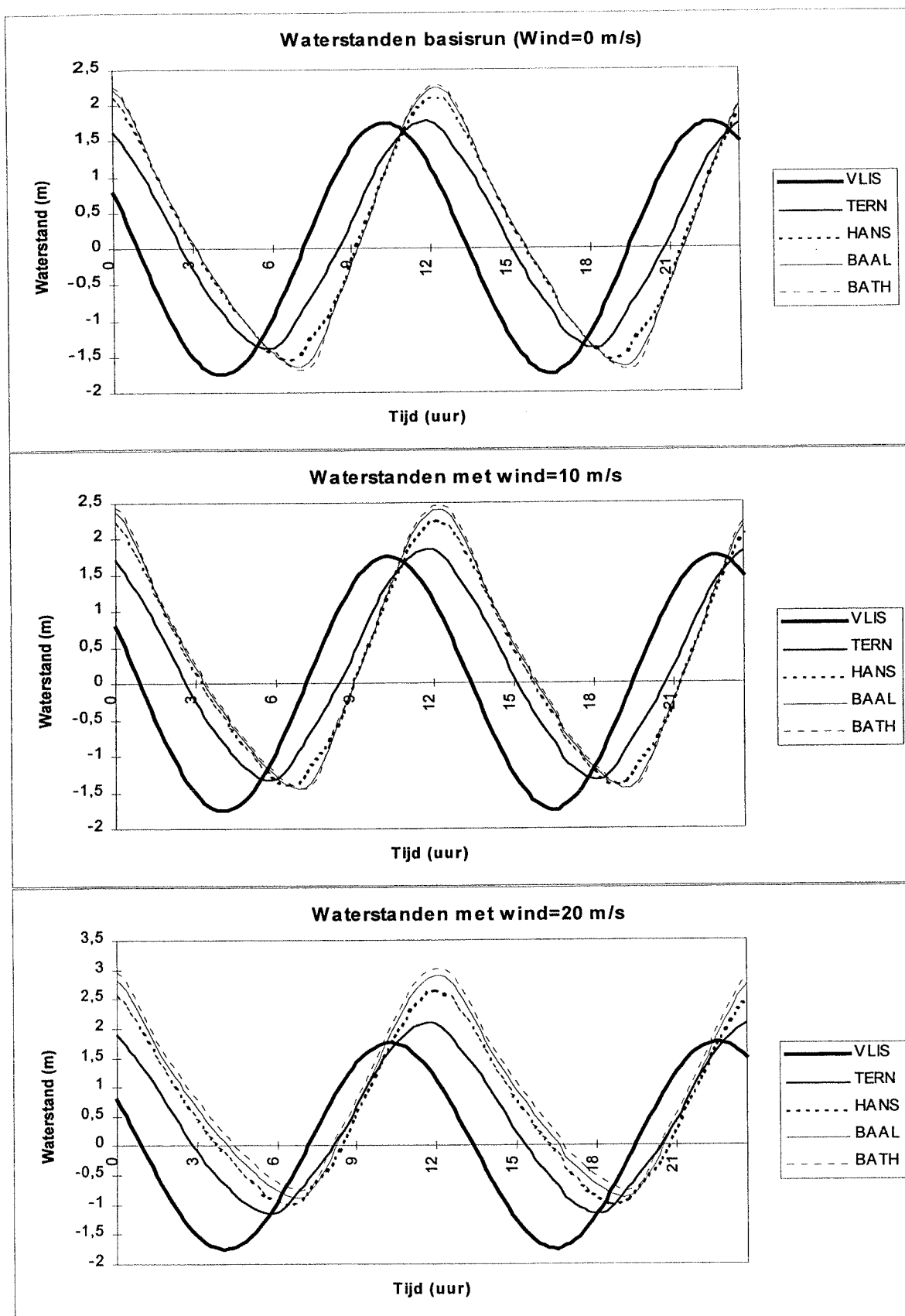
Bijlage 13: Getij-model: Lengte



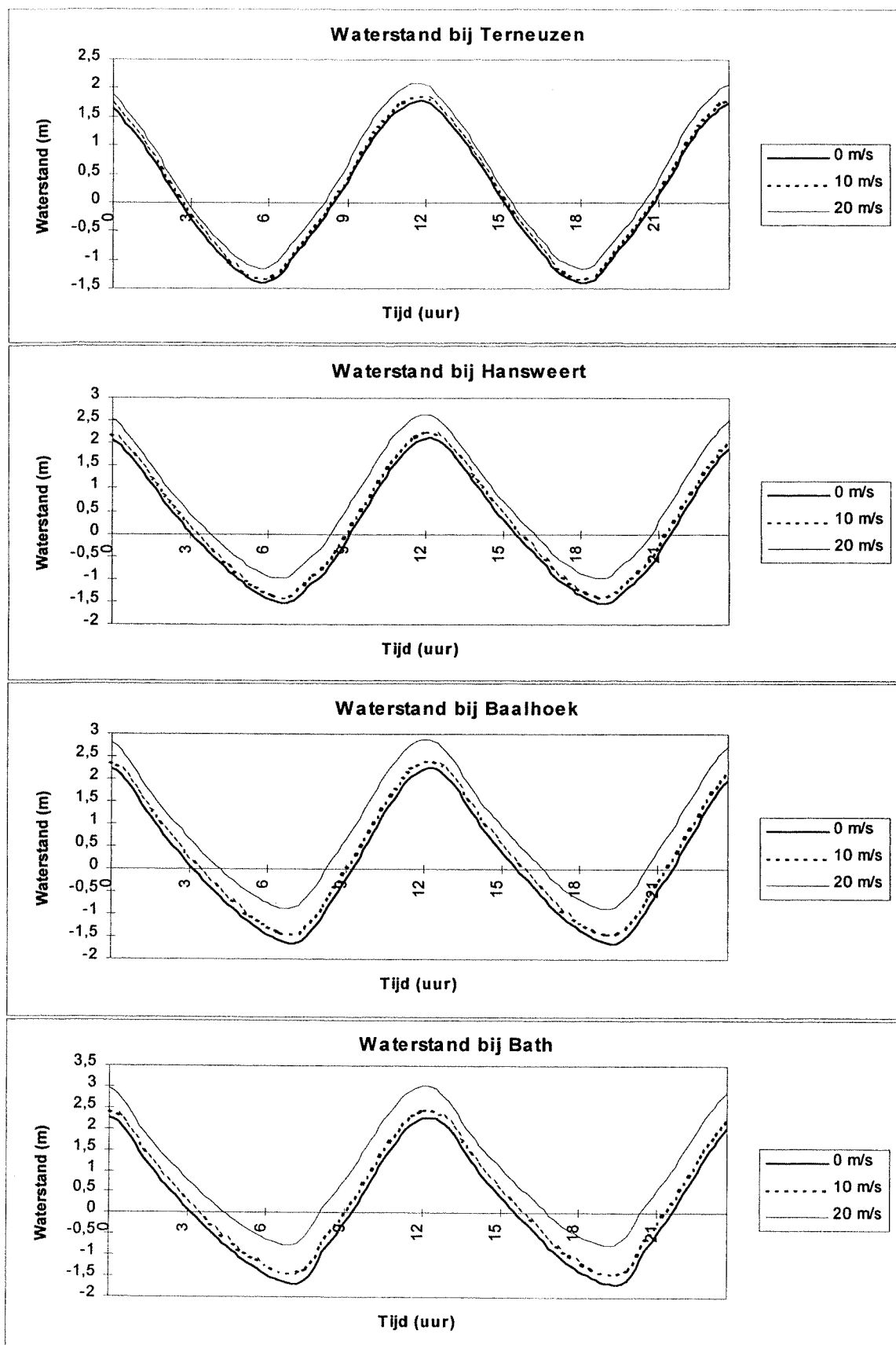
Bijlage 14: Getij-model: Samenvatting lengte



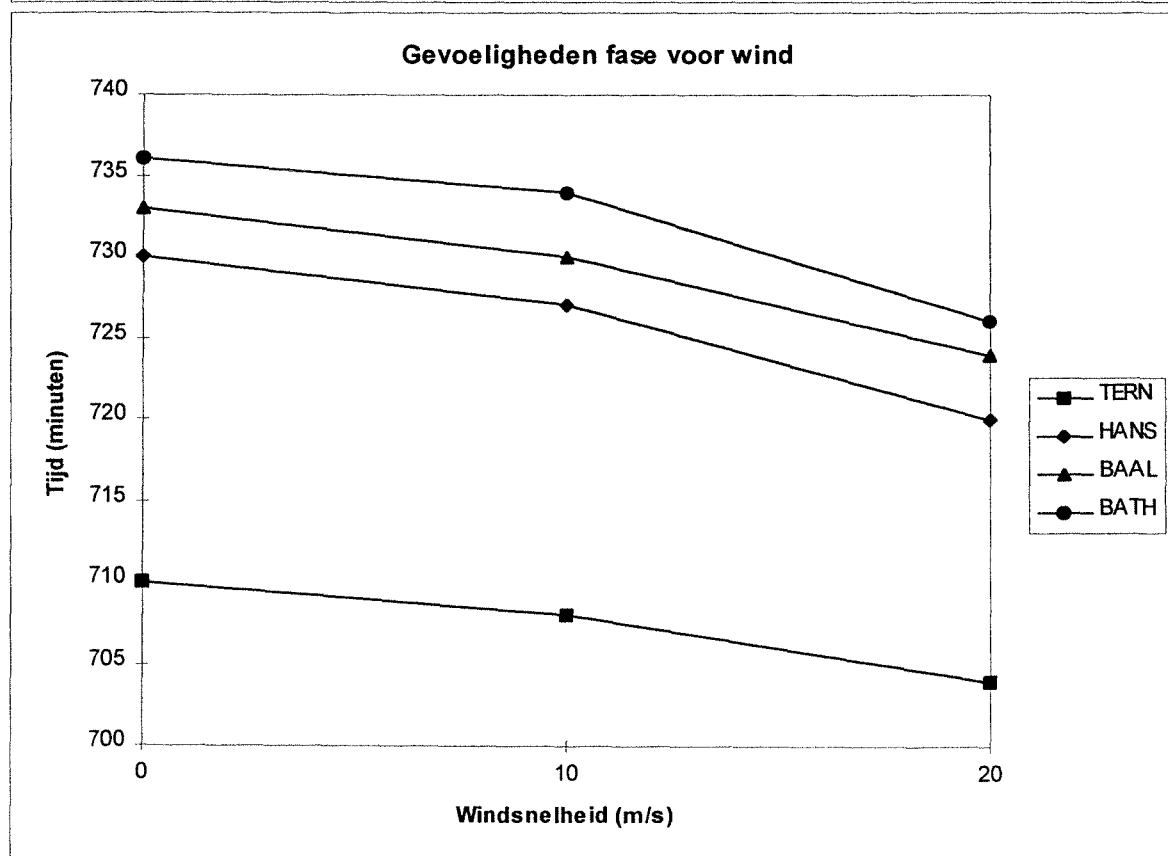
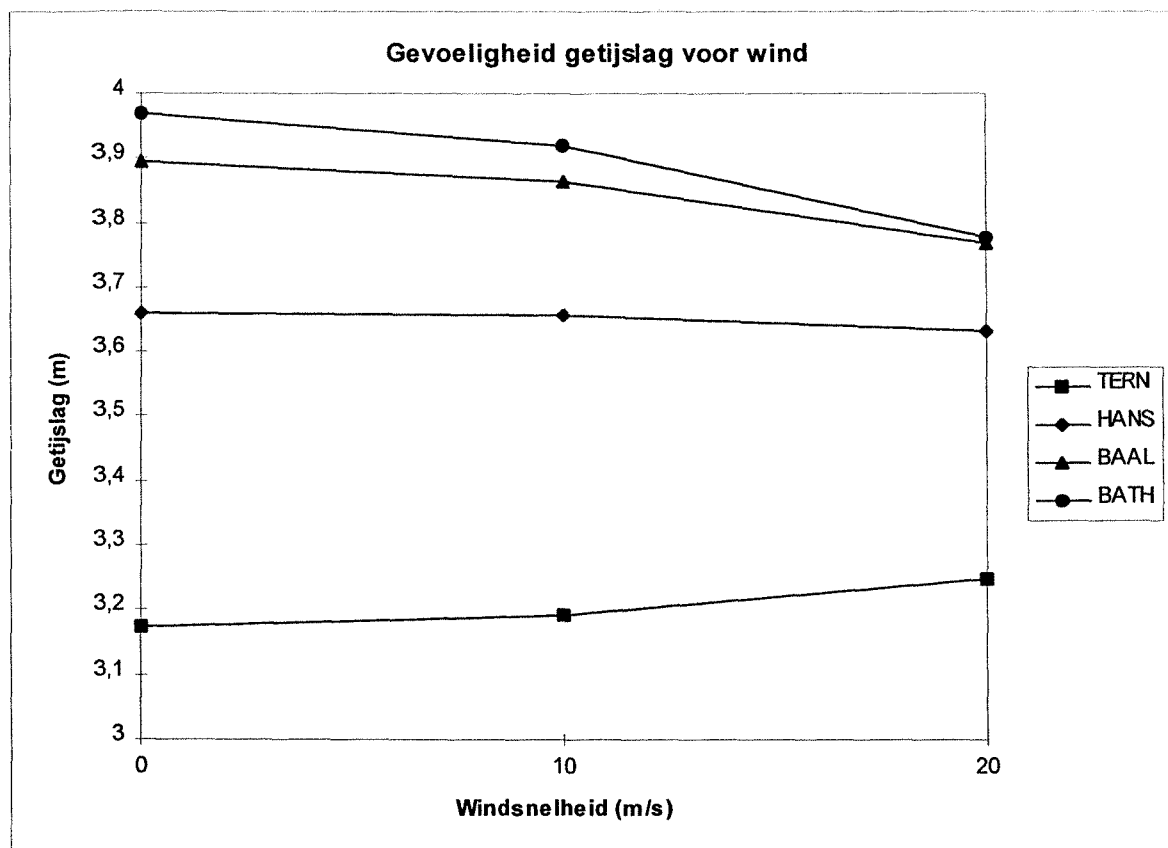
Bijlage 15: Getij-model: Wind



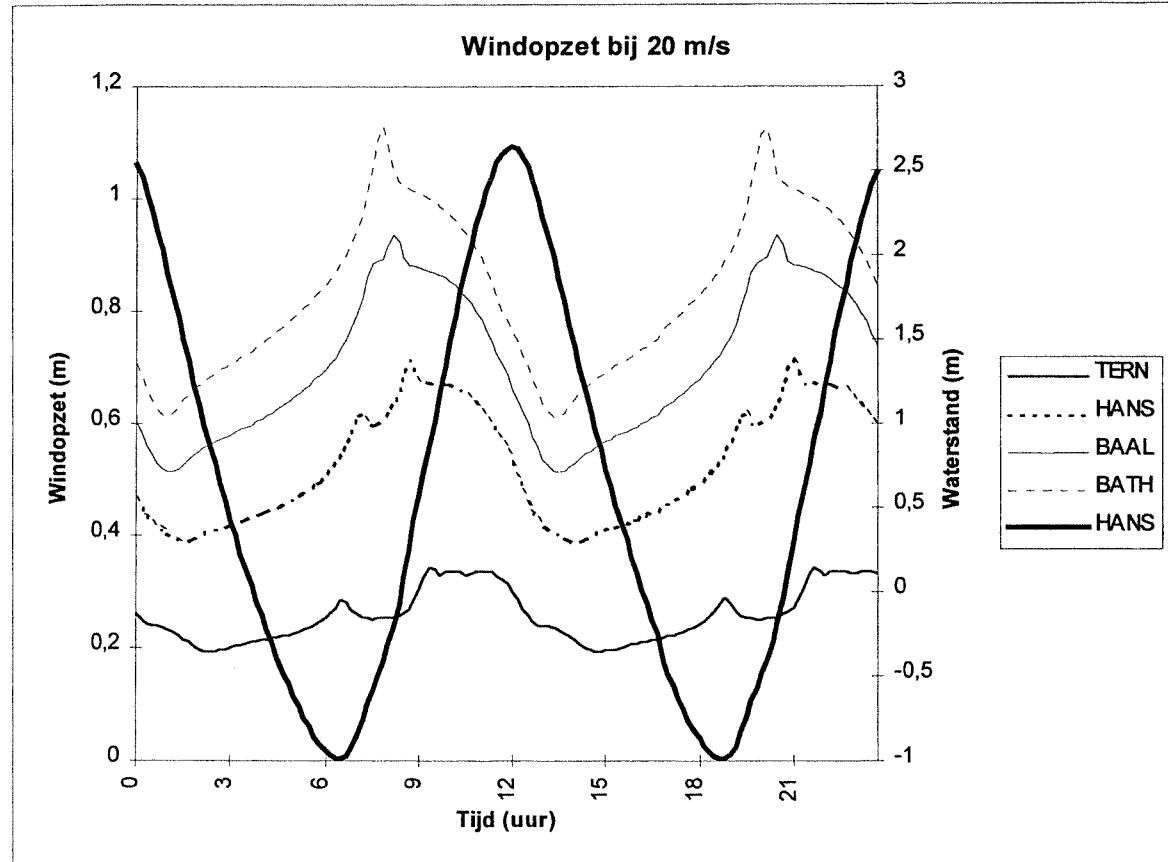
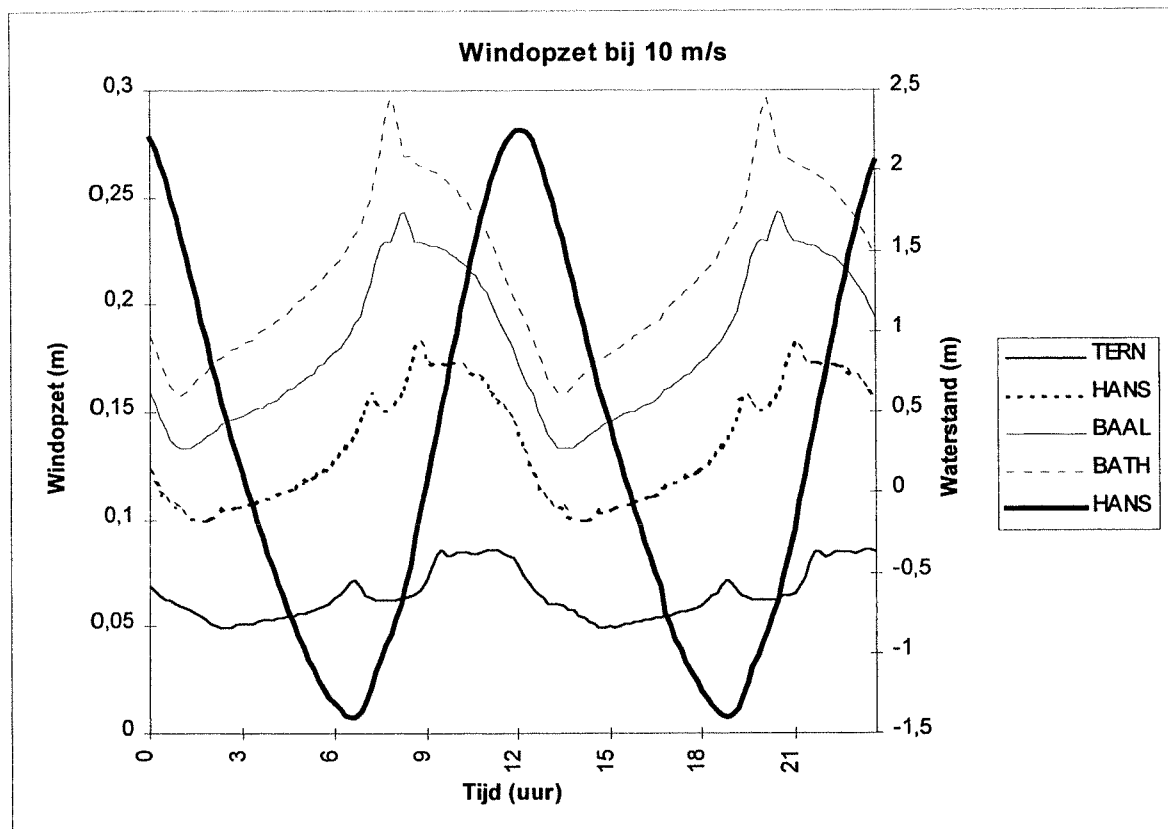
Bijlage 16: Getij-model: Wind



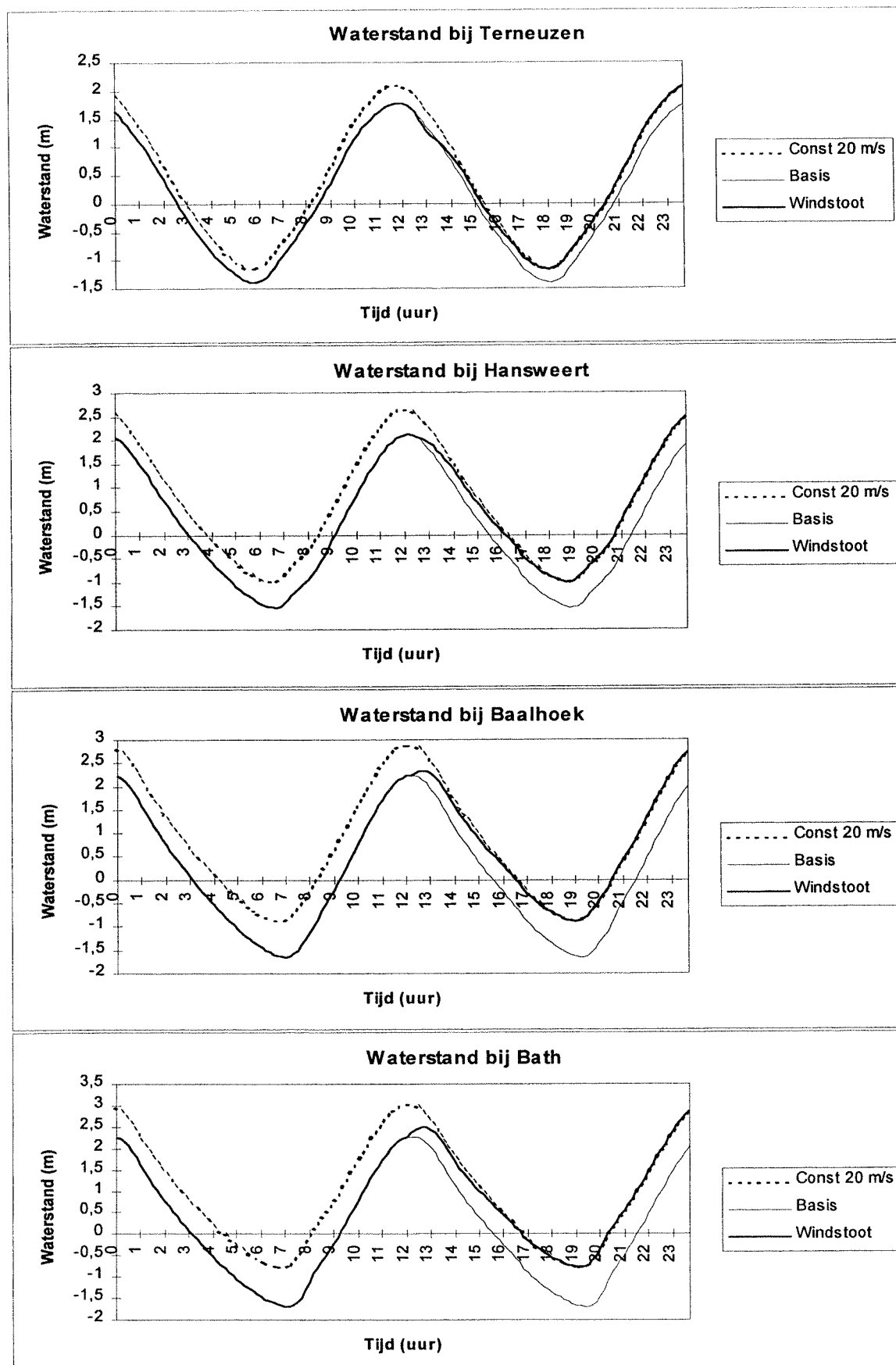
Bijlage 17: Getij-model: Samenvatting wind



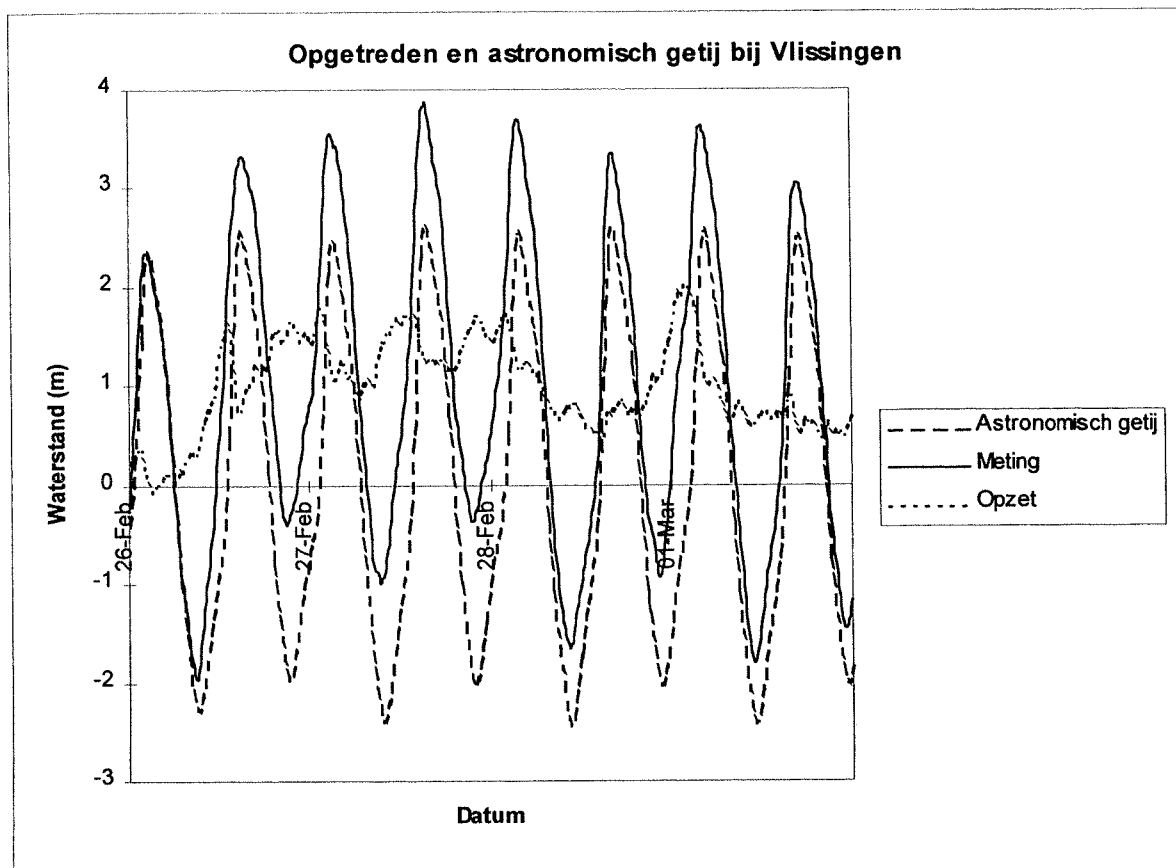
Bijlage 18: Getij-model: Windopzet



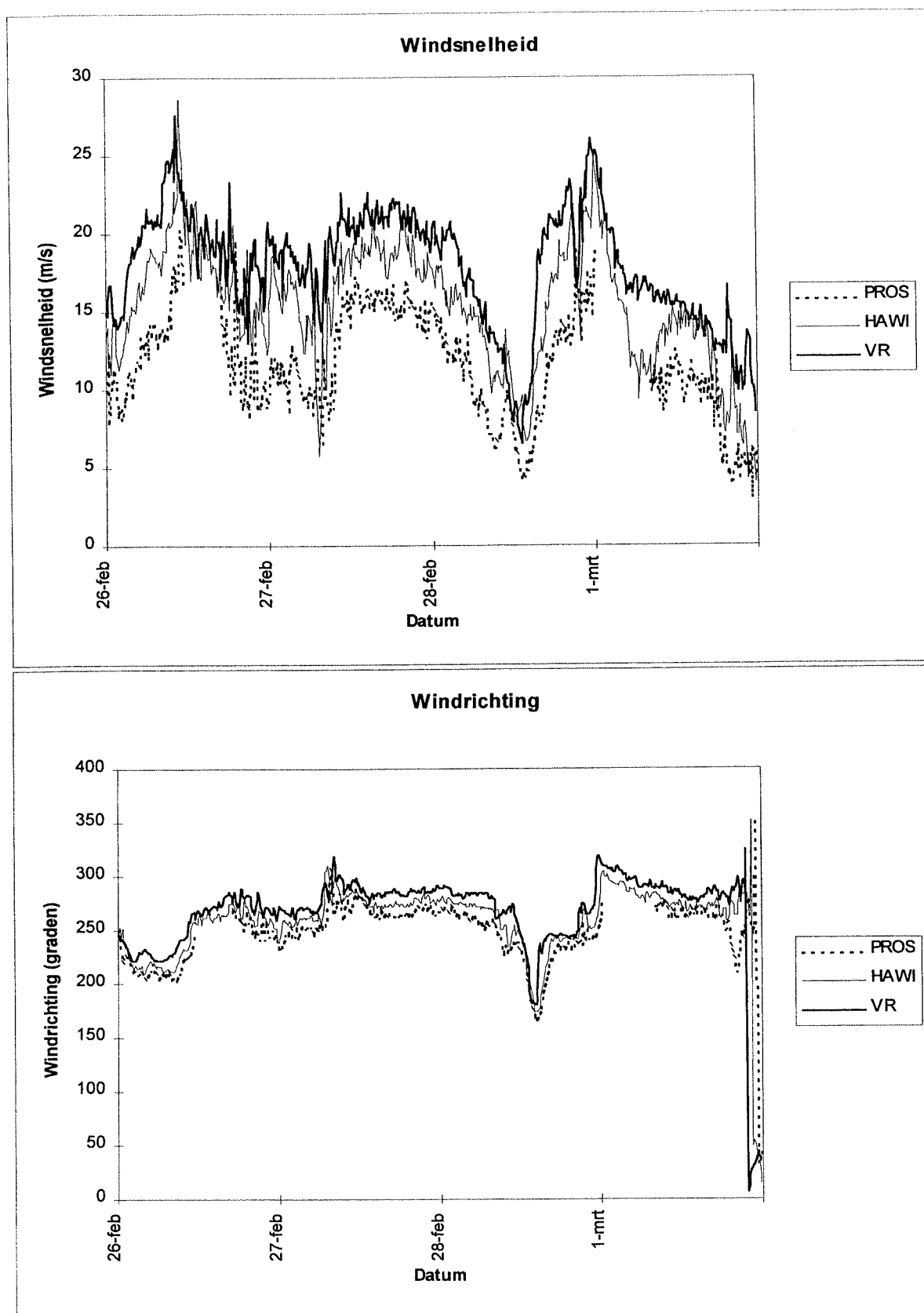
Bijlage 19: Getij-model: Windstoot



Bijlage 21: Opgetreden en astronomisch getij bij Vlissingen tijdens de Crocus-stormvloedperiode

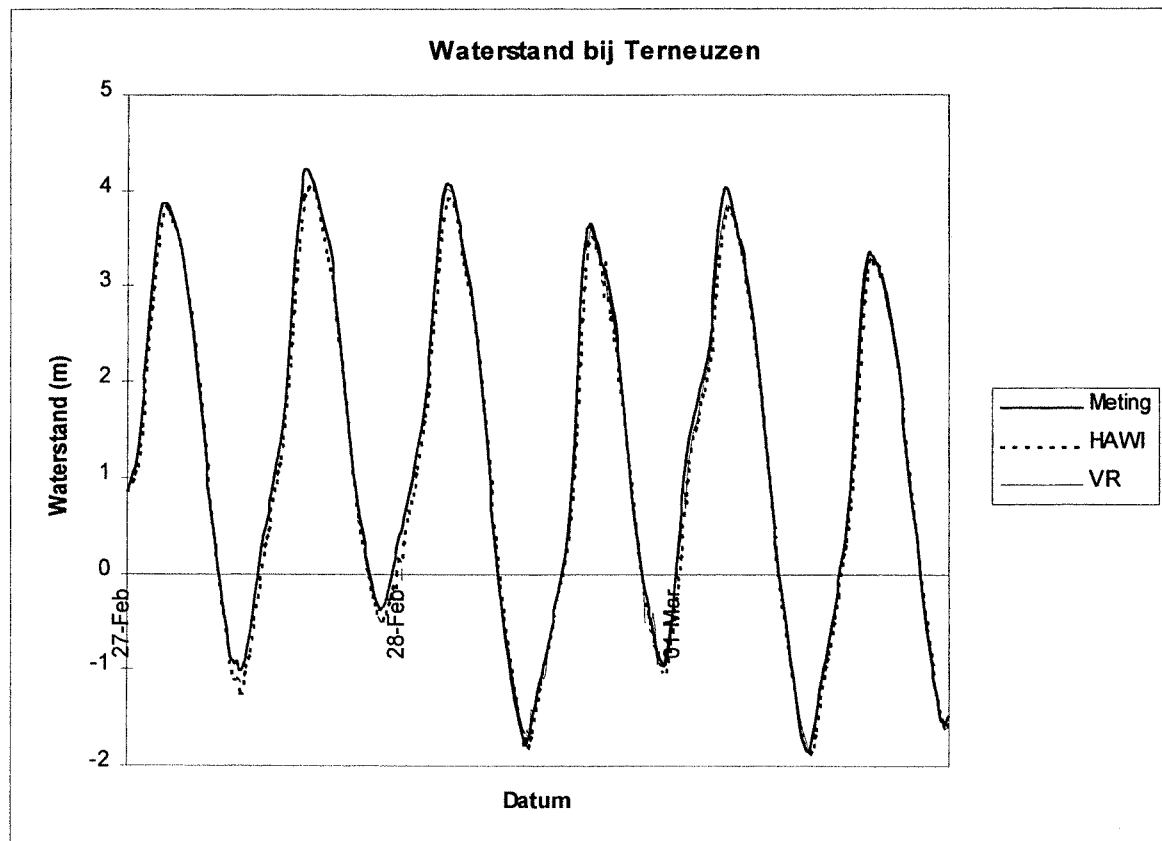
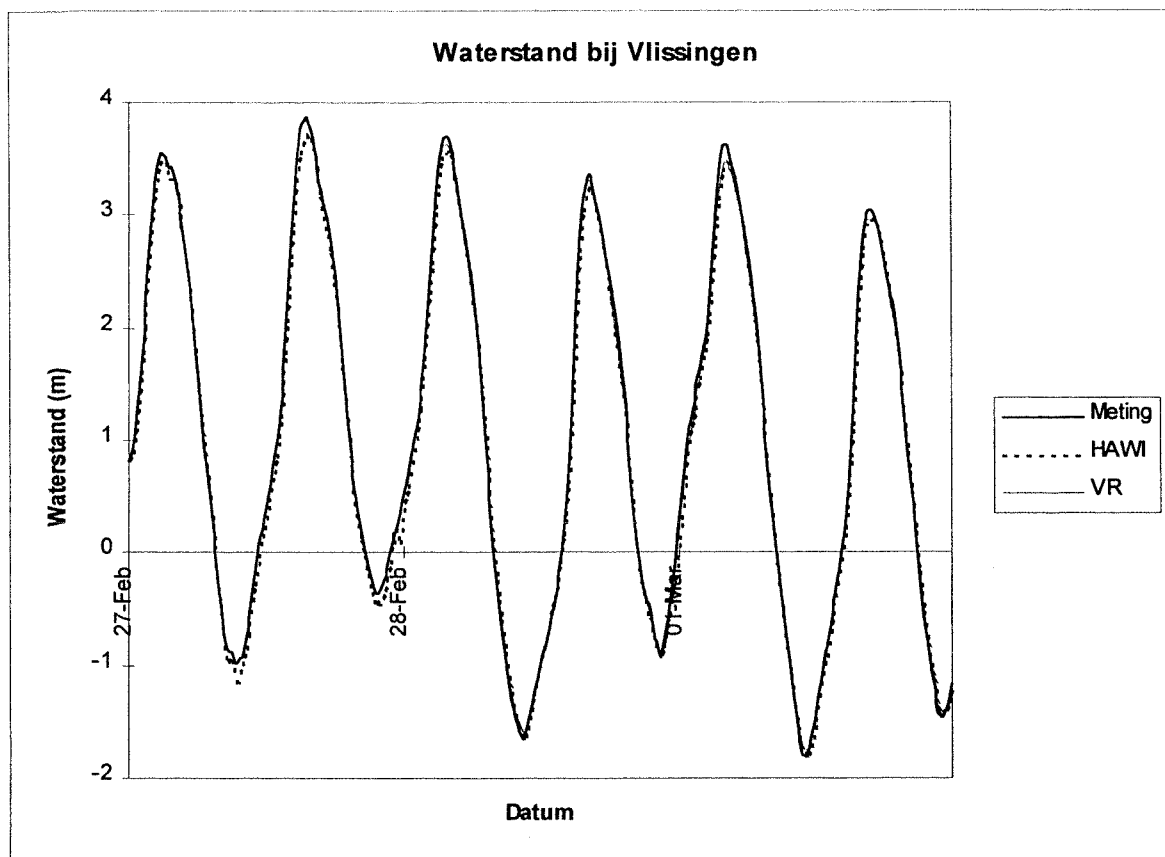


Bijlage 22: Windgegevens tijdens de Crocus-stormvloedperiode

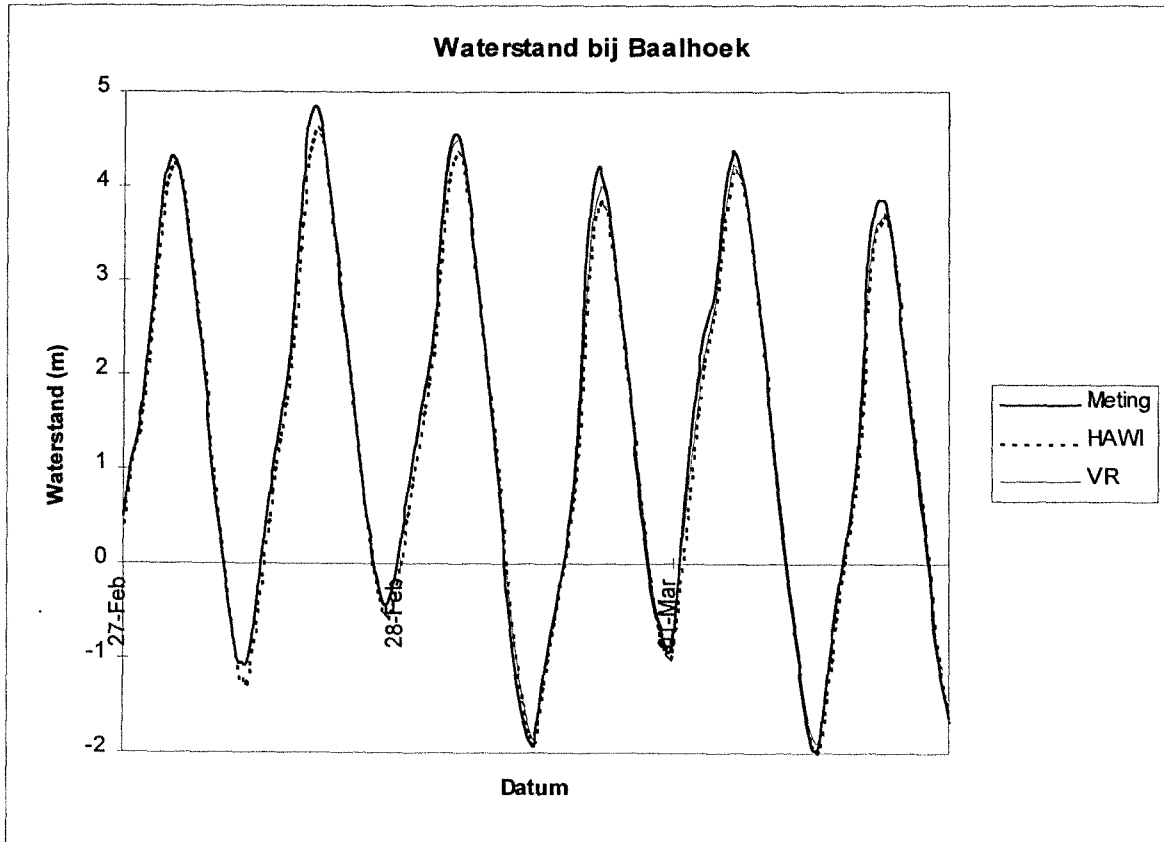
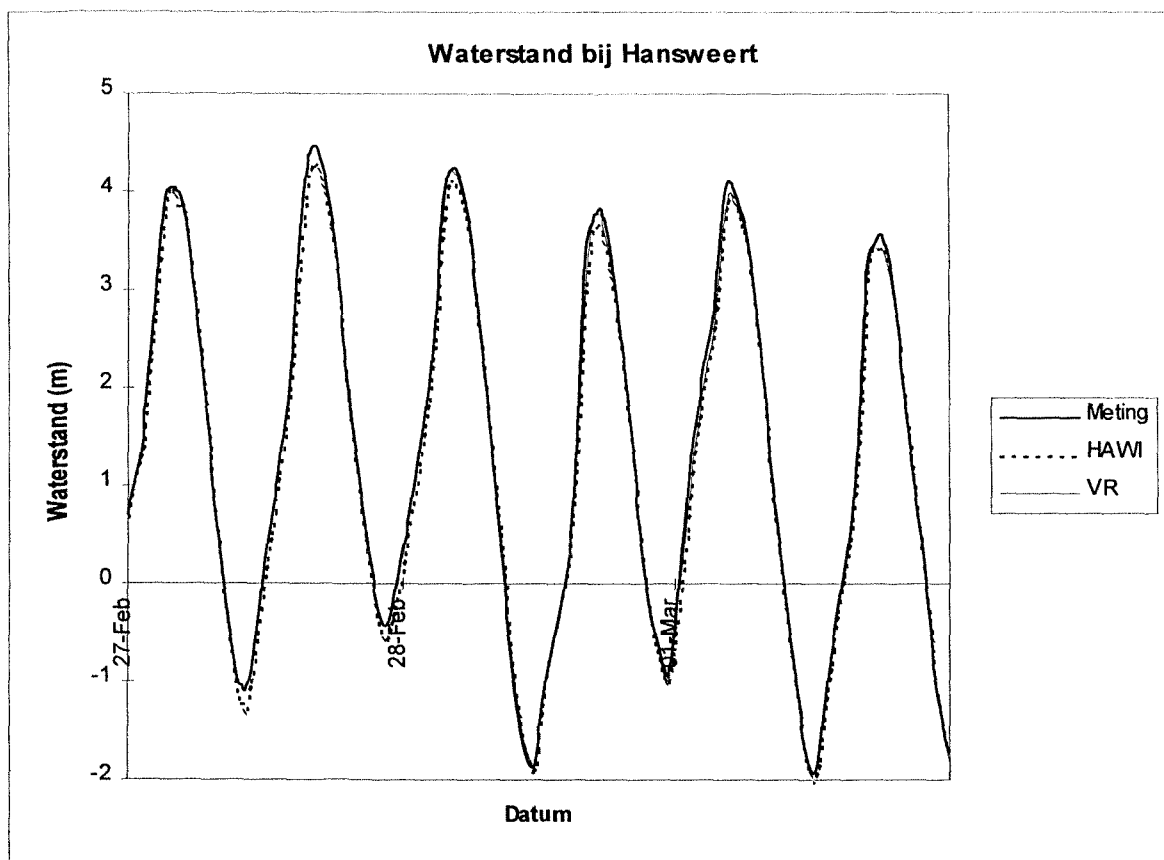


PROS=Prosperpolder; HAWI=Hansweert; VR= Vlake van de Raan.

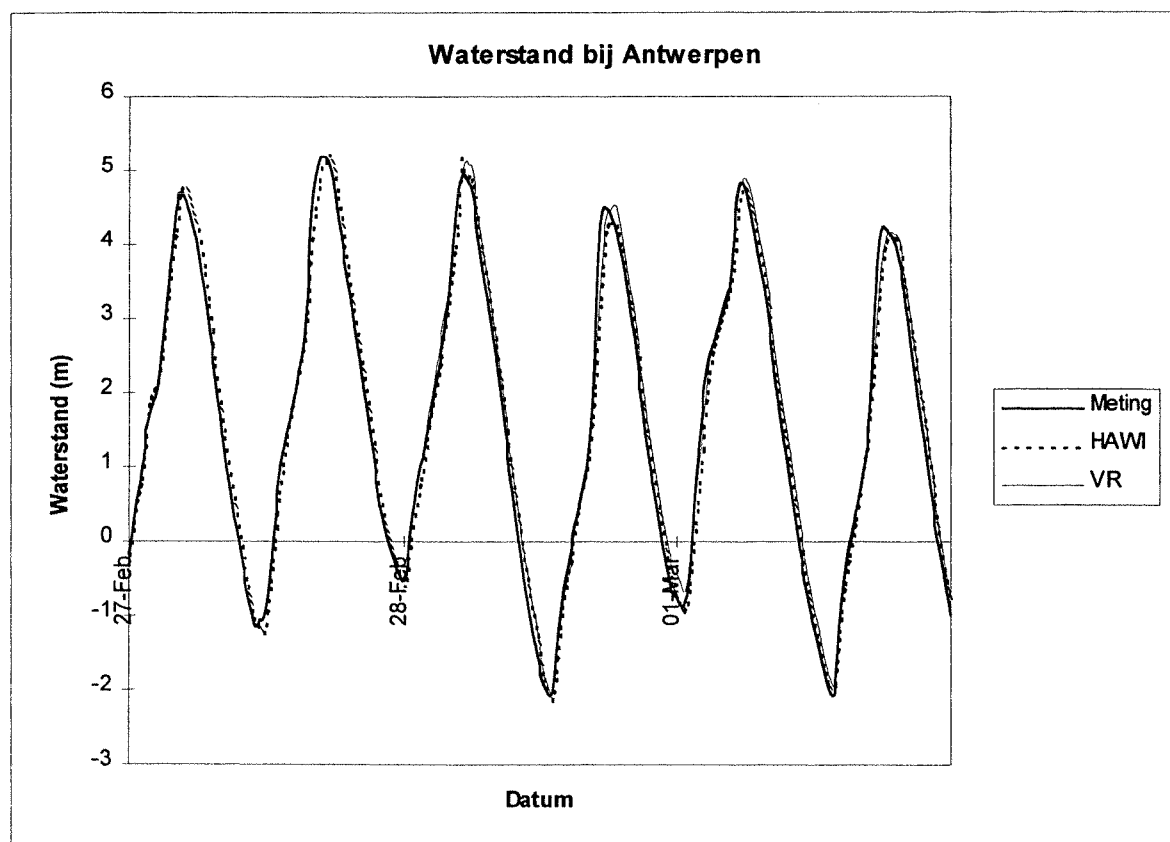
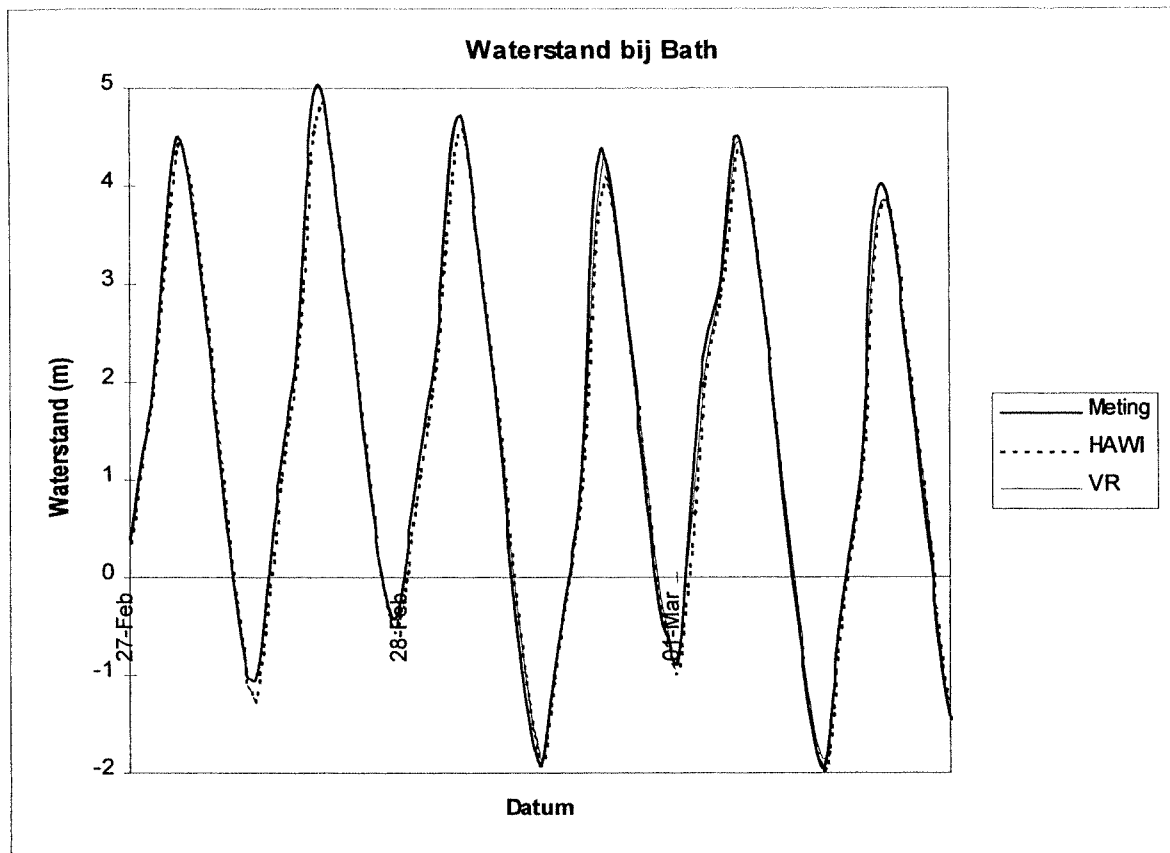
Bijlage 23: Basisrun: Uitkomst SCALWEST-fijn model



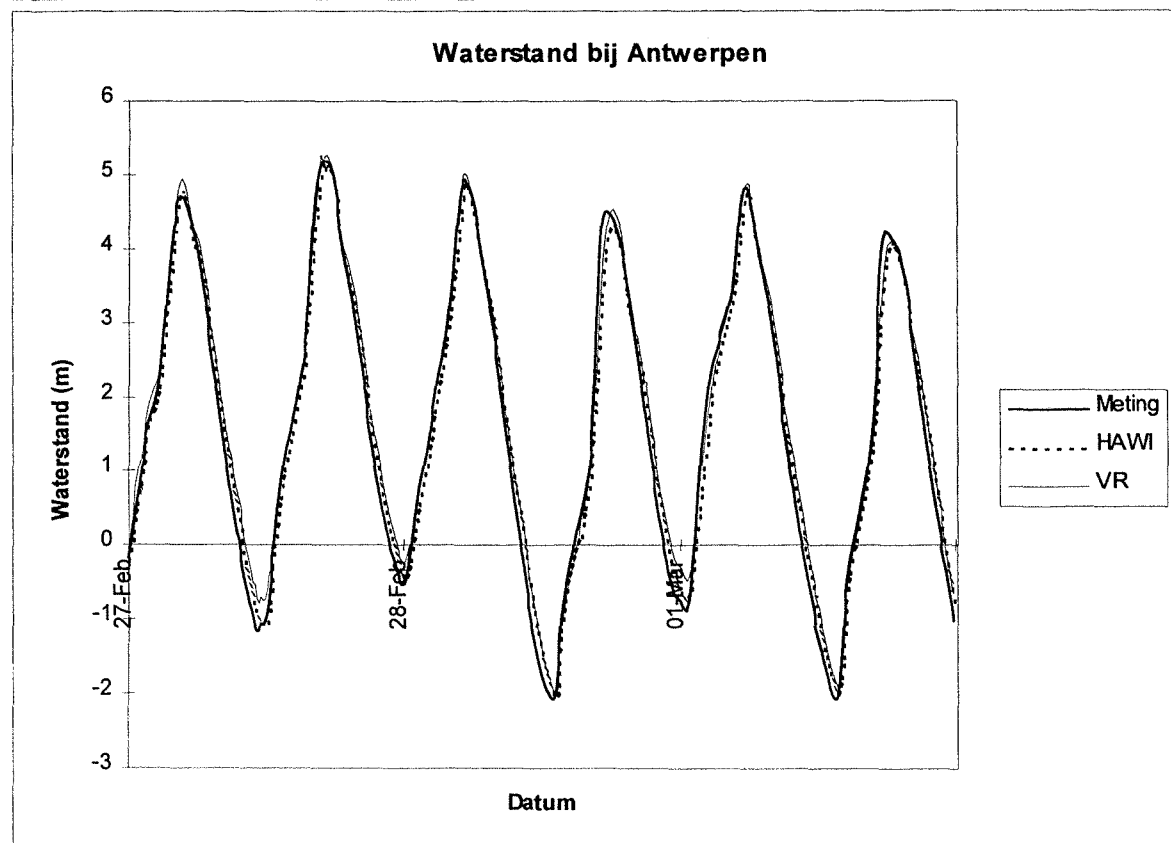
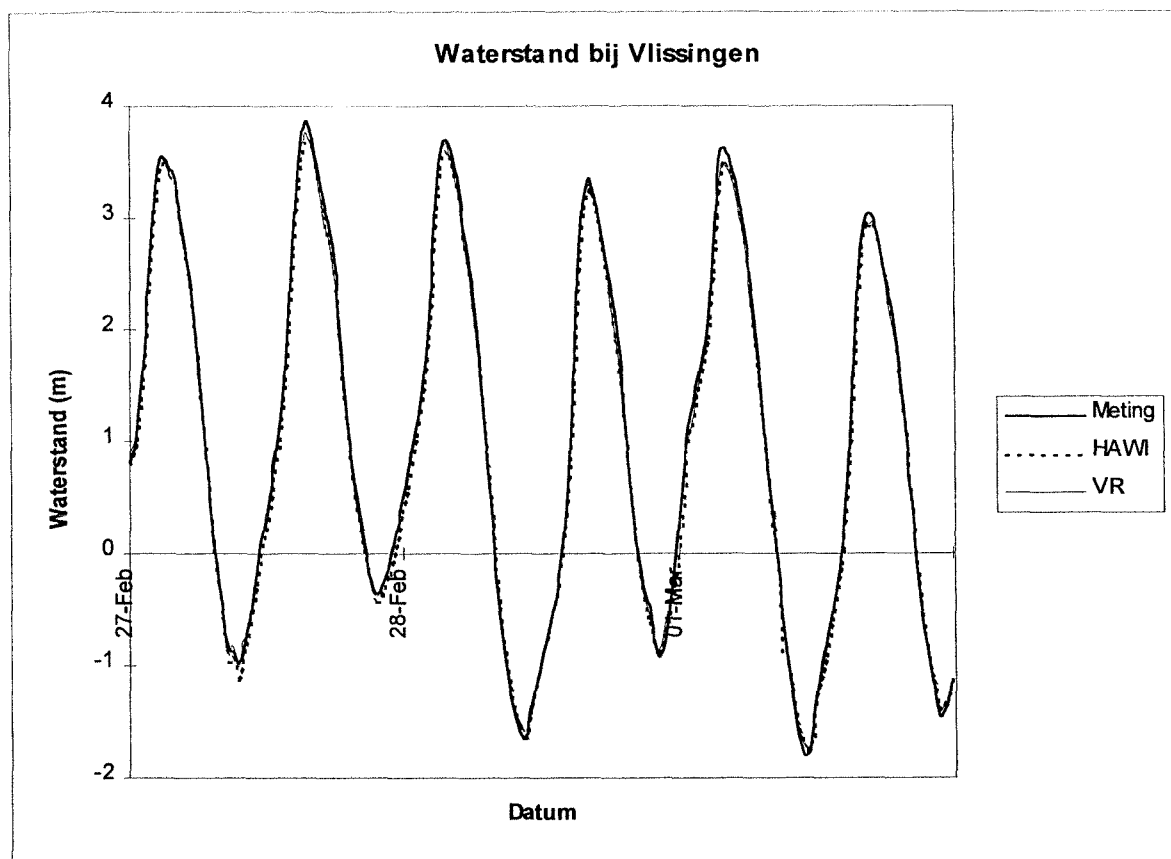
(Bijlage 23 vervolg)



(Bijlage 23 vervolg)

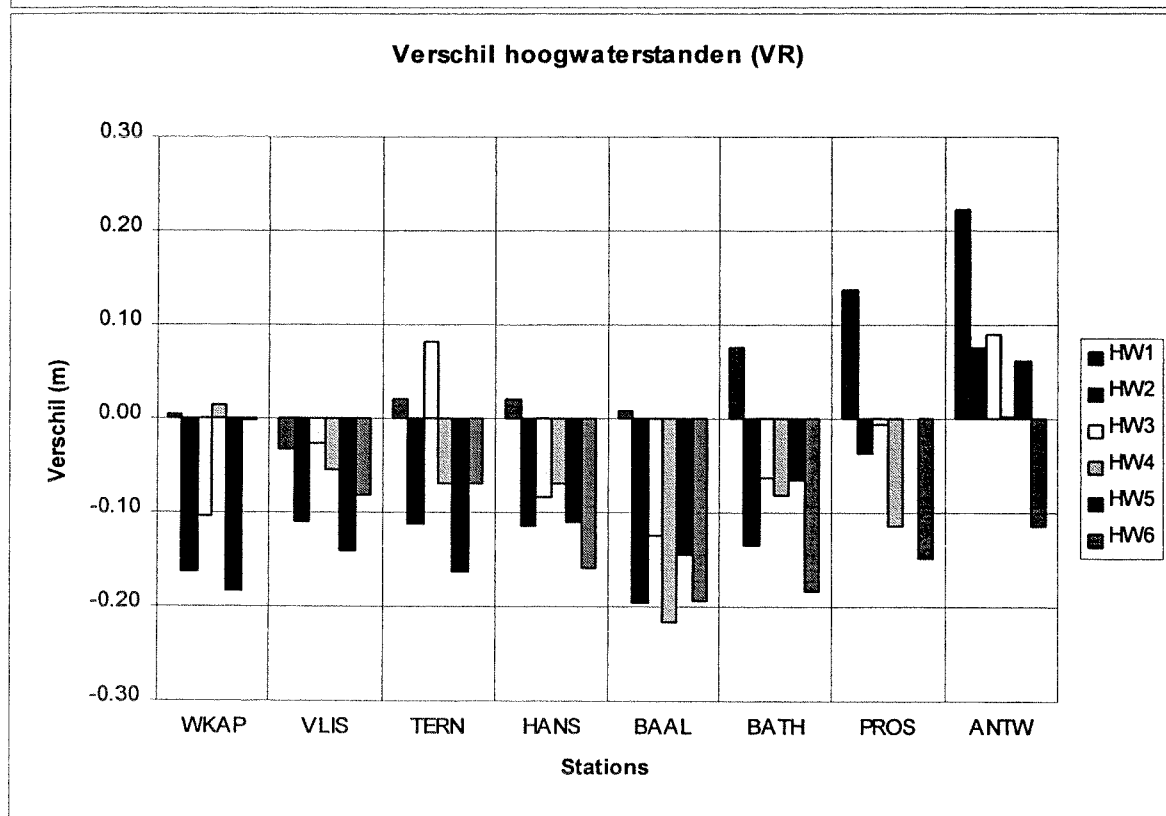
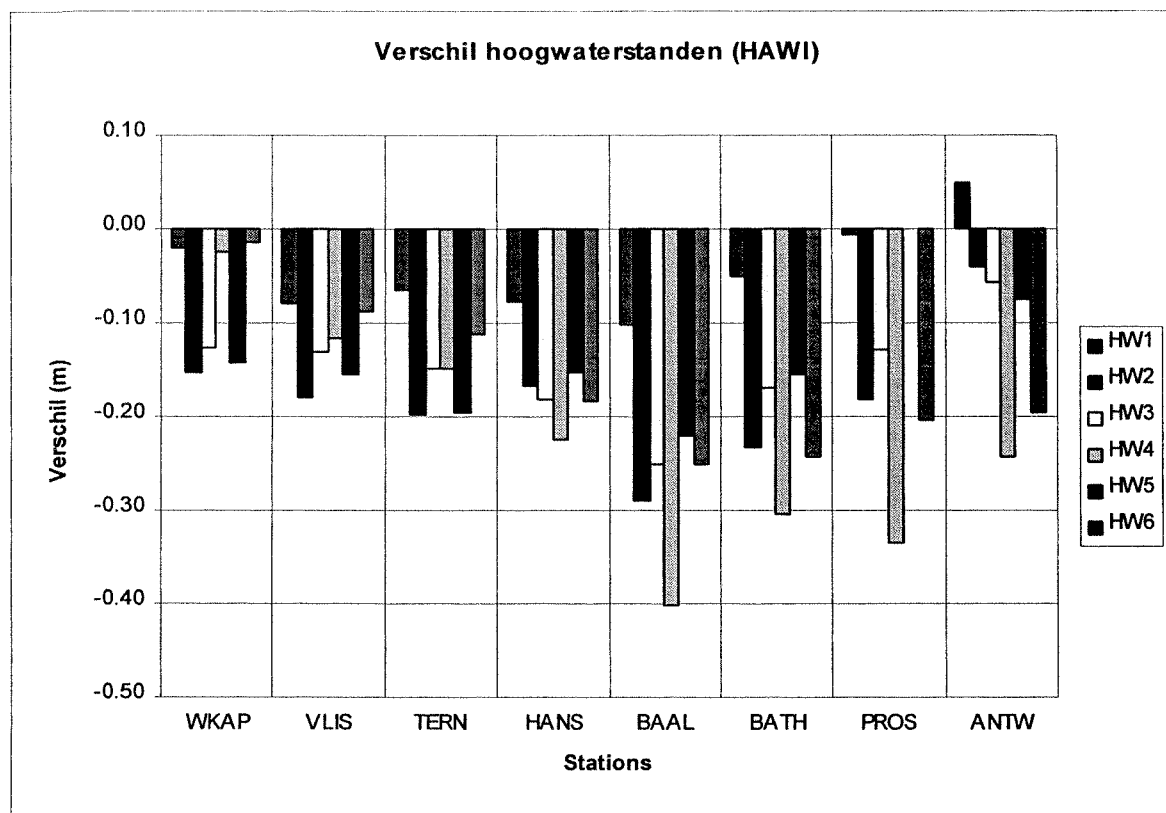


Bijlage 24: Basisrun: Uitkomst SCALWEST-grof model



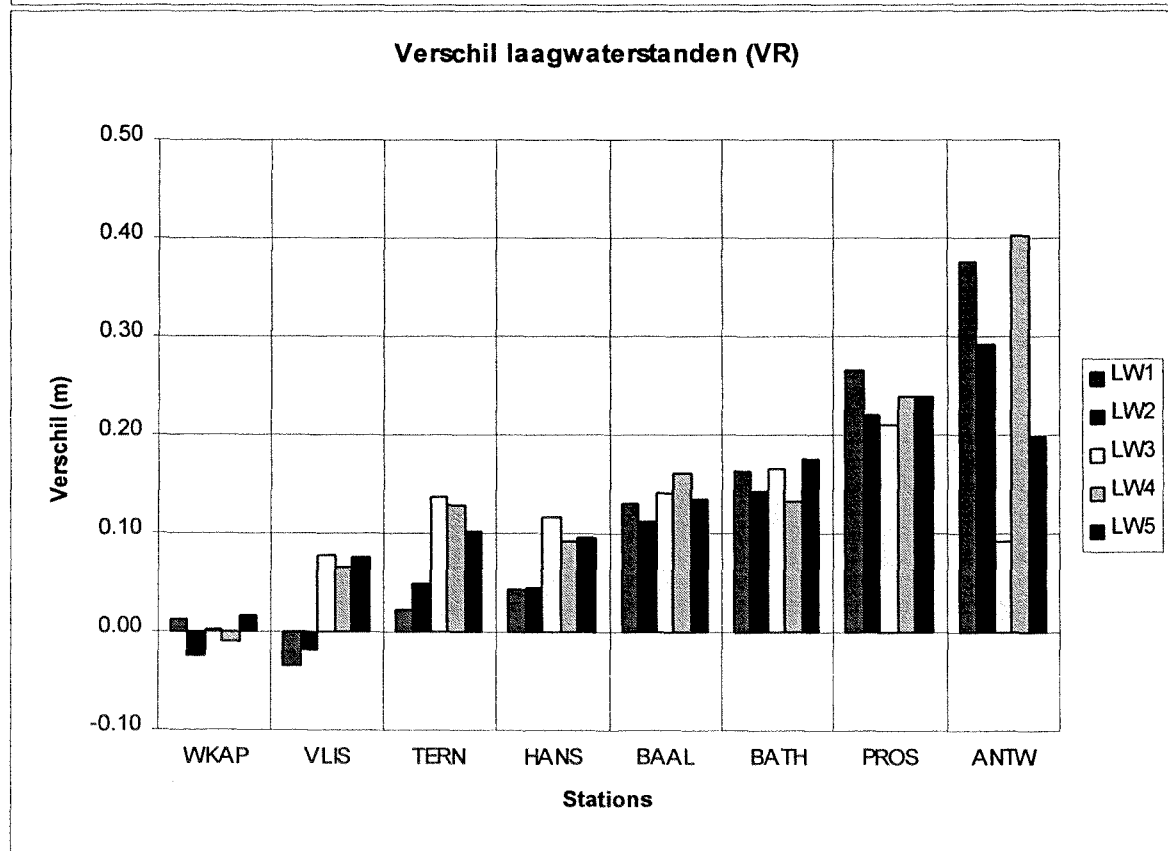
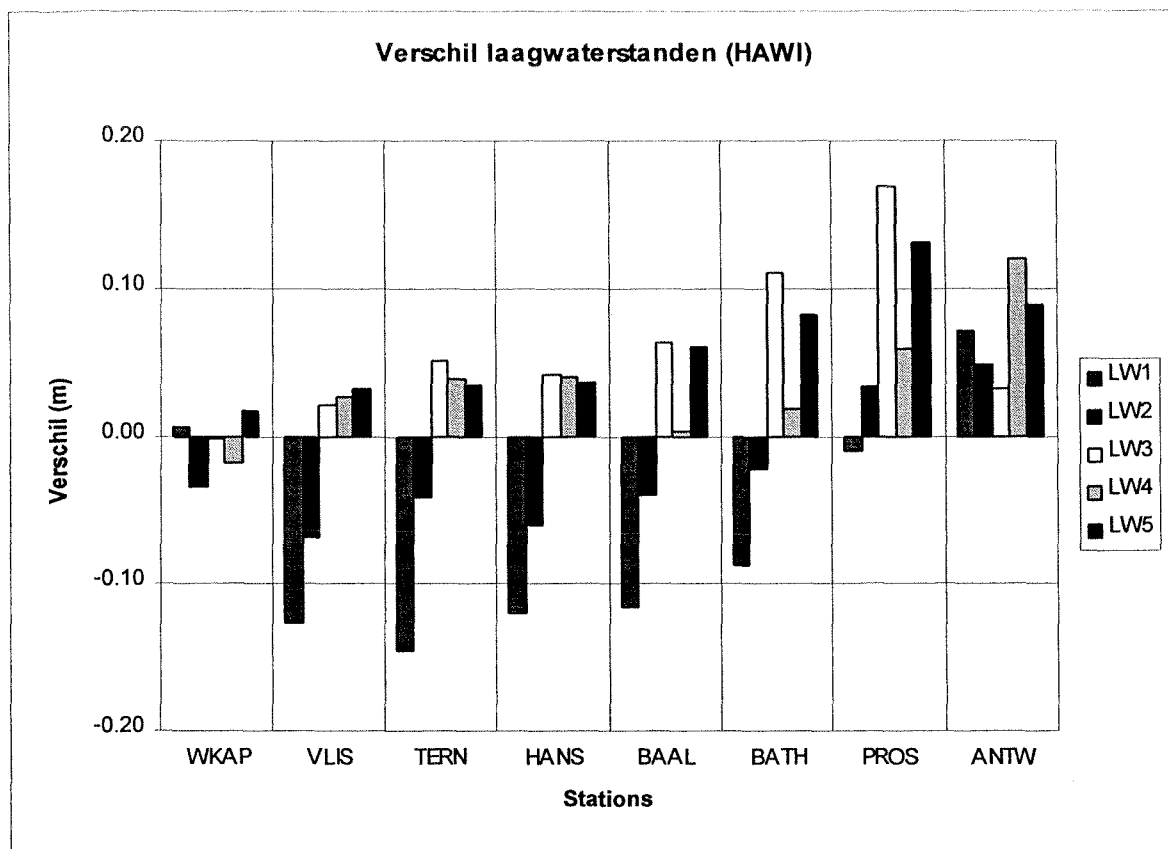
Bijlage 25: Basisrun: Verschillen hoog-en laagwaterstanden van SCALWEST-grof

Een positief verschil betekent dat het model te hoge resultaten geeft ten opzichte van de metingen

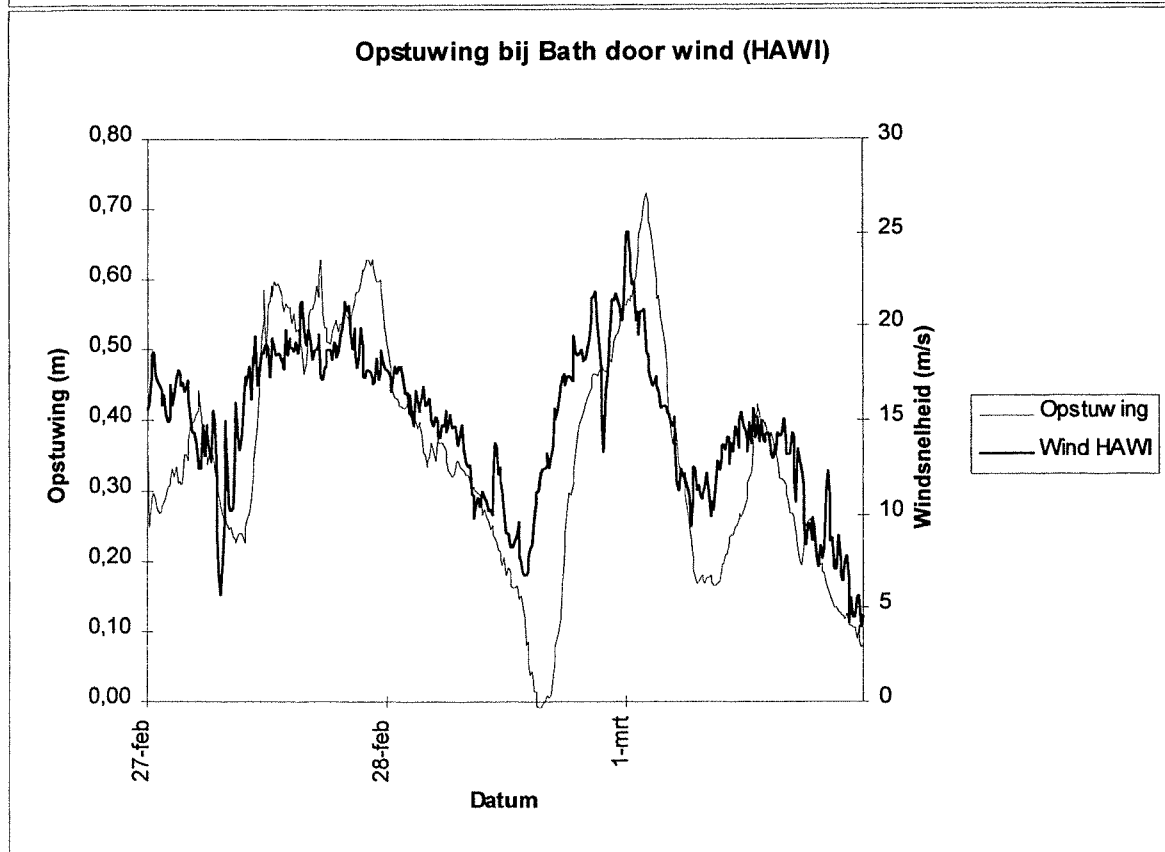
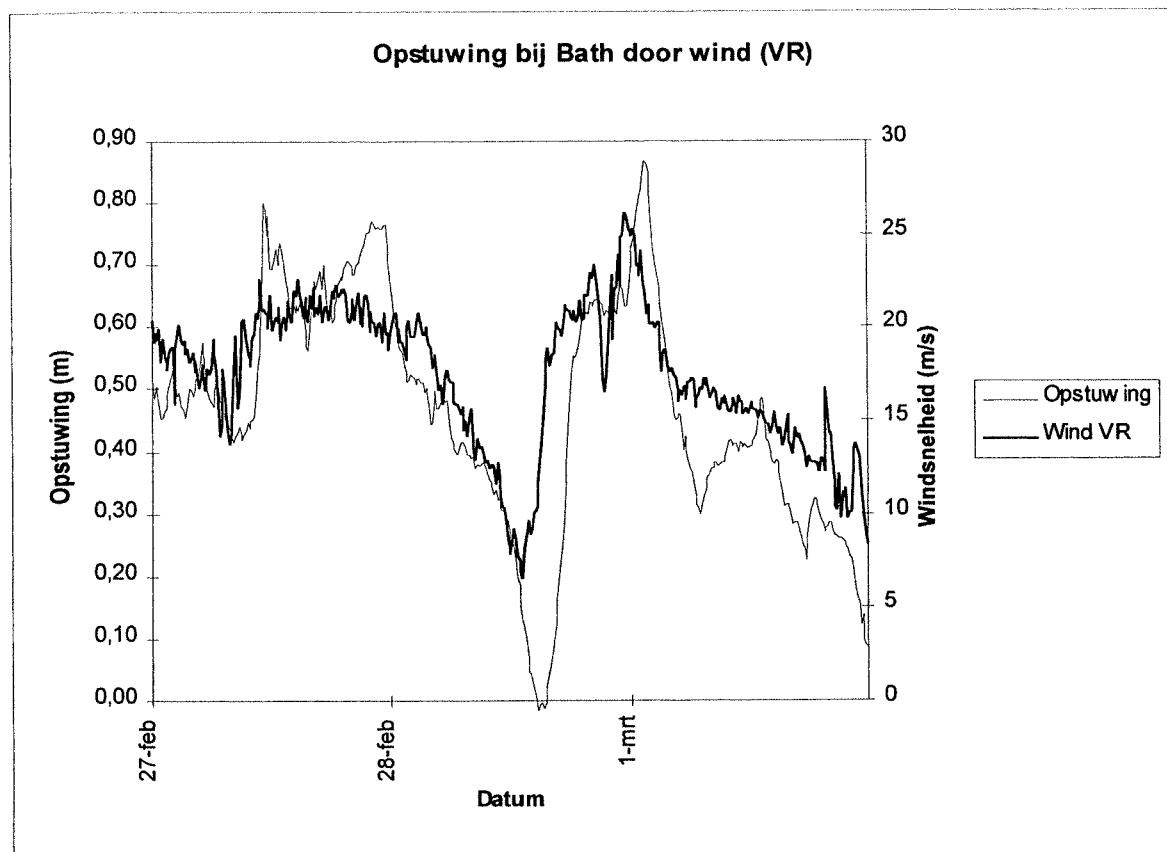


(Bijlage 25: vervolg)

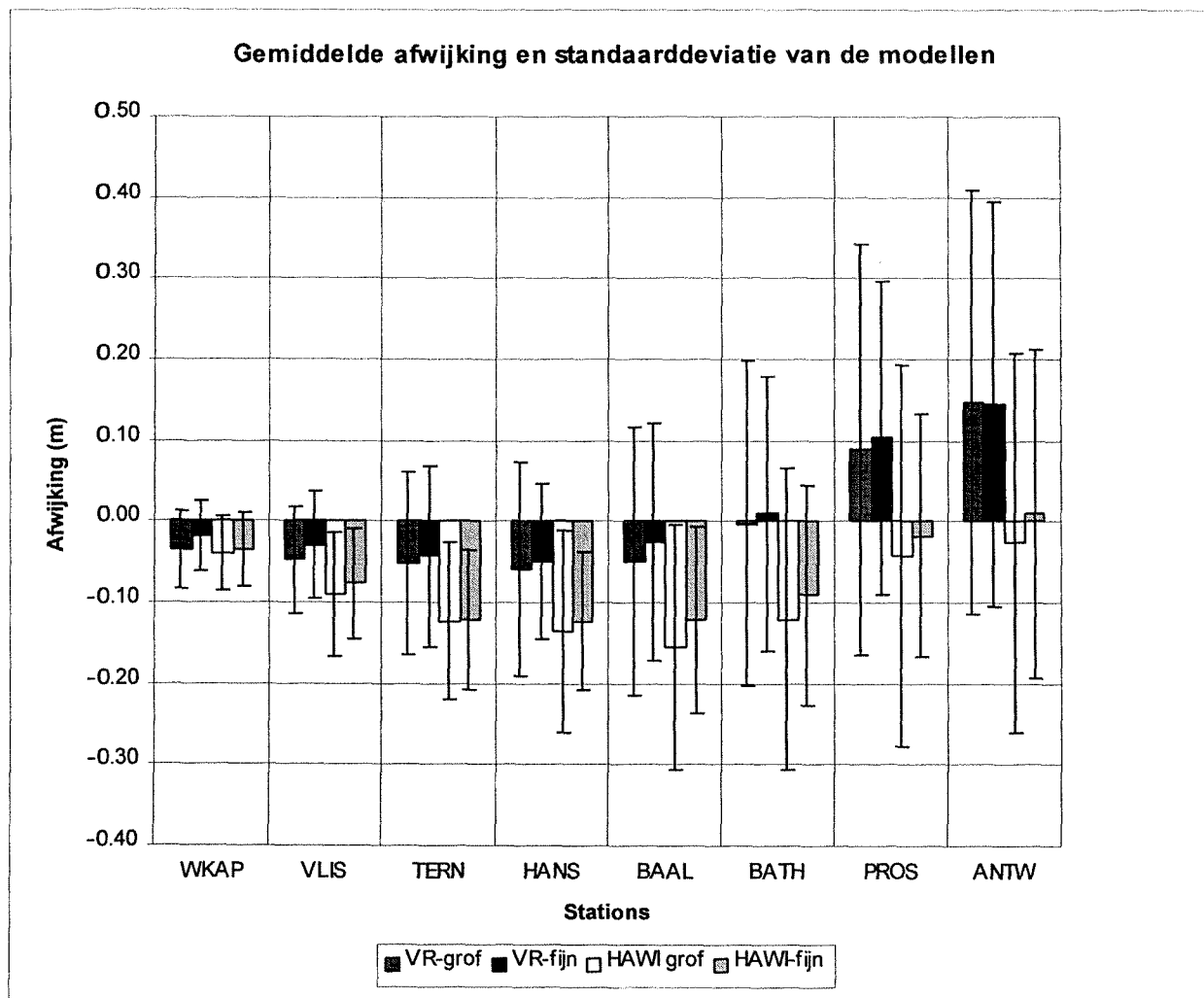
Een positief verschil betekent dat het model te hoge resultaten geeft ten opzichte van de metingen



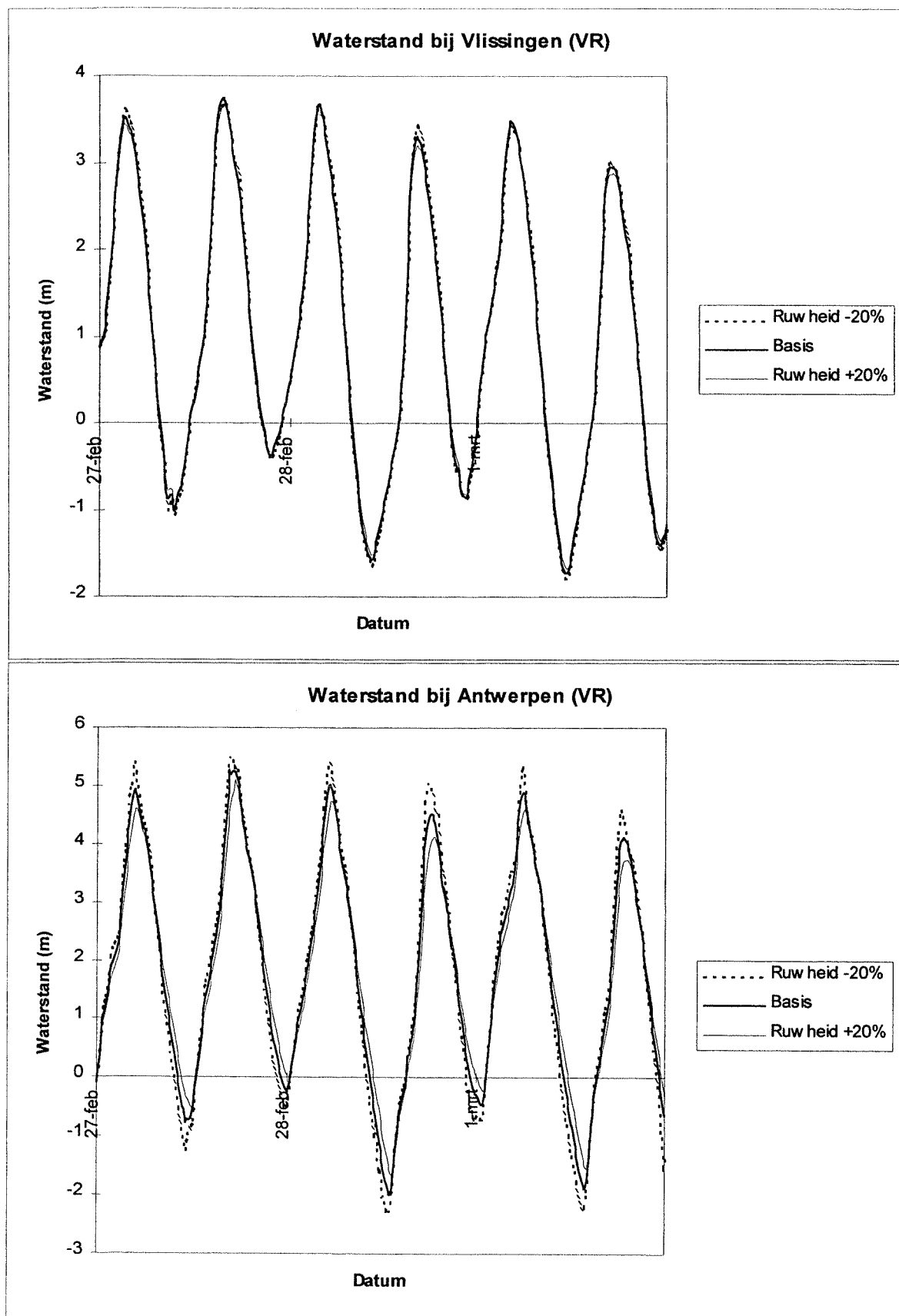
Bijlage 26: Basisrun: Opstuwing bij Bath met SCALWEST-grof



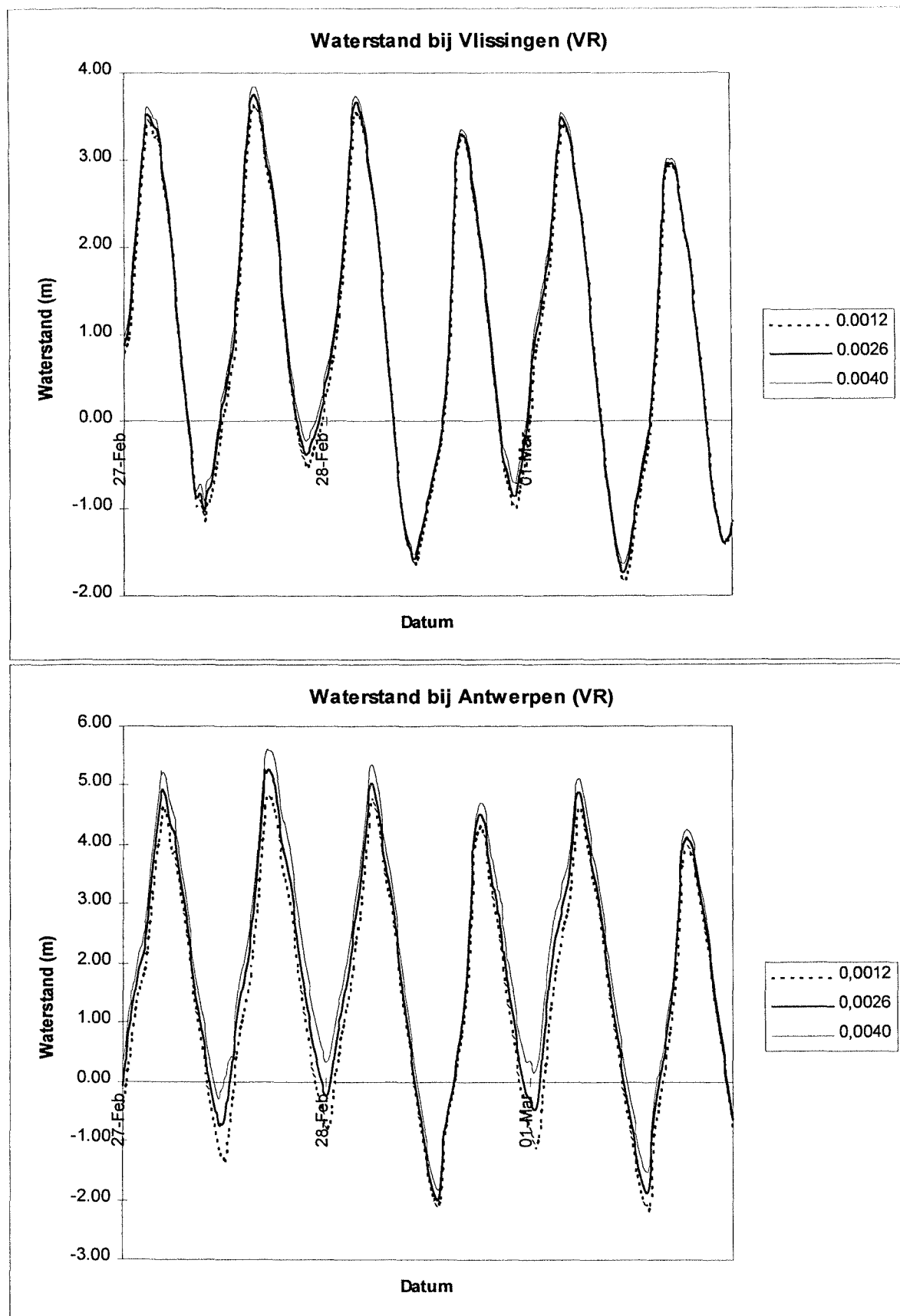
Bijlage 27: Basisrun: Gemiddelde afwijking en standaarddeviatie



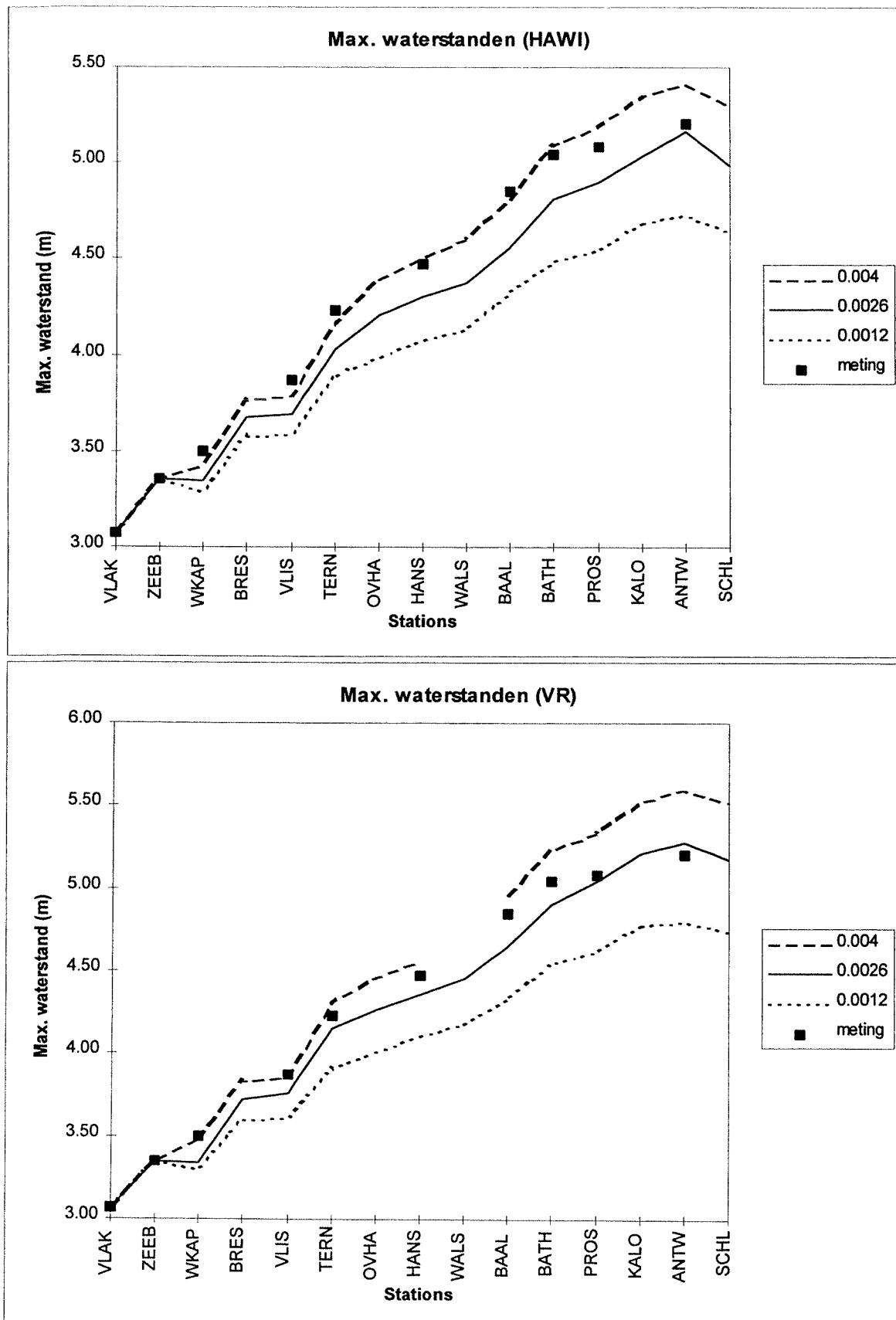
Bijlage 28: Gevoeligheidsonderzoek: Bodemruwheid



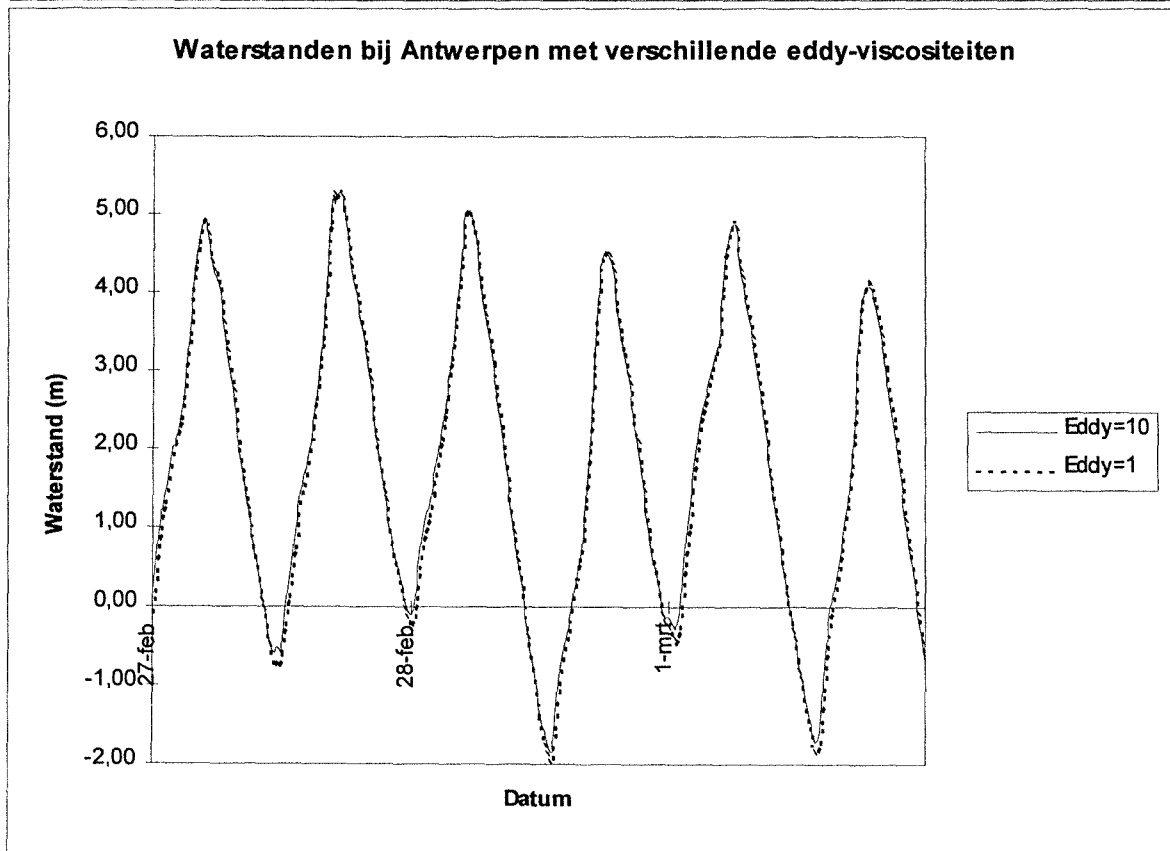
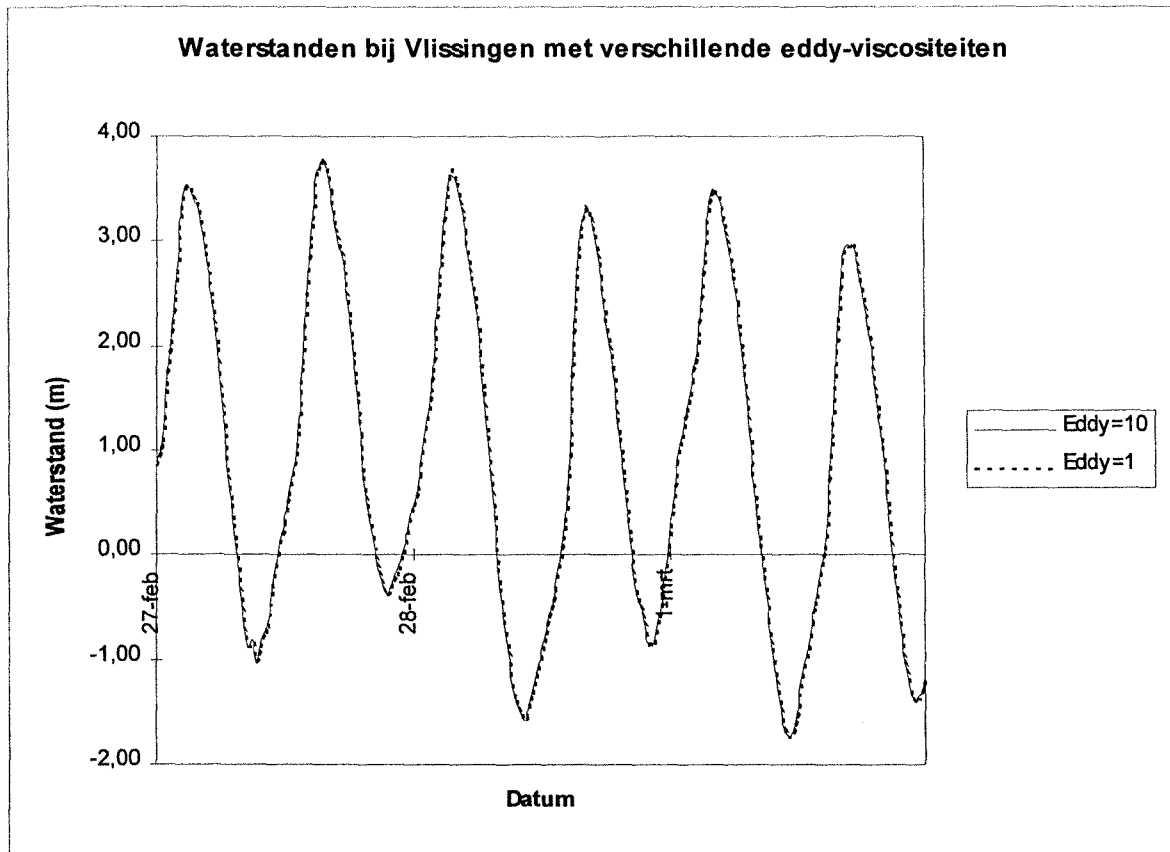
Bijlage 29: Gevoeligheidsonderzoek: Windstresscoëfficiënt



Bijlage 30: Gevoeligheidsonderzoek: Maximale waterstanden bij verschillende windstresscoëfficiënten

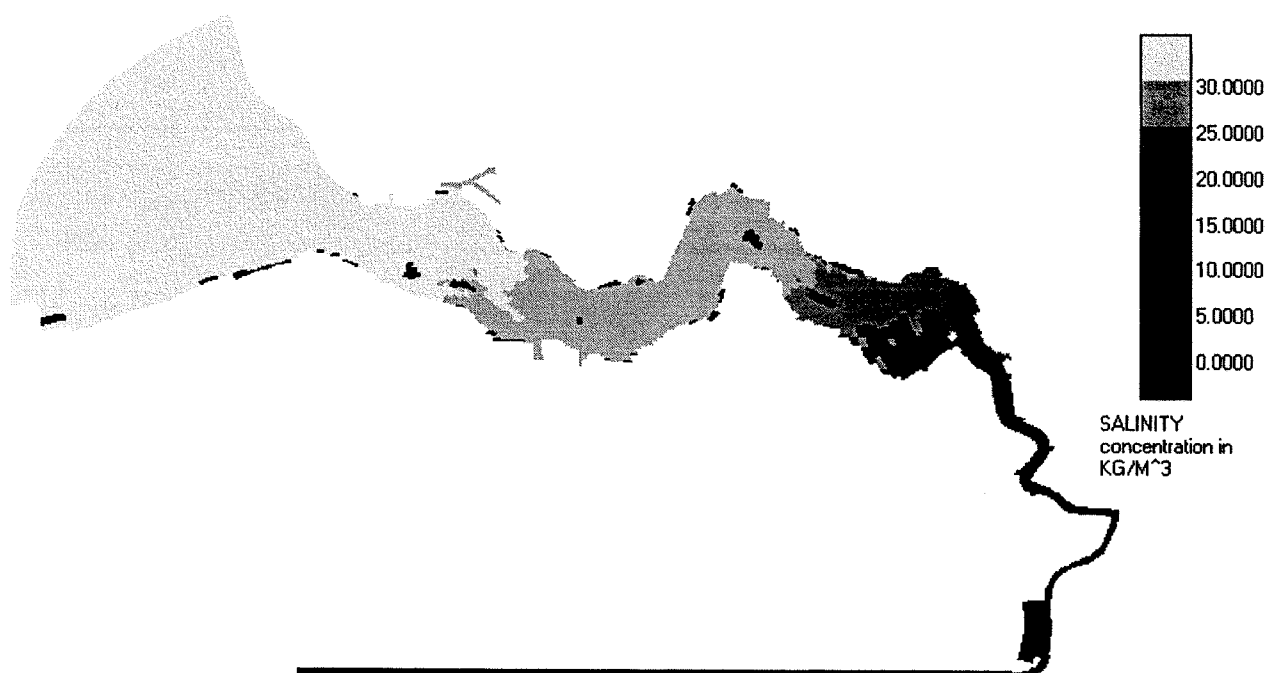


Bijlage 31: Gevoeligheidsonderzoek: Eddy-viscositeitscoëfficiënt

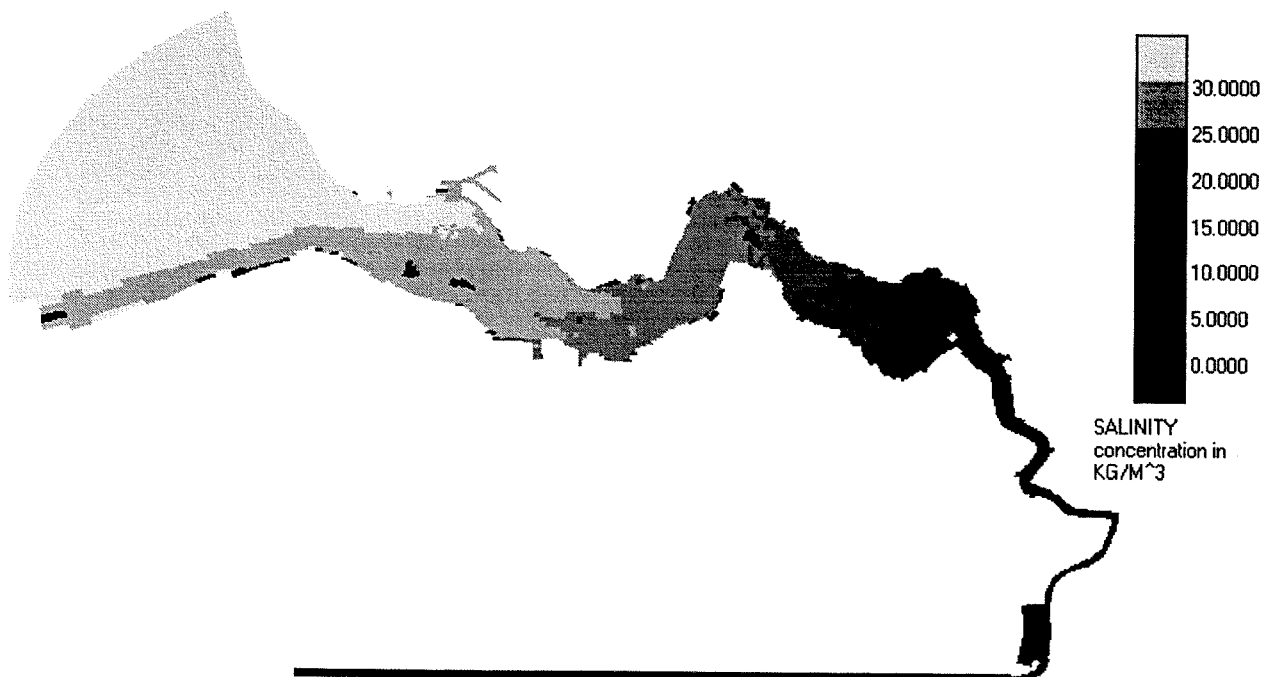


Bijlage 32: Gevoeligheidsonderzoek: Zoutvelden

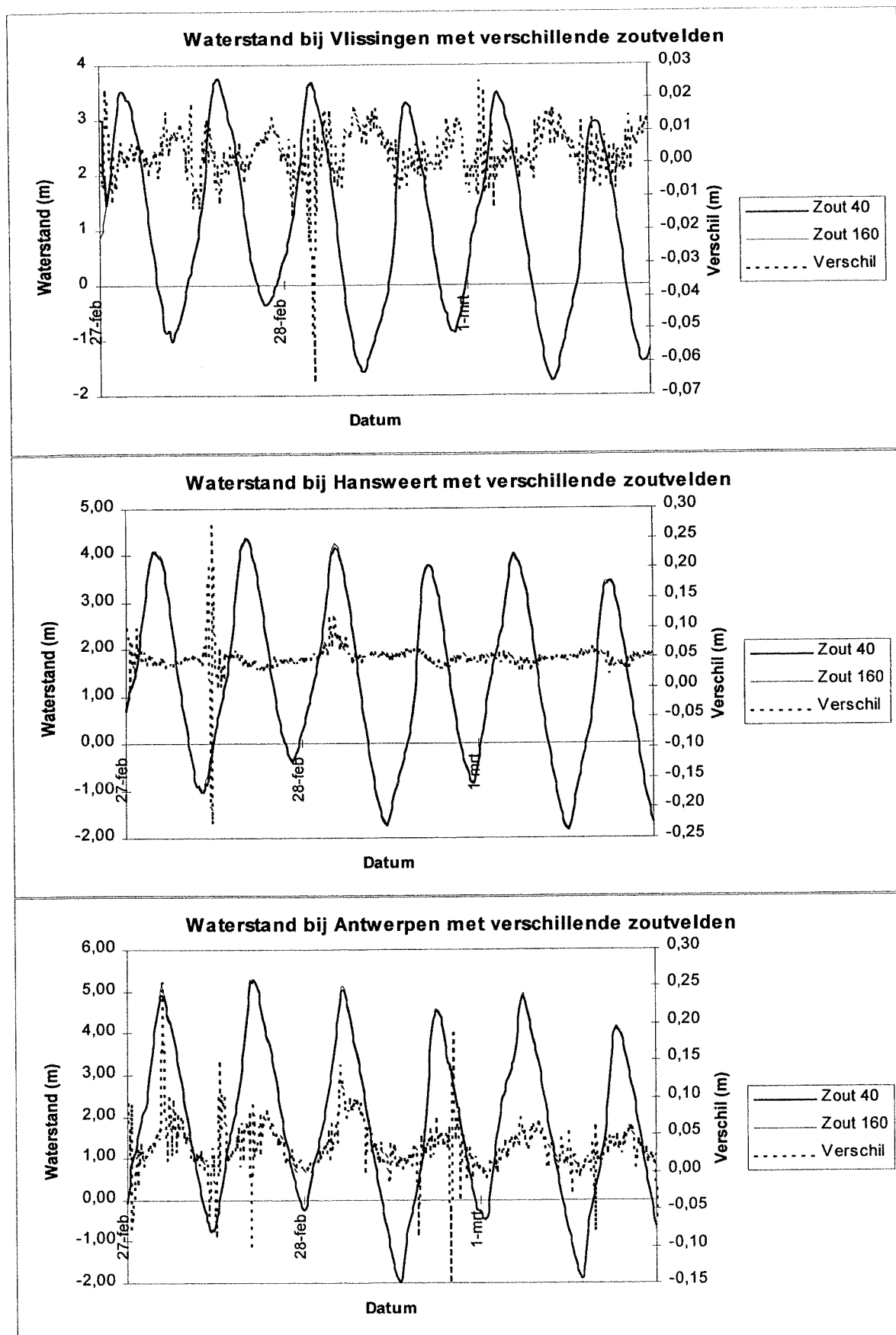
Zoutveld behorende bij een Schelde afvoer van 40 m³/s



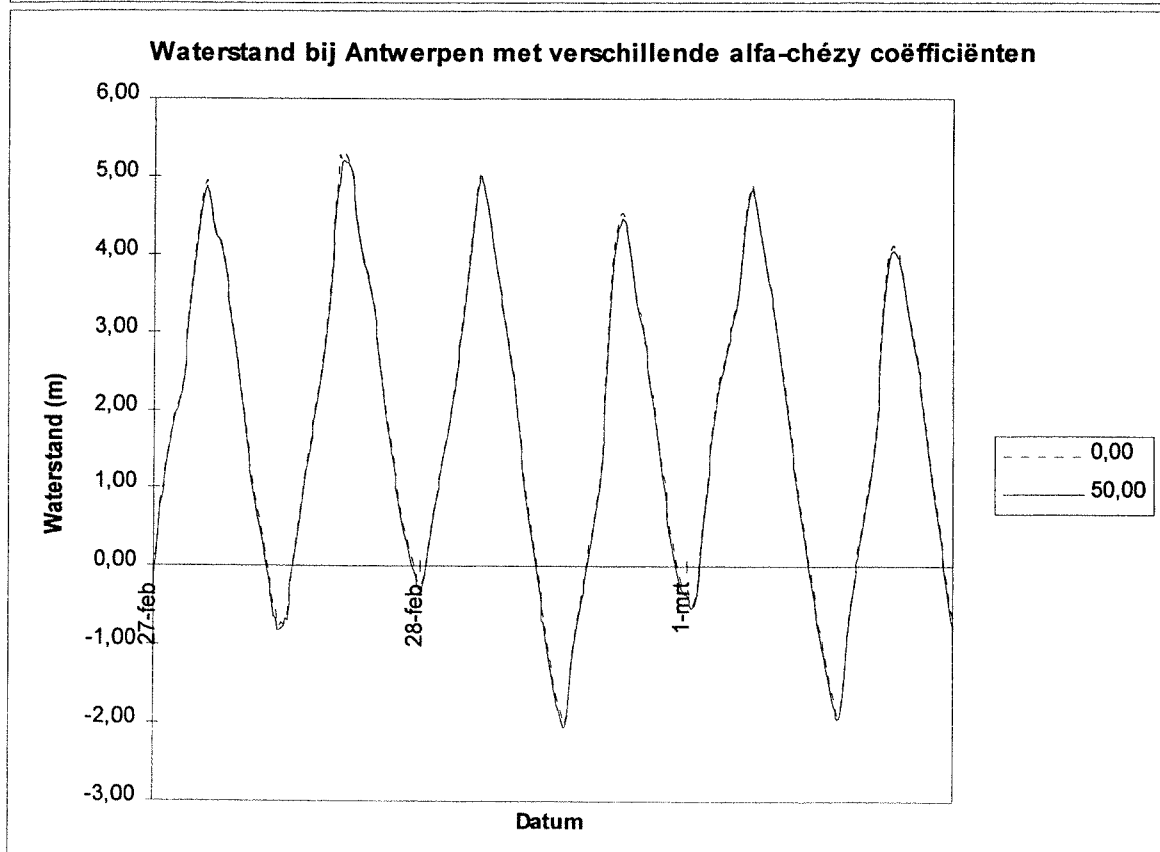
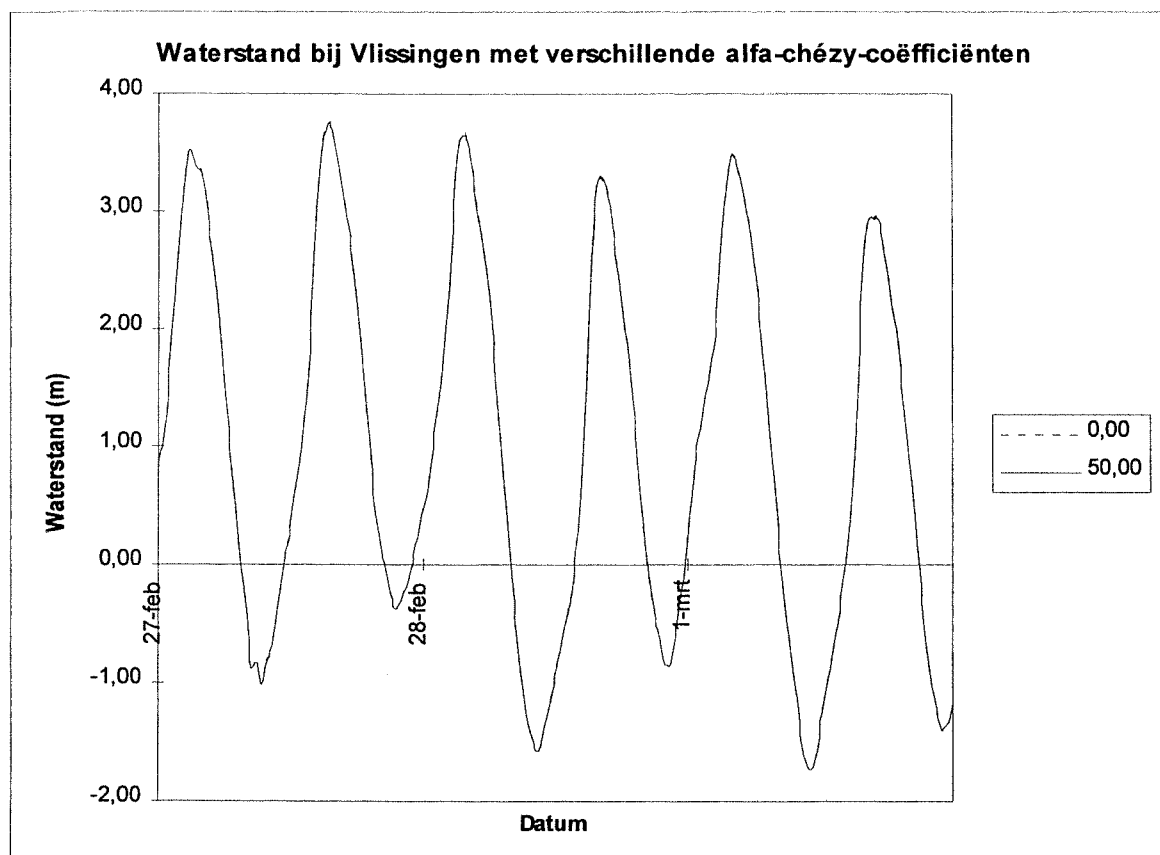
Zoutveld behorende bij een Schelde afvoer van 160 m³/s



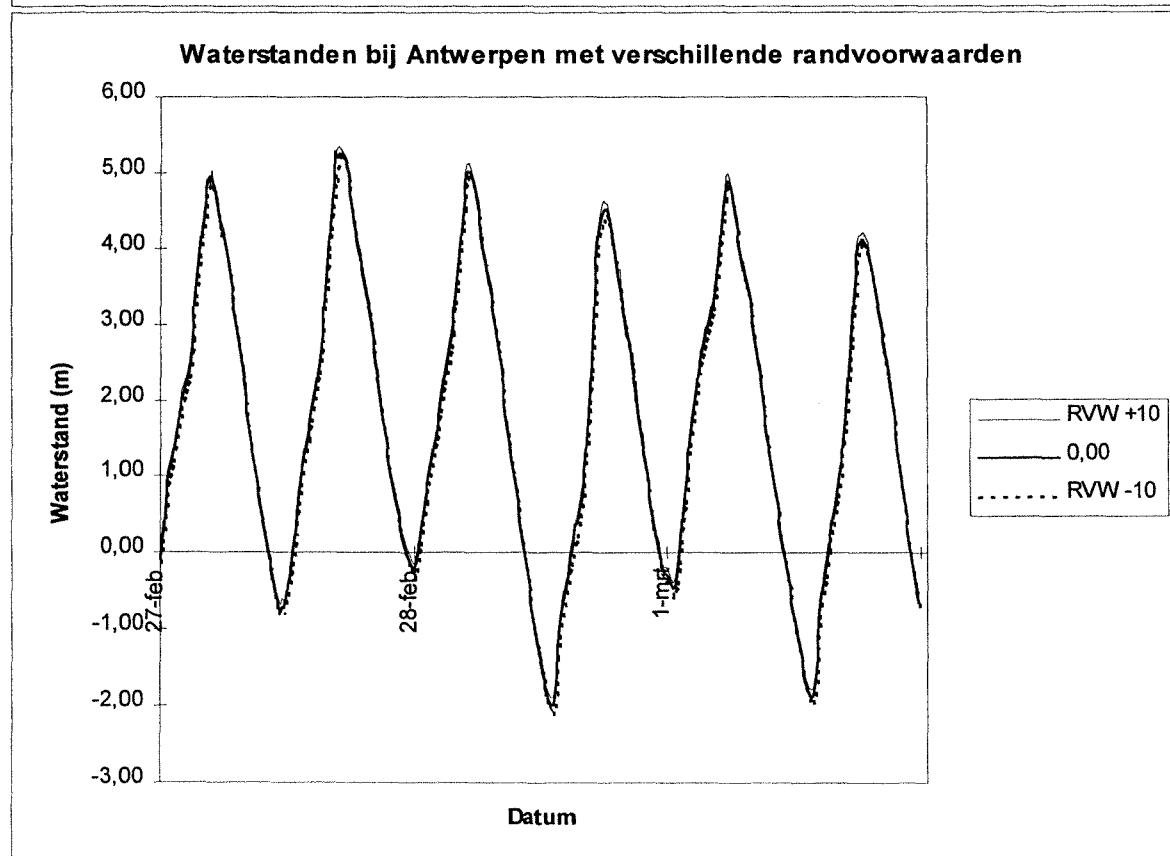
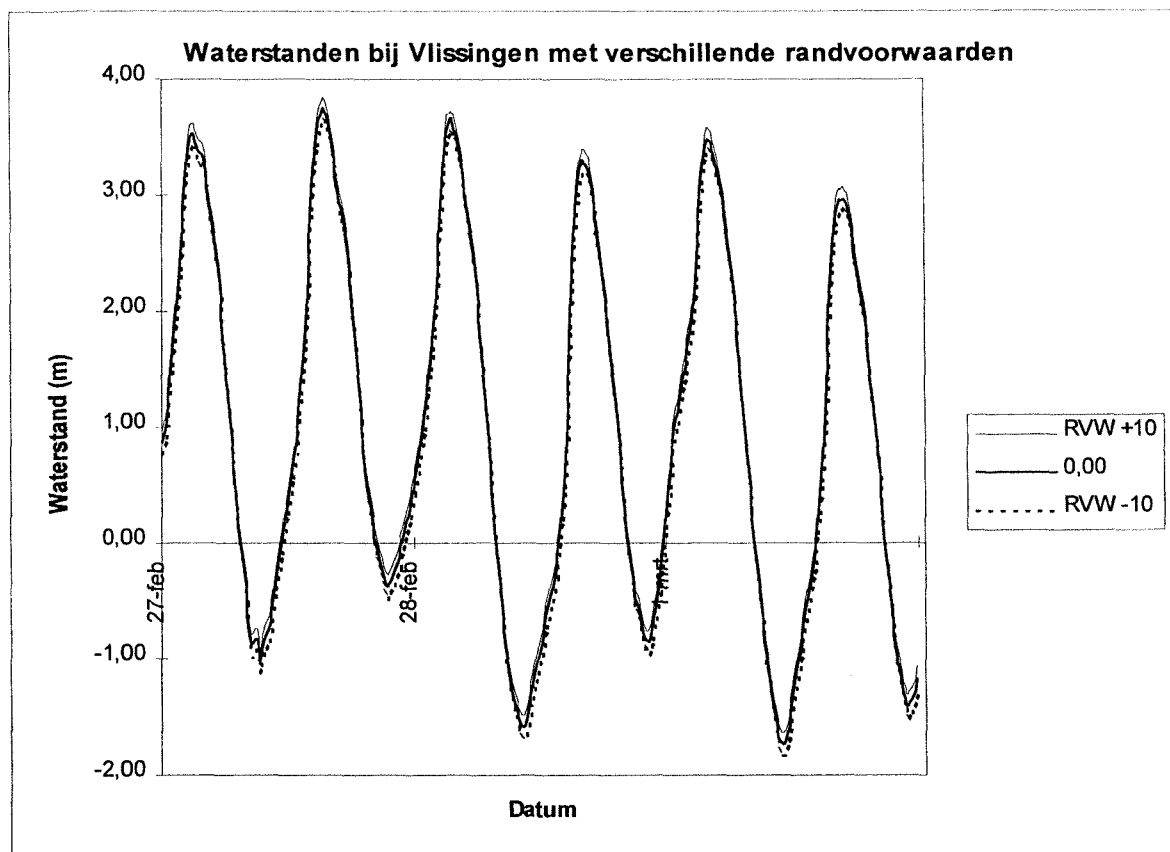
Bijlage 33: Gevoeligheidsonderzoek: Dichtheid



Bijlage 34: Gevoeligheidsonderzoek: Alfa-chézy coëfficiënt

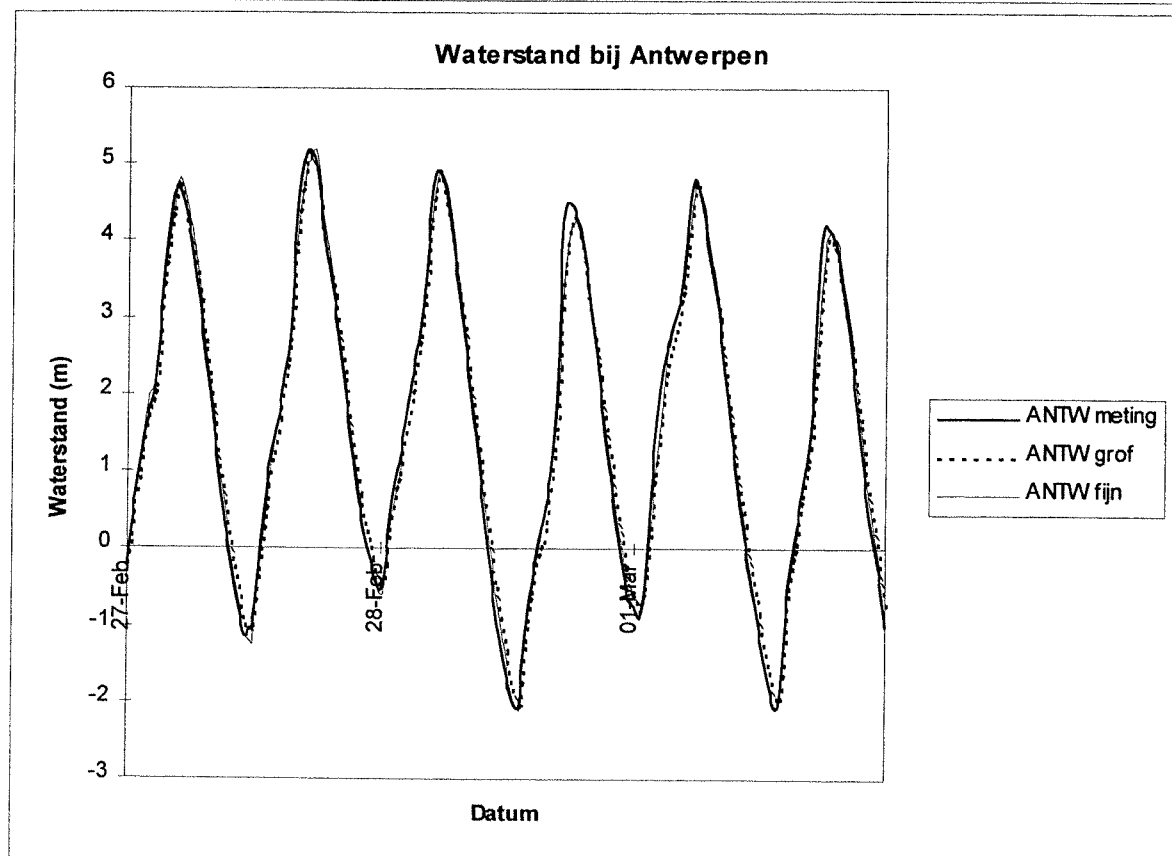
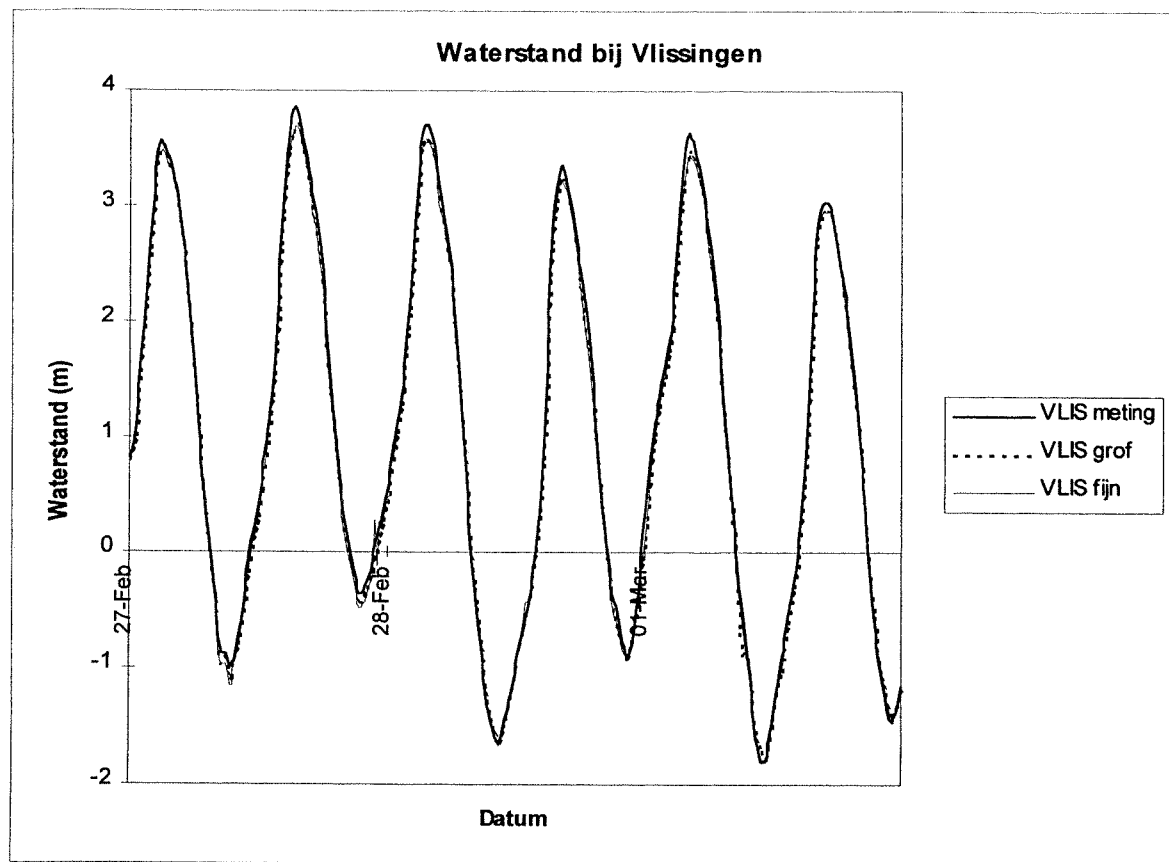


Bijlage 35: Gevoeligheidsonderzoek: Randvoorwaarden



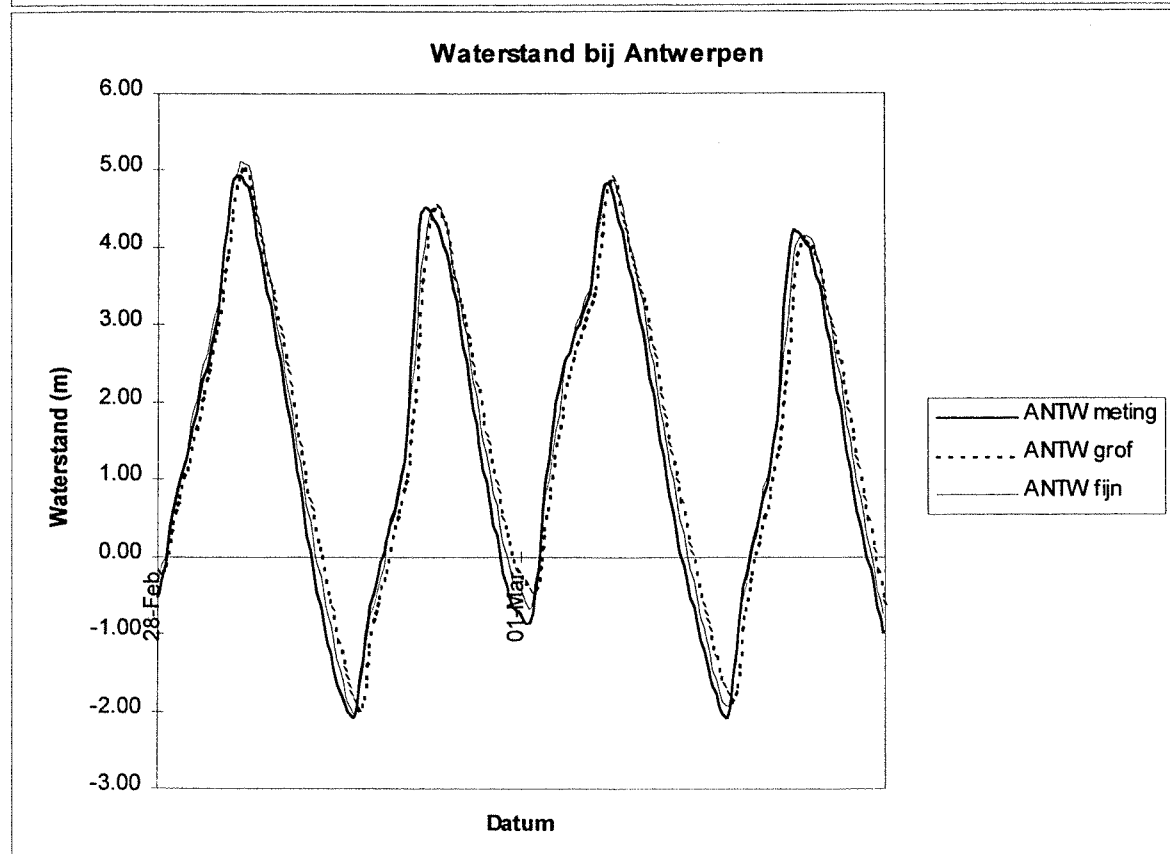
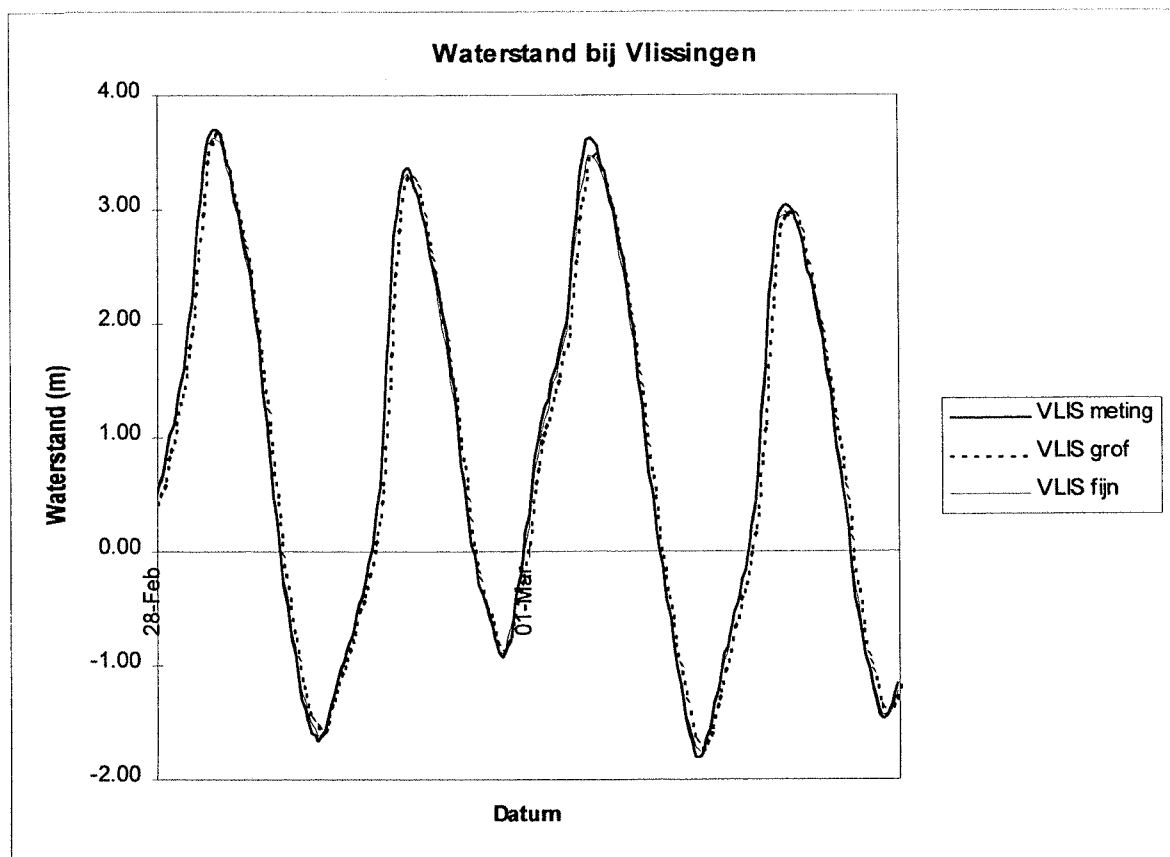
Bijlage 36: Gevoeligheidsonderzoek: Grof- en fijnmazig model

Met de wind bij Hansweert:

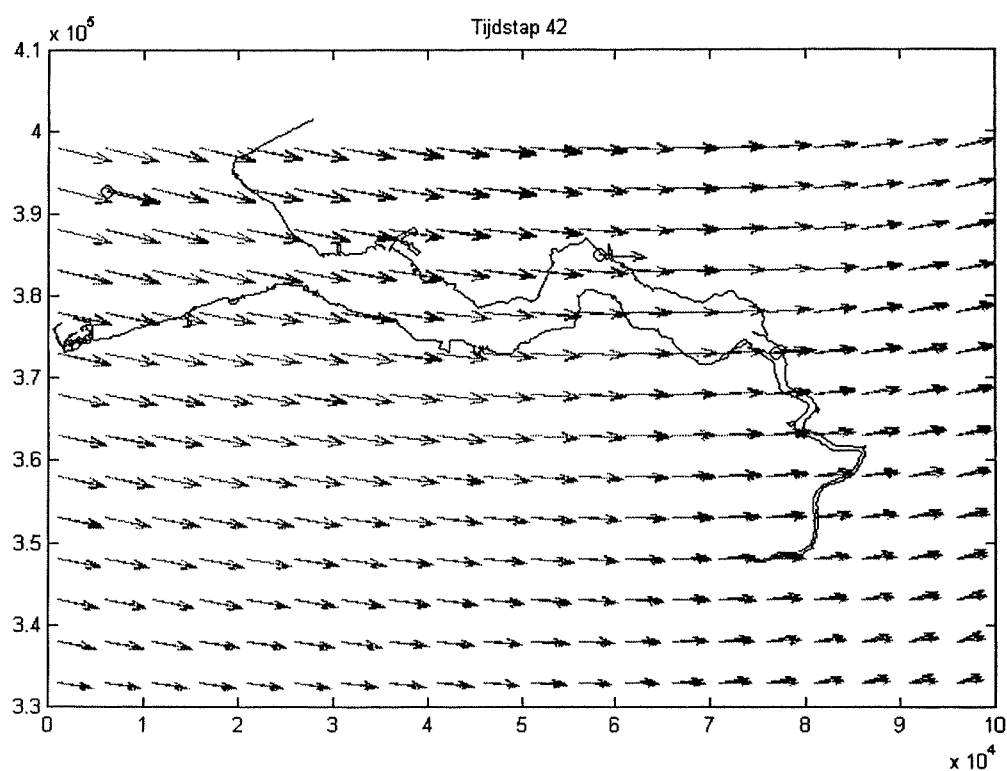
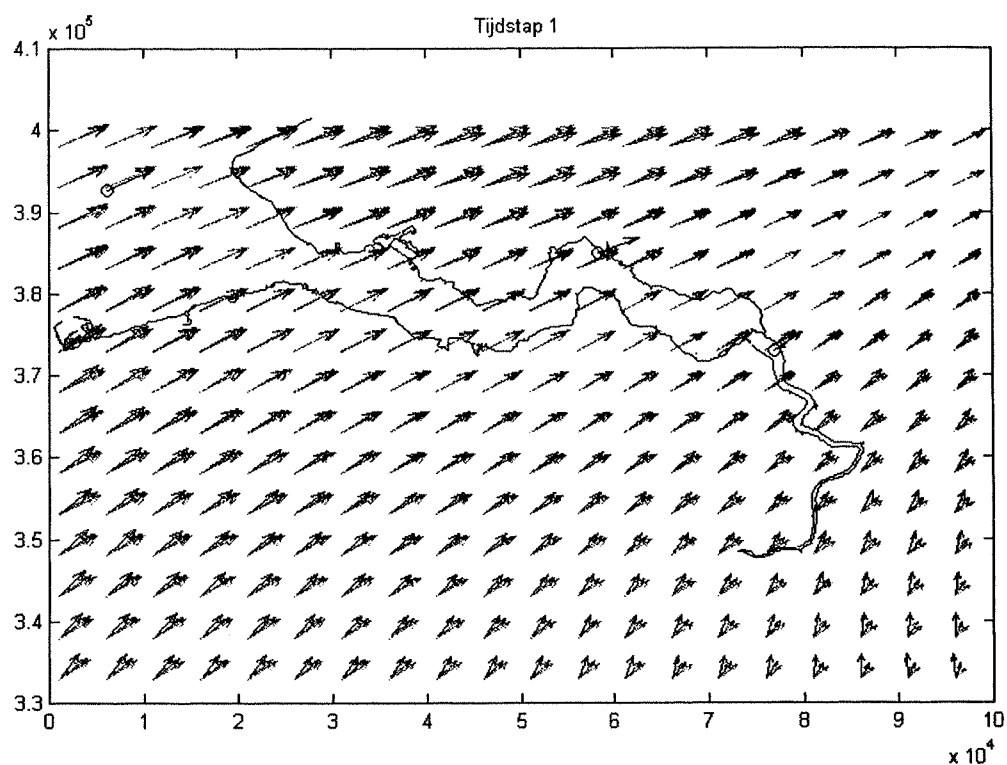


(Bijlage 36 vervolg)

Met de wind bij de Vlakte van de Raan

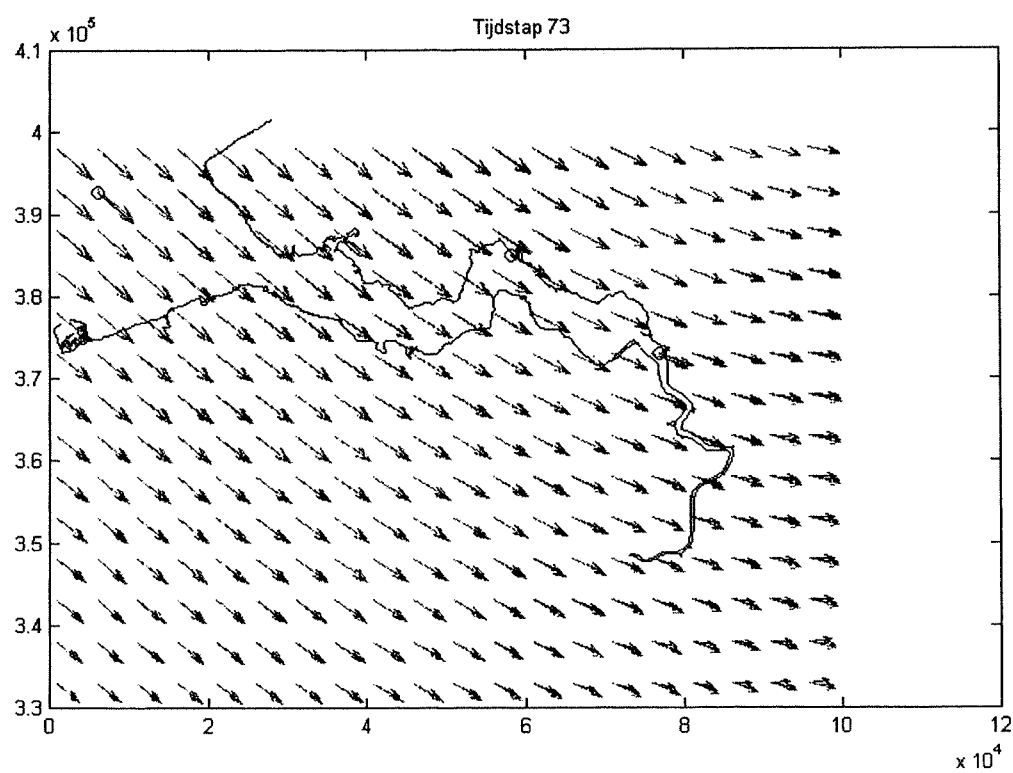
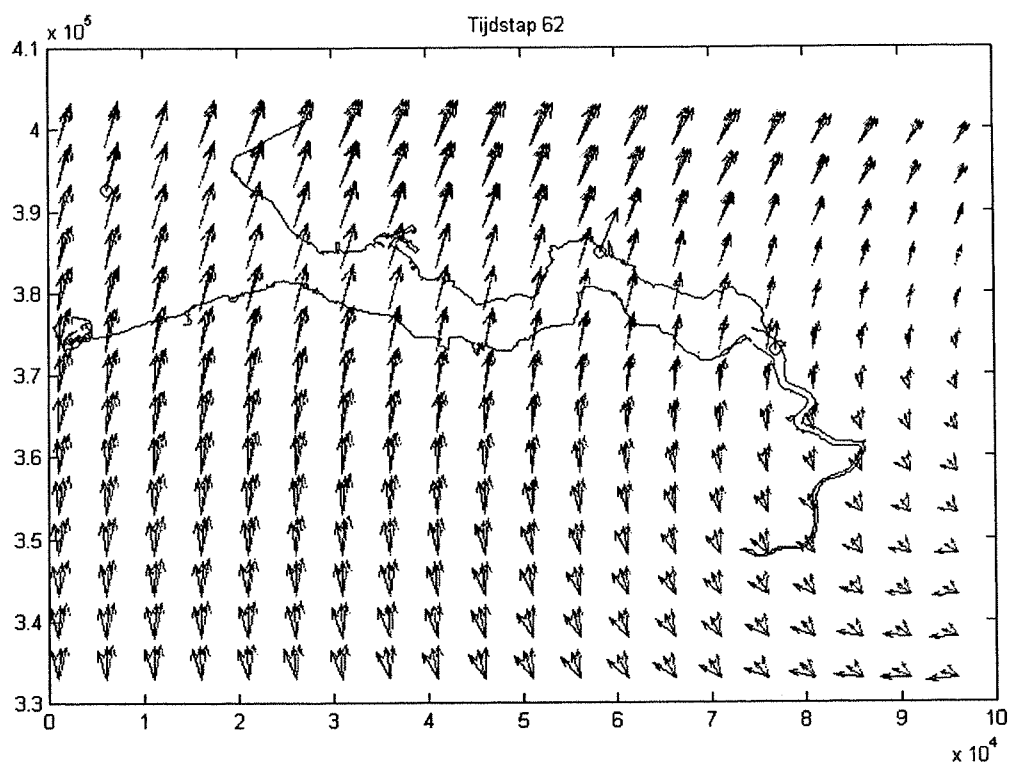


Bijlage 37: Var. windveld: Windvelden met verschillende σ_0

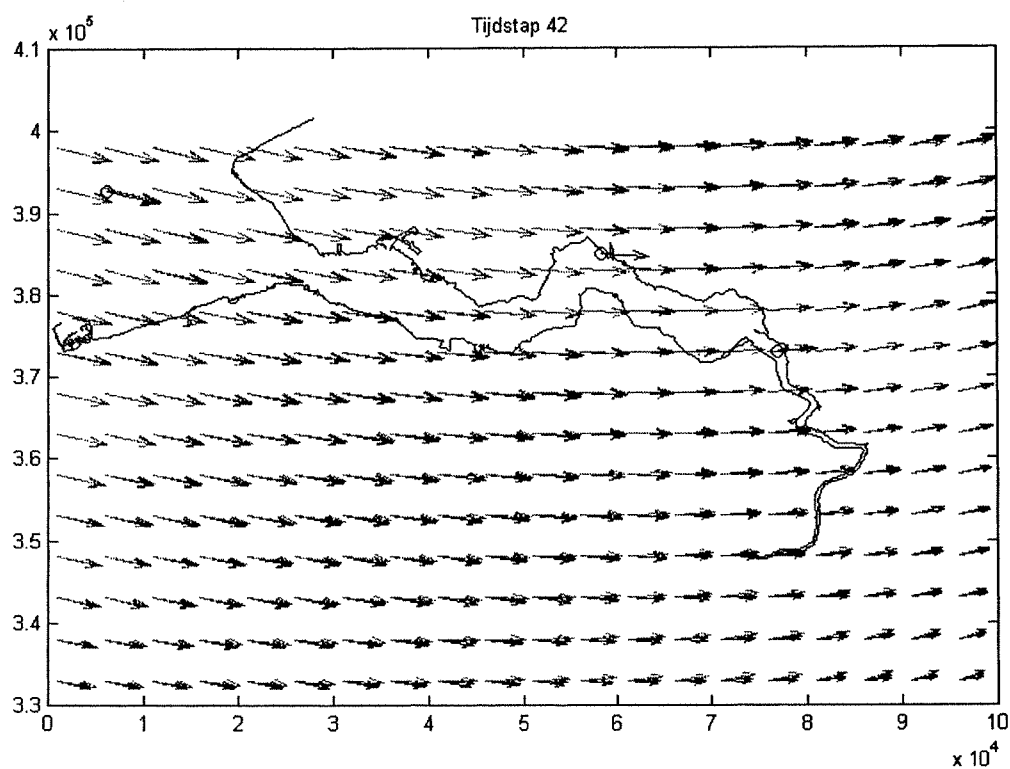
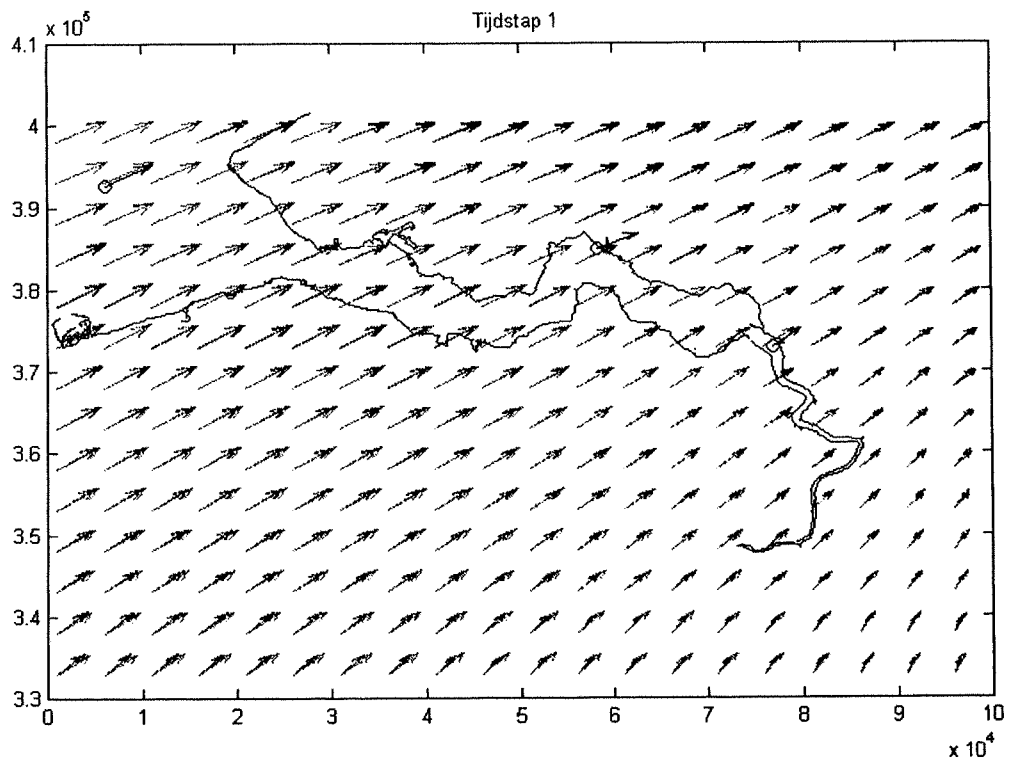


blauw: $\sigma_0 = 0,5$;
 rood: $\sigma_0 = 2,5$;
 groen: $\sigma_0 = 5,0$;
 zwart: meting.

(Bijlage 37 vervolg)

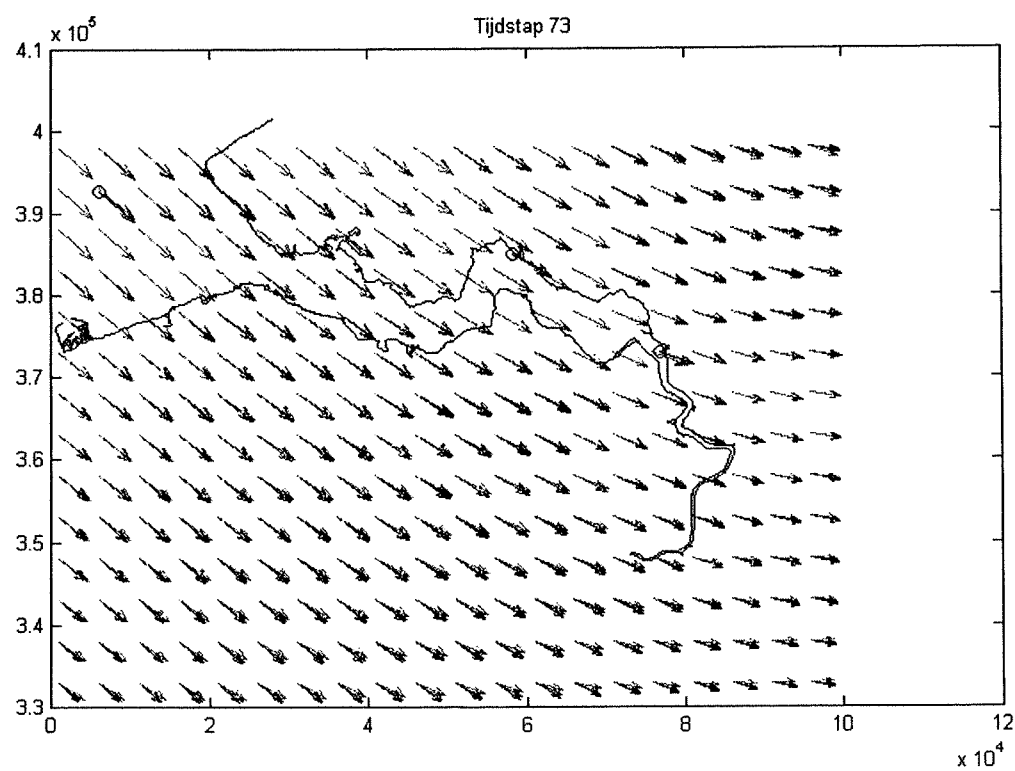
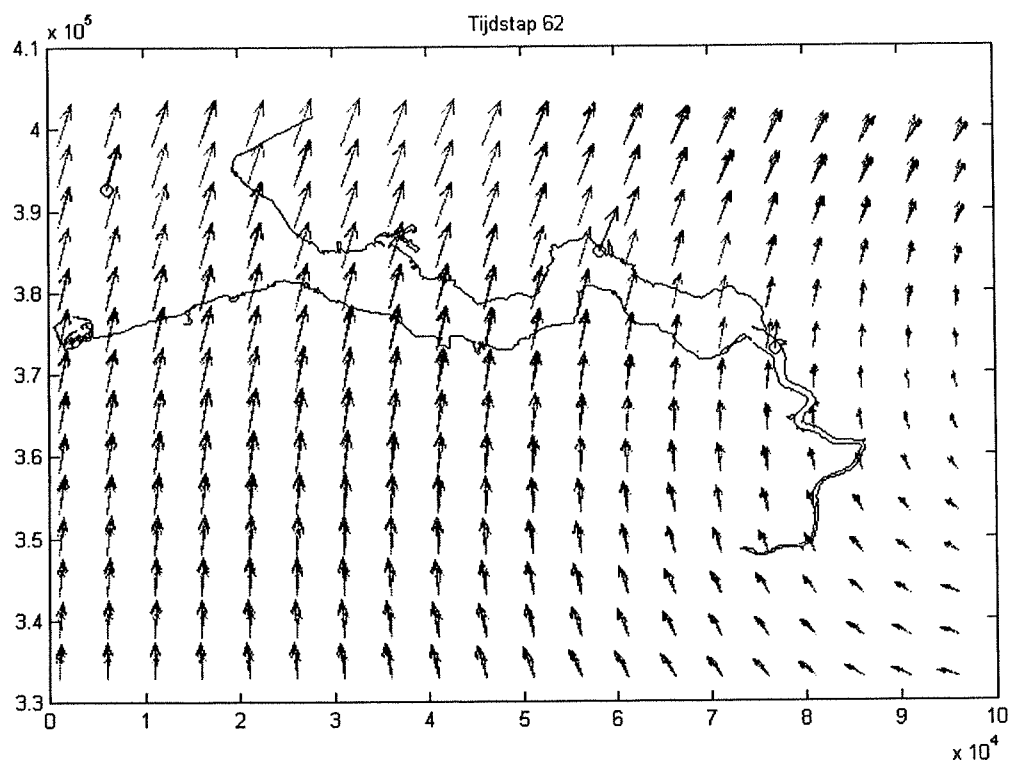


Bijlage 38: Var. windveld: Windvelden met verschillende frac_{div}

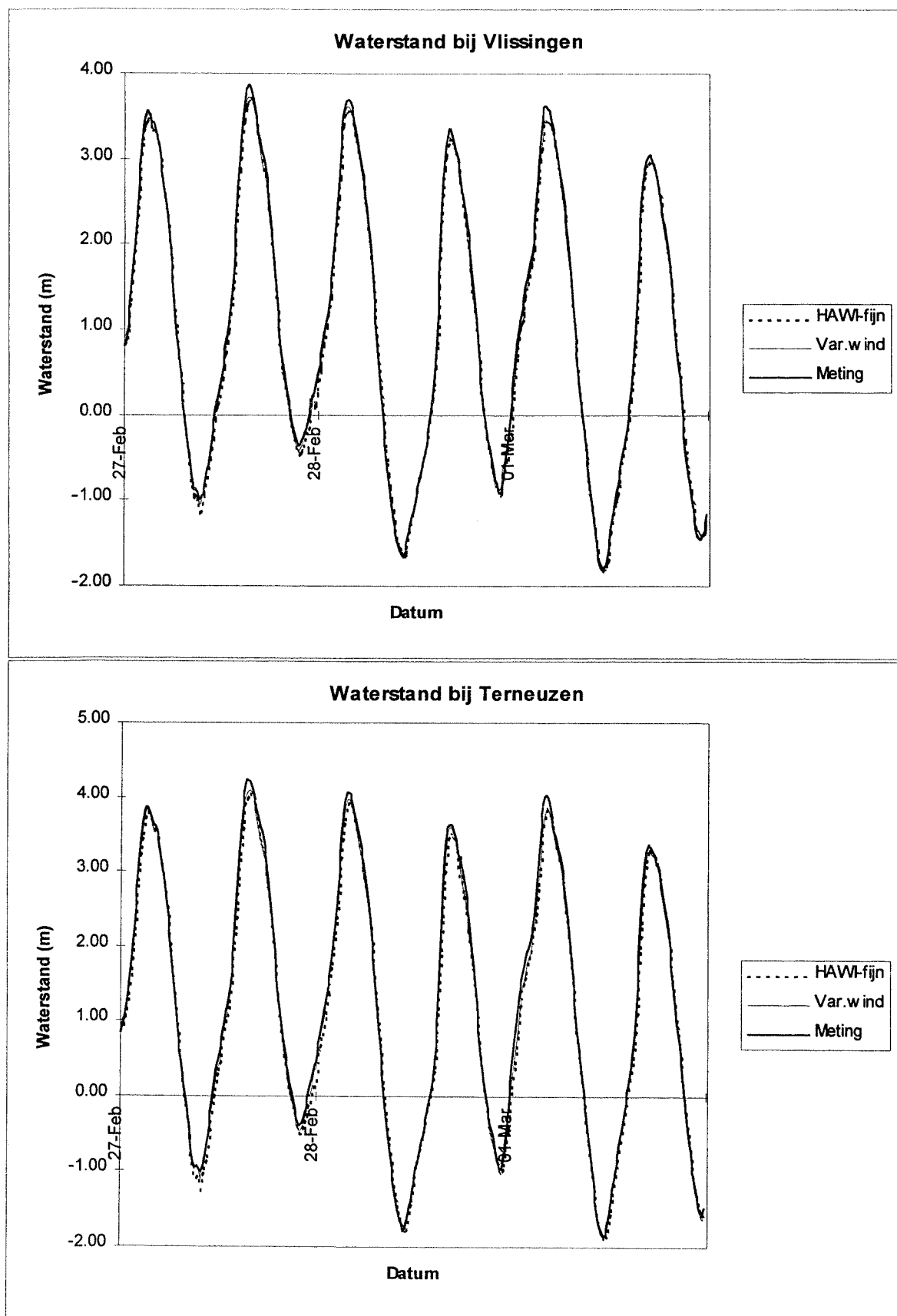


blauw: $\text{frac}_{\text{div}} = 0,15$;
 rood: $\text{frac}_{\text{div}} = 0,25$
 groen: $\text{frac}_{\text{div}} = 0,5$
 zwart: meting

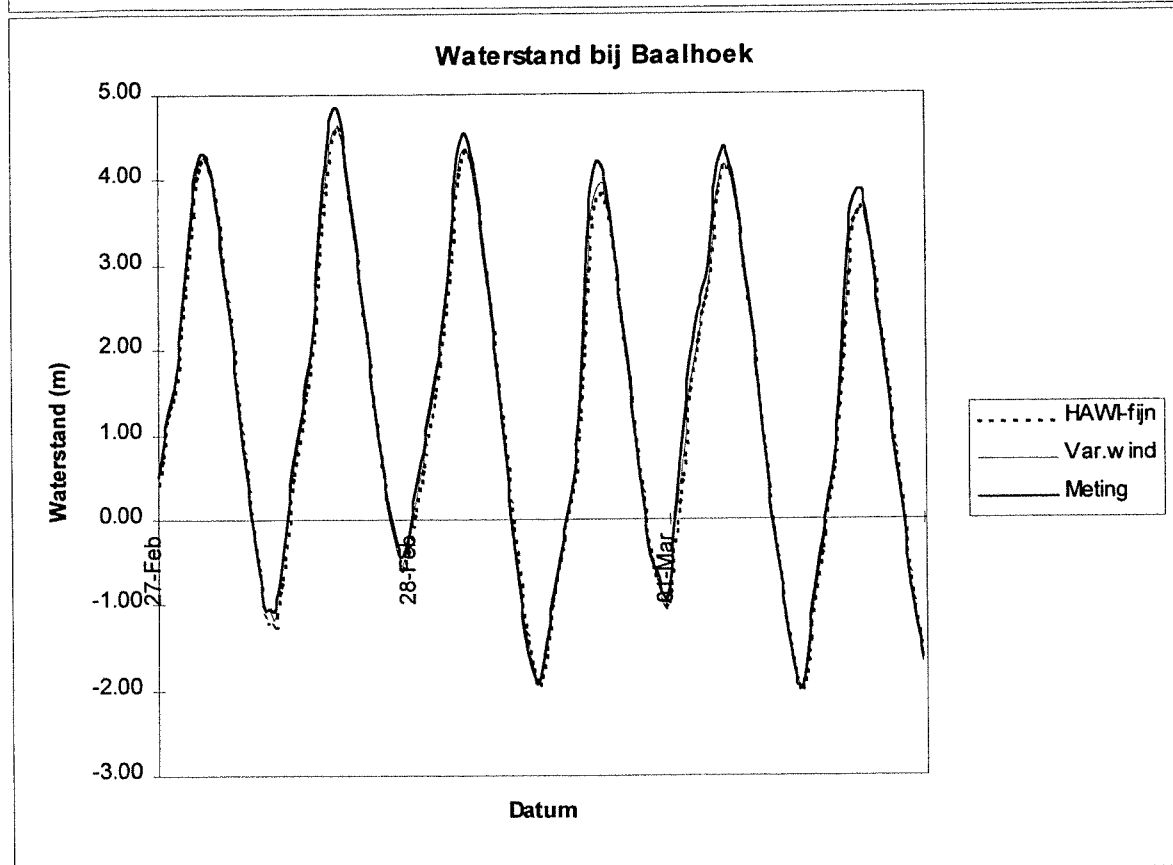
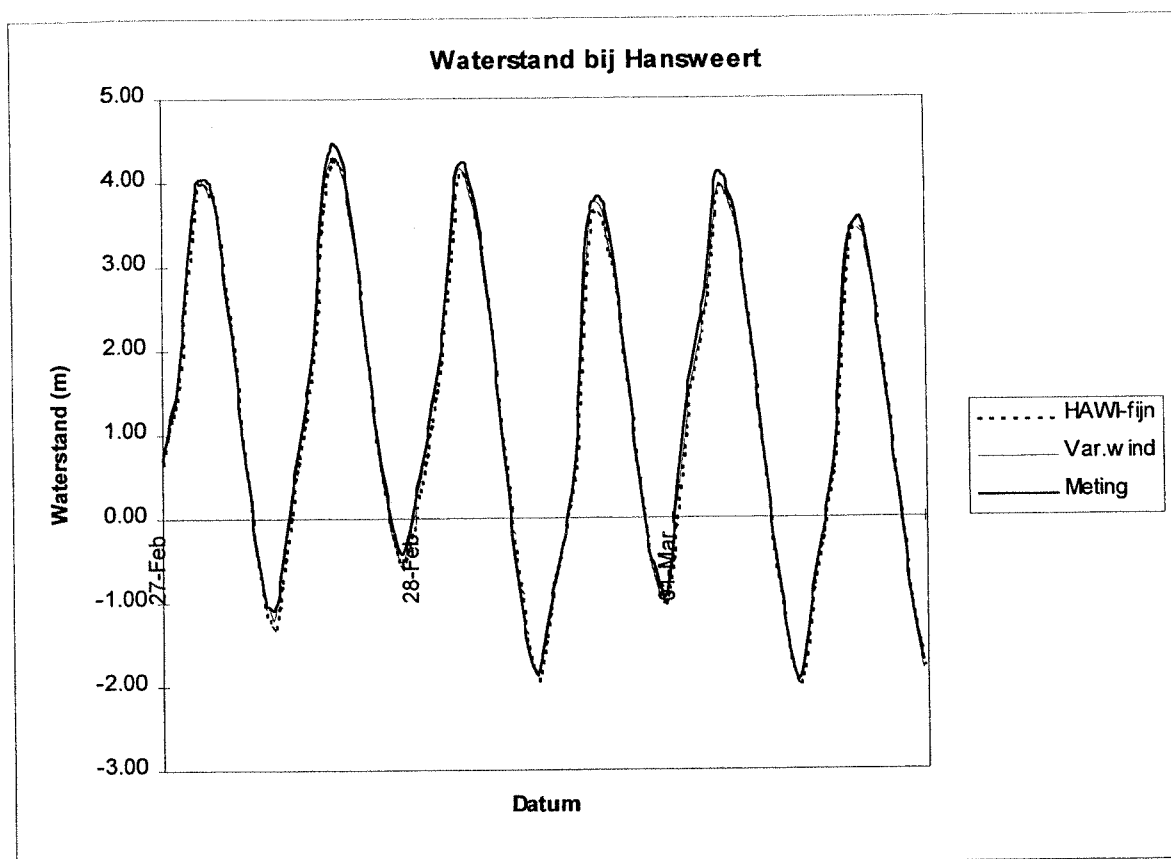
(Bijlage 38 vervolg)



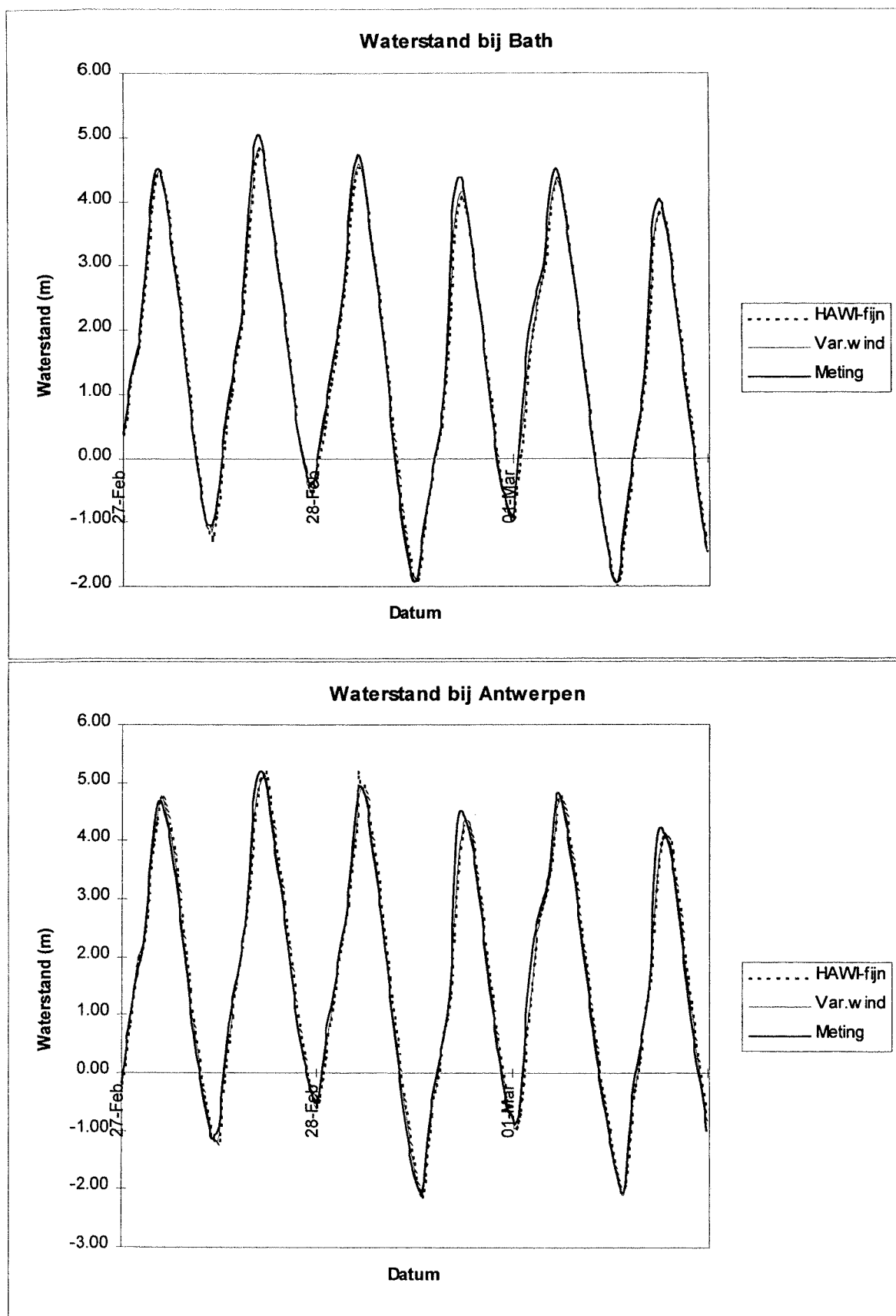
Bijlage 39: Var. windveld: Uitkomsten SCALWEST-fijn



(Bijlage 39 vervolg)

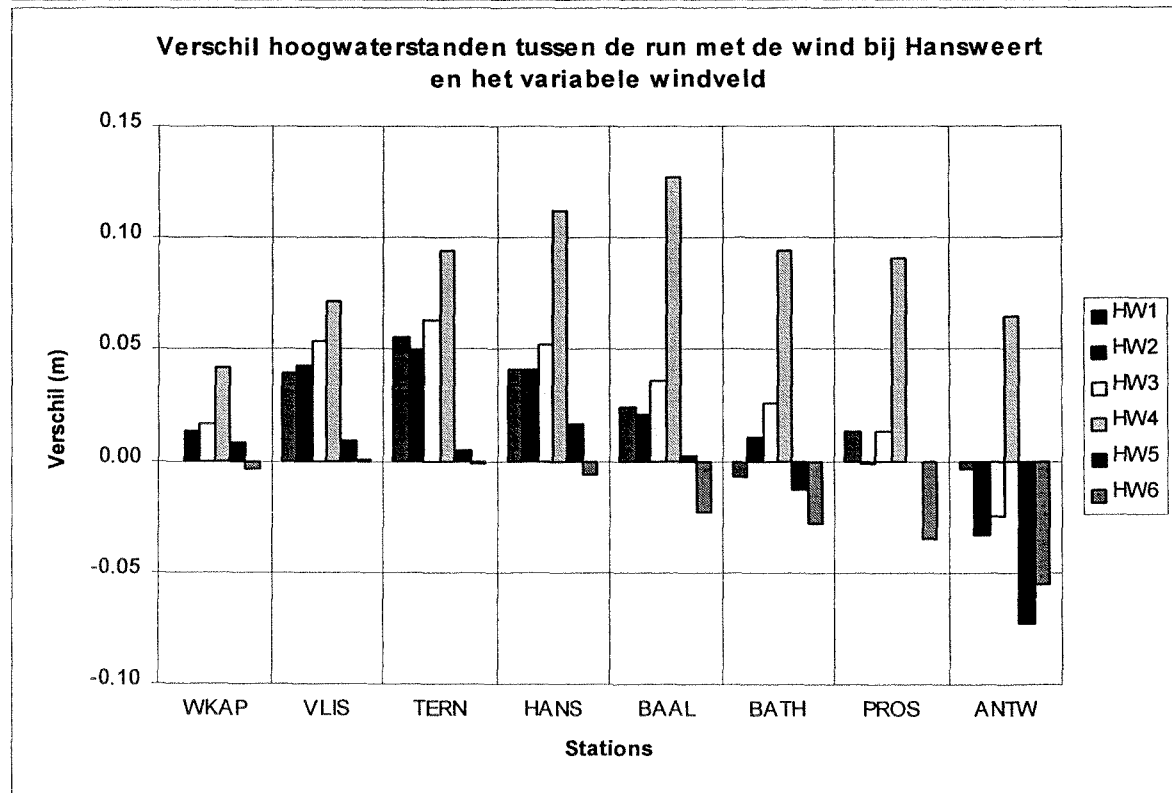
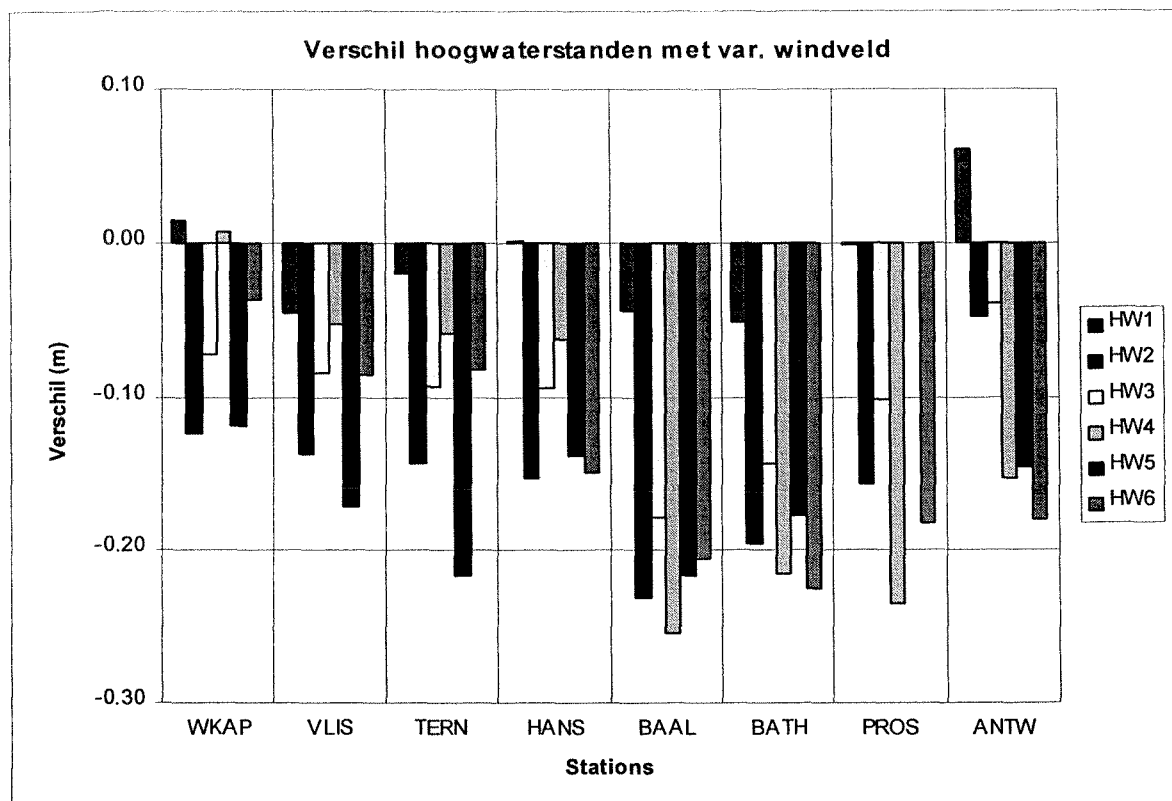


(Bijlage 39: vervolg)



Bijlage 40: Var. windveld: Verschillen hoog-en laagwaterstanden

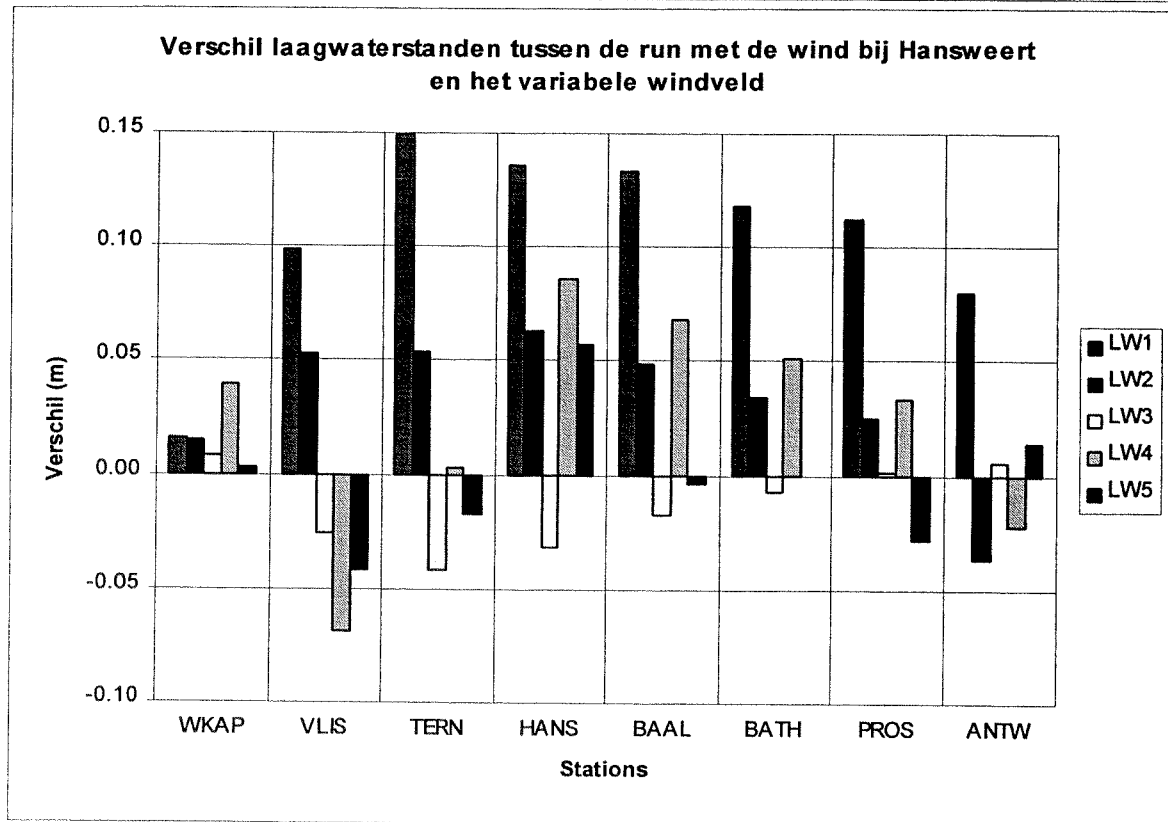
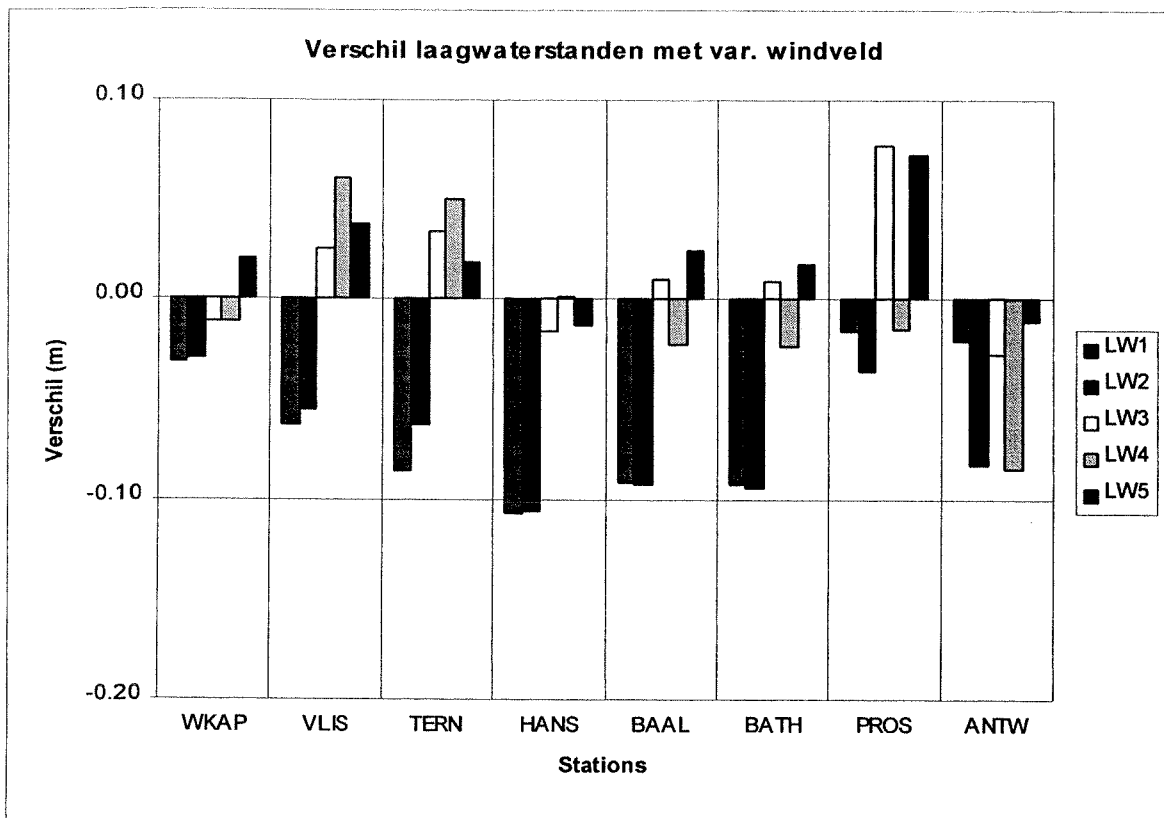
Een positief verschil betekent dat het model te hoge resultaten geeft ten opzichte van de metingen.



Een positief verschil betekent dat er een verbetering plaatsvindt.

(Bijlage 40: vervolg)

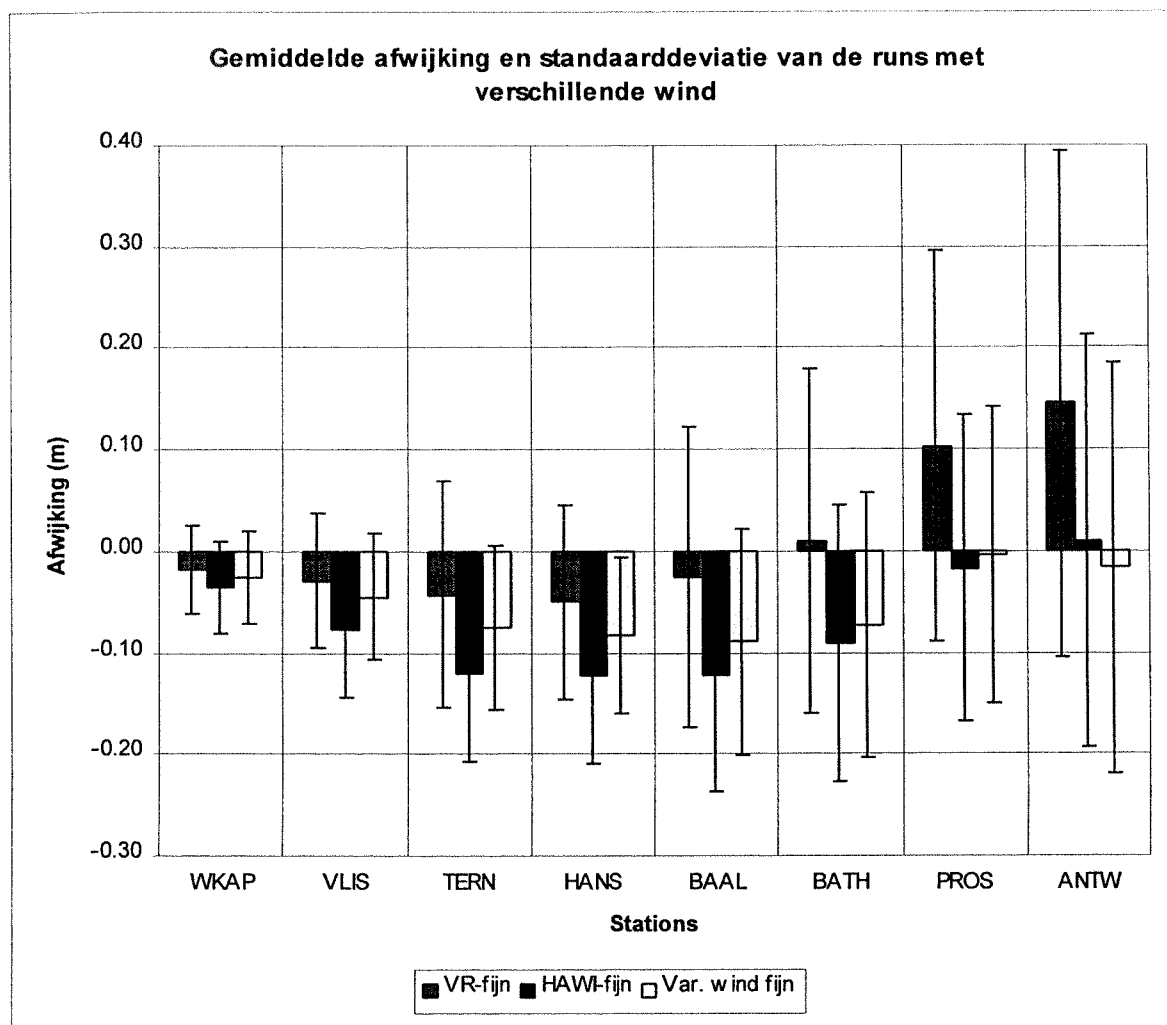
Een positief verschil betekent dat het model te hoge resultaten geeft ten opzichte van de metingen.



Een positief verschil betekent dat er een verbetering plaatsvindt.

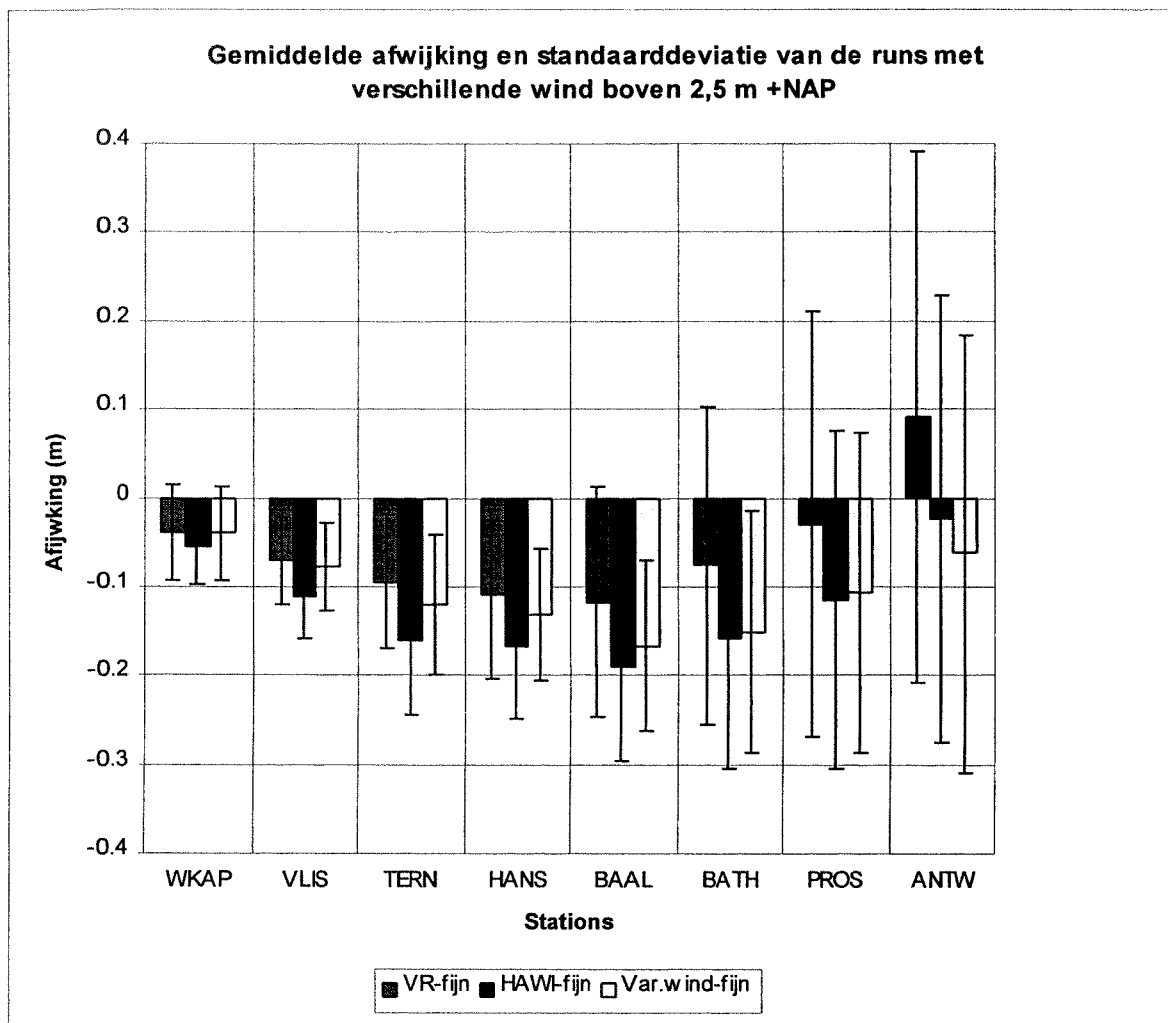
Bijlage 41: Var. windveld: Gemiddelde afwijking en standaarddeviatie

Een positieve afwijking betekent dat het model te hoge waarden berekent.



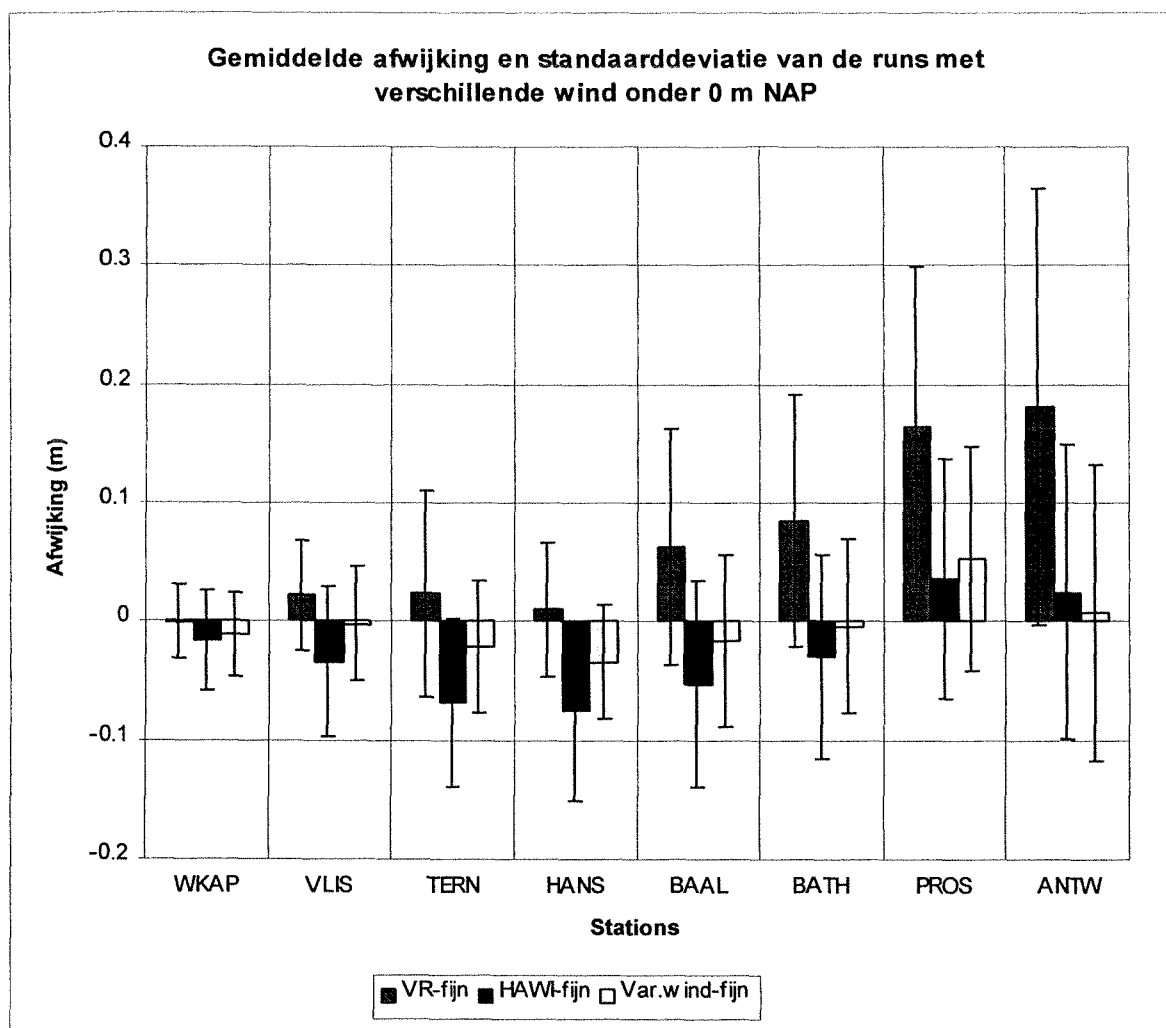
Bijlage 42: Var. windveld: Gemiddelde afwijking en standaarddeviatie van de runs boven 2,5 m + NAP

Een positieve gemiddelde afwijking betekent dat het model te hoge waarden berekent

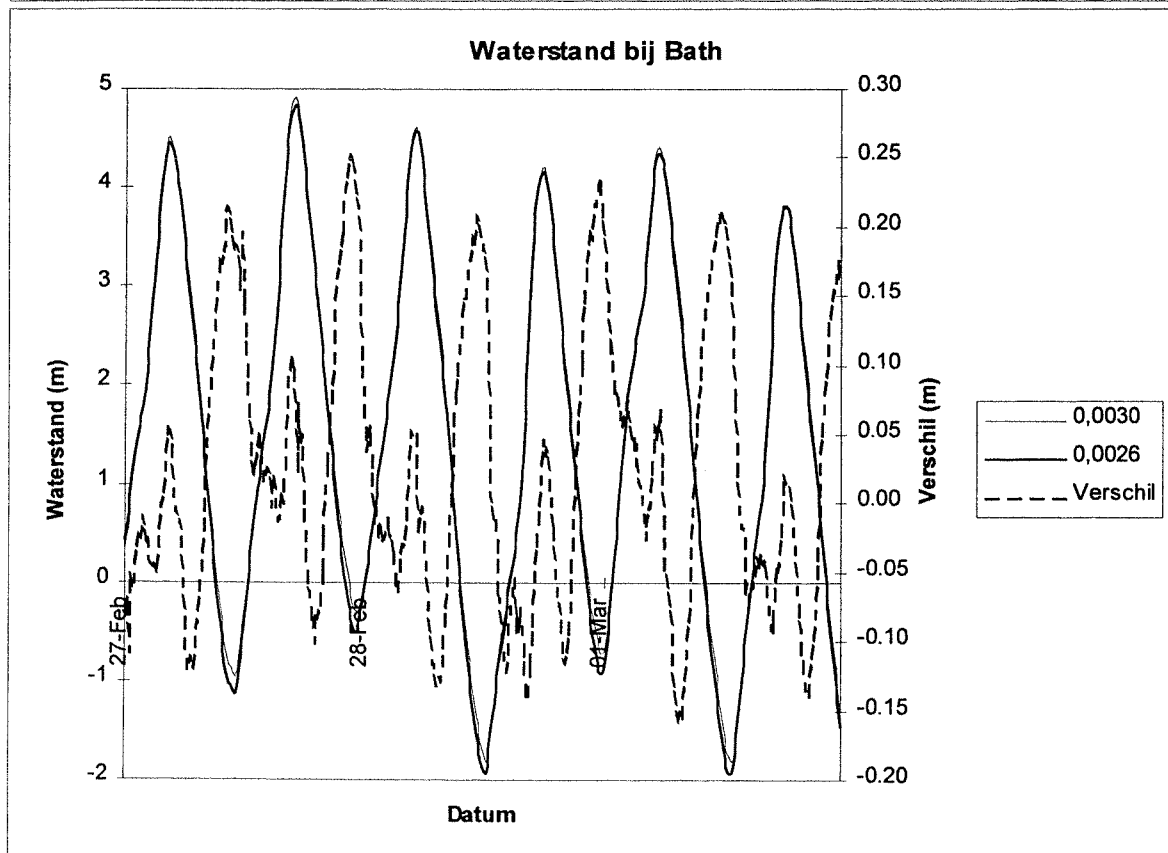
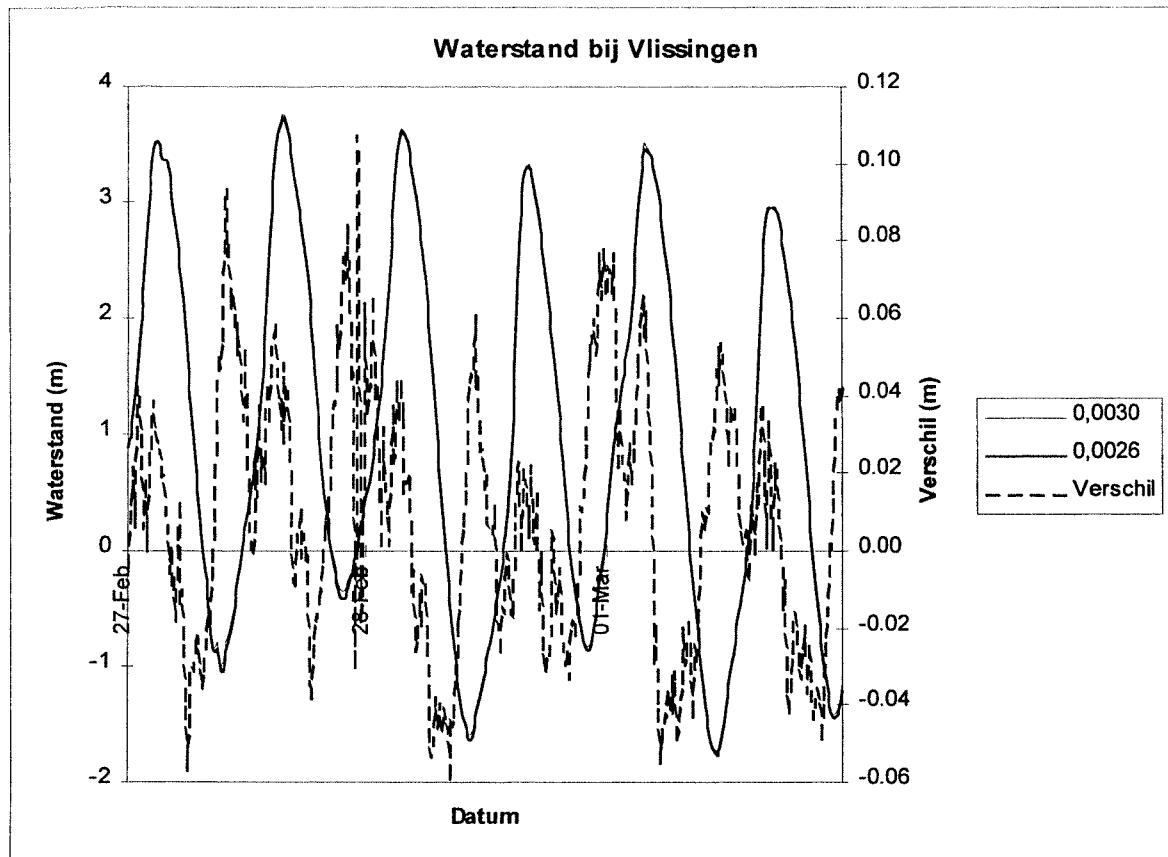


Bijlage 43: Var. windveld: Gemiddelde afwijking en standaarddeviatie van de runs beneden 0 m NAP

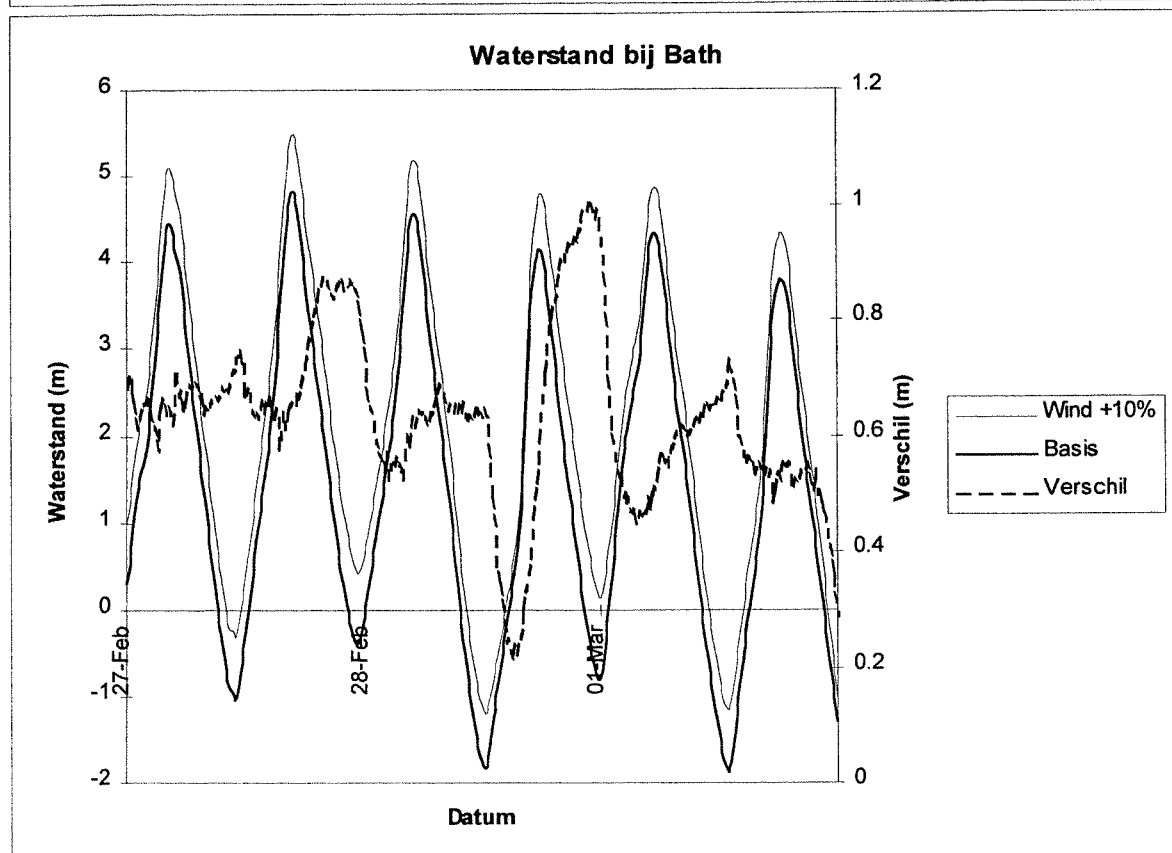
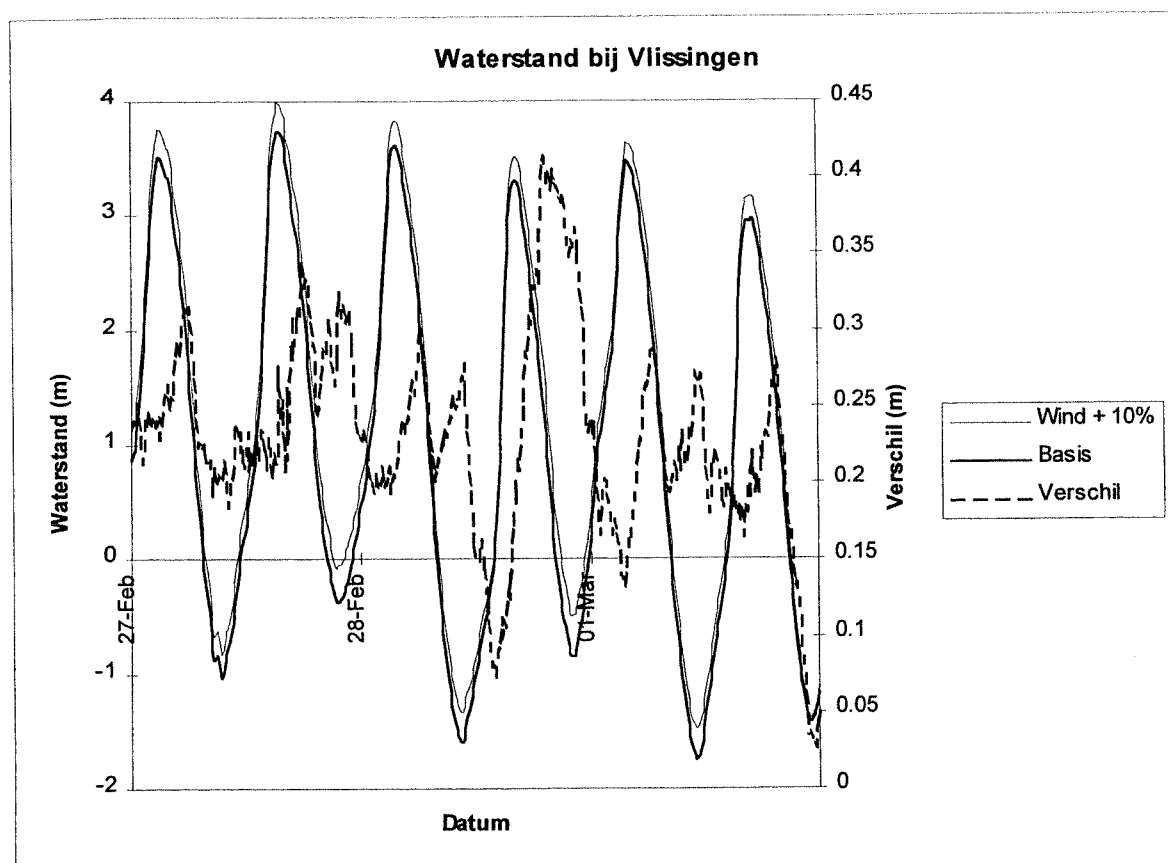
Een positieve gemiddelde afwijking betekent dat het model te hoge waarden berekent.



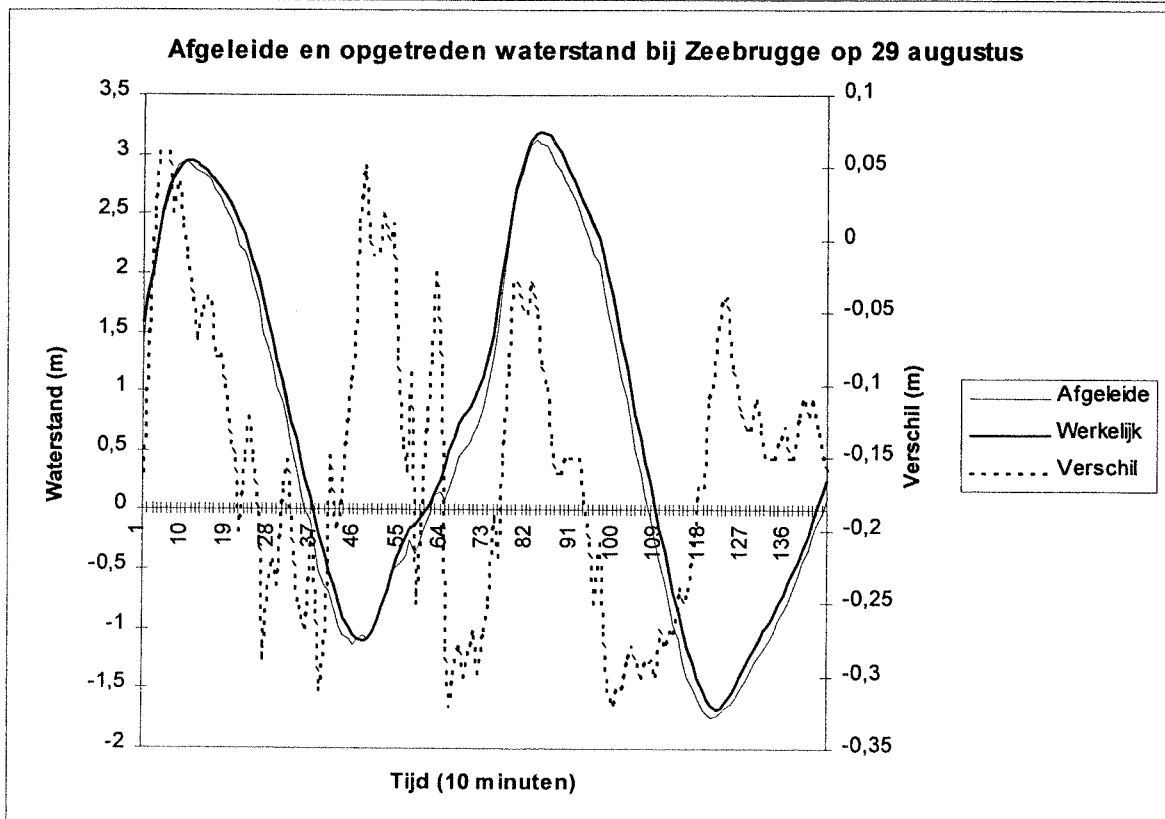
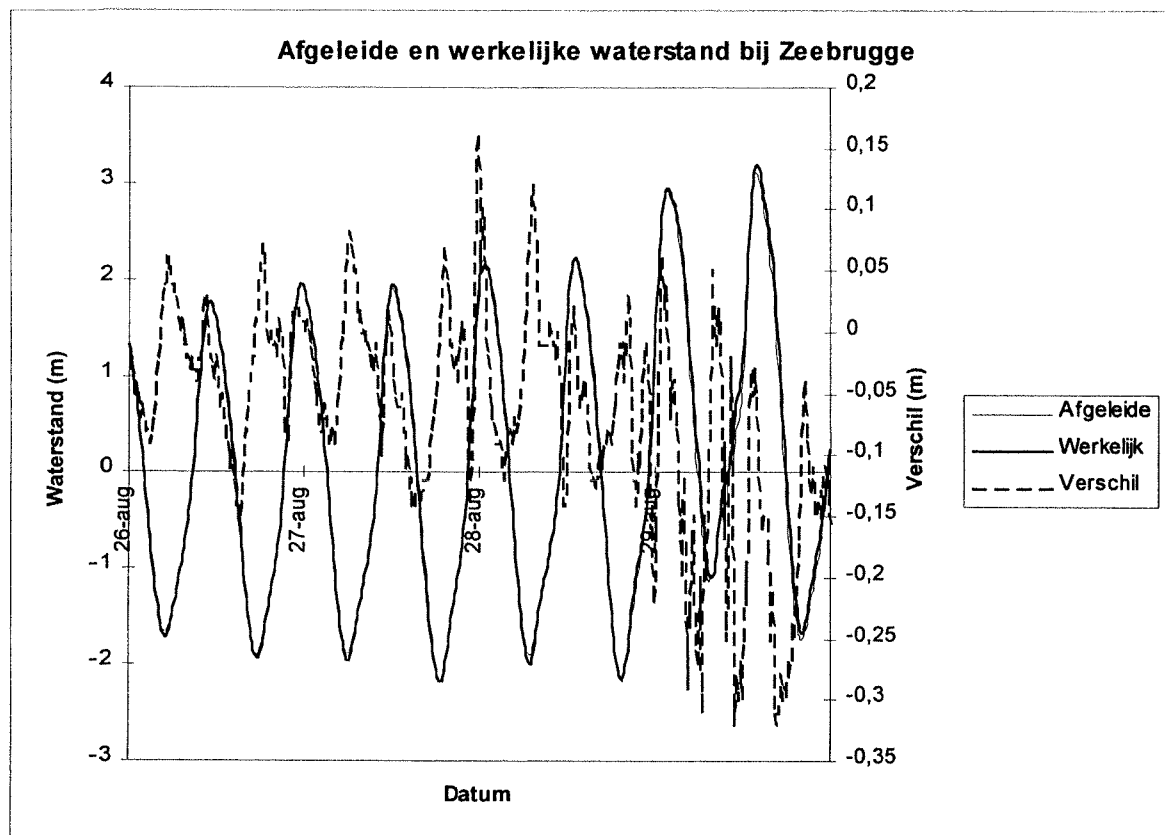
Bijlage 44: Var. windveld: Windstresscoëfficiënt = 0,0030



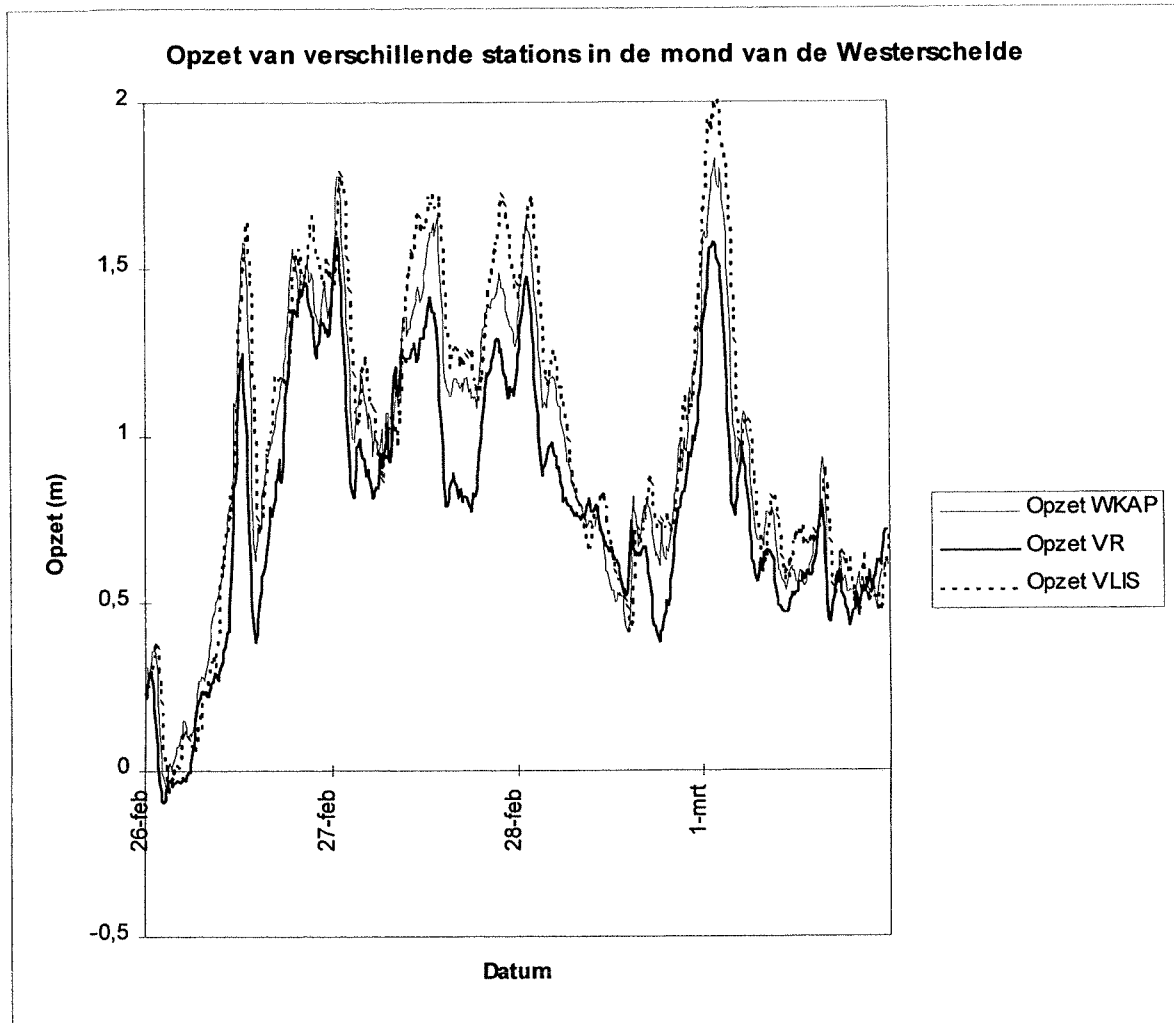
Bijlage 45: Var. windveld: 10% hardere wind



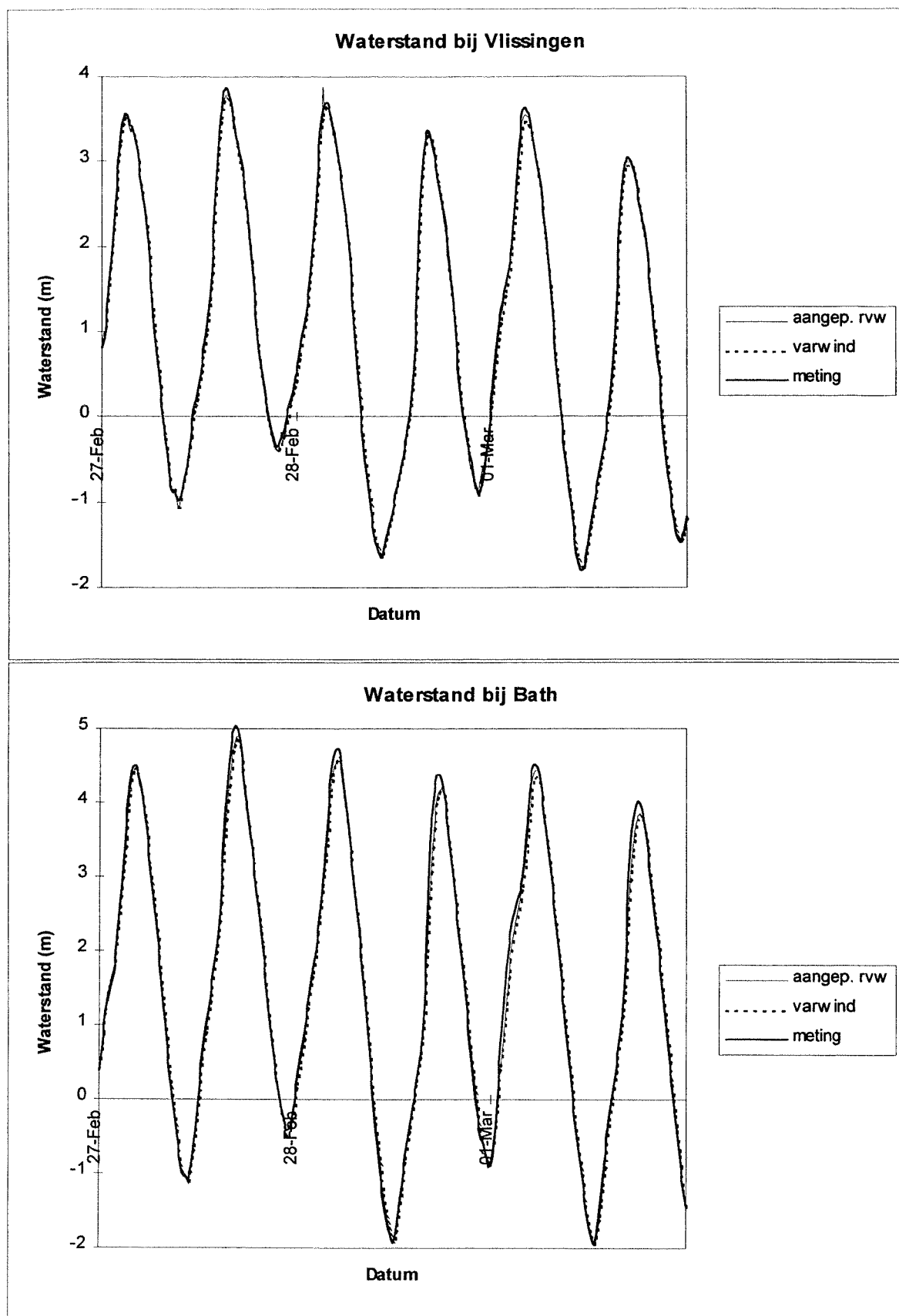
Bijlage 46: Aangepaste randvoorwaarde: Afgeleide en werkelijke waterstand bij Zeebrugge voor 26-29 augustus 1996



Bijlage 47: Aangepaste randvoorwaarde: Opzet van verschillende stations in de mond van de Westerschelde

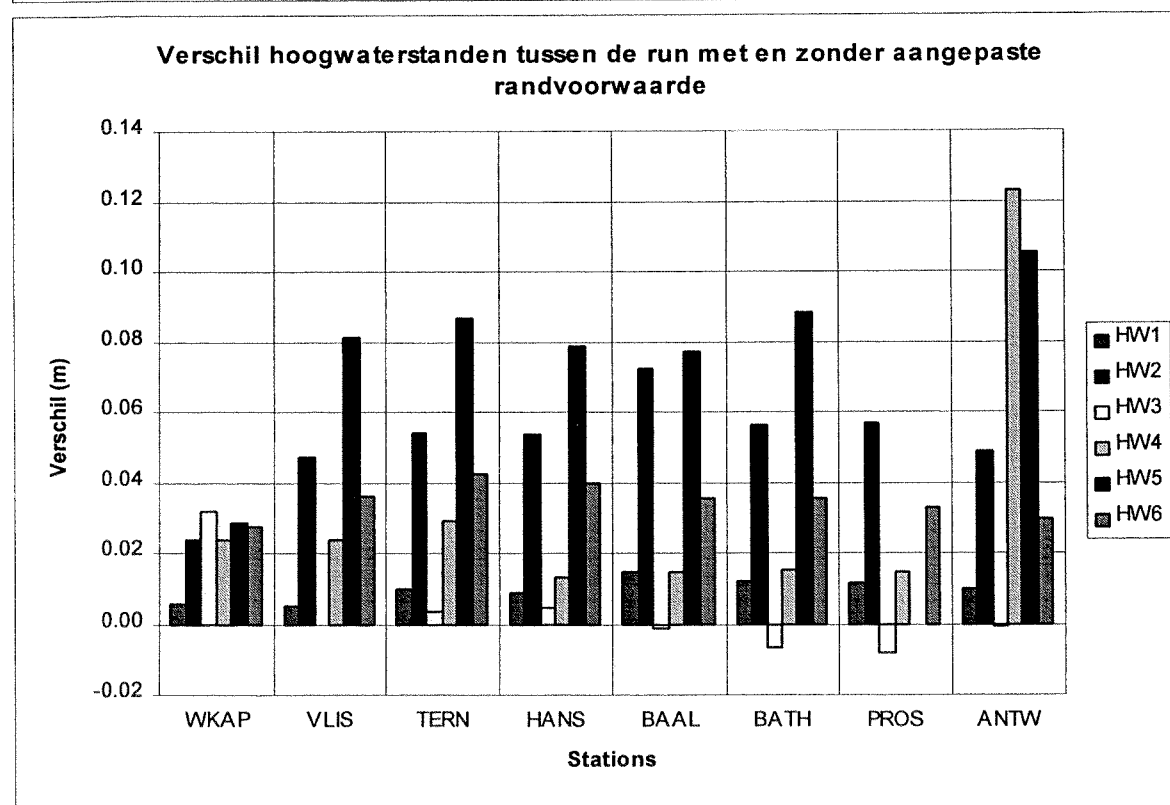
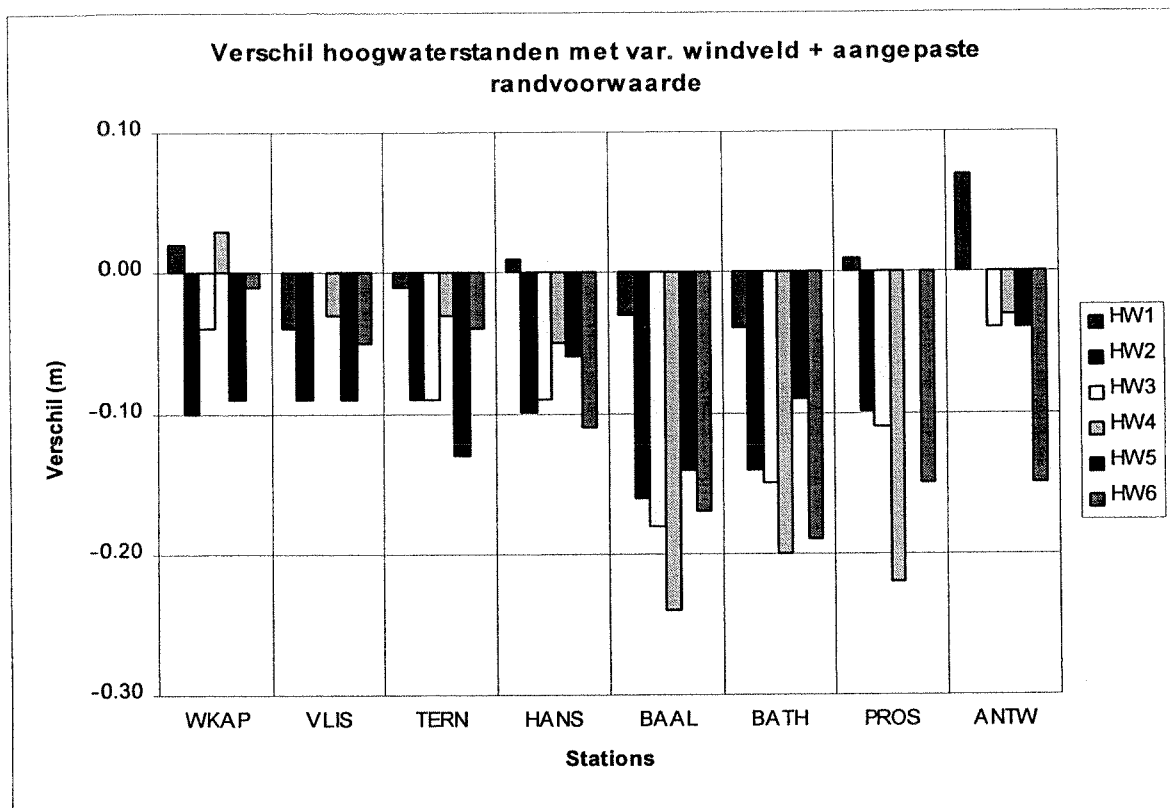


Bijlage 48: Aangepaste randvoorwaarde: Uitkomst SCALWEST-fijn



Bijlage 49: Aangepaste randvoorwaarde: Verschillen hoog- en laagwaterstanden

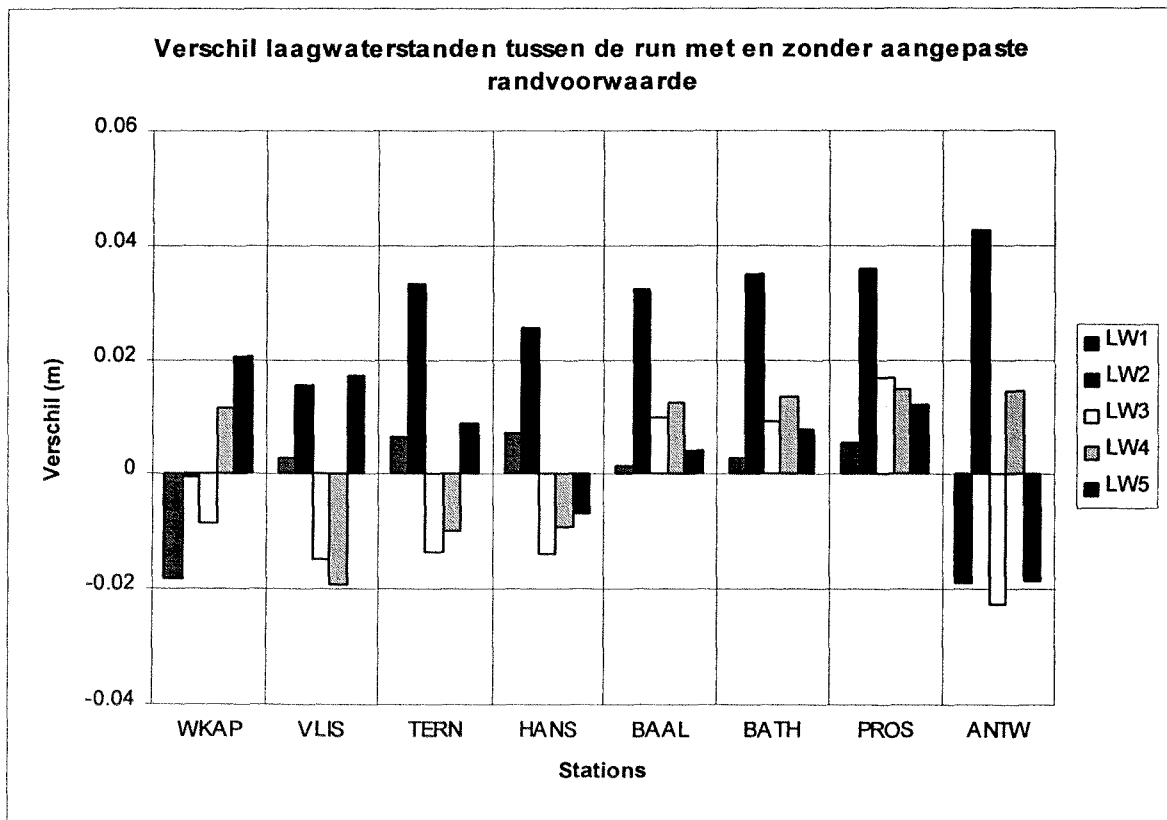
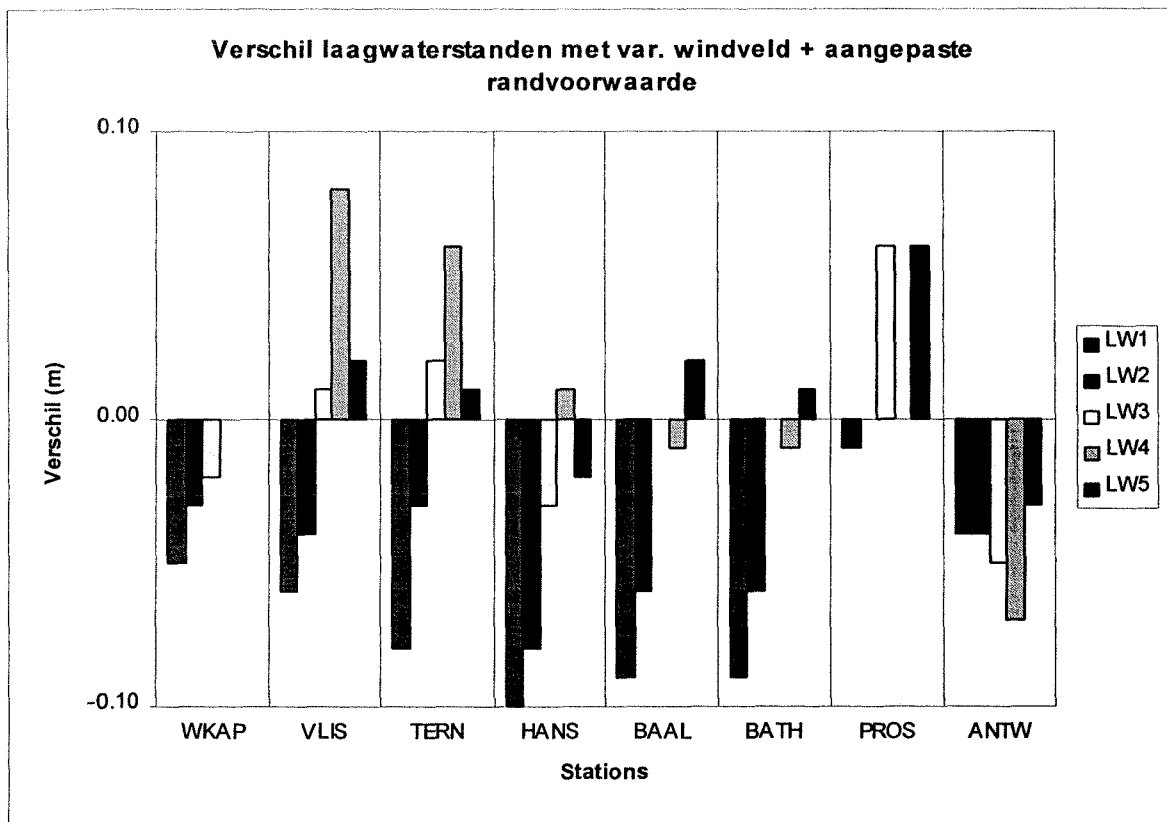
Een positief verschil betekent dat het model te hoge resultaten geeft ten opzichte van de metingen.



Een positief verschil betekent dat er een verbetering plaatsvindt.

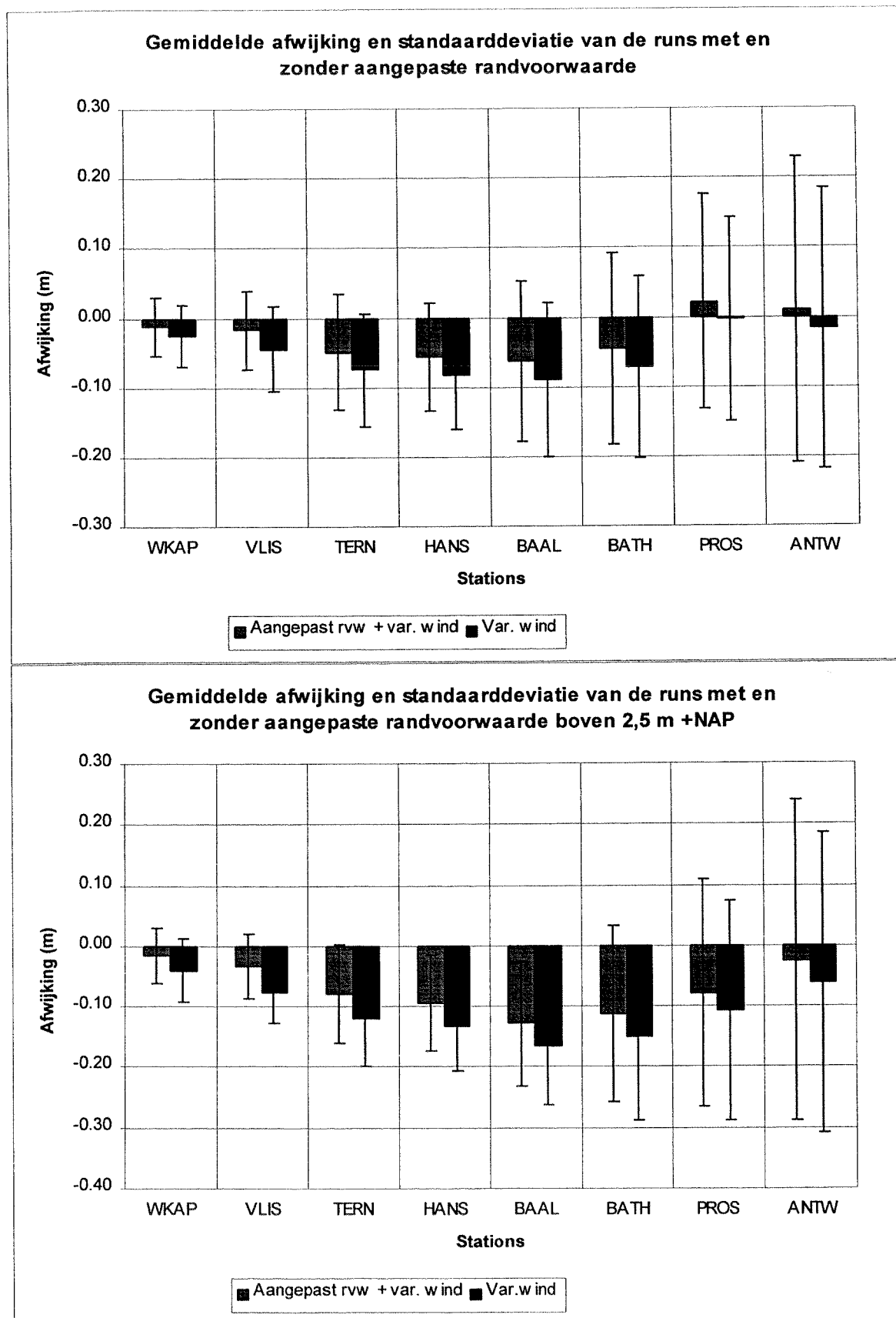
(Bijlage 49: vervolg)

Een positief verschil betekent dat het model te hoge resultaten geeft ten opzichte van de metingen

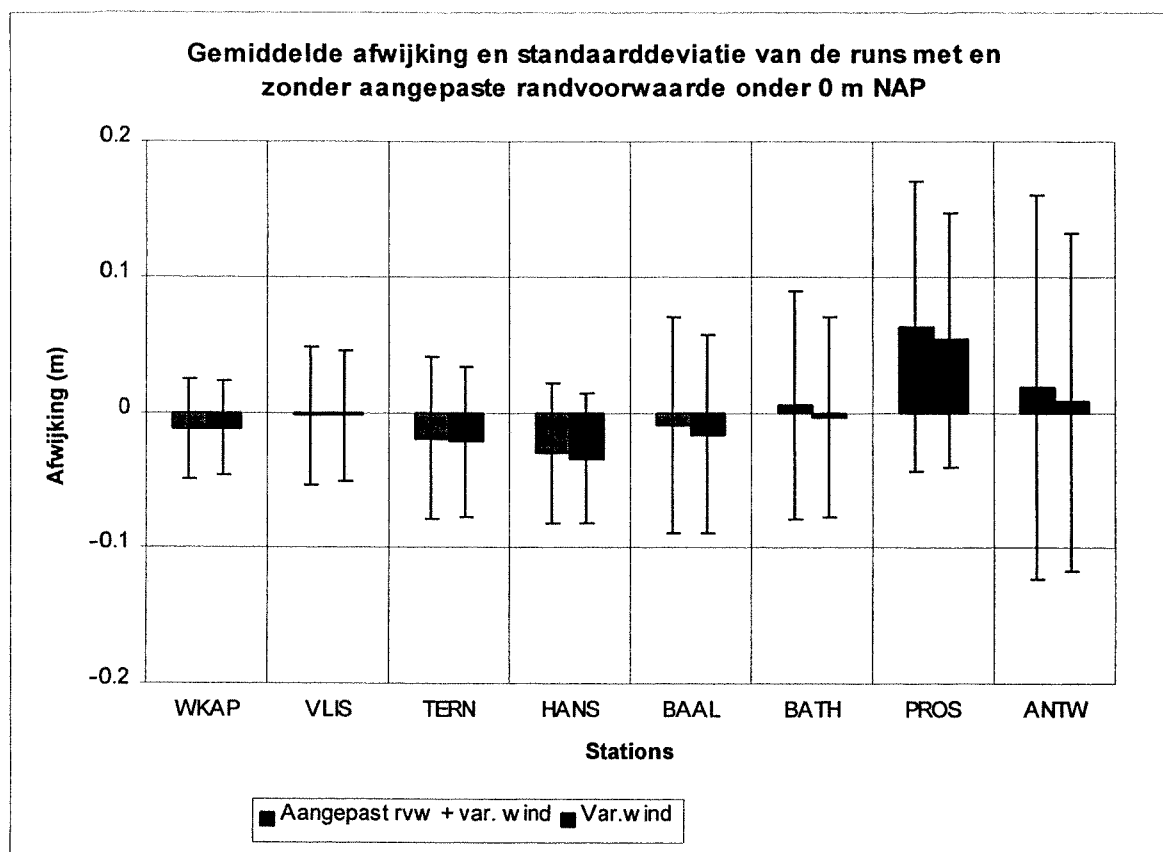


Een positief verschil betekent dat er een verbetering plaatsvindt

Bijlage 50: Aangepaste randvoorwaarde: Gemiddelde afwijking en standaarddeviatie



(Bijlage 50: vervolg)



Appendix 1: Alfa-chézy coëfficiënt

Wanneer er transport van zout plaatsvindt dan kan een correctie op de bodemruwheid plaatsvinden. Men kan dit doen door een α -chézy coëfficiënt te definiëren. Met deze α kan de correctiefactor β berekend worden. In onderstaande vergelijking staat hoe deze factor gebruikt wordt in de moment-vergelijking in de u-richting.

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \dots + \beta g \frac{\|u\| u}{C^2 H} + g \frac{\partial \zeta}{\partial x} = \frac{g}{2} \frac{H}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial x}$$

Waarin:

H = totale waterdiepte

ζ = waterhoogte boven een referentievlak

ρ = dichtheid

De overige termen zijn weggelaten, zoals advection, Coriolis, wind en viscositeit.

Omdat de snelheid aan de bodem verschilt van de over de verticaal gemiddelde snelheid, moet de bodemwrijving aangepast worden met een factor β . Hierbij wordt aangenomen dat de snelheid aan de bodem dezelfde richting heeft als de diepte-gemiddelde snelheid.

Voor β geldt:

$$\beta = 1 - \alpha \frac{H}{\rho} \frac{\nabla \rho \cdot u}{\|u\|}$$

De coëfficiënt α is dimensieloos. β moet een waarde hebben tussen 1/3 en 3. Met de berekende factor β kan vervolgens de aangepaste Chézy waarde berekend worden:

$$\frac{1}{C'^2} = \frac{\beta}{C^2} \leftrightarrow C' = \frac{C}{\sqrt{\beta}}$$

Waarin:

C' = aangepaste Chézy waarde

C = niet aangepaste Chézy waarde

Appendix 2: WAQUA invoerfile bak-model

```
#####
# BAK MODEL van de Westerschelde                                #
# Gemaakt door Gerard Dam                                       #
# Mei 1998                                                       #
#####
```

```
IDENTIFICATION
WAQUA
EXPERIMENT='bak'
OVERWRITE
```

```
MESH
GRID
AREA
MMAX=22, NMAX=3
```

```
CURVILINEAR
CCOFIL='/users.7/verdiep/jansenm/Gerard/TELMACCCOCUR1'
```

```
POINTS
P 1 = (M=1, N=1, NAME='ZEEKANT')
P 2 = (M=1, N=3, NAME='ZEEKANT 2')

P 3 = (M=1, N=2, NAME='VLISSINGEN')
P 4 = (M=8, N=2, NAME='TERNEUZEN')
P 5 = (M=14, N=2, NAME='HANSWEERT')
P 6 = (M=18, N=2, NAME='BAALHOEK')
P 7 = (M=21, N=2, NAME='BATH')
```

BOUNDARIES

```
ENCLOSURES
E=(1,1) (22,1) (22,3) (1,3) (1,1)
```

```
OPENINGS
OPEN1 = LINE (P1, P2, NAME = 'OPEN RAND')
```

BATHYMETRY

```
GLOBAL
CONST_VALUES=8.0
DEPDEF =6.00
```

```
FLOW
PROBLEM
TIMEFRAME
DATE = '11 MAY 1998'
TSTART = 0.
TSTOP =2880.
```

```
METHODVARIABLES
TSTEP = 1.
ITERACCURACY = 0.005
```

```
FRICTION
GLOBAL
UDIREC
GLOBAL
CONST_VALUES = 0.022
VDIREC
GLOBAL
CONST_VALUES = 0.022
```

```
FORCINGS
INITIAL
WATLEVEL
GLOBAL
LAYOUT=1
CONST_VALUES=0.0
```

```
BOUNDARIES
B: OPEN1
BTYPE = 'w1'
BDEF = 'fourier'
SAME
```

```
FOURIER
GENERAL
OMEGA=1.4011
```

```
SERIES
S:P1
TID=0
AZERO=0
AMPL=1.749
PHASE=4.7123889
```

```
CHECKPOINTS
LEVELSTATIONS
P3, P4, P5, P6, P7
```

```
SDSOUTPUT
HISTORIES
TFHISTO = 1440.
TIHISTO = 1.
TLHISTO = 2880.
```