

BOUW EN VALIDATIE TRISCAL

Een 3D-model van de Westerschelde

T.B.V. PROJECT VERDIEPING

Rapportage Activiteit B

door Maarten Jansen

**Ingenieursbureau Svašek b.v.
Projectnr. 1011**

September 1997

Voorwoord

In het kader van het project Verdieping is door het ingenieursbureau Svašek B.V. bij en in opdracht van het Rijksinstituut voor Kust en Zee (RIKZ) een kromlijinig model gemaakt van (een deel van) de Westerschelde waarmee de driedimensionale waterbeweging gesimuleerd kan worden. Dit model is gebaseerd op het pakket TRIWAQ. Dit model kan o.a. gebruikt gaan worden als onderzoeksmodel ter ondersteuning van het onderzoek naar het morfologisch gedrag van drempels in de Westerschelde. Dit rapport is een verslag van de bouw en validatie van dit TRISCAL-model.

Op deze plaats wil ik drs. H. Verbeek, ir. A. Langerak, C. van der Male (allen RIKZ-Middelburg), ir. E. Collard en ir. B. Les (Svašek), drs. M.J. van der Slikke en drs. F. Tank (UU), K. Wouters (TUD), P. Lievense en L. Dekker (RWS-Zeeland) en alle overige mensen die hebben bijgedragen aan de bouw en validatie, bedanken voor hun adviezen, commentaar en goede samenwerking.

Middelburg, 26 september 1997

Inhoudsopgave

Voorwoord	1
Lijst van Tabellen	3
Lijst van Figuren.....	3
Lijst van Bijlagen.....	4
1. Inleiding	5
2. Modelbouw	7
2.1 BOUW GROFMAZIG TRISCAL	7
2.2 BOUW FIJNMAZIG TRISCAL-MODEL	8
2.2.1 <i>Bouw uitsnede-model</i>	8
2.2.2 <i>Verplaatsen grid</i>	8
2.2.3 <i>Beschrijving k-ε turbulentiemodel</i>	9
2.2.4 <i>Overige parameters</i>	13
2.3 REKENDUUR EN GROOTTE VERSCHILLENDE MODELLEN	14
3. Randvoorwaarden	15
3.1 LIGGING RANDVOORWAARDEN SCALWEST-MODEL	15
3.2 LIGGING RANDVOORWAARDEN UITSNEDE-MODEL	15
3.3 GEBRUIKTE RANDVOORWAARDEN.....	16
3.4 BEGINVOORWAARDEN.....	16
4. Resultaten berekeningen	17
4.1 RESULTATEN BEREKENINGEN MET TRISCAL-GROF	18
4.2 RESULTATEN BEREKENING MET HET 2DH-UIITSNEDE MODEL	18
4.2.1 <i>Resultaten vergelijking springtij 2DH-uitsnede model</i>	19
4.2.2 <i>Resultaten vergelijking doodtij SCALWEST-uitsnede</i>	20
4.2.3 <i>Stroombeelden tijdens springtij</i>	22
4.3 RESULTATEN BEREKENING MET HET TRISCAL-FIJN MODEL.....	23
4.3.1 <i>Resultaten vergelijking springtij 2DH uitsnede-TRISCAL</i>	23
4.4 VERGELIJKING TRISCAL-RESULTATEN MET HF-RADARMETINGEN	25
4.5 SECUNDAIRE STROMING IN LANGS- EN DWARSRICHTING TIJDENS SPRINGTIJ..	27
4.5.1 <i>Uitvoer van de TRISCAL-berekening</i>	27
4.5.2 <i>Stroming tijdens maximum vloed</i>	30
4.5.3 <i>Stroming tijdens maximum eb</i>	31
5. Conclusies	33
6. Aanbevelingen	34
Literatuurlijst	35

Lijst van Tabellen

Tabel 2.1	Instelling van het uitsnede-model en TRISCAL.....	13
Tabel 2.2	Manningwaarden zoals in berekeningen gebruikt	14
Tabel 2.3	Vergelijking tussen de verschillende modellen.....	14
Tabel 3.1	Coördinaten van de randvoorwaardelocaties.....	15
Tabel 3.2	Waterstanden en getijcoëfficiënten bij Vlissingen tijdens de validatieperioden	16
Tabel 4.1	Overzicht en index berekeningen tijdens Activiteit B.....	17
Tabel 4.2	Gemiddeld verschil en standaarddeviatie van stroomsnelheden.....	18
Tabel 4.3	Hoogwater- en laagwaterstanden tijdens springtij in meters boven NAP.....	19
Tabel 4.4	Gemiddeld verschil en standaarddeviatie van de waterstanden tussen SCALWEST en het uitsnede-model	19
Tabel 4.5	Vloed- en ebvolumes en procentuele verschillen tussen SCALWEST en uitsnede-model	20
Tabel 4.6	Gemiddeld verschil en standaarddeviatie van de debieten tussen SCALWEST en het uitsnede-model	20
Tabel 4.7	Hoogwater- en laagwaterstanden tijdens doodtij in meters boven NAP	20
Tabel 4.8	Gemiddeld verschil en standaarddeviatie van de waterstanden tussen SCALWEST en het uitsnede-model	21
Tabel 4.9	Vloed- en ebvolumes en procentuele verschillen tussen SCALWEST en uitsnede-model	21
Tabel 4.10	Gemiddeld verschil en standaarddeviatie van de debieten tussen SCALWEST en uitsnede-model	21
Tabel 4.11	Hoogwater- en laagwaterstanden tijdens springtij in meters boven NAP.....	23
Tabel 4.12	Gemiddeld verschil en standaarddeviatie van de waterstand tussen het uitsnede-model en TRISCAL	23
Tabel 4.13	Vloed- en ebvolumes en procentuele verschillen tussen uitsnede-mdl en TRISCAL.....	24
Tabel 4.14	Gemiddeld verschil en standaarddeviatie van de debieten tussen uitsnede-model en TRISCAL.....	24
Tabel 4.15	Tijdstippen op 5 mei met ruimtelijke uitvoer.....	27

Lijst van Figuren

Figuur 3.1	Schematisatie herverdeling debieten aan randen.....	15
Figuur 4.1	Grafische voorstelling secundaire stroming in langsrichting	28
Figuur 4.2	Secundaire stroming volgens De Vriend (1976) met $C=50 \text{ m}^{1/2}/\text{s}$ en de benadering.....	29

Lijst van Bijlagen

Bijlage I.1 Rooster Uitsnede model.....	36
Bijlage I.2 Rooster SCALWEST-grof model	38
Bijlage II.1 Verschil in waterstanden tussen 2 lagen-model en 7 lagen-model.....	39
Bijlage II.2 Verschil in debieten tussen 2 lagen-model en 7 lagen-model	40
Bijlage III.1 Verschil in waterstanden tussen $dt=0.25$ min en $dt=0.5$ min.....	41
Bijlage III.2 Verschil in debieten tussen $dt=0.25$ min en $dt=0.5$ min.	42
Bijlage IV.1 Verschil in waterstanden tussen viscositeit $1 \text{ m}^2/\text{s}$ en $3 \text{ m}^2/\text{s}$	43
Bijlage IV.2 Verschil in debieten tussen viscositeit $1 \text{ m}^2/\text{s}$ en $3 \text{ m}^2/\text{s}$	44
Bijlage V.1 Windsnelheid en -richting bij Hansweert tijdens periode 25-04 t/m 08-05-96	45
Bijlage V.1 Windsnelheid en -richting bij Hansweert tijdens periode 28/29-09-96.....	46
Bijlage VI Verschil in waterstanden tijdens springtij tussen SCALWEST en uitsnede.....	47
Bijlage VII Verschil in debieten tijdens springtij tussen SCALWEST en uitsnede	49
Bijlage VIII Verschil in waterstanden tijdens doodtij tussen SCALWEST en uitsnede	51
Bijlage IX Verschil in debieten tijdens doodtij tussen SCALWEST en uitsnede	53
Bijlage X.1 Stroombeeld maximum vloed en hoogwater tijdens springtij	55
Bijlage X.2 Stroombeeld maximum eb en laagwater tijdens springtij	56
Bijlage XI Verschil in waterstanden tijdens springtij tussen uitsnede en TRISCAL	57
Bijlage XII Verschil in debieten tijdens springtij tussen uitsnede en TRISCAL	59
Bijlage XIII Stroomsnelheden in u- en v-richting tijdens maximum eb gemeten met HF-radar	61
Bijlage XIV Stroomsnelheden tijdens maximum eb uit TRISCAL en verschillen met HF-radar ...	62
Bijlage XV Stroomsnelheden in u- en v-richting tijdens max vloed gemeten met HF-radar	63
Bijlage XVI Stroomsnelheden tijdens maximum vloed uit TRISCAL en verschillen met HF-radar	64
Bijlage XVII Stroombeelden in bovenste, middelste en onderste laag tijdens maximum vloed.....	65
Bijlage XVIII Secundaire stroming in langsrichting tijdens maximum vloed.....	66
Bijlage XIX Secundaire stroming in dwarsrichting tijdens maximum vloed.....	67
Bijlage XX Stroombeelden in bovenste, middelste en onderste laag tijdens maximum eb	68
Bijlage XXI Secundaire stroming in langsrichting tijdens maximum eb	69
Bijlage XXII Secundaire stroming in dwarsrichting tijdens maximum eb	70

1. Inleiding

Door het RIKZ zijn in samenwerking met de Universiteit Utrecht en de Technische Universiteit Delft de afgelopen jaren een aantal onderzoeken gedaan naar de water- en sedimentbeweging op en rond drempels in de Westerschelde. Hierbij is de Drempel van Hansweert als pilotproject gebruikt. Om een nog beter inzicht in de maatgevende processen rond drempels te krijgen, is er behoefte aan modelinstrumentarium waarmee een ruimtelijk beeld van de water- en sedimentbeweging en de morfologische veranderingen verkregen kan worden. Vooral van belang is om inzicht te krijgen in de driedimensionale processen rond de drempels. Het afgelopen jaar is door het Ingenieursbureau Svašek het SCALWEST-model gebouwd (Jansen, 1997). Dit is een numeriek, kromlijng 2DH-model gebaseerd op het programmapakket WAQUA om de waterbeweging en zoutverdeling in de Westerschelde te simuleren. Dit SCALWEST-model omvat de Westerschelde vanaf de rand Zeebrugge/Vlakte van de Raan/Westkapelle en de Schelde tot aan Gent. Als bodemschematisatie is de bodemligging van 1996 gebruikt die als uitgangssituatie geldt ten aanzien van de geplande 48'/43' verdieping van de Westerschelde.

Er bestaat behoefte aan een model waarmee driedimensionale effecten rond drempels, zoals secundaire stroming of de invloed van nevengeulen, gemodelleerd kunnen worden. Tevens kan dan een schatting gemaakt worden van de aanpassingen die gedaan moeten worden om van een 2DH-model een quasi-3D-model te maken.

Op basis van het SCALWEST-model zijn daarom twee modellen gebouwd om 3D-berekeningen mee uit te voeren. Eén model is gebaseerd op het grofmazig rooster van SCALWEST, het andere is een uitsnede van het SCALWEST-model dat gebaseerd is op het fijnmazig rooster. Met beide modellen zijn berekeningen uitgevoerd met 7 à 8 lagen in de verticaal. Voor u ligt de rapportage van de bouw en de calibratie van deze modellen die de naam TRISCAL hebben gekregen. In bijlage I is de roosterschematisatie van beide modellen gepresenteerd.

De ontwikkeling van dit model is een onderdeel van de opdracht van het RIKZ (contract, nr. RKZ-416) aan het Ingenieursbureau Svašek B.V. om een bijdrage te leveren aan de ontwikkeling van een meerdimensionaal morfodynamisch model van de Westerschelde (Verbeek, 1996). Hiertoe zijn door het RIKZ in het kader van het project VERDIEPING voor 1996/97 een aantal activiteiten gepland.

De bijdrage die het Ingenieursbureau Svašek B.V. levert omvat de volgende activiteiten:

- activiteit A: bouw, calibratie en verificatie van het kromlijng 2DH waterbewegingsmodel SCALWEST.
- activiteit B: ontwikkeling van een 3D waterbewegingsmodel op basis van het SCALWEST-model om een beter beeld te krijgen van de maatgevende processen t.a.v. debietverdeling, sedimenttransport en morfodynamica voor de drempels in de Westerschelde.
- activiteit C: uitvoeren van een vooronderzoek naar de maatgevende morfologische processen in de Westerschelde.

Deze activiteiten zullen uitgevoerd worden door ir. M.H.P. Jansen, waarbij ondersteuning verleend wordt door ir. B. Blik en ir. E. Collard. Deze rapportage en werkzaamheden tijdens activiteit B zijn uitgevoerd door ir. M.H.P. Jansen op het RIKZ-kantoor te Middelburg. Van RIKZ-zijde was projectbegeleider drs. H. Verbeek en is nauw samengewerkt met C. van der Male. Daarnaast is er regelmatig overleg gevoerd met P. Lievense en L. Dekker van Rijkswaterstaat Directie Zeeland. Bij de ontwikkeling van het rooster zijn er contacten geweest met R. van Dijk en R. Plieger van het RIKZ-Den Haag.

In hoofdstuk 2 van deze rapportage zal het model beschreven worden. Daarna volgen in

hoofdstuk 3 de gehanteerde randvoorwaarden en zullen in hoofdstuk 4 de resultaten van de berekeningen gepresenteerd worden. Uiteindelijk zullen de conclusies in hoofdstuk 5 volgen en de aanbevelingen in hoofdstuk 6.

2. Modelbouw

Zoals in hoofdstuk 1 al is genoemd is er behoefte aan een 3D-waterbewegingsmodel waarmee de stroming rond drempels gemodelleerd kan worden. Dit TRISCAL-model is gebaseerd op (een gedeelte van) het fijnmazig SCALWEST-rooster, een 2DH model van de Westerschelde.

Bij de start van de bouw van dit model bleek dat een berekening met het fijnmazige SCALWEST-model met 5 tot 8 lagen in de verticaal zowel op de ontwikkelmachine bij dir. Zeeland als op het rekencluster van het RIKZ vanwege geheugenruimte niet mogelijk is. Een berekening van een tijdperiode van 10 minuten met het hele model met 8 lagen was wel mogelijk op de Cray in Amsterdam, maar hier is vanwege de kosten (120 gld. p. uur rekentijd) van af gezien.

Daarom is besloten om met het grofmazig model een aantal berekeningen uit te voeren om inzicht te krijgen in de 3D-berekeningen. Daarna is er een uitsnede gemaakt uit het fijnmazig SCALWEST-model van het oostelijk gedeelte van de Westerschelde waarin de drempels van Hansweert, Valkenisse en Bath liggen.

2.1 BOUW GROFMAZIG TRISCAL

In het voorjaar van 1997 is door het ingenieursbureau Svašek een fijnmazig en een grofmazig model gebouwd van de Westerschelde. Het grofmazig model is vanwege het beperkte aantal rekenpunten (32130) gebruikt om een aantal testberekeningen te maken om inzicht te krijgen in de werking van TRIWAQ en de mogelijkheden van verwerking en presentatie te verkennen. Bovendien kon met de eerste resultaten alvast een validatie uitgevoerd worden (zie paragraaf 4.1 en Dam, 1997)

Door het beperkte aantal rekenpunten was het niet nodig een uitsnede te maken en kon een berekening met het hele rooster gemaakt worden. Een beperking van het gebruik van het grofmazig model is dat dit model nog niet gecalibreerd is voor een 2DH-berekening en dat daardoor ook geen uitspraak gedaan kan worden over geconstateerde verschillen tussen gemeten waarden en berekende waterstanden en debieten.

Het grofmazig TRISCAL-model heeft een grootte van 189 bij 170 punten ($n_{max} \times m_{max}$). De berekening waarbij de periode 4 en 5 mei 1996 is doorgerekend, is gedaan met een model met 5 horizontale lagen. In hoofdstuk 4 worden de resultaten van deze berekening beschreven. Voor de stage van G. Dam, student aan de UT, die hij heeft uitgevoerd bij het RIKZ is de periode 28 - 29 september 1996 gesimuleerd (Dam, 1997). Dit is gedaan met een model van 8 lagen. In paragraaf 4.1 worden de conclusies van dit onderzoek genoemd.

2.2 BOUW FIJNMAZIG TRISCAL-MODEL

2.2.1 *Bouw uitsnede-model*

Het eigenlijke doel van activiteit B was een model te bouwen gebaseerd op het fijnmazig rooster waarmee de driedimensionale waterbeweging rond drempels gesimuleerd kan worden. Bij de eerste testberekeningen bleek echter dat het niet mogelijk was het hele fijnmazige rooster te gebruiken voor een 3D som. Daarom is in een vroeg stadium besloten een uitsnede te maken, waardoor het aantal rekenpunten beperkt kan blijven.

Op basis van resultaten van de 2DH-berekeningen is gekozen een benedenrand tussen Hoek van Baarland en de Platen van Hulst te leggen en een bovenrand aan te brengen ter hoogte van de Hedwigepolder (zie bijlage I.1).

Het nieuwe model omvat daardoor alleen nog maar de Westerschelde tussen Baarland en Hedwigepolder met daarin de drempels van Hansweert, Valkenisse en Bath. Dit model heeft een grootte van 265 bij 236 punten ($n_{max} \times m_{max}$).

Om de invloed van een berekening met een uitsnede op de resultaten te kunnen bepalen zijn eerst een aantal berekeningen gedaan met een 2DH-model van de uitsnede. De randvoorwaarden gegenereerd met het 2DH-SCALWEST-model zijn overgezet op een 2DH-model van de uitsnede.

De verschillen tussen de resultaten met het grote model en de uitsnede bij deze 2DH-berekeningen worden in paragraaf 4.2 behandeld.

De lagen in het TRISCAL-model zijn zogenaamde sigma-lagen. Dit betekent dat in elk punt de diepte wordt opgedeeld in een aantal lagen die elk de zelfde hoogte hebben. De eerste laag ligt dan altijd aan het wateroppervlak en de 7e of 8e laag ligt aan de bodem.

2.2.2 *Verplaatsen grid.*

Na de bouw van het uitsnede-model en de 2DH calibratie ervan (zie paragraaf 4.2) is getracht om een 3D-berekening met dit model te maken. Er bleven zich echter problemen voordoen met de beschikbare geheugenruimte. De reden hiervoor was dat bij een berekening met TRIWAQ in tegenstelling tot WAQUA bij het vaststellen van geheugenruimte niet gekeken wordt welke punten wel en welke punten niet mee doen in de berekening. TRIWAQ gaat uit van volledige matrix ($n_{max} \times m_{max}$) en reserveert op basis van die waarden de geheugenruimte.

Het SCALWEST-model heeft bijvoorbeeld een n_{max} en m_{max} van resp. 565 en 506. Bij een berekening met WAQUA hoeft slechts voor 31838 'natte' rekenpunten ruimte vrij gemaakt te worden. Wanneer een zelfde som met TRIWAQ gemaakt wordt, waarbij met 1 horizontale laag gerekend wordt dan wordt de hele matrix gereserveerd voor de berekening. Dit zijn 285890 rekenpunten, 9 keer zo veel als bij de WAQUA-berekening.

De uitsnede heeft in het grote model de hoekpunten (n_{min} , m_{min} : 313, 1) en (n_{max} , m_{max} : 550,235). De uitsnede ligt in de rechterbovenhoek van het grote model.

Omdat de waarden n_{max} en m_{max} verlaagd moesten worden is besloten de n -waarden met 300 te verlagen en de m -waarden tot 235 te laten lopen. De nieuwe waarden (n_{max} , m_{max}) zijn hierdoor geworden (265, 236). Het totaal aantal rekenpunten in de TRIWAQ berekeningen is hierdoor gereduceerd tot 62540.

2.2.3 Beschrijving k-ε turbulentiemodel

Met SIMONA kan op betrekkelijk eenvoudige wijze een 2DH-model omgezet worden in een 3D-model waarbij de stroming in meerdere lagen in de verticaal berekend kan worden. Het gedeelte binnen SIMONA waarmee dit kan heet TRIWAQ. De overdracht tussen de verschillende lagen wordt bepaald met behulp van een ingebouwde turbulentie model (het k-ε model). Hierin spelen de turbulentie kinetische energie (k) en de turbulente dissipatie (ε) een grote rol.

Het k-ε turbulentiemodel is ontwikkeld door het Waterloopkundig Laboratorium om ingebouwd te worden in DELFT3D (Van Kester, 1994). In een later stadium is het k-ε turbulentiemodel verbeterd (Stelling et al., 1994) en ingebouwd in TRIWAQ (De Goede et al., 1995). Hieronder volgt een beknopte omschrijving die is overgenomen uit (De Goede et al., 1995).

Het k-ε turbulentiemodel is als volgt gedefinieerd (uit Van Rijn, 1990):

$$\frac{\partial(uk)}{\partial x} + \frac{\partial(wk)}{\partial z} - \frac{P_{t,x}}{\rho} \frac{\partial u}{\partial x} - \frac{\tau_{t,xz}}{\rho} \frac{\partial u}{\partial z} - \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\mathcal{E}_f}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial x} \right) - \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{\mathcal{E}_f}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial z} \right) + \epsilon = 0$$

en

$$\frac{\partial(u\epsilon)}{\partial x} + \frac{\partial(w\epsilon)}{\partial z} - C_{1\epsilon} \epsilon \left(\frac{P_{t,x}}{\rho} \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\tau_{t,xz}}{\rho} \frac{\partial u}{\partial z} \right) - \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\mathcal{E}_f}{\sigma_\epsilon} \frac{\partial \epsilon}{\partial x} \right) - \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{\mathcal{E}_f}{\sigma_\epsilon} \frac{\partial \epsilon}{\partial z} \right) + C_{2\epsilon} \frac{\epsilon^2}{k} = 0$$

waarin (tevens ook de parameters uit de overige formules van paragraaf 2.2.3)

- B_k : buoyancy term in transportvergelijking voor turbulente kinetische energie
- B_ϵ : buoyancy term in transportvergelijking voor turbulente dissipatie
- $c_{1\epsilon}$: calibratieconstante $c_{1\epsilon} = 1,44$
- $c_{2\epsilon}$: calibratieconstante $c_{2\epsilon} = 1,92$
- $c_{3\epsilon}$: calibratieconstante afhankelijk van gelaagdheid
- c_μ : calibratieconstante in k-ε model, $c_\mu = 0,09$
- C_{2D} : Chezy-coëfficiënt in 2D-berekening
- d : waterdiepte onder referentievlak
- D_v : verticale eddy diffusiviteit in σ -richting
- $\sqrt{G_{\xi\xi}}$: roosterafstand in ξ -richting
- $\sqrt{G_{\eta\eta}}$: roosterafstand in η -richting
- g : gravitatieversnelling
- H, h : totale waterdiepte $h = d + \zeta$
- k : turbulente kinetische energie
- $p, P_{t,x}$: waterdruk
- P_k : produktieterm in transportvergelijking voor turbulente kinetische energie
- P_ϵ : produktieterm in transportvergelijking voor turbulente dissipatie
- t : tijd
- u : stroomsnelheid in ξ -richting
- u_b : kritische stroomsnelheid bij de bodem
- u_s : kritische stroomsnelheid aan het vrije oppervlak
- U_b : totale stroomsnelheid aan de bodem $U_b = \sqrt{u_{b2}^2 + v_{b2}^2}$
- v : stroomsnelheid in η -richting
- z : verticale coördinaat
- Δz : laagdikte
- Δz_b : dikte bodemlaag
- Δz_s : dikte top laag
- ξ, η : coördinaten in kromlijng grid

ϵ	: turbulente dissipatie
ϵ_t	: eddy viscositeit
ζ	: waterstand boven referentievlak
κ	: Von Karman's constante, $\kappa = 0,41$
ν_v	: verticale eddy viscositeit (σ -richting)
ρ	: dichtheid van water
σ	: geschaalde verticale coördinaat $\sigma = (z - \zeta)/(d + \zeta)$ met $\sigma = 0$ aan oppervlak en $\sigma = -1$ aan bodem
σ_p	: turbulent Prandtl-Schmidt getal voor buoyancy flux, $\sigma_p = 0,7$
σ_k	: coëfficiënt, $\sigma_k = 1,0$
σ_ϵ	: coëfficiënt, $\sigma_\epsilon = 1,3$
$\tau_{t,kz}$	: schuifspanning over de diepte
ω	: verticale snelheid in het σ -coördinatensysteem

Het k - ϵ turbulentiemodel zoals dat in TRIWAQ is ingebouwd, wordt aangeduid als SANCTUM (Snel, Alternatief, Niet Conservatief, TURbulentie Model). Het SANCTUM-model is gebaseerd op de volgende veronderstellingen:

1. De horizontale lengteschalen zijn groot t.o.v. de verticale lengteschalen. Daarom moet vooral in verticale richting nauwkeurig gediscrètiseerd worden.
2. De productie-, buoyancy- en dissipatieterm vormen de belangrijkste termen in de vergelijking.
3. Het exact behoud van k en ϵ is vanwege veronderstelling 2 minder belangrijk. Hierdoor vereenvoudigt de numerieke implementatie van de advectieterm.
4. Vanwege veronderstelling 1 kan de bijdrage van de gradiënten in horizontale richting in de productieterm verwaarloosd worden.
5. In horizontale richting zal de numerieke diffusie dominant zijn over de fysische diffusie.
6. In verticale richting is de diffusie dominant over de advectie. De numerieke diffusie zal kleiner zijn dan de fysische diffusie.
7. De positie waar k en ϵ berekend worden, wordt verplaatst naar de grensvlakken tussen de lagen.

Dit leidt tot de volgende vergelijkingen:

$$\frac{\partial k}{\partial t} + \frac{u}{\sqrt{G_{\xi\xi}}} \frac{\partial k}{\partial \xi} + \frac{v}{\sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial k}{\partial \eta} + \omega_k \frac{k_{k-1} - k_k}{h_k} =$$

$$\frac{2}{h_k + h_{k+1}} \left(\left[D_v \frac{\partial k}{\partial z} \right]_{k-1/2} - \left[D_v \frac{\partial k}{\partial z} \right]_{k+1/2} \right) + P_k + B_k - \epsilon$$

en

$$\frac{\partial \epsilon}{\partial t} + \frac{u}{\sqrt{G_{\xi\xi}}} \frac{\partial \epsilon}{\partial \xi} + \frac{v}{\sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial \epsilon}{\partial \eta} + \omega_k \frac{k_{k-1} - k_k}{h_k} =$$

$$\frac{2}{h_k + h_{k+1}} \left(\left[D_v \frac{\partial \epsilon}{\partial z} \right]_{k-1/2} - \left[D_v \frac{\partial \epsilon}{\partial z} \right]_{k+1/2} \right) + P_\epsilon + B_\epsilon - c_{2\epsilon} \frac{\epsilon^2}{k}$$

De produktietermen worden als volgt gedefinieerd:

$$P_k = \nu_v \left[\left(\frac{\partial u}{\partial z} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial z} \right)^2 \right]$$

$$P_\epsilon = c_{1\epsilon} \frac{\epsilon}{k} P_k$$

De buoyancy-termen geven de omzetting van turbulente kinetische energie in potentiële energie weer. Deze termen worden als volgt bepaald:

$$B_k = \frac{\nu_v}{\sigma_\rho} \frac{g}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial z}$$

$$B_\epsilon = c_{1\epsilon} \frac{\epsilon}{k} (1 - c_{3\epsilon}) B_k$$

De waarde van $c_{3\epsilon}$ is afhankelijk van het type gelaagdheid. Voor een stabiele gelaagdheid geldt $c_{3\epsilon}=1,0$ en vervalt de buoyancy flux uit de transportvergelijking voor ϵ . In het geval van een instabiele gelaagdheid geldt $c_{3\epsilon}=0,0$ en groeit de dissipatie mee met de turbulente kinetische energie.

De verticale viscositeitscoëfficiënt wordt als volgt gedefinieerd:

$$\nu_v = c_\mu \frac{k^2}{\epsilon}$$

De bodem wordt geplaatst op $z=z_0$. Dit is de hoogte waarop volgens het logaritmisch snelheidsverloop de stroomsnelheid nul is. De ruwheidshoogte z_0 wordt als volgt bepaald (Uittenbogaard et al., 1992)

$$z_0 = -H \exp \left(1 + \frac{\kappa}{\sqrt{g}} C_{2D} \right)$$

Aan de bodem moet er een evenwicht zijn tussen productie en dissipatie van kinetische energie. Dit leidt tot de volgende Dirichlet randvoorwaarde:

$$k|_{z=z_0} = \frac{u_{*b}^2}{\sqrt{c_\mu}}$$

Voor de dissipatie ϵ wordt bij de bodem de volgende randvoorwaarde gebruikt:

$$\epsilon \Big|_{z=z_b} = \frac{u_{*b}^3}{\kappa z_0}$$

De bodemschuifspanningssnelheid u_{*b} wordt bepaald uit de stroomsnelheid in het eerste roosterpunt boven de bodem volgens het logaritmisch snelheidsprofiel:

$$u_{*b} = \frac{|U_b| \kappa}{\ln \left(1 + \frac{\Delta z_b}{2 z_0} \right)}$$

Aan het wateroppervlak wordt de stroming aangedreven door wind. Deze wordt opgelegd door middel van een Dirichlet randvoorwaarde voor de kinetische energie k :

$$k \Big|_{z=\zeta} = \frac{u_{*s}^2}{\sqrt{C_\mu}}$$

Voor de dissipatie geldt aan het wateroppervlak :

$$\epsilon \Big|_{z=\zeta} = \frac{u_{*s}^3}{\kappa \frac{\Delta z_s}{2}}$$

Bij de open randen wordt de turbulente energie k lineair verondersteld tussen bodem en oppervlak als het logaritmisch snelheidsverloop benaderd wordt door een lineair verloop.

$$k \Big|_z = \frac{1}{\sqrt{C_\mu}} \left[u_{*b}^2 \left(1 - \frac{z+d}{H} \right) + u_{*s}^2 \frac{z+d}{H} \right]$$

De dissipatie ϵ is bij benadering de superpositie van twee hyperbolen uitgaande van de schuifspanningen bij de bodem en het wateroppervlak:

$$\epsilon \Big|_z = \frac{u_{*b}^3}{\kappa(z+d)} + \frac{u_{*s}^3}{\kappa(H-z-d)}$$

2.2.4 Overige parameters

Omdat het uitsnede-model op hetzelfde grid gebaseerd is als het grote SCALWEST-model kunnen ook een groot aantal parameters overgenomen worden.

In Tabel 2.1 zijn parameters die overgenomen zijn uit het SCALWEST-model, gepresenteerd.

parameter	waarde/inhoud
bodemschematisatie	1996
bodemruwheid	Manning in $m^{-1/3} s$
viscositeit	1 m^2/s
windsnelh.\richting	gemeten bij Hansweert
tijdstap	0.5 min
aantal roosterpunten WAQUA	31838
aantal roosterpunten TRIWAQ	62540 (265*236)
droogvalprocedure	1 (gemiddeld)
kritische diepte droogval	0,15 m
initieel zoutveld	bij Schelde afvoer 40 m^3/s en HW Terneuzen
reflectiecoëfficiënt	0,0
initiele waterstand	NAP + 0,5 meter
returntijd	330 min.

Tabel 2.1 Instelling van het uitsnede-model en TRISCAL

De invloed van een aantal parameters is geverifieerd met een uitsnede-model van 2 lagen (zie Bijlagen II, III en IV). Dit is gedaan omdat de berekeningen met meer dan 2 lagen meer rekentijd en schijfruimte kost. In bijlage II zijn de verschillen in waterstanden en debieten tussen een berekening met 2 lagen en een berekening met 7 lagen weergegeven. De verschillen zijn klein. Opvallend is dat de verschillen bij eb iets groter zijn dan bij vloed. Dit komt misschien door het droogvallen van platen dat bij 2 lagen minder gevoelig is dan bij 7 lagen.

Als controle voor de invloed van de tijdstap is ook een berekening uitgevoerd waarbij de tijdstap gehalveerd is. Zoals in bijlage III te zien is heeft dit geen gevolgen voor de waterbeweging.

Ook is de invloed van de viscositeitsparameter onderzocht. De berekeningen met een viscositeitscoëfficiënt van 5 m^2/s en 10 m^2/s bleken instabiel te worden. In bijlage IV zijn de resultaten van een berekening met een viscositeitscoëfficiënt van 1 m^2/s en 3 m^2/s tegen elkaar uitgezet. De tweede hoogwatertop ligt bij een grotere viscositeitscoëfficiënt hoger dan bij de oorspronkelijke.

De debieten door raai 5a worden tijdens maximum vloed bij een grotere viscositeitscoëfficiënt afgeplat t.o.v. van de lagere coëfficiënt. Bij eb is dit andersom. Omdat de waterbeweging bij de oorspronkelijke viscositeitscoëfficiënt van 1 m^2/s beter overeenstemt met de metingen is deze waarde gekozen. In het SCALWEST-model is ook een viscositeitscoëfficiënt van 1 m^2/s gebruikt.

De bodemruwheden zijn overgenomen uit het SCALWEST-model en zijn niet verder aangepast. In Tabel 2.2 zijn de Manningwaarden, zoals gebruikt in de berekeningen, gepresenteerd.

traject	n-waarden	Manningwaarde	Chezywaarde diepe
Baarland-Baalhoek	13-170	0,0265	59 m ^{2/3} /s
Baalhoek-Bath	171-221	0,0250	63 m ^{2/3} /s
Bath-grens	m22-264 (m=222)	0,0220	71 m ^{2/3} /s
grens-Hedwigepolder	m=223-236	0,0210	74 m ^{2/3} /s

Tabel 2.2 Manningwaarden zoals in berekeningen gebruikt
Manningwaarden in m^{-1/3}s

De reflectiecoëfficiënt is tijdens één berekening op 50 gezet en tijdens een andere op 100. Van beide berekeningen waren die uitkomsten slechter en dus is de reflectiecoëfficiënt op nul gezet. De kritische diepte bij droogval stond standaard tijdens de meeste berekeningen op 0,15 m. Alleen tijdens de berekeningen met het TRISCAL-model voor de periode van doodtij en voor de HF-radar periode (28/29 september) is een kritische diepte van 0,5 meter gebruikt uit stabiliteitsoverwegingen. Bij een lagere kritische diepte ontstonden problemen met het droogvallen van platen en oevers.

2.3 REKENDUUR EN GROOTTE VERSCHILLENDE MODELLEN

Om een overzicht te krijgen van de verschillende modellen die ontwikkeld zijn en de rekentijd die nodig is om een periode van 48 uur (2 dgn) door te rekenen zijn de verschillende modellen in Tabel 2.3 met hun kenmerken gepresenteerd.

model	2DH-3D	nmax*mmax	rekenpunten	snelheid	bijzonderheden
SCALWEST-fijn	2DH	565*506	82707	1:5	
SCALWEST-grof	2DH	189*170	9357	1:64	niet afgeregeld
3D-SCALWEST-fijn	3D	565*506	285890	1:0.1	10 min, k=5, CRAY
3D-SCALWEST-grof	3D	189*170	32130	1:1,8	k=8
2DH-uitsnede-fijn	2DH	265*236	31838	1:10,1	
3D-uitsnede-fijn	3D	265*236	62540	1:0.5	k=7

Tabel 2.3 Vergelijking tussen de verschillende modellen
snelheid is gedefinieerd als: rekentijd op HP9000/door te rekenen periode
1:5 betekent bijvoorbeeld dat een periode van 5 uur in 1 uur berekend is
k in de kolom bijzonderheden staat voor het aantal lagen

3. Randvoorwaarden

3.1 LIGGING RANDVOORWAARDEN SCALWEST-MODEL

De randvoorwaarden die dit nieuwe TRISCAL-model aansturen zijn afkomstig uit het 2DH SCALWEST-model. Met het SCALWEST-model zijn 3 dagen doorgerekend waarna resultaten van de laatste 48 uur gebruikt zijn als randvoorwaarden voor het 3D-uitsnede-model. De gebruikte randvoorwaarden lagen bij het SCALWEST-model en bij het TRISCAL-grof model aan zeezijde bij Westkapelle-Vlakte van Raan en Zeebrugge en aan rivierzijde bij Gent. Aan zeezijde wordt een waterstandsrand opgelegd. Bij Terneuzen (Kanaal Gent-Terneuzen), Bath (Zoommeer), Antwerpse Havendokken, Rupelmonde en Gent worden debieten van resp. 20 m³/s, 2 m³/s, 12 m³/s, 30 m³/s en 30 m³/s opgelegd. De laatste 2 debieten vormen samen het totale Scheldedebiet of de zoetwaterafvoer van de Schelde.

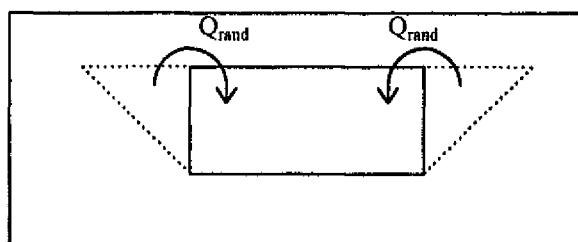
3.2 LIGGING RANDVOORWAARDEN UITSNEDE-MODEL

Het uitsnede-model ligt tussen Baarland en Hedwigepolder in. Op de benedenrand (Hoek van Baarland-Platen van Hulst, n=313) is een waterstandsrand aangebracht en op de bovenrand (Hedwigepolder, m=235) een debietrand. In Tabel 3.1 zijn de coördinaten weergegeven.

plaats	soort rand	n-coördinaat	m-coördinaat	RD x-coörd.	RD y-coörd.
H.v.Baarland	waterstand	13 of 313	43	51227.379	379353.406
Pl.van Hulst		13 of 313	173	55267.461	376000.688
Hedwigepolder	debiet	512	235	74429.828	373748.625
Nw Westlandp.		544	235	75879.188	375264.688

Tabel 3.1 Coördinaten van de randvoorwaardelokaties

Vanwege de gewenste nauwkeurigheid zijn de randvoorwaarden per roosterpunt overgezet. De benedenstroomse rand bestaat uit 107 punten en de bovenstroomse rand uit 12 punten. Uit stabiliteitsoverwegingen zijn alleen randvoorwaarden opgelegd op die punten die permanent onder water staan. Op de bovenstroomse rand zijn de debieten die normaal door drooggezette punten stromen per tijdstap opgeteld bij de debieten die door de diepere punten stromen. In figuur 3.1 is dit schematisch weergegeven.



Figuur 3.1 Schematisatie herverdeling debieten aan randen

Bij punten die afwisselend droogvallen en onder water lopen bestaat de kans op instabiliteiten wanneer met transport van bijvoorbeeld zout of sediment wordt gerekend. Dit komt omdat bij droogval van een punt negatieve waterstanden en dus ook negatieve concentraties kunnen optreden. Hierdoor wordt de continuïteit niet meer gewaarborgd en kan het punt als put of bron gaan functioneren.

Zout speelt ten oosten van Hansweert een grote rol in de waterbeweging en daarom moeten op beide randen naast waterstands- of debietrandvoorwaarden ook zourandvoorwaarden opgelegd worden.

3.3 GEBRUIKTE RANDVOORWAARDEN

Met de verschillende modellen zijn 3 perioden doorgerekend. De eerste twee perioden zijn ook gebruikt bij de calibratie van het 2DH-SCALWEST model (Jansen, 1997). Het betrof een doodtij (26 april 1996) met een getijcoëfficiënt van 0.72 en een springtij (4 en 5 mei 1996) met een getijcoëfficiënt van 1.23. In beide perioden is er weinig wind (windkracht 2-3 uit het noordwesten). De derde periode (28 en 29 september 1996) betrof ook een springtij (GC=1,29) met een windkracht 4-5 uit het zuidwesten. In bijlage V zijn de windsnelheid en de windrichting tijdens de bovenstaande perioden weergegeven.

In Tabel 3.2 zijn de waterstanden en getijcoëfficiënten bij Vlissingen vermeld

	HW-stand	LW-stand	amplitude/Getijcoëfficiënt
Gem. Springtij	2.43	-2.04	4.47/1.16
Gem. Getij	2.05	-1.81	3.86/1.00
Gem. Doodtij	1.55	-1.47	3.02/0.78
27 april 1996			
LW stand/tijd	HW stand/tijd	Getijverschil vloed/eb	Getijcoëfficiënt
-1.62/02:50	1.35/09:00	2.97/2.68	0.77/0.69
-1.33/15:20	1.26/21:30	2.59	0.67
5 mei 1996			
HW stand/tijd	LW stand/tijd	Getijverschil eb/vloed	Getijcoëfficiënt
2.59/03:00	-2.18/09:30	4.77/4.68	1.24/1.21
2.50/15:00	-2.26/21:50	4.76	1.23
29 september 1996			
HW stand/tijd	LW stand/tijd	Getijverschil eb/vloed	Getijcoëfficiënt
2.75/14:40	-2.31/21:30	5.06/4.89	1.31/1.26
2.58/03:00	-2.32/9.35	4.9	1.27

Tabel 3.2 Waterstanden en getijcoëfficiënten bij Vlissingen tijdens de validatieperioden
waterstanden in meters t.o.v. NAP
als gemiddeld getij zijn de 10-jarig gemiddelde waarden (1991.0) gebruikt

De randvoorwaarden zijn in 3 punten (Westkapelle, Vlakte van de Raan en Zeebrugge) bepaald uit dichtbijgelegen waterstandsmeetstations met behulp van de verlooppijnen van de M2-component en zijn afkomstig uit de database van het VCZ-Middelburg. Tussen de 3 punten wordt de waterstand geïnterpoleerd.

3.4 BEGINVOORWAARDEN

In het model moeten een aantal beginvoorwaarden opgegeven worden.

De initiële waterstand van 1,5 m boven NAP die in het SCALWEST-model gebruikt is, gaf in het uitsnede-model problemen. De oorzaak hiervan was dat de schokgolf die gedurende de eerste tijdstappen door het model loopt op sommige plaatsen waar de Courant-getallen groot zijn voor instabiliteit zorgt. Door de initiële waterstand te verlagen naar NAP+0,50 meter is dit probleem verholpen.

Als initieel zoutveld is evenals bij de SCALWEST-berekening een zoutveld gekozen dat hoort bij een Schelde-afvoer van 40 m³/s en hoogwater bij Terneuzen. Deze is in het verleden berekend met het E-WESTII model (Dekker, 1993).

Deze gaf een goed beeld en is voor de 3D-berekening niet aangepast.

4. Resultaten berekeningen

Tijdens activiteit B zijn verschillende perioden met verschillende modellen doorgerekend. In paragraaf 3.3 zijn de kenmerken van de verschillende perioden beschreven.

In Tabel 4.1 is een overzicht en een index te vinden van de berekeningen en de resultaten.

model	periode	getij + coëfficiënt	uitvoer	paragraaf
SCALWEST	26/27-04-96	doodtij (GC=0.72)	tijdreeksen	4.2
uitsnede			tijdreeksen	4.2
SCALWEST	04/05-05-96	springtij (GC=1.23)	tijdreeksen	4.2
uitsnede			tijdreeksen	4.2 en 4.3
TRISCAL-fijn			tijdreeksen	4.3
TRISCAL-fijn			ruimtelijk	4.5
TRISCAL-grof	28/29-09-96	springtij (GC=1.29)	ruimtelijk (HF-radar)	4.1
TRISCAL-fijn			ruimtelijk (HF-radar)	4.4

Tabel 4.1 Overzicht en index berekeningen tijdens Activiteit B

De resultaten van de TRISCAL-berekeningen zullen op CD-ROM gezet worden.

De uitvoer van de TRISCAL-fijn berekening van 4 en 5 mei zijn tijdreeksen op 5 mei (0:00 uur tot 23.50 uur, om de 10 min.) en mapfiles om de 30 minuten tijdens het laatste getij op 5 mei (11:00 uur tot 23:30 uur).

Van de TRISCAL-grof berekening van 28 en 29 september zijn tijdreeksen op 28 en 29 mei (0.00 uur 28-09 tot 04:20 uur 29-09, om de 10 min.) en mapfiles om de 20 minuten (15:00 uur 28-09 tot 04:20 uur, 29-09) als uitvoer gegenereerd.

4.1 RESULTATEN BEREKENINGEN MET TRISCAL-GROF

Zoals in hoofdstuk 2 al is gemeld zijn met het TRISCAL-grof model een aantal testberekeningen uitgevoerd. Deze zijn uitgevoerd voor het onderzoek naar de betrouwbaarheid van HF-radar stroommetingen (High Frequency Radar) van de stroomsnelheden aan het wateroppervlak (zie Dam, 1997). Voor de periode van 28 en 29 september 1996 zijn de stroomsnelheden in de bovenste laag vergeleken met de HF-radar metingen.

Van twee raaien nabij Hansweert zijn 4 punten vergeleken: B1 t/m B4 en C1 t/m C4 tijdens een springtijcyclus. In een meetpunt B1, zijn de verschillen groot. Dit komt doordat dit punt in het verlengde van een strekdam ligt.

De overige punten komen goed overeen, waarbij met name midden in de geul de metingen erg goed met de berekening overeenstemmen. In Tabel 4.2 zijn de gemiddelde verschillen en de standaarddeviatie van de stroomsnelheden in hoofdrichting en dwarsrichting per punt vermeld.

Vergelijking	gemiddeld verschil hoofdrichting (m/s)	standaarddeviatie hoofdrichting (m/s)	gemiddeld verschil dwarsrichting (m/s)	standaarddeviatie dwarsrichting (m/s)
SW B1	-0.23	0.68	-0.10	0.13
SW B2	-0.02	0.16	-0.02	0.27
SW B3	-0.03	0.16	-0.06	0.21
SW B4	0.06	0.39	0.11	0.28
SW C1	-0.07	0.23	-0.07	0.22
SW C2	-0.03	0.15	-0.09	0.18
SW C3	0.01	0.20	-0.05	0.25
SW C4	0.02	0.40	-0.04	0.16

Tabel 4.2 Gemiddeld verschil en standaarddeviatie van stroomsnelheden
 (uit Dam, 1997)
 stroomsnelheden in m/s

In (Dam, 1997) is ook een ruimtelijke vergelijking uitgevoerd. Ook deze laat zien dat het stroombeeld vrij goed overeenkomt. Rond kentering zijn er enkele verschillen en de stroomsnelheid van de vloedstroom is groter in sommige delen. Dit komt ook voor in de vergelijking van de punten in raai C.

4.2 RESULTATEN BEREKENING MET HET 2DH-UTSNEDE MODEL

Zoals in paragraaf 2.2 al is vermeld, beslaat het uitsnede-model het deel van de Westerschelde tussen Baarland en Hedwigepolder. Het rooster van dit uitsnede-model is uit het SCALWEST-rooster gehaald. Op basis van deze overeenkomst zijn de resultaten van het 2DH-uitsnede model vergeleken met die van het SCALWEST-model. Dit is gedaan voor een doottij, de periode 26 en 27 april 1996 en een springtij, de periode 4 en 5 mei 1996. In paragraaf 3.3 zijn kenmerken van deze perioden verder beschreven.

Aangetekend moet worden dat uit oogpunt van stabiliteit in het uitsnede-model een aantal aanpassingen zijn gedaan. Zo zijn de droogvallende punten op de rand 'dichtgezet' (zie paragraaf 3.2) en zijn op drie plaatsen in het model een aantal bodemdiepten aangepast. De veerhaven van Kruiningen is afgesloten door een viertal punten in de mond van de haven op NAP+10 meter te brengen. Verder zijn in de Schaar van Ossensisse 14 punten met 1 à 2 meter verlaagd en is in het Land van Saeftinge 1 punt met 0.80 meter verhoogd. Op al deze plaatsen kwamen te hoge stroomsnelheden voor die het gevolg zijn van een te grote gradiënt in de bodemschematisatie.

4.2.1 Resultaten vergelijking springtij 2DH-uitsnede model.

Voor een viertal punten zijn de waterstanden berekend met het uitsnede-model vergeleken met de waterstanden die berekend zijn met het SCALWEST-model. In bijlage VI zijn de resultaten van deze vergelijking gepresenteerd. Te zien is dat de waterstanden dicht bij de benedenrand nauwelijks variëren. Bij Bath zijn de hoogwaters 8 cm te hoog en loopt de waterbeweging bij laagwater achter. Dit komt waarschijnlijk door de aanpassingen die gedaan zijn in het uitsnede-model.

In Tabel 4.3 staan de verschillen op hoog- en laagwater tussen beide modellen. De gemiddelde verschillen en de standaarddeviatie van de verschillen staan in Tabel 4.4.

	SCALWEST				uitsnede-model				verschil			
	hw1	lw1	hw2	lw2	hw1	lw1	hw2	lw2	hw1	lw1	hw2	lw2
Overloop v. Hansw.	2.87	-2.40	2.77	-2.48	2.88	-2.40	2.78	-2.48	0.01	0.00	0.01	0.00
Hansweert	2.96	-2.44	2.86	-2.52	2.95	-2.45	2.85	-2.52	-0.01	-0.01	-0.01	-0.01
Walsoorden	3.01	-2.46	2.91	-2.54	2.99	-2.47	2.89	-2.55	-0.02	-0.01	-0.02	-0.01
Baalhoek	3.10	-2.46	3.00	-2.54	3.14	-2.49	3.04	-2.56	0.04	-0.02	0.04	-0.02
Schaar vd Noord	3.17	-2.47	3.06	-2.55	3.24	-2.51	3.13	-2.58	0.07	-0.03	0.07	-0.04
Bath	3.27	-2.48	3.17	-2.56	3.36	-2.54	3.25	-2.61	0.08	-0.06	0.08	-0.05

Tabel 4.3 Hoogwater- en laagwaterstanden tijdens springtij in meters boven NAP

hw1: hoogwater 1 : 04:00 uur 05-05-96
 lw1: laagwater 1: 11:00 uur 05-05-96
 hw2: hoogwater2: 16:00 uur 05-05-96
 lw2: laagwater 2: 23:00 uur 05-05-96

	gemiddeld verschil	standaarddeviatie
Overloop v. Hansw.	0.00	0.01
Hansweert	0.00	0.02
Walsoorden	0.00	0.03
Baalhoek	0.01	0.04
Schaar vd Noord	0.01	0.05
Bath	0.01	0.05

Tabel 4.4 Gemiddeld verschil en standaarddeviatie van de waterstanden tussen SCALWEST en het uitsnede-model waarden in meters

Zoals ook uit Tabel 4.3 en Tabel 4.4 blijkt is het verschil bij de Overloop van Hansweert het kleinst en bij Bath het grootst.

In bijlage VII zijn de debieten tijdens het springtij uitgezet. Ook hier valt op dat naarmate de debietraai verder van de bovenrand af ligt de verschillen groter worden. Opvallend is dat door de vloedgedomineerde geul met vloed een te klein debiet stroomt en dat door de ebgedomineerde geul een te groot vloeddebet stroomt. Dit komt doordat op de benedenrand een te klein debiet de Overloop van Ossensisse instroomt doordat een aantal punten hierin dicht zijn gezet..

In Tabel 4.5 zijn de eb- en vloedvolumes per raal weergegeven en in Tabel 4.6 de verschillen in debieten tussen het SCALWEST-model en het uitsnede-model.

	SCALWEST		uitsnede-model		verschil	
	vloedvolume	ebvolume	vloedvolume	ebvolume	vloedvolume	ebvolume
R1.Vw.b.Bath	345716	-345846	344936	-345064	-0.23%	-0.23%
R3.Overl.Valkenisse	497690	-485937	514327	-495426	3.23%	1.92%
R3.Zimmermgeul	42864	-52137	42646	-56369	-0.51%	7.51%
R5a.Zuidergat	444994	-489375	464317	-501686	4.16%	2.45%
R5a.Schv.Waarde	300244	-251475	305020	-260335	1.57%	3.40%
R6.Middelgat	446484	-508923	470294	-522167	5.06%	2.54%
R6.GatvOssenis	661659	-590651	669555	-605212	1.18%	2.41%

Tabel 4.5 Vloed- en ebvolumes en procentuele verschillen tussen SCALWEST en uitsnede-model
waarden in m³

	gemiddeld verschil	standaarddeviatie
R1.Vw.b.Bath	-3.17	60.40
R3.Overl.Valkenisse	1.97	869.36
R3.Zimmermgeul	60.06	184.42
R5a.Zuidergat	-0.82	791.45
R5a.Schv.Waarde	62.20	454.39
R6.Middelgat	-371.91	897.80
R6.GatvOssenis	420.22	892.90

Tabel 4.6 Gemiddeld verschil en standaarddeviatie van de debieten tussen SCALWEST en het uitsnede-model
waarden in m³

De maximale verschillen in eb- en vloedvolumes zijn 7%. In raai 6 voert het Gat van Ossenis te veel debiet aanvoert en het Middelgat te veel debiet af. Het zijn echter enkele procenten van de maximale debieten.

4.2.2 Resultaten vergelijking doodtij SCALWEST-uitsnede

Behalve een springtij is ook een doodtij met het SCALWEST-model en het uitsnede-model doorgerekend. In bijlage VIII zijn voor dezelfde 4 plaatsen de waterstanden gepresenteerd. Ook hier is te zien dat naarmate de afstand van de benedenrand toeneemt de waterstand minder overeenkomt. Bij Bath is de hoogwaterstand 4 cm te hoog en de laagwaterstand 4 cm te laag. In Tabel 4.7 zijn de hoog- en laagwaterstanden vermeld en in Tabel 4.8 zijn de gemiddelde verschillen en de standaarddeviatie van de verschillen tussen de modellen gepresenteerd.

	SCALWEST				uitsnede-model				verschil			
	lw1	hw1	lw2	hw2	lw1	hw1	lw2	hw2	lw1	hw1	lw2	hw2
Overloop v.Hansw	-1.80	1.67	-1.53	1.55	-1.80	1.67	-1.53	1.55	0.00	0.01	0.00	0.00
Hansweert	-1.83	1.72	-1.56	1.60	-1.83	1.73	-1.57	1.61	-0.01	0.01	0.00	0.00
Walsoorden	-1.85	1.78	-1.58	1.67	-1.86	1.81	-1.59	1.68	-0.01	0.02	-0.01	0.01
Baalhoek	-1.88	1.86	-1.61	1.74	-1.90	1.90	-1.63	1.76	-0.02	0.04	-0.02	0.02
Schaar vd Noord	-1.91	1.90	-1.64	1.79	-1.94	1.94	-1.67	1.82	-0.02	0.04	-0.03	0.03
Bath	-1.93	1.95	-1.66	1.84	-1.96	1.99	-1.70	1.89	-0.03	0.04	-0.04	0.04

Tabel 4.7 Hoogwater- en laagwaterstanden tijdens doodtij in meters boven NAP

lw1: laagwater 1: 04:00 uur 27-04-96
hw1: hoogwater 1: 11:00 uur 27-04-96
lw2: laagwater 2: 16:00 uur 27-04-96
hw2: hoogwater2: 23:00 uur 27-04-96

	gemiddeld verschil	standaarddeviatie
Overloop v.Hansw.	0.00	0.00
Hansweert	0.00	0.01
Walsoorden	-0.01	0.01
Baalhoek	-0.01	0.02
Schaar vd Noord	-0.01	0.02
Bath	-0.02	0.02

Tabel 4.8 Gemiddeld verschil en standaarddeviatie van de waterstanden tussen SCALWEST en het uitsnede-model waarden in meters

Uit de tabellen 4.7 en 4.8 blijkt eveneens dat de verschillen bij Bath het grootst zijn. Bij Bath is standaarddeviatie 2 cm en is gemiddeld de waterstand 2 cm te laag. De verschillen zijn bij doottij echter kleiner dan bij springtij.

In bijlage IX zijn de debieten tijdens doottij tegen elkaar uitgezet. Hierin is te zien dat met vloed het uitsnede-model achterloopt bij het SCALWEST-model. Dit komt doordat aan benedenstroomse zijde een aantal punten dicht gezet zijn, waardoor het getij moeilijker het model in kan stromen.

Op hoogwater loopt het uitsnede-model in raai 5a en raai 6 10 minuten achter. Bij eb wordt de achterstand weer ingelopen.

In Tabel 4.9 zijn de eb- en vloedvolumes in de verschillende raaien vermeld en in Tabel 4.10 volgen het gemiddeld verschil en de standaarddeviatie van de debieten.

	SCALWEST		uitsnede-model		verschil	
	vloedvolume	ebvolume	vloedvolume	ebvolume	vloedvolume	ebvolume
R1.Vw.b.Bath	246236	-253465	245568	-253076	-0.27%	-0.15%
R3.Overl.Valkenisse	351961	-347939	356652	-350961	1.33%	0.87%
R3.Zimmermgeul	19891	-31530	19691	-32761	-1.01%	3.90%
R5a.Zuidergat	315800	-334711	322107	-339127	2.00%	1.32%
R5a.Schv.Waarde	184287	-172619	185422	-175364	0.62%	1.59%
R6.Middelgat	292256	-347440	308895	-349150	5.69%	0.49%
R6.GatvOssenisse	454302	-405318	449089	-414731	-1.15%	2.32%

Tabel 4.9 Vloed- en ebvolumes en procentuele verschillen tussen SCALWEST en uitsnede-model waarden in m³

	gemiddeld verschil	standaarddeviatie
R1.Vw.b.Bath	-1.55	22.82
R3.Overl.Valkenisse	19.39	382.58
R3.Zimmermgeul	-9.39	68.71
R5a.Zuidergat	21.32	438.67
R5a.Schv.Waarde	-1.37	418.93
R6.Middelgat	203.08	875.90
R6.GatvOssenisse	-178.57	672.24

Tabel 4.10 Gemiddeld verschil en standaarddeviatie van de debieten tussen SCALWEST en uitsnede-model waarden in m³

Op dezelfde plaatsen als bij springtij komen nu de verschillen naar voren. De verschillen zijn kleiner dan bij springtij. Opvallend is dat in het uitsnede-model nu het Middelgat te veel debiet aanvoert en de Overloop van Ossensisse te veel afvoert. Dit in tegenstelling tot de resultaten tijdens springtij (paragraaf 4.2.1). De verschillen in eb- en vloedvolumes zijn klein, maximaal 6%.

4.2.3 Stroombeelden tijdens springtij

Ter verduidelijking van de stroming in de Westerschelde nabij Hansweert, zijn in bijlage X een aantal stroombeelden tijdens springtij gepresenteerd. Deze zijn afkomstig uit het SCALWEST-model.

Om 03:00 uur is het maximum vloed (bijlage X.1). Duidelijk te zien is de grote stroming vanuit de Overloop van Ossensisse en de divergentie en convergentie op de Drempel van Hansweert. De maximale stroomsnelheden zijn 2 m/s en treden op bij de Put van Hansweert.

Twee uur later, om 05:00 uur is het net na hoogwater (bijlage X.2). Het hele gebied staat onder water en de stroomsnelheden zijn laag. Vanuit de Schaar van Waarde en langs de platen van Ossensisse en de Molenplaat vindt al een kleine ebstroom plaats. In het Zuidergat, op de Drempel van Hansweert en in het Middelgat is er nauwelijks stroming.

Maximale ebstroom is er om 08:00 uur (bijlage X.3). In het Zuidergat zijn de stroomsnelheden groter dan in de Schaar van Waarde. De stroomsnelheden door de Schaar van Ossensisse zijn afgenomen ten opzichte van hoogwater (komt door grotere wrijving). Op de drempel van Hansweert is duidelijk divergentie en convergentie waarneembaar. De stroomsnelheden in de Overloop van Hansweert zijn groter dan in het Middelgat.

Om 11:00 uur is het laagwater (bijlage X.4). De ondiepe gedeelten zijn nu drooggefallen. Vanuit het Zuidergat is nog een kleine ebstroom aanwezig. Langs de Plaat van Ossensisse ontstaat weer een vloedstroom. Dit komt omdat ten gevolge van de traagheid de richting van de stroming in ondiepe gedeelten eerder omslaat dan in de diepe geulen.

4.3 RESULTATEN BEREKENING MET HET TRISCAL-FIJN MODEL

4.3.1 Resultaten vergelijking springtij 2DH uitsnede-TRISCAL

Met het TRISCAL-model is alleen het springtij van 4 en 5 mei 1996 doorgerekend. De kenmerken van dit getij zijn beschreven in paragraaf 3.3. Het TRISCAL-model heeft 7 horizontale lagen. In bijlage XI zijn de waterstanden berekend met het 2DH-uitsnede model en het TRISCAL-model gepresenteerd. Uit de figuren blijkt dat de verschillen verder van de benedenrand toenemen. Dit was ook het geval bij de vergelijking van het uitsnede-model met het SCALWEST-model (paragraaf 4.2.1 en 4.2.2). Verder blijkt dat het TRISCAL model beter de gemeten waterstanden benaderd dan het 2DH-uitsnede model. Met name bij eb is dit het geval.

In Tabel 4.11 staan de hoog- en laagwaterstanden vermeld en in Tabel 4.12 de gemiddelde verschillen en standaarddeviaties per meetpunt.

	Uitsnede-model				TRISCAL				verschil			
	hw1	lw1	hw2	lw2	hw1	lw1	hw2	lw2	hw1	lw1	hw2	lw2
Overloop v. Hansw.	2.88	-2.40	2.78	-2.48	2.88	-2.42	2.78	-2.49	0.00	-0.01	0.00	-0.01
Hansweert	2.95	-2.45	2.85	-2.52	2.98	-2.45	2.87	-2.53	0.02	-0.01	0.02	0.00
Walsoorden	2.99	-2.47	2.89	-2.55	3.02	-2.51	2.91	-2.57	0.03	-0.04	0.02	-0.03
Baalhoek	3.14	-2.49	3.04	-2.56	3.20	-2.54	3.08	-2.62	0.06	-0.05	0.04	-0.05
Schaar vd Noord	3.24	-2.51	3.13	-2.58	3.29	-2.57	3.18	-2.64	0.04	-0.06	0.05	-0.06
Bath	3.36	-2.54	3.25	-2.61	3.40	-2.58	3.29	-2.65	0.04	-0.04	0.04	-0.04

Tabel 4.11 Hoogwater- en laagwaterstanden tijdens springtij in meters boven NAP

hw1: hoogwater 1 : 04:00 uur 05-05-96
 lw1: laagwater 1 : 11:00 uur 05-05-96
 hw2: hoogwater2: 16:00 uur 05-05-96
 lw2: laagwater 2: 23:00 uur 05-05-96

	gemiddeld verschil	standaard deviatie
Overloop v. Hansw.	-0.01	0.01
Hansweert	0.00	0.02
Walsoorden	-0.01	0.04
Baalhoek	-0.02	0.06
Schaar vd Noord	-0.03	0.08
Bath	-0.02	0.08

Tabel 4.12 Gemiddeld verschil en standaarddeviatie van de waterstand tussen het uitsnede-model en TRISCAL waarden in meters

De verschillen tussen de hoog- en laagwaterstanden van de twee modellen zijn klein, maximaal 6 cm. De standaarddeviaties zijn iets groter dan in paragraaf 4.2.1. Dit komt omdat de verschillen bij vloed en eb groter zijn.

In bijlage XII zijn de debieten die met het uitsnede-model berekend zijn vergeleken met de debieten die uit het TRISCAL-model komen. Ook hier blijkt weer dat de verschillen naarmate de raaien verder van de bovenrand liggen, toenemen. De maximale debieten uit het TRISCAL-model zijn groter dan die uit het uitsnede-model. De debieten komen goed met elkaar overeen.

In Tabel 4.13 staan de vloed- en ebvolumes van beide modellen en in Tabel 4.14 volgen de gemiddelde verschillen en standaarddeviaties per meetraai.

	2DH uitsnede		TRISCAL		verschil	
	vloedvolume	ebvolume	vloedvolume	ebvolume	vloedvolume	ebvolume
R1.Vw.b.Bath	344936	-345064	344572	-346159	-0.11%	0.32%
R3.Overl.Valkenisse	514327	-495426	519627	-498877	1.03%	0.70%
R3.Zimmermgeul	42646	-56369	43653	-57961	2.36%	2.82%
R5a.Zuidergat	464317	-501686	463889	-509687	-0.09%	1.59%
R5a.Schv.Waarde	305020	-260335	317607	-264297	4.13%	1.52%
R6.Middelgat	470294	-522167	477832	-539789	1.60%	3.37%
R6.GatvOssenisse	669555	-605212	677943	-603788	1.25%	-0.24%

Tabel 4.13 Vloed- en ebvolumes en procentuele verschillen tussen uitsnede-mdl en TRISCAL waarden in m³

	gemiddeld verschil	standaard deviatie
R1.Vw.b.Bath	-6.8169	70.05941
R3.Overl.Valkenisse	-1.8169	367.1473
R3.Zimmermgeul	-5.28169	138.4017
R5a.Zuidergat	-135.958	376.3387
R5a.Schv.Waarde	106.3592	511.6899
R6.Middelgat	-118.183	518.433
R6.GatvOssenisse	73.70423	669.42

Tabel 4.14 Gemiddeld verschil en standaarddeviatie van de debieten tussen uitsnede-model en TRISCAL waarden in m³/s

De verschillen van de getijvolumes tussen het uitsnede-model en het TRISCAL-model zijn klein. Een maximaal verschil van 4% treedt op. Ook het gemiddeld verschil en de standaarddeviatie per meet raai zijn klein. De grootste verschillen treden op in raai 5a en raai 6.

4.4 VERGELIJKING TRISCAL-RESULTATEN MET HF-RADARMETINGEN

In september en oktober 1996 zijn op de Drempel van Hansweert met HF-radar metingen gedaan van de stroomsnelheden aan het wateroppervlak. De conclusies van het onderzoek van Gerard Dam (Dam, 1997) waarbij resultaten van het TRISCAL-grof model zijn vergeleken met HF-radarmetingen staan in paragraaf 4.1. In deze paragraaf zullen de uitkomsten beschreven worden van de vergelijking van de resultaten van de bovenste laag van het TRISCAL-fijn model met deze metingen.

Wederom is voor de vergelijking de meting op 28 en 29 september 1996 gebruikt. In paragraaf 3.3 is het getij op deze dagen beschreven.

Op twee tijdstippen zijn de modelresultaten vergeleken met de HF-radar metingen. Dit zijn:

1. Maximum ebstroom, 28 september 1996: 19:40 uur
2. Maximum vloedstroom, 29 september 1996: 03:00 uur

In bijlage XIII zijn de resultaten van de HF-radar meting tijdens maximum ebstroom weergegeven. Dit is gedaan voor de stroomsnelheden in u- en v-richting. De u-richting loopt oost-west en de v-richting noord-zuid. In de figuren is de ruwe data gepresenteerd. In het grootste gebied zijn de snelheden kleiner dan 2 m/s. De grootste waarden komen voor op platen op het vasteland. Hier betreft het fouten in de HF-radarmeting.

Voor beide tijdstippen zijn de stroomsnelheden in de bovenste laag van de TRISCAL-berekening geïnterpoleerd naar het HF-radarrooster. Dit is gebeurd met de triangulatiemethode. In bijlage XIV en bijlage XV zijn de 'onbewerkte' en 'bewerkte' modelresultaten gepresenteerd. Door de interpolatie is het beeld iets grover geworden maar zijn de patronen nog herkenbaar. Tevens zijn alleen gegevens ten noorden van Perkpolder en ten oosten van Kruiningen gebruikt omdat hier ook gemeten is. In v-richting zijn de snelheden overwegend positief en in u-richting negatief. Dit is te verwachten bij eb.

Daarna is het verschil tussen de berekende stroomsnelheden in u- en v-richting en de gemeten stroomsnelheden bepaald. In bijlage XVI zijn de verschillen in u- en v-richting gepresenteerd. De verschillen in v-richting (hoofdrichting) zijn kleiner dan in u-richting. Aan de randen van het gebied dat gebruikt is, komen grote verschillen voor. Dit komt doordat de waarden die met HF-radar op land gemeten heeft hier een rol spelen. Ten zuiden van de Plaat van Ossenis, in de Schaar van Ossenis en ten oosten hiervan komen de grootste verschillen voor. Dit komt doordat hier met HF-radar niet zo nauwkeurig gemeten kan worden vanwege de opstelling van de HF-radar meetapparatuur.

Midden in het gebied ten noorden hiervan zijn de gemiddelde verschillen in v-richting 0,15 m/s en in u-richting 0,25 m/s. Dit is op de plaats van een diepe geul. Ten zuiden van de haven van Hansweert is nog een punt waar grote verschillen optreden (tot 0,5 m/s).

Concluderend kan gezegd worden dat de resultaten in de hoofdrichting van de stroming (v) beter overeenkomen dan in de dwarsrichting (u) en dat het betrouwbaar gebied ten oosten en ten noorden van de Plaat van Ossenis ligt. Ten zuiden van de plaat en aan de randen treden de grootste verschillen op.

De resultaten van de HF-radarmeting tijdens maximum vloedstroom staan in bijlage XVII. De grootste stroomsnelheden komen voor in de zuidwesthoek (Schaar van Ossenis en Molenpolder) en de noordoosthoek (Hansweert, Kruiningen) van het gebied. Dit is of op het vasteland of op platen. Op de drempel zijn de stroomsnelheden in u-richting maximaal +2m/s en in v-richting -2 m/s.

In Bijlage XVIII en Bijlage XIX zijn de resultaten van de TRISCAL-berekening gepresenteerd. In de bocht bij Hansweert zijn de stroomsnelheden in u-richting groter dan de stroomsnelheden in v-richting. De stroomsnelheden in u-richting zijn positief en maximaal 2 m/s en in v-richting zijn de stroomsnelheden negatief en maximaal -1,5 m/s.

De verschillen in stroomsnelheden tussen de HF-radarmeting en de TRISCAL-berekening zijn weergegeven in bijlage XX. Ook bij maximum vloed zijn de verschillen in het zuidelijk deel en aan de randen het grootst. De verschillen in v-richting zijn groter dan de verschillen in u-richting. Dit is anders dan bij maximum eb, waar de verschillen in v-richting kleiner waren dan in u-richting.

Dat de verschillen in v-richting groter zijn dan in u-richting komt misschien doordat de stroomsnelheden in deze richting bij maximum vloed groter zijn dan bij maximum eb. De gemiddelde verschillen in u-richting in het gedeelte ten zuiden van de haven van Kruiningen zijn 0,10 m/s en in v-richting 0,25 m/s.

De verschillen in de Schaar van Ossensisse liggen tussen 0,5 m/s en 1 m/s, wat erg hoog is. Dit kan komt doordat de richting van de stroming, gemeten met HF-radar tegengesteld is aan de richting die uit de TRISCAL-berekening komt. Misschien komt dit door windinvloeden of een andere geometrie.

De conclusie van de vergelijking tussen resultaten van HF-radarmetingen en TRISCAL-berekeningen is dat in een bepaald afgebakend gebied (rond de drempel van Hansweert) de resultaten goed overeenstemmen. De maximale verschillen in dit gebied zijn in beide richtingen in de orde van 0,25 m/s. De oorzaak hiervan kan liggen aan onnauwkeurigheden in de modelschematisatie, meetonnauwkeurigheden, andere windinvloeden of een andere geometrie. Aan de oevers en plaatranden liggen de verschillen hoger (tot 1 m/s). In sommige punten midden in het gebied zijn de verschillen ook groot. Deze verschillen komen door een slechte meting of door een fout in het model. De verschillen in de stroming in de Schaar van Ossensisse zijn bij maximum vloed groot. Er is geen statistische bewerking op de resultaten uitgevoerd omdat een deel van het 'betrouwbaarheids'gebied buiten het gebied van de interpolateerde resultaten ligt.

De interpolatie van de TRISCAL-gegevens is betrouwbaar aangezien het kleurverloop van de geïnterpoleerde snelheden overeenkomt met de oorspronkelijke snelheden.

4.5 SECUNDAIRE STROMING IN LANGS- EN DWARSRICHTING TIJDENS SPRINGTIJ

4.5.1 Uitvoer van de TRISCAL-berekening

In deze paragraaf en de volgende (4.5.1 t/m 4.5.4) zullen ruimtelijke resultaten van de TRISCAL-berekening van het springtij van 4 en 5 mei 1996 besproken worden. In paragraaf 3.3 zijn de kenmerken van dit getij besproken.

Deze berekening is uitgevoerd met 7 horizontale lagen. Deze lagen zijn zgn. sigma-lagen waarbij op elke plaats in het gebied de diepte is verdeeld in 7 gelijke lagen.

Als uitvoer van de TRISCAL-berekening is het laatste getij op 5 mei (11:00 uur tot 23:30 uur) genomen waarvan om het half uur mapfiles zijn bewaard. In Tabel 4.15 staan de tijdstippen waarvan de resultaten in de volgende paragrafen besproken worden.

tijdstip	situatie	waterstand bij Hansweert
15:30 uur	max vloed	NAP+ 2.37 meter
17:00 uur	kentering hw	NAP+ 2.57 meter
20:30 uur	max eb	NAP- 1.01 meter
23:30 uur	kentering lw	NAP- 2.16 meter

Tabel 4.15 Tijdstippen op 5 mei met ruimtelijke uitvoer

De berekeningsresultaten zijn verwerkt met het programma Matlab. De methodiek hierbij was als volgt:

1. Van elk tijdstip zijn de stroomgegevens van de Drempel van Hansweert van alle 7 lagen ingelezen.
2. Per roosterpunt zijn de **dieptegemiddelde stroomsnelheid** en **hoofdrichting** bepaald. Hierna kan per laag de stroomsnelheid in langsrichting (hoofdrichting) en dwarsrichting (loodrecht op de hoofdrichting) berekend worden.
3. Op basis van de dieptegemiddelde stroomsnelheid is het **logaritmisch snelheidsprofiel** berekend
4. De verschillen tussen de berekende snelheden in langsrichting uit TRISCAL en het logaritmisch snelheidsprofiel zijn een maat voor de **secundaire stroming in langsrichting**. Door deze verschillen te lineariseren kan de intensiteit van de secundaire stroming in langsrichting bepaald worden.
5. Door het snelheidsverloop in dwarsrichting te lineariseren kan de intensiteit van de **secundaire stroming in dwarsrichting** bepaald worden.

De **secundaire stroming in langsrichting** is de mate waarin het snelheidsprofiel van de langsstroming over de diepte afwijkt van het logaritmisch snelheidsprofiel dat weergegeven wordt door:

$$u\left(\frac{z}{h}\right) = \bar{u} \left\{ 1 + \alpha + \alpha \ln\left(\frac{z}{h}\right) \right\}$$

waarin:

- | | | |
|-----------|---|-------|
| u | : stroomsnelheid in langsrichting op hoogte z/h | (m/s) |
| z | : hoogte in meters boven de bodem | (m) |
| h | : waterdiepte | (m) |
| $\bar{u}$ | : dieptegemiddelde stroomsnelheid | (m/s) |

De wrijvings parameter α wordt als volgt gedefinieerd:

$$\alpha = \frac{\sqrt{g}}{\kappa C}$$

waarin:

g	: gravitatie versnelling	(m/s ²)
κ	: Von Karman's constante, $\kappa = 0,41$	(-)
C	: Chezy coëfficiënt	(m ^{1/2} /s)

De mate van afwijking wordt voorgesteld als een rechte:

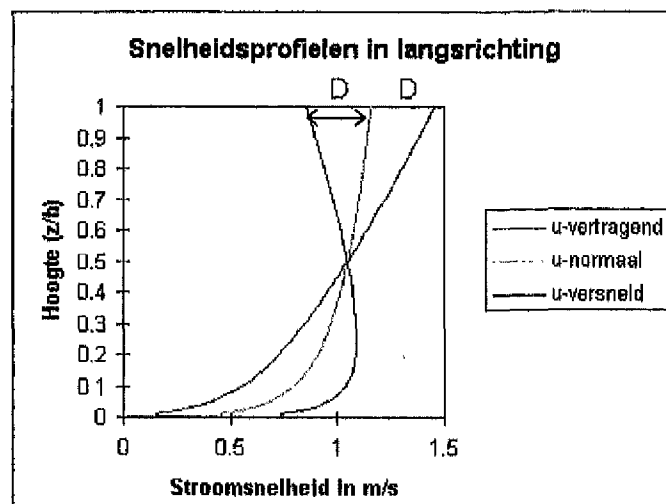
$$lv\left(\frac{z}{h}\right) = -D + 2D \frac{z}{h}$$

waarin:

lv	: afwijking van de langsstroming op hoogte z/h	(m/s)
D	: maximale afwijking (aan oppervlak $lv=D$, aan bodem $lv = -D$)	(m/s)

De factor D is een maat voor de intensiteit van de secundaire stroming in langsrichting. Met de kleinste kwadratenmethode is per roosterpunt, per tijdstip de factor D bepaald. Wanneer de factor D positief is, duidt dit op een vertraging van de stroming waarbij de onderste laag langzamer en de bovenste laag sneller stroomt dan in de normale toestand.

In figuur 4.1 is de bovenstaande modellering grafisch weergegeven



Figuur 4.1 Grafische voorstelling secundaire stroming in langsrichting

De groene lijn geeft de 'normale' stroomsnelheidsverdeling weer. De rode lijn is de vertraagde stroming en de blauwe lijn de versnelde stroming. Als een stroming vertraagd zal dat als eerste merkbaar zijn aan de bodem, waar de wrijving het hoogst is.

Bij een versnelling, bv. bij het opstromen van een overlaat in een prismatische goot, zullen de stroomlijnen aan de bodem meer gekromd zijn dan aan het wateroppervlak. Daardoor zal het relatief aan de bodem harder stromen.

De **secundaire stroming in dwarsrichting** wordt op een soortgelijke manier berekend.

Nadat de dwarsstroming per roosterpunt, per laag bepaald is, kan de variatie over de diepte worden benaderd met de formule:

$$dv\left(\frac{z}{h}\right) = -E + 2E\frac{z}{h}$$

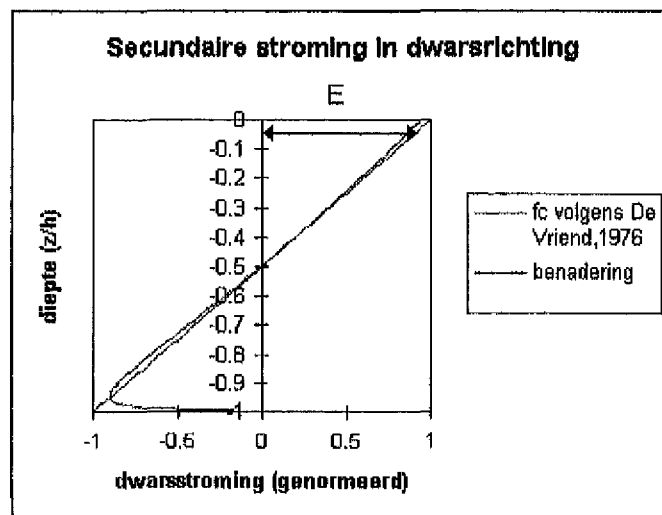
waarin:

dv : afwijking van de stroming in dwarsrichting op hoogte z/h (m/s)

E : maximale afwijking (aan oppervlak $dv=E$, aan bodem $dv = -E$) (m/s)

De factor E is een maat voor de intensiteit van de secundaire stroming in dwarsrichting. Hierbij is aangenomen dat E positief is als aan het wateroppervlak de dwarsstroming ten opzichte van de hoofdrichting naar links gericht is.

In feite is de formulering van de secundaire stroming een stuk gecompliceerder (De Vriend, 1976). In figuur 4.2 is deze formulering getoond samen met de benadering die tijdens dit onderzoek gehanteerd is.



Figuur 4.2 Secundaire stroming volgens De Vriend (1976) met $C=50 \text{ m}^{1/2}/\text{s}$ en de benadering

Bij de bodem gaat de stroomsnelheid volgens De Vriend weer terug naar 0 m/s. De laag waarin dit gebeurt is echter altijd kleiner dan 0,10 z/h . De onderste laag van het model is 0,143 z/h dik. Daarom is de benadering zoals hierboven beschreven is, gerechtvaardigd.

4.5.2 Stroming tijdens maximum vloed

In bijlage XXI zijn de stroombeelden in de bovenste (1e), middelste (4e) en onderste laag (7e laag) tijdens maximum vloed gepresenteerd. Duidelijk te zien is dat de stroomsnelheden in de bovenste en middelste laag groter zijn dan de onderste laag waar bodemwrijving meer invloed heeft. Ook is divergentie en convergentie van de stroomlijnen te herkennen. Bovendien lijkt het alsof vooral in de bovenste lagen de stroming meer naar de ondiepere Schaar van Waarde gericht is terwijl in de onderste laag de stroming meer de diepere geul naar het Zuidergat volgt.

De secundaire stroming in langsrichting is gepresenteerd in bijlage XXII. Deze is berekend op de manier zoals beschreven is in paragraaf 4.5.1. De (licht)blauwe kleur geeft versnelling aan en de rood/gele kleur vertraging. Globaal is waarneembaar dat de stroming in de bocht bij Hansweert versneld, vervolgens op de drempel vertraagd en in het Zuidergat weer versneld. Opvallend is dat de invloed van dammen en obstakels onder water lokaal erg groot is. In het model zitten bij het Oude Hoofd van Walsoorden en de inloop naar de haven Hansweert sterke gradiënten. Dit is terug te vinden in de secundaire stroming in langsrichting.

In Bijlage XXIII is de intensiteit van de secundaire stroming in dwarsrichting weergegeven. Deze is ook berekend op de manier zoals beschreven is in paragraaf 4.5.1. Op plaatsen waar in dwarsrichting het kleurverloop groot is, zijn meerdere circulatiecellen dwars op de hoofdstroming aanwezig. De geel/rode kleur geeft een cel aan die bovenin de verticaal linksom draait en de licht/donkere blauwe kleur geeft een andere cel aan die tegengesteld draait. Dit is het geval bij de inloop van het Zuidergat ten hoogte van Walsoorden en in de bocht bij Hansweert.

Aan noordzijde van de Plaat van Ossenis is er een secundaire stroming die verwacht kan worden in een bocht. Aan de bodem is de stroming naar de binnenbocht (Plaat van Ossenis) gericht. De maximale dwarsstroom aan de bodem is 0,5 m/s.

In de buitenbocht, bij de haven van Hansweert is een tegengestelde cel (blauwe kleur) waarneembaar. Hier is de invloed van de uitstroom uit het ondiepere Middelgat te zien. De stroming in de onderste lagen wordt alleen beïnvloed door de stroming vanuit de Overloop van Hansweert en de stroming in de bovenste lagen wordt beïnvloed door zowel het Middelgat als de Overloop van Hansweert.

Bovendien duikt de stroming in de onderste laag de diepe kuil nabij Hansweert in. De maximale dwarsstroom in deze cel is 0,35 m/s.

Op en langs de Drempel van Hansweert is één cel aanwezig (lichtgroene kleur) waarbij de stroming in de onderste laag naar de binnenbocht gericht is. Dit zorgt voor (momentaan) extra transport van sediment naar de rand van de drempel. De maximale dwarsstroming is 0,1 m/s.

In de inloop van het Zuidergat zijn 3 cellen aanwezig. De invloed van de stroming vanuit de Schaar van Ossenis en vanaf de drempel is te zien. Nabij de haven van Perkpolder is een cel aanwezig (groene kleur) met een stroming in de onderste laag naar de haven toe. Daarnaast zit een tegengestelde cel (blauwe kleur) met een stroming in de onderste lagen van de linkeroever af en de derde cel (geel/rood) heeft weer een stroming in de onderste lagen die naar de linkeroever toe gericht is. Verwacht kan worden dat op de scheiding van de eerste twee cellen een (momentane) verticale stroming omlaag plaatsvindt en op de scheiding van de tweede en derde cel een (momentane) verticale stroming omhoog plaatsvindt.

In het Zuidergat zelf zijn twee cellen aanwezig die van elkaar afdraaien en beide een stroming in de onderste laag richting de ondiepe gedeelten (zuideroever en noordelijke plaat) hebben. Dit leidt tot een sedimenttransport vanuit de diepe geul richting de buiten- en binnenbocht (ondiepe oevers en platen).

4.5.3 Stroming tijdens maximum eb

De stroming in de bovenste (1e), middelste (4e) en onderste (7e) laag is gepresenteerd in bijlage XXIV. In de bovenste lagen zijn de stroomsnelheden groter dan in de onderste laag. De bulk van de aanvoer uit het Zuidergat en de Schaar van Waarde stroomt over en langs de drempel richting de bocht bij Hansweert. Nabij de veerhaven van Kruiningen ontmoeten beide stromingen elkaar. In de bovenste laag zijn de convergentie en divergentie groter dan in de onderste laag waar de stroombanen geleidelijker verlopen. Dit komt door de traagheid van de stroming in de bovenste laag en doordat de onderste laag de diepe geulen blijft volgen.

In bijlage XXV is figuur van de intensiteit van de secundaire stroming in de langsrichting tijdens maximum eb weergegeven. In paragraaf 4.5.1 is een uitleg gegeven over de berekeningsmethode van deze secundaire stroming.

Bijlage XXV geeft een geheel ander beeld dan de figuur in bijlage XXII, de secundaire stroming in langsrichting tijdens maximum vloed. Tijdens maximum eb is bijna het hele gebied geel/rood gekleurd, wat duidt op vertraging, terwijl tijdens maximum vloed de stroming op sommige plaatsen versneld en op andere plaatsen vertraagd. Dit komt waarschijnlijk omdat voor het bepalen van het tijdstip van de maximum eb de stroomsnelheden in de bovenste laag zijn gebruikt. Deze laag zal eerder versnellen dan de onderste lagen, waardoor een 'vertragend' beeld ontstaat.

De grootste vertraging treedt op in de uitloop van de Schaar van Waarde waar de langzaam stromende onderlaag uit het Zuidergat onder de sterke stroom uit de Schaar van Waarde doorstroomt. Bij de Oude Hoofd van Walsoorden vindt vanwege een sterke gradiënt in de bodem wederom lokaal vertraging plaats.

In de binnenbocht van de bocht bij Hansweert is er versnelling. Dit komt doordat het profiel daar nauwer wordt. Misschien kan uit meerdere figuren van de secundaire stroming in langsrichting worden bepaald wanneer de vertraging en versnelling en daarmee relatieve transportcapaciteit ($Su_{op tredend}/Su_{gem}$) het grootst en het kleinst is.

De intensiteit van de secundaire stroming in dwarsrichting tijdens maximum eb is gepresenteerd in bijlage XXVI. (zie paragraaf 4.5.1 voor een uitleg over de berekeningsmethode). Een rode kleur houdt in dat de stroomrichting bovenin de verticaal naar links gericht is en onder in de verticaal dus naar rechts. Bij een blauwe kleur is dit andersom.

In het Zuidergat is één grote cel aanwezig (rode kleur) waarin de stroming in de onderste laag naar de binnenbocht gericht is. Bij het uitkomen van het Zuidergat vormt zich in de binnenbocht nog een tegengestelde cel (groene kleur).

Langs de drempel is een zeer sterk patroon aanwezig. Op het plateau langs de Plaat van Ossenis is nauwelijks secundaire stroming aanwezig. In de vaargeul is over een grote afstand een cel zichtbaar (groen/blauw) met een stroming in de onderste laag die naar de binnenbocht gericht is. Hierdoor vindt er tijdelijk sedimenttransport richting Drempel plaats. Naast deze rechtsomdraaiende cel is een sterke linksomdraaiende cel (rode kleur) aanwezig die veroorzaakt wordt doordat de stroming in de onderste laag gedomineerd wordt door het Zuidergat terwijl boven in de verticaal de invloed van de ondiepere Schaar van Waarde merkbaar is. De stroming in de onderste laag is naar de haven van Kruiningen gericht. Nabij de haven van Kruiningen verdwijnt de rode cel onder invloed van de bochtstroming bij Hansweert. In de bocht van Hansweert is één grote cel aanwezig (blauw/groen). De stroming in de onderste laag is gericht naar de binnenbocht. Hierdoor zal sedimenttransport richting de Plaat van Ossenis plaatsvinden. In de binnen- en buitenbocht zijn op enkele plaatsen tegengestelde cellen zichtbaar.

De secundaire stroming in langsrichting geeft zowel tijdens maximum vloed als maximum eb een versnelling drempelopwaarts en drempelafwaarts en een vertraging op de drempel. De verschillen zijn bij vloed groter dan bij eb. Op plaatsen met een sterke verticale gradiënt in de

bodemligging (Oude Hoofd van Walsoorden) is de secundaire stroming in langsrichting het grootst.

De secundaire stroming in dwarsrichting geeft de invloed van bochtstroming, geometrie en Coriolis goed weer. In de bocht bij Hansweert is tijdens maximum eb en vloed in de binnenbocht een cel aanwezig met een stroming in de onderste laag naar binnen, richting Plaat van Ossensisse, gericht (bochtstroming). In de buitenbocht is de stroming in de onderste laag tijdens de twee getijsituaties naar buiten gericht (invloed van Schaar van Waarde, geometrie).

Op de drempel van Hansweert tijdens maximum eb en vloed een cel aanwezig met een stroming in de onderste laag richting het plateau langs de Plaat van Ossensisse. Naast deze cel is tijdens maximum eb een cel aanwezig die beïnvloed wordt door de geometrie. In de onderste lagen is er een stroming richting Zuidergat en in de bovenste laag is de stroming meer gericht naar de ondiepere Schaar van Waarde. Bij maximum vloed is als gevolg van dit effect de eerste cel (richting plateau) veel breder.

In het Zuidergat zijn tijdens maximum vloed 3 cellen aanwezig en tijdens eb 2 cellen. De stroming in de onderste laag is in de binnenbocht altijd naar binnen gericht.

5. Conclusies

De belangrijkste conclusie van dit rapport is dat het TRISCAL-model bruikbaar is en dat de resultaten tot nu toe bevredigend zijn. Een nadeel is dat het model een lange doorlooptijd heeft (2:1) en dat daardoor soms het wachten op resultaten erg lang duurt. De uitvoer is door de fijnheid van het rooster wel gedetailleerd. Deze uitvoer is op CD-rom aanwezig.

Dit TRISCAL-model is ontwikkeld omdat verwacht mag worden dat driedimensionale stroming een sterke invloed heeft op het sedimenttransport en de morfologie van drempels. Voor het TRISCAL-grof model is een schematisatie van de hele Westerschelde (en Schelde tot aan Gent) gebruikt. Het TRISCAL-fijn model bevat maar een gedeelte van de Westerschelde, tussen Baarland en de Hedwigepolder. In het TRISCAL-fijn model liggen de drempels van Hansweert, Valkenisse en Bath.

De verschillen tussen de resultaten uit het TRISCAL-fijn model en de 2DH-modelresultaten wat betreft waterstands- en debietsverloop zijn acceptabel, zeker gezien het aantal aanpassingen dat gedaan is om een werkend 3D-model te verkrijgen. Deze aanpassingen waren onder andere het ontwikkelen van een uitsnede-model, het dichtzetten van droogvallende punten op de rand, de aanpassingen van de bodemschematisatie op 4 punten en het verhogen van de kritische diepte voor droogval van platen.

De verschillen met de HF-radar metingen van de stroomsnelheden aan het oppervlak zijn in het gebied ten noorden en oosten van de Plaat van Ossensisse klein. Maximaal zijn de verschillen in dit gebied 0,25 m/s. Aan de randen en ten zuiden van de Plaat van Ossensisse zijn de verschillen groter. Dit gebied is eigenlijk niet representatief omdat in de metingen fouten zitten. Ook de resultaten van het TRISCAL-grof model komen in het 'betrouwbaarheids'gebied overeen met de HF-radarmetingen. Midden in de geul zijn de verschillen kleiner dan aan de rand.

De presentatie mogelijkheden met behulp van de programma's Animate en Matlab zijn erg groot. In de paragrafen 4.4 en 4.5 zijn hiervan voorbeelden te vinden. Door een goede presentatie van de 3D-resultaten kan het inzicht in de water- en sedimentbeweging en daarmee de morfologie rond drempels en in andere gebieden verhoogd worden. De ruimtelijke variatie van de secundaire stroming in langs- en dwarsrichting is goed aanschouwelijk te maken. Ook komen deze patronen redelijk goed overeen met metingen en met de theorie van bochtstroming, geometrie en Coriolis-effecten. Hopelijk kan tijdens vervolgonderzoek van drempels veel gebruik gemaakt worden van deze programmatuur.

6. Aanbevelingen

Zoals tijdens elk project blijkt, roept elk diepgaand onderzoek meer vragen op dan zij beantwoordt. Ook tijdens dit onderzoek (activiteit B), de bouw van een driedimensionaal model van (een deel van) de Westerschelde was dit het geval. Daarom kunnen voortvloeiend uit deze activiteit, de volgende aanbevelingen gedaan worden:

- De modelresultaten zullen nader onderzocht moeten worden op hun nauwkeurigheid en betrouwbaarheid. Tijdens activiteit B is slechts alleen gekeken naar de overeenkomsten met de HF-radarmetingen van de oppervlakte stroming. Om een goed beeld van de resultaten te krijgen is een vergelijking met andere, dieptevariërende, metingen noodzakelijk. Gedacht kan dan worden aan ADCP, OSM, ELMAR en drijfvermetingen. Daarnaast zal een onderzoek moeten plaatsvinden naar de betrouwbaarheid en geldigheid van deze metingen. Wat is de invloed van zeer lokale variaties in het bodemprofiel of van weersinvloeden ?
- De presentatie mogelijkheden met behulp van Matlab moeten uitgebreid en gestandaardiseerd worden. Inzichtverhogend zal het werken als bijvoorbeeld ook divergentie en convergentie van de stroomlijnen of resultaten per raai gepresenteerd kunnen worden. Eventueel zou een animatie in de tijd van bijvoorbeeld de secundaire stroming daarbij kunnen helpen.
Tevens moeten de tools die ontwikkeld zijn, bruikbaar zijn voor andere personen en andere modellen.
- De resultaten uit het TRISCAL-model zullen vertaald moeten worden naar het initiële sedimenttransport. Van belang is om een idee te krijgen van de fouten die gemaakt worden bij de berekening van het sedimenttransport met een 2DH-model of een Q3D-model.
- Om eventueel de resultaten van het TRISCAL-model te verbeteren kan nog geëxperimenteerd worden met de volgende parameters:
 - reflectiecoëfficiënt
 - returntijd
 - droogvalprocedure
 - windschuifspanning
 - andere turbulentiemodellen

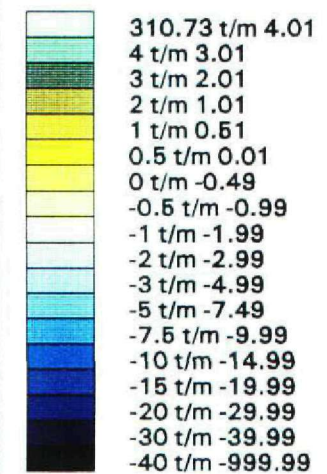
Literatuurlijst

- Banning, G. van, *Roostergeneratie Westerschelde, Kuststrook en Zuidelijke Noordzee. Deel 1: Roostergeneratie Westerschelde*. Emmeloord: Alkyon Hydraulic Consultancy, 1997a
- Banning, G. van, *Roostergeneratie Westerschelde, Kuststrook en Zuidelijke Noordzee. Deel 2: Redesign Kuststrookmodelrooster*. Emmeloord: Alkyon Hydraulic Consultancy, 1997b
- Dam, G., *De vergelijking van HF-radar met andere stromingsgegevens*. RIKZ/OS-97.820x. Middelburg: Rijksinstituut voor Kust en Zee, juli 1997
- Dekker, L., P. Lieveense en C. van der Male, *Calibratie en verificatie SCALDIS100*. RIKZ/AB-94.839x. Middelburg: Rijksinstituut voor Kust en Zee, oktober 1994
- Dekker, L., *Scaldis: Modeloriëntatie, randvoorwaarden, beginvoorwaarden en metingen*. Memo. Rijkswaterstaat Directie Zeeland. september 1993
- EDS, *User's Guide WAQUA*. SIMONA-rapportnr. 92-10. Rijkswaterstaat/Rijksinstituut voor Kust en Zee, januari 1996
- Goede, E.D. De, en J.A.Th.M. van Kester, *Het inbouwen van een operationeel k-ε turbulentiemodel in TRIWAQ*. Rapport nr. Z844.50. Delft: Waterloopkundig Laboratorium (WL), februari 1995
- Jansen, M., *Bouw, Calibratie en Verificatie SCALWEST*. Rapport nr. 97210/1011. Middelburg: Ingenieursbureau Svašek B.V., mei 1997
- Kester, J.A.Th.M. van, *Validatie DELFT3D voor menglaag proef*. Rapport nr. Z810. Delft: Waterloopkundig Laboratorium (WL), 1994
- Lieveense, P., *Waterbewegingsmodel SCALDIS400*. Rapport nr. AX 94.072. Middelburg: Rijkswaterstaat Directie Zeeland, december 1994
- Rijn, L.C. Van, *Principles of Fluid Flow and Surface Waves in Rivers, Estuaries, Seas, and Oceans*. Utrecht: Universiteit Utrecht, 1990
- Stelling, G.S., J.A.Th.M. van Kester en L.J.M. Hulsen, *3D-numerieke modellering Haringvlietsluizen*. Rapport nr. Z686. Delft: Waterloopkundig Laboratorium (WL), 1994
- Verbeek, H., *Morfologisch onderzoek van de Westerschelde, een zoektocht naar de mogelijkheden*. Werkdocument RIKZ/OS-96.814x. Middelburg: Rijksinstituut voor Kust en Zee, mei 1996
- Vriend, H.J. De, *A Mathematical model of steady flow in curved shallow channels*. Comm. on Hydraulics, Delft, Technische Universiteit Delft. rept 76-1, 1976

Rooster Uitsnede

Bijlage I.1

Legenda
meters

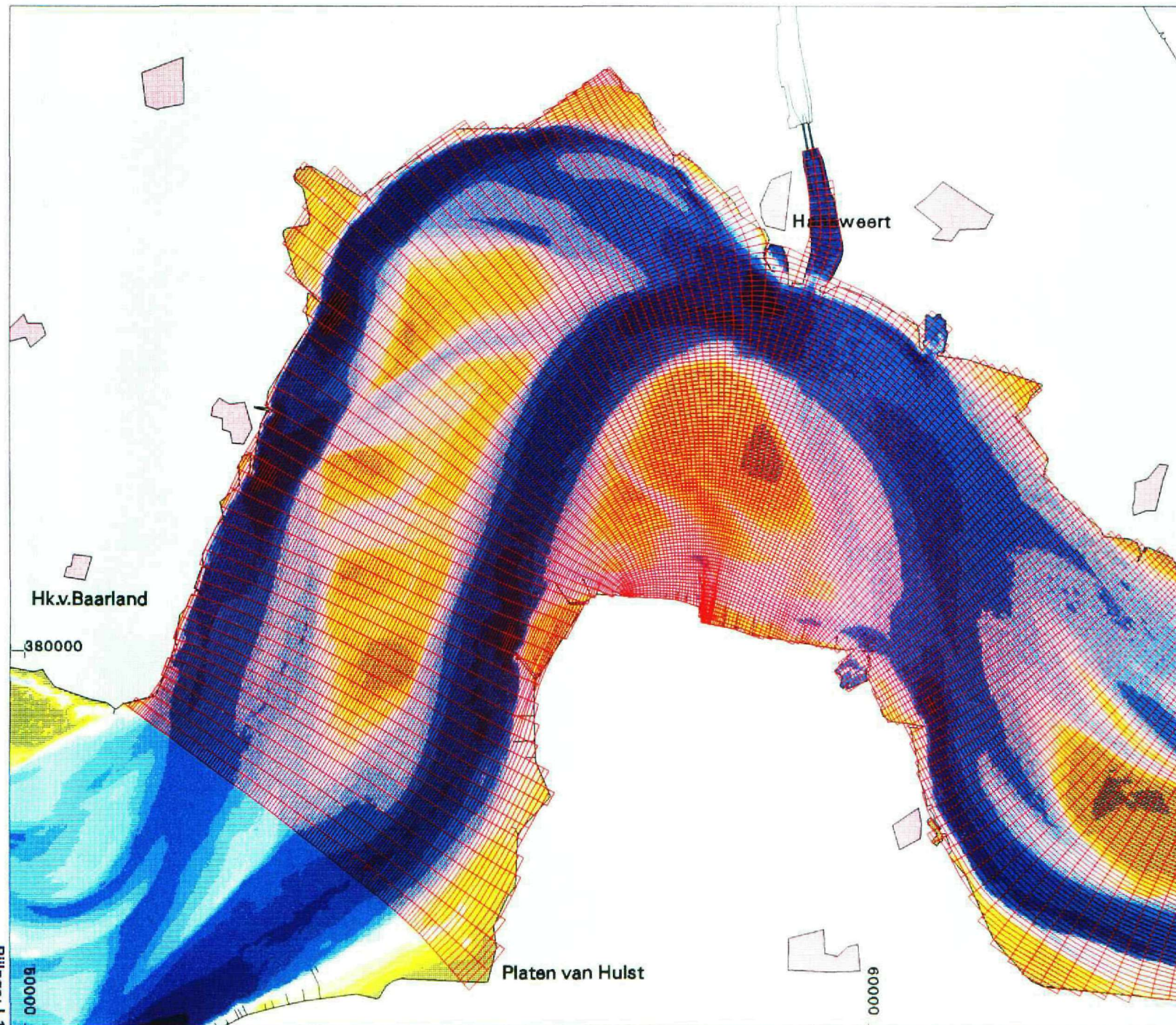


Schaal: 1:65.000

Verdpleping

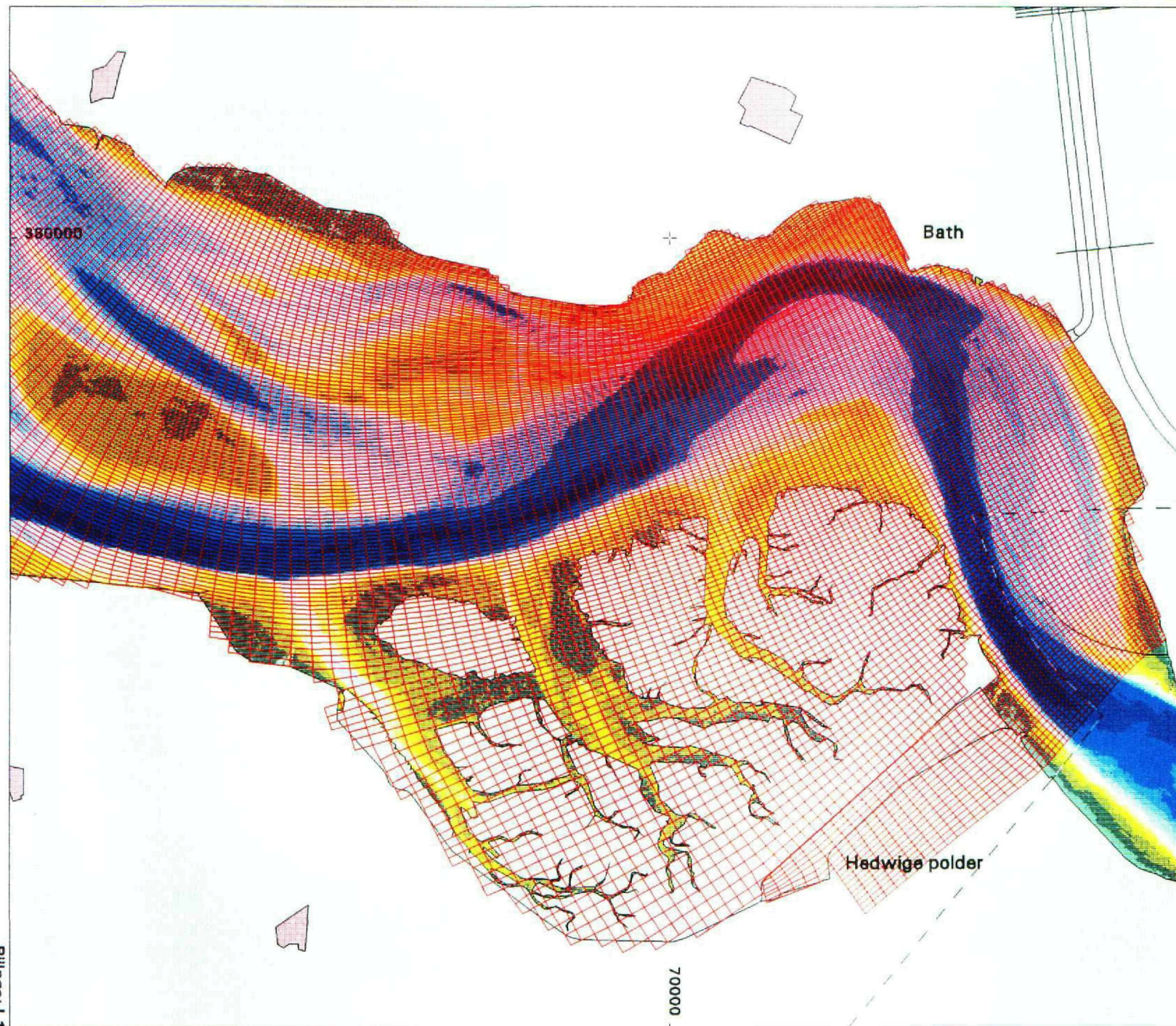


Rijksinstituut voor Kust en Zee
Rijkswaterstaat

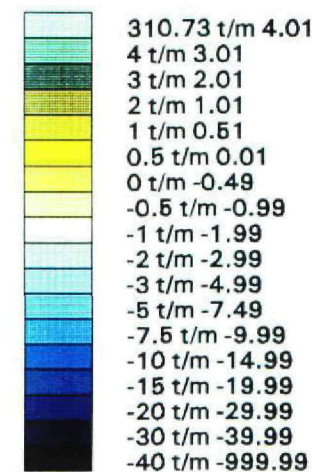


Rooster Uitsnede

Bijlage I.1



Legenda meters



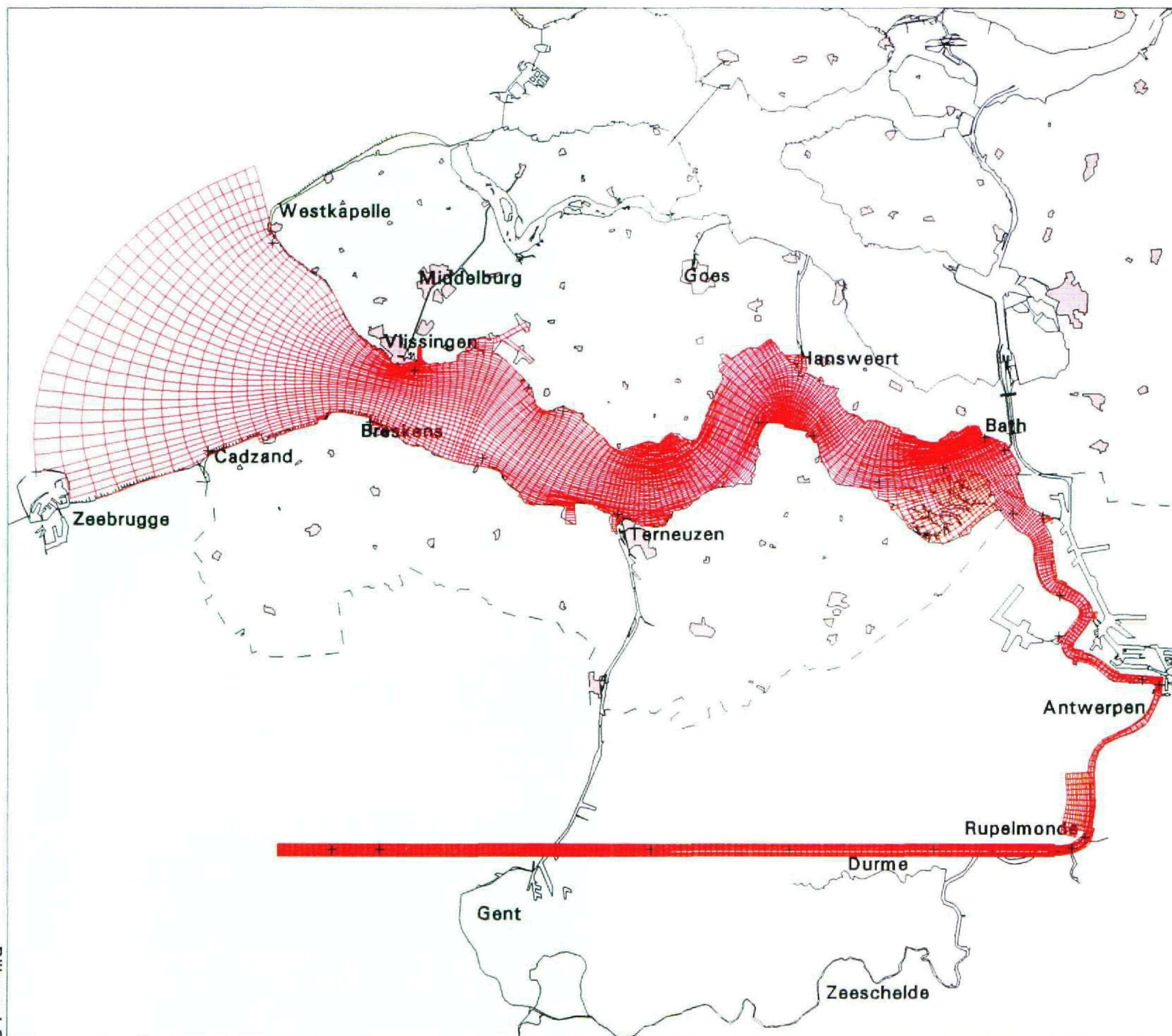
Schaal: 1:65.000

Verdieping



Rijksinstituut voor Kust en Zee
Rijkswaterstaat

Bijlage 1.2

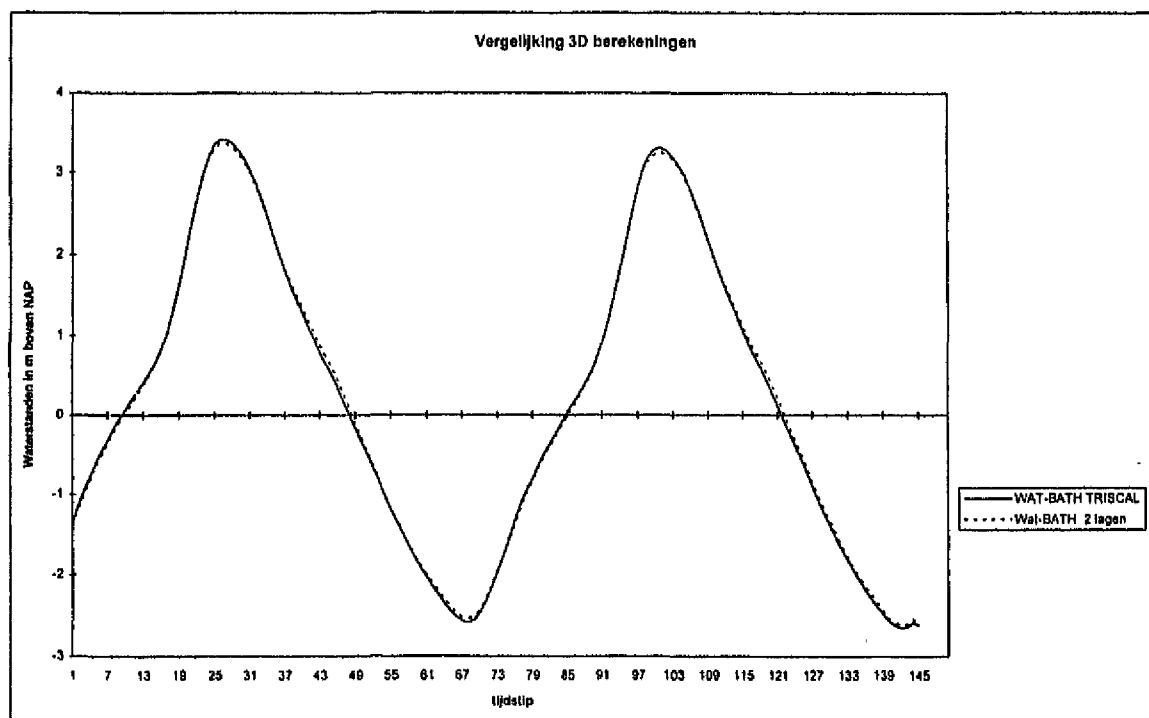
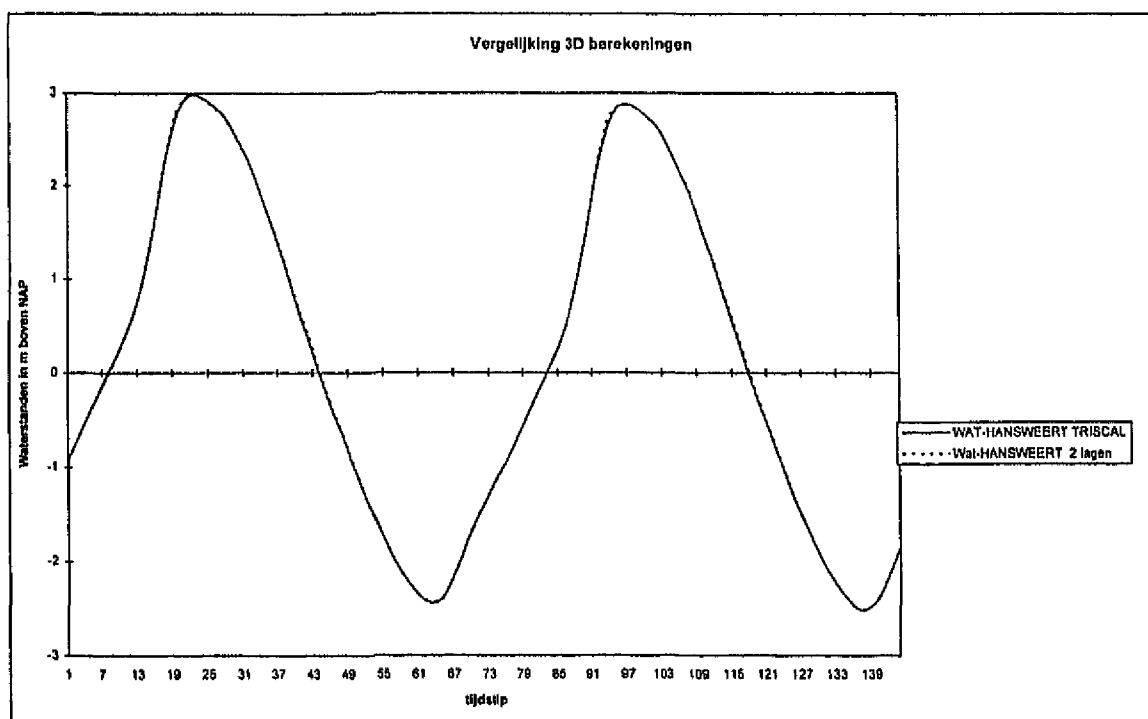


Schaal: 1:413.000

Verdieping

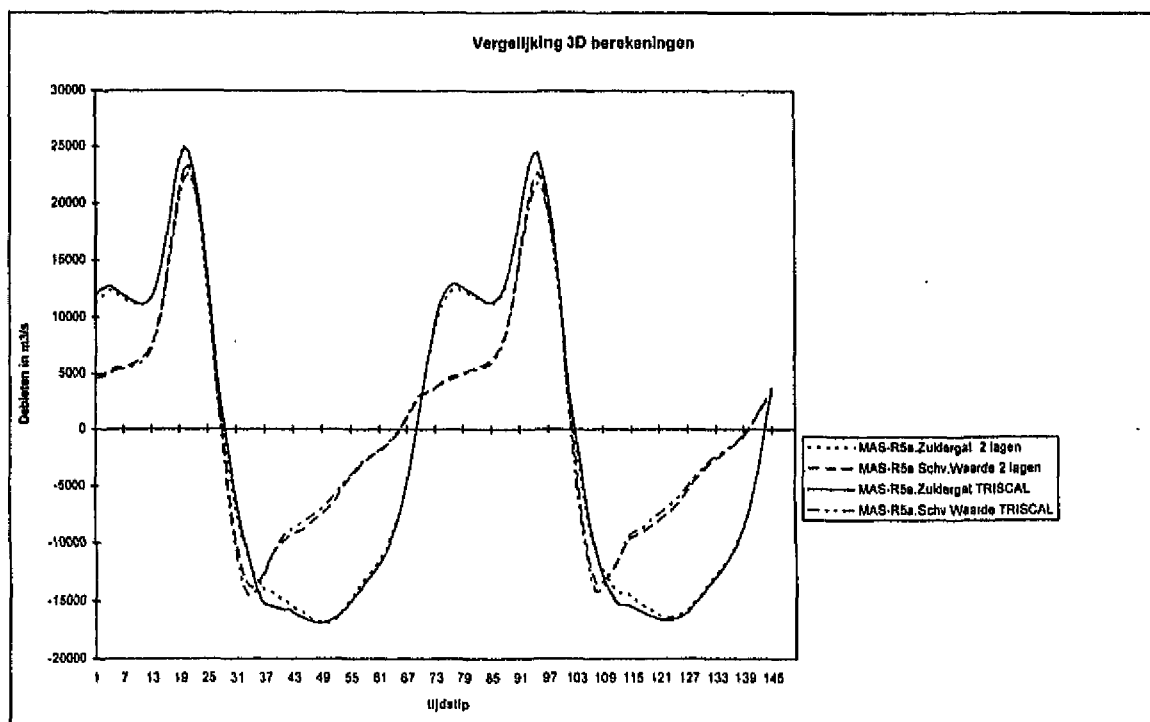
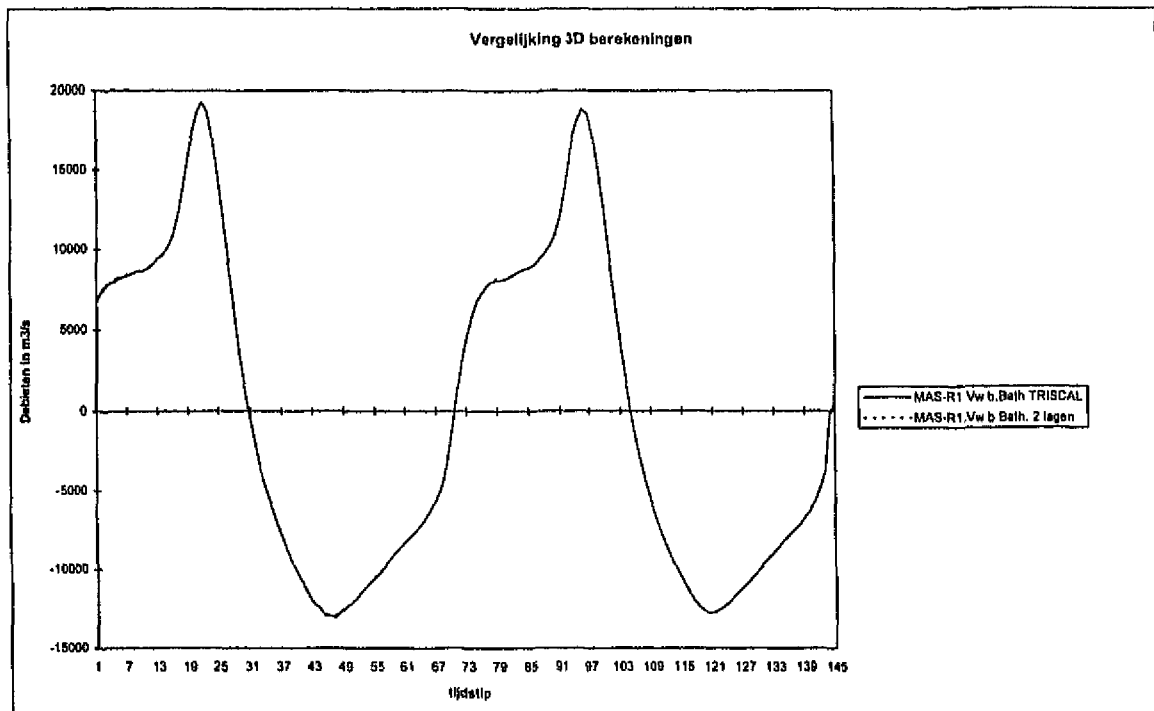
Rijksinstituut voor Kust en Zee
Rijkswaterstaat

Bijlage II.1 Verschil in waterstanden tussen 2 lagen-model en 7 lagen-model

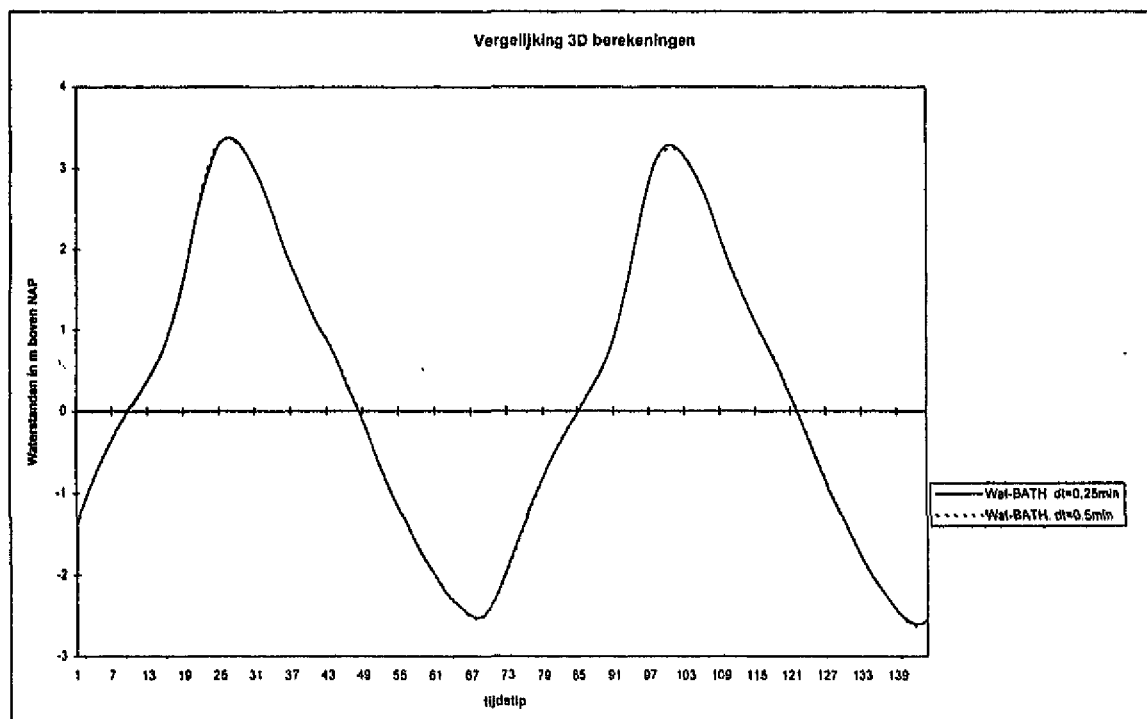
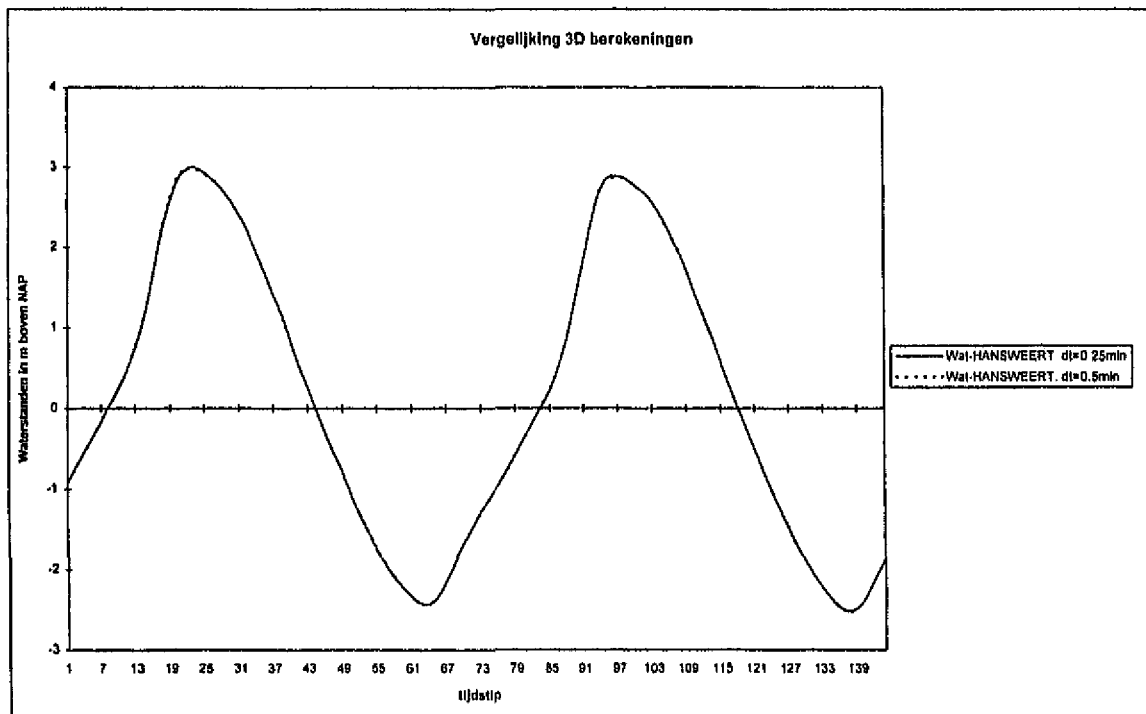


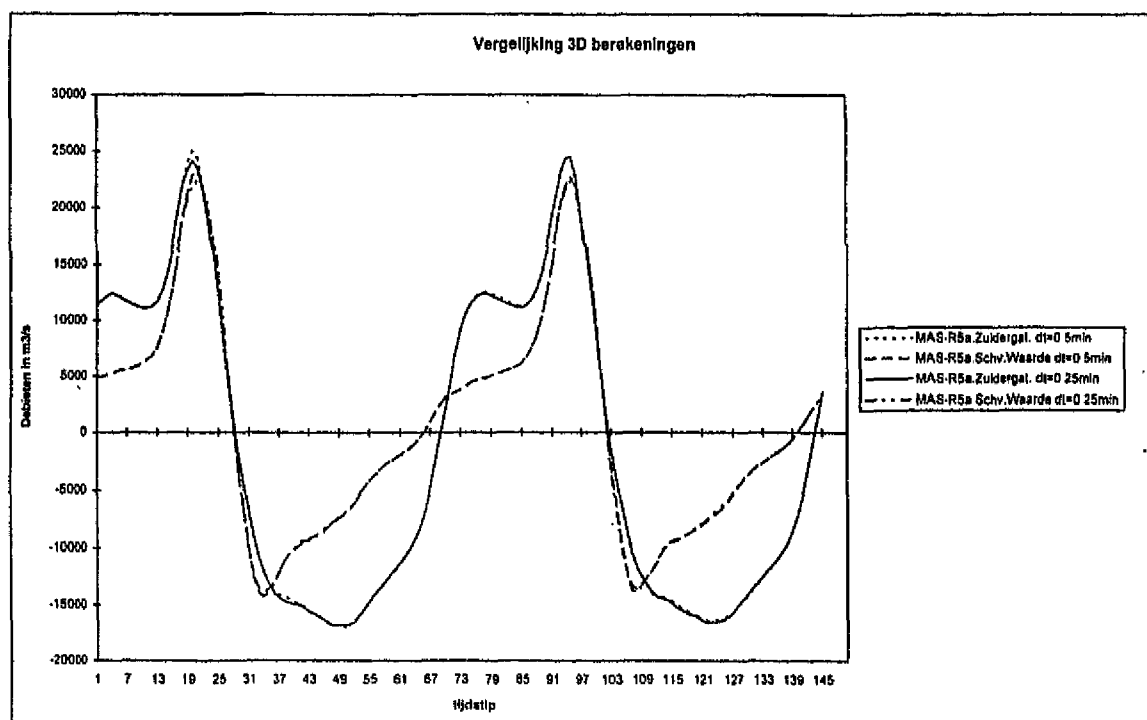
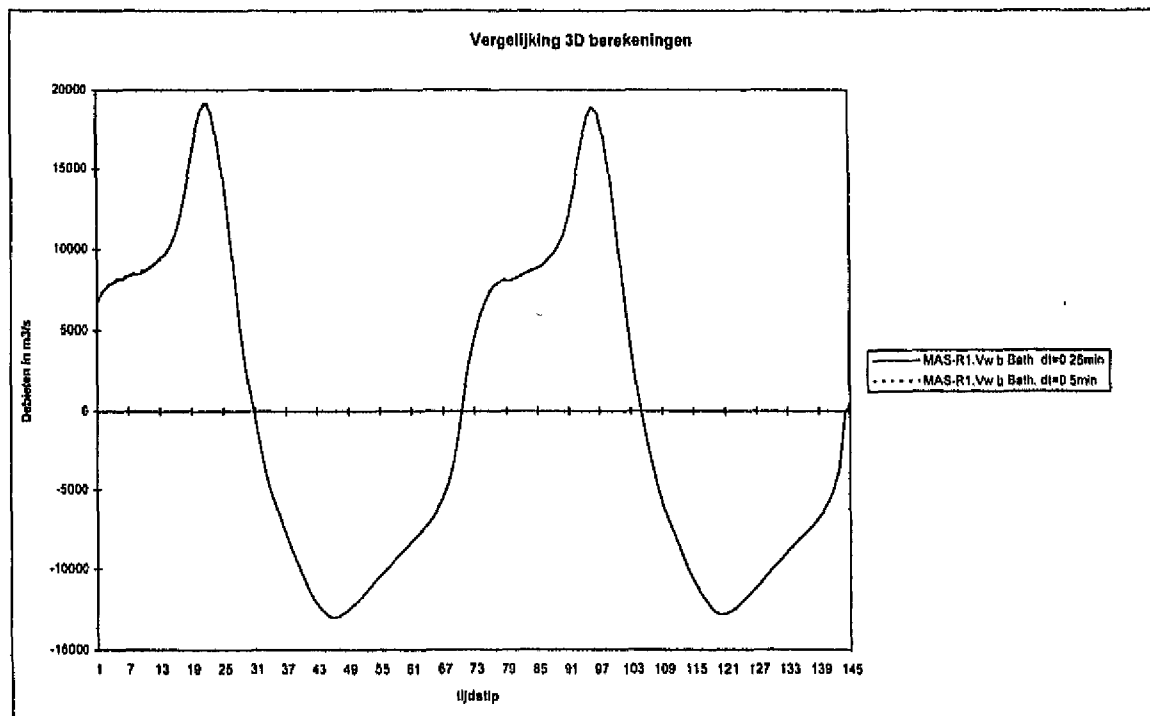
Bijlage II.2

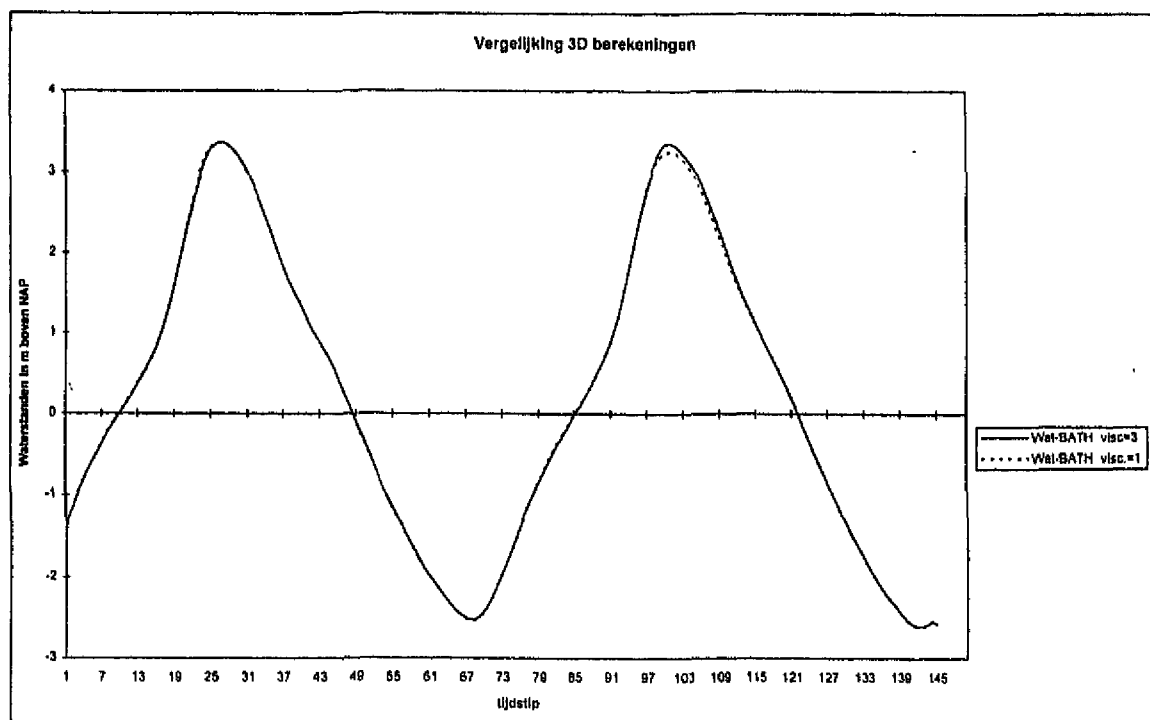
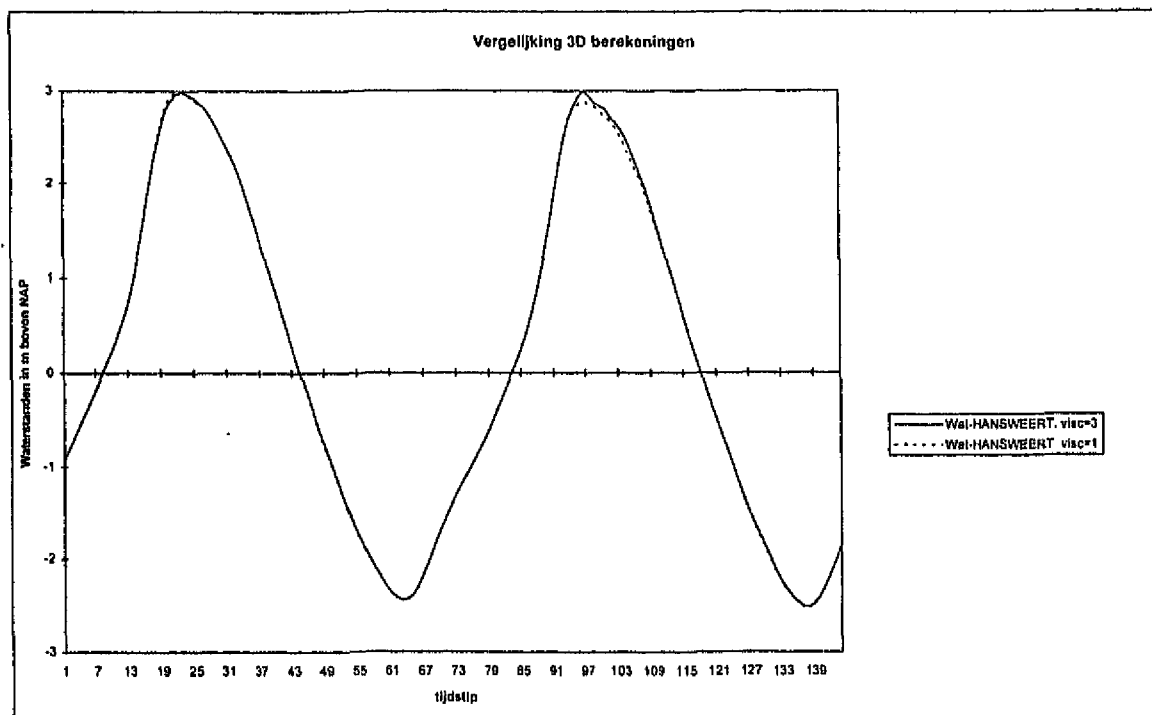
Verschil in debieten tussen 2 lagen-model en 7 lagen-model

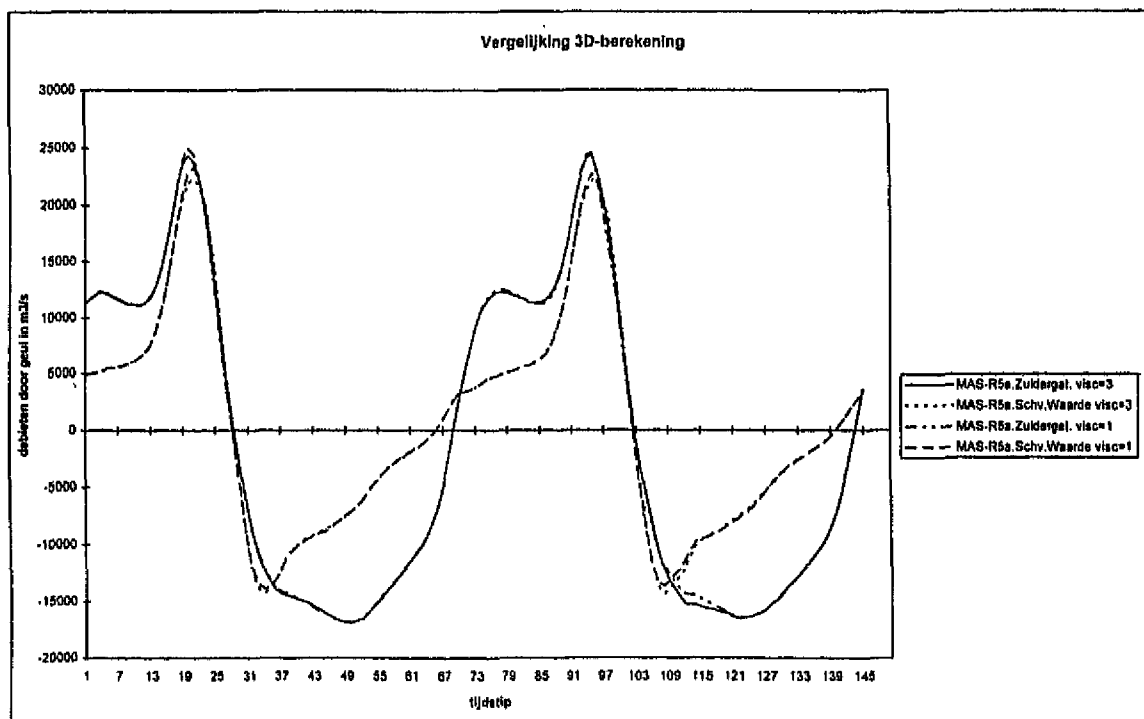
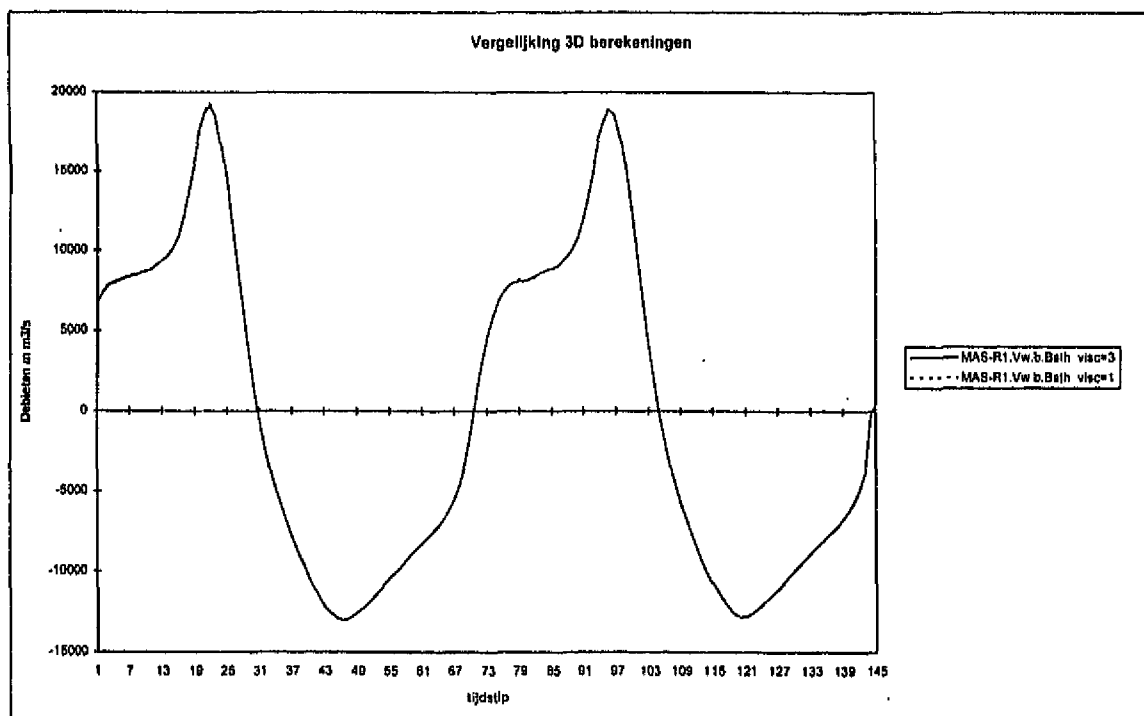


Bijlage III.1

Verschil in waterstanden tussen $dt=0.25$ min en $dt=0.5$ min.

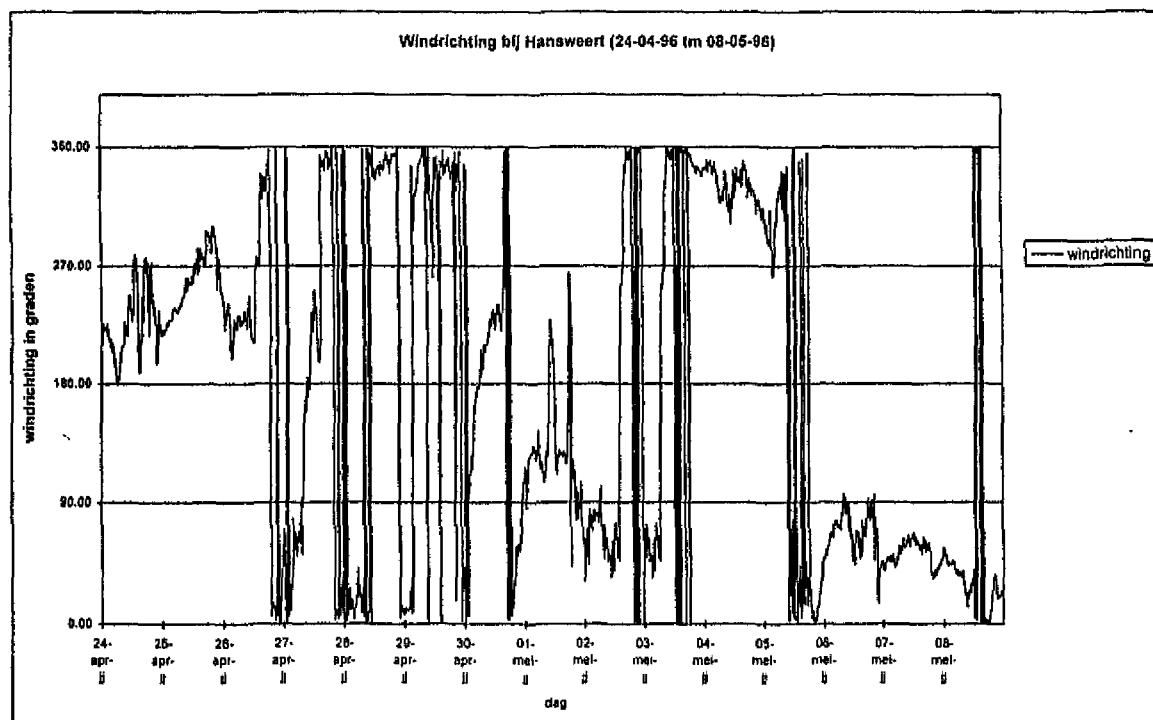
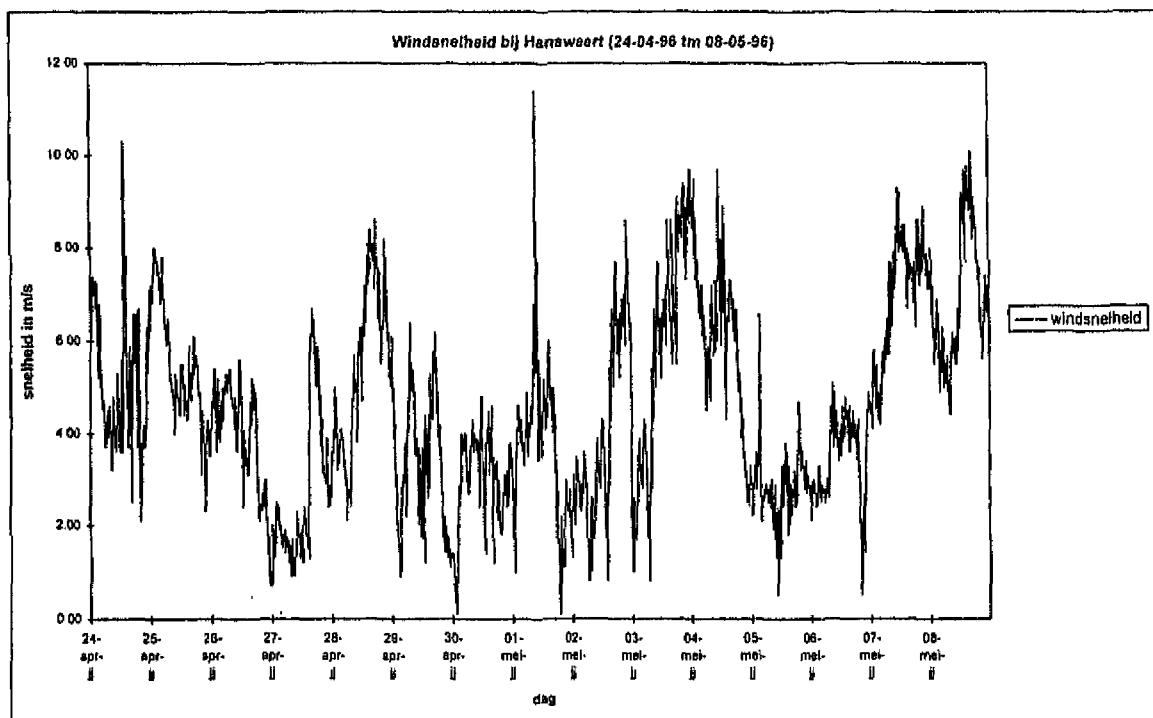
Bijlage III.2 Verschil in debieten tussen $dt=0.25$ min en $dt=0.5$ min.

Bijlage IV.1 Verschil in waterstanden tussen viscositeit 1 m²/s en 3 m²/s

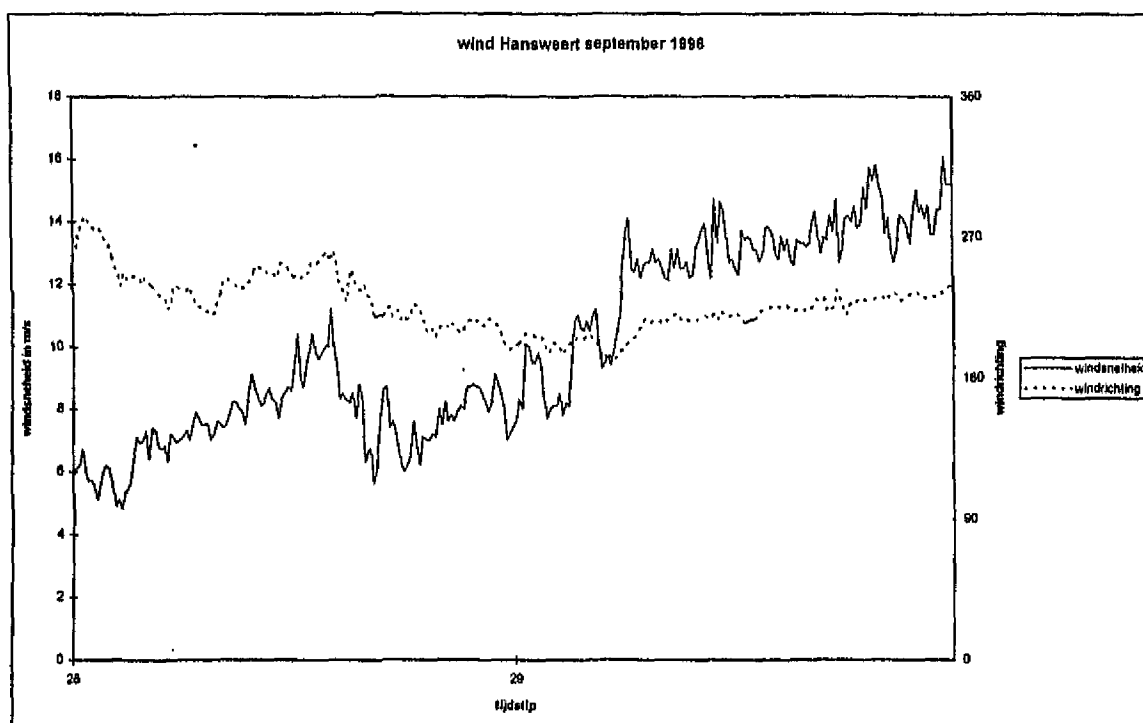
Bijlage IV.2 Verschil in debieten tussen viscositeit 1 m²/s en 3 m²/s

Bijlage V.1

Windsnelheid en -richting bij Hansweert tijdens periode 25-04 t/m 08-05-96

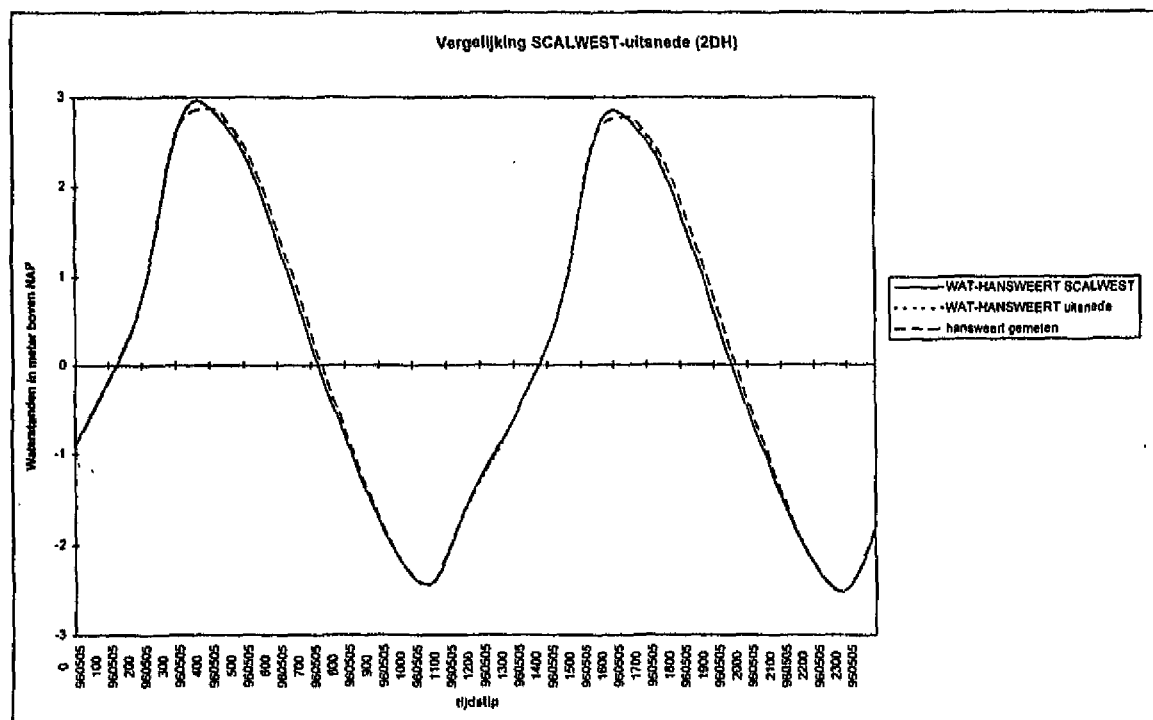
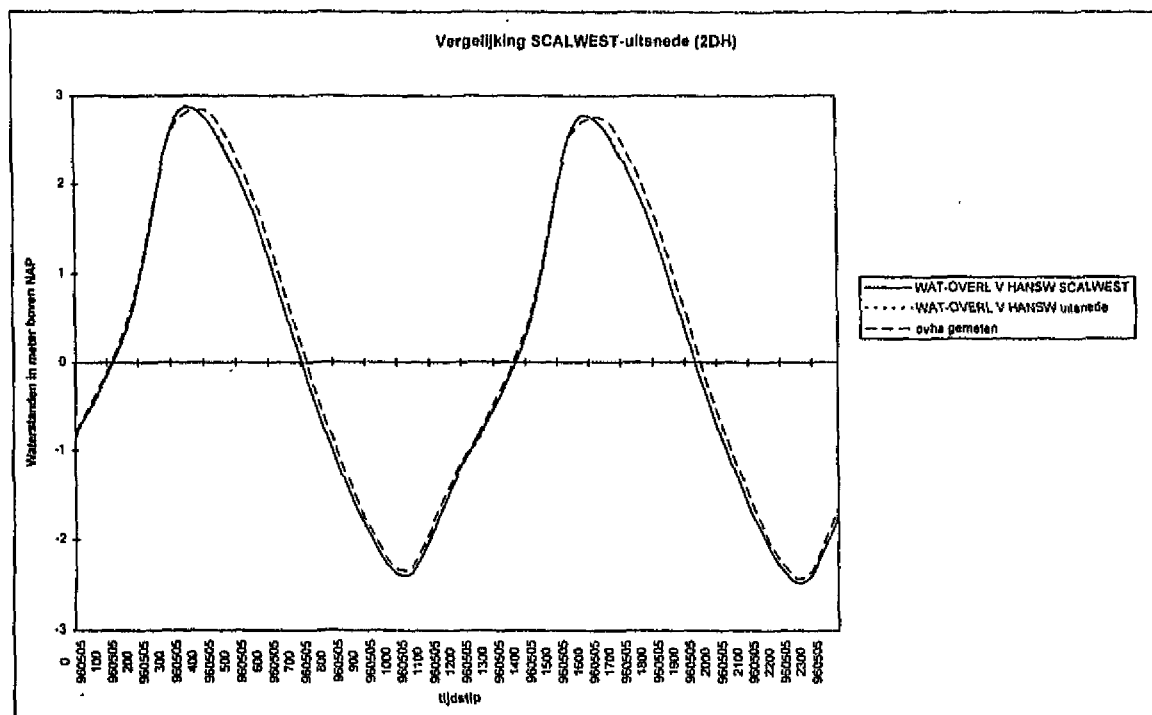


Bijlage V.1 Windsnelheid en -richting bij Hansweert tijdens periode 28/29-09-96



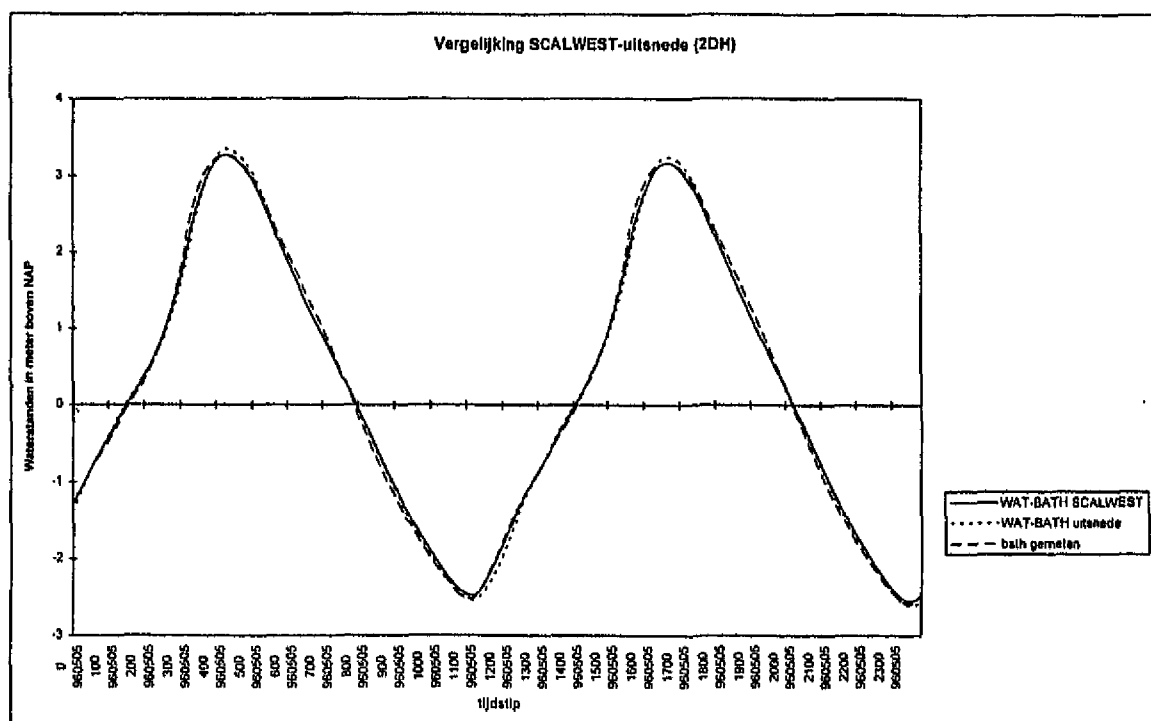
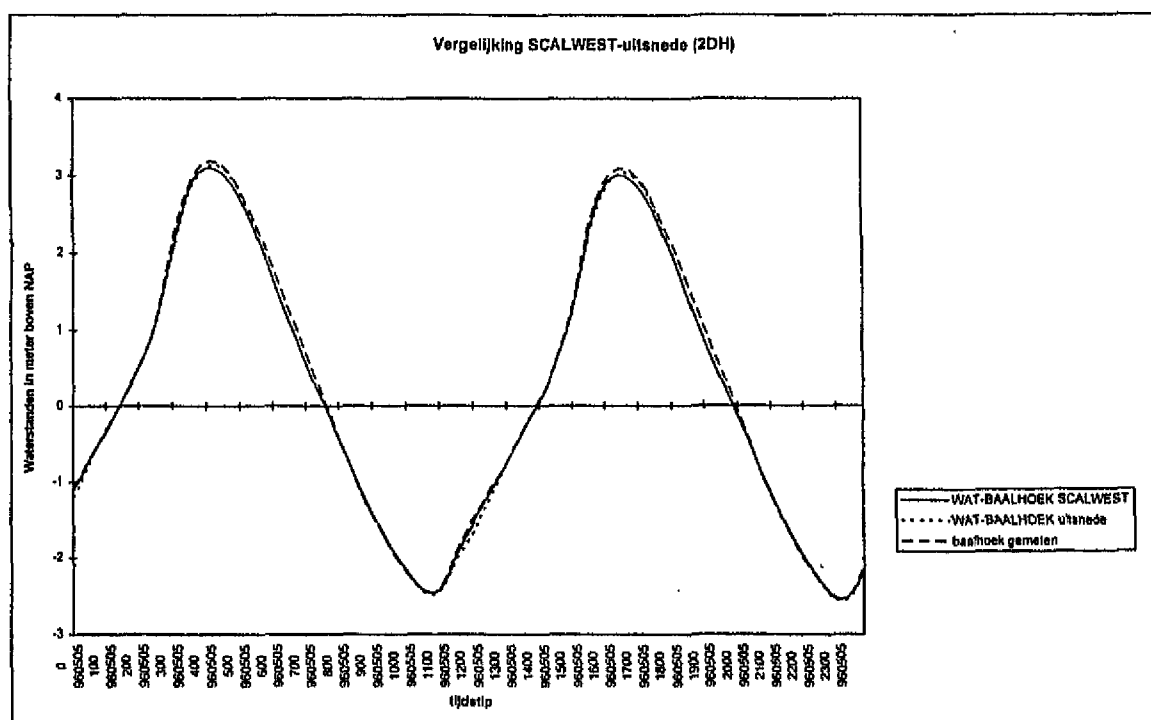
Bijlage VI

Verschil in waterstanden tijdens springtij tussen SCALWEST en uitsnede



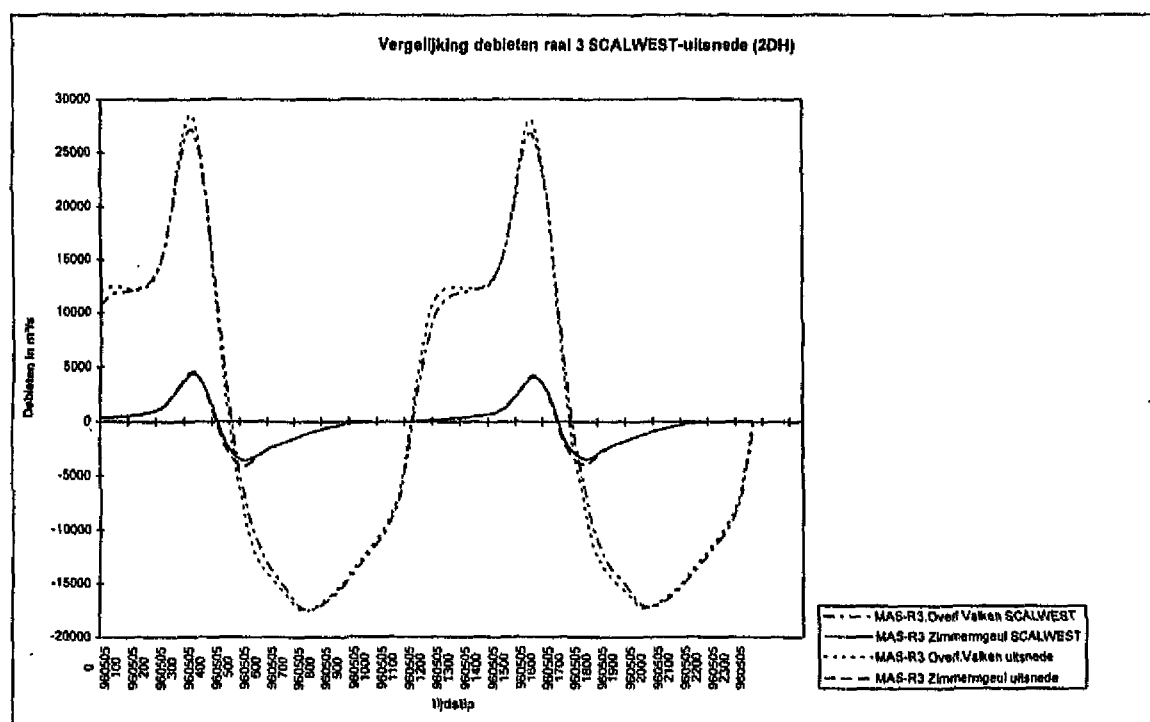
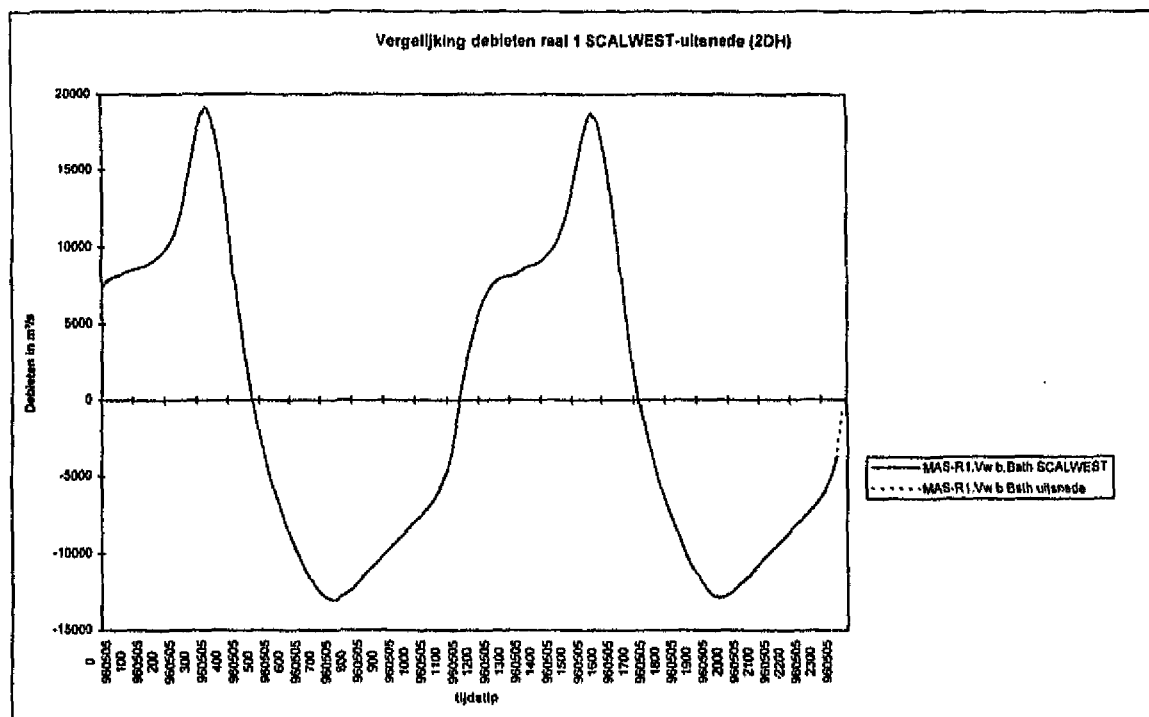
Bijlage VI

Verschil in waterstanden tijdens springtij tussen SCALWEST en uitsnede



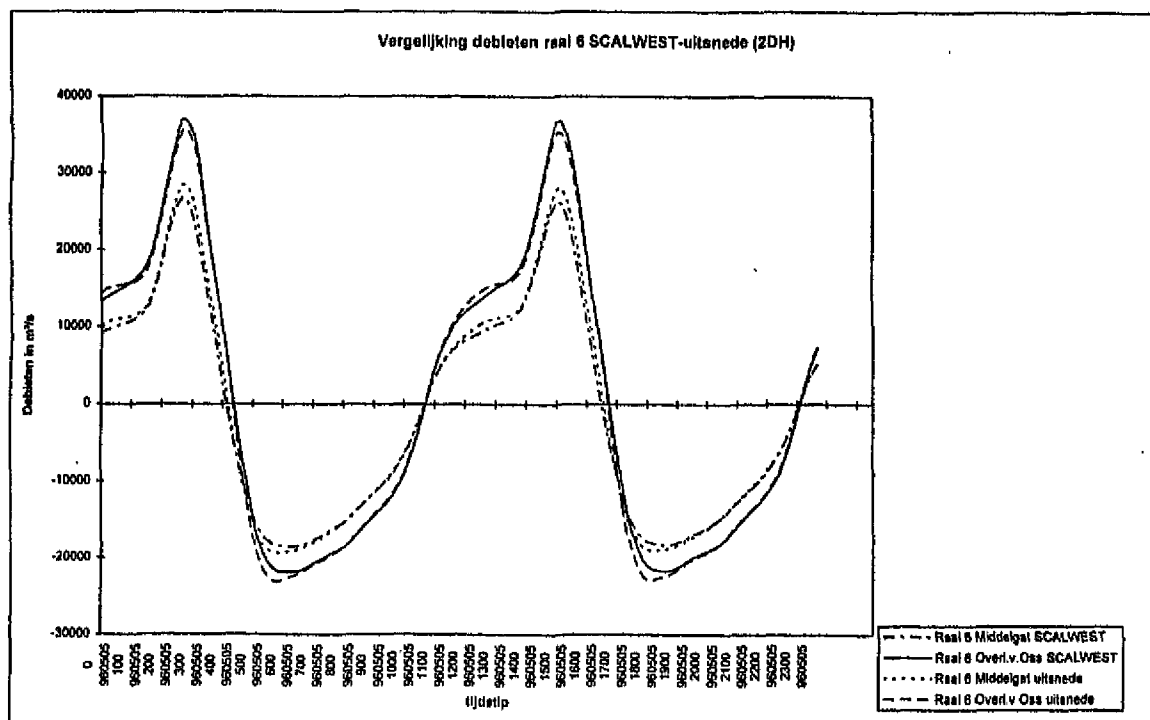
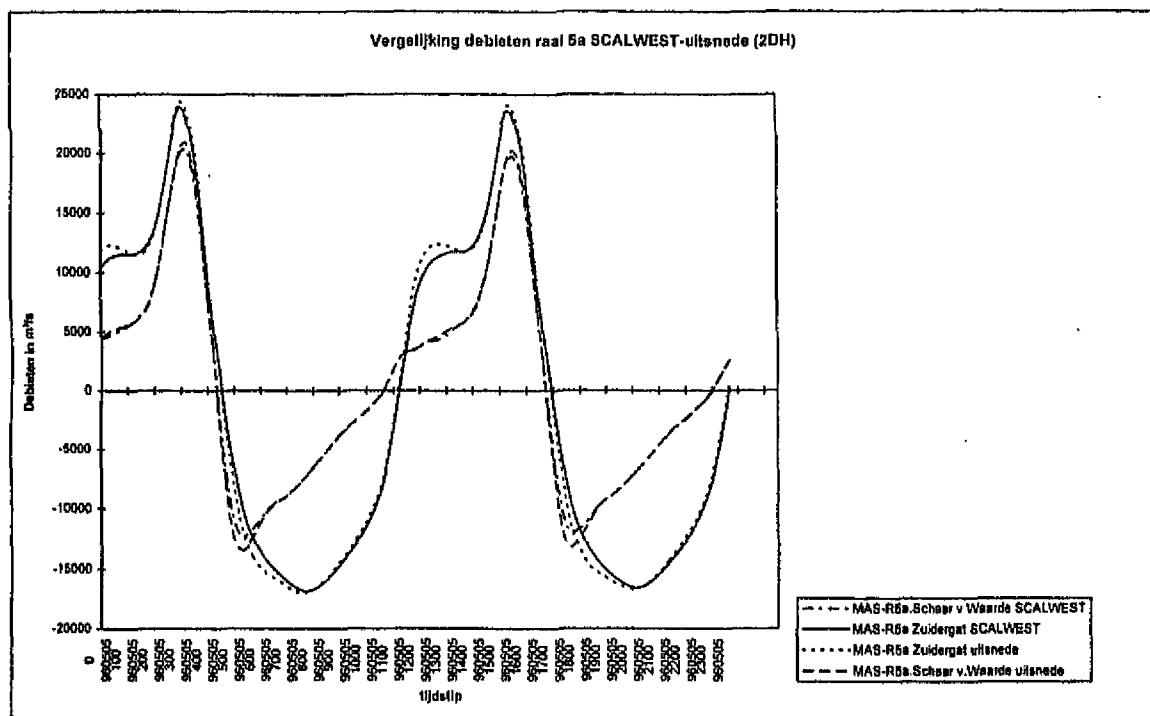
Bijlage VII

Verschil in debieten tijdens springtij tussen SCALWEST en uitsnede



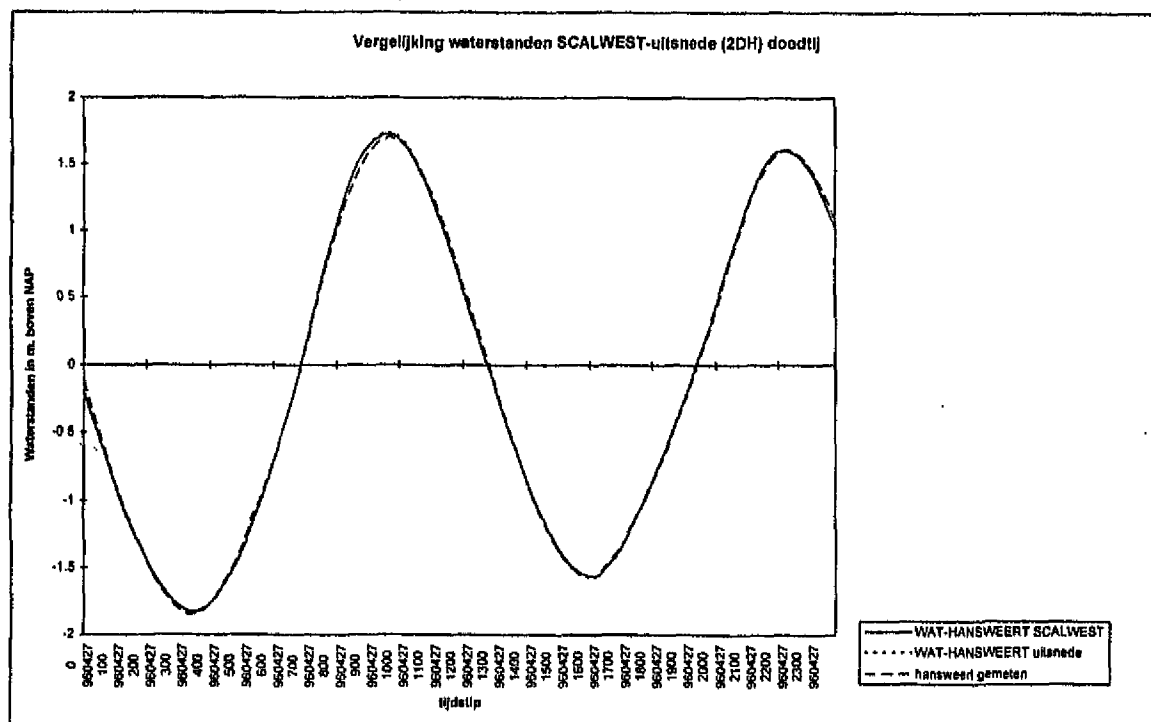
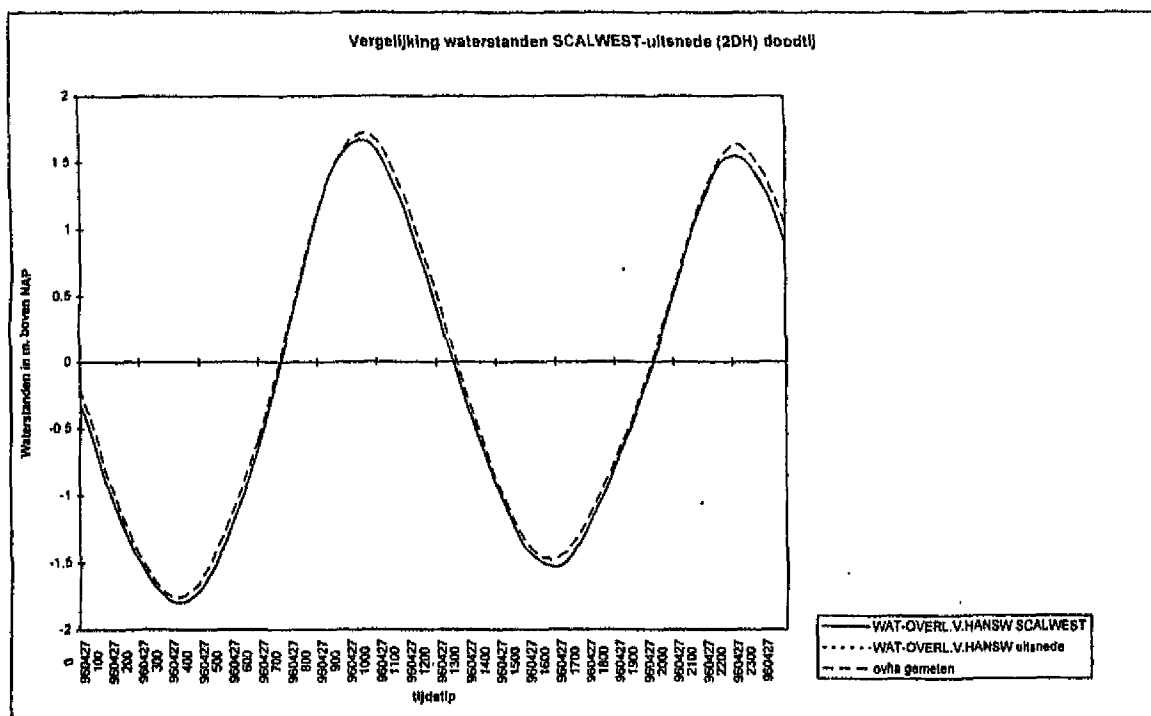
Bijlage VII

Verschil in debieten tijdens springtij tussen SCALWEST en uitsnede



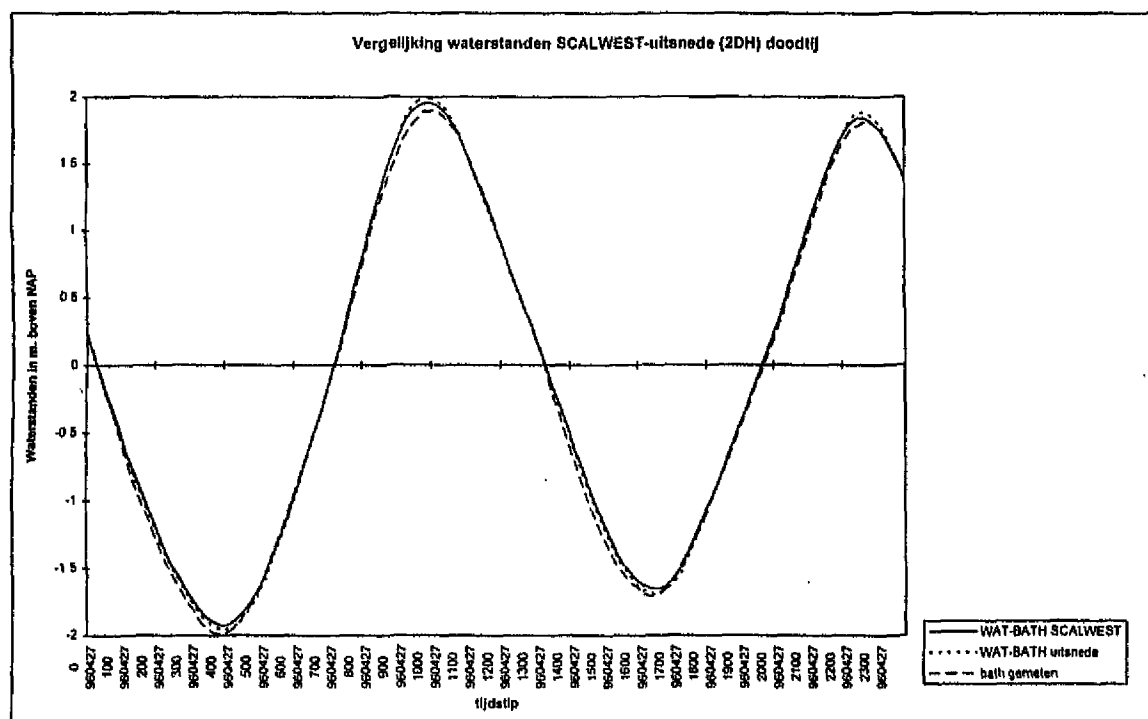
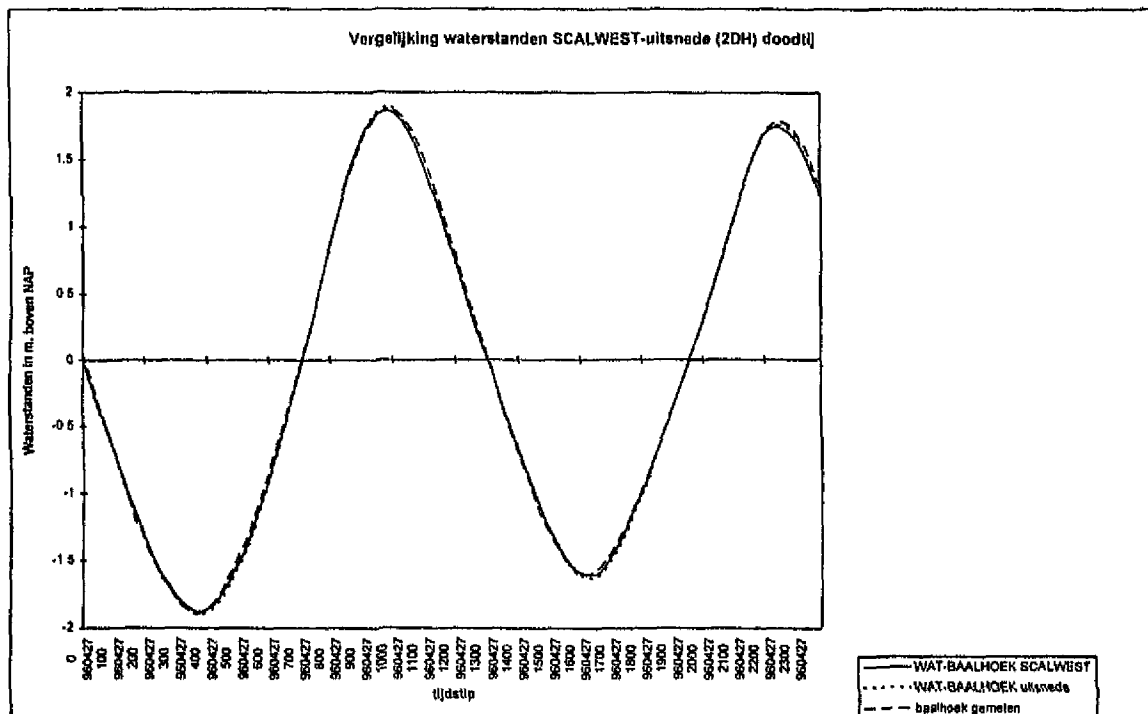
Bijlage VIII

Verschil in waterstanden tijdens doodtij tussen SCALWEST en uitsnede



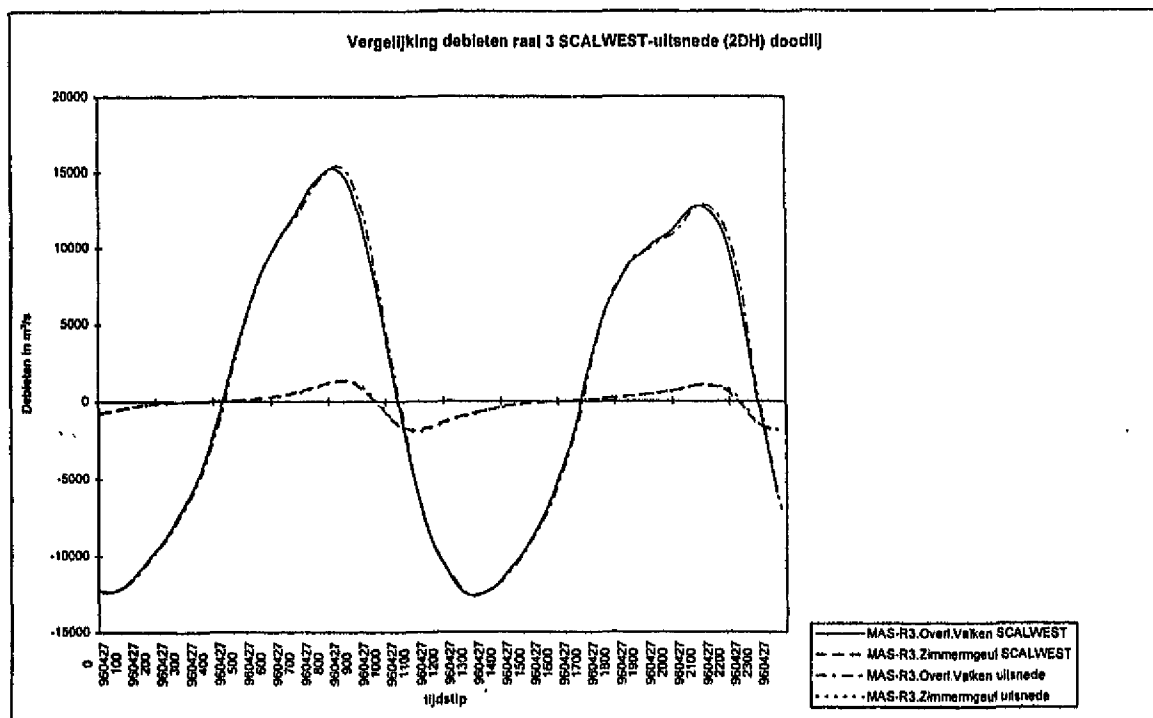
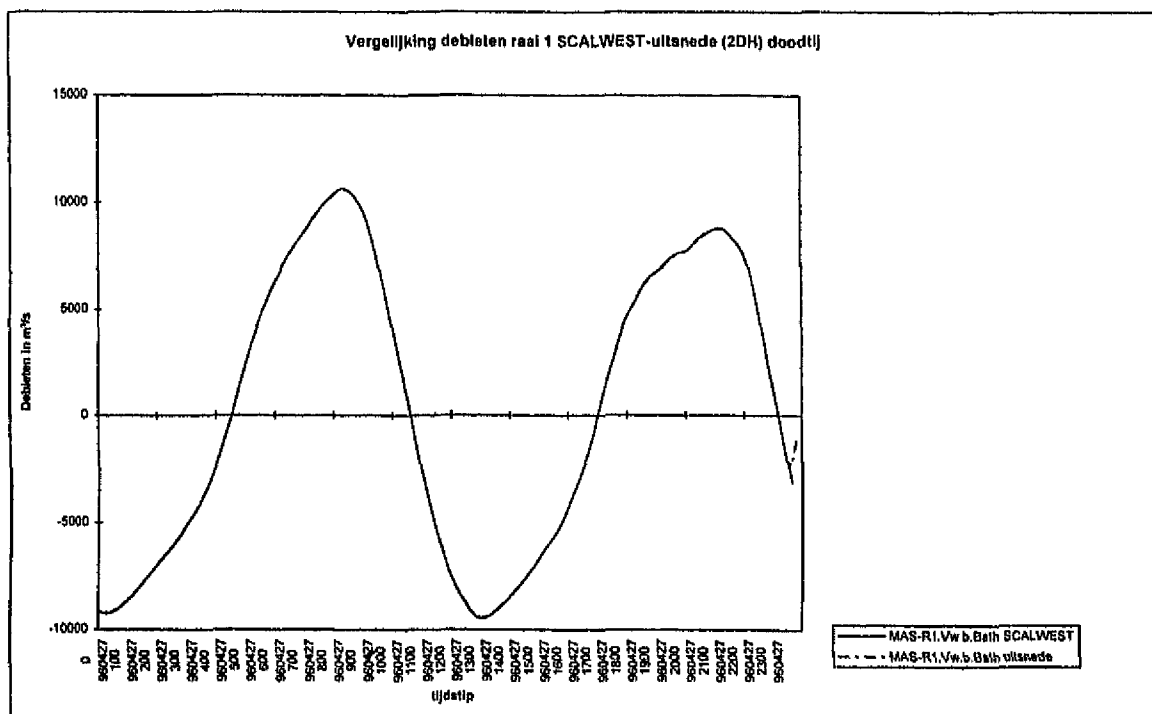
Bijlage VIII

Verschil in waterstanden tijdens doottij tussen SCALWEST en uitsnede



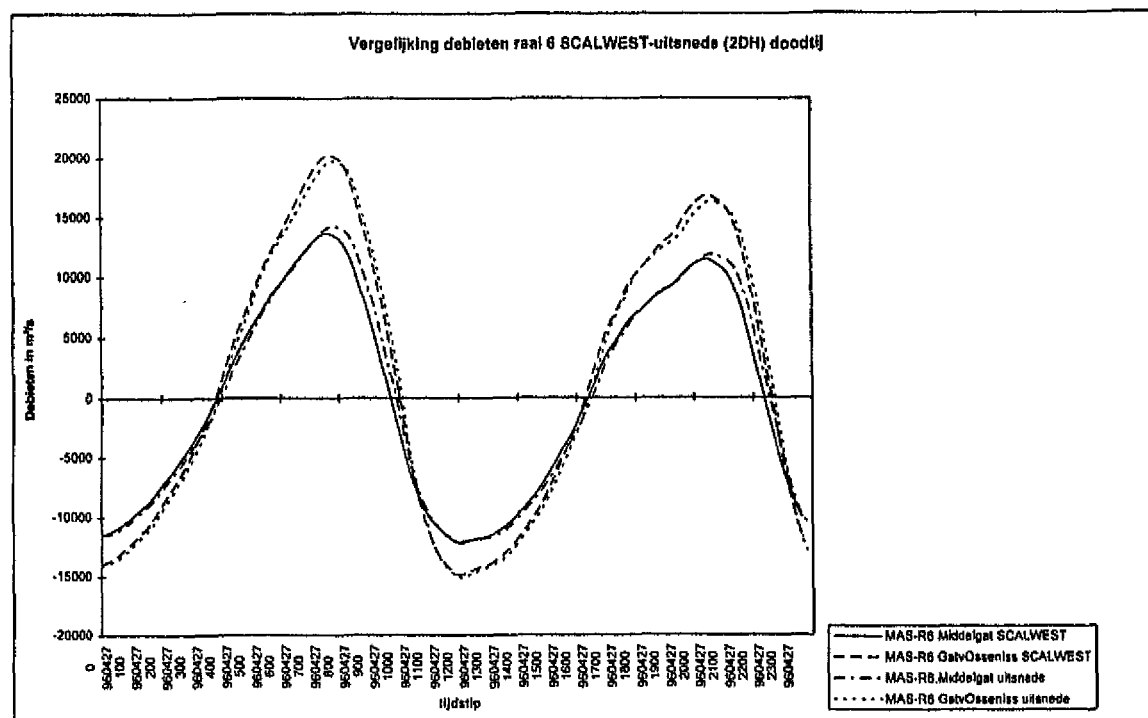
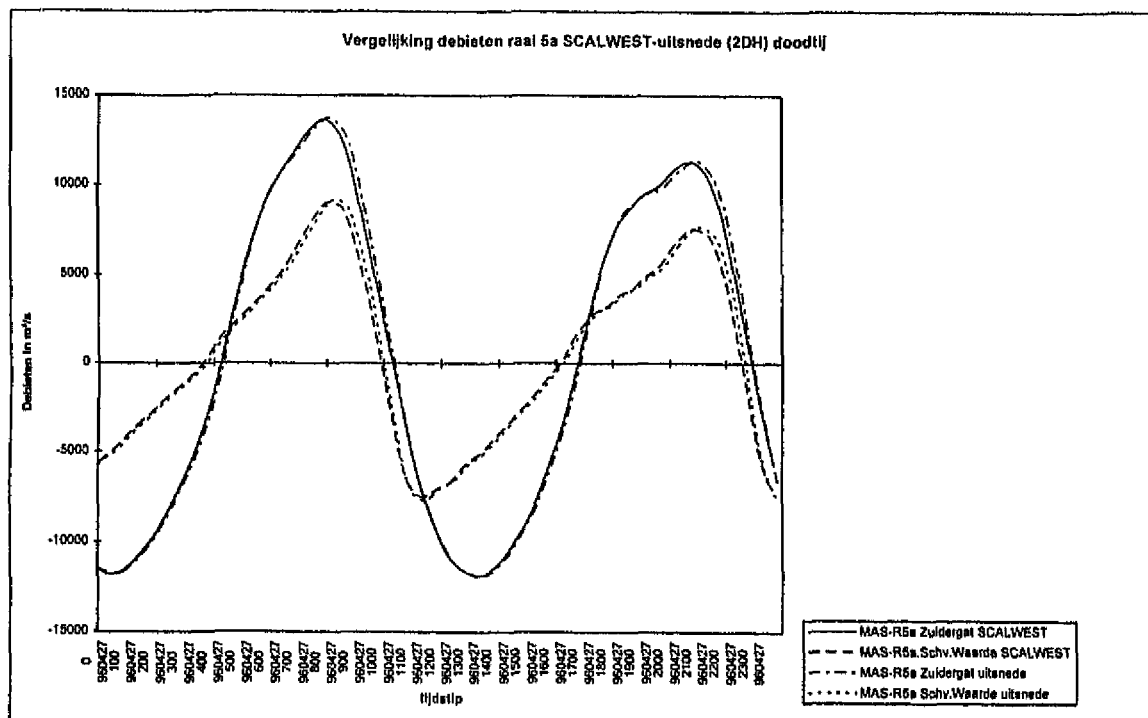
Bijlage IX

Verschil in debieten tijdens doordij tussen SCALWEST en uitsnede

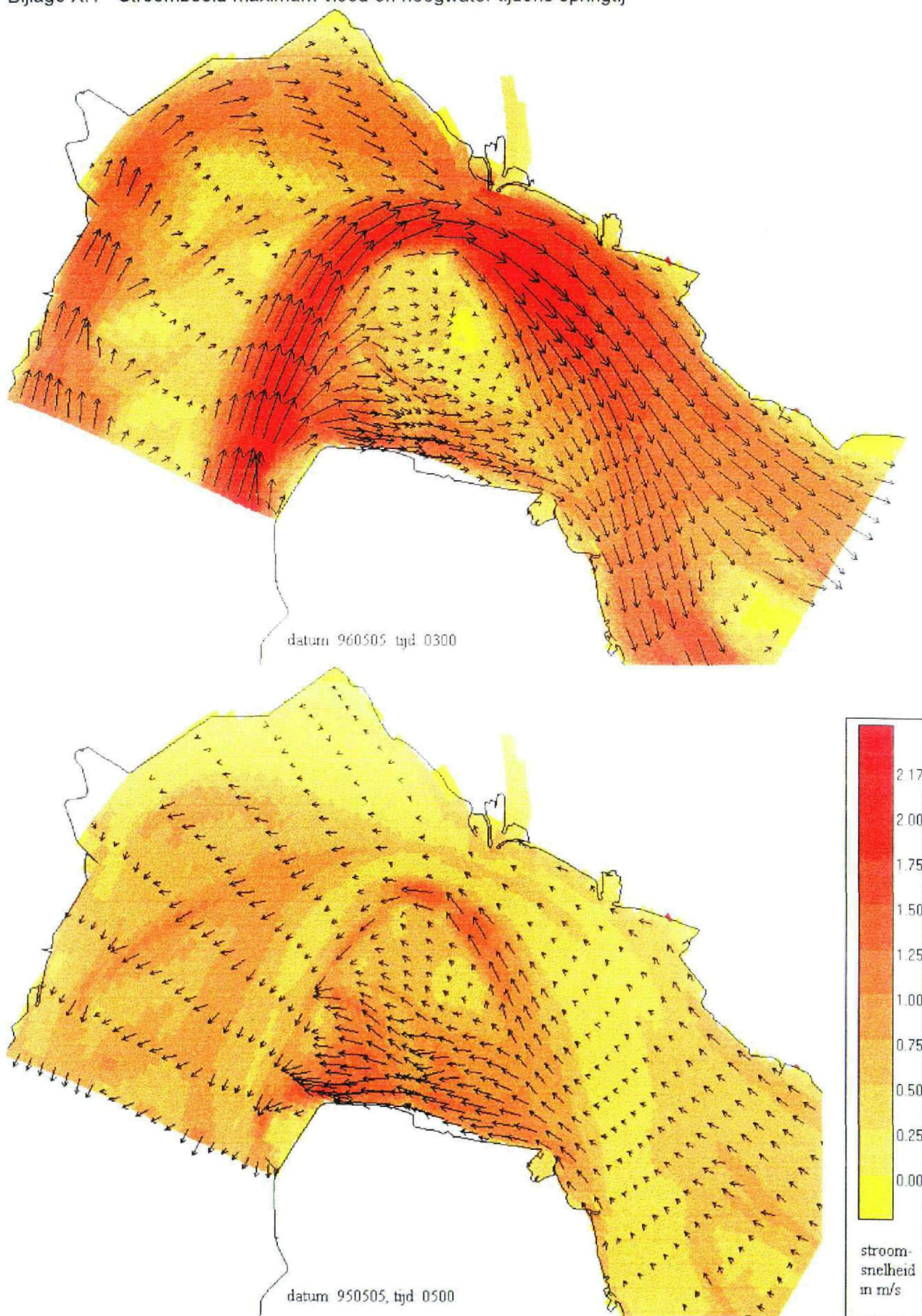


Bijlage IX

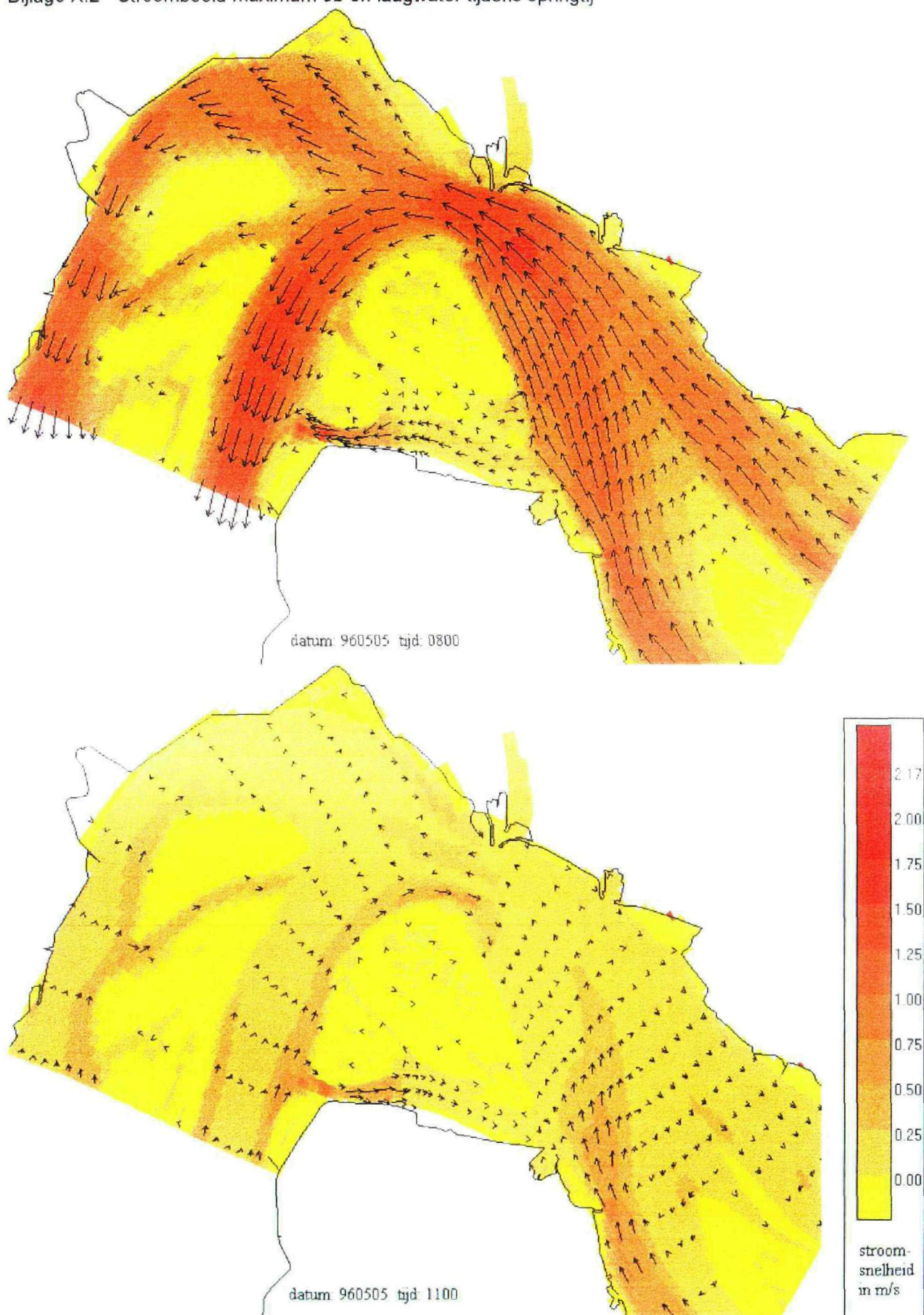
Verschil in debieten tijdens doottij tussen SCALWEST en uitsnede



Bijlage X.1 Stroombeeld maximum vloed en hoogwater tijdens springtij

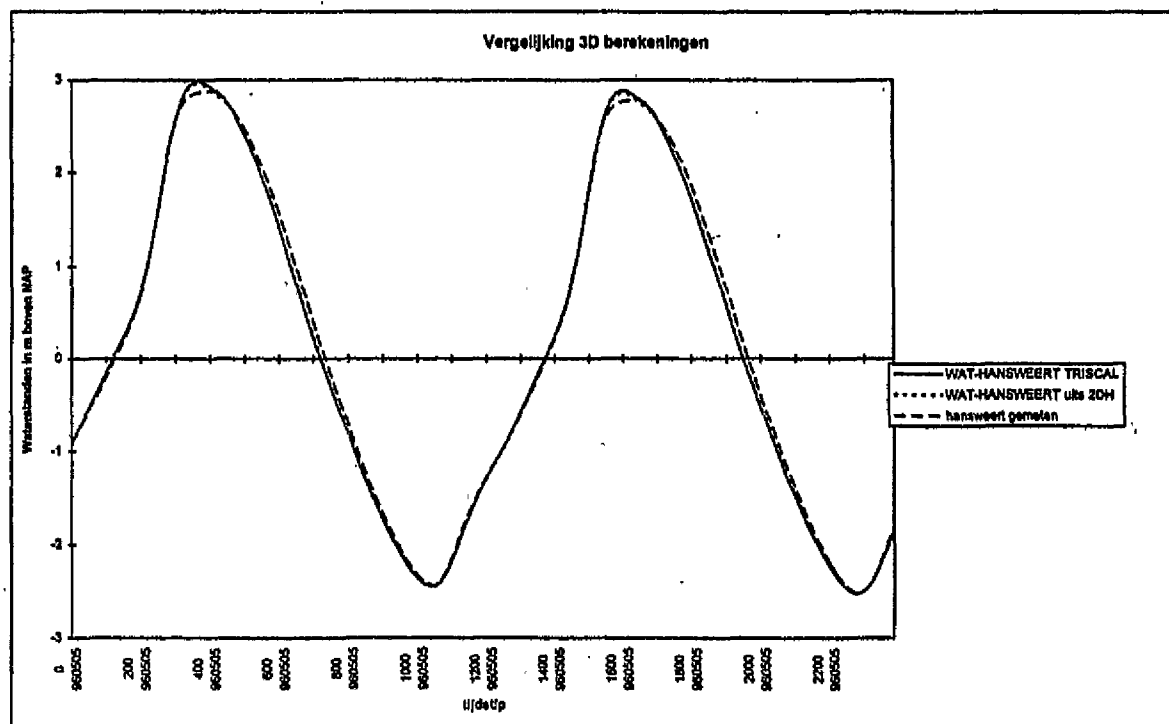
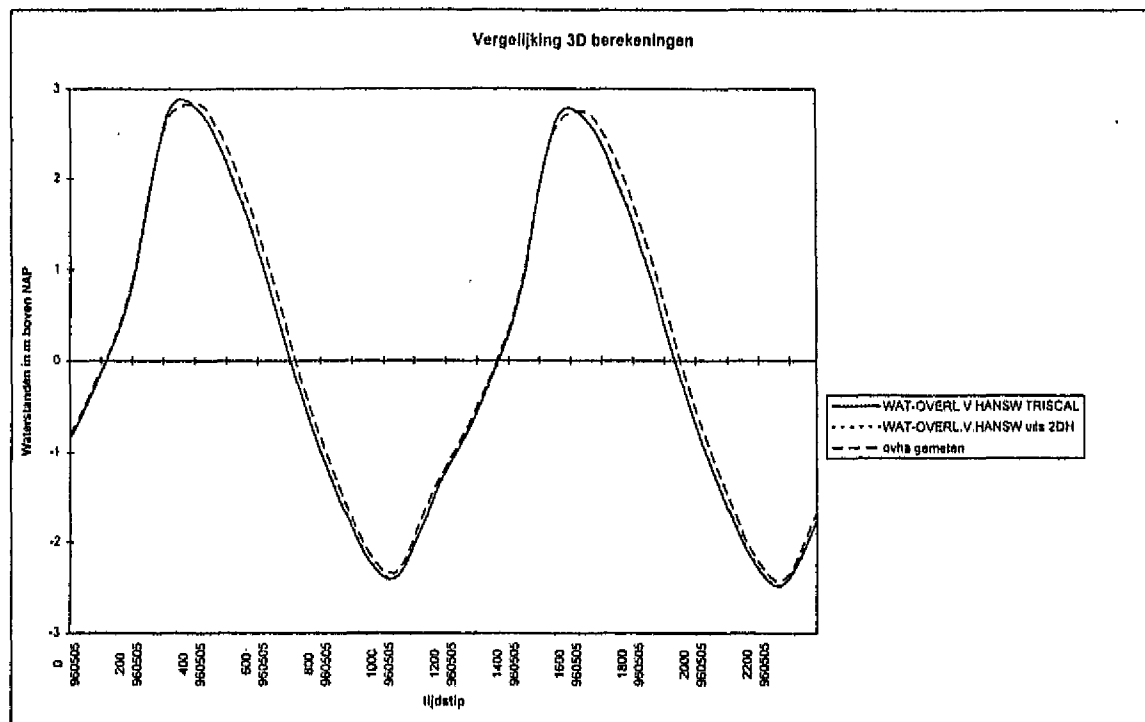


Bijlage X.2 Stroombeeld maximum eb en laagwater tijdens springtij



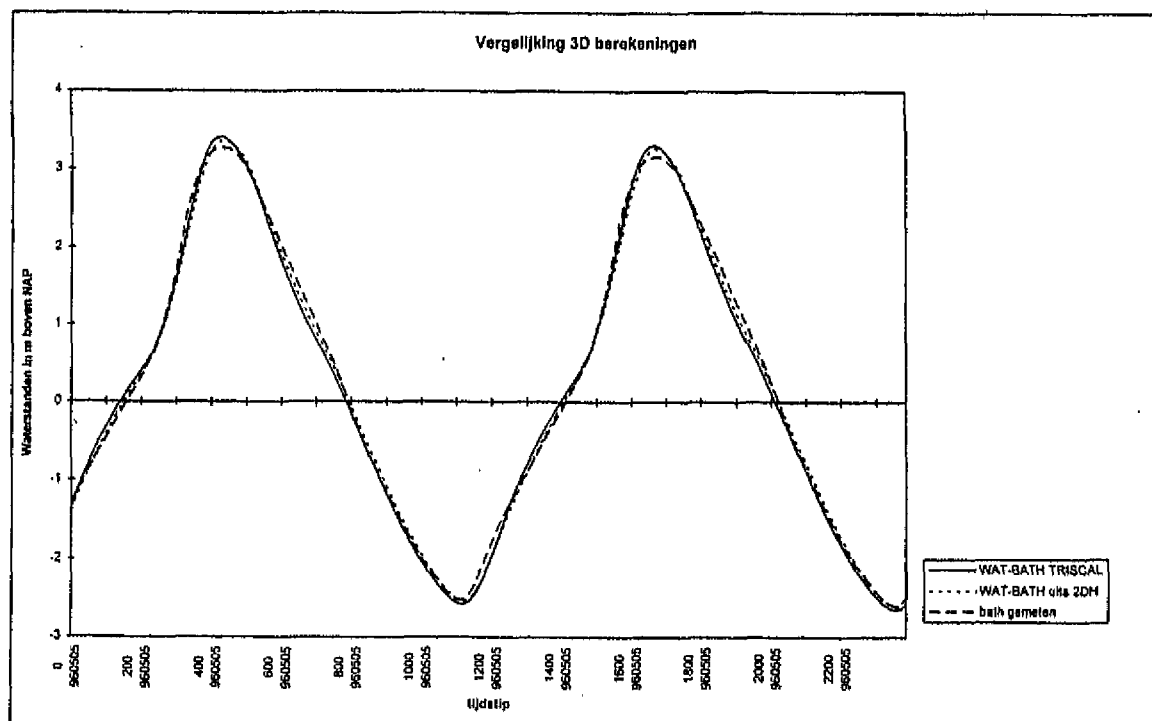
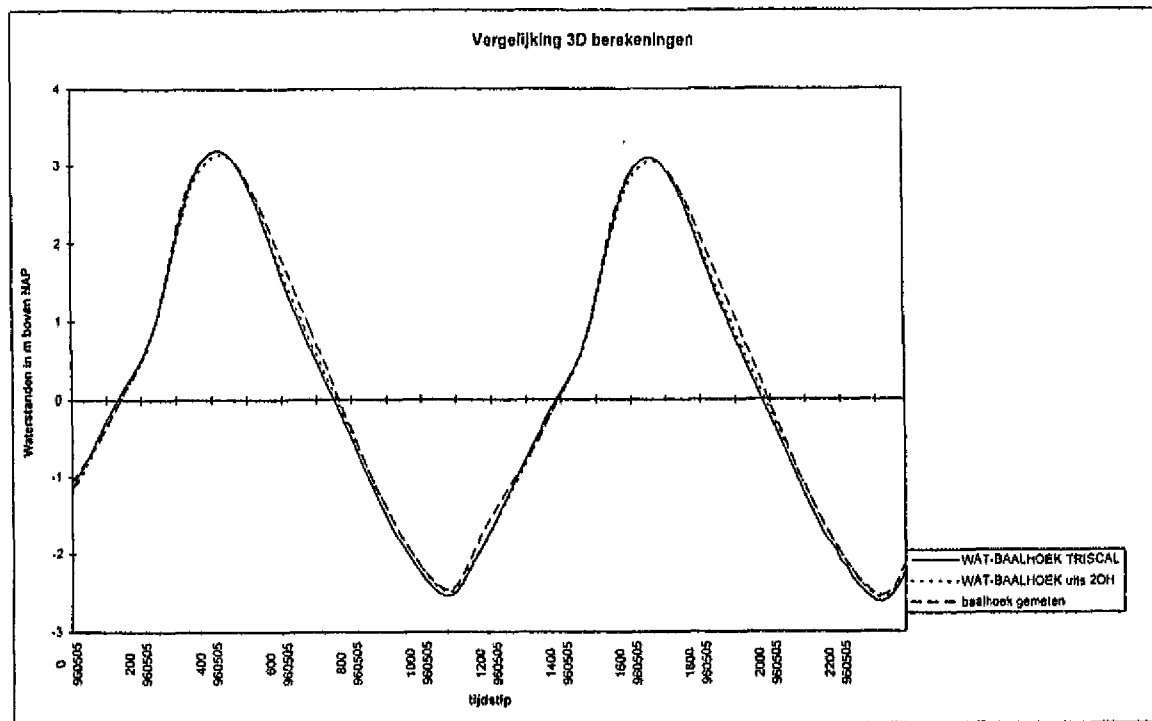
Bijlage XI

Verschil in waterstanden tijdens springtij tussen uitsnede en TRISCAL



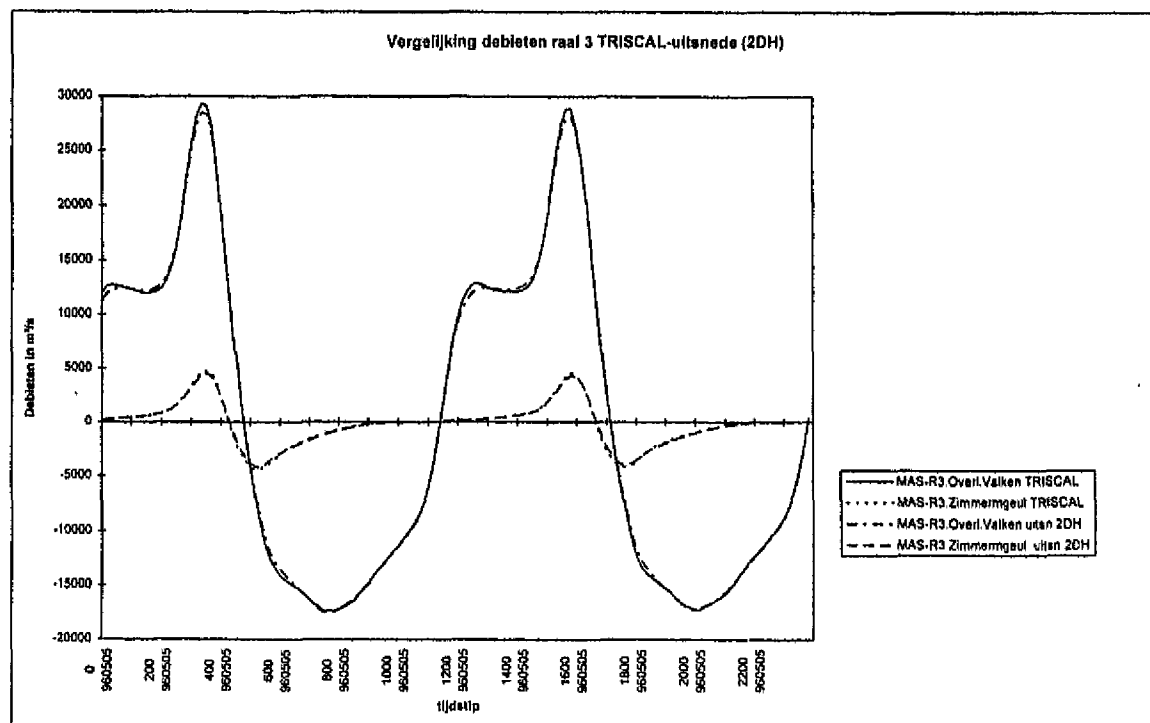
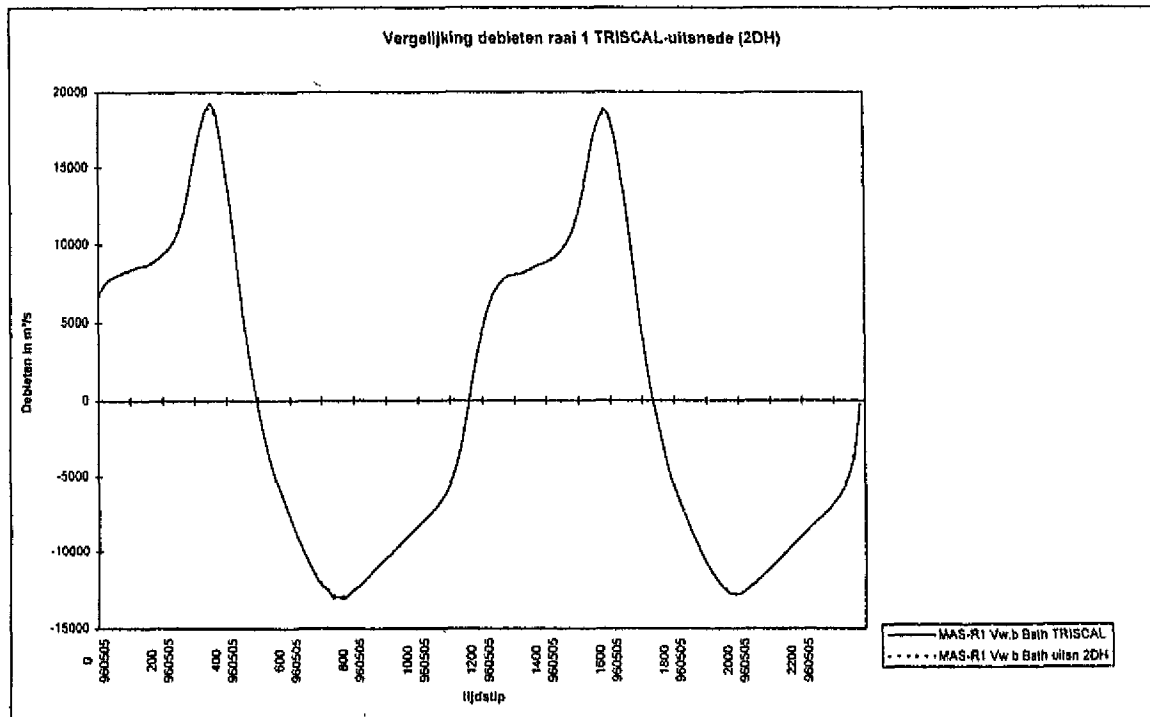
Bijlage XI

Verschil in waterstanden tijdens springtij tussen uitsnede en TRISCAL



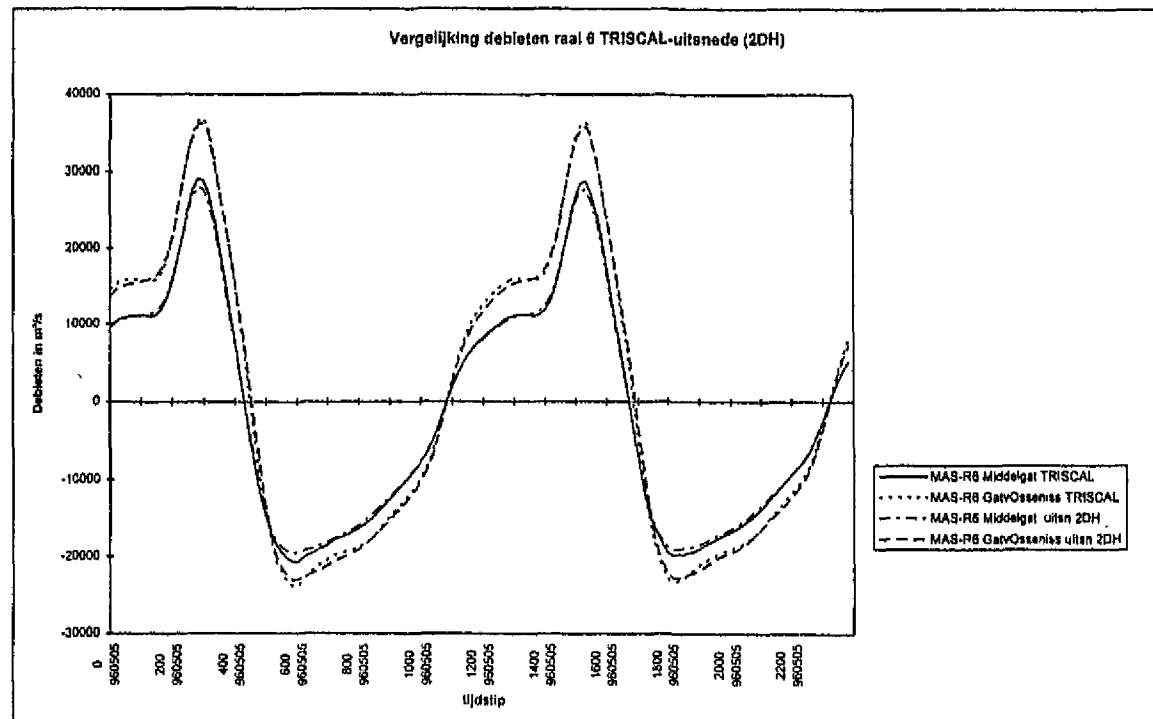
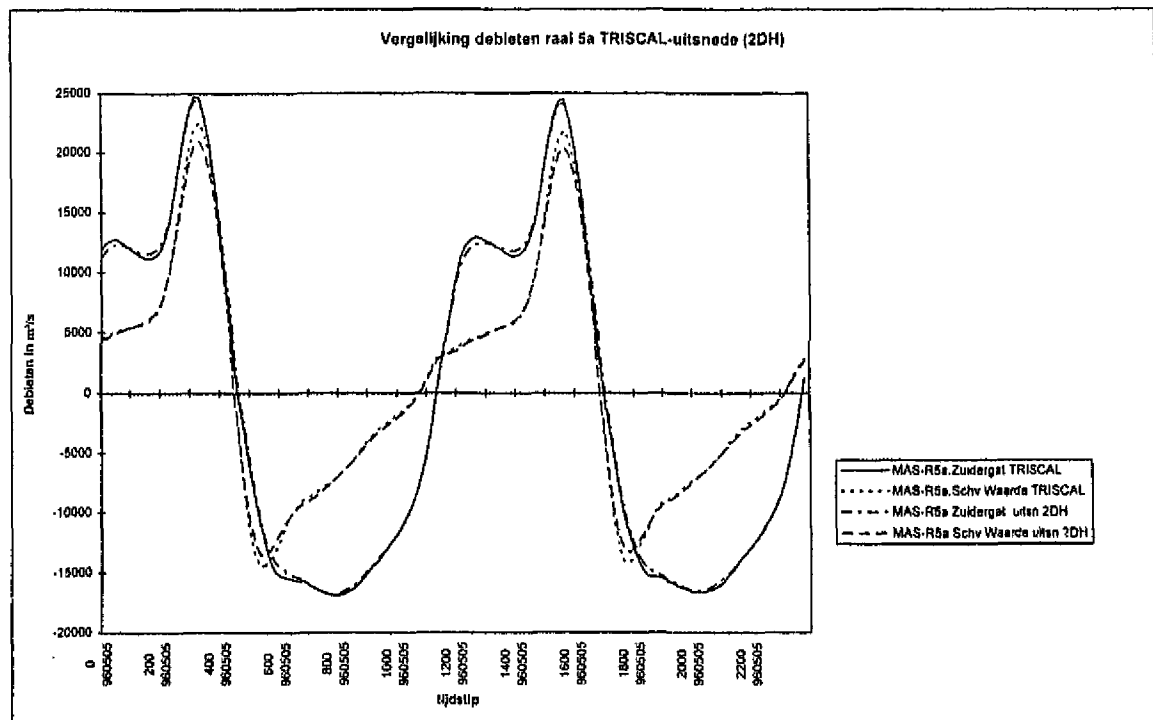
Bijlage XII

Verschil in debieten tijdens springtij tussen uitsnede en TRISCAL

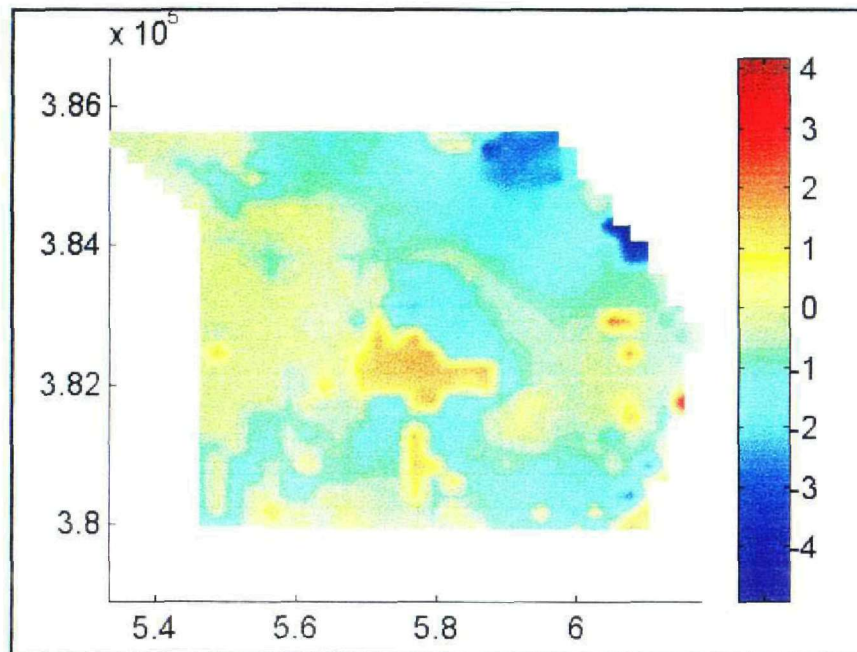


Bijlage XII

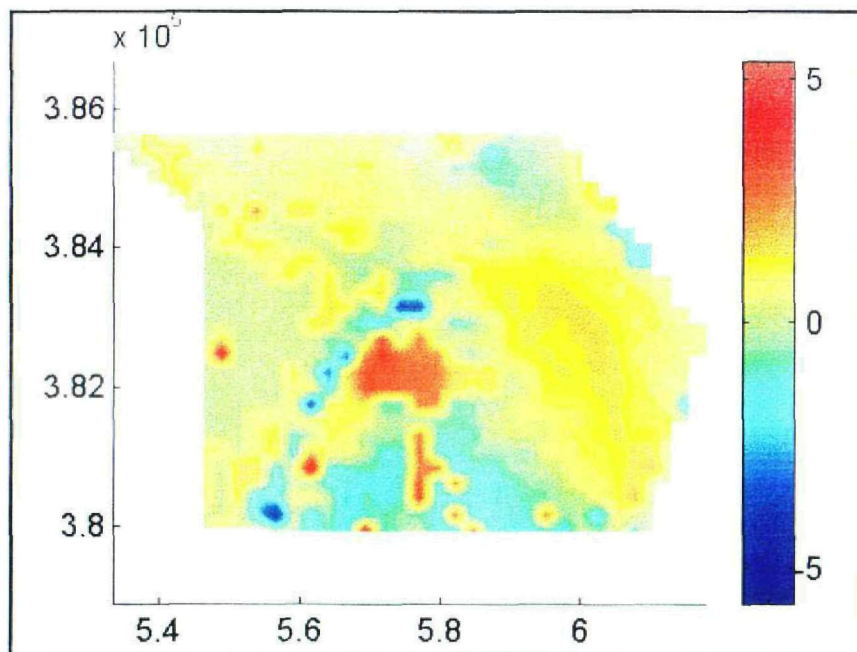
Verschil in debieten tijdens springtij tussen uitsnede en TRISCAL



Bijlage XIII Stroomsnelheden in u- en v-richting tijdens maximum eb gemeten met HF-radar

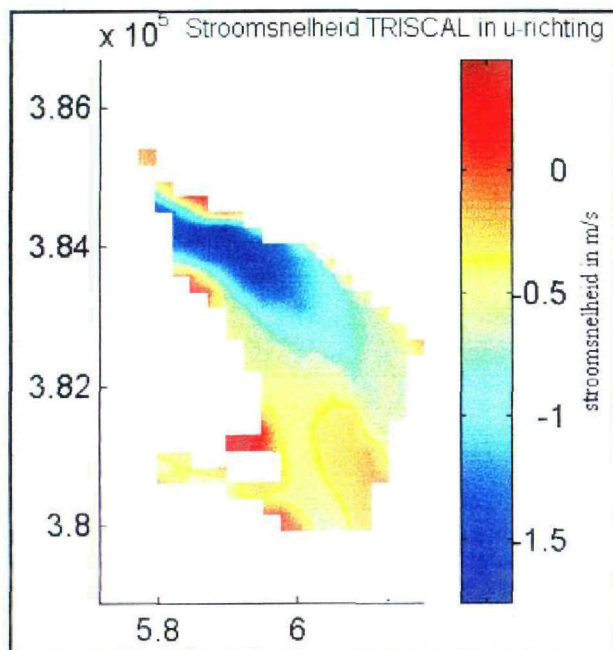


Snelheden in u-richting (in m/s)

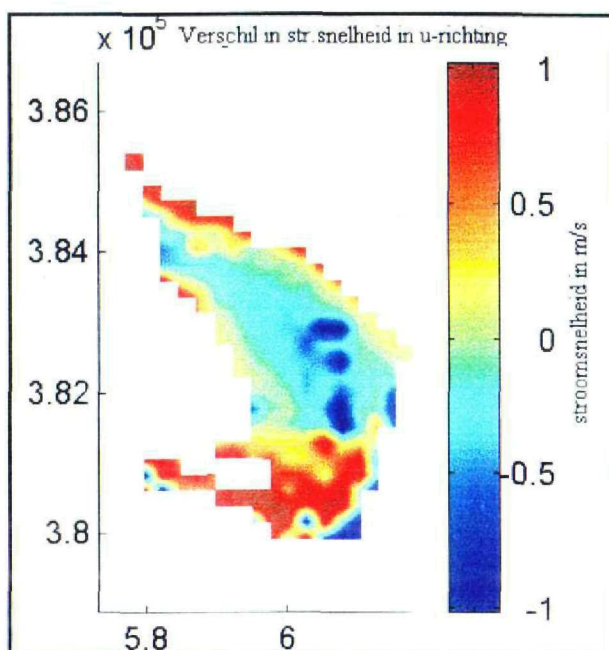


Snelheden in v-richting (in m/s)

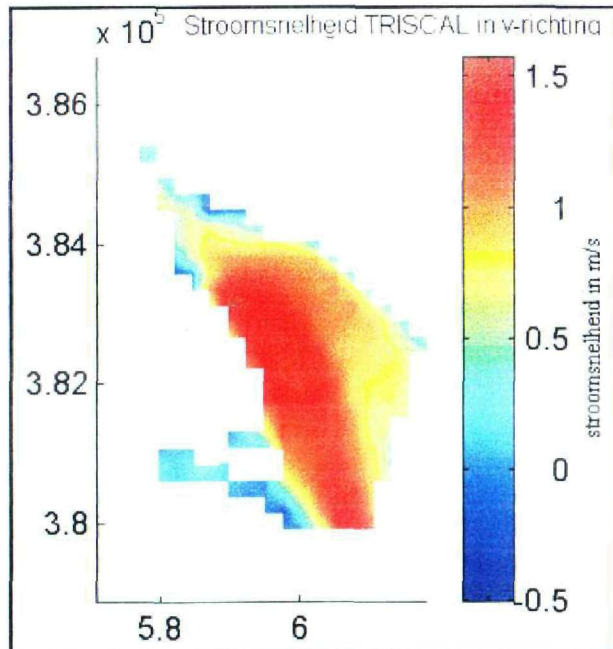
Bijlage XIV Stroomsnelheden tijdens maximum eb uit TRISCAL en verschillen met HF-radar



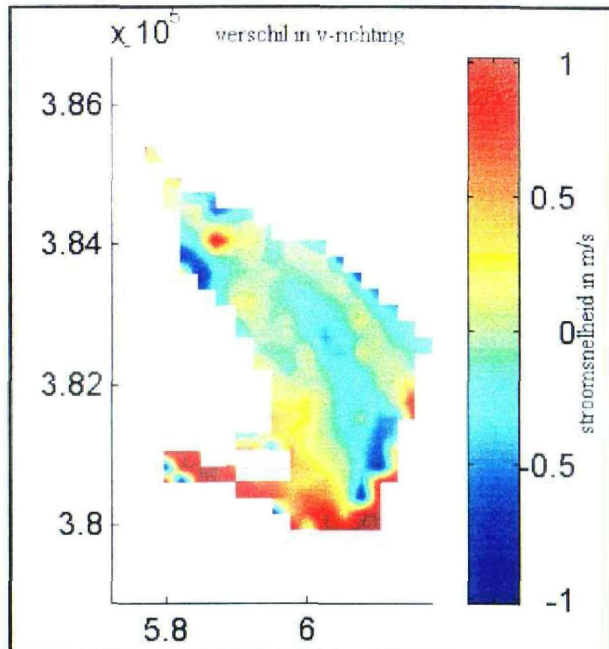
Stroomsnelheden in u-richting (in m/s)



Verschillen tussen HF-radar en TRISCAL

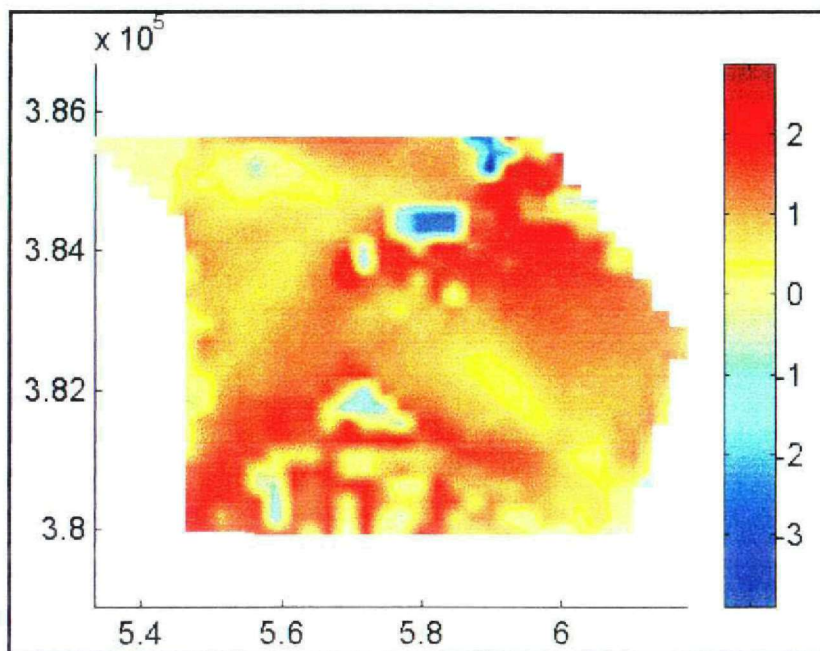


Stroomsnelheden in v-richting geïnterpoleerd (in m/s)

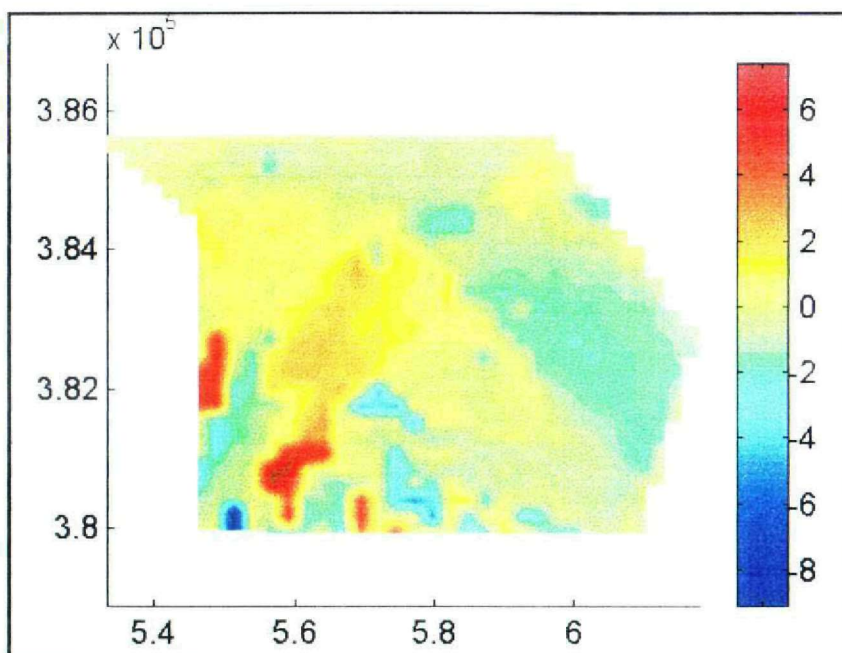


Verschillen tussen HF-radar en TRISCAL

Bijlage XV Stroomsnelheden in u- en v-richting tijdens max vloed gemeten met HF-radar

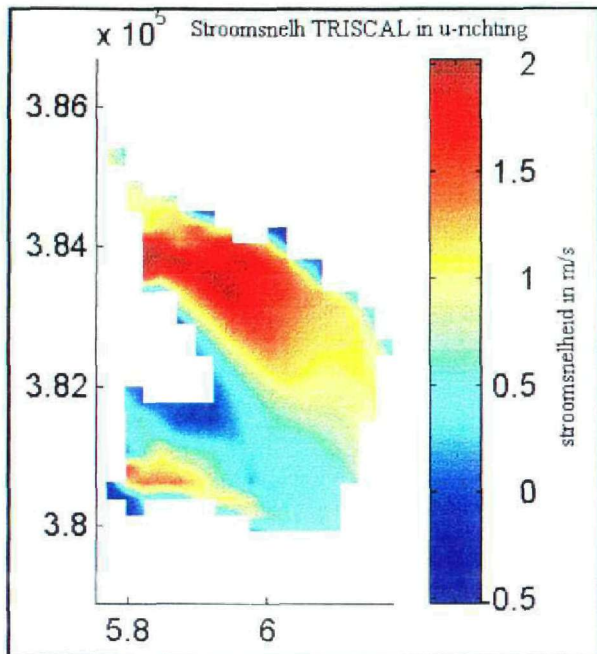


Stroomsnelheden in u-richting uit HF-radar meting (in m/s)

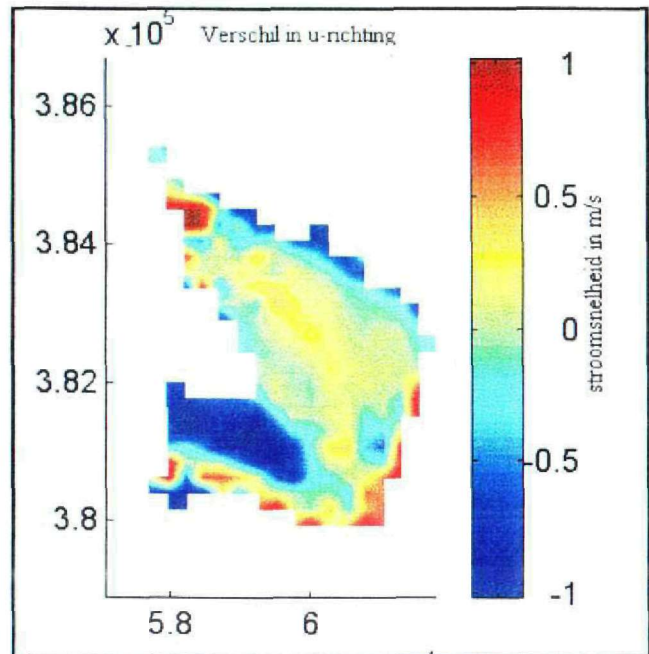


Stroomsnelheden in v-richting uit HF-radar meting (in m/s)

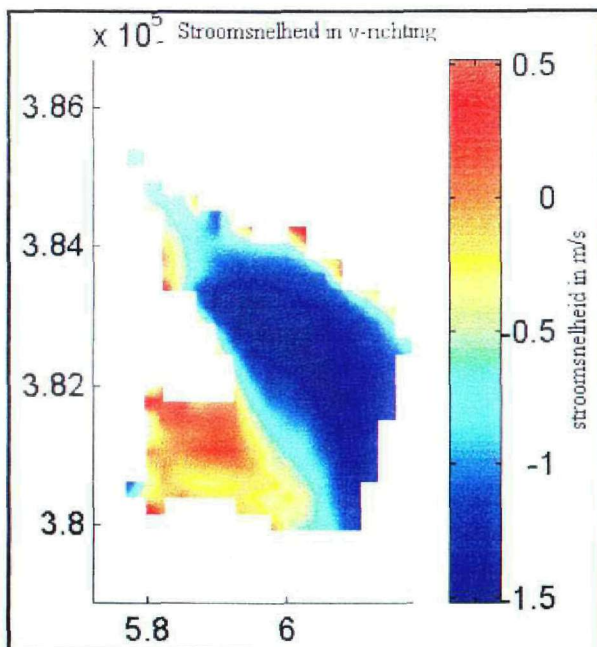
Bijlage XVI Stroomsnelheden tijdens maximum vloed uit TRISCAL en verschillen met HF-radar



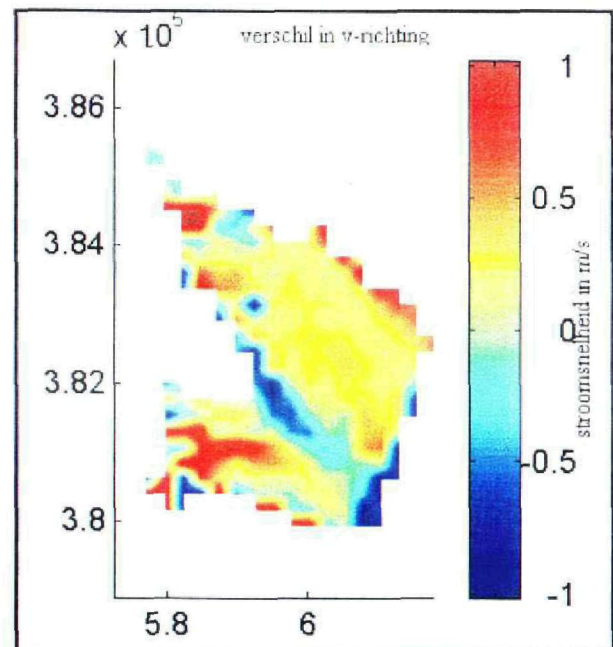
Stroomsnelheden in u-richting (in m/s)



Verschillen tussen HF-radar en TRISCAL



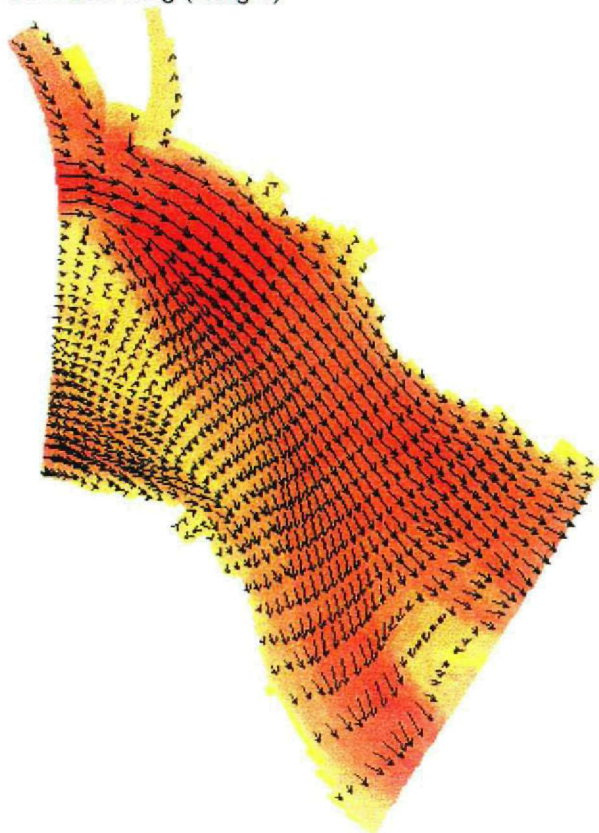
Stroomsnelheden in u-richting geïnterpoleerd (in m/s)



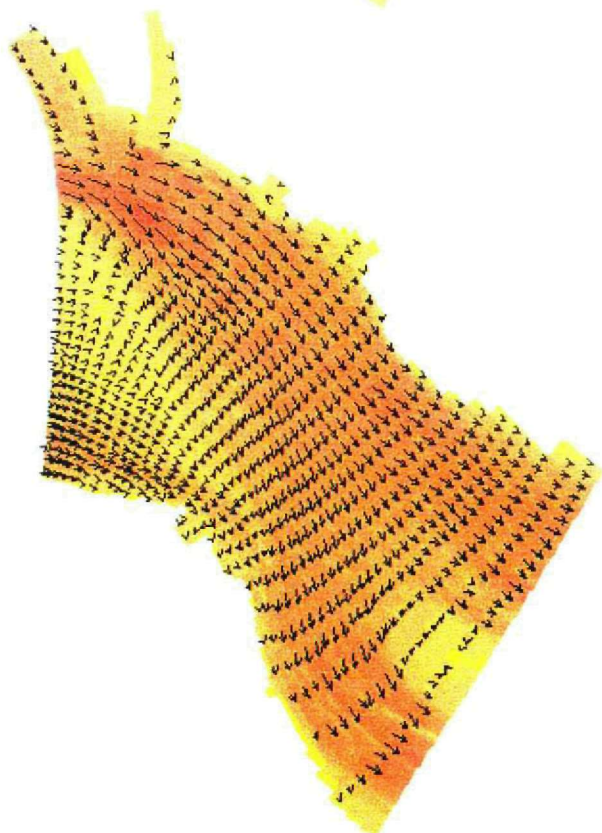
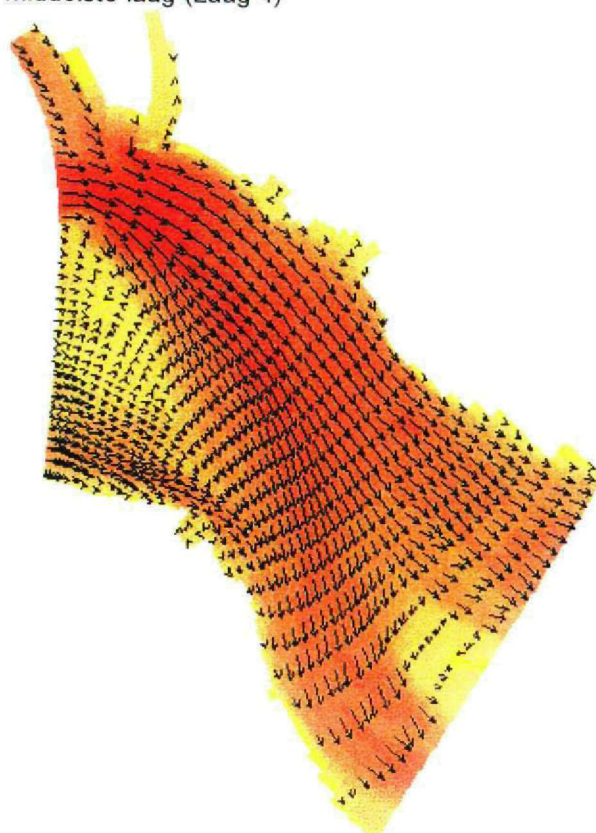
Verschillen tussen HF-radar en TRISCAL

Bijlage XVII Stroombeelden in bovenste, middelste en onderste laag tijdens maximum vloed

Bovenste laag (Laag 1)



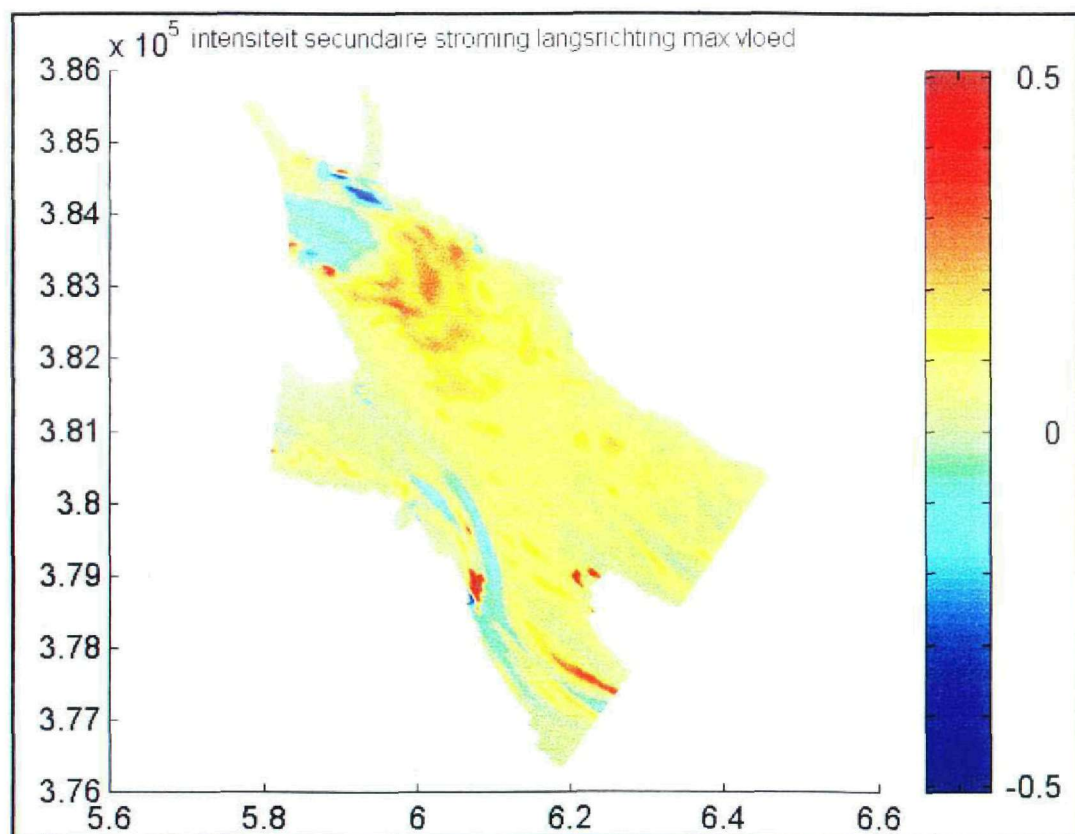
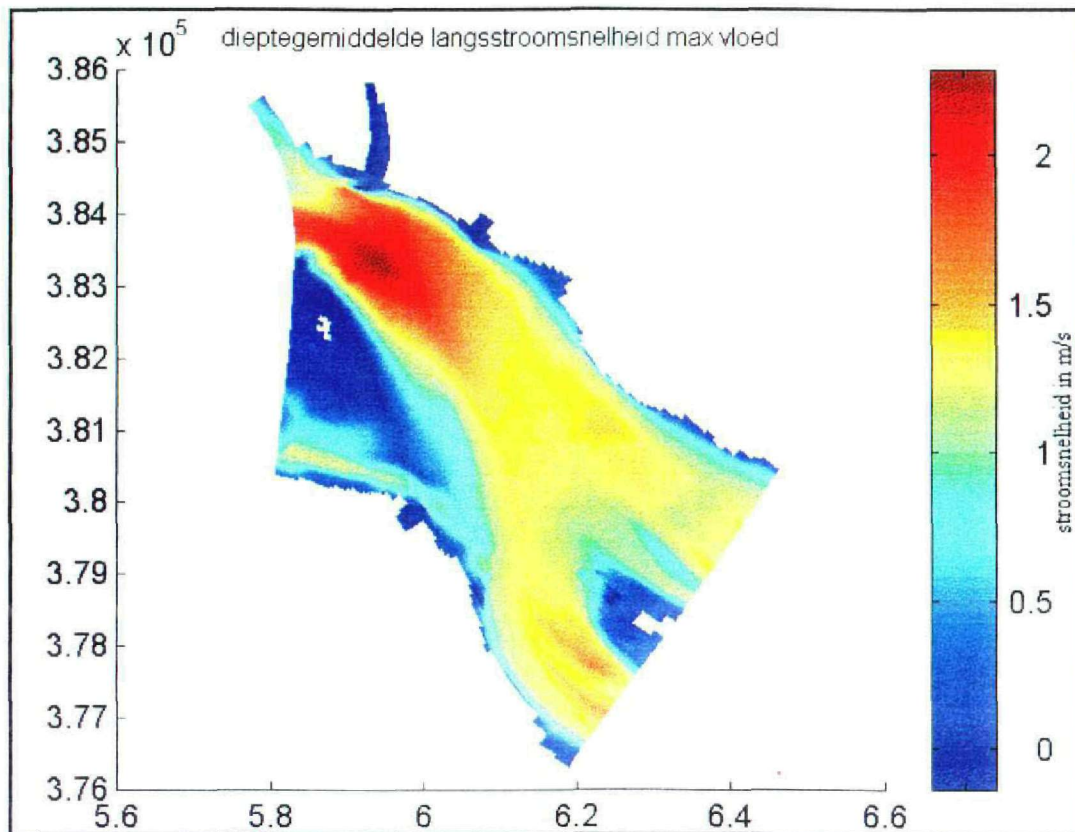
Middelste laag (Laag 4)



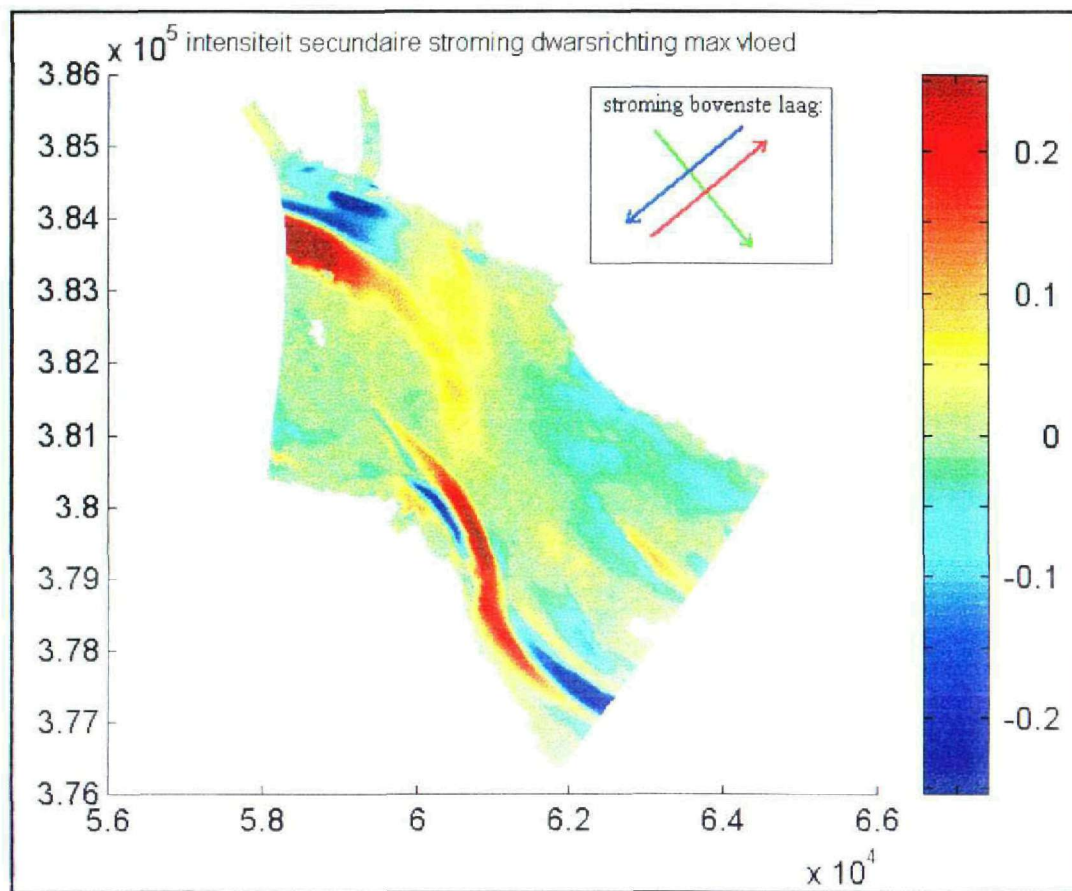
Stroomsnelheid in m/s

Onderste laag (Laag 7)

Bijlage XVIII Secundaire stroming in langsrichting tijdens maximum vloed

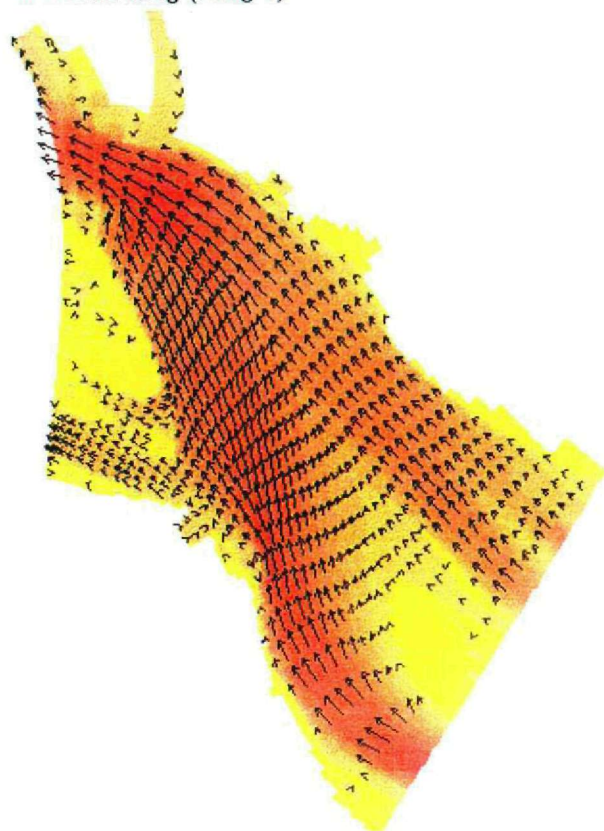


Bijlage XIX Secundaire stroming in dwarsrichting tijdens maximum vloed

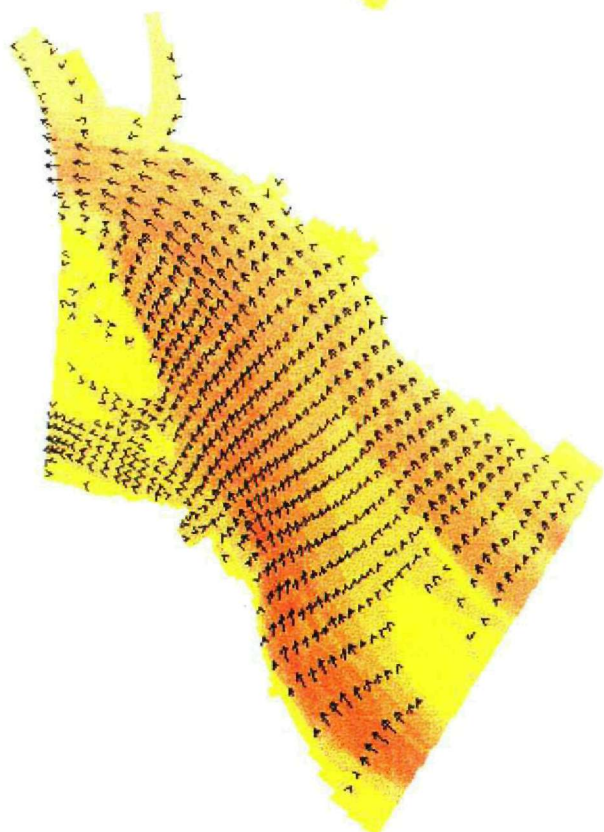
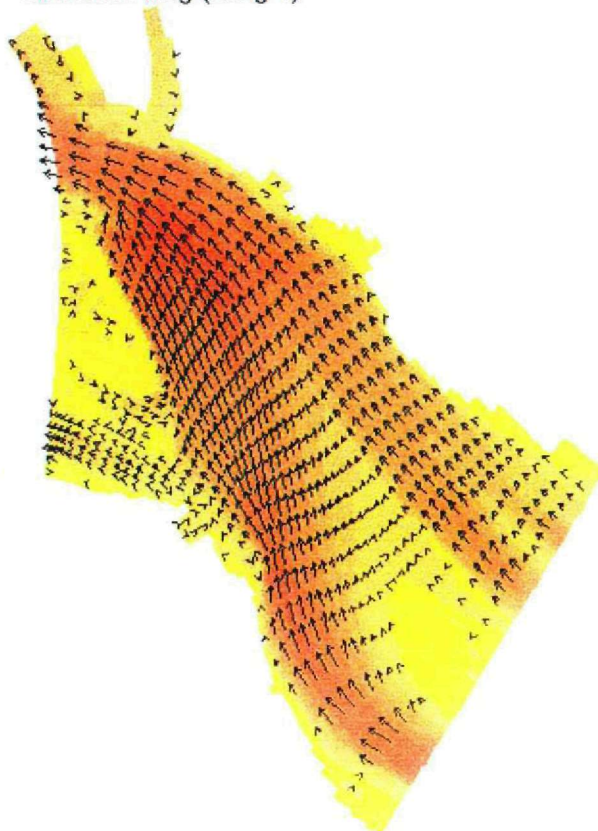


Bijlage XX Stroombeelden in bovenste, middelste en onderste laag tijdens maximum eb

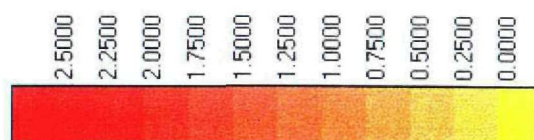
Bovenste laag (Laag 1)



Middelste laag (Laag 4)

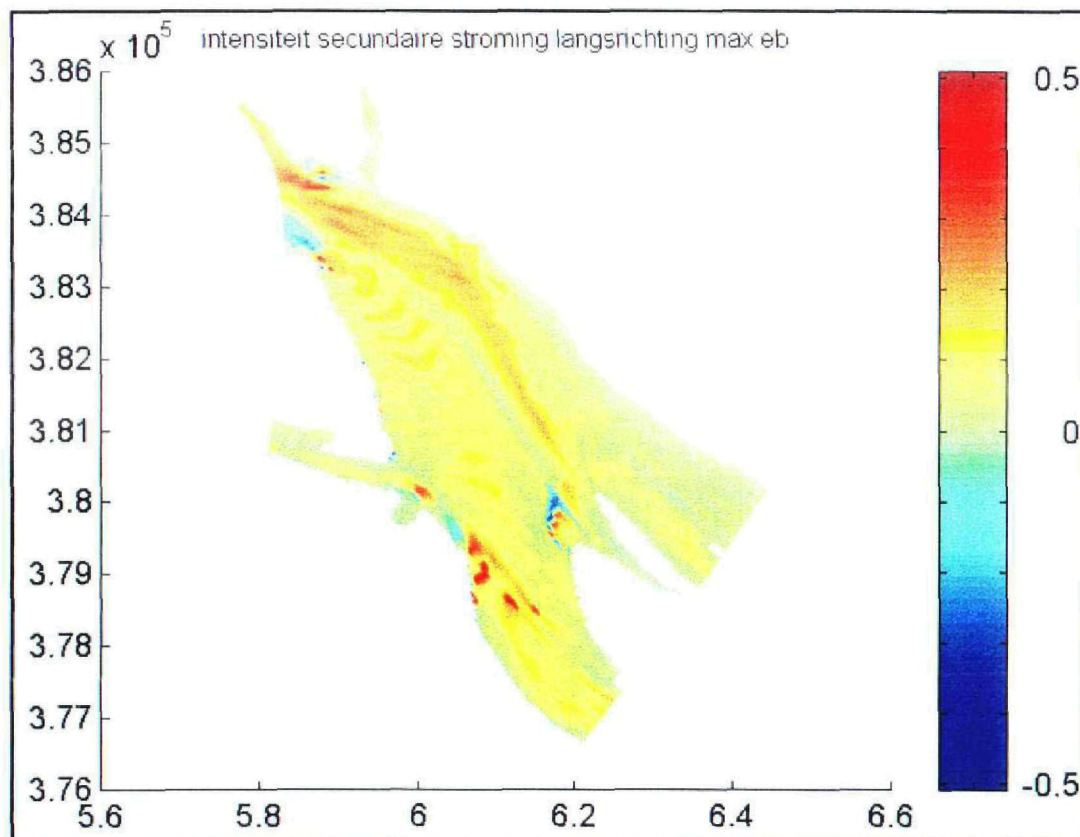
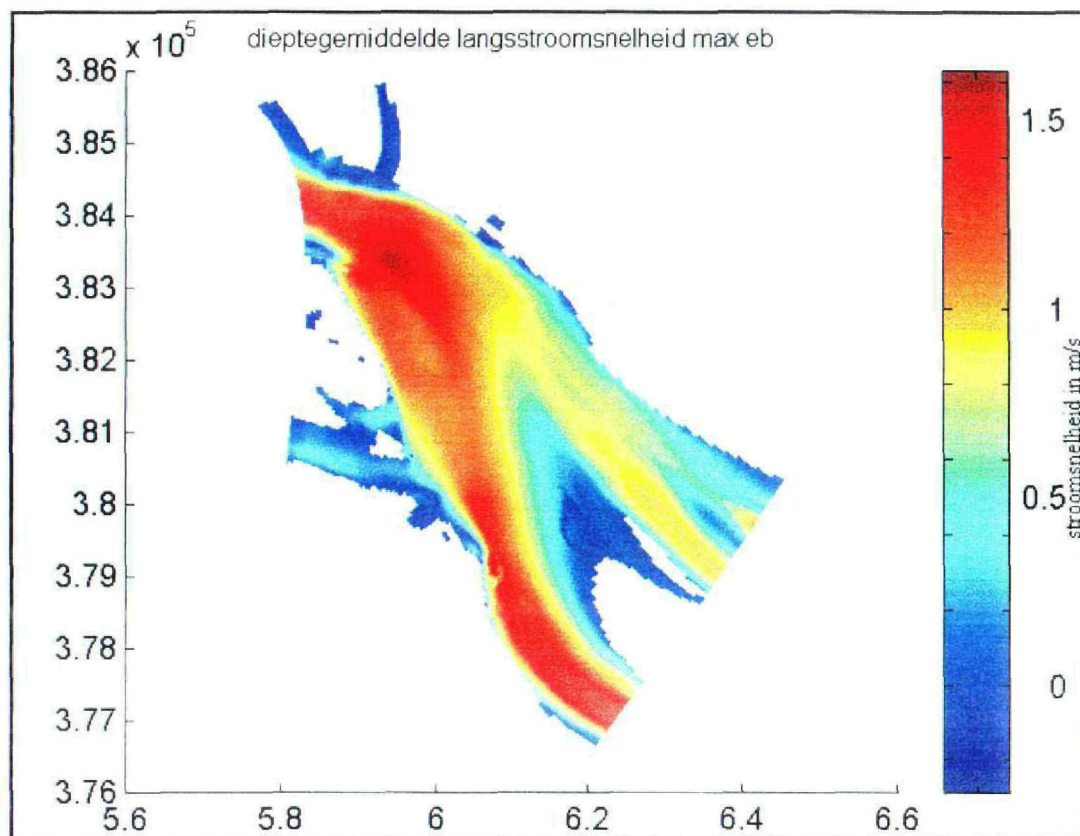


Onderste laag (Laag 7)



stroomsnelheid in m/s

Bijlage XXI Secundaire stroming in langsrichting tijdens maximum eb



Bijlage XXII Secundaire stroming in dwarsrichting tijdens maximum eb

