

eindrapport van het afstudeerproject

Morfologie en modellering van de Westerschelde

deel 1 : tekst

naam	: Arie de Gelder
studienummer	: 254508
datum	: augustus 1996
opleiding	: Civiele Techniek (TU Delft)
bedrijf	: Ingenieursbureau Svašek

Voorwoord

In dit rapport wordt mijn afstudeerproject, morfologie en modellering van de Westerschelde beschreven. Dit project is de afsluiting van mijn studie aan de TU-Delft, afdeling Civiele Techniek, vakgroep Waterbouwkunde, specialisatie kustmorfologie. Dit afstudeerproject is uitgevoerd in samenwerking met ingenieursbureau Svašek. De benodigde gegevens zijn beschikbaar gesteld door Rijkswaterstaat, RIKZ Middelburg.

De afstudeercommissie bestaat uit de volgende personen:

prof. dr. K. d' Angremond, voorzitter
dr.ir. N. Booij
dr.ir. J. van de Graaff
ir. R.J. Labeur (ingenieursbureau Svašek)

Hierbij wil ik mijn begeleiders, RIKZ Middelburg en alle medewerkers van ingenieursbureau Svašek bedanken voor hun ideeën, adviezen en hulp.

Arie de Gelder
mei 1996

Inhoudsopgave

Voorwoord	2
Samenvatting	5
1 Inleiding	6
1.1 Probleemomschrijving	6
1.2 Doel van het afstudeerproject	6
1.3 Beschrijving van het afstudeerproject	6
1.4 Opbouw van het rapport	7
2 De Westerschelde	8
2.1 Algemeen	8
2.2 Historie	8
2.3 Huidige functies	8
2.4 Morfologisch onderzoek	9
2.5 Operationele computermodellen van de Westerschelde	10
3 Fysisch mathematische modellering van stroming	13
3.1 Algemeen	13
3.2 De ondiep-water vergelijkingen	13
3.3 Discretisatie	14
3.3.1 Ruimtelijke en mathematische discretisatie	14
3.3.2 Eindige differentie methode (EDM)	14
3.3.3 Eindige-elementen-methode (EEM)	15
3.3.4 Vergelijking EDM en EEM	16
3.4 Software	16
4 Een stroommodel van de Westerschelde (FINWES96)	17
4.1 Algemeen	17
4.2 Modelbegrenzing en randvoorwaarden	17
4.2.1 Eisen aan het model	17
4.2.2 Modelbegrenzing	17
4.2.3 Randvoorwaarden	18
4.3 Ruimtelijke schematisatie	18
4.3.1 Mesh	18
4.3.2 Dieptes	19
4.4 Kalibratie	19
4.4.1 Kalibratie-gegevens	19
4.4.2 Vaststelling wrijvingsparameter	20
4.4.3 Gevoeligheidsanalyse	22
4.4.4 Modelresultaten	22
4.5 Dominantie van de waterbeweging	23

4.5.1	Algemeen	23
4.5.2	Controle m.b.v. individuele eb- en vloedvolumina	23
4.5.3	Controle m.b.v. een evenwichtsrelatie	24
4.6	Vergelijking FINWES96 met SCALDIS100	24
5	Fysisch mathematische modellering van sedimenttransport	27
5.1	Algemeen	27
5.2	Fysica van het transport	27
5.2.1	Bodemtransport en zwevend transport	27
5.2.2	Aanpassingsverschijnselen	27
5.2.3	Zandtransport en slibtransport	28
5.3	Mathematische modellering van het transport	28
5.3.1	Algemeen	28
5.3.2	Gebruikte methode	29
5.3.3	Transportformules	30
6	Berekeningen van zandtransport in de Westerschelde	33
6.1	Algemeen	33
6.2	Kalibratie zandtransport-berekeningen	33
6.3	Evaluatie zandtransport-berekeningen	34
6.3.1	Algemeen	34
6.3.2	Naijling	34
6.3.3	Dominantie van het zandtransport	35
6.3.4	Lokale bodemveranderingen	36
7	Baggeren en storten	38
7.1	Algemeen	38
7.2	Baggeren op de drempel van Hansweert	38
7.3	Storten in de Schaar van Waarde en in het Zuidergat	39
8	Conclusies en aanbevelingen	41
8.1	Stroommodellen	41
8.2	Zandtransport-berekeningen	41
8.3	Morfologisch onderzoek	42
	Verklarende woordenlijst	43
	Literatuurlijst	44
	Lijst van figuren	46
	Lijst van tabellen	47
	Lijst van bijlagen	48

Samenvatting

De Westerschelde is een complex estuarium waarin natuurlijke ontwikkelingen, menselijk ingrijpen en hydrodynamica elkaar beïnvloeden. Voor het beheer van dit gebied worden o.a. numerieke rekenmodellen toegepast om de water- en sedimentbeweging in de Westerschelde te simuleren.

Met behulp van het softwarepakket FINEL is een horizontaal twee dimensionaal model van de Westerschelde gebouwd (FINWES96). De resultaten van dit model komen goed overeen met metingen van waterstanden en snelheden en de resultaten van het reeds bestaande WAQUA-model SCALDIS100.

Op basis van het stroommodel FINWES96 zijn zandtransporten berekend. Deze berekeningen zijn gebaseerd op de evenwichtstransport-formules van Engelund/Hansen en Van Rijn. De resultaten van deze berekeningen zijn redelijk in overeenstemming met gemeten zandconcentraties, beddingvormen en bodemveranderingen.

Het model FINWES96 kan op verschillende manieren bij morfologisch onderzoek gebruikt worden. Als illustratie is de invloed van de verdieping van de drempel van Hansweert bestudeerd.

De belangrijkste conclusies van het afstudeerproject zijn:

- Het gebruik van numerieke modellen is een relatief goedkope en veelbelovende methode voor morfologisch onderzoek (onder andere in de Westerschelde).
- Het softwarepakket FINEL is flexibel en betrouwbaar.
- Bij de verdere ontwikkeling van morfologische modellen voor de Westerschelde zal men onder andere aandacht moeten besteden aan de naijling en onder- en oververzadiging van de zandconcentratie.
- Een verdieping van de drempel van Hansweert tot NAP - 16 m doet de jaarlijkse baggerhoeveelheid met 0.5 - 1.0 Mm³ toenemen.
- Storten van het t.b.v. de verdieping gebaggerde zandvolume in de Schaar van Waarde of het Zuidergat beïnvloedt de grootschalige water- en zandbeweging. M.n. ter plekke van de overgang tussen verschillende geulen (drempels) verandert het erosie/sedimentatiepatroon.

1 Inleiding

1.1 Probleemomschrijving

De aanleiding voor dit afstudeerproject bestaat uit twee problemen:

1. De Westerschelde (zie figuur 1.1) is een complex estuarium waarin natuurlijke ontwikkelingen, menselijk ingrijpen en hydrodynamica elkaar voortdurend beïnvloeden. Er bestaat behoefte om morfologische veranderingen te voorspellen en de invloed van menselijk ingrijpen (m.n. baggeren, storten en ontpolderen) te bepalen. De hydrodynamica van de Westerschelde is gesimuleerd in diverse numerieke modellen. Op basis van deze modellen is het echter nog niet mogelijk om sedimenttransporten te berekenen.
2. Bij ingenieursbureau Svašek is op basis van een eindige-elementen-methode het softwarepakket FINEL ontwikkeld. Met dit pakket kunnen stromingen, golven en sedimenttransporten in o.a. estuaria berekend worden. Er bestaat behoefte om dit model te testen en uit te breiden.

Er zijn twee redenen om deze problemen te combineren en een FINEL-model van de Westerschelde te bouwen:

- vergroten van het inzicht in de morfologie van de Westerschelde;
- testen van het softwarepakket FINEL.

1.2 Doel van het afstudeerproject

Het doel van het afstudeerproject is:

Stromingen en sedimenttransporten in de Westerschelde tijdens een getij te simuleren met FINEL en op basis van dit model de lokale invloed van een verdieping van de drempel van Hansweert te beschrijven.

1.3 Beschrijving van het afstudeerproject

Het afstudeerproject bestaat uit de volgende onderdelen:

- literatuur-onderzoek naar de morfologie van de Westerschelde;
- literatuur-onderzoek naar de modellering van stromingen en sedimenttransporten;
- de bouw van een eindige-elementen-schematisatie van de Westerschelde;
- kalibratie van het FINEL-stroommodel;
- berekenen van eb- en vloedvolumina op basis van het stroommodel en deze vergelijken met een morfologische evenwichtsrelatie die is gebaseerd op metingen;
- vergelijken van het FINEL-model FINWES96 en het WAQUA-model SCALDIS100;
- kalibratie van zandtransport-berekeningen

- berekening van zandtransporten op basis van het stroommodel en berekening van de resulterende erosie en sedimentatie;
- vergelijken van de berekende zandtransporten met een inventarisatie van natuurlijke dynamiek op basis van luchtfoto's;
- vergelijken van berekende initiële bodemveranderingen met gemeten bodemveranderingen;
- berekenen van de invloed van een verdieping van de drempel van Hansweert en een evenredige verondieping in een stortgebied.

1.4 Opbouw van het rapport

De aard van dit afstudeerproject brengt de beschrijving van een groot aantal verschillende onderwerpen met zich mee. Het is de bedoeling dat dit rapport in zijn geheel een indruk geeft van de omvang en diepgang van het afstudeerproject. Verder is geprobeerd alle onderdelen zo beknopt mogelijk te beschrijven. Een belangrijk deel van de resultaten van het afstudeerwerk is grafisch gepresenteerd in de figuren en bijlagen.

Voor een aantal lezers zullen slechts enkele delen van dit rapport van belang zijn. Daarom zijn de hoofdstukken zo geschreven dat ze afzonderlijk gelezen kunnen worden. Enige overlap was hierbij niet te vermijden.

In hoofdstuk 2 worden een aantal facetten van het probleemgebied, de Westerschelde beschreven. Hoofdstuk 3 vormt de theoretische basis van het modelleren van stroming. Hoofdstuk 4 betreft de numerieke modellering van de stroming in de Westerschelde. De theorie van sedimenttransport-berekeningen wordt behandeld in hoofdstuk 5. In hoofdstuk 6 komt de berekening van sedimenttransport in de Westerschelde aan de orde. De invloed van baggeren en storten wordt beschreven in hoofdstuk 7. Tenslotte is hoofdstuk 8 een overzicht van de belangrijkste conclusies en aanbevelingen.

Een algemene beschrijving van het softwarepakket FINEL is opgenomen in bijlage 1. Bijlage 2 en 3 bevatten de kalibratie-grafieken van respectievelijk het stroommodel en de sedimenttransport-berekeningen.

2 De Westerschelde

2.1 Algemeen

De Westerschelde is een belangrijke vaarweg en een ecologisch uniek gebied. Om dit gebied goed te beheren is inzicht in het gedrag van het estuarium van groot belang.

Daarnaast is de Westerschelde een goede testcase voor het softwarepakket FINEL. FINEL is namelijk ontwikkeld voor toepassingen in dergelijke situaties en van de Westerschelde is een groot aantal metingen beschikbaar. Deze metingen kunnen worden gebruikt voor kalibratie van een stroommodel en sedimenttransport-berekeningen. Verder bestaan operationele WAQUA-modellen van dit gebied, waar het FINEL-model mee vergeleken kan worden.

In dit hoofdstuk wordt een aantal aspecten van de Westerschelde beschreven.

2.2 Historie¹

De Westerschelde is een estuarium in het zuiden van Nederland. Dit estuarium is ontstaan uit de zeearm Honte en de rivier de Schelde. Na afdamming van de Schelde bij Gent omstreeks 1300 raakte de Honte verbonden met de Schelde en werd zo de nieuwe monding de Westerschelde. Langzamerhand werd de oude monding, de Oosterschelde, steeds minder belangrijk en in de 14e eeuw was de Westerschelde diep genoeg om de nieuwe scheepvaartroute naar Antwerpen te worden. In de 15e en 16e eeuw groeide de Westerschelde uit tot een groot getijbekken. Zij was met de Oosterschelde verbonden door ondiepe waterscheiding-achtige gebieden, het Sloe en het Kreekrak. De Westerschelde bestond uit verschillende takken, grote vlakke getij-gebieden en moerassen met een grote bergingscapaciteit. Zie figuur 2.1.

In de hierop volgende eeuwen verzandden de takken. Veel gebieden rond de Westerschelde werden bewoonbaar gemaakt door kreken af te dammen en ringdijken aan te leggen. Zo werden de eerste polders gevormd. In 1788 damde men de verbindingsgeul tussen de Braakman en het Zwin af, in 1867 het Kreekrak en in 1871 het Sloe. Zo werden de beide Scheldes gescheiden. Ook zuidelijk gelegen takken zandden aan en werden afgedamd. Van de getijmoerassen is alleen het Verdrongen Land van Saeftinge overgebleven. Het intergetijdegebied (tussen NAP-2m en NAP+2m) nam af van 350 km² in 1650 tot 90 km² in 1990.

Ook de getij-karakteristieken veranderden in de loop der tijd. Het getijverschil bij Antwerpen nam toe van 3.2 m in 1650 tot 5.2 m in 1990 en de snelheid

¹ de vermelde feiten zijn ontleend aan Van der Spek, 1994; Pieters, 1993 en Mol, 1994

van de getijgolf nam aanzienlijk toe. Het faseverschil tussen Antwerpen en Vlissingen was in 1650 4.5 uur. Momenteel is het faseverschil 2 uur.

Vanaf ca. 1800 verdedigden de omwonenden verschillende oevers met stortsteen. In de periode van 1966 tot 1971 werden twee leidammen aangelegd; op de Plaat van Doel (België) en op de Ballastplaat. Al in 1560 is "Het Oude Hoofd" tussen Walsoorden en Perkpolder aangelegd. Deze dam was waarschijnlijk bedoeld als oeververdediging, maar ging fungeren als geleidingswerk. In het belang van de scheepvaart is de dam in 1966 ingekort.

Na 1900 is veel gebaggerd op de drempels in de Westerschelde. De gebaggerde hoeveelheden werden voor het grootste deel weer teruggestort in de Westerschelde. Ook gebaggerd materiaal uit havens en kanalen stortte men in de Westerschelde. Daarnaast werd voor verschillende doeleinden zand onttrokken aan de Westerschelde.

2.3 Huidige functies²

De Westerschelde is een trechtervormig estuarium, dat de verbinding vormt tussen het stroomgebied van de Schelde en de zuidelijke baai van de Noordzee (zie figuur 2.2). Het totale stroomgebied heeft een oppervlakte van ruim 21000 km². Hiervan ligt bijna 1000 km² op Nederlands grondgebied. In het stroomgebied wonen ongeveer 10 miljoen mensen.

De belangrijkste maatschappelijke gebruiksfuncties van het watersysteem zijn die van scheepvaartweg en afvoerweg van water. De Westerschelde verzorgt de toegang naar zee vanaf Antwerpen; de tweede haven van Westeuropa. Met het afgevoerde water worden de afvalstoffen van huishoudelijke, agrarische en industriële activiteiten van 10 miljoen mensen geloosd, voor een belangrijk deel nog ongezuiverd.

Om Antwerpen bereikbaar te houden voor de scheepvaart wordt voortdurend gebaggerd. Momenteel wordt gewerkt aan een verdieping van ondiepe gedeelten van de vaargeul om Antwerpen ook bereikbaar te maken voor schepen die tot 50 voet diep steken. Verder wordt een Westerschelde-oeververbinding ter hoogte van Terneuzen voorbereid. Ook wordt onderzoek uitgevoerd naar de aanleg van een buitendijkse bergingslocatie voor vervuild havenslib.

Naast maatschappelijke gebruiksfuncties heeft de Westerschelde ook een belangrijke ecologische functie. Hiervoor is in de loop der tijd steeds meer belangstelling gekomen. De Westerschelde is met name belangrijk als doortrek- en overwinteringsgebied voor vogels en kraam- en kinderkamer voor vissen in de Noordzee. Er zijn plannen om deze ecologische functie te versterken, bijvoorbeeld door te ontpolderen.

² de vermelde feiten zijn ontleend aan Pieters e.a., 1991

Ook de veiligheid van de omwonenden moet gewaarborgd worden. Het land moet daarom tegen overstromingen worden beschermd.

2.4 Morfologisch onderzoek

In paragraaf 2.1 is beschreven hoe de Westerschelde zich ontwikkeld heeft. Over de processen, die deze ontwikkelingen beheersen is in de loop der tijd veel gediscussieerd. Een deel van deze discussie is beschreven in Van Veen, 1944 en Van Veen, 1945.

Hierin is terug te vinden dat men lange tijd dacht dat opslibbing van de Westerschelde onvermijdelijk was: "Eene rivier uitmondende in eene aan vloed en eb onderhevige zee gaat, aan zichzelf overgelaten, achteruit"³. Over hoe dit (t.b.v. de scheepvaart) kon worden voorkomen liepen de meningen uiteen. Met name tussen belgen en nederlanders. Beide partijen gingen er wel van uit dat de grootte van het doorstroomprofiel van een geul een functie is van de stroomhoeveelheid door die geul (getijvolume). Twee belangrijke opties om de Westerschelde bevaarbaar te houden waren dan ook ontpolderen (vergroten van de komberging en dus de stroomhoeveelheden) en reguleren (om de geulen in ieder geval diep genoeg te houden).

Men beseftte echter dat het zand voor de aanzanding ergens vandaan komt, van de bovenrivier of van zee. Daarom ontstond discussie over de grootte van deze zandimport. Men kwam tot de conclusie dat de beweging van vaste stoffen (slib en zand) zou moeten worden bestudeerd. Een doorstroomprofiel is namelijk niet altijd een functie van de stroomhoeveelheid. Op drempels in de Westerschelde treden bijvoorbeeld grote stroombewegingen op terwijl de profielen klein zijn. Er moet dus ook naar de zandstromen worden gekeken: "Neemt de zandstroom op een traject toe dan is er op dat traject uitschuring, neemt zij af dan is er aanzanding". Deze opvatting is met name door de belg De Mey verwoord in 'L'Escaut maritiem', 1892. In die tijd concludeerde men namelijk op basis van de plaatselijke zandbeweging tot een algemene aanzanding van het estuarium of een neiging tot verdwijnen van diepe vaarwaterdelen. Hij waarschuwde tegen deze snelle conclusie, omdat hij zelf constateerde dat wanneer één van de geulen minder wordt, een ander zijn plaats inneemt.

Deze nieuwe inzichten leidden er bij Van Veen zelfs toe dat hij begon te pleiten voor lagere stroomsnelheden (door het verkleinen van de komberging m.b.v. een sluis bij Vlissingen) en zo de sedimentbeweging beperkt te houden.

Ook een latere publicatie van Veen uit 1950, 'Eb- en vloodschaar systemen in de Nederlandse getijwateren' bevat veel waardevolle informatie. Hierin geeft hij een meer algemene kwalitatieve beschrijving van de morfologische processen. Voor een beschrijving en verklaring van het gedrag van eb- en

³ een uitspraak van Caland in 1861

vloedscharen wordt verwezen naar deze publicatie. Een voorbeeld van zijn manier van redeneren is gegeven in figuur 2.3.

De discussie over de ontwikkelingen in de Westerschelde is na 1950 uiteraard niet gestopt. Momenteel wordt bij Rijkswaterstaat binnen het kader van het OOSTWEST-project veel studie gedaan. Zie hiervoor bijvoorbeeld de rapportage van de pilotstudie (Pieters e.a., 1991). Dit onderzoek heeft een extra impuls gekregen door de verdieping van de vaarroute in de Westerschelde. Hier worden slechts enkele onderdelen van het onderzoek beschreven die direct van belang zijn voor dit afstudeerproject.

Op verschillende plaatsen in de Westerschelde worden continu waterstanden gemeten. De lokaties van de waterstandstations zijn gegeven in figuur 2.4. Deze waterstanden zijn digitaal beschikbaar en zijn gebruikt voor de aansturing en kalibratie van het stroommodel (zie hoofdstuk 4).

Incidenteel worden simultane debietmetingen in raaien dwars op de Westerschelde uitgevoerd (De Jong, 1989). De metingen van april 1989 zijn gebruikt voor de kalibratie van het stroommodel. Door middel van een evenwichtsrelatie zijn ook andere debietmetingen vergeleken met de berekende waarden (zie paragraaf 4.5).

Tijdens een aantal snelheidsmetingen is ook de zandconcentratie gemeten. Een gedeelte van deze metingen is in het kader van dit afstudeerproject verwerkt. Op basis hiervan zijn de sedimenttransport-berekeningen gekalibreerd (zie paragraaf 6.2).

Met behulp van geomorfologische luchtfoto-interpretatie is een inventarisatie van de habitatverdeling in de Westerschelde gemaakt (Huijs, 1995). De hierin gegeven inventarisatie van de dynamica en de dominante stroomrichtingen zijn vergeleken met de berekende sedimenttransporten (zie paragraaf 6.3.3).

Op basis van dieptelodingen zijn met behulp van het GIS-Arcinfo-systeem bodemveranderingen berekend. Er is een atlas met dieptekaarten en verschilkaarten beschikbaar. De bodemveranderingen zijn vergeleken met de berekende initiële bodemveranderingen (zie paragraaf 6.3.4).

In het kader van het Project Monitoring Verdieping (MOVE) wordt de invloed van de verdieping van de Westerschelde bestudeerd (Tank, 1995). De in hoofdstuk 7 beschreven toepassing van FINWES96 kan worden gezien als een bescheiden bijdrage aan dit onderzoek.

2.5 Operationele computermodellen van de Westerschelde

Voor de Westerschelde is een aantal computermodellen beschikbaar die stroming simuleren. Het een-dimensionale DUFLOW-model dat bruikbaar is van Vlissingen tot Gent en twee-dimensionale horizontale WAQUA-modellen: SCALDIS100 en SCALDIS400. SCALDIS100 heeft een maaswijdte van

100 m. en is gedeeltelijk kromlijng (zie Dekker e.a., 1994). SCALDIS400 is een volledig rechthoekig model met een maaswijdte van 400 m.

In het verleden zijn ook andere modellen gebruikt. Bij dit afstudeerwerk zijn modelresultaten van SCALDIS100 en DETWES gebruikt. DETWES is een voorloper van SCALDIS100.

In het kader van dit afstudeerproject is met behulp van FINEL een model van de Westerschelde gebouwd dat zowel de waterbeweging als de sedimentbeweging simuleert. In de volgende hoofdstukken wordt dit model, FINWES96 beschreven en toegepast. In paragraaf 4.6 worden FINWES96 en SCALDIS100 met elkaar vergeleken.

3 Fysisch mathematische modellering van stroming

3.1 Algemeen

Om de waterbeweging te simuleren wordt een aantal stappen doorlopen. In dit hoofdstuk wordt het modelleringsproces beschreven. Dit proces is schematisch weergegeven in figuur 3.1.

Door een gebied te schematiseren tot een rekenrooster (mesh) kunnen waterstanden en snelheden berekend worden. In het volgende hoofdstuk wordt de berekening van stroming in de Westerschelde beschreven.

De stroming in de Westerschelde wordt gedomineerd door het getij. Tweemaal per dag stroomt bij Vlissingen meer dan 1 miljard m³ water het estuarium in en uit, terwijl de rivierafvoer gemiddeld 3 miljard m³ over een heel jaar bedraagt. De waterstandsvarianties zijn meer dan 5 m bij Vlissingen tot meer dan 6 m bij Bath.

3.2 De ondiep-water-vergelijkingen

Een groot aantal externe factoren beïnvloedt de waterbeweging. De belangrijkste daarvan zijn waterdiepte, zwaartekracht, bodemwrijving, draaiing van de aarde en de stand van zon en maan.

In estuaria kan de samenhang van waterstanden, snelheden en genoemde factoren onder een aantal aannames beschreven worden door de ondiep-water-vergelijkingen. Dit stelsel algebraïsche vergelijkingen is afgeleid van de wetten van behoud van massa en behoud van impuls (Newton). De invloed van de stand van zon en maan wordt bij de oplossing van deze vergelijkingen verwerkt in de randvoorwaarden. De ondiep-water-vergelijkingen worden hier in de behoudsvorm gegeven:

- uit de massa balans volgt:

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \quad [3.1]$$

- uit de impulsbalans in de x-richting volgt:

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{u^2}{h} + \frac{gh^2}{2} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{uv}{h} \right) + gh \frac{\partial z}{\partial x} + f_w u - f_c v = 0 \quad [3.2a]$$

- uit de impulsbalans in de y-richting volgt:

$$\frac{\partial v}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{uv}{h} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{v^2}{h} + \frac{gh^2}{2} \right) + gh \frac{\partial z}{\partial y} + f_w v + f_c u = 0 \quad [3.2b]$$

waarin:

h	=	waterdiepte	(m)
u	=	vert. geïntegreerde snelheid in x-richt.	(m ³ /m/s)
v	=	vert. geïntegreerde snelheid in y-richt.	(m ³ /m/s)
g	=	valversnelling	(m/s ²)
z	=	bodemniveau	(m)
f_w	=	bodemwrijvingsfactor (zie vergelijking [4.1])	(s ⁻¹)
f_c	=	Coriolis coëfficiënt	(s ⁻¹)

NB: u en v zijn hier debieten, geen snelheden.

De belangrijkste aannames hierbij zijn:

- water is een homogene vloeistof;
- de dichtheid van het water wordt niet door druk beïnvloed (onsamendrukbaarheid);
- de druk is hydrostatisch over de diepte verdeeld;
- de stroming is 2-dimensionaal (d.w.z. dat de schaal van de verticale afmetingen veel kleiner is dan die van de horizontale afmetingen).

3.3 Discretisatie

3.3.1 Ruimtelijke en mathematische discretisatie

Het stelsel algebraïsche ondiep-water-vergelijkingen kan worden beschreven door een stelsel numerieke vergelijkingen. Deze stap wordt de discretisatie genoemd en bestaat uit twee onderdelen: de ruimtelijke discretisatie en de mathematische discretisatie.

De essentie van de ruimtelijke discretisatie is dat er een aantal punten wordt aangewezen waar de waterstanden en snelheden bekend zijn, een aantal punten waar men deze eigenschappen wil weten en de punten die nodig zijn om deze punten aan elkaar te verbinden. Welke schematisatie wordt toegepast is afhankelijk van de methode die bij de andere deelstap wordt toegepast. In figuur 3.2 is voor een gedeelte van de Westerschelde de ruimtelijke schematisatie van FINEL en WAQUA gegeven.

Bij de mathematische discretisatie worden de ondiep-water-vergelijkingen *herschreven tot vergelijkingen die de relatie aangeven tussen de waterstanden en de snelheden in de roosterpunten*. Hiervoor bestaan verschillende methodes. Een in Nederland veel toegepaste methode is de eindige-differentie-methode. Een andere methode is de eindige-elementen-methode.

3.3.2 Eindige-differentie-methode (EDM)

De eindige-differentie-methode kan als volgt globaal worden beschreven⁴:

⁴ voor een uitgebreide beschrijving, zie Stelling, 1984

Allereerst wordt d.m.v. een numeriek schema en het ontwikkelen van Taylorreeksen het stelsel partiële differentiaal vergelijkingen (PDE's) omgeschreven naar een stelsel gewone differentiaal vergelijkingen (ODE's). Vervolgens wordt ook door middel van Taylorreeksen dit stelsel gewone differentiaal vergelijkingen omgeschreven naar een stelsel discrete vergelijkingen. In het geval deze vergelijkingen expliciet zijn, kunnen ze direct worden opgelost. In het geval ze impliciet zijn, kunnen ze bijvoorbeeld met behulp van het Thomas-algoritme worden opgelost.

Het stelsel discrete vergelijkingen moet een aantal eigenschappen bezitten, die de overeenkomst met het stelsel partiële vergelijkingen beschrijven: stabiliteit (dat wil zeggen dat de oplossing eindig is) en consistentie (dat wil zeggen dat er overeenkomst is tussen het numerieke model en het algebraïsche model). Stabiliteit en consistentie houden samen convergentie in. Dat wil zeggen dat bij kleinere gridgrootte of tijdstap het verschil tussen de numerieke oplossing en de werkelijke oplossing van de PDE's ook kleiner wordt.

3.3.3 Eindige-elementen-methode (EEM)

Het basisidee van de eindige-elementen-methode⁵ is om de onbekende eigenschappen h , u en v te benaderen door een interpolatie tussen deze eigenschappen in de roosterpunten. Zo zijn de eigenschappen h , u en v in het gehele gebied gedefinieerd door de som van evenveel continue functies als er roosterpunten zijn (zie figuur 3.3). Vervolgens worden de ondiep-water-vergelijkingen vermenigvuldigd met weegfuncties en geïntegreerd over het gebied. Als de weegfuncties en de interpolatiefuncties gelijk worden genomen (Galerkin-methode) leidt deze procedure tot een kleinste kwadraten benadering van de PDE. Hierdoor ontstaat een stelsel gewone differentiaal vergelijkingen, dat in matrixvorm kan worden geschreven. Tenslotte wordt dit stelsel vertaald naar discrete vergelijkingen.

Bij het toepassen van de EEM voor FINEL worden de ondiep-water-vergelijkingen gediscretiseerd met behulp van het 1^o orde upwind schema en de discontinuë Galerkin-methode⁶. De hierdoor ontstane relatie tussen twee punten (middelpunten van elementen) wordt ontbonden in de richting loodrecht op de celwand tussen deze elementen. Vervolgens worden deze discrete vergelijkingen met behulp van de 'Riemann-solver'⁷ gesplitst in een deel dat door de celwand naar links gaat en een deel dat naar rechts gaat. De zo ontstane vergelijkingen beschrijven hoe verschillen in waterstanden en snelheden door de celwanden 'heen en weer reizen' en zo deze

⁵ voor een uitgebreide beschrijving, zie Vreugdenhil, 1994 en Praagman, 1983

⁶ zie Hughes, 1987

⁷ zie Glaister, 1990

eigenschappen in de punten veranderen. Ook bij deze methode gelden de eisen van stabiliteit, consistentie en convergentie.

3.3.4 Vergelijking EDM en EEM

De aanpak van de eindige-differentie-methode en de eindige-elementen-methode is totaal verschillend. Toch zijn de resultaten goed vergelijkbaar. Voor een eenvoudig geval is de uitkomst zelfs identiek (Vreugdenhil, 1985). Ook de vergelijking tussen FINWES96 en SCALDIS100 (paragraaf 4.6) laat een sterke overeenkomst in resultaten zien.

In de praktijk is het grootste verschil tussen de EDM en de EEM dat bij de EDM voor de ruimtelijke schematisatie een regelmatig (eventueel kromlijinig) vierkantennet wordt vereist. Bij de EEM kan zowel grootte als vorm van de elementen verschillen. Zie voor een voorbeeld van een gestructureerd en ongestructureerd grid figuur 3.2.

Ook is het mogelijk om via de eindige-elementen-methode op systematische wijze meer nauwkeurige benaderingen op te bouwen, door bijvoorbeeld parabolische interpolatiefuncties te gebruiken.

3.4 Software

Software is de verbinding tussen de numerieke vergelijkingen en de computersimulatie. Met behulp van een computertaal (Fortran) worden opdrachten aan de computer gegeven. De computer herhaalt vervolgens de numerieke bewerkingen een groot aantal maal, zodat voor elke tijdstap de waterstanden en snelheden in de roosterpunten berekend worden. De resultaten van deze berekeningen kunnen op verschillende manieren worden weergegeven en worden vergeleken met bijvoorbeeld metingen. Vervolgens kunnen onbekende factoren worden aangepast om de resultaten meer in overeenstemming te brengen met metingen (de kalibratie).

Als de berekende en bekende eigenschappen goed overeenkomen kan worden verondersteld dat ook de onbekende waterstanden en snelheden overeenkomen met de berekende waarden en kan het model worden gebruikt. Andere aannames zijn dat afrondingsfouten geen invloed hebben en dat er geen programmeerfouten zijn gemaakt.

Er zijn verschillende softwarepakketten beschikbaar om de waterbeweging te simuleren. Voor dit afstudeerproject zijn vooral WAQUA en FINEL van belang. WAQUA is gebaseerd op een eindige-differentie-methode (Zie ICIM Rijswijk, 1994). FINEL is gebaseerd op een eindige-elementen-methode. Een algemene beschrijving is opgenomen in bijlage 1.

4 Een stroommodel van de Westerschelde (FINWES96)

4.1 Algemeen

Met behulp van het softwarepakket FINEL (zie bijlage 1) is een numeriek rekenmodel van de Westerschelde gebouwd. Allereerst zijn keuzes gemaakt m.b.t. de omvang en nauwkeurigheid van het model. Deze keuzes worden in dit hoofdstuk toegelicht. Er is een schematisatie van de Westerschelde gemaakt en het stroommodel is gekalibreerd. Hierbij is extra aandacht gegeven aan de weergave van de eb-vloed-dominantie van de waterbeweging. Deze dominantie is van belang voor inzicht in de morfologische processen. Vervolgens is het model vergeleken met het bestaande WAQUA-model SCALDIS100.

4.2 Modelbegrenzing en randvoorwaarden

4.2.1 Eisen aan het model

Bij aanvang van het afstudeerproject zijn de volgende eisen aan het FINEL-model gesteld:

- bouw, kalibratie en toepassing van het model mag niet te veel tijd in beslag nemen (maximum rekentijd per standaardrun: 15 uur);
- benodigde gegevens moeten eenvoudig en digitaal te verkrijgen zijn;
- het model dient goed vergelijkbaar te zijn met de bestaande WAQUA-modellen (ongeveer gelijke maaswijdte en gebaseerd op dezelfde meetgegevens).

4.2.2 Modelbegrenzing

In FINEL kunnen open en gesloten grenzen worden opgegeven. Door de gesloten grenzen is geen stroming mogelijk. Het model wordt aangestuurd door aan de open grenzen randvoorwaarden op te geven (waterstanden, snelheden of waterstanden én snelheden).

In de Westerschelde worden permanent waterstanden en incidenteel snelheden gemeten. Het model kan dus voor elke periode worden toegepast als voor de randvoorwaarden waterstanden worden opgegeven. Daarom is voor open grenzen bij waterstandstations gekozen.

Voor de waterstanden en debietgegevens moet gebruik worden gemaakt van dezelfde meetgegevens, die voor de kalibratie van SCALDIS100 zijn gebruikt. Deze gegevens zijn bij RIKZ-Middelburg digitaal beschikbaar. Er staan waterstandsstations bij Vlissingen, Terneuzen, Hansweert, Baalhoek, Bath, Prosperpolder en Liefkenshoek. Bij Breskens is de waterstand bekend door een relatie met de waterstanden bij Vlissingen.

De dieptegegevens van de Westerschelde zijn vanaf de Noordzee tot aan de Nederlands-Belgische grens digitaal beschikbaar binnen het grid-informatie-systeem GIS-Arcinfo. Dit systeem wordt beheerd door RIKZ-Middelburg. Meetgegevens van de Schelde op Belgisch grondgebied zijn niet eenvoudig te verkrijgen. Daarom is één open rand bij de Nederlands-Belgische grens gekozen.

De zeewaartse grens is zo gekozen dat een zo groot mogelijk model ontstaat. Beperkende factoren hierbij zijn de eisen m.b.t. de rekentijd en maaswijdte. De rekentijd van een model wordt bepaald door de maaswijdte van het model en de rekenkracht van de computer. De berekeningen zijn uitgevoerd op een PC met een Pentium 133 Mhz processor. Uit enkele test-runs met constante diepte is gebleken dat een model van Vlissingen tot de grens met een maaswijdte tussen de 100 en 400 meter (SCALDIS100 en SCALDIS400) een rekentijd van 4 uur per getij oplevert. Een basisrun bestaat uit iets minder dan 4 getijden, dus is het model voldoende snel. De open grens aan zee wordt gevormd door de lijn Vlissingen-Breskens.

De gesloten grenzen worden gevormd door de dijken.

4.2.3 Randvoorwaarden

Het verloop van de waterstanden op de lijn Vlissingen-Breskens is niet bekend. In de berekeningen wordt daarom over de hele lijn de waterstand bij Vlissingen opgegeven. De begrenzing landinwaarts (de Nederlands-Belgische grens) is vlak bij het waterstandsstation Prosperpolder.

Als randvoorwaarden kunnen eventueel ook met een ander model berekende waterstanden of snelheden worden gebruikt. In dat geval is echter niet duidelijk door welk model afwijkingen met meetgegevens veroorzaakt worden. Bij een praktijktoepassing kan dit echter wel zinvol zijn.

4.3 Ruimtelijke schematisatie

4.3.1 Mesh

Om met behulp van FINEL de Westerschelde te modelleren is de Westerschelde eerst geschematiseerd door een mesh van driehoekjes (elementen). Één van de voordelen van het toepassen van de eindige-elementen-methode is dat de grootte en vorm van de elementen mag variëren. Hierdoor kan in gebieden waar de eigenschappen sterk veranderen gemakkelijk een fijnere schematisatie worden toegepast dan in gebieden waar de eigenschappen minder veranderen. Door een goede schematisatie kan dus een kortere rekentijd of een grotere numerieke nauwkeurigheid worden bereikt.

Er is gekozen voor een maaswijdte tussen de 100 en 400 meter. Verder is gekozen voor grotere elementen op de platen dan in de geulen. In de geulen

zijn de elementen zo vorm gegeven dat er in de breedte relatief (per lengte-eenheid) meer elementen zijn dan in de lengte.

Het mesh is gegenereerd met het softwarepakket SEPRAN (Segal, 1993). Hierbij worden de grenzen van verschillende gebieden en het aantal elementen daarlangs aangegeven. SEPRAN berekent vervolgens een regelmatig grid dat hier goed bij aansluit.

Voor de schematisatie van de Westerschelde zijn met behulp van lodingskaarten (schaal 1:10000) uit 1988/1990 de grenzen van geulen, bepaald. Hierbij is voor de hoofdgeulen de NAP-10m-dieptelijn aangehouden en voor de kortsluitgeulen het NAP-niveau (zie figuur 4.1).

De schematisatie bestaat uit 5830 punten en 11222 elementen. Het totale mesh is weergegeven in figuur 4.3.

4.3.2 Dieptes

Aan de middens van de elementen (driehoekjes) zijn dieptes toegekend. Dit is gedaan m.b.v. het bij Rijkswaterstaat operationele GIS-Arcinfo-systeem (zie figuur 4.2). In dit systeem zijn voor verschillende jaargangen op een regelmatig grid van 20 meter de dieptes beschikbaar. Deze bestanden zijn opgebouwd door het interpoleren naar de GIS-roosterpunten van gedigitaliseerde loding-gegevens. Er is gebruik gemaakt van lodingsgegevens van 1988.

Uit steekproeven is gebleken dat dieptes van geulen en platen in het model goed overeenkomen met die op de lodingskaarten. Bij enkele kortsluitgeulen is de schematisatie niet optimaal (relatief grote elementen). De invloed hiervan op de waterbeweging blijft beperkt.

Elementen waarvoor met het GIS-Arcinfo-systeem geen dieptes zijn gevonden (een aantal elementen langs de gesloten grenzen) worden in de modelberekeningen behandeld als droogstaande platen. Alleen een gedeelte van het Verdrongen Land van Saeftinge is tijdens de kalibratie (zie 4.4.2) handmatig ingevuld.

De dieptes van het totale model zijn weergegeven in figuur 4.4.

4.4 Kalibratie

4.4.1 Kalibratie-gegevens

De waterbeweging in het model is zoveel mogelijk in overeenstemming met de meetgegevens gebracht door het variëren van een aantal parameters. Hierbij is gebruik gemaakt van waterstandgegevens en debietgegevens.

Waterstandregistraties zijn beschikbaar van de stations: Vlissingen, Terneuzen, Hansweert, Baalhoek, Bath, Prosperpolder en Liefkenshoek (zie

figuur 2.4). Met de waterstanden te Vlissingen en Prosperpolder wordt het model aangestuurd. De andere meetreeksen worden voor de kalibratie gebruikt. Er wordt gebruik gemaakt van de reeksen van 28 en 29 september 1992 en 2 - 10 april 1989, omdat van deze periode SCALDIS100-resultaten beschikbaar zijn. Voor deze periodes zijn de belangrijkste getij-karakteristieken gegeven in tabel 4.1 en 4.2.

Van april 1989 bleken geen waterstanden bij Prosperpolder beschikbaar te zijn. Voor deze periode is het gemiddelde van de waterstanden bij Bath en Liefkenshoek genomen. In dit geval worden de waterstanden bij Bath correct weergegeven (zie bijlage 2).

In april 1989 zijn in de volgende raaien (zie figuur 2.4) stroommetingen uitgevoerd, waaruit debieten en getijvolumina zijn berekend:

1. Meetraai 2, gemeten op 4 april
2. Meetraai 7, 6 april
3. Meetraai 10, gemeten op 10 april

In de Westerschelde is meer dan 60 keer een debietmeting uitgevoerd, waaruit het getijvolume door een geul bepaald kan worden (De Jong, 1989).

4.4.2 Vaststelling wrijvingsparameter

Als kalibratie-parameter is uitsluitend de wrijving gebruikt. In de ondiep-water-vergelijkingen wordt de wrijving gerepresenteerd door de term met de bodemwrijvingsfactor f_w (zie vergelijking [3.2]). Bij de berekening hiervan wordt aangenomen dat stroomveranderingen zo langzaam zijn dat de bodemwrijving werkt als in een stationaire toestand. Dan geldt voor hydraulisch ruwe omstandigheden het volgende empirische verband⁸:

$$f_w = \frac{g \cdot \bar{u}}{C^2 \cdot h} \quad [4.1]$$

$$C = 18 \log \left(\frac{12 \cdot h}{k} \right) \quad [4.2]$$

waarin:

f_w	=	bodemwrijvingsfactor (zie vergelijking [3.1])	(s ⁻¹)
g	=	valversnelling	(m/s ²)
C	=	Chezy-waarde	(m ^{1/2} /s)
u	=	diepte gemiddelde snelheid	(m/s)
h	=	waterdiepte	(m)
k	=	ruwheid (Nikuradse)	(m)

⁸ In de FINEL-programmatuur wordt voor hydraulisch gladde condities een aangepaste formulering gebruikt.

De te variëren grootheid is de Nikuradse-waarde. Een grote waarde betekent een grote ruwheid, een lage waarde betekent een lage ruwheid. In bijlage 2.1 t/m 2.6 is voor verschillende ruwheden de invloed op de waterstanden en debieten weergegeven. Hierin is te zien dat bij lage ruwheden de getij-doordringing sterker is. De debieten en de getijslag zijn groter.

De kalibratie is als volgt verlopen (zie bijlage 2):

1. Er zijn vier berekeningen gemaakt met over het gehele gebied en in de tijd een constante Nikuradse-waarde (0.01, 0.05, 0.10 en 0.20 m). Op basis van de resultaten van deze vier berekeningen (zie bijlage 2.1 t/m 2.6) is gekozen voor een Nikuradse-waarde van 0.05 m.

De resultaten van de run met een ruwheid van 0.05 m zijn niet optimaal. Bij deze run treden vrij grote afwijkingen op rond hoogwater. Vooral bij Hansweert en Baalhoek stijgen de waterstanden tijdens vloed te langzaam en worden ze tijdens hoogwater te hoog. Tijdens eb dalen de waterstanden te snel en zijn de debieten te groot. Voor deze verschijnselen zijn twee verklaringen: de komberging is niet realistisch geschematiseerd of de ruwheid is in werkelijkheid niet constant.

2. Om de resultaten te verbeteren zijn allereerst de dieptes in het Land van Saeftinge aangepast. Bij controle bleek namelijk dat een groot gedeelte van het Land van Saeftinge in het model ontbrak. De reden hiervoor is dat dit gedeelte in 1988 niet is gemeten. De invloed van deze aanpassing is niet groot (zie bijlage 2.7 t/m 2.12).
3. Vervolgens is de ruwheid tijdens hoge vloodsnelheden (> 0.5 m/s) verlaagd tot een Nikuradse-waarde van 0.02 m. Dit verbetert de resultaten, vooral de weergave van het debiet (zie bijlage 2.7 t/m 2.12).

Deze verbetering van de resultaten bij toepassing van een lagere ruwheid tijdens hoge vloodsnelheden, kan er op wijzen dat ook in werkelijkheid de stroming tijdens hoge vloodsnelheden minder weerstand ondervindt. Dat dit tijdens eb niet optreedt zou kunnen samenhangen met de asymmetrie van de beddingvormen.

In verband met de beperkte tijd is het model niet verder gekalibreerd. Bij een verdere kalibratie zou aandacht kunnen worden besteed aan de zeewaartse randvoorwaarde, de ruwheid tijdens eb, beddingvormen (ruwheidsvoorspellers), de in- en uitstroming van plaatgebieden en de diepteschematisatie. De verwachting is dat vooral een betere definitie van de zeewaartse randvoorwaarde (tussen Vlissingen en Breskens) de resultaten positief zal beïnvloeden (zie volgende paragraaf).

4.4.3 Gevoeligheidsanalyse

Om de betrouwbaarheid van het model te testen is de invloed bepaald van enkele belangrijke invoerparameters: de inspeeltijd en de randvoorwaarden.

Aan het begin van de berekening wordt in het gehele estuarium een constante waterstand opgelegd. Het model heeft enige tijd nodig om overall realistische waterstanden te berekenen. Dit gebeurt echter vrij snel. Bij de standaardrun wordt een inspeeltijd van 21 uur aangehouden (7 uur rekentijd). Als test is ook een run met 93 uur inspeeltijd berekend (30 uur rekentijd). In alle meetpunten bleek de afwijking tussen de resultaten van deze run en de standaardrun niet meer dan 0.01 m te bedragen. Conclusie:

Een inspeeltijd van 21 uur (7 uur rekentijd) is ruim voldoende.

Aan de open randen wordt per tijdstip één waterstand (Vlissingen) opgelegd, hoewel de waterstand in werkelijkheid over de rand varieert. Deze variatie is echter klein t.o.v. de veranderingen in waterstand tijdens een getij. Als test is een modelberekening gemaakt met aan de zeewaartse rand de waterstand zoals die geldt voor Breskens. De resultaten van deze run en de standaardrun komen redelijk overeen (zie bijlage 2.13 t/m 2.18). Tijdens hoogwater zijn de afwijkingen van de orde van grootte die optreedt bij berekeningen met verschillende ruwheden. Op enkele punten komt deze testberekening beter overeen met de metingen dan de basisrun, op andere punten juist niet. Conclusie:

De keuze van de zeewaartse randvoorwaarden (waterstanden gemeten te Vlissingen of berekend te Breskens) beïnvloedt de berekeningsresultaten. Bij verdere kalibratie of nieuwe modellen moet daarom aandacht aan de randvoorwaarden worden besteed.

4.4.4 Modelresultaten

De resultaten van het stroommodel FINWES96 worden samen met de resultaten van het WAQUA-model SCALDIS100 gepresenteerd in de figuren 4.5 t/m 4.10, 4.13 t/m 4.17 en de tabellen 4.4 t/m 4.6.

De modelresultaten van FINWES96 zijn verkregen met een over het gehele estuarium constante ruwheid (Nikuradse-waarde) van 0.05 m tijdens eb en lage vloodsnelheden (< 0.5 m/s) en 0.02 m tijdens hoge vloodsnelheden (> 0.5 m/s). Voor SCALDIS100 is de ruwheid vergelijkbaar (zie paragraaf 4.6).

De berekende waterstanden komen over het algemeen goed overeen met de metingen (0.05 tot 0.10 m). De belangrijkste afwijkingen zijn:

- Bij alle waterstandstations achterlopen van de berekende waterstanden t.o.v. de gemeten waterstanden tijdens het laatste deel van de waterstandsstijging en in Hansweert en Baalhoek voorlopen tijdens het laatste deel van de waterstandsval (figuur 4.5 t/m 4.9).

- Bij Hansweert, Baalhoek en Bath worden te hoge hoogwaters berekend en bij Hansweert en Baalhoek te lage laagwaters (tabel 4.4).

De overeenkomst tussen de berekende debieten en debieten op basis van gemeten snelheden is opmerkelijk goed. Vooral omdat het model uitsluitend met waterstanden wordt aangestuurd. De afwijkingen die nog optreden zijn:

- Tijdens het eerste deel van de eb worden te grote debieten berekend (zie figuur 4.10).
- Het ebvolume in de vloedgeul van raai 7 (Everingen) is te groot.

De berekende dominante volumina komen verder goed overeen met een morfologische evenwichtsrelatie op basis van metingen (zie figuur 4.15). Op deze evenwichtsrelatie wordt in paragraaf 4.5 verder ingegaan.

4.5 Dominantie van de waterbeweging

4.5.1 Algemeen

Sommige geulen trekken tijdens vloed meer water dan tijdens eb. Door andere geulen stroomt tijdens eb meer water dan tijdens vloed. Voor een bepaalde geul wordt de getijfase, waarin het meeste water door de geul stroomt dominant genoemd (zie Svašek, 1994 en figuur 4.11). Deze vloed- of eb-dominantie is belangrijk voor de morfologische processen.

De dominante stroomrichting kan berekend worden door de debieten over één of meerdere getijden te middelen. Een ruimtelijk beeld van de met FINWES96 berekende dominante stroomrichting is gegeven in de figuren 4.16 en 4.17. Deze getijresiduele debieten zijn bepaald door de debieten van 17 getijden te middelen (2 t/m 10 april).

Op twee manieren is gecontroleerd of de eb-vloed-dominantie correct wordt gesimuleerd. Allereerst zijn de eb- en vloedvolumina van de geulen in raai 7 afzonderlijk vergeleken met de volumina op basis van gemeten debieten. Vervolgens zijn de volumina in de geulen van raai 6 en 7 vergeleken met een evenwichtsrelatie tussen dominante volumina en doorstroomoppervlak. Deze controles worden in de volgende paragrafen beschreven.

Met een stroommodel kunnen voor elke willekeurige raai de eb- en vloedvolumina eenvoudig worden bepaald. Bij een morfologische studie kan dit waardevolle gegevens opleveren (Svašek, 1994). Wegens tijdgebrek is tijdens dit afstudeerproject niet verder op deze toepassing ingegaan.

4.5.2 Controle m.b.v. individuele eb- en vloedvolumina

De verdeling van de berekende eb- en vloedvolumina wijkt enigszins af van de verdeling van de getijvolumina zoals die op basis van metingen is bepaald (figuur 4.13 en 4.14 en tabel 4.6).

Bij de interpretatie van dit verschil moet echter het volgende in overweging worden genomen. De 'gemeten' volumes worden bepaald op basis van simultane snelheidsmetingen en lodingen. Voor de debietmeting in raai 7 (april 1989) is gebruik gemaakt van acht meetschepen (zie voor de lokatie bijlage 3). Om uit de metingen volumina te bepalen moeten de gemeten snelheden worden toegekend aan een gedeelte van het gemeten doorstroomoppervlak. Met een stroommodel worden de eb- en vloedvolumina berekend uit de debieten in alle elementen die de raai vormen (voor raai 7 zijn dit 28 elementen). Daarbij is direct duidelijk bij welk doorstroomoppervlak deze debieten horen. Het is dus mogelijk dat met een model berekende volumina nauwkeuriger zijn dan op basis van gemeten snelheden berekende volumina. Het optreden van verschillen tussen berekende en 'gemeten' eb- en vloedvolumina betekent dus niet per definitie een slecht stroommodel.

4.5.3 Controle m.b.v. een evenwichtsrelatie

In veel estuaria blijkt een verband te bestaan tussen het getijvolume door een geul en het doorstroomoppervlak van een geul. De getijvolumes worden bepaald uit debietmetingen in de geulen van raai 2 t/m 10 (zie figuur 2.4). Deze metingen zijn uitgevoerd tijdens verschillende getijden (variërend van springtij tot doodtij) in de periode 1950 tot 1990. Om ze toch te kunnen vergelijken zijn de getijvolumes herleid naar gemiddeld getij.

Op basis hiervan zijn evenwichtsrelaties opgesteld (Svašek, 1994). Er blijkt een eenvoudige en sterke relatie te bestaan tussen het ebvolume in ebgeulen en het vloedvolume in vloedgeulen enerzijds en het doorstroomoppervlak van deze geulen anderzijds. Deze relatie is identiek voor ebgeulen en vloedgeulen.

In figuur 4.15 zijn de naar gemiddeld getij herleidde dominante volumina uitgezet tegen het bijbehorende doorstroomoppervlak. Zowel de uit de metingen bepaalde waarden als de op basis daarvan berekende evenwichtsrelatie zijn weergegeven.

Ter controle is voor de geulen in raai 6 en 7 met FINWES96 eveneens het naar gemiddeld getij herleide dominante volume bepaald. Ook de resultaten hiervan zijn weergegeven in figuur 4.15. De met FINWES96 berekende waarden blijken sterk overeen te komen met de evenwichtsrelatie. Dit wijst op een correct weergegeven dominantie.

4.6 Vergelijking FINWES96 met SCALDIS100

De twee meest recente stroommodellen van de Westerschelde (FINWES96 en SCALDIS100) zijn met elkaar vergeleken. Ze verschillen in begrenzing, schematisatie, randvoorwaarden en software (zie tabel 4.3). De resultaten blijken echter sterk overeen te komen.

FINWES96 is in het kader van dit afstudeerproject gebouwd met behulp van het softwarepakket FINEL. Dit pakket is gebaseerd op een eindige-elementen-methode (bijlage 1). SCALDIS100 is door RIKZ-Middelburg gebouwd met

behulp van WAQUA. WAQUA is een softwarepakket dat is gebaseerd op de eindige-differentie-methode (Dekker e.a., 1994). Omdat van SCALDIS100 geen resultaten van reststroomberekeningen beschikbaar zijn, zijn voor de vergelijking daarvan resultaten van DETWES, een voorloper van SCALDIS100 gebruikt (Van der Male, 1993).

De belangrijkste modelkarakteristieken van beide modellen worden in tabel 4.3 gegeven. De resultaten van beide modellen worden gecombineerd gepresenteerd in de figuren 4.5 t/m 4.10 en 4.13 t/m 4.15 en de tabellen 4.4 t/m 4.6.

De ruwheid wordt in SCALDIS100 opgegeven via de Manning-waarde en in FINWES96 via de Nikuradse-waarde. Een indicatie van hoe de Manning-waarde en de Nikuradse-waarde zich tot elkaar verhouden is gegeven in figuur 4.12. In deze figuur wordt voor verschillende Nikuradse- en Manning-waarden de Chezy-waarde als een functie van de diepte gegeven. De Chezy waarde kan namelijk zowel met de Nikuradse-waarde (zie vergelijking [4.2]) als met behulp van de Manning-waarde worden bepaald. In het laatste geval geldt (Ven te Chow, 1959):

$$C = \frac{1.49}{n} * h^{\frac{1}{6}} \quad [4.3]$$

waarin:

C	=	Chezy-waarde	(m ^{1/2} /s)
h	=	waterdiepte	(m)
n	=	ruwheidsfactor (Manning)	(-)

Bij beide modellen treedt voor hoogwater in het model vertraging t.o.v. de natuur op en voor laagwater een versnelling. Waarschijnlijk wordt dit veroorzaakt door het gebruik van een constante ruwheidsparameter, terwijl de ruwheid in werkelijkheid varieert per gebied en per getij-fase. Een indicatie van de invloed hiervan is de verbetering die bij FINWES96 optreedt door tijdens de vloedperiode een lagere ruwheid toe te passen.

De weergave van de hoog- en laagwaters is in FINWES96 en SCALDIS100 totaal verschillend (zie tabel 4.4). SCALDIS100 geeft de hoogwaters ongeveer 0.15 m te laag en de laagwaters ongeveer 0.10 m te hoog weer, terwijl FINWES96 de hoogwaters ongeveer 0.10 m te hoog en de laagwaters ongeveer 0.10 m te laag weergeeft. Dit verschijnsel kan niet door het verschil in ruwheid worden verklaard. De ruwheid is in SCALDIS100 namelijk lager dan in FINWES96, wat het tegenovergestelde verschijnsel zou veroorzaken. Omdat in SCALDIS100 al bij Vliissingen de hoogwaters te laag zijn wordt deze afwijking waarschijnlijk in dit model zeewaarts van Vliissingen veroorzaakt en stroomopwaarts versterkt.

Ook de weergave van de debieten is in beide modellen verschillend. Zowel qua volumina (tabel 4.6) als variërend in de tijd (figuren 4.10, 4.13 en 4.14).

De netto debieten van FINWES96 en DETWES komen wel sterk overeen (figuren 4.16 t/m 4.19). Met DETWES zijn de reststromen van een matig springtij berekend (Van der Male, 1993).

Geconcludeerd kan worden dat over het algemeen de resultaten van beide modellen goed overeenkomen. De weergave van hoog- en laagwaters en debieten is echter wel verschillend. Beide gebruikte methoden lijken gelijkwaardig. Verschillen in modelschematisatie en randvoorwaarden kunnen echter verschillende resultaten tot gevolg hebben. Bij twijfel aan modelresultaten is daarom een uitgebreide gevoeligheidsanalyse en/of het gebruik van meerdere modellen aan te bevelen.

5 Fysisch mathematische modellering van sedimenttransport

5.1 Algemeen

De sedimentbeweging hangt nauw samen met de waterbeweging. De invloed van golven is in de diepere delen van de Westerschelde verwaarloosbaar. Daarom is bij dit afstudeerproject alleen het sedimenttransport onder invloed van stroming bestudeerd. Er zijn verschillende methoden ontwikkeld om op basis van stroming het sedimenttransport te modelleren.

In dit hoofdstuk worden allereerst enkele belangrijke begrippen beschreven. Vervolgens komen enkele veel gebruikte methoden om sedimenttransport te modelleren aan de orde. Tenslotte worden de bij dit afstudeerproject gebruikte evenwichtstransport-formules beschreven.

5.2 Fysica van het transport

5.2.1 Bodemtransport en zwevend transport

Bij de modellering van sedimenttransport is het gebruikelijk om het sedimenttransport onder te verdelen in bodemtransport en zwevend transport. De exacte overgang tussen bodemtransport en zwevend transport is moeilijk te definiëren. Het onderscheid wordt echter gemaakt omdat het gedrag verschillend is. Het bodemtransport past zich onmiddellijk aan de lokale stroomtoestand aan en kan daarom worden berekend als een functie van deze stroomtoestand.

Voor het zwevend transport kan op deze manier slechts een lokaal evenwichtstransport worden gevonden. Het werkelijke sedimenttransport zal hier in veel gevallen van afwijken omdat het zwevend transport zich niet direct aanpast.

5.2.2 Aanpassingsverschijnselen

In een estuarium zoals de Westerschelde is de stroomsituatie niet continu. Daarom varieert ook het evenwichtstransport, zowel in de tijd als in de ruimte. Het sedimenttransport past zich voortdurend aan de nieuwe evenwichtstoestand aan (zie figuur 5.1).

In een getijsituatie verandert de stroomtoestand voortdurend in de tijd. Als sediment ver van de bodem verwijderd is (hoog in de verticaal) zal de concentratie pas na enige tijd zijn aangepast. Deze naijling wordt gekarakteriseerd door de aanpassingstijd, de tijd die nodig is voor aanpassing aan de veranderde stroomtoestand. De aanpassingstijd hangt af van de mate van onder- of oververzadiging en de verhouding tussen de valsnelheid van het sediment en de stroomsnelheid.

De stroomsituatie kan in de tijd, maar ook in de ruimte veranderen. Ook in dit geval treden aanpassingsverschijnselen op. Wanneer bijvoorbeeld in de richting van de stroom het doorstroomoppervlak kleiner wordt, neemt het evenwichtstransport toe (hogere snelheden, dus meer turbulentie). De sedimentconcentratie in het aanstromende water is in dit geval meestal lager dan de evenwichtskoncentratie (onderverzadiging) en er zal aanpassing optreden tot het evenwicht is bereikt. Dit proces gaat gepaard met erosie. Bij dieper of breder worden van het doorstroomoppervlak vindt het tegenovergestelde proces plaats (oververzadiging). Dit gaat meestal gepaard met sedimentatie. Dit proces wordt gekarakteriseerd door de aanpassingslengte, de lengte die nodig is voor de aanpassing aan de lokale omstandigheden. Ook de aanpassingslengte hangt af van de mate van onder- of oververzadiging en de verhouding tussen valsnelheid en stroomsnelheid.

5.2.3 Zandtransport en slibtransport

Het sedimenttransport kan ook worden onderverdeeld naar korrelgrootte, namelijk in zandtransport en slibtransport. Dit onderscheid is belangrijk omdat zand en slib zich verschillend gedragen. De valsnelheid van grote sedimentkorrels is namelijk groter dan van kleine deeltjes. Groffer sediment zal dus minder gemakkelijk omhoog getransporteerd worden. In de Westerschelde worden zand en slibconcentraties afzonderlijk gemeten. De grens tussen zand en slib is bij deze metingen bij 0.053 mm (korreldiameter).

Zandtransport bestaat voor een belangrijk deel uit bodemtransport en ook het zwevend zandtransport vindt vooral vlak bij de bodem plaats. Het zandtransport past zich daarom snel aan de evenwichtstoestand aan en is redelijk goed met evenwichtstransportformules te beschrijven.

Slibtransport bestaat bijna geheel uit zwevend transport dat van elders wordt aangevoerd. De slibconcentratie wordt namelijk niet bepaald door de lokale opwoeling (het bodem-materiaal in de geulen bestaat voornamelijk uit zand). De aanpassingstijd en aanpassingslengte van slibtransport is zeer groot en de concentratie is dus vrijwel constant in de tijd. De neerslag van slib vindt voornamelijk plaats in gebieden met permanent lage snelheden. Voor de ontwikkeling van geulen is het slibtransport daarom niet zo belangrijk. Bij dit afstudeerproject is alleen het zandtransport gemodelleerd.

5.3 Mathematische modellering van het transport

5.3.1 Algemeen

Bodemtransport kan als een functie van de lokale hydraulische omstandigheden worden beschreven. Hiervoor is een groot aantal formules ontwikkeld.

Bij de berekening van het zwevend transport wordt meestal aangenomen dat de verplaatsing van het sediment dat zich in het water bevindt gelijk is aan de waterverplaatsing. De sedimentconcentratie in het water kan op

verschillende manieren worden berekend. Als wordt aangenomen dat de dichtheid van het sediment constant is kan uit de massabalans het volgende verband [5.1] worden afgeleid. Hierin wordt de turbulentie meegenomen via de Reynolds benadering en de interactie tussen stroom en sediment volgens het concept van eddy-viscositeit (Van Rijn, 1993).

$$\frac{\partial c}{\partial t} + \frac{u \cdot c}{\partial x} + \frac{v \cdot c}{\partial y} + \frac{(w - w_s) \cdot c}{\partial z} - \frac{\epsilon_{s,x} \cdot \frac{\partial c}{\partial x}}{\partial x} - \frac{\epsilon_{s,y} \cdot \frac{\partial c}{\partial y}}{\partial y} - \frac{\epsilon_{s,z} \cdot \frac{\partial c}{\partial z}}{\partial z} = 0 \quad [5.1]$$

hierin is:

c	=	sedimentconcentratie	(kg/m ³)
u, v, w	=	snelheid in x-, y- en z-richting	(m/s)
ϵ_s	=	sediment diffusie coëfficiënt	(m ² /s)
w_s	=	valsnelheid sediment deeltje	(m/s)
t	=	tijd	(s)

Het volledig drie-dimensionaal (3D) oplossen van deze vergelijking kost enorm veel rekencapaciteit. De snelheden en diffusie-coëfficiënten moeten in elk punt bekend zijn, zodat een volledig drie-dimensionaal stroommodel gebouwd moet worden. Om deze redenen worden vaak vereenvoudigingen toegepast.

In veel gevallen wordt quasi-drie-dimensionaal gerekend. Dit wil zeggen dat gebruik wordt gemaakt van een twee dimensionaal horizontaal stroommodel. Door aannames te doen voor de verdeling van de snelheden en diffusie-coëfficiënten over de verticaal wordt de verdeling van de sedimentconcentratie over de verticaal berekend. Een veel gebruikte quasi-3D-benadering is de toepassing van een diepte-geïntegreerd stroommodel in combinatie met een logaritmisch snelheidsprofiel.

Er kan ook gebruik worden gemaakt van een puur twee-dimensionaal rekenmodel. Hierbij wordt alleen een diepte-geïntegreerde concentratie berekend.

Verder wordt vaak verondersteld dat het zwevend transport zich evenals het bodemtransport direct aanpast aan de lokale stroomtoestand. Het lokale sedimenttransport is dan gelijk aan het lokale evenwichtstransport. In dit geval kan het sedimenttransport als een functie van de lokale omstandigheden berekend worden.

5.3.2 Gebruikte methode

Hoewel in de Westerschelde het zandtransport niet per definitie gelijk is aan het evenwichtstransport is bij de zandtransportberekeningen in het kader van dit afstudeerproject wel voor deze benadering gekozen. Met betrekkelijk weinig inspanning kan met de evenwichtstransport-benadering namelijk relatief veel informatie worden verkregen. Er kan een eerste schatting van de

grootte van het sedimenttransport en de verdeling over het estuarium worden gegeven. Verder kan de invloed van veranderingen in de stroomtoestand geschat worden. Met deze informatie en ervaring kan gericht worden gewerkt aan modellering met behulp van andere benaderingen.

De beperkingen van de gevolgde benadering moeten echter wel bij de interpretatie van de resultaten betrokken worden. De belangrijkste beperking is dat naijling en onder- en oververzadiging niet worden gemodelleerd.

5.3.3 Transportformules

Er zijn verschillende formules ontwikkeld om het evenwichtstransport te berekenen. Bij dit afstudeerproject is gebruik gemaakt van de formule van Engelund-Hansen en de formule van Van Rijn. Voor beide formules is uitgegaan van de beschrijving zoals die wordt gegeven in Van Rijn, 1993. De formule van Engelund-Hansen was reeds in de FINEL-programmatuur beschikbaar. De formule van Van Rijn is in het kader van dit afstudeerproject toegevoegd.

De formule van Engelund-Hansen is gebaseerd op het energie-balans-concept. Hierbij wordt geen onderscheid gemaakt tussen bodemtransport en zwevend transport. Door middel van kalibratie zijn onbekende parameters bepaald. De formule van Engelund/Hansen luidt:

$$S_{tot} = \rho_s * \frac{0.05 * \bar{u}^5}{(s-1)^2 * g^{\frac{1}{2}} * D_{50} * C^3} \quad [5.2]$$

waarin:

S_{tot}	= totale zandtransport	(kg/m/s)
$\bar{u}$	= dieptegemiddelde snelheid	(m/s)
s	= relatieve dichtheid (ρ_s/ρ)	(-)
g	= valversnelling	(m/s ²)
D_{50}	= korreldiameter	(m)
C	= Chezy-coëfficiënt	(m ^{1/2} /s)
ρ_s	= soortelijke dichtheid sediment	(kg/m ³)

De formule van Van Rijn maakt onderscheid tussen zwevend transport en bodemtransport. Het totale zandtransport is de som van bodemtransport en zwevend transport.

$$S_{tot} = S_s + S_b \quad [5.3]$$

waarin:

S_{tot}	= totale zandtransport	(kg/m/s)
S_s	= zwevend zandtransport	(kg/m/s)
S_b	= bodemtransport	(kg/m/s)

Het zwevend transport wordt gedefinieerd als de integraal van het produkt van de snelheid (u) en de concentratie (c) vanaf de laag waarin bodemtransport optreedt ($z=a$) tot het wateroppervlak ($z=h$). Dan geldt:

$$S_s = c_a \cdot \bar{u} \cdot h \cdot \frac{1}{h} \int_a^h \left(\frac{u}{\bar{u}} \cdot \frac{c}{c_a} \right) dz = c_a \cdot \bar{u} \cdot h \cdot F \quad [5.4]$$

met:

$$F = \int_a^h \left(\frac{u}{\bar{u}} \cdot \frac{c}{c_a} \right) \cdot d\left(\frac{z}{h}\right) \quad [5.5]$$

waarin:

S_s	= zwevend zandtransport	(kg/m/s)
c	= zandconcentratie	(kg/m ³)
c_a	= zandconcentratie bij de bodemlaag	(kg/m ³)
u	= snelheid	(m/s)
$\bar{u}$	= dieptegemiddelde snelheid	(m/s)
h	= waterdiepte	(m)

De factor F wordt berekend door aannames te doen m.b.t. de verdeling van snelheid en zandconcentratie over de diepte. Van Rijn neemt verder aan dat de dikte van de bodemlaag gelijk is aan de effectieve ruwheidsparemeter ($a=k$). Voor de zandconcentratie aan de rand van deze laag geldt volgens Van Rijn:

$$c_a = 0.015 \cdot \frac{D_{50}}{a} \cdot \frac{T^{1.5}}{D_*^{0.3}} \quad [5.6]$$

met:

$$T = \frac{\tau_b' - \tau_{b,cr}}{\tau_{b,cr}} \quad [5.7]$$

waarin:

T	= bodemschuifspanningsparameter	(-)
D_*	= bewegingsparameter	(-)
τ_b'	= effectieve bodemschuifspanning	(N/m ²)
$\tau_{b,cr}$	= kritieke bodemschuifspanning	(N/m ²)

Voor de berekening van het bodemtransport gaat Van Rijn uit van de bewegingsvergelijkingen voor individuele deeltjes. De onbekende parameters zijn door middel van kalibratie bepaald. In de meeste gevallen geldt:

$$S_b = \rho_s * 0.053 * (s-1)^{0.5} * g^{0.5} * D_{50}^{1.5} * D_*^{-0.3} * T^{2.1} \quad \text{voor } T < 3 \quad [5.8]$$

$$S_b = \rho_s * 0.1 * (s-1)^{0.5} * g^{0.5} * D_{50}^{1.5} * D_*^{-0.3} * T^{1.5} \quad \text{voor } T \geq 3 \quad [5.9]$$

waarin:

S_b	= bodemtransport	(kg/m/s)
s	= relatieve dichtheid (ρ_s/ρ)	(-)
g	= valversnelling	(m/s ²)
D_{50}	= korreldiameter	(m)
T	= bodemschuifspanningsparameter	(-)
D_*	= bewegingsparameter	(-)
ρ_s	= soortelijke dichtheid sediment	(kg/m ³)

De factor 0.015 in vergelijking [5.6] is niet dimensieloos. Voor de onbekende parameters (D_* , τ_b' en $\tau_{b,cr}$) en de achtergronden van de beschreven formules wordt verwezen naar Van Rijn, 1993.

6 Berekeningen van zandtransport in de Westerschelde

6.1 Algemeen

Op basis van het stroommodel FINWES96 (zie hoofdstuk 4) zijn de zandtransporten in de Westerschelde berekend. Op basis van berekende waterstanden en snelheden is voor de rekenperiode (2 t/m 10 april 1989) elke 10 minuten het zandtransport in ieder element berekend. Er is gebruik gemaakt van de evenwichtstransportbenadering. Hierbij worden de aanpassingsverschijnselen verwaarloosd. Omdat de erosie en sedimentatie klein zal zijn t.o.v. de waterdiepte wordt in het stroommodel de bodemligging tijdens de berekening niet aangepast.

De berekeningen zijn gekalibreerd met behulp van gemeten zandconcentraties. Hierbij is de aanname dat de naijling verwaarloosbaar is geëvalueerd. Vervolgens zijn de over 17 getijden gemiddelde zandtransporten berekend. Voor de gebieden boven de laagwaterlijn zijn de richtingen van deze transporten vergeleken met de asymmetrie van beddingvormen (bepaald uit luchtfoto's, zie paragraaf 6.3.3). Verder zijn op basis van de berekende zandtransporten initiële bodemveranderingen berekend. De resultaten hiervan zijn vergeleken met gemeten bodemveranderingen (zie paragraaf 6.3.4). Op basis van deze vergelijking zijn de aannames dat de aanpassingslengte en de bodemveranderingen tijdens een getij verwaarloosbaar zijn, getoetst.

6.2 Kalibratie zandtransport-berekeningen

Voor de berekening van zandtransporten in het kader van dit afstudeerproject is de evenwichtstransport benadering gevolgd. Hierbij wordt het sedimenttransport berekend op basis van de actuele en lokale hydraulische situatie (snelheid, diepte en ruwheid).

De belangrijkste parameter bij het berekenen van zandtransport is de lokale snelheid. De met het stroommodel berekende snelheid wordt sterk bepaald door de lokale bodemschematisatie⁹. Daarom is het bij zandtransportberekeningen belangrijk om deze parameters te controleren. Voor lokaties waar de bodemligging tijdens de meting overeenkomt met de modelschematisatie worden de snelheden goed gereproduceerd. Op lokaties waar de modeldiepte sterk afwijkt van de diepte tijdens de meting worden wel afwijkende snelheden gevonden. Bij het vergelijken van zandtransporten op basis van gemeten en berekende snelheden (bijlage 3) moet hier rekening mee worden gehouden.

⁹ Een stroommodel wordt afgeregeld op waterstanden en debieten. Als deze parameters realistisch worden weergegeven kan de lokaal berekende snelheid toch nog sterk afwijken van gemeten waarden. In veel gevallen wordt dit veroorzaakt doordat de bodemligging tijdens de metingen lokaal afwijkt van de bodemschematisatie in het model ($v = q/h$).

Tijdens snelheidsmetingen in de Westerschelde worden in veel gevallen ook sedimentconcentraties gemeten. Voor de kalibratie van de zandtransport-berekeningen is gebruik gemaakt van de metingen op 6 april 1989 bij raai 7 (Terneuzen) en recente metingen op de drempel van Hansweert (oktober 1995). Zie bijlage 3.

In een spread sheet zijn met de evenwichtstransportformule van Engelund Hansen de zandtransporten berekend op basis van de gemeten snelheden. Dit is gedaan voor verschillende ruwheidsparementers. Hiervoor is evenals bij de kalibratie van het stroommodel de Nikuradse-waarde gebruikt. Deze evenwichtstransporten zijn vergeleken met de zandtransporten die zijn gebaseerd op gemeten concentraties. Bij een Nikuradse-waarde van 0.40 m bleek voor alle lokaties de hoeveelheid sedimenttransport redelijk overeen te komen¹⁰ (zie figuur 6.1). Vooral ter plekke van de drempel van Hansweert zijn de resultaten erg goed (zie bijlage 3.9 e.v. en 3.21 e.v.). De metingen in raai 7 (nabij Terneuzen) laten veel grotere afwijkingen zien (zie bijlage 3.2 e.v.).

Ook bij de berekeningen van zandtransporten op basis van met het stroommodel berekende stroomsnelheden is vervolgens een Nikuradse waarde van 0.40 m gebruikt.

6.3 Evaluatie van de zandtransport-berekeningen

6.3.1 Algemeen

In de figuren 6.2 t/m 6.5 en bijlage 3 worden de resultaten van de zandtransport-berekeningen gepresenteerd. In de volgende paragrafen worden deze resultaten beschreven en geëvalueerd.

Bij de evaluatie is gebruik gemaakt van gemeten zandconcentraties, luchtfoto's (gemeten beddingvormen) en het GIS-Arcinfo systeem (gemeten bodemveranderingen).

6.3.2 Naijling

Bij het vergelijken van de evenwichtstransporten met de op basis van gemeten zandconcentraties berekende transporten valt op dat de evenwichtstransporten structureel voorlopen op de werkelijke transporten (bijlage 3.3 t./m 3.6, 3.10 t./m 3.19 en 3.22 t./m 3.26). Dit was te verwachten omdat bij de evenwichtstransport-benadering de in werkelijkheid optredende aanpassingsverschijnselen verwaarloosd zijn (zie hoofdstuk 5).

¹⁰ Zowel bij de kalibratie van het stroommodel als bij de kalibratie van de zandtransport-berekeningen wordt de Nikuradse-waarde als ijkingsparameter gebruikt. Uit de kalibratie van het stroommodel volgt een Nikuradse-waarde van 0.05 m. Bij kalibratie van de zandtransport-berekeningen wordt een Nikuradse-waarde van 0.40 m gevonden. Hieruit blijkt dat door ijking gevonden parameters slechts een beperkte fysische waarde hebben.

Omdat de naijling structureel verwaarloosd wordt, wordt de fout die ontstaat tijdens snelheidstoename vaak gecompenseerd door de fout die ontstaat tijdens de snelheidsafname (zie figuur 5.1: onderverzadiging = oververzadiging). In dit geval kunnen de getijgemiddelde (netto) zandtransporten goed berekend worden.

Voor de Westerschelde is bij de berekening van netto zandtransporten de naijling echter wel van (beperkte) invloed.

Bij de kentering van eb naar vloed verandert de stromingstoestand namelijk relatief langzaam en na kentering zijn de zandconcentraties daarom laag. Bij de kentering van vloed naar eb nemen de snelheden echter zeer snel af. In werkelijkheid blijven de zandtransporten daarom ook tijdens het begin van de ebfase nog enige tijd vrij hoog. Bij de evenwichtstransportberekening wordt dit verschijnsel echter niet gemodelleerd. Het netto zandtransport wordt daarom in een aantal gevallen sterker door de eb gedomineerd dan berekend (zie bijlage 3.4, 3.10, 3.22, 3.23 en 3.24). In deze bijlagen is het verschil tussen gemeten en berekend evenwichtstransport na vloed-eb-kentering duidelijk zichtbaar.

Om de sedimentbeweging nauwkeuriger te modelleren zou naijling in de berekeningen moeten worden betrokken. Voor een eerste indicatie zijn de berekende zandtransporten echter goed bruikbaar.

6.3.3 Dominantie van het zandtransport

Uit de om de 10 minuten berekende sedimenttransporten kunnen netto zandtransporten worden bepaald. Dit is gedaan door de zandtransporten van 17 getijden (2 t/m 10 april 1989) te middelen. Een ruimtelijk beeld van deze netto zandtransporten wordt gegeven in figuur 6.2 en 6.3. In aansluiting bij de terminologie van paragraaf 4.5 wordt de getijfase waarin het meeste zand wordt getransporteerd dominant genoemd. De dominante zandtransportrichting komt sterk overeen met de dominante stroomrichting (zie figuur 4.16 t/m 4.19). Er zijn echter ook verschillen. Enkele gebieden die qua berekende waterbeweging zwak eb-dominant zijn, zijn qua berekend sedimenttransport vloed-dominant. Dit verschijnsel kan een fysische oorzaak hebben. Door de asymmetrie van het getij zijn de maximale vloodsnelheden in veel gevallen namelijk hoger dan de maximale ebsnelheden en de maximale evenwichtstransporten zijn tijdens vloed dan meer dan evenredig hoger dan de maximale eb-evenwichtstransporten. Het kan echter ook zo zijn dat de ebtransporten te laag worden berekend omdat naijling verwaarloosd wordt (zie vorige paragraaf).

Dominantie van het sedimenttransport veroorzaakt asymmetrische bodemvormen. Als onderdeel van een geomorfologische luchtfoto-interpretatie is op basis van bodemvormen de dominante sedimenttransportrichting boven de laagwaterlijn geïnventariseerd (Huijs, 1995). De resultaten hiervan zijn vergeleken met berekende dominante sedimenttransportrichtingen (in figuur 6.4 is een voorbeeld gegeven).

Voor de luchtfoto-interpretatie is gebruik gemaakt van foto's die op de volgende data zijn genomen:

deelgebied 2 en 3 : 01/10/1987 (platen) en 11/07/1988 (schorren)
deelgebied 4 : 20/08/1989 (Valkenisse) 13/04/1987 (Waarde) en
11/07/90 (Saeftinge)

Voor de sedimenttransport-berekeningen is gebruik gemaakt van 17 getijden (2 t/m 10 april 1989).

Over het algemeen is er een sterke overeenkomst tussen de inventarisatie op basis van luchtfoto's en de berekeningen te zien.

6.3.4 Lokale bodemveranderingen

Op basis van berekende evenwichtstransporten zijn de initiële bodemveranderingen berekend.

Op basis van dieptelodingen zijn met behulp van het GIS-Arcinfo-systeem de werkelijke bodemveranderingen berekend. De resultaten hiervan zijn in de vorm van een atlas beschikbaar. De berekende initiële bodemveranderingen zijn met deze gemeten bodemveranderingen vergeleken. In figuur 6.5 zijn zowel de berekende als gemeten bodemveranderingen rond de drempel van Hansweert gegeven.

De gemeten veranderingen zijn het gevolg van duizenden getijden bij een voortdurend veranderende bodemligging. Er zijn twee periodes weergegeven: 1982-1986 en 1986-1992. De verschillen tussen deze twee verschilplots geven aan dat de erosie en sedimentatie patronen aan verandering onderhevig zijn.

De berekende initiële bodemveranderingen zijn gebaseerd op één bodemligging en 17 getijden (2 t./m 10 april 1989).

Bij het vergelijken van de berekende en gemeten bodemveranderingen moet verder met het volgende rekening worden gehouden:

- Menselijke activiteiten (baggeren en storten) beïnvloeden wel de gemeten maar niet de berekende initiële bodemveranderingen.
- De schaalverdeling van de verschillende plots verschilt. De berekende bodemveranderingen zijn met een grove en een fijne schaalverdeling gepresenteerd (2 plots) om zowel extreme als kleine veranderingen aan te kunnen geven.

Er is een redelijke overeenkomst tussen de berekende en gemeten bodemveranderingen. Zowel het ruimtelijk beeld als de orde van grootte (10 m/5 jaar) komen goed overeen. Opvallend is wel dat op de drempel van Hansweert in de berekeningen geen sedimentatie van belang optreedt, terwijl op deze drempel jaarlijks vier miljoen m³ zand wordt gebaggerd. Zowel tijdens eb als tijdens vloed wordt stroomopwaarts van deze drempel in het model wel sterke sedimentatie berekend (figuur 7.2). Dit is een indicatie dat voor de

berekening van de lokatie van erosie- en sedimentatiegebieden de aanpassingslengte niet verwaarloosd mag worden.

De bodemveranderingen tijdens een getij zijn een factor 1000 kleiner dan de waterdiepte. De aanname dat tijdens de berekening van enkele getijden de bodemligging niet hoeft worden aangepast is dus correct.

7 Baggeren en storten

7.1 Algemeen

De belangrijkste gebruiksfunctie van de Westerschelde is scheepvaart tussen de haven van Antwerpen en de Noordzee. Ten behoeve van deze scheepvaart moet er een doorgaande geul van de monding tot Antwerpen zijn, met een bepaalde minimum breedte, diepte en bochtstraal. Om deze structuur te handhaven wordt voortdurend gebaggerd in ondiepe of smalle gedeelten van de vaarweg. Het gebaggerde materiaal wordt veelal teruggestort in andere delen van de Westerschelde. Momenteel wordt gewerkt aan een verdieping van de vaarweg om de toegang tot Antwerpen te verbeteren.

Vooraf een aantal ondiepe gedeelten waar meerdere eb- en vloedgeulen samenkomen (drempels) vergen veel baggerwerk. Met name de drempel van Hansweert waar ieder jaar vier miljoen m³ zand wordt gebaggerd. In figuur 7.1 is het drempelprobleem weergegeven.

Bij dit afstudeerproject is de lokale invloed van een verdere verdieping van de drempel van Hansweert bestudeerd. Hierbij is gebruik gemaakt van het ontwikkelde stroommodel en daarop gebaseerde zandtransportberekeningen. Naast berekeningen met de oorspronkelijke bodemschematisatie zijn berekeningen met een aangepaste bodemschematisatie gemaakt. In dit hoofdstuk worden resultaten van 3 verschillende situaties beschreven (zie figuur 7.1):

- Verdieping van de drempel van Hansweert (tot NAP -16 m) zonder verder aanpassingen.
- Verdieping van de drempel van Hansweert (1 Mm³) met een evenredige verondieping in de Schaar van Waarde.
- Verdieping van de drempel van Hansweert (1 Mm³) met een evenredige verondieping in het Zuidergat.

Deze toepassing van het model FINWES96 is een illustratie van één van de mogelijkheden om stroom- en zandtransportmodellen te gebruiken bij morfologische studies.

7.2 Verdieping drempel van Hansweert

De drempel van Hansweert ligt op de overgang van de Overloop van Hansweert naar het Zuidergat (zie figuur 7.1). Momenteel wordt op deze drempel jaarlijks vier miljoen m³ zand gebaggerd.

In de berekening met de oorspronkelijke bodemschematisatie treedt op de drempel geen significante aanzanding op (zie paragraaf 6.3.4). Waarschijnlijk wordt dit veroorzaakt doordat bij de gebruikte evenwichtstransport benadering de aanpassingslengte wordt verwaarloosd. Omdat de hoeveelheid zandtransport op de drempel echter goed berekend kan worden (zie paragraaf 6.2) kan de invloed van een verdieping op de baggervolumes wel worden

bestudeerd. Als de waterbeweging alleen ter plakke van de drempel door de verdieping beïnvloed wordt, zal bij gelijkblijvend debiet en grotere diepte de snelheid en daarom ook het zandtransport boven de drempel afnemen. Als de werkelijke zandtransporten gelijk zijn aan de berekende evenwichtstransporten zal deze afname van de zandtransportcapaciteit van resulteren in een evenredige toename van het baggervolume op de drempel.

Om de invloed van een verdieping te bestuderen is in de originele bodemschematisatie de bodem over een gebied van 1.2 km^2 verdiept tot NAP -16 m. Een ruimtelijk beeld van de resultaten is gegeven in figuur 7.2. De zandtransporten in een raai H (dwars over de drempel, zie figuur 7.2) zijn gegeven in figuur 7.3.

De grootschalige waterbeweging verandert nauwelijks en het gevolg van de aangebrachte verdieping blijkt inderdaad een afname van de zandtransportcapaciteit te zijn. Voor het berekende getij (6 april 1989) een afname met $1000 - 2000 \text{ m}^3/\text{getij}$. Dit is tijdens een sterk springtij (zie tabel 4.2). De toename van het jaarlijkse baggervolume zal bij verder ongewijzigde omstandigheden $0.5 - 1.0 \text{ Mm}^3$ zijn.

7.3 Verondieping van de Schaar van Waarde of het Zuidergat

Het zand dat op de drempel gebaggerd wordt moet ergens blijven. Bij de hiervoor beschreven berekening is aangenomen dat dit zand niet in de Westerschelde wordt teruggestort. In werkelijkheid wordt het zand echter wel teruggestort. Er zijn twee berekeningen uitgevoerd waarbij het op de drempel van Hansweert gebaggerde materiaal in een nabij gelegen stortgebied wordt gestort, in de Schaar van Waarde of in het Zuidergat (zie figuur 7.1). Bij deze berekeningen is de drempel (1.2 km^2) verdiept met 0.88 m. De Schaar van Waarde is verondiept met 0.473 m (2.1 km^2). Het Zuidergat is verondiept met 0.928 m (1.1 km^2).

Bij deze berekeningen blijken twee effecten op te treden (figuur 7.4 toont een ruimtelijk beeld):

1. Allereerst de directe invloed van storten: hogere snelheden en hogere zandtransporten ter plaatse van het stortgebied
2. Daarnaast verandert in deze gevallen ook de grootschalige waterbeweging. Beide stortgebieden liggen in een twee geulen systeem. Door de verondieping ten opzichte van de nulsituatie trekt de geul waarin gestort wordt minder water. Ook dit effect beïnvloedt de zandtransporten, lagere transporten in de geul waarin gestort is en grotere transporten in de ongewijzigde geul.

Ook is te zien dat er verschillen in erosie en sedimentatie berekend worden in gebieden waar de bodem niet is aangepast. Met name nabij de overgangen tussen verschillende geulen (drempels).

De geconstateerde verandering van de grootschalige waterbeweging beïnvloedt de randvoorwaarden niet. Tot op meer dan 5 kilometer van

Prosperpolder (de landwaartse randvoorwaarde) zijn de berekende snelheden in de aangepaste situatie gelijk aan de berekende snelheden in de nulsituatie. Bij modelberekeningen waarbij meer of grotere veranderingen in de bodemschematisatie worden aangebracht zal de invloed echter steeds verder merkbaar zijn. In dat geval kan het zo zijn dat de opgelegde randvoorwaarden in werkelijkheid niet voor die situatie toepasbaar zijn. In dat geval moet het model worden uitgebreid of moeten de randvoorwaarden worden aangepast (eventueel met behulp van een grootschaliger model).

8 Conclusies en aanbevelingen

8.1 Stroommodellen

Tijdens dit afstudeerproject is in relatief korte tijd de stroming in een complex estuarium (de Westerschelde) gemodelleerd. De resultaten van het gebouwde stroommodel FINWES96 komen goed overeen met metingen en resultaten van het bestaande WAQUA-model SCALDIS100. Met deze modellen kan op vrijwel elke lokatie en elk tijdstip waterstanden en snelheden berekend worden. Verder kan vrij eenvoudig geëxperimenteerd worden met deze modellen. Onder andere kan de invloed van voorgenomen ingrepen (baggeren, storten en ontpolderen) bestudeerd worden.

FINEL is gebleken een volwaardig en flexibel software-pakket te zijn. Een voordeel van dit pakket is dat modellen met behulp van een PC gebouwd en gebruikt kunnen worden. Daarom verdient het aanbeveling om FINEL verder te ontwikkelen en geschikt te maken voor algemeen gebruik.

Mogelijke verbeteringen van FINWES96 zijn:

- gebruik van meer realistische randvoorwaarden (bijvoorbeeld variërend langs de lijn Vlissingen-Breskens i.p.v. constant);
- toepassing van ruwheidsvoorspellers of handmatig de ruwheid per getijfase of deelgebied laten variëren;
- opsporen en aanpassen van onjuistheden in de diepteschematisatie;

De nauwkeurigheid kan worden vergroot door een model met een fijnere schematisatie te bouwen (m.n. in de kortsluitgeulen).

Om ook grootschalige experimenten uit te kunnen voeren verdient het aanbeveling om een FINEL-model te bouwen dat een groter gebied beslaat, zowel zeewaarts als tot in België. Aanpassingen mogen de stroming bij de open randen namelijk niet beïnvloeden, want dan gelden de opgelegde randvoorwaarden niet meer. Eventueel kunnen ook de randvoorwaarden worden aangepast *m.b.v. een grootschaliger model*.

8.2 Zandtransport-berekeningen

Op basis van de uitvoer van het stroommodel zijn met FINEL tevens zandtransporten en daaruit resulterende erosie en sedimentatie berekend.

Het zandtransport in de Westerschelde is berekend met behulp van de evenwichtstransportformules van Engelund/Hansen en van Van Rijn. Bij de evenwichtstransportbenadering wordt ervan uitgegaan dat aanpassingsverschijnselen verwaarloosbaar zijn. Deze aanname blijkt in een aantal gevallen niet juist te zijn:

- Na kentering van vloed naar eb blijkt uit metingen dat de zandconcentraties in enkele gevallen hoger zijn dan berekend. In deze gevallen wordt het berekende netto transport te sterk door de vloed gedomineerd.

- Bij de drempel van Hansweert blijkt de sedimentatie meer stroomopwaarts berekend te worden dan in werkelijkheid optreedt.

De zandtransport-berekeningen kunnen op verschillende manieren verbeterd of uitgebreid worden. Welke methode hiervoor het meest geschikt is hangt af van de gewenste toepassing en het effect van ingrepen:

- Voor een eerste indruk van grootte en richting van zandtransporten is de gevolgde benadering voldoende.
- Als de eb-vloed-dominantie belangrijk is zal naijling in de berekeningen betrokken moeten worden.
- Wanneer de exacte lokatie van erosie- en sedimentatiegebieden van belang is, is modellering van onder- en oververzadiging noodzakelijk.

Zowel aanpassingstijd als onder- en oververzadiging zouden met een quasi-3D-benadering kunnen worden gemodelleerd. Bij een zeer grote vereiste nauwkeurigheid zal zowel stroming als sedimenttransport drie-dimensionaal moeten worden berekend. Het is goed mogelijk dat bij zo'n nauwkeurigheid ook de invloed van golven niet langer verwaarloosd mag worden.

8.3 Morfologisch onderzoek

Een verdieping van de drempel van Hansweert tot NAP -16 m veroorzaakt voor een flink springtij een afname van de zandtransportcapaciteit boven de drempel van 1000 - 2000 m³/getij. De toename van de jaarlijkse baggervolumes zal 0.5 - 1.0 Mm³/jaar zijn.

Verondiepingen van de Schaar van Waarde of het Zuidergat beïnvloeden de grootschalige waterbeweging en leiden ook tot veranderingen in erosie en sedimentatie in ongewijzigde gebieden, m.n. ter plekke van de overgang tussen verschillende geulen (drempels).

Zowel FINWES96 als andere hydraulische modellen zouden bij verder morfologisch onderzoek betrokken kunnen worden. Hiermee kan relatief eenvoudig en goedkoop onder andere het volgende worden bereikt:

- reproductie van stroom, golven en sedimenttransport;
- ruimtelijke visualisatie van belangrijke parameters;
- afschatten van de invloed van bepaalde ingrepen.

Verklarende woordenlijst

debiet:	geïntegreerde snelheid (alleen over de diepte ($\text{m}^3/\text{m}/\text{s}$) of over de diepte en de breedte (m^3/s))
dominante volume:	vloedvolume in vloedgeul ebvolume in ebgeul
dominantie:	het verschijnsel dat tijdens de ene getijfase (eb of vloed) meer water of zand door een geul getransporteerd wordt dan tijdens de andere getijfase (zie figuur 4.11); de getijfase waarin meer wordt getransporteerd wordt de dominante getijfase voor die geul genoemd.
drempel:	ondiepte aan het einde van geulen
ebschaar:	- een getijgeul die voornamelijk open ligt voor de ebstroom en die aan het zee-einde een drempel heeft (Van Veen, 1950) - een getijgeul waar tijdens eb meer water doorheen stroomt dan tijdens vloed
ebvolume:	de hoeveelheid water die tijdens de ebfase van een getij door een bepaalde doorsnede wordt getransporteerd
erosie:	ontgronding, verdieping
estuarium:	riviermonding met sterke getij-indringing
getijvolume:	de hoeveelheid water die tijdens een getij door een bepaalde doorsnede wordt getransporteerd (eb en vloedvolume)
kalibratie:	ijking; in overeenstemming brengen met de werkelijkheid
komberging:	de hoeveelheid water die stroomopwaarts van een zekere doorsnede wordt geborgen
morfologie:	studie van de vorm (van de Westerschelde)
parameter:	veranderlijke grootte
sedimentatie:	aanzanding, verondieping
vloedschaar:	- een getijgeul die voornamelijk open ligt voor de vloed en die aan het bovineinde een drempel heeft (Van Veen, 1950) - een getijgeul waar tijdens vloed meer water doorheen stroomt dan tijdens eb
vloedvolume:	de hoeveelheid water die tijdens de vloedfase van een getij door een bepaalde doorsnede wordt getransporteerd

Literatuurlijst

- 1 Dekker, L., P. Lievense en K van der Male, Kalibratie en verificatie SCALDIS100, Werkdocument RIKZ/AB-94.839x, 1994
- 2 Glaister, P., Flux difference splitting for open-channel flows, Int. journal for num. methods in fluids; vol 16, 1993
- 3 Hughes, Th. J. R., Recent progress in the development and understanding of SUPG-methods with special reference to the compressible Euler and Navier-Stokes equations, Int. journal for num. methods in fluids; vol. 7, 1987
- 4 Huijs, S.W.E., Geomorfologische ontwikkeling van het intergetijdegebied in de Westerschelde 1935-1989, 1995
- 5 ICIM Rijswijk, User's Guide WAQUA versie 5.03, 1994
- 6 Jong, H. de, Debietgegevens van de Westerschelde vanaf 1932, 1989
- 7 Male, K. van der, Euleriaanse reststromen op de Westerschelde berekend met DETWES, 1993
- 8 Mol, G., Overzicht menselijke ingrepen Westerschelde, Werkdocument RIKZ/AB-Concept, 1994
- 9 Pieters, T., C. Storm, T. Walhout en T. Ysebaert, Het Schelde estuarium, méér dan een vaarweg, 1991
- 10 Pieters, T., Het Schelde-estuarium, beheren of beheersen?, 1993
- 11 Praagman, N., Numerical solution of the shallow water equations by a finite element method, 1983
- 12 Rijn, Leo C. van, Principles of sediment transport in Rivers, Estuaries and Coastal Seas, 1993
- 13 Segal, G., SEPRAN - users manual, 1993
- 14 Spek, A.J.F. van der, Large-scale evolution of Holocene tidal basins in the Netherlands, 1994
- 15 Stelling, G.S., On the construction of computational methods for shallow water flow problems, 1984
- 16 Svašek b.v., Verklarend onderzoek Drempels Westerschelde, 1994

- 17 Tank, F.T.G., Het gedrag van drempels in de Westerschelde, een verkennende studie, 1995
- 18 Veen, J. van, Schelderegion en schelderegion, 1944
- 19 Veen, J. van, Opmerkingen over scheldepublikaties, 1945
- 20 Veen, J. van, Eb- en vloodschaarsystemen in de nederlandse getijwateren, tijdschrift K.N.A.G. 1950
- 21 Ven te Chow, Ph. D., Open Channel Hydraulics, 1959
- 22 Vreugdenhil, C.B., Numerieke berekeningen in waterbouwkunde en hydrologie, 1985
- 23 Vreugdenhil, C.B., Numerical methods for shallow-water flow, 1994

Lijst van figuren

figuur 1.1	Namen geulen en platen Westerschelde
figuur 2.1	De ontwikkeling van het Schelde-estuarium
figuur 2.2	Het Schelde-estuarium
figuur 2.3	Drempels en eb- en vloedscharen
figuur 2.4	Debietraaien en waterstandstations Westerschelde
figuur 3.1	Modelleringsproces
figuur 3.2	Ruimtelijke discretisatie WAQUA en FINEL
figuur 3.3	Basisidee eindige-elementen-methode
figuur 4.1	Detail lodingkaart en Sepran-begrenzing
figuur 4.2	Detail FINWES96-schematisatie met GIS-Arcinfo-dieptes
figuur 4.3	FINWES96-mesh
figuur 4.4	FINWES96-diepte-schematisatie
figuur 4.5	Modelresultaten - waterstanden Vlissingen
figuur 4.6	Modelresultaten - waterstanden Terneuzen
figuur 4.7	Modelresultaten - waterstanden Hansweert
figuur 4.8	Modelresultaten - waterstanden Baalhoek
figuur 4.9	Modelresultaten - waterstanden Bath
figuur 4.10	Modelresultaten - debieten raai 7
figuur 4.11	Dominantie
figuur 4.12	Relatie Manning-waarde en Nikuradse-waarde
figuur 4.13	Modelresultaten - debieten Everingen (vloedgeul raai 7)
figuur 4.14	Modelresultaten - debieten Pas van Terneuzen (ebgeul raai 7)
figuur 4.15	Evenwichtsrelatie getijvolume-doorstroomoppervlak
figuur 4.16	Netto debieten in de Westerschelde-FINWES96 Westelijk deel
figuur 4.17	Netto debieten in de Westerschelde-FINWES96 Oostelijk deel
figuur 4.18	Netto debieten in de Westerschelde-DETWES Westelijk deel
figuur 4.19	Netto debieten in de Westerschelde-DETWES Oostelijk deel
figuur 5.1	Aanpassing van sedimenttransport aan actuele en lokale evenwichtstoestand
figuur 6.1	Kalibratie zandtransportberekeningen
figuur 6.2	Netto zandtransporten in de Westerschelde - Westelijk deel
figuur 6.3	Netto zandtransporten in de Westerschelde - Oostelijk deel
figuur 6.4	Netto zandtransporten boven de laagwaterlijn
figuur 6.5	Lokale bodemveranderingen
figuur 7.1	Drempels, bagger- en stortgebieden
figuur 7.2	Invloed verdieping drempel van Hansweert
figuur 7.3	Zandtransporten drempel van Hansweert
figuur 7.4	Invloed verondieping Schaar van Waarde

(figuur 4.2, 4.4, 6.4, 6.5, 7.1, 7.2, 7.3 en 7.5 in kleur)

Lijst van tabellen

tabel 4.1	Getijgegevens Vlissingen 28-29 september 1992
tabel 4.2	Getijgegevens Vlissingen 3-10 april 1989
tabel 4.3	Modelkarakteristieken FINWES96 en SCALDIS100
tabel 4.4	Hoog- en laagwaters FINWES96 en SCALDIS100 6 april 1989
tabel 4.5	Waterstanden FINWES96 en SCALDIS100 6 april 1989
tabel 4.6	Getijvolumina FINWES96 en SCALDIS100 6 april 1989

Lijst van bijlagen

bijlage 1	Beschrijving FINEL
bijlage 2	Kalibratie en gevoeligheidsanalyse stroommodel FINWES96
bijlage 3	Kalibratie en resultaten sedimenttransport-berekeningen

C-13855 712
(deel 2)

eindrapport van het afstudeerproject

Morfologie en modellering van de Westerschelde

deel 2 : figuren, tabellen en bijlagen

naam	: Arie de Gelder
studienummer	: 254508
datum	: augustus 1996
opleiding	: Civiele Techniek (TU Delft)
bedrijf	: Ingenieursbureau Svašek

Lijst van figuren

figuur 1.1	Namen geulen en platen Westerschelde
figuur 2.1	De ontwikkeling van het Schelde-estuarium
figuur 2.2	Het Schelde-estuarium
figuur 2.3	Drempels en eb- en vloedscharen
figuur 2.4	Debietraaien en waterstandstations Westerschelde
figuur 3.1	Modelleringsproces
figuur 3.2	Ruimtelijke discretisatie WAQUA en FINEL
figuur 3.3	Basisidee eindige-elementen-methode
figuur 4.1	Detail lodingkaart en Sepran-begrenzing
figuur 4.2	Detail FINWES96-schematisatie met GIS-Arcinfo-dieptes
figuur 4.3	FINWES96-mesh
figuur 4.4	FINWES96-diepte-schematisatie
figuur 4.5	Modelresultaten - waterstanden Vlissingen
figuur 4.6	Modelresultaten - waterstanden Terneuzen
figuur 4.7	Modelresultaten - waterstanden Hansweert
figuur 4.8	Modelresultaten - waterstanden Baalhoek
figuur 4.9	Modelresultaten - waterstanden Bath
figuur 4.10	Modelresultaten - debieten raai 7
figuur 4.11	Dominantie
figuur 4.12	Relatie Manning-waarde en Nikuradse-waarde
figuur 4.13	Modelresultaten - debieten Everingen (vloedgeul raai 7)
figuur 4.14	Modelresultaten - debieten Pas van Terneuzen (ebgeul raai 7)
figuur 4.15	Evenwichtsrelatie getijvolume-doorstroomoppervlak
figuur 4.16	Netto debieten in de Westerschelde-FINWES96 Westelijk deel
figuur 4.17	Netto debieten in de Westerschelde-FINWES96 Oostelijk deel
figuur 4.18	Netto debieten in de Westerschelde-DETWES Westelijk deel
figuur 4.19	Netto debieten in de Westerschelde-DETWES Oostelijk deel
figuur 5.1	Aanpassing van sedimenttransport aan actuele en lokale evenwichtstoestand
figuur 6.1	Kalibratie zandtransportberekeningen
figuur 6.2	Netto zandtransporten in de Westerschelde - Westelijk deel
figuur 6.3	Netto zandtransporten in de Westerschelde - Oostelijk deel
figuur 6.4	Netto zandtransporten boven de laagwaterlijn
figuur 6.5	Lokale bodemveranderingen
figuur 7.1	Drempels, bagger- en stortgebieden
figuur 7.2	Invloed verdieping drempel van Hansweert
figuur 7.3	Zandtransporten drempel van Hansweert
figuur 7.4	Invloed verondieping Schaar van Waarde

(figuur 4.2, 4.4, 6.4, 6.5, 7.1, 7.2, 7.3 en 7.5 in kleur)

Lijst van tabellen

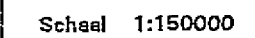
tabel 4.1	Getijgegevens Vlissingen 28-29 september 1992
tabel 4.2	Getijgegevens Vlissingen 3-10 april 1989
tabel 4.3	Modelkarakteristieken FINWES96 en SCALDIS100
tabel 4.4	Hoog- en laagwaters FINWES96 en SCALDIS100 6 april 1989
tabel 4.5	Waterstanden FINWES96 en SCALDIS100 6 april 1989
tabel 4.6	Getijvolumina FINWES96 en SCALDIS100 6 april 1989

Lijst van bijlagen

bijlage 1	Beschrijving FINEL
bijlage 2	Kalibratie en gevoeligheidsanalyse stroommodel FINWES96
bijlage 3	Kalibratie en resultaten sedimenttransport-berekeningen

Figuren

Namen gouden en platen



INGENIEURSBUREAU / SVASEK B.V.	datum	: april 1996
Namen geulen en platen Westerschelde	rapport	: A 982
	figuur	: 1.1

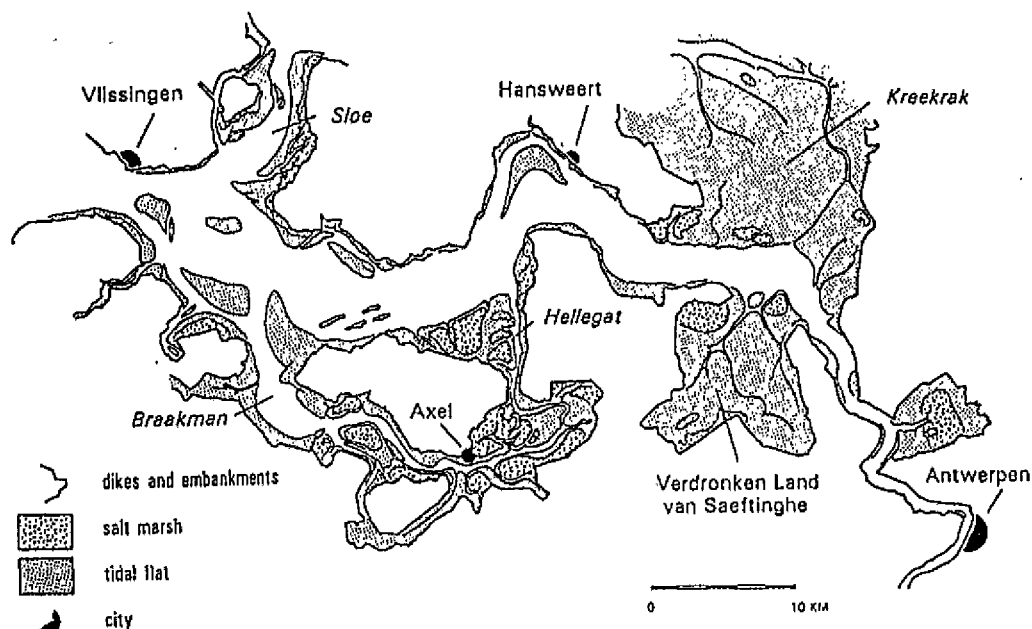


Figure 6.6 The Schelde estuary in 1650 AD. Reconstruction based predominantly on the map "Zelandia Comitatus Novissima" by Roman and Visscher (1655). After Van der Spek (1993.)

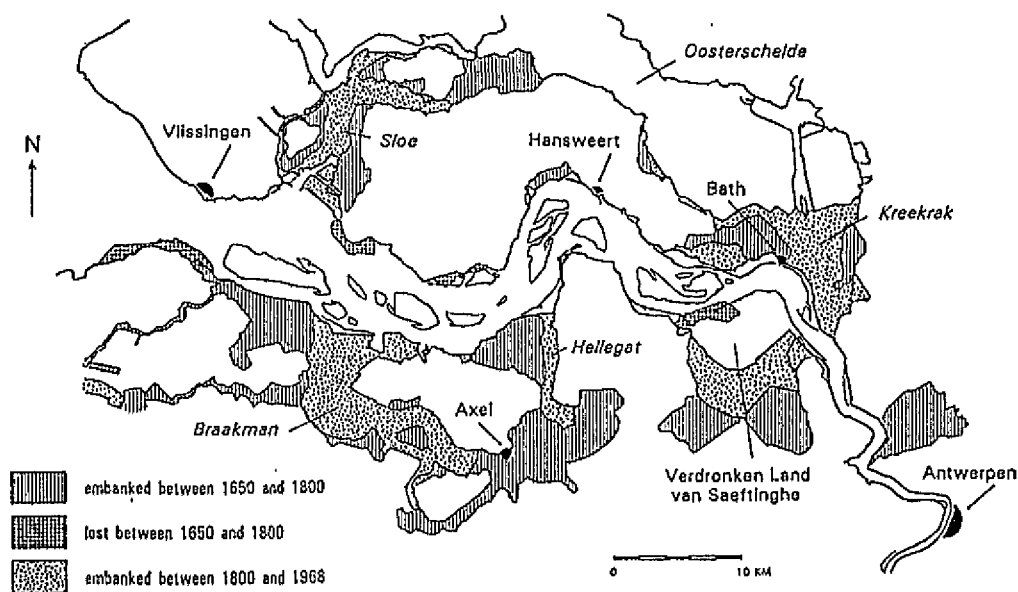
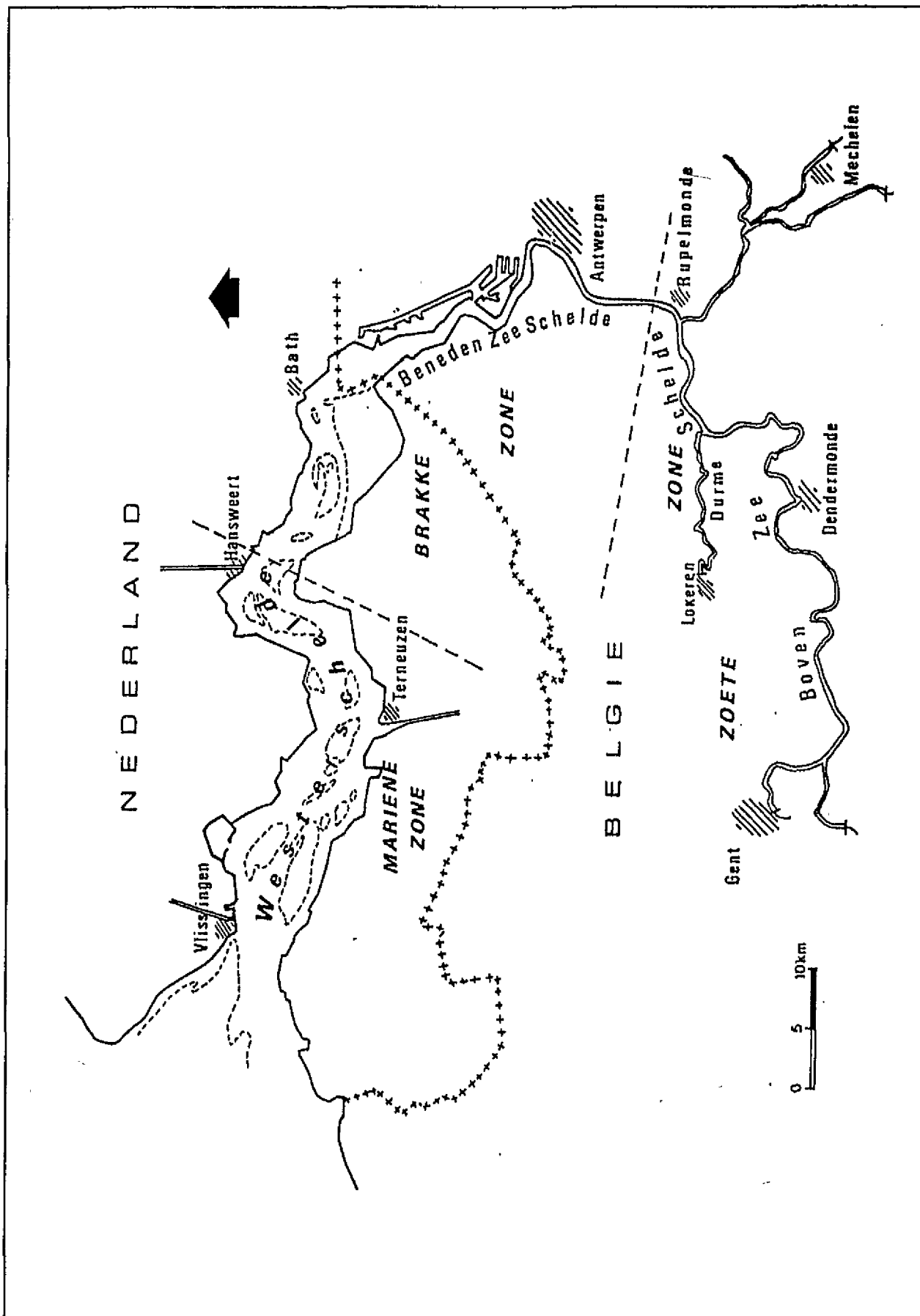


Figure 6.7 Map showing the accretion and subsequent embankment of the intertidal flats and marshes along the Schelde estuary between 1650 and 1968. The given intertidal morphology represents the situation in 1968.



INGENIEURSBUREAU / SVASEK B.V.	datum : april 1996
Het Schelde-estuarium (bron: Pieters e.a., 1991)	rapport : A 982
	figuur : 2.2

Een op het eerste gezicht opmerkelijke eigenschap van scharen is, dat een vloodschar een ebschar tracht te vermijden en omgekeerd.

Soms maakt een eb- of vloodschar twee vingers ter weerszijden van de tegenliggende geul (fig. 10), of buigen de twee tegenstanders iets zijwaarts af om elkaar in een soort flankaanval te benaderen (fig. 11). Een der redenen van deze eigenschap is het zandtransport. Een ander is de bochtwerking (zie fig. 24).

Het is nl. aannemelijk dat in een normale vloodschar een vloed-



Drempel = delta ebschar in delta vloodschar

Fig. 10. Schema van het elkaar vermijden van een eb- en een vloodschar door middel van vorkvorming.

Sketch of the mutual 'evasion' of flood- and ebb-channels by means of a forked tongue.



Fig. 11. Schema van het elkaar vermijden van een eb- en een vloodschar met flankaanval.

Sketch of a mutual 'evasion' with flank attack of flood- and ebb-channels.

zandstroom overheerst en dat dit in een normale ebschar met de eb-zandstroom het geval is. Nabij het ontmoetingspunt van een eb- en een vloodschar wordt dus zand van weerszijden aangevoerd en een deel hiervan vormt de zg. drempel. Men zou dit 'de strijd der delta's' kunnen noemen.

Natuurlijk is de zandbeweging ingewikkelder dan hier in enige

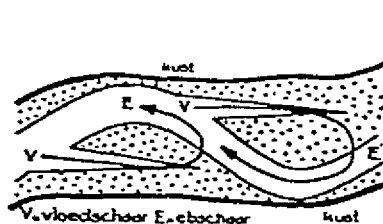


Fig. 12. Schema van zg. zandneren; zandbeweging in het vloodschar stroomop, stroomaf in het ebschar.

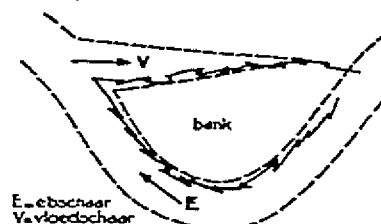


Fig. 13. Schema van de werkelijke zandbeweging bij een veel voorkomend systeem van eb- en vlood-scharen.

woorden werd aangeduid. Door de getijbeweging beweegt het zand als op een schudzeef; er is een zg. reststroom of 'drift'. Bij eb- en vlood-scharen bestaan er meestal zandneren waarbij het zand stroomopwaarts gaat in een vloodschar en stroomafwaarts in een ebgeul. Een zand-ner is een rondgaande zandbeweging, in die zin dat het een schudzeef-K. N. A. G., I.XVII

20*

beweging en lang niet cirkelvormig is, doch dat een zelfde korrel na verloop van tijd weer op dezelfde plaats kan komen (fig. 12). De werkelijke beweging is meer als fig. 13 aangeeft.

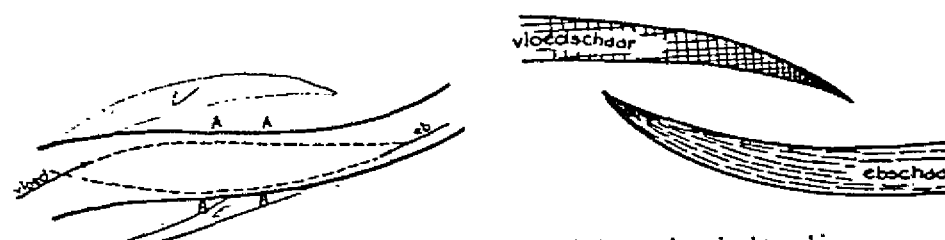
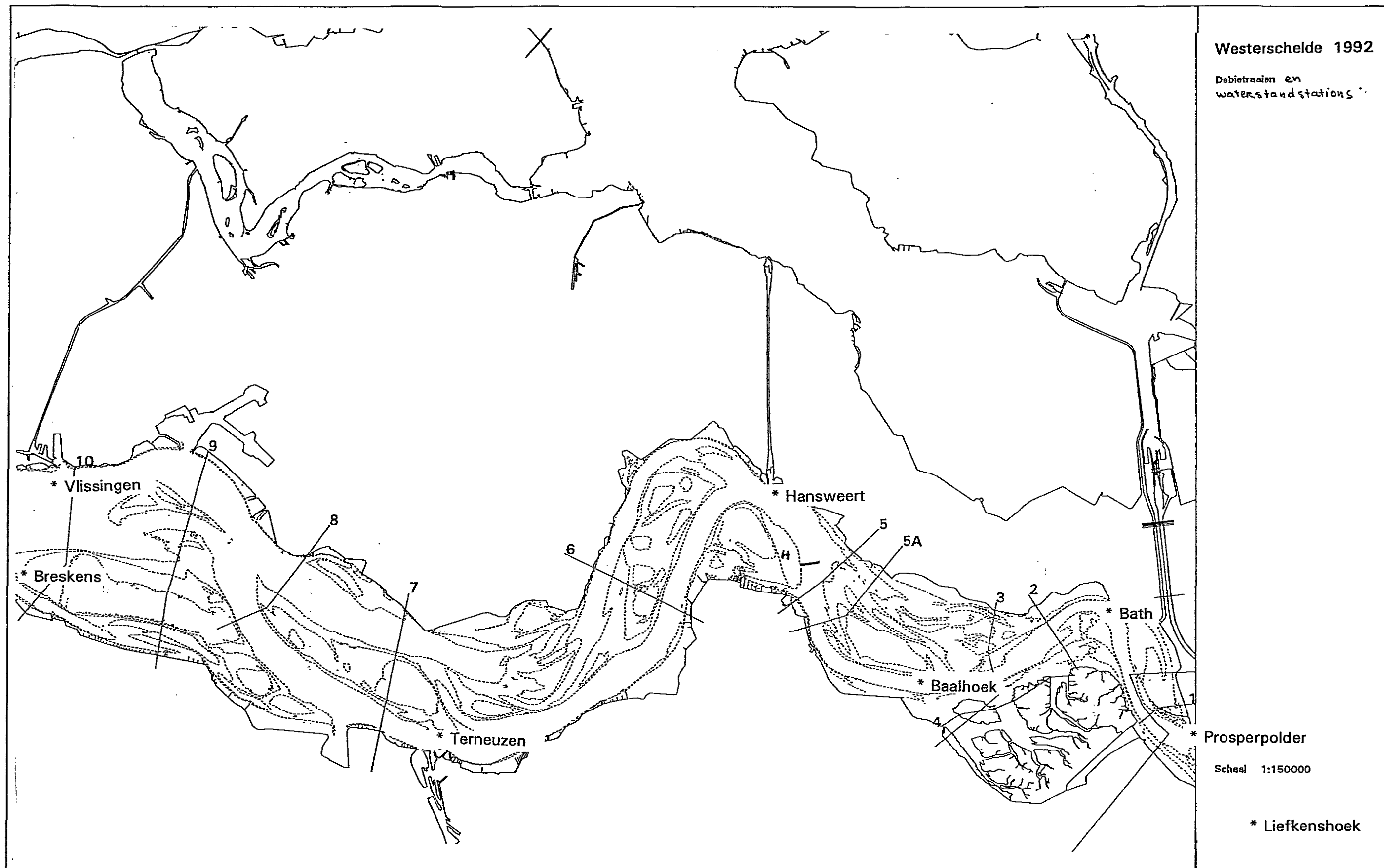
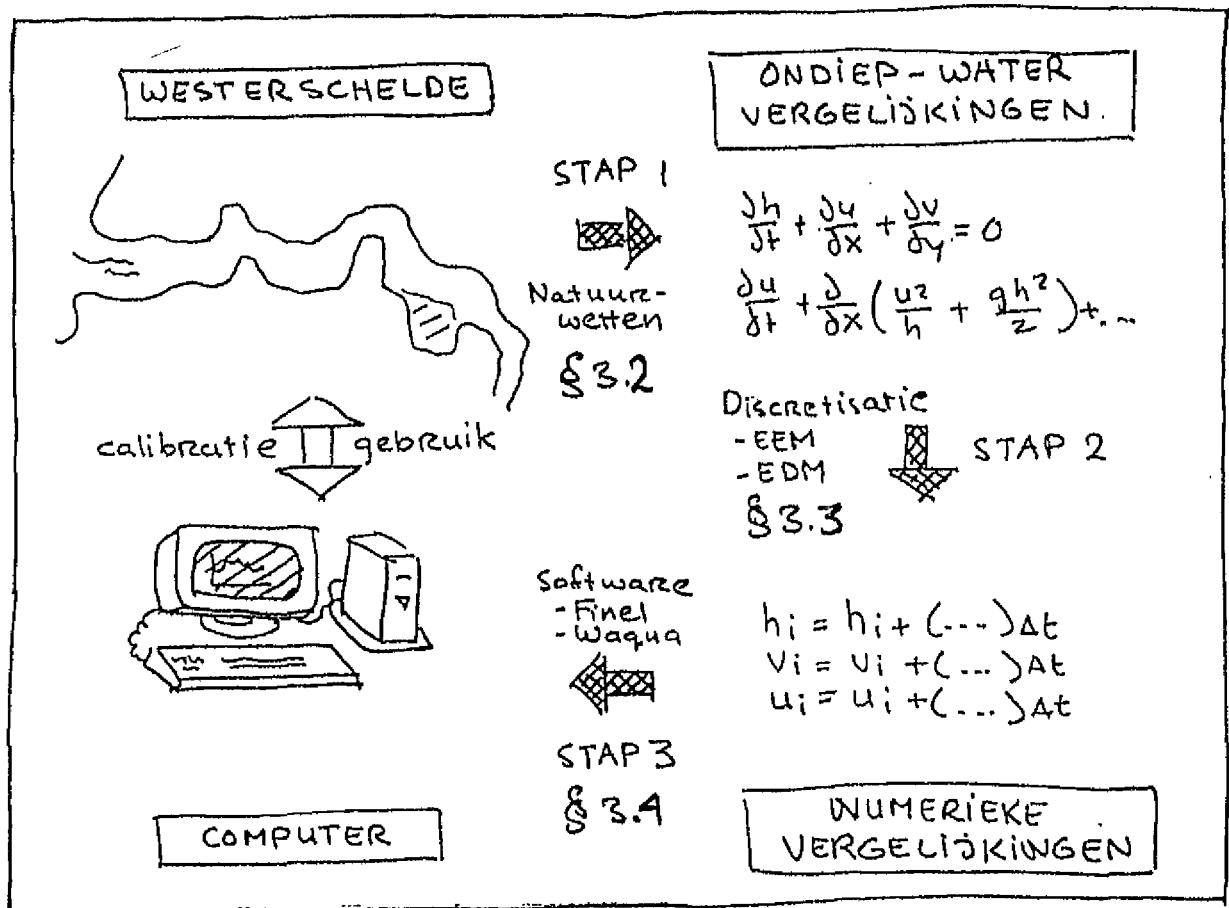


Fig. 24. Schema van splitting in eb- en vloodscharen door bochtwerking. Bend-action explains to a large extent splicing of a channel, or the birth of ebb- and flood-channels.

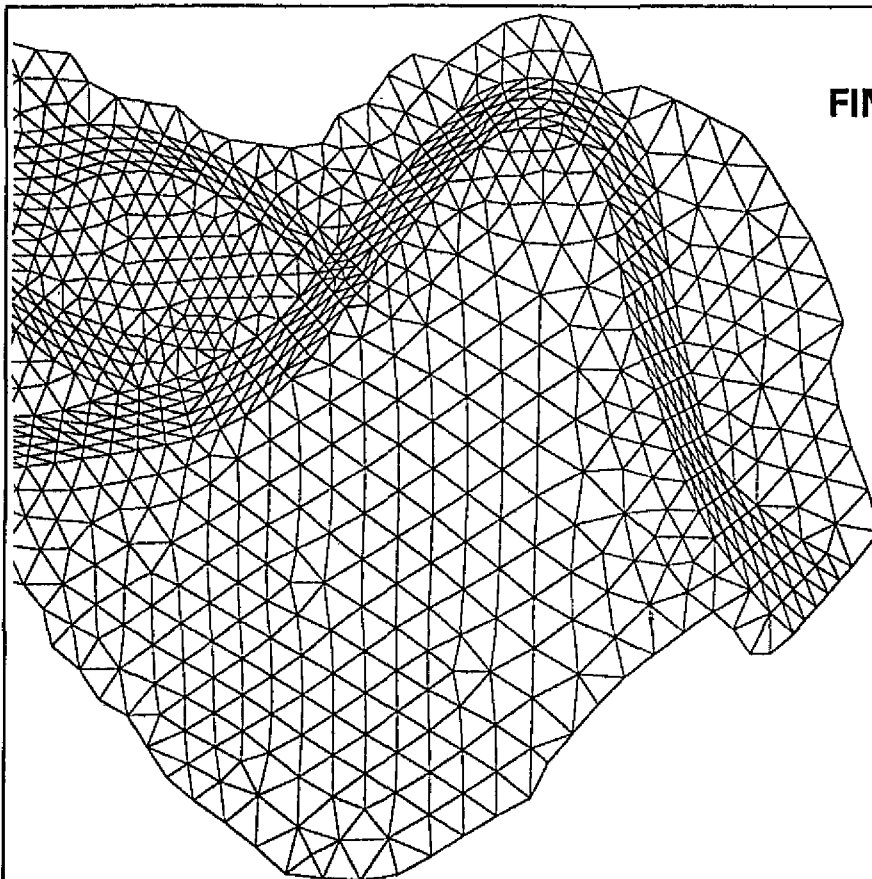


INGENIEURSBUREAU SVASEK B.V.	datum	: april 1996
	rapport	: A 982
	figuur	: 2.4

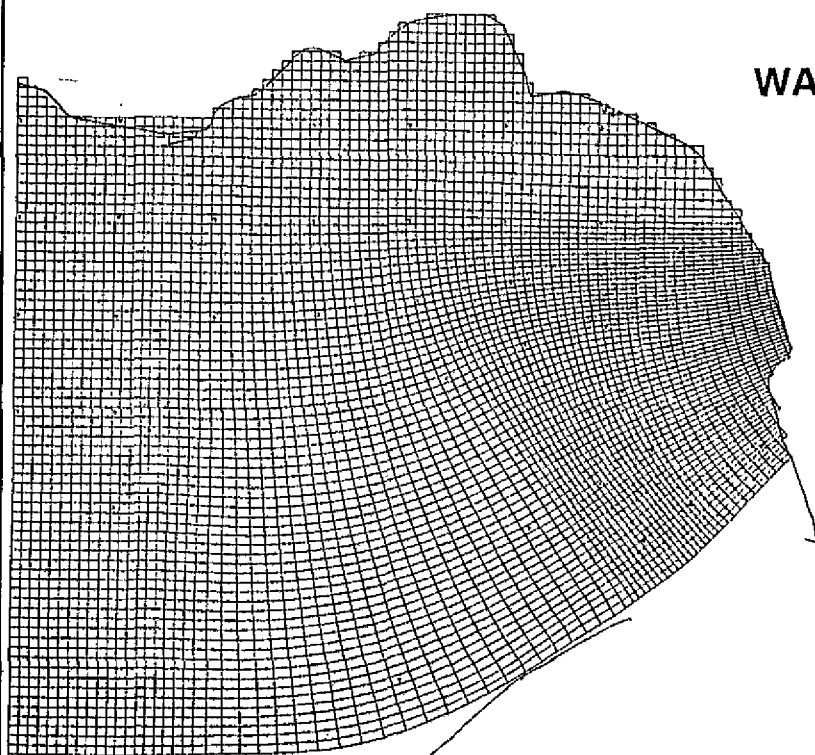
Debietraaien en waterstandstations Westerschelde



INGENIEURSBUREAU / SVASEK B.V.	datum : april 1996
Modelleringsproces (bron: vrij naar Stelling en Booij, 1994)	rapport : A 982
	figuur : 3.1



FINEL-schematisatie



WAQUA-schematisatie

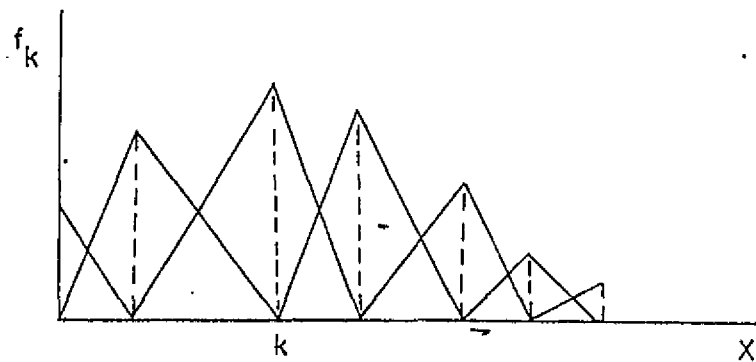
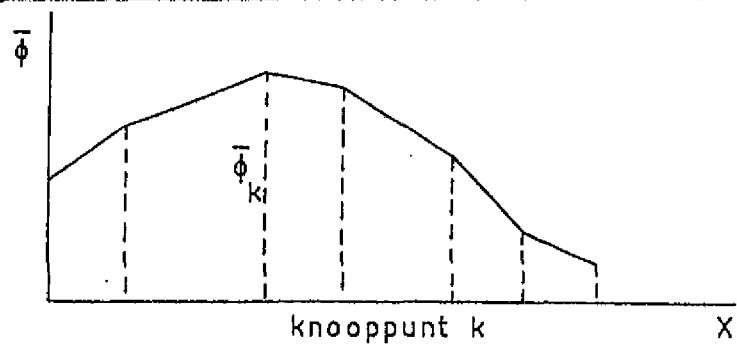
INGENIEURSBUREAU / **SVASEK B.V.**

Ruimtelijke discretisatie WAQUA en FINEL
(bron: Tank, 1995 en auteur)

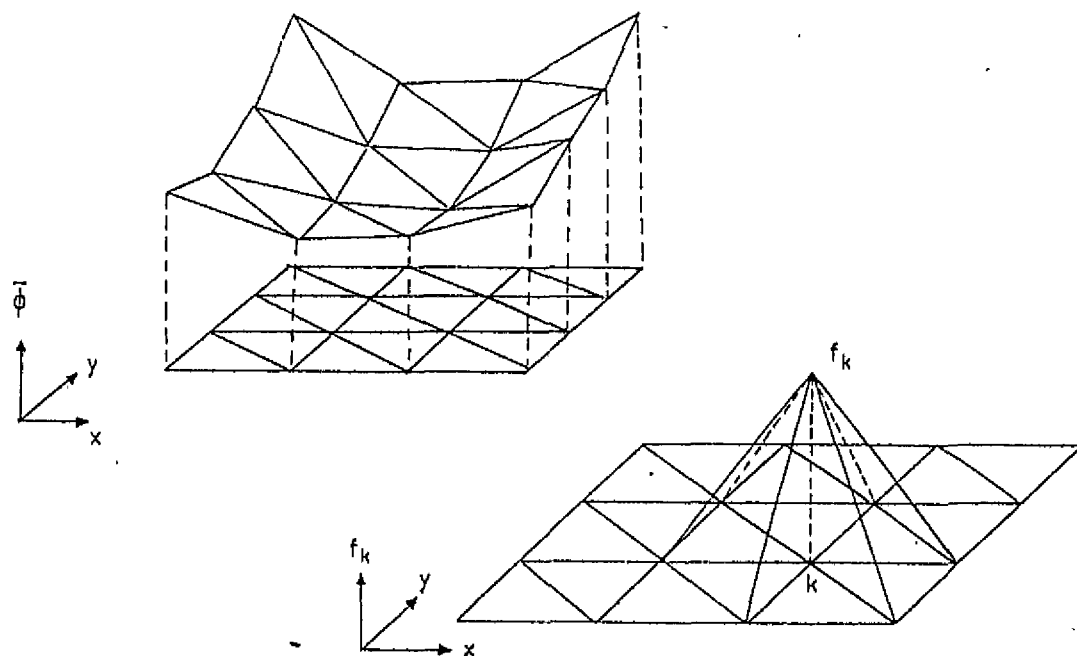
datum : april 1996

rapport : A 982

figuur : 3.2



Lineaire interpolatie en opbouw uit interpolatiefuncties f_k .



Twee-dimensionale lineaire interpolatie en interpolatiefunctie $f_k(x,y)$.

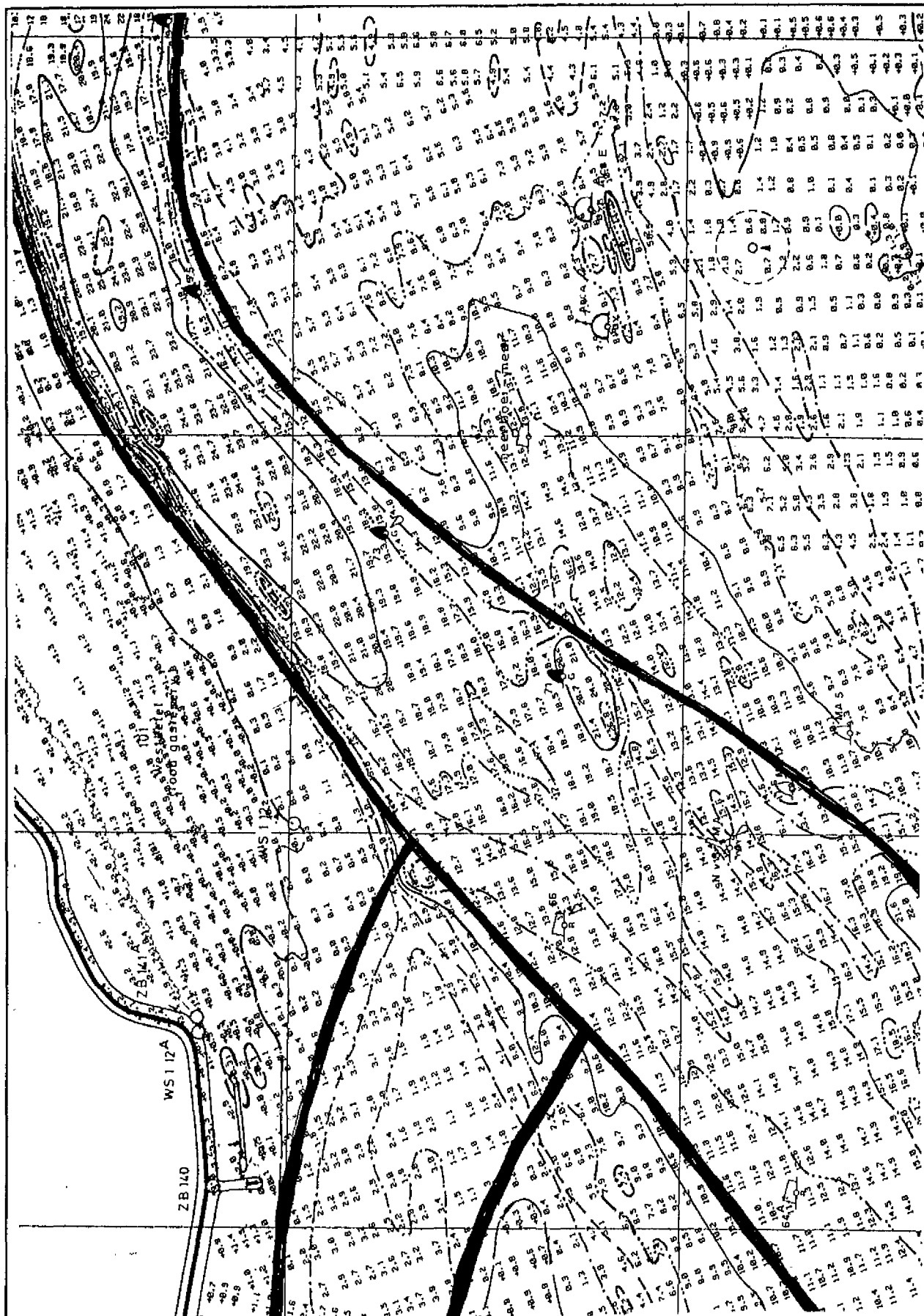
INGENIEURSBUREAU SVASEK B.V.

Basisidee eindige elementenmethode
(bron: Vreugdenhil, 1985)

datum : april 1996

rapport : A 982

figuur : 3.3



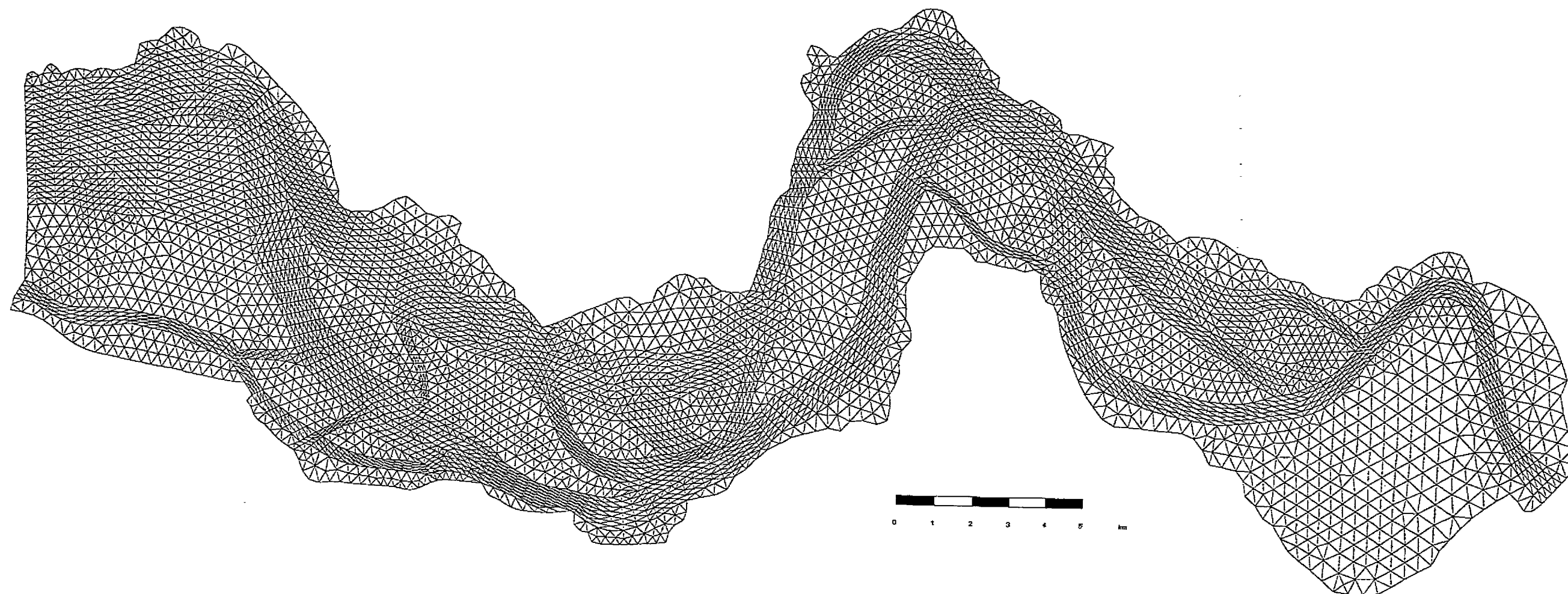
INGENIEURSBUREAU / **SVASEK B.V.**

Detail lodingkaart en Sepranbegrenzing
(bron: Rijkswaterstaat meetdienst Vlissingen)

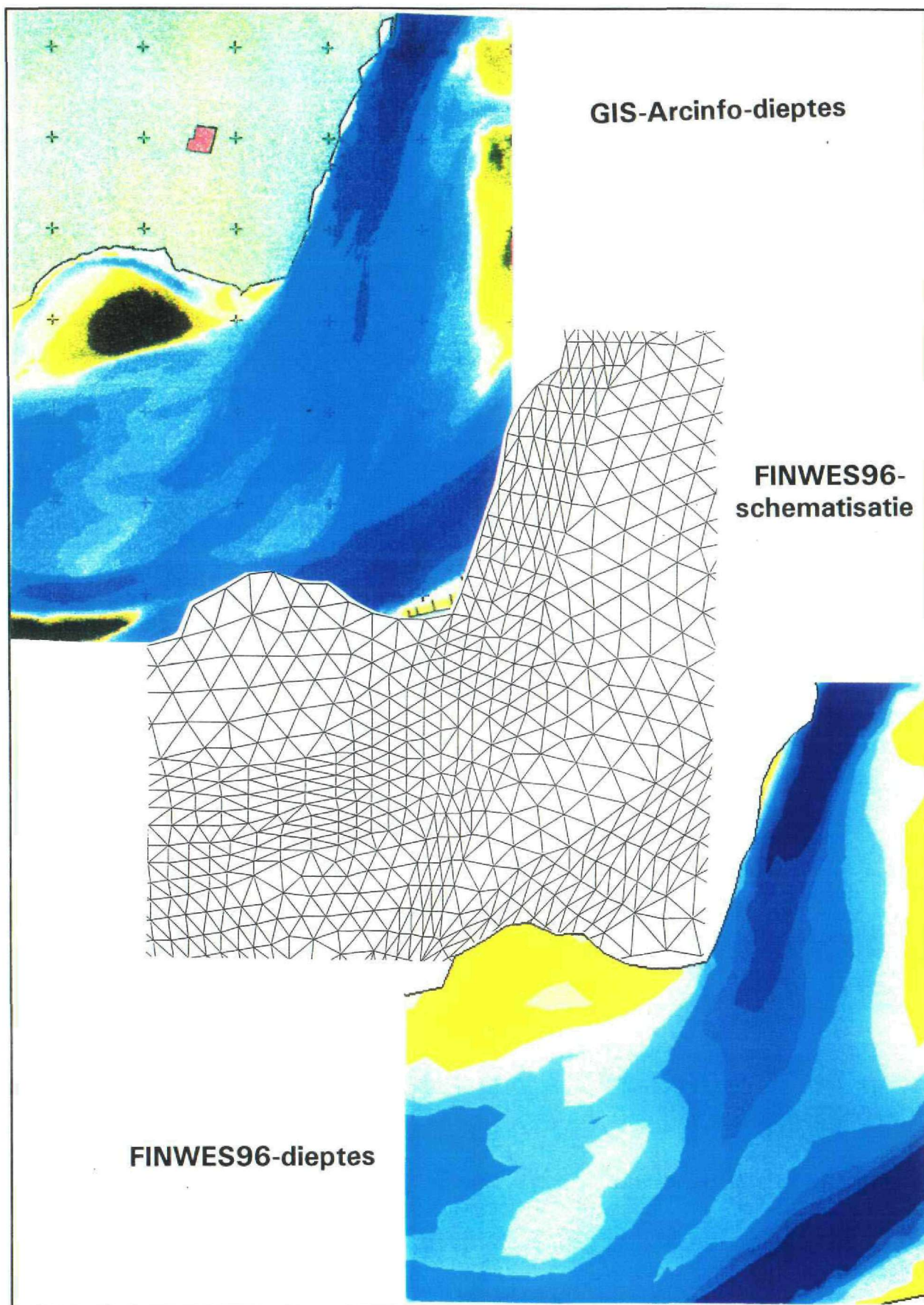
datum : april 1996

rapport : A 982

figuur : 4.1



INGENIEURSBUREAU SVASEK B.V. FINWES96-mesh	datum	:april 1996
	rapport	:A 982
	figuur	:4.3



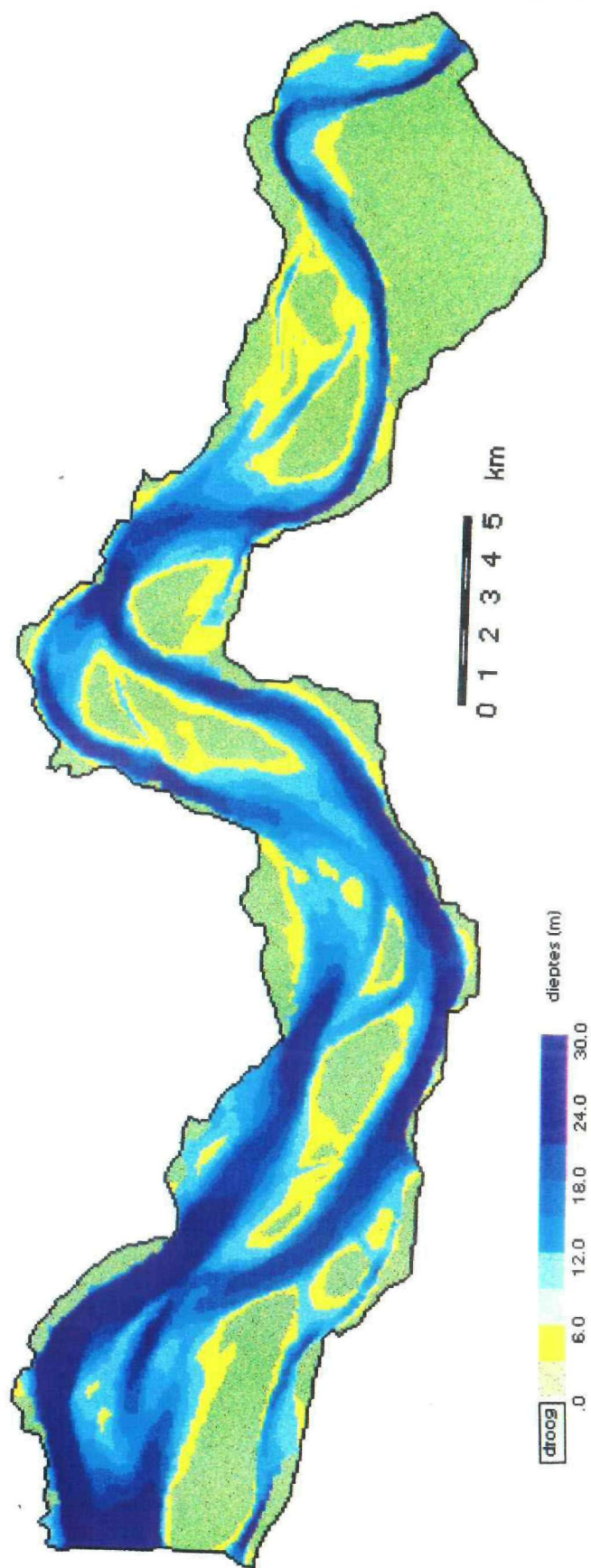
INGENIEURSBUREAU **SVASEK** B.V.

Detail FINWES96-schematisatie met GIS Arcinfo-deptes

datum : april 1996

rapport : A 982

figuur : 4.2



INGENIEURSBUREAU / **SVAŠEK** B.V.

FINWES96-diepte-schematisatie

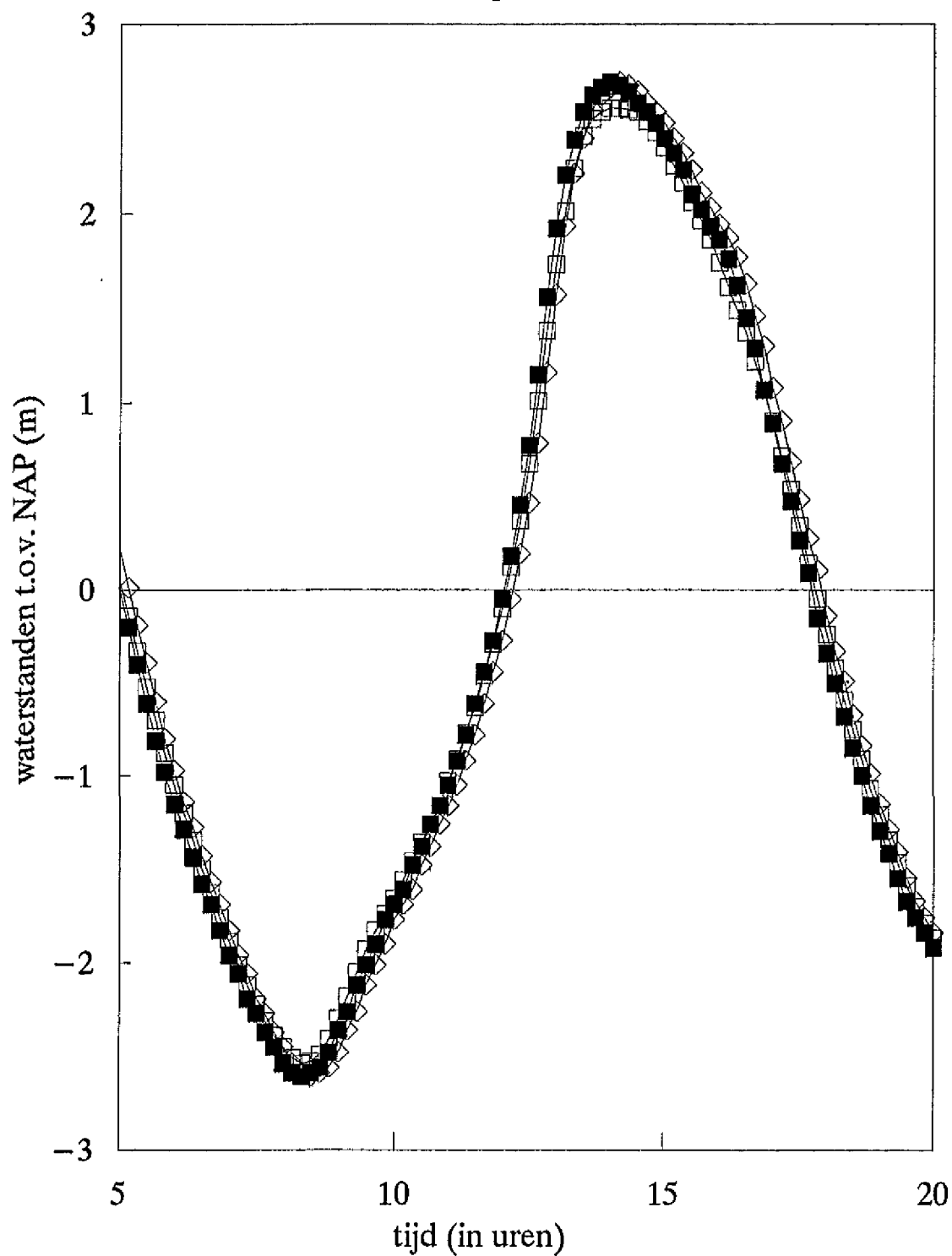
datum : april 1996

rapport : A 982

figuur : 4.4

Waterstanden Vlissingen

6 april 1989



■ gemeten

□ SCALDIS100

◇ FINWES96

INGENIEURSBUREAU/SVAŠEK B.V.

Modelresultaten - waterstanden Vlissingen

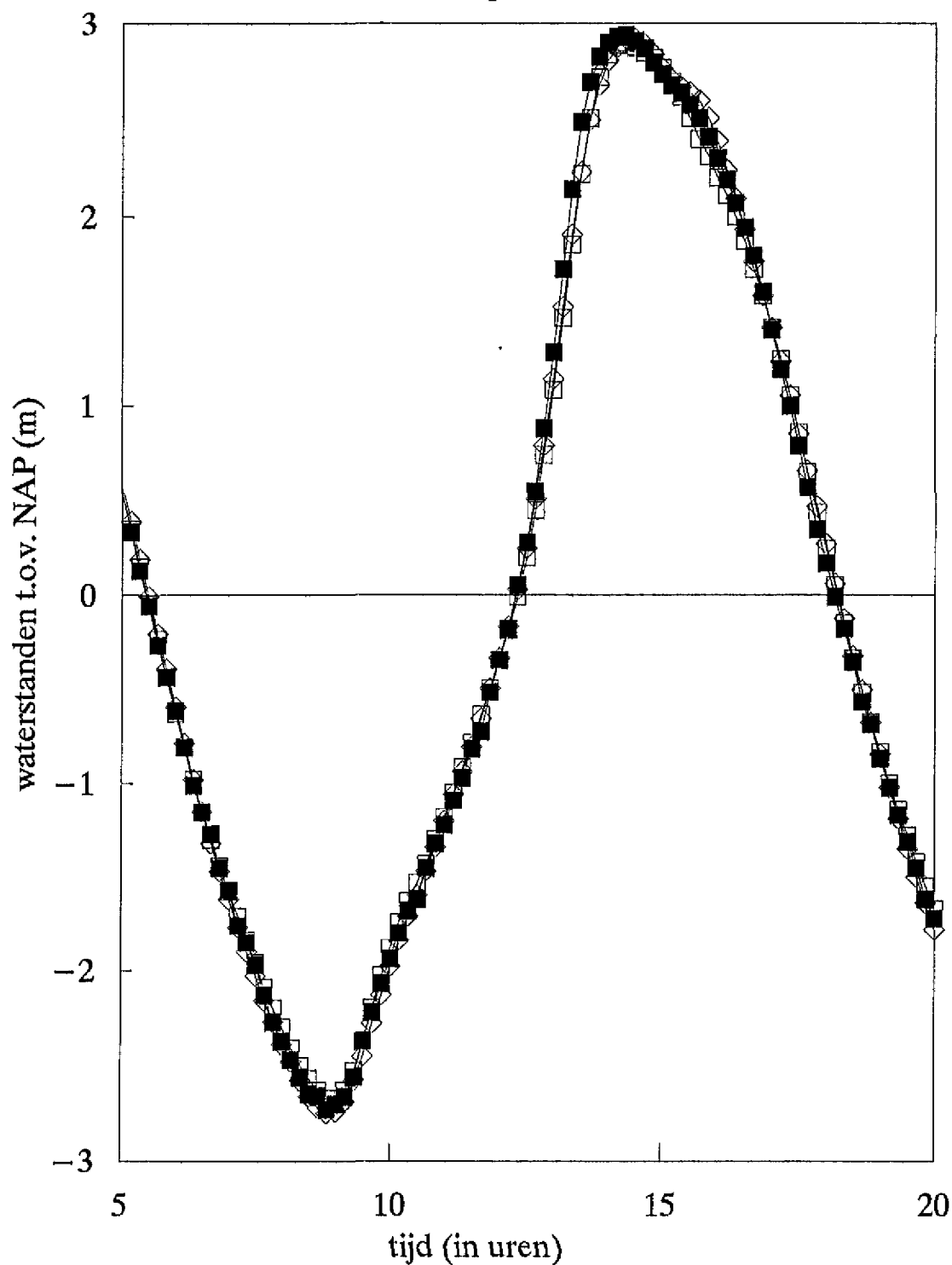
datum : april 1996

rapport : A 982

figuur : 4.5

Waterstanden Terneuzen

6 april 1989



■ gemeten

□ SCALDIS100

◇ FINWES96

INGENIEURSBUREAU / SVASEK B.V.

Modelresultaten - waterstanden Terneuzen

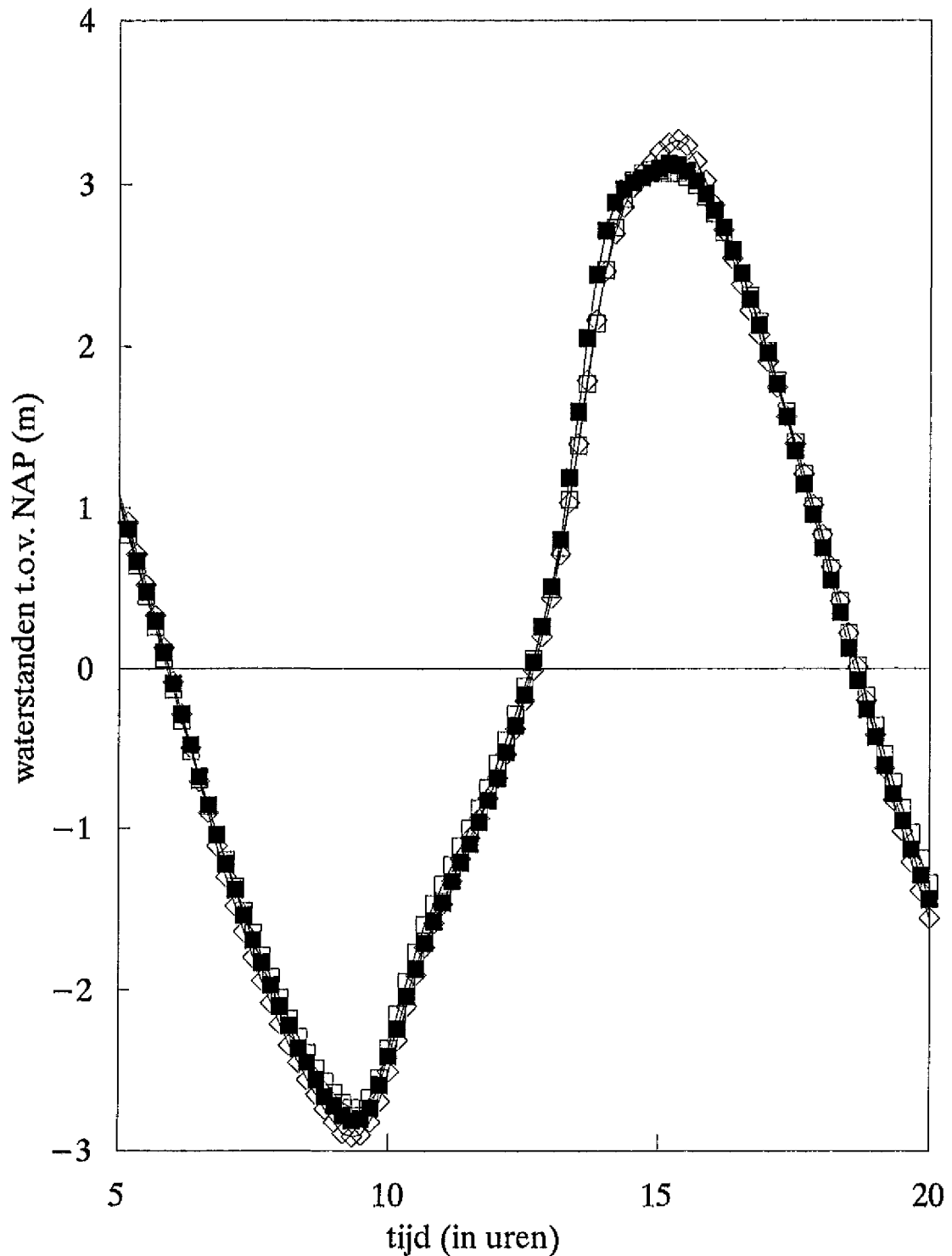
datum : april 1996

rapport : A 982

figuur : 4.6

Waterstanden Hansweert

6 april 1989



■ gemeten □ SCALDIS100 ◇ FINWES96

INGENIEURSBUREAU / **SVASEK B.V.**

Modelresultaten - waterstanden Hansweert

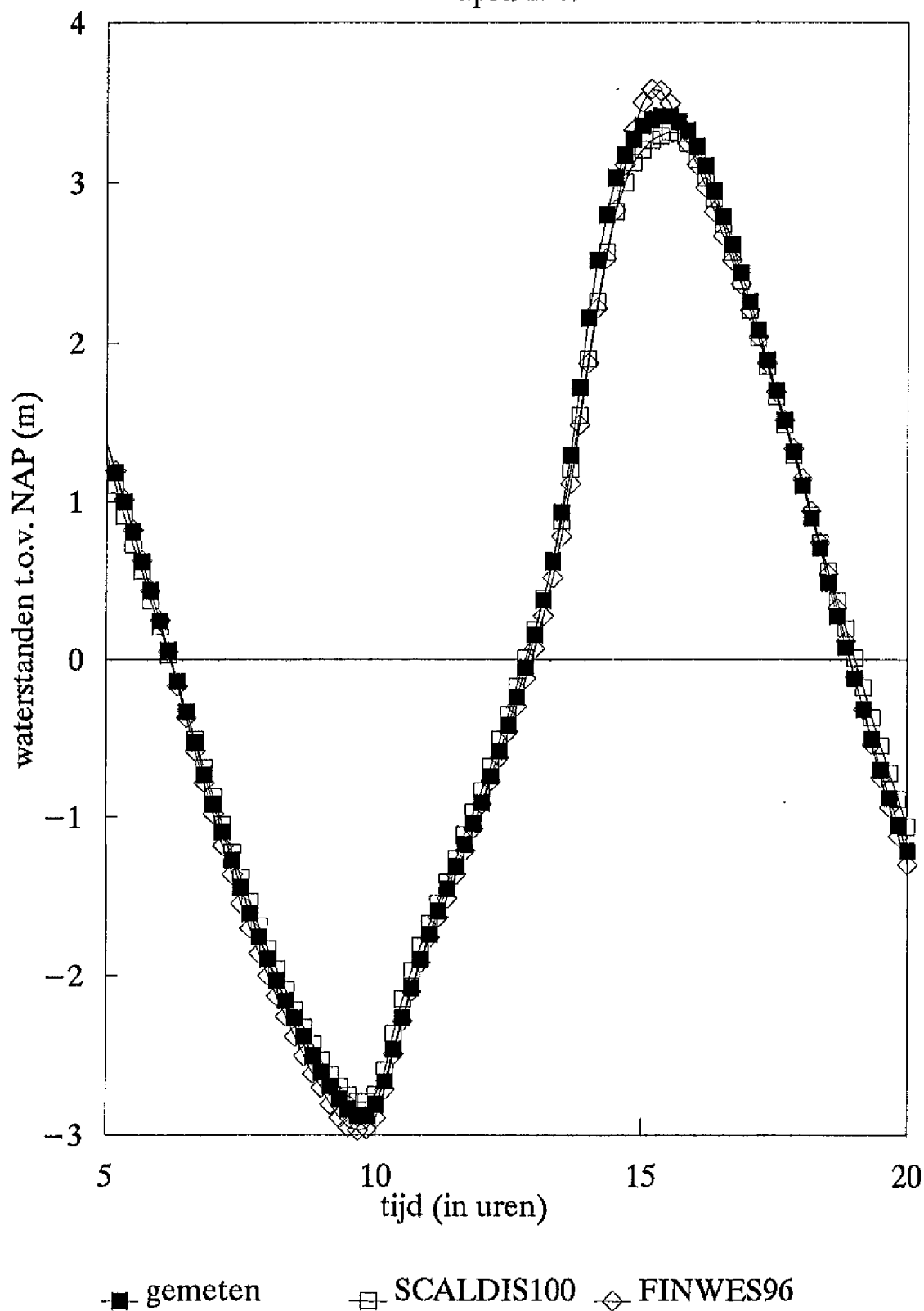
datum : april 1996

rapport : A 982

figuur : 4.7

Waterstanden Baalhoek

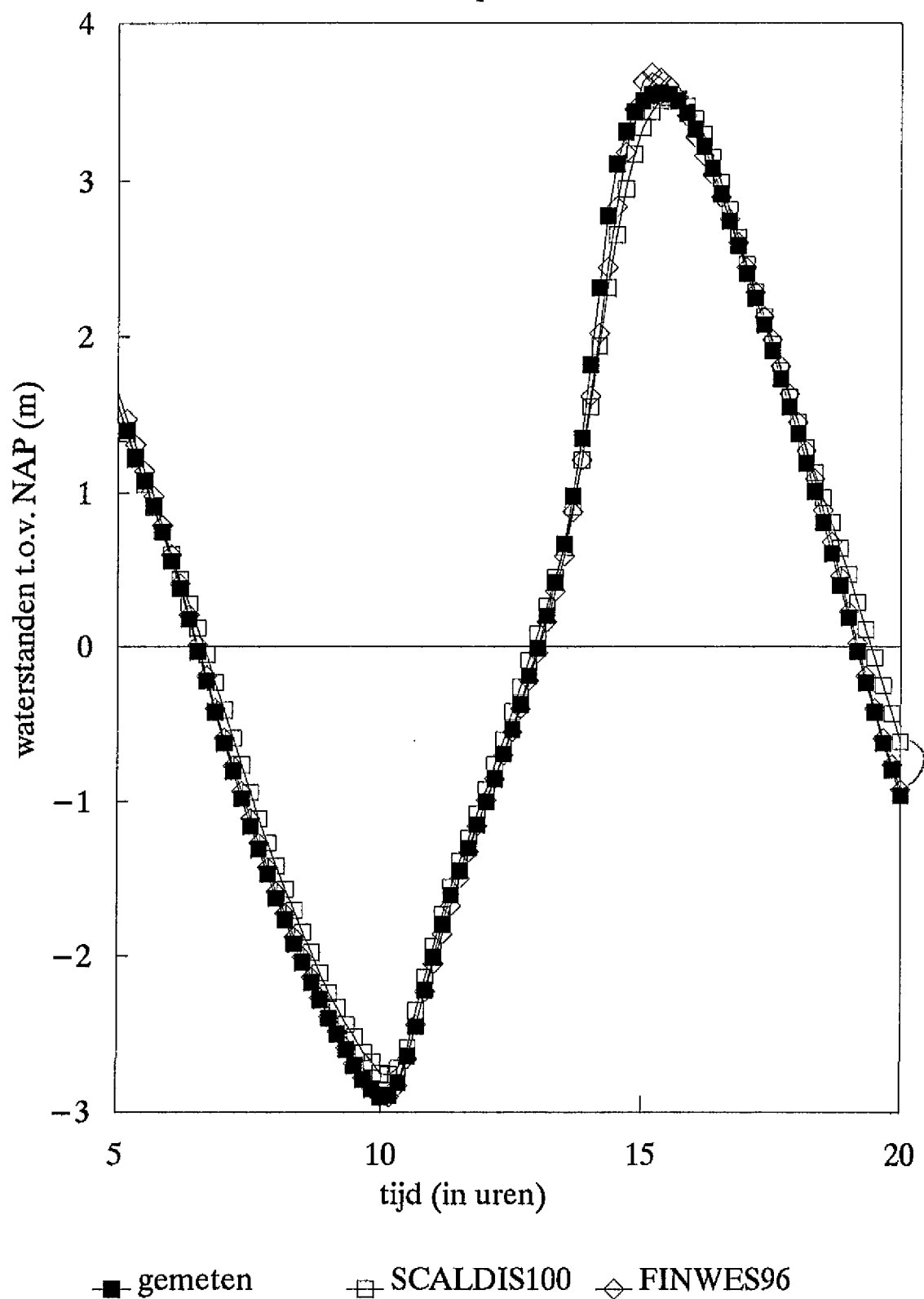
6 april 1989



INGENIEURSBUREAU / SVASEK B.V.	datum : april 1996
Modelresultaten - waterstanden Baalhoek	rapport : A 982
	figuur : 4.8

Waterstanden Bath

6 april 1989



INGENIEURSBUREAU / **SVASEK** B.V.

Modelresultaten - waterstanden Bath

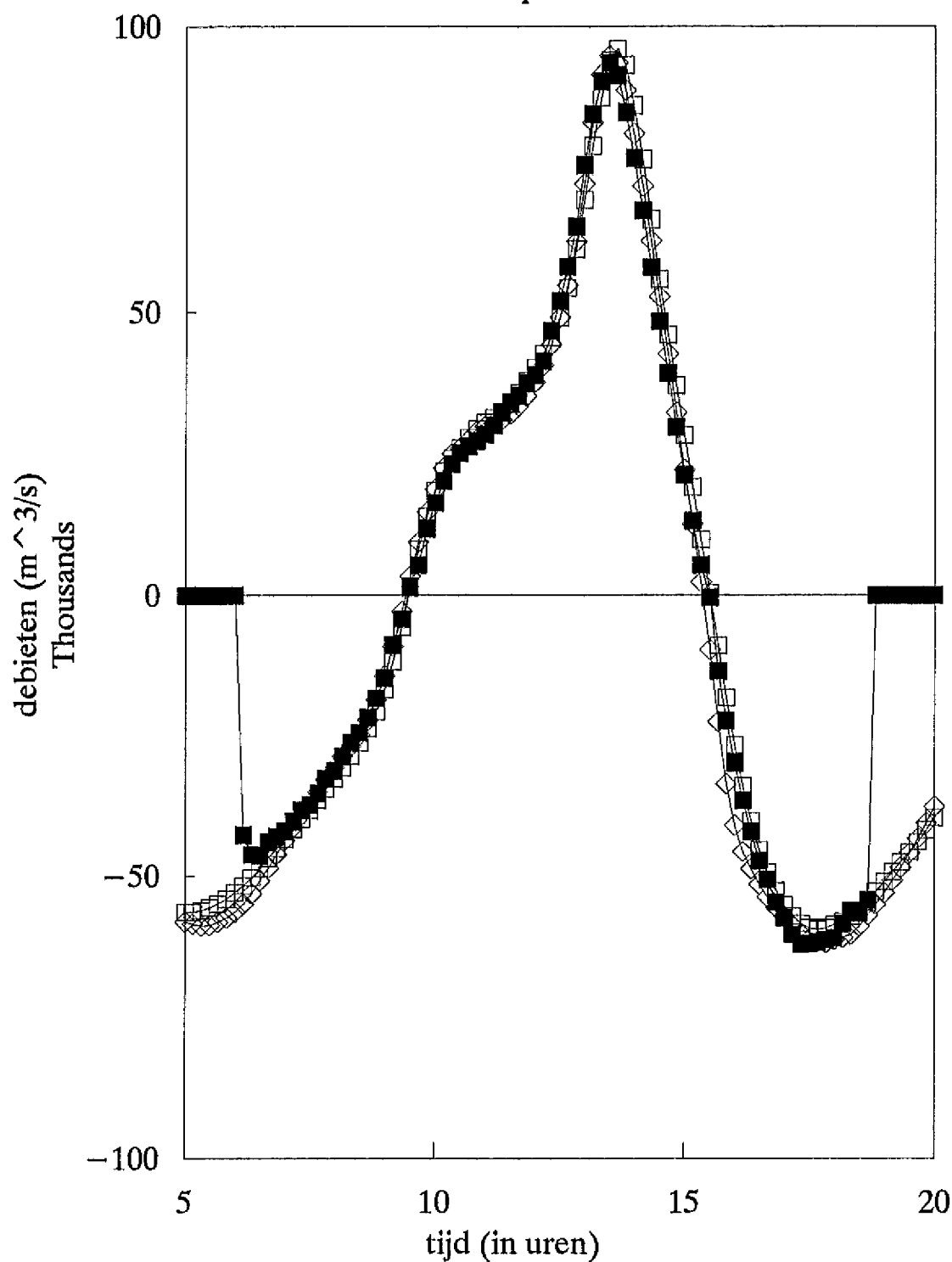
datum : april 1996

rapport : A 982

figuur : 4.9

Debieten door raai 7

6 april 1989



■ gemeten

□ SCALDIS100

◇ FINWES96

INGENIEURSBUREAU / **SVASEK B.V.**

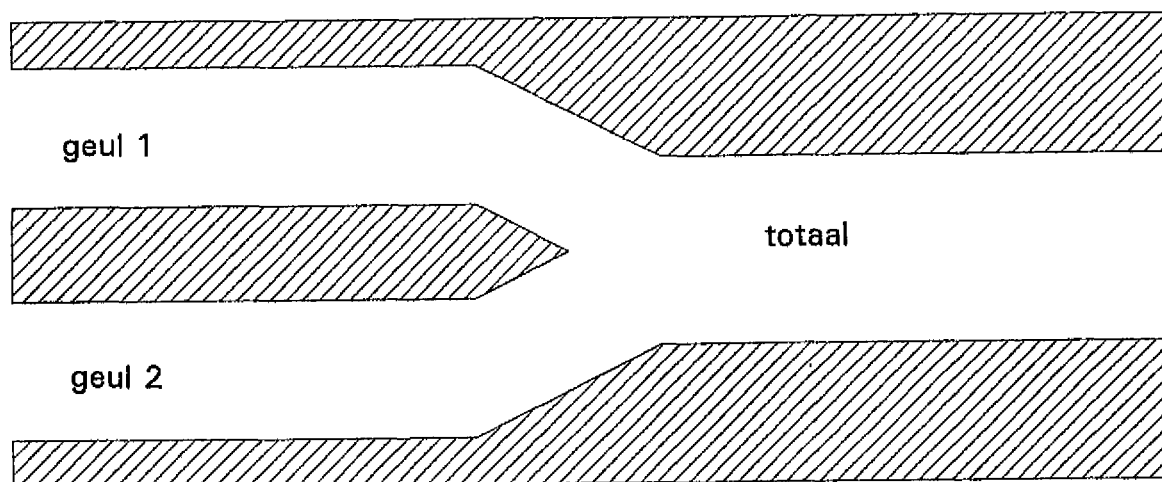
Modelresultaten - debieten raai 7
(Everingen en Pas van Terneuzen)

datum : april 1996

rapport : A 982

figuur : 4.10

	eb	vloed
geul 1	60	30
geul 2	40	70
totaal	100	100

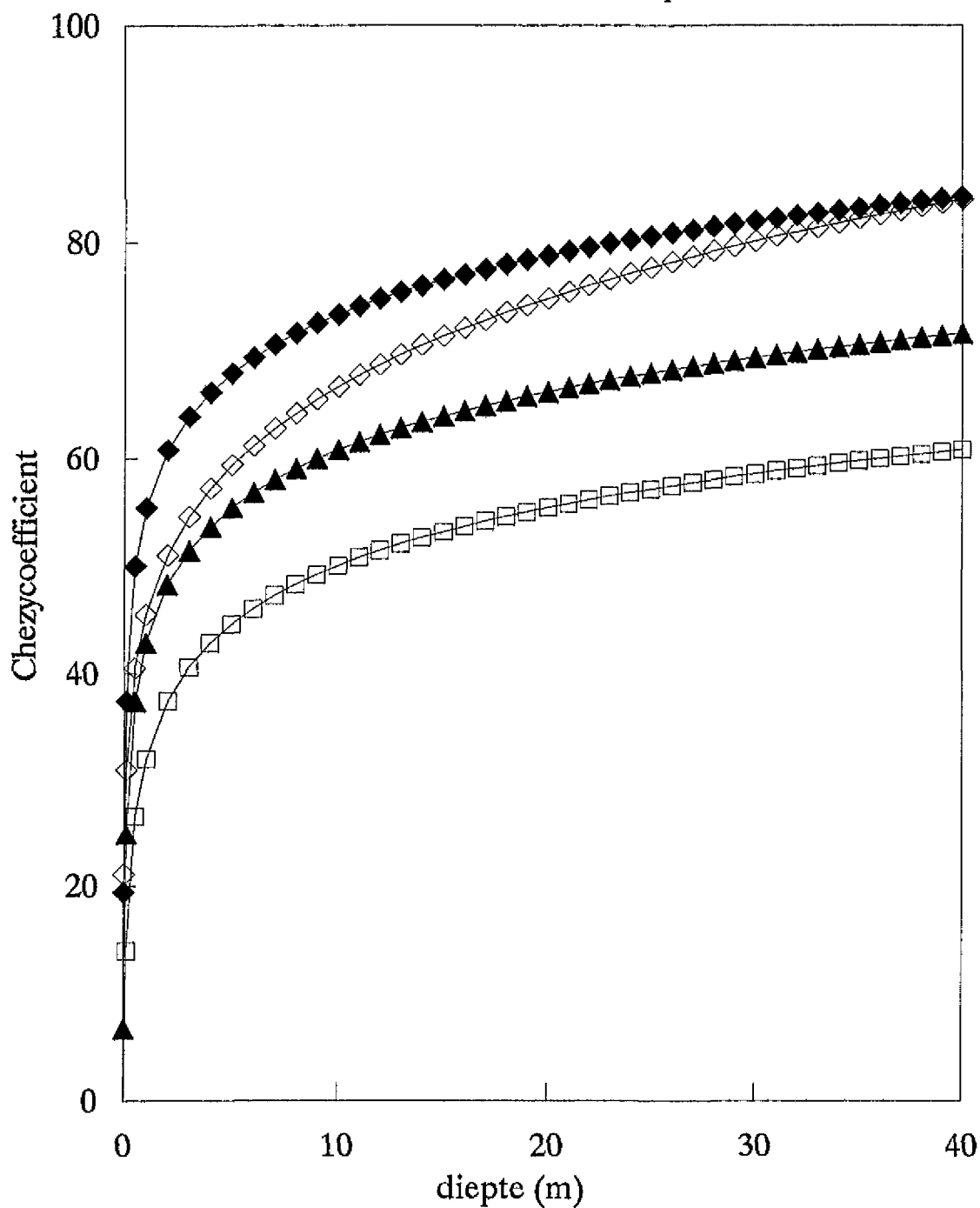


geul 1 is eb dominant

geul 2 is vloed dominant

INGENIEURSBUREAU/ SVASEK B.V.	datum : aug. 1996
Dominantie	rapport : A 982
	figuur : 4.11

Chezycoefficient afhankelijk van de diepte voor verschillende ruwheidsparameters



$\blacklozenge$ $C(k=0.01m)$ $\blacktriangle$ $C(k=0.05m)$
 $\square$ $C(k=0.20m)$ $\diamond$ $C(n=0.022)$

INGENIEURSBUREAU / **SVASEK B.V.**

Relatie Manning-waarde en Nikuradse-waarde

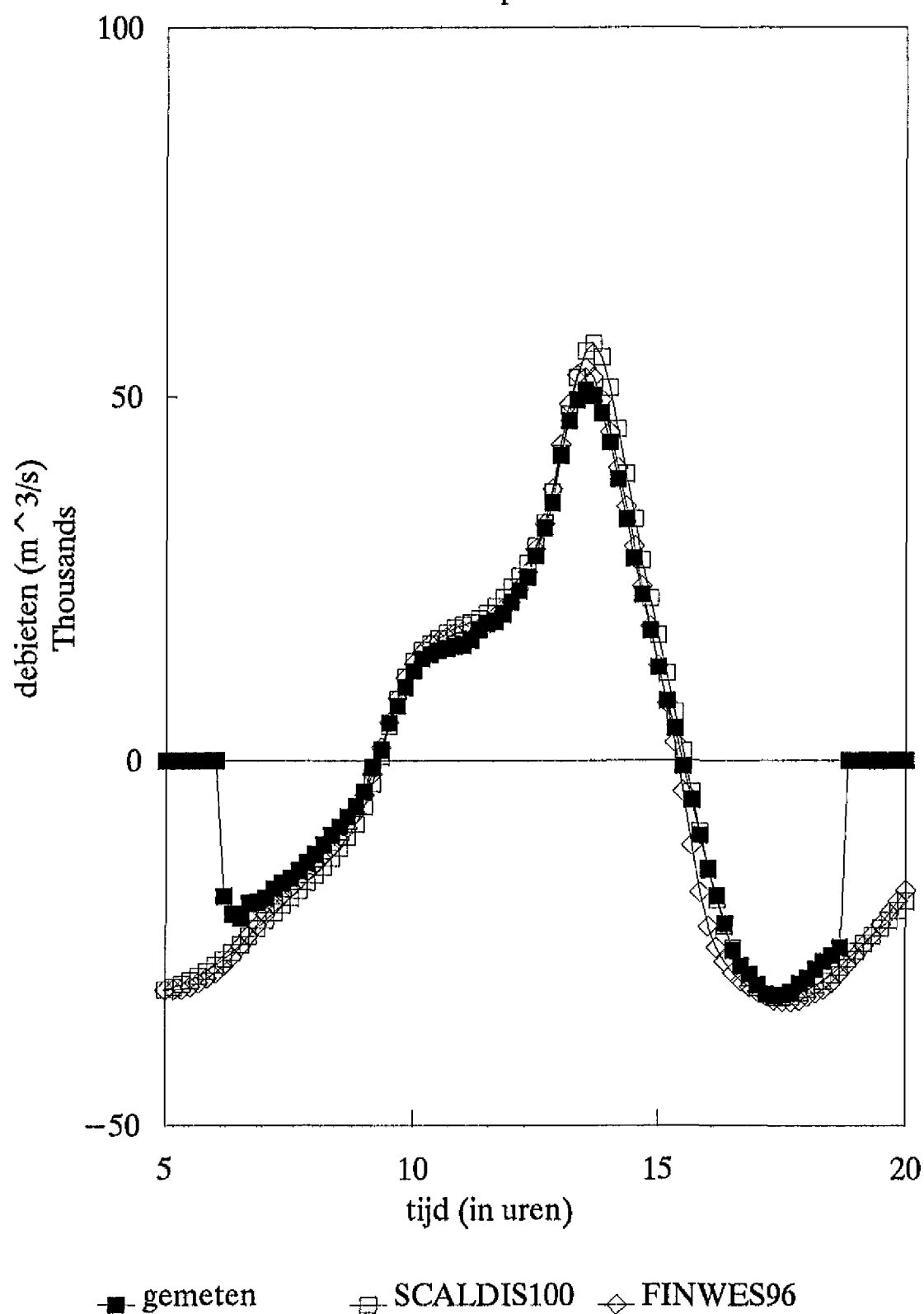
datum : april 1996

rapport : A 982

figuur : 4.12

Debieten door Everingen (vloedgeul raai 7)

6 april 1989



INGENIEURSBUREAU / SVAŠEK B.V.

Modelresultaten - debieten Everingen
(vloedgeul raai 7)

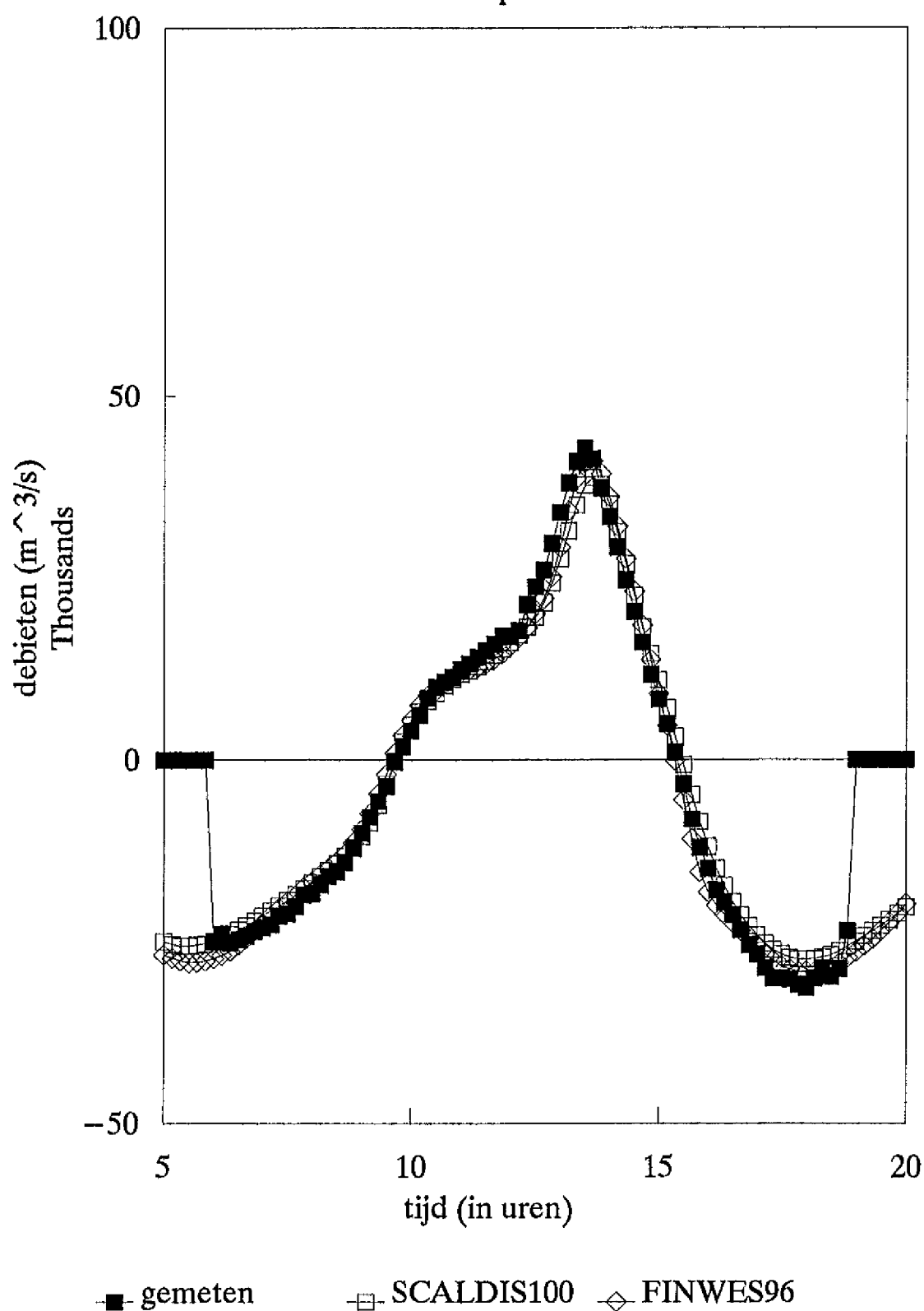
datum : april 1996

rapport : A 982

figuur : 4.13

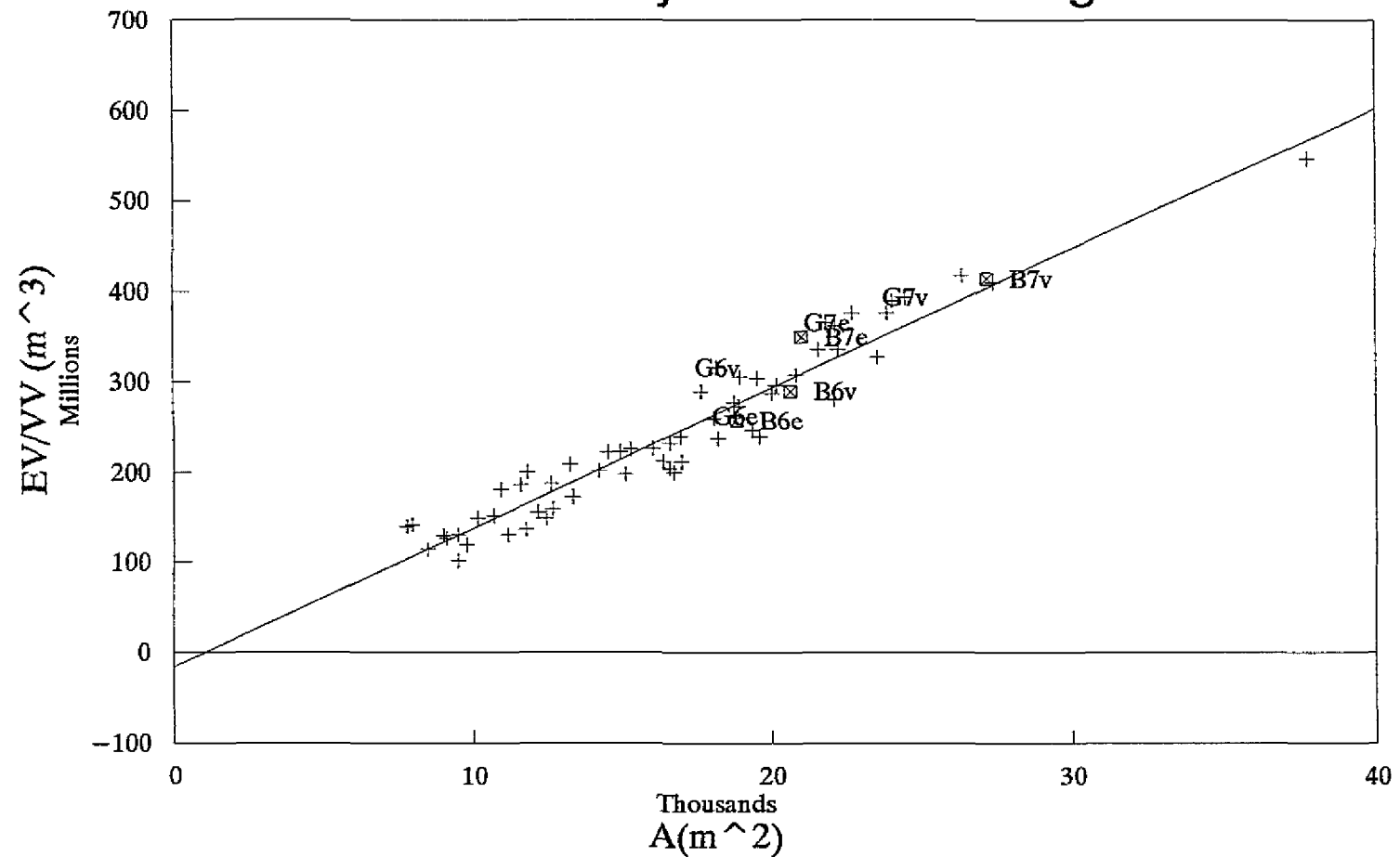
Debieten door Pas van Tern. (ebgeul raai 7)

6 april 1989



INGENIEURSBUREAU / SVASEK B.V.	datum : april 1996
Modelresultaten - debieten Pas van Terneuzen (ebgeul raai 7)	rapport : A 982
	figuur : 4.14

Stabiliteitsanalyse eb – en vloedgeulen



⊠ berekende waarden

+ gemeten waarden

— uit metingen afgeleide relatie

(bijv. B7e = berekend raai 7 ebgeul)

$$DV = 15454 * A - 16444153$$

INGENIEURSBUREAU / SVAŠEK B.V.

Evenwichtsrelatie getijvolume-doorstroomboppervlak

datum

: aug. 1996

rapport

: A 982

figuur

: 4.15



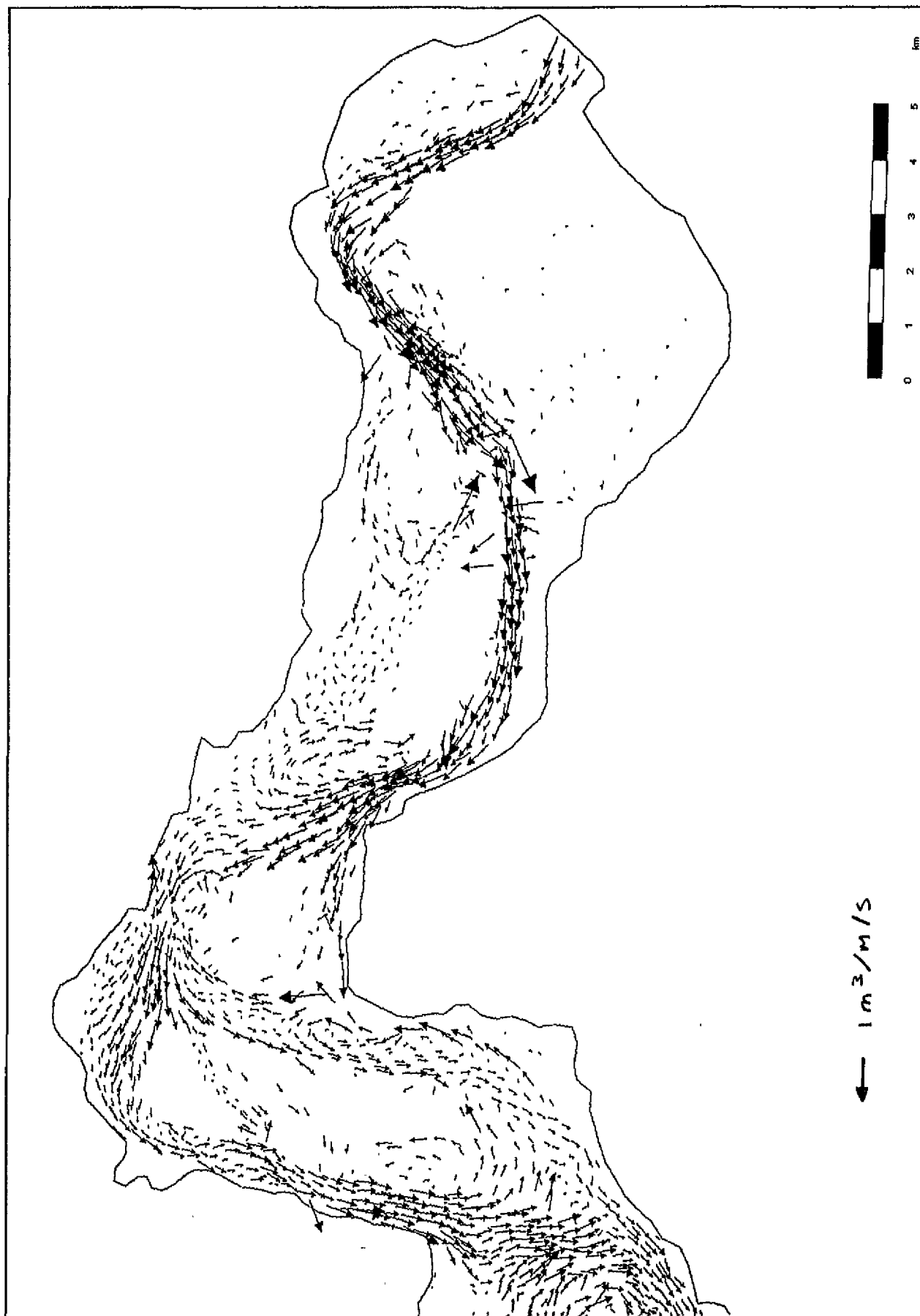
INGENIEURSBUREAU **SVASEK** B.V.

Netto debieten in de Westerschelde - FINWES96
Westelijk deel

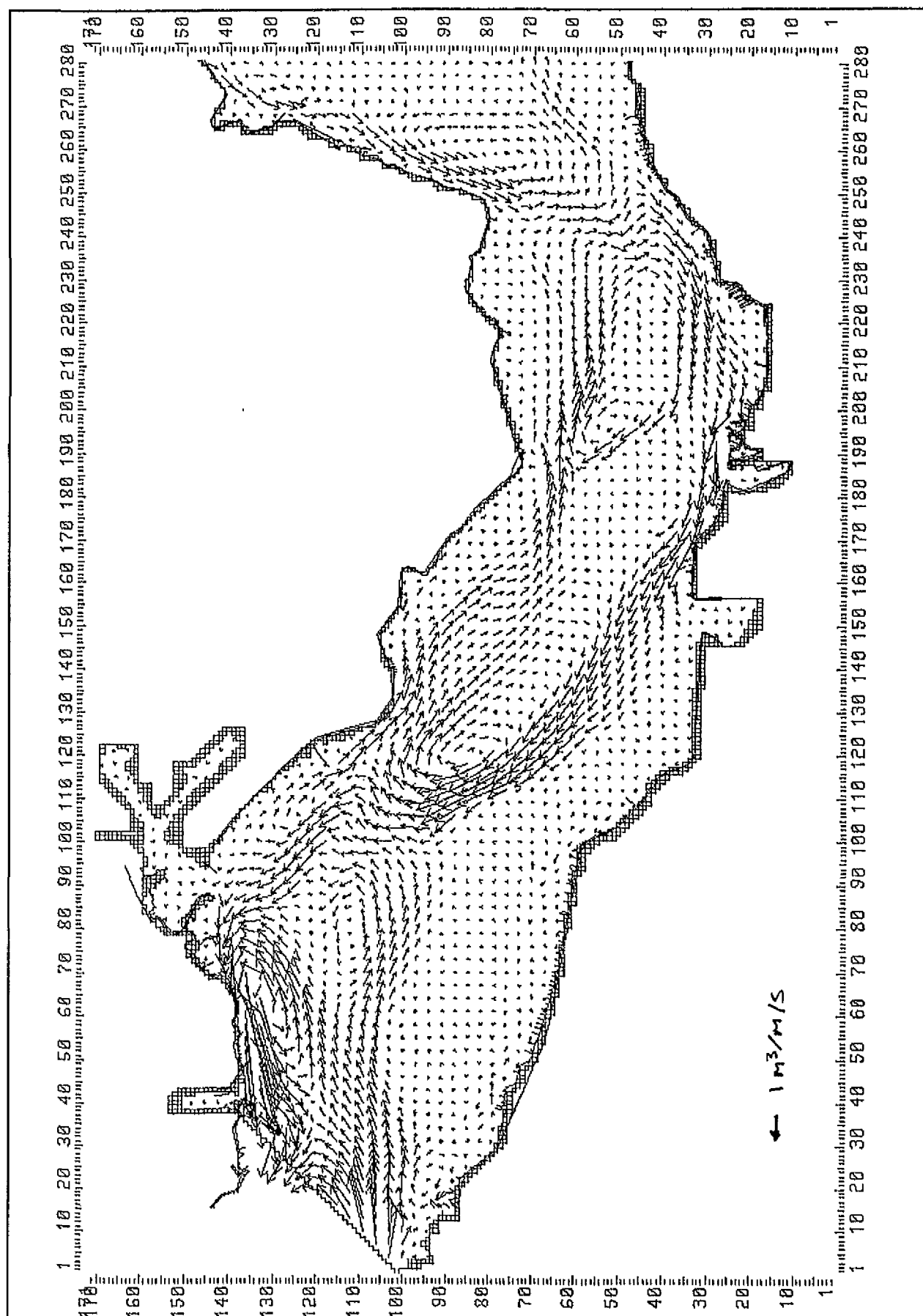
datum : april 1996

rapport : A 982

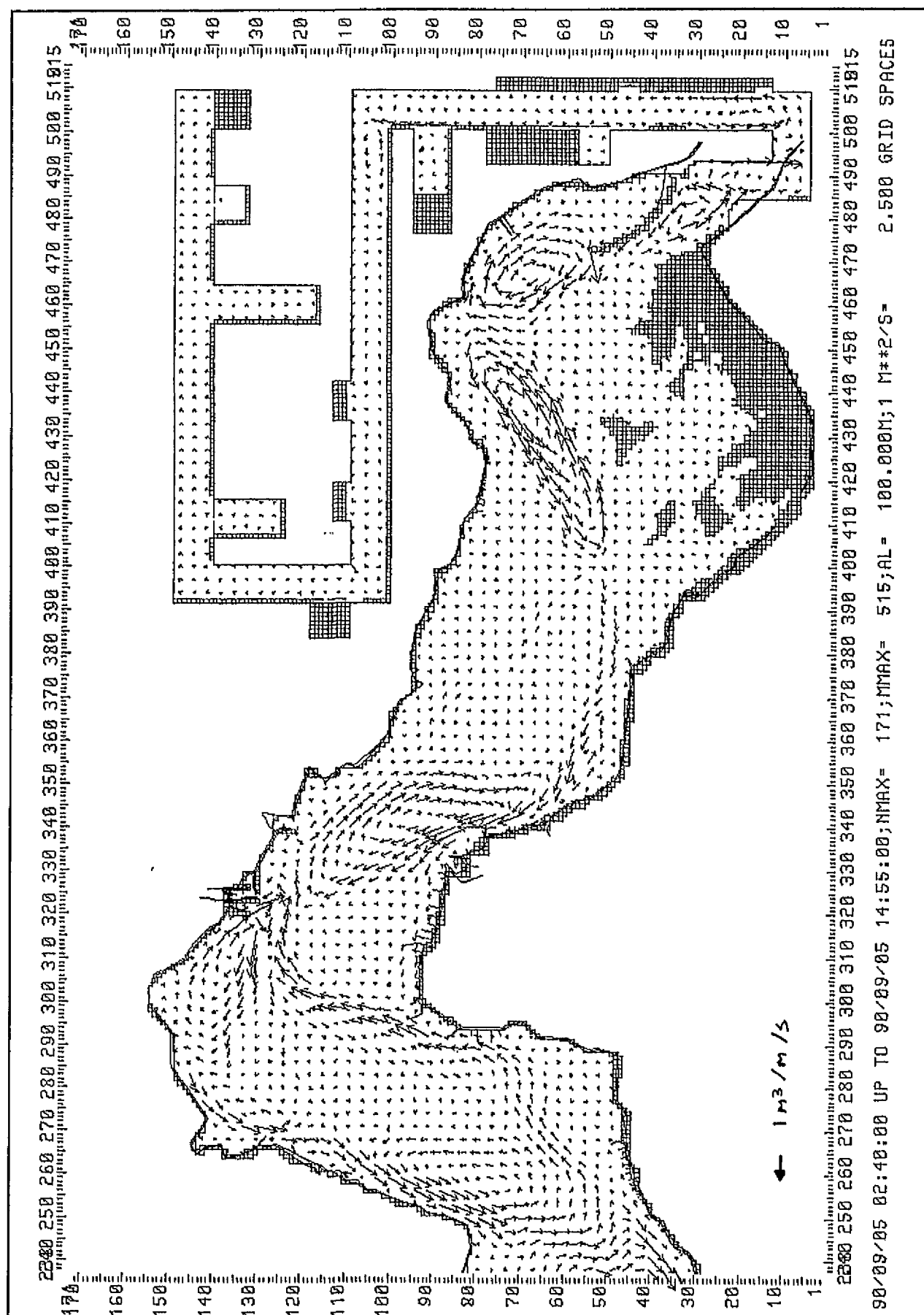
figuur : 4.16



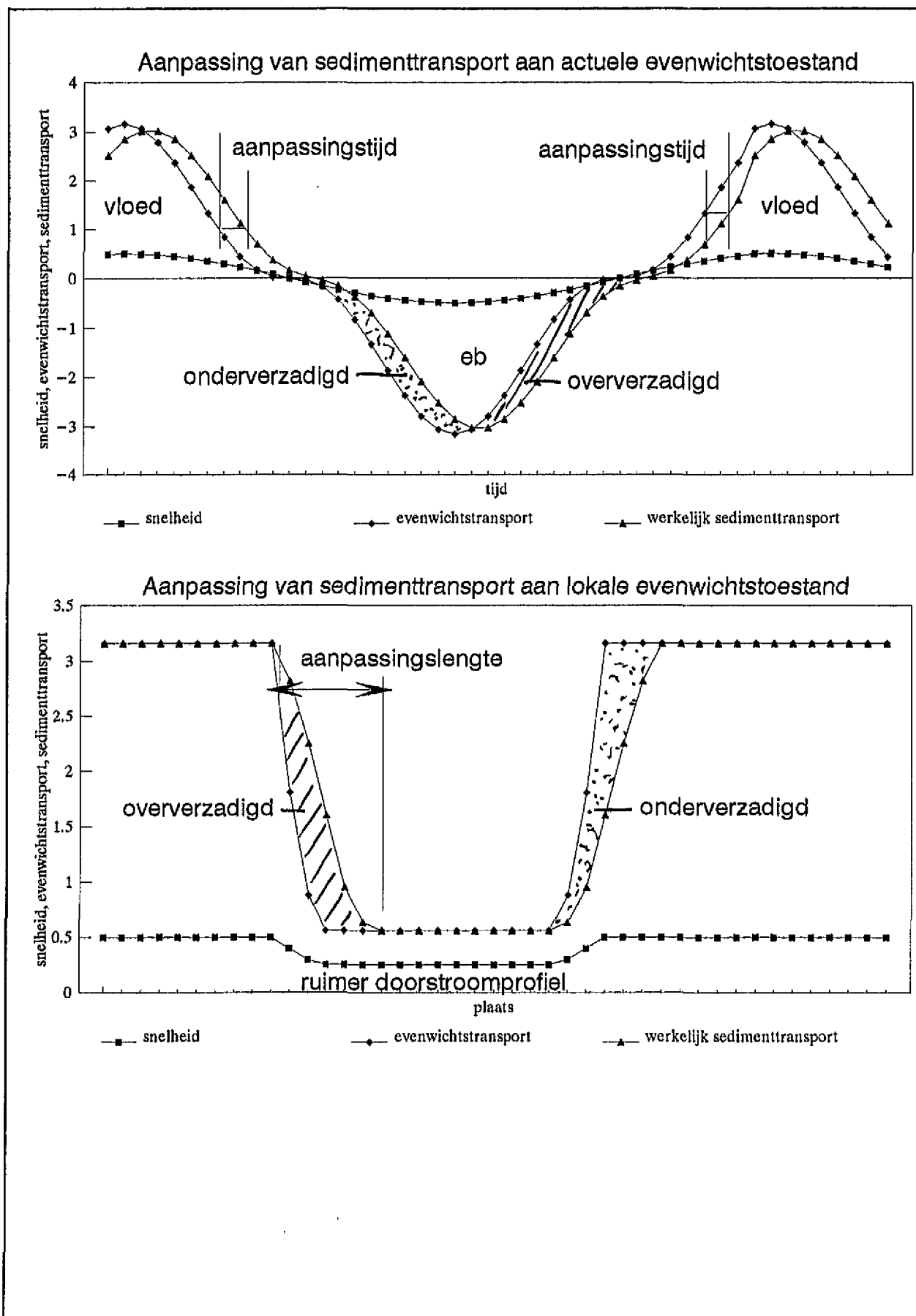
INGENIEURSBUREAU SVASEK B.V.	datum : april 1996
Netto debieten in de Westerschelde - FINWES96 Oostelijk deel	rapport : A 982
	figuur : 4.17



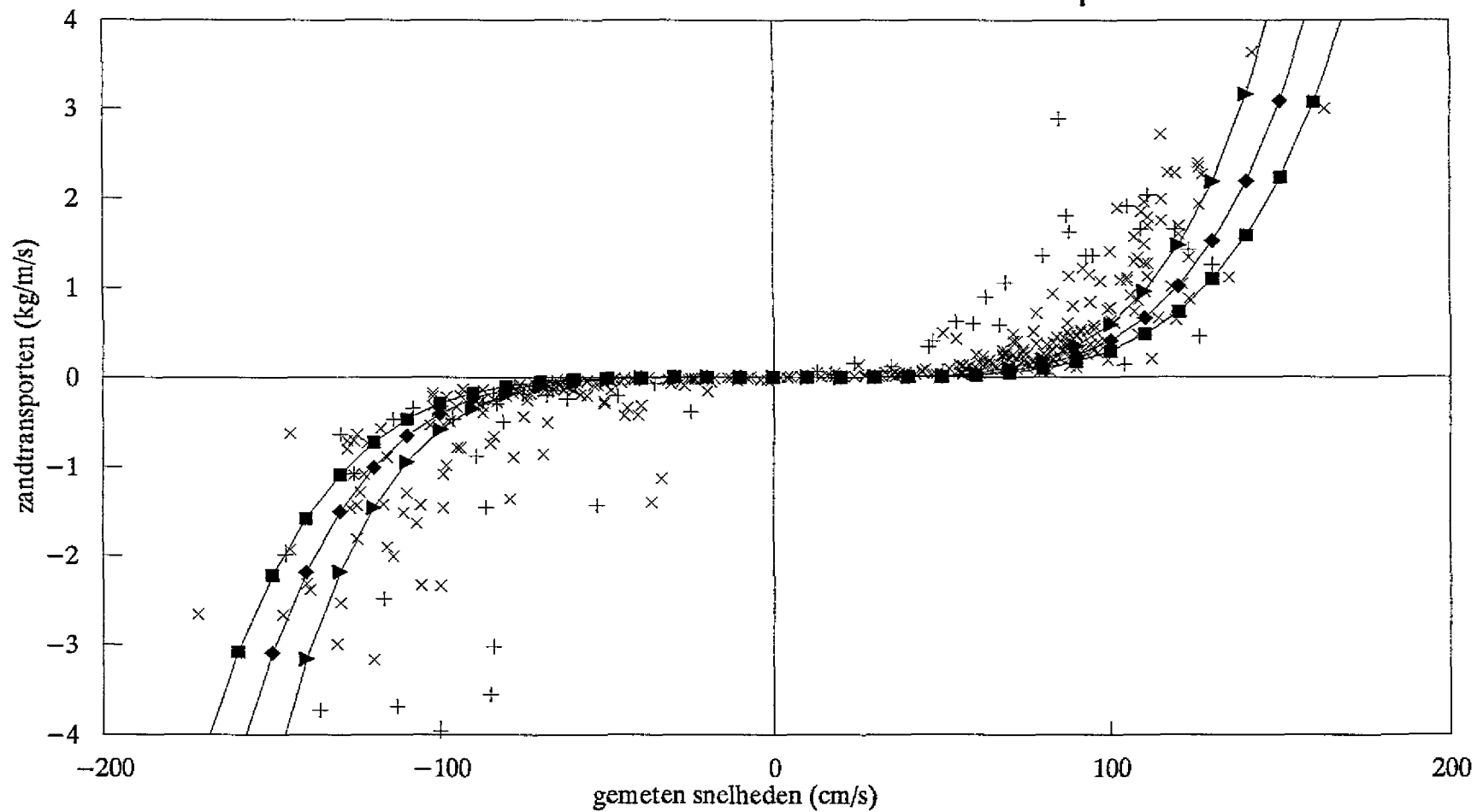
Netto debieten in de Westerschelde - DETWES Westelijk deel (bron: Van der Male, 1993)	datum	: april 1996
	rapport	: A 982
	figuur	: 4.18



Netto debieten in de Westerschelde - DETWES Oostelijk deel (bron: Van der Male, 1993)	datum	: april 1996
	rapport	: A 982
	figuur	: 4.19



verband snelheden en zandtransporten



■ evenwichtstransport ($k=0.2m$) ◆ evenwichtstransport ($k=0.4m$) ▲ evenwichtstransport ($k=0.8m$)
 × zandtransport dr.v. Hansweert + zandtransport raai 7
 positieve waarden zijn zeewaarts gericht (cb)

INGENIEURSBUREAU **SVASSEK** B.V.

Kalibratie zandtransportberekeningen

datum : aug. 1996

rapport : A 982

figuur : 6.1



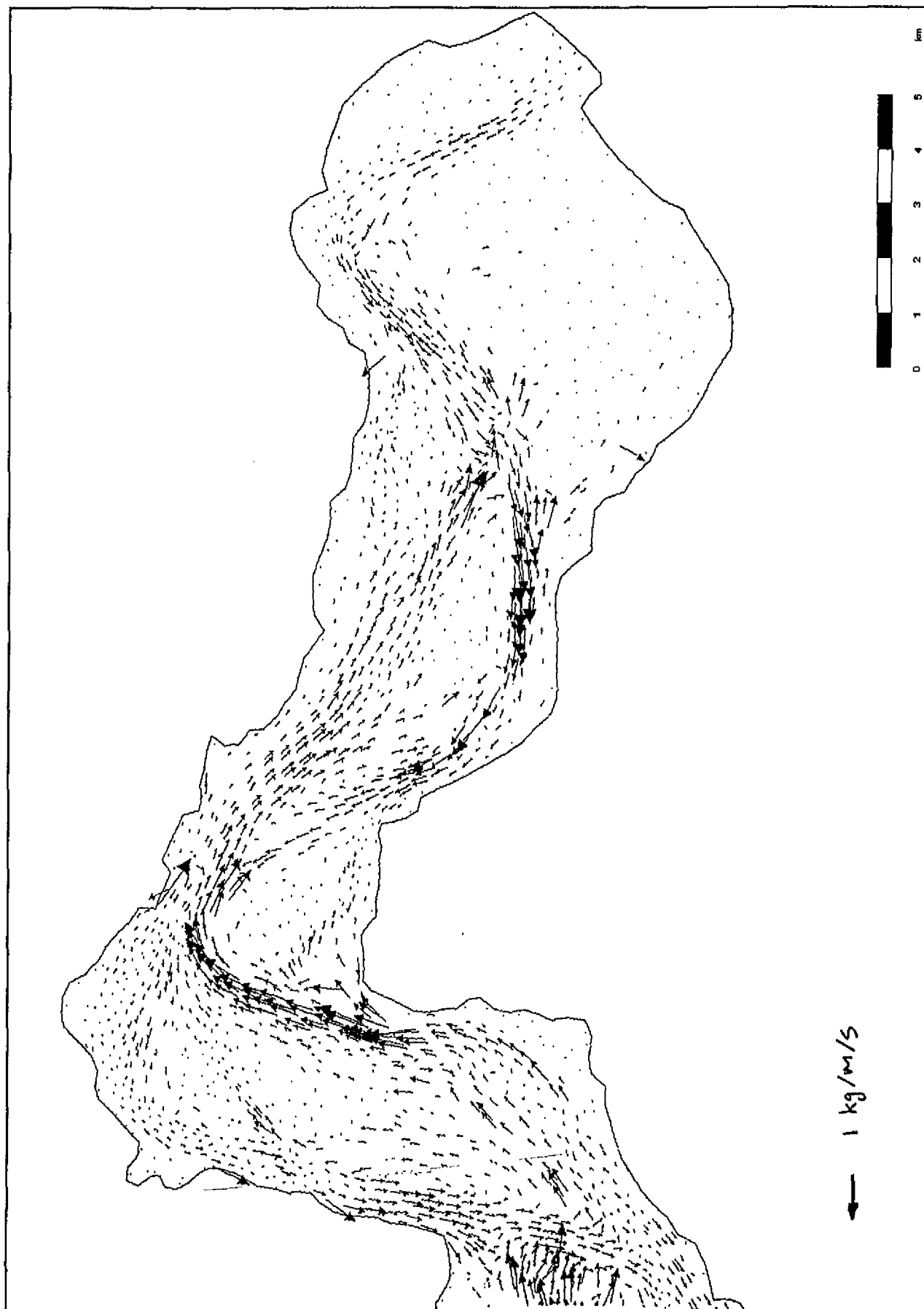
INGENIEURSBUREAU **SVAŠEK B.V.**

Netto zandtransporten in de Westerschelde
Westelijk deel

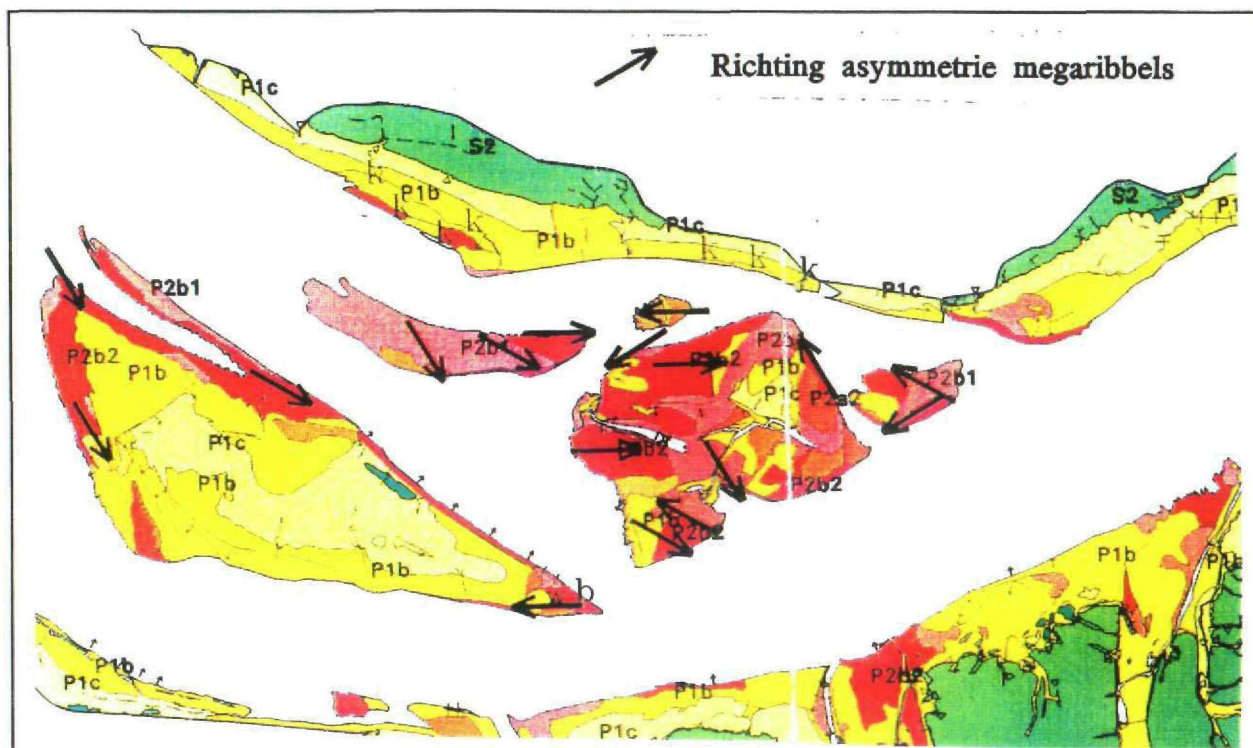
datum : april 1996

rapport : A 982

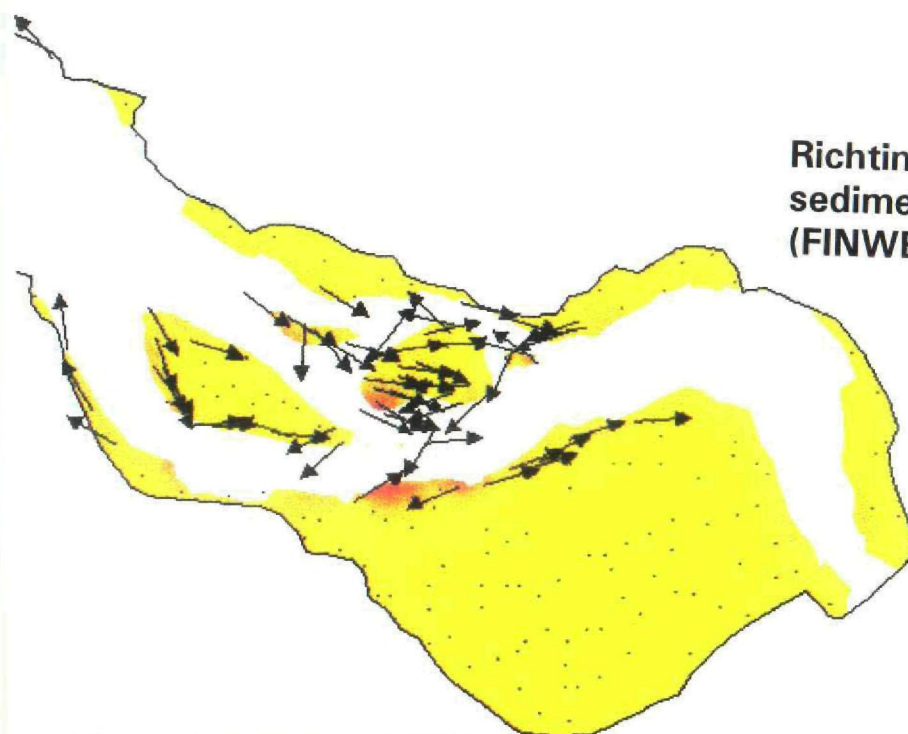
figuur : 6.2



INGENIEURSBUREAU / SVÁSEK B.V.	datum : april 1996
Netto zandtransporten in de Westerschelde Oostelijk deel	rapport : A 982
	figuur : 6.3

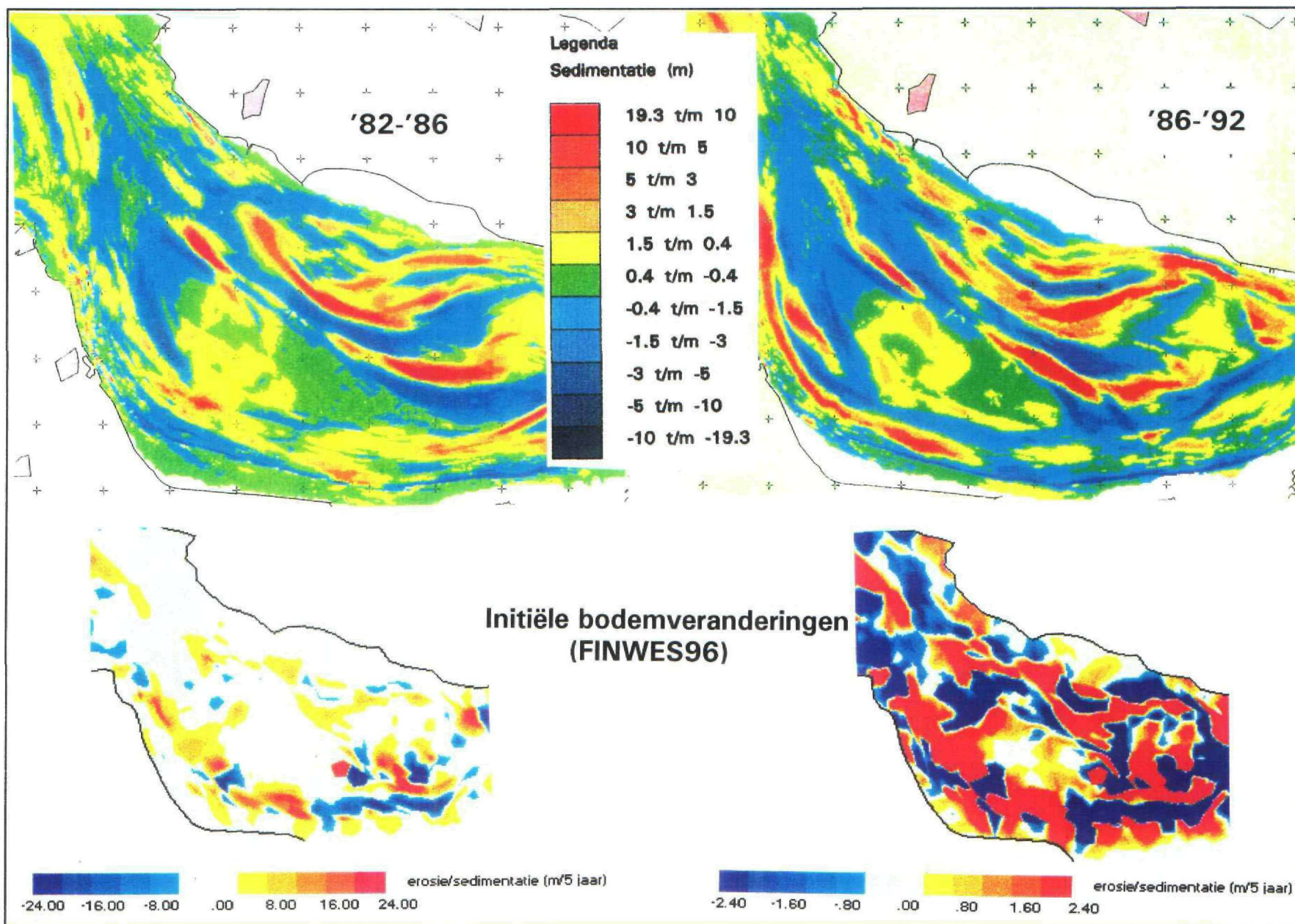


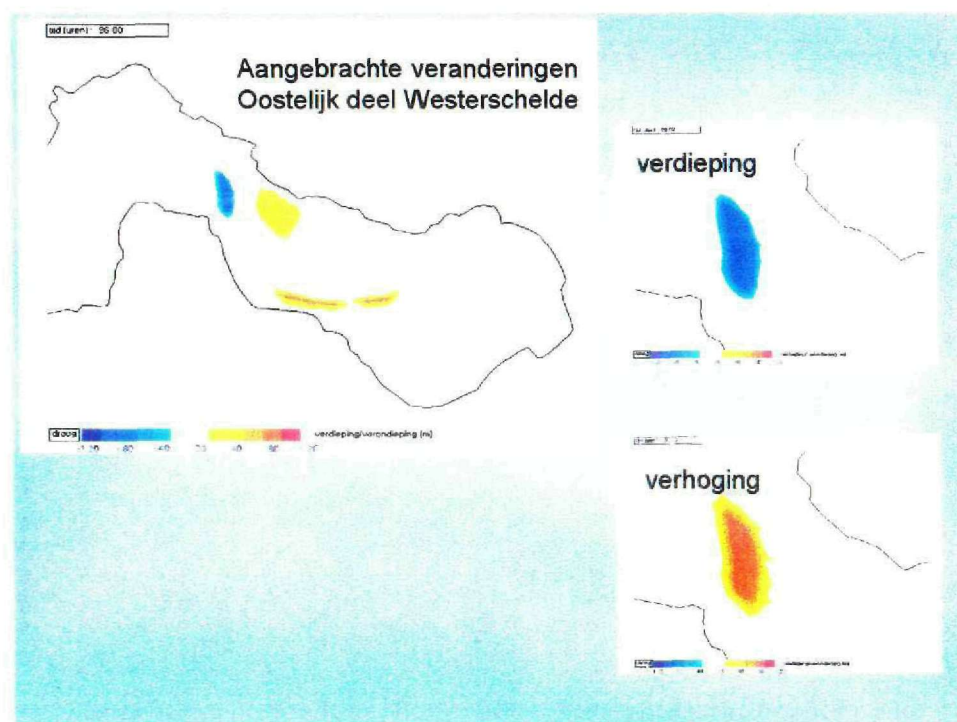
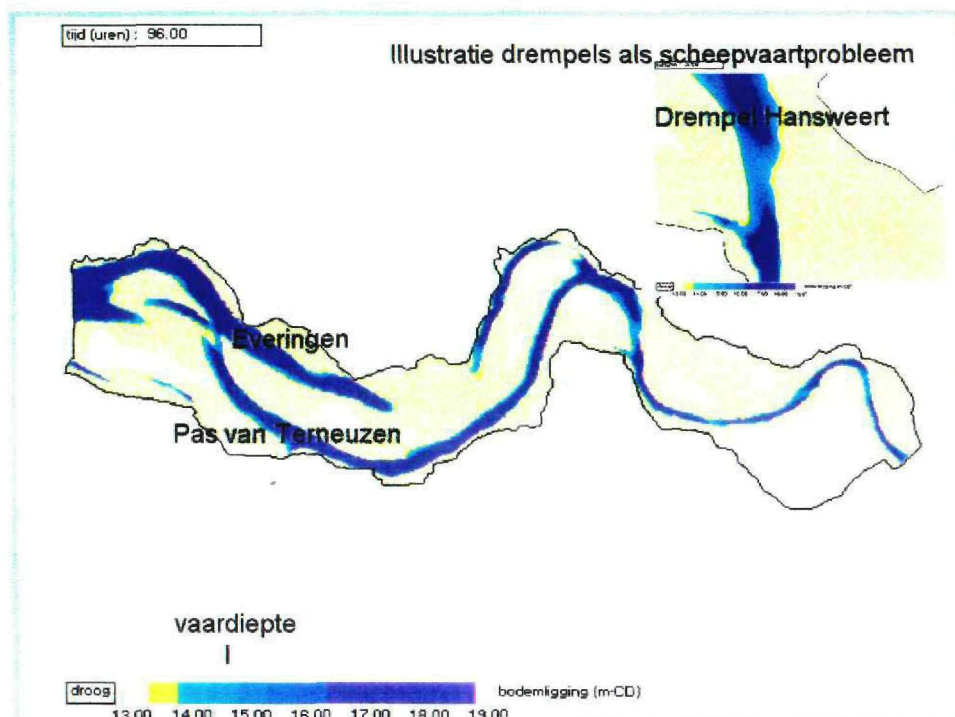
Luchtfoto-interpretatie
(Huijs, 1995)



droog .00 5.00 10.00 15.00 20.00 25.00 30.00 gemiddelde sedimenttransporten ($E \cdot 6 \text{ m}^2/\text{s}$)

INGENIEURSBUREAU / SVAŠEK B.V.	datum : april 1996
Netto zandtransporten boven de laagwaterlijn	rapport : A 982
	figuur : 6.4





INGENIEURSBUREAU **SVASEK** B.V.

Drempels, bagger en stortgebieden

datum : april 1996

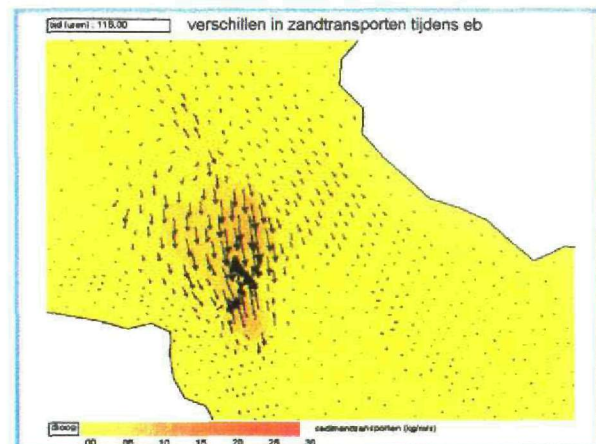
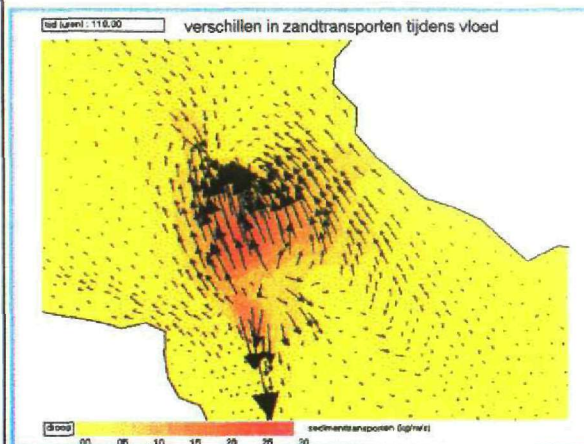
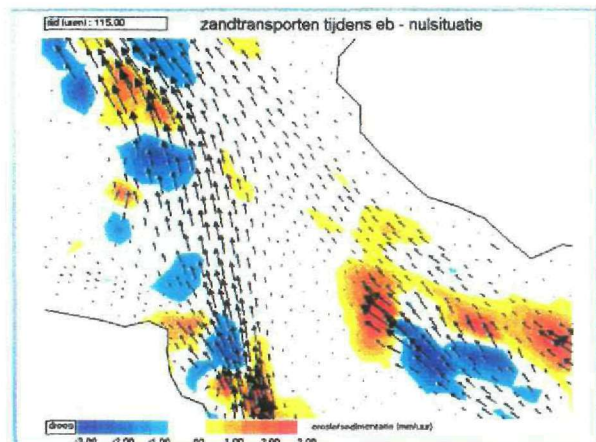
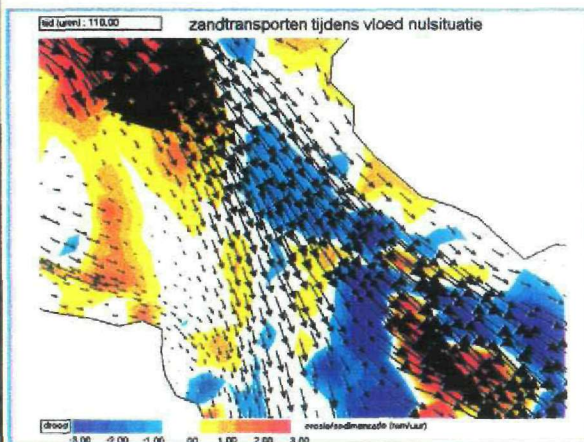
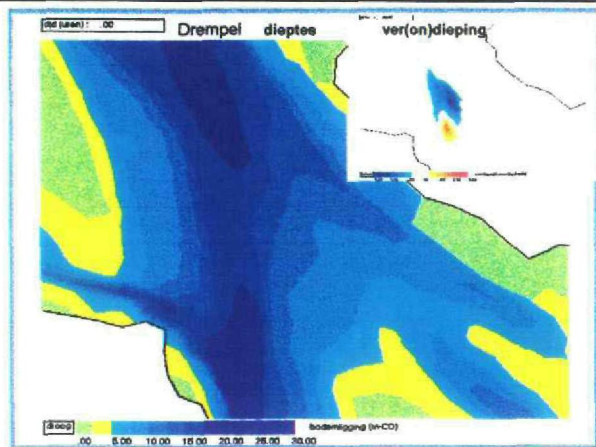
rapport : A 982

figuur : 7.1

Verdiepte drempel

tot 16m (gedeeltelijk verondiept)

lagere snelheden op de drempel
dus lagere sedimenttransporten



INGENIEURSBUREAU / **SVASEK B.V.**

Invloed verdieping drempel van Hansweert

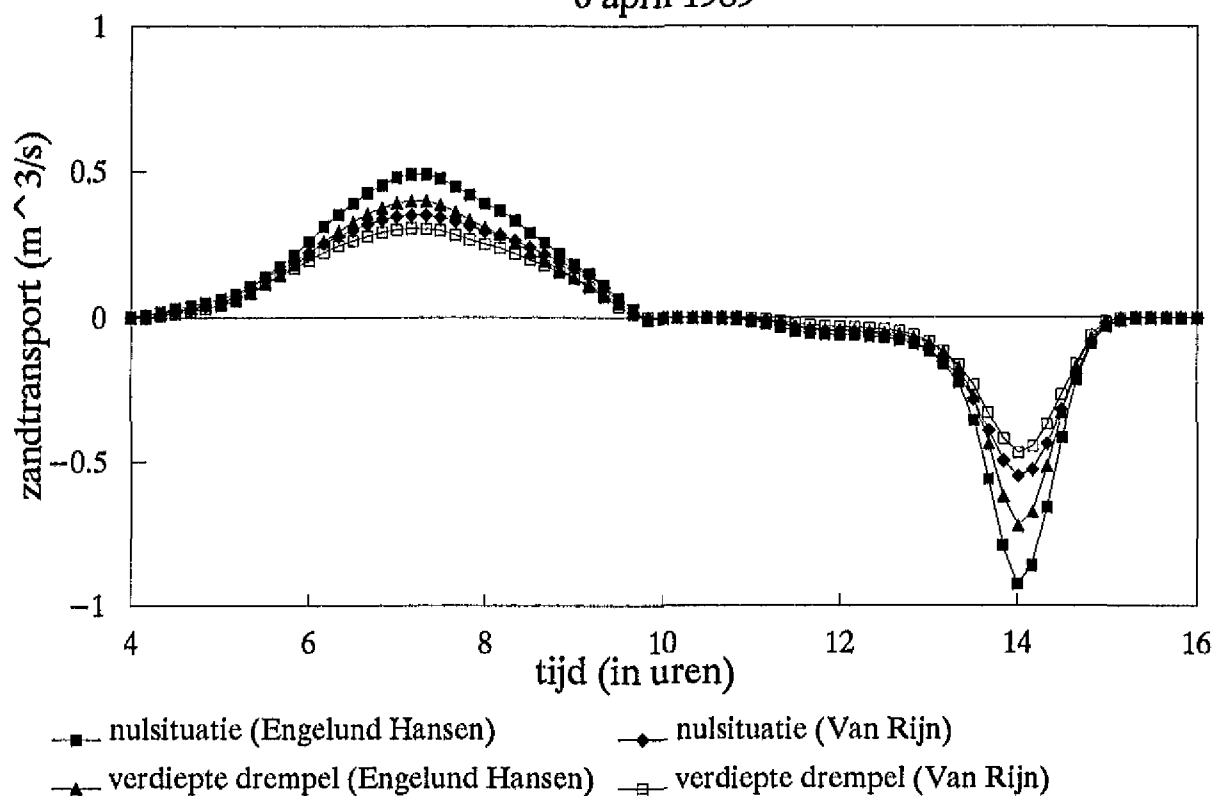
datum : aug. 1996

rapport : A 982

figuur : 7.2

Zandtransporten drempel van Hansweert

6 april 1989

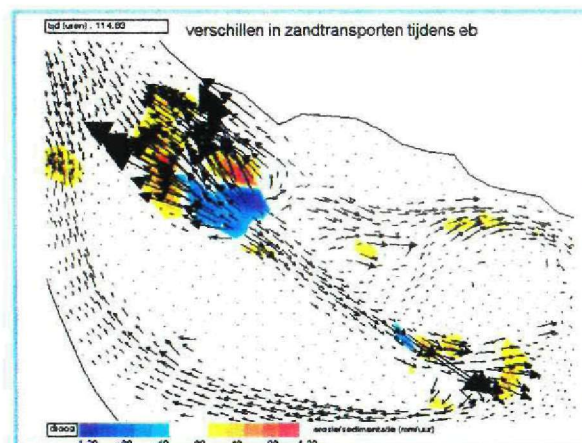
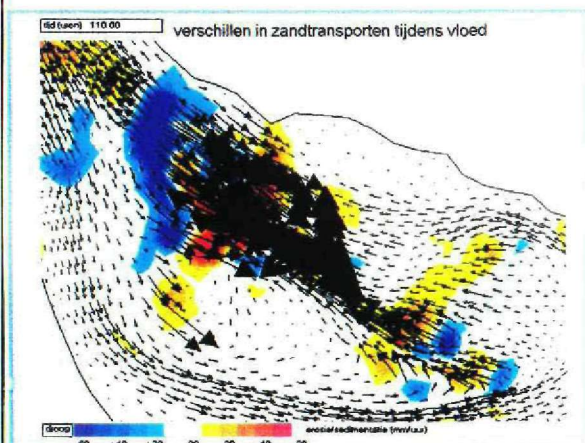
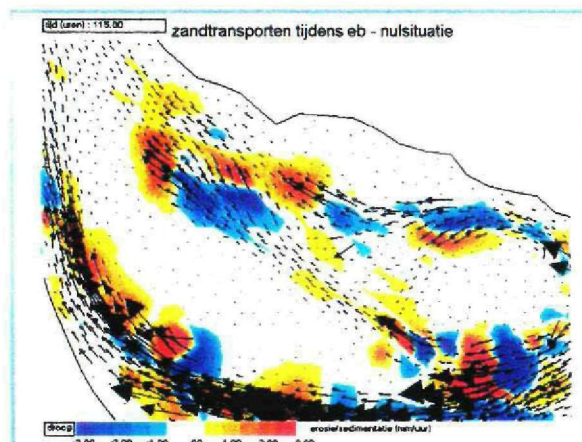
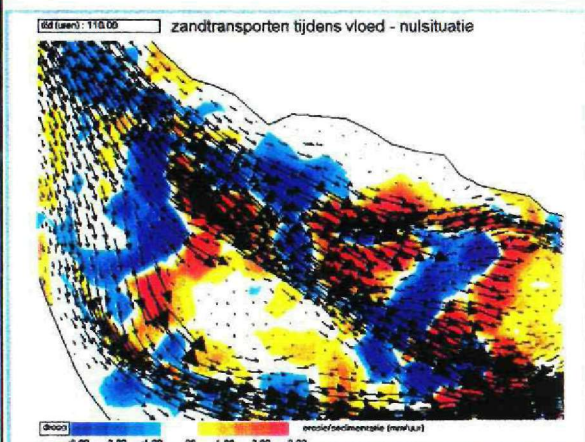
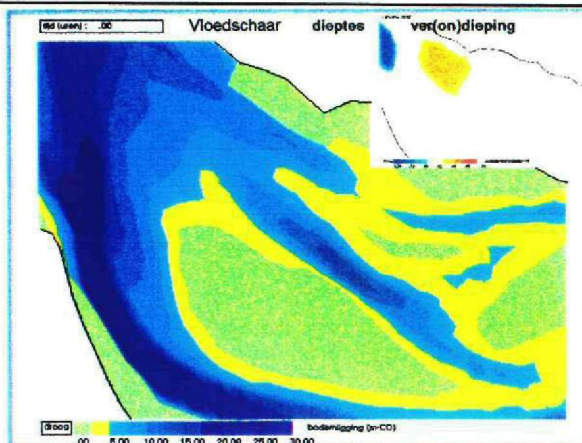


Zandtransporten ($m^3/getij$)

	Engelund Hansen		
	nulsituatie	verdiepte drempel	verschil
vloedfase	5000	4020	980
ebfase	3650	2830	820
totaal	8650	6850	1800
	Van Rijn		
	nulsituatie	verdiepte drempel	verschil
vloedfase	3920	3320	600
ebfase	2570	2090	480
totaal	6490	5410	1080

Verondiepte vloedschaar (incl. verdiepte drempel)

hogere snelheden in de schaar
dus grotere sedimenttransporten, maar ook
minder water door de schaar,
dus lagere transporten



Tabellen

	HW-stand	LW-stand	Getij- verschil	Getij- coëff.
gem. springtij	2.39 m	-2.03 m	4.42 m	1.16
gemiddeld getij	2.02 m	-1.80 m	3.82 m	1.00
gem. doottij	1.53 m	-1.49 m	3.02 m	0.79
28 september 1992	2.70 m 2.64 m	-2.06 m -2.42 m	4.76/4.70 5.06/4.96	1.25/1.23 1.32/1.30
29 september 1992	2.54 m 2.58 m	-2.16 m -2.37 m	4.70/4.74 4.85 m	1.23/1.24 1.27

Tabel 4.1 Getijgegevens Vlissingen 28-29 september 1992

Datum	Getijcoëfficiënt			
	daling	rijzing	daling	rijzing
2 april 1989		0.86	0.87	0.85
3 april 1989	0.88	1.01	1.00	0.95
4 april 1989	1.04	1.13	1.10	1.06
5 april 1989	1.18	1.35	1.23	1.22
6 april 1989	1.32	1.39	1.24	1.26
7 april 1989	1.37	1.35	1.27	1.23
8 april 1989	1.34	1.25	1.27	1.34
9 april 1989	1.27	1.21	1.23	1.24
10 april '89	1.14	1.09		

Tabel 4.2 Getijgegevens Vlissingen 3-10 april 1989

	FINWES96	SCALDIS100
begrenzing: - zeewaarts (open) - landwaarts (open) - overig (gesloten)	- Vlissingen-Breskens - landsgrens Nederland-België - dijken	- Westkapelle-Vlakte v/d Raan-Zeebrugge - Gent, Antwerpen, Terneuzen - dijken
vorm elementen	driehoekig	rechthoekig
maaswijdte	geulen: 100-200m platen: 200-400m	kustzone 400-100m Westerschelde 100m Zeeschelde 30-100m
randvoorwaarden	waterstanden aan beide open grenzen	waterstanden aan de zeewaartse open grens, afvoeren bij Gent, Antwerpen en Terneuzen
rekening/hardware ¹	4 uur per getij op Pentium 133 Mhz	3 uur per getij op HP9000/730
gemiddelde tijdstap	gemiddeld 1 seconde (varieert tijdens getij)	30 seconden (vaste waarde)
aantal rekenpunten	11222	52000
ruwheidswaarde	Nikuradse-waarde van 5 centimeter	Manning-waarde van 0.022 (dimensieloos) (Van Bath tot Gent: 0.022 tot 0.015)

Tabel 4.3 Modelkarakteristieken FINWES96 en SCALDIS100

¹

Een HP9000/730 is ongeveer 10 maal zo snel als een Pentium 133 Mhz

Plaats	Metingen	Scaldis100	Scaldis100 Afwijkingen	Finwes96	Finwes96 Afwijkingen
	Hoogwaterstanden (m t.o.v. NAP)				
Vlissingen	2.42	2.27	-0.15	2.42	0.00
Terneuzen	2.68	2.61	-0.06	2.66	-0.02
Hansweert	2.76	2.76	0.00	2.86	0.10
Baalhoek	3.08	2.91	-0.17	3.19	0.11
Bath	3.20	3.14	-0.06	3.32	0.12
	Laagwaterstanden (m t.o.v. NAP)				
Vlissingen	-2.61	-2.54	0.05	-2.61	0.00
Terneuzen	-2.73	-2.67	0.06	-2.75	-0.02
Hansweert	-2.81	-2.73	0.08	-2.91	-0.10
Baalhoek	-2.88	-2.80	0.08	-2.97	-0.09
Bath	-2.90	-2.76	0.14	-2.90	0.00

Tabel 4.4 Hoog- en laagwaters FINWES96 en SCALDIS100 6 april 1989

Plaats	SCALDIS100		FINWES96	
	Standaard afwijking (m)	Gemiddelde afwijking (m)	Standaard afwijking (m)	Gemiddelde afwijking(m)
Vlissingen	0.045	-0.014	0.156	0.009
Terneuzen	0.063	-0.014	0.069	-0.014
Hansweert	0.067	0.015	0.079	-0.040
Baalhoek	0.055	0.009	0.076	-0.006
Bath	0.127	0.078	0.074	-0.002

Tabel 4.5 Waterstanden FINWES96 en SCALDIS100 6 april 1989

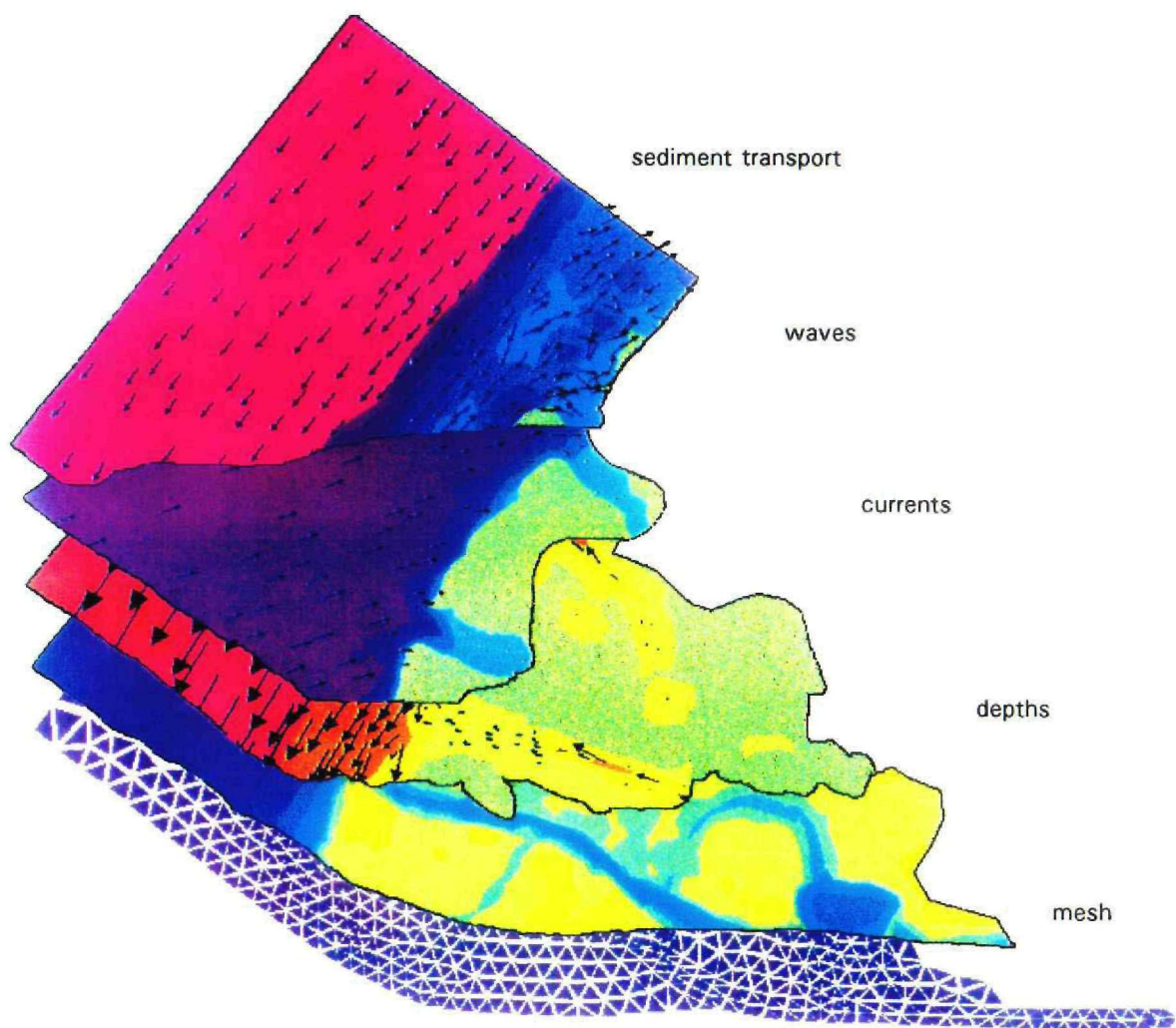
Meting	Metingen	Scaldis100	Vershil	Finwes96	Vershil
	Ebvolumina				
Everingen	446.7 Mm ³	387.0 Mm ³	-13%	552.9 Mm ³	24%
Pas Tern	504.4 Mm ³	660.0 Mm ³	31%	466.0 Mm ³	- 8%
tot. raai 7	951.1 Mm ³	947.0 Mm ³	00%	1018.9Mm ³	7%
	Vloedvolumina				
Everingen	531.0 Mm ³	592.7 Mm ³	12%	514.7 Mm ³	- 3%
Pas Tern	397.3 Mm ³	377.6 Mm ³	- 5%	349.5 Mm ³	-12%
tot. raai 7	928.3 Mm ³	970.3 Mm ³	5%	864.2 Mm ³	- 7%

Tabel 4.6 Getijvolumina FINWES96 en SCALDIS100 6 april 1989

Bijlage 1

FINEL

a two dimensional finite element model for
the numerical computation of currents, waves
and transport processes in lakes, rivers and
coastal seas



1. INTEGRAL MODELLING WITH FINEL

1.1 INTRODUCTION

FINEL is a computer model for the computation of 2-dimensional shallow water flow, refraction of short waves, and transport processes in inland and coastal waters.

The flow, wave and transport parts of the model are contained in different program modules, which can be applied individually but also in combination with each other.

The latter possibility allows, for instance, the computation of sediment transport due to the combined action of waves and currents.

1.2 FINITE ELEMENT METHOD

The numerical basis of FINEL is the finite element method.

Typical for the finite element method is that the area for which the model is made, in this case a coastal or inland shallow water region, is divided into a number of triangles and/or quadrilaterals, the so called elements.

The size and shape of these elements may vary within the region of which the model is made. Characteristic features of a specific region, like for instance tidal channels and - flats, or the configuration of the shore line, are with the use of variable element sizes and - shapes easily incorporated in the model. Another advantage of the finite element method is that by locally applying a smaller element size, it is possible to achieve a higher degree of accuracy in areas of special interest.

The physical variables which are involved in each module, like for instance water level and horizontal current velocities in the flow module, or wave heights and wave number vector in the wave module, are represented by discrete values in each of the elements.

The mathematical equations involved in each module finally determine how the physical variables interact with each other and how they evolve in time. These mathematical equations are derived from the underlying physical laws.

Before going deeper into the mathematical details of the separate modules, we will first describe the way in which a finite element schematization (or - mesh) of a water body can be created.

2. MODEL SCHEMATIZATION

2.1 MESH GENERATION

The generation of a finite element mesh, may be performed manually, or automatically by means of a mesh generator.

In the first case, the elements are first drawn by hand on a map of the area, after which the resulting nodal points of the elements are numbered. Subsequently, for each nodal point the coordinates have to be listed, together with the numbers of the nodal points belonging to each element. Obviously, for large schematizations, this way of schematizing can be cumbersome and time consuming, while also the risk of human errors increases.

For larger schematizations, automatic generation of the finite element mesh, by means of an automatized mesh generator, is therefore preferred.

The automatic mesh generator basically does the same work as previously described, but this time only a limited number of points along the contour of an area has to be given.

The mesh generator then automatically fills the area within the given contour with elements of a specified size and shape. In this way, it is also possible to define several sub-areas within one model. This can be of use if 'overall' output quantities at a specific sub-area are required, like for instance the total sedimentation/erosion in a navigational channel.

2.2 DEPTH SCHEMATIZATION

Besides by its horizontal dimensions, an inland or coastal shallow water body is to a large extent characterized by its bottom levels.

The generation of the finite element mesh is therefore only complete after adding the depths or bottom levels in the model. Depending on the required degree of accuracy and the available time and budget, more or less advanced ways of schematizing the depths can be applied.

Sometimes an up to date data source with bathymetrical information exists (for instance GIS-applications) from which the depth in each element of the mesh can be obtained.

Depth information can also be obtained from navigational charts or from bathymetrical surveys. As in these cases the depth information not necessarily coincides with the mesh points, the depths in these points have to be obtained by means of interpolating the available data. For this purpose SVASEK uses its own bathymetrical data processing program GRISYS.

3. DESCRIPTION OF AVAILABLE MODULES

3.1 FINFLOW: 2-DIMENSIONAL SHALLOW WATER FLOW

3.1.1 General

FINFLOW is a module for 2-dimensional horizontal flow.

FINFLOW can be applied in order to simulate the horizontal water movement in a certain region, resulting in time dependent predictions of water levels and current velocities.

This information can be used directly, if for instance maximum water levels and discharge capacities are required in case of a flood protection study.

Indirectly, knowledge of the water movement is required in the case of for instance a pollution study, where the water flow determines the pollutant transport rates.

3.1.2 Basic equations

The basic equations for FINFLOW are derived from the conservation equations for mass and momentum. In shallow water, the equation for vertical momentum may be simplified to yield the hydrostatic pressure distribution over the water depth.

Integration of the remaining equations over the water depth and using the hydrostatic pressure distribution, yields the so-called shallow water equations.

This system of equations consists of:

the mass balance -, or continuity equation:

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0$$

the momentum balance for the x-component of the current:

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{u^2}{h} + \frac{gh^2}{2} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{uv}{h} \right) + gh \frac{\partial z}{\partial x} + f_w u - f_c v - \frac{W_x}{\rho_w} = 0$$

and a momentum balance for the y-component of the current:

$$\frac{\partial v}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{uv}{h} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{v^2}{h} + \frac{gh^2}{2} \right) + gh \frac{\partial z}{\partial y} + f_w v + f_c u - \frac{W_y}{\rho_w} = 0$$

where:

h	=	water depth	(m)
u	=	depth integrated x-current velocity	(m ² /s)
v	=	depth integrated y-current velocity	(m ² /s)
g	=	gravitational acceleration	(m/s ²)
z	=	bottom level	(m)
f_w	=	bottom friction factor	(s ⁻¹)
f_c	=	Coriolis coefficient	(s ⁻¹)
W_x	=	wind shear force in x-direction	(N/m ²)
W_y	=	wind shear force in y-direction	(N/m ²)
ρ_w	=	density of water	(kg/m ³)

Besides the force due to the bottom slope, the forcing terms in the momentum equations include the bottom friction due to the bed roughness, which is calculated with de Chézy's or with Manning's formula, the Coriolis force, which depends on location of the area on the hemisphere, and the wind shear stress at the water surface determined by the wind speed and the roughness of the water surface.

A special problem in shallow waters is the flooding and drying of large areas during a tidal cycle. In FINEL a procedure is incorporated to deal with these areas. As will be explained in paragraph 3.1.4, the difference in the flow state between two adjacent elements is decomposed into right - and left traveling characteristic waves. If one of the two elements tends to dry, the corresponding characteristic wave is partially reflected from this element. Numerically, this procedure guarantees mass conservation during the drying process.

3.1.3 Boundary conditions

Along the boundaries of the model the flow conditions, e.g. water levels and/or current velocities, have to be prescribed in order to simulate a specific hydraulic event.

A solid wall or shore line is simulated by applying a zero normal velocity as boundary condition. Instead of water levels or current velocities, also a non-reflecting boundary condition can be applied, in which the complete incoming wave is specified.

The latter type of boundary condition has the advantage, that waves generated within the model area freely cross the model boundaries, without being reflected, which enhances the stability of the model.

3.1.4 Solution method

As solution method for the shallow water equations in FINFLOW the discontinuous Galerkin method is adopted (Hughes, [1]), in which the flow variables are taken constant in each element. For the further explanation of the method, it is convenient to write the shallow water equations in the so-called flux-vector form as follows:

$$\frac{\partial \mathbf{U}}{\partial t} + \nabla \cdot \mathbf{F} = \mathbf{H}$$

where:

$$\mathbf{U} = \begin{pmatrix} h \\ u \\ v \end{pmatrix}, \quad \mathbf{F}_x = \begin{pmatrix} u \\ \frac{u^2}{h} + \frac{gh^2}{2} \\ \frac{uv}{h} \end{pmatrix}, \quad \mathbf{F}_y = \begin{pmatrix} v \\ \frac{uv}{h} \\ \frac{v^2}{h} + \frac{gh^2}{2} \end{pmatrix}$$

and:

$$\mathbf{H} = \begin{pmatrix} 0 \\ \frac{W_x}{\rho_w} - gh \frac{\partial z}{\partial x} - f_w u + f_c v \\ \frac{W_y}{\rho_w} - gh \frac{\partial z}{\partial y} - f_c u - f_w v \end{pmatrix}$$

The shallow water equations have now been written such that all the derivatives of the flow variables are contained in the left hand side of the equation, while the other terms, representing the external forces, appear on the right hand side.

The above form of the shallow water equations, allows integration of the equations over an element, according to Gauss' divergence theorem:

$$\int \frac{\partial U}{\partial t} d\Omega + \oint F \cdot n d\Gamma = \int H d\Omega$$

where:

$d\Omega$ = element surface
 $d\Gamma$ = element contour line
 n = unit vector normal to the element contour, directed outward

If the flux F along the contour of an element is known, the change of the flow state U can be computed directly, using the above formula.

As U is discontinuous across the element contours, the inter-element flux F is not known beforehand, but involves the solution of a local Riemann problem (Harten, Lax & van Leer, [2]).

The required numerical flux is calculated using an approximate Riemann solver according to Roe, in which the jump-discontinuity of the flow variables is decomposed into a predetermined number of left- and right traveling waves (Glaister, [3]).

This method guarantees o.a. strict conservation of the flow variables, (no mass nor momentum is lost), and an exact solution of hydraulic jumps.

The time integration is explicit (forward Euler) with an automatic timestep control.

3.1.5 Input requirements

As input, FINFLOW requires the finite element mesh together with the depth schematization as described in Chapter 2, together with the specification of the boundary conditions, which can consist of water levels, current velocities or the incoming waves, and finally the desired output timestep interval.

The timestep of the computation itself need not be specified, as FINFLOW is provided with an automatic timestep control which ensures an optimum performance of the model.

3.1.6 Output and post processing

During the computation, after each output timestep interval, all flow variables of the entire finite element field, are written to harddisc in binary format, in order to minimize the required data storage capacity.

Afterwards, when the computation is ready, the results can be inspected and/or presented by means of a special purpose post processing library.

With this library, time - and space related output of the flow conditions, or any flow related variable, can be created.

Time related output concerns for instance timeseries of the requested variables at specified locations.

Space related output, in the form of vector - and isoline plots in full color, shows the spatial variation of the requested variable at a certain moment in time.

In the latter case, the entire flow domain can be plotted, or, if requested, details of interesting or important locations.

3.2 FINWAVE: WAVE REFRACTION

3.2.1 General

When short waves approach the shoreline, the wave propagation direction and wave height change as a result of the interaction of the waves with the bottom topography.

Close to the shoreline, when the water depths are of the same order as the wave heights, wave breaking might occur. Similar wave alterations, including wave breaking, can also occur in areas with strong horizontal variations in the currents velocities, due to interaction of the waves with the currents.

In the wave module FINWAVE, the changes in wave characteristics due to variable depths and/or currents are computed.

Information of the waves can be used for the design of coastal structures (design loads due to wave attack), or shipping channels (manoeuvrability). Besides, coastal morphological processes are often determined by the erosive action of the incoming waves, for which FINWAVE can also be applied.

3.2.2 Basic equations

FINWAVE is based on the linear wave theory for monochromatic, uni-directional water waves. The mathematical equations which describe the propagation of waves, and the wave height are, respectively, the conservation equation for wave crests, and the and the conservation equation for wave action.

The conservation equation for wave crests states that the wave period can only change in space if the wave length changes in time:

$$\frac{\partial \vec{K}}{\partial t} + \nabla (\sigma + \vec{K} \cdot \vec{u}) = 0$$

$$\sigma = \sqrt{g k_0 \tanh(k_0 h)}$$

where:

$\vec{K}$	=	wave number vector	(m ⁻¹)
$\vec{u}$	=	current velocity	(m/s)
σ	=	intrinsic radian wave frequency	(s ⁻¹)
g	=	gravitational acceleration	(m/s ²)
h	=	water depth	(m)
k_0	=	wave number	(m ⁻¹)

The action balance equation is a more general form of the conservation equation for wave energy, and is, instead of the latter, also valid in the case of combined waves and currents:

$$\frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{E}{\sigma} \right) + \nabla \cdot \left(\frac{E}{\sigma} (\vec{c}_g + \vec{u}) \right) + \frac{D}{\sigma} = 0$$

$$\vec{c}_g = \frac{n\sigma}{k_0^2} \vec{k}, \quad n = \frac{1}{2} + \frac{k_0 h}{\sinh(2k_0 h)}$$

where:

E	=	wave energy = 1/8 g H _{rms} ²	(m ³ /s ²)
H _{rms}	=	root mean square wave height	(m)
c _{g,x}	=	wave group velocity, x-direction	(m/s)
c _{g,y}	=	wave group velocity, y-direction	(m/s)
D	=	wave energy dissipation	(m ³ /s ³)

Wave breaking and wave energy dissipation due to bottom friction are contained in the term D/omega of the action balance equation.

For the determination of this term a formulation of the wave breaking process due to Battjes and Stive is used (Battjes & Stive, [4]).

3.2.3 Boundary conditions

Along the boundaries the height, period and direction of the incoming waves have to be specified. This input can either be given directly or as a deep water wave condition; in case of the latter a module is available which translates the deep water wave conditions towards the boundary using the classical refraction formulas (Snell's law).

3.2.4 Solution method

A conventional approach was to solve these equations while proceeding along the wave-rays; the 'wave-ray method'.

In FINWAVE however the equations are solved on a fixed finite element grid which has a number of advantages. Problems like the crossing of wave rays for instance, are completely avoided. Besides, the output is obtained in the known, a-priori determined points of the finite element mesh.

The solution method is similar to that of the previously described shallow water equations, but now two decoupled equations have to be solved instead of a fully coupled system of equations. Therefore, a more straightforward solution method can be applied, which is also described in Hughes, ref. [1].

The time change of the wave parameters, which determines the update every timestep, depend on their spatial derivatives, according to the relations given by the equations of paragraph 3.2.2.

The wave parameters are in this case defined in the nodal points of the finite element mesh. As in each element, the wave parameters now vary linearly, the spatial derivatives which appear in the equations, can be calculated immediately.

The associated time change of the parameters, are distributed over all the nodes of an element, in a way depending on the orientation of each node with respect to the local wave direction.

3.2.5 Input requirements

The input requirements of FINWAVE are the same as for FINFLOW, that is that the finite element mesh and depth schematization have to be provided, together with the specification of the boundary conditions (incoming waves) and the output interval.

In case of the computation of wave refraction in combination with currents, also computed current velocities, obtained from FINFLOW, have to be given as input.

Although FINWAVE is in principle a time dependant module, in most applications the stationary wave conditions will be required, in which case the module is run until an equilibrium has established which is then written to disc.

3.2.6 Output and postprocessing

After each specified output timestep interval, the complete wave field of the finite element domain is written to harddisc, in binary format.

For the further elaboration of the output data, use can be made of the same post processing library as described under FINFLOW. Besides general output like the wave height and the wave number vector, a number of more specific quantities can be presented like for instance the wave-induced bottom shear stress, the radiation stresses and the percentage of breaking waves.

3.3 FINTRA/TRASIL: SEDIMENT TRANSPORT

3.3.1 General

These modules concern the transport and sedimentation/erosion of non-cohesive (FINTRA) and cohesive sediments (TRASIL).

Both equilibrium and non-equilibrium sediment transports can be considered.

The sediment transport rates depend on the currents, and in case of wave induced transport also on the wave related parameters, the module therefore requires as input computed current and/or wave fields. As the wave and current modules run on the same finite element schematization, a perfect 'one to one' exchange of these data from the FINFLOW and FINWAVE to FINTRA/TRASIL is possible. The resulting sediment transport can subsequently be calculated by a number of available formulas for sediment load e.g. Engelund-Hansen, Bijker or a CERC like formula in the case of wave driven longshore sediment transport.

3.3.2 Basic equations

The computational part of FINTRA and TRASIL consists of two parts.

In part one the sediment transport rates, as a result of the combined action of waves and currents, is calculated. For this purpose a number of pre-programmed subroutines is available like for instance:

Engelund-Hansen (sediment transport by currents):

$$S_c = \frac{0.05 \bar{u}^5}{(s-1)^2 g^{1/2} D_{50} C^3}$$

transport is in direction of current

where:

S_c	=	volumetric current related sediment transport	(m ² /s)
$\bar{u}$	=	depth-averaged current velocity	(m/s)
s	=	specific density of sediment	(-)
g	=	gravitational acceleration	(m/s ²)
D_{50}	=	median sediment diameter	(m)
C	=	Chezy roughness coefficient	(m ^{1/2} /s)

or a CERC-like formula for wave driven longshore transport:

$$S_w = 0.77 D \sin \varphi$$

transport is directed along bottom contourline

where:

S_w	=	volumetric wave related sediment transport	(m ² /s)
D	=	wave energy dissipation	(m ³ /s ²)
φ	=	angle wave crests - bottom contourline	

As an almost infinite number of sediment transport formulas exist, some of the widely used and accepted have currently been programmed.

Besides the two yet mentioned these are Bijker's formula, and the transport formula of van Rijn. If necessary however, any desired formula can be plugged into FINTRA or TRASIL by writing a single subroutine for it.

In the second step of the sediment transport module, the erosion and sedimentation rates are computed by means of solving the sediment mass balance equation:
It's in this second step that the two modules FINTRA and TRASIL distinguish.
In FINTRA the mass balance equation reads:

$$\frac{\partial z}{\partial t} + \frac{\partial S_x}{\partial x} + \frac{\partial S_y}{\partial y} = 0$$

where:

z	$\approx$	bottom level	(m)
S_x	$\approx$	total sediment transport x-direction	(m ² /s)
S_y	$\approx$	total sediment transport y-direction	(m ² /s)

This equation is solved by an upstream differencing method analogous to the method described in the previous paragraph.

As result the bottom changes during to equilibrium transport conditions are yielded.

In TRASIL a more complicated form of the sediment mass balance equation is solved, which also takes into account the non-equilibrium effects:

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \frac{\partial S_x}{\partial x} + \frac{\partial S_y}{\partial y} + w_s(c_b - c_{b,e}) = 0$$

where:

C	$=$	depth integrated sediment mass	(kg)
w_s	$=$	settling velocity sediment	(m/s)
c_b	$=$	sediment concentration at bottom	(kg/m ³)
$c_{b,e}$	$=$	equilibrium sediment concentration at bottom	(kg/m ³)

The solution of this equation is obtained by means of the particle method.

The transported substance, here the suspended sediments, is conceived as particles which are convected by the current velocities. To the convective displacement of the particles, a random displacement is added, to account for the transport by turbulent motion.

TRASIL actually computes the depth integrated sediment mass, the amount of erosion and/or sedimentation is directly given by the last term $w_s \cdot (c_b - c_{b,e})$ in the above equation.

3.3.3 Input requirements

The input requirements of FINTRA and TRASIL are the same as for FINFLOW and FINWAVE; the finite element mesh and depth schematization have to be provided, together with the specification of the boundary conditions (incoming waves) and the output interval.
Besides, also the computed current velocities obtained from FINFLOW, and/or computed wave parameters from FINWAVE, have to be given as input.

3.3.4 Output and postprocessing

In both FINTRA and TRASIL, during the computation the computed sediment transports and erosion/sedimentation rates are written to disk, in binary format, every specified output timestep interval.

For the further elaboration of the output data, use can be made of the same post processing library as described under FINFLOW.

General output like the sediment transport and the erosion/sedimentation rates, can be presented. The results can also be integrated over, for instance, a tidal cycle in order to obtain net tidal sediment transports.

A very useful option is the presentation of difference plots in case transport computations have been made for different lay-outs.

The net erosion/sedimentation and sediment transport due to the lay-out change alone can then immediately be verified.

4. AN APPLICATION: THE WESTERN SCHELDT ESTUARY

4.1 INTRODUCTION

Within the framework of a MSc thesis study, a FINFLOW application of the Western Scheldt estuary was set up. Besides general modelling of the flow in the Western Scheldt estuary, special emphasis was put on the distribution of the flow in ebb and flood channels in relation to the degree of morphodynamic equilibrium of the channels.

With the calibrated flow model, the consequences of the dredging of bars and the choice of the dumping strategies are investigated using the transport module FINTRA.

4.2 THE MODEL

First, a finite element grid of the Western Scheldt was produced with the automatic mesh generator. The resulting finite element mesh consists of 5830 nodal points and 11222 elements, and comprises the area from Flushing to Prosper Polder at the Dutch-Belgium border. In the picture of the mesh can be seen that the elements nicely follow the geometrical properties of the estuary.

The shore line, tidal channels, short cuts and tidal flats are represented exactly, which is required for an adequate flow simulation in an estuary of which area about 30 % dries every tidal cycle. The size of the elements varies from 100-200 m in the channels to 200-400 m on the tidal flats.

The depths appended to the model are directly obtained from a GIS system, without further processing, adaptation or smoothing of the GIS data.

As boundary conditions, the model uses recorded water levels at Flushing and Prosper Polder.

The model was run on a PC, with a 133 MHz Pentium processor.

On this computer the simulation of one tidal cycle takes about 4 hours, implying a computer time to real time ratio of about 1 to 3.

4.3 THE RESULTS

Some results of runs executed so far are shown in the color figures included. Besides the model results, these pictures also give an impression of the way the model results can be presented.

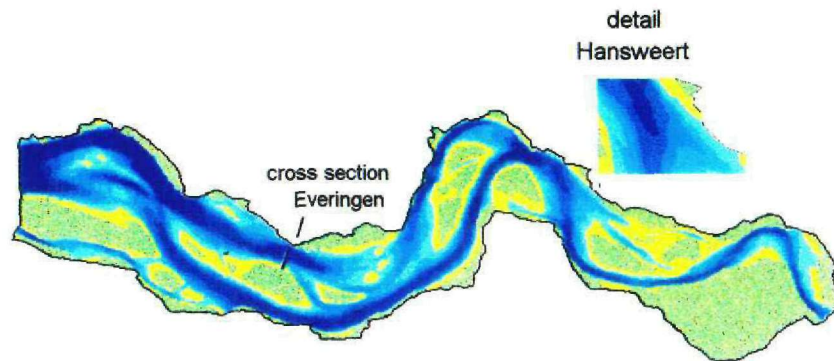
Shown are the schematisation of the Western Scheldt, computed currents and water levels, and sediment transport analyses including also the change of the sediment movement due to dredging/dumping activities.

It turned out that the effects of dredging and dumping can be quite substantial, having influence at relatively large distances from the dumping/dredging locations, due to redistribution of the flow in the tidal channels.

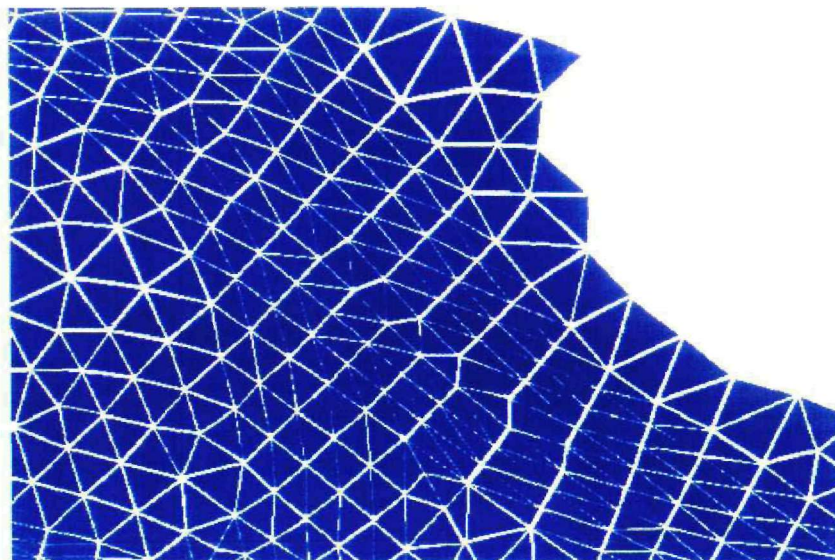
5. REFERENCES

- [1] **T.J.R. Hughes**, 1987,
Recent progress in the development and understanding of SUPG methods with special reference to the compressible Euler and Navier-Stokes Equations,
International Journal for Numerical Methods in Fluids, Vol. 7, 1261-1275.
- [2] **A. Harten, P.D. Lax, B. van Leer**, 1983,
On upstream differencing and Godunov-type schemes for hyperbolic conservation laws,
SIAM Review, Vol. 25, No. 1, 35-61.
- [3] **P. Glaister**, 1993,
Flux-difference splitting for open-channel flows,
International Journal for Numerical Methods in Fluids, Vol. 16, 629-654.
- [4] **J.A. Battjes, M.J.F. Stive**, 1985,
Calibration and verification of a dissipation model for random breaking waves,
Journal of Geophysical Research, Vol. 90, No. C5, 9159-9167.
- [5] **L.C. van Rijn**, 1993,
Principles of sediment transport in rivers, estuaries and coastal seas,
Aqua Publications - Amsterdam.

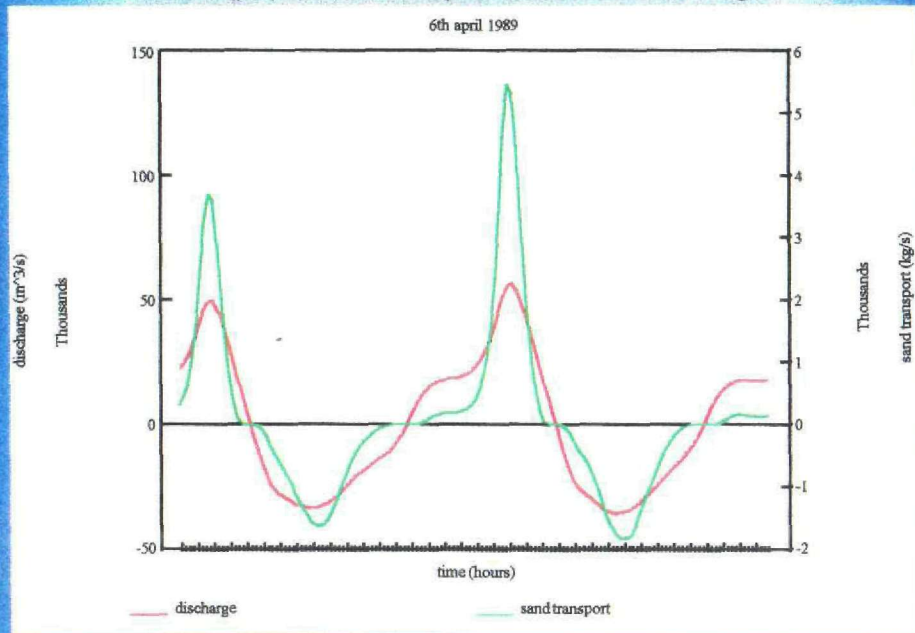
The Western Scheldt - depth schematization



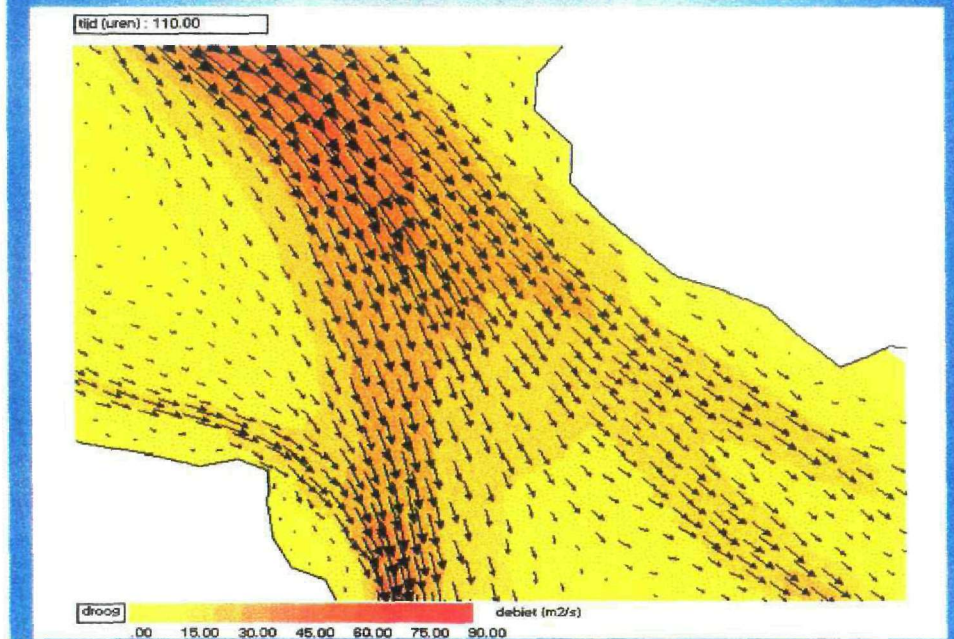
Finite element schematization at Hansweert



Discharge and sand transport cross section Everingen



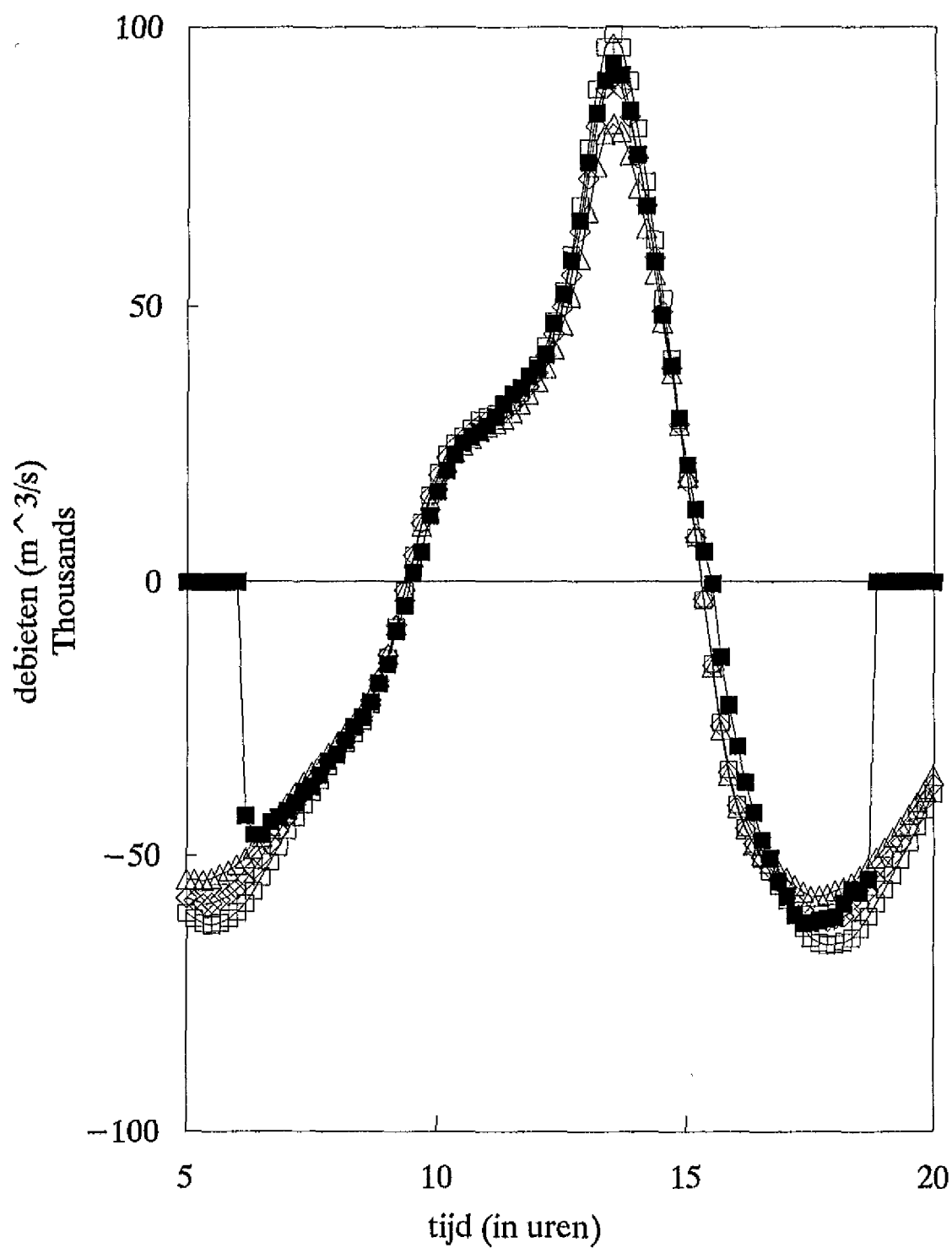
Flow field at Hansweert



Bijlage 2

Debieten door raai 7

6 april 1989



INGENIEURSBUREAU / SVASEK B.V.

Kalibratie FINWES96
 stap 1: Verschillende ruwheden (Nikuradse-waarde: k)

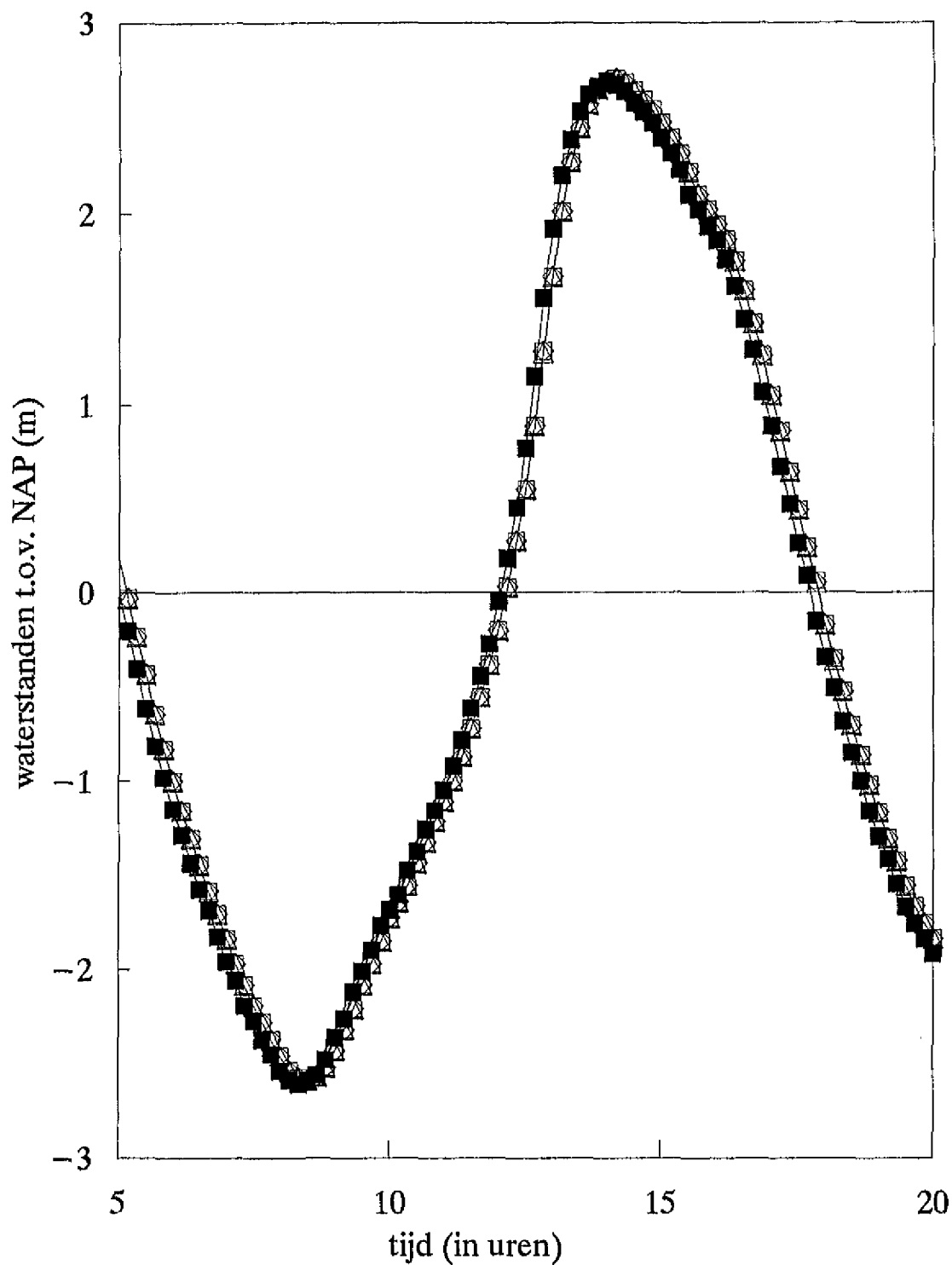
datum : april 1996

rapport : A 982

bijlage : 2.1

Waterstanden Vlissingen

6 april 1989



■ gemeten □ $k=0.01m$ ◇ $k=0.05m$ △ $k=0.20m$

INGENIEURSBUREAU / SVASEK B.V.

Kalibratie FINWES96
stap 1: Verschillende ruwheden (Nikuradse-waarde: k)

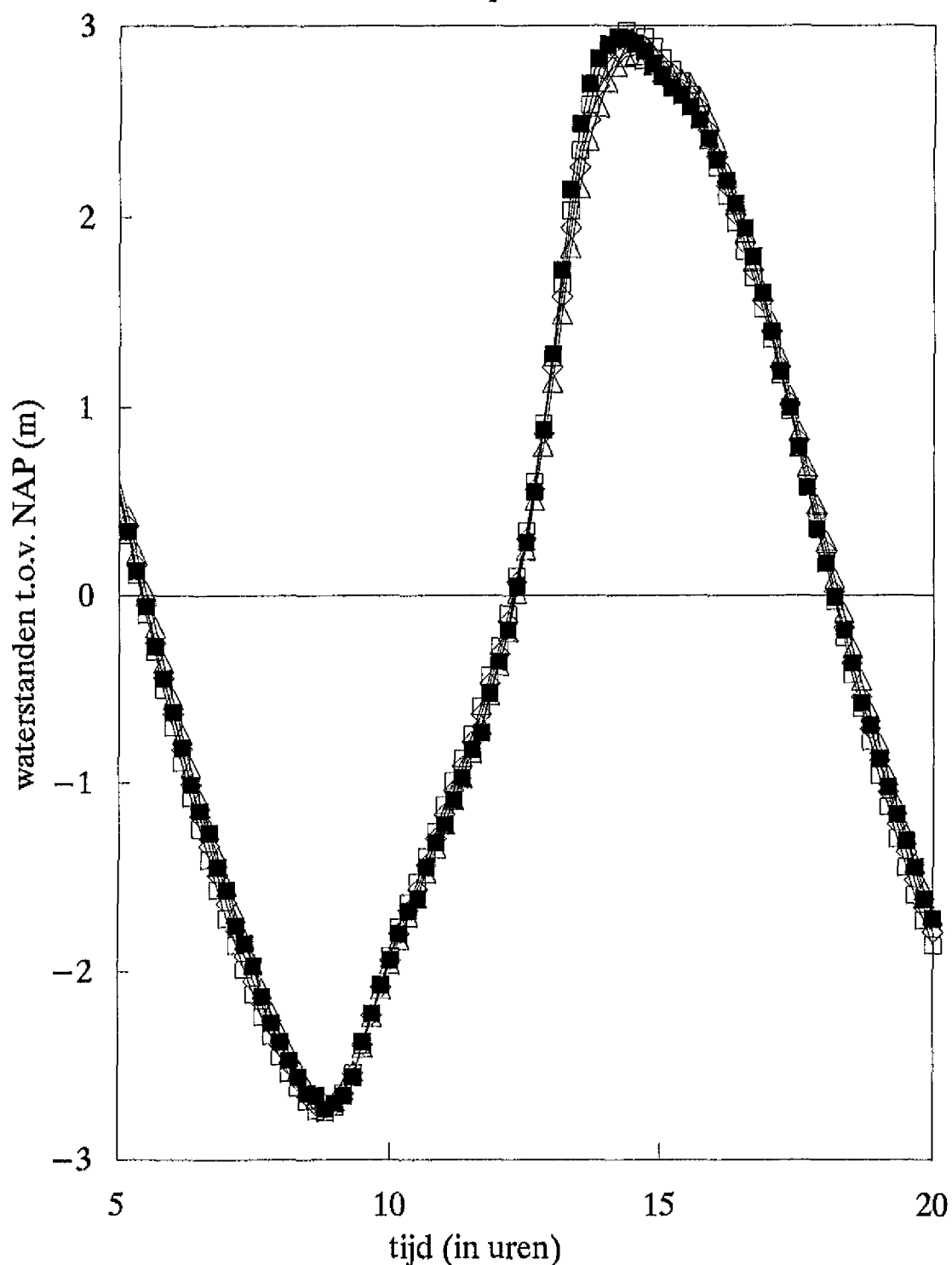
datum : april 1996

rapport : A 982

bijlage : 2.2.

Waterstanden Terneuzen

6 april 1989



■ gemeten □ k=0.01m ◇ k=0.05m △ k=0.20m

INGENIEURSBUREAU / **SVASEK B.V.**

Kalibratie FINWES96
 stap 1: Verschillende ruwheden (Nikuradse-waarde: k)

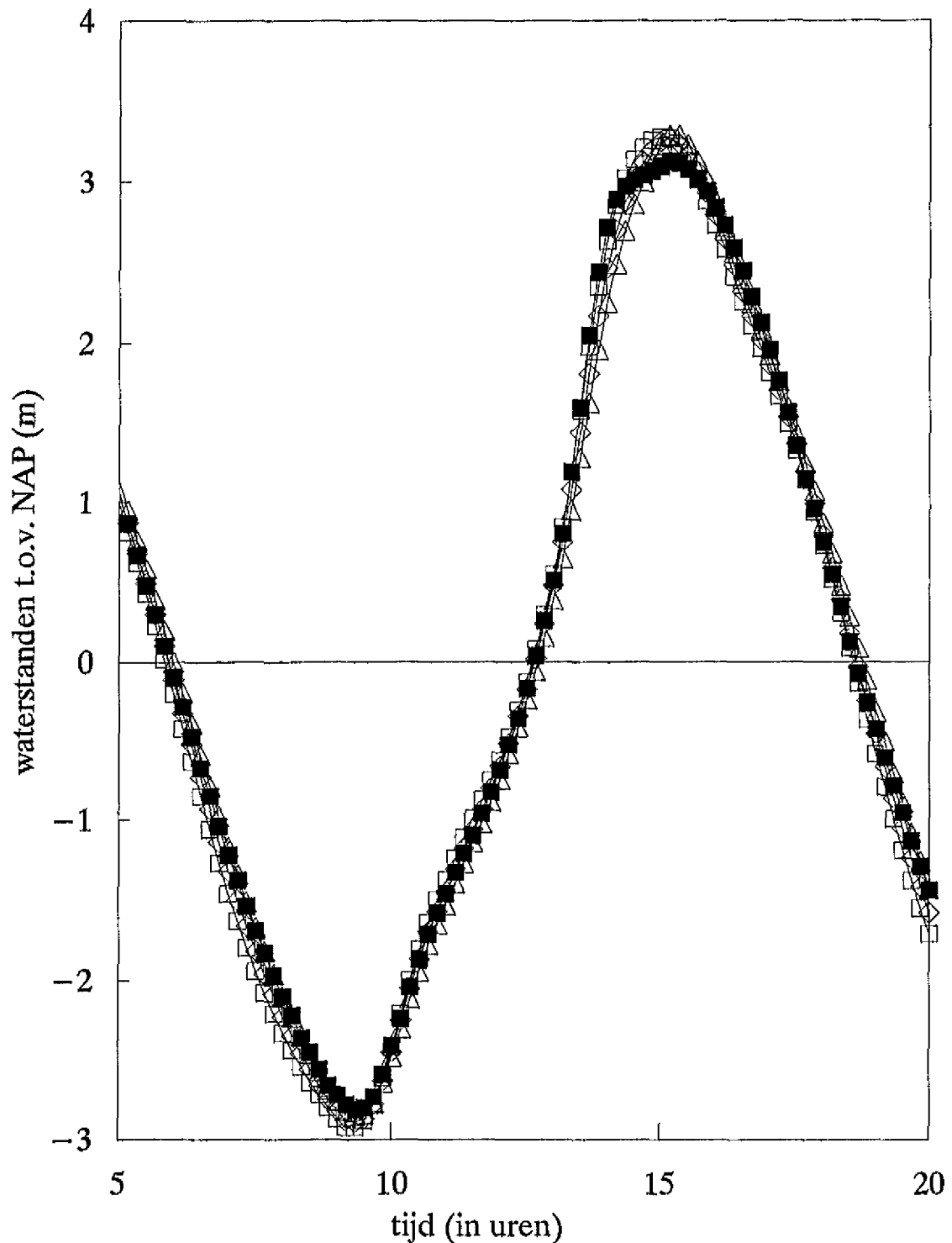
datum : april 1996

rapport : A 982

bijlage : 2.3.

Waterstanden Hansweert

6 april 1989



■ gemeten □ k=0.01m ◇ k=0.05m △ k=0.20m

INGENIEURSBUREAU/SVASEK B.V.

Kalibratie FINWES96
stap 1: Verschillende ruwheden (Nikuradse-waarde: k)

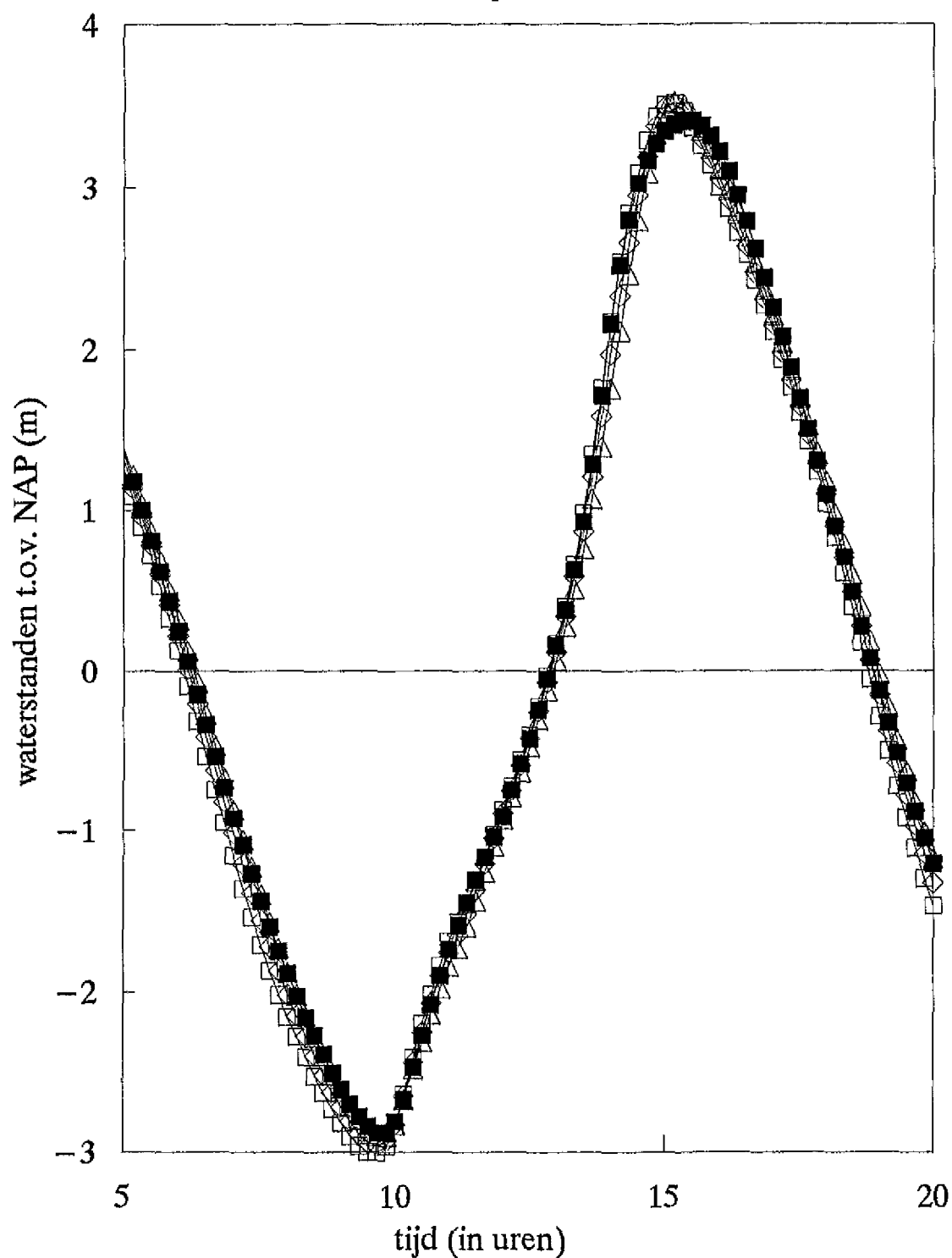
datum : april 1996

rapport : A 982

bijlage : 2.4.

Waterstanden Baalhoek

6 april 1989



■ gemeten □ k=0.01m ◇ k=0.05m △ k=0.20m

INGENIEURSBUREAU / **SVASEK B.V.**

Kalibratie FINWES96
stap 1: Verschillende ruwheden (Nikuradse-waarde: k)

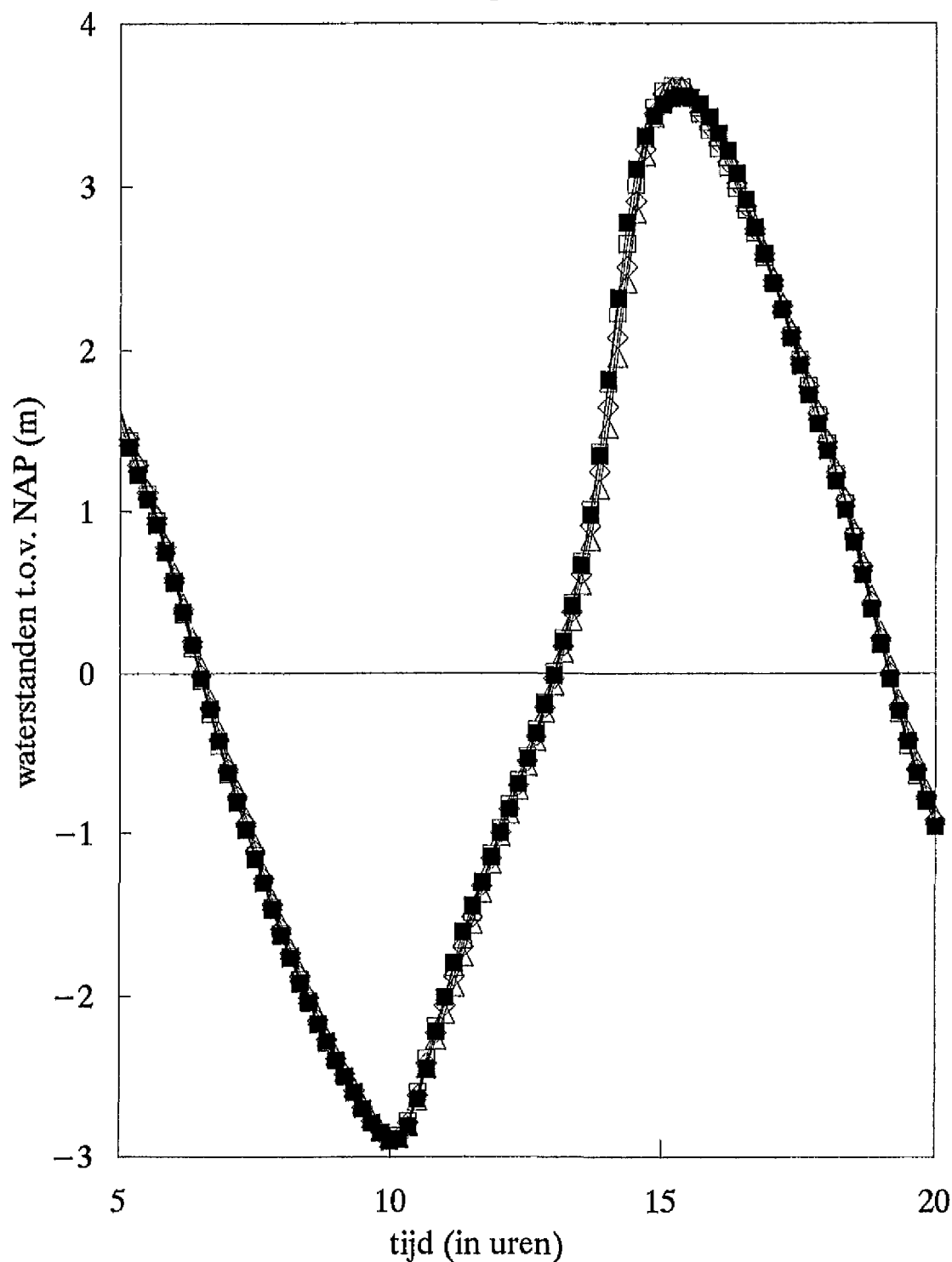
datum : april 1996

rapport : A 982

bijlage : 2 . S.

Waterstanden Bath

6 april 1989



■ gemeten □ k=0.01m ◇ k=0.05m △ k=0.20m

INGENIEURSBUREAU / **SVASEK** B.V.

Kalibratie FINWES96
 stap 1: Verschillende ruwheden (Nikuradse-waarde: k)

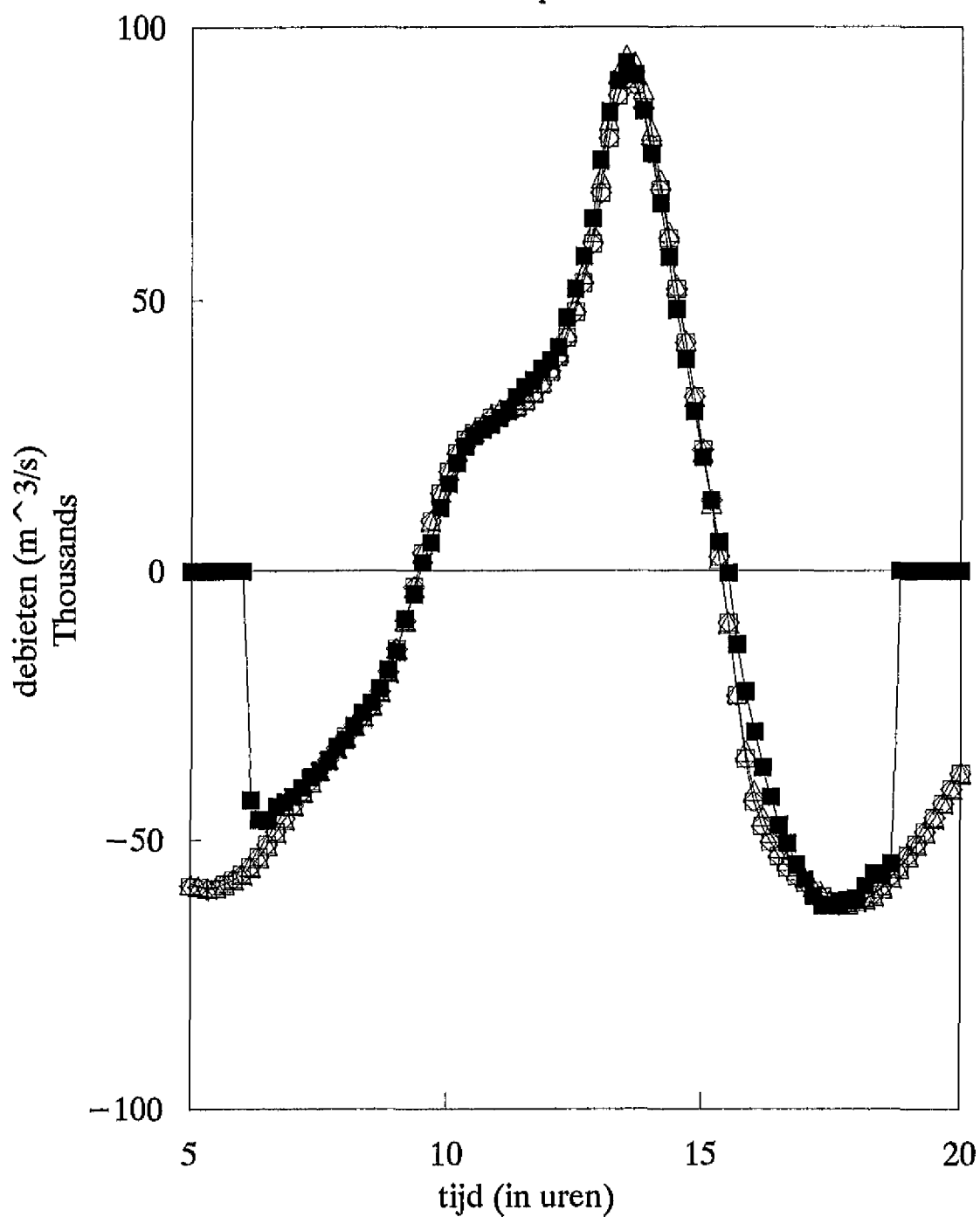
datum : april 1996

rapport : A 982

bijlage : 2.6.

Debieten door raai 7

6 april 1989



■ gemeten

□ basisrun (k=0.05m)

◇ + Saeftinge

△ + Saeftinge + vloedruwheid

INGENIEURSBUREAU/SVASEK B.V.

datum : april 1996

Kalibratie FINWES96

rapport : A 982

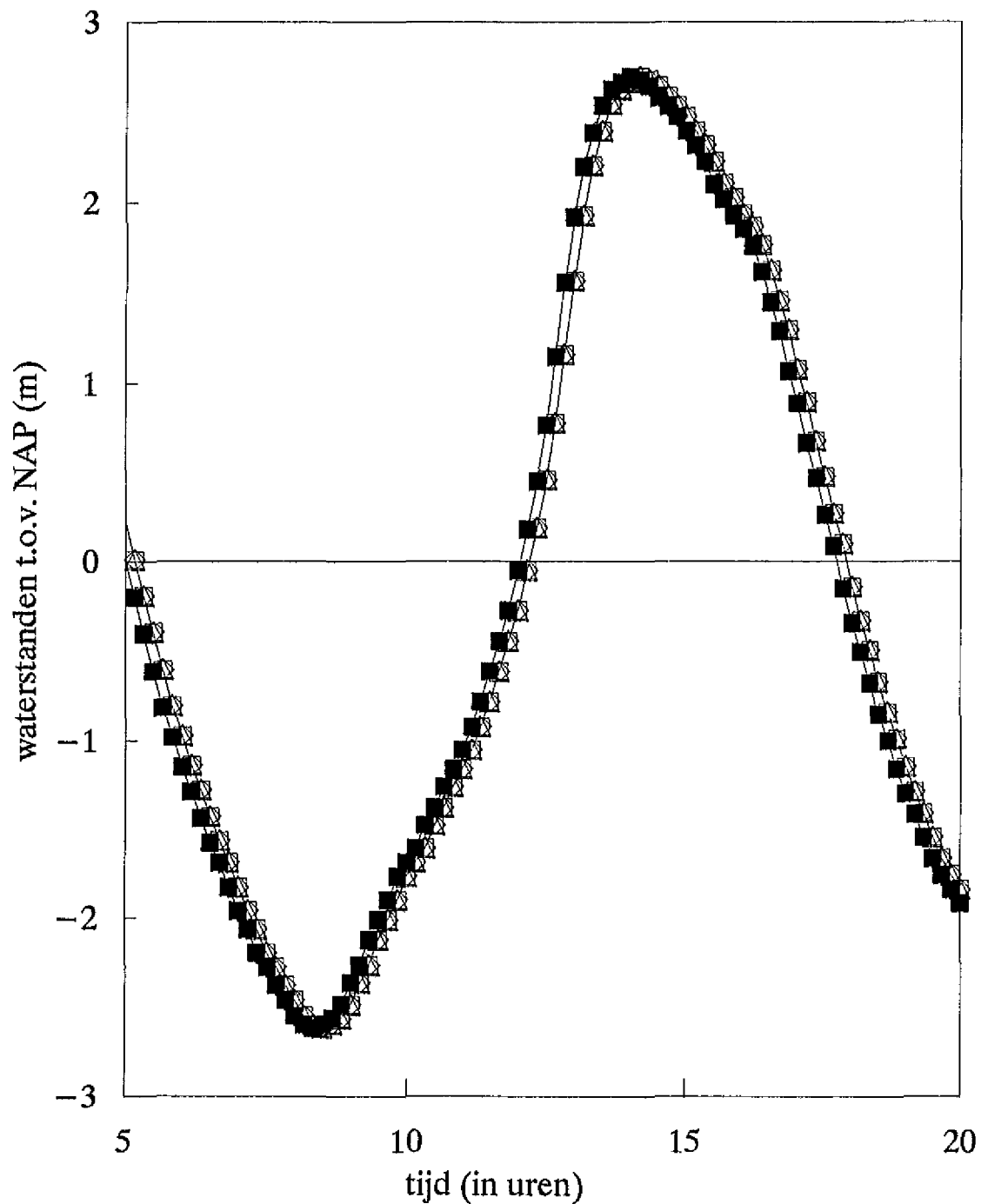
stap 2: Land van Saeftinge in model opgenomen

stap 3: Lagere ruwheid tijdens hoge vloodsnelheden

bijlage : 2.7

Waterstanden Vlissingen

6 april 1989



■ gemeten

□ basisrun ($k=0.05m$)

◇ + Saeftinge

△ + Saeftinge + vloedruwheid

INGENIEURSBUREAU / SVAŠEK B.V.

datum : april 1996

Kalibratie FINWES96

rapport : A 982

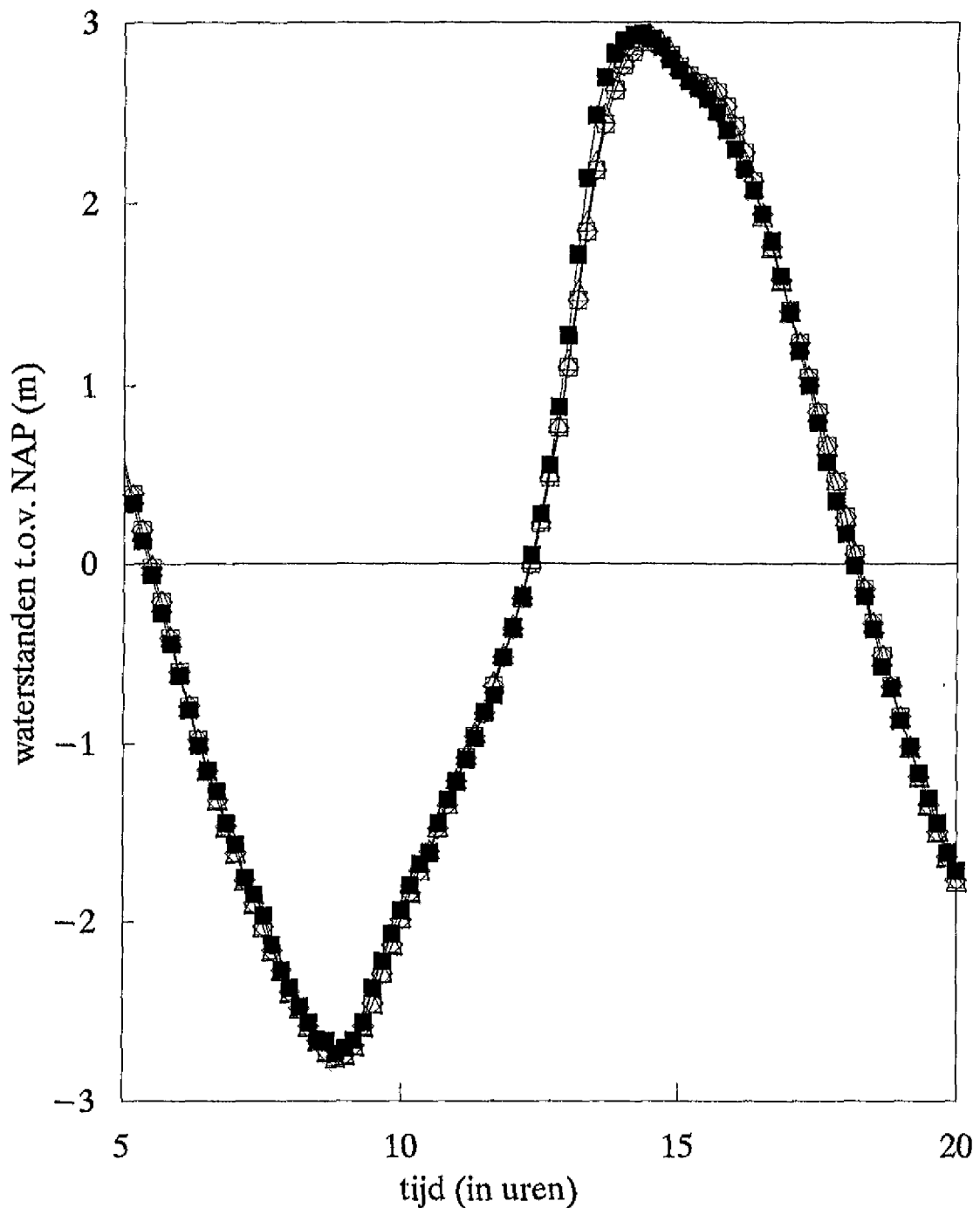
stap 2: Land van Saeftinge in model opgenomen

stap 3: Lagere ruwheid tijdens hoge vloodsnelheden

bijlage : 2.8

Waterstanden Terneuzen

6 april 1989



■ gemeten

□ basisrun ($k=0.05m$)

◇ + Saeftinghe

△ + Saeftinghe + vloedruwheid

INGENIEURSBUREAU / SVASEK B.V.

datum : april 1996

Kalibratie FINWES96

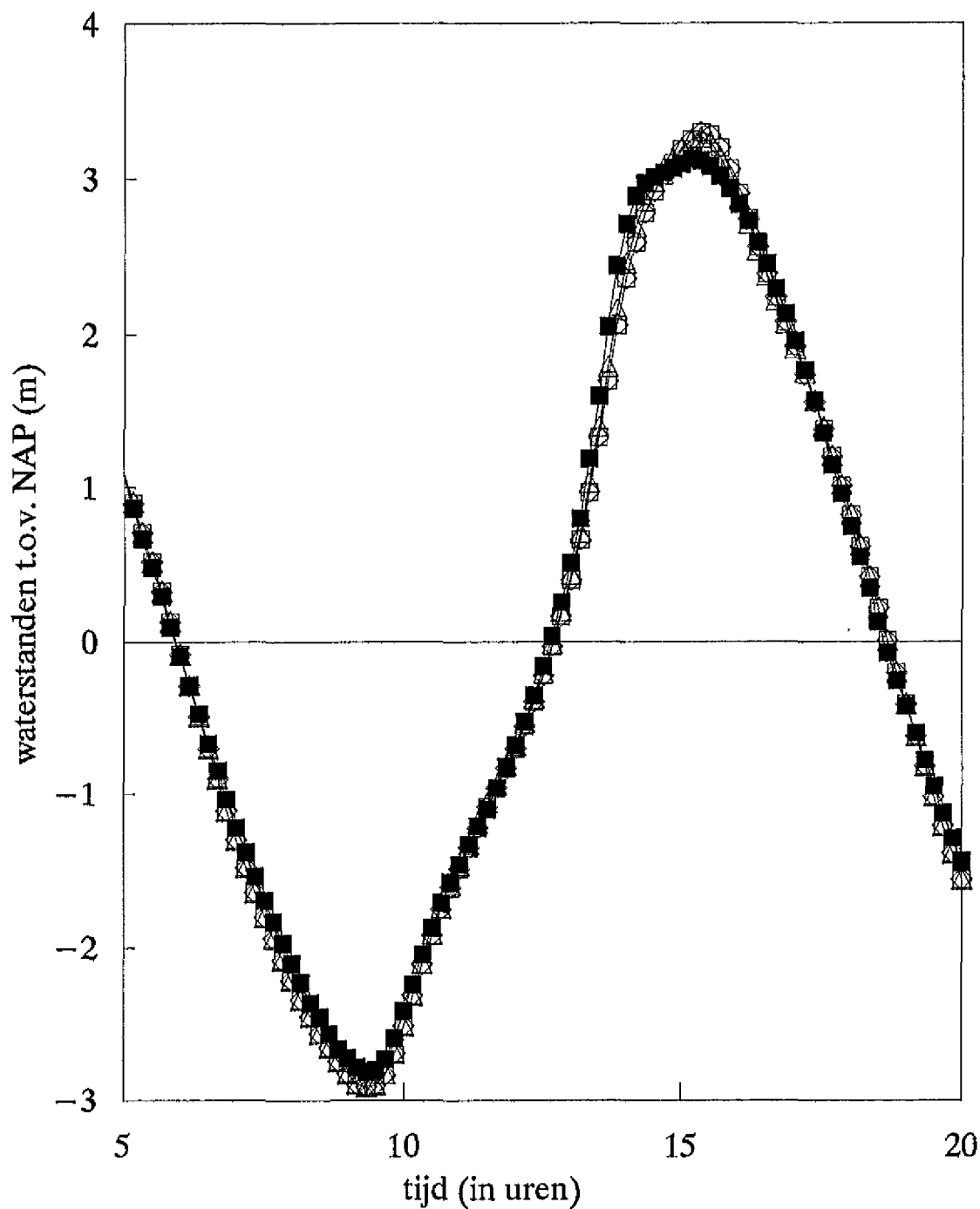
rapport : A 982

stap 2: Land van Saeftinghe in model opgenomen
stap 3: Lagere ruwheid tijdens hoge vloodsnelheden

bijlage : 2.9

Waterstanden Hansweert

6 april 1989



■ gemeten

□ basisrun ($k=0.05m$)

◇ + Saeftinge

△ + Saeftinge + vloedruwheid

INGENIEURSBUREAU / **SVASEK B.V.**

Kalibratie FINWES96

stap 2: Land van Saeftinge in model opgenomen

stap 3: Lagere ruwheid tijdens hoge vloodsnelheden

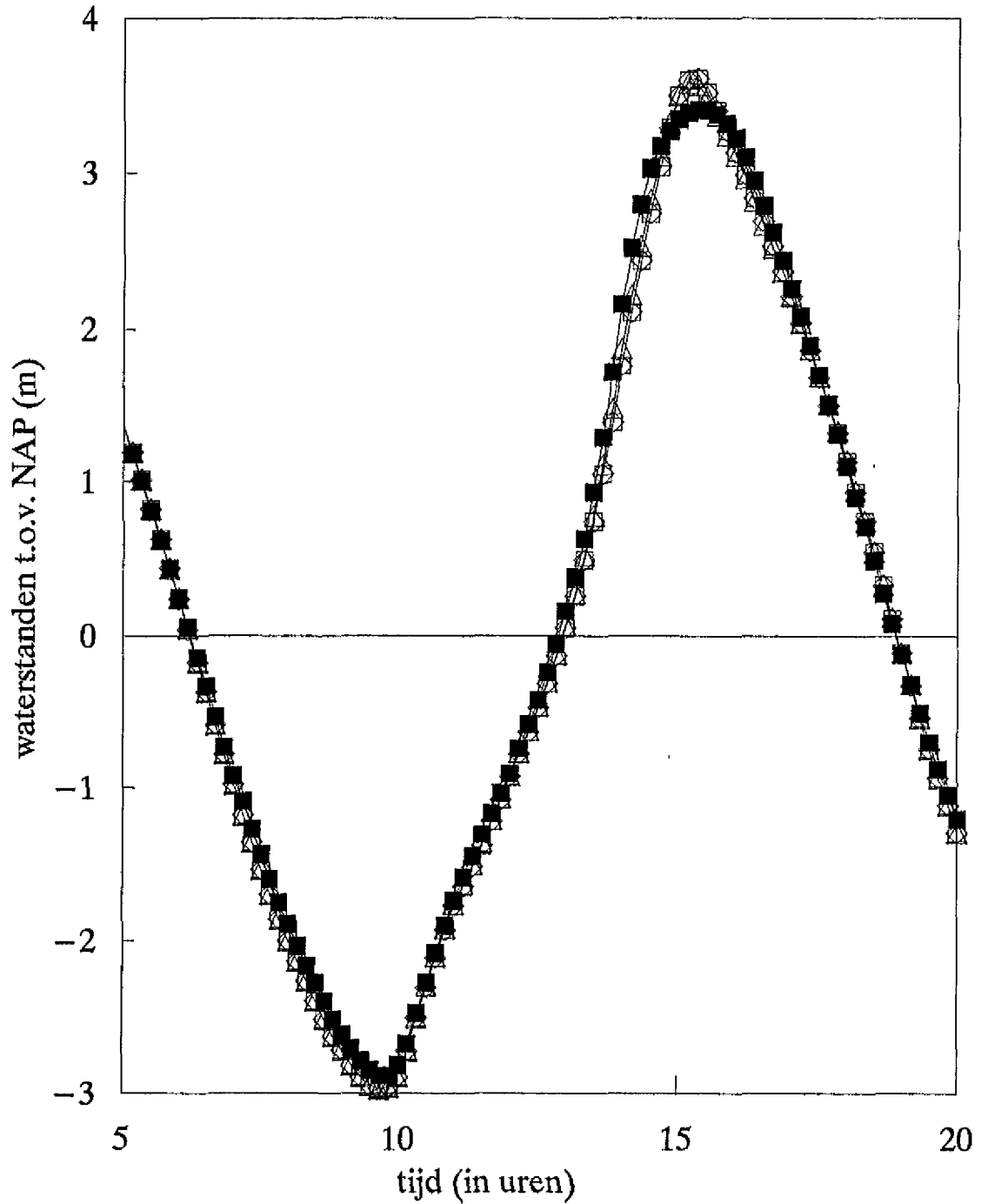
datum : april 1996

rapport : A 982

bijlage : 2.10

Waterstanden Baalhoek

6 april 1989



■ gemeten

□ basisrun ($k=0.05m$)

◇ + Saefting

△ + Saefting + vloedruwheid

INGENIEURSBUREAU / SVAŠEK B.V.

datum : april 1996

Kalibratie FINWES96

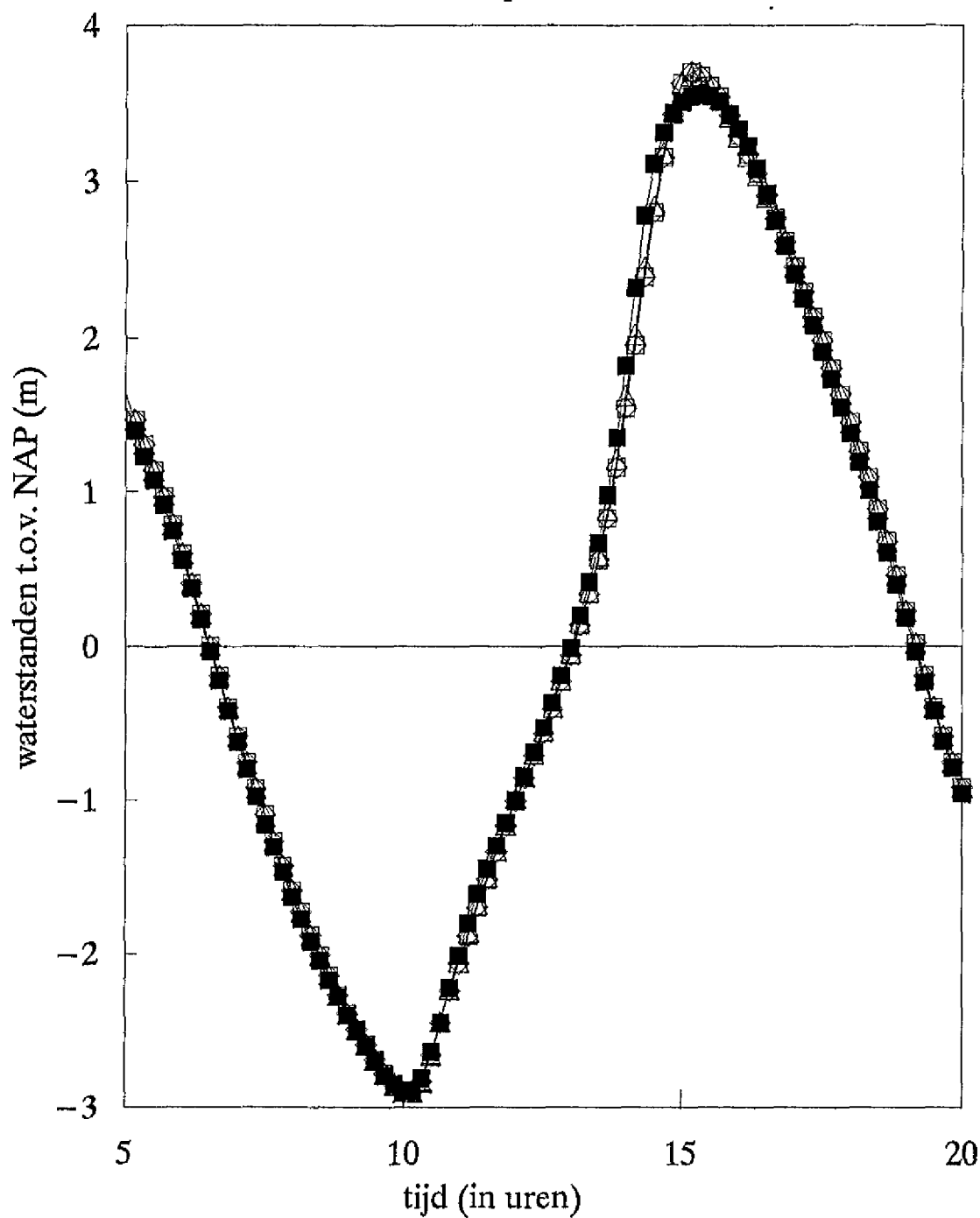
rapport : A 982

stap 2: Land van Saefting in model opgenomen
stap 3: Lagere ruwheid tijdens hoge vloodsnelheden

bijlage : 2.11

Waterstanden Bath

6 april 1989



■ gemeten

□ basisrun ($k=0.05\text{m}$)

◇ + Saefting

△ + Saefting + vloedruwheid

INGENIEURSBUREAU **SVASEK** B.V.

datum : april 1996

Kalibratie FINWES96

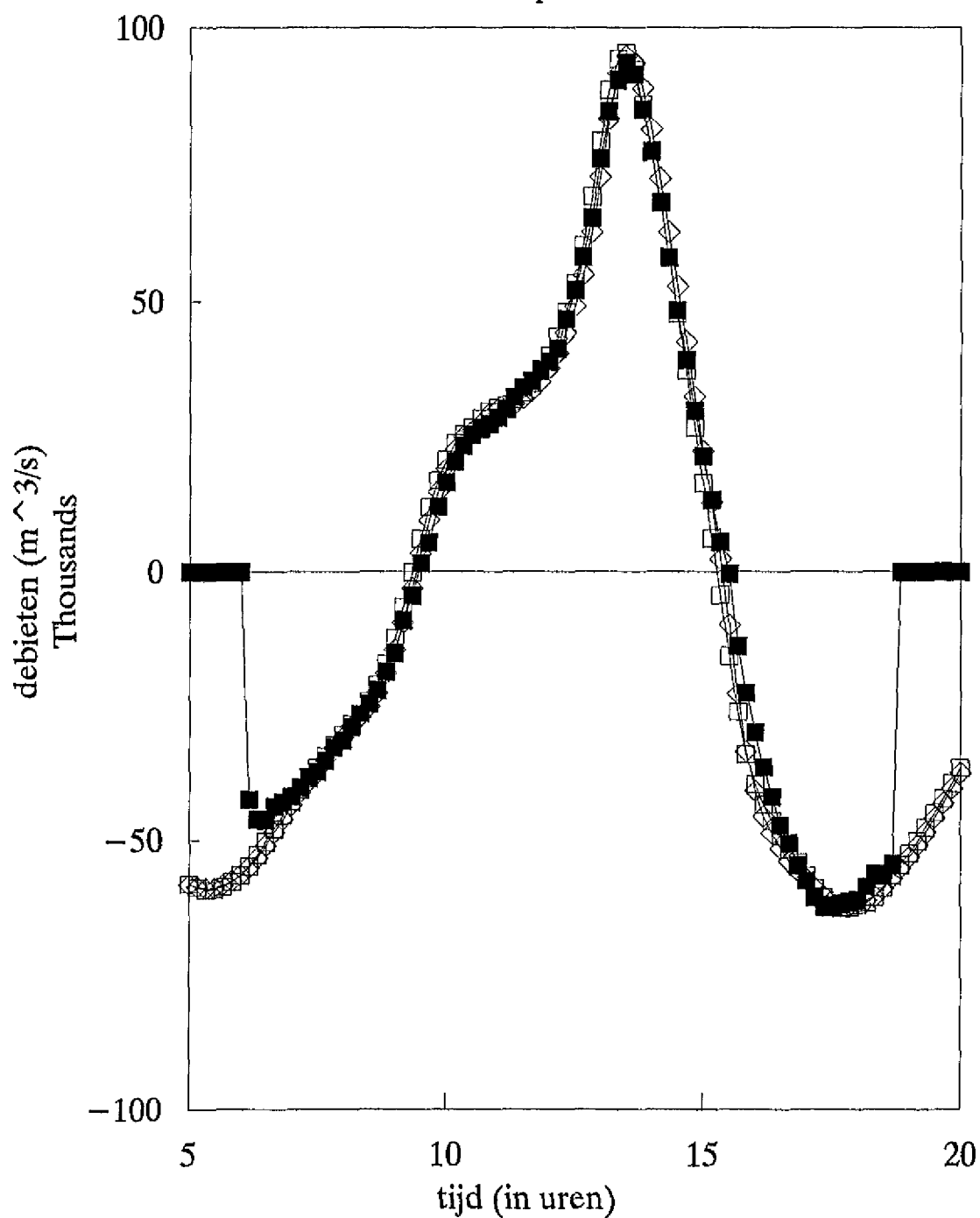
rapport : A 982

stap 2: Land van Saefting in model opgenomen
stap 3: Lagere ruwheid tijdens hoge vloodsnelheden

bijlage : 2.12

Debieten door raai 7

6 april 1989



■ gemeten

□ Zeewaartse rand Breskens

◇ Zeewaartse rand Vlissingen

INGENIEURSBUREAU SVASEK B.V.

datum : april 1996

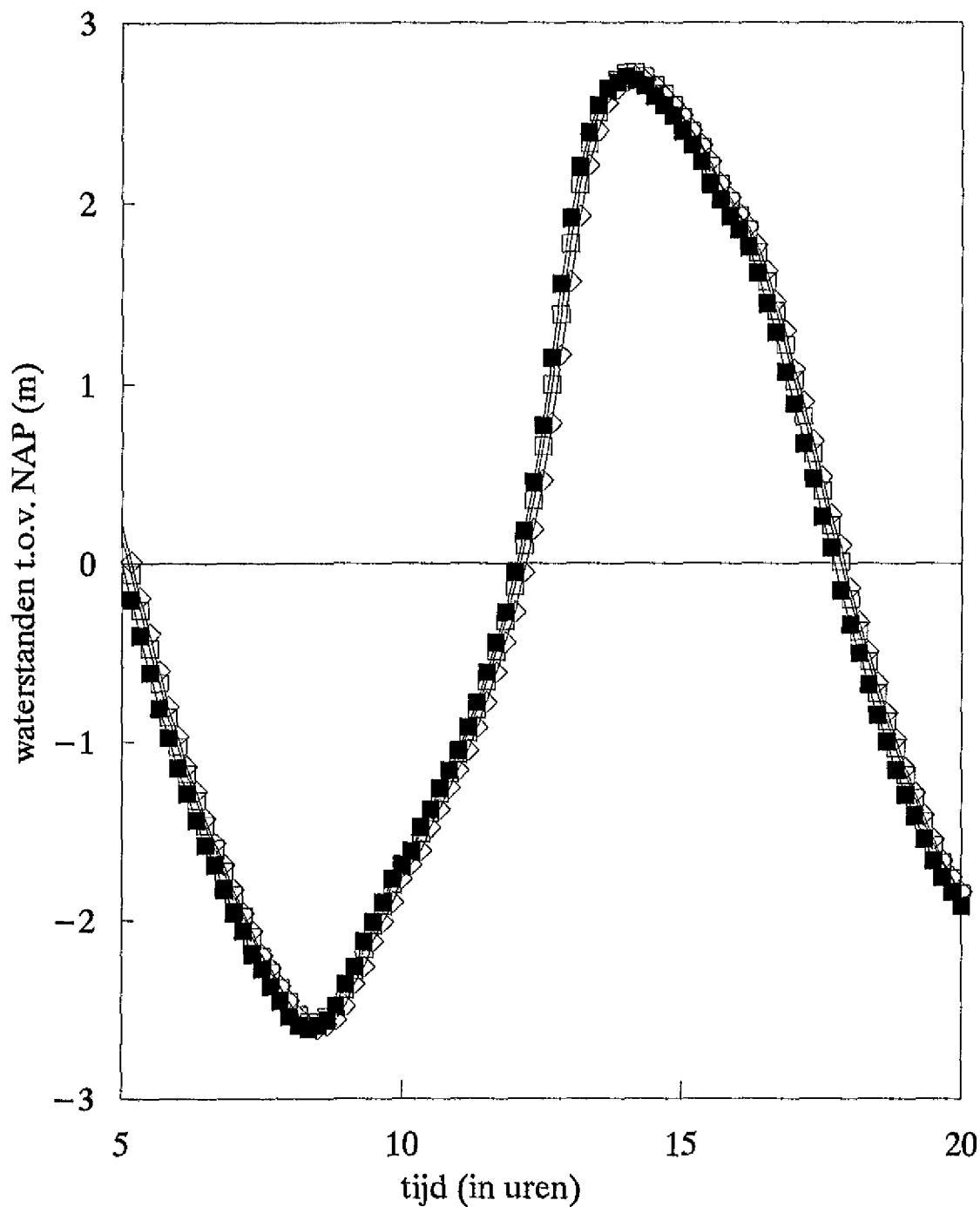
Gevoeligheidsanalyse FINWES96
Invloed zeewaartse randvoorwaarde
(meetwaarden Vlissingen of Breskens)

rapport : A 982

bijlage : 2.13

Waterstanden Vlissingen

6 april 1989



■ gemeten

□ Zeewaartse rand Breskens

◇ Zeewaartse rand Vlissingen

INGENIEURSBUREAU / SVAŠEK B.V.

Gevoeligheidsanalyse FINWES96
Invloed zeewaartse randvoorwaarde
(meetwaarden Vlissingen of Breskens)

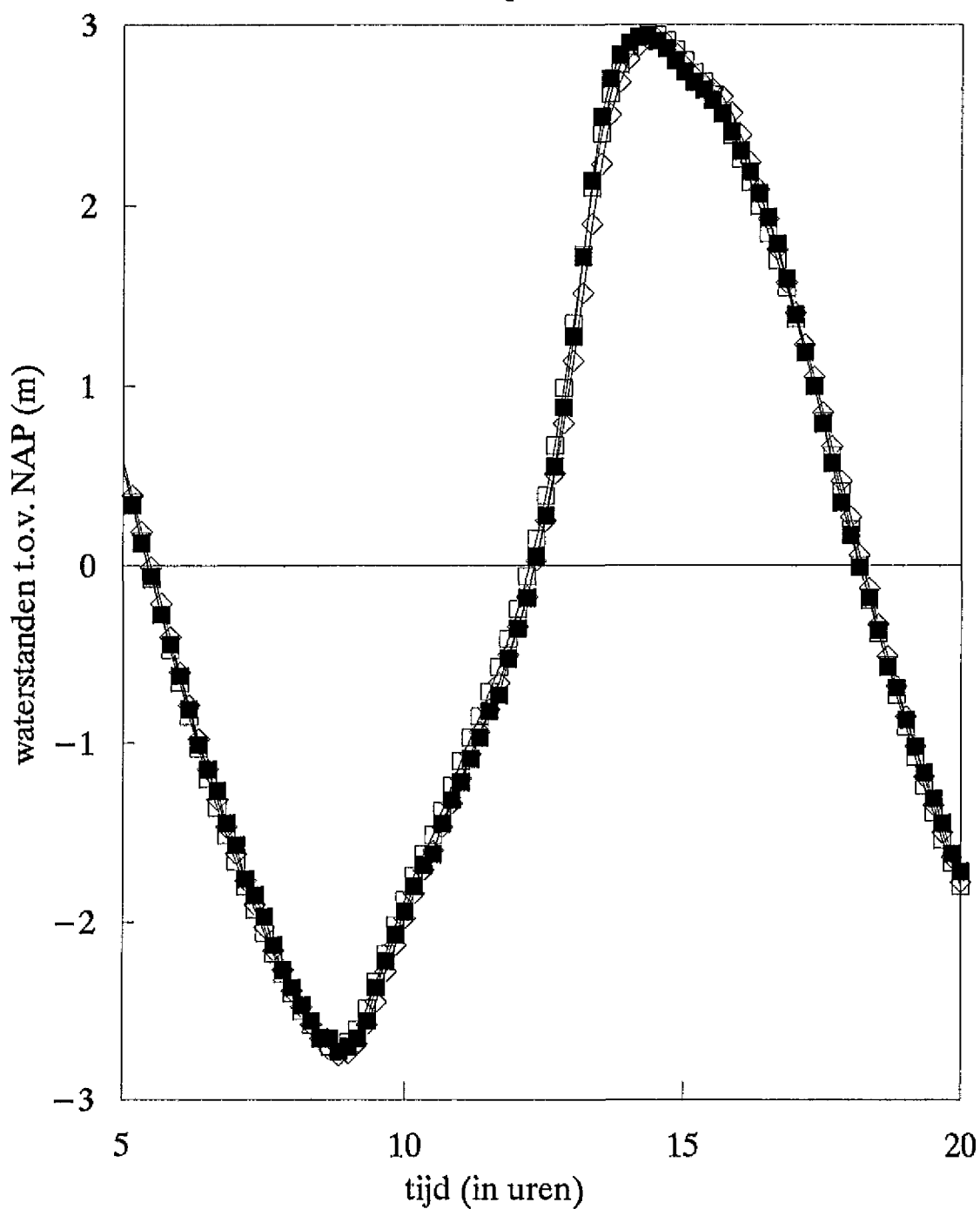
datum : april 1996

rapport : A 982

bijlage : 2 . 14

Waterstanden Terneuzen

6 april 1989



■ gemeten

□ Zeewaartse rand Breskens

◇ Zeewaartse rand Vlissingen

INGENIEURSBUREAU / SVAŠEK B.V.

Gevoeligheidsanalyse FINWES96
Invloed zeewaartse randvoorwaarde
(meetwaarden Vlissingen of Breskens)

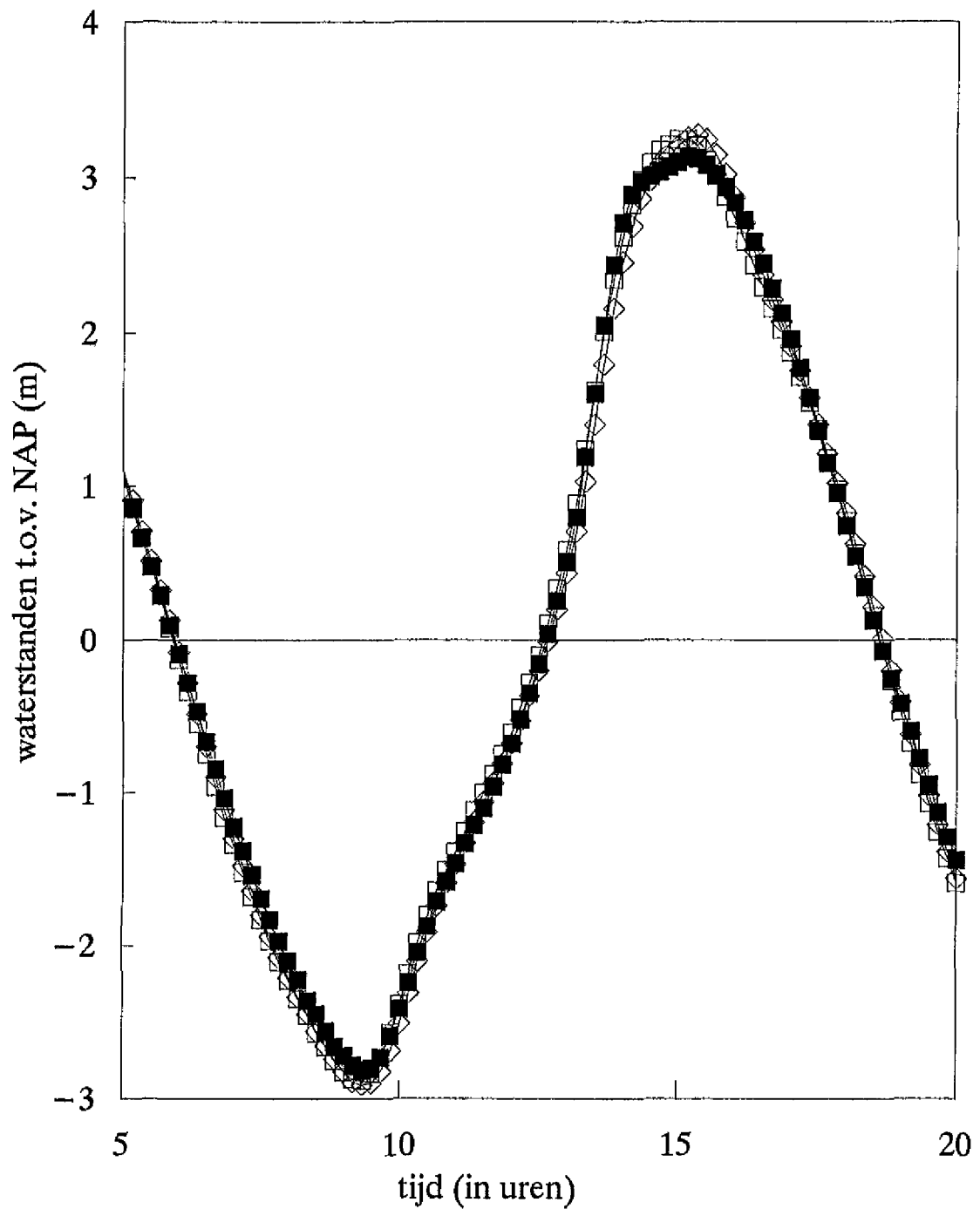
datum : april 1996

rapport : A 982

bijlage : 2.15

Waterstanden Hansweert

6 april 1989



■ gemeten

□ Zeewaartse rand Breskens

◇ Zeewaartse rand Vlissingen

INGENIEURSBUREAU / SVASEK B.V.

datum : april 1996

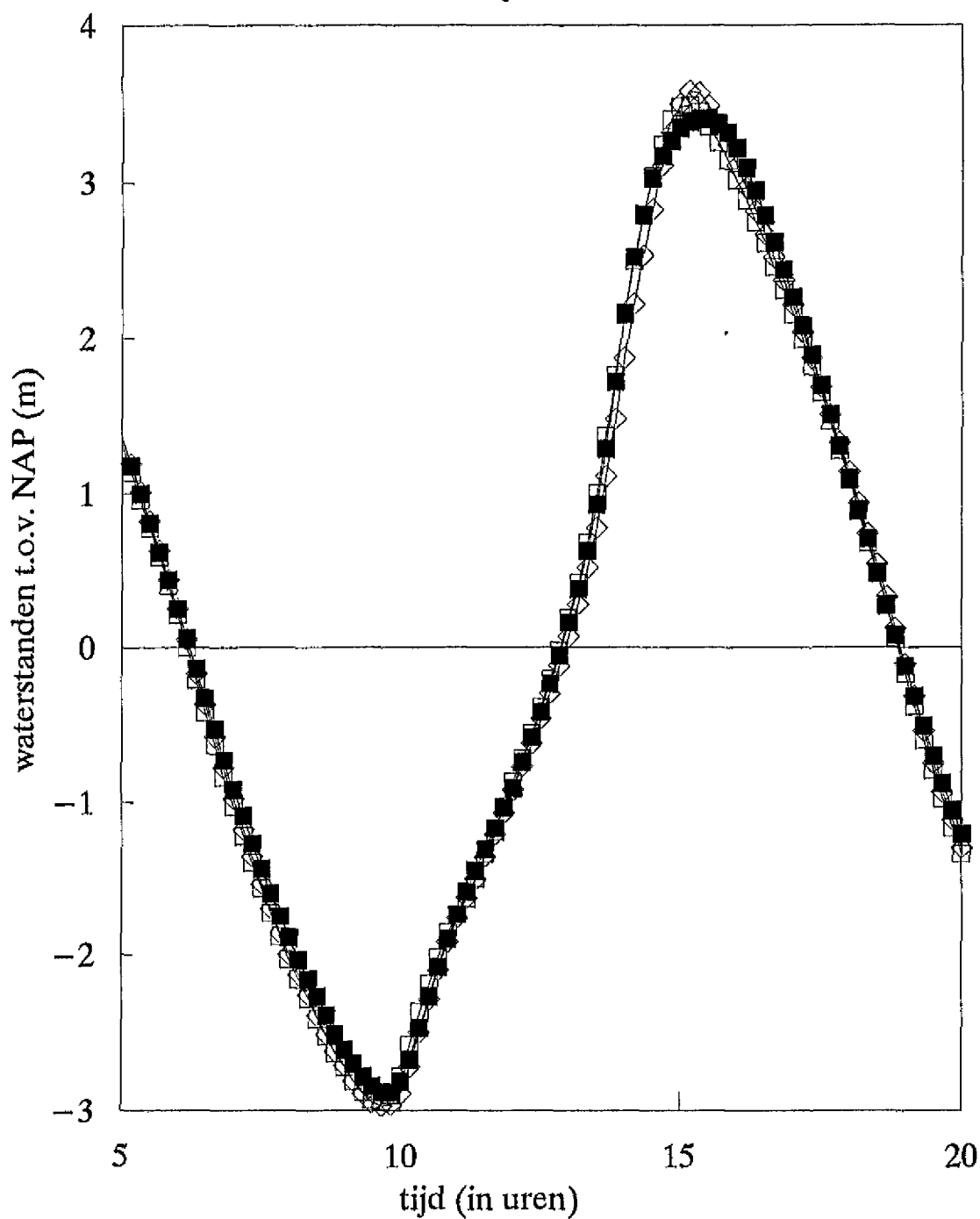
Gevoeligheidsanalyse FINWES96
Invloed zeewaartse randvoorwaarde
(meetwaarden Vlissingen of Breskens)

rapport : A 982

bijlage : 2 . 16

Waterstanden Baalhoek

6 april 1989



INGENIEURSBUREAU / **SVASEK** B.V.

Gevoeligheidsanalyse FINWES96
Invloed zeewaartse randvoorwaarde
(meetwaarden Vlissingen of Breskens)

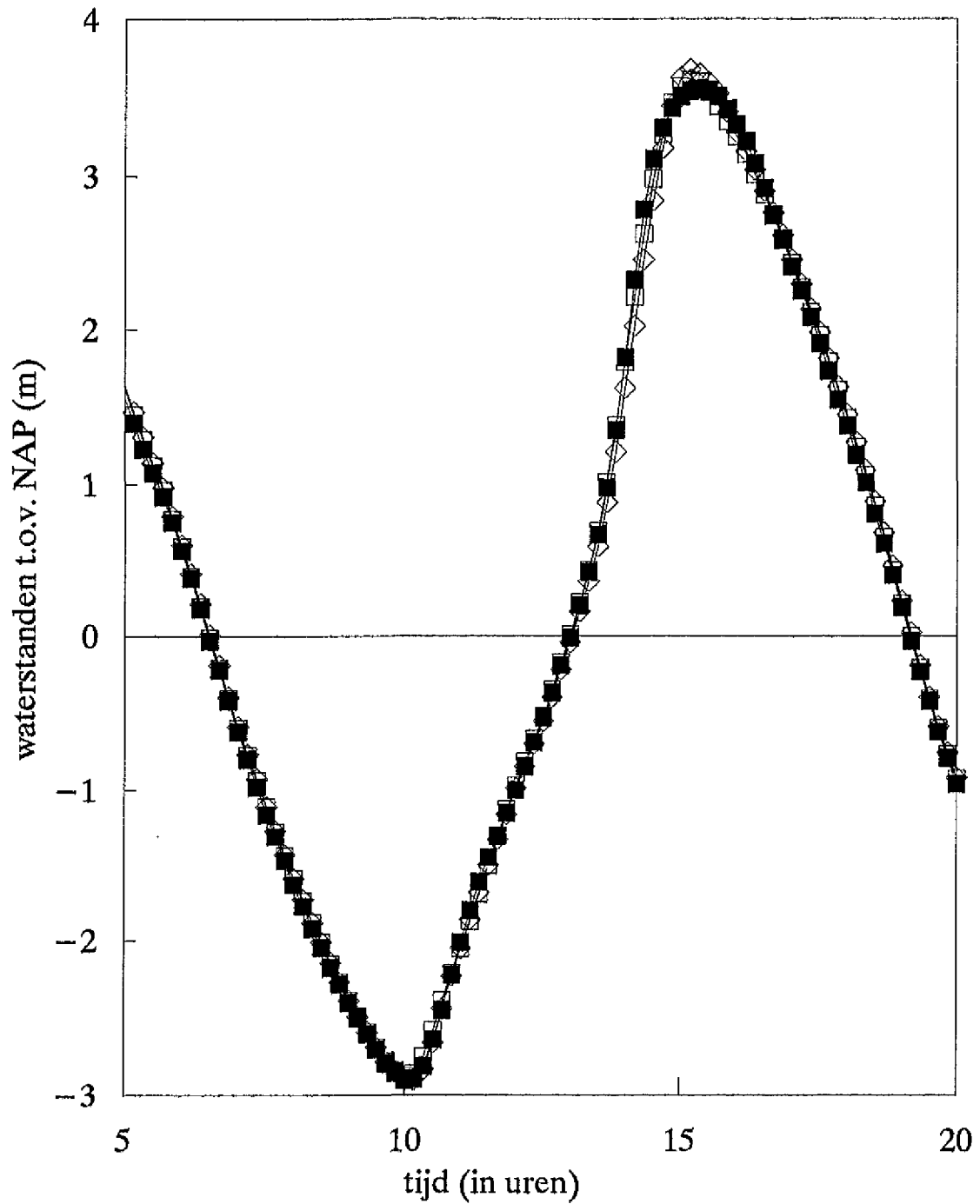
datum : april 1996

rapport : A 982

bijlage : 2 . 17

Waterstanden Bath

6 april 1989



■ gemeten

□ Zeewaartse rand Breskens

◇ Zeewaartse rand Vlissingen

INGENIEURSBUREAU / **SVASEK B.V.**

datum : april 1996

Gevoeligheidsanalyse FINWES96
Invloed zeewaartse randvoorwaarde
(meetwaarden Vlissingen of Breskens)

rapport : A 982

bijlage : 2. 18

Bijlage 3

Toelichting bij bijlage 3

1

In bijlage 3 worden met Finel berekende zandtransporten vergeleken met gemeten zandconcentraties. Er is gebruik gemaakt van de volgende metingen:

- 6 april 1989 - raai 7 (Pas van Terneuzen - Everingen);
- 23 oktober 1995 - raaien F,G,H, en J (Drempel van Hansweert);
- 25 oktober 1995 - raai C (Drempel van Hansweert).

2

De zandtransportberekeningen zijn gebaseerd op de waterbeweging. De waterbeweging in het model is niet gelijk aan de waterbeweging tijdens de meting. Bij het vergelijken van de gemeten waarden met de modelresultaten moet met het volgende rekening worden gehouden:

- de bodemligging tijdens de meting is niet gelijk aan de diepteschematisatie van het model;
- de metingen van oktober 1995 zijn vergeleken met de modelresultaten van 6 april 1989 (een ander getij!).

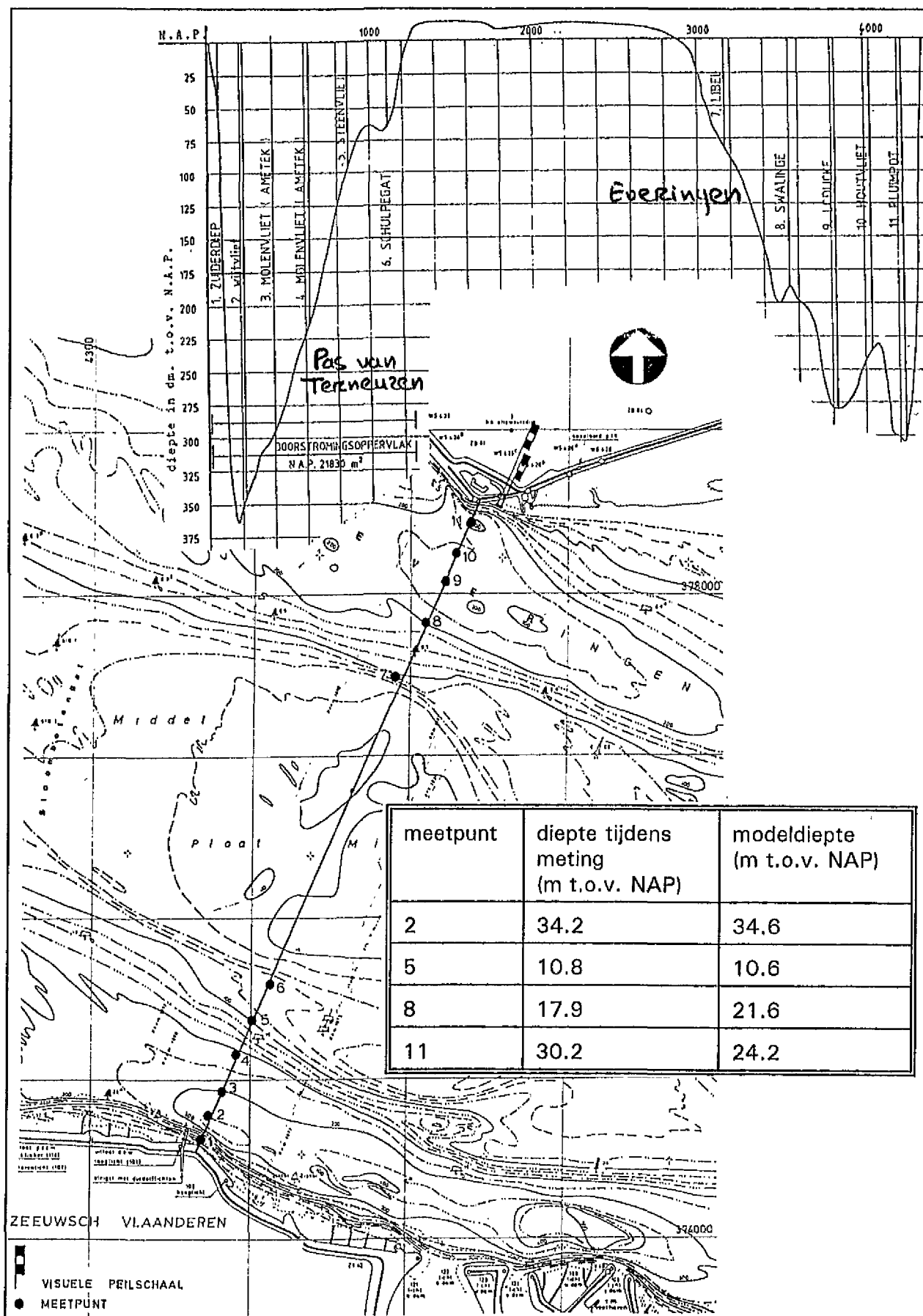
Een indicatie van de invloed hiervan is het verschil tussen de gemeten en berekende snelheden.

3

De gepresenteerde evenwichtstransporten zijn berekend met een Nikuradse-waarde van 0.4 m.

4

De zeewaartse richting (eb) is positief.



INGENIEURSBUREAU / SVAŠEK B.V.

Meetlokatie met bodemligging tijdens de meting
(6 april 1989) en modeldieptes

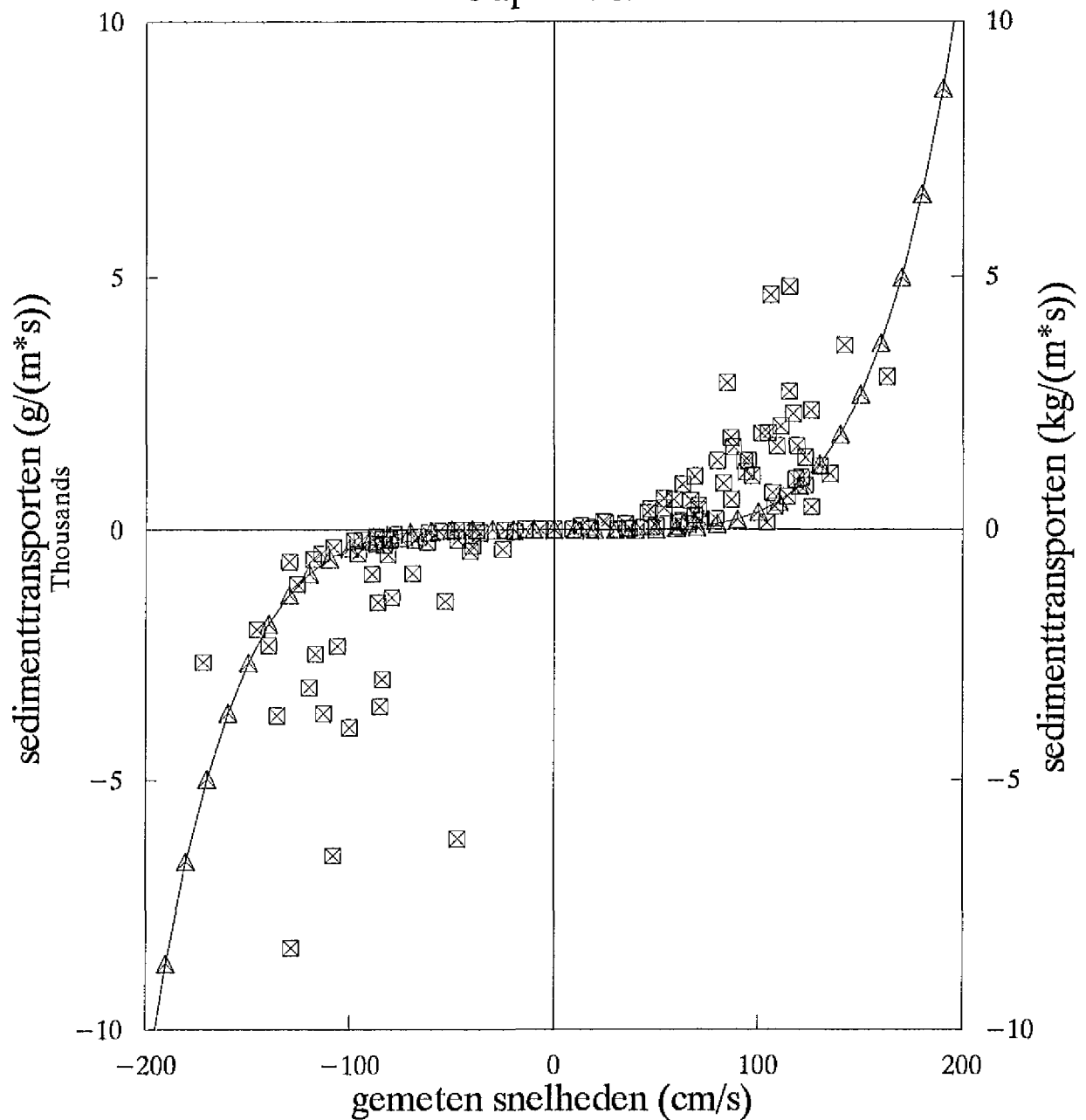
datum : april 1996

rapport : A 982

bijlage : 3.1

verband snelheden en sedimenttransporten

6 april 1989



De weergegeven lijn is gebaseerd op een gemiddelde Chezy waarde.

INGENIEURSBUREAU / **SVASEK** B.V.

Kalibratie zandtransportberekeningen (6 april 1989)

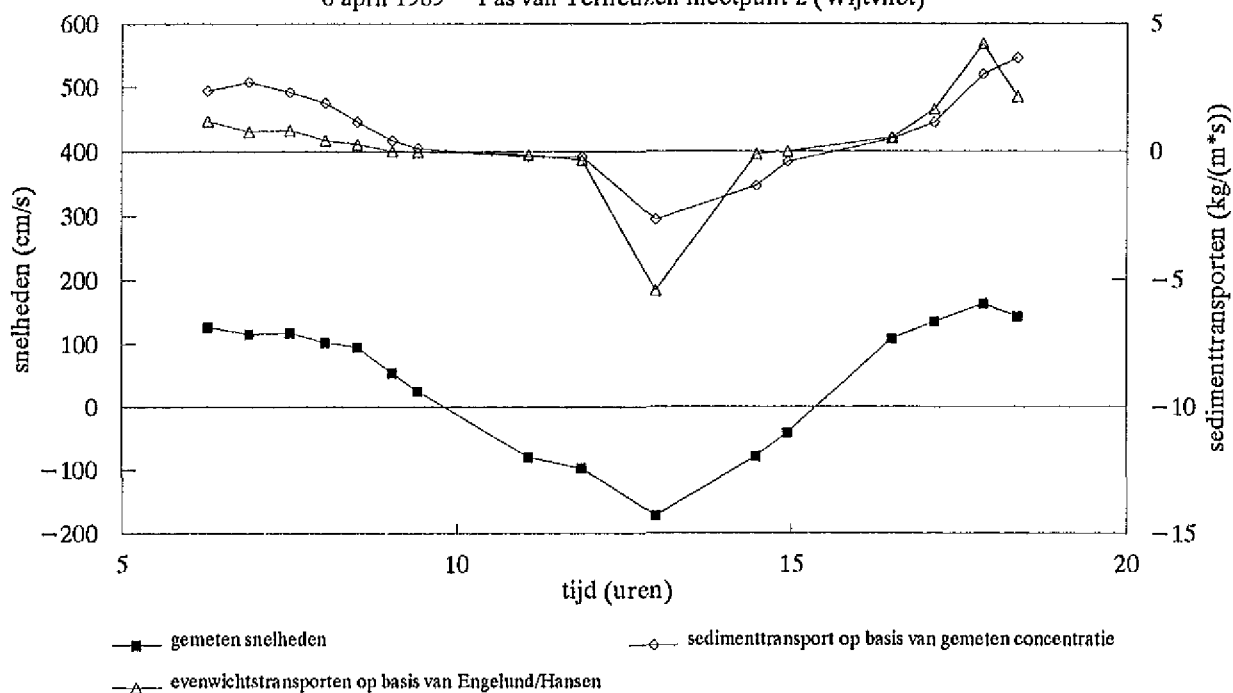
datum : april 1996

rapport : A 982

bijlage : 3.2

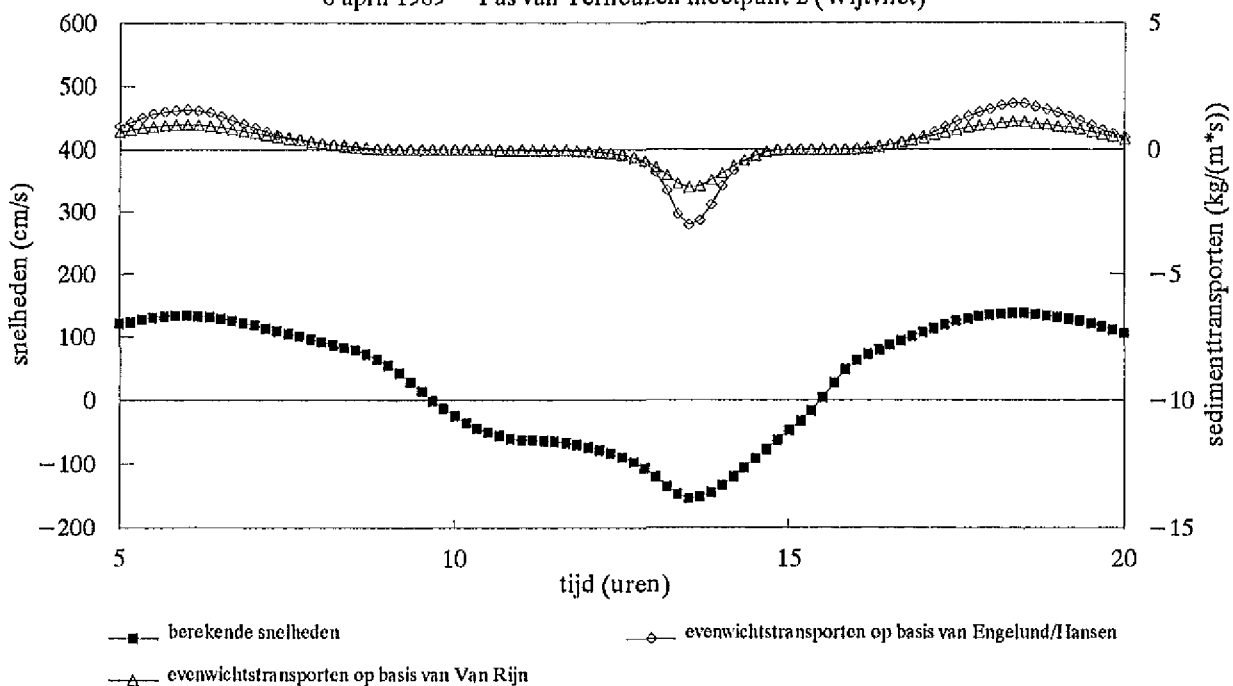
Gemeten snelheden en sedimenttransporten raai 7

6 april 1989 - Pas van Terneuzen meetpunt 2 (Wijtvliet)



Berekende snelheden en sedimenttransporten raai 7

6 april 1989 - Pas van Terneuzen meetpunt 2 (Wijtvliet)



INGENIEURSBUREAU **SVASEK** B.V.

Zandtransporten - raai 7 - meetpunt 2
meting en berekening: 6 april 1989

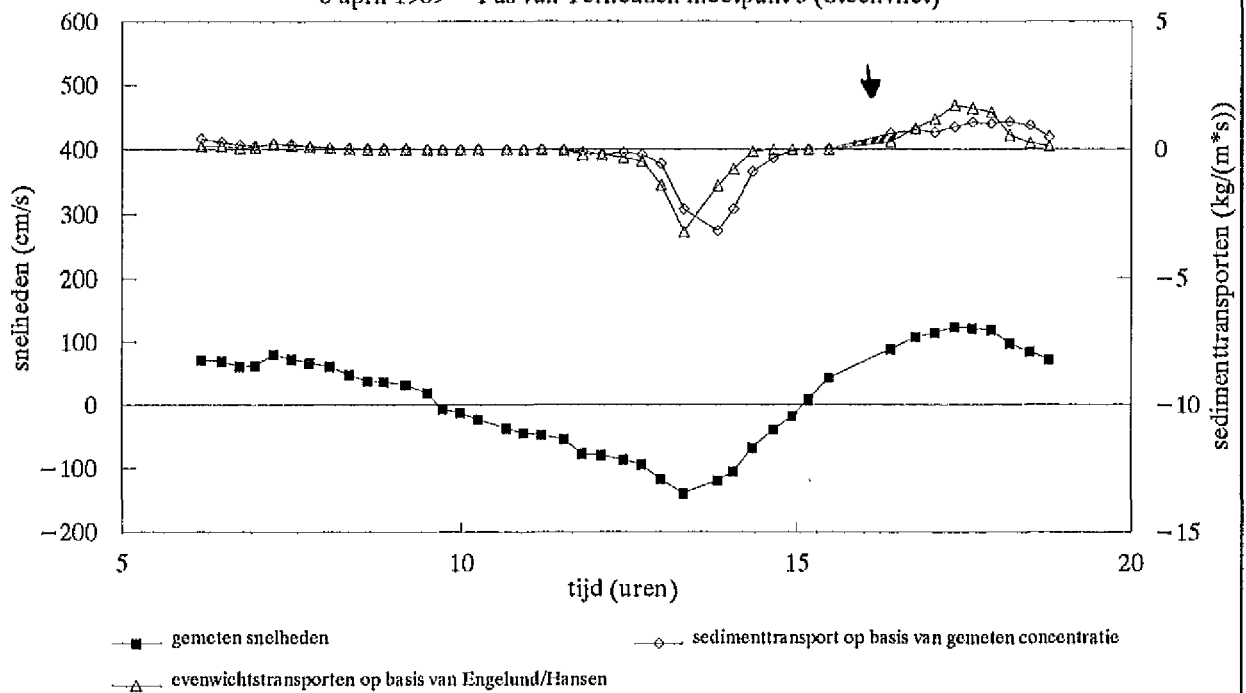
datum : april 1996

rapport : A 982

bijlage : 3.3

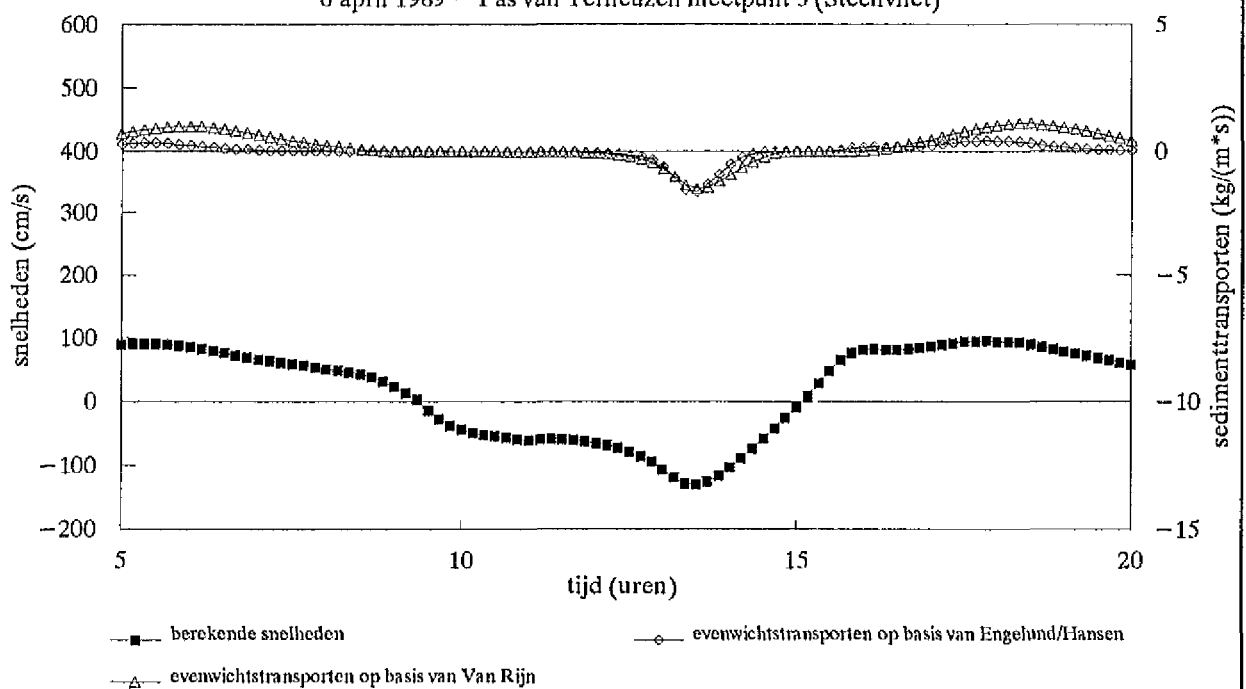
Gemeten snelheden en sedimenttransporten raai 7

6 april 1989 – Pas van Terneuzen meetpunt 5 (Steenvliet)



Berekende snelheden en sedimenttransporten raai 7

6 april 1989 – Pas van Terneuzen meetpunt 5 (Steenvliet)



INGENIEURSBUREAU / **SVASEK** B.V.

Zandtransporten - raai 7 - meetpunt 5
meting en berekening: 6 april 1989

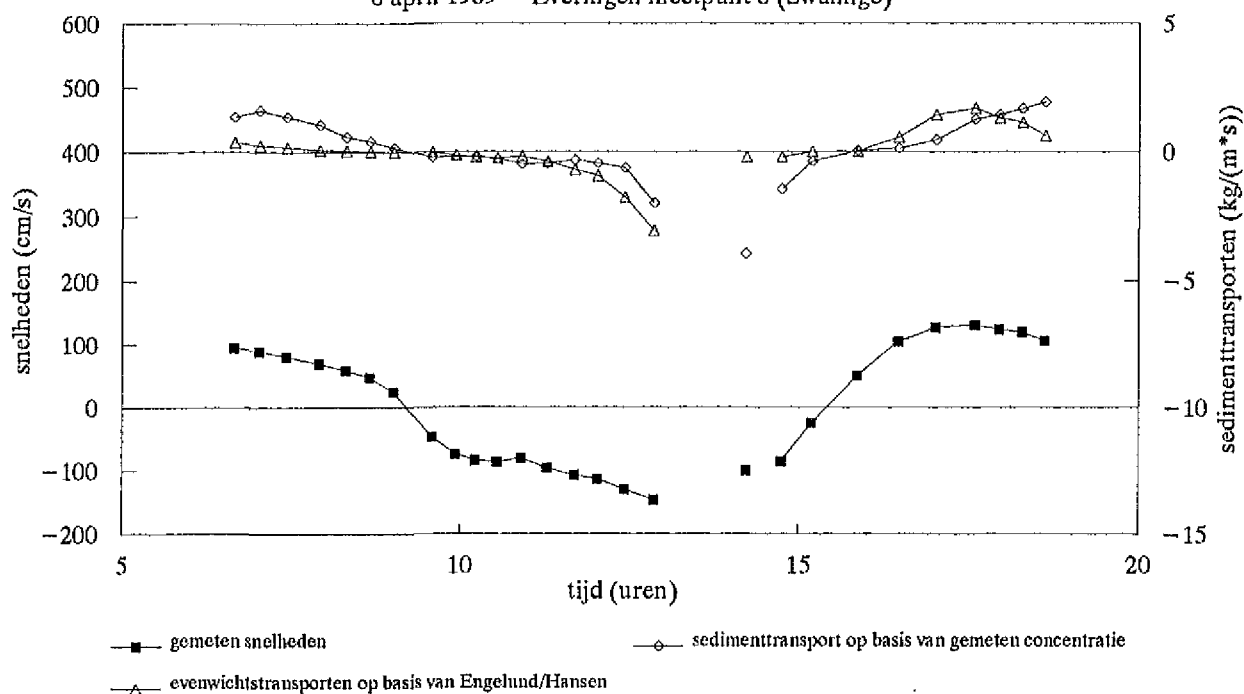
datum : april 1996

rapport : A 982

bijlage : 3.4

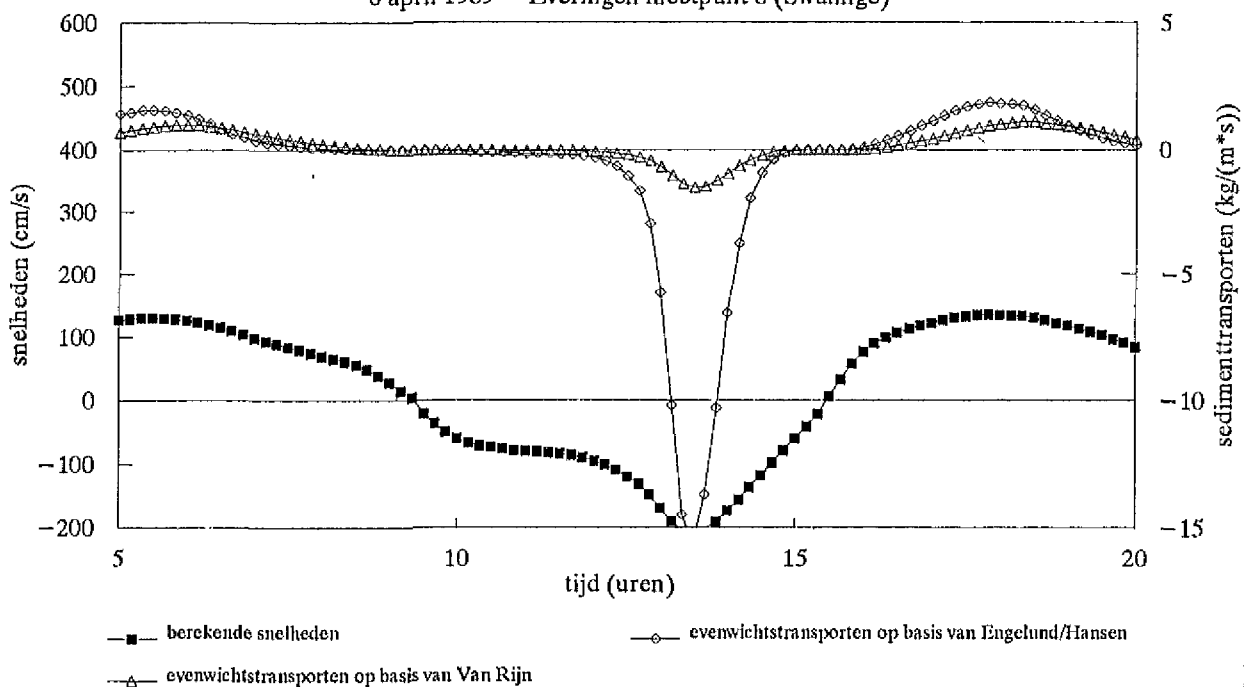
Gemeten snelheden en sedimenttransporten raai 7

6 april 1989 – Everingen meetpunt 8 (Swalinge)



Berekende snelheden en sedimenttransporten raai 7

6 april 1989 – Everingen meetpunt 8 (Swalinge)



INGENIEURSBUREAU / **SVASEK B.V.**

Zandtransporten - raai 7 - meetpunt 8
meting en berekening: 6 april 1989

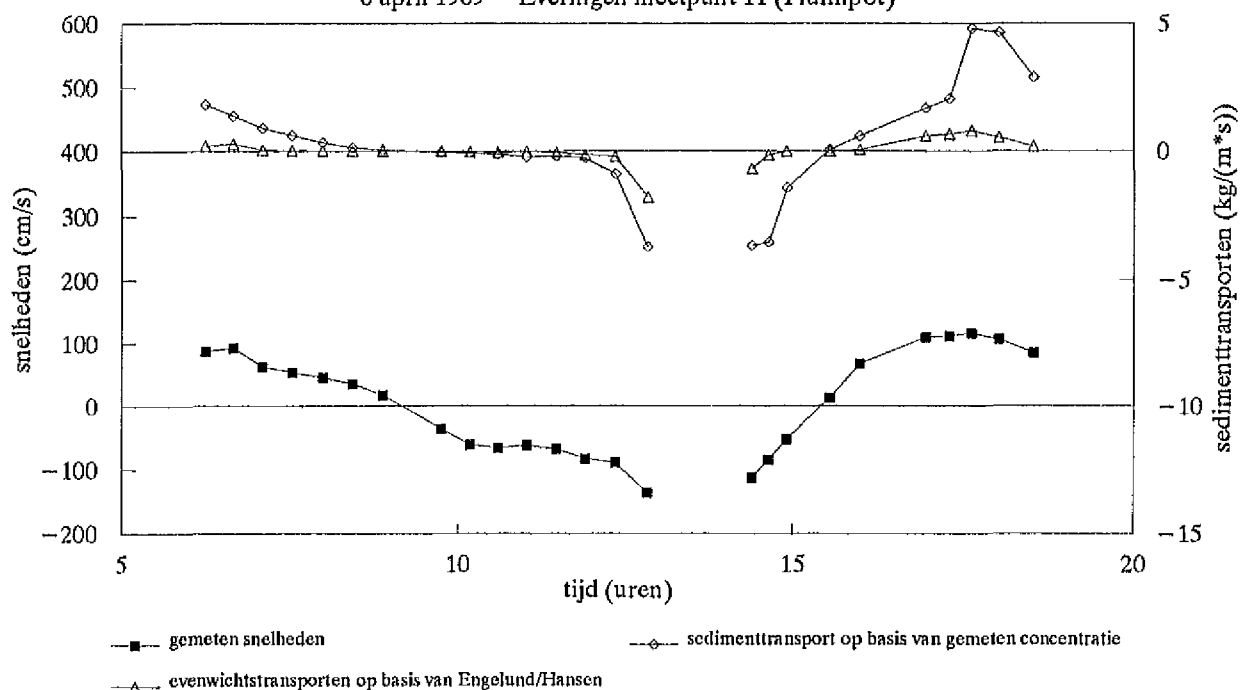
datum : april 1996

rapport : A 982

bijlage : 3.5

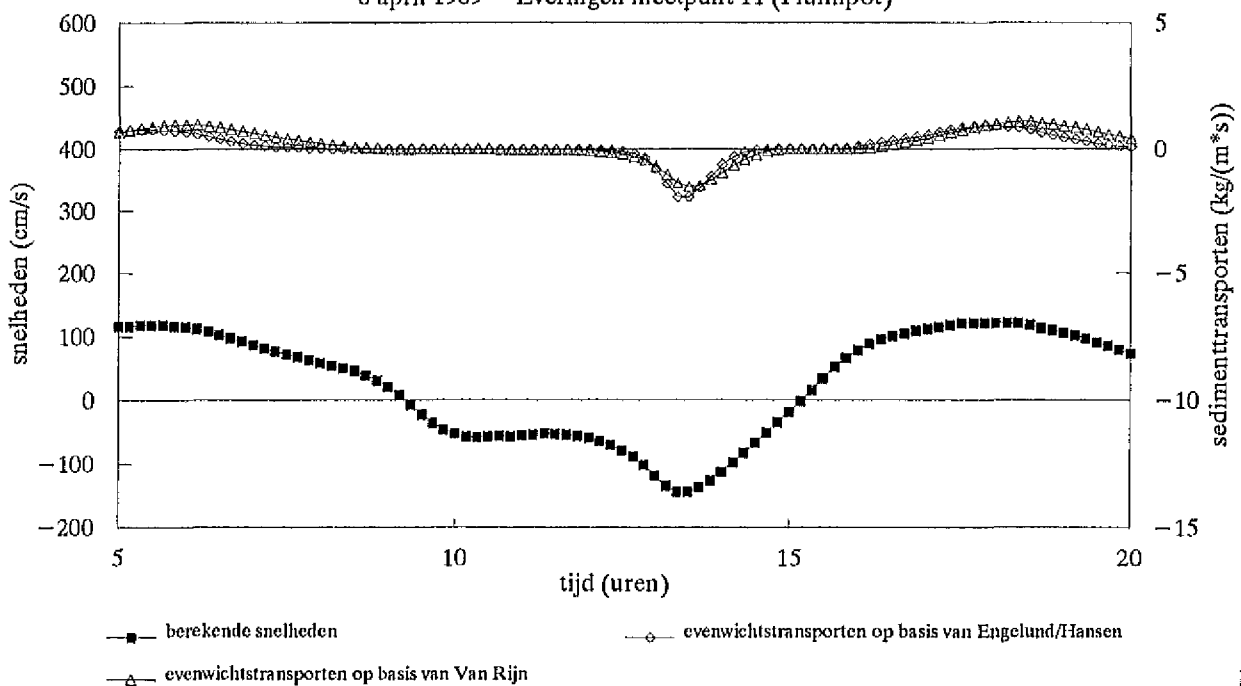
Gemeten snelheden en sedimenttransporten raai 7

6 april 1989 – Everingen meetpunt 11 (Pluimpot)



Berekende snelheden en sedimenttransporten raai 7

6 april 1989 – Everingen meetpunt 11 (Pluimpot)



INGENIEURSBUREAU/SVASEK B.V.

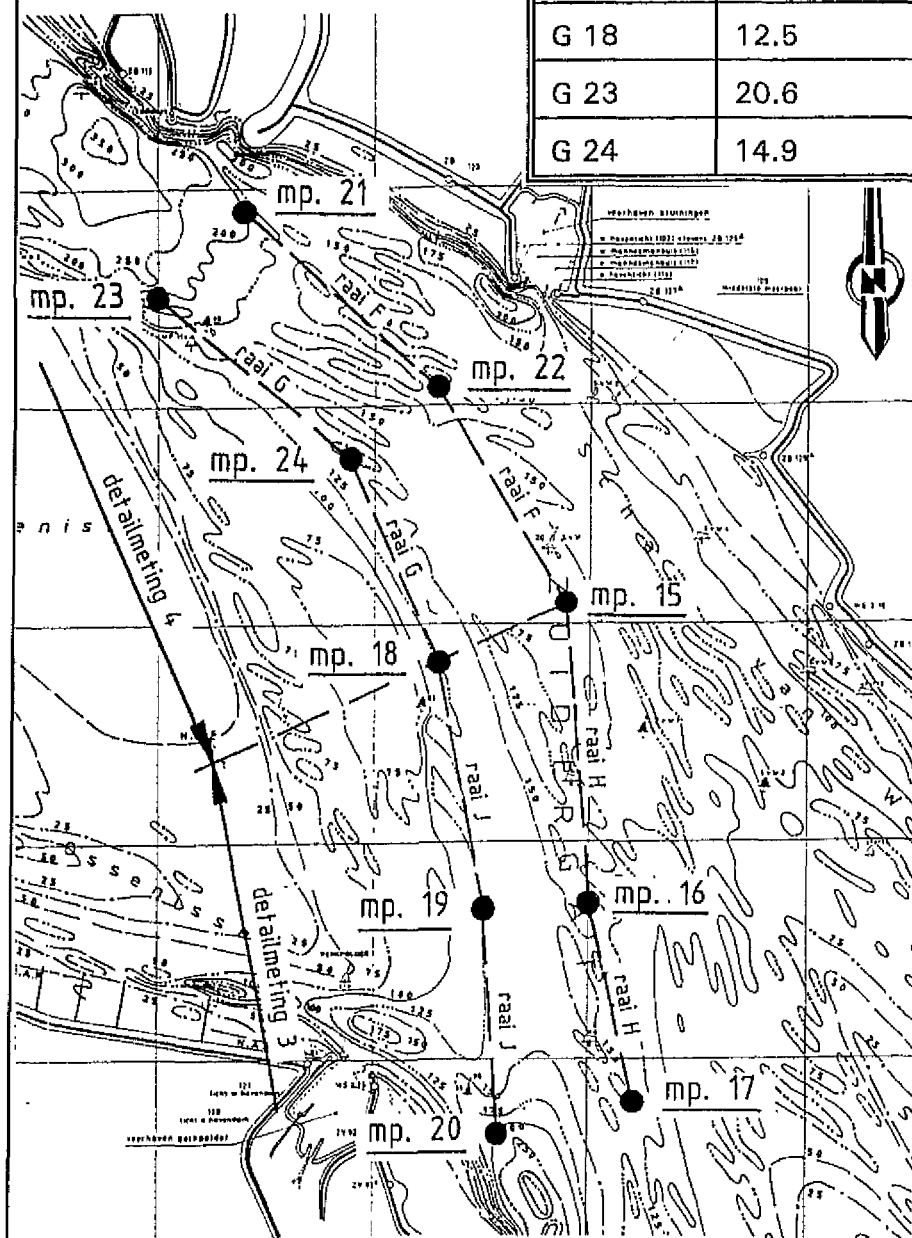
Zandtransporten - raai 7 - meetpunt 11
meting en berekening: 6 april 1989

datum : april 1996

rapport : A 982

bijlage : 3.6

meetpunt	diepte tijdens meting (m t.o.v. NAP)	modeldiepte (m t.o.v. NAP)
H 15	15.4	15.6
H 16	16.2	10.5
J 18	12.7	15.3
J 19	12.8	12.3
J 20	19.4	20.6
F 15	15.5	17.6
F 22	14.8	17.9
G 18	12.5	15.3
G 23	20.6	20.9
G 24	14.9	15.2



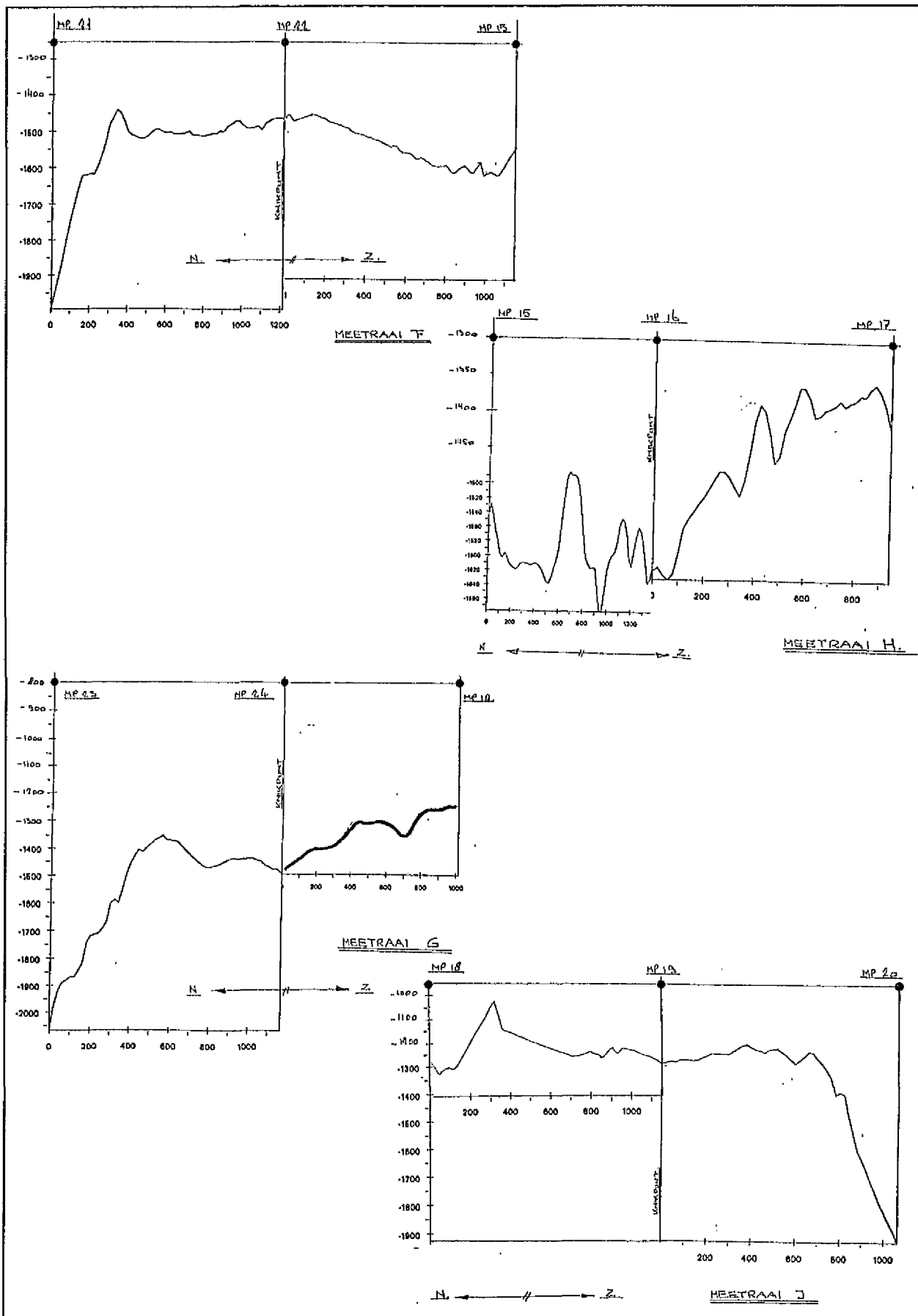
INGENIEURSBUREAU / SVASEK B.V.

Meetlokatie met bodemligging tijdens de meting
(23 oktober 1995) en modeldieptes

datum : april 1996

rapport : A 982

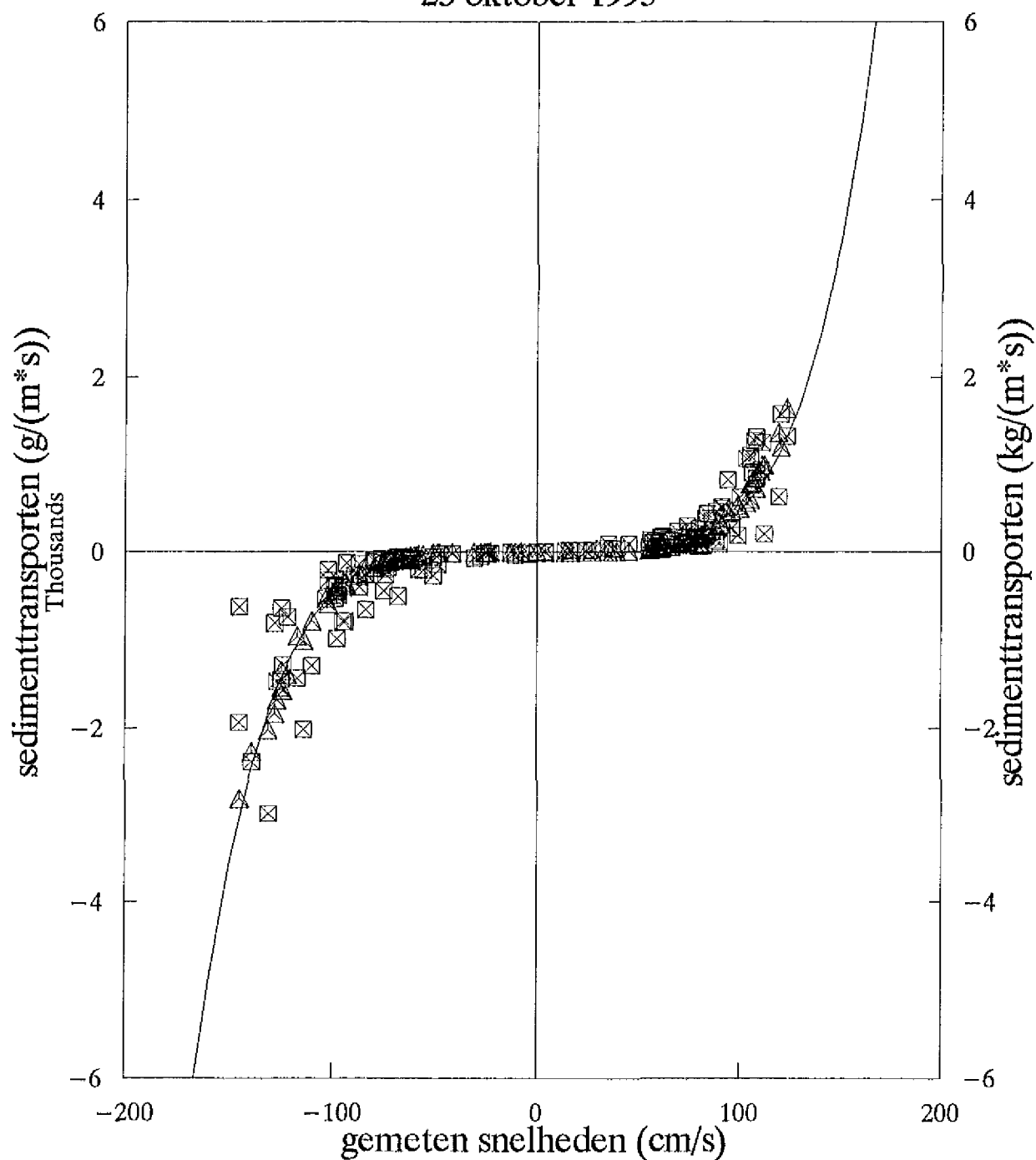
bijlage : 3.7



INGENIEURSBUREAU / SVASEK B.V.	datum : april 1996
Meetlokatie met bodemligging tijdens de meting (23 oktober 1995) en modeldieptes	rapport : A 982
	bijlage : 3.8

verband snelheden en sedimenttransporten

23 oktober 1995



☒ zandtransporten

△ evenwichtstransporten

positieve waarden zijn zeewaarts gericht (eb)

De weergegeven lijn is gebaseerd op een gemiddelde Chezy waarde.

INGENIEURSBUREAU / **SVASEK B.V.**

datum : april 1996

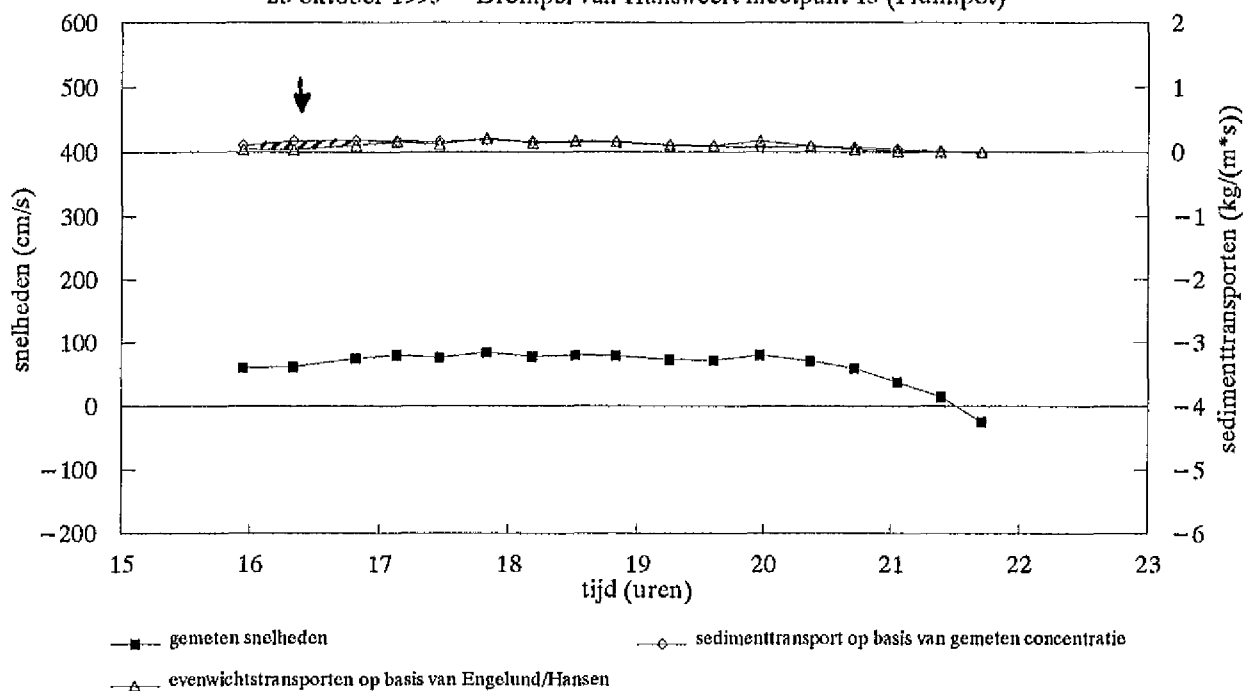
Kalibratie zandtransportberekeningen (23 oktober 1995)

rapport : A 982

bijlage : 3.9

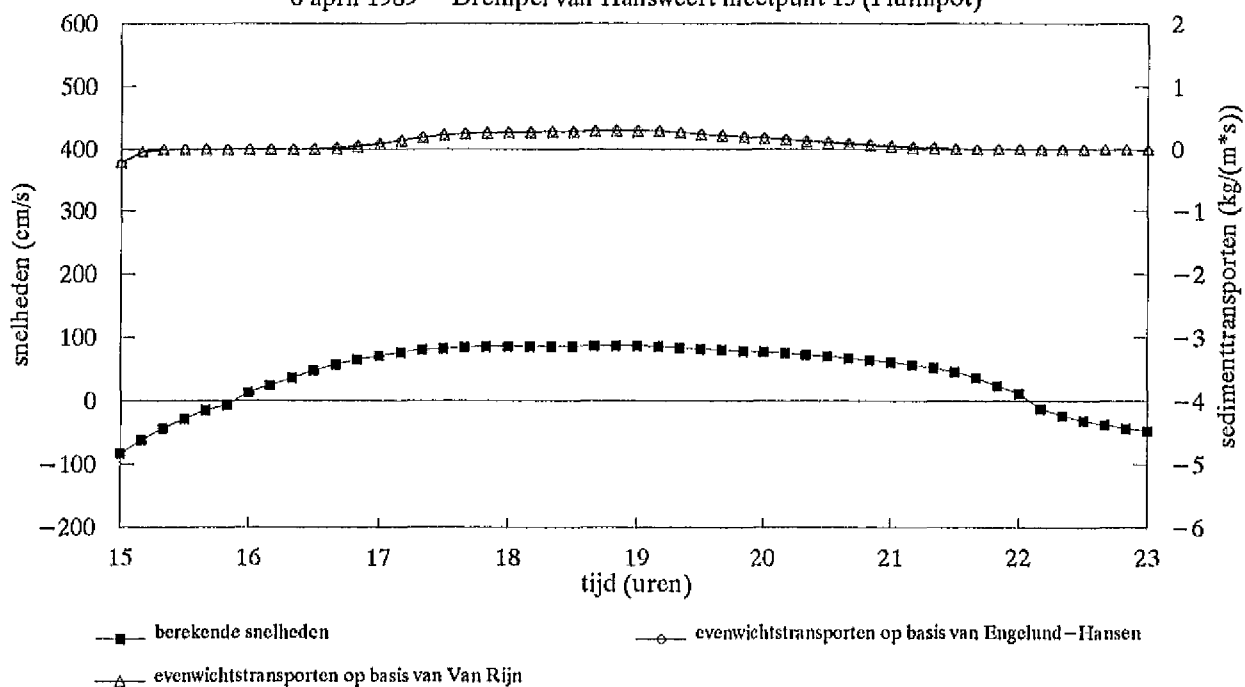
Gemeten snelheden en sedimenttransporten raai H

23 oktober 1995 – Drempel van Hansweert meetpunt 15 (Pluimpot)



Berekende snelheden en sedimenttransporten raai H

6 april 1989 – Drempel van Hansweert meetpunt 15 (Pluimpot)



INGENIEURSBUREAU / SVAŠEK B.V.

Zandtransporten - raai H - meetpunt 15
meting : 23 oktober 1995
berekening : 6 april 1989

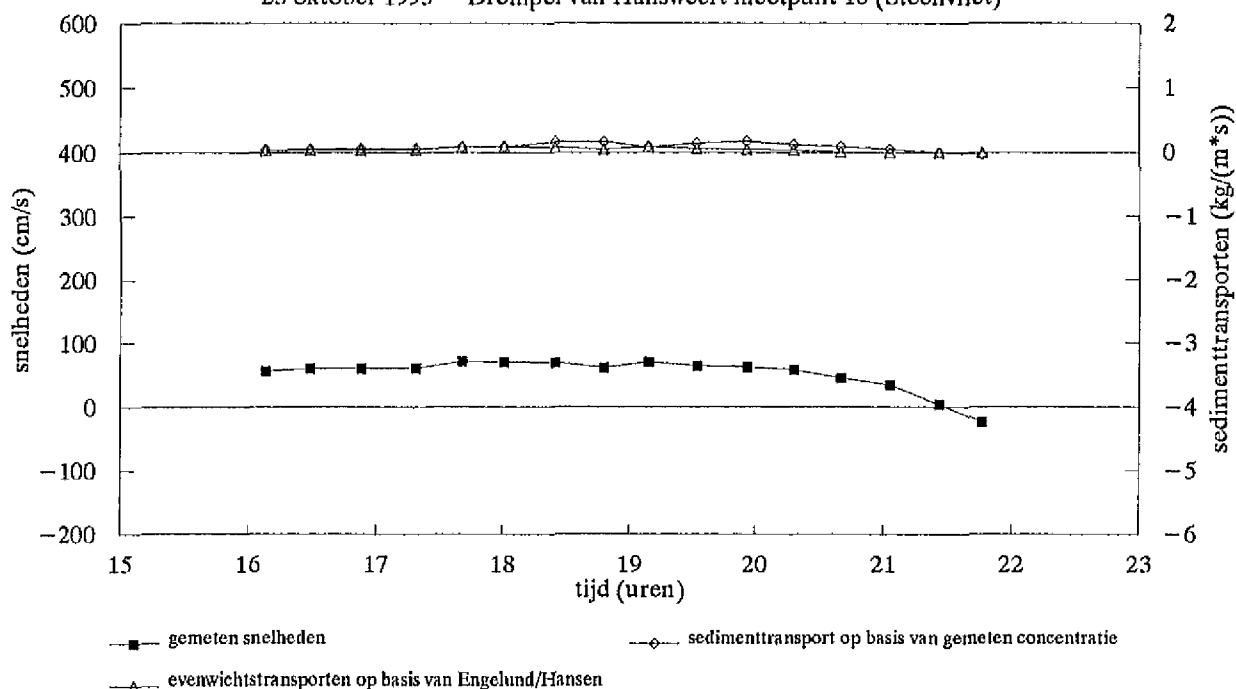
datum : april 1996

rapport : A 982

bijlage : 3 · 10

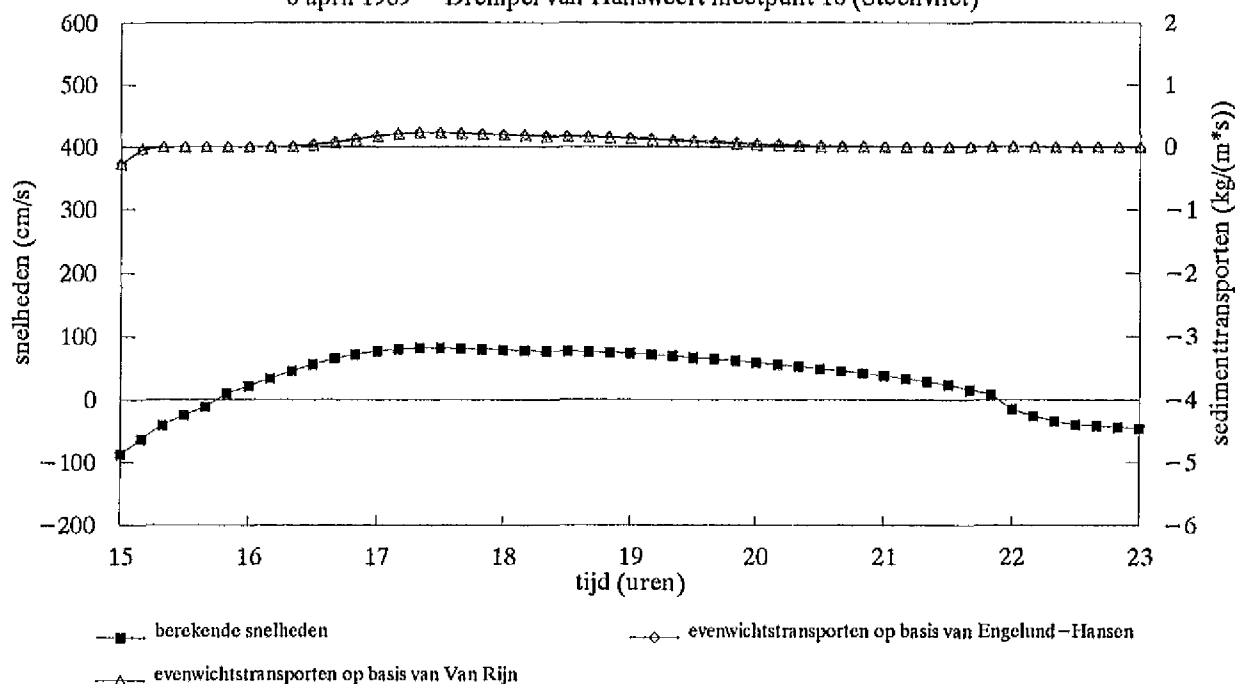
Gemeten snelheden en sedimenttransporten raai H

23 oktober 1995 – Drempel van Hansweert meetpunt 16 (Steenvliet)



Berekende snelheden en sedimenttransporten raai H

6 april 1989 – Drempel van Hansweert meetpunt 16 (Steenvliet)



INGENIEURSBUREAU/SVASEK B.V.

Zandtransporten - raai H - meetpunt 16

meting : 23 oktober 1995

berekening : 6 april 1989

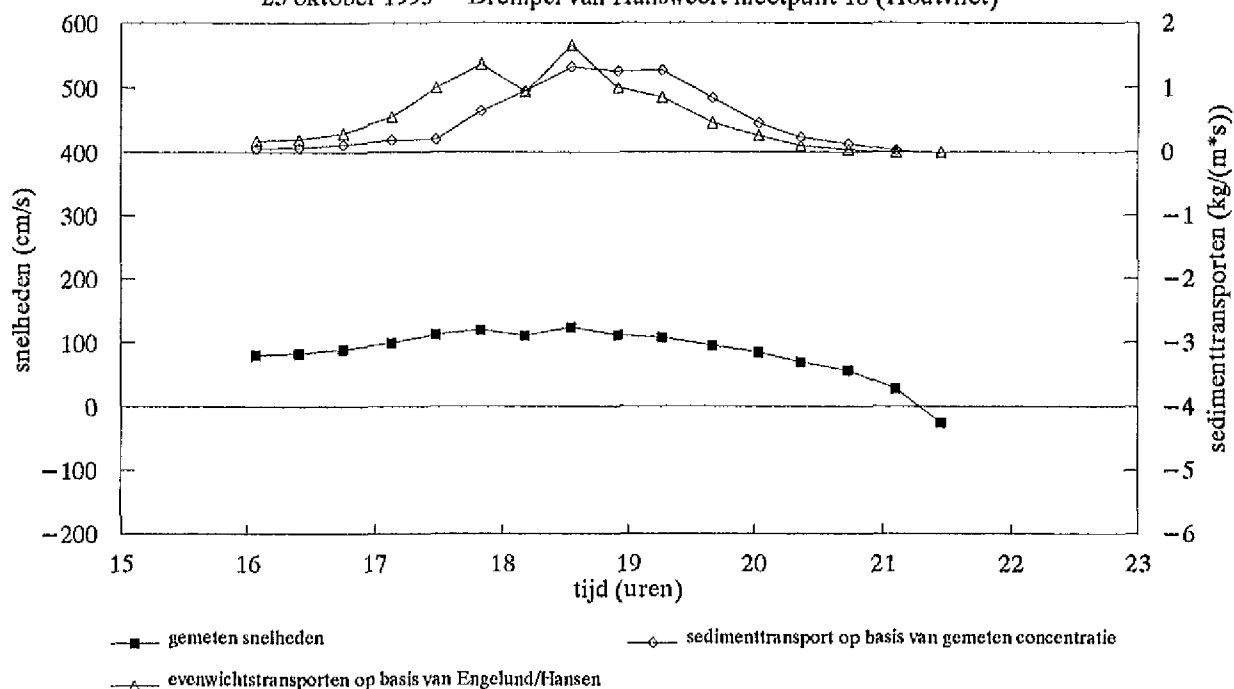
datum : april 1996

rapport : A 982

bijlage : 3.11

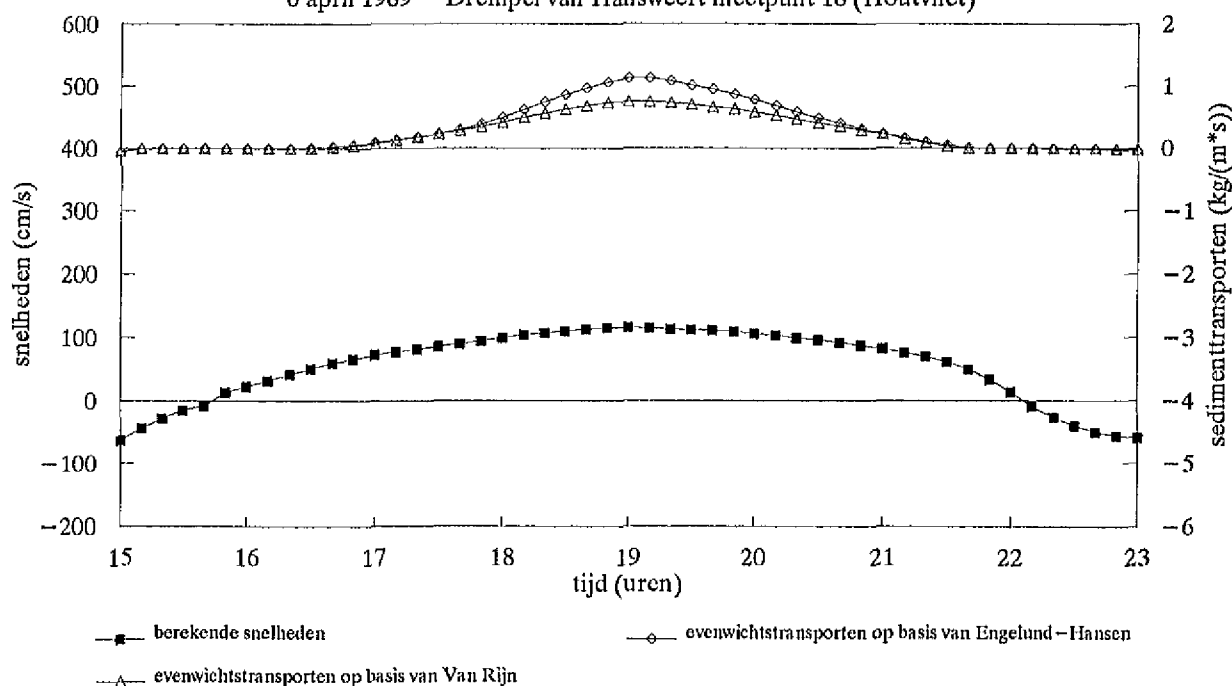
Gemeten snelheden en sedimenttransporten raai J

23 oktober 1995 – Drempel van Hansweert meetpunt 18 (Houtvliet)



Berekende snelheden en sedimenttransporten raai J

6 april 1989 – Drempel van Hansweert meetpunt 18 (Houtvliet)



INGENIEURSBUREAU/SVASEK B.V.

Zandtransporten - raai J - meetpunt 18

meting : 23 oktober 1995

berekening : 6 april 1989

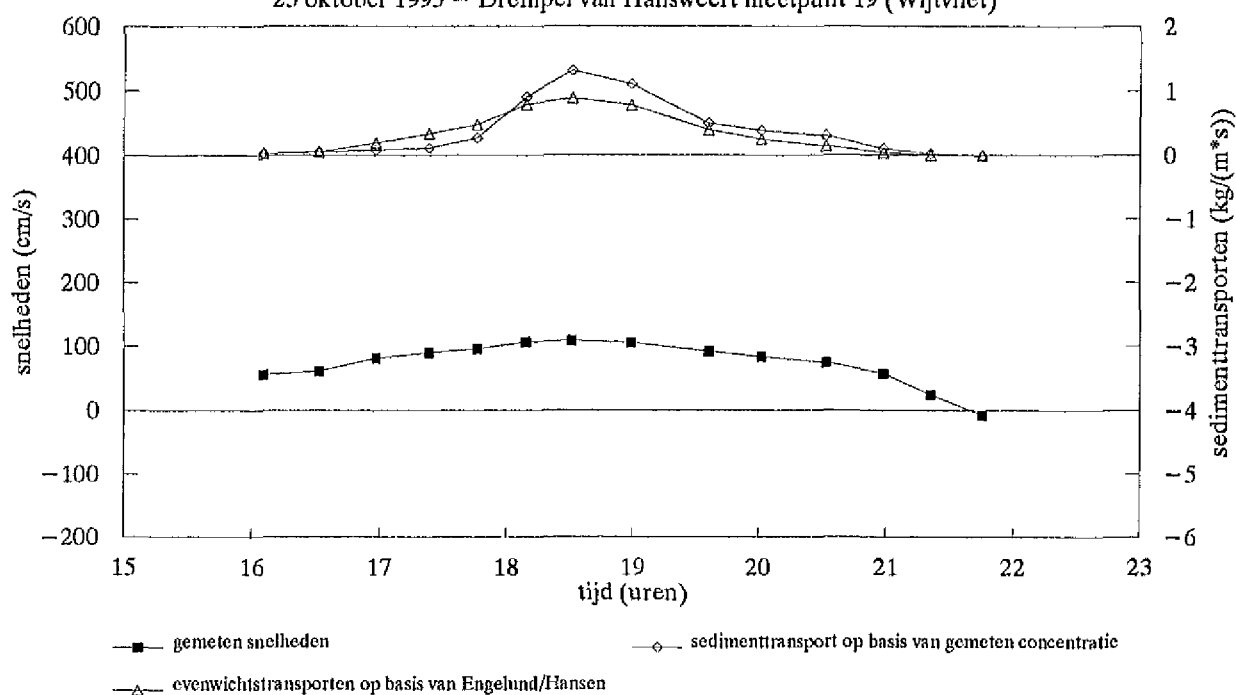
datum : april 1996

rapport : A 982

bijlage : 3.12

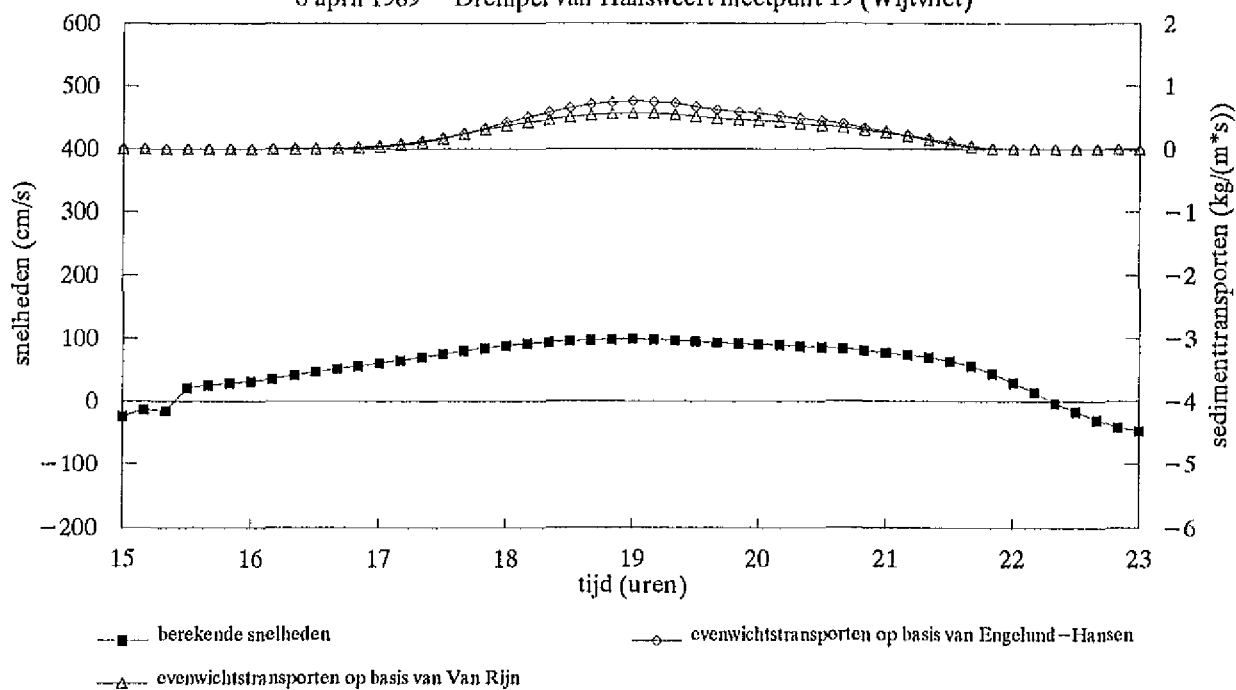
Gemeten snelheden en sedimenttransporten raai J

23 oktober 1995 – Drempel van Hansweert meetpunt 19 (Wijtvliet)



Berekende snelheden en sedimenttransporten raai J

6 april 1989 – Drempel van Hansweert meetpunt 19 (Wijtvliet)



INGENIEURSBUREAU / SVASEK B.V.

Zandtransporten - raai J - meetpunt 19

meting : 23 oktober 1995

berekening : 6 april 1989

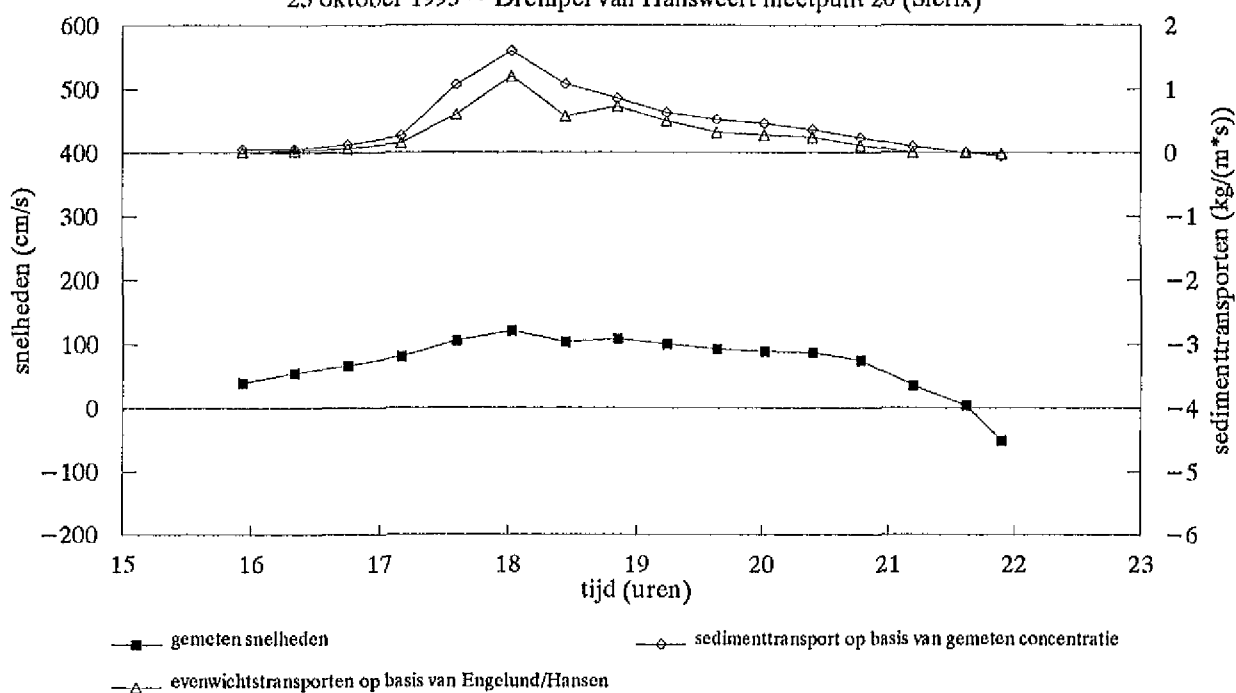
datum : april 1996

rapport : A 982

bijlage : 3.13

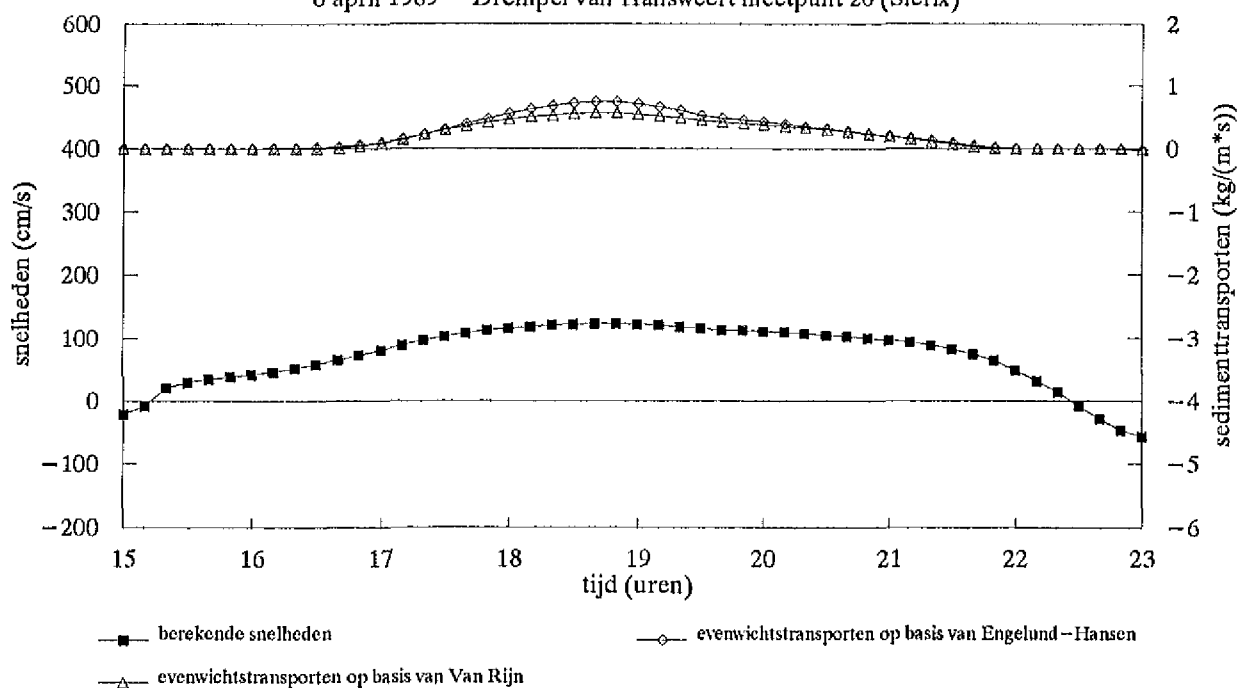
Gemeten snelheden en sedimenttransporten raai J

23 oktober 1995 - Drempel van Hansweert meetpunt 20 (Sierix)



Berekende snelheden en sedimenttransporten raai J

6 april 1989 - Drempel van Hansweert meetpunt 20 (Sierix)



INGENIEURSBUREAU / **SVASEK B.V.**

datum : april 1996

Zandtransporten - raai J - meetpunt 20

rapport : A 982

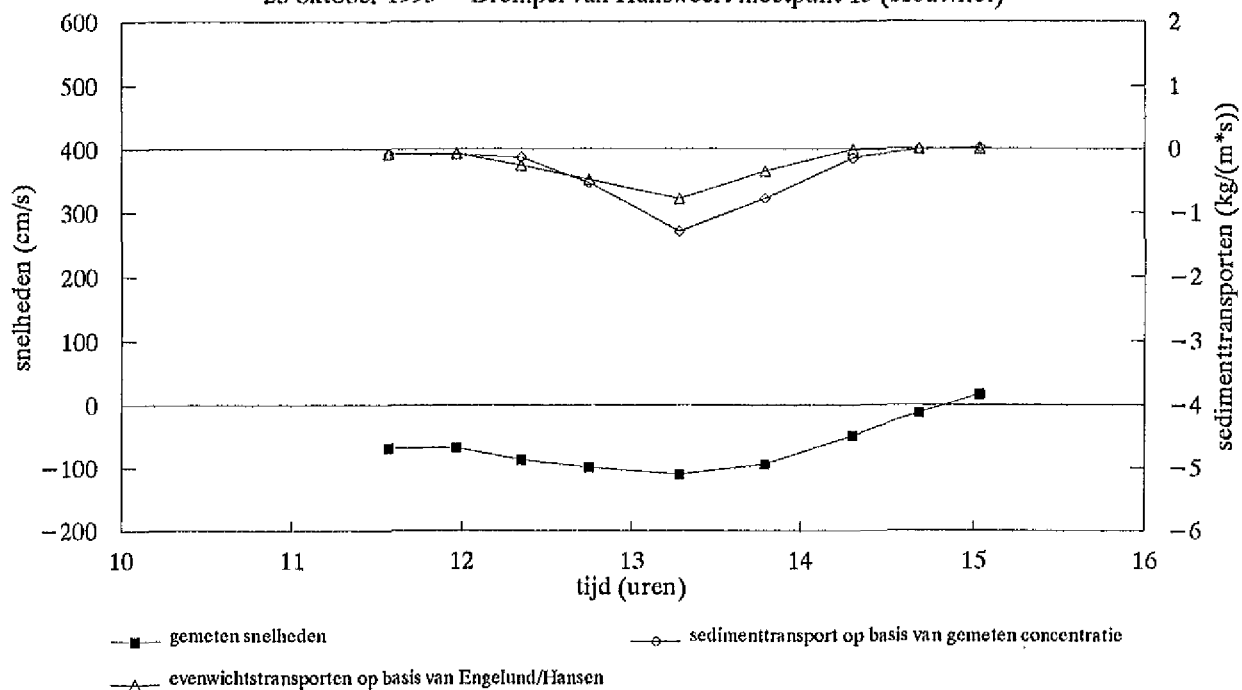
meting : 23 oktober 1995

bijlage : 3.14

berekening : 6 april 1989

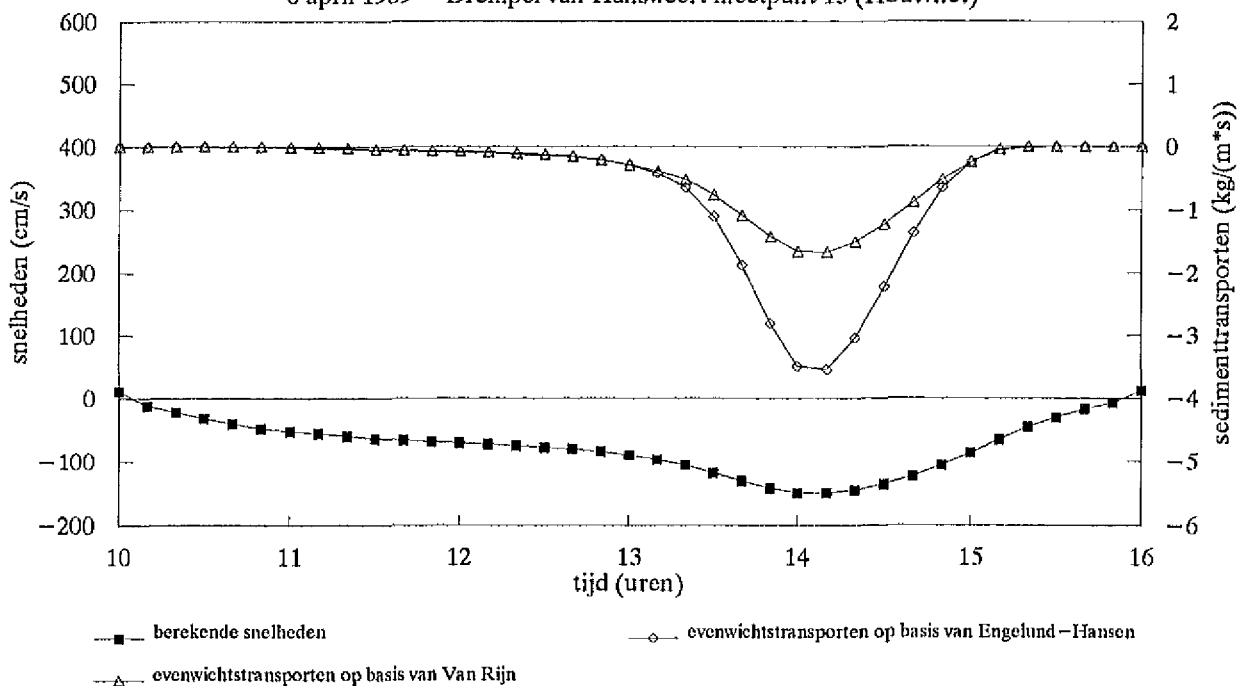
Gemeten snelheden en sedimenttransporten raai F

23 oktober 1995 – Drempel van Hansweert meetpunt 15 (Houtvliet)



Berekende snelheden en sedimenttransporten raai F

6 april 1989 – Drempel van Hansweert meetpunt 15 (Houtvliet)



INGENIEURSBUREAU / **SVASEK B.V.**

Zandtransporten - raai F - meetpunt 15

meting : 23 oktober 1995

berekening : 6 april 1989

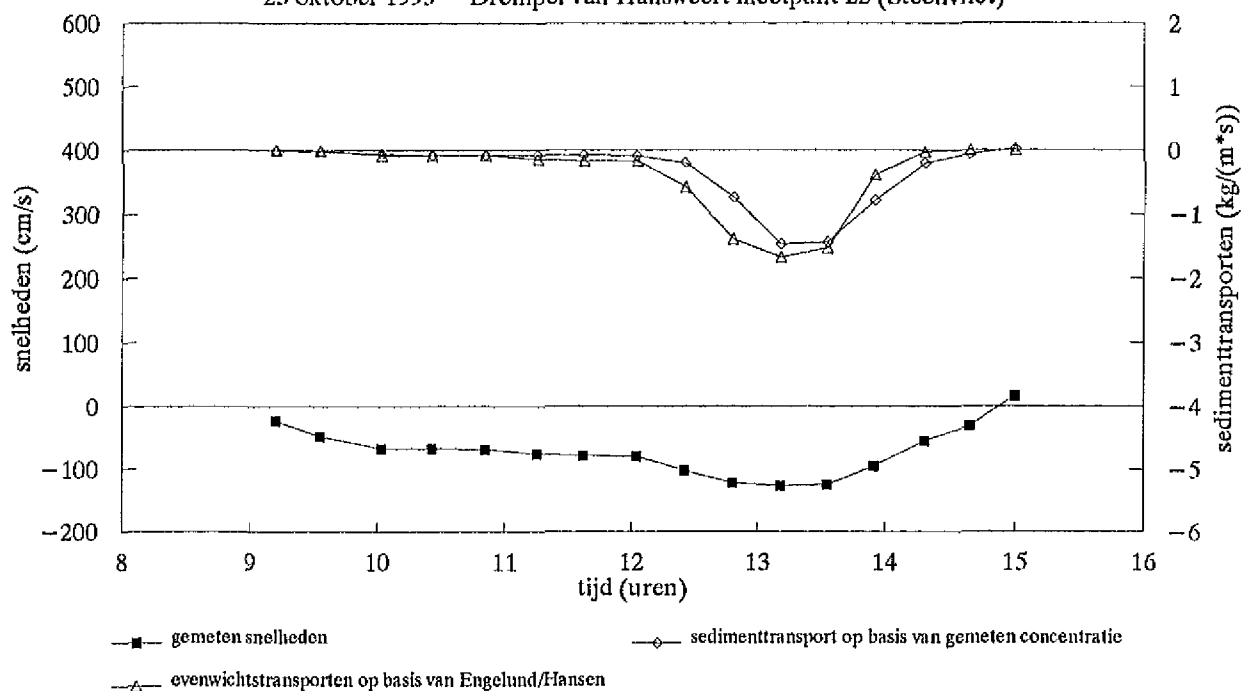
datum : april 1996

rapport : A 982

bijlage : 3. 15

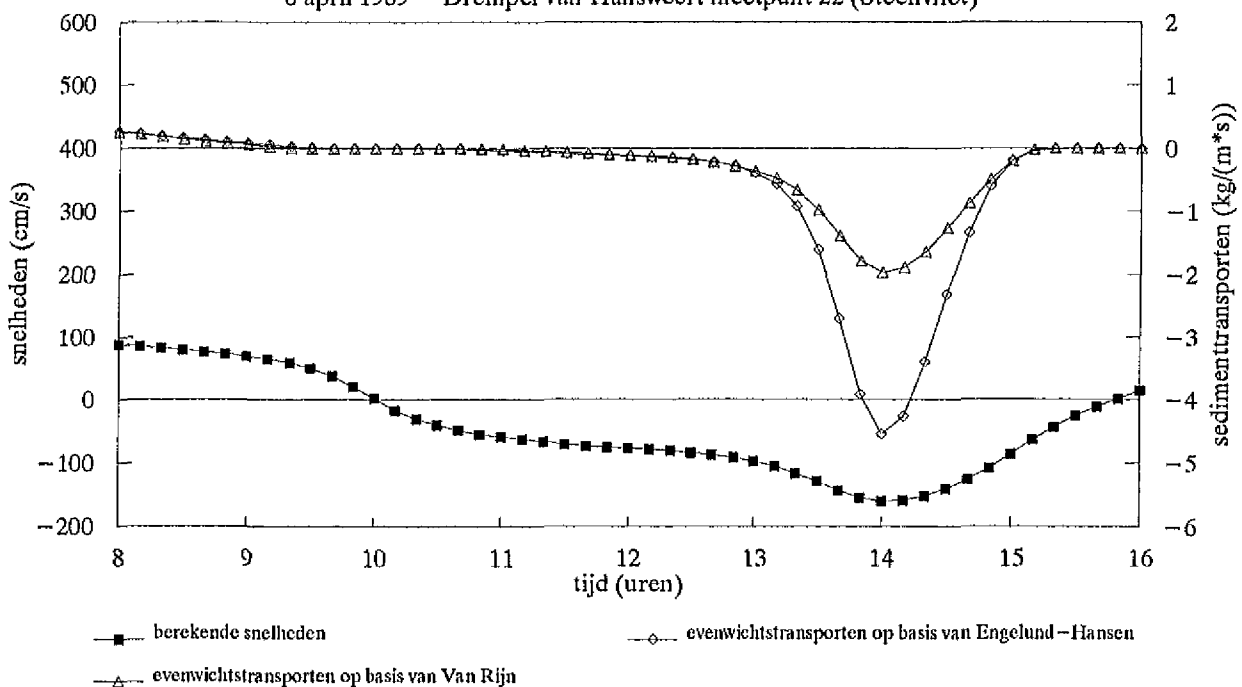
Gemeten snelheden en sedimenttransporten raai F

23 oktober 1995 – Drempel van Hansweert meetpunt 22 (Steenvliet)



Berekende snelheden en sedimenttransporten raai F

6 april 1989 – Drempel van Hansweert meetpunt 22 (Steenvliet)



INGENIEURSBUREAU SVASEK B.V.

Zandtransporten - raai F - meetpunt 22

meting : 23 oktober 1995

berekening : 6 april 1989

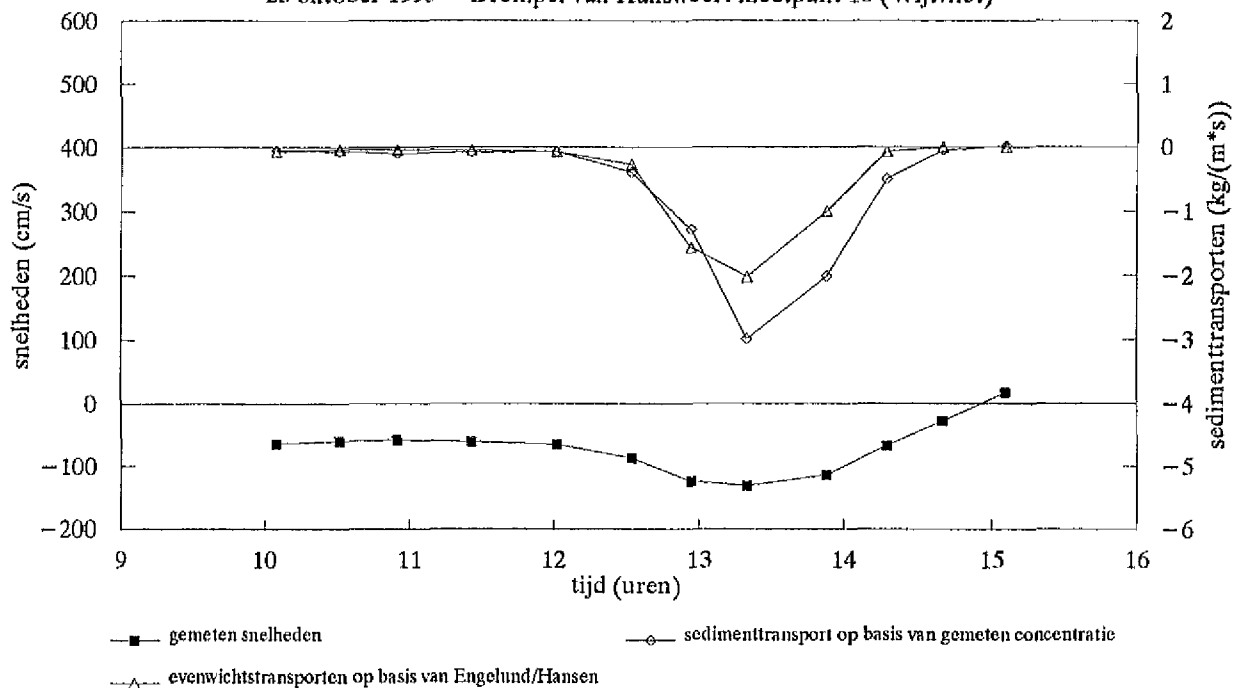
datum : april 1996

rapport : A 982

bijlage : 3.16

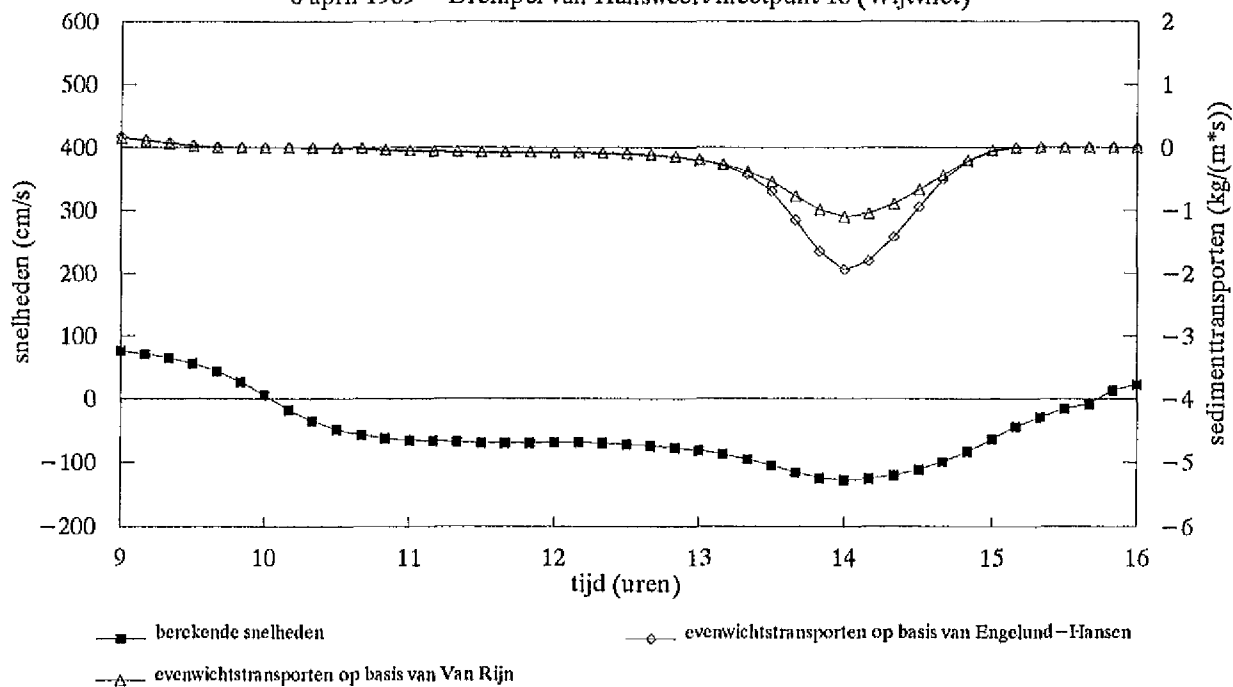
Gemeten snelheden en sedimenttransporten raai G

23 oktober 1995 – Drempel van Hansweert meetpunt 18 (Wijtvliet)



Berekende snelheden en sedimenttransporten raai G

6 april 1989 – Drempel van Hansweert meetpunt 18 (Wijtvliet)



INGENIEURSBUREAU **SVASEK** B.V.

Zandtransporten - raai G - meetpunt 18

meting : 23 oktober 1995

berekening : 6 april 1989

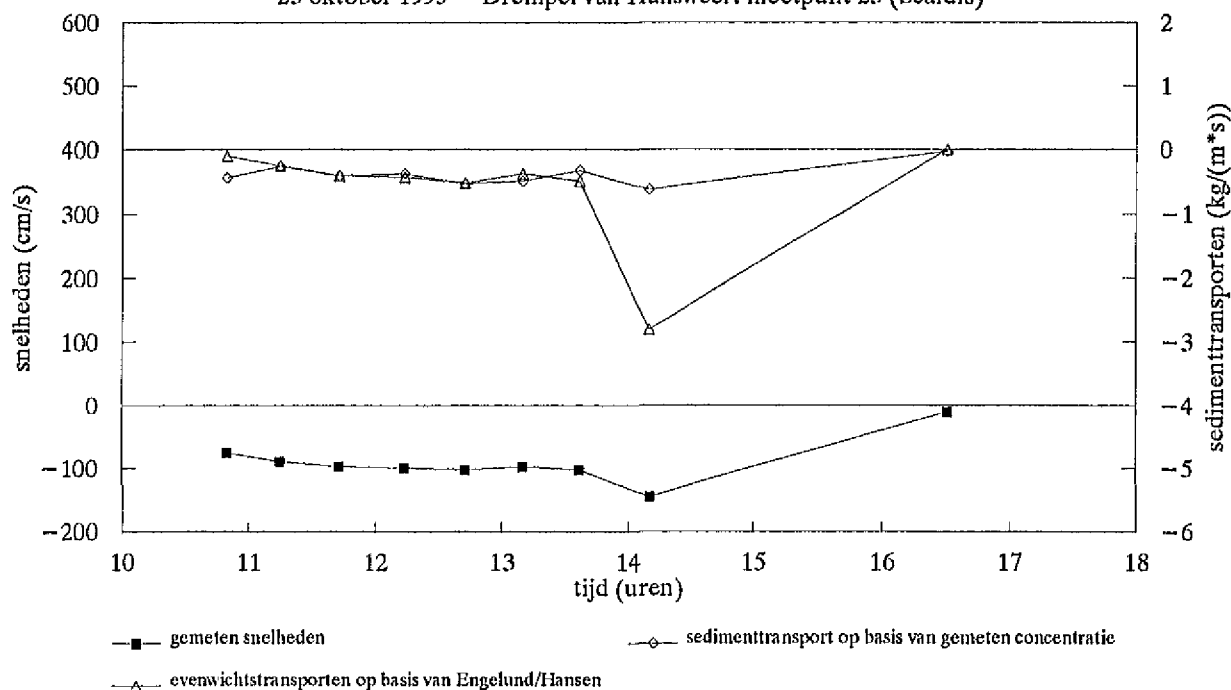
datum : april 1996

rapport : A 982

bijlage : 3 . 17

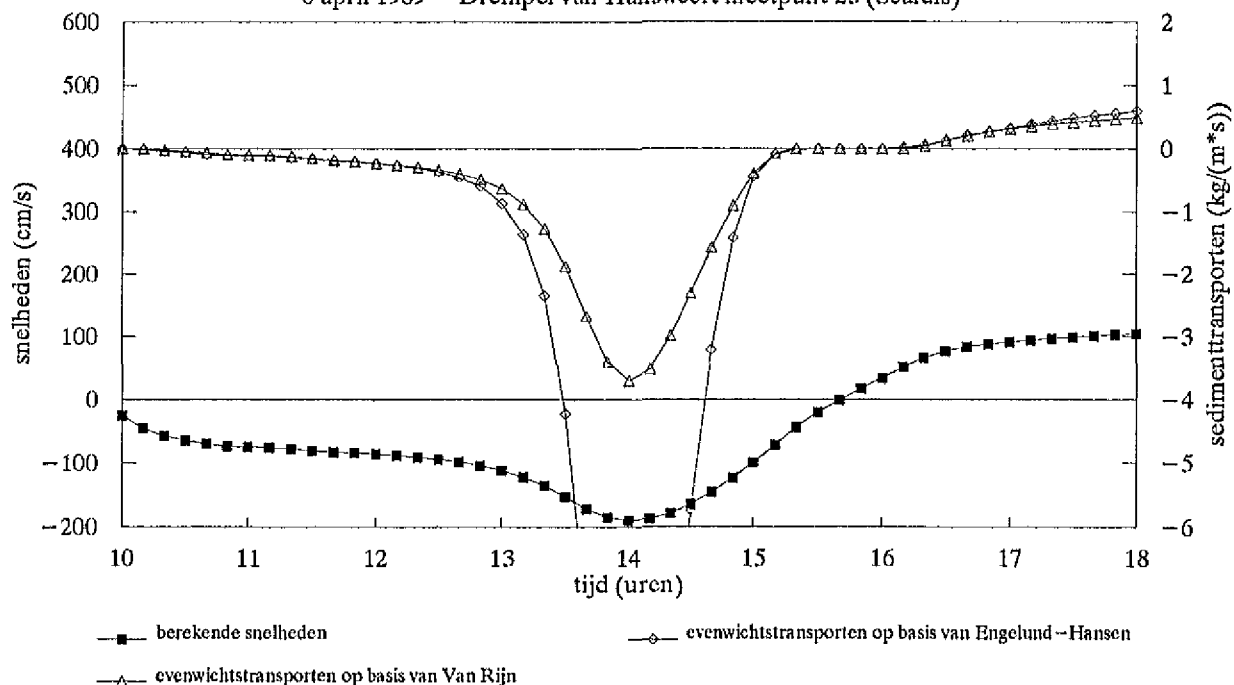
Gemeten snelheden en sedimenttransporten raai G

23 oktober 1995 – Drempel van Hansweert meetpunt 23 (Scaldis)



Berekende snelheden en sedimenttransporten raai G

6 april 1989 – Drempel van Hansweert meetpunt 23 (Scaldis)



INGENIEURSBUREAU / **SVASEK B.V.**

Zandtransporten - raai G - meetpunt 23

meting : 23 oktober 1995

berekening : 6 april 1989

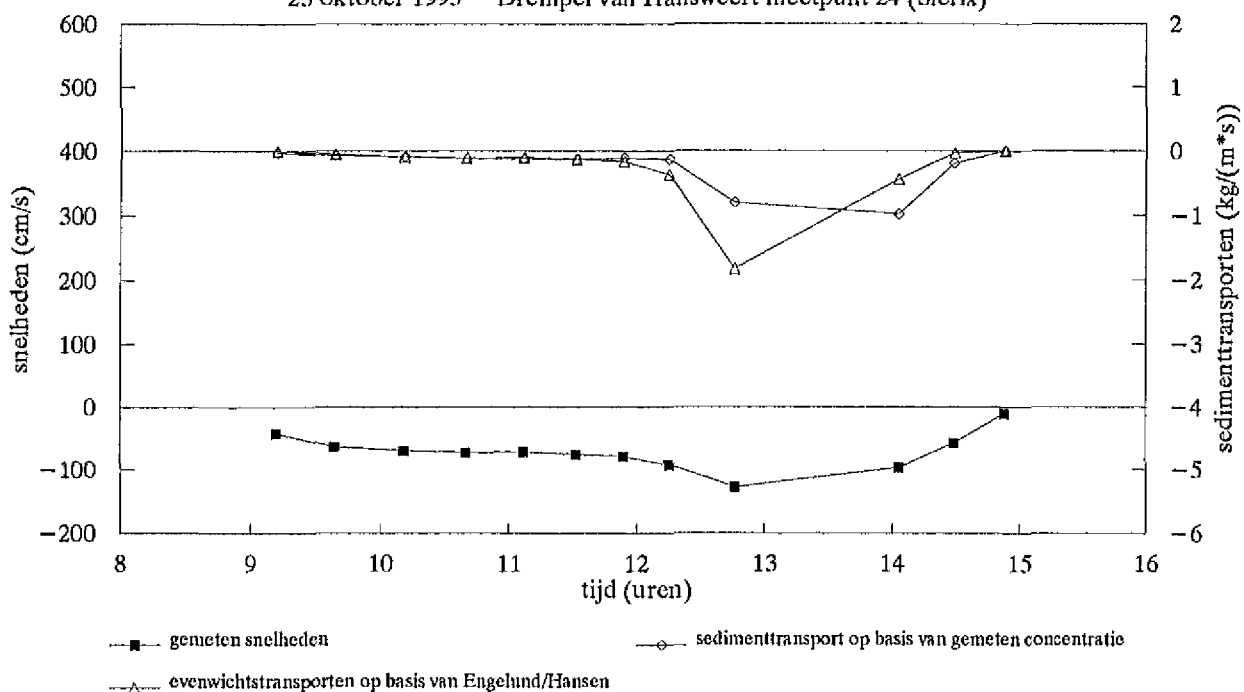
datum : april 1996

rapport : A 982

bijlage : 3. 18

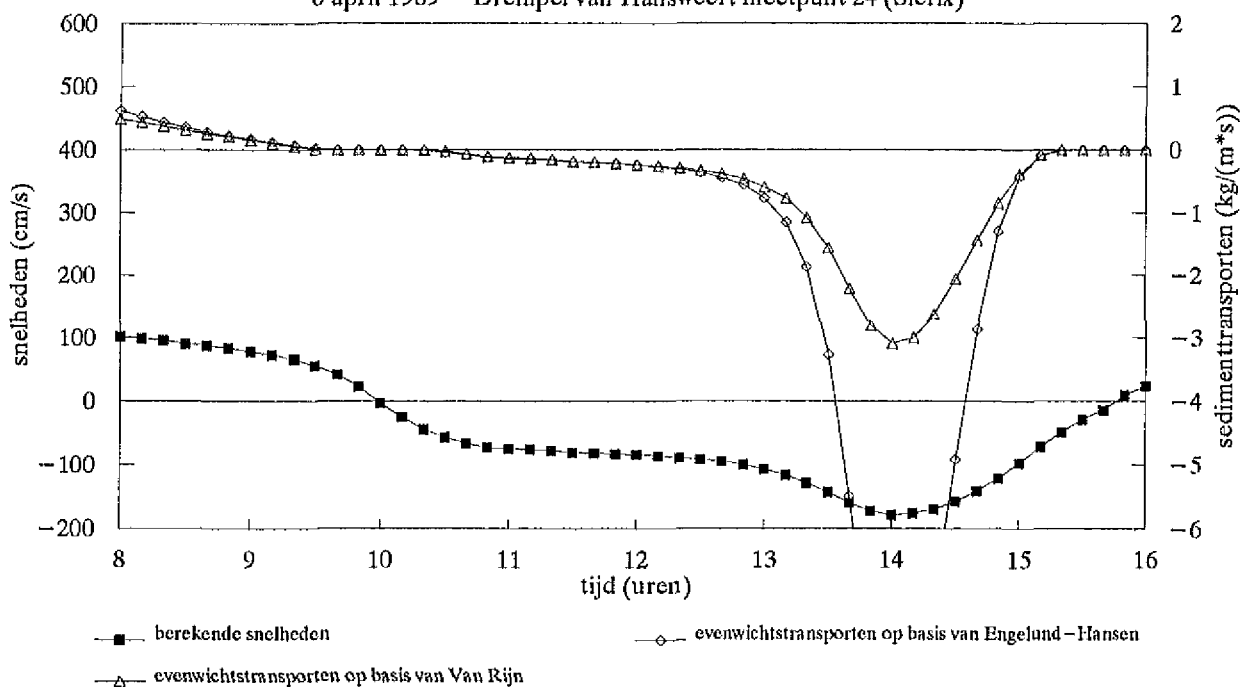
Gemeten snelheden en sedimenttransporten raai G

23 oktober 1995 – Drempel van Hansweert meetpunt 24 (Sierix)



Berekende snelheden en sedimenttransporten raai G

6 april 1989 – Drempel van Hansweert meetpunt 24 (Sierix)



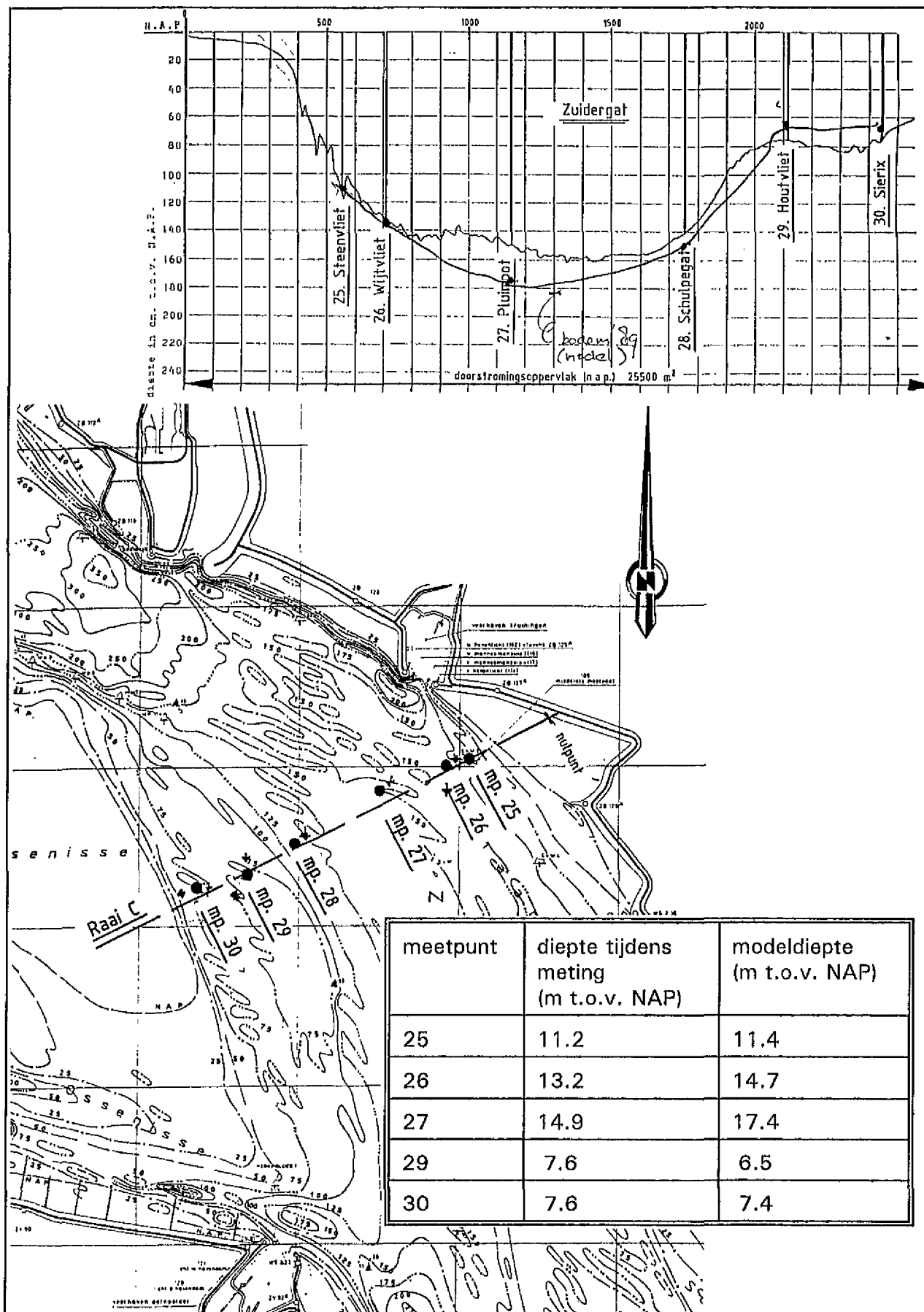
INGENIEURSBUREAU / **SVASEK B.V.**

Zandtransporten - raai G - meetpunt 24
 meting : 23 oktober 1995
 berekening : 6 april 1989

datum : april 1996

rapport : A 982

bijlage : 3.19



INGENIEURSBUREAU / **SVASEK B.V.**

Meetlokatie met bodemligging tijdens de meting
(25 oktober 1995) en modeldieptes

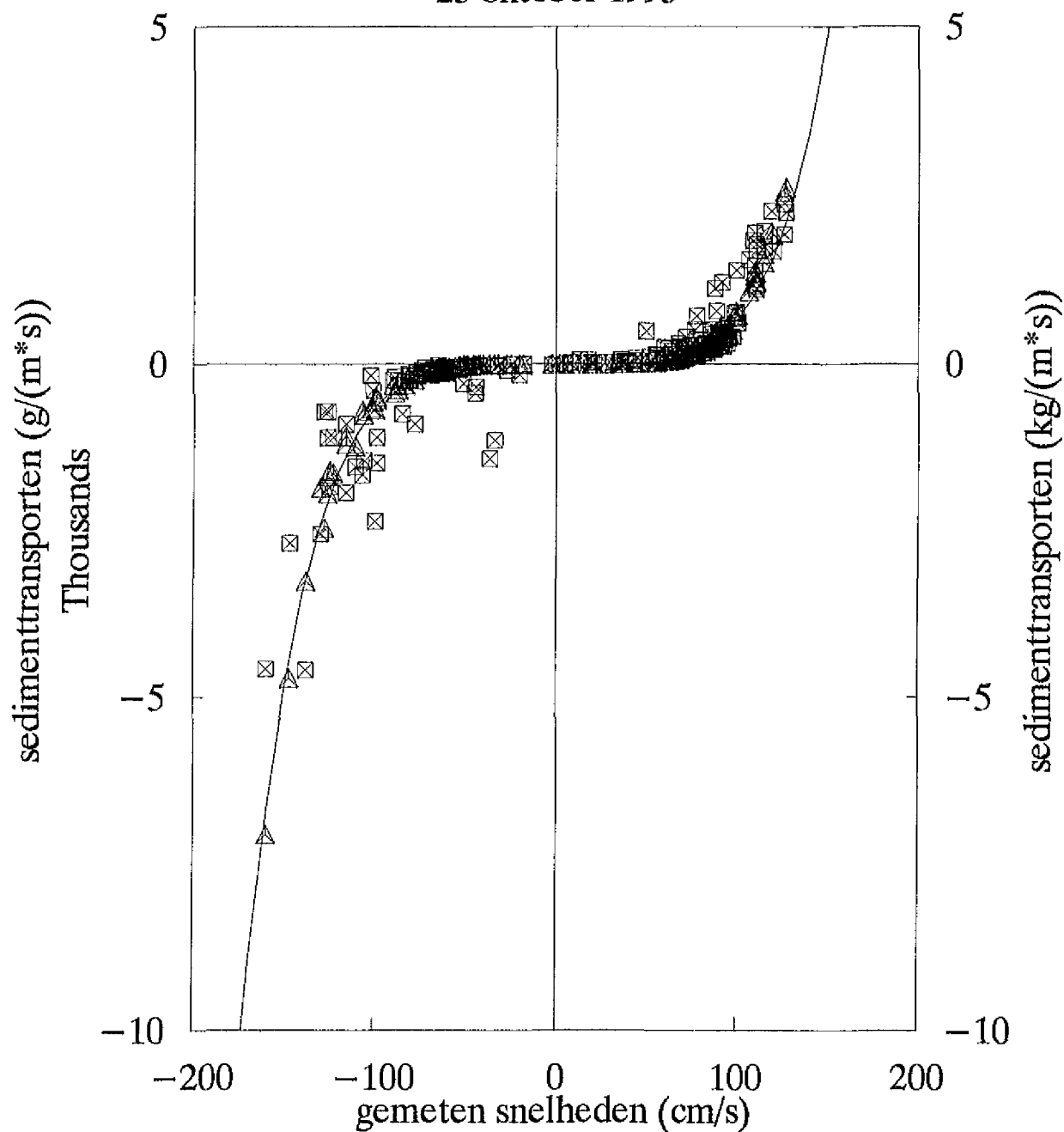
datum : april 1996

rapport : A 982

bijlage : 3.20

verband snelheden en sedimenttransporten

25 oktober 1995



☒ zandtransporten

△ evenwichtstransporten

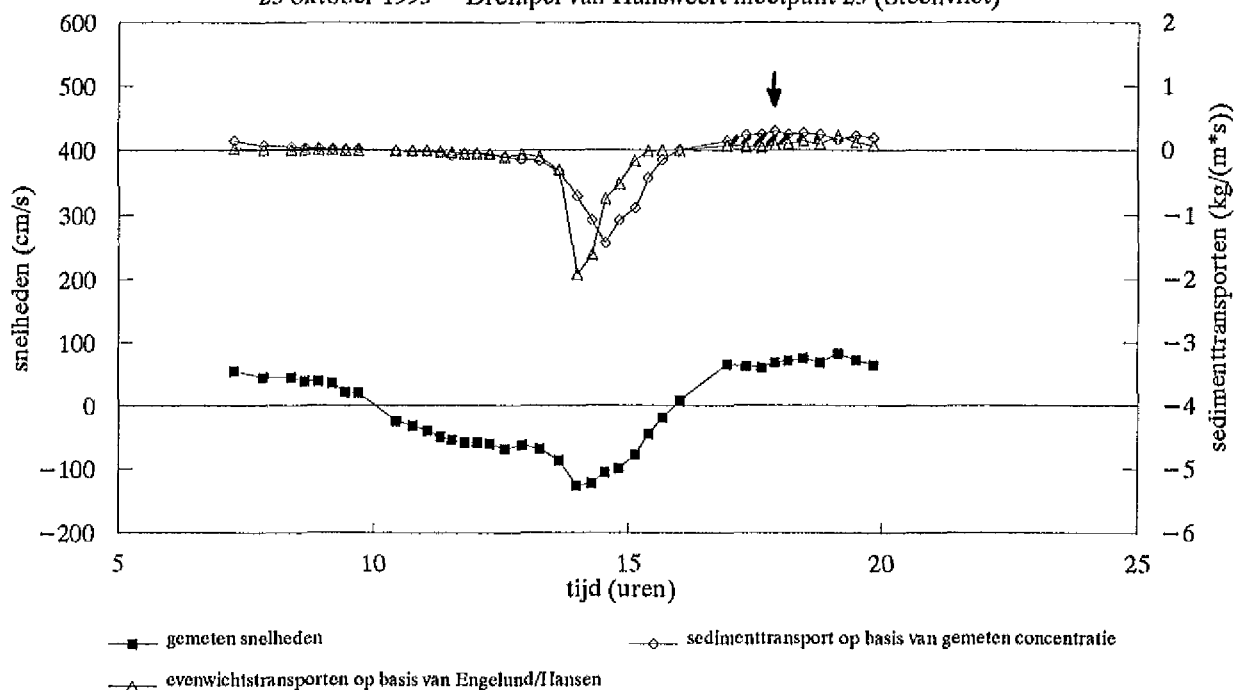
positieve waarden zijn zeewaarts gericht (eb)

De weergegeven lijn is gebaseerd op een gemiddelde Chezy waarde.

INGENIEURSBUREAU / SVASEK B.V.	datum : april 1996
Kalibratie zandtransportberekeningen (25 oktober 1995)	rapport : A 982
	bijlage : 3. 21

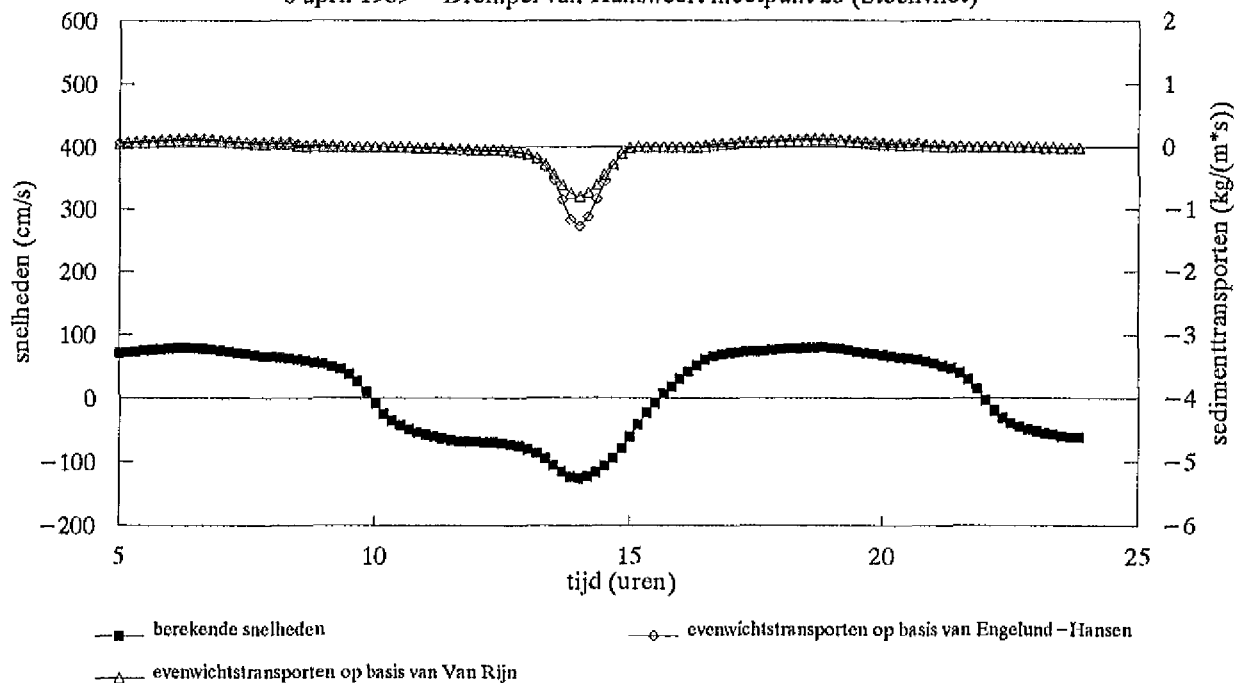
Gemeten snelheden en sedimenttransporten raai C

25 oktober 1995 – Drempel van Hansweert meetpunt 25 (Steenvliet)



Berekende snelheden en sedimenttransporten raai C

6 april 1989 – Drempel van Hansweert meetpunt 25 (Steenvliet)



INGENIEURSBUREAU/SVASEK B.V.

datum : april 1996

Zandtransporten - raai C - meetpunt 25

rapport : A 982

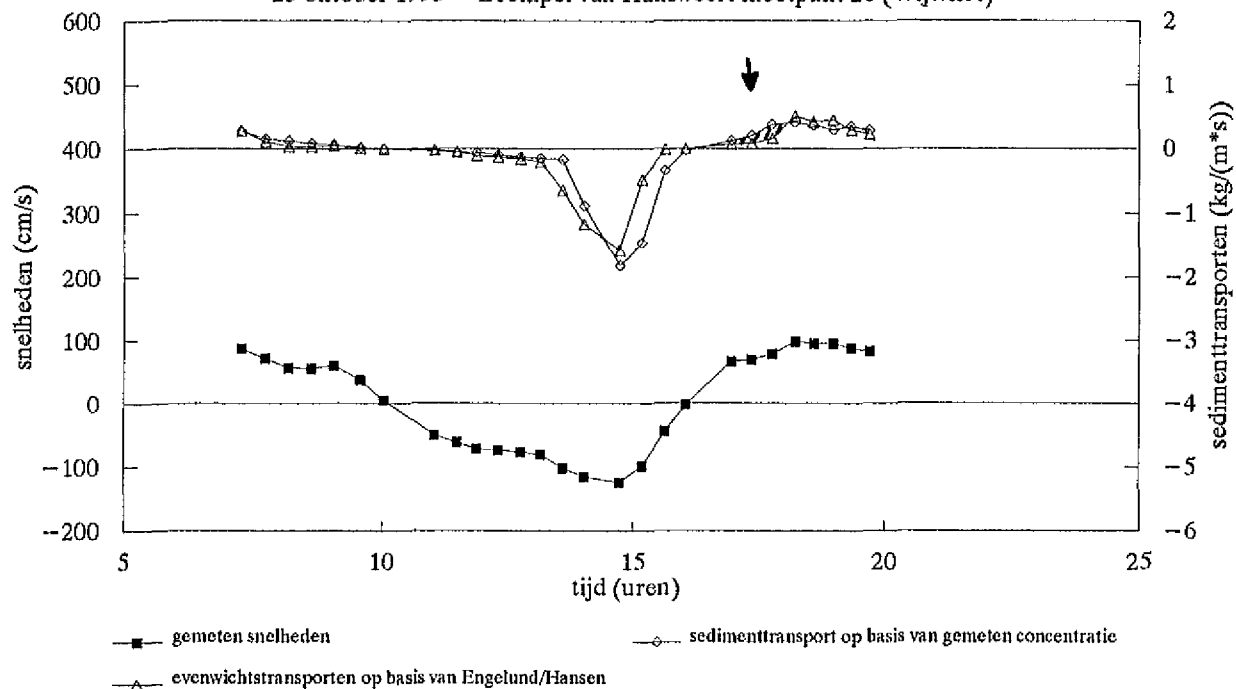
meting : 25 oktober 1995

bijlage : 3.22

berekening : 6 april 1989

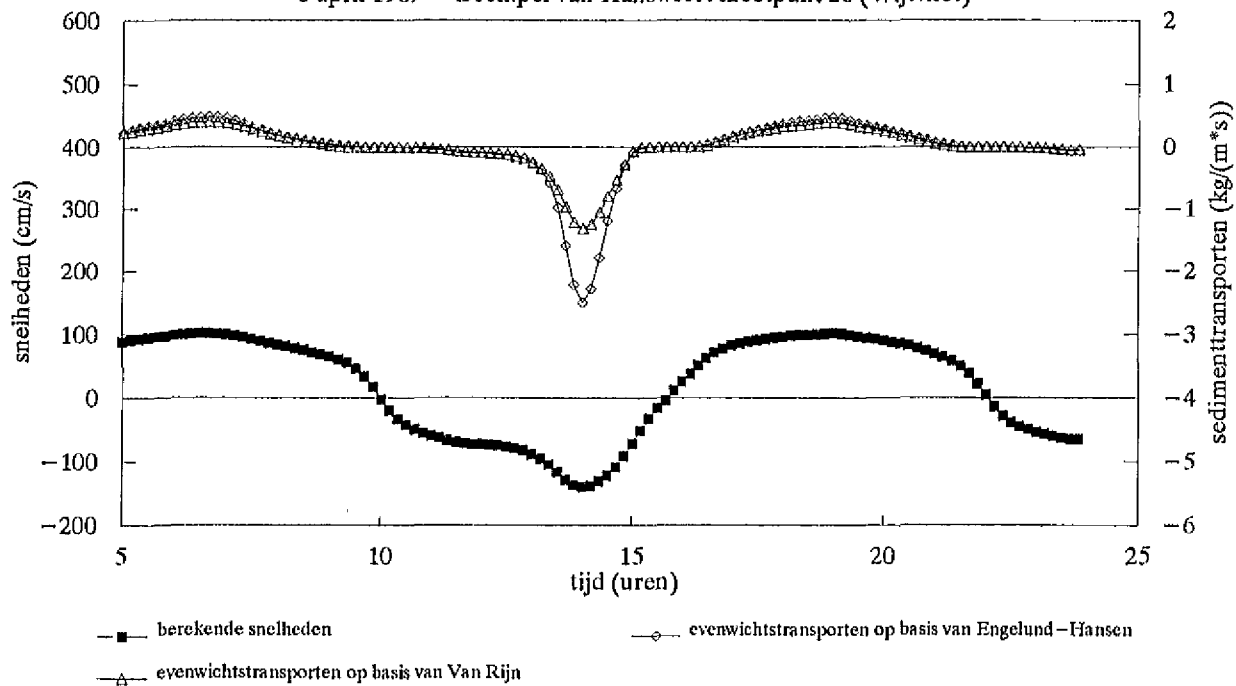
Gemeten snelheden en sedimenttransporten raai C

25 oktober 1995 – Drempel van Hansweert meetpunt 26 (Wijtvliet)



Berekende snelheden en sedimenttransporten raai C

6 april 1989 – Drempel van Hansweert meetpunt 26 (Wijtvliet)



INGENIEURSBUREAU / **SVASEK** B.V.

Zandtransporten - raai C - meetpunt 26

meting : 25 oktober 1995

berekening : 6 april 1989

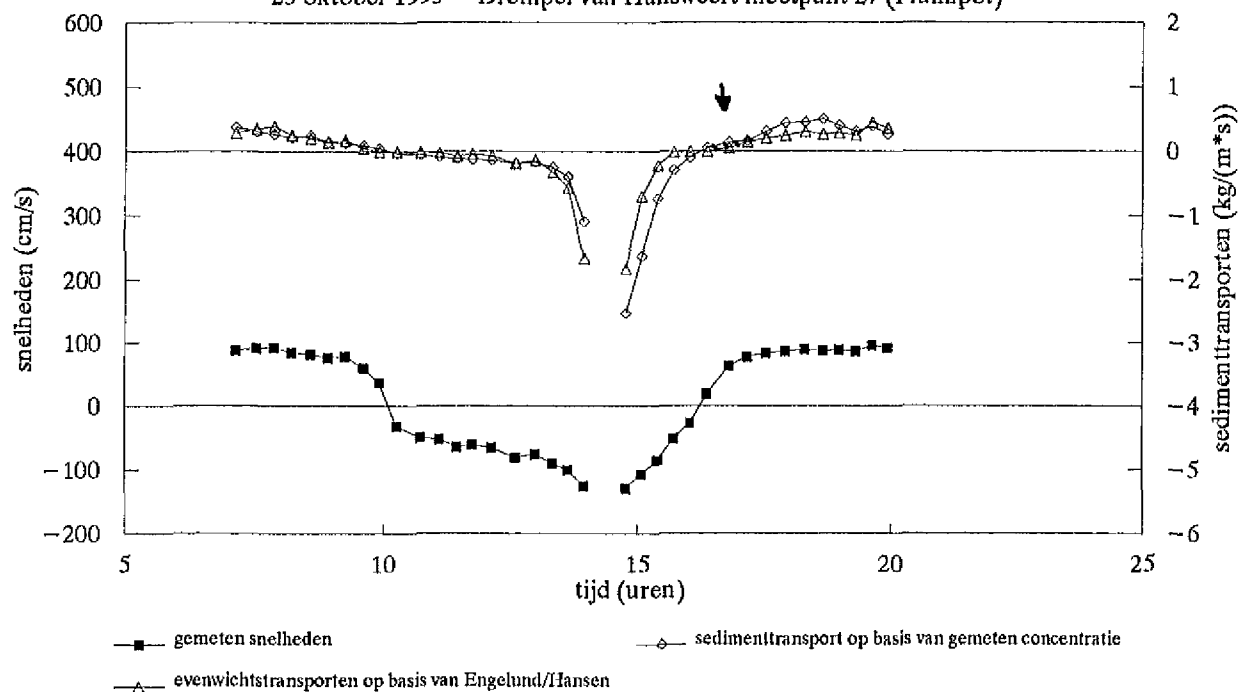
datum : april 1996

rapport : A 982

bijlage : 3.23

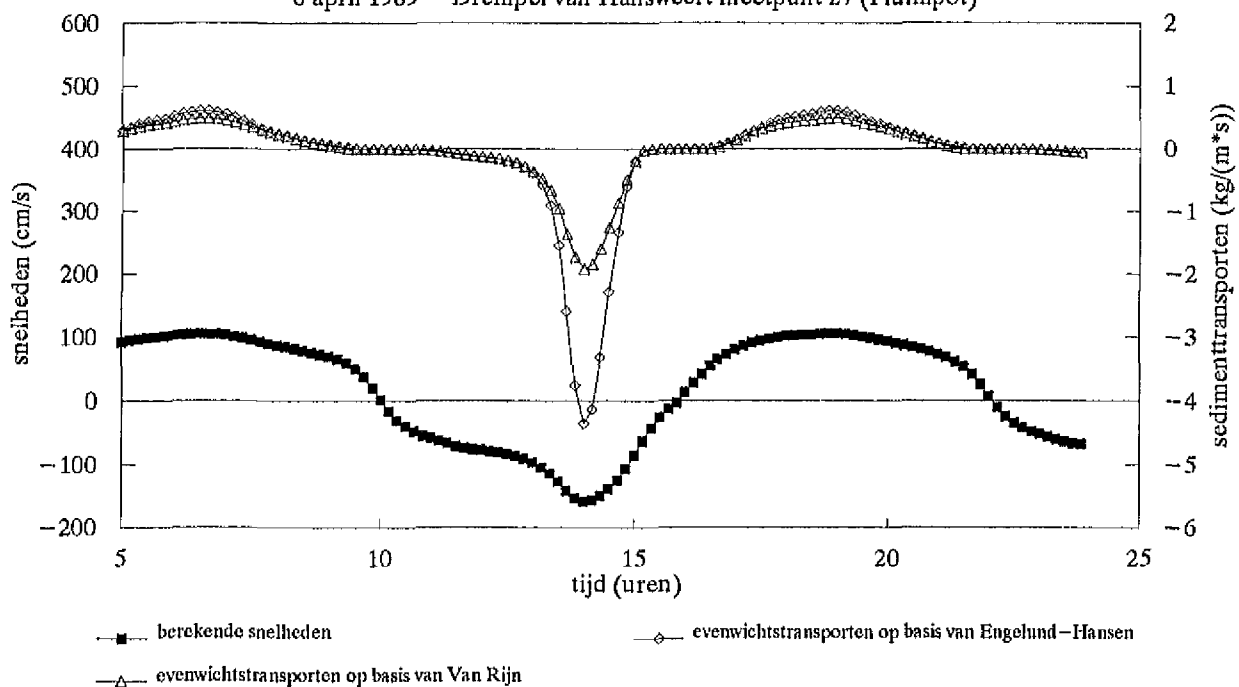
Gemeten snelheden en sedimenttransporten raai C

25 oktober 1995 – Drempel van Hansweert meetpunt 27 (Pluimpot)



Berekende snelheden en sedimenttransporten raai C

6 april 1989 – Drempel van Hansweert meetpunt 27 (Pluimpot)



INGENIEURSBUREAU / **SVASEK B.V.**

Zandtransporten - raai C - meetpunt 27

meting : 25 oktober 1995

berekening : 6 april 1989

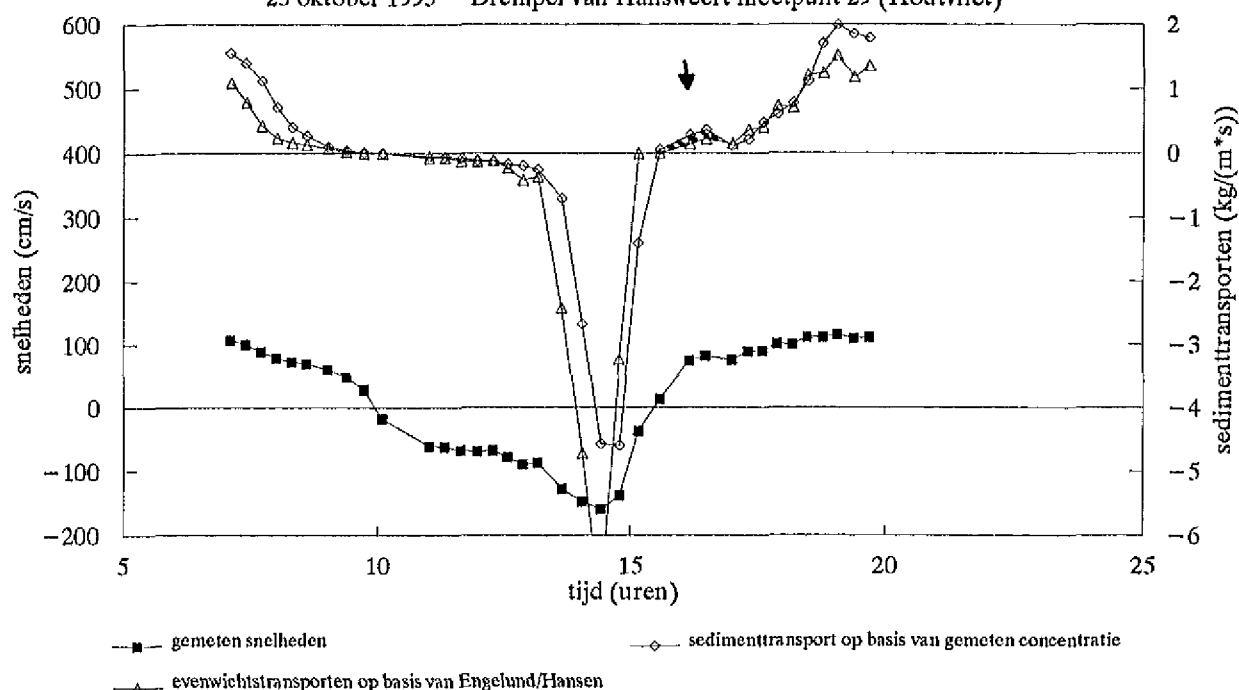
datum : april 1996

rapport : A 982

bijlage : 3.24

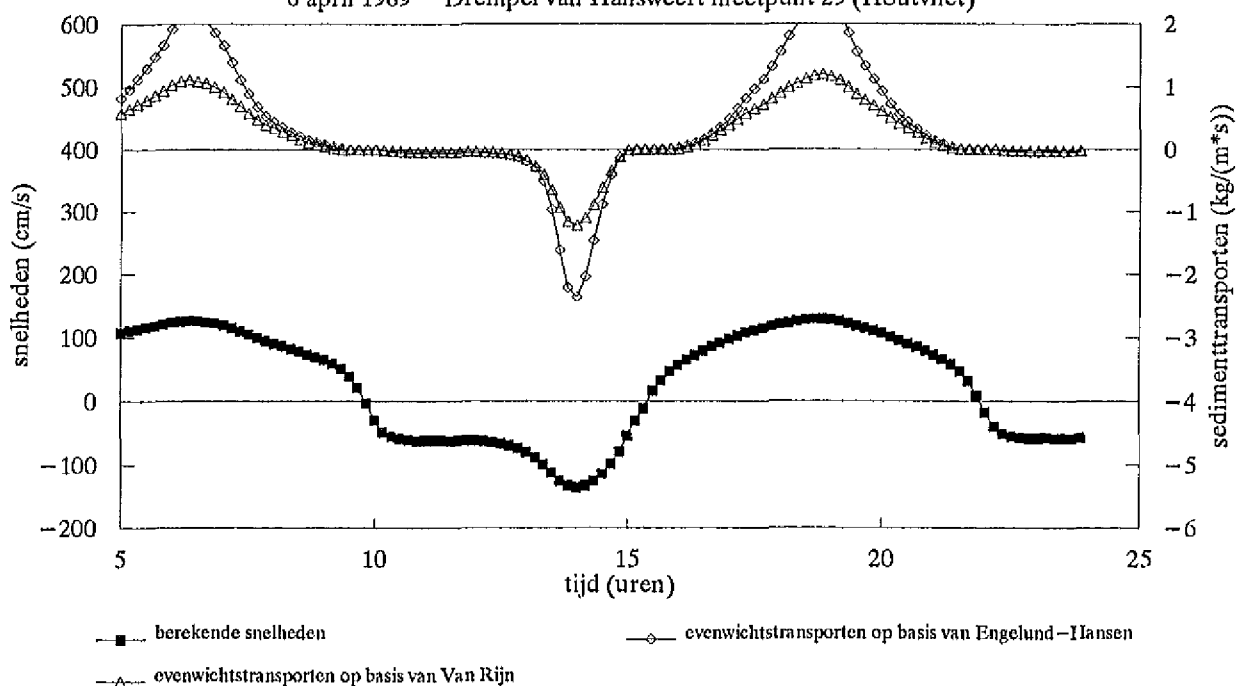
Gemeten snelheden en sedimenttransporten raai C

25 oktober 1995 – Drempel van Hansweert meetpunt 29 (Houtvliet)



Berekende snelheden en sedimenttransporten raai C

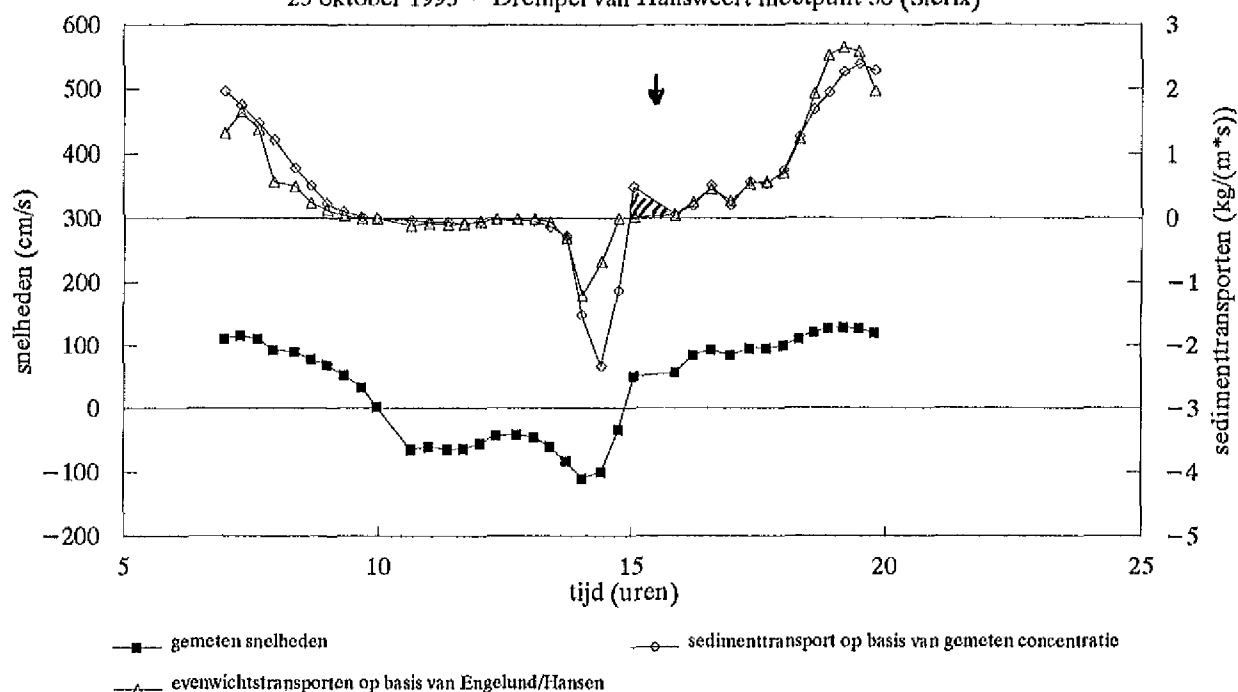
6 april 1989 – Drempel van Hansweert meetpunt 29 (Houtvliet)



INGENIEURSBUREAU / SVASEK B.V.		datum	: april 1996
Zandtransporten - raai C - meetpunt 28		rapport	: A 982
meting : 25 oktober 1995		bijlage	: 3 - 25
berekening : 6 april 1989			

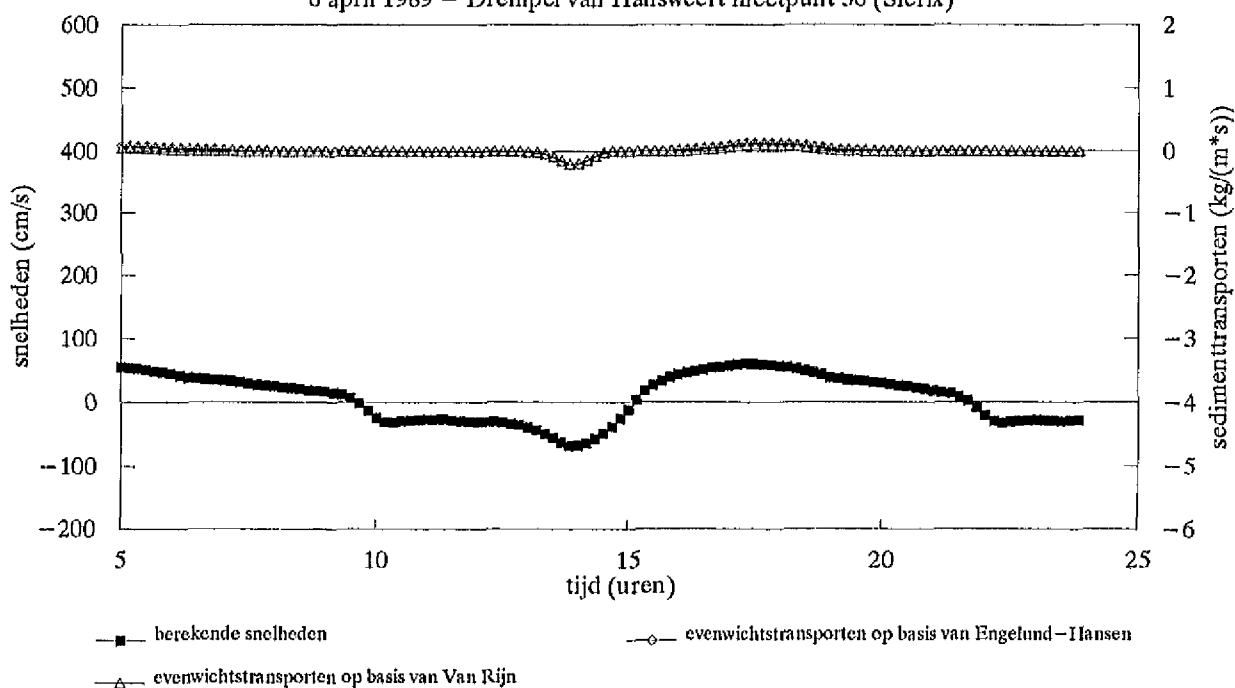
Gemeten snelheden en sedimenttransporten raai C

25 oktober 1995 – Drempel van Hansweert meetpunt 30 (Sierix)



Berekende snelheden en sedimenttransporten raai C

6 april 1989 – Drempel van Hansweert meetpunt 30 (Sierix)



INGENIEURSBUREAU / **SVASEK** B.V.

Zandtransporten - raai C - meetpunt 29

meting : 25 oktober 1995

berekening : 6 april 1989

datum : april 1996

rapport : A 982

bijlage : 3 . 26