

Het gedrag van drempels in de Westerschelde

Beschrijving en analyse van zandtransportmetingen op en rondom de Drempel van Hansweert

mei 1997

F.T.G. Tank

Universiteit Utrecht

Faculteit der Ruimtelijke Wetenschappen

Vakgroep Fysische Geografie

Instituut voor Marien en Atmosferisch Onderzoek (IMAU)

IMAU Rapport 97-08

Rapport voor de Rijkswaterstaat Directie Zeeland
en het Rijksinstituut voor Kust en Zee/RIKZ

Project VERDIEP-vaargeulbeheer

Projectgroep DREMPELS

Voorwoord

De projectgroep DREMPELS is in het voorjaar van 1995 door Directie Zeeland opgestart in het kader van het toen net ondertekende verdrag tussen België en Nederland inzake de verdieping '48/'43 van de Westerschelde. DREMPELS is een gezamenlijk project het Rijksinstituut voor Kust en Zee/RIKZ, de Technische Universiteit Delft (TUD) en de Universiteit Utrecht (UU). Het project wordt in opdracht van de Directie Zeeland uitgevoerd.

Het deel van het onderzoek binnen het project DREMPELS dat uitbesteed is aan de Universiteit Utrecht wordt uitgevoerd bij het RIKZ in Middelburg. Daar vindt ook de dagelijkse begeleiding van het Utrechtse onderzoek plaats.

Het onderzoek naar het morfodynamisch gedrag van drempels in de Westerschelde is een direct vervolg op de in het project OOSTWEST (Vroon et al., 1996) verkregen inzichten in het fysisch systeem van de Westerschelde in het algemeen en het in 1994 gerapporteerde onderzoek naar drempels door het ingenieursbureau Svasek (Blik en Ruijter, 1994) in het bijzonder.

Mijn directe begeleiders ir A. Langerak, drs H. Verbeek (beiden RIKZ) en dr J.H. van den Berg (UU), de begeleidingsgroep bestaande uit dr ir J. van de Graaff en ir M. D. Groenewoud (beiden TUD) en de collega's ir P.G.J. Sistermans, drs C. Storm (beiden Directie Zeeland), ir. M.H.P. Jansen (Ingenieursbureau Svasek) en Koen Wouters (stagiair TUD) wil ik bedanken voor hun inzet en aangename samenwerking in deze fase van het DREMPEL-onderzoek. Tevens wordt stagiair Michiel Schaap bedankt voor het uitvoeren van de WAMORF-berekeningen van de Drempel van Hansweert.

Middelburg, mei 1997

Inhoud

Lijst van tabellen

Lijst van figuren

Lijst van bijlagen

1	Inleiding	1
1.1	Kader	1
1.2	Onderzoeksvragen	2
1.3	Opzet rapportage	2
2	Meetgegevens	3
2.1	Inleiding	3
2.2	Instrument en nauwkeurigheid	3
2.3	Beschikbare gegevens	4
2.4	Beschrijving voorverwerking gegevens	6
2.5	Betrouwbaarheid metingen	6
3	Beschrijving	9
3.1	Inleiding	9
3.2	Diepte geïntegreerd zandtransport	9
3.2.1	Inleiding	9
3.2.2	Verloop tijdens een getijcyclus	9
3.2.3	Maximum transport	12
3.2.4	Vergelijking met de sedimenttransportformule van Engelund- Hansen	15
3.3	Dwarstransport	18
3.3.1	Inleiding	18
3.3.2	Verloop tijdens een getijcyclus	18
3.3.3	Maximum transport	19
3.4	Transportfluxen	21
3.5	Residueel zandtransport door Getij Residuele Stroming	22
3.5.1	Inleiding	22
3.5.2	Analyse	23
3.6	Residueel transport door getij-asymmetrie	25
3.6.1	Inleiding	25
3.6.2	Analyse	25
3.7	Residueel zandtransport door onder- en oververzadiging	26
3.7.1	Inleiding	26
3.7.2	Verwachte patroon onder- en oververzadiging op de noordelijke zijde van de Drempel van Hansweert	27
3.7.3	Methode	28
3.7.4	Vergelijking temporeel en ruimtelijk verloop van de gemeten en berekende concentratieverticalen	31
4	Synthese	33
5	Conclusies	37
	Literatuur	39

Lijst van tabellen

- Tabel 2.1 Meetbereik en nauwkeurigheid van de met de AZTM gemeten variabelen
- Tabel 2.2 Overzicht dwarsmetingen van het zandtransport
- Tabel 2.3 Overzicht langsmetingen van het zandtransport
- Tabel 3.1 Verhouding tussen met de formule van Engelund-Hansen berekend zandtransport en gemeten zandtransport bij maximum zandtransport
- Tabel 3.2 Gemeten getij residuele stroomsnelheden en met Engelund-Hansen berekende residuele zandtransporten van OSM-metingen op de Drempel van Hansweert van 1 t/m 28 oktober 1995.
- Tabel 3.3 Eb- en vloedzandtransporten, totale en residuele zandtransporten (in kg/m) op 25 oktober 1995 per meetpunt in raai C
- Tabel 3.4 Eb- en vloedzandtransporten, totale en residuele zandtransporten (in kg/m) door getij-asymmetrie op 25 oktober 1995 per meetpunt in raai C
- Tabel 3.5 Verwachte temporele, ruimtelijke en gecombineerde onder- en oververzadigingen tijdens verschillende periode in een getijcyclus in de binnenbocht op de noordelijke zijde van de Drempel van Hansweert
- Tabel 3.6 Opgetreden ZR-waarden en geïnterpreteerde opgetreden onder- en oververzadigingen en de verwachte onder- en oververzadigingen tijdens verschillende perioden in een getijcyclus in de binnenbocht op de noordelijke zijde van de Drempel van Hansweert

Lijst van figuren

- Figuur 2.1 Schematische weergave werking AZTM (uit: Van Rijn, 1993)
- Figuur 2.2 Ijklijn zandconcentraties AZTM stroomgoot door het WL en ijklijn pomponsters van een Westerschelde-meting
- Figuur 2.3 Meetlokaties AZTM-metingen op de Drempel van Hansweert: dwarsraaien
- Figuur 2.4 Meetlokaties AZTM-metingen op de Drempel van Hansweert: langsraaien F, G, H en J
- Figuur 2.5 Meetlokaties AZTM-metingen op de Drempel van Hansweert: langsraai M
- Figuur 2.6 Concentratie (A) en snelheidsverticaal (B) van een AZTM-meting voor berekening van het zandtransport
- Figuur 3.1 Raai B'. AZTM. Diepte gemiddelde stroomsnelheid en diepte geïntegreerde zandtransport
- Figuur 3.2 Raai C. AZTM. Diepte gemiddelde stroomsnelheid en diepte geïntegreerde zandtransport
- Figuur 3.3 Raai D_z. AZTM. Diepte gemiddelde stroomsnelheid en diepte geïntegreerde zandtransport
- Figuur 3.4 Raai 5A. Zuidergat. AZTM. Diepte gemiddelde stroomsnelheid en diepte geïntegreerde zandtransport
- Figuur 3.5 Raai 5A. Schaar van Waarde. AZTM. Diepte gemiddelde stroomsnelheid en diepte geïntegreerde zandtransport
- Figuur 3.6 Raai H en J. AZTM. Diepte gemiddelde stroomsnelheid en diepte geïntegreerde zandtransport
- Figuur 3.7 Raai F en G. AZTM. Diepte gemiddelde stroomsnelheid en diepte geïntegreerde zandtransport
- Figuur 3.8 Raai M. AZTM. Diepte gemiddelde stroomsnelheid en diepte geïntegreerde zandtransport
- Figuur 3.9 Diepte geïntegreerde zandtransporten en diepte gemiddelde richtingen tijdens maximum eb en vloed. Dwarsraaien
- Figuur 3.10 Diepte geïntegreerde zandtransporten en diepte gemiddelde richtingen tijdens maximum eb en vloed. Langsraaien F, G, H en J
- Figuur 3.11 Diepte geïntegreerde zandtransporten tijdens maximum eb en vloed en het langsprofiel. Langsraaien F, G, H en J
- Figuur 3.12 Diepte geïntegreerde zandtransporten en diepte gemiddelde richtingen tijdens maximum eb en vloed. Langsraai M
- Figuur 3.13 Diepte geïntegreerde zandtransporten tijdens maximum eb en vloed en het langsprofiel. Langsraai M
- Figuur 3.14 Gemeten en met Engelund-Hansen berekende zandtransporten
- Figuur 3.15 Drempel van Hansweert. Zandtransport volgens de formule van Engelund-Hansen tijdens maximum eb. WAMORF-berekening
- Figuur 3.16 Drempel van Hansweert. Zandtransport volgens de formule van Engelund-Hansen tijdens maximum eb. WAMORF-berekening
- Figuur 3.17 Definitie schets a. transversale transport en b. secundair transport
- Figuur 3.18 Raai C. Dwarstransport op 0.1 z/h boven bodem tijdens getij
- Figuur 3.19 Drempel van Hansweert. Maximum eb. Zandtransporten en richtingen op 3 diepten

- Figuur 3.20 Drempel van Hansweert. Maximum vloed. Zandtransporten en richtingen op 3 diepten
- Figuur 3.21 Raai B'. AZTM. Transversaal en secundair transport tijdens maximum eb
- Figuur 3.22 Raai C. AZTM. Transversaal en secundair transport tijdens maximum eb
- Figuur 3.23 Raai 5A-Zuidergat. AZTM. Transversaal en secundair transport tijdens maximum eb
- Figuur 3.24 Raai B'. AZTM. Transversaal en secundair transport tijdens maximum vloed
- Figuur 3.25 Raai C. AZTM. Transversaal en secundair transport tijdens maximum vloed
- Figuur 3.26 Raai 5A-Zuidergat. AZTM. Transversaal en secundair transport tijdens maximum vloed
- Figuur 3.27 Het verloop van cellen met zandtransporten door secundaire stroming op de Drempel van Hansweert tijdens maximum eb- en maximum vloedtransport
- Figuur 3.28 Drempel van Hansweert. Sedimenttransport (massa) per getijfase in de dwarsraaien
- Figuur 3.29 Schets van de berekening totaal zandtransport per getijfase in een dwarsraai
- Figuur 3.30 Lokaties van de OSM-meetpunten op de Drempel van Hansweert in oktober 1995
- Figuur 3.31 Ligging van de AZTM-meetpunten in dwarsprofiel van raai C op 25 oktober 1995
- Figuur 3.32 Met de formule van Engelund-Hansen berekende zandtransporten door getijasymmetrie in raai C op 25 oktober 1995
- Figuur 3.33 Residueel zandtransport door onder- en oververzadigde getijstromen in de aanloop naar een te ruime drempel (uit: Storm, 1996)
- Figuur 3.34 Lokatie van de punten a, b en c op de noordelijke zijde van de Drempel van Hansweert
- Figuur 3.35 Vorm van de concentratieverticaal bij verschillende suspensiegetallen Z (uit: Van Rijn, 1993)
- Figuur 3.36a Gemeten en met Rouse berekende concentratieverticalen tijdens toenemende en maximum ebstroom in 3 meetpunten in raai M; referentiehoogte $a = 0.01h$
- Figuur 3.36b Gemeten en met Rouse berekende concentratieverticalen tijdens afnemende ebstroom en toenemende vloedstroom in 3 meetpunten in raai M; referentiehoogte $a = 0.01h$
- Figuur 3.36c Gemeten en met Rouse berekende concentratieverticalen tijdens maximum en afnemende vloedstroom in 3 meetpunten in raai M; referentiehoogte $a = 0.01h$
- Figuur 3.37 Tijdstippen gedurende de metingen in raai M waarvan concentratieverticalen zijn gebruikt in de analyse
- Figuur 4.1 Kenmerkende elementen van het zandtransport op en rondom de Drempel van Hansweert tijdens eb
- Figuur 4.2 Kenmerkende elementen van het zandtransport op en rondom de Drempel van Hansweert tijdens vloed

Lijst van bijlagen

- Bijlage A Uitgebreid overzicht zandtransportmetingen op en rondom de Drempel van Hansweert en de bijbehorende getij- en weersomstandigheden
- Bijlage B Diepte schema AZTM-metingen
- Bijlage C Vergelijking diepte gemiddelde stroomsnelheden en -richtingen van AZTM- en ELMAR-metingen
- Bijlage D D_{50} van de korrelgrootte van de meetpunten in de raaien F, G, H en J
- Bijlage E Hoogte van de bodemvormen 100 m stroomopwaarts en -afwaarts van de AZTM-metpunten

1 Inleiding

1.1 Kader

Drempels zijn natuurlijke ondiepten in een geul op de overgang tussen twee bochten in estuaria en meanderende rivieren. In de Westerschelde, gelegen in ZW Nederland, komen drempels voor in de vaarweg naar de zeehaven van Antwerpen. De drempels vormen daar een probleem voor de steeds dieper stekende schepen en moeten daarom door middel van baggerwerk worden verdiept. De onderhoudsbaggerwerkzaamheden, die in het oosten van de Westerschelde geconcentreerd zijn, hebben jaarlijks een omvang van circa 9 Mm³. Met de '48/'43- verdieping, die naar verwachting medio 1997 start en 4 jaar duurt zal het verdiepings- en onderhoudsbaggerwerk een omvang hebben van circa 17 Mm³ per jaar. Na de verdieping zal het onderhoudsbaggerwerk van circa 14 Mm³ per jaar nodig zijn (Huijs, 1997). Deze toename van het bagger- en stortwerk betekent een nog grotere ingreep op de fysische structuur van het estuarium met alle gevolgen van dien voor het ecologisch systeem van de Westerschelde.

In het Beleidsplan Westerschelde (Bestuurlijk Klankbordforum Westerschelde, 1991) is een lange termijn visie opgesteld, waarbij men het natuurlijk karakter van de Westerschelde zoveel mogelijk wil behouden zonder dat daarbij de maatschappelijke functies aangetast worden. Om de druk op het fysisch systeem van de Westerschelde te reduceren worden door Rijkswaterstaat/Directie Zeeland beheersalternatieven, die het baggerbezwaar verminderen bij een voldoende diepe drempel, onderzocht. Dit onderzoek vindt plaats binnen het project VERDIEP, projectgroep DREMPELS. De beheersalternatieven die overwogen worden zijn het verder naar het westen storten van specie; concentratie van de zandwinning in het oosten van de Westerschelde, vergroting van de komberging door ontpolderen, harde maatregelen zoals het aanleggen van (onderwater-) leidammen om de stroming over een drempel te concentreren en morfologisch baggeren en storten. Bij morfologisch baggeren en storten wordt gedacht aan het op overdiepte brengen van de drempel, het midden op de drempel in de vaargeul baggeren en beïnvloeding van de lokale debietverdeling door het volstorten van een nevengeul. Om de gevolgen van deze alternatieven op de baggerinspanning juist te kunnen inschatten, is kennis nodig van het morfologisch gedrag van een drempel.

De doelstelling van het onderzoek naar het gedrag van drempels in de Westerschelde luidt dan ook:

Het verkrijgen van inzicht in de morfodynamische processen die de geometrie van een drempel bepalen, zodanig dat met de verkregen kennis de gevolgen van beheersalternatieven voor baggerwerk voldoende nauwkeurig afgeschat kunnen worden en nieuwe beheersalternatieven kunnen worden gegenereerd.

In dit rapport worden zandtransportmetingen op en rondom de Drempel van Hansweert beschreven en geanalyseerd.

1.2 Onderzoeksvragen

Om inzicht te verkrijgen in het gedrag van drempels in de Westerschelde is een aantal metingen verricht op en rondom de Drempel van Hansweert. De Drempel van Hansweert is een grote drempel in het midden van het Nederlands deel van het estuarium waar jaarlijks $3 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ wordt gebaggerd.

De beschrijving en analyse van de zandtransportmetingen op de Drempel van Hansweert worden geleid door hypothesen die opgesteld zijn in Tank (1996). Het transport van slib ($d_{50} < 50 \mu\text{m}$) wordt niet onderzocht omdat de geringe hoeveelheid slib in de Westerschelde niet van belang is voor het gedrag van de grootschalige morfologie.

Bij de beschrijving en analyse van het zandtransport worden de volgende, algemene, onderzoeksvragen beantwoord:

- * Hoe verloopt globaal het diepte gemiddeld zandtransport op de Drempel van Hansweert tijdens een getijcyclus en meer in detail tijdens maximum eb- en maximum vloedtransport?
- * Hoe verloopt globaal het zandtransport in dwarsrichting nabij de bodem op de Drempel van Hansweert tijdens een getijcyclus en meer in detail tijdens maximum eb- en maximum vloedtransport?
- * Wat is het belang van zandtransport door Getij Residuele Strooming op de drempel?
- * Wat is het belang van zandtransport door getij-asymmetrie op de drempel?
- * Wat is het belang van naijlingseffecten (onder- en oververzadigingen) voor het zandtransport naar de drempel?

N.B. In de onderzoeksvragen is expliciet sprake van maximum zandtransport omdat het tijdstip van maximum zandtransport niet samen valt met de maximum stroomsnelheid.

1.3 Opzet rapportage

In hoofdstuk 2 komen de metingen aan de orde. Het gebruikte meetinstrument, de AZTM, en de nauwkeurigheid daarvan worden beschreven. Er wordt een overzicht gegeven van de metingen, de omstandigheden waarbij deze plaats vonden en de betrouwbaarheid van de zandtransportmetingen wordt ingeschat. In hoofdstuk 3 volgt eerst een beschrijving van het diepte geïntegreerde zandtransport en vervolgens van het zandtransport in dwarsrichting en wordt het belang van zandtransport door Getij Residuele Strooming, getij-asymmetrie en onder- en oververzadiging onderzocht. Ook worden in hoofdstuk 3 de zandtransportmetingen vergeleken met het sedimenttransportmodel van Engelund-Hansen. In hoofdstuk 4 staat een synthese en in hoofdstuk 5 volgen tenslotte de belangrijkste conclusies.

2 Meetgegevens

2.1 Inleiding

Het merendeel van de metingen van het zandtransport op en rondom de Drempel van Hansweert vond plaats gedurende twee meetperioden in oktober-november 1995 en in april-mei 1996. Voor deze zandtransportmetingen is gebruik gemaakt van de AZTM.

In dit hoofdstuk wordt eerst de wijze van meten met de AZTM en de nauwkeurigheid van het instrument nader toegelicht. Vervolgens volgt een overzicht van de beschikbare metingen en de getij- en weersomstandigheden waaronder de metingen zijn verricht. Het hoofdstuk eindigt met een beschrijving van de voorverwerking van de gegevens en een inschatting van de betrouwbaarheid van de metingen.

2.2 Instrument en nauwkeurigheid

AZTM

De AZTM (Akoestische ZandTransport Meter) werkt volgens een akoestisch principe. Het geluidssignaal van de AZTM wordt door de gesuspenseerde zanddeeltjes in een bepaald (water-)volume verstrooid. Uit de amplitude en de frequentie-verschuiving van het verstrooide signaal kan de concentratie en de snelheid van de zanddeeltjes gelijktijdig en continu berekend worden (figuur 2.1). Uit de concentratie en de snelheid wordt het zandtransport berekend. De AZTM is gemonteerd aan een meetvis. Behalve een AZTM zit er ook een magnetisch kompas en een drukdoos (om de diepte ten opzichte van het wateroppervlak te berekenen) en een echolood (om de hoogte boven de bodem vast te stellen) aan de meetvis. Het geheel heeft een massa van 200 kg.

Vanaf een boot wordt met behulp van een lier met de AZTM een verticaal gemeten. Een verticaal wordt van onder naar boven volgens een vast meetschema gemeten. Een verticaal bestaat, afhankelijk van de diepte, uit 3 tot 7 meetpunten, waarbij de dichtheid van de meetpunten nabij de bodem het hoogst is (bijlage B). Op elke diepte wordt 2 minuten gemeten. De meting van één verticaal duurt een half uur. Via een kabel worden de gegevens op het schip digitaal opgeslagen.

Volgens het meetschema bevindt de onderste meetdiepte zich op 0.2 m boven de bodem. Daarvoor moet de AZTM op de bodem gezet worden. Dit is echter niet bij elke verticaal gebeurd. Als een AZTM op de bodem wordt gezet is deze gevoeliger voor schade door bewegingen van het schip die via de kabel worden overgebracht.

De frequentie van het geluidssignaal van de AZTM is 4.5 MHz. Bij deze frequentie is de AZTM het minst gevoelig voor de korrelgrootte en ongevoelig voor de slibfractie ($d_{50} < 50 \mu\text{m}$) (Van Rijn, 1993). Als het aandeel slib in de sediment $< 5 \%$ is, is de AZTM ongevoelig voor het slib (Anonymous, 1985). Dit is gebleken uit proeven in een stroomgoot met slib met een $d_{50} = 5 \mu\text{m}$ en zand met een $d_{50} = 150 \mu\text{m}$. Bij grotere aandelen slib wordt de ongevoeligheid

voor de fractie < 50 µm door de Meetdienst Zeeland betwijfeld (mond. med. Jan van Dijke). Dit vermoeden wordt veroorzaakt doordat de ijklijnen van metingen in de Westerschelde, waarbij zandconcentraties van pompmonsters tegen de concentraties van de AZTM zijn uitgezet (waarbij de lijn door de oorsprong is gedwongen), vaak te vlak zijn in vergelijking met de ijklijnen van metingen in de stroomgoot met puur zand (figuur 2.2). In de Westerschelde komt de fijne fractie in redelijk grote concentraties voor. De Meetdienst Zeeland vermoedt dan ook dat de AZTM wel degelijk gevoelig is voor de fractie < 50 µm. Op het moment van schrijven van dit rapport (januari 1997) wordt, in opdracht van de Meetdienst Zeeland, door de bouwers van de AZTM, het Waterloopkundig Laboratorium, onderzoek gedaan naar de gevoeligheid voor de fractie < 50 µm van de AZTM. De invloed van de temperatuur en de saliniteit is klein (Van Rijn, 1993). Deze variabelen worden echter wel gemeten en de meting wordt achteraf hiervoor gecorrigeerd.

	Meetbereik	Nauwkeurigheid
Korrelgrootte	50 - 500 µm; optimaal: 80 - 210 µm	n.v.t.
Concentratie, transport	50 - 5000 mg/l	± 5% van het meetbereik Bij onbekende korrelafmetingen: ± 30% van het meetbereik
Snelheid	0.1 - 5 m/s; bij concentraties < 20 mg/l zijn de snelheden onbetrouwbaar	± 2% van het meetbereik
Richting	360 °, t.o.v. magnetisch Noorden	± 2.8 °
Diepte (drukdoos)	60 m	0.1 m
Bodemligging (echolood)	50 m	0.1 m

Tabel 2.1 Meetbereik en nauwkeurigheid van de met de AZTM gemeten variabelen (bron: Waterloopkundig Laboratorium, 1983; Anonymous, 1985).

2.3 Beschikbare gegevens

Het zandtransport op de Drempel van Hansweert is met de AZTM gemeten in een aantal dwars- en langsvaarten. De lokaties van de meetvaarten zijn in de figuren 2.3, 2.4 en 2.5 weergegeven. De metingen zijn verricht tijdens verschillende getij- en weersomstandigheden. In onderstaande tabellen worden per type meting de gebruikte instrumenten, en de getij- en weersomstandigheden samengevat. Een uitvoeriger overzicht van getij- en weersomstandighe-

den is te vinden in bijlage A. Tijdens alle AZTM metingen zijn gelijktijdig stroomsnelheidsmetingen met de ELMAR verricht die in Tank (1997) zijn beschreven.

Raai	Datum	Instrument	GC (-)	Duur (uur)	Weer
B'/Dz	170496	AZTM	1.18	13	ZO, W, 4 Bft
C	251095	AZTM	1.14	13	ZW, Z, 6-3 Bft
5A	14/150695	AZTM	1.19	13	NW, W, 4 Bft

Tabel 2.2 Overzicht dwarsmetingen van het zandtransport
GC = getijcoëfficiënt afgeleid uit waterstanden van het waterstandsstation Hansweert

Raai	Datum	Instrument	GC (-)	Duur (uur)	Weer
F	231095	AZTM	1.07	7	Z, ZZO, 4 Bft
G*	231095	AZTM	1.07	7	Z, ZZO, 4 Bft
H*	231095	AZTM	1.07	7	Z, ZZO, 4 Bft
J	231095	AZTM	1.07	7	Z, ZZO, 4 Bft
M	160996	AZTM	1.11	13	O, ONO, 2-3 Bft

Tabel 2.3 Overzicht langsmetingen van het zandtransport
* = zowel in raai G en raai H is een meetpunt afkomstig van eerdere metingen tijdens andere getijomstandigheden (zie bijlage A)

Dwarsmetingen

De dwarsraaien liggen zoveel mogelijk loodrecht op de geulmorfologie (figuur 2.3). De getijcoëfficiënt van een gemiddeld springtij in Hansweert is 1.13. De getijcoëfficiënt is het quotiënt van de tijdens de meting opgetreden getijslag en de gemiddelde getijslag tussen 1980 en 1990 van het waterstandsstation. De meeste dwarsmetingen zijn uitgevoerd tijdens sterk ontwikkelde springtijden (tabel 2.2).

Langsmetingen

De metingen in de raaien F, G, H en J zijn gecombineerde metingen, waarbij de raaien F en G gelijktijdig tijdens vloed aan de noordelijke zijde van de Drempel van Hansweert zijn gemeten (figuur 2.4). De metingen in de raaien H en J vonden plaats tijdens eb aan de zuidelijke zijde

van de drempel. De metingen vonden plaats tijdens een matig ontwikkeld springtij. De metingen in raai M werden verricht op de noordelijke zijde van de drempel in de binnenbocht (figuur 2.5) gedurende een hele getijcyclus, tijdens een gemiddeld springtij.

2.4 Beschrijving voorverwerking gegevens

AZTM

De gemeten zandconcentraties zijn gecorrigeerd met de ijklijn van het instrument. De ijklijnen zijn opgesteld door het Waterloopkundig Laboratorium te Delft. De ijking vond plaats in zoet water (saliniteit 0 ‰) bij een temperatuur van 15°C waarbij de geluidssnelheid 1464.3 m/s is. De Kt-factor, een omrekeningsfactor die afhankelijk is van saliniteit en temperatuur, is onder deze omstandigheden 1.0. De ijklijnen zijn herleid naar omstandigheden tijdens de veldmetingen die in bijlage A zijn opgesomd. De Kt-factor in bijlage A is afkomstig uit een door het Waterloopkundig Laboratorium opgestelde tabel.

De ijklijnen van de AZTM zijn gebaseerd op 6 pompmonsters die tijdens de meting genomen zijn. Het bereik van de pompmonsters ligt tussen de 250 en 900 mg/l. De ijklijnen zijn door de oorsprong 'gefit' en hebben hoge correlatie-coëfficiënten ($R = 0.99$).

Diepte geïntegreerde zandtransporten zijn berekend door op een bepaalde hoogte in de verticaal de concentratie te vermenigvuldigen met de stroomsnelheid. Onder in de verticaal wordt lineair geëxtrapoleerd naar een transport van 0 kg/m².s (figuur 2.6). Bovenin de verticaal wordt lineair geëxtrapoleerd naar het oppervlak waarbij wordt aangenomen dat de stroomsnelheid aan het wateroppervlak gelijk is aan die in het hoogste meetpunt en dat de zandconcentratie aan het oppervlak gelijk is aan 0 mg/l. Het diepte geïntegreerde transport is vervolgens berekend door de integraal van het product van de stroomsnelheid en zandconcentratie over de diepte te berekenen.

2.5 Betrouwbaarheid metingen

Literatuur

Uit veldmetingen op de Rijn blijkt dat de resultaten van de AZTM gemiddeld genomen vrij redelijk met metingen met de PFS (pompmonsters) en de Delfste Fles 2 overeenstemmen (Kamphuis, 1988). Bij individuele metingen kunnen resultaten van de verschillende instrumenten elkaar sterk ontlopen. De resultaten van de verschillende metingen wijken nabij de bodem het meest af. Uit veldmetingen in de Oosterschelde blijkt dat in ieder geval bij concentraties tot 120 mg/l de AZTM- en pompresultaten elkaar weinig ontlopen (Anonymous, 1985).

Onderlinge vergelijking verschillende meetpunten

De betrouwbaarheid van de AZTM-metingen is ingeschat door de diepte gemiddelde stroomsnelheden en diepte geïntegreerde zandtransporten in de verschillende meetpunten in een raai met elkaar te vergelijken.

In de figuren 3.1 tot en met 3.8 staat voor de volledige meting per meetpunt de diepte gemiddelde stroomsnelheden en diepte geïntegreerde zandtransporten weergegeven. Geconcludeerd kan worden dat de AZTM-metingen consistent zijn.

Vergelijking AZTM - ELMAR

Om een inschatting te krijgen van de betrouwbaarheid van de door de AZTM gemeten stroomsnelheden en stroomrichtingen zijn deze vergeleken met de (vrijwel) simultaan op (vrijwel) dezelfde lokatie gemeten stroomsnelheid en -richting van de ELMAR (bijlage C). Deze vergelijking is gemaakt voor de diepte gemiddelde waarden tijdens een getij. Deze vergelijking is verricht voor de metingen in dwarsraai C en de langsraaien F, G, H en J om een inschatting van de betrouwbaarheid te krijgen.

Geconcludeerd wordt dat de diepte gemiddelde stroomsnelheden (bijlage C.1, C.2 en C.3) van de AZTM en de ELMAR elkaar weinig ontlopen. Gemiddeld is de afwijking 0.05 m/s. Soms is het verschil meer dan 0.5 m/s, zoals in meetpunt 27 om 10.30 uur en in meetpunt 29 om 16 uur. In meetpunt 23 en 24 werd tijdens maximum stroom door een storing niet door de AZTM gemeten. In meetpunt 23 liggen de stroomsnelheden van de ELMAR systematisch 0.2 m/s lager dan de AZTM stroomsnelheden. Rondom maximum stroom zijn de AZTM stroomsnelheden over het algemeen 0.2 m/s lager dan de ELMAR stroomsnelheden.

De afwijking tussen de stroomsnelheden tussen ELMAR en AZTM kan deels verklaard worden doordat ELMAR en AZTM niet gelijktijdig een verticaal meten en omdat de meetfrequentie van de ELMAR hoger is dan van de AZTM.

Ook de diepte gemiddelde stroomrichtingen van AZTM en ELMAR (bijlage C.4 t/m C.6) wijken niet veel van elkaar af. Gemiddeld is de afwijking 5 à 10 graden en niet systematisch. Rond stroomkentering kunnen de richtingen wel 180 graden uiteenlopen. Dit is te verklaren doordat AZTM en ELMAR niet gelijktijdig een verticaal meten en omdat de middelingstijden over een verticaal van AZTM en ELMAR (respectievelijk 20 en 10 minuten) afwijken.

3 Beschrijving

3.1 Inleiding

In dit hoofdstuk worden de metingen van het zandtransport op en rondom de Drempel van Hansweert beschreven. Deze beschrijving wordt sterk geleid door de te toetsen hypothesen, zoals die verwoord zijn Tank (1996).

Eerst wordt het diepte geïntegreerde zandtransport in de hoofdrichting op en rondom de drempel beschreven. Het diepte geïntegreerde zandtransport wordt vergeleken met het sedimenttransport model van Englund-Hansen. Daarna komt het zandtransport in dwarsrichting aan de orde. Tenslotte wordt de grootte van zandtransport door Getij Residuele Strooming, getij-asymmetrie en onder- en oververzadiging onderzocht.

3.2 Diepte geïntegreerd zandtransport

3.2.1 Inleiding

Het verloop in de tijd in de meetpunten in de raai tijdens de meting van de diepte gemiddelde hoofdstrooming en het diepte geïntegreerd zandtransport wordt als eerste beschreven. Vervolgens wordt het diepte geïntegreerde zandtransport tijdens maximum transport nader beschouwd.

3.2.2 Verloop tijdens een getijcyclus

Het verloop van de diepte gemiddelde stroomsnelheid die door de AZTM is gemeten wordt hier alleen summier beschreven, omdat de diepte gemiddelde stroomsnelheid die met de ELMAR gemeten is reeds in Tank (1997) is beschreven.

Dwarsraaien

Raai B' Figuren 3.1

Raai B' ligt ten noorden van de Drempel van Hansweert in de scherpe bocht rondom de Plaat van Ossensisse (figuur 2.3).

De diepte geïntegreerde zandtransporten van 3 kg/m.s tijdens maximum eb in de binnenbocht, in de meetpunten 36 en 21, zijn een factor 2 groter dan in de buitenbocht, in de meetpunten 23 en 35, ofschoon in de buitenbocht ebstroomsnelheden optreden die van gelijke grootte zijn. Dat in de binnenbocht de transporten groter zou verklaard kunnen worden doordat hier hogere zandconcentraties optreden. Door de *secundaire strooming* namelijk wordt zand aangevoerd vanuit de buitenbocht. In de perioden rondom eb- en vloedkentering zijn er perioden van respectievelijk 1 en 2 uur dat het zandtransport vrijwel 0 kg/m.s is. Daarnaast veroorzaakt de

secundaire stroming in de binnenbocht, doordat deze hier naar het wateroppervlak is gericht, een reductie van de valsnelheid van het zand. Hierdoor neemt de sedimentatiesnelheid in de binnenbocht af.

Tijdens maximum vloedtransport treden in de binnenbocht zandtransporten op van orde 8 à 10 kg/m.s. Deze zandtransporten zijn 2 keer zo groot als in de buitenbocht. Uit de pieken van de maximum vloedstroomsnelheid en de maximum zandtransporten bij vloed is waar te nemen dat maximum zandtransport 15 minuten na maximum stroomsnelheid optreedt. Het transport van zand reageert dus met een vertraging op veranderingen in de stroomsnelheid, het zogenaamde najlingseffect. Verder is te zien dat maximum vloedtransport in de binnenbocht 10 minuten eerder optreedt dan in de buitenbocht.

Raai C Figuur 3.2

Raai C ligt op de noordelijke zijde van de Drempel van Hansweert (figuur 2.3).

Door een technische storing ontbreken de meetgegevens in meetpunt 28, dat in het westelijke deel van de diepe geul, net langs het plateau ten oosten van de Plaat van Ossensisse ligt.

Maximale ebzandtransporten van 2 kg/m.s treden op in meetpunt 29 en 30, die beide op het plateau ten oosten van de Plaat van Ossensisse liggen. Daar treden ook de hoogste ebstroomsnelheden op. In de andere drie meetpunten, die in het oostelijke deel van de diepe geul liggen treden geringe zandtransporten op. Gezien de stroomsnelheden in meetpunt 28 die gemeten zijn met de ELMAR (Tank, 1997) en de hoge zandconcentraties in de binnenbocht van de diepe geul (zie raai B') treden de hoogste zandtransporten op in dit meetpunt. Rondom eb- en vloedkentering treden respectievelijk perioden op van 2 en 1 uur op dat de zandtransporten te verwaarlozen zijn in alle meetpunten.

Maximale zandtransporten tijdens vloed zijn het grootst in meetpunt 29, op het plateau ten oosten van de Plaat van Ossensisse: 5 kg/m.s. In meetpunt 30, ook op het plateau, zijn de zandtransporten lager omdat vloedkentering daar reeds rondom maximum vloedstroom in de rest van de geul optreedt. In de buitenbocht van de diepe geul zijn de zandtransporten kleiner dan op het plateau, maar wel groter dan tijdens maximum zandtransport tijdens eb. Ook tijdens vloed treden naar verwachting de grootste zandtransporten op in meetpunt 28 om hierboven genoemde redenen.

De maximale zandtransporten in raai C zijn ongeveer de helft van de zandtransporten in raai B'. De oorzaak hiervan is dat raai B' gemeten is tijdens een sterk ontwikkeld springtij en raai C tijdens een gemiddeld springtij: de stroomsnelheden en dus ook de zandtransporten zijn hoger naarmate het springtij sterker is.

Raai D_z Figuur 3.3

Raai D_z ligt in het oostelijk deel van de Schaar van Ossensisse (figuur 2.3).

Tijdens het overgrote deel van een getijcyclus zijn de zandtransporten in raai D_z zeer gering. Tijdens maximum zandtransport tijdens eb treedt er een kleine piek op in beide meetpunten van maximaal 0.75 kg/m.s. Bij maximum zandtransport tijdens vloed is de piek in beide meetpunten een factor 3 hoger dan bij de maximale transporten tijdens eb.

Raai 5A - Zuidergat Figuur 3.4

Raai 5A - Zuidergat ligt ten zuiden van de Drempel van Hansweert. De zandtransporten in het Zuidergat zijn alleen in twee meetpunten in de binnenbocht gemeten: gegevens van de buitenbocht ontbreken dus (figuur 2.3).

De zandtransporten tijdens eb in meetpunt 52, dat in de uiterste binnenbocht ligt, zijn vrijwel 0 kg/m.s. In dit meetpunt treden alleen tijdens maximum vloed zandtransporten op die van belang zijn.

In meetpunt 51, gelegen midden in de geul, zijn tijdens eb de maximale zandtransporten 2 kg/m.s. De maximale zandtransporten in dit meetpunt liggen tijdens vloed in dezelfde orde van grootte, maar zijn korter van duur: het totale zandtransport tijdens eb is groter dan tijdens vloed. Rondom eb- en vloedkentering zijn gedurende enkele uren in dit meetpunt de zandtransporten vrijwel 0 kg/m.s en dus te verwaarlozen.

Raai 5A - Schaar van Waarde Figuur 3.5

Raai 5A - Schaar van Waarde ligt ten zuidoosten van de Drempel van Hansweert. Meetpunt 53 is een dag eerder gemeten dan de overige drie meetpunten in de raai. Omdat de getijcoëfficiënten van de waterstanden die gemeten zijn in Hansweert niet sterk van elkaar afwijken op beide dagen zijn de metingen onderling redelijk goed vergelijkbaar. Tussen beide dagen zit een verschuiving in het getij van een uur.

Tijdens de ebfase zijn de zandtransporten in de raai te verwaarlozen, behalve in meetpunt 54 dat in het verlengde van de Schaar van Valkenisse ligt en die ook tijdens eb veel water afvoert. De zandtransporten zijn daar maximaal 1 kg/m.s.

Tijdens vloed treden in de meetpunten maximale transporten op die variëren tussen 1 en 3 kg/m.s.

Langsraaien

Raai H en J Figuur 3.6

De raaien H en J liggen evenwijdig aan elkaar op de zuidelijke zijde van de Drempel van Hansweert (figuur 2.4). De raaien H en J zijn alleen tijdens de ebfase gemeten. Meetgegevens van meetpunt 17 ontbreken door storing.

De zandtransporten in raai J, in het westen van de geul, zijn maximaal 1.5 kg/m.s en daarmee 5 keer zo groot als in raai H in het oosten van de geul. In het eerste uur en de laatste 2 uur van de ebfase zijn de zandtransporten vrijwel 0 kg/m.s.

Raai F en G Figuur 3.7

De raaien F en G liggen evenwijdig aan elkaar parallel aan de geulas op de noordelijk zijde van de Drempel van Hansweert (figuur 2.4). De metingen in deze raaien vonden plaats tijdens de vloedfase. Meetpunt 23 is onder afwijkende omstandigheden op 10 oktober 1995 gemeten. Van meetpunt 23 en 24 ontbreken de gegevens rondom maximum vloedtransport.

De metingen tussen beide raaien zijn niet met elkaar te vergelijken doordat in raai G de gegevens ontbreken of van andere metingen afkomstig zijn.

In raai F worden de grootste zandtransporten gemeten in meetpunt 21 van bijna 3 kg/m.s. Van meetpunt 21 naar meetpunt 15, gaande van bocht naar drempel, nemen de zandtransporten af tot 1 kg/m.s.

Raai M Figuur 3.8

Raai M ligt op de noordelijke zijde van de Drempel van Hansweert, ten oosten van de rand langs het plateau ten oosten van de Plaat van Ossensisse (figuur 2.5). De meetpunten liggen op een stroombaan tijdens maximum vloedstroom bij een gemiddeld getij.

Bij maximum zandtransport tijdens eb treden transporten op van ruim 2 kg/m.s. Er is geen duidelijk verloop in de raai van de zandtransporten te zien. Wel is in meetpunt 65, het meetpunt dat het dichtst bij het centrum van de drempel ligt het zandtransport het kleinst. Tijdens eb- en vloedkentering treden zandtransporten op van 0 kg/m.s.

Maximum zandtransport tijdens vloed is bijna 6 kg/m.s in meetpunt 60, dat het verst van het centrum van de drempel af ligt. Gaande van meetpunt 60 naar meetpunt 65 neemt het zandtransport af naar ruim 2 kg/m.s. Er vindt op de noordelijke zijde van de Drempel van Hansweert tijdens vloed drempelopwaarts een duidelijke afname van het zandtransport plaats. Dat tijdens maximum vloedtransport een duidelijke gradiënt in het transport van meetpunt 60 naar 65 aanwezig is en niet tijdens maximum ebtransport kan verklaard worden doordat raai M in een stroombaan tijdens maximum vloed ligt. Tijdens maximum eb ligt raai M niet in een stroombaan.

3.2.3 Maximum transport

Dwarsraaien

In figuur 3.9 staan de vectoren van het diepte geïntegreerd transport tijdens maximum eb- en maximum vloedtransport in de dwarsraaien. De metingen in de verschillende raaien kunnen niet kwantitatief met elkaar worden vergeleken omdat de metingen tijdens verschillende getijomstandigheden gemeten zijn. Overigens zijn alle metingen wel verricht tijdens een gemiddeld tot sterk ontwikkeld springtij.

Tijdens maximum ebtransport vindt in het Zuidergat het meeste transport plaats in het diepe, westelijke deel van de geul. In het oostelijk deel van het Zuidergat, nabij de Plaat van Walsoorden, is het transport bij maximum eb nihil. Ook de transporten in de Schaar van Waarde zijn gering, met uitzondering van de Schaar van Valkensisse. Van het zand dat tijdens maximum ebtransport door het Zuidergat wordt getransporteerd wordt maar een zeer gering deel door de Schaar van Ossensisse, voor het de Drempel van Hansweert opkomt, afgevoerd. In raai C, op de noordelijke zijde van de drempel, zijn de maximum ebtransporten het grootst op het plateau ten oosten van de Plaat van Ossensisse en (waarschijnlijk) in het westelijk deel van de diepe geul, dus in de binnenbocht. Ook in raai B' vinden de grootste transporten plaats in de binnenbocht. De afwijkende richting van de transportvector in meetpunt 36 wordt veroorzaakt door het transport vanaf het plateau ten oosten van de Plaat van Ossensisse.

Tijdens maximum vloedtransport zijn de transporten een factor 10 hoger dan tijdens maximum ebtransport. De grootste verschillen tussen eb- en vloedtransport treden op in de nevengeulen

zoals de Schaar van Ossensisse en de Schaar van Waarde. In meetpunt 51 in het Zuidergat en meetpunt 30 op het plateau zijn de ebtransporten van dezelfde orde van grootte als de vloedtransporten. Net als bij maximum ebtransport vindt op de noordelijke zijde van de drempel, in de raaien B' en C, de grootste transporten plaats in de binnenbocht, dus op het plateau en in het westen van de diepe geul. Het zandtransport in het oostelijk deel van raai C, in de meetpunten 27, 26 en 35, komt in de Schaar van Waarde terecht. Uit de Schaar van Ossensisse komen aanzienlijke transporten tijdens maximum vloed. In het Zuidergat en de Schaar van Waarde wordt tijdens maximum vloedtransport het transport gelijkmatig over de breedte van de geul getransporteerd.

Langsraaien

Raai F, G, H, J

In figuur 3.10 is het ruimtelijk patroon te zien van het diepte geïntegreerd zandtransport op de zuidelijke zijde van de Drempel van Hansweert tijdens maximum ebtransport en op de noordelijke zijde van de drempel tijdens maximum vloedtransport. Meetpunt 17 en 24 ontbreken en meetpunt 23 is tijdens andere omstandigheden gemeten.

Tijdens maximum ebtransport valt op dat in raai J, in het westen van de geul, de zandtransporten 10 keer zo groot zijn als in raai H, in het oosten van de geul. Raai J ligt in het verlengde van de diepe buitenbocht van het Zuidergat waar ook de hoogste ebtransporten optreden, zo blijkt uit figuur 3.9. In meetpunt 20 is te zien dat het zand uit het Zuidergat ter hoogte van de Schaar van Ossensisse afbuigt naar het plateau ten oosten van de Plaat van Ossensisse. De zandtransporten in de meetpunten in raai J zijn 1 kg/m.s; er is geen gradiënt in het transport te zien.

Op de noordelijke helft van drempel is raai G niet goed te vergelijken met raai F doordat gegevens ontbreken of metingen niet gelijktijdig plaatsvonden. In raai F, in de buitenbocht, is duidelijk een afname van het zandtransport te zien van meetpunt 21 naar 15, dus van bocht naar drempel. In meetpunt 21 is het zandtransport 2 kg/m.s en in meetpunt 15 is dit 1 kg/m.s. In meetpunt 15, dat enkele honderden meters ten noorden van het centrum van de drempel ligt, treedt een groot verschil op van 15 graden in de richting van het eb- en vloedtransport: tijdens maximum ebtransport komt in dit meetpunt het zand uit het Zuidergat en tijdens maximum vloedtransport gaat het materiaal de Schaar van Waarde in.

In figuur 3.11 staat het maximum eb- en vloedtransport uitgezet met het bodemprofiel van de raai. Tijdens maximum ebtransport vindt in raai J van meetpunt 20 naar 19 een geringe toename van 1.1 naar 1.2 kg/m.s van het zandtransport plaats met een sterke afname van 5 m van de waterdiepte. In raai J is van meetpunt 19 naar 18 het transport constant terwijl het circa 0.5 m dieper wordt. Ook in raai H is tussen meetpunt 16 en 15 een toename van het zandtransport van 0.2 naar 0.3 kg/m.s te zien terwijl het 0.5 m dieper wordt.

Tussen meetpunt 21 en 22 in raai F wordt de geul 7 m ondieper terwijl het diepte geïntegreerde zandtransport tijdens maximum vloedtransport met 1 kg/m.s toeneemt. Vervolgens wordt de geul 0.5 m ondieper en neemt het diepte geïntegreerde zandtransport met 1 kg/m.s af. Analyse

van raai G vervalt door gebrekkige gegevens omdat het zandtransport in de meetpunten 23 en 24 ontbreekt.

Het zandtransport neemt de ene keer af en een andere keer toe met de diepte. De stroomsnelheid is direct afhankelijk van de diepte van de geul. Het zandtransport is weer met een macht 4 à 5 afhankelijk van de stroomsnelheid. Het zandtransport correleert dus niet met de diepte van de geul. Dit kan verklaard worden doordat andere kenmerken van de geometrie, zoals geulbreedte en (relatief) geuloppervlak, de stroomsnelheid en daarmee ook het zandtransport beïnvloeden.

Raai M

De transporten in raai M tijdens maximum eb- en maximum vloedtransport staan in figuur 3.12. Raai M ligt op de noordelijke zijde van de drempel langs het plateau ten oosten van de Plaat van Ossensisse in de diepe geul. Langs het plateau vinden de grootste transporten plaats. In meetpunt 60 is het NAP -21 m en in meetpunt 65 NAP -15 m.

Tijdens maximum ebtransport neemt van meetpunt 65 naar meetpunt 62 het diepte geïntegreerde transport een factor 3 toe van 1 kg/m.s naar 3 kg/m.s. Vervolgens neemt van meetpunt 62 naar 61 het transport weer af naar 2 kg/m.s om van meetpunt 61 naar 60 weer toe te nemen tot 2.3 kg/m.s. Er is gaande van drempel naar diepe bocht een toename van het transport te zien. Dat tijdens maximum ebtransport geen eenduidige gradiënt in het zandtransport van meetpunt 65 naar 60 te zien is, komt, zoals al eerder opgemerkt, doordat raai M niet in een stroombaan van maximum eb ligt.

Van meetpunt 60 naar 61 is tijdens maximum vloedtransport een afname van het diepte geïntegreerde transport te zien van 5.6 naar 3.7 kg/m.s. Van meetpunt 61 naar 62 neemt het transport weer even toe naar 5.2 kg/m.s en vervolgens halveert het transport van meetpunt 62 naar meetpunt 65 tot 2.6 kg/m.s. Tijdens maximum vloedtransport is duidelijk een afname te zien van diepe bocht naar ondiepere, bredere en te ruime drempel.

Het maximum vloedtransport is op de noordelijke zijde van de Drempel van Hansweert een factor 2 à 3 groter dan het ebtransport.

In figuur 3.13 staat het diepte geïntegreerde zandtransport tijdens maximum eb en vloed uitgezet samen met de geuldiepte in raai M. Uit deze figuur kan geconcludeerd worden dat tijdens maximum eb- en vloedtransport het zandtransport, via de stroomsnelheid, tussen meetpunt 60 en 63 over een afstand van 1200 m vrij sterk samenhangt van de geuldiepte. Dat in de langsraaien in figuur 3.11 dit verband niet zo duidelijk was komt doordat de versturende werking van nevengeulen op het noordwestelijk deel van de drempel minder groot is. Tussen meetpunt 63 en 65, over een afstand van 800 m, is de diepte constant terwijl het zandtransport afneemt. Deze afname wordt veroorzaakt door het te ruime geulprofiel van de drempel waardoor de stroomsnelheid en daarmee ook het zandtransport afneemt.

Opvallend zijn de lage zandtransporten tijdens maximum eb- en vloedtransport in meetpunt 61 vergeleken met de zandtransporten in meetpunt 60 en 62. In meetpunt 61 zijn bodemvormen van 2 m hoog aanwezig die het transport beïnvloeden. De bodemvormen zijn overigens een jaar eerder gemeten dan de zandtransporten. Een verklaring voor de relatief geringe zandtransporten in meetpunt 61 kan zijn dat de AZTM in een diepe trog van een duin geplaatst is waar

relatief lage stroomsnelheden optreden door neervorming achter de duintop.

3.2.4 Vergelijking met de sedimenttransportformule van Engelund-Hansen

De gemeten diepte geïntegreerde zandtransporten zijn vergeleken met de transportformule van Engelund-Hansen (1967 in: Van Rijn, 1993). Deze vergelijking is uitgevoerd om zicht te krijgen in de belangrijke variabelen die het zandtransport beïnvloeden.

De formule van Engelund-Hansen berekent het totale transport, dus het transport van bodem- en suspensie materiaal samen, met:

$$q_t = \frac{0.05 \rho_s U^5}{(s-1)^2 g^{0.5} d_{50} C^3} \quad 3.1$$

waarin:

q_t	=	totaal transport (kg/m.s)
u	=	diepte gemiddelde stroomsnelheid (m/s)
C	=	Chézy-coëfficiënt ($m^{0.5}/s$) = $18 \log(12.h/k_s)$
ρ_s	=	sediment dichtheid (=2650) (kg/m ³)
s	=	relatieve dichtheid (= ρ_s/ρ)
ρ	=	dichtheid water (= 1015) (kg/m ³)
d_{50}	=	mediane korrelgrootte van het beddingmateriaal (m)
h	=	waterdiepte t.o.v. NAP (m)
k_s	=	bodemruwheid (m)

Tijdreeks diepte geïntegreerd zandtransport

Van alle meetpunten in de raaien B', C, Dz, 5A en M is de gemeten tijdreeks vergeleken met de berekende tijdreeks. Per meetpunt is in de formule de waterdiepte ten opzichte van NAP en de door de AZTM gemeten diepte gemiddelde stroomsnelheid gebruikt. Voor de parameter d_{50} is 240 μ m en voor de parameter k_s is 0.45 m in het de formule gebruikt. De waarde van de d_{50} is de gemiddelde d_{50} op de Drempel van Hansweert zoals bepaald op 23 oktober 1995 in de 10 meetpunten van de raaien F, G, H en J (bijlage D). De waarde van k_s is de gemiddelde waarde van de hoogte van de bodemvormen in de meetpunten van de raaien B', C, Dz, 5A, F, G, H, J en M (bijlage E). De standaard deviatie van de gemiddelde korrelgrootte in de 10 meetpunten is 49 μ m. De hoogte van de bodemvormen is afgeleid uit een grid van een 'multi-beam' loding tussen 12 en 19 oktober 1995 met een cel-grootte van 2 x 2 m.

In figuur 3.14a tot 3.14l staan de tijdsreeksen van het gemeten en de met de zandtransport-

formule van Engelund-Hansen berekende transport uitgezet. Het overzicht van de verschillen tussen gemeten en berekend transport bij maximum transport is gegeven in tabel 3.1. In de figuren en tabel 3.1 valt op dat voor waterdiepten kleiner 15 m het gemeten zandtransport door de formule van Engelund-Hansen redelijk goed wordt gemodelleerd. Bij waterdiepten groter dan 15 m wordt het zandtransport vaak met een factor 2 à 3 overschat door de formule.

			eb	vloed				eb	vloed	
			afwijking bij T_{max}	afwijking bij T_{max}				afwijking bij T_{max}	afwijking bij T_{max}	
Raai	mp	h NAP (m)	T_{ber}/T_{gem}	T_{ber}/T_{gem}	Raai	mp	h NAP (m)	T_{ber}/T_{gem}	T_{ber}/T_{gem}	
B'	36	8	1.2	1.9	5A	51	13	0.5	0.5	
	23	22	1.1	2.2		52	7	1.0	1.5	
	21	20	1.4	3.8		53	5	1.0	1.5	
	35	16	3.0	1.1		54	7	2.0	1.2	
C	25	11	2.0	1.9		55	9	2.0	0.9	
	26	13	1.5	1.2		56	3	1.3	3.0	
	27	15	0.8	1.0		M	60	21	1.6	1.3
	29	8	1.0	2.5			61	13	3.6	5
	30	7	1.3	0.8			62	15	1.3	2.0
D ₂	37	6	2.4	1.9			63	14	0.9	1.0
	38	11	0.7	0.8	64		15	2.1	0.9	
					65	15	1.8	0.7		

Tabel 3.1 Verhouding tussen met de formule van Engelund-Hansen berekend zandtransport (T_{ber}) en gemeten zandtransport (T_{gem}) bij maximum zandtransport

Deze overschatting is met name duidelijk in de meetpunten in raai B'. Voor $h < 15$ m voldoet de formule van Engelund-Hansen wel goed. De k_s van 0.45 m is kennelijk een aardige maat voor de ruwheid van de geulen rondom de Drempel van Hansweert die ondieper zijn dan NAP -15 m.

Verder valt op dat de (vloed-)piek van het berekend zandtransport 15 à 20 minuten vóór de piek van het gemeten zandtransport optreedt. Deze afwijking is de vertraging, de naijling, die het zandtransport heeft ten opzichte van veranderingen in de stroomsnelheid.

Ruimtelijk beeld diepte geïntegreerd transport tijdens maximum stroom (WAMORF)

Het ruimtelijk patroon tijdens maximum eb- en vloedtransport van het gemeten diepte geïntegreerd zandtransport in figuur 3.9, 3.10 en 3.11 wordt vergeleken het diepte geïntegreerde zandtransport tijdens maximum eb- en vloedtransport volgens Engelund-Hansen zoals berekend met de morfologische WAQUA-module WAMORF.

De WAMORF berekening vond plaats met het getij van 6 april 1989, een gemiddeld springtij, met een bodem van de Westerschelde van 1988. Het WAMORF model is noch geijkt noch gevalideerd (Schaap, 1997). Wel is WAMORF gekoppeld aan het geijkt en gevalideerd WAQUA-model Scaldis100. De volgende instellingen in WAMORF van het Engelund-Hansen model zijn gebruikt: $k_s = 0.1$ m (afgeleid uit $C = 60 \text{ m}^{0.5}/\text{s}$) en een d_{50} van $200 \mu\text{m}$. Deze instellingen wijken af van de veldomstandigheden. De transporten in de figuren 3.15 en 3.16 zijn in m^2/s . Dit is geen beletsel voor de (over het algemeen kwalitatieve) vergelijking met de gemeten transporten. Vergelijking van de eerste WAMORF resultaten met metingen geven een goede overeenkomst (Schaap, 1997). Afwijkingen zijn in de orde van 10 %.

In figuur 3.15 is te zien dat tijdens maximum ebtransport de transporten in de binnenbocht langs en op het plateau het grootst zijn in de dwarssectie van de geul. Verder valt op dat in het Zuidergat de zandtransporten het hoogste zijn in de buitenbocht. Ter hoogte van de Schaar van Ossensisse nemen de zandtransporten in grootte af tot $1.6 \text{ kg}/\text{m}\cdot\text{s}$ ($= 0.001 \text{ m}^2/\text{s} \times 2650 \text{ kg}/\text{m}^3 \times 0.4$ (-; porositeit)) en nemen aan de andere, noordelijke zijde van de drempel weer in grootte toe tot $4.8 \text{ kg}/\text{m}\cdot\text{s}$ ($= 0.003 \text{ m}^2/\text{s}$). In de Schaar van Waarde treden de grootste ebtransporten in de Schaar van Valkenisse. Deze patronen zijn ook in de metingen waarneembaar.

Tijdens maximum vloed om 14 uur (figuur 3.16) is het zandtransport een factor 3 groter dan tijdens maximum ebtransport. Op de noordelijke zijde van de drempel en in het Zuidergat zijn de transporten het hoogst in de binnenbocht: tussen 1.6 0.001 en $6.4 \text{ kg}/\text{m}\cdot\text{s}$ ($= 0.001$ en $0.004 \text{ m}^2/\text{s}$). Op de noordelijke zijde van de drempel nemen de zandtransporten in grootte af om vervolgens aan de andere zijde in het Zuidergat weer in grootte toe te nemen. In de Schaar van Ossensisse zijn de transporten groter tijdens maximum vloed dan tijdens maximum eb. Van over de Plaat van Ossensisse wordt zand naar de Drempel van Hansweert getransporteerd met een grootte tussen de 0 en $1.6 \text{ kg}/\text{m}\cdot\text{s}$ ($= 0$ en $0.001 \text{ m}^2/\text{s}$). Voorts valt op dat de transportbaan tijdens maximum vloed op het midden van de Drempel van Hansweert een oostelijker verloop heeft dan tijdens maximum eb. Dit geeft de ruimtelijke scheiding op de drempel aan van het eb- en vloedtransport.

Geconcludeerd kan worden dat door WAMORF het ruimtelijk beeld en de grootte van het zandtransport tijdens maximum eb en vloed goed wordt weergegeven, ondanks het feit dat de ruwheid ($k_s = 0.1$ m) aan de lage kant is, evenals de d_{50} van $200 \mu\text{m}$. Een k_s van 0.4 m en een d_{50} van $240 \mu\text{m}$ zijn reëlere waarden voor de Drempel van Hansweert.

3.3 Dwarstransport

3.3.1 Inleiding

Het dwarstransport is het zandtransport loodrecht op de hoofdtransportrichting. Het dwars-transport kan worden onderverdeeld in het transport loodrecht op de diepte gemiddelde hoofdtransportrichting *in een raai*, genaamd transversaal zandtransport, en het lokale transport loodrecht op de diepte gemiddelde hoofdtransportrichting *in een meetpunt*, genaamd secundair zandtransport. Het secundair zandtransport wordt veroorzaakt door de secundaire stroming. Het geïntegreerde zandtransport door de transversale stroming in de verticaal is niet noodzakelijk-kerwijs 0 m/s (figuur 3.17a), het geïntegreerde secundair zandtransport is dat wel (figuur 3.17b). Bij het secundair transport vindt het merendeel van het transport nabij de bodem plaats. Het secundair zandtransport komt voor in de vorm van één of meerdere cellen.

De transversale en secundaire stroming en het daardoor opgewekte zandtransport zijn het gevolg van divergentie of convergentie van de hoofdstroming en van centrifugaalkrachten en Coriolisversnelling. Een derde oorzaak van dwarsstroming is aanstroming onder een hoek ten opzichte van de hoofdstromingsrichting van water vanuit een andere geul of van over een plaat.

Nabij de bodem zijn de zandconcentraties het hoogst, waardoor de richting van de dwarsstroming nabij de bodem van belang is voor het netto effect binnen de dwarssectie van een geul.

In deze paragraaf wordt het ruimtelijk patroon van het zandtransport door de transversale en de secundaire stroming over de Drempel van Hansweert beschreven. De grootte van het zandtransport op een bepaalde hoogte in de verticaal wordt uitgedrukt in (k)g/m².s. Dit is de massa drooggewicht zand dat per seconde horizontaal door een (verticaal) vlak van 1 m² wordt getransporteerd.

3.3.2 Verloop tijdens een getijcyclus

Om een indruk te krijgen van de grootte van het dwarstransport is in de meetpunten in raai C van de meting op 25 oktober 1995 het verloop van de grootte van het dwarstransport op van 10 % van de waterdiepte boven de bodem (in het vervolg 'vlak boven de bodem' genoemd) uit metingen berekend. Het dwarstransport is berekend ten opzichte van de gemiddelde richting van het diepte geïntegreerd zandtransport die gemeten is met de AZTM in de raai tijdens de hele getijcyclus.

In figuur 3.18 zijn alleen de meetpunten 25 en 30 weergegeven om de figuur overzichtelijk te houden. Figuur 3.18 laat zien dat gedurende een groot deel van de eb fase in de binnenbocht in meetpunt 30 op het plateau ten oosten van de Plaat van Ossensisse dwarstransporten van meer dan 0.025 kg/m².s aanwezig zijn. Deze dwarstransporten zijn naar de binnenbocht gericht. Tijdens de vloed treden alleen rondom maximum stroom transporten op die groter zijn dan 0.025 kg/m².s. Op het plateau ten oosten van de Plaat van Ossensisse zijn deze naar de

binnenbocht gericht en in meetpunt 25 in de buitenbocht naar de binnenbocht.

Bij vergelijking van de dwarsstroming vlak boven de bodem zoals met de ELMAR gemeten op dezelfde dag (zie Tank, 1997) blijkt dat tijdens eb de richting van het dwarstransport vlak boven de bodem daarvan afwijkt. Dit wordt verklaard doordat de gemiddelde richting van de stroming in de raai bij de ELMAR-metingen 165 graden en van het transport bij de AZTM metingen 150 graden is.

3.3.3 Maximum transport

Vectoren op 0.1, 0.4 en 0.75 z/h

Van de meetpunten in de dwarsraaien op de Drempeel van Hansweert zijn de transportvectoren tijdens maximum eb en maximum vloed op drie relatieve hoogten in de verticaal bepaald. Het betreffen de vectoren op 0.1, 0.4 en 0.75 keer de waterdiepte (h) boven de bodem. Als de meetdiepte meer dan 5 % afweek van de gewenste diepte zijn de gegevens buiten beschouwing gelaten.

Maximum eb Figuur 3.19

De zandtransporten op 0.1 z/h zijn een factor 2 à 5 groter dan op 0.4 z/h en 0.75 z/h. In het Zuidergat valt op dat nabij de bodem het zandtransport naar de binnenbocht is gericht. Dit stemt overeen met de theorie uit de rivierkunde dat in een bocht het zandtransport nabij de bodem naar de binnenbocht is gericht. In de binnenbocht om de Plaat van Ossensisse is juist nabij de bodem een transport dat ten opzichte van de transporten hoger in de verticaal naar de buitenbocht is gericht. Voorbeelden hiervan zijn de meetpunten 19, 18, 64, 29, 30, 61 en 23. Over het algemeen verschillen in de meetpunten de transportrichtingen op de drie hoogten niet zoveel van elkaar.

Maximum vloed Figuur 3.20

In de binnenbocht om de Plaat van Ossensisse treden tijdens maximum stroom nabij de bodem zandtransporten in enkele meetpunten zoals 36 en 63 op die vergeleken met de transporten hoger in de verticaal naar de binnenbocht gericht zijn. In andere meetpunten in de binnenbocht is het zandtransport nabij de bodem echter naar de buitenbocht gericht. Een eenduidig beeld van het dwarstransport kan niet uit deze metingen worden gehaald.

Dat in meetpunt 36 de transportrichting op de 3 hoogten maximaal 20 graden van elkaar afwijken wordt verklaard doordat het transport boven in de verticaal sterk wordt beïnvloed wordt door het transport vanaf het plateau ten oosten van de Plaat van Ossensisse en onderin de verticaal door het transport in de diepe geul.

Transversaal en secundair transport

In de dwarsraaien is ten opzichte van de gemiddelde transportrichting tijdens maximum eb- en

maximum vloedtransport over de hele breedte van de raai in elk meetpunt op zes verschillende hoogten de grootte van het dwarstransport berekend. Deze componenten van het zandtransport zijn in het bijbehorende dwarsprofiel van de raai getekend. Het dwarstransport ten opzichte van de gemiddelde transportrichting tijdens maximum transport in de raai is het transversale transport. Het transport door de secundaire stroming is berekend ten opzichte van het gemiddelde transversale transport in de verticaal van een meetpunt. Uit het patroon van het transport door de secundaire stroming in de verschillende meetpunten zijn circulatiecellen met zandtransport door de secundaire stroming bepaald.

Soms kan het zijn dat een enkel meetpunt nabij de bodem 'onder' de bodem terecht is gekomen. Dit kan verklaard worden doordat metingen van het zandtransport niet gelijktijdig plaatsvonden met de meting van de bodemdiepte en er tussentijds sedimentatie heeft plaatsgevonden. Een andere oorzaak kunnen verschillen zijn in de nauwkeurigheid van de instrumenten die gebruikt zijn bij de zandtransportmeting of bij de loding die diepte bepalen. Dat een punt 'onder' de bodem ligt heeft geen gevolgen voor de interpretatie van de meetgegevens. Let op: in raai B' (figuur 3.21 en 3.24) is een andere pijlschaal gebruikt dan in de overige raaien.

Maximum eb

Raai B' Figuur 3.21

Het aan beiden zijden tegengestelde transversale transport tijdens maximum eb duidt op divergerend transport: de waterbeweging is ook divergerend (Tank, 1997). Het transport door de secundaire stroming is in meetpunten 36 en 23 in de binnenbocht nabij de bodem naar de buitenbocht gericht. In de meetpunten 21 en 35 in de buitenbocht is nabij de bodem het transport door secundaire stroming naar de binnenbocht gericht. In raai B' zijn twee tegengesteld draaiende cellen met secundaire transport aanwezig met nabij de bodem een grootte van $0.040 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{s}$.

Raai C Figuur 3.22

Het transversale transport is tijdens maximum eb in raai C gering, behalve in de binnenbocht op het plateau ten oosten van de Plaat van Ossensisse. Er zijn twee cellen met transport door secundaire stroming waarneembaar: in de binnenbocht op het plateau met nabij de bodem een transport van $0.020 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{s}$ dat naar de buitenbocht gericht is. Een andere cel is aanwezig in de buitenbocht met nabij de bodem een transport van $0.006 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{s}$ dat naar de binnenbocht gericht is.

Raai 5A-Zuidergat Figuur 3.23

De transversale stroming in meetpunt 51 is naar de binnenbocht gericht en in meetpunt 52 te verwaarlozen. In het Zuidergat is zeker één cel aanwezig met transport door de secundaire stroming die nabij de bodem naar de binnenbocht gericht is. Het secundair transport vlak boven de bodem is daar fors: $0.080 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{s}$.

Maximum vloed

Raai B' Figuur 3.24

Het transversale transport duidt op divergerend transport door de divergerende stroming. In meetpunt 36 is het transversaal zandtransport zeer fors: $0.7 \text{ kg/m}^2\cdot\text{s}$. In de raai zijn twee cellen aanwezig met transport door secundaire stroming. In cel in de binnenbocht veroorzaakt nabij de bodem een transport van $0.2 \text{ kg/m}^2\cdot\text{s}$ naar de binnenbocht. De cel in de buitenbocht veroorzaakt nabij de bodem een transport van $0.1 \text{ kg/m}^2\cdot\text{s}$ naar de buitenbocht.

Raai C Figuur 3.25

In raai C divergeert het transport tijdens maximum vloed. In de binnenbocht op het plateau ten oosten van de Plaat van Ossensisse staat een transportcel door de secundaire stroming die nabij de bodem een transport van $0.1 \text{ kg/m}^2\cdot\text{s}$ veroorzaakt richting de binnenbocht. In de buitenbocht staan twee cellen met secundair transport: in meetpunten 27 en 26 een cel met nabij de bodem een transport van $0.015 \text{ kg/m}^2\cdot\text{s}$ die naar de binnenbocht gericht is en in de uiterste buitenbocht een cel met nabij de bodem een transport van $0.005 \text{ kg/m}^2\cdot\text{s}$ richting de buitenbocht.

Raai 5A-Zuidergat Figuur 3.26

Het transport door de transversale stroming is duidt op divergentie. In de meetpunten 51 en 52 staat een cel door de secundaire stroming die nabij de bodem met transport van $0.050 \text{ kg/m}^2\cdot\text{s}$ richting de binnenbocht.

Cellenpatroon met zandtransport door secundaire stroming

In figuur 3.27 is een samenvatting van de figuren 3.20 tot en met 3.26 van het verloop over de Drempeel van Hansweert van de cellen met zandtransport door de secundaire stroming. Getallen bij de cellen geven de grootte van het zandtransport door de secundaire stroming vlak boven de bodem aan.

Het cellenpatroon is complex en niet eenduidig. Behalve in raai 5A zijn de transporten door de secundaire stroming tijdens maximum vloedtransport 2 à 5 keer groter dan tijdens maximum ebtransport. Verder valt op dat het cellen patroon door de secundaire stroming in Tank (1997) afwijkt van het cellenpatroon in het zandtransport. Deze afwijking kan verklaard worden doordat de stroommetingen niet gelijktijdig werden verricht met de AZTM-metingen zodat de invloed op het cellenpatroon van de doodtij - springtij cyclus een rol speelt. Maar ook in raai C, waar de ELMAR- en AZTM-metingen gelijktijdig plaatsvonden is het cellenpatroon sterk verschillend. Een andere verklaring is dat het tijdstip van maximum stroom en maximum transport niet samenvallen. Een derde verklaring is dat de middelingstijd en dichtheid van de meetpunten van de AZTM en ELMAR van elkaar verschillen.

3.4 Transportfluxen

In figuur 3.28 zijn de zandtransporten tijdens de eb- en vloedfase in de verschillende dwars-

raaien op en rondom de Drempel van Hansweert weergegeven. De transporten zijn tijdens verschillende getijcondities gemeten waardoor ze onderling niet te vergelijken zijn. De getransporteerde zandmassa's per getijfase zijn volgens de methode in Kruyt (1992) berekend: van elk meetpunt is door integratie over de tijd het diepte geïntegreerde zandtransport per getijfase berekend. Vervolgens is het diepte geïntegreerde zandtransport representatief gesteld voor een bepaald breedte, dus een bepaald oppervlak, in de geul (figuur 3.29). Over die breedte is het diepte geïntegreerde zandtransport tijdens een getijfase berekend. Sommering over alle meetpunten in de raai levert het totale zandtransport per getijfase. Het totale oppervlak dat gerepresenteerd wordt door de meetpunten in een raai is vrijwel gelijk aan het totale geuloppervlak onder NAP. Het oppervlak van raai 5A - Zuidergat is echter 6.000 m² kleiner dan het oppervlak onder NAP omdat de 2 meetpunten in deze raai niet representatief zijn voor het gehele breedte van de geul. Hierdoor wordt het zandtransport in raai 5A onderschat, omdat gegevens over de diepe buitenbocht van de geul, waar veel zandtransport tijdens eb plaatsvindt, ontbreken.

In de meetraaien in de hoofdgeulen rondom de Drempel van Hansweert treden zandtransporten op van enkele 10.10⁶ kg per getijfase. Van het totale transport in raai 5A wordt tijdens eb 63% en tijdens vloed 57 % door het Zuidergat getransporteerd. Omdat het zandtransport in het Zuidergat wordt onderschat zijn deze percentages in werkelijkheid hoger. Deze verdeling van het zandtransport is gelijk aan de verdeling van het getijvolume in deze raai (Tank, 1997). Het transport in de Schaar van Ossensisse is ongeveer een tiende deel van het zandtransport in de hoofdgeul. Het zandtransport tijdens vloed is een factor 0.5 à 2 groter dan tijdens eb. Een zandtransport massa van 10.10⁶ kg is gelijk aan een zandvolume van 6300 m³ ($\rho_s = 2650$ kg/m³, porositeit = 0.4 (-)). Gemiddeld wordt er, bij een baggeromvang van 3.10⁶ m³ per jaar, op de Drempel van Hansweert ruim 8000 m³ per dag gebaggerd. Hieruit kan geconcludeerd worden dat tijdens een springtij op één dag het zandtransport over de Drempel van Hansweert een factor 5 à 6 groter is dan het zandvolume dat op de drempel wordt gebaggerd. Het lijkt waarschijnlijk dat tijdens een springtij de dagelijkse baggerhoeveelheden nog dezelfde dag aangevuld worden door sedimentatie.

3.5 Residueel zandtransport door Getij Residuele Stroming

3.5.1 Inleiding

Getij Residuele Stroming (GRS) is in de Westerschelde en met name op drempels een belangrijk zandtransportmechanisme (Storm, 1996; Tank, 1996). De hierna volgende uitleg over Getij Residuele Stroming is gebaseerd op Storm (1996). Getij Residuele Stroming zijn de reststromen van horizontale circulatie patronen zoals eb- en vloedscharen of eb- en vloedgedomineerde geuldelen of neren rondom obstakels en platen. Deze horizontale circulatie patronen ontstaan door de interactie van het horizontale getij met de geometrie. Getij Residuele Stroming is gedefinieerd als het residuele watertransport op een willekeurige lokatie in een estuarium als gevolg van het getij, gemiddeld over een doortij-springtij cyclus. De invloeden

van de rivierafvoer, het weer en ongelijkheden in het getij vallen hiermee weg. In een geul van dijk tot dijk is de GRS nul: een eboverschot wordt gecompenseerd door een vloedoverschot. GRS is een factor 10 à 100 kleiner dan de maximale stroomsnelheden. GRS is echter ruimtelijk zeer consistent en daarom van groot belang voor patronen in het zandtransport.

3.5.2 Analyse

De grootte van het zandtransport door GRS op de Drempel van Hansweert is op twee wijzen onderzocht. Ten eerste door uit stroommetingen met OSM's op de Drempel van Hansweert (Meetdienst Zeeland, 1996a) gedurende 2 doortij-springtij-cycli het zandtransport te berekenen. Ten tweede door een 13 uren zandtransportmeting in raai C (Meetdienst Zeeland, 1996b) te analyseren.

OSM's: 4 weken

Van een aantal OSM-metingen die in een dwarsraai op de Drempel van Hansweert liggen (figuur 3.30) is de GRS van 1 tot en met 28 oktober 1995, over twee doortij-springtij-cycli, bepaald. Met behulp van de formule van Engelund-Hansen is uit de momentane zandtransporten het zandtransport door de GRS berekend. De dwarsraai met de OSM's ligt op vrijwel dezelfde positie als raai C.

De OSM's bevinden zich op een (relatieve) diepte van 40 % boven de bodem. Op deze diepte treden stroomsnelheden op die ongeveer gelijk zijn aan de diepte gemiddelde stroomsnelheid in de verticaal.

De stroomsnelheden zijn per elke 10 minuten beschikbaar. De stroomsnelheden zijn ontbonden in een langs- en dwarscomponent ten opzichte van de raai. De hoek van de raai ten opzichte van het noorden is 243°. De zandtransporten met de formule van Engelund-Hansen zijn met

Meetpunt	OSM-nummer	Residuele stroomsnelheid (m/s)			Residueel transport (kg/m.s)		
		u_{dwars}	u_{langs}	u	T_{dwars}	T_{langs}	T
7	107	0.02	0.12	0.12	0.01	0.09	0.09
6	109	0.06	0.02	0.06	0.03	-0.16	-0.16
5	112	-0.03	0.02	0.04	0.04	-0.21	-0.21
3	119	0.03	-0.01	-0.03	0.02	-0.07	-0.07
2	120	-0.02	-0.04	-0.04	0.02	-0.07	-0.07

Tabel 3.2 Gemeten getij residuele stroomsnelheden en met Engelund-Hansen berekende residuele zandtransporten van OSM-metingen op de Drempel van Hansweert van 1 t/m 28 oktober 1995.

een $C = 45 \text{ m}^{0.5}/\text{s}$ (bij $h = 15 \text{ m}$; $k_s = 0.4 \text{ m}$) en een d_{50} van $240 \mu\text{m}$. De positieve stroomsnelheden en zandtransporten in langsrichting zijn in noordelijke (eb-)richting. De positieve stroomsnelheden en transporten in dwarsrichting zijn in oostelijke richting.

Uit tabel 3.2 blijkt dat in de meetpunten 6 en 7 op het plateau ten oosten van de Plaat van Ossensisse een GRS in ebrichting aanwezig is. Met name in meetpunt 7 is deze GRS groot. Ook in meetpunt 5 in de diepe geul, net ten oosten van het plateau, is een ebgerichte GRS aanwezig. In de meetpunten 2 en 3, in het oostelijk deel van de geul is er een GRS van 0.03 à 0.04 m/s aanwezig in vloedrichting. Het omslagpunt tussen eb- en vloedgerichte GRS bevindt zich ergens tussen meetpunt 5 en 3 (de metingen in punt 4 ontbreken). Het omslagpunt tussen eb en vloed van de (berekende) zandtransporten bevindt zich een stuk westelijker, namelijk tussen meetpunt 6 en 7 op het plateau. Van meetpunt 6 tot en met 2 zijn de getij residuele zandtransporten in vloedrichting! Dat de richting van de GRS over een groot deel van de breedte van de geul niet samenvalt met de richting van de getij residuele transporten komt doordat het zandtransport volgens Engelund-Hansen met de vijfde macht evenredig is met de diepte gemiddelde stroomsnelheid. Omdat de maximum stroomsnelheden hoger zijn tijdens vloed kan netto zandtransport in vloedrichting optreden ook al is de GRS in die meetpunten in ebrichting.

Raai C: 13 uur

Het betreft een 13-uurs meting tijdens een gemiddeld springtij, dus er heeft geen middeling over een springtij-doodtij cyclus plaatsgevonden. Voor de rivierafvoer, weersinvloeden en ongelijkheden in het getij is niet gecorrigeerd. Daarnaast ontbreken in raai C de gegevens van meetpunt 28. Hierdoor is de GRS van dijk tot dijk niet noodzakelijkerwijs nul.

Meetpunt	Eb	Vloed	Eb/Vloed-ratio	Totaal	Residueel
25	3097	-7169	0.43	10266	-4090
26	4149	-9662	0.43	13811	-5513
27	6094	-15325	0.4	21419	-9231
29	16932	-19655	0.86	36587	-2733
30	24203	-6892	3.51	31095	17311

Tabel 3.3 Eb- en vloedzandtransporten, totale en residuele zandtransporten (in kg/m) op 25 oktober 1995 per meetpunt in raai C

In figuur 3.31 is de ligging van de meetpunten in het dwarsprofiel weergegeven. In figuur 3.32 is het verloop van het gemeten zandtransport weergegeven tijdens de meting. In de tabel 3.3 staan per meetpunt de zandtransporten per eb- en vloedfase, de totale en residuele zandtransporten en de verhouding tussen de eb- en vloedtransporten. Uit de tabel 3.3 blijkt dat in het oostelijk deel van raai C (meetpunten 25 t/m 29) een vloedoverschot in zandtransport aanwezig is van tussen de 3.000 en 9.000 kg/m. Dit vloedoverschot in het zandtransport wordt deels gecompenseerd door een eboverschot van 17.000 kg/m in het uiterste westen van raai C (meetpunt 30) op het plateau ten oosten van de Plaat van Ossensisse. Een identiek patroon van het zandtransport door GRS werd berekend uit de OSM-metingen over twee doortij springtijcycli. De GRS op de Drempel van Hansweert is als volgt: in het oosten van de geul en op het oostelijk deel van het plateau (meetpunten 25 t/m 29) een vloedgedomineerd zandtransport en op het westelijk deel van de geul op het plateau een ebgedomineerd zandtransport (meetpunt 30). In de hele raai C domineert het vloedtransport. In de hele raai C domineert het zandtransport in vloedrichting.

3.6 Residueel transport door getij-asymmetrie

3.6.1 Inleiding

Een belangrijk mechanisme dat de aanzanding van drempels in de Westerschelde veroorzaakt is getij-asymmetrie (Storm, 1996; Tank, 1996). In een estuarium met relatief ondiepe geulen zoals de Westerschelde zal de getijgolf zodanig deformeren dat het dal van de getijgolf minder snel voortplant dan de top. De getijgolf wordt hierdoor asymmetrisch. Daardoor duurt de ebfase langer dan de vloedfase en treden tijdens de vloedfase hogere gemiddelde en maximale stroomsnelheden op dan tijdens de ebfase. De vervorming van de getijgolf leidt ook tot een asymmetrie in het zandtransport. Getij-asymmetrie is de afwijking van de opgetreden getijgolf ten opzichte van de sinusvormige (M_2) getijgolf. Het zandtransport dat hierdoor veroorzaakt wordt is het gevolg van de deformatie van de getijgolf.

3.6.2 Analyse

Om de grootte van het zandtransport door getij-asymmetrie te bepalen is de methode uit Storm (1996) gebruikt. Deze methode kan niet rechtstreeks op de zandtransporten worden toegepast en daarom wordt uitgegaan van de met de formule van Engelund-Hansen uit de diepte gemiddelde stroomsnelheden berekende zandtransporten. De diepte gemiddelde stroomsnelheden in elk meetpunt worden met een vaste factor aangepast, zodanig dat het reststroom in elk meetpunt 0 m/s is. Daardoor wordt het effect van de GRS geneutraliseerd. De analyse is toegepast op de meting tijdens een gemiddeld springtij in raai C op 25 oktober 1995. In figuur 3.32 staan met de Engelund-Hansen berekende zandtransporten door de getij-asymmetrie. In tabel 3.4 worden de berekende zandtransporten per getijfase samengevat.

Meetpunt	Eb	Vloed	Eb/Vloed-ratio	Totaal	Residueel
25	1639	-5584	0.43	7223	-3945
26	4443	-8481	0.43	12924	-4038
27	1915	-21584	0.4	23499	-19669
29	6281	-31942	0.86	38223	-25661
30	3217	-13255	3.51	16472	-10038

Tabel 3.4 Eb- en vloedzandtransporten, totale en residuele zandtransporten (in kg/m) door getij-asymmetrie op 25 oktober 1995 per meetpunt in raai C

Uit de figuur 3.32 en de tabel 3.4 blijkt dat het vloedtransport aanzienlijk groter is dan het ebzandtransport. Hieruit blijkt dat getij-asymmetrie een belangrijk factor is in het zandtransporten op de Drempel van Hansweert.

3.7 Residueel zandtransport door onder- en oververzadiging

3.7.1 Inleiding

Residueel zandtransport door onder- en oververzadiging is een belangrijk mechanisme dat aanzanding van verdiepte drempels veroorzaakt (Storm, 1996; Tank, 1996). De hierna volgende (1-dimensionale) theorie over transport door onder- en oververzadigingen is gebaseerd op Storm (1996).

Onder- en oververzadiging veroorzaakt een residueel transport van een geuldeel naar een (verdiepte) drempel doordat het momentane zandtransport met een vertraging reageert op een verandering in de stroomsnelheid. De veranderingen in de stroomsnelheid ontstaan door relatieve veranderingen in het doorstroomoppervlak. Deze vertragingen en versnellingen kunnen gemiddeld over een getijfase in bepaalde gebieden aanwezig zijn. In deze gebieden is dus gemiddeld over een getijfase sprake van oververzadigd sedimenttransport bij vertragende stroom en onderverzadigd sedimenttransport bij versnellende stroom. Deze *ruimtelijke* onder- en oververzadigingen zijn gesuperponeerd op *temporele* onder- en oververzadigingen door versnellende en vertragende stroom gedurende een getij.

In de getijfase met oververzadiging wordt meer zand getransporteerd in een bepaalde richting dan in de daaropvolgende fase met onderverzadiging in de andere richting. In het geval van een te ruim geulprofiel, bijvoorbeeld een gebaggerde drempel, leidt dit tot netto transport van een geul(-deel) naar het te ruime profiel (figuur 3.33). De verstoring die het te ruime geulprofiel in feite is, wordt uitgevlakt.

3.7.2 Verwachte patroon onder- en oververzadiging op de noordelijke zijde van de Drempel van Hansweert

Het belang van zandtransport naar de Drempel van Hansweert door ruimtelijke onder- en oververzadigingen is raai M onderzocht. Raai M ligt op de noordelijke zijde van de Drempel van Hansweert in de binnenbocht (figuur 2.5).

In tabel 3.5 en de bijbehorende figuur 3.34 is het verwachtingspatroon op de noordelijke zijde van de Drempel van Hansweert gedurende een getijcyclus van de temporele en ruimtelijke onder- en oververzadiging. Ook het gecombineerde effect van temporele en ruimtelijke onder- en oververzadigingen staat in de tabel 3.5.

Het temporele verloop van de onder- en oververzadiging op de verschillende lokaties is tijdens de verschillende getijperioden als volgt: tijdens de eerste periode in een getijfase, als de stroomsnelheid toeneemt, is de waterkolom onderverzadigd. Later, tijdens maximum eb- en vloedstroom, is de stroming constant en is de waterkolom verzadigd. Na maximum stroom, in de laatste periode van een getijfase als de stroomsnelheid weer afneemt, is de waterkolom oververzadigd.

		Temporele o/o			Ruimtelijke o/o	Temporele + Ruimtelijke o/o		
		Periode binnen getij fase				Periode binnen getijfase		
Getijfase	lokatie	begin	max. str.	eind		begin	max. str.	eind
Eb	a	-	0	+	--	-	0/-	0 ?
	b	-	0	+	-	-	0/-	+
	c	-	0	+	0	-/0	0	+
Vloed	c	-	0	+	0	-	0	0/+
	b	-	0	+	+	-/0	+	+
	a	-	0	+	++	0 ?	+	+

Tabel 3.5 Verwachte temporele, ruimtelijke en gecombineerde onder- en oververzadigingen tijdens verschillende periode in een getijcyclus in de binnenbocht op de noordelijke zijde van de Drempel van Hansweert

- = onderverzadiging a = (verdiepte) drempel
 0 = verzadiging b = overgangszone
 + = oververzadiging c = geul

Het ruimtelijk patroon van de verzadigingsgraad is als volgt: als bij eb het water de drempel (lokatie a) afstroomt en toeneemt in stroomsnelheid (lokatie b) is de waterkolom in beide punten onderverzadigd; pas in lokatie c, voorbij het overgangsgebied, is de waterkolom

verzadigd en in evenwicht met de heersende stromingscondities. Bij vloed stroomt het water dat aanvankelijk verzadigd is (lokatie c) is via het overgangsgebied (lokatie b) de drempel op en de waterkolom wordt oververzadigd (lokatie a).

Het gecombineerde effect van de temporele en de ruimtelijke onder- en oververzadigingen is ook ingeschat. De inschatting hiervan is lastig omdat het relatieve aandeel van de temporele en de ruimtelijke effecten onbekend is. Hier wordt aangenomen dat beide effecten even zwaar wegen. De temporele verzadigingsgraad zal in het ene geval versterkt en in het andere geval verzwakt worden door de ruimtelijke verzadigingsgraad. Wel neemt in al de drie perioden de (ruimtelijke) verzadigingsgraad in de richting van de stroming toe.

3.7.3 Methode

Om een indruk te krijgen van de grootte van het residueel transport door onder- en oververzadiging is onderzocht in hoeverre het beeld van de gecombineerde verzadigingsgraad in tabel 3.5 ook in werkelijk optreedt. Daartoe is op de noordelijke zijde van de Drempel van Hansweert in de binnenbocht een zandtransportmeting in langsraai M verricht (figuur 2.5). De raai bestaat uit 6 achter elkaar liggende meetpunten. Raai M ligt in een stroombaan tijdens maximum vloedstroom. De ligging ervan is gebaseerd op een drijfvermeting tijdens een gemiddeld getij (Meetdienst Zeeland, 1996c). De meting in raai M is verricht tijdens een matig ontwikkeld springtij met een getijcoëfficiënt van 1.11 (-).

De analyse van raai M is beperkt tot drie meetpunten: meetpunt 60 in het niet gebaggerde geuldeel, meetpunt 63 in het overgangsgebied tussen verdiepte geul (drempel) en geuldeel en meetpunt 65 op de verdiepte drempel. Meetpunt 60 komt dus overeen met c, meetpunt 62 met b en meetpunt 65 met a in tabel 3.5.

Of een concentratieverticaal onder- of oververzadigd is, is onderzocht door deze te vergelijken met een theoretische concentratieverticaal. De theoretische concentratieverticaal is berekend volgens de methode van Rouse. De gemeten en de berekende concentratieverticaal zijn uitgedrukt in het suspensie-getal Z . De ratio tussen het berekende en het gemeten suspensie-getal, ZR , is een maat voor de (relatieve) verzadiging van de verticaal. Bij $ZR = 1$ is de verticaal verzadigd. Een $ZR < 1$ duidt op onderverzadiging en een $ZR > 1$ op oververzadiging van de verticaal.

Hieronder wordt de berekening van de suspensie-getallen met de methode van Rouse uitgelegd.

Rouse-verdeling

De Rouse-verdeling gaat uit van een parabolisch verloop van de diffusiecoëfficiënt over de stroomverticaal en kan als volgt berekend worden (Van Rijn, 1993):

$$\frac{c_z}{c_a} = \left(\frac{h-z}{z} \cdot \frac{a}{h-a} \right)^2$$

3.3

waarin:

- c_z = concentratie op hoogte z boven de bodem (-)
 c_a = referentieconcentratie (-)
 h = waterdiepte (m)
 z = hoogte boven de bodem (m)
 a = hoogte boven de bodem waar de referentieconcentratie is gedefinieerd (m)
 Z = $w_s/\beta K u_{*c}$, het suspensie getal waarin:
 w_s = valsnelheid van het gesuspenseerd sediment (m/s)
 β = $1+2(w_s/u_{*c})^2$ (-)
 K = Von Karman constante (0.4 (-))
 u_{*c} = $\sqrt{g \cdot u/(18 \cdot \log(12h/k_s))}$ (m/s)
 u = diepte gemiddelde stroomsnelheid (m/s)
 k_s = effectieve bodemruwheid (m)

Het suspensiegetal Z is behalve een parameter die de vorm van de concentratieverticaal goed beschrijft ook fysisch goed te interpreteren. Z is namelijk de quotiënt van de valsnelheid van het zand, w_s , en de bodemschuifspanningssnelheid, u . Het suspensiegetal beschrijft de verhouding tussen de twee tegengesteld werkende mechanismen. Een hoge waarde van Z hoort bij een concentratieverticaal waarbij vrijwel alle zand geconcentreerd bij de bodem is (figuur 3.35). Dit duidt op een (relatief) grote korrelgrootte, dus valsnelheid. Een lage waarde van Z duidt op een concentratieverticaal waarbij zand tot bovenin gelijkmatig over de verticaal is verdeeld. Dit duidt op een relatief kleine invloed van de valsnelheid.

De concentratieverticaal wordt volgens Rouse berekend met de valsnelheid van het gesuspenseerde sediment. De korrelgrootte van het gesuspenseerde materiaal is over het algemeen kleiner dan die van het bodemsediment. Het verschil in korrelgrootte neemt af met toename van de stroomsnelheid. De berekeningen zijn echter uitgevoerd met een vaste waarde van de d_{50} van 240 μm ($w_s = 0.030$ m/s) van het bodemmateriaal. De berekening is verder uitgevoerd met een vaste waarde van de Chézy-coëfficiënt van 49 $\text{m}^{0.5}/\text{s}$ die hoort bij waterdiepten van tussen de 21 en 15 m en bij een k_s -waarde van 0.4 m.

De referentieconcentratie is berekend op de hoogte boven de bodem a die gedefinieerd is als de halve hoogte van de beddingvormen. Veel gebruikte waarden voor a variëren tussen 0.01h en 0.05h (Van Rijn, 1984 in: Voogt et al., 1991). De bodemvormen in meetpunten 60, 62 en 65 zijn tussen de 0.2 m en 0.4 m hoog (bijlage E; 'multi-beam'-lading oktober 1995). Een a

van $0.01h$ komt vrij goed overeen met de halve hoogte van de bodemvormen in meetpunten (waterdiepte = NAP -21.0 m: $a = 0.21$ m; NAP -14.9 m: $a = 0.15$ m) zijn.

De Rouse-verdeling is genormaliseerd door te delen door de waterdiepte (zie Jeuken, 1992). De vergelijking wordt dan:

$$\frac{c_z}{c_a} = \left(\frac{1 - \frac{z}{h} \cdot 0.01}{\frac{z}{h} \cdot 1 - 0.01} \right)^z = \left(0.0101 \left(\frac{h}{z} - 1 \right) \right)^z \quad 3.4$$

Het onderste *gemeten* punt in de concentratie verticaal bevond zich (meestal) op 0.2 m boven de bodem. Dit komt overeen met een relatieve waterdiepte in de meetpunten 60, 62 en 65 die varieert tussen de $0.005 h$ en $0.016 h$.

Suspensiegetal van de gemeten concentratieverticalen

Het suspensiegetal van de gemeten concentratieverticalen is bepaald door met een regressie volgens een machtsfunctie door de meetwaarden te fitten volgens de Rouse-verdeling. De machtsfunctie is:

$$y = ax^b \quad 3.5$$

waarin:

$$y = c_z$$

$$a = c_a$$

$$x = \left(\frac{h-z}{z} \right) \cdot \left(\frac{a}{h-a} \right)$$

$$b = Z$$

Op elke meethoogte is een Z berekend. De Z op 50% van de waterdiepte boven de bodem is de Z die representatief is gesteld voor de gehele concentratieverticaal.

3.7.4 Vergelijking temporeel en ruimtelijk verloop van de gemeten en berekende concentratieverticalen

De gemeten en berekende concentratieverticalen en de bijbehorende suspensiegetallen in de meetpunten 60, 62 en 65 zijn met elkaar vergeleken (figuur 3.36a t/m c). De vergelijking is gemaakt voor 6 perioden tijdens een getijcyclus (figuur 3.37). De waterdiepte in figuur 3.36 is relatief gemaakt maar de concentraties zijn absoluut.

Let op! In de grafieken in figuur 3.36 staat de (relatieve) diepte op de x-as.

Wat in eerste instantie opvalt in de grafieken in figuur 3.36 is dat de *gemeten* concentraties altijd groter zijn dan de *berekende* concentraties. De verschillen zijn het grootst op 20 % boven de bodem. De *vorm* van de berekende concentratieverticaal komt over het algemeen echter goed overeen met de gemeten concentratieverticalen. Verder valt ook op dat het berekende suspensiegetal altijd groter is dan het gemeten suspensiegetal. Dit blijkt ook uit de ZR, die in alle gevallen > 1 is.

Een verklaring voor het grote verschil tussen gemeten en berekende concentratieverticalen is dat de d_{50} van het getransporteerde zand kleiner is dan de (gemeten) d_{50} van 240 μm van het bodemmateriaal die in de berekening is gebruikt. Uit een gevoeligheidsanalyse is gebleken dat het verloop van de berekende concentratie verticalen zeer gevoelig is voor de ingevoerde d_{50} en aanzienlijk minder gevoelig voor de k_s -waarde. Een derde verklaring voor de afwijking van de gemeten en berekende verticalen is dat de Rouse-verdeling een 1DV-benadering is. 2D (en 3D) effecten hebben een grote invloed op de concentratie verdeling. Zo liggen de meetpunten in een binnenbocht waar de secundaire stroming aanvoer van extra sediment veroorzaakt. Deze effecten zijn niet te verdisconteren in de Rouse-verdeling. Verder veroorzaakt de secundaire stroming een afname van de valsnelheid in de binnenbocht waardoor daar meer sediment in suspensie blijft (dit is weer een 1D-effect). Dat afname van de valsnelheid heeft als gevolg dat de gemeten en berekende verticalen beter passen bij een kleinere d_{50} (afname valsnelheid w_s). Ondanks het feit dat het verloop van de gemeten concentratieverticalen afwijken van de berekende concentratieverticalen worden ze nader onderzocht omdat onderlinge verschillen in de mate van verzadiging informatie verschaffen over onder- en oververzadiging.

In tabel 3.6 is de ZR in de verschillende meetpunten en op de verschillende tijdstippen samengevat. De ZR varieert tussen de 1.02 en de 4.71. De ZR is altijd groter dan 1, dus er zou alleen sprake zijn van oververzadiging. Het lijkt erop dat de berekende Z getal systematisch te groot is. Het is daarom redelijk om aan te nemen dat $Z_{\text{ber}}/Z_{\text{gem}}$ -ratio genormeerd moet worden op een waarde van 1.5. Dit zou betekenen bij ZR-waarden lager dan 1.5 onderverzadiging en bij ZR-ratio's hoger dan 1.5 oververzadiging optreedt.

Als uitgegaan wordt van een eenheidswaarde van de ZR van 1.5 dan stemt het opgetreden (ruimtelijk en temporeel gecombineerd) patroon van de onder- en oververzadiging tijdens de ebfase goed overeen met het verwachte patroon. Tijdens de vloedfase is alleen tijdens maximum vloed de overeenkomst goed.

		ZR (-)			Onder- en oververzadiging					
		Periode binnen getijfase			Periode binnen getijfase					
Getijfase	lokatie	begin	max. str.	eind	begin		max. str.		eind	
Eb	65	1.45	1.15	4.71	0/-	-	-	0/-	+++	0
	62	1.03	1.58	3.26	-	-	0/-	0/-	+++	+
	60	1.70	1.72	2.06	0/+	-/0	0/-	0	++	+
Vloed	60	1.96	1.02	1.09	+	-	-	0	-	0/+
	62	3.44	2.04	1.60	++	-/0	+	+	0/-	+
	65	1.72	2.56	2.05	0/+	0	++	+	+	+

Tabel 3.6 Opgetreden ZR-waarden en geïnterpreteerde opgetreden onder- en oververzadigingen en de verwachte onder- en oververzadigingen (in **vet**) tijdens verschillende periode in een getijcyclus in de binnenbocht op de noordelijke zijde van de Drempel van Hansweert

- = onderverzadiging 65 = (verdiepte) drempel
0 = verzadiging 62 = overgangszone
+ = oververzadiging 60 = geul

Met behulp van deze analyse is het niet goed in te schatten of onder- en oververzadiging werkelijk optreedt, alhoewel tijdens de ebfase dit wellicht mogelijk is. Behalve tekortkomingen in de methode (bijvoorbeeld geen rekening gehouden met veranderingen in de valsnelheid van het sediment bij veranderende stroomsnelheid), in de meting (geen zandmonsters op verschillende hoogten in de verticaal genomen om de korrelgrootte van het gesuspenseerde zand vast te stellen) of tekortkomingen van de Rouse-verdeling zelf, spelen ook factoren als de invloed van de lokatie van de meetraai in de binnenbocht een rol. De lokatie van de raai in de binnenbocht leidt mogelijk tot hogere zandconcentraties aldaar, door aanvoer van zand via de secundaire stroming of van over de plaat. Daarnaast beïnvloeden, behalve veranderingen van het (relatief) geuloppervlak, ook veranderingen in de geulbreedte het ruimtelijk effect van het zandtransport door onder- en oververzadiging. Om het principe van zandtransport door onder- en oververzadiging naar een (verdiepte) drempel aan te tonen zou onderzoek onder beter gecontroleerde condities in een stroomgoot geschikter zijn.

4 Synthese

De synthese betreft de situatie tijdens een gemiddeld springtij.

Eb Figuur 4.1

In het Zuidergat is het (diepte geïntegreerd) zandtransport maximaal 2 kg/m.s in de diepe buitenbocht; in de binnenbocht is het zandtransport vrijwel 0 kg/m.s. De grootste zandtransporten van 1 kg/m.s uit de Schaar van Waarde komen uit de Schaar van Valkenisse; in de rest van de Schaar van Waarde zijn de maximale transporten klein.

Door de Schaar van Ossensisse wordt alleen tijdens maximum eb gedurende korte tijd zand getransporteerd van enige omvang: 0.8 kg/m.s.

Ter hoogte van het centrum en op de noordelijke zijde van de Drempel van Hansweert vinden de grootste maximale zandtransporten plaats op het plateau ten oosten van de Plaat van Ossensisse en in het oostelijk deel van de diepe geul naast het plateau. De maximale transporten hebben een grootte van 2 à 3 kg/m.s. In de buitenbocht zijn de maximale ebtransporten een factor 2 kleiner dan in de binnenbocht.

Op de zuidelijke zijde van de Drempel van Hansweert neemt in de binnenbocht het zandtransport tussen de Schaar van Ossensisse en het midden van de drempel niet af. Op de noordelijk zijde van de drempel neemt in de binnenbocht het zandtransport wel toe: van 1 kg/m.s naar 2 kg/m.s. Dit wordt veroorzaakt door versnelling van de stroom door convergentie.

Rondom kentering is het zandtransport in het hele gebied 1 à 2 uur vrijwel 0 kg/m.s.

In de hoofdgeul ligt het totale zandtransport tijdens de ebfase in de orde 10 à 25.10⁶ kg. Minimaal 63 % van het zand dat in het drempelgebied aankomt, is afkomstig uit het Zuidergat. Nog geen 10 % van het zand uit het Zuidergat wordt door de Schaar van Ossensisse afgetapt. Vrijwel alle zand dat tijdens eb op het midden van de drempel sedimenteert, is dan ook afkomstig uit het Zuidergat.

Tijdens een groot deel van de ebfase treden dwarszandtransporten op. Op de noordelijke zijde van de Drempel van Hansweert convergeert het zandtransport. Het cellenpatroon van zandtransport door de secundaire stroming is complex. Vlak boven de bodem, op 0.1 deel van de waterdiepte, vinden zandtransporten plaats die variëren tussen de 0.006 en 0.080 kg/m².s.

Alleen in het westelijk deel van het plateau ten oosten van de Plaat van Ossensisse vindt zandtransport door GRS in ebrichting plaats van 0.09 kg/m.s over twee doortij springtij-cycli.

Op de noordelijke zijde van de Drempel van Hansweert vindt *mogelijk* tijdens de ebfase zandtransport door naijlingseffecten naar de (verdiepte) drempel plaats. Dit is met de gebruikte meting en analysemethode nog niet hard te maken.

Vloed Figuur 4.2

Tijdens de vloedfase is het maximale zandtransport gemiddeld een factor 2 à 3 groter dan het maximale (diepte geïntegreerde) transport tijdens de ebfase. In de vloedscharen, zoals de Schaar van Waarde, is dit verschil groter: een factor 10. In een ebschaar, zoals het Zuidergat, is dit verschil kleiner: een factor 1 of minder.

Op de noordelijke zijde van de Drempel van Hansweert treden in de binnenbocht transporten op van 5 à 10 kg/m.s. Ook op het plateau ten oosten de Plaat van Ossenissee treden hoge maximale transporten op. In de buitenbocht zijn de zandtransporten een factor 2 à 3 kleiner. In de binnenbocht halveren de maximale vloedtransporten tussen de diepe bocht en de ondiepe drempel.

Uit de Schaar van Ossenissee en (volgens modelberekeningen) door getijstromen van over de Plaat van Ossenissee komen zandtransporten die maximaal 1.6 kg/m.s zijn. De duur van deze transporten is een uur, dus kort.

Ter hoogte van de drempel verdeelt het zand zich tussen het Zuidergat en de Schaar van Waarde. In het Zuidergat vinden de hoogste transporten plaats in de binnenbocht. Deze transporten zijn hier maximaal 2 kg/m.s. In de Schaar van Waarde vinden zandtransporten over de gehele breedte plaats van maximaal 1 à 3 kg/m.s.

Rondom het midden van de Drempel van Hansweert hebben de banen met maximum transport tijdens vloed een oostelijker ligging dan tijdens de eb.

In de hoofdgeul ligt het totale zandtransport tijdens de vloedfase in de orde van $15 \text{ à } 40 \cdot 10^6$ kg: een factor 2 à 3 groter dan het totale transport tijdens de ebfase. Het merendeel (minimaal 57 %) van het zand dat in het drempelgebied wordt verdeelt, gaat naar het Zuidergat. Het totale transport in de Schaar van Ossenissee is circa 5 % van het transport in de hoofdgeulen. Omgerekend naar zandvolumina vinden over de Drempel van Hansweert op één dag tijdens een gemiddeld springtij transporten plaats die enkele malen groter zijn dan de gemiddelde dagelijkse hoeveelheid gebaggerd materiaal.

Rondom maximum vloed vindt het grootste deel van de dwarstransporten plaats. Op de noordelijke zijde van de drempel divergeert het zandtransport. Het cellenpatroon van het zandtransport door de secundaire stroming is complex en wijkt af van het patroon dat bij analyse van de waterbeweging naar voren kwam (Tank, 1997). Vlak boven de bodem varieert het transport tussen de 0.005 en 0.20 kg/m².s.

Het zandtransport door GRS is op de Drempel van Hansweert over een groot deel van de breedte van de geul (met uitzondering van het westelijk deel van het plateau) in vloedrichting en tussen 0.07 en 0.21 kg/m.s groot.

Getij-asymmetrie op de noordelijke zijde van de drempel (inclusief het plateau ten oosten van de Plaat van Ossenissee) is in vloedrichting en tijdens een gemiddeld springtij residueel tussen de 4000 en 26000 kg/m groot.

Op de noordelijke zijde van de Drempel van Hansweert is het niet te bewijzen of tijdens de

vloedfase zandtransport door naijling (ruimtelijke onder- en oververzadiging) naar de drempel plaatsvindt. Behalve tijdens maximum vloed is het patroon in de verzadingsgraad vrij onduidelijk.

5 Conclusies

De beschrijving en analyse van de zandtransportmetingen op de Drempel van Hansweert levert de volgende inzichten op die van belang zijn voor het morfodynamisch gedrag van die drempel:

Langsrichting

- * in de hoofdgeul zijn gemiddeld de maximale (diepte geïntegreerde) zandtransporten tijdens vloed een factor 2 à 3 groter dan tijdens eb; in een vloedschaar is deze factor 10 en in een ebschaar ongeveer een factor 1 of kleiner;
- * in de hoofdgeul vindt tijdens eb- en vloedkentering gedurende respectievelijk 1 en 2 uur een te verwaarlozen hoeveelheid zandtransport plaats;
- * op de noordelijke zijde van de drempel zijn de zandtransporten tijdens eb en vloed het grootst in de binnenbocht; in de buitenbocht zijn de transporten een factor 2 à 3 kleiner;
- * tijdens maximum vloed vindt gedurende een korte periode (< 1 uur) zandtransport van over de Plaat van Ossensisse naar het drempelgebied plaats;
- * ter hoogte van het centrum van de Drempel van Hansweert lopen de banen met maximaal zandtransport uiteen: tijdens vloed ligt deze oostelijker dan tijdens eb;
- * het zandtransport ijlt ongeveer 15 minuten na op veranderingen in de stroomsnelheid; dit is met name duidelijk rondom maximum vloed;

Dwarsrichting

- * zandtransport in dwarsrichting vindt hoofdzakelijk plaats rondom maximum eb en maximum vloed;
- * het cellenpatroon van het zandtransport door secundaire stroming is complex en niet consistent; vlak boven de bodem, op een hoogte van 10% boven de bodem, treden tijdens eb zandtransporten op tussen de 0.006 en 0.080 kg/m².s en tijdens vloed tussen de 0.005 en 0.20 kg/m².s;

Zandfluxen

- * op het midden van de Drempel van Hansweert is tijdens eb ruim 60 % van het zand afkomstig uit het Zuidergat; de rest uit de Schaar van Waarde;
- * op de drempel wordt tijdens de vloedfase het zand tussen de Schaar van Waarde en het Zuidergat als volgt verdeeld: 60 % respectievelijk 40 %;
- * de tijdens een gemiddeld springtij door de stroming getransporteerde hoeveelheden zand over de drempel zijn 5 à 6 maal groter dan de gemiddelde dagelijkse baggeromvang op de drempel;

Getij Residuele Stroming (GRS)

- * uit berekeningen met de formule van Engelund-Hansen die gebaseerd zijn op stroommetingen gedurende 4 weken blijkt dat op de noordelijke zijde van de Drempel van

Hansweert over een groot deel van de geulbreedte zandtransport door GRS van tussen de 0.07 en 0.21 kg/m.s optreedt; dit zandtransport wordt in het uiterste westen van de geul, op het plateau ten oosten van de Plaat van Ossensisse, gecompenseerd door een residueel zandtransport in ebrichting van 0.09 kg/m.s.

Getij-asymmetrie

- * op de noordelijke zijde van de drempel treedt door getij-asymmetrie een residueel zandtransport op van 4000 à 26000 kg/m in vloedrichting tijdens een gemiddeld springtij.

Naijlingseffecten: onder- en oververzadiging

- * zandtransport naar de (te ruime) drempel door naijlingseffecten (ruimtelijke) onder- en oververzadiging) is zeer moeilijk aan te tonen: behalve een niet ideale meting (bijvoorbeeld geen zandmonsters van het suspensiemateriaal) beïnvloedt de ligging van de meetraai in de binnenbocht de zandconcentraties; wel lijkt het patroon in onder- en oververzadiging tijdens de ebfase en tijdens maximum vloed de theorie over zandtransport naar een (verdiepte) drempel niet tegen te spreken.

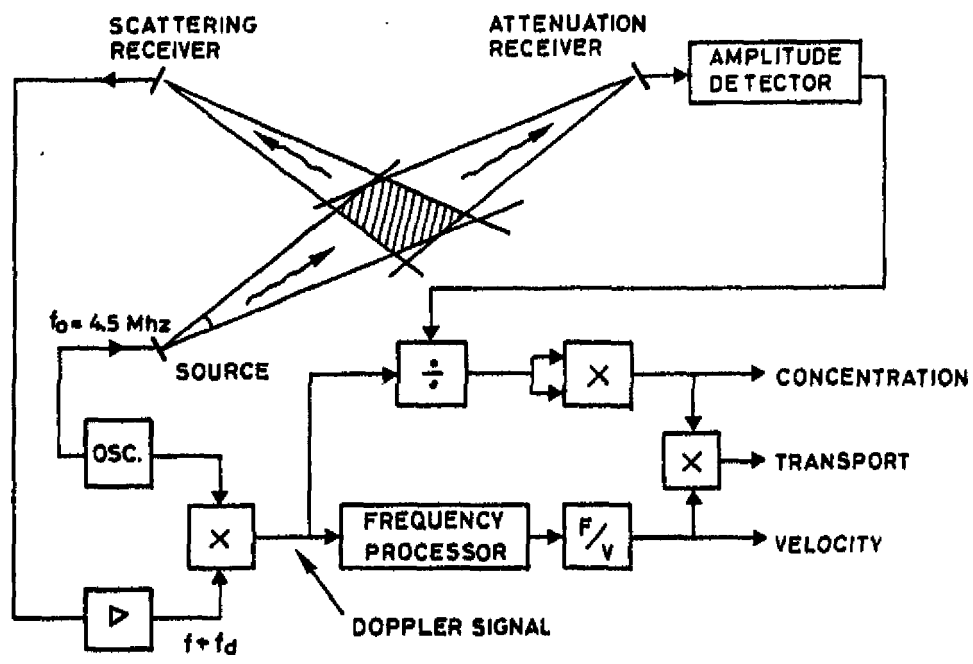
Overig

- * de grootte van het zandtransport wordt met de transportformule van Engelund-Hansen bij diepten kleiner dan NAP -15 m redelijk goed geschat (afwijking < factor 2) met een bodemruwheid (k_s) van 0.45 m; bij grotere diepten wordt het transport overschat met een factor 2 of meer;
- * het ruimtelijk beeld rondom maximum eb en vloed van de met de formule van Engelund-Hansen berekende zandtransport in de WAQUA-module WAMORF komt goed overeen met het beeld uit de metingen;

Literatuur

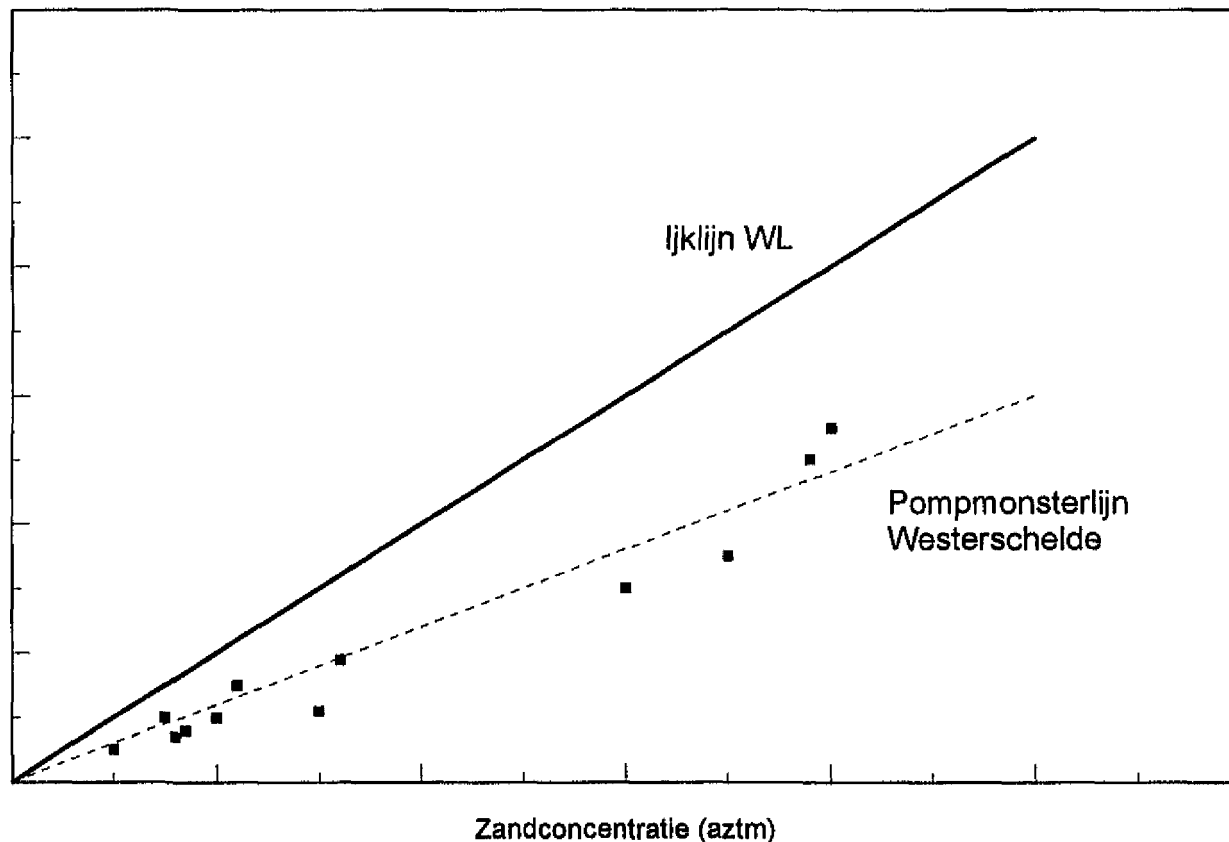
- Anonymous, 1985. Akoestische Zandtransportmeter 1-dimensionale AZTM. Rijkswaterstaat, Delta Dienst, Nota nr. DDWT 85.022, 93 p.
- Bestuurlijk Klankbordforum Westerschelde, 1991. Beleidsplan Westerschelde. Rijkswaterstaat, Directie Zeeland, 92 p.
- Bliek, A.J. en M.N. Ruijter, 1994. Verklarend onderzoek drempels Westerschelde. Ingenieursbureau Svasek, project 940.
- Huijs, S.W.E., 1997. Baggerinspanning bij verdieping '48/'43. Rijkswaterstaat, Directie Zeeland, Afdeling Rivierkunde (NWL), Notitie NWL-97.21, 6 p.
- Jeuken, M.C.J.L., 1992. Een analyse van stroom- en sedimenttransportmetingen in het oostelijk deel van de Westerschelde. Rijkswaterstaat, Directie Zeeland, Nota NWL-92.17.
- Kamphuis, H., 1988. Zwevend transportmeting op de Boven-Rijn (km 865.900) met de Delftse Fles 2, de AZTM en de PFS. Rijkswaterstaat, DBW/RIZA, Afdeling Rivieren, Arnhem/Lelystad, Werkdocument 88.092X, 14 p.
- Kruyt, N.M., 1992. Berekende en gemeten zandtransporten over dwarsraaien in de Westerschelde. Stagerapport RUU, Rijkswaterstaat/DGW.
- Meetdienst Zeeland, 1995a. Raai 5A. Stroom- en sedimentmeting Westerschelde 14 en 15 juni 1995. Rijkswaterstaat, Directie Zeeland, Meetdienst Zeeland, Notitie ZLMD-95.N.021.
- Meetdienst Zeeland, 1995b. Raai F, G, H en J. Stroom- en sedimentmeting Drempel van Hansweert, 23 oktober 1995. Rijkswaterstaat, Directie Zeeland, Meetdienst Zeeland, Notitie ZLMD-95.N.027.
- Meetdienst Zeeland, 1996a. OSM-metingen. Drempel van Hansweert (detailmeting 1), 29 september t/m 29 oktober 1995. Rijkswaterstaat, Directie Zeeland, Meetdienst Zeeland, Notitie ZLMD-95.N.028.
- Meetdienst Zeeland, 1996b. Raai C. Debiet- en sedimentmeting Drempel van Hansweert, 25 oktober 1995. Rijkswaterstaat, directie Zeeland, Meetdienst Zeeland, Notitie ZLMD-95.N.031.
- Meetdienst Zeeland, 1996c. Raai B'/D₂. Debiet- en sedimentmeting. Drempel van Hansweert (18), 17 april 1996. Rijkswaterstaat, Directie Zeeland, Meetdienst Zeeland, Notitie ZLMD-96.N.010.
- Meetdienst Zeeland, 1996d. Meetresultaten stroombaanmeting vloed. Drempel van Hansweert. Detailmeting 16, 21 mei 1996. Rijkswaterstaat, Directie Zeeland, Meetdienst Zeeland, Notitie ZLMD-96.N.021
- Meetdienst Zeeland, 1996e. Stroom- en sedimentmeting. Drempel van Hansweert, 16 september 1996. Rijkswaterstaat, Directie Zeeland, Meetdienst Zeeland, Notitie ZLMD-96.N.022
- Schaap, M., 1997. Testen en verbeteren van de WAMORF-routines. Stageverslag Hogeschool Zeeland, Rijkswaterstaat/RIKZ, Werkdocument RIKZ/OS-97.802X, 33 p.
- Storm, C., 1996. Residuele zandtransporten in de Westerschelde. Rijkswaterstaat/RIKZ, RIKZ-Werkdocument OS-96.837X, 72 p.

- Tank, F.T.G., 1996. Het gedrag van drempels in de Westerschelde. Literatuurstudie en hypothesen. Universiteit Utrecht, Faculteit Ruimtelijke Wetenschappen, IMAU R96-07.
- Tank, F.T.G., 1997. Het gedrag van drempels in de Westerschelde. Beschrijving en analyse van metingen van de waterbeweging op en rondom de Drempel van Hansweert. Universiteit Utrecht, Faculteit der Ruimtelijke Wetenschappen, IMAU R 97-01.
- Van Rijn, L.C., 1993. Principles of sediment transport in rivers, estuaries and coastal seas. Aqua publications, Amsterdam.
- Voogt, L., L.C. Van Rijn en J.H. Van den Berg, 1991. Sediment transport of fine sands at high velocities. Journ. of Hydraul. Eng., 117, 7, 869-890.
- Vroon, J.H., C. Storm en J. Coossen, 1996. Eindrapport OOSTWEST-project. Rijkswaterstaat/RIKZ (in voorbereiding)
- Waterloopkundig Laboratorium, 1983. Akoestische Zandtransportmeter, type AZTM-1. Handboek. Waterloopkundig Laboratorium 096, 30 p.

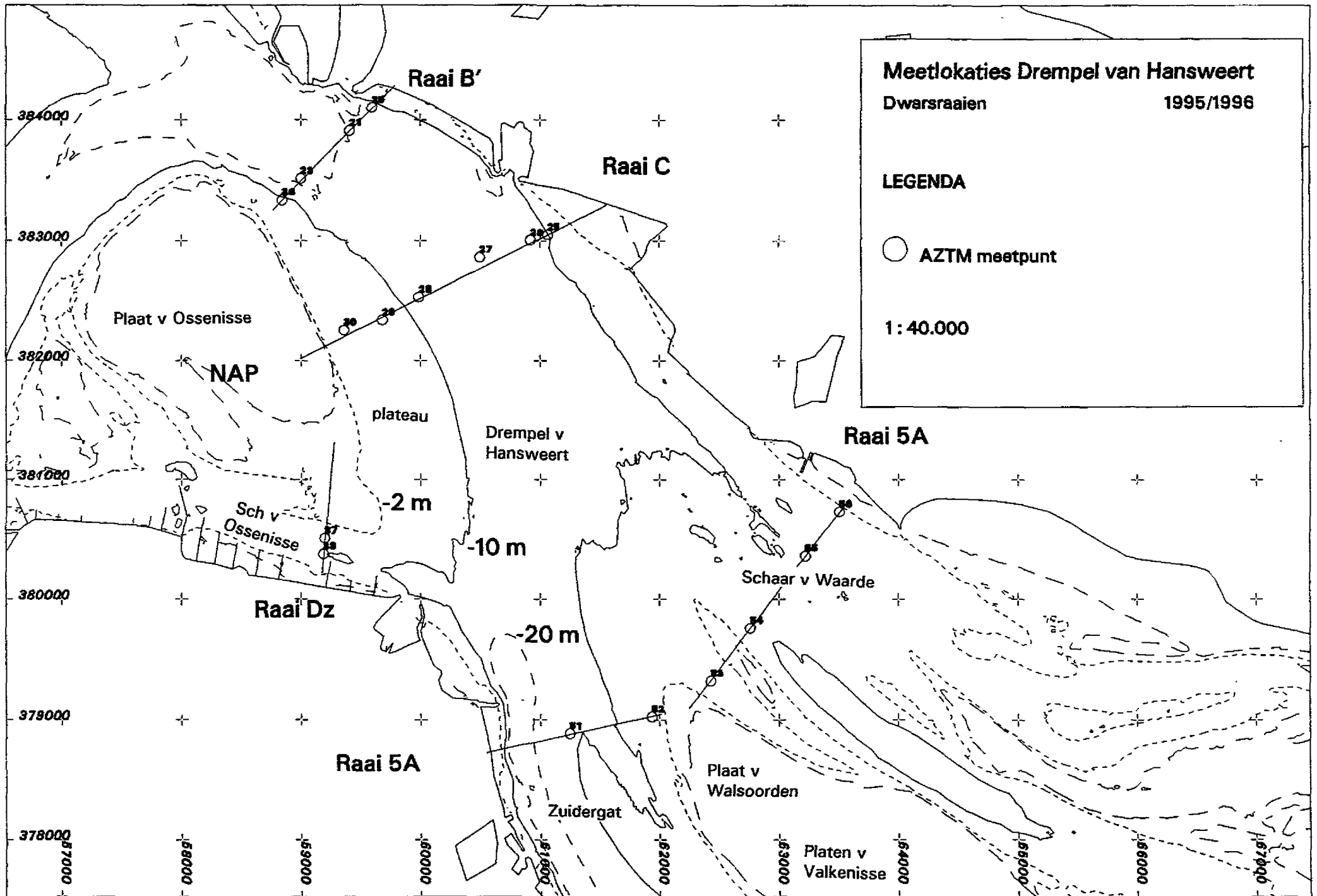


Figuur 2.1 Schematische weergave werking AZTM (uit: Van Rijn, 1993)

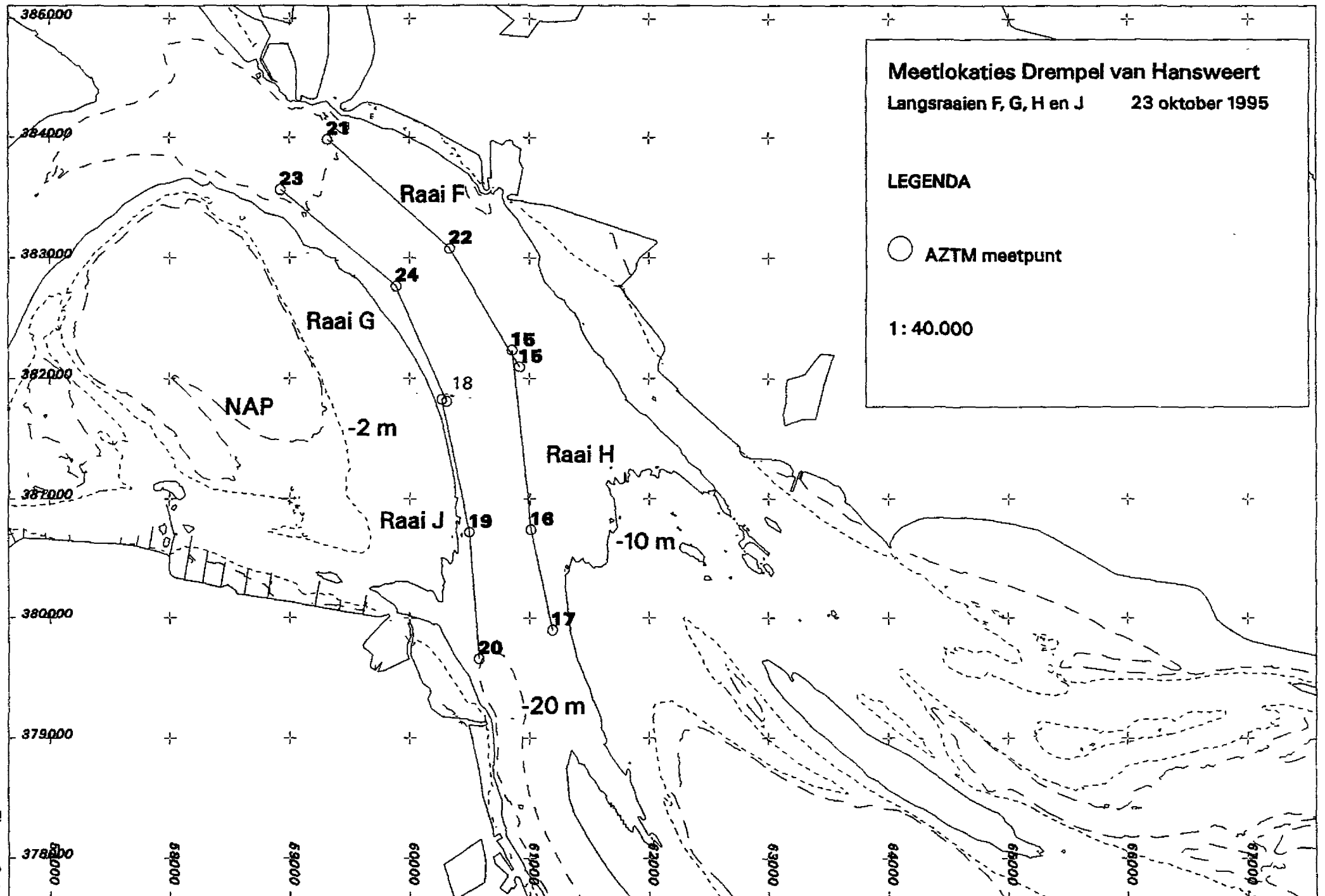
Zandconcentratie (monster)



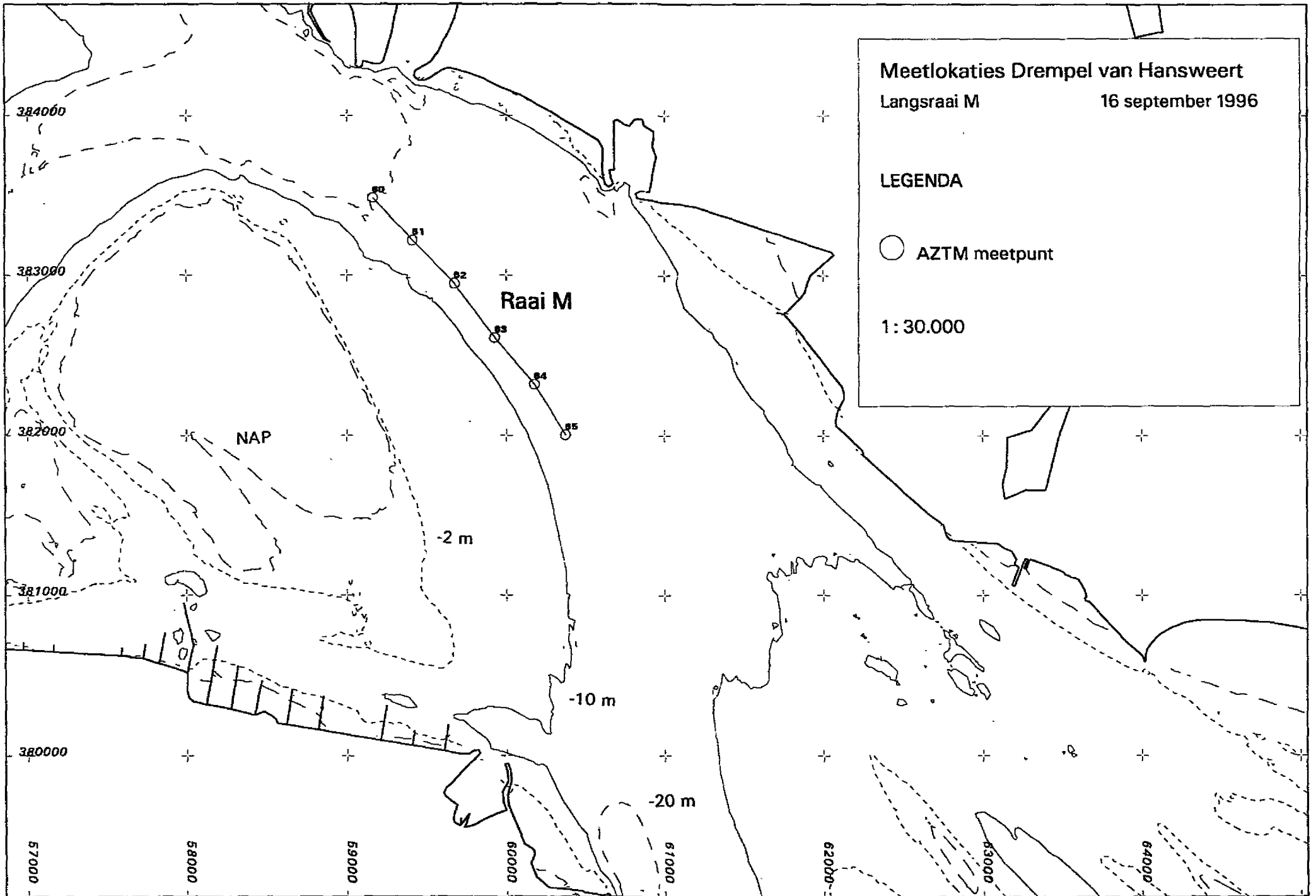
Figuur 2.2 Schematische weergave van de ijkljnen van de zandconcentratiemetingen met de AZTM in een stroomgoot en in de Westerschelde



Figuur 2.3



Figuur 2.4



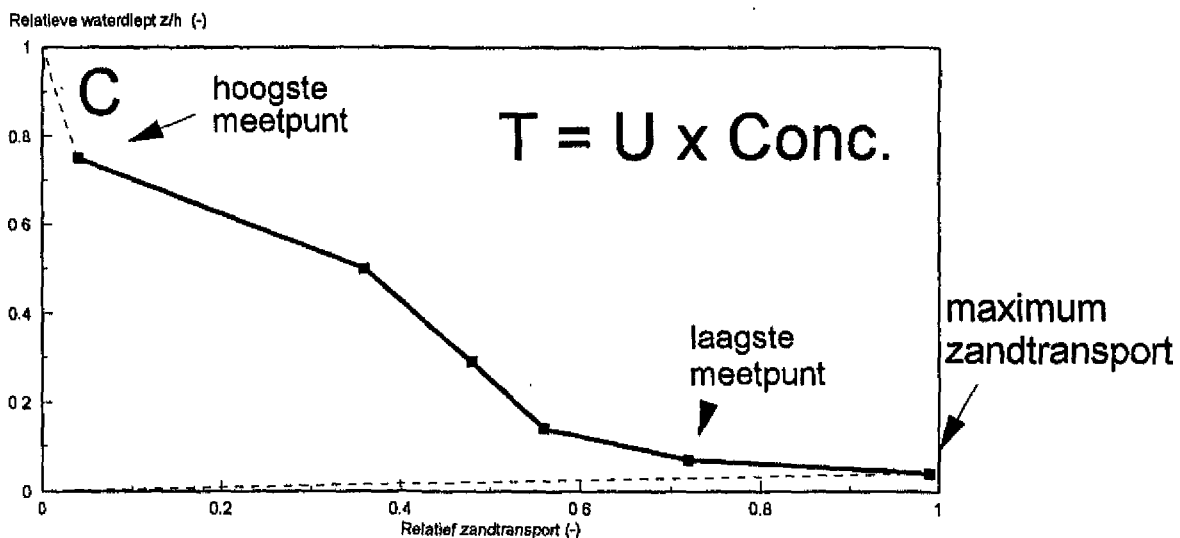
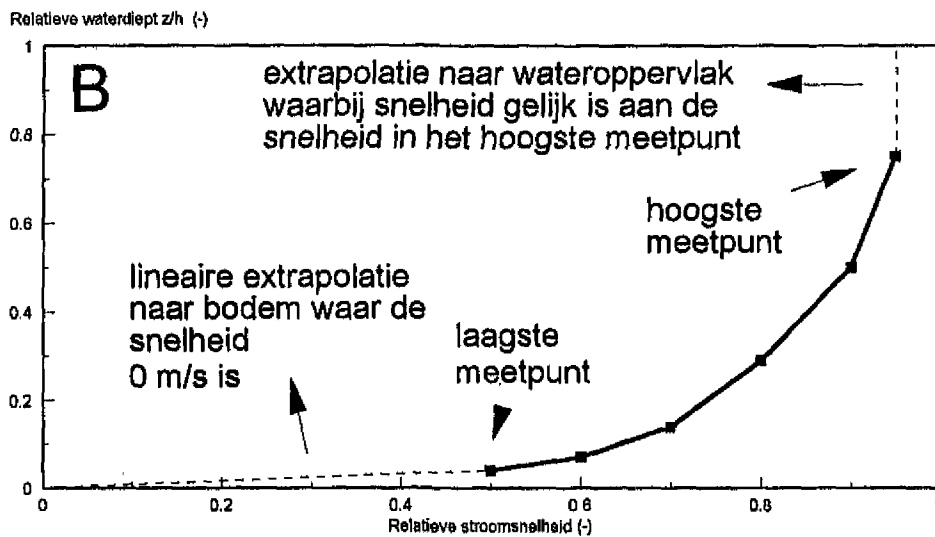
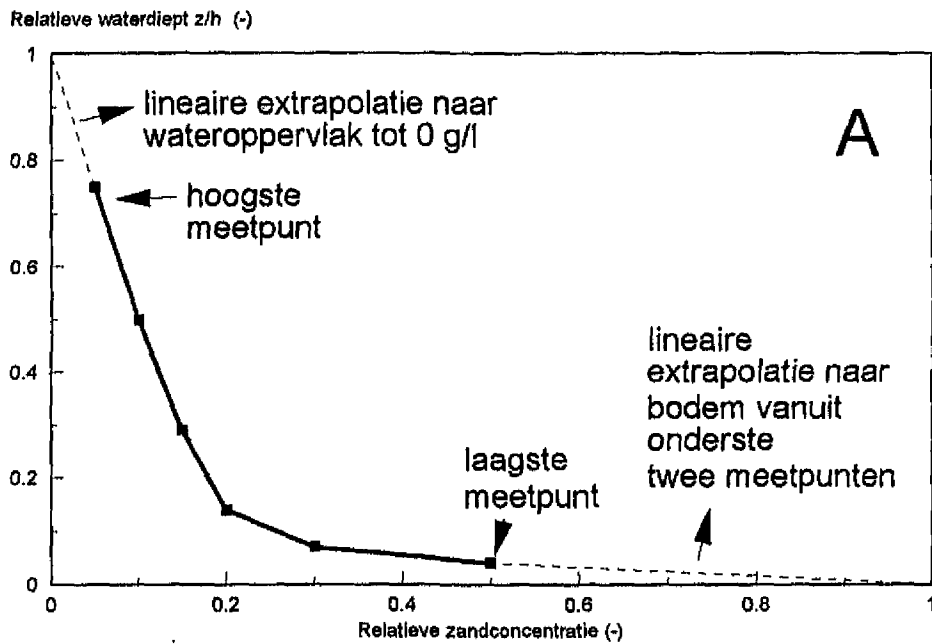
Meetlokaties Drenpel van Hansweert
Langsraai M 16 september 1996

LEGENDA

○ AZTM meetpunt

1: 30.000

Figuur 2.5

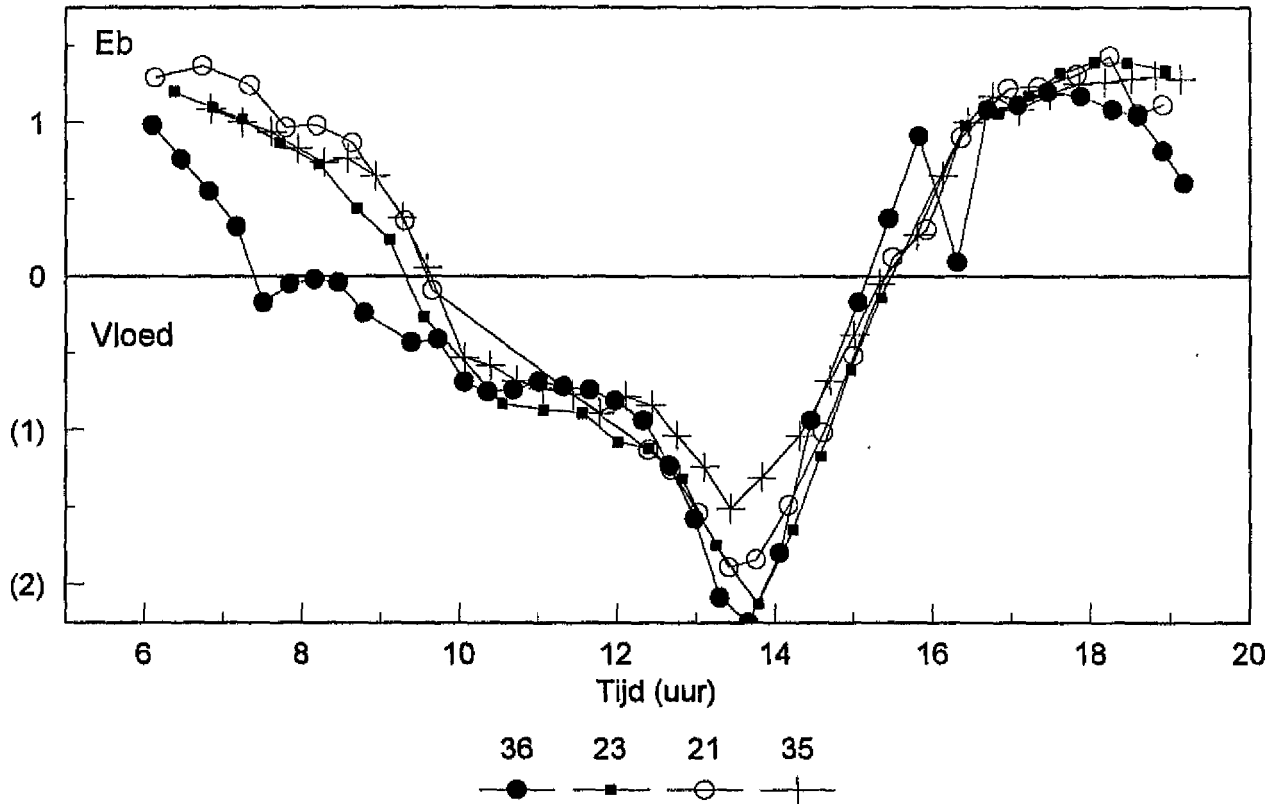


Figuur 2.6 Concentratie- (A) en snelheidsverticaal (B) en de berekende zandtransportverticaal (C)

Raai B' Diepte gemiddelde stroomsnelheid (w)

AZTM 170496 GC = 1.18

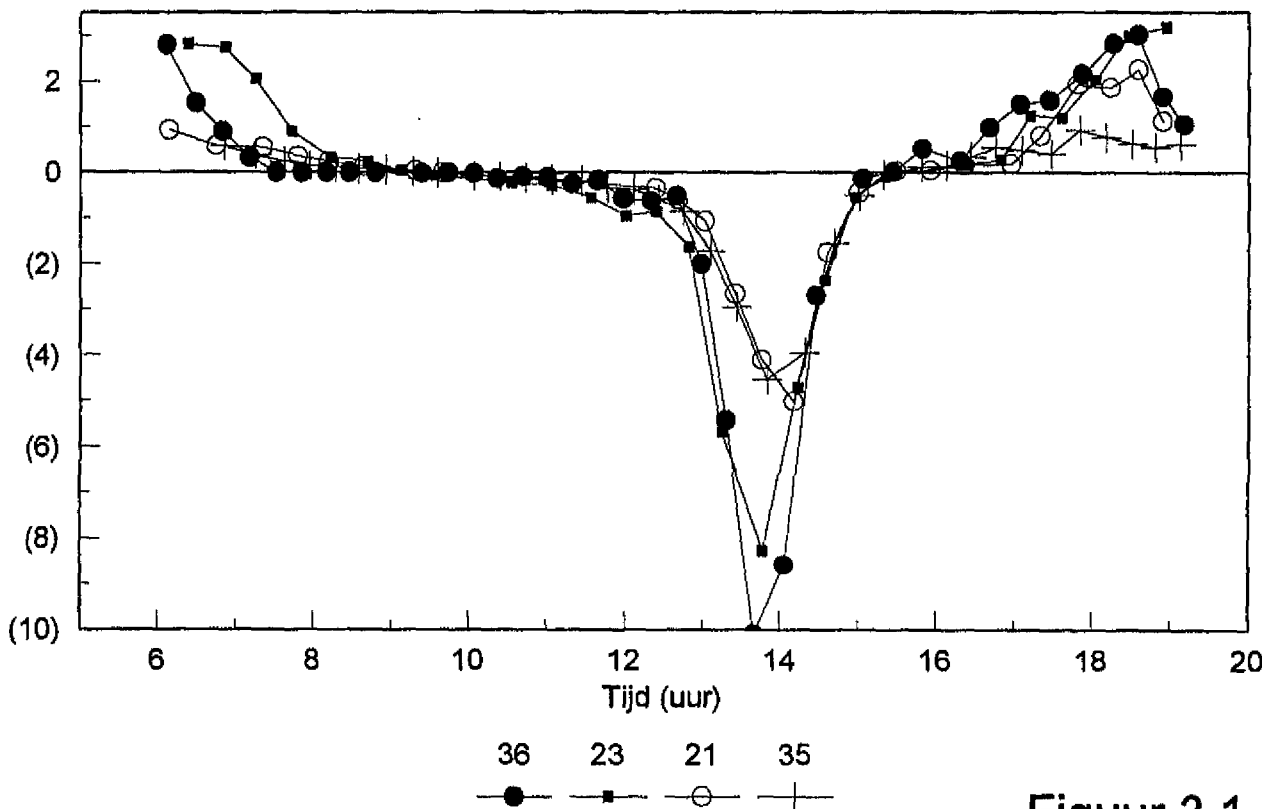
w (m/s)



Raai B' Diepte geïntegreerd zandtransport (T)

AZTM 170496 GC = 1.18

T (kg/m.s)

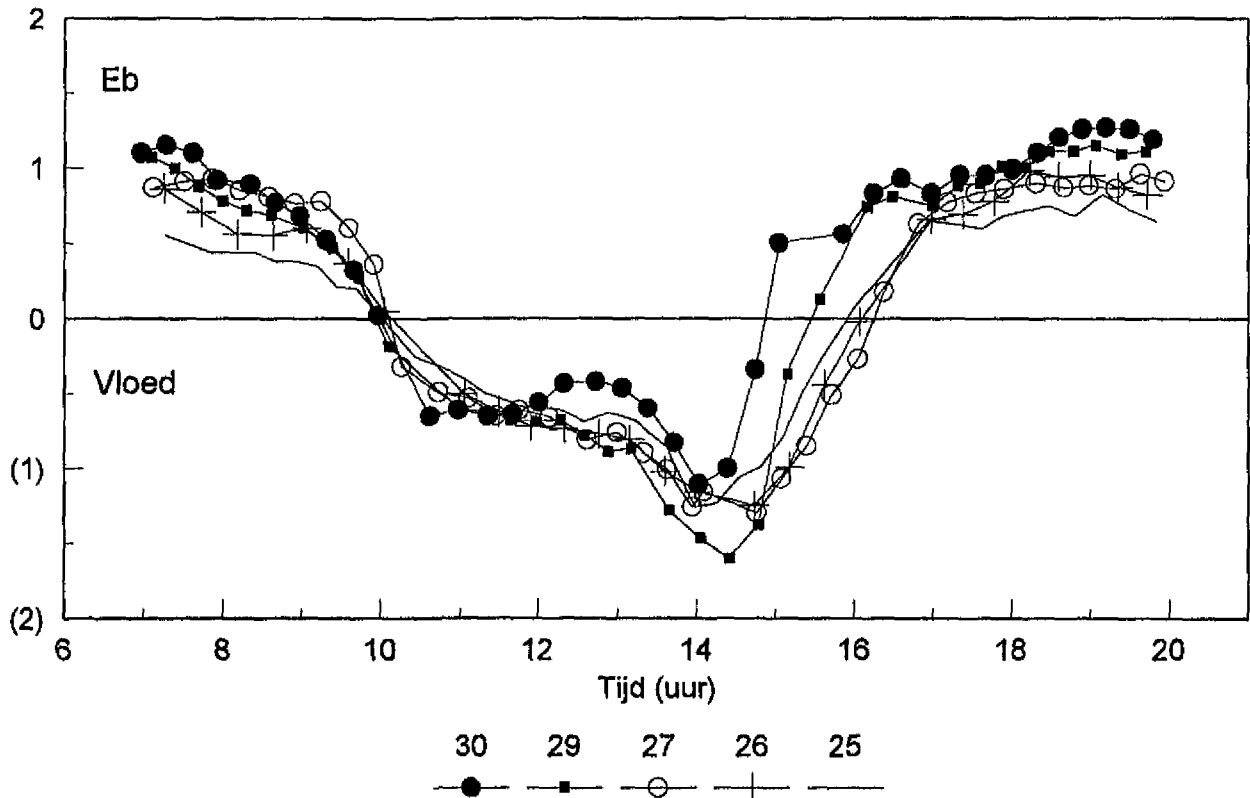


Figuur 3.1

Raai C Diepte gemiddelde stroomsnelheid (w)

AZTM 251095 GC = 1.14

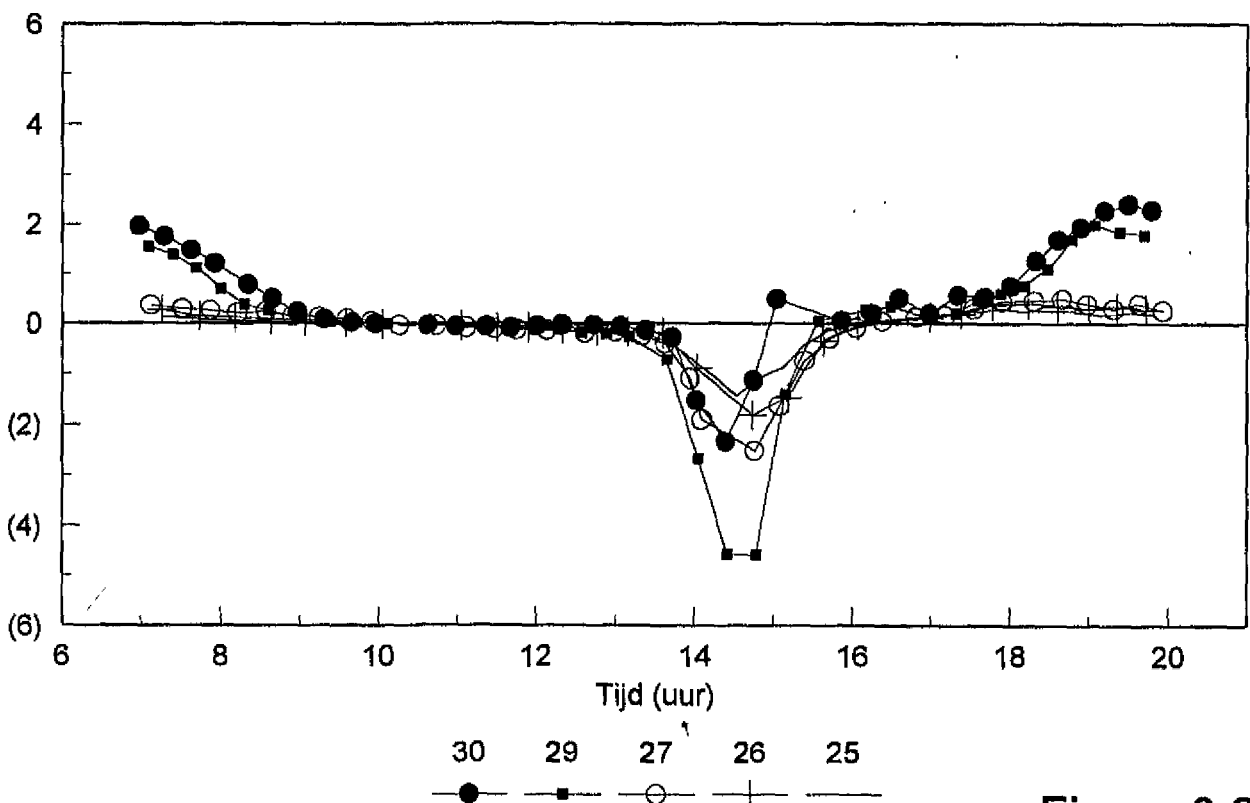
w (m/s)



Raai C Diepte geïntegreerd zandtransport (T)

AZTM 251095 GC = 1.14

T (kg/m.s)

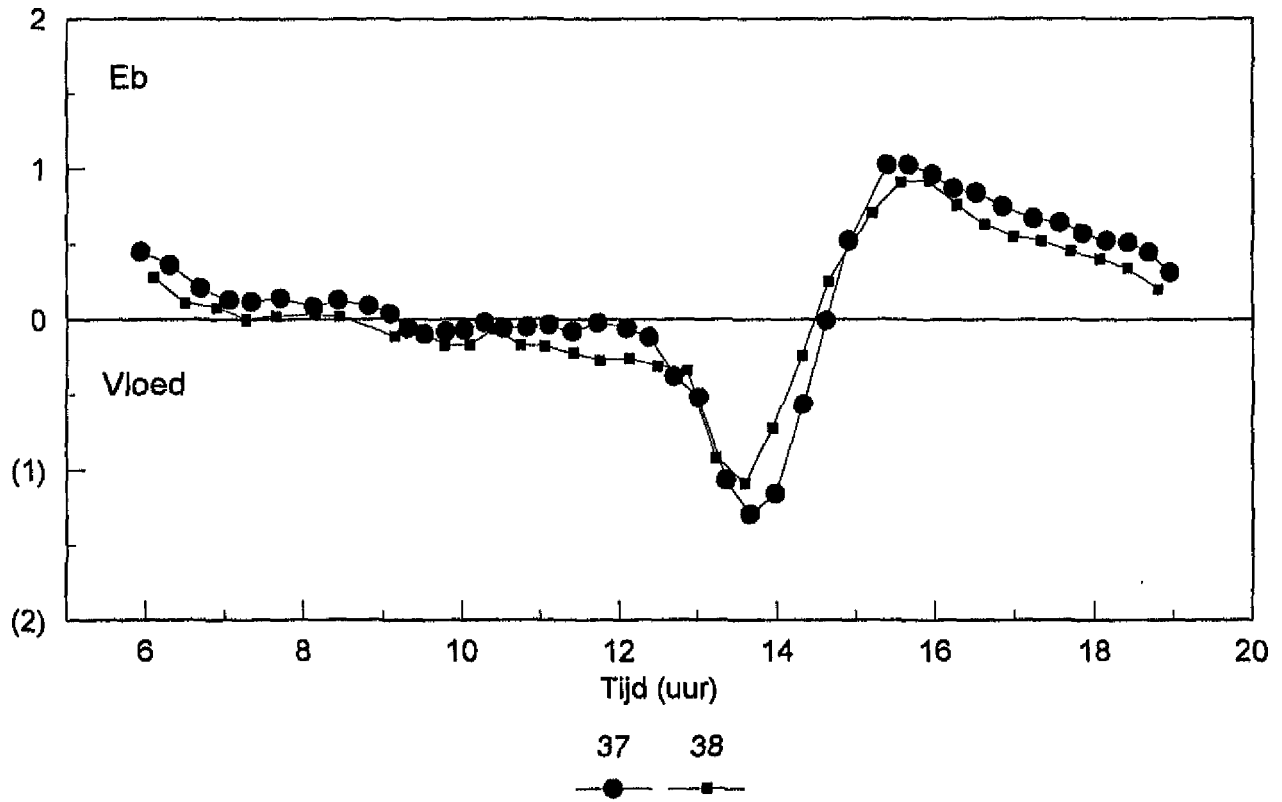


Figuur 3.2

Raai Dz Diepte gemiddelde stroomsnelheid (w)

AZTM 170496 GC = 1.18

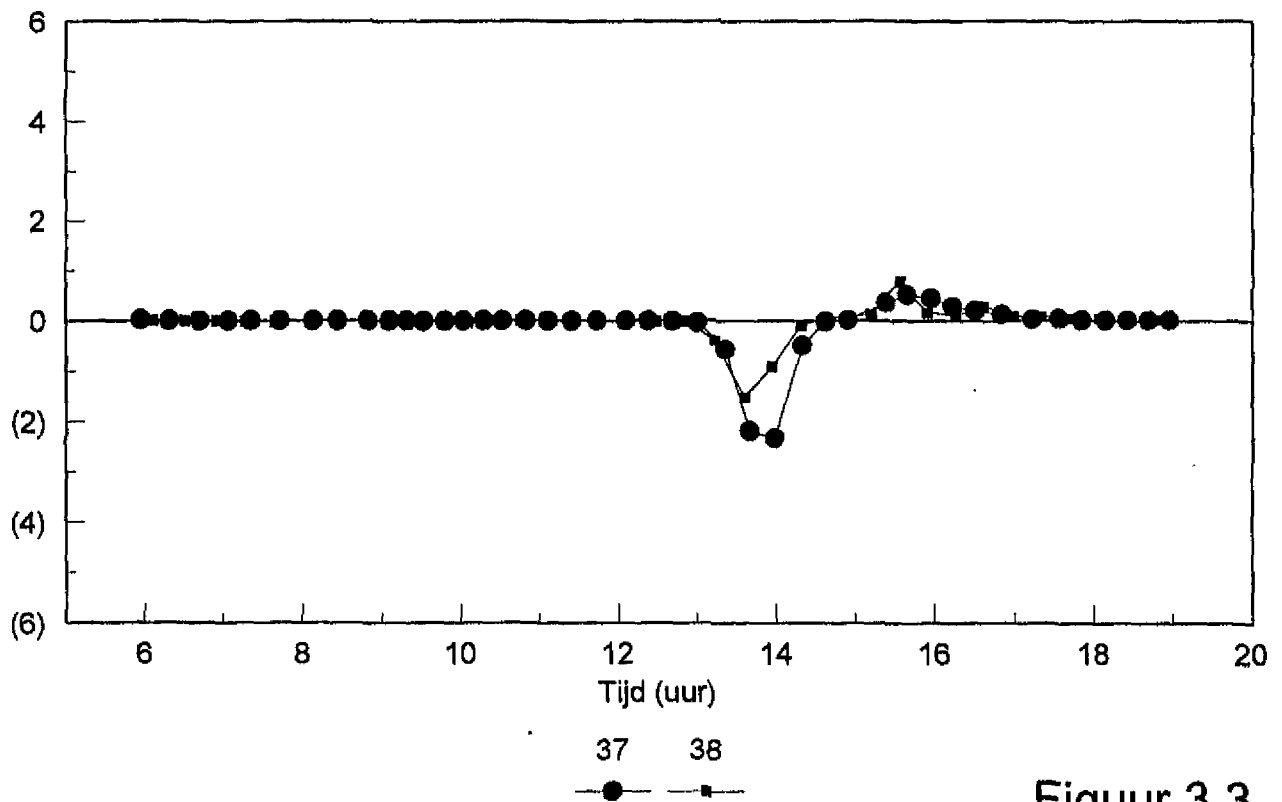
w (m/s)



Raai Dz Diepte geïntegreerd zandtransport (T)

AZTM 170496 GC = 1.18

T (kg/m.s)

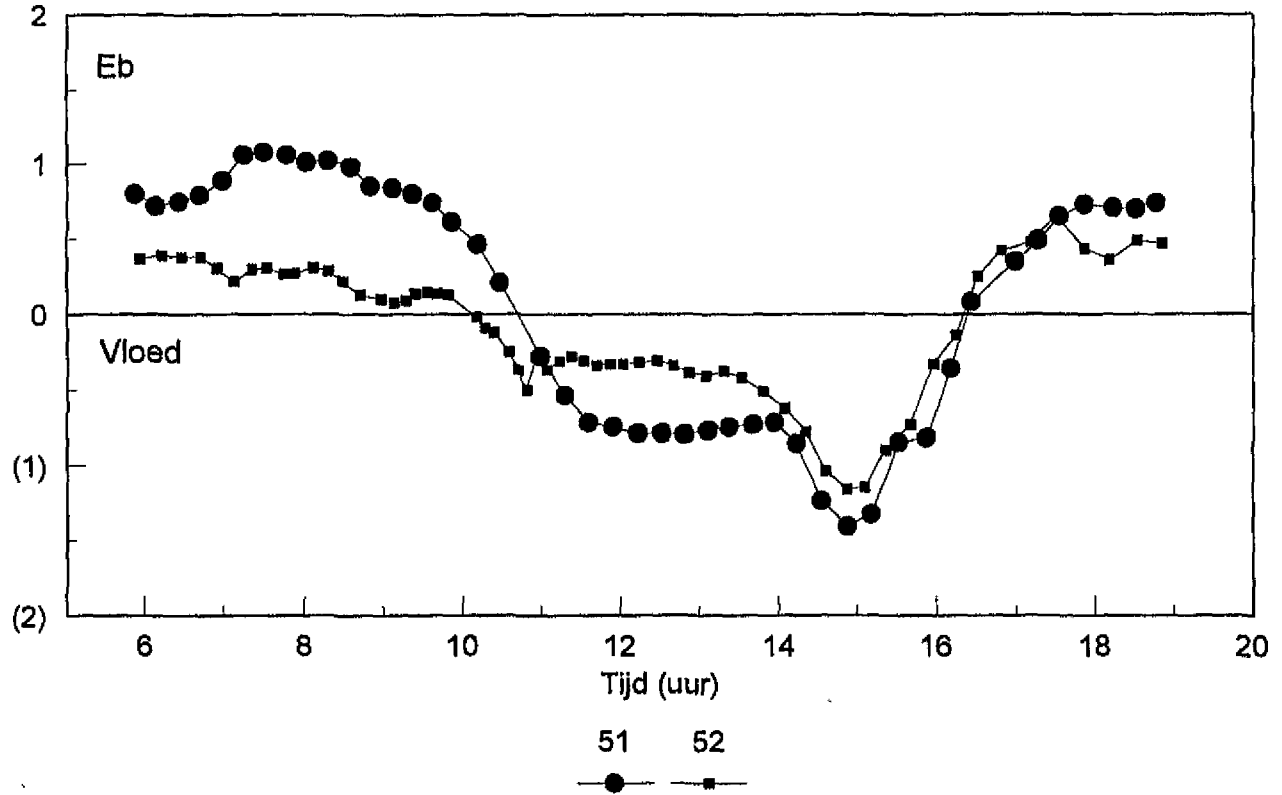


Figuur 3.3

Raai 5A Zuidergat Diepte gemiddelde stroomsnelheid (w)

AZTM 140695 GC = 1.19

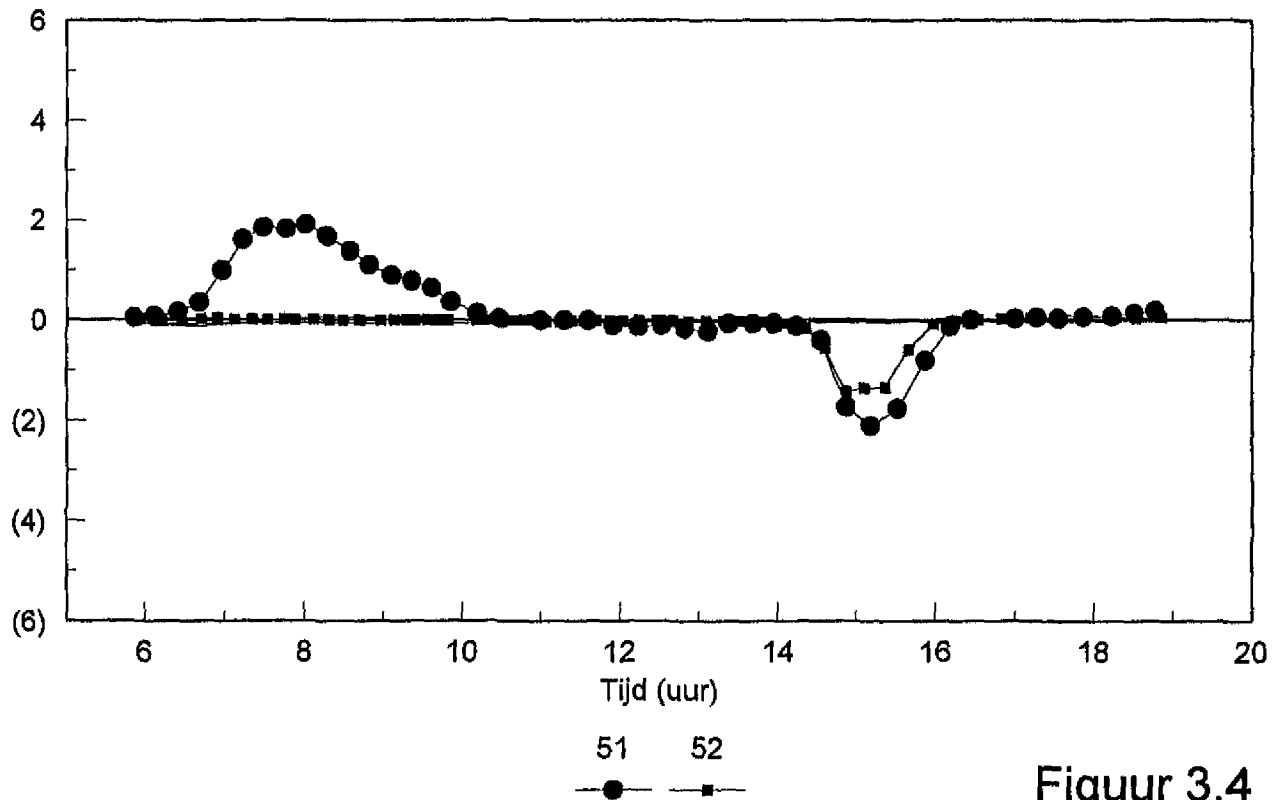
w (m/s)



Raai 5A Zuidergat Diepte geïntegreerd zandtransport (T)

AZTM 140695 GC = 1.19

T (kg/m.s)

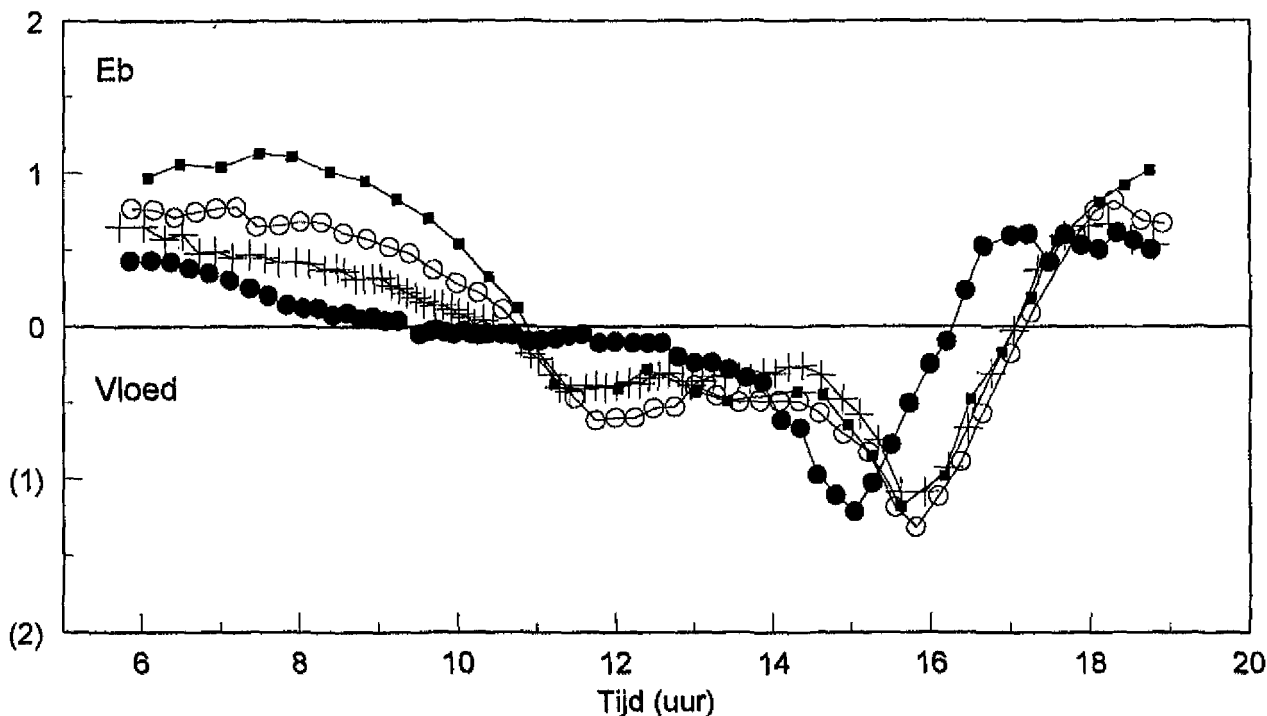


Figuur 3.4

Raai 5A Schaar v Waarde Diepte gemiddelde stroomsnelheid (w)

AZTM 14/150695 GC = 1.19

w (m/s)

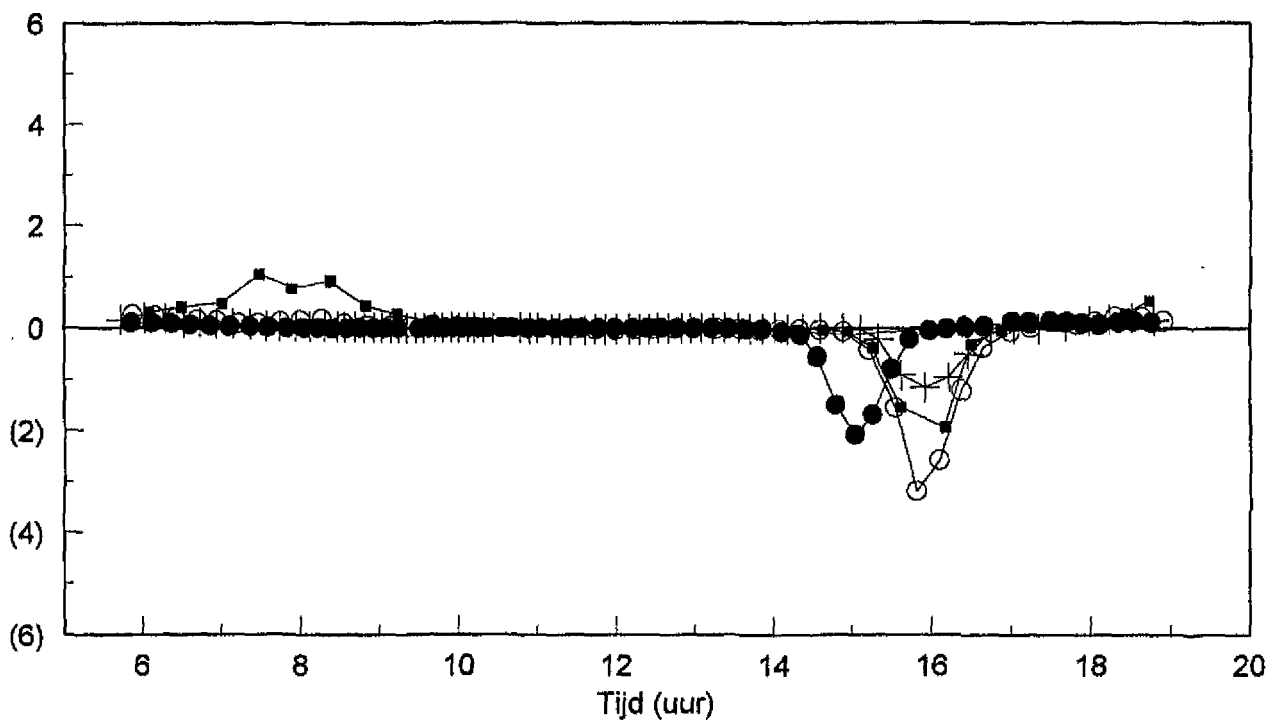


53 54 55 56
● ■ ○ +

Raai 5A Schaar v Waarde Diepte geïntegreerd zandtransport (T)

AZTM 14/150695 GC = 1.19

T (kg/m.s)



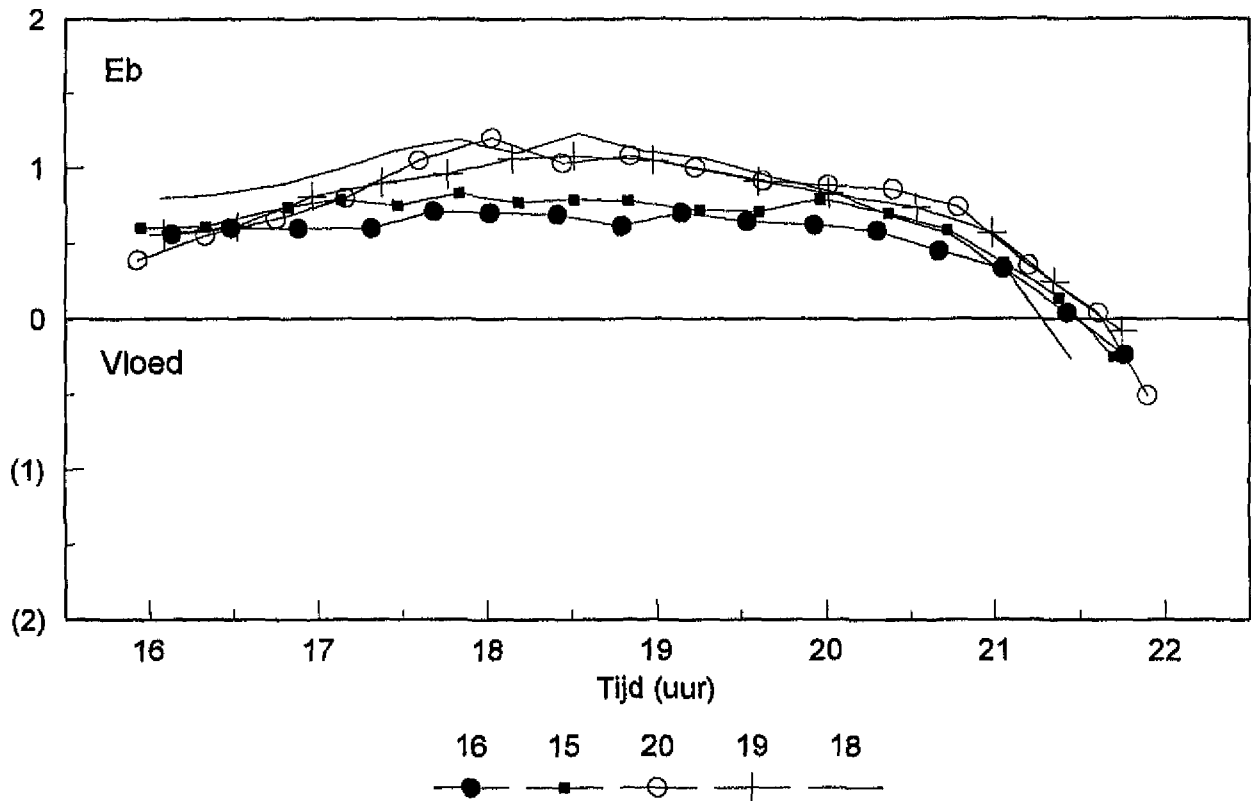
53 54 55 56
● ■ ○ +

Figuur 3.5

Raai H en J Diepte gemiddelde stroomsnelheid (w)

AZTM 231095 GC = 1.07

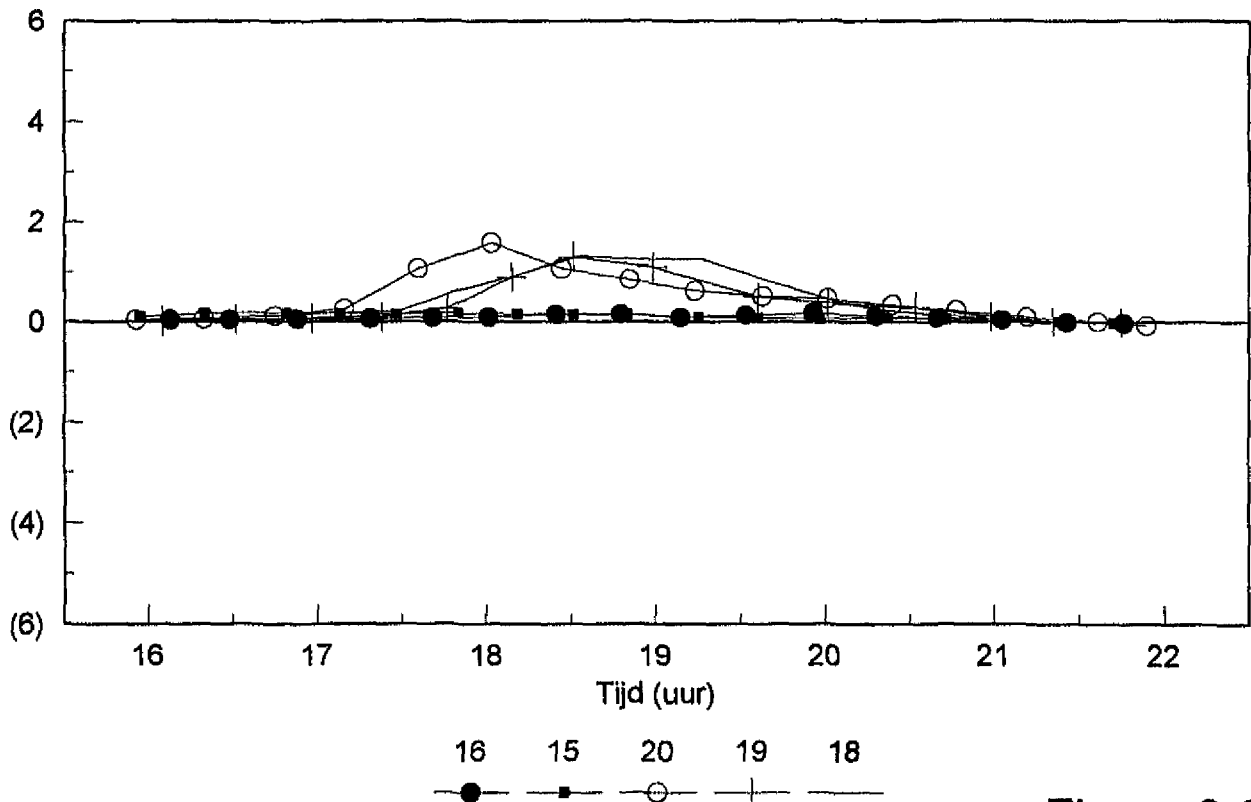
w (m/s)



Raai H en J Diepte geïntegreerd zandtransport (T)

AZTM 231095 GC = 1.07

T (kg/m.s)

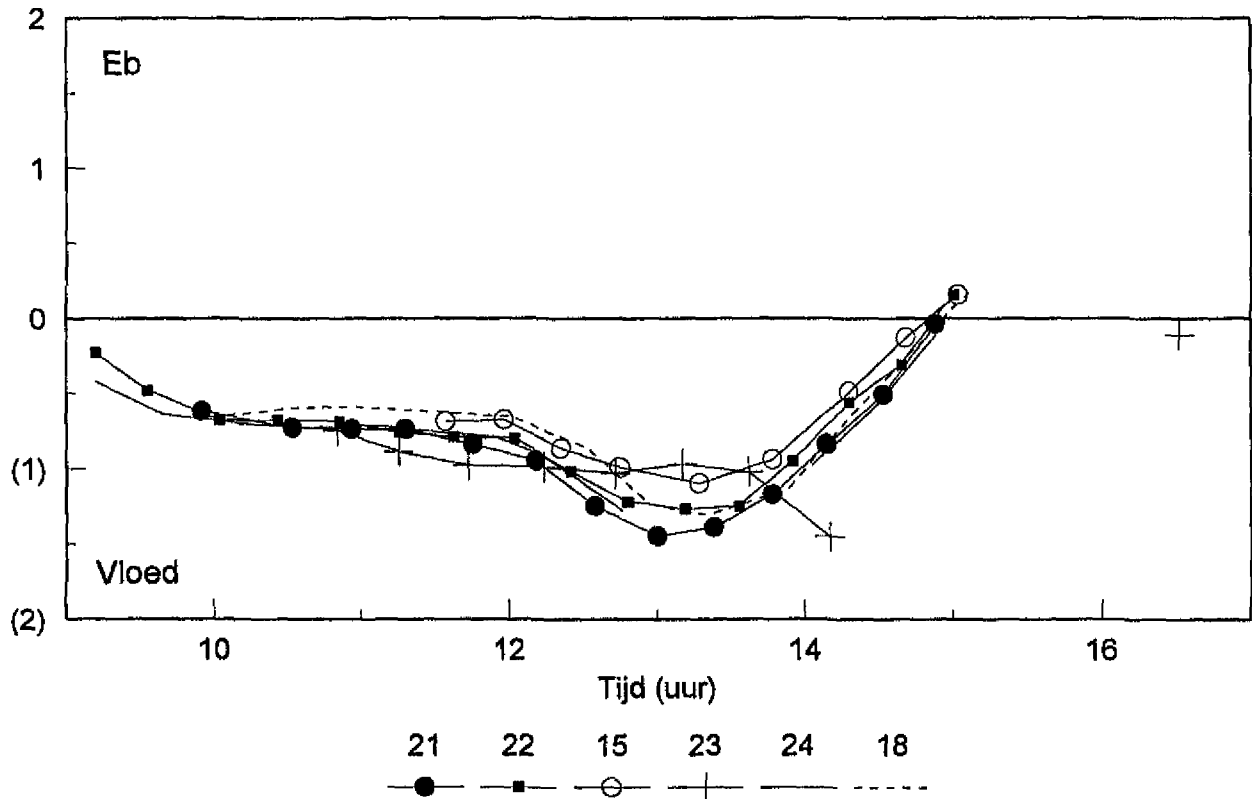


Figuur 3.6

Raai F en G Diepte gemiddelde stroomsnelheid (w)

AZTM 231095 GC = 1.07

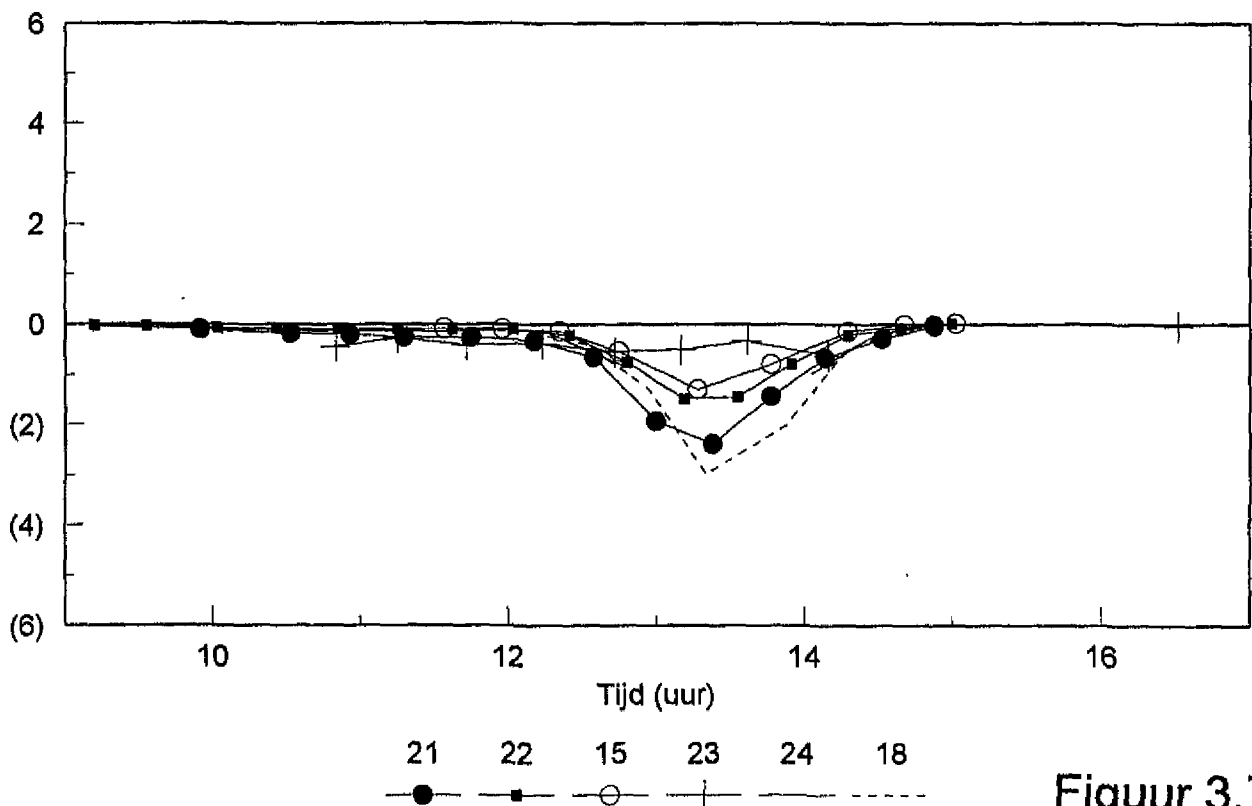
w (m/s)



Raai F en G Diepte geïntegreerd zandtransport (T)

AZTM 231095 GC = 1.07

T (kg/m.s)

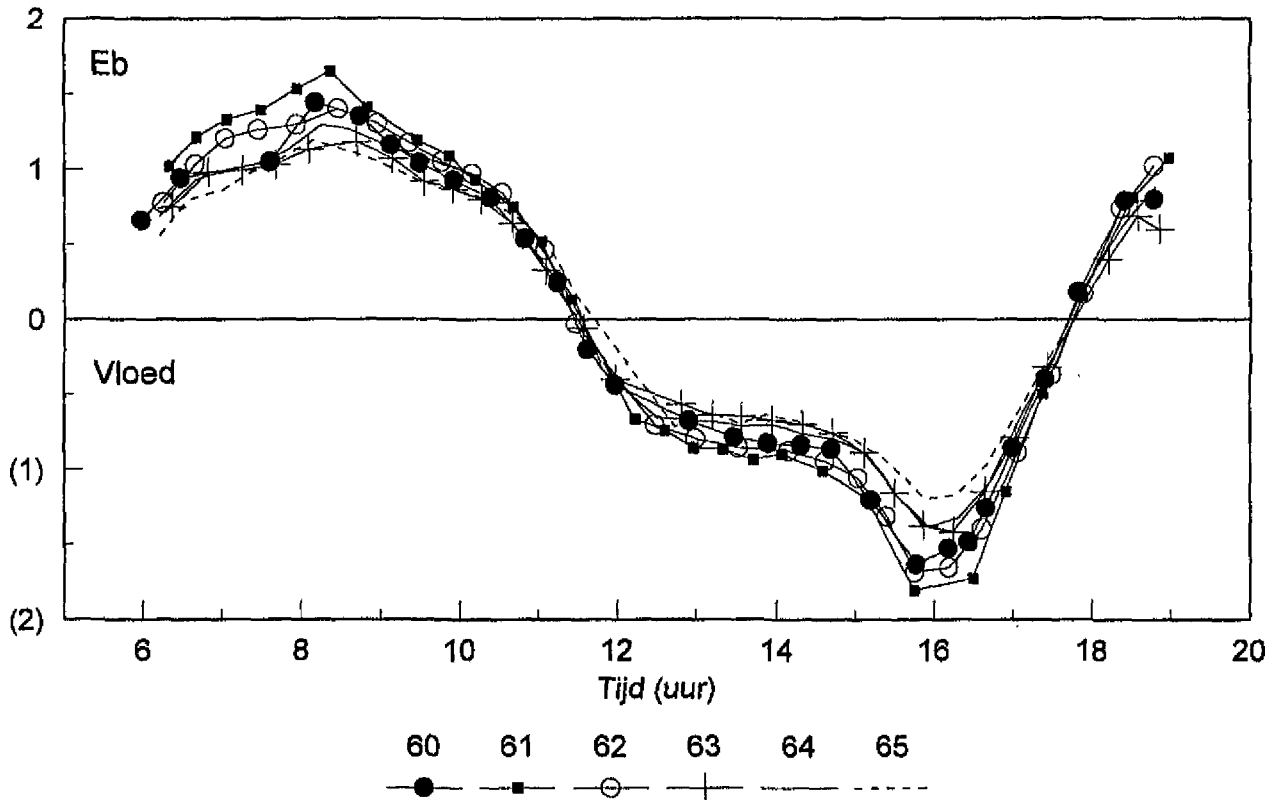


Figuur 3.7

Raai M Diepte gemiddelde stroomsnelheid (w)

AZTM 160996 GC = 1.11

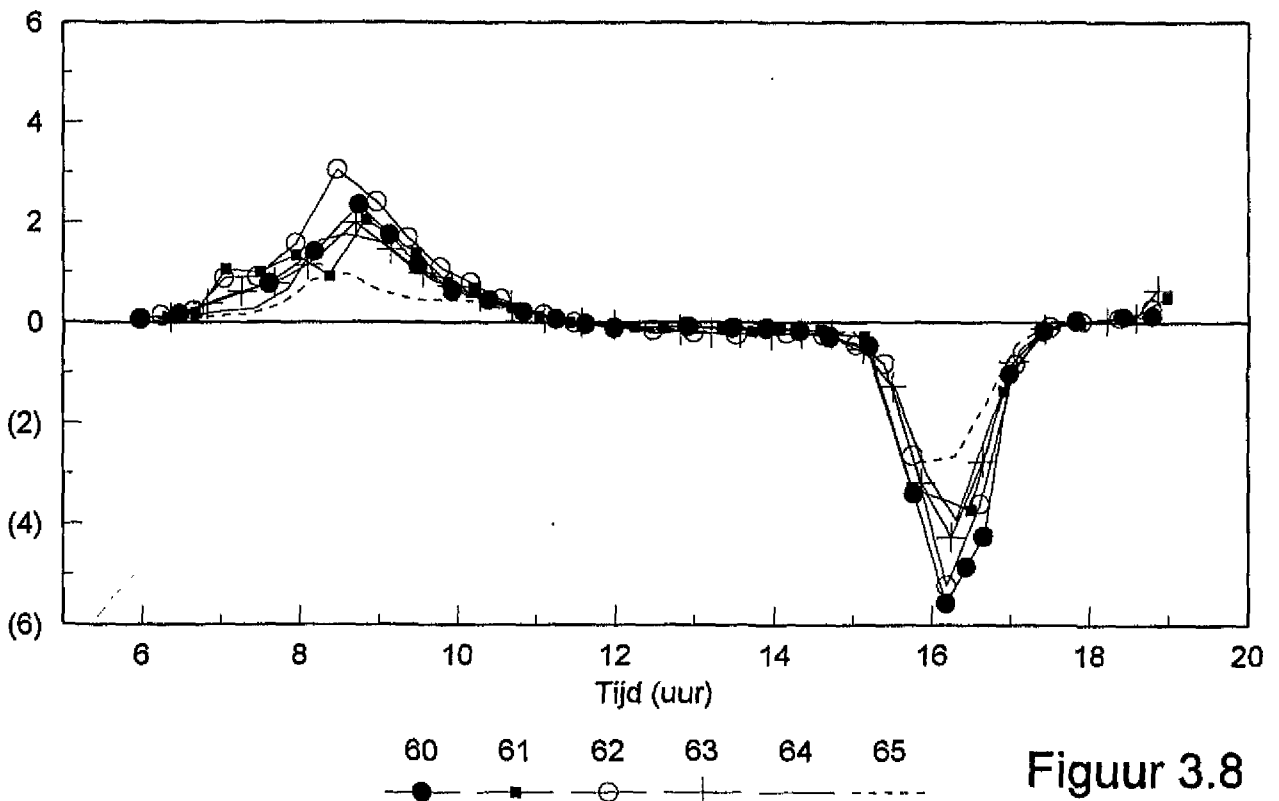
w (m/s)



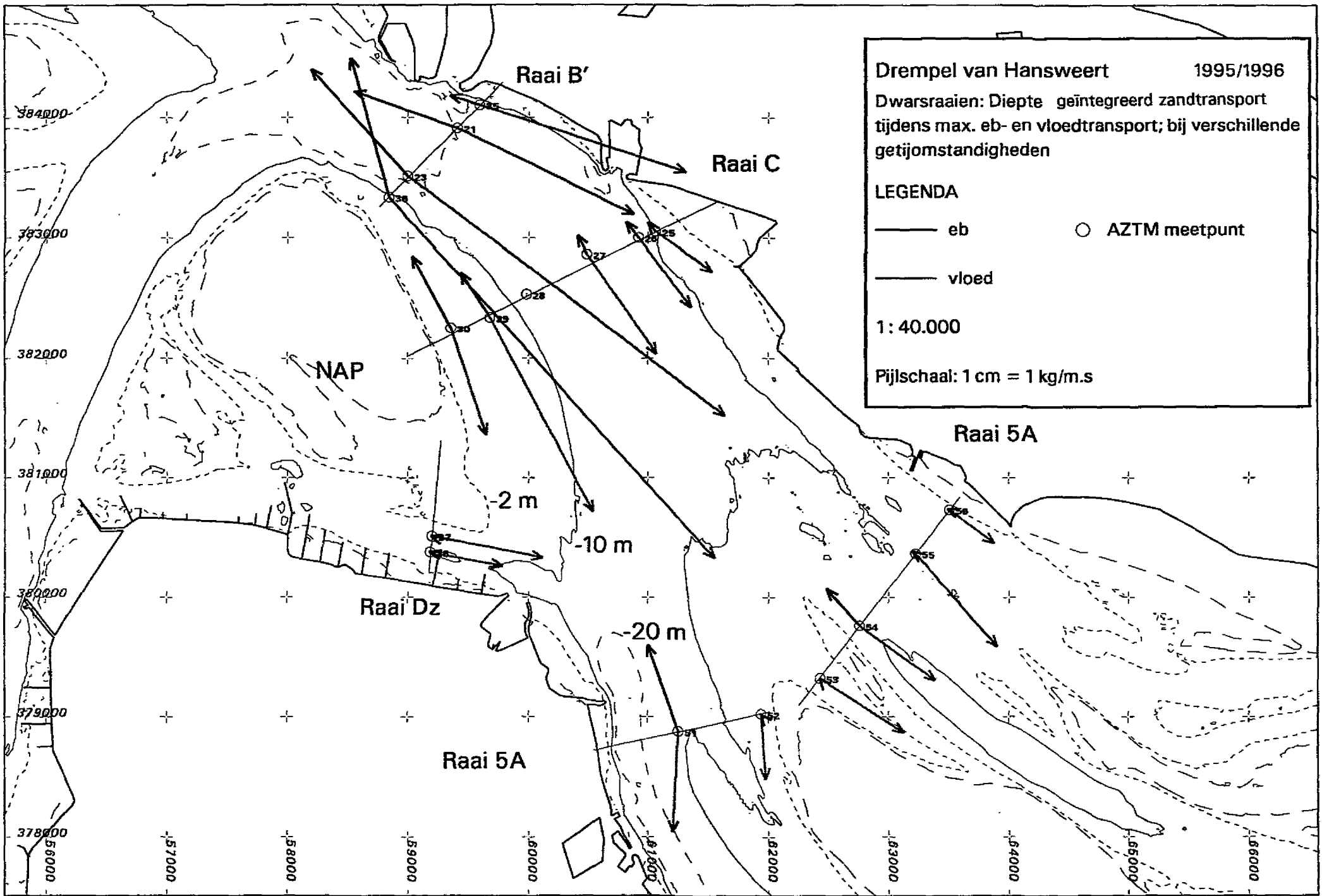
Raai M Diepte geïntegreerd zandtransport (T)

AZTM 160996 GC = 1.11

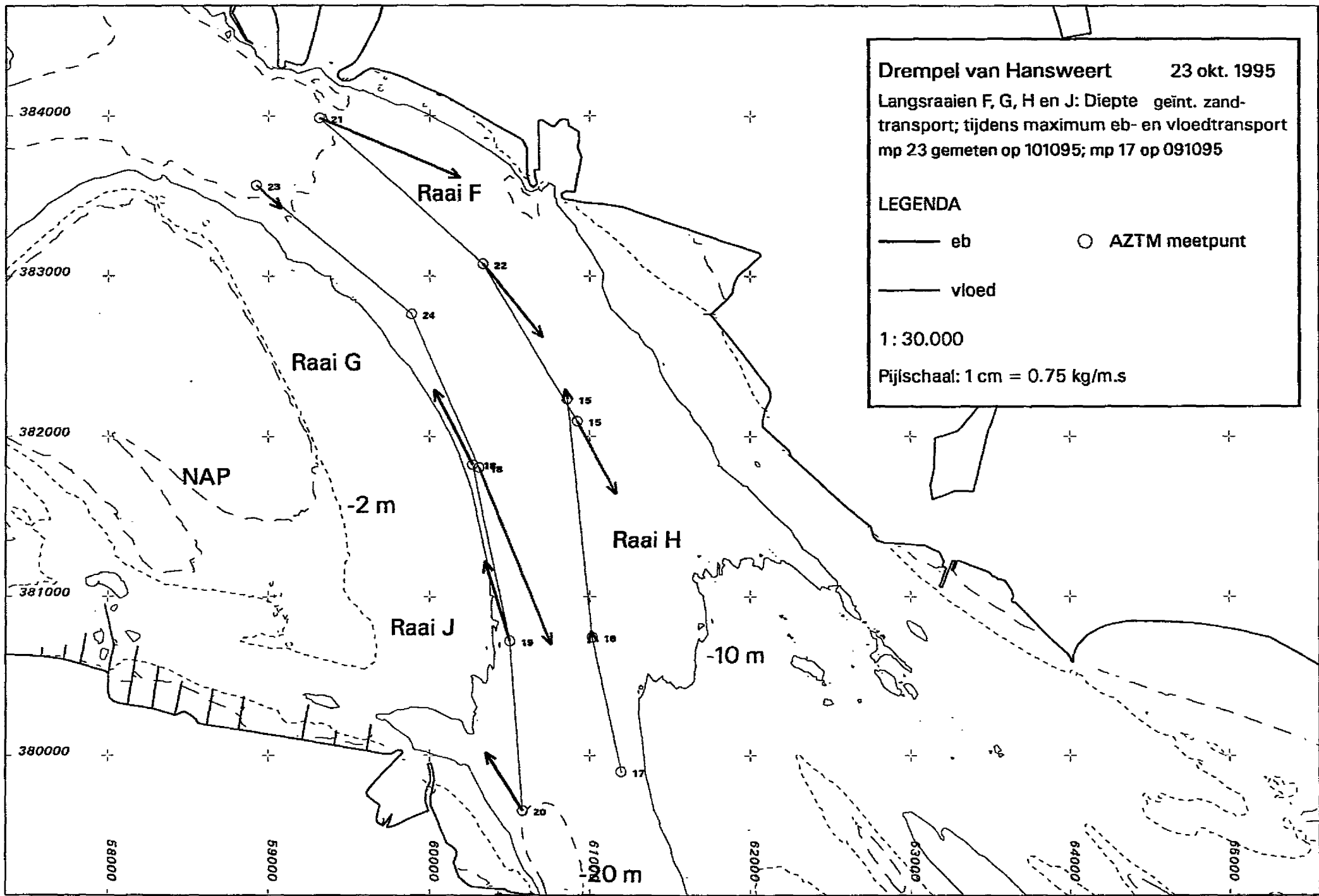
T (kg/m.s)



Figuur 3.8



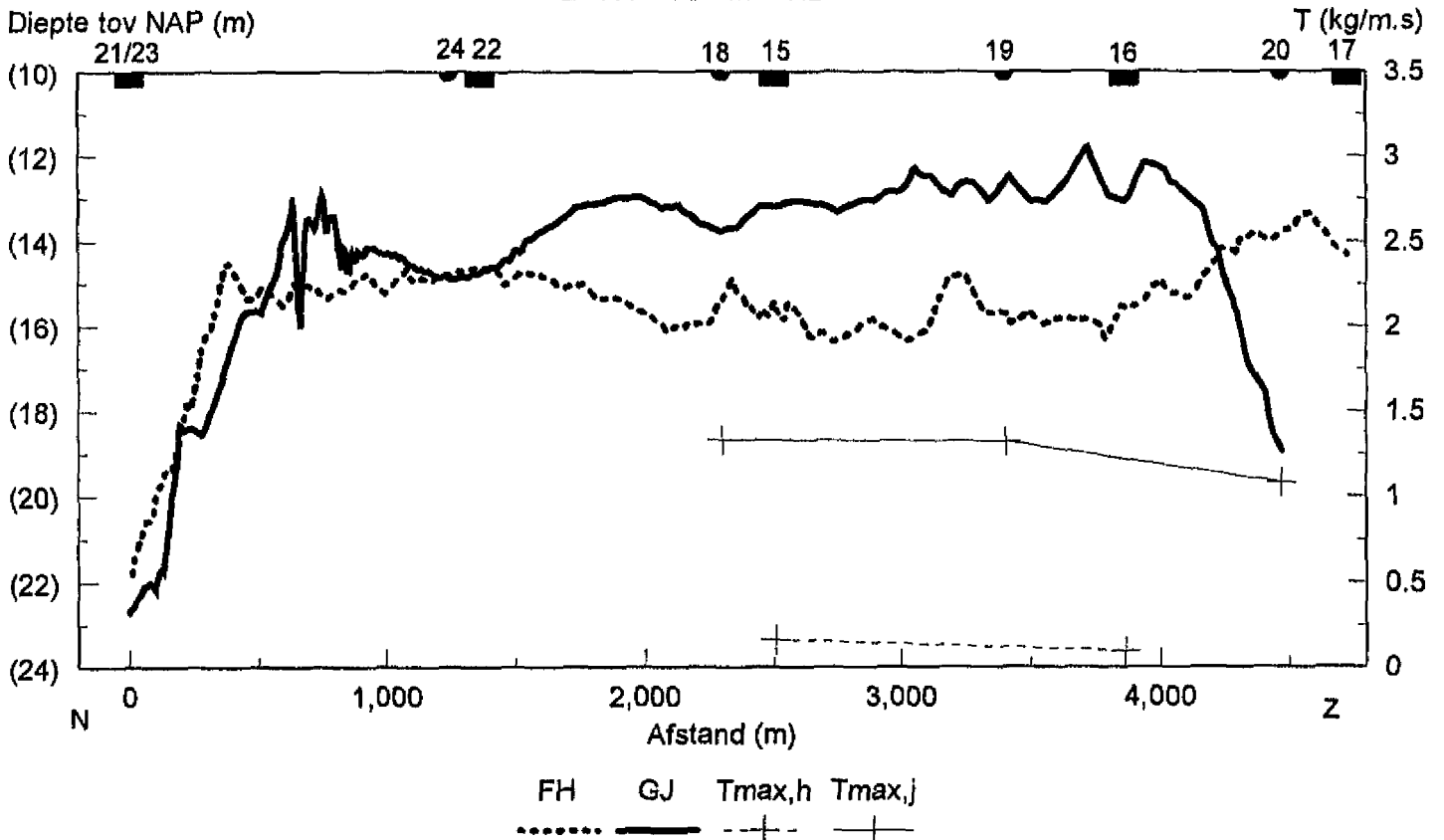
Figur 3.9



Figuur 3.10

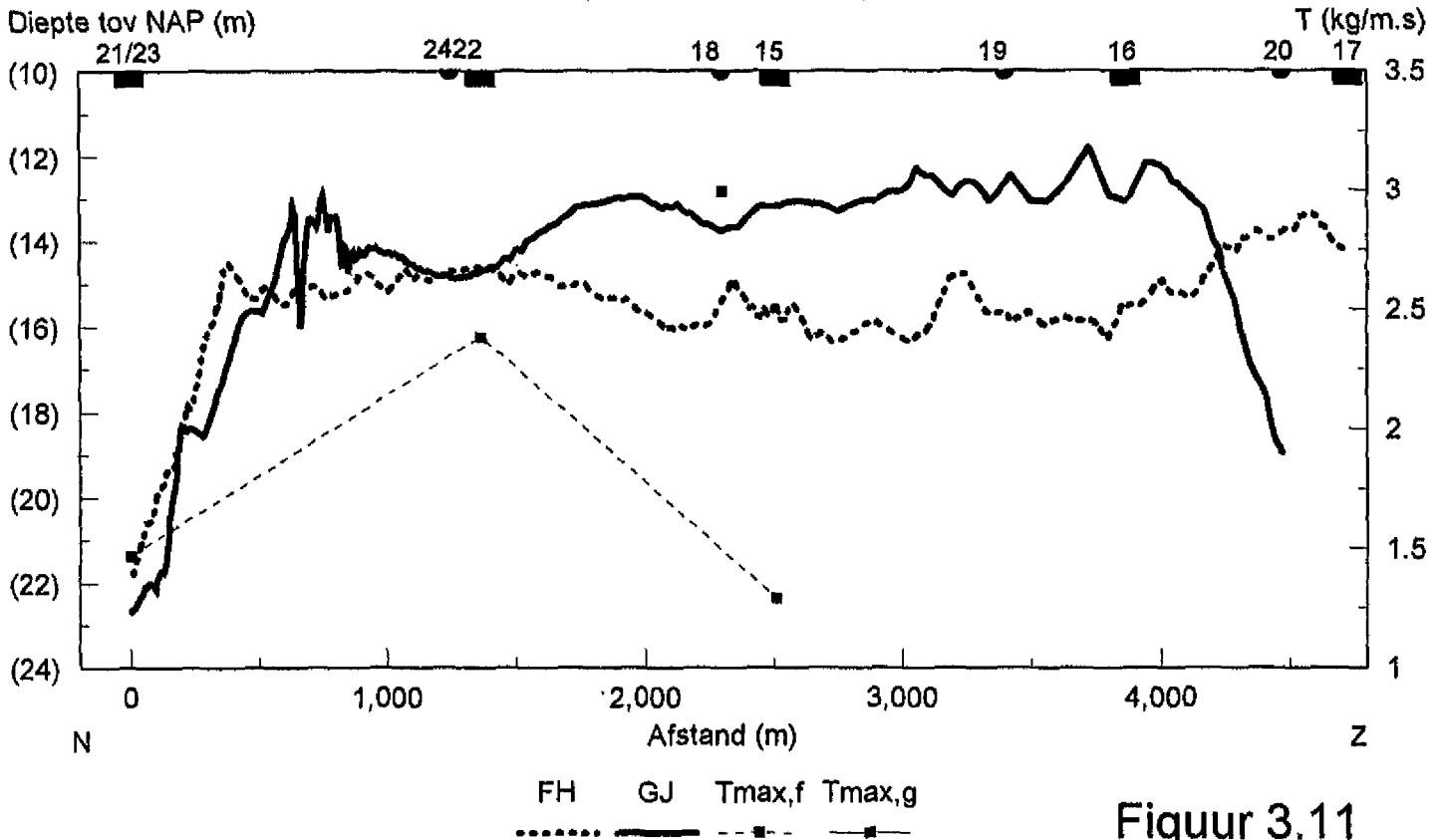
Raai F H (oost)/G J (west) Diepte geïntegreerd transport bij max. ebtransport

231095 AZTM 18.25 u

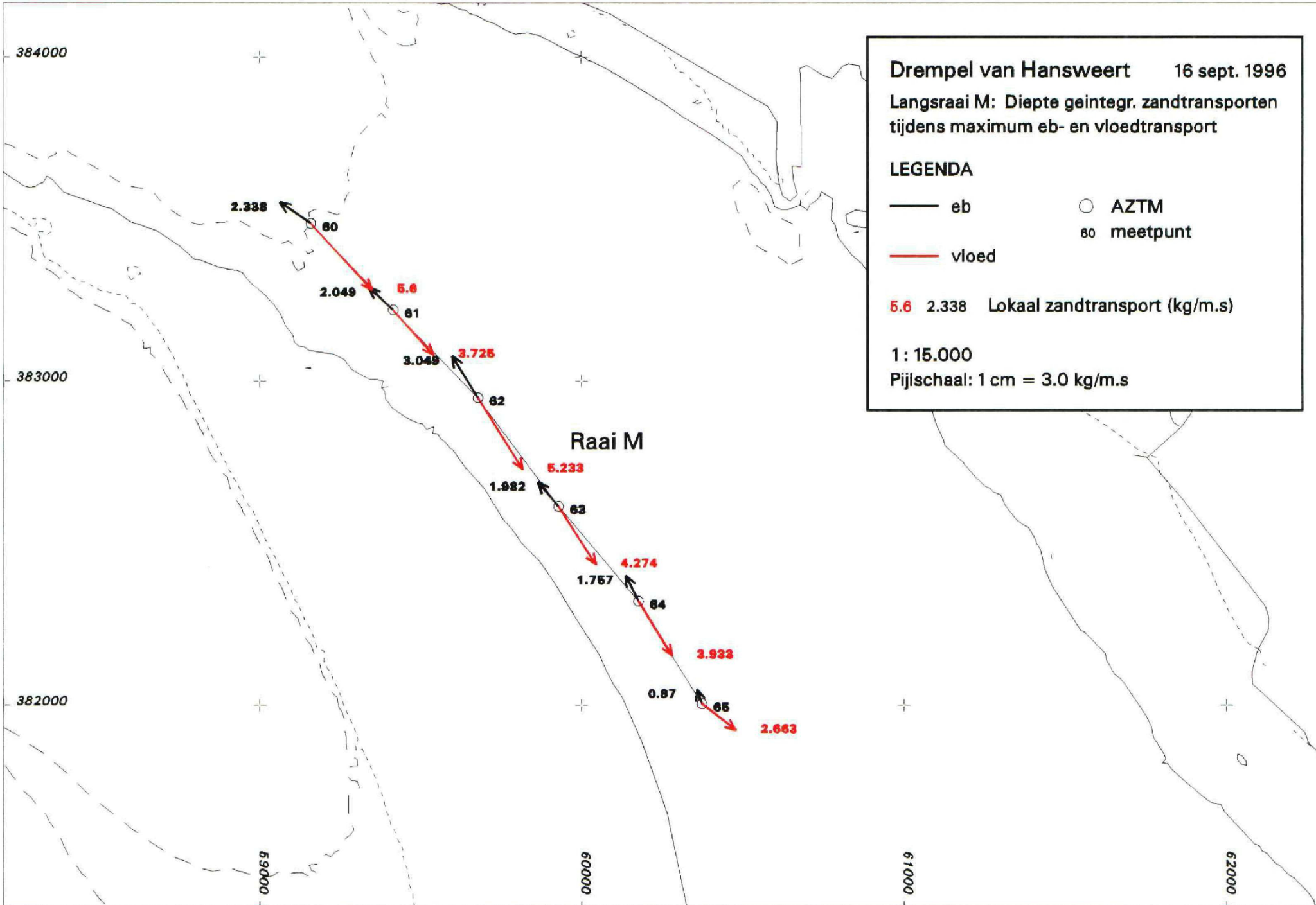


Raai F H (oost)/G J (west) Diepte geïntegr. transport bij max. vloedtransport

231095 AZTM 13.15 u



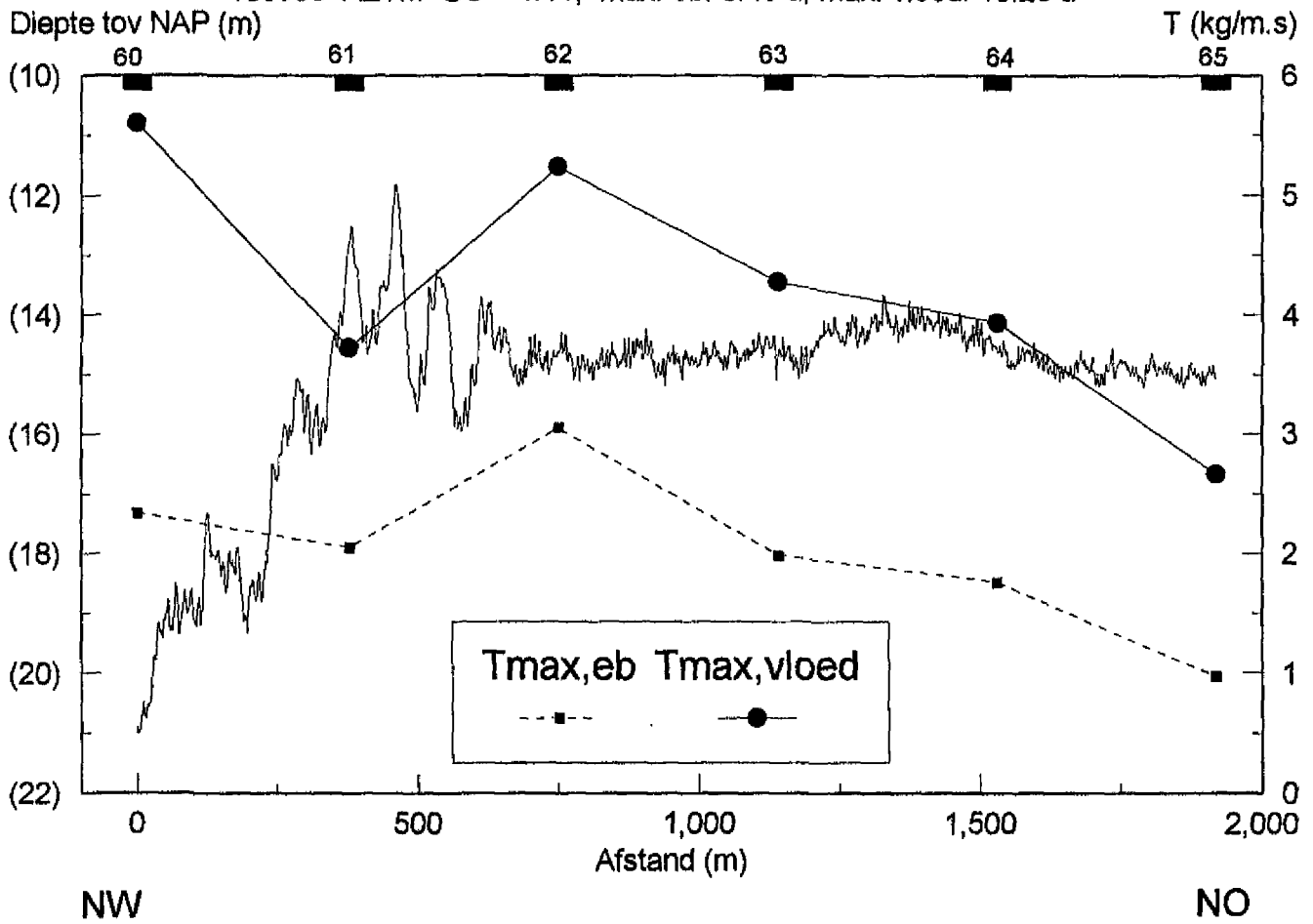
Figuur 3.11



Figuur 3.12

Raai M Langsprofiel Diepte geïntegreerd transport tijdens max. transport

160996 AZTM GC = 1.11; max. eb: 8.40 u; max. vloed: 16.20 u

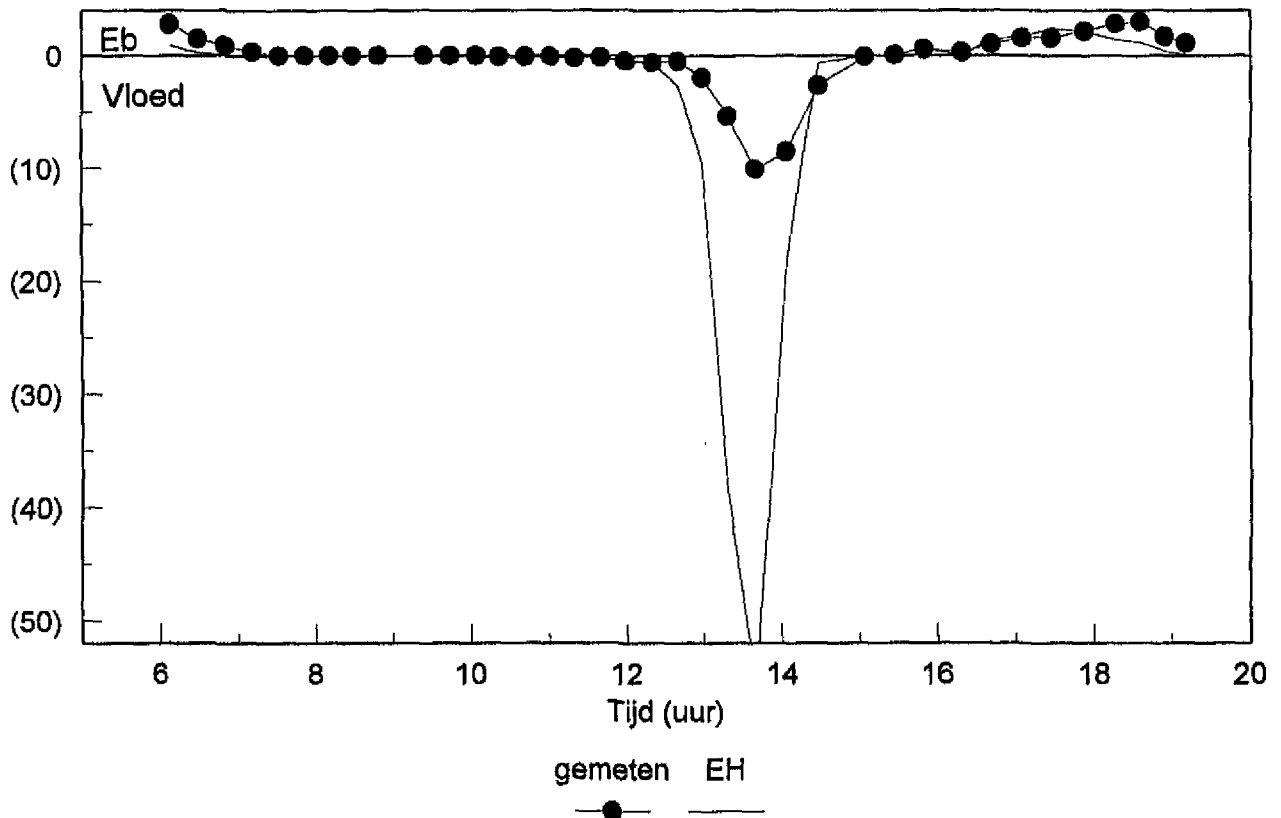


Figuur 3.13

Raai B' MP 36 Gemeten en berekend (Engelund-Hansen) transport (T)

AZTM 170496 GC = 1.18 D50 = 240 μ m Ks = 0.45 m h = 8.3 m

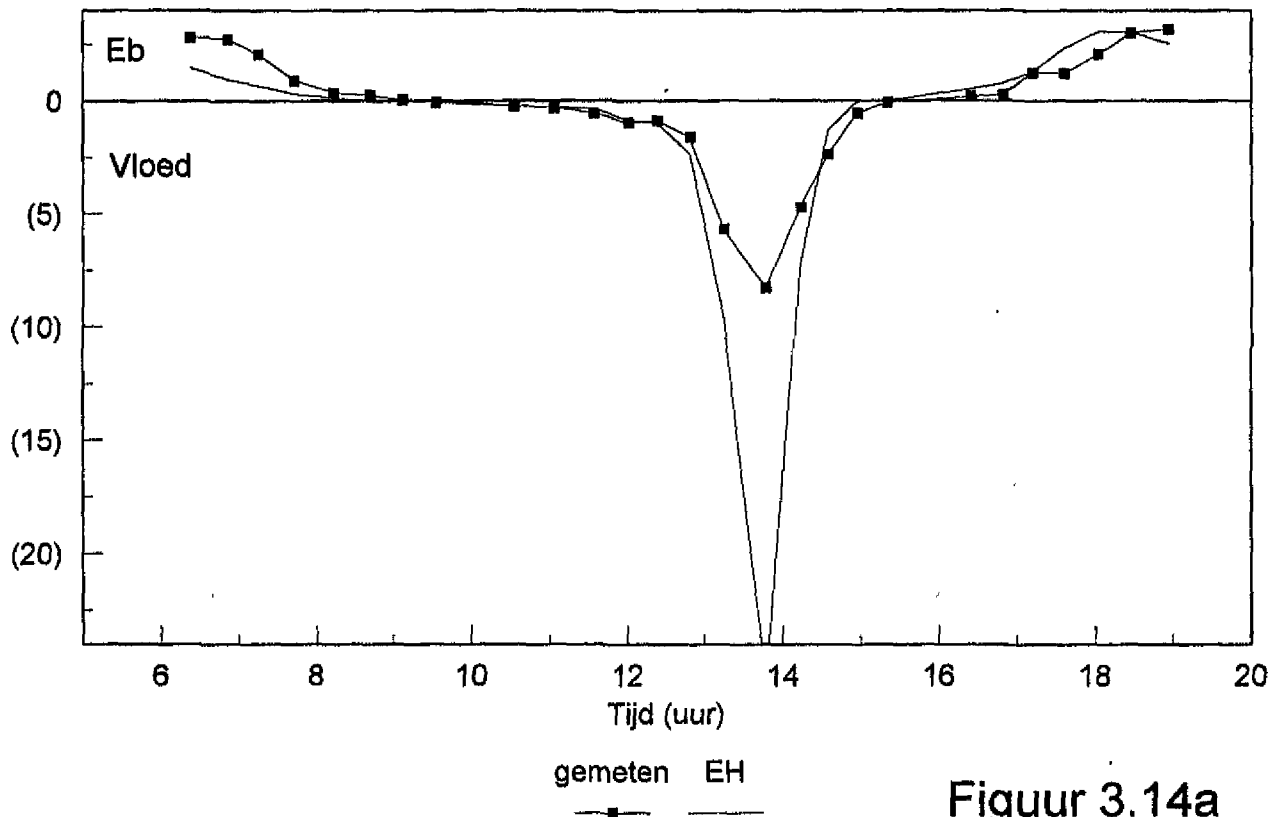
T (kg/m.s)



Raai B' MP 23 Gemeten en berekend (Engelund-Hansen) transport (T)

AZTM 170496 GC = 1.18 D50 = 240 μ m Ks = 0.45 m h = 22 m

T (kg/m.s)

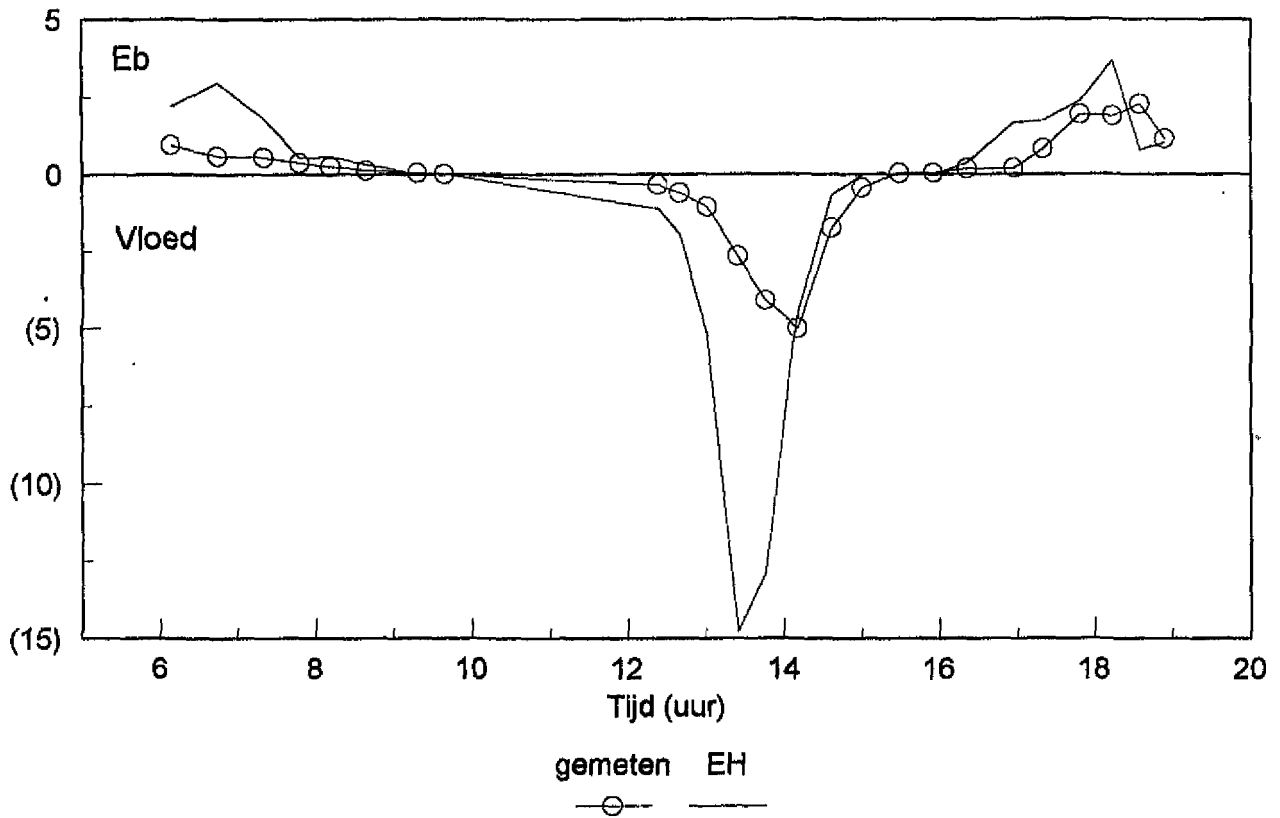


Figuur 3.14a

Raai B' MP 21 Gemeten en berekend (Engelund-Hansen) transport (T)

AZTM 170496 GC = 1.18 D50 = 240 um Ks = 0.45 m h = 20 m

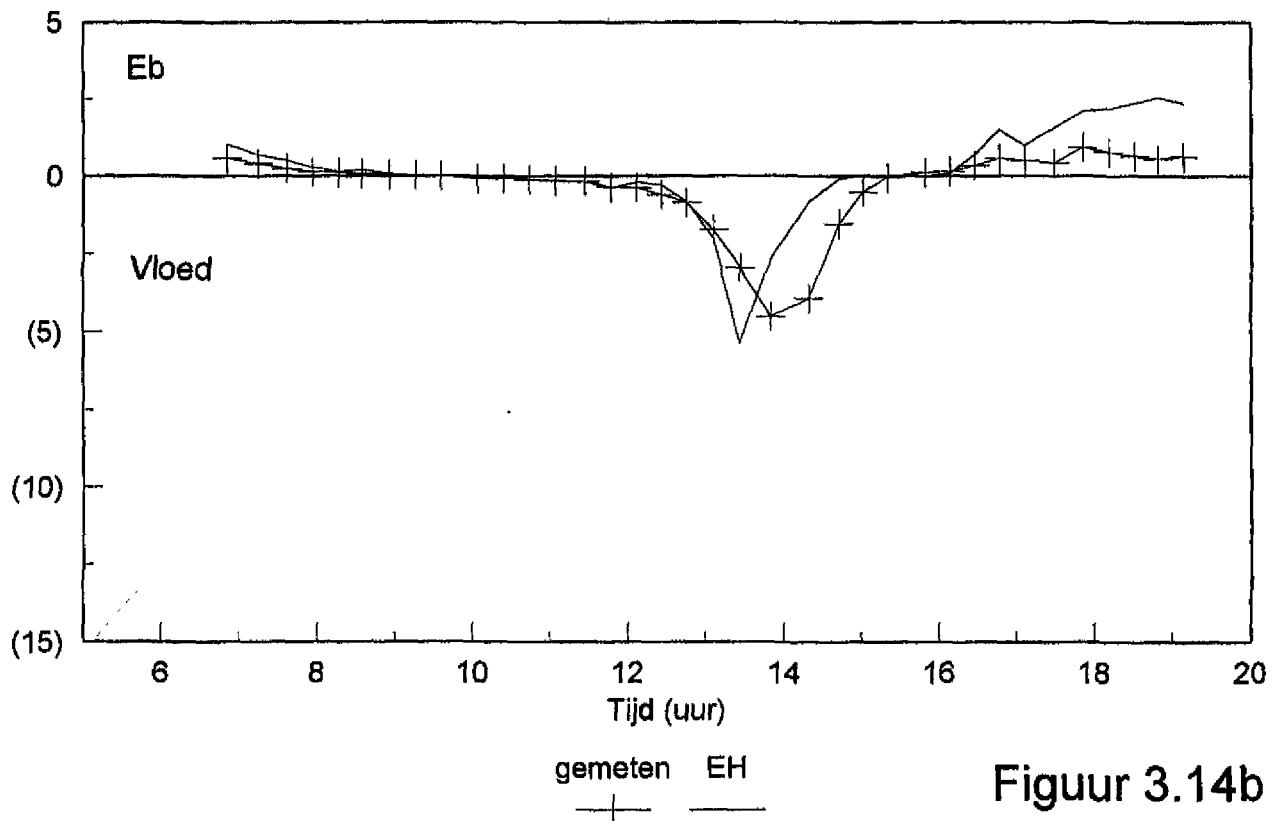
T (kg/m.s)



Raai B' MP 35 Gemeten en berekend (Engelund-Hansen) transport (T)

AZTM 170496 GC = 1.18 D50 = 240 um Ks = 0.45 m h = 16 m

T (kg/m.s)

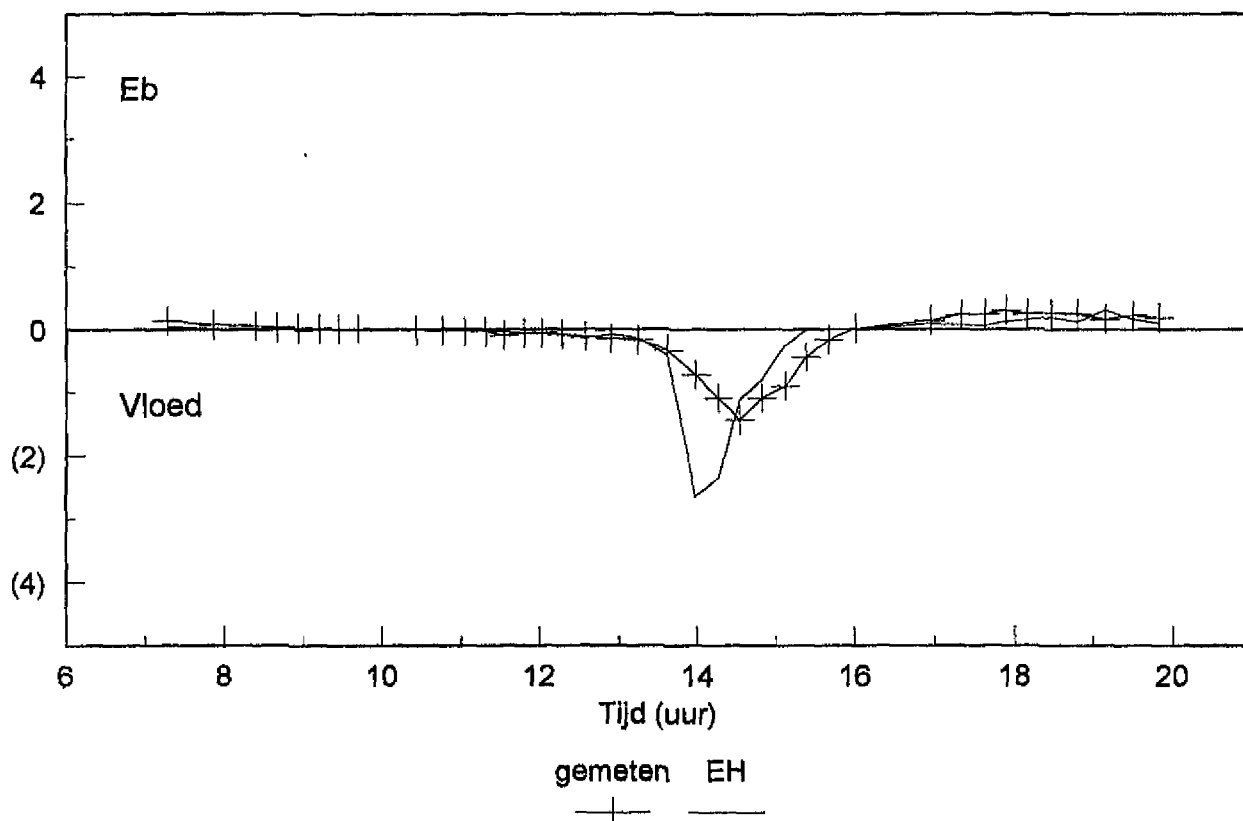


Figuur 3.14b

Raai C MP 25 Gemeten en berekend (Engelund-Hansen) transport (T)

AZTM 251095 GC = 1.14 D50 = 240 μ m Ks = 0.45 m h = 10.8 m

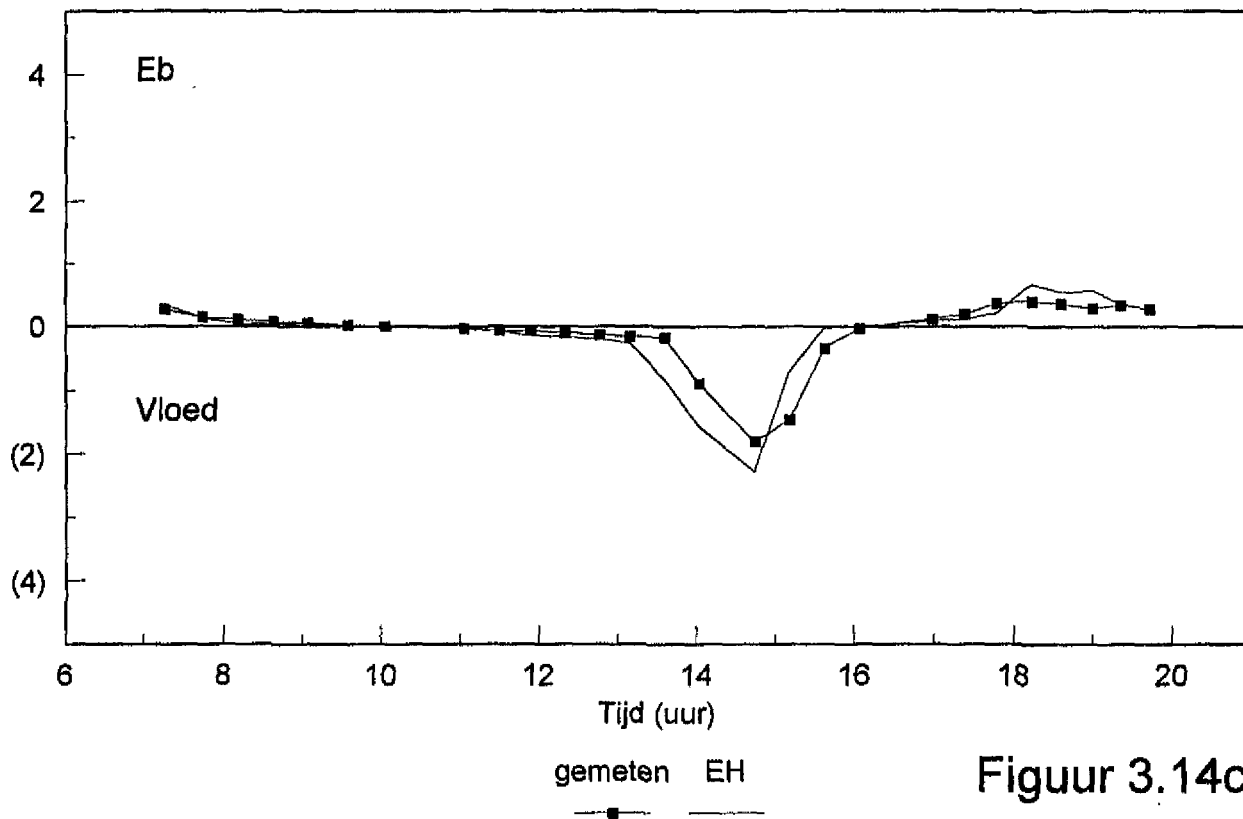
T (kg/m.s)



Raai C MP 26 Gemeten en berekend (Engelund-Hansen) transport (T)

AZTM 251095 GC = 1.14 D50 = 240 μ m Ks = 0.45 m h = 13.3 m

T (kg/m.s)

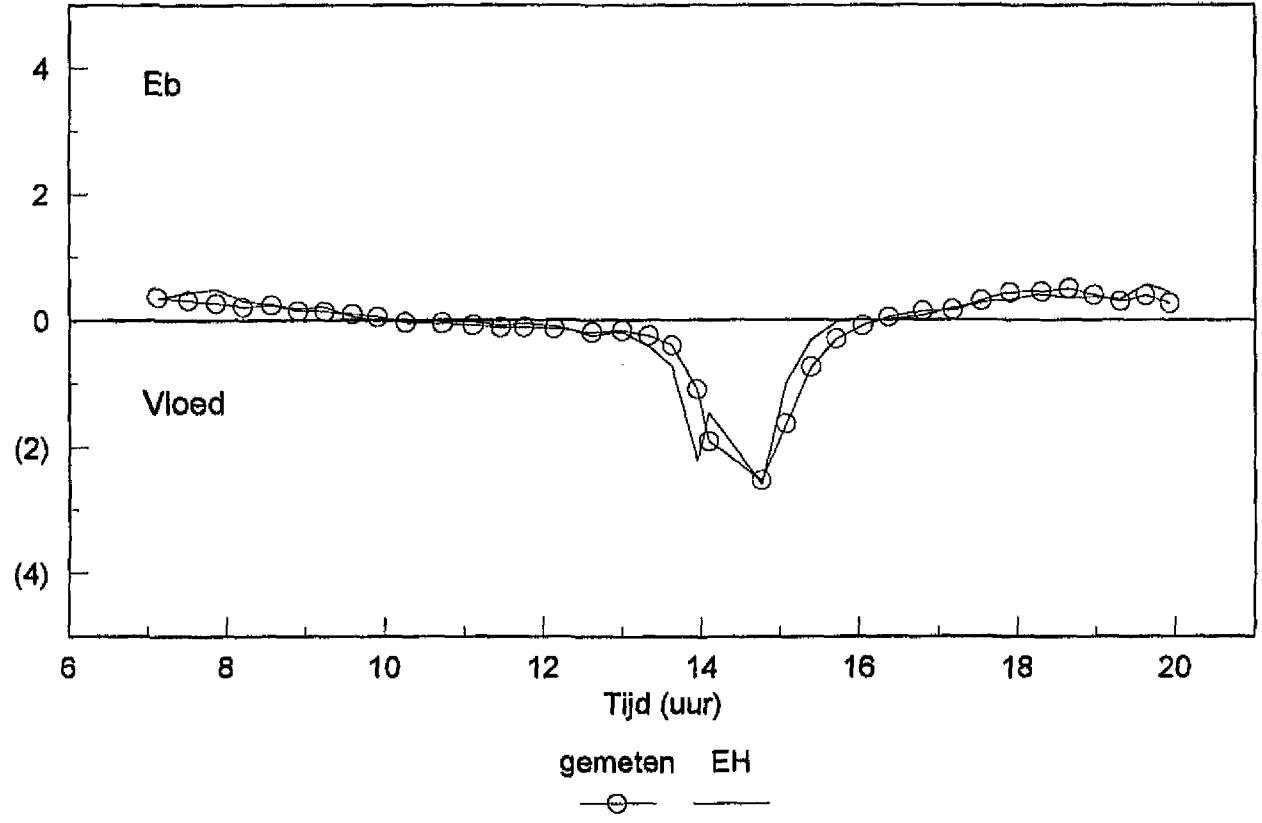


Figuur 3.14c

Raai C MP 27 Gemeten en berekend (Engelund-Hansen) transport (T)

AZTM 251095 GC = 1.14 D50 = 240 um Ks = 0.45 m h = 15.3 m

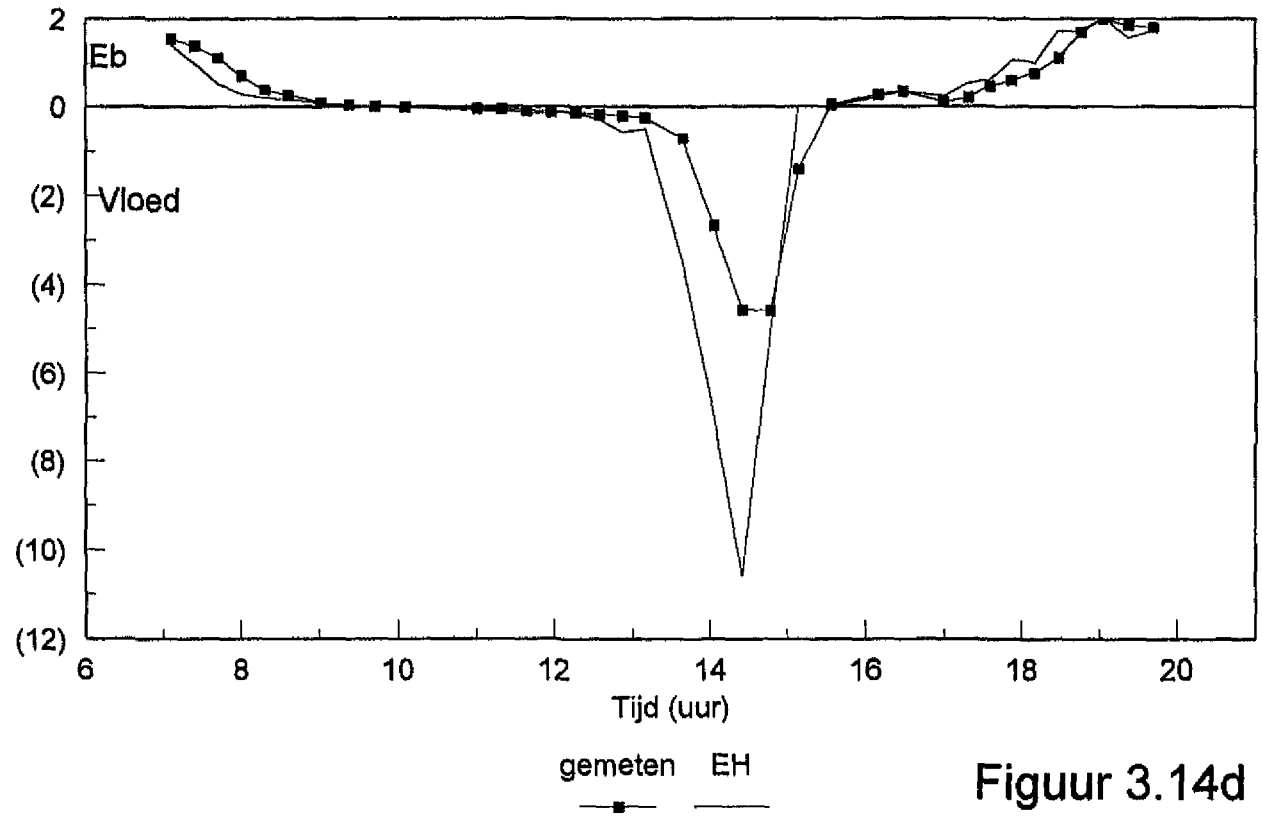
T (kg/m.s)



Raai C MP 29 Gemeten en berekend (Engelund-Hansen) transport (T)

AZTM 251096 GC = 1.14 D50 = 240 um Ks = 0.45 m h = 7.6 m

T (kg/m.s)

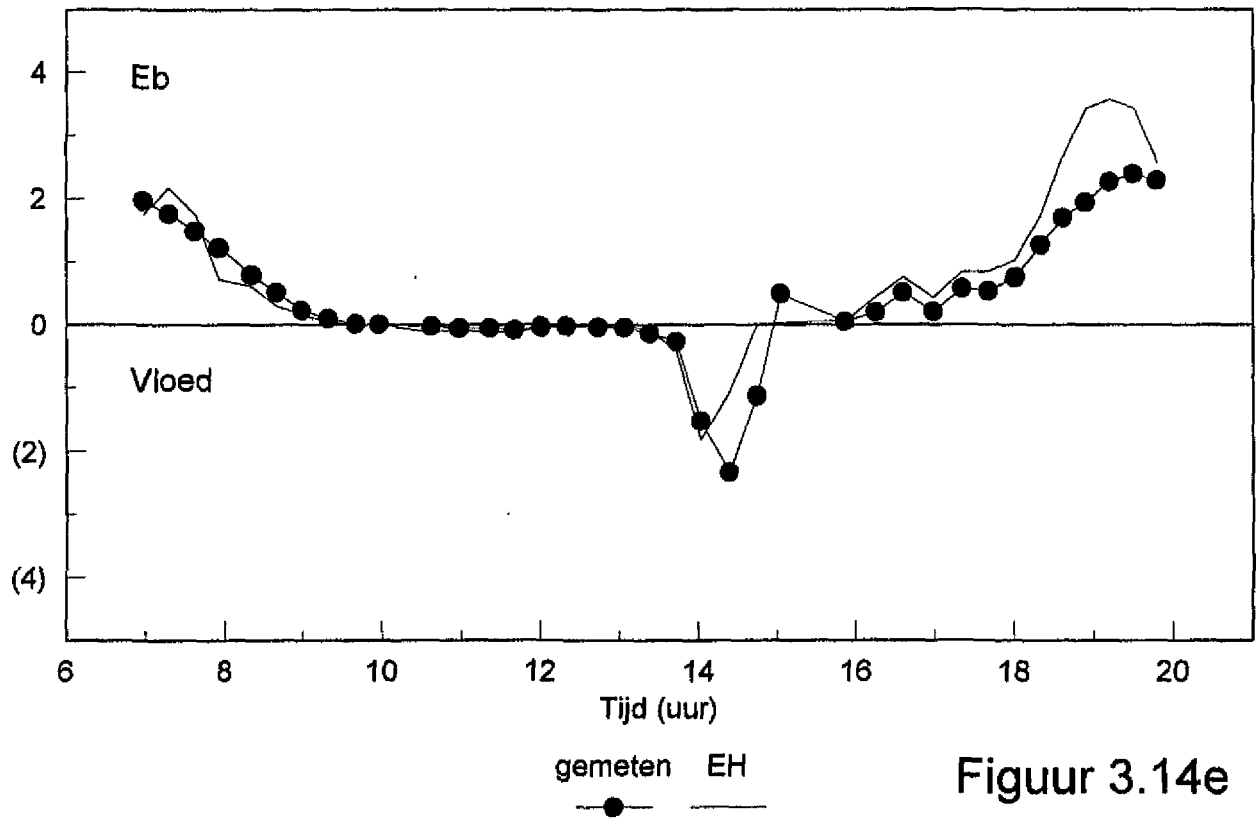


Figuur 3.14d

Raai C MP 30 Gemeten en berekend (Engelund-Hansen) transport (T)

AZTM 251095 GC = 1.14 D50 = 240 μ m Ks = 0.45 m h = 6.8 m

T (kg/m.s)

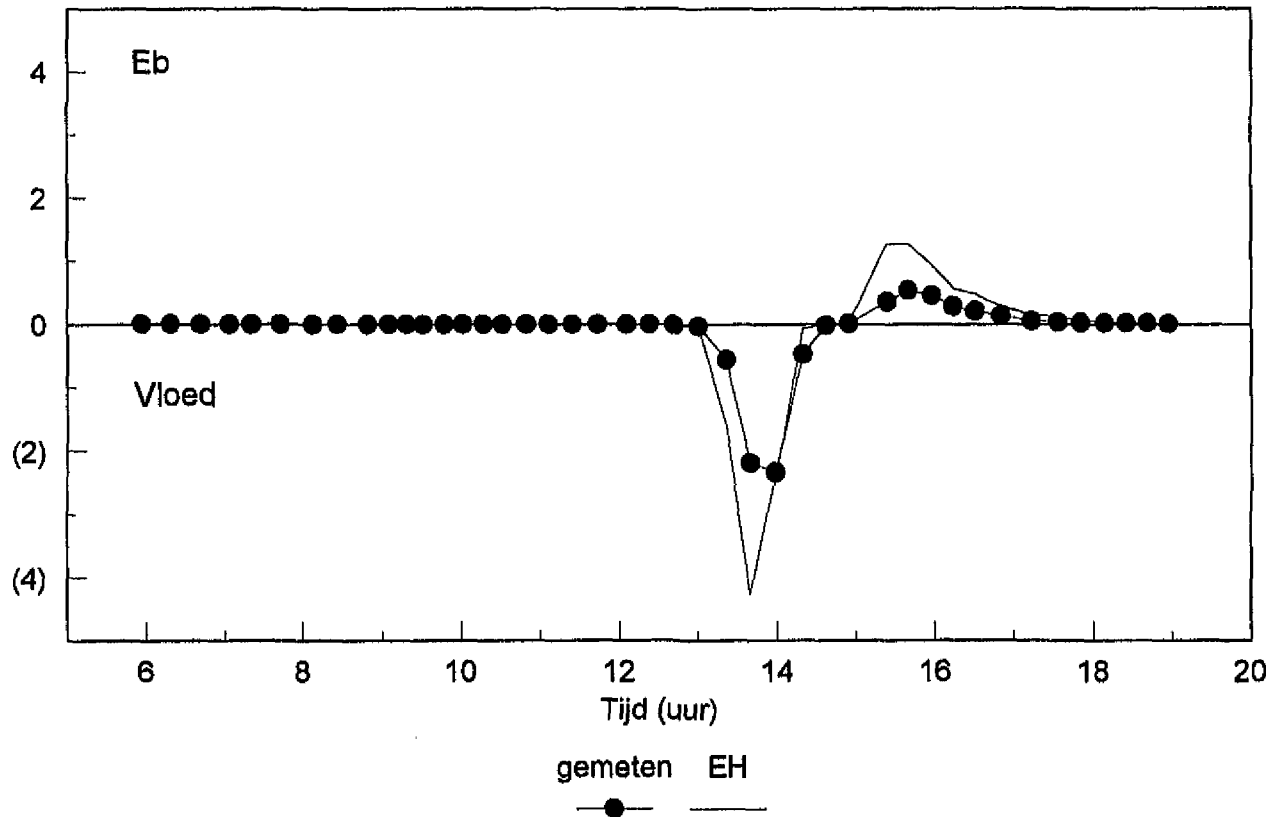


Figuur 3.14e

Raai Dz MP 37 Gemeten en berekend (Engelund-Hansen) transport (T)

AZTM 170496 GC = 1.18 D50 = 240 um Ks = 0.45 m h = 6.1 m

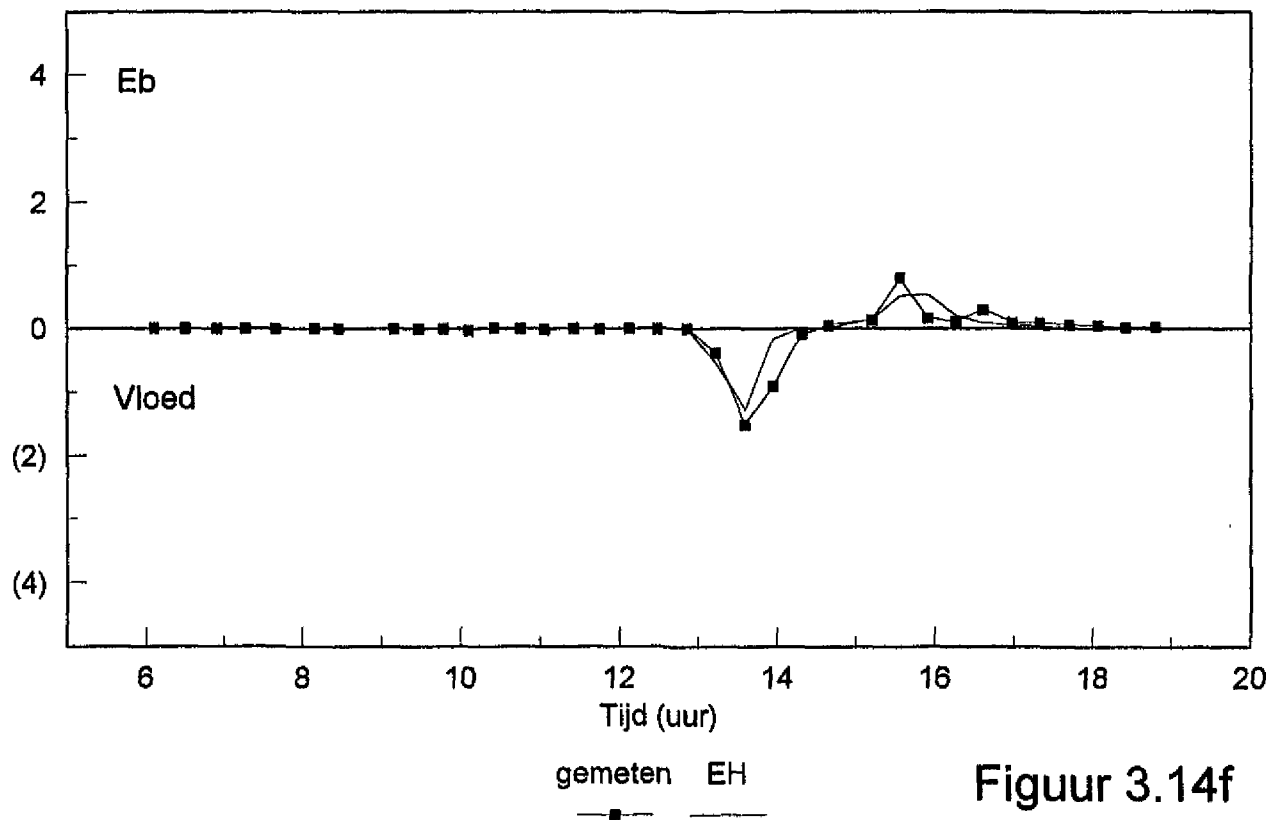
T (kg/m.s)



Raai Dz MP 38 Gemeten en berekend (Engelund-Hansen) transport (T)

AZTM 170496 GC = 1.18 D50 = 240 um Ks = 0.45 m h = 11 m

T (kg/m.s)

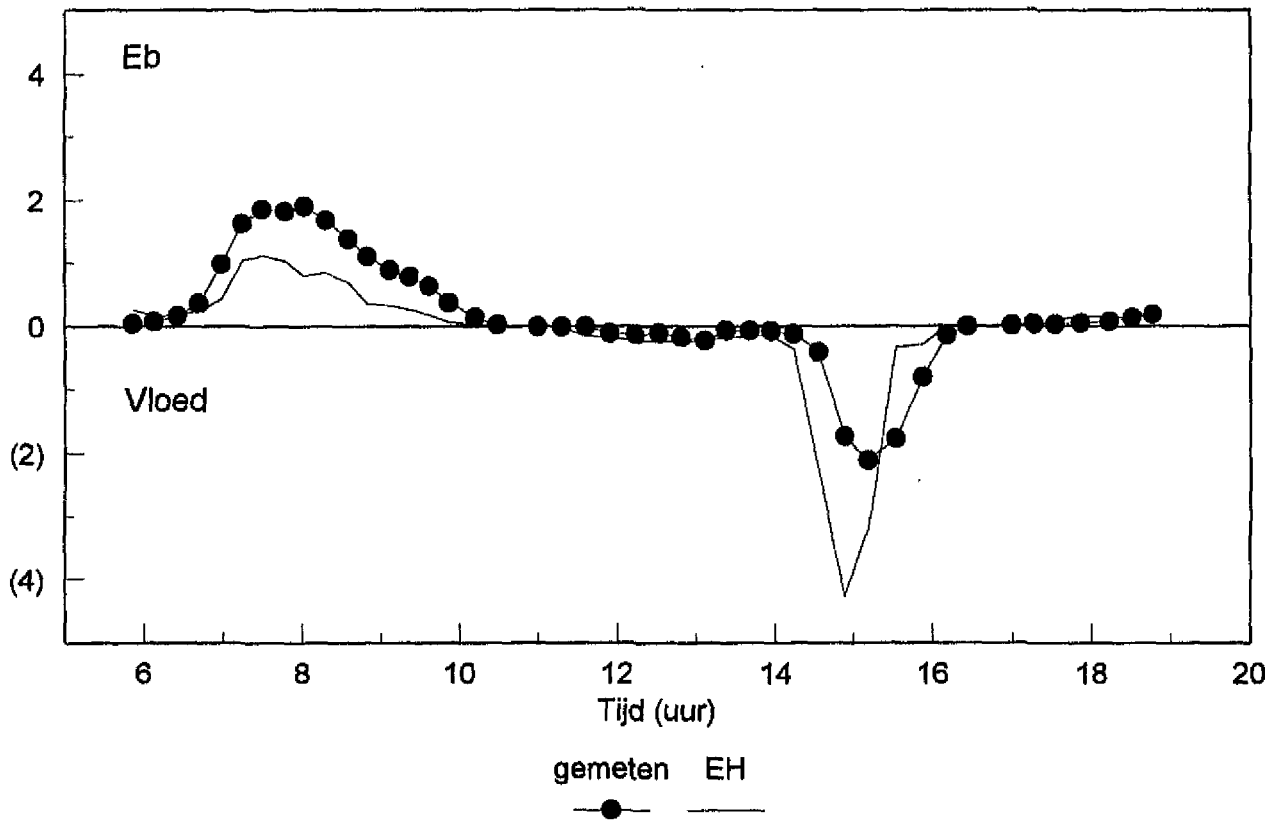


Figuur 3.14f

Raai 5A MP 51 Gemeten en berekend (Engelund-Hansen) transport (T)

AZTM 140695 GC = 1.19 D50 = 240 μ m Ks = 0.45 m h = 12.7 m

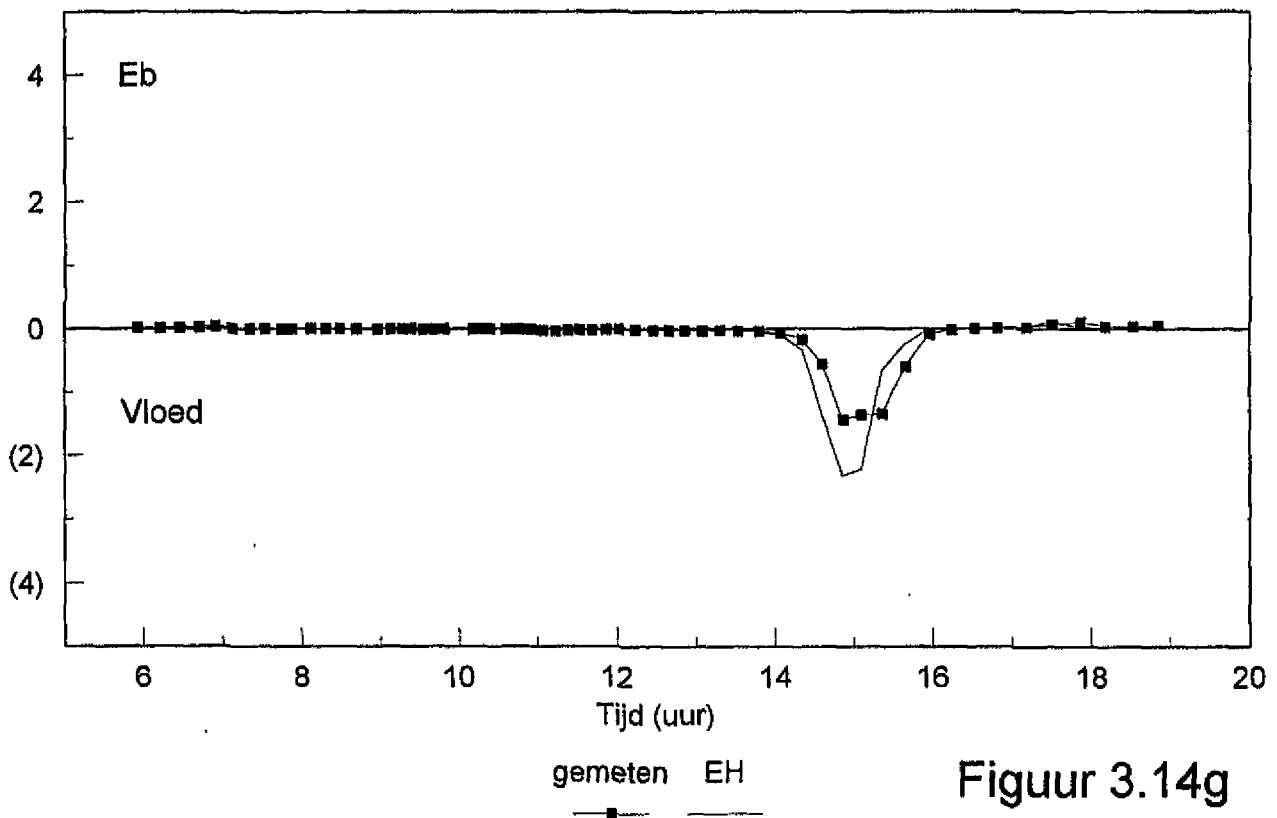
T (kg/m.s)



Raai 5A MP 52 Gemeten en berekend (Engelund-Hansen) transport (T)

AZTM 140695 GC = 1.19 D50 = 240 μ m Ks = 0.45 m h = 6.5 m

T (kg/m.s)

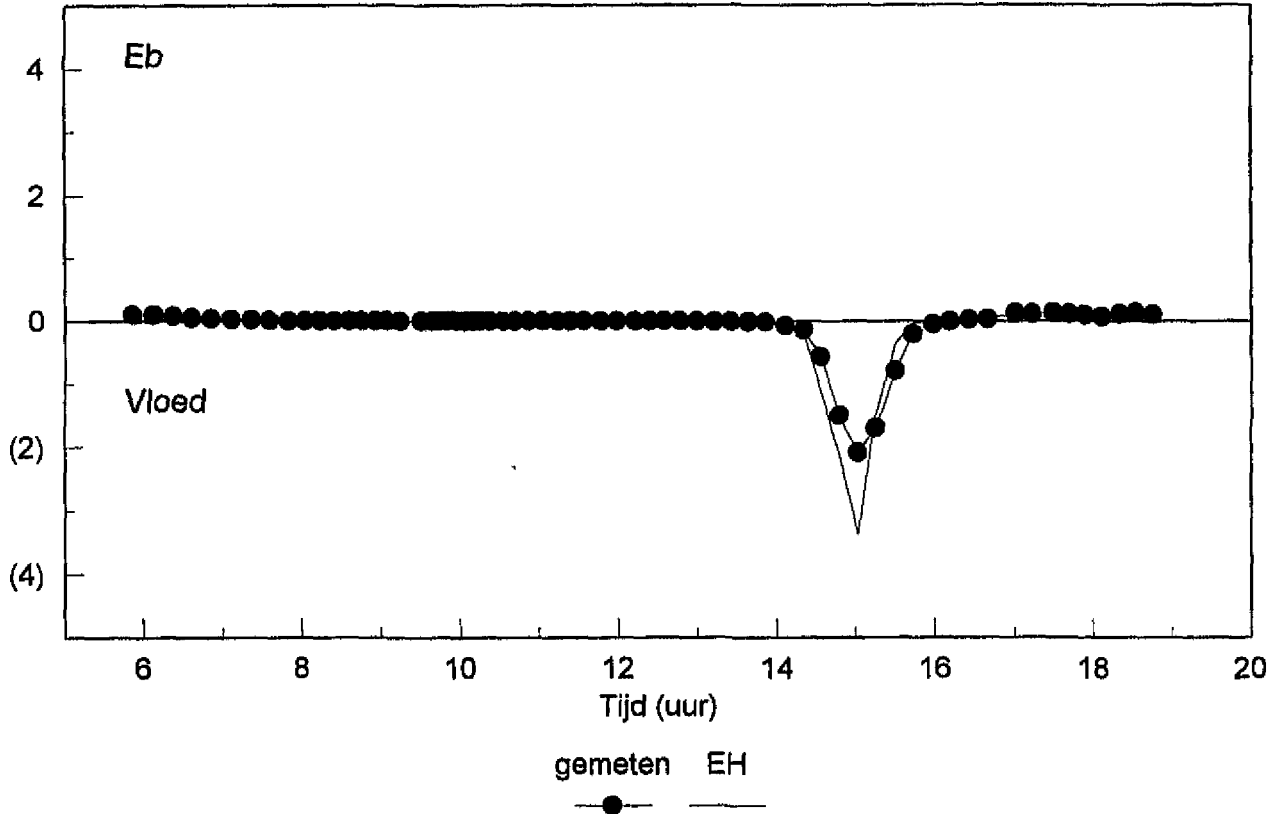


Figuur 3.14g

Raai 5A MP 53 Gemeten en berekend (Engelund-Hansen) transport (T)

AZTM 140695 GC = 1.19 D50 = 240 um Ks = 0.45 m h = 5.3 m

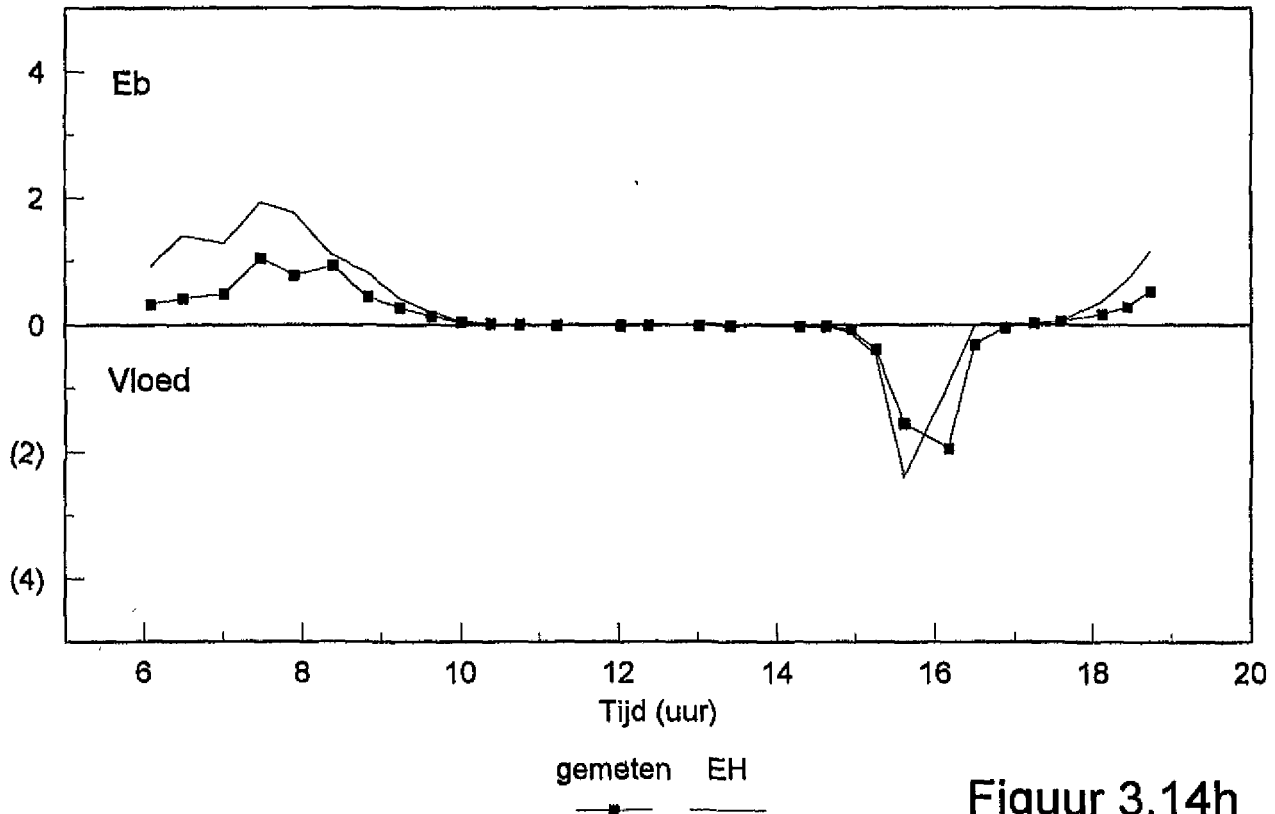
T (kg/m.s)



Raai 5A MP 54 Gemeten en berekend (Engelund-Hansen) transport (T)

AZTM 140695 GC = 1.19 D50 = 240 um Ks = 0.45 m h = 7.2 m

T (kg/m.s)

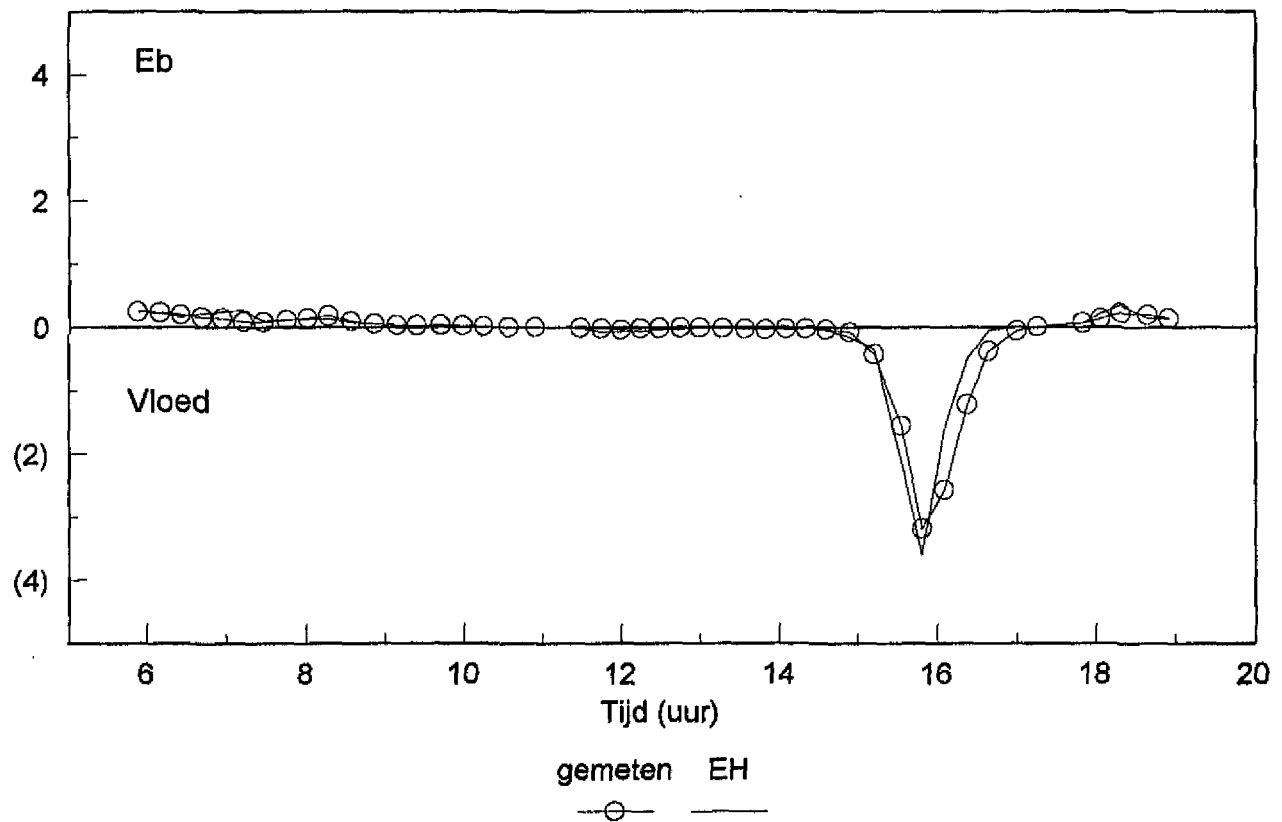


Figuur 3.14h

Raai 5A MP 55 Gemeten en berekend (Engelund-Hansen) transport (T)

AZTM 140695 GC = 1.19 D50 = 240 μ m Ks = 0.45 m h = 9.4 m

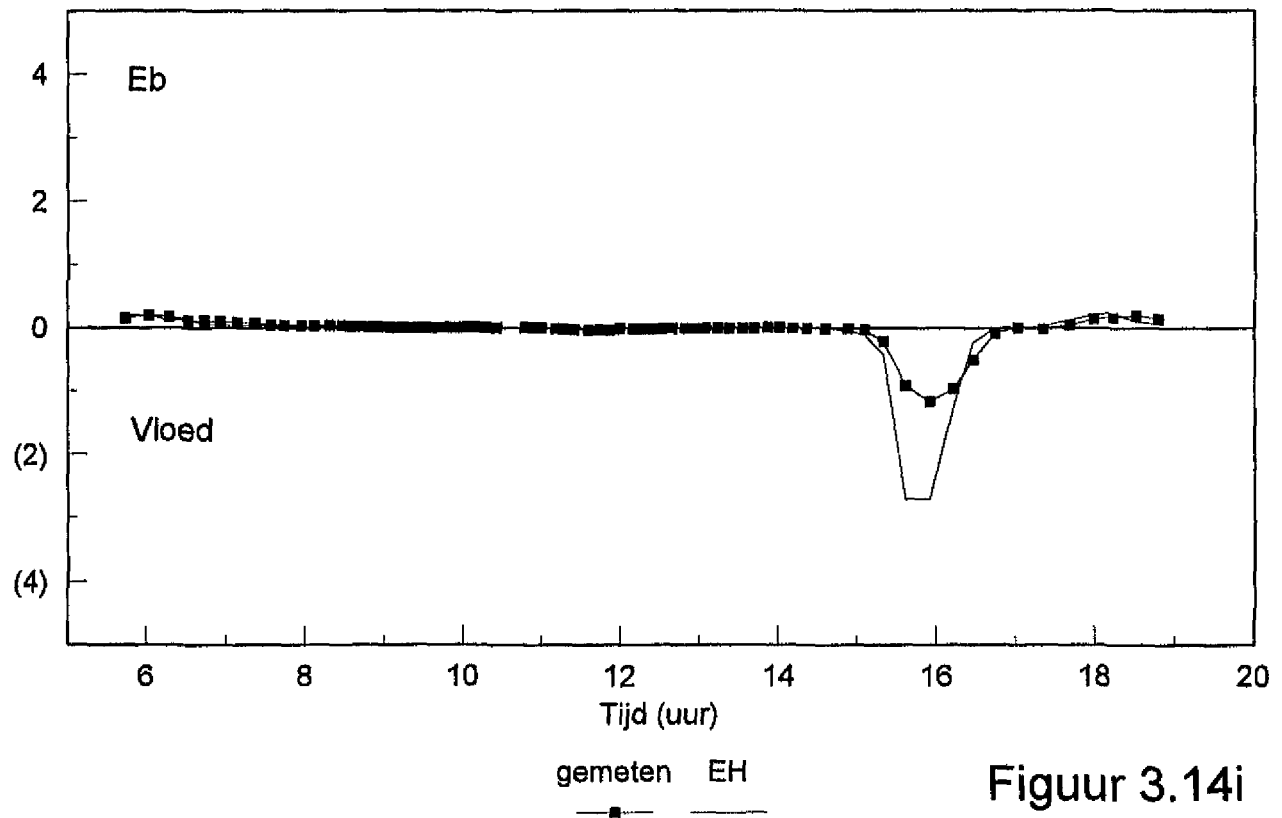
T (kg/m.s)



Raai 5A MP 56 Gemeten en berekend (Engelund-Hansen) transport (T)

AZTM 140695 GC = 1.19 D50 = 240 μ m Ks = 0.45 m h = 3.1 m

T (kg/m.s)

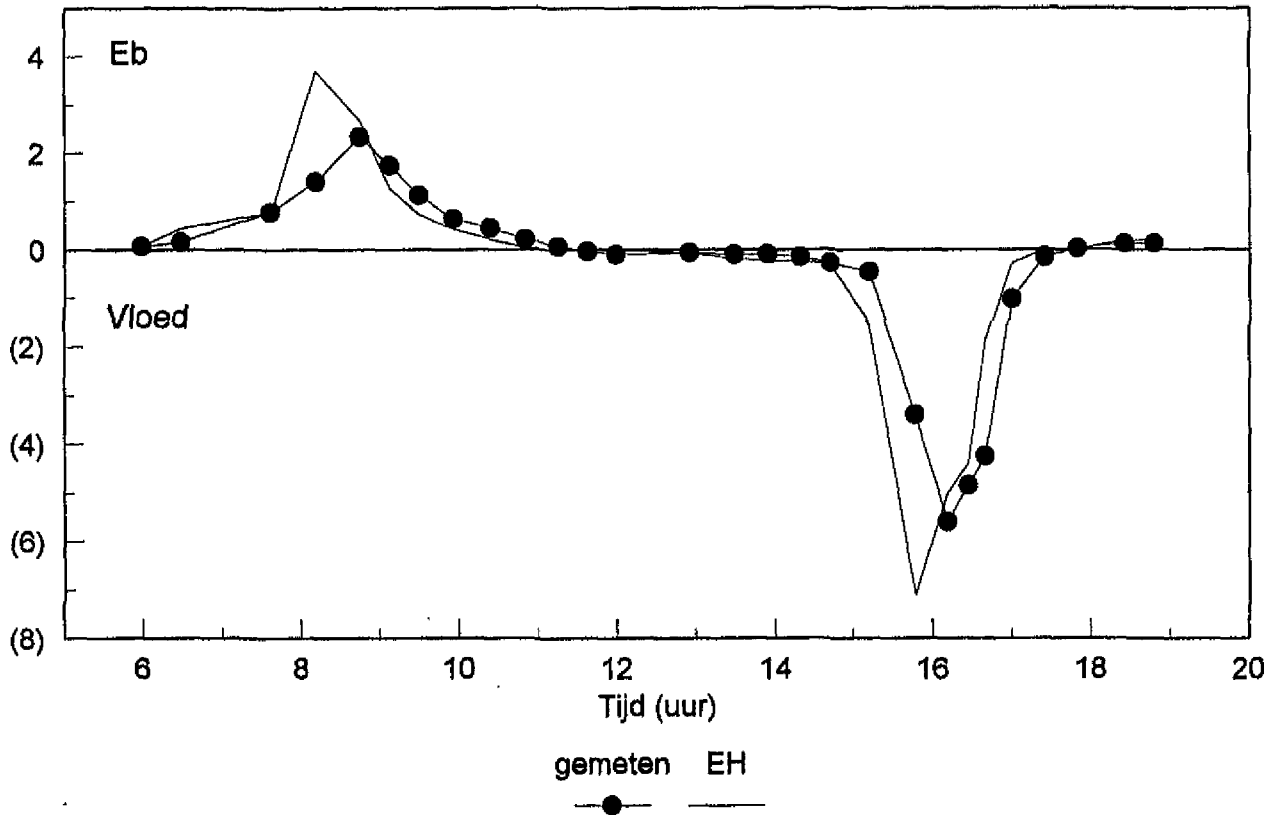


Figuur 3.14i

Raai M MP 60 Gemeten en berekend (Engelund-Hansen) transport (T)

AZTM 160996 GC = 1,11 D50 = 240 um Ks = 0,45 m h = 21 m

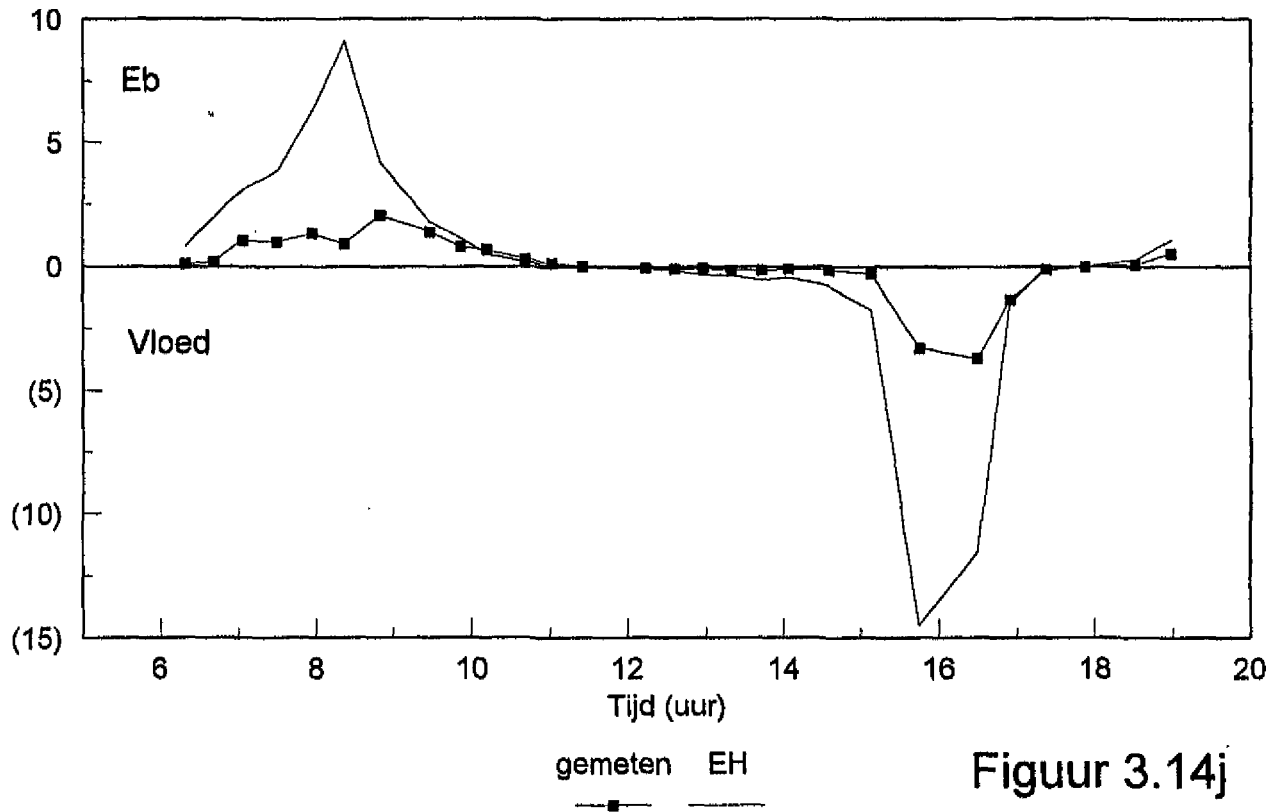
T (kg/m.s)



Raai M MP 61 Gemeten en berekend (Engelund-Hansen) transport (T)

AZTM 160996 GC = 1.11 D50 = 240 um Ks = 0.45 m h = 13.4 m

T (kg/m.s)

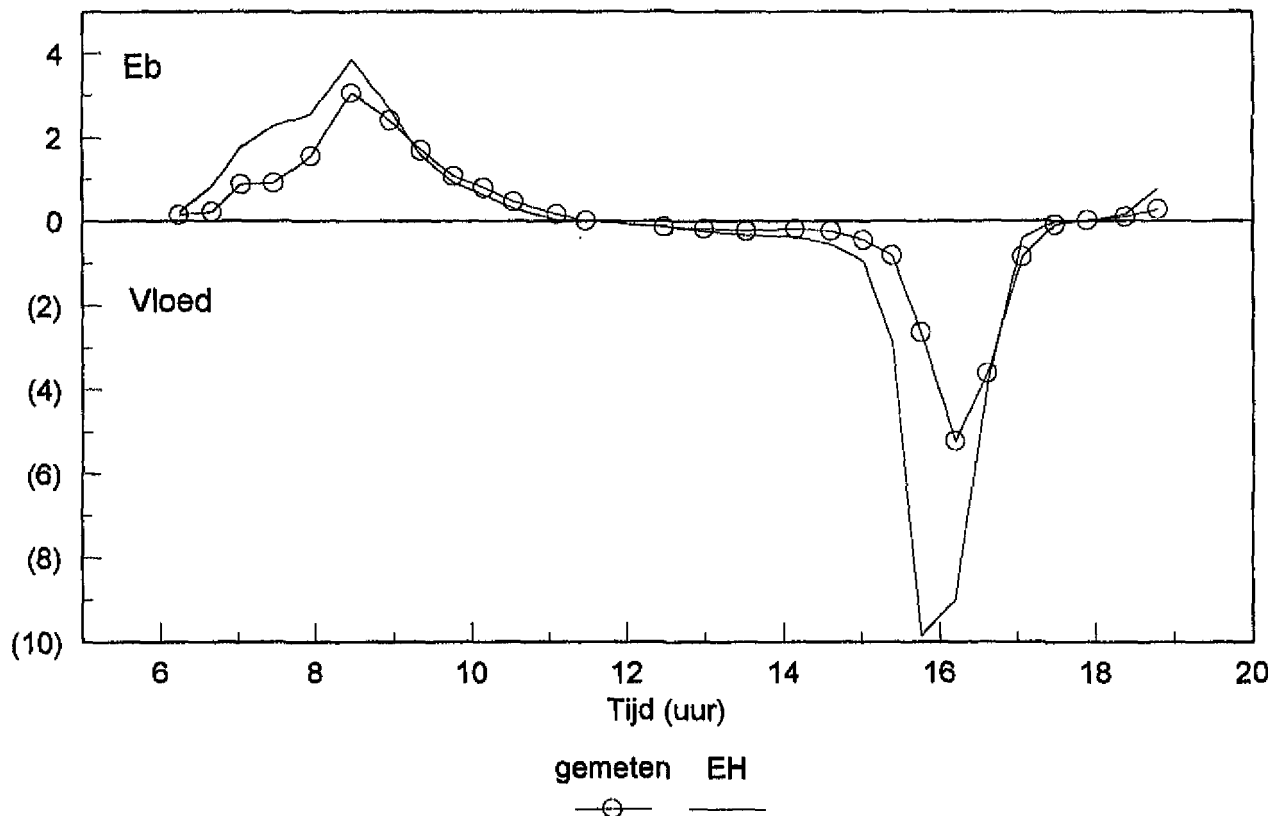


Figuur 3.14j

Raai M MP 62 Gemeten en berekend (Engelund-Hansen) transport (T)

AZTM 160996 GC = 1.11 D50 = 240 um Ks = 0.45 m h = 14.6 m

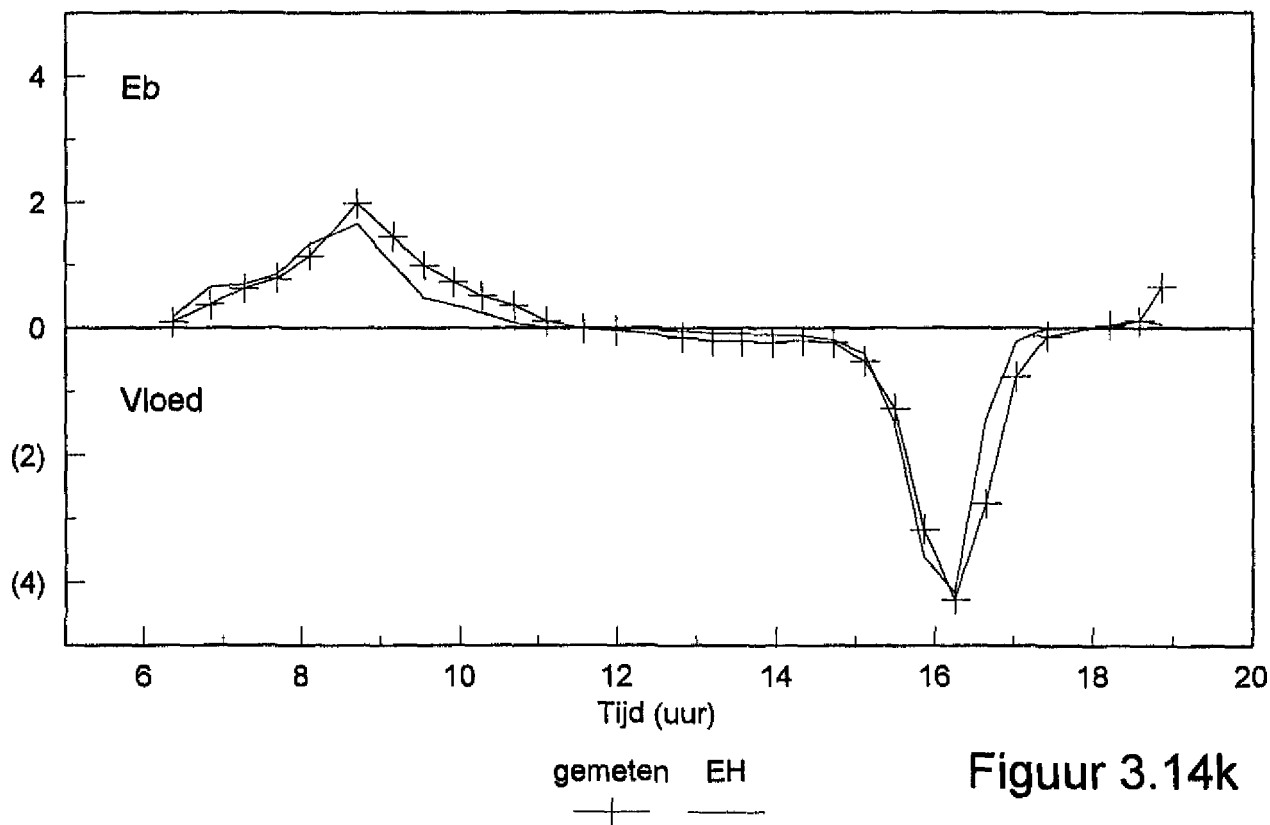
T (kg/m.s)



Raai M MP 63 Gemeten en berekend (Engelund-Hansen) transport (T)

AZTM 160996 GC = 1.11 D50 = 240 um Ks = 0.45 m h = 14.3 m

T (kg/m.s)

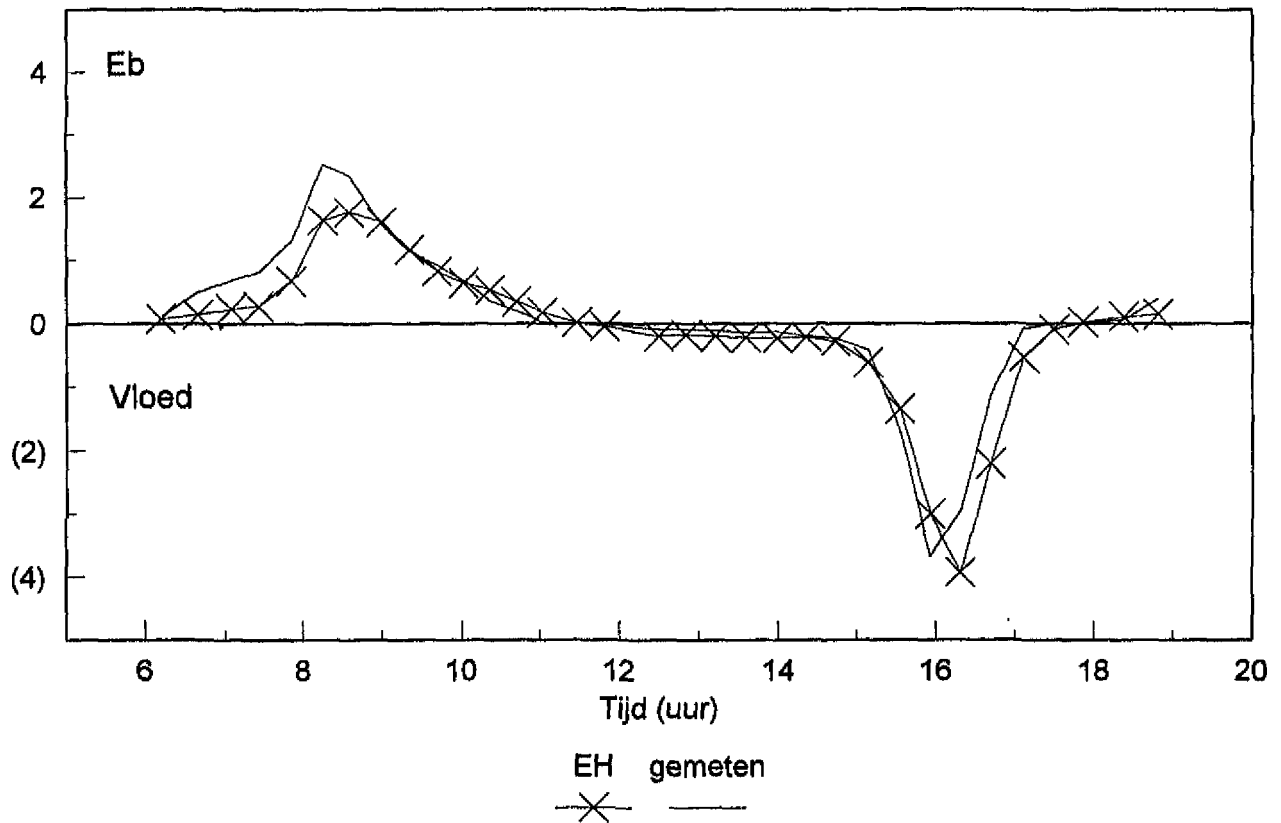


Figuur 3.14k

Raai M MP 64 Gemeten en berekend (Engelund-Hansen) transport (T)

AZTM 160996 GC = 1.11 D50 = 240 μ m Ks = 0.45 m h = 14.9 m

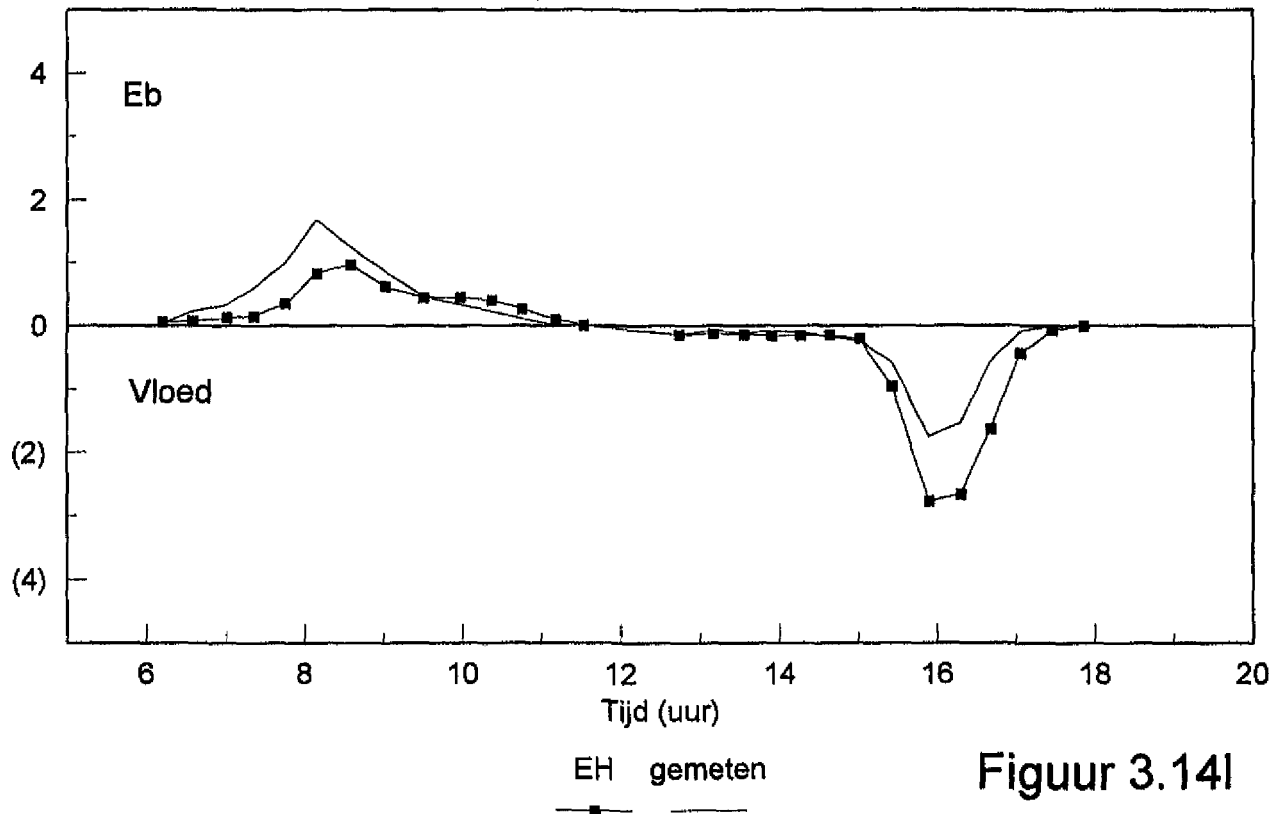
T (kg/m.s)



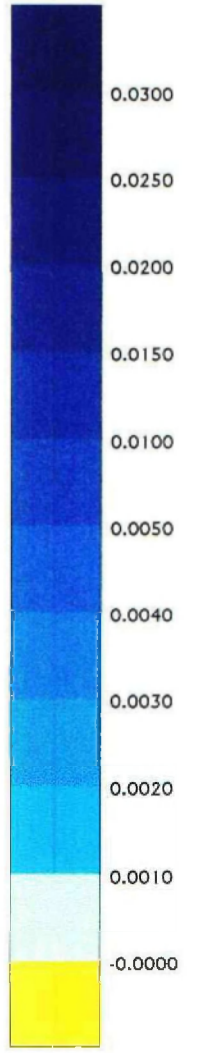
Raai M MP 65 Gemeten en berekend (Engelund-Hansen) transport (T)

AZTM 160996 GC = 1.11 D50 = 240 μ m Ks = 0.45 m h = 14.9 m

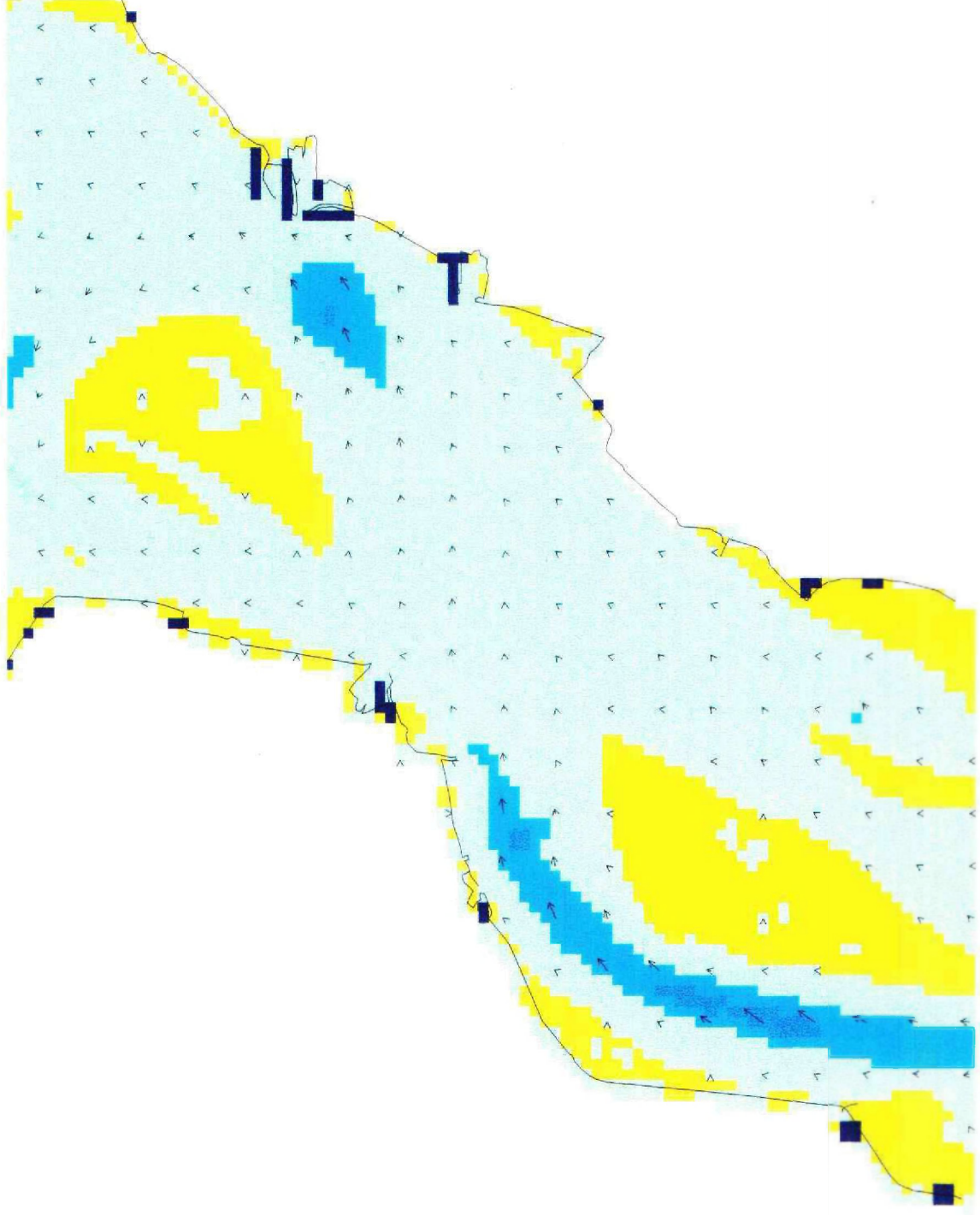
T (kg/m.s)



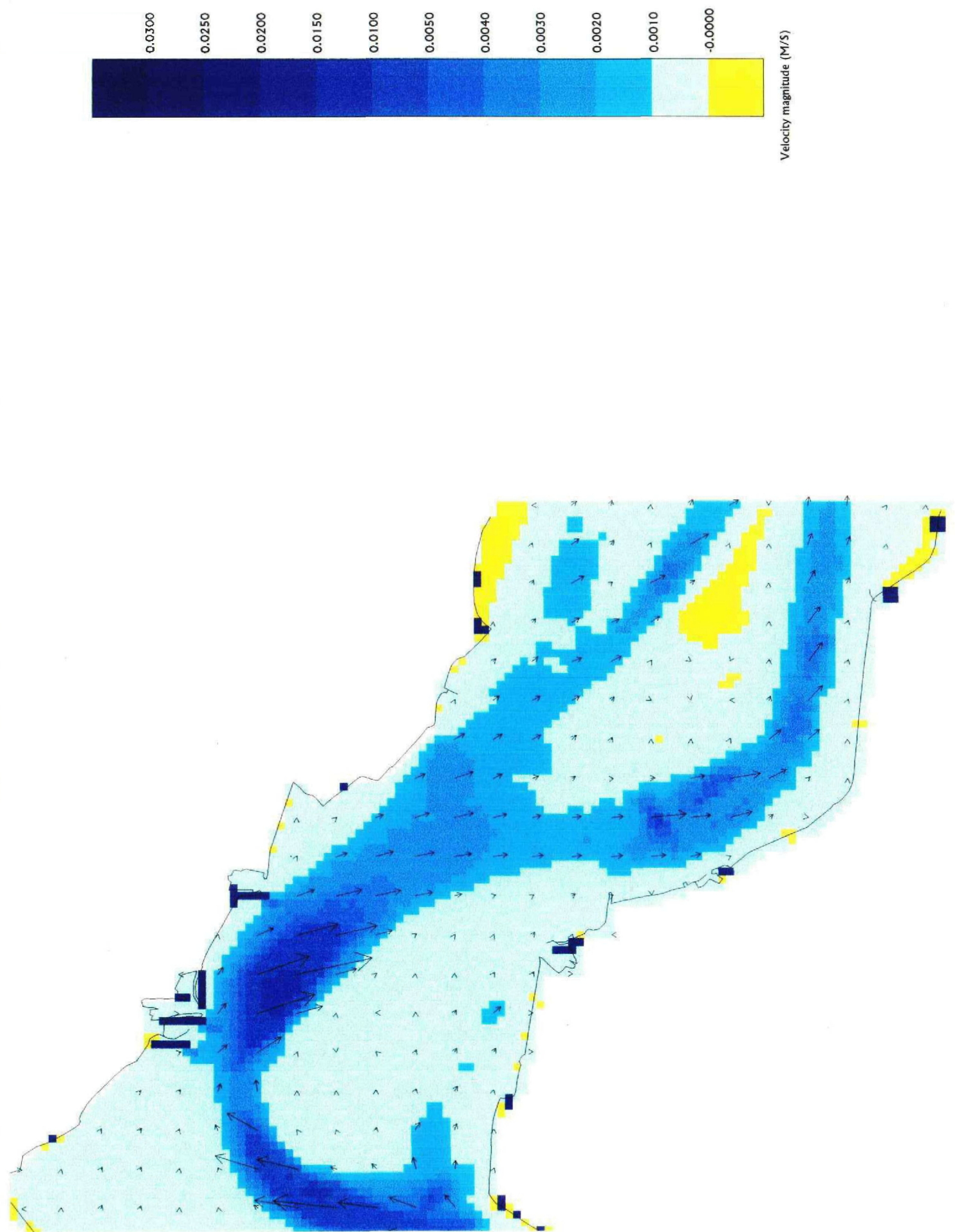
Figuur 3.14I



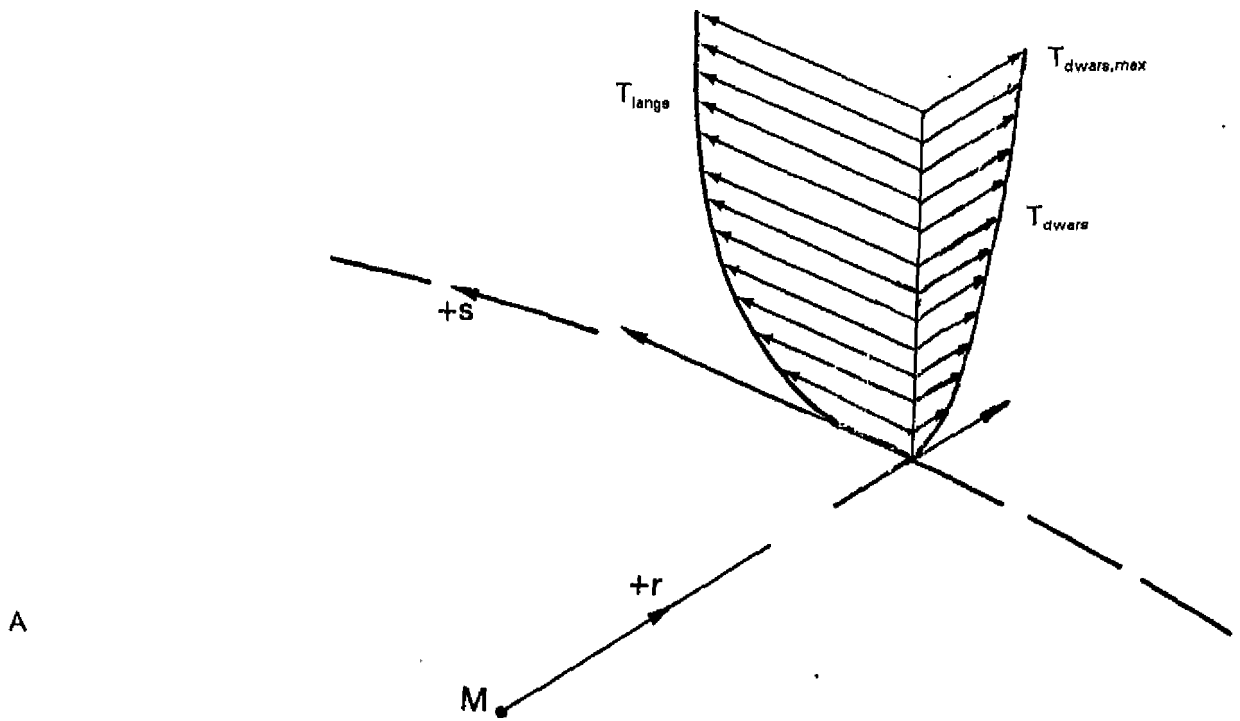
Velocity magnitude (M/S)



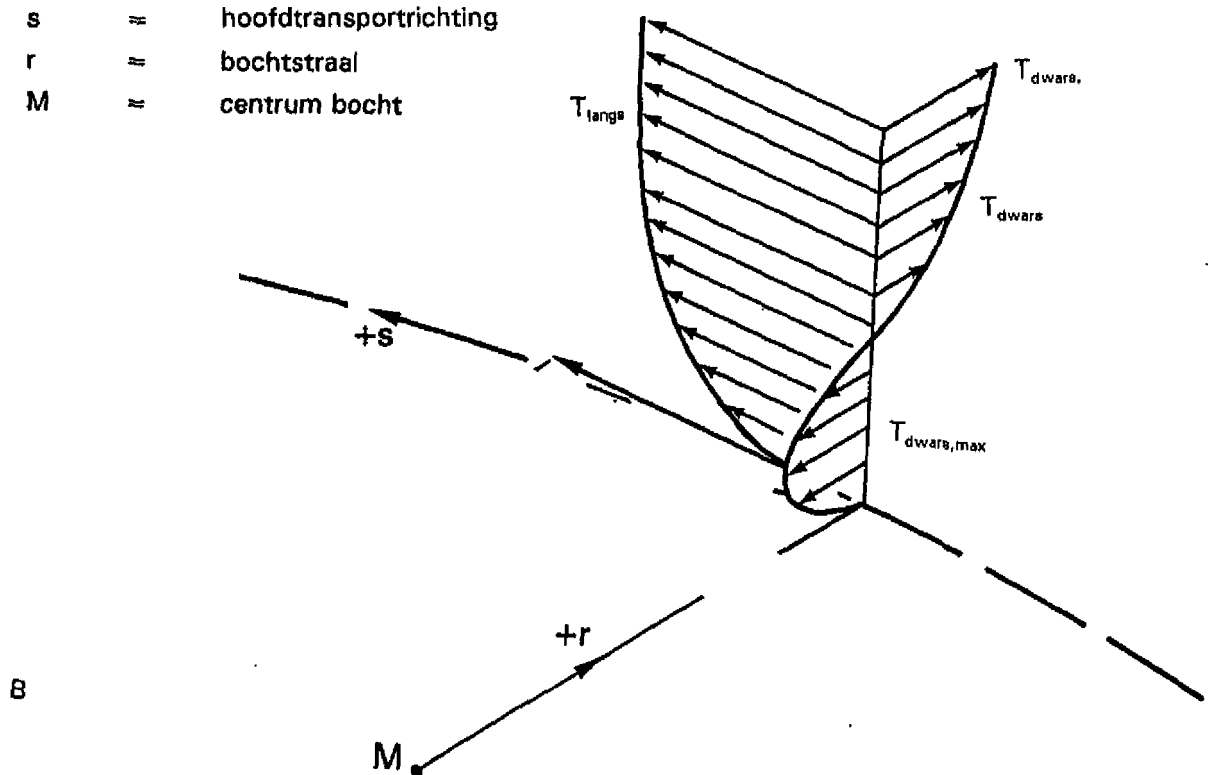
Figuur 3.15
Drempel van Hansweert. Zandtransport (in m²/s) volgens Engeland-Hansen tijdens maximum eb. WAMORF-berekening



Figuur 3.16 Drenpel van Hansweert. Zandtransport (in m^2/s) volgens Engelund-Hansen tijdens maximum vloed. WAMORF-berekening



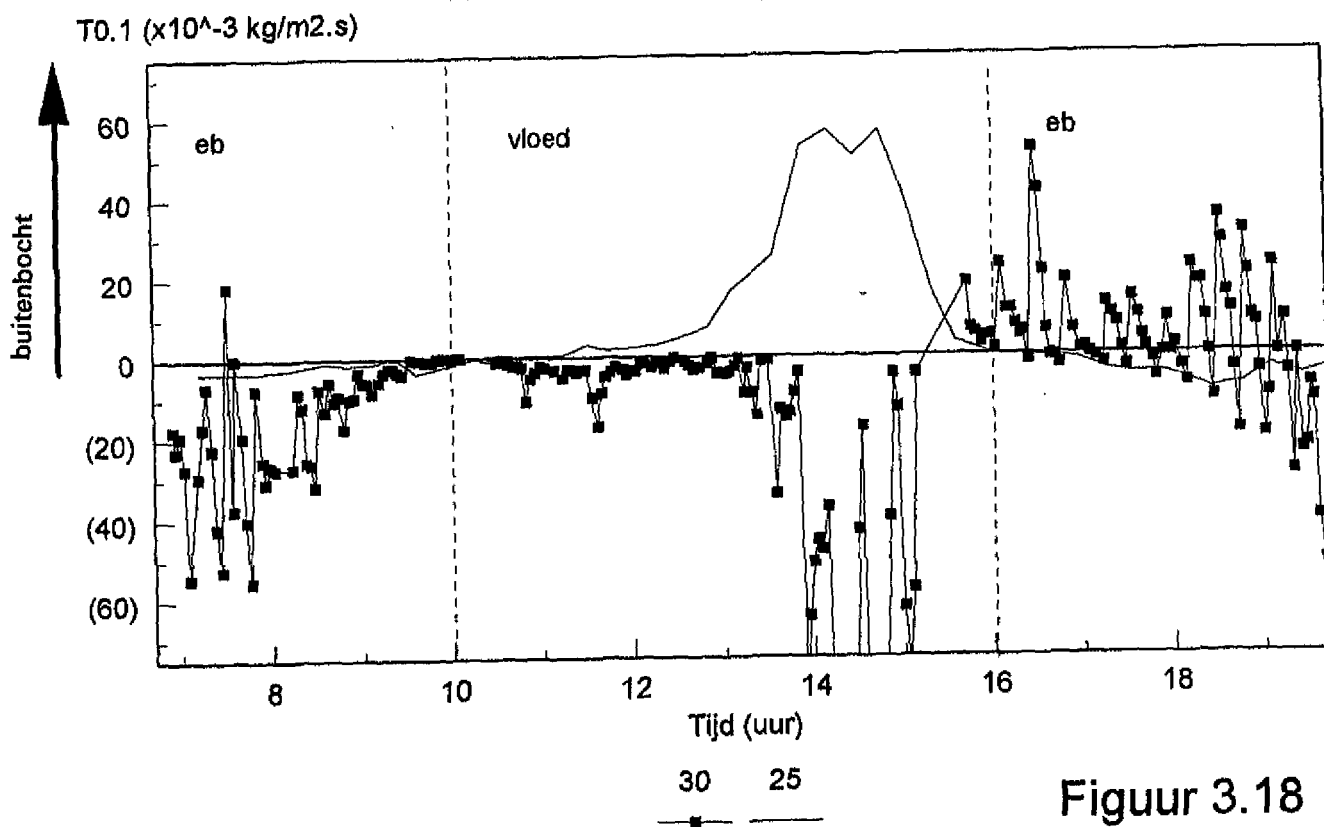
s ≡ hoofdtransportrichting
 r ≡ bochtstraal
 M ≡ centrum bocht

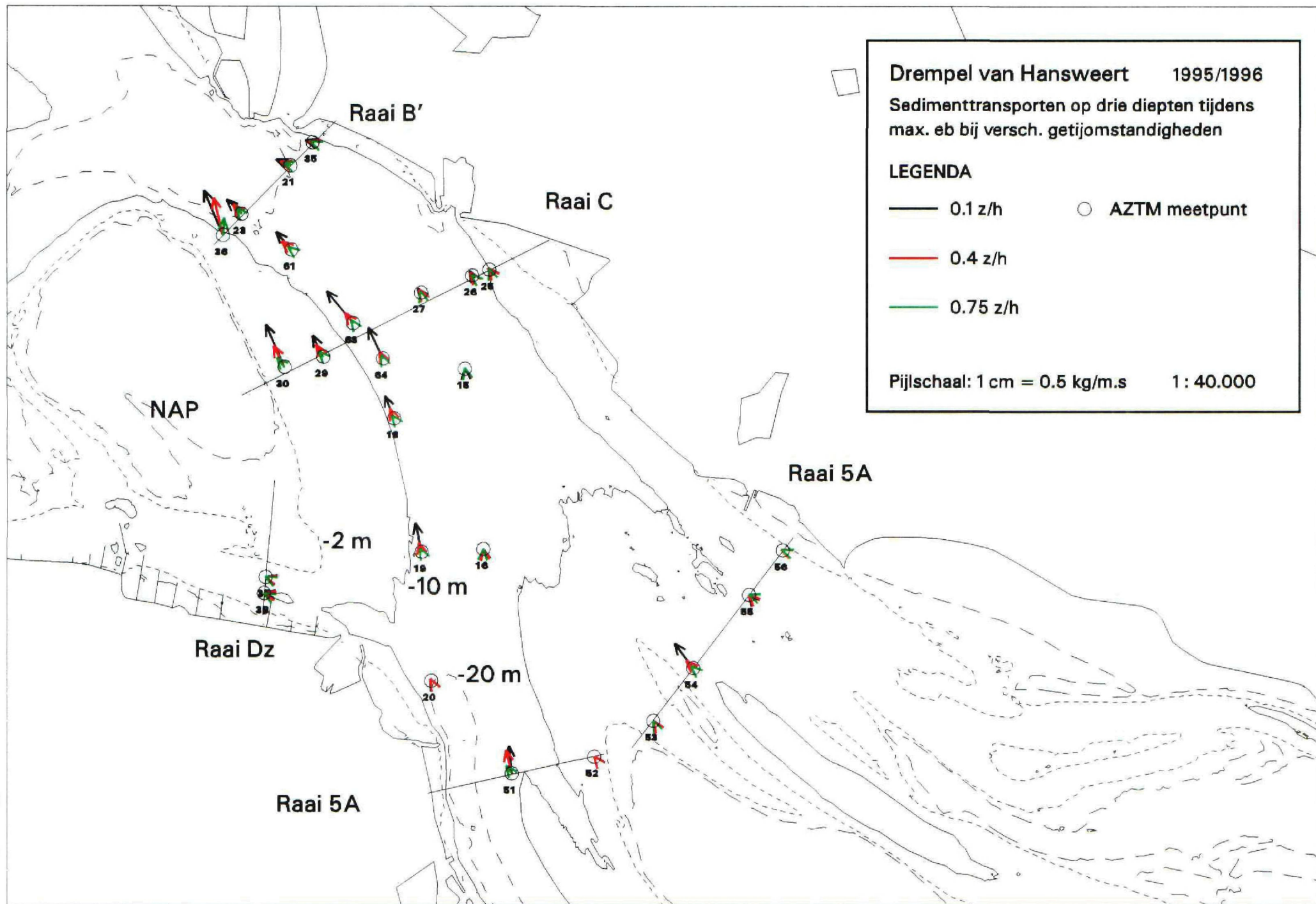


Figuur 3.17 Definitieschets a. transversale transport en b. secundair transport

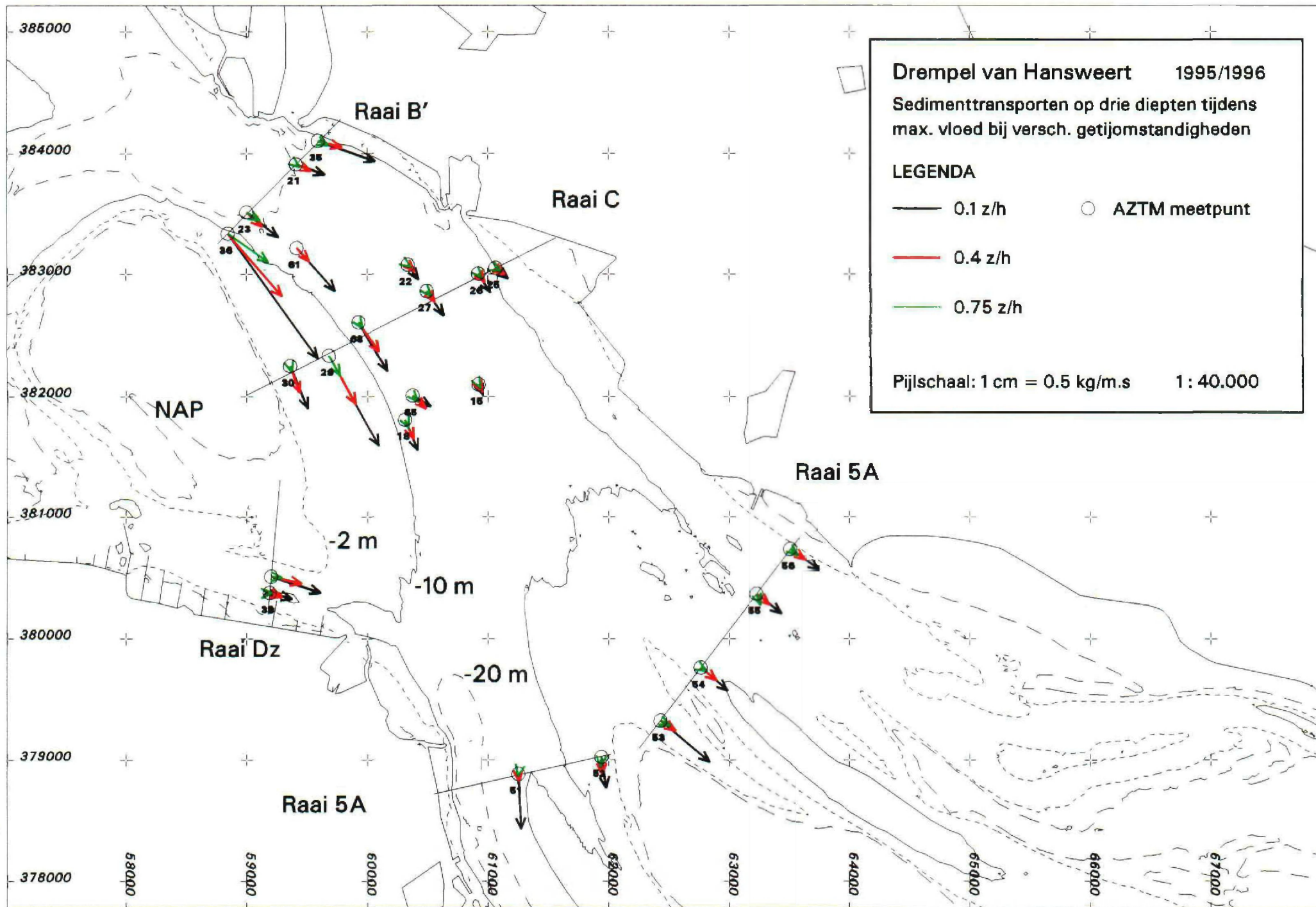
Raai C Dwarstransport op 0.1 z/h + bodem (T0.1)

AZTM 951025 Getij-coefficient = 1.14





Figuur 3.19

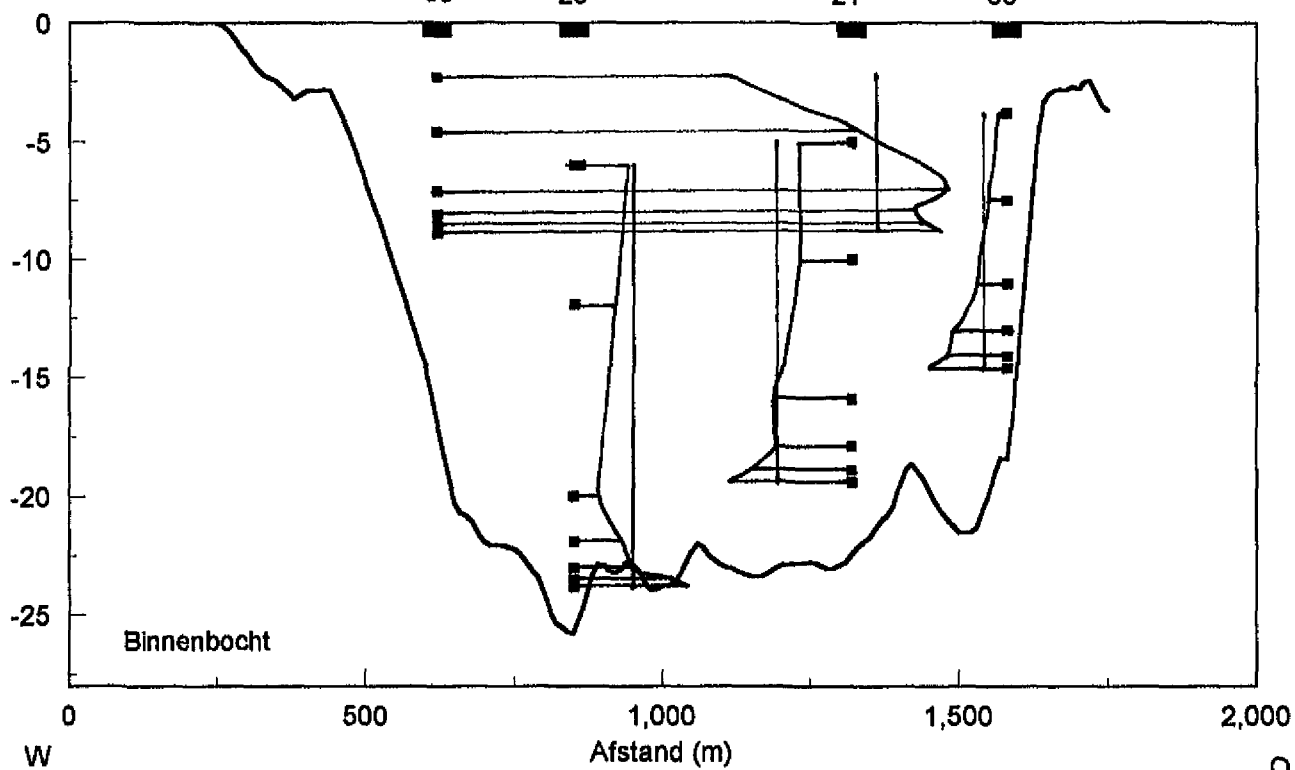


Figuur 3.20

Raai B' Transversaal en secundair transport tijdens maximum eb

AZTM 170496 GC = 1.18 18.17 - 18.44 uur 1 mm = 4 g/m².s

Diepte tov NAP (m)

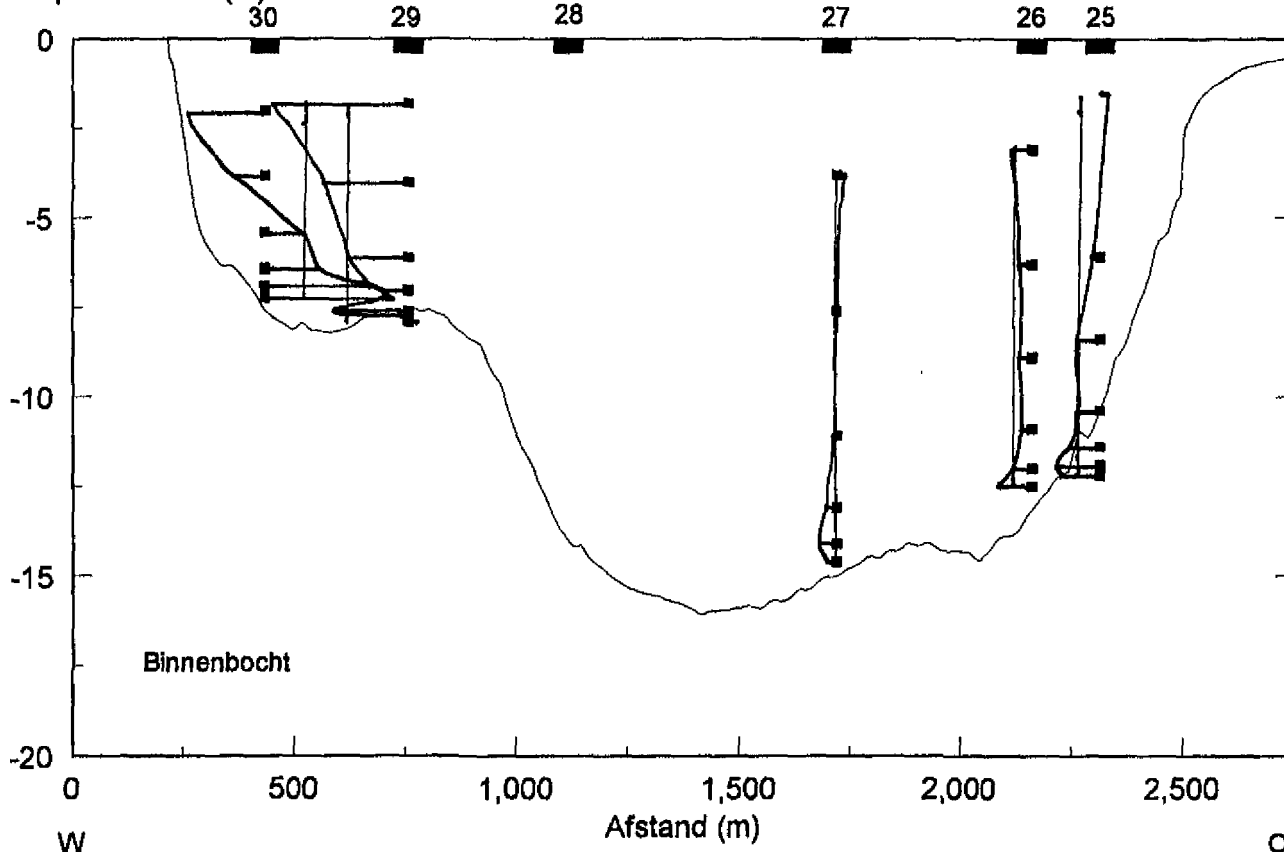


Figuur 3.21

Raai C Transversaal en secundair transport tijdens maximum eb

AZTM 251095 GC = 1.14 18.27 - 18.57 u 1mm ≈ 2 g/m².s

Diepte tov NAP (m)



Figuur 3.22

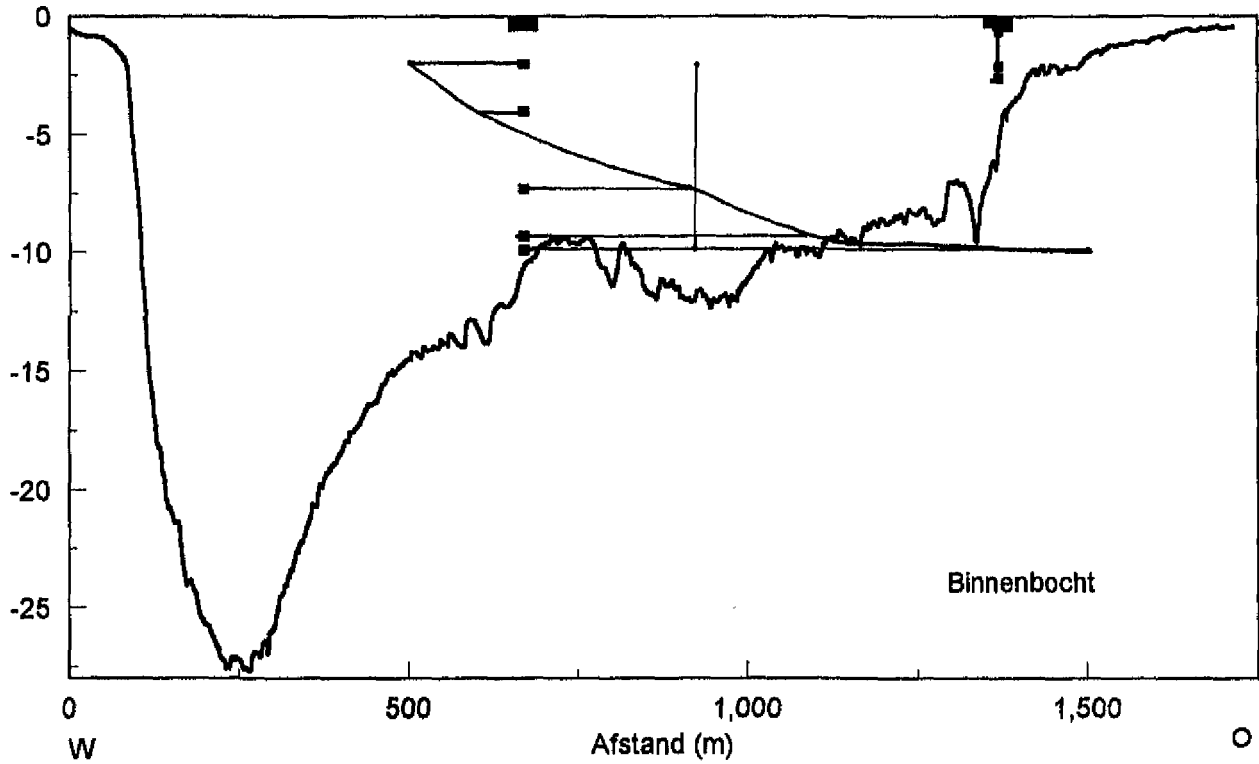
Raai 5A Transversaal en secundaire transport tijdens maximum eb

AZTM 140695 GC = 1.19 7.51 - 8.08 uur 1 mm = 2 g/m².s

Diepte tov NAP (m)

51

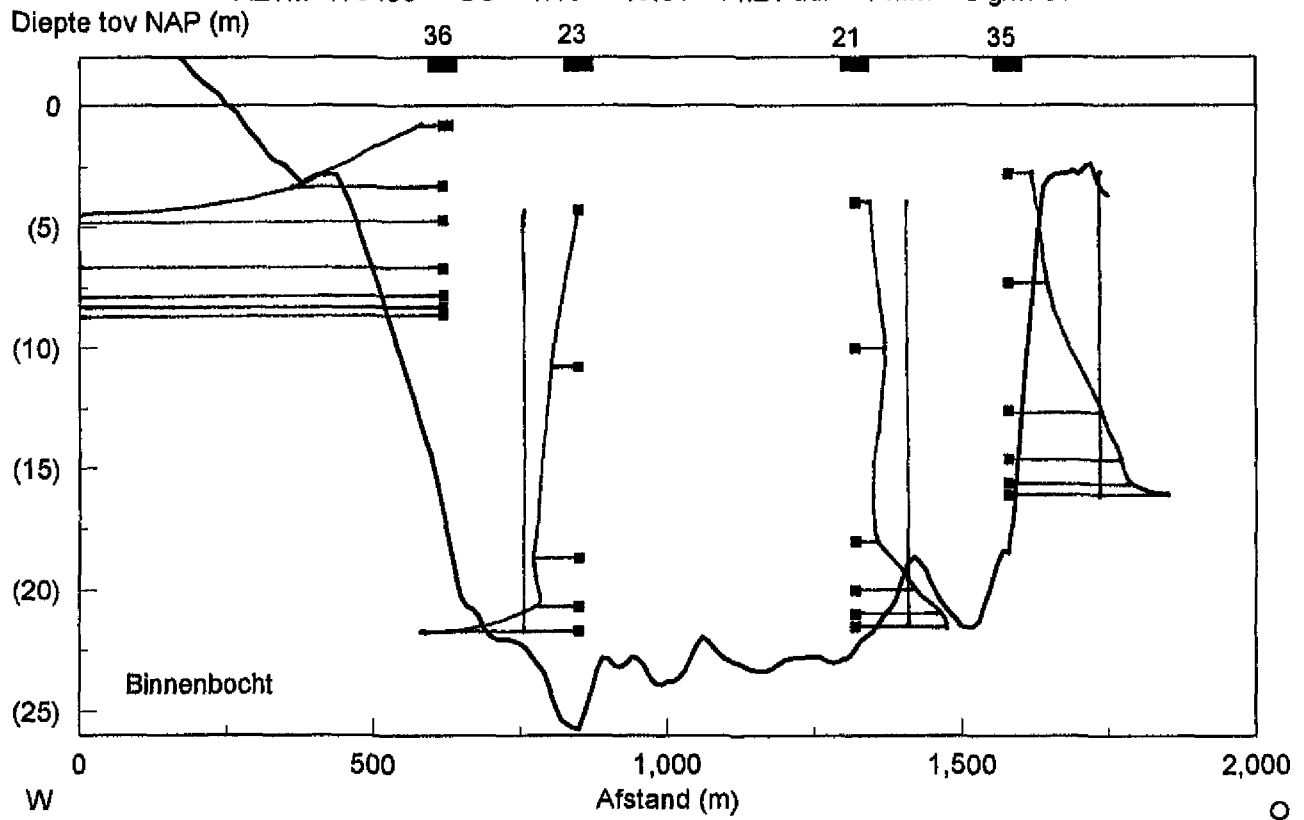
52



Figuur 3.23

Raai B' Transversaal en secundair transport tijdens maximum vloed

AZTM 170496 GC = 1.18 13.31 - 14.21 uur 1 mm = 8 g/m².s

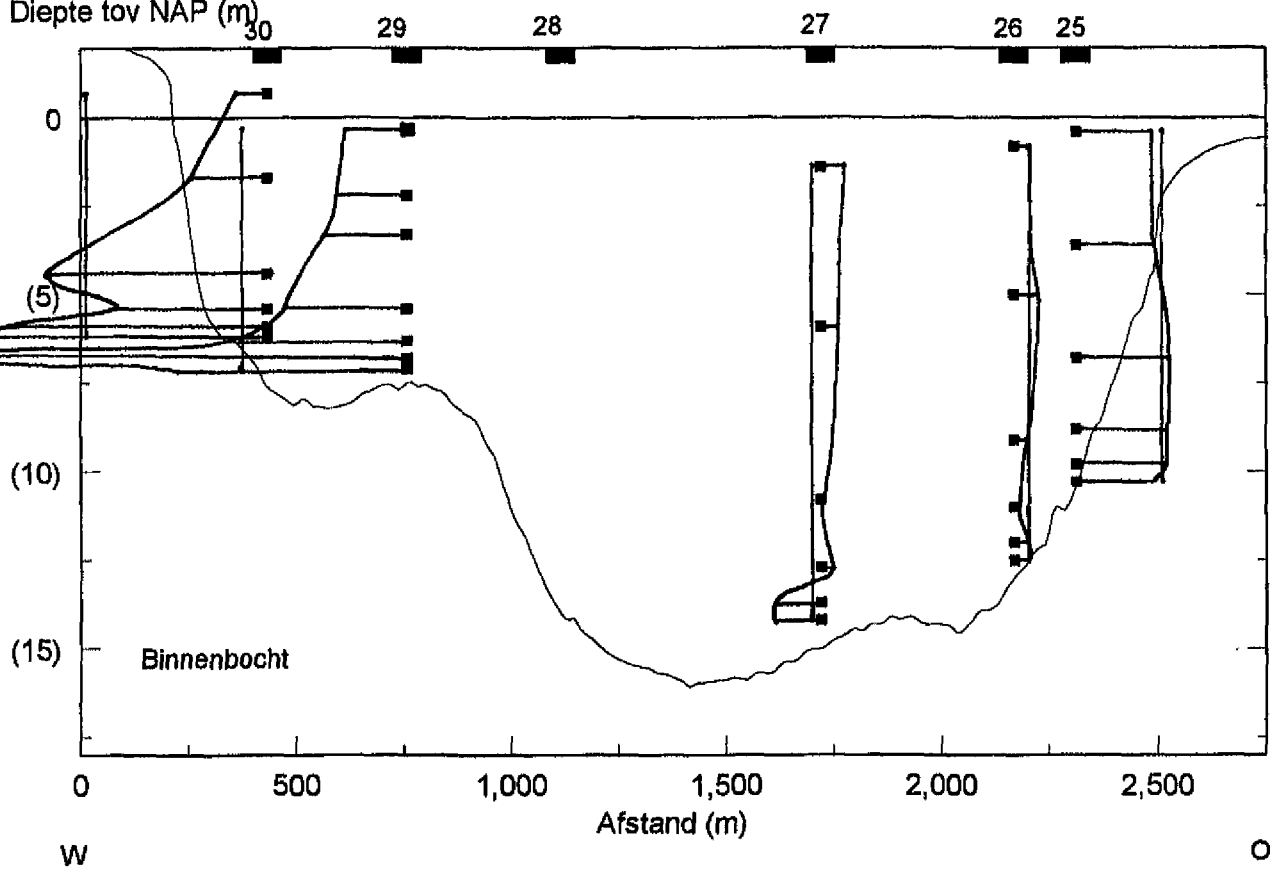


Figuur 3.24

Raai C Transversaal en secundair transport tijdens maximum vloed

AZTM 231095 GC = 1.14 14.16 - 14.56 u 1mm = 4 g/m².s

Diepte tov NAP (m)



Figuur 3.25

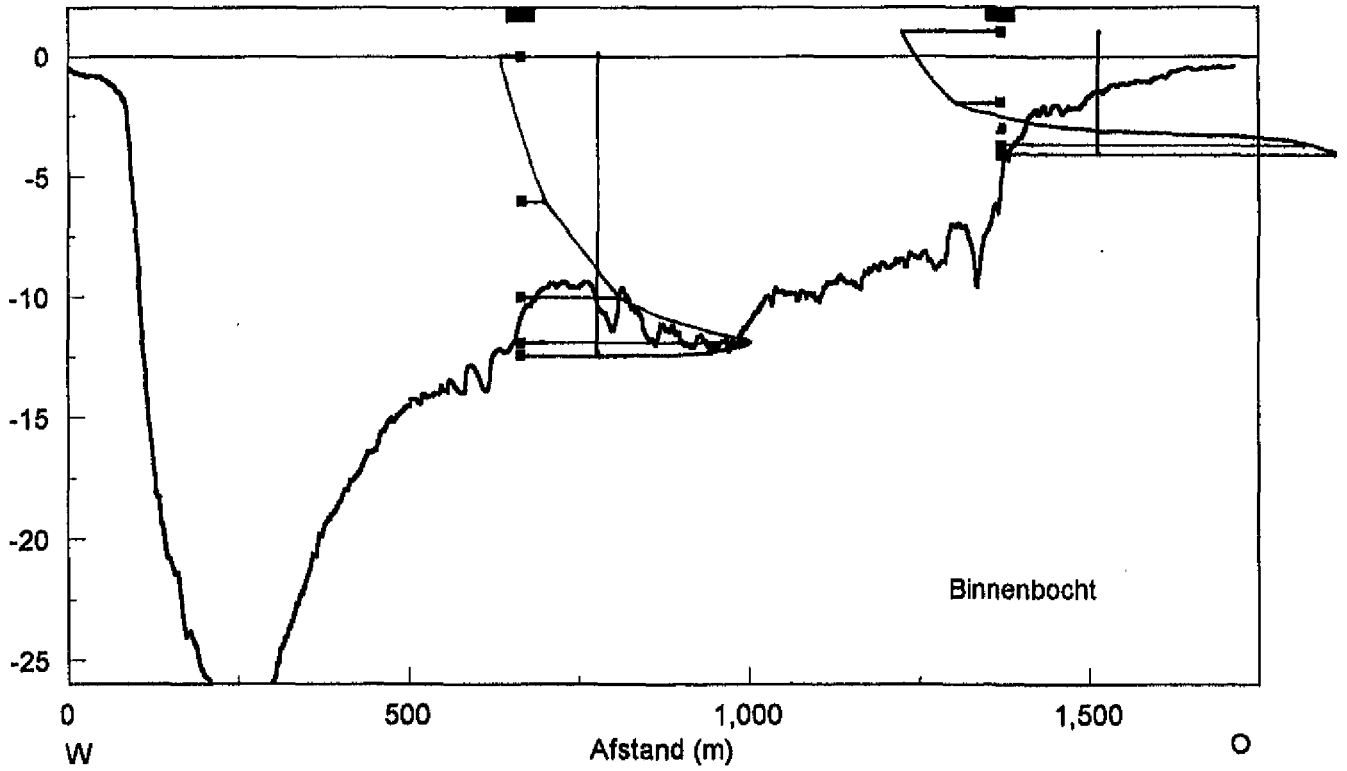
Raai 5A Transversaal en secundair transport tijdens maximum vloed

AZTM 140695 GC = 1.19 14.46 - 15.17 uur 1 mm = 2 g/m².s

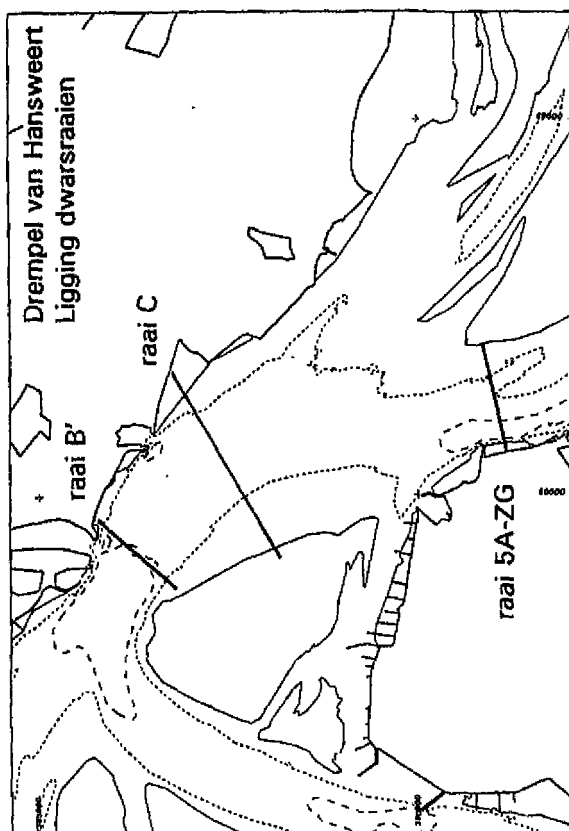
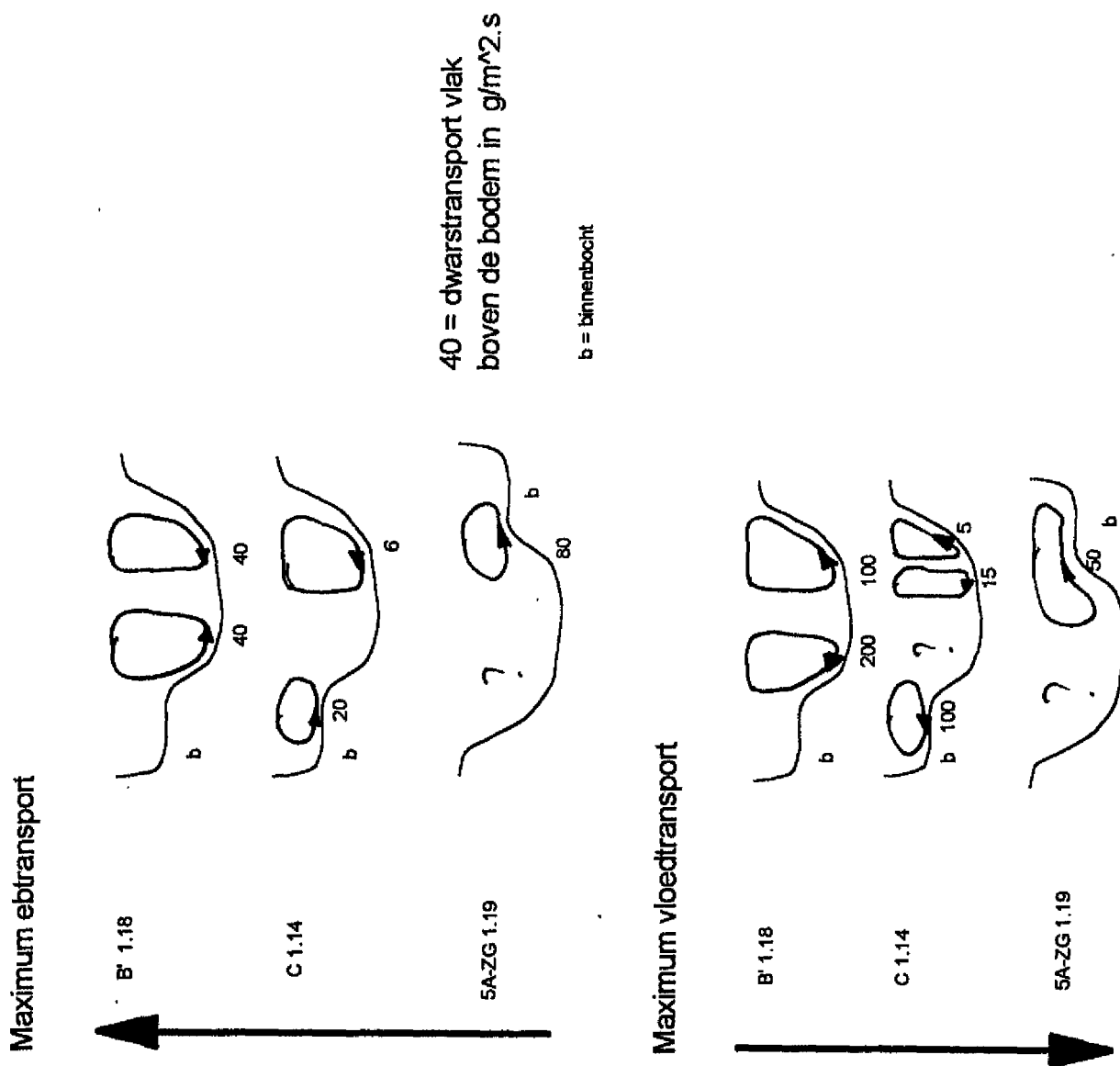
Diepte tov NAP (m)

51

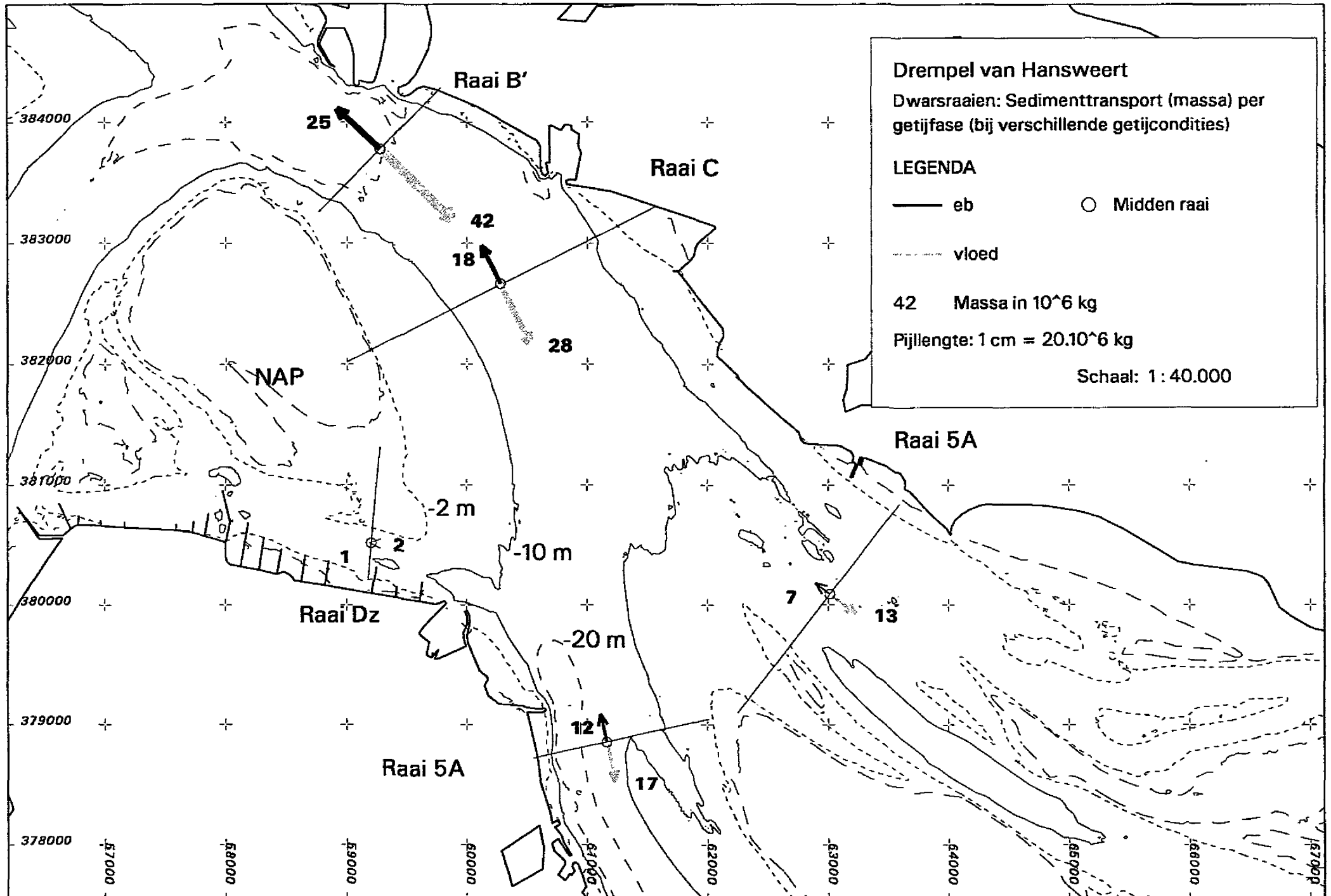
52



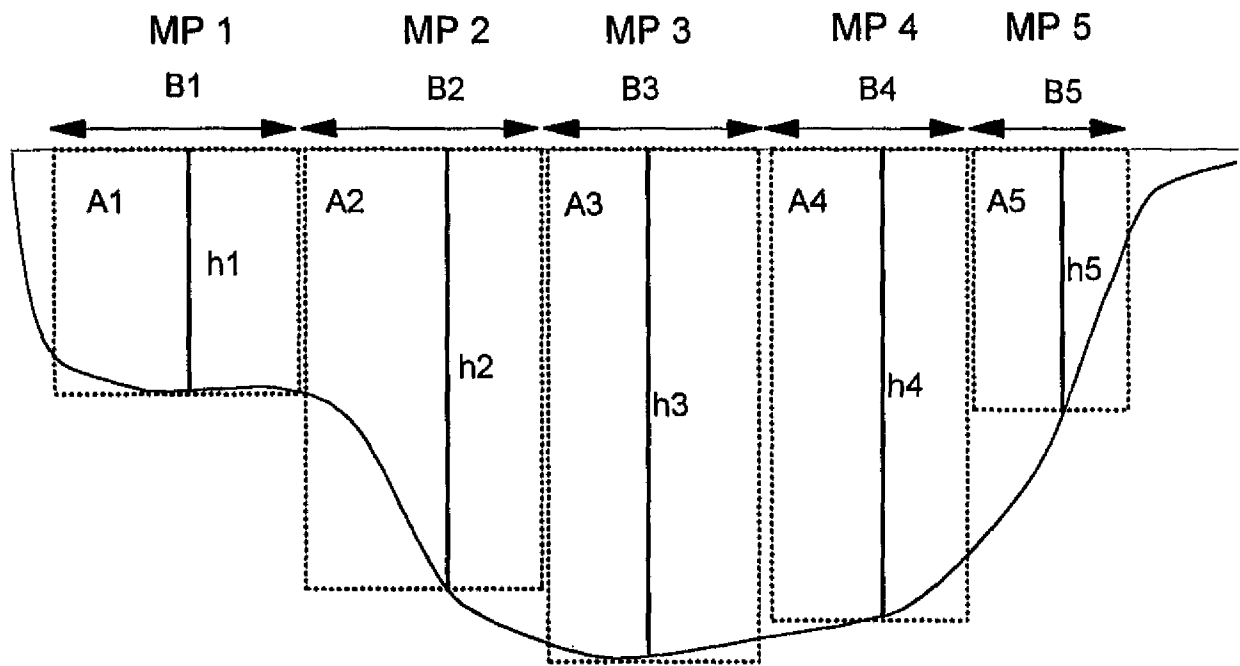
Figuur 3.26



Figuur 3.27 Het verloop van cellen met zandtransporten door secundaire stroming op de Drempeel van Hansweert tijdens maximum eb- en maximum vloedtransport



Figuur 3.28



mp = meetpunt
 B = breedte
 h = waterdiepte
 A = oppervlak

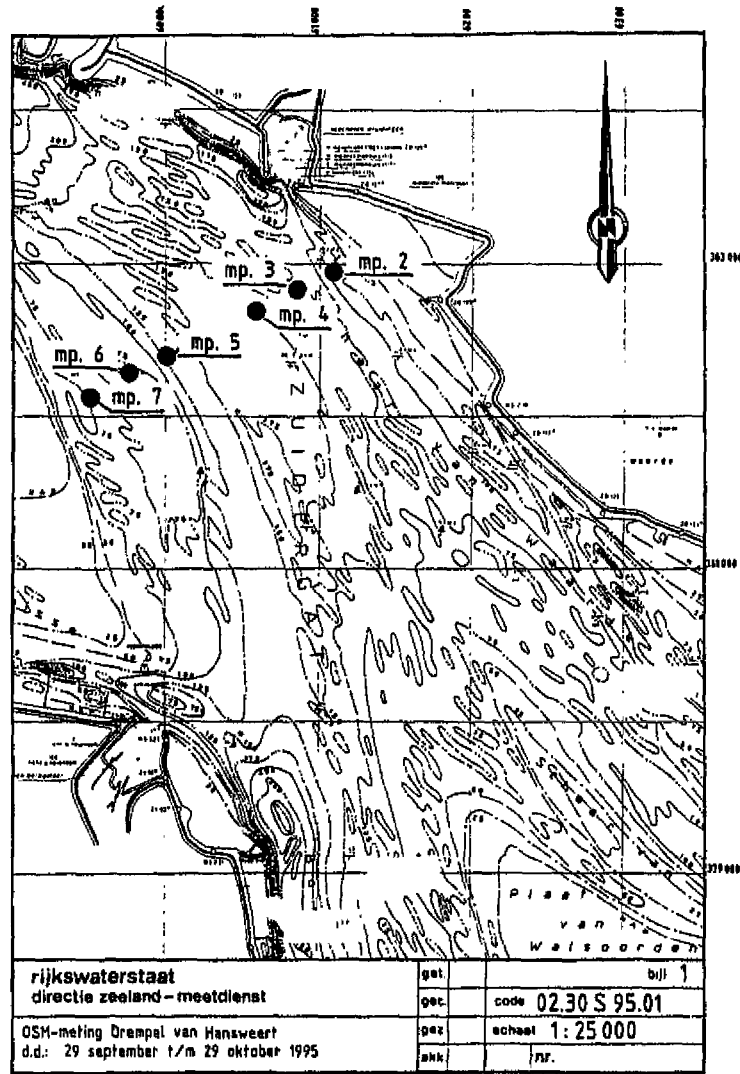
Berekening totaaltransport:

$$T_{tot, getijfase} = \sum_{n=1}^N (\sum_{i=1}^n T_n) * B_n$$

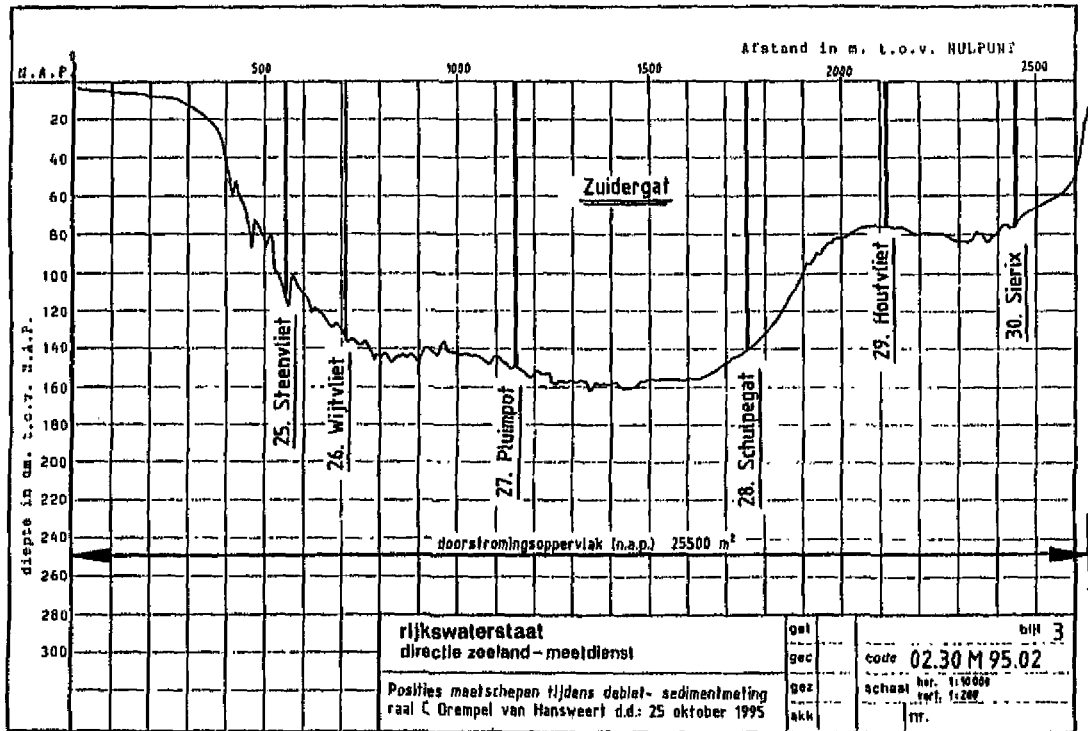
waarin;

T = momentaan transport
 n = meetpunt
 B = breedte

Figuur 3.29 Schets van de berekening van het totaal; langstransport in een dwarsraai per getijfase



Figuur 3.30 Lokaties van de OSM-meetpunten op de Drempel van Hansweert in oktober 1995

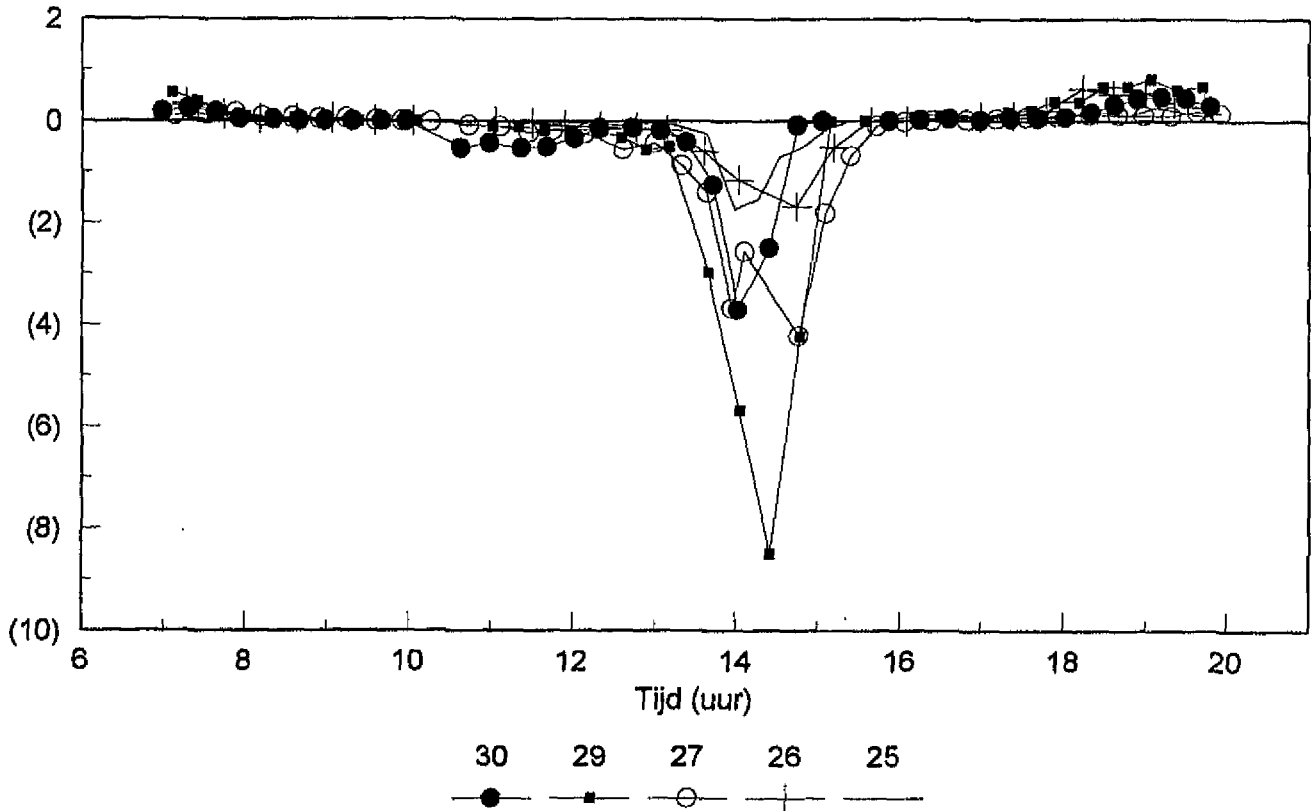


Figuur 3.31 Ligging van de AZTM-meetpunten in dwarsprofiel van raai C op 25 oktober 1995

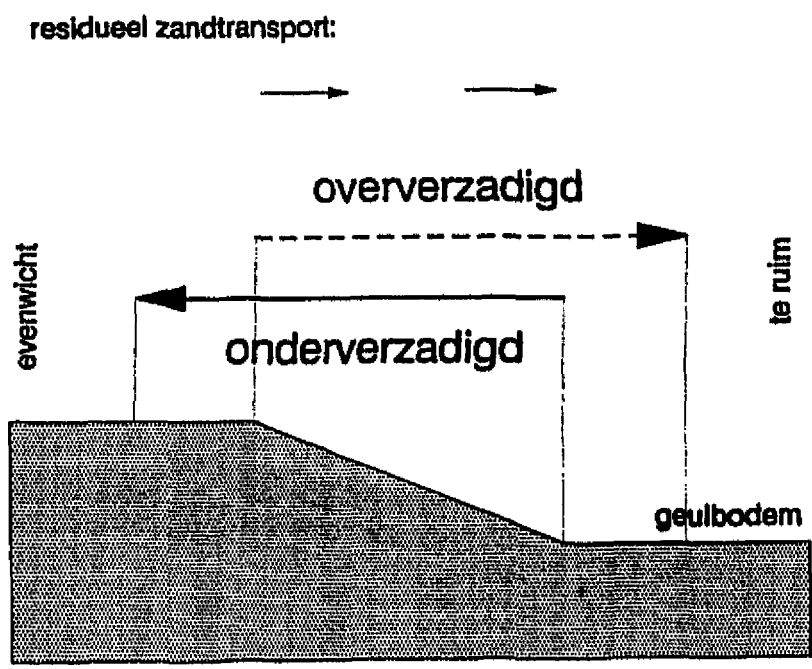
Raai C Diepte geïntegreerd zandtransport (T) door Getij-Asymmetrie

AZTM 251095 GC = 1.14

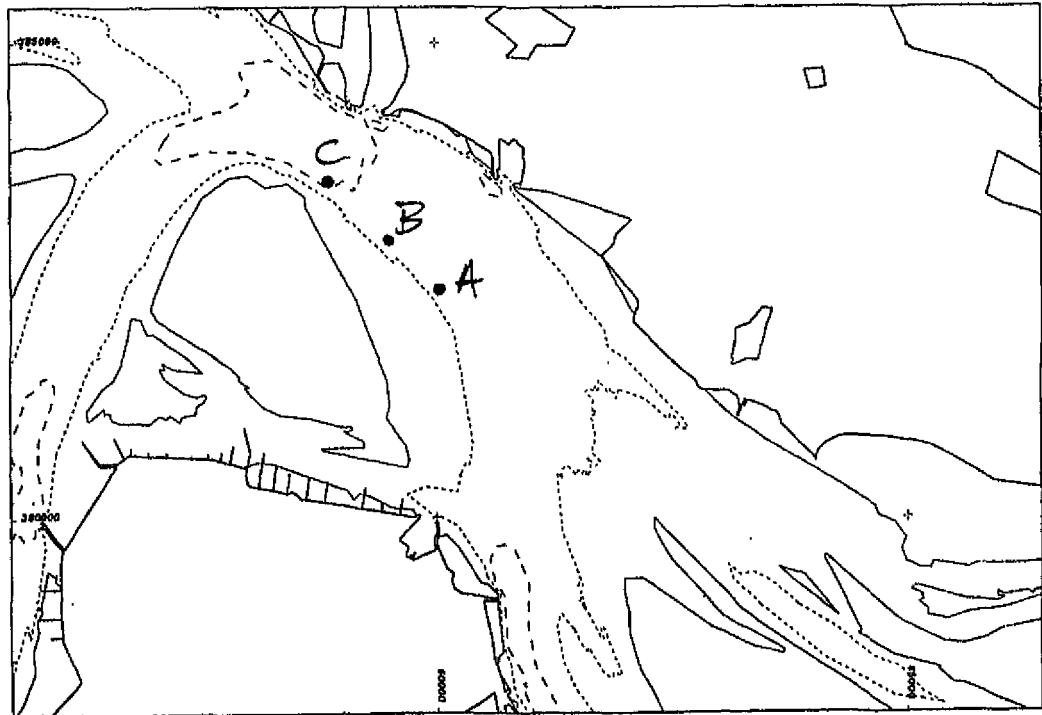
T ($\times 10^3$ g/m.s)



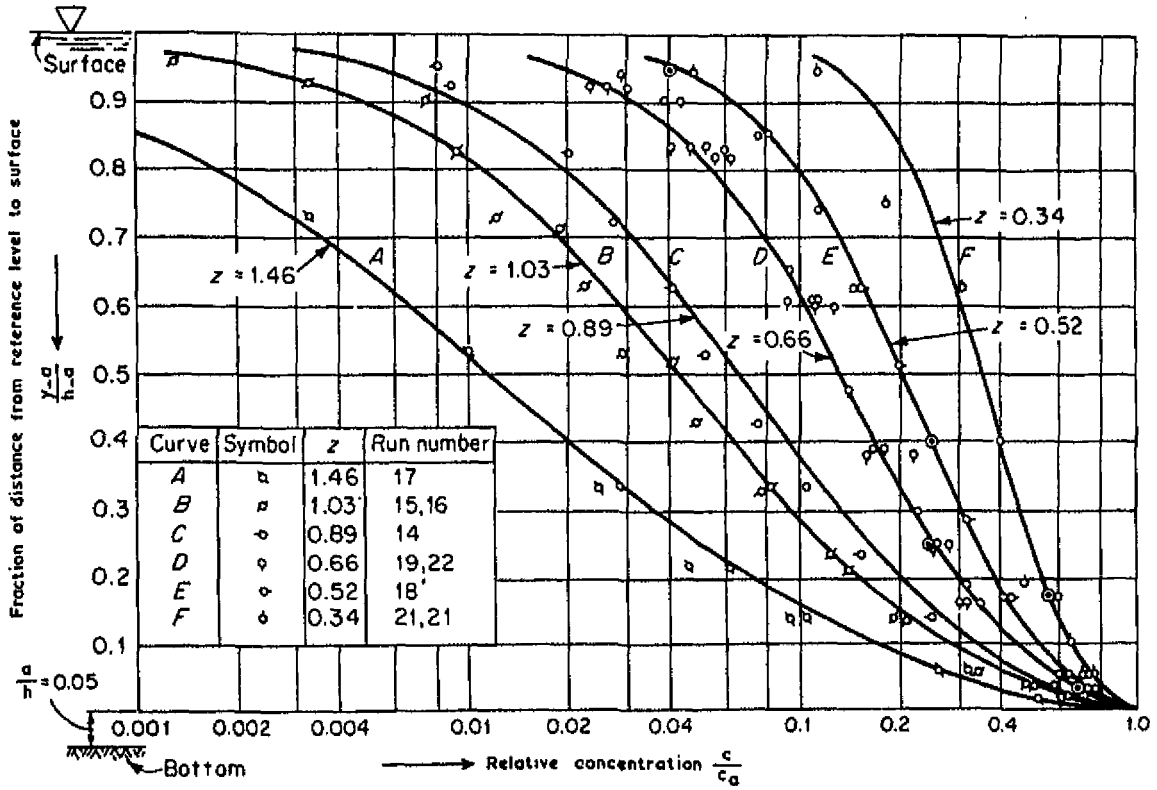
Figuur 3.32 Met de formule van Engelund-Hansen berekende zandtransporten door getij-asymmetrie in raai C op 25 oktober 1995



Figuur 3.33 Residueel zandtransport door onder- en oververzadigde getijstroom in de aanloop naar een te ruime drempel (uit: Storm, 1996)



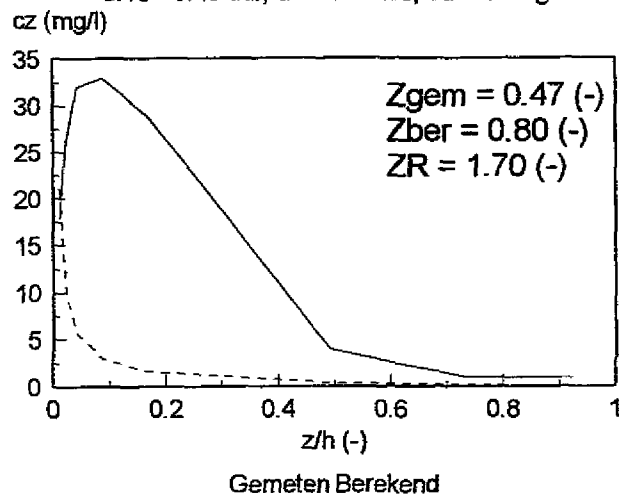
Figuur 3.34 Lokatie van de punten a, b en c op de noordelijke zijde van de Drempel van Hansweert



Figuur 3.35 Vorm van de concentratieverticaal bij verschillende suspensiegetallen Z (uit: Van Rijn, 1993)

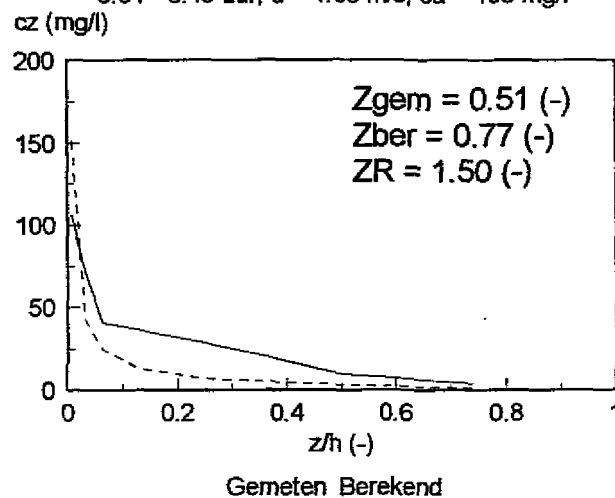
MP 60 Toenemende ebstroom

6.16 - 6.43 uur, $u = 0.94$ m/s; $ca = 18$ mg/l



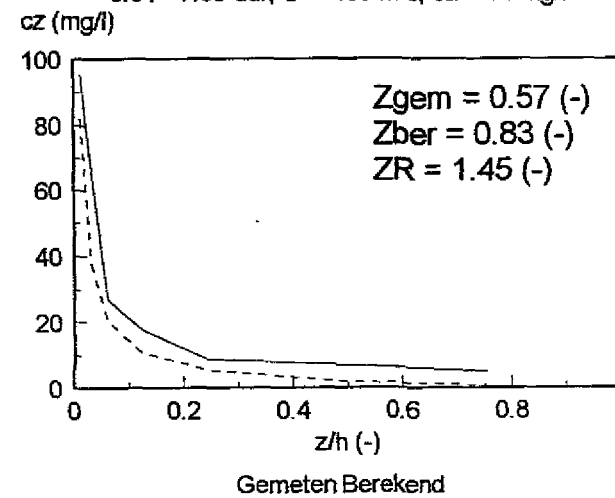
MP 62 Toenemende ebstroom

6.31 - 6.49 uur, $u = 1.03$ m/s; $ca = 106$ mg/l



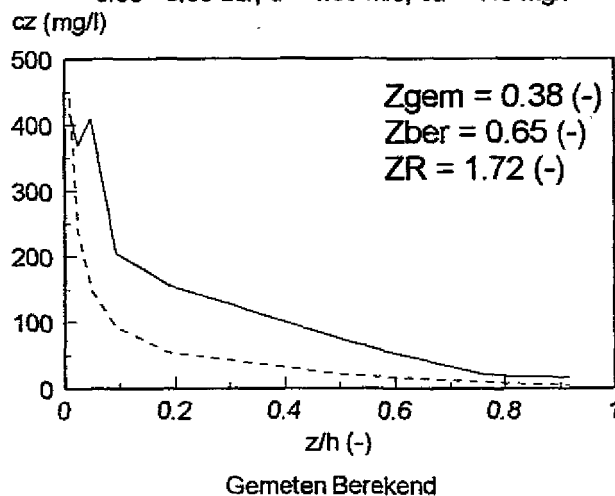
MP 65 Toenemende ebstroom

6.51 - 7.09 uur, $u = 0.86$ m/s; $ca = 51$ mg/l



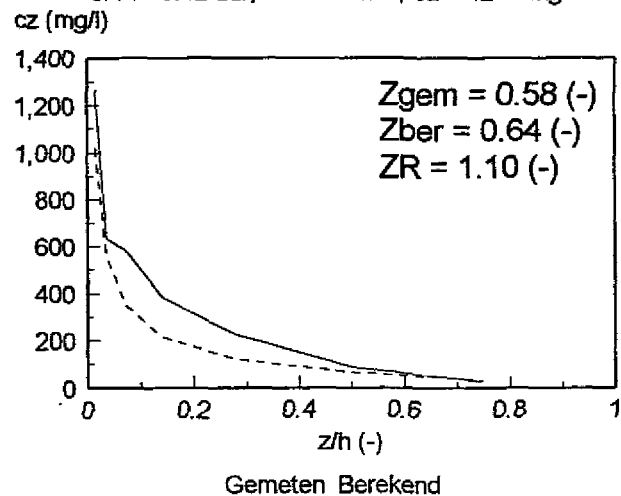
MP 60 Maximum ebstroom

8.35 - 8.55 uur, $u = 1.35$ m/s; $ca = 419$ mg/l



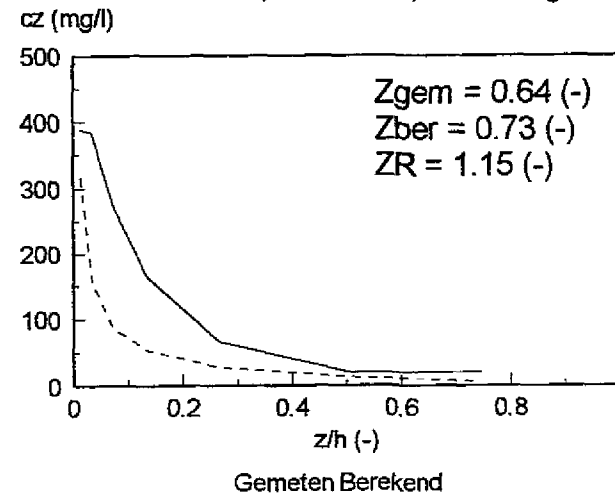
MP 62 Maximum ebstroom

8.14 - 8.42 uur, $u = 1.40$ m/s; $ca = 1266$ mg/l



MP 65 Maximum ebstroom

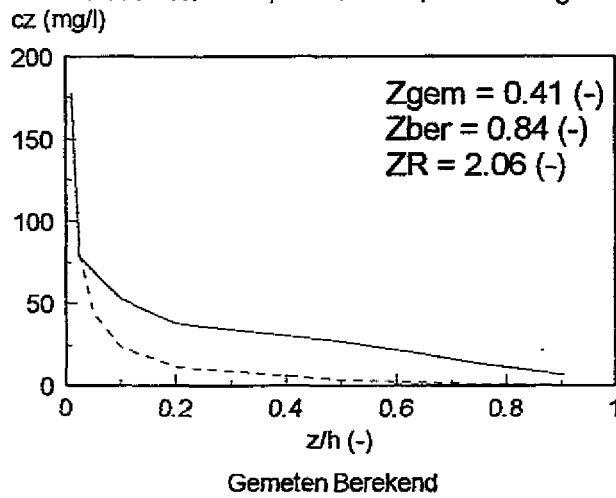
8.25 - 8.46 uur, $u = 1.12$ m/s; $ca = 390$ mg/l



Figuur 3.36.a Gemeten en met Rouse berekende concentratieverticalen tijdens toenemende en maximum ebstroom in 3 meetpunten in raai M; referentiehoogte $a = 0.01$ h

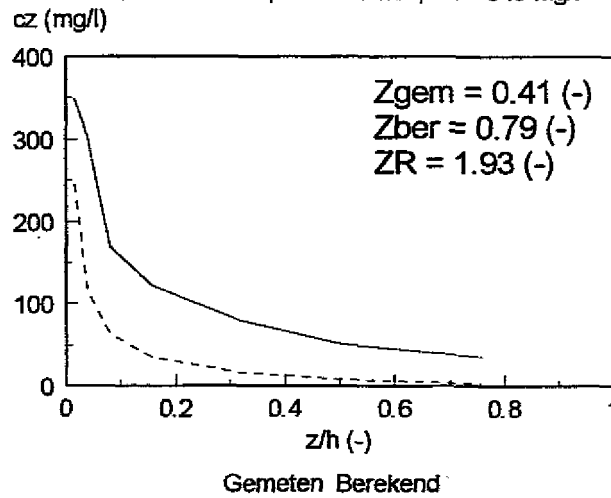
MP 60 Afnemende ebstroom

10.14 - 10.35 uur, $u = 0.81$ m/s; $ca = 178$ mg/l



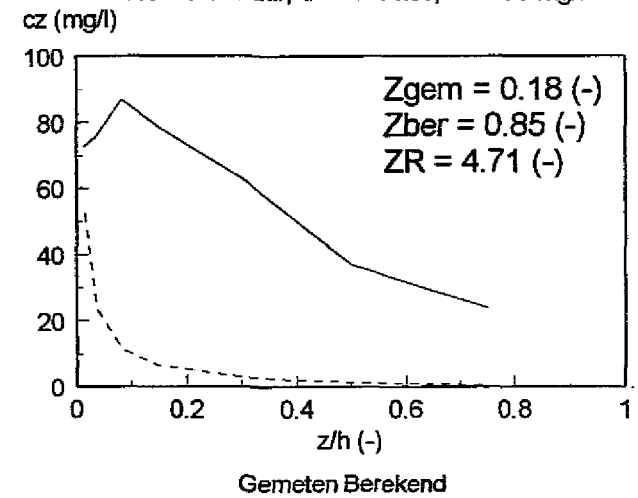
MP 62 Afnemende ebstroom

10.01 - 10.20 uur, $u = 0.97$ m/s; $ca = 349$ mg/l



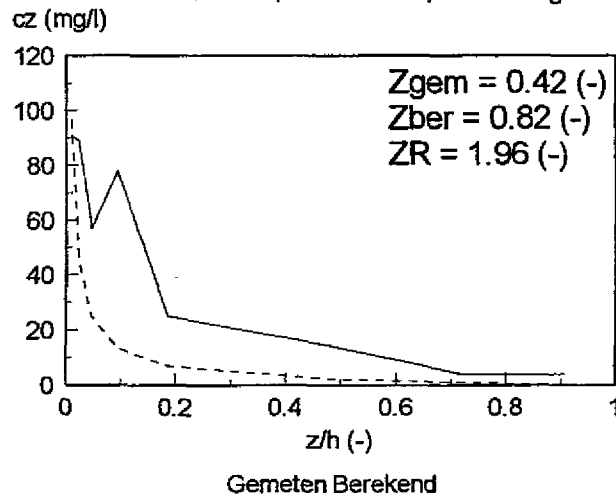
MP 65 Afnemende ebstroom

10.13 - 10.31 uur, $u = 0.80$ m/s; $ca = 73$ mg/l



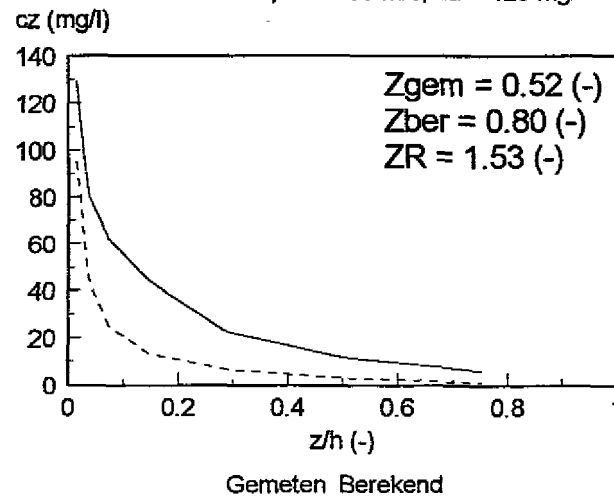
MP 60 Toenemende vloedstroom

14.34 - 14.51 uur, $u = 0.87$ m/s; $ca = 91$ mg/l



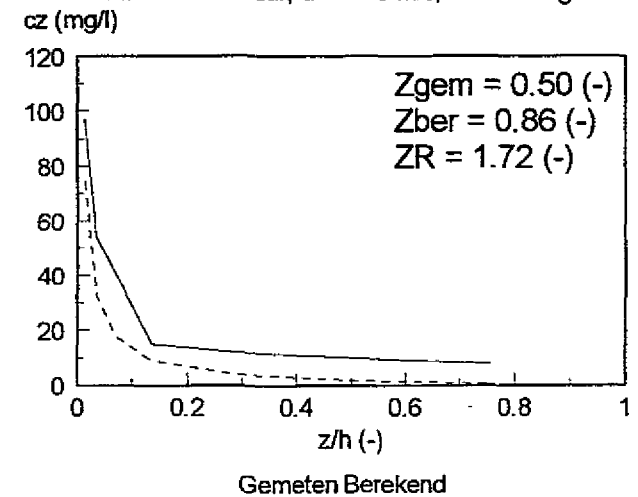
MP 62 Toenemende vloedstroom

14.25 - 14.49 uur, $u = 0.95$ m/s; $ca = 129$ mg/l



MP 65 Toenemende vloedstroom

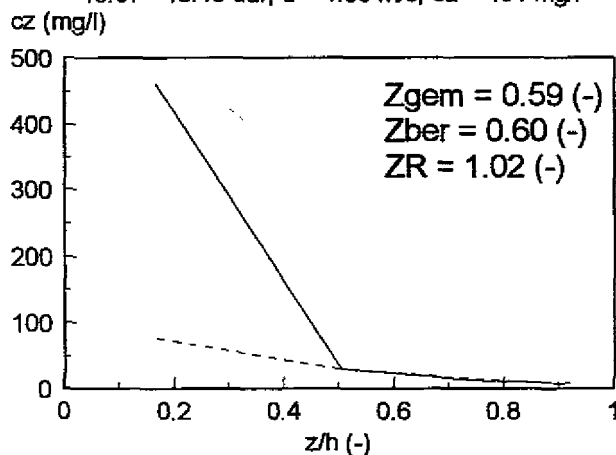
14.30 - 14.47 uur, $u = 0.75$ m/s; $ca = 97$ mg/l



Figuur 3.36.b Gemeten en met Rouse berekende concentratieverticalen tijdens afnemende ebstroom en toenemende vloedstroom in 3 meetpunten in raai M; referentiehoogte $a = 0.01$ h

MP 60 Maximum vloedstroom

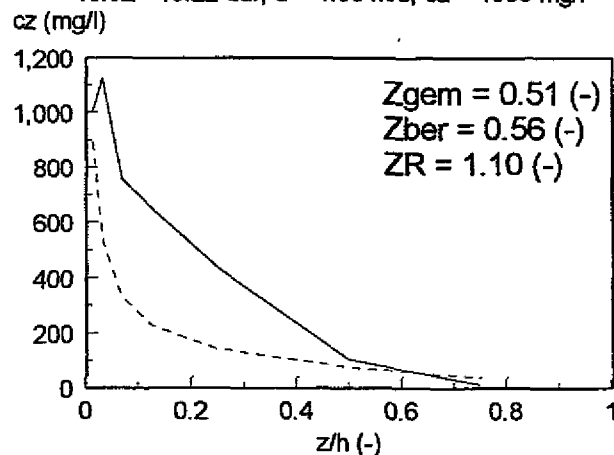
16.07 - 16.16 uur, $u = 1.53$ m/s; $ca = 461$ mg/l



Gemeten Berekend

MP 62 Maximum vloedstroom

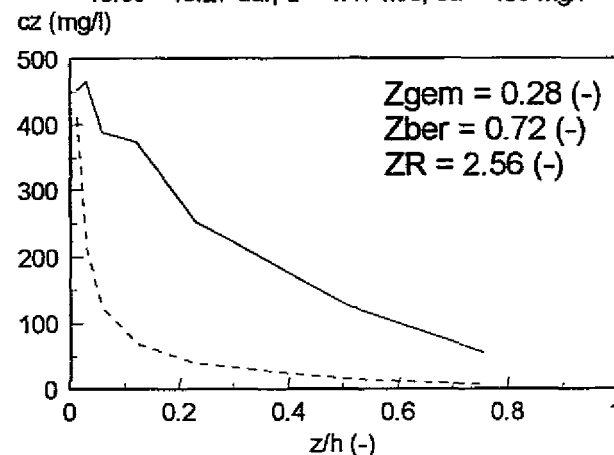
16.02 - 16.22 uur, $u = 1.66$ m/s; $ca = 1008$ mg/l



Gemeten Berekend

MP 65 Maximum vloedstroom

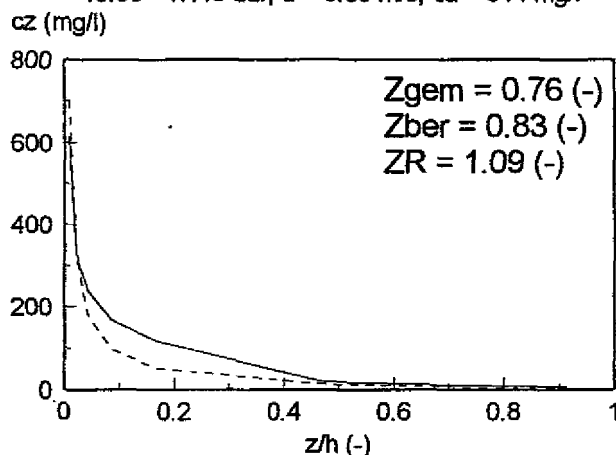
16.09 - 16.27 uur, $u = 1.17$ m/s; $ca = 453$ mg/l



Gemeten Berekend

MP 60 Afnemende vloedstroom

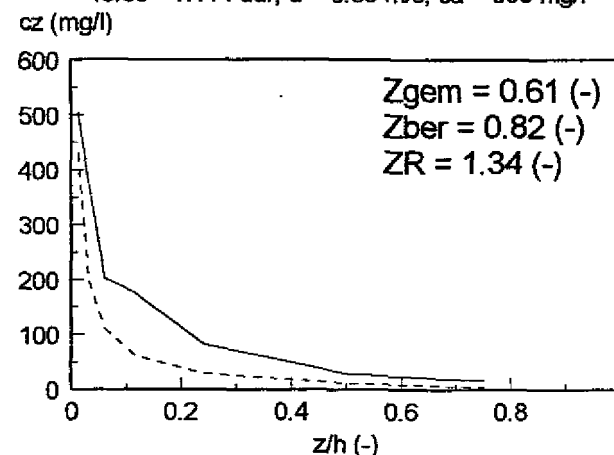
16.50 - 17.10 uur, $u = 0.86$ m/s; $ca = 614$ mg/l



Gemeten Berekend

MP 62 Afnemende vloedstroom

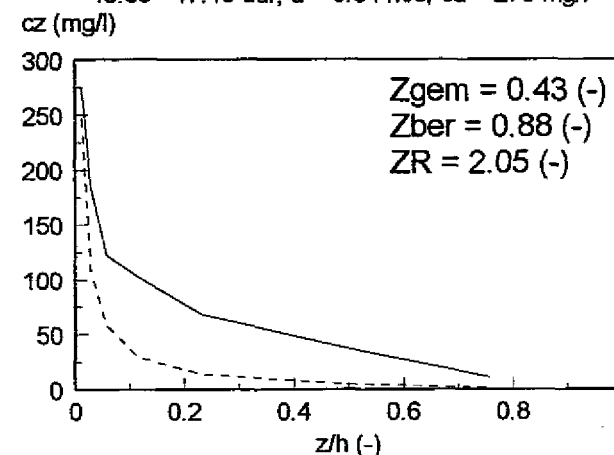
16.55 - 17.14 uur, $u = 0.89$ m/s; $ca = 503$ mg/l



Gemeten Berekend

MP 65 Afnemende vloedstroom

16.55 - 17.13 uur, $u = 0.64$ m/s; $ca = 275$ mg/l

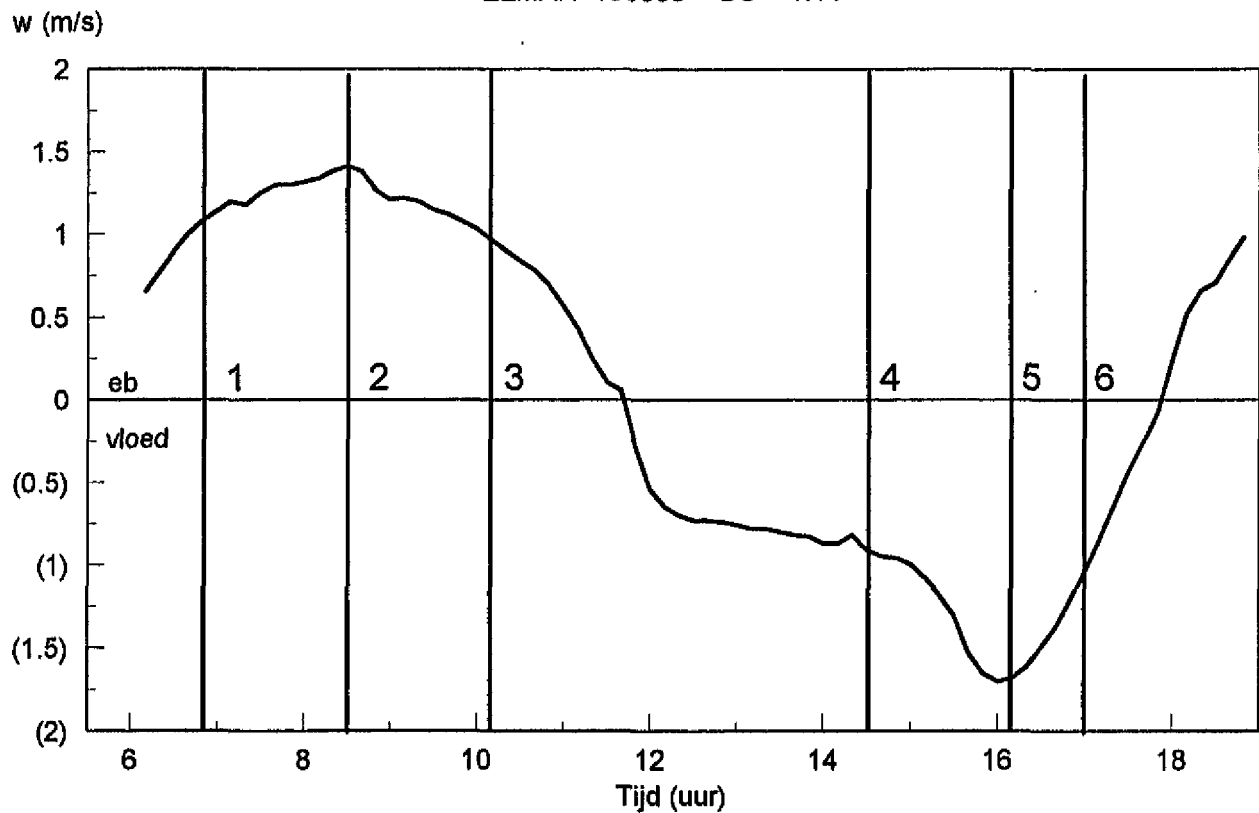


Gemeten Berekend

Figuur 3.36.c Gemeten en met Rouse berekende concentratieverticalen tijdens maximum en afnemende vloedstroom in 3 meetpunten in raai M; referentiehoogte $a = 0.01$ h

Raai M Diepte gemiddelde stroomsnelheid (w)

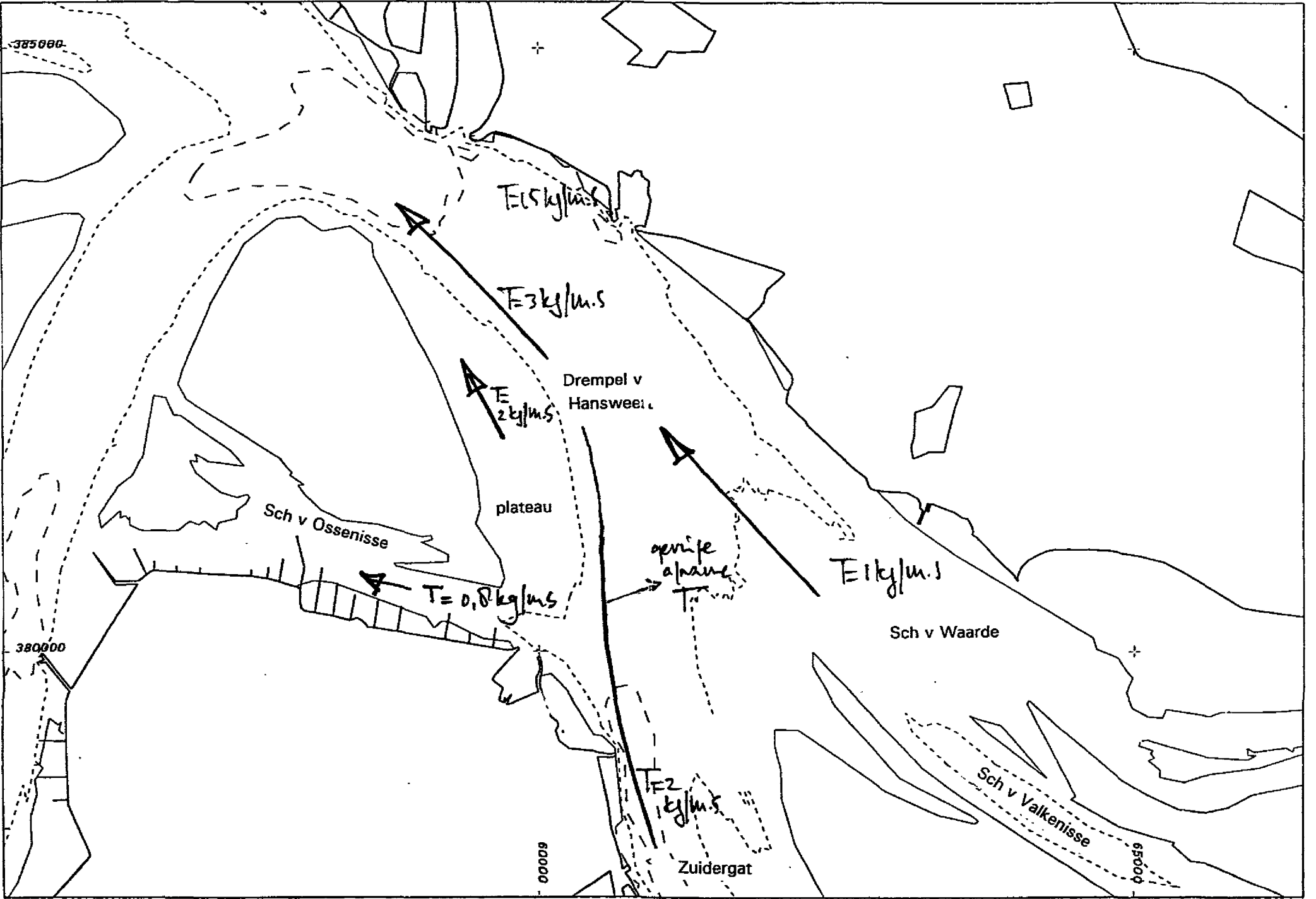
ELMAR 160996 GC = 1.11



1 = toenemende eb
2 = maximum eb
3 = afnemende eb

4 = toenemende vloed
5 = maximum vloed
6 = afnemende vloed

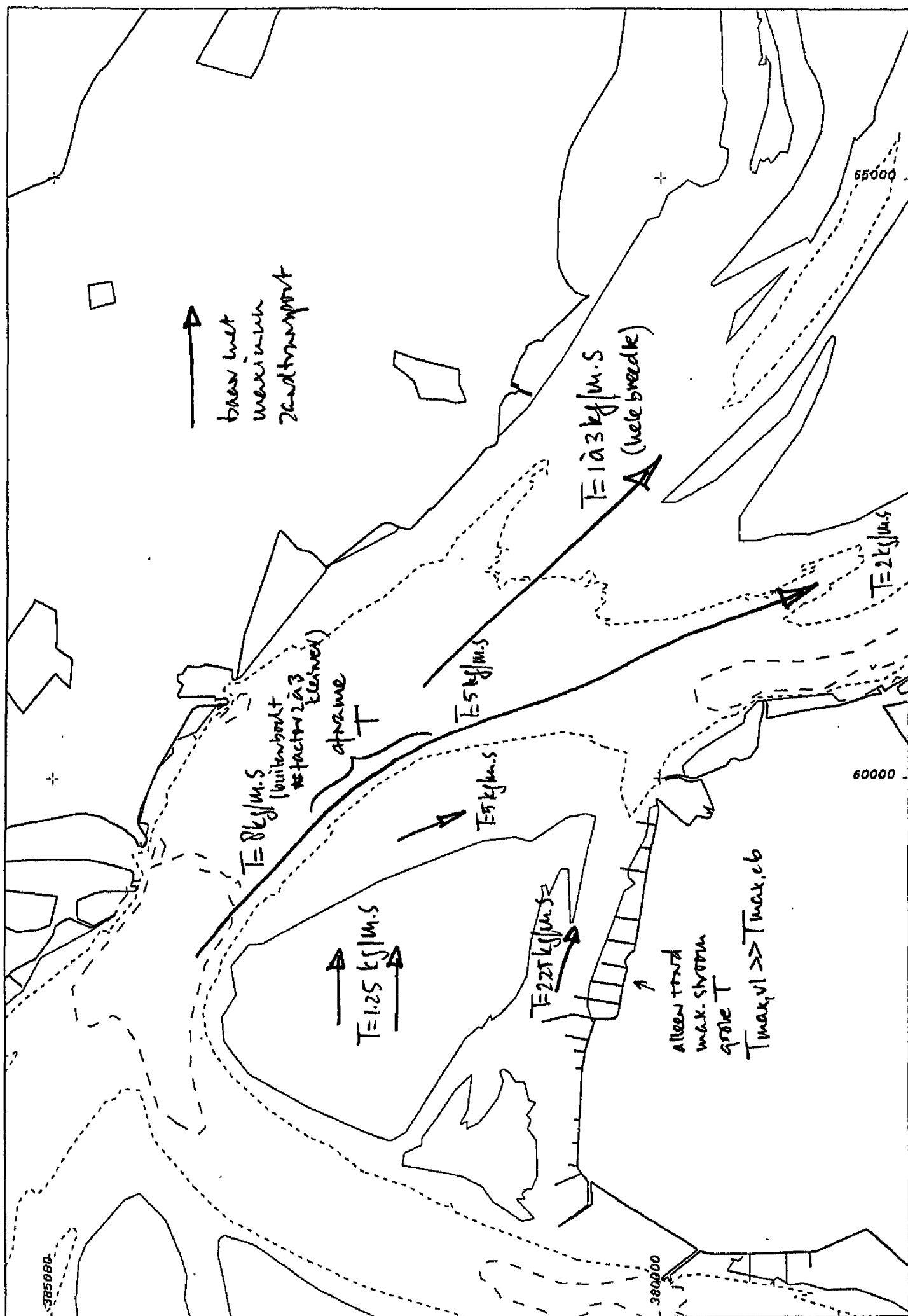
Figuur 3.37 Tijdstippen gedurende de metingen in raai M waarvan concentratieverticalen zijn gebruikt in de analyse



Figuur 4.1

Kenmerkende elementen van het zandtransport op en rondom de Drempel van Hansweert tijdens eb

Hansweert tijdens eb



Figuur 4.2 Kenmerkende elementen van het zandtransport op en rondom de Drempeel van Hansweert tijdens vloed

Bijlagen

Bijlage A

Uitgebreid overzicht zandtransportmetingen op en rondom de Drempel van Hansweert en de bijbehorende getij- en weersomstandigheden

A.1 Overzicht dwarsmetingen van het zandtransport

A.2 Overzicht langsmetingen van het zandtransport

Bijlage A.1

Raai	Datum	Instrument	GC (-)	Duur (uur)	Weer	Opmerkingen	Watertemperatuur (grd C)	Kt (-)	Rapport
B'D ₂	170496	AZTM	eb 1.159 vloed 1.217 eb 1.152	13	aanvankelijk ZO, 4 Bft; later W, 4 Bft	meetpunt 21 storing van 9.40 tot 12.20 u	8.3	0.950	Meetdienst Zeeland, 1996c
C	251095	AZTM	eb 1.110 vloed 1.135 eb 1.175	13	overdag ZW, 6 Bft; s'avond Z, 3 Bft	-	13.9	1.046	Meetdienst Zeeland, 1996b
5A	140695	AZTM	eb 1.186 vloed 1.186 eb 1.195	13	aanvankelijk NNW, 4 Bft; gelcidelijk W, 4 Bft	meetpunt 51, 52 en 53	15.1	1.042	Meetdienst Zeeland, 1995a
	150695	AZTM	eb 1.182 vloed 1.146 eb 1.204	13	W, 4 Bft	meetpunt 54, 55 en 56	14.6	1.037	Meetdienst Zeeland, 1995a

Tabel 1 (deel 1) Overzicht dwarsmetingen van het zandtransport

GC = getijcoëfficiënt afgeleid uit waterstanden van het waterstandsstation Hansweert

Bijlage A.2

Raai	Datum	Instrument	GC (-)	Duur (uur)	Weer	Opmerkingen	Watertemp (grd C)	Kt (-)	Rapport
F	231095	AZTM	vloed 1.022 eb 1.110	7	aanvankelijk Z, later ZZO, 4 Bft	-	15.2	1.046	Meetdienst Zeeland, 1995b
G	231095	AZTM	vloed 1.022 eb 1.110	7	idem	mp 23 gemeten op 101095, GC= 1.094, storing 14.20 tot 16.20 u mp 24 storingen 13-14 u	idem; mp 23: 16.5	idem; mp 23: 1.062	idem
H	231095	AZTM	vloed 1.022 eb 1.110	7	idem	mp 17 gemeten op 091095, GC = 1.209, AZTM werkte geheel niet	idem	idem	idem
J	231095	AZTM	vloed 1.022 eb 1.110	7	idem	-	idem	idem	idem
M	160996	AZTM	eb 1.101 vloed 1.087 eb 1.144	13	aanvankelijk O, 2 Bft; later ONO, 3 Bft	-	16.7	1.072	Meetdienst Zeeland, 1996e

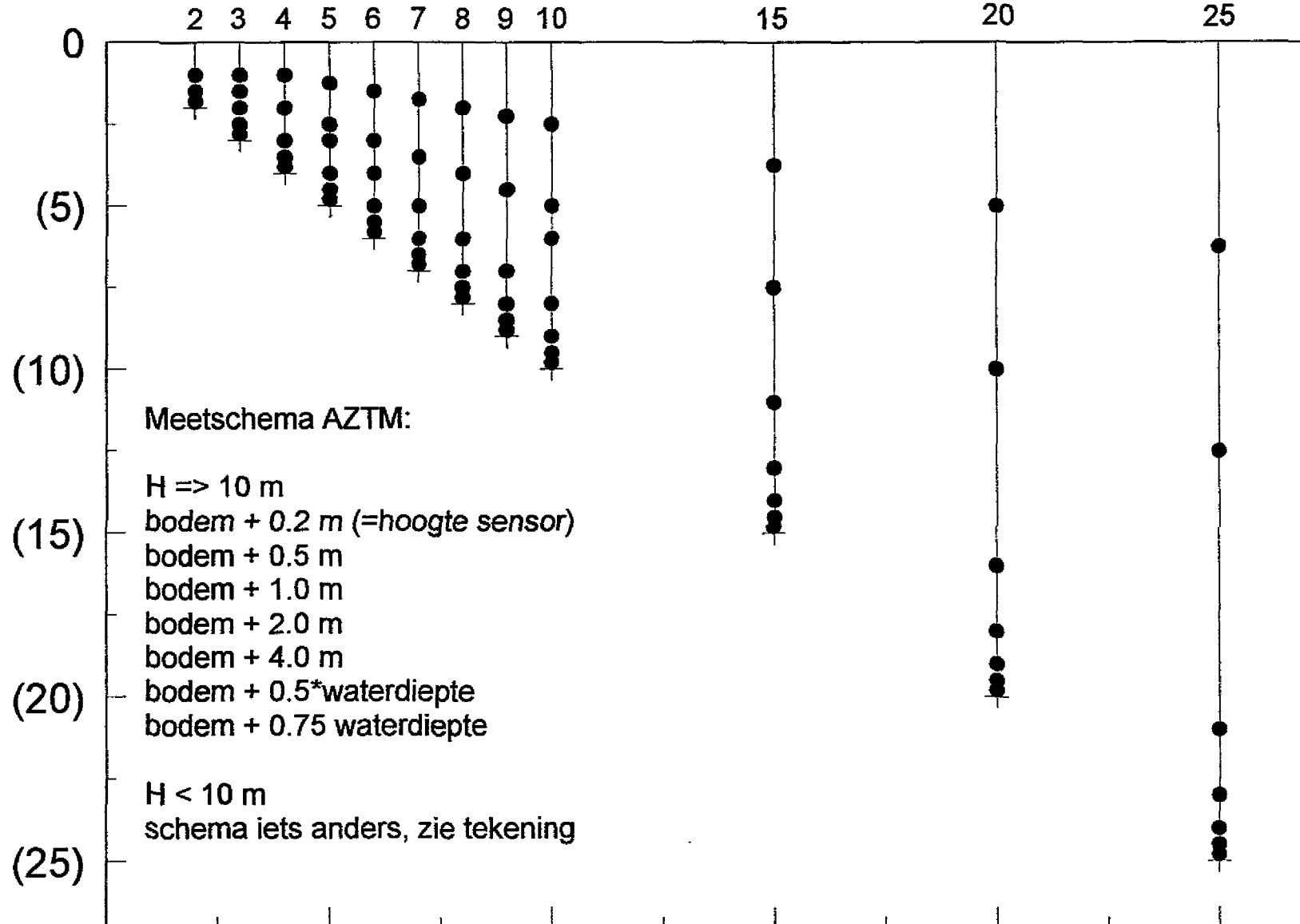
Tabel 2 Overzicht langsmetingen van het zandtransport

Bijlage B

Diepte schema AZTM zandtransportmetingen

Meetschema AZTM

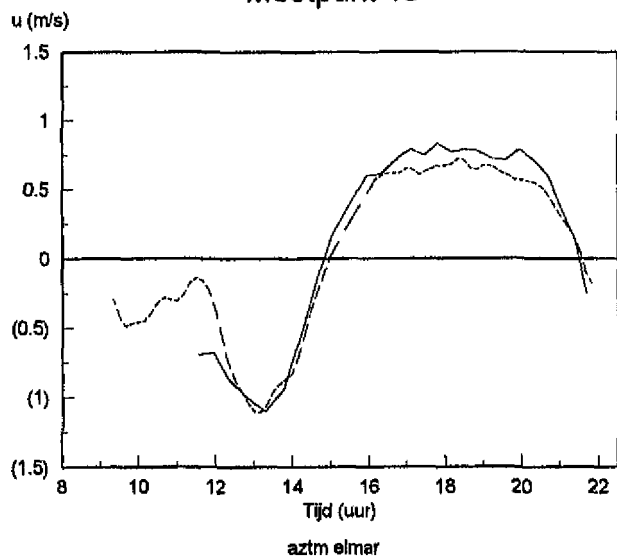
Diepte tov NAP (m)



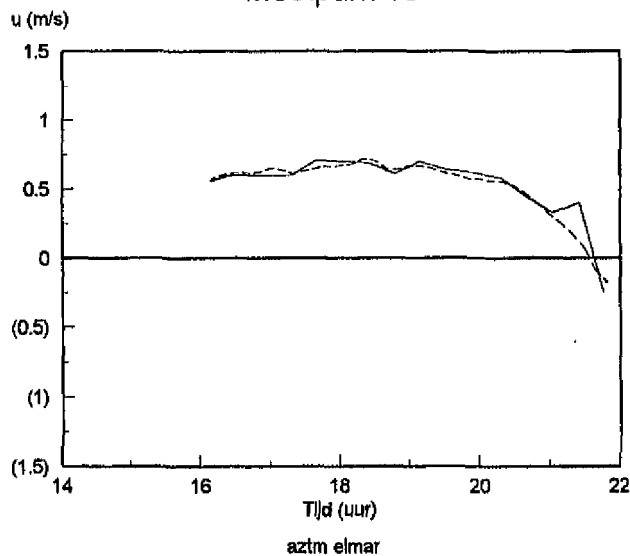
Bijlage C

Vergelijking van de diepte gemiddelde stroomsnelheden en -richtingen van AZTM- en ELMAR-metingen

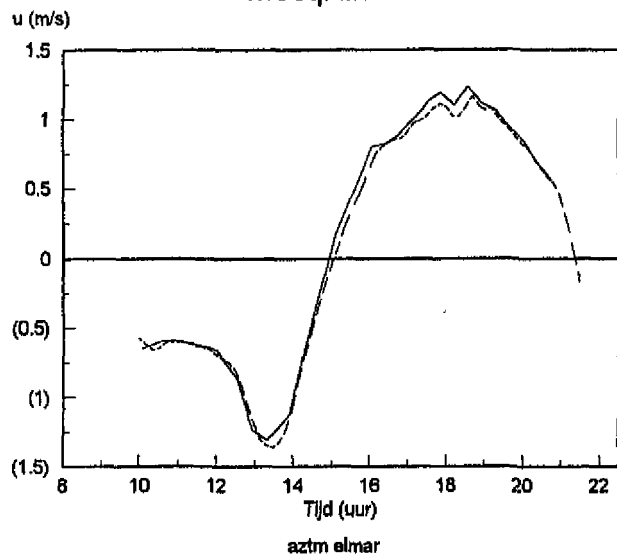
Meetpunt 15



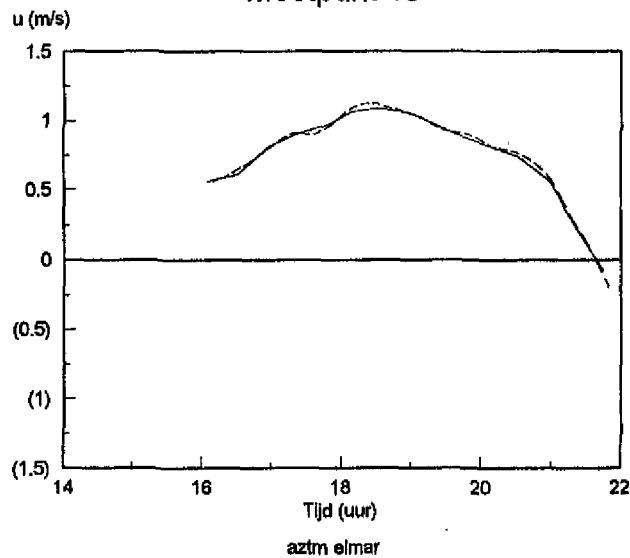
Meetpunt 16



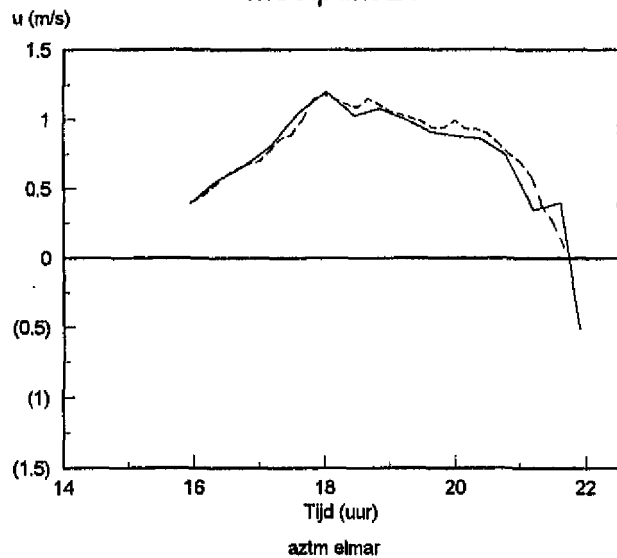
Meetpunt 18



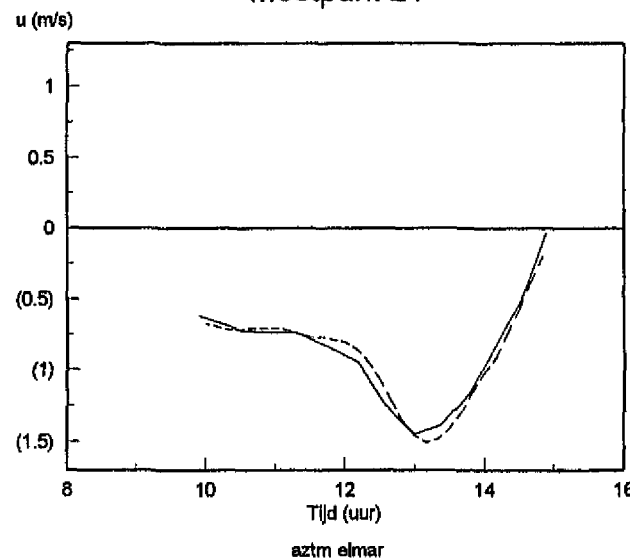
Meetpunt 19



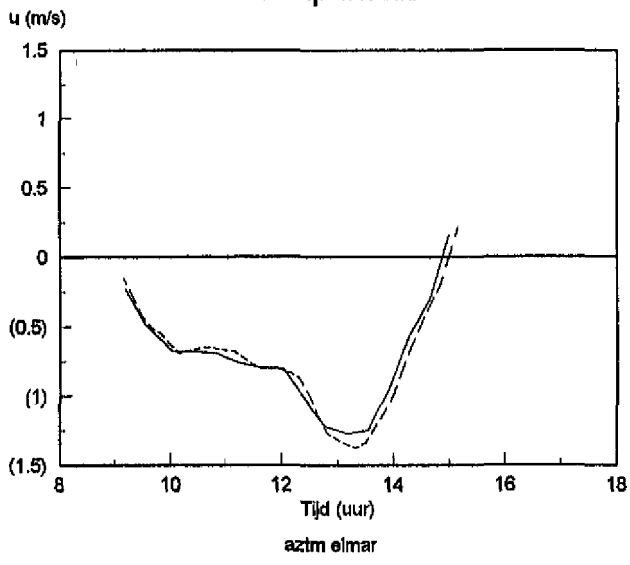
Meetpunt 20



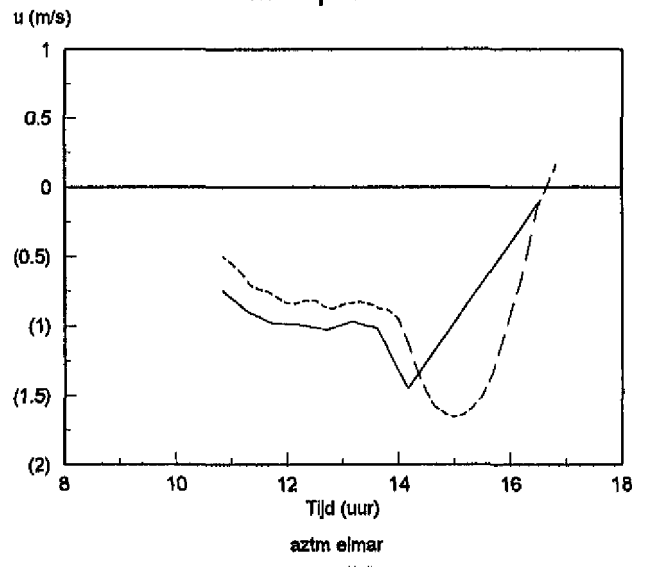
Meetpunt 21



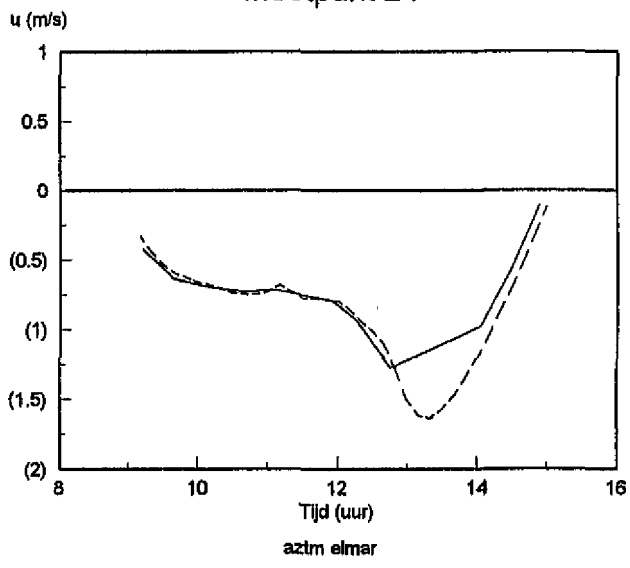
Meetpunt 22



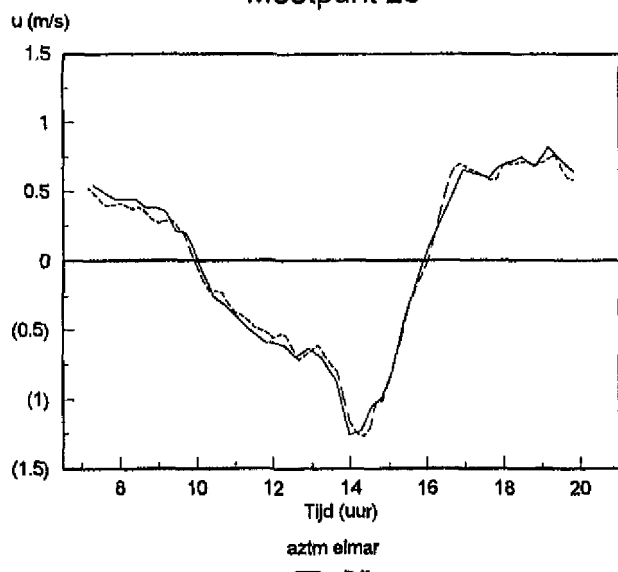
Meetpunt 23



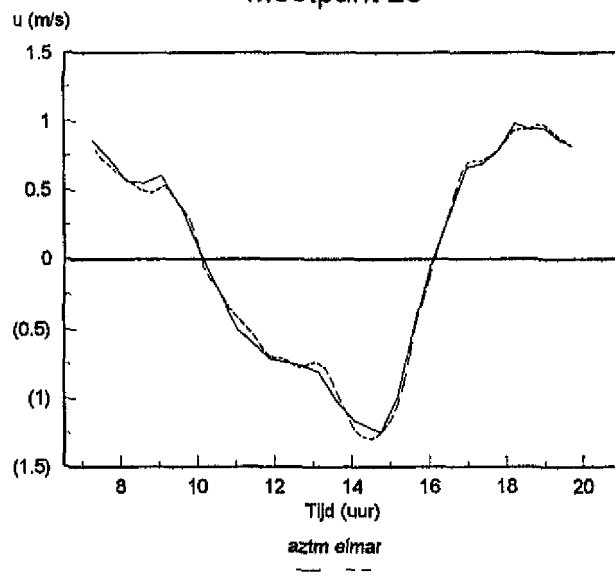
Meetpunt 24



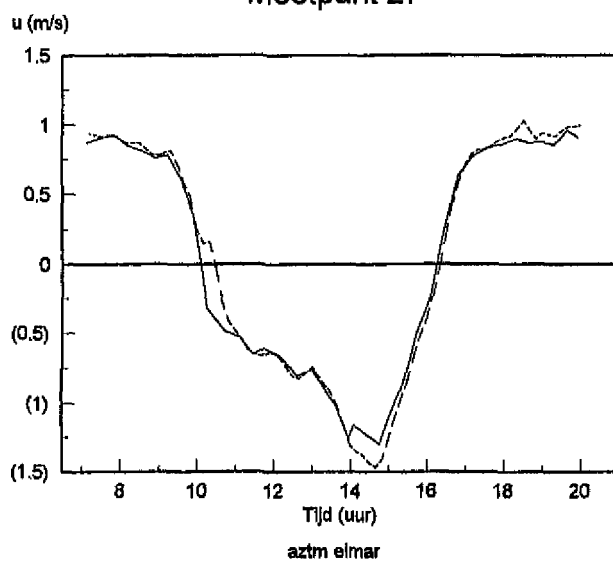
Meetpunt 25



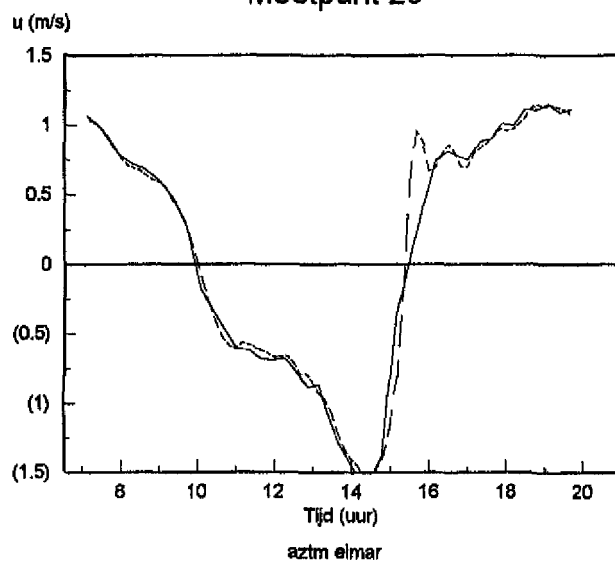
Meetpunt 26



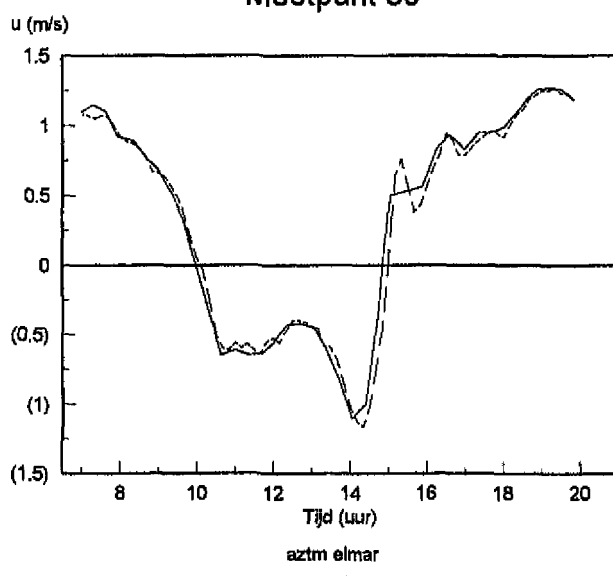
Meetpunt 27



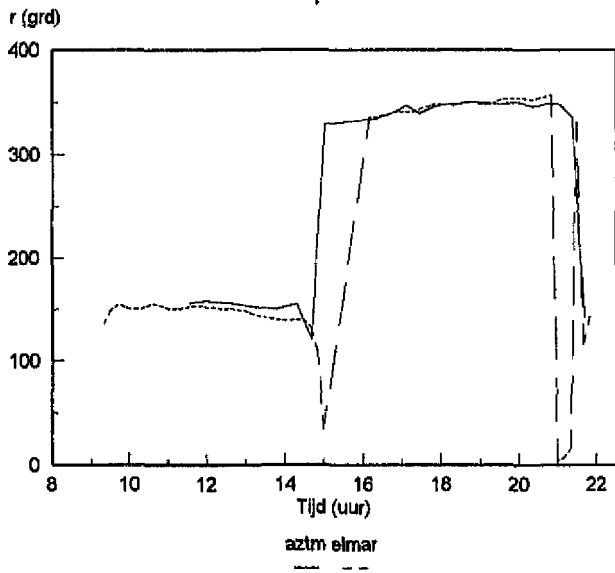
Meetpunt 29



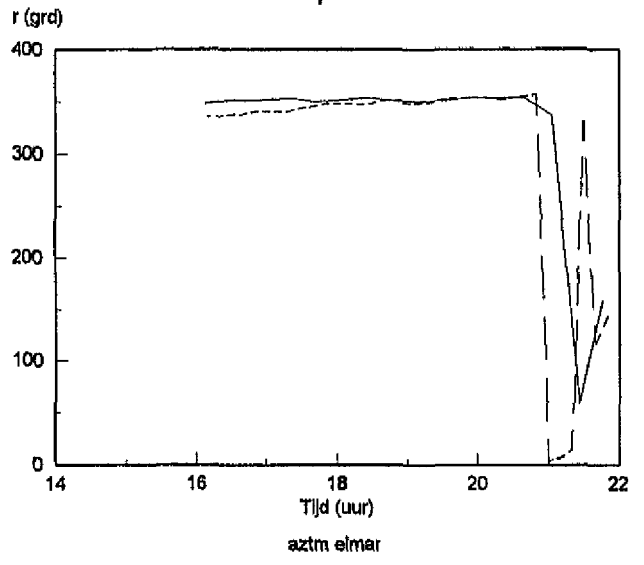
Meetpunt 30



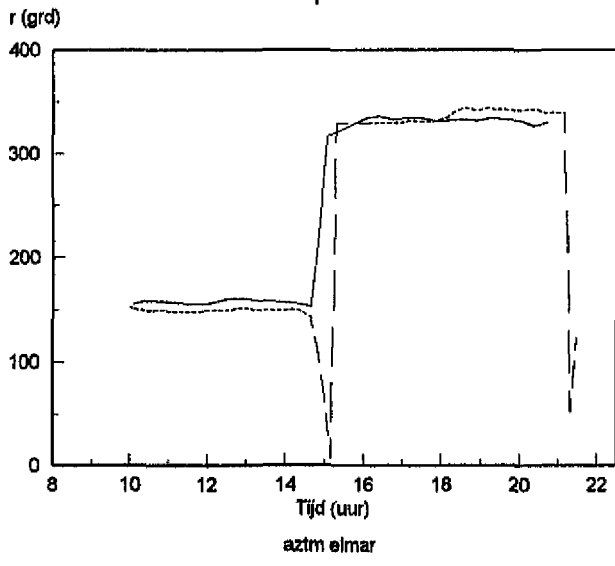
Meetpunt 15



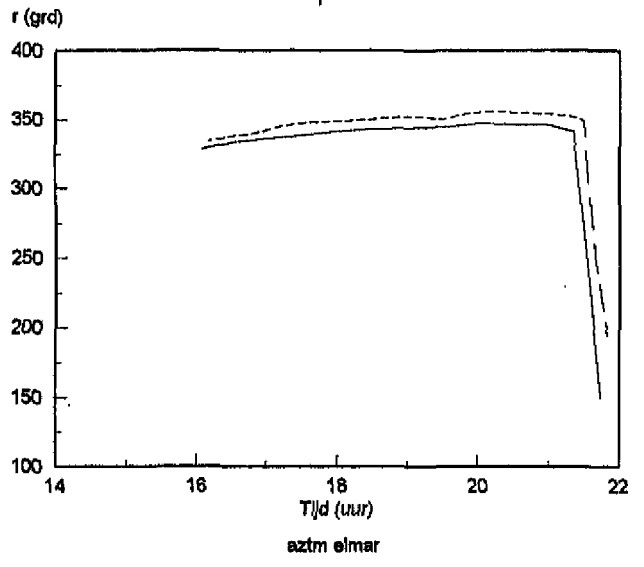
Meetpunt 16



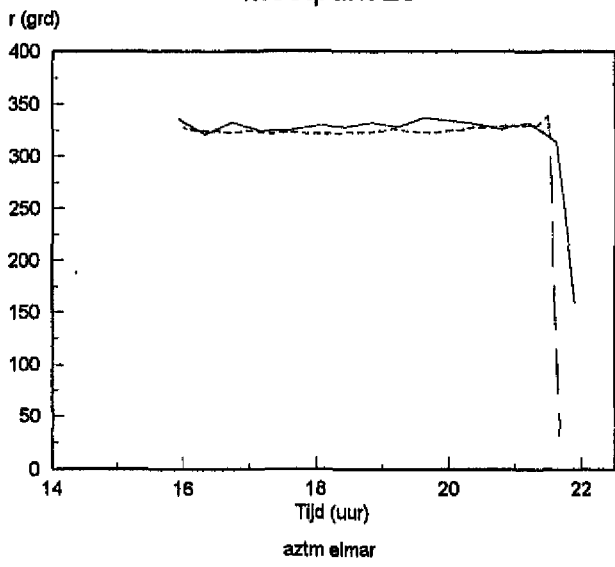
Meetpunt 18



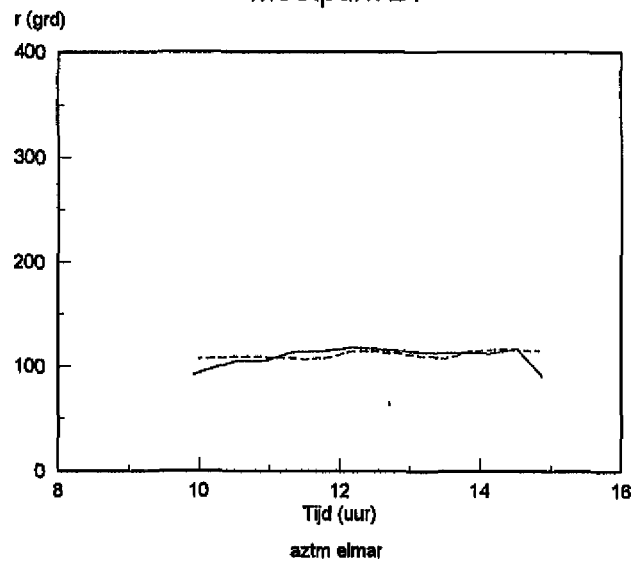
Meetpunt 19



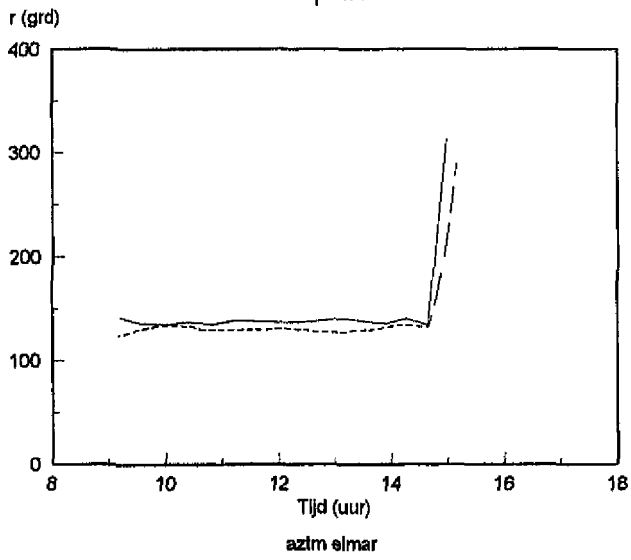
Meetpunt 20



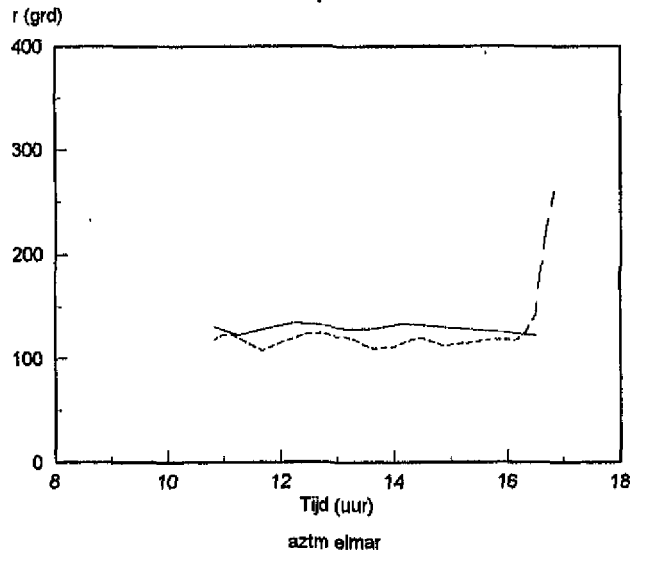
Meetpunt 21



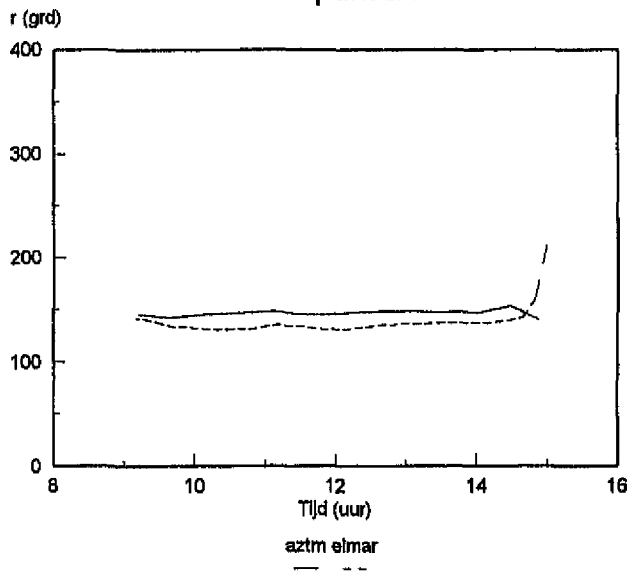
Meetpunt 22



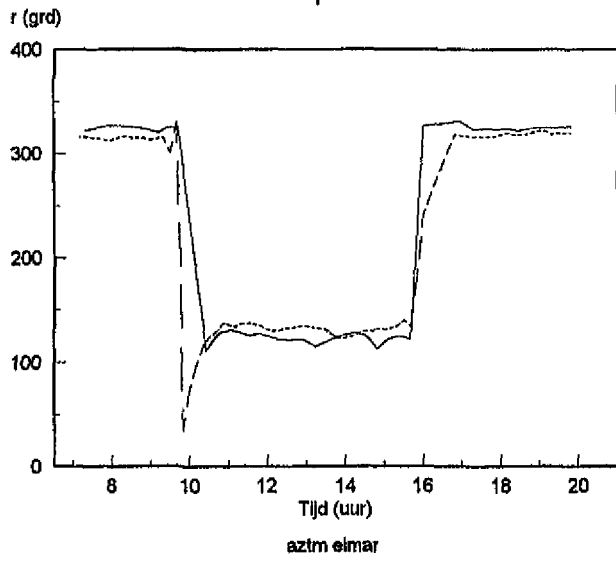
Meetpunt 23



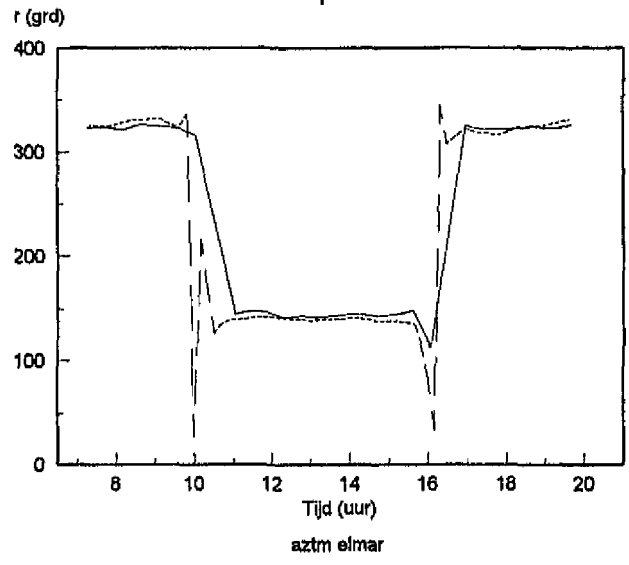
Meetpunt 24



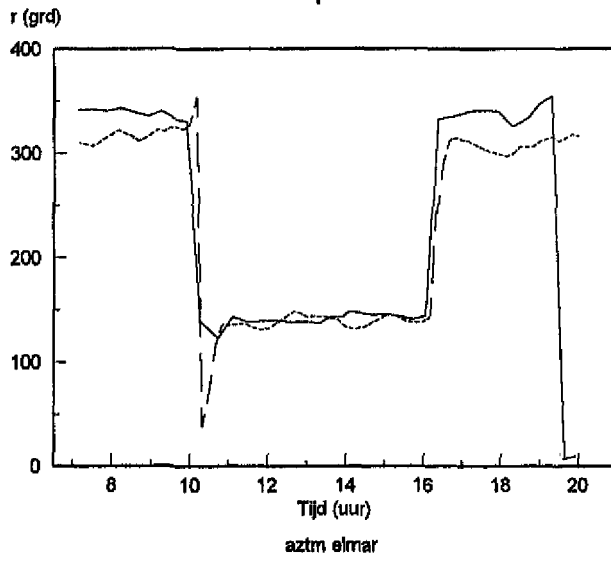
Meetpunt 25



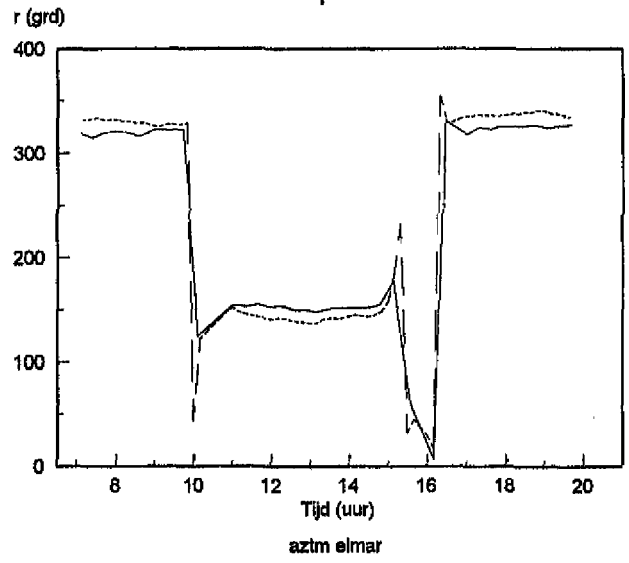
Meetpunt 26



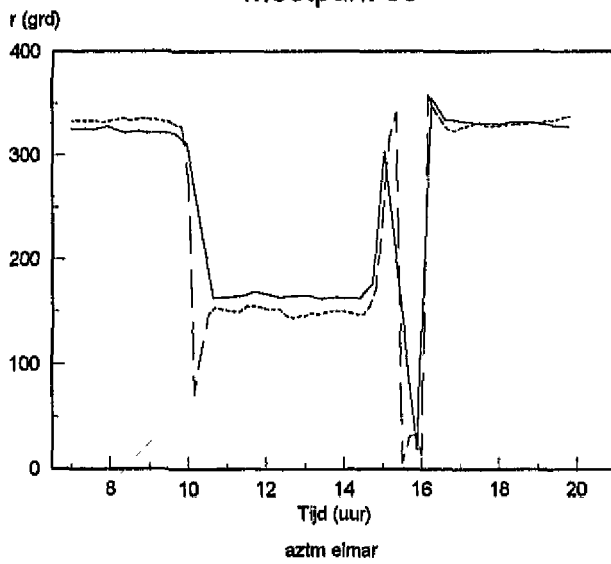
Meetpunt 27



Meetpunt 29



Meetpunt 30

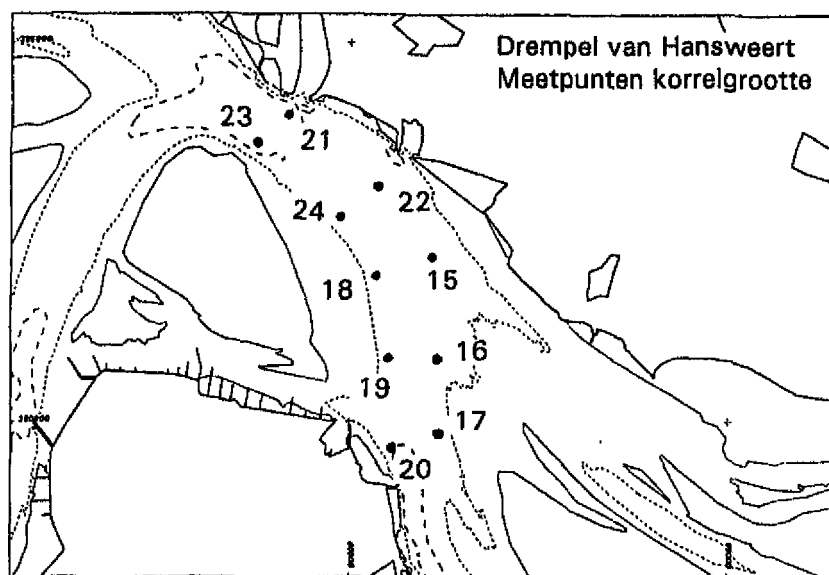


Bijlage D

D_{50} van de korrelgrootte in de meetpunten van de raaien F, G, H en J

Meetpunt	D_{50} (μm)	D_{90} (μm)
15	245	347
16	216	364
17	209	321
18	180	269
19	180	275
20	205	322
21	293	447
22	293	426
23	285	430
24	301	419

Tabel. D_{50} en D_{90} van de korrelgrootte van het bodemmateriaal in de meetpunten in de raaien F, G, H, en J op de Drempel van Hansweert (bron: Meetdienst Zeeland, 1995b)



Bijlage E

Hoogte van de bodemvormen 100 m stroomop- en afwaarts van de AZTM-meetpunten

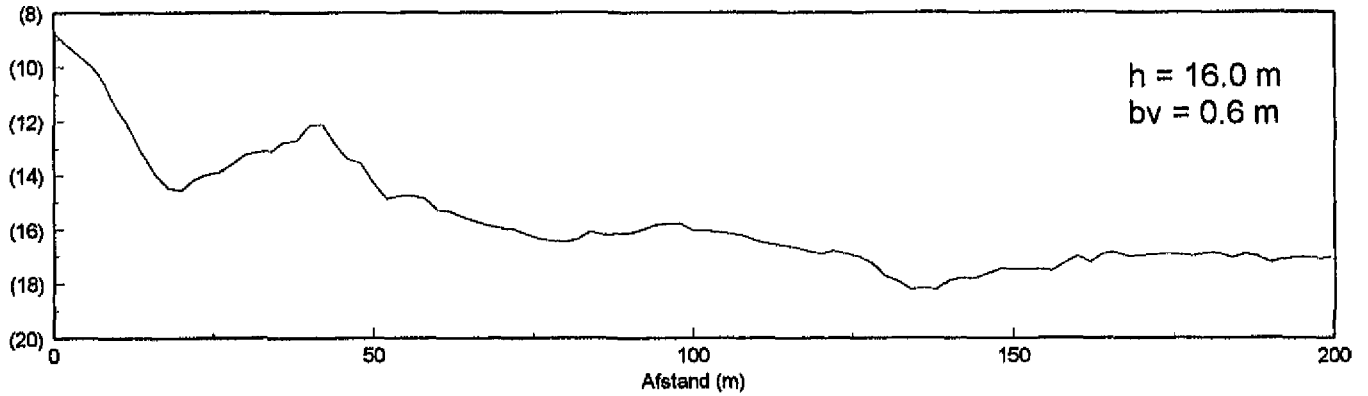
h = waterdiepte tov NAP (m)

bv = hoogte bodemvorm (m)

Raai B' MP 35 Bodemvormen langprofiel in meetpunt (op 100 m)

12-19 okt. 1995 Multi-beam pixelgrootte = 2 x 2 m

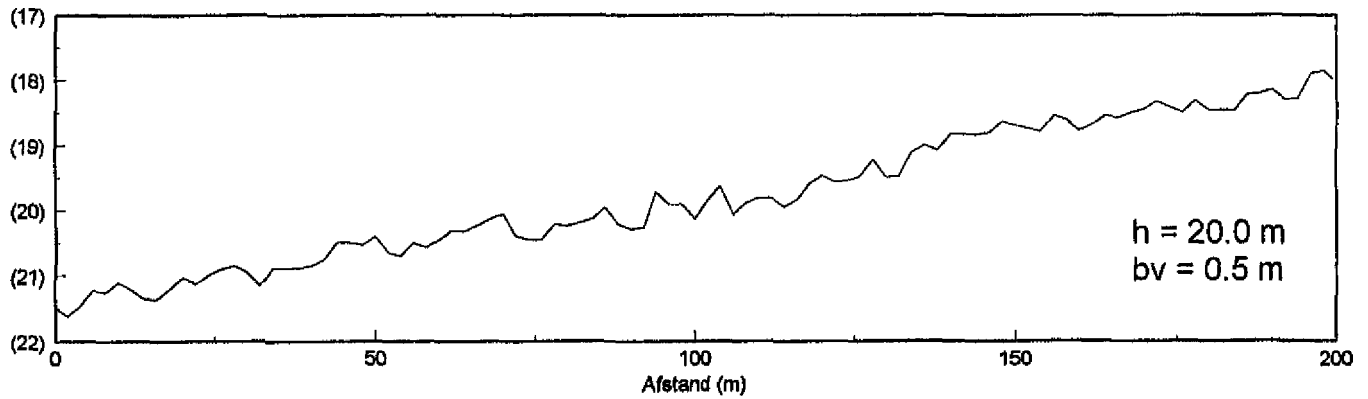
Diepte tov NAP (m)



Raai B' MP 21 Bodemvormen langprofiel in meetpunt (op 100 m)

12-19 okt. 1995 Multi-beam pixelgrootte = 2 x 2 m

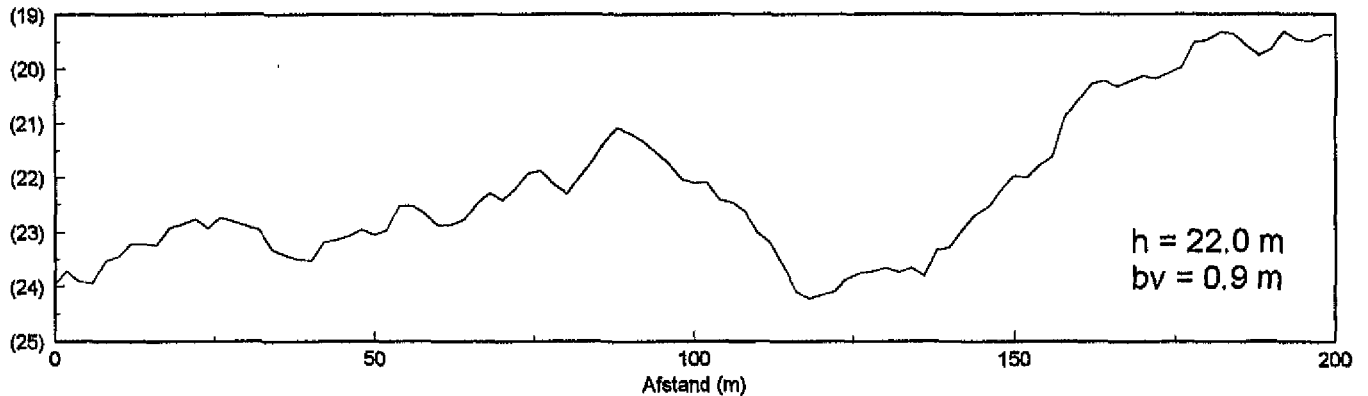
Diepte tov NAP (m)



Raai B' MP 23 Bodemvormen langprofiel in meetpunt (op 100 m)

12-19 okt. 1995 Multi-beam pixelgrootte = 2 x 2 m

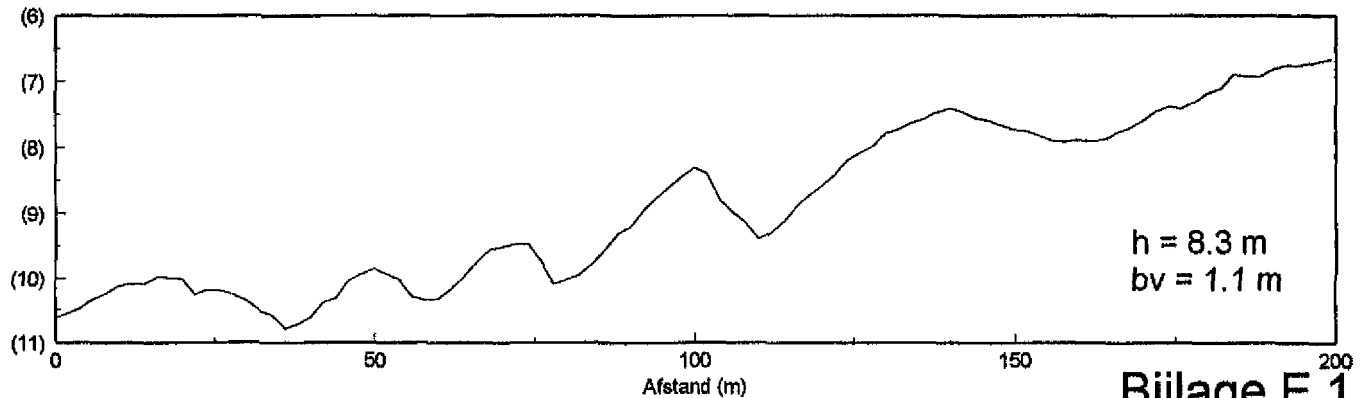
Diepte tov NAP (m)



Raai B' MP 36 Bodemvormen langprofiel in meetpunt (op 100 m)

12-19 okt. 1995 Multi-beam pixelgrootte = 2 x 2 m

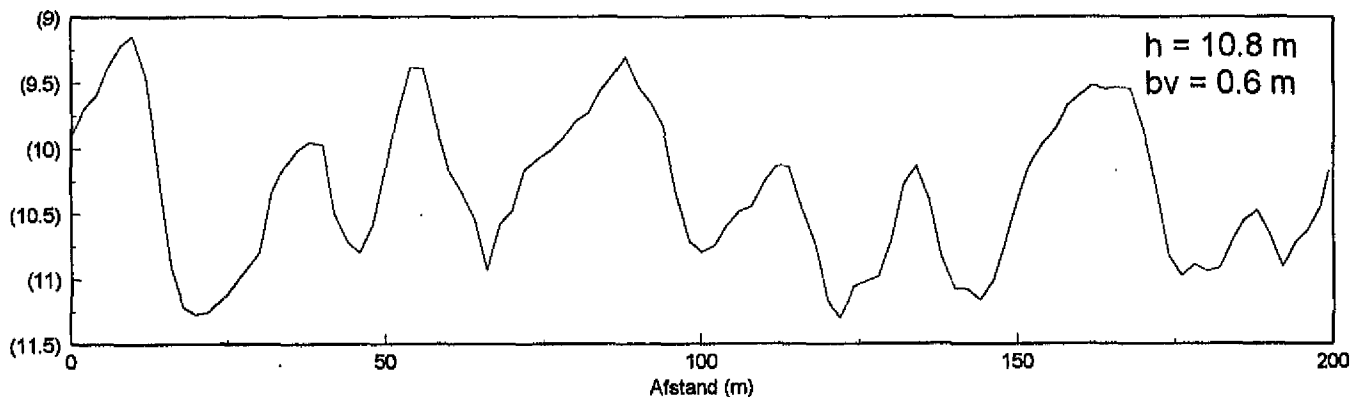
Diepte tov NAP (m)



Raai C MP 25 Bodemvormen langsprofiel in meetpunt (op 100 m)

12-19 okt. 1995 Multi-beam pixelgrootte = 2 x 2 m

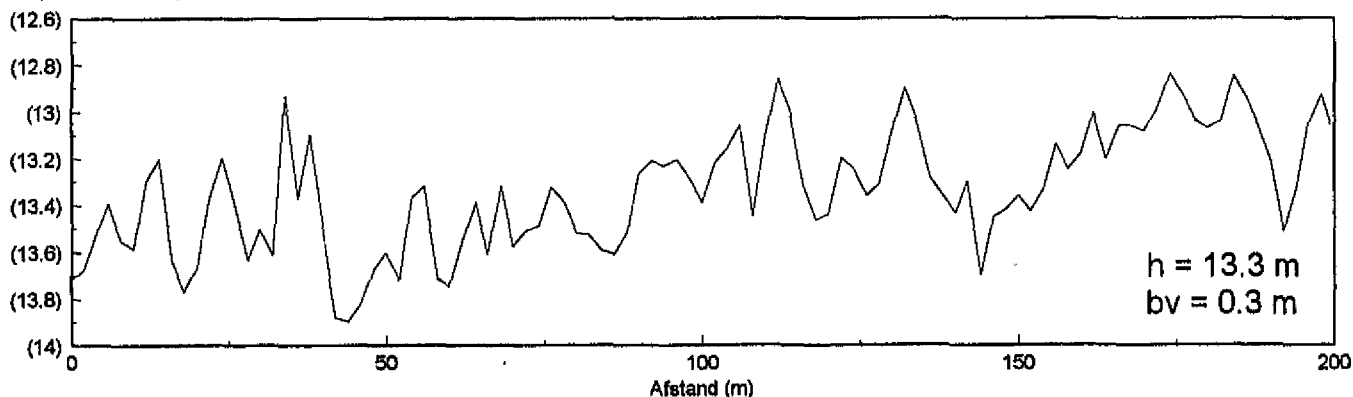
Diepte tov NAP (m)



Raai C MP 26 Bodemvormen langsprofiel in meetpunt (op 100 m)

12-19 okt. 1995 Multi-beam pixelgrootte = 2 x 2 m

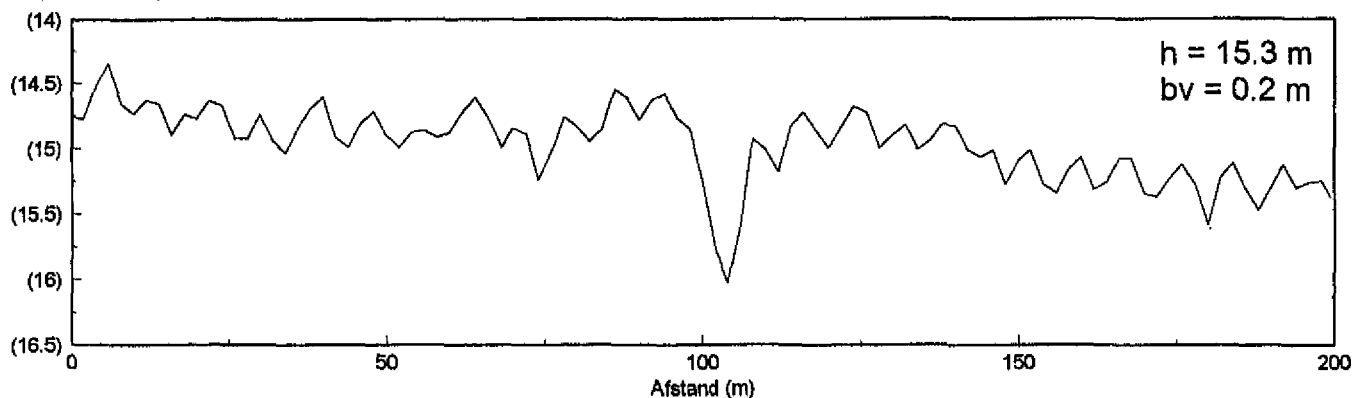
Diepte tov NAP (m)



Raai C MP 27 Bodemvormen langsprofiel in meetpunt (op 100 m)

12-19 okt. 1995 Multi-beam pixelgrootte = 2 x 2 m

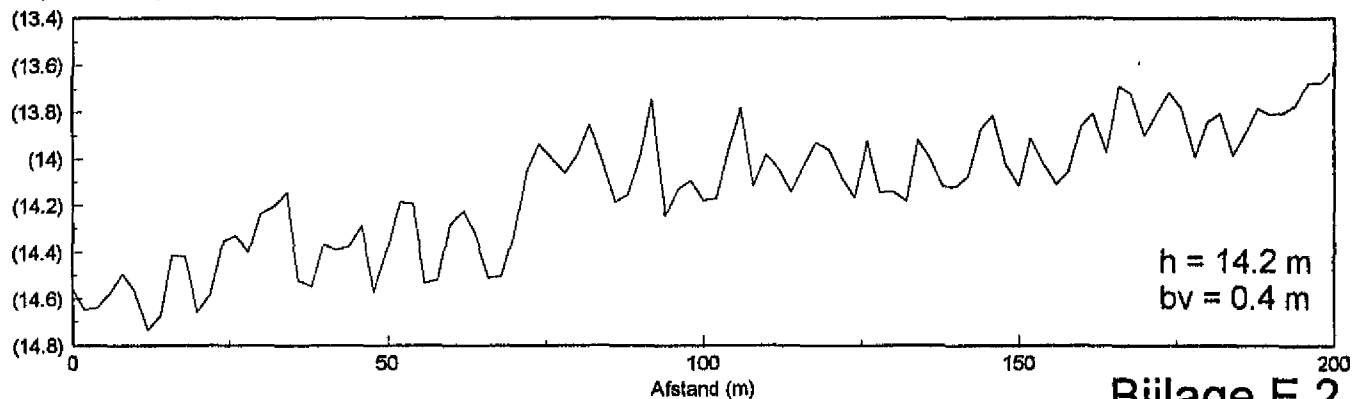
Diepte tov NAP (m)



Raai C MP 28 Bodemvormen langsprofiel in meetpunt (op 100 m)

12-19 okt. 1995 Multi-beam pixelgrootte = 2 x 2 m

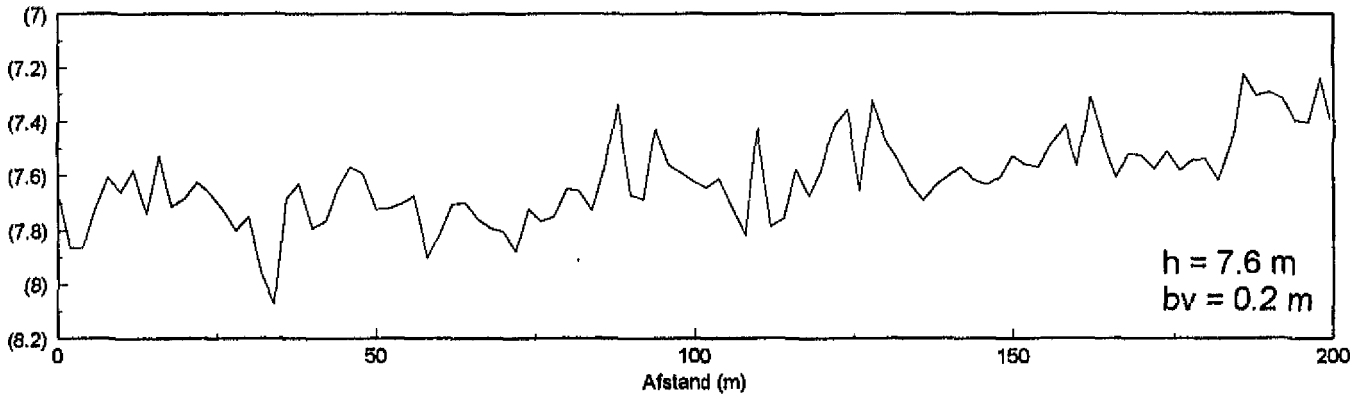
Diepte tov NAP (m)



Raai C MP 29 Bodemvormen langsprofiel in meetpunt (op 100 m)

12-19 okt. 1995 Multi-beam pixelgrootte = 2 x 2 m

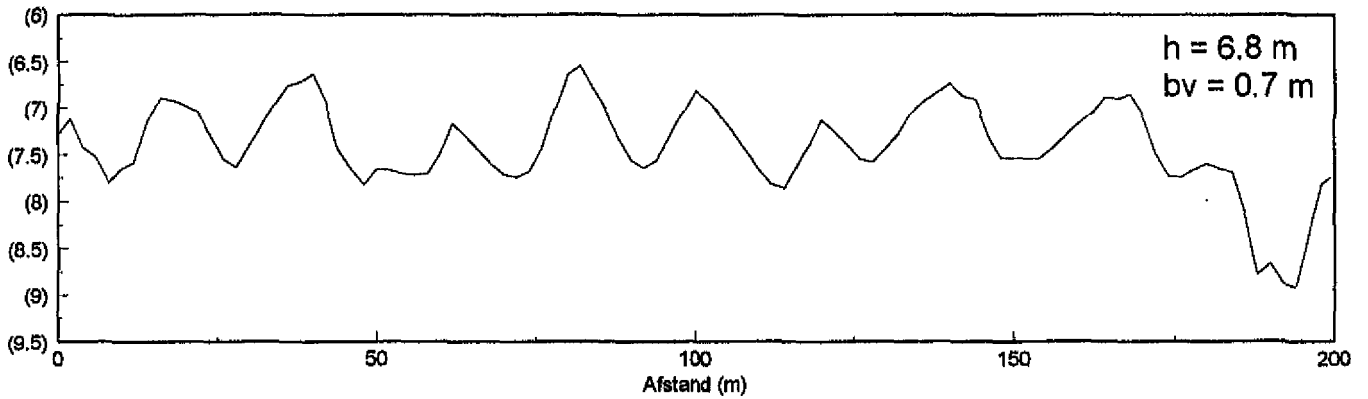
Diepte tov NAP (m)



Raai C MP 30 Bodemvormen langsprofiel in meetpunt (op 100 m)

12-19 okt. 1995 Multi-beam pixelgrootte = 2 x 2 m

Diepte tov NAP (m)

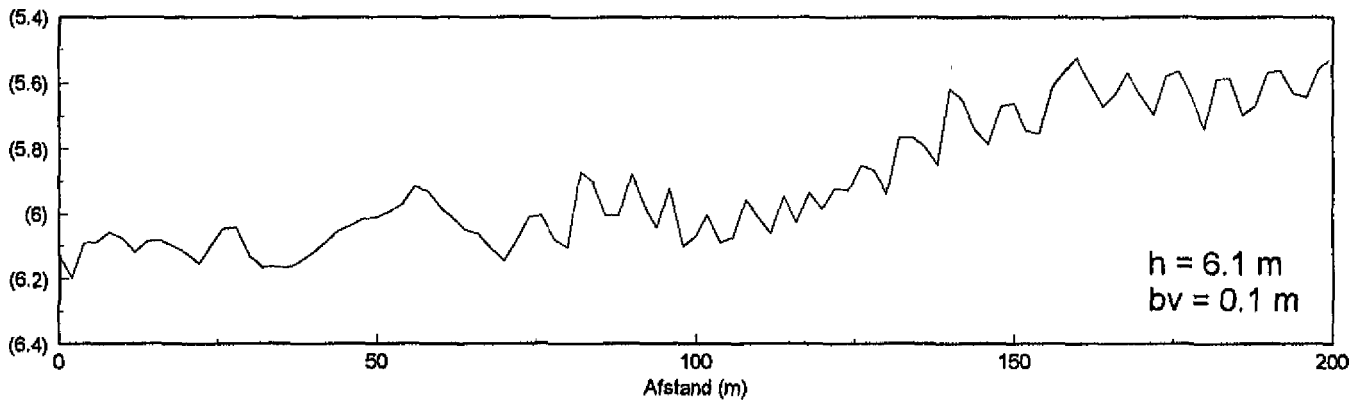


Bijlage E.3

Raai Dz MP 37 Bodemvormen langsprofiel in meetpunt (op 100 m)

12-19 okt. 1995 Multi-beam pixelgrootte = 2 x 2 m

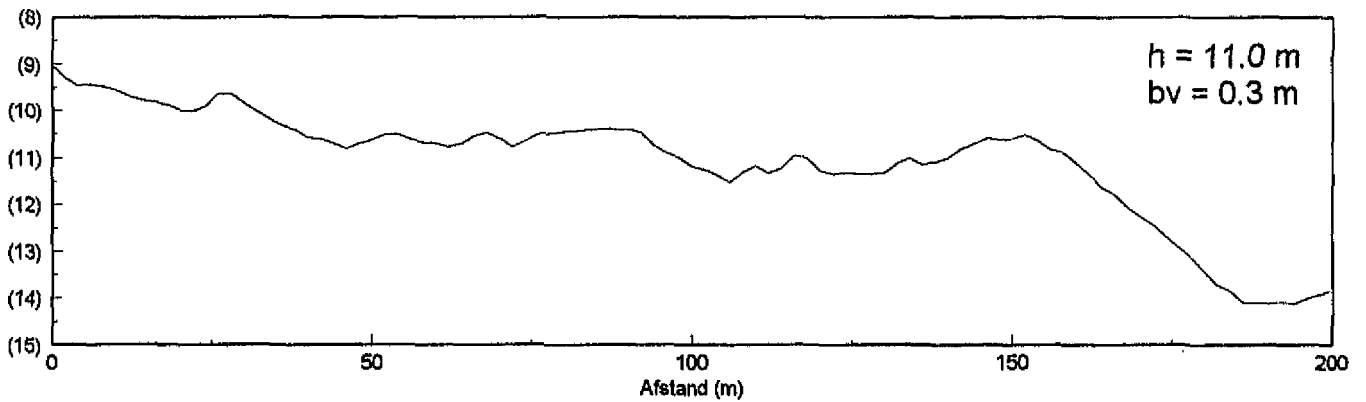
Diepte tov NAP (m)



Raai Dz MP 38 Bodemvormen langsprofiel in meetpunt (op 100 m)

12-19 okt. 1995 Multi-beam pixelgrootte = 2 x 2 m

Diepte tov NAP (m)

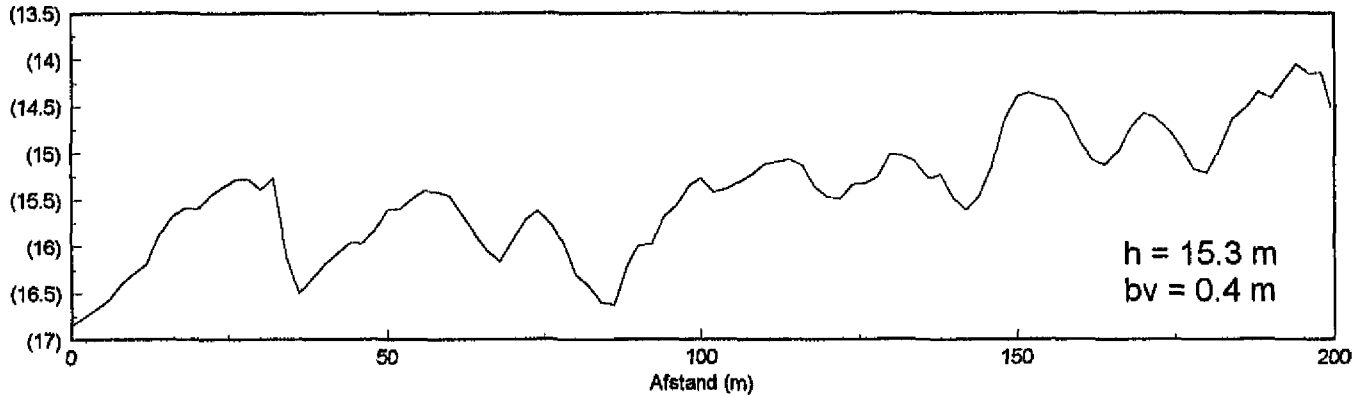


Bijlage E.4

Raai H MP 16 Bodemvormen langsprofiel in meetpunt (op 100 m)

12-19 okt. 1995 Multi-beam pixelgrootte = 2 x 2 m

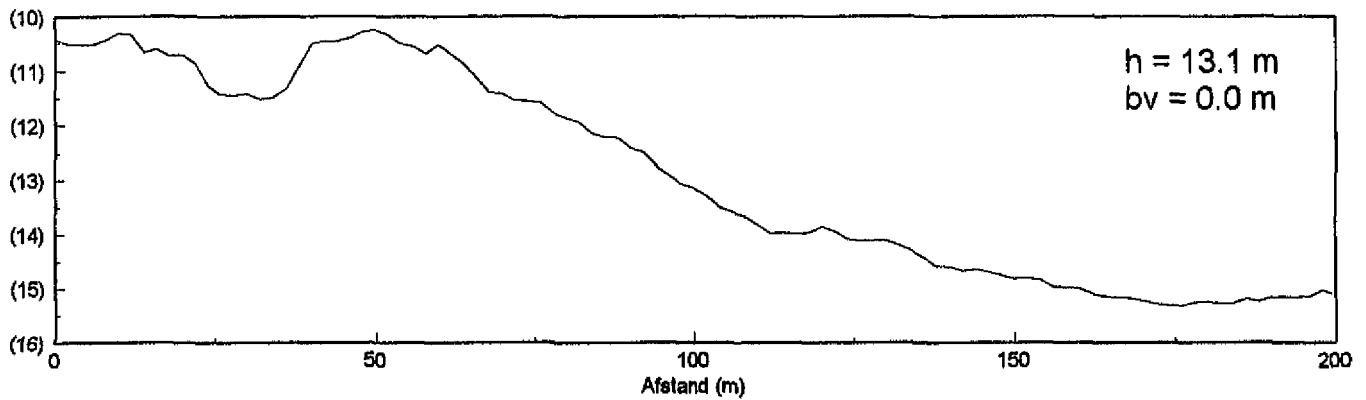
Diepte tov NAP (m)



Raai H MP 19 Bodemvormen langsprofiel in meetpunt (op 100 m)

12-19 okt. 1995 Multi-beam pixelgrootte = 2 x 2 m

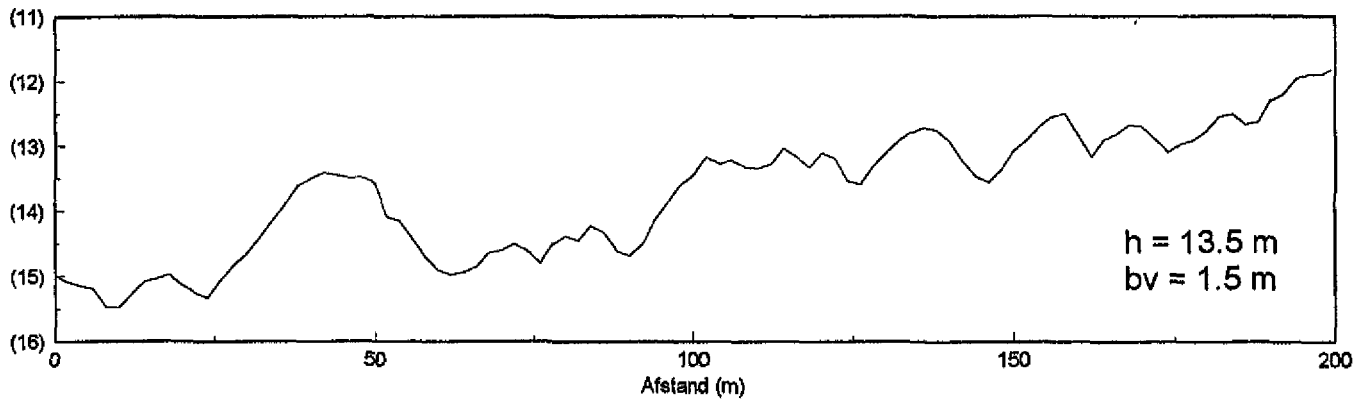
Diepte tov NAP (m)



Raai H MP 17 Bodemvormen langsprofiel in meetpunt (op 100 m)

12-19 okt. 1995 Multi-beam pixelgrootte = 2 x 2 m

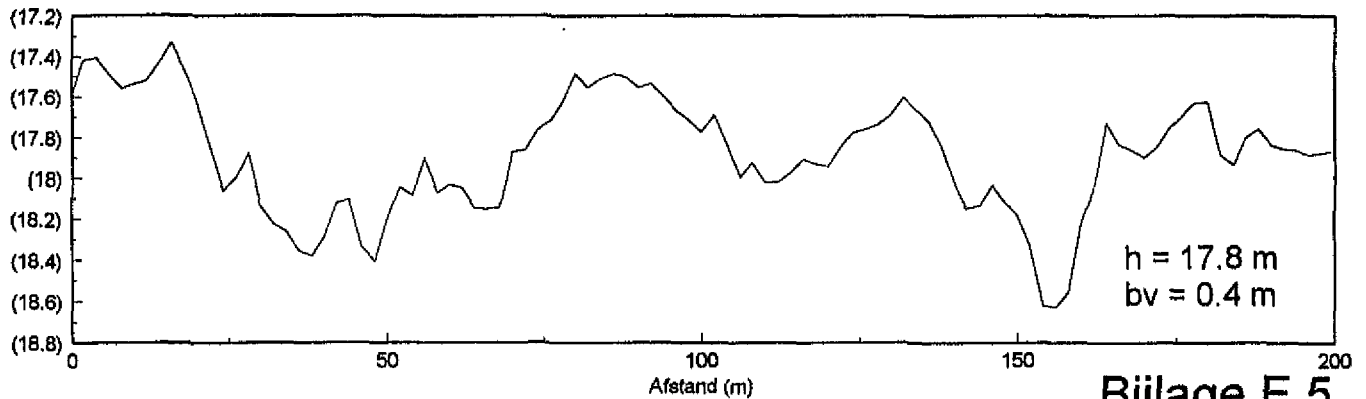
Diepte tov NAP (m)



Raai J MP 20 Bodemvormen langsprofiel in meetpunt (op 100 m)

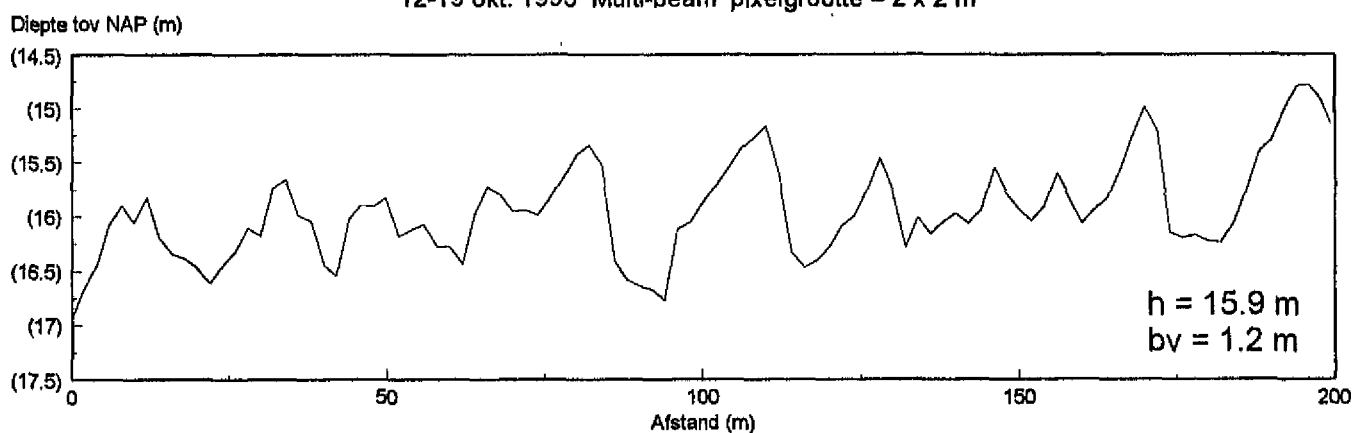
12-19 okt. 1995 Multi-beam pixelgrootte = 2 x 2 m

Diepte tov NAP (m)



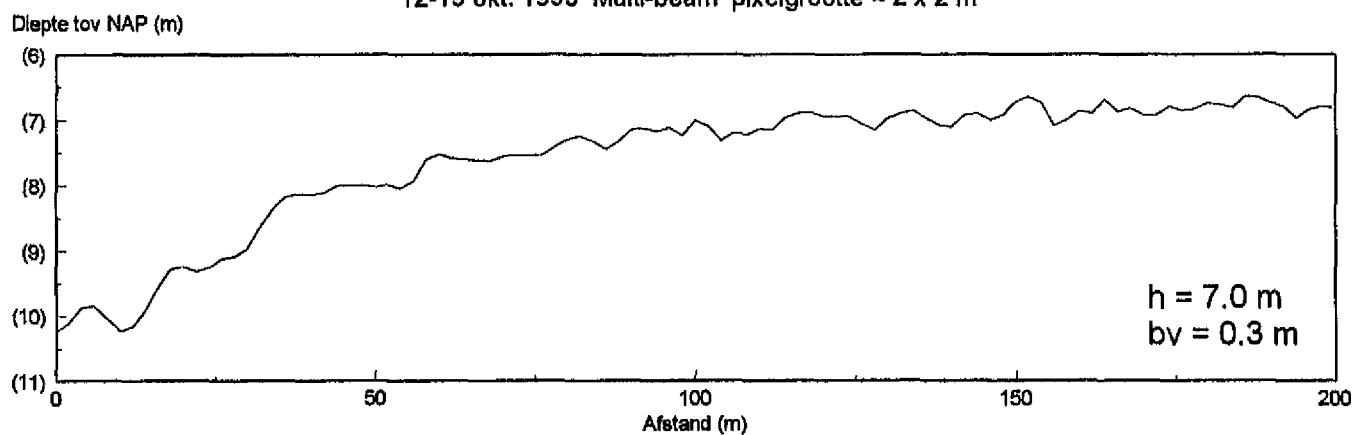
Raai F/H MP 15 Bodemvormen langprofiel in meetpunt (op 100 m)

12-19 okt. 1995 Multi-beam pixelgrootte = 2 x 2 m



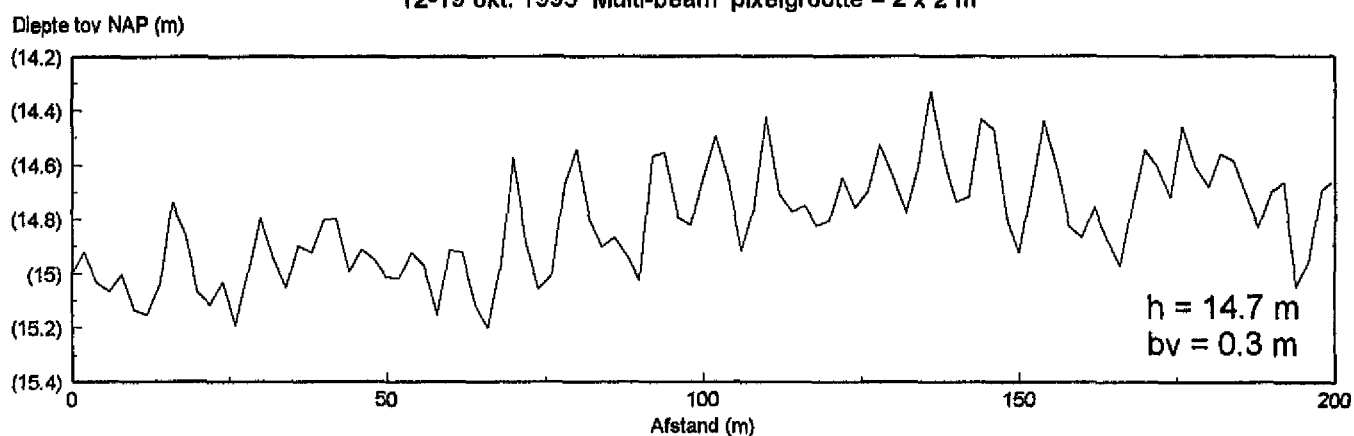
Raai F/H MP 18 Bodemvormen langprofiel in meetpunt (op 100 m)

12-19 okt. 1995 Multi-beam pixelgrootte = 2 x 2 m



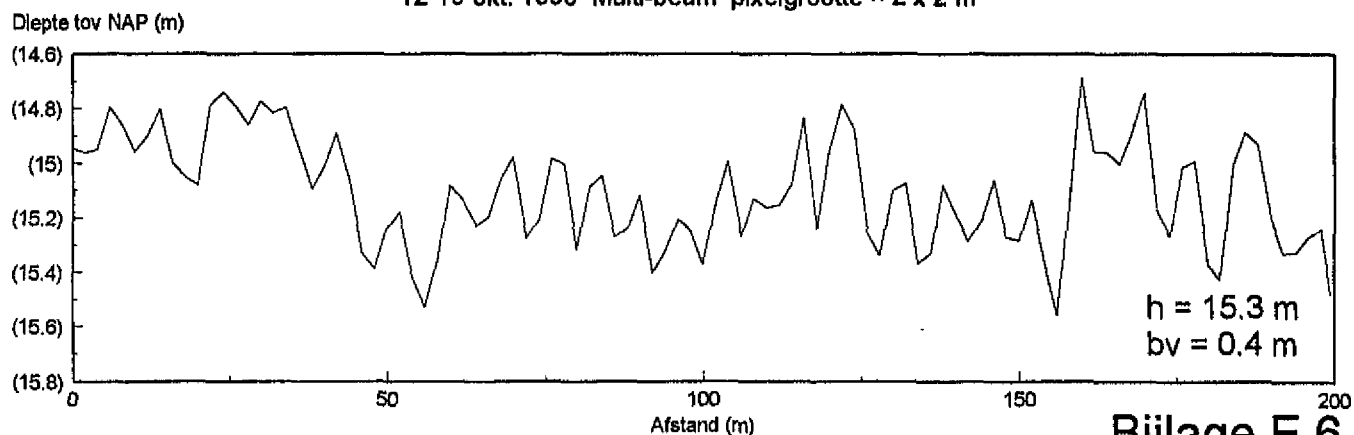
Raai F MP 22 Bodemvormen langprofiel in meetpunt (op 100 m)

12-19 okt. 1995 Multi-beam pixelgrootte = 2 x 2 m



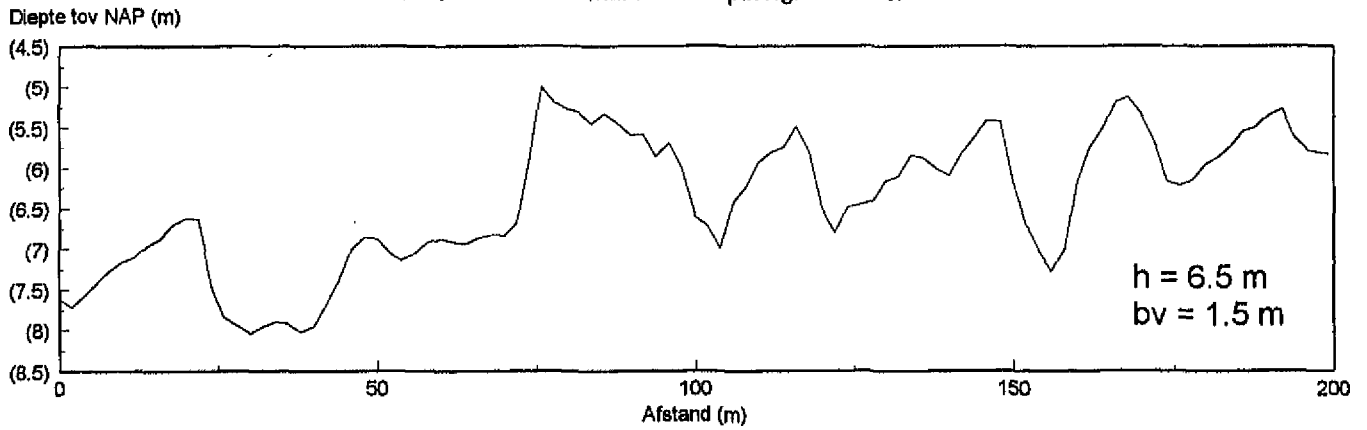
Raai G MP 24 Bodemvormen langprofiel in meetpunt (op 100 m)

12-19 okt. 1995 Multi-beam pixelgrootte = 2 x 2 m



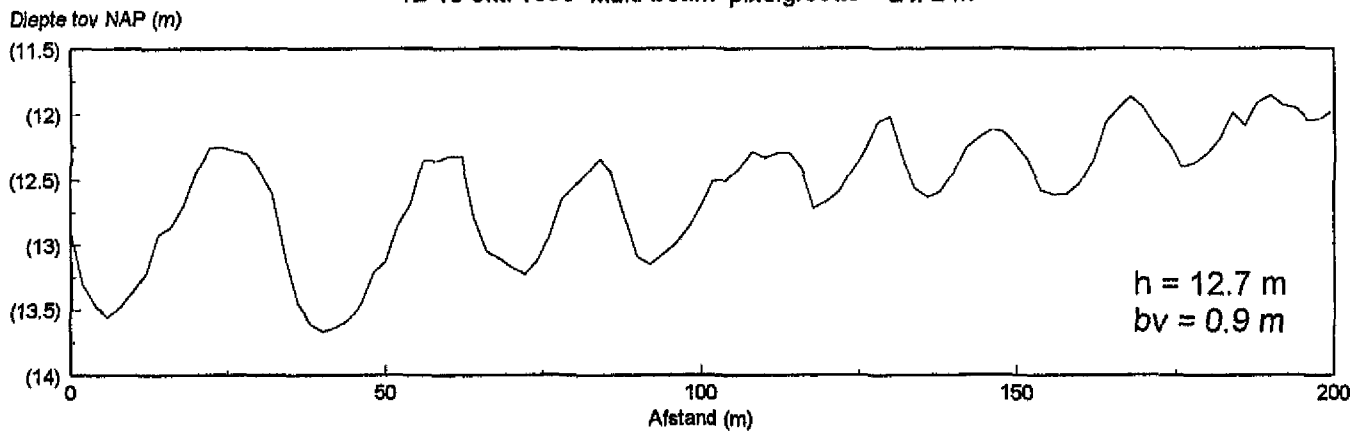
Raai 5A MP 52 Bodemvormen langsprofiel in meetpunt (op 100 m)

12-19 okt. 1995 Multi-beam pixelgrootte = 2 x 2 m



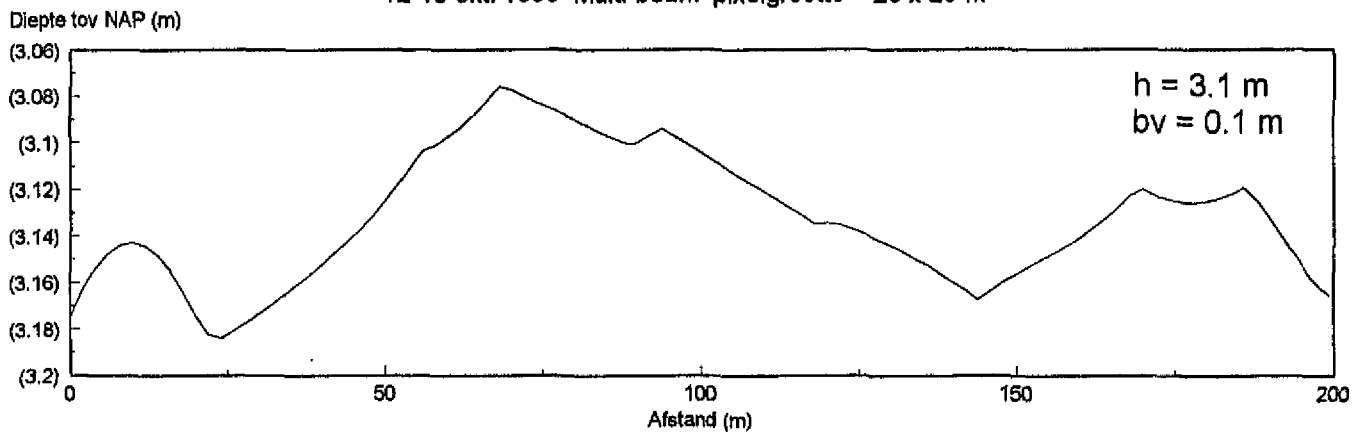
Raai 5A MP 51 Bodemvormen langsprofiel in meetpunt (op 100 m)

12-19 okt. 1995 Multi-beam pixelgrootte = 2 x 2 m



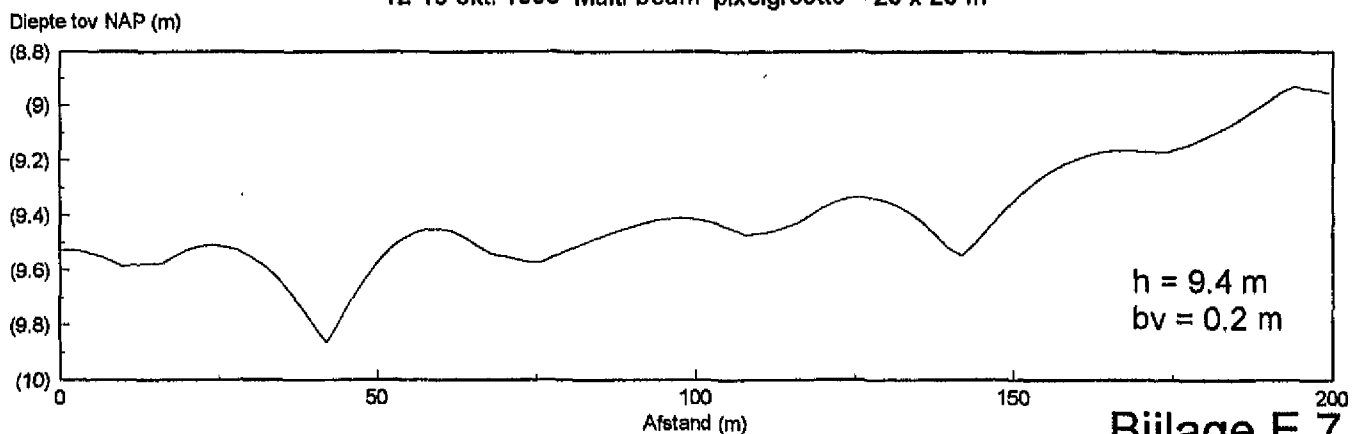
Raai 5A MP 56 Bodemvormen langsprofiel in meetpunt (op 100 m)

12-19 okt. 1995 Multi-beam pixelgrootte = 20 x 20 m

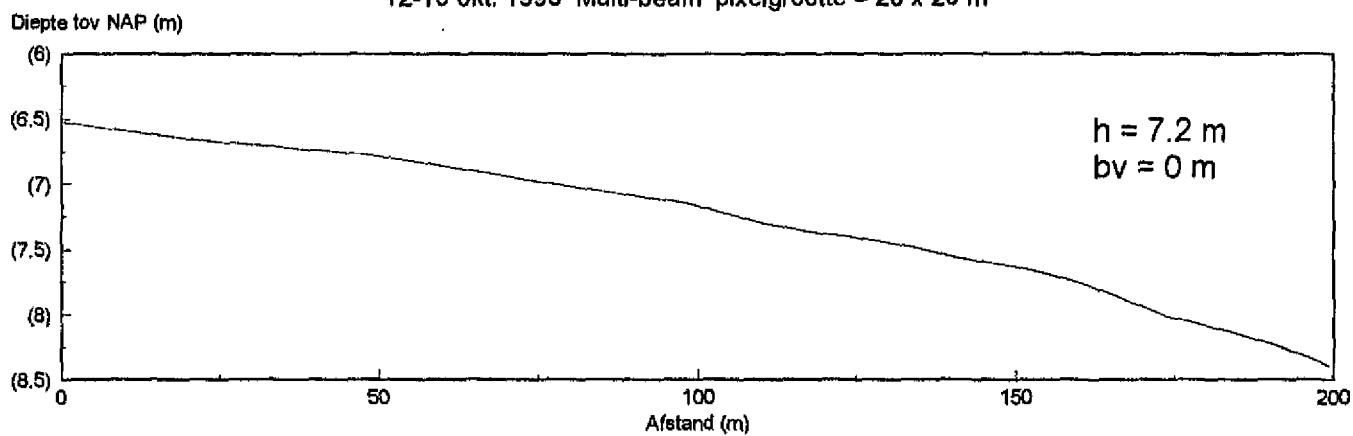


Raai 5A MP 55 Bodemvormen langsprofiel in meetpunt (op 100 m)

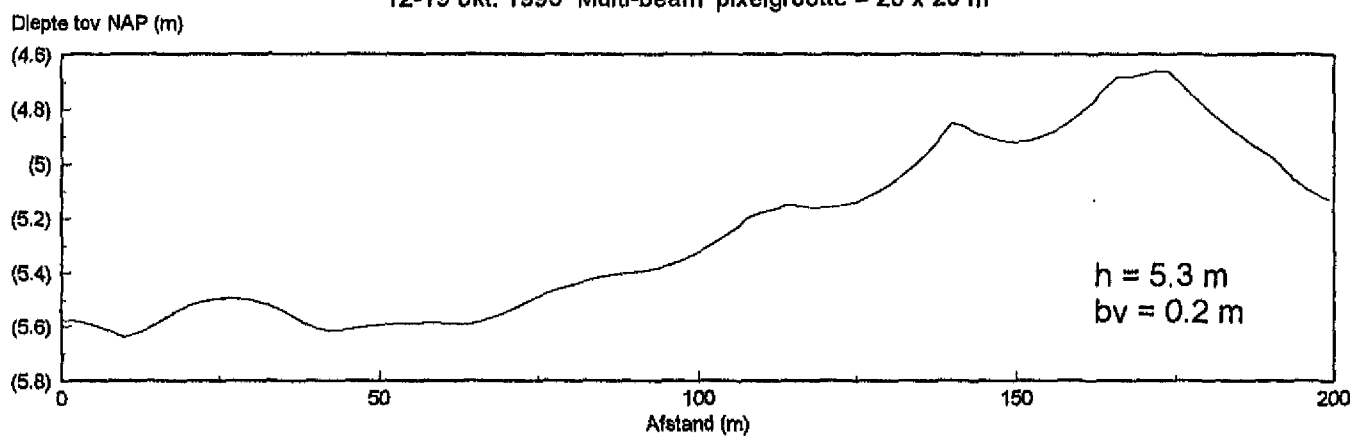
12-19 okt. 1995 Multi-beam pixelgrootte = 20 x 20 m



Raai 5A MP 53 Bodemvormen langsprofiel in meetpunt (op 100 m)
12-19 okt. 1995 Multi-beam pixelgrootte = 20 x 20 m



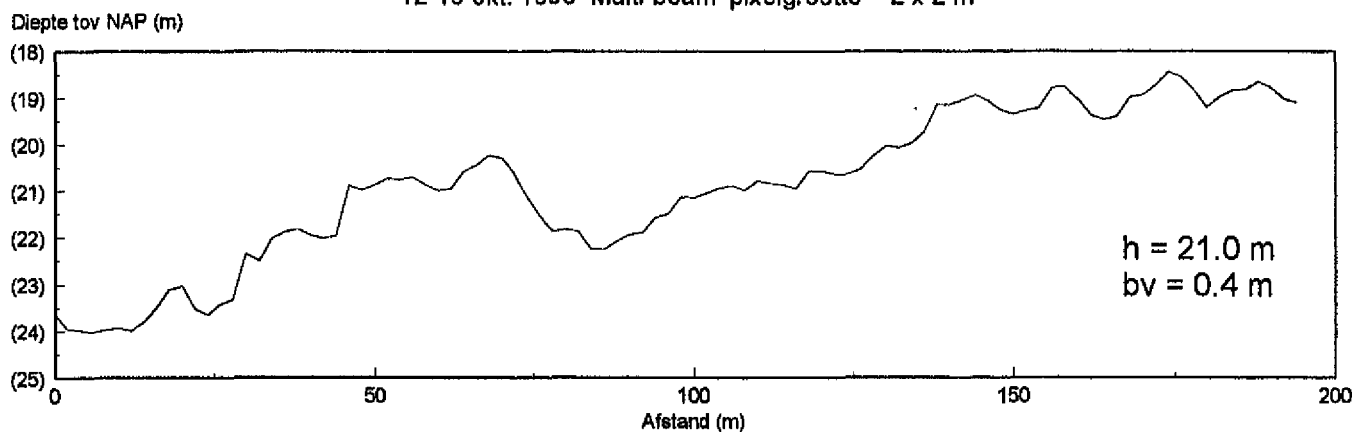
Raai 5A MP 53 Bodemvormen langsprofiel in meetpunt (op 100 m)
12-19 okt. 1995 Multi-beam pixelgrootte = 20 x 20 m



Bijlage E.8

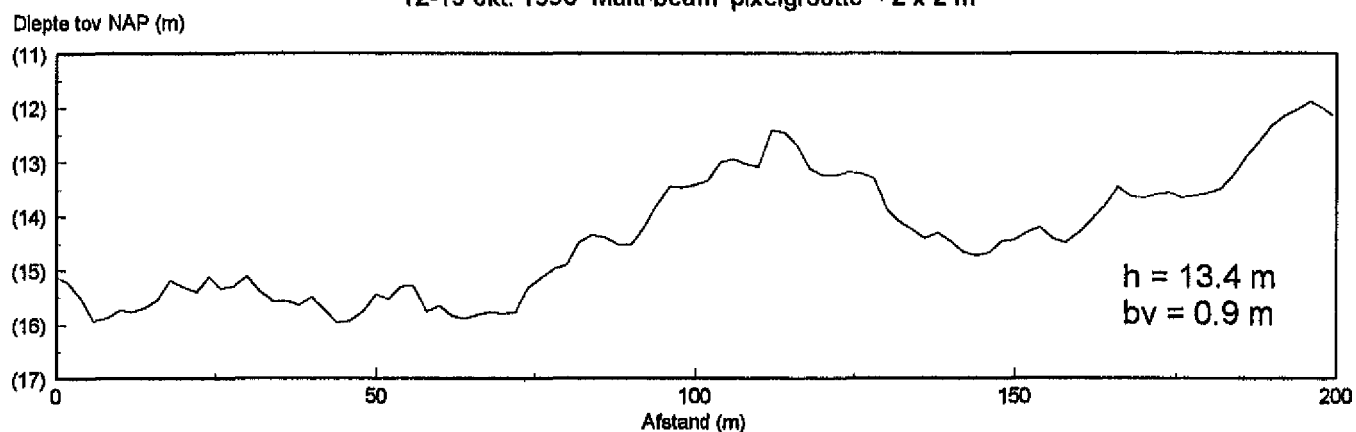
Raai M MP 60 Bodenvormen langsprofiel in meetpunt (op 100 m)

12-19 okt. 1995 Multi-beam pixelgrootte = 2 x 2 m



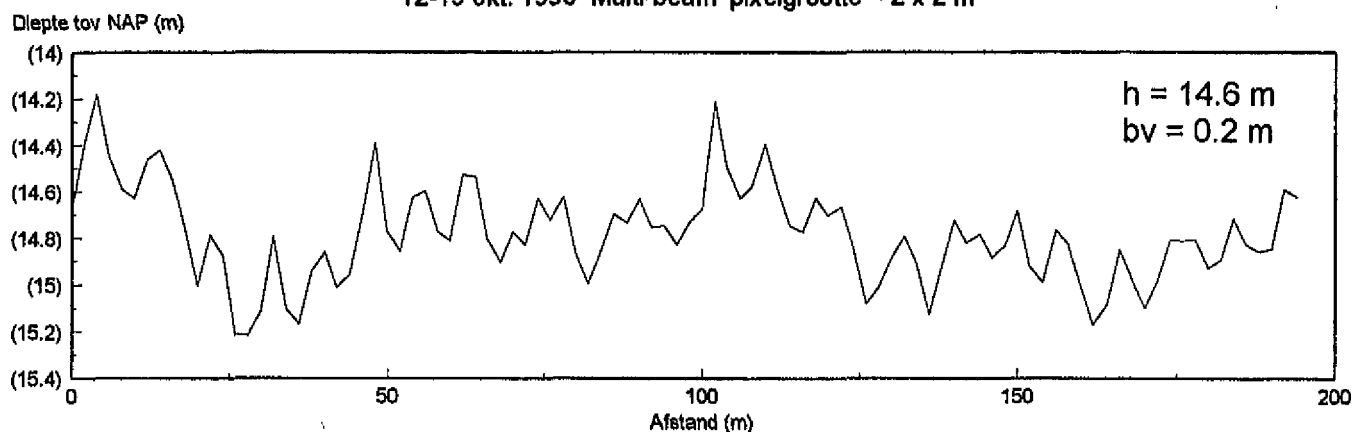
Raai M MP 61 Bodenvormen langsprofiel in meetpunt (op 100 m)

12-19 okt. 1995 Multi-beam pixelgrootte = 2 x 2 m



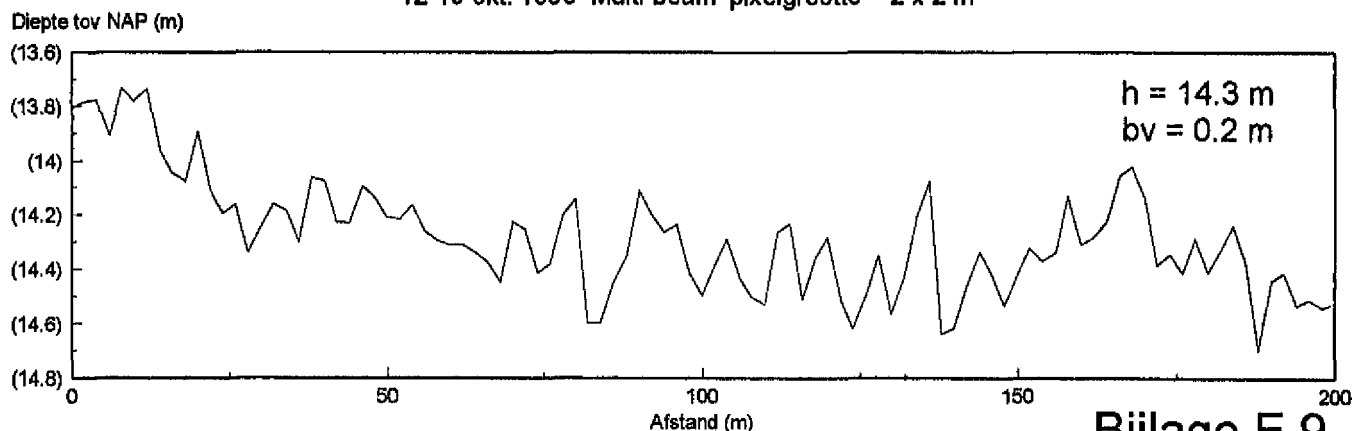
Raai M MP 62 Bodenvormen langsprofiel in meetpunt (op 100 m)

12-19 okt. 1995 Multi-beam pixelgrootte = 2 x 2 m

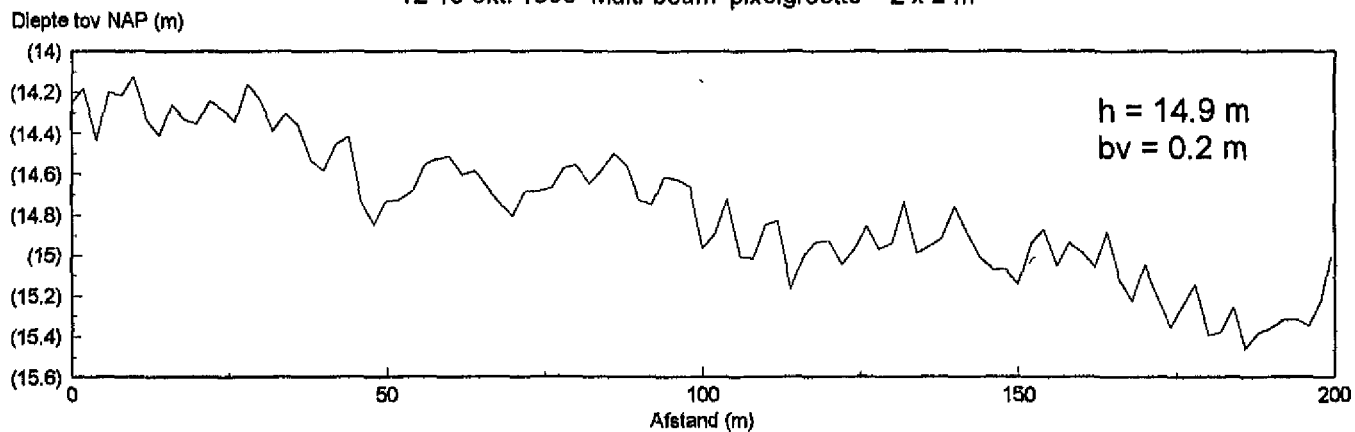


Raai M MP 63 Bodenvormen langsprofiel in meetpunt (op 100 m)

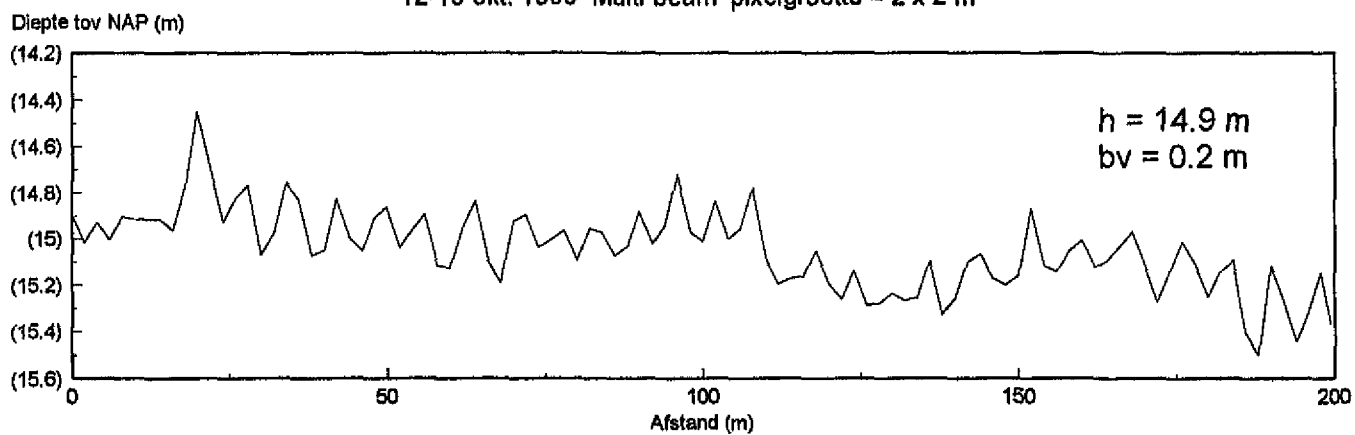
12-19 okt. 1995 Multi-beam pixelgrootte = 2 x 2 m



Raai M MP 64 Bodenvormen langsprofiel in meetpunt (op 100 m)
12-19 okt. 1995 Multi-beam pixelgrootte = 2 x 2 m



Raai M MP 65 Bodenvormen langsprofiel in meetpunt (op 100 m)
12-19 okt. 1995 Multi-beam pixelgrootte = 2 x 2 m



Bijlage E.10