

Nota NWL-92.17

**EEN ANALYSE VAN STROOM- EN
SEDIMENTTRANSPORTMETINGEN IN
HET OOSTELIJK DEEL VAN DE
WESTERSCHELDE**

Tekst

auteur: M.C.J.L. Jeuken
datum: 6 april 1992
bijlagen: 63 figuren, 6 appendices

Inhoudsopgave

Lijsten van figuren, tabellen en appendices

1.	Inleiding	1
2.	Onderzoeksgebied en metingen	2
2.1	Het onderzoeksgebied	2
2.2	De metingen	2
3.	Stroommetingen in het Zuidergat en de Overloop van Valkenisse	4
3.1	Gegevens verwerking	4
3.1.1	Het berekenen van de primaire en secundaire stroomcomponenten	4
3.1.2	Normalisatie en middeling van de stroomcomponenten.	5
3.2	Observaties	7
3.2.1	Stroomverticalen; Elmar versus AZTM	7
3.2.2	Primaire stroomverticalen rond maximale eb- en vloedstroom.	7
3.2.3	Genormaliseerde en gemiddelde primaire stroomverticalen en gemiddelde secundaire stroomverticalen rond maximale eb- en vloedstroom.	8
3.3	Discussie	10
3.3.1	De primaire stroomverticalen tijdens maximale eb- en vloedstroom	10
3.3.2	De secundaire stroomverticalen tijdens maximale eb- en vloedstroom	12
4	Sedimenttransport-metingen in het Valkenisse-gebied	15
4.1	Gegevens verwerking	15
4.1.1	Concentratieverticalen, stroomverticalen en transportverticalen.	15
4.1.2	Normalisatie van enkele concentratieverticalen rond maximale stroom	16
4.1.3	Diepte-geïntegreerde transporten en de totaal transporten gedurende eb en vloed	17
4.1.4	Het berekenen van sedimenttransporten volgens Engelund-Hansen en Van Rijn	17
4.2	Observaties	19
4.2.1	Zandconcentratie- en stroomverticalen rond maximale stroom	19
4.2.2	Enkele genormaliseerde concentratieverticalen	20
4.2.3	Diepte-geïntegreerde zand- en slibtransporten als functie van de tijd	21
4.2.4	Het totale zand- en slibtransport tijdens eb en vloed	22
4.2.5	Berekende en gemeten sedimenttransporten	22
4.3	Discussie	25
4.3.1	Stroom- en concentratieverticalen en genormaliseerde concentratieverticalen	25
4.3.2	Diepte-geïntegreerd zand- en slibtransporten als functie van de tijd	27
4.3.3	Totale eb- en vloedtransporten	28
4.3.4	Berekende en gemeten transporten	29
5.	Samenvatting, conclusies en aanbevelingen	32
5.1	Samenvatting en conclusies	32
5.2	Aanbevelingen	35

Literatuurreferenties

Lijst van figuren

- Fig.1 Locatie van het onderzoeksgebied
1a het Valkenisse-gebied
1b bagger- en stortlocaties in het Valkenisse-gebied
- Fig.2 Locaties van de 13-uurs metingen
- Fig.3 Dwarsprofielen van raai 5
- Fig.4 Dwarsprofielen van raai 3
- Fig.5 Het gebruikte v,u-assenstelsel voor het berekenen van de primaire en secundaire stroomcomponenten.
- Fig.6 Stroomsnelheids- en richtingsverticalen van Elmar en AZTM tijdens maximale stroom in meetpunt 2, raai 5.
- Fig.7 Stroomsnelheids- en richtingsverticalen van Elmar en AZTM tijdens maximale stroom in meetpunt 3, raai 5.
- Fig.8 Primaire en secundaire stroomverticalen volgens Elmar en AZTM in meetpunt 2 van raai 5
- Fig.9 Primaire en secundaire stroomverticalen volgens Elmar en AZTM in meetpunt 3 van raai 5
- Fig.10 Verticale verdeling van de primaire stroomcomponenten in meetpunt 1 van raai 3
- Fig.11 Verticale verdeling van de primaire stroomcomponenten in meetpunt 2 van raai 3
- Fig.12 Verticale verdeling van de primaire stroomcomponenten in meetpunt 3 van raai 3
- Fig.13 Verticale verdeling van de primaire stroomcomponenten in meetpunt 4 van raai 3
- Fig.14 Verticale verdeling van de primaire stroomcomponenten in meetpunt 5 van raai 3
- Fig.15 Verticale verdeling van de primaire stroomcomponenten in meetpunt 1 van raai 5
- Fig.16 Verticale verdeling van de primaire stroomcomponenten in meetpunt 2 van raai 5
- Fig.17 Verticale verdeling van de primaire stroomcomponenten in meetpunt 3 van raai 5
- Fig.18 Verticale verdeling van de primaire stroomcomponenten in meetpunt 4 van raai 5
- Fig.19 Verticale verdeling van de primaire stroomcomponenten in meetpunt 5 van raai 5
- Fig.20 Genormaliseerde gemiddelde primaire stroomverticalen en gemiddelde secundaire stroomverticalen in meetpunt 2 van raai 3
- Fig.21 Genormaliseerde gemiddelde primaire stroomverticalen en gemiddelde secundaire stroomverticalen in meetpunt 3 van raai 3
- Fig.22 Genormaliseerde gemiddelde primaire stroomverticalen en gemiddelde secundaire stroomverticalen in meetpunt 4 van raai 3
- Fig.23 Genormaliseerde gemiddelde primaire stroomverticalen en gemiddelde secundaire stroomverticalen in meetpunt 5 van raai 3
- Fig.24 Genormaliseerde gemiddelde primaire stroomverticalen en gemiddelde secundaire stroomverticalen in meetpunt 1 van raai 5
- Fig.25 Genormaliseerde gemiddelde primaire stroomverticalen en gemiddelde secundaire stroomverticalen in meetpunt 2 van raai 5
- Fig.26 Genormaliseerde gemiddelde primaire stroomverticalen en gemiddelde secundaire stroomverticalen in meetpunt 3 van raai 5
- Fig.27 Genormaliseerde gemiddelde primaire stroomverticalen en gemiddelde secundaire stroomverticalen in meetpunt 4 van raai 5
- Fig.28 Genormaliseerde gemiddelde primaire stroomverticalen en gemiddelde secundaire stroomverticalen in meetpunt 5 van raai 5
- Fig.29 Ruimtelijke variatie in eb-vloeddominantie van de primaire stroomcomponent: getijstroom in relatie tot meandergeometrie.
- Fig.30 Significante secundaire stroomcomponenten in het Zuidergat (raai 5).
- Fig.31 Significante secundaire stroomcomponenten in de Overloop van Valkenisse (raai 3).
- Fig.32 Extrapolatie-aannamen voor het construeren van stroom-, concentratie- en transportverticalen.
- Fig.33 Stroomsnelheid- en concentratieverticalen in het Zuidergat tijdens maximale ebstroom
- Fig.34 Stroomsnelheid- en concentratieverticalen in het Zuidergat tijdens maximale vloedstroom
- Fig.35 Stroomsnelheid- en concentratieverticalen in de Schaar van Waarde tijdens maximale ebstroom
- Fig.36 Stroomsnelheid- en concentratieverticalen in de Schaar van Waarde tijdens maximale vloedstroom
- Fig.37 Stroomsnelheid- en concentratieverticalen in de Schaar van Valkenisse tijdens maximale ebstroom
- Fig.38 Stroomsnelheid- en concentratieverticalen in de Schaar van Valkenisse tijdens maximale vloedstroom
- Fig.39 Stroomsnelheid- en concentratieverticalen in de Zimmermangeul en op de plaat tijdens maximale ebstroom

- Fig.40 Stroomsnelheid- en concentratieverticalen in de Zimmermangeul en op de plaat tijdens maximale vloedstroom
- Fig.41 Genormaliseerde concentratieverticalen in het Zuidergat (meetpunt 2)
- Fig.42 Genormaliseerde concentratieverticalen in de Schaar van Waarde (mp 10)
- Fig.43 Genormaliseerde concentratieverticalen in de Zimmermangeul (mp8)
- Fig.44 Genormaliseerde concentratieverticaal in de Schaar van Valkenisse
- Fig.45 Totale gemeten zand- en slibtransporten als functie van de tijd in de Schaar van Waarde en het Zuidergat
- Fig.46 Totale gemeten zand- en slibtransporten als functie van de tijd in de Overloop van Valkenisse en de Zimmermangeul
- Fig.47 Totale gemeten zand- en slibtransporten als functie van de tijd in de Schaar van Valkenisse en het inscharend ebgeultje.
- Fig.48 Het totale zand- en slibtransport tijdens eb en vloed
- Fig.49 De transportdiscrepantie-ratio's als functie van de stroomsnelheid in het Zuidergat (meetpunt 2, raai 5)
- Fig.50 De transportdiscrepantie-ratio's als functie van de stroomsnelheid in het Zuidergat (meetpunt 3, raai 5)
- Fig.51 De transportdiscrepantie-ratio's als functie van de stroomsnelheid in het Zuidergat (meetpunt 5, raai 5)
- Fig.52 De transportdiscrepantie-ratio's als functie van de stroomsnelheid in de Schaar van Waarde (meetpunt 9, raai 5)
- Fig.53 De transportdiscrepantie-ratio's als functie van de stroomsnelheid in de Schaar van Waarde (meetpunt 10, raai 5)
- Fig.54 De transportdiscrepantie-ratio's als functie van de stroomsnelheid in de Schaar van Waarde (meetpunt 11, raai 5)
- Fig.55 De transportdiscrepantie-ratio's als functie van de stroomsnelheid in het inscharend ebgeultje (meetpunt 10)
- Fig.56 De transportdiscrepantie-ratio's als functie van de stroomsnelheid in de Schaar van Valkenisse (meetpunt 11)
- Fig.57 De transportdiscrepantie-ratio's als functie van de stroomsnelheid in meetpunt 8 van raai 3
- Fig.58 Het effect van een variabele valsnelheid op de theoretische concentratieverticaal
- $k_s = 0.01m$
 - $k_s = 1m$
- Fig.59 Het effect van een variabele valsnelheid op de theoretische concentratieverticaal, gebaseerd op een parabolisch-constante mengcoëfficiënt en een $k_s = 1m$.
- Fig.60 Verticaal gemiddelde concentraties en stroomsnelheden als functie van de tijd, in het Zuidergat, de Schaar van Waarde en de Schaar van Valkenisse.
- Fig.61 Transportdiscrepantie-ratio's als functie van de stroomsnelheid
- oorspronkelijke berekening volgens Van Rijn
 - aanpassing van theta
 - aanpassing van sigma
- Fig.62 Gevoeligheidsanalyse van de formule van Engelund-Hanssen voor variaties in verticaal gemiddelde stroomsnelheid ($\bar{u}$), ruwheidshoogte (k_s) en waterdiepte (h).
- Fig.63 Gevoeligheidsanalyse van de formule van Van Rijn voor variaties in verticaal gemiddelde stroomsnelheid ($\bar{u}$), ruwheidshoogte (k_s) en waterdiepte (h).

Lijst van tabellen

- Tabel 1 Totale hoeveelheden gebaggerde en gestorte specie uitgevoerd in 1990 ten behoeve van het vaargeulonderhoud in het Valkenisse-gebied.
- Tabel 2 Getij- en weersomstandigheden tijdens de metingen
- Tabel 3 Relatieve bandbreedtes om de genormaliseerde gemiddelde stroomverticalen.
- Tabel 4 Gemiddelde, verticaal gemiddelde stroomrichtingen gedurende maximale stroom.
- Tabel 5 Voorspellingspercentages van Van Rijn
- Tabel 6 Voorspellingspercentages van Van Rijn waarbij $\bar{u} \geq 1m/s$
- Tabel 7 Voorspellingspercentages van Engelund-Hanssen
- Tabel 8 Voorspellingspercentages van Engelund-Hansen waarbij $\bar{u} \geq 1m/s$
- Tabel 9 Voorspellingspercentages per meetpunt waarbij $T(berekend)/T(gemeten) = 0.5-2$.

Lijst van appendices

- Bijlage A** Meetdiepte-schema voor de Elmar stroommetingen
- Bijlage B** Ijklijnen van de akoestische zandtransport meters (AZTM) en de Partech slibmeters
- Bijlage C** Genormaliseerde logaritmische snelheidsprofielen
- Bijlage D** De afzonderlijke secundaire stroomcomponenten in de meetpunten van raai 3
- Bijlage E** Resultaten van de saliniteitsmeting in meetpunt 3 van raai 5.
- Bijlage F** Sedimenttransportformule van Van Rijn

1. Inleiding

Kader

In deelrapport 4 van het Beleidsplan Westerschelde (1989) worden een aantal knelpunten in het beheer geconstateerd, die worden toegeschreven aan menselijke ingrepen in de morfodynamiek van het estuarium (inpolderingen, bagger- en stortactiviteiten). Als mogelijke oplossing voor deze knelpunten wordt voorgesteld om, de baggeractiviteiten in de Westerschelde te verminderen met behoud van de scheepvaartfunctie.

Een nadere inventarisatie van de mogelijkheden om de baggeractiviteiten te verminderen bleek, in het kader van het Beleidsplan Westerschelde, echter niet mogelijk. Daarom werd in 1989 door de Rijkswaterstaat Directie Zeeland, het Oostwest-project (oostelijk deel Westerschelde) gestart, met als belangrijkste doelstellingen: (1) het nader analyseren van de knelpunten in het beheer, (2) het inventariseren en evalueren van de mogelijkheden om de baggerintensiteit te verminderen, en (3) het herkennen en aanvullen van kennisleemten die nodig zijn voor de verdere uitwerking en eventuele realisatie van de mogelijkheden om de baggeractiviteiten te verminderen (Pieters et.al.,1991).

Het voorliggende rapport is uitgevoerd in het kader van het Oostwest-project, en geeft een analyse van stroom- en sedimenttransportmetingen in de Westerschelde. De analyse is uitgevoerd en gerapporteerd door drs. M.C.J.L. Jeuken onder begeleiding van dr. J.H. van den Berg, middels het contract ZL-3018 van de Rijkswaterstaat Directie Zeeland met de Rijksuniversiteit te Utrecht.

Doelstellingen

Morfologische veranderingen in estuaria worden in belangrijke mate bepaald door het sedimenttransport dat wordt opgewekt door de waterbeweging. Hierbij treden interacties op tussen morfologie, waterbeweging en sedimenttransport, die al dan niet gekenmerkt worden door een relaxatie-tijd.

Inzicht in de ruimtelijke en temporele variaties van stromingspatronen en sedimenttransporten, in relatie tot de morfologie, is nodig om de morfologische veranderingen te kunnen begrijpen en voorspellen. Kennis van de estuarine morfodynamiek is van essentieel belang om de gevolgen van eventuele toekomstige ingrepen, in de morfodynamiek van het estuarium (bv. de verdieping 48'/43'), te kunnen afschatten.

In dit rapport wordt een analyse gegeven van stroom- en sedimenttransportmetingen in het oostelijk deel van de Westerschelde rond springtij. Het doel van de analyse is drieledig:

- Het verkrijgen van inzicht in de ruimtelijke variaties van stroompatronen in relatie tot de morfologie;
- Herkennen van eventuele ruimtelijke variaties in sedimentconcentraties en -transporten in relatie tot de morfologie en waterbeweging, en;
- Het vergelijken en evalueren van de voorspelkracht van sedimenttransportformules op basis van gemeten transporten.

De analyse is gebaseerd op metingen die in 1990 zijn uitgevoerd in het kader van het Oostwest-project.

2. Onderzoeksgebied en metingen

2.1 Het onderzoeksgebied

Het onderzoeksgebied is gelegen in het oostelijk deel van de Westerschelde en wordt vaak aangeduid als het Valkenisse-gebied (fig.1a). De morfolgie van dit gebied wordt gekenmerkt door een hoofdgeul en een aantal nevengeulen gescheiden door platen. Aan de zuidoost-grens van het gebied liggen de schorren en slikken van het land van Saeftinghe. De hoofdgeul, die van belang is voor de scheepvaart van en naar Antwerpen, wordt gevormd door: het Zuidergat, de Bocht van Walsoorden, en de Overloop van Valkenisse. De diepte van de vaargeul varieert van 15m -NAP op de drempels van Valkenisse en Hansweert, tot ruim 30 meter in de Bocht van Walsoorden. De belangrijkste nevengeulen zijn: de Schaar van Waarde, de Schaar van Valkenisse en de Zimmermangeul. Van deze nevengeulen is de Schaar van Valkenisse het diepst (diepste punt op ruim 15m -NAP). Door de aanwezigheid van een inscharend ebgeultje staat de Schaar van Valkenisse in verbinding met de Overloop van Valkenisse. De grootste plaat in het gebied bestaat uit de Plaat van Walsoorden en een deel van de Platen van Valkenisse, die sinds het eind van de jaren zeventig met elkaar zijn vergroeid.

De morfologische ontwikkeling van de geulen en platen wordt beïnvloed door baggeractiviteiten: ten behoeve van de scheepvaart worden bagger- werkzaamheden uitgevoerd op de drempels van Valkenisse en Hansweert, en langs de zuidelijke rand van de platen die aan de hoofdgeul grenzen (fig.1b). Stortingen vinden plaats in de buitenbocht van de hoofdgeul ter hoogte van Konijneschor, de Schaar van Waarde, de Zimmermangeul, en het gebied ten zuidoosten van de drempel van Hansweert (fig.1b). De totale hoeveelheden gebaggerde en gestorte specie die in 1990 door de Belgische baggerbedrijven zijn gebaggerd en gestort ten behoeve van het vaargeulonderhoud, zijn samengevat in tabel 1.

Tabel 1. Totale hoeveelheden gebaggerde en gestorte specie uitgevoerd in 1990 t.b.v. het vaargeulonderhoud in het Valkenisse-gebied

baggerlocatie	baggerhoeveelheden (* 10 ⁶ m ³)	stortlocatie	storthoeveelheden (*10 ⁶ m ³)
drempel Valkenisse	1.232	Schaar van Waarde	0.606
zuidelijke plaatranden	1.414	Konijneschor, boei 63, Baalhoek	3.15
drempel Hansweert	1.915	n.v.t	n.v.t
totaal	4.561	totaal	3.756

2.2 De metingen

Meetperiode en de meetlocaties

Op 5 en 6 september 1990, respectievelijk 3 en 2 dagen vóór springtij, zijn in de twee raaien 3 en 5 (fig.2) een aantal 13-uurs metingen uitgevoerd. Tijdens deze metingen zijn

stroomverticalen, sedimenttransporten, en saliniteiten gemeten. De locaties van de verschillende metingen zijn weergegeven in de figuren 2, 3 en 4.

Op 10 september 1990 zijn nog twee 13-uurs metingen uitgevoerd: één in de Schaar van Valkenisse en één in het inscharende ebgeultje (meetpunten DG11 en DG10, fig.2). Tijdens deze metingen zijn eveneens stroomverticalen en sedimenttransporten gemeten.

De getij- en weerscondities tijdens de drie meetdagen zijn samengevat in tabel 2 (notitie: ZLMD-90.N.116, ZLMD-90.N.122 en ZLMD-90.N.123). De getijcondities tijdens deze drie meetdagen zijn vergelijkbaar: de getijcoëfficiënten liggen bij benadering in dezelfde orde grootte. Omdat de strijklengte in het oostelijk deel van de Westerschelde gering is en de windkracht tijdens de metingen ook gering was, kan de invloed van eventuele golfwerking tijdens de metingen worden verwaarloosd.

Tabel 2. Getij- en weersomstandigheden tijdens de metingen

datum	M.E.T	h in m	tijverschil	GC*	richting	kracht
05-09-90	3:05	2.74			WNW	2-3 Bf
	9:10	-2.06	4.80	1.07		
	15:10	2.61	4.67	1.04		
	21:50	-2.47	5.08	1.14		
06-09-90	3:40	2.69			ZW ruimend NW	4 Bf
	9:50	-2.30	4.99	1.12		
	16:00	2.94	5.24	1.17		
	22:20	-2.17	5.11	1.14		
10-09-90	0:20	-2.58			NW	3-5 Bf
	6:15	2.58	5.16	1.15		
	12:20	-2.11	4.69	1.05		
	18:25	2.68	4.79	1.07		

* GC=getijcoëfficiënt, gedefinieerd als de ratio van het opgetreden tijverschil gedeeld door het tijverschil bij gemiddelde getijcondities.

Stroommetingen

De stroommetingen zijn uitgevoerd met een Elmar-meetvis. Deze meetvis richt zich op de stroom waarbij de stroomsnelheid gemeten wordt met een Ott-molen. De middelingstijd van de Elmar was tijdens de metingen ingesteld op één minuut. De richting van de stroom wordt gemeten m.b.v een gyrokompas. Voor het meten van een volledige verticaal wordt uitgegaan van een meetdiepte-schema dat afhankelijk is van de waterdiepte (bijlage A).

Omdat de gyrotol verloopt wordt in principe aan het begin van iedere verticaalmeting het kompas geijkt met het kompas aan boord van het schip. Naderhand worden de gemeten richtingen lineair met de tijd gecorrigeerd. IJking van de Ott-molens gebeurt eens in de paar jaar in een stroomgoot in Rijswijk (in 1990 werden 65 Elmar-meetvissen geijkt).

Sedimenttransport-metingen

De zandtransporten zijn gemeten met een Akoestische Zand Transport Meter, in het vervolg aangeduid als AZTM. De werking van de AZTM is gebaseerd op de transmissie en verstrooiing van geluid in een met zand gevuld meetvolume. De massaconcentratie en de snelheid waarmee het zand beweegt worden gelijktijdig bepaald uit respectievelijk de amplitude en de frequentie-verschuiving van het verstrooide geluid (Anonymous, 1984).

Slibtransporten zijn gemeten met een Partech troebelheidsmeter, waarbij de Partech gemonteerd was op de AZTM-meetvis. Het principe van de Partech is gebaseerd op het meten van de uitdoving van uitgezonden licht ten gevolge van het in het water aanwezige slib. De mate van uitdoving kan worden omgerekend naar een slibconcentratie (McCave, 1978). De middelingstijd van de AZTM/Partech was tijdens de meting ingesteld op twee minuten.

De transporten van zowel zand als slib worden berekend door de gemeten concentraties te vermenigvuldigen met de stroomsnelheid (waarmee het zand beweegt). De richting van het sedimenttransport wordt gemeten met een magnetisch kompas. Door het gebruik van een magnetisch kompas is het mogelijk dat de richting van het meetpunt boven in de verticaal afwijkt. Het meetdiepte-schema van de AZTM is anders dan dat van de Elmar: bodem + 1m, bodem + 2m, bodem + 4m, (oppervlak-8m), oppervlak-2m. De Elmar metingen en AZTM/Partech metingen zijn niet simultaan uitgevoerd, o.a. doordat de tijdsduur waarin een verticaal gemeten wordt voor beide instrumenten verschilde.

Voor de ijking van zowel AZTM als Partech werden tijdens de metingen, ongeveer één keer per uur, water-sediment monsters (ca. 1 liter) genomen op 1 meter boven de bodem. De ijklijnen voor zowel de AZTM als de Partech zijn opgenomen in bijlage B.

3. Stroommetingen in het Zuidergat en de Overloop van Valkenisse

3.1 Gegevens verwerking

3.1.1 Het berekenen van de primaire en secundaire stroomcomponenten

De analyse van de stroommetingen is beperkt tot een selectie van stroomverticalen: alleen de stroomverticalen rond maximale eb- en vloedstroom worden beschouwd (in totaal ± 10 verticalen per meetpunt). De keuze voor maximale stroomcondities is gebaseerd op de veronderstelling dat tijdens maximale stroomcondities, de interactie tussen waterbeweging, sedimenttransport en morfologie het grootst is.

Voor de Elmar-meetpunten in de hoofdgeul, de meetpunten 1 t/m 5 in raai 3 en 5, zijn de verticale verdelingen van de primaire en secundaire stroomcomponenten tijdens maximale eb- en vloedstroom berekend. De primaire stroomcomponent (u) is gedefinieerd als de stroming evenwijdig aan de geul-as. De secundaire stroomcomponent (v) is de stroming in het vlak loodrecht op de geul-as. Om redenen van uniformiteit is de positieve u-component gelijk gesteld aan de ebrichting. Voor de meetpunten in raai 5 is dit een oriëntatie van 347° t.o.v. het Noorden. Voor de meetpunten in raai 3 heeft de positieve u-component een oriëntatie van 255° t.o.v. het Noorden. Het gebruikte assenstelsel is weergegeven in figuur 5.

Doordat in deze stroomcomponenten de richtingvariaties zijn verdisconteerd, kunnen de stroomverticalen van de verschillende meetpunten beter met elkaar worden vergeleken: de stroomverticalen liggen in hetzelfde vlak. Ook voor de middeling en normalisatie van stroomcomponenten (paragraaf 3.1.2) is het van belang dat de stroomcomponenten in hetzelfde vlak liggen.

Om een indruk te krijgen van de verschillen in stroomsnelheid en -richting tussen Elmar en AZTM, zijn tijdens maximale eb- en vloedstroom in raai 5, acht AZTM-verticalen vergeleken met acht Elmar-verticalen. Van de acht verticaalmetingen zijn richting- en stroomverticalen gemaakt. In verband met de grafische weergave van de richtingverticalen,

zijn de gemeten richtingen geconverteerd naar een richting t.o.v. de raai, door het x,y-stelsel 77° te roteren in kloksgewijze richting (in raai 5 kan de richting van de ebstroom variëren van 257° tot 77°). De richting van de vloedstroom is positief ($0^\circ \leq \alpha \leq 180^\circ$), de grootte van de vloedstroom is negatief. De richting van de ebstroom is negatief ($-180^\circ \leq \alpha < 0^\circ$), en de grootte van de ebstroom is positief.

Tevens is na gegaan welke verschillen in primaire en secundaire stroomcomponenten optreden als gevolg van de variaties in stroomsnelheid en -richting.

3.1.2 Normalisatie en middeling van de stroomcomponenten.

Tijdens het meten van één stroomverticaal, en rond maximale eb-en vloedstroom kan de getijstroom als quasi-stationair worden beschouwd, d.w.z. dat er geen vertragingen en versnellingen optreden. Op basis van deze quasi-stationariteit is te verwachten dat de primaire stroomverticalen het theoretisch logaritmisch snelheidsprofiel benaderen. Om de berekende verticaalvormen met het logaritmisch snelheidsprofiel, en met elkaar te kunnen vergelijken, is het nodig om de stroomverticalen te normaliseren. Uitspraken over de significantie waarmee een gemeten stroomverticaal al dan niet afwijkt van het logaritmisch snelheidsprofiel, kunnen alleen worden gedaan wanneer de bandbreedten om de stroomcomponenten bekend zijn. Deze bandbreedtes kunnen worden berekend door de genormaliseerde primaire stroomverticalen te middelen.

De primaire stroomcomponenten (u) tijdens maximale stroom zijn genormaliseerd door de berekende stroomcomponenten in de verticaal te delen door de de verticaal gemiddelde waarde van de primaire stroomcomponent (zie ook Van Gastel, 1987, Van de Meene, 1992). Hierbij is de verticaal gemiddelde waarde berekend door numerieke integratie volgens de trapezium-regel. Door deze normalisatie zijn de temporele en ruimtelijke variaties in stroomsnelheid "geëlimineerd", en kunnen de verticaalvormen met elkaar worden vergeleken.

Op basis van de aanname dat rond maximale eb- en vloedstroom (1-2 uur) de getijstroom als quasi-stationair kan worden beschouwd, zijn de genormaliseerde stroomverticalen (4 tot 5), per meetpunt in de verticaal rekenkundig gemiddeld en zijn tevens de standaarddeviaties van de stroomcomponenten (σ) berekend. Doordat de primaire stroomcomponenten in hetzelfde (horizontale) vlak liggen is een dergelijke middelingsprocedure geoorloofd. De standaarddeviaties van de gemiddelde relatieve hoogten (z/h , ligging in het verticale vlak) kunnen in de vormbeschouwing worden verwaarloosd, omdat deze klein tijdens maximale stroom (gemiddeld over alle componenten, 0.01). De op deze wijze berekende bandbreedten worden veroorzaakt door meetfouten en turbulentie.

Om de genormaliseerde gemiddelde primaire stroomverticalen te kunnen vergelijken met het theoretisch logaritmisch snelheidsprofiel, is de vergelijking voor het logaritmisch snelheidsprofiel (verg.1) als volgt genormaliseerd (Soulsby, 1983, Van Rijn 1990):

$$u_z = \frac{u_{*,c}}{\kappa} \cdot \ln\left(\frac{z}{z_0}\right) \quad (1)$$

met:

u_z = stroomsnelheid op hoogte z boven de bodem

$u_{*,c}$ = bodemschuifspanningssnelheid in geval van stroming

$\kappa = 0,4$ (de Von Kármán constante)

z = is de meethoogte boven de bodem

z_0 = de hoogte boven de bodem waarop de stroomsnelheid nul is

de bodemschuifspanningssnelheid $u_{*,c}$, kan als volgt worden herschreven,

3.2 Observaties

In deze paragraaf komen de berekende primaire en secundaire stroomverticalen aan de orde. Doel van de beschouwingen is, het verkrijgen van inzicht in de ruimtelijke variaties in stroompatronen in relatie tot de morfologie.

3.2.1 Stroomverticalen: Elmar versus AZTM

Een selectie van stroomsnelheids- en stroomrichtingsverticalen in de meetpunten 2 en 3 van raai 5 tijdens maximale stroom, is weergegeven in de figuren 6 en 7. Uit deze figuren blijkt het volgende:

- Verschillen in stroomrichting tijdens maximale stroom, tussen Elmar en AZTM kunnen variëren van 0-30°. De richting van de AZTM in het bovenste meetpunt van de verticaal kan 15-25° verschillen van de andere meetpunten in de AZTM-verticaal. Hierbij spelen o.a. oriëntatie en diepgang van het schip een rol;
- Verschillen in gemeten stroomsnelheid tussen Elmar en AZTM variëren van praktisch 0 tot 0,4 m/s. Hierbij dient te worden opgemerkt dat het meten van de Elmar en AZTM verticalen om praktische redenen niet geheel simultaan kon worden uitgevoerd. Dit geldt met name voor één van de stroomverticalen in meetpunt 2 tijdens vloed (15:16-15:32), waarbij de tijdsoverlap tussen Elmar- en AZTM-meting relatief klein is.

Vergelijking van de berekende verticale verdelingen van de primaire (u) en de secundaire stroomcomponenten (v) leidt tot de volgende conclusies (fig. 8 en 9):

- De secundaire stroomcomponent (v): de rotatie van het x,y-stelsel en de gemeten richtingsverschillen in de verticaal zijn bepalend voor de berekende secundaire stroomcomponent. Kleine verschillen in stroomrichting (de vectorrichting) resulteren in grote verschillen in de secundaire stroomcomponent v. De secundaire stroomverticalen van Elmar en AZTM vertonen aanzienlijke verschillen;
- De primaire stroomcomponent (u): verschillen in gemeten stroomsnelheid (de vectorgrootte) leiden tot vergelijkbare verschillen in de primaire component (u). De primaire stroomverticalen van beide instrumenten komen dan ook redelijk overeen.

3.2.2 Primaire stroomverticalen rond maximale eb- en vloedstroom.

In deze paragraaf worden de berekende primaire stroomverticalen besproken. De secundaire stroomverticalen komen alleen in paragraaf 3.2.3 aan de orde, waar de genormaliseerde gemiddelde primaire stroomverticalen samen met de gemiddelde secundaire stroomverticalen worden beschouwd. De afzonderlijke secundaire stroomverticalen blijven buiten beschouwing omdat de verschillen tussen de afzonderlijke verticalen te groot zijn om eenduidige uitspraken te kunnen doen. Ter illustratie zijn de afzonderlijke secundaire stroomverticalen in de meetpunten van raai 3 opgenomen opgenomen in bijlage D.

Primaire stroomverticalen in de Overloop van Valkenisse (raai 3)

De verticale verdelingen van de primaire stroomcomponenten in de meetpunten 1 tot en met 5 zijn weergegeven in de figuren 10 t/m 14. Uit deze figuren blijkt dat er een ruimtelijke differentiatie in de eb/vloed dominantie van de primaire stroomsnelheden rond maximale stroom bestaat:

- Zowel meetpunt 1 als meetpunt 2, beiden gelegen in de buitenbocht, is duidelijk

vloeddominant in de primaire stroomcomponent. Dit blijkt onder andere uit de verticaal gemiddelde stroomsnelheden, in de legenda aangeduid als V_{gem} ;

- de meetpunten 4 en 5, gelegen in de binnenbocht, zijn in tegenstelling tot de meetpunten 1 en 2, ebdominant in de primaire stroomcomponent;
- in meetpunt 3 is gemiddeld de eb-gerichte u-component sterker dan de vloed-gerichte u-component terwijl $\bar{u}_{max,vl} = 1,34$ m/s net iets groter is dan $\bar{u}_{max,eb} = 1,21$ m/s.

Behalve deze ruimtelijke variatie in eb/vloed dominantie valt tevens op dat, uitgezonderd meetpunt 4, de temporele variatie in primaire stroomsnelheden groter is tijdens maximale vloedstroom dan tijdens maximale ebstroom: de getijstroom is rond maximale vloedstroom minder quasi-stationair dan rond maximale ebstroom.

Primaire stroomverticalen in het Zuidergat (raai 5)

De verticale verdelingen van de primaire stroomcomponenten in de meetpunten van raai 5 zijn weergegeven in de figuren 15 t/m 19. Uit deze figuren blijkt het volgende:

- de meetpunten 1 en 2 zijn beiden ebdominant met betrekking tot de verticale verdeling van de primaire stroomcomponent. De verschillen tussen de vier stroomverticalen in meetpunt 1 tijdens vloedstroom (positieve en negatieve waarden) worden waarschijnlijk veroorzaakt door fouten in de gemeten richting;
- meetpunt 3 is, in mindere mate, eveneens ebdominant;
- meetpunt 4 en 5, in de binnenbocht, zijn duidelijk vloeddominant waarbij het verschil tussen eb en vloed het grootst is in meetpunt 5.

De meetpunten 2, 3, 4, en 5 vertonen, net als de meetpunten in raai 3, een grotere temporele variatie in primaire stroomsnelheden tijdens maximale vloedstroom dan tijdens maximale ebstroom.

3.2.3 Genormaliseerde en gemiddelde primaire stroomverticalen en gemiddelde secundaire stroomverticalen rond maximale eb- en vloedstroom.

De Overloop van Valkenisse

De genormaliseerde en gemiddelde primaire stroomverticalen zijn samen met de gemiddelde secundaire stroomverticalen weergegeven in de figuren 20 t/m 23. Meetpunt 1 wordt hier buiten beschouwing gelaten omdat de waterdiepte zeer gering is en de standaarddeviaties in de gemiddelde waarden van z/h relatief groot zijn. In deze figuren kan het volgende worden waargenomen:

- *meetpunt 2.* De verticale verdeling van de primaire componenten wordt gekenmerkt door een vormverschil tussen eb en vloed: tijdens eb is er sprake van een logaritmisch snelheidsprofiel terwijl dit tijdens vloed niet het geval is. De grootste standaarddeviaties treden op nabij de bodem. De secundaire stroomcomponenten zijn tijdens eb alleen in de bovenste helft van de verticaal ($z/h > 0.4$) significant. Deze componenten zijn naar de buitenbocht gericht. Tijdens vloed is alleen dicht bij de bodem ($z/h = 0-0.2$) een kleine significante stroomcomponent aanwezig;
- *meetpunt 3.* De standaarddeviaties van de primaire stroomcomponenten zijn klein. De vloedstroom wordt benaderd door een steiler logaritmisch snelheidsprofiel dan de ebstroom. Zowel tijdens de eb- als de vloedstroom is er sprake van een sterke secundaire dwarscomponent. Tijdens de ebstroom is de, naar de buitenbocht gerichte, stroomcomponent significant in de gehele verticaal. Tijdens de vloedstroom is de secundaire stroomcomponent boven $z/h = 0.2$ significant groter dan nul, en naar de binnenbocht gericht;

- *meetpunt 4.* Net als in meetpunt 3 is er in meetpunt 4 ook sprake van een vormverschil in de primaire stroomverticaal: tijdens vloed bestaat er een tendens naar een steiler logaritmisch stroomprofiel dan tijdens eb. Tijdens maximale ebstroom is er een relatief sterke, naar de buitenbocht gerichte secundaire stroming aanwezig. Tijdens vloed verschilt de secundaire stroomcomponent niet significant van nul;
- *meetpunt 5.* Opvallend in meetpunt 5 zijn de afwijkende vorm van de primaire stroomverticaal tijdens vloed, en de grote standaarddeviaties. Deze zijn het gevolg van de relatief grote vormverschillen tussen de afzonderlijke genormaliseerde stroomverticalen. Tijdens eb is er sprake van een logaritmisch snelheidsprofiel. Ook in meetpunt 5 is er sprake van een naar de buitenbocht gerichte secundaire stroming tijdens maximale ebstroom. Tijdens vloedstroom is dit niet het geval;

Het Zuidergat

In de figuren 24 t/m 28 zijn de genormaliseerde en gemiddelde primaire stroomverticalen en de gemiddelde secundaire stroomverticalen weergegeven. Uit deze figuren blijkt het volgende:

- *meetpunt 1.* De primaire stroomcomponent tijdens maximale vloedstroom vertoont een wat grilliger patroon met grotere standaarddeviaties dan tijdens de ebstroom. De secundaire componenten zijn nauwelijks significant: tijdens ebstroom is er op $z/h=0.35$ een naar de binnenbocht gerichte stroomcomponent. Tijdens maximale vloedstroom is er zowel boven als onderin de verticaal een kleine naar de buitenbocht gerichte dwarscomponent ($z/h=0.12$ en $z/h=0.77$);
- *meetpunt 2.* De primaire stroomverticaal tijdens maximale vloedstroom wijkt af van het logaritmisch snelheidsprofiel. Voor de stroomverticaal tijdens ebstroom is dit niet het geval. De secundaire component tijdens vloedstroom is in een groot deel van de verticaal ($z/h=0-0.75$) significant en naar de buitenbocht gericht. Tijdens maximale ebstroom is er sprake van een naar de buitenbocht gerichte component boven in de verticaal, en een naar de binnenbocht gerichte component nabij de bodem;
- *meetpunt 3.* Tijdens maximale vloedstroom wijkt de primaire stroomcomponent boven in de verticaal iets af van het logaritmisch snelheidsprofiel. De secundaire stroomcomponent is tijdens de ebstroom alleen bovenin significant groter dan nul. Deze stroomcomponenten zijn naar de buitenbocht gericht. Ook tijdens vloed is er sprake van een naar de buitenbocht gerichte secundaire stroomcomponent;
- *meetpunt 4.* Zowel tijdens vloed- als tijdens ebstroom komt de vorm van de primaire stroomverticaal vrij goed overeen met het logaritmisch snelheidsprofiel. De standaarddeviaties zijn onder en boven in de verticaal het grootst. Tijdens ebstroom is er nagenoeg geen sprake van een significante secundaire stroming. Tijdens vloed is dit alleen onderin de verticaal het geval. De stroomcomponent is daar naar de buitenbocht gericht.
- *meetpunt 5.* De primaire stroomverticalen vertonen een vormverschil waarbij de verticaal tijdens ebstroom afwijkt van het logaritmisch snelheidsprofiel. Een significante secundaire stroomcomponent is alleen tijdens vloedstroom aanwezig ($z/h=0.37$).

3.3 Discussie

3.3.1 De primaire stroomverticalen tijdens maximale eb- en vloedstroom

Primaire stroomcomponenten in relatie tot de morfologie

In paragraaf 3.2.2 is gebleken dat de eb/vloeddominantie van de primaire stroomcomponenten morfologie gebonden is: in raai 3 zijn de primaire stroomverticalen tijdens maximale stroom in de meetpunten 1 en 2 (buitenbocht) vloeddominant en in de meetpunten 3, 4 en 5 (binnenbocht) ebdominant. In raai 5 zijn de primaire stroomverticalen in de meetpunten 1, 2 en 3 ebdominant en in de meetpunten 4 en 5 vloeddominant. Deze verschillen in eb/vloeddominantie, zowel binnen één raai als tussen de twee raaien 3 en 5, suggereren dat de ruimtelijke variatie in eb/vloeddominantie bepaald wordt door de richting van de getijstroom in relatie tot de meandergeometrie. Het beeld zou er als volgt uit kunnen zien:

In de uitloop van het Nauw van Bath, zal t.g.v. de bochtstroming de ebstroom zich in de buitenbocht concentreren (fig.29). Als gevolg hiervan zal ter hoogte van de drempel van Valkenisse de ebstroom het sterkst zijn langs de platen. Dit effect, waarbij de sterkste stroom zich concentreert langs de Platen van Valkenisse, blijft waarschijnlijk merkbaar tot aan het inscharende ebgeultje (A in fig.29). In het relatief rechte gedeelte van de bocht tot aan het inscharende vloodschaartje in de buitenbocht, zal naar verwachting in het gehele dwarsprofiel de ebstroom dominant zijn, waarbij de ebstroom zich concentreert in de buitenbocht. Ter hoogte van het vloodschaartje (B in figuur 29) is de stroom waarschijnlijk vloeddominant in de buitenbocht, en ebdominant in de binnenbocht. Voorbij het vloodschaartje zal de ebstroom ten gevolge van de bochtstroming (de centrifugale kracht) zich concentreren in de buitenbocht en het diepere geulgedeelte, waar de getijstroom ebdominant is.

Tijdens vloedstroom treedt een inverse procesgang op: het water dat vanaf Hansweert het Valkenisse-gebied binnen stroomt verdeelt zich ter hoogte van de drempel van Hansweert over de nevengeulen (40%) en de hoofdgeul (60%). In het Zuidergat concentreert de getijstroom zich langs de Platen van Valkenisse. Vergeleken met de ebdominante buitenbocht kan de vloedstroom in de binnenbocht (absoluut) sterker zijn dan de vloedstroom in de buitenbocht. Dit blijkt uit de primaire stroomverticalen van raai 5. Ter hoogte van het inscharende vloodschaartje is de vloedstroom het sterkst in de buitenbocht, waar de getijstroom naar verwachting vloeddominant is. Ook in het relatief rechte middenstuk is de hoofdstroom geconcentreerd in de buitenbocht, maar zal daar minder sterk zijn dan de ebstroom. Na het waarschijnlijk, ebdominante middenstuk concentreert de vloedstroom zich in de buitenbocht van de Overloop van Valkenisse ten gevolge van bochtstroming. De maximale stroomsnelheden in de buitenbocht zijn beduidend groter dan de maximale stroomsnelheden in de binnenbocht. Op de drempel van Valkenisse verdeelt de getijstroom zich over de uitloop van het Nauw van Bath en de vloodschaar Schaar van de Noord, waarbij de stroomsnelheden in de uitloop van het Nauw van Bath beduidend kleiner zullen zijn dan tijdens de ebstroom.

De bandbreedtes van de genormaliseerde gemiddelde stroomverticalen

De berekende bandbreedtes geven de "fouten"-marge om de berekende stroomverticaal weer, waarbij de "fouten"-marge veroorzaakt wordt door meetfouten en door turbulentie. Wanneer de bandbreedtes om de berekende stroomverticaal bekend zijn, is het mogelijk om uitspraken te doen over significante vormverschillen: wijkt de berekende stroomverticaal wel of niet af van het theoretisch logaritmisch snelheidsprofiel, treden er wel of geen vormverschillen in stroomverticaal op tussen de verschillende meetpunten. Het is echter niet

mogelijk om basis van dit type stroommetingen, de bijdrage van de turbulentie aan de bandbreedte te bepalen. Om turbulentie te kunnen meten zal gebruik moeten worden gemaakt van een electromagnetische stroommeter, waarbij tijdens het meten gedurende 10 tot 15 minuten op één meethoogte gemeten moet worden, zodat betrouwbare statistiek kan worden uitgevoerd op de "bursts".

De relatieve bandbreedten om de primaire stroomverticalen zijn per meetpunt gemiddeld over de verticaal. De gemiddelde waarde per verticaal is bepaald door, per gemiddelde relatieve meethoogte de relatieve fout te berekenen en deze vervolgens rekenkundig te middelen over de verticaal. De resultaten zijn samengevat in tabel 3.

Tabel 3. Relatieve bandbreedtes om de genormaliseerde gemiddelde stroomverticalen

band(%)	mp32	mp33	mp34	mp35	mp51	mp52	mp53	mp54	mp55
U'eb	15±10	5±2	7±4	3±2	17±11	6±5	5±2	9±6	9±4
U'vloed	9±5	6±2	10±3	28±19	21±6	11±5	6±2	9±4	6±2

Uit tabel 3 blijkt dat de meeste bandbreedtes rond de 10 procent liggen. De uitschieters kunnen veroorzaakt zijn door meetfouten, maar ook door een plotselinge toename in turbulentie.

De vorm van de genormaliseerde gemiddelde stroomverticalen

Rond maximale eb-en vloedstroom kan de getijstroom als quasi-stationair worden beschouwd. Op basis van deze quasi-stationairiteit is te verwachten dat de gemeten en de berekende primaire stroomverticalen het logaritmisch snelheidsprofiel benaderen.

Voor de meeste primaire stroomverticalen blijkt deze verwachting te kloppen. Afwijkingen van het logaritmisch snelheidsprofiel treden echter op in de meetpunten 2 van zowel raai 3 als raai 5 tijdens maximale vloedstroom: de genormaliseerde stroomsnelheden bovenin de verticaal zijn kleiner dan op grond van een logaritmisch snelheidsprofiel te verwachten is. In meetpunt 2 van raai 5 treden ook onderin de verticaal afwijkingen op: hier zijn de stroomsnelheden groter dan in het geval van een logaritmisch snelheidsprofiel. In meetpunt 5 van raai 5 treedt tijdens ebstroom eveneens een afwijking van het logaritmisch snelheidsprofiel op: de stroomsnelheden boven in de verticaal zijn groter dan in het logaritmisch snelheidsprofiel. De afwijking van het logaritmisch snelheidsprofiel blijken ook uit het feit dat in deze meetpunten op $z/h \approx 0.37$ de genormaliseerde stroomsnelheid significant afwijkt van één.

Doordat de stroomverticalen vóór het middelen zijn genormaliseerd is de temporele variatie in stroomsnelheden in de opeenvolgende stroomverticalen geëlimineerd. De afwijkingen van het logaritmisch snelheidsprofiel suggereren echter dat er sprake zou kunnen zijn van versnellingen en vertragingen. In geval van stroomversnelling zullen de stroomsnelheden boven in de verticaal kleiner zijn dan door het logaritmisch snelheidsprofiel wordt voorspeld. In een vertragende stroom zullen de stroomsnelheden boven in de stroom groter zijn, dan door het logaritmisch snelheidsprofiel wordt voorspeld. Dit wordt veroorzaakt door de traagheid van de stroom, die verder van de bodem groter wordt (Soulsby en Dyer, 1981). Stroomversnellingen zijn echter niet beperkt tot de sinusvormige tijdsafhankelijkheid van het getij. Volgens Soulsby en Dyer (1981) kunnen aanzienlijke stroomversnellingen optreden ten gevolge van kortdurende (10 minuten) variaties in stroomsnelheid. In de meetpunten 2 speelt dit effect mogelijk een rol doordat de tijdsduur, waarin één verticaal gemeten wordt, 20 tot 25 minuten bedraagt. In meetpunt 5 is dit effect

minder waarschijnlijk doordat de tijdsduur van één verticaalmeting ongeveer 10 minuten bedraagt.

Een tweede effect dat een rol zou kunnen spelen bij de afwijkingen van het logaritmisch snelheidsprofiel, is de aanwezigheid van horizontale en verticale stratificatie. Stratificatie kan ontstaan door gradiënten in zoutgehalte, temperatuur en/of sedimentconcentraties (Soulsby, 1983). Verticale dichtheidsstratificatie kan leiden tot grotere vloedstroomsnelheden in de diepste gedeelten van de geul, m.n. in de onderste helft van de verticaal. Nabij het oppervlak en in ondiepere gedeelten van de geul zullen de vloedstroomsnelheden kleiner zijn. Tijdens ebstroom treedt een invers patroon op (Dronkers, 1986). Als er sprake zou zijn van verticale stratificatie dan zijn de grootste verschillen in dichtheid te verwachten in de diepe geulen, zoals in meetpunt 2 in raai 5. Echter, in dit meetpunt zijn helaas geen saliniteitsmetingen uitgevoerd. In meetpunt 3, waar de waterdiepte beduidend kleiner is ($h_3 = 1/3h_2$), zijn wél saliniteitsmetingen uitgevoerd (bijlage E). Uit deze metingen blijkt dat in meetpunt 3 tijdens maximale stroom de dichtheidsverschillen in één verticaal gering zijn, 0.1 kg/m^3 . De verschillen in dichtheid tussen de verticalen tijdens maximale stroom zijn een factor tien groter. De temporele variatie in dichtheid gedurende de 13-uurs meting, op bijvoorbeeld 1 meter boven de bodem en 1 meter beneden het wateroppervlak, zijn nog iets groter: 2 kg/m^3 en ruim 2.5 kg/m^3 . In hoeverre deze temporele variaties in dichtheid de genormaliseerde primaire stroomverticalen kunnen beïnvloeden is nog niet duidelijk. Wél is het waarschijnlijk dat in meetpunt 2 van raai 5 een eventuele verticale dichtheidsstratificatie groter zal zijn dan in meetpunt 3, en dat het effect van stratificatie niet bij voorbaat mag worden verwaarloosd.

3.3.2 De secundaire stroomverticalen tijdens maximale eb- en vloedstroom

Secundaire stroming in estuaria - theorie

Secundaire stroming is gedefinieerd als de stroom die loodrecht staat op de hoofdstroom en als verticaal gemiddelde waarde, de waarde nul heeft (De Vriend, 1977, De Vriend en Struiksma, 1983). In estuaria ontstaat secundaire stroming ten gevolge van de centrifugale kracht, werkzaam in bochten. Naast deze centrifugale kracht, levert de rotatie van de aarde, die zich manifesteert als de Coriolis versnelling, een belangrijke bijdrage in het ontstaan van secundaire stroming. De coriolis kracht, het produkt van versnelling en massa, resulteert op het noordelijk halfrond in een naar rechts gerichte dwarscomponent die loodrecht staat op de stroomrichting.

Volgens Booij en Kalkwijk, (1983 en 1986) is de secundaire stroming (v) een combinatie van de centrifugale kracht en de coriolis kracht, waarbij beide krachten elkaar niet beïnvloeden:

$$v_n = v_n^b + v_n^c \quad (8)$$

v_n is de secundaire stroming loodrecht op de hoofdstroom, v_n^b is de secundaire stroming ten gevolge van de centrifugale kracht, en v_n^c is de secundaire stroming ten gevolge van de coriolis kracht. Uit afleidingen van Booij en Kalkwijk (1983, 1986), en De Vriend (in Booij en Kalkwijk 1983, 1986) blijkt dat de vergelijking voor de secundaire stroomsnelheid ten gevolge van bochtstroming als volgt kan worden weergegeven:

$$v_n^b = \frac{\bar{u}_s}{\kappa^2} \cdot \frac{h}{R} f_b\left(\frac{z}{h}, \alpha\right) \quad (9)$$

met:

$\bar{u}_s$ = de verticaal gemiddelde stroomsnelheid in de hoofdstroomrichting

κ = de Von Kármán constante (0.4)
 h = de waterdiepte
 R = bochtstraal

f_b is een gecompliceerde functie van de verticale coördinaat (z/h) en een wrijvingsparameter (α). Voor de stroming ten gevolge van de coriolis versnelling geldt (Booij en Kalkwijk, 1983 en 1986),

$$v_n^c = -\text{teken}(\bar{u}_s) \cdot \frac{\Omega \cdot h}{\kappa^2} f_c\left(\frac{z}{h}, \alpha\right) \quad (10)$$

met:

$\Omega = \pm 2\omega \sin \phi$ = de coriolis parameter $\approx 1.14 \cdot 10^{-4}$ rad/s

κ = de Von Kármán constante (0.4)

h = de waterdiepte

Het "teken" heeft betrekking op de richting van de getijstroom (bv. ebstroom positief en vloedstroom negatief). Ook in deze vergelijking is f_c een gecompliceerde functie van de hoogte boven de bodem (z/h) en een wrijvingsparameter. Belangrijke verschillen tussen v_n^b en v_n^c zijn: (1) de stroming veroorzaakt door de coriolisversnelling (v_n^c) is, in tegenstelling tot de stroming ten gevolge van de centrifugale kracht (v_n^b), onafhankelijk van de stroomsnelheid in de hoofdstroomrichting ($\bar{u}_s$). (2) De stroming ten gevolge van de coriolis versnelling verandert van richting met de hoofdstroomrichting. Consequenties van deze verschillen zijn: (a) bij lagere stroomsnelheden is de bijdrage van de coriolis versnelling relatief belangrijk, en (b) afhankelijk van de richting van de getijstroom in relatie tot de meandergeometrie zullen de stroomcomponenten elkaar in het ene geval (eb/vloed) kunnen versterken en in het andere geval elkaar tegenwerken. Het relatieve belang van de coriolis-component kan als volgt worden afgeschat (Booij en Kalkwijk, 1983):

$$\left| \frac{v_n^c}{v_n^b} \right| = \left| \frac{\Omega \cdot R}{\bar{u}_s} \right| \cdot \left| \frac{f_c}{f_b} \right| = \frac{1}{2} \cdot \left| \frac{\Omega \cdot R}{\bar{u}_s} \right| \quad (11)$$

Dit betekent bijvoorbeeld dat, wanneer $\Omega \approx \pm 1.14 \cdot 10^{-4}$ rad/s, $R = 5$ km en $\bar{u}_s = 1.2$ m/s, de stroomcomponenten ongeveer even groot zijn.

In de volgende paragraaf wordt geprobeerd de observaties, voor zover mogelijk, te koppelen aan de theorie.

Secundaire stroming in estuaria - observaties

Alvorens in te gaan op de observaties, zal eerst nader worden ingegaan op de definitie van secundaire stroming. De definitie van secundaire stroming, zoals gedefinieerd door De Vriend (1977) en De Vriend en Struiksmá (1983), betekent in de praktijk dat de richtingen van de secundaire stroomcomponenten loodrecht staan op de verticaal gemiddelde stroomrichting. Doordat de verticaal gemiddelde stroomrichting ruimtelijke, maar ook temporele variaties vertoont maakt dit het vergelijken en middelen van de secundaire stroomverticalen praktisch onmogelijk. Immers, wanneer de definitie voor secundaire stroming strikt gehandhaafd wordt zal voor iedere variatie in gemiddelde stroomrichting, de berekende secundaire stroomverticaal in een ander vlak komen te liggen. Hierdoor is het middelen van verticalen niet meer geoorloofd en kan geen inzicht worden verkregen in de bandbreedte om de secundaire stroomverticaal.

Bij de berekeningen van de secundaire stroomcomponenten is er, ten onrechte, vanuitgegaan dat de secundaire stroomcomponenten loodrecht op de morfologie staan: alle

componenten zijn berekend in het vlak dat loodrecht op de locale oriëntatie van de geul-as staat. Gevolg van deze keuze is, dat hiermee indirect wordt aangenomen dat de verticaal gemiddelde richting van de ebstroom een oriëntatie heeft van 347° in raai 5, en 255° in raai 3. De vloedstroom zou een precies tegenovergestelde richting moeten hebben. Om na te gaan voor welke meetpunten deze aanname nog reëel is, zijn voor ieder meetpunt de verticaal gemiddelde stroomrichtingen tijdens maximale ebstroom en tijdens maximale vloedstroom rekenkundig gemiddeld. Die meetpunten waarbij deze gemiddelde stroomrichting niet meer dan 3 graden afwijkt van de locale geulas oriëntatie worden verondersteld nog representatief te zijn voor het berekenen van de stroomcomponenten op die specifieke locatie. De gemiddelde waarden zijn samengevat in tabel 4. Op basis van het bovengenoemde criterium worden alleen de meetpunten met vetgedrukte richtingen in de beschouwing meegenomen.

Tabel 4. Gemiddelde, verticaal gemiddelde stroomrichtingen gedurende maximale stroom

richting	mp51	mp52	mp53	mp54	mp55	mp32	mp33	mp34	mp35
eb	348	349	337	350	346	247	238	232	244
vloed	262*	177	175	174	164	73	67	77	78

*eb raai 5"= 347° , "vloed raai 5"= 167° , "eb raai 3"= 255° , "vloed raai 3"= 75°

*=onwaarschijnlijk grote temporele variaties in verticaal gemiddelde stroomrichting

In figuur 30 is het dwarsprofiel van raai 5 weergegeven met daarin de secundaire stroomcomponenten die significant van nul verschillen. Voor de afzonderlijke meetpunten is de waterstand bepaald door de gemeten waterdiepte tijdens maximale stroom rekenkundig te middelen over de tijd. Opvallend is de variatie in waterstanden tussen de verschillende meetpunten. Het waterstandsverval in het tijdsbestek 6:00-8:40 uur is in figuur 30 weergegeven door h_0 en h_1 . Het waterstandsverschil tussen de meetpunten 1, 4 en 5 is gezien het verloop in de tijd nog reëel. Voor meetpunt 2 ligt dat anders: het moment van maximale ebstroom valt later, maar de gemiddelde waterstand is hoger. Waarschijnlijk wordt dit veroorzaakt doordat de Elmar-meetvis tengevolge van de sterke stroming niet recht onder het schip hangt. Hierdoor is de gebruikte kabellengte langer, met als gevolg een overschatte waterdiepte.

Uit het beeld van de secundaire stroomcomponenten blijkt dat er aanwijzingen zijn voor de aanwezigheid van een helicoidale beweging, waarbij in het "diepste" punt van de geul de stroming aan het oppervlak naar de buitenbocht is gericht en vlak bij de bodem naar de binnenbocht is gericht. Dicht bij de bodem levert de coriolisversnelling een positieve bijdrage aan de secundaire stroomcomponent, bovenin de verticaal is de bijdrage van de coriolis versnelling negatief. Wanneer met behulp van formule 11 de verhouding tussen de coriolis kracht en de centrifugale kracht wordt afgeschat, dan geldt in meetpunt 2:

$v_n^c = -0.24 v_n^b$ ($R=5\text{km}$ en $\bar{u}=1.18\text{m/s}$). In de meetpunten 1 en 4 is er sprake van een relatief kleine, naar de binnenbocht gerichte dwarscomponent.

Het dwarsprofiel van raai 3 is weergegeven in figuur 31. Ook hier treden waterstandsvariaties op, en lijkt het er op dat de werkelijke meetpositie van meetpunt 2 tijdens de meting meer in de buitenbocht lag dan in het dwarsprofiel is weergegeven. Dit zou mede veroorzaakt kunnen zijn door de sterke vloedstroom: 1.4-1.8m/s op 1 meter onder het wateroppervlak.

Het secundaire stroombeeld is minder bevestigend dan het stroombeeld in raai 5: alleen in meetpunt 2 is er in de onderste vier meter van de verticaal een naar de binnenbocht gerichte secundaire stroming. Boven in verticaal zijn de gemiddelde secundaire stroomcomponenten zeer klein en bovendien niet significant groter dan nul. Dit zou kunnen

betekenen dat de secundaire stroming gecompenseerd wordt door een verticale neerwaartse stroomcomponent om de continuïteit in de verticaal te handhaven. In meetpunt 2 is de verhouding tussen de bijdrage van de coriolis kracht en de centrifugale kracht: $v_n^c = 0.19 v_n^b$. De secundaire stroomcomponent in meetpunt 4 is nauwelijks significant groter dan nul ($\sigma = 0.0004 \text{ m/s}$).

Uit voorgaande discussie blijkt dat het berekenen van de secundaire stroomverticalen minder eenvoudig is dan het lijkt. Het verloop van de gyrotol, waarvoor zo goed mogelijk gecorrigeerd wordt, maakt het moeilijk om op basis van één enkele gemeten stroomverticaal een betrouwbare secundaire stroomverticaal te berekenen. Bij het berekenen van een secundaire stroomverticaal is het van belang om eerst na te gaan of de richtingvariaties en -correcties binnen één verticaal reëel zijn. Vervolgens moet de verticaal gemiddelde richting d.m.v. numerieke integratie worden bepaald. De richting loodrecht op deze verticaal gemiddelde richting bepaald vervolgens de richting van de secundaire stroomcomponent. De secundaire stroomverticaal is redelijk betrouwbaar wanneer de verticaal gemiddelde secundaire stroming bij benadering gelijk is aan nul ($v < 0.05 \text{ m/s}$). De bandbreedten om de secundaire stroomcomponenten blijven echter onbekend.

Om toch op een zinnige wijze inzicht te krijgen in de bandbreedte om de secundaire stroomverticaal, kan alleen worden uitgegaan van de metingen tijdens maximale eb- en vloedstroom, waarbij de stroming als quasi-stationair kan worden beschouwd. Vervolgens zal voor vier tot vijf verticalen een gemiddelde, verticaal gemiddelde stroomrichting moeten worden bepaald waarna wordt aangenomen dat de secundaire stroming optreedt in het vlak loodrecht op deze gemiddelde, verticaal gemiddelde stroomrichting. Belangrijk hierbij is dat de temporele variatie in de verticaal gemiddelde stroomrichting zo klein mogelijk is. Naast de beperking in de tijd (quasi-stationariteit), is er ook sprake van een ruimtelijke beperking: de secundaire stroomcomponenten van de verschillende meetpunten zullen zelden in exact hetzelfde vlak liggen, wat op grond van de theoretisch helicoïdale beweging ook niet te verwachten is.

4 Sedimenttransport-metingen in het Valkenisse-gebied

4.1 Gegevens verwerking

4.1.1 Concentratieverticalen, stroomverticalen en transportverticalen.

Om diepte-geïntegreerde transporten te kunnen berekenen moeten de concentraties en stroomsnelheden aan het oppervlak en dicht bij de bodem bekend zijn. Deze waarden zijn echter niet gemeten waardoor aannamen moeten worden gedaan omtrent de waarden van deze variabelen. Bij de verwerking van de gemeten stroomverticalen, concentratieverticalen en transportverticalen worden door de meetdienst de volgende aannamen gedaan (fig.32): de stroomverticalen hebben aan het oppervlak dezelfde waarde als het bovenste meetpunt in de verticaal ($u_0 = u_{0,1}$). De stroomsnelheid aan de bodem is gelijk aan nul ($u_b = 0 \text{ m/s}$). Voor de concentratieverticalen geldt dat de concentratie aan het oppervlak gelijk is aan nul ($c_0 = 0 \text{ mg/l}$). De concentratie aan de bodem wordt berekend door lineaire extrapolatie van de onderste twee meetpunten in de verticaal. Voor de transportverticalen geldt dat de transporten aan het oppervlak gelijk worden gesteld aan de helft van het transport gemeten in het bovenste meetpunt ($T_0 = \frac{1}{2} T_{0,1}$). Het bodemtransport wordt berekend door lineaire extrapolatie vanuit de onderste twee meetpunten. De keuze van deze aannamen komt in paragraaf 4.3.4 nog ter discussie.

4.1.2 Normalisatie van enkele concentratieverticalen rond maximale stroom

De vorm van de concentratieverticaal kan extra informatie verschaffen over de processen die een rol spelen bij het ontstaan van de specifieke concentratieverticaal. Om de vorm van de concentratieverticaal te kunnen evalueren is het nodig om de gemeten concentratieverticaal te normaliseren en te vergelijken met een genormaliseerde theoretische concentratieverticaal. Bij de normalisatie worden de meethoogte en de gemeten concentraties dimensieloos gemaakt door respectievelijk te delen door de waterdiepte en door een referentie-concentratie. De theoretisch concentratieverticaal wordt eveneens uitgedrukt in een dimensieloze concentratie en een dimensieloze meet- en waterdiepte.

Om de gemeten concentratieverticalen te kunnen normaliseren moeten de gemeten concentraties gedeeld worden door een referentie-concentratie. De definitie van de referentieconcentratie is van belang omdat deze de uiteindelijke vorm van de genormaliseerde gemeten en theoretische concentratieverticaal beïnvloedt. Bij de normalisatie is uitgegaan van de volgende operationele definitie: de referentie concentratie is de concentratie op een hoogte boven de bodem van $a=0.05h$ (Van den Berg en Van Gelder, in voorbereiding).

Deze definitie van c_a leidt echter tot een beperkte toepassing: het meetdiepte-schema tijdens de AZTM-metingen is slechts in enkele meetpunten geschikt om c_a te berekenen door interpolatie van gemeten concentraties. De volgende meetpunten lenen zich voor normalisatie: meetpunt 2 in het Zuidergat (eb en vloed), meetpunt 10 in de Schaar van Waarde (eb en vloed), meetpunt 11 in de Schaar van Valkenisse (vloed), meetpunt 8 in de Zimmermangeul (eb en vloed).

De theoretisch concentratieverticaal is gebaseerd op de Rouse-verdeling (Dyer, 1986):

$$\frac{c_z}{c_a} = \left(\frac{h-z}{z} \cdot \frac{a}{h-a} \right)^Z \quad (12)$$

met,

c_z = de concentratie op hoogte z boven de bodem

c_a = de referentieconcentratie

h = de waterdiepte

z = de meethoogte boven de bodem

a = de hoogte boven de bodem waar de referentieconcentratie is gedefinieerd

$Z = w_s / \beta \kappa u_*$, het suspensiegetal met,

w_s = de valsnelheid van het gesuspendeerde sediment

$\beta = 1 + 2(w_s / u_{*c})^2$

$u_{*c} = g^{0.5} \bar{u} / (18 \log(12h/k_s))$, de bodemschuifspanningssnelheid

In vergelijking 12 zijn de waterdiepte, de meethoogte en de hoogte van de referentieconcentratie genormaliseerd door te delen door de waterdiepte. De vergelijking ziet er dan als volgt uit,

$$\frac{c_z}{c_a} = \left(\frac{1 - \frac{z}{h}}{\frac{z}{h}} \cdot \frac{0.05}{1 - 0.05} \right)^Z = (0.0526 \left(\frac{h}{z} - 1 \right))^Z \quad (13)$$

Het suspensiegetal Z is voor de betreffende meetpunten berekend waarbij voor h en $\bar{u}$ de actuele waarden zijn ingevuld, terwijl voor w_s één vaste waarde en voor k_s twee extreme

waarden zijn aangenomen: $w_s = 0.015 \text{ m/s}$, $k_s = 0.01 \text{ m}$ en $k_b = 1 \text{ m}$. De aanname voor w_s is gebaseerd op berekeningen van w_s volgens de vergelijking in bijlage F.

De op deze wijze verkregen genormaliseerde concentratieverticalen zullen worden besproken in paragraaf 4.2.2.

4.1.3 Diepte-geïntegreerde transporten en de totaal transporten gedurende eb en vloed

De verticaal gemiddelde concentratie, stroomsnelheid, en het transport worden berekend door numerieke integratie volgens de trapezium-regel, waarna gedeeld wordt door de gemiddelde waterdiepte. Het diepte-geïntegreerde transport per verticaal (kg/ms) wordt bepaald door numerieke integratie van de transportverticaal over de waterdiepte (volgens de trapezium-regel).

De totaal transporten voor eb en vloed (kg/m) zijn berekend door het diepte-geïntegreerde transport (kg/ms) per verticaal te vermenigvuldigen met de tijdsduur (in seconden) van de verticaalmeting en deze transporten voor zowel de eb- als de vloedstroom te sommeren. Om de verschillende meetpunten te kunnen vergelijken is de tijdsduur van de 13-uurs metingen gelijk gemaakt met de kortste 13-uurs meting (12,43 uur = 12 uur en 25 min.) door middel van interpolatie: de overige metingen duurden net één of twee verticaalmetingen langer waardoor de totale transporten in de betreffende meetpunten ten onrechte groter zijn dan in het meetpunt met de kortste meetduur.

4.1.4 Het berekenen van sedimenttransporten volgens Engelund-Hansen en Van Rijn

Om een beter inzicht te krijgen in de voorspelkracht van sedimenttransportformules in estuariumgeulen, zijn sedimenttransporten berekend volgens de methode van Engelund-Hansen en volgens Van Rijn.

Engelund-Hansen

De formule van Engelund-Hansen is gebaseerd op energie beschouwingen en ziet er als volgt uit (van Rijn, 1989),

$$q_t = \frac{0.05 \cdot (\bar{u})^5}{(s-1)^2 \cdot g^{0.5} \cdot d_{50} \cdot C^3} \quad (14)$$

Hierin is q_t het totale sedimenttransport (m^2/s), $\bar{u}$ is de verticaal gemiddelde stroomsnelheid (m/s), C is de Chézy-coëfficiënt ($\text{m}^{0.5}/\text{s}$), d_{50} is de mediane korrelgrootte (m), s is de specifieke dichtheid (-) en g is de zwaartekrachtversnelling (m/s^2). De berekende transporten, zowel volgens Engelund-Hansen als Van Rijn, zijn omgerekend tot waarden in kg/m.s door te vermenigvuldigen met de sedimentdichtheid ($\rho = 2650 \text{ kg/m}^3$).

Van Rijn

De sedimenttransportformule van Van Rijn maakt onderscheid tussen het suspensief transport en het bodemtransport (Van Rijn, 1989):

$$q_t = q_s + q_b \quad (15)$$

$$q_s = F \cdot \bar{u} \cdot h \cdot c_a \quad (16)$$

$$q_b = 0.053 \cdot [(s-1) \cdot g]^{0.5} \cdot d_{50}^{1.5} \cdot D^{-0.3} \cdot T^{2.1} \quad (17)$$

met (zie tevens bijlage F):

F = een vormfactor (-)

$\bar{u}$ = de verticaal gemiddelde snelheid (m/s)

h = de waterdiepte (m)

c_s = de referentieconcentratie (-)

s = de specifieke dichtheid (-)

g = de zwaartkrachtversnelling (m/s²)

d_{50} = de mediane korrelgrootte (m)

D_s = een korrel parameter (-)

T = de bodemschuifspanning parameter (-).

De berekende transporten volgens Engelund-Hansen en Van Rijn berusten op een aantal aannamen en beperkingen:

- In de formule van Van Rijn wordt gebruik gemaakt van een representatieve korreldiameter en een gradatiecoëfficiënt (d_s en σ , zie tevens bijlage F) waarvoor de d_{84} en d_{16} bekend moeten zijn. Omdat deze fractiegegevens niet beschikbaar zijn is gebruik gemaakt van de benadering $d_s = 0.8d_{50}$ in het geval dat $T < 25$ (Van Rijn, pers.com.), en $d_s = d_{50}$ in het geval dat $T \geq 25$. De aanname in het geval dat $T < 25$ is "geverifieerd" door $\sigma = 2$ te stellen en d_s te berekenen (zie bijlage F) voor de extreme berekende T waarden. Voor deze extreme T -waarden geldt: $d_s = 0.74d_{50}$ ($T = 1.25$) en $d_s = 0.87d_{50}$ ($T = 12.96$);
- Voor de bodemruwheidshoogte k_s is een relatie met de stroomsnelheid aangenomen, zoals deze is voorgesteld door Van den Berg (1987):

$$k_s = 10 \cdot e^{-4.6\bar{u}} \quad 1 \leq \bar{u} \leq 2 \text{ m/s} \quad (18)$$

$$k_s = 0.001m \quad \bar{u} \geq 2 \text{ m/s} \quad (19)$$

Het bereik van de formule is in dit rapport om praktische redenen uitgebreid tot 0,6 m/s, zoals dit ook door Biegel (1991) in navolging van Gerritsen (1990) is gedaan.

- De aanname voor k_s heeft als gevolg dat de berekeningen beperkt zijn tot die verticaalmetingen waarbij $\bar{u} \geq 0.6$ m/s;
- Berekeningen zijn alleen uitgevoerd voor die meetpunten waar betrouwbare sedimenttransporten zijn gemeten: alleen die AZTM-metingen waarvan de correlatiecoëfficiënt van de ijklijn $R^2 > 0.7$ zijn gebruikt om berekende en gemeten waarden met elkaar te vergelijken. Consequentie hiervan is dat de meetpunten 2 en 3 van raai 3 buiten beschouwing blijven ($R^2 < 0.4$).
- Omdat het aantal AZTM-metpunten per geul beperkt is, en omdat bovendien de interesse uitgaat naar ruimtelijke variaties in sedimenttransport binnen één of meerdere geulen, zijn de gemeten en berekende transporten niet geïntegreerd over de geulbreedte, zoals dat door Kruyt (1992) is gedaan.

Om de berekende en de gemeten transporten met elkaar te kunnen vergelijken, zijn de discrepantie-ratio's (berekend/gemeten) berekend. Deze ratio's zijn vervolgens uitgezet als functie van de stroomsnelheid waarbij eb- en vloedstroom van elkaar te onderscheiden zijn

(paragraaf 4.2.4).

4.2 Observaties

In deze paragraaf worden de concentratieverticalen, en de gemeten en berekende transporten besproken. Doel van deze beschouwingen is om na te gaan in hoeverre er sprake is van ruimtelijke variaties in sedimentconcentraties en -sedimenttransporten in relatie tot de waterbeweging en de morfologie. Tevens wordt getracht de voorspelkracht van sediment-transportformules te evalueren.

In de subparagraaf "zandconcentratie- en stroomverticalen rond maximale stroom" valt, naast de meetpunten 2 en 3, ook meetpunt 5 van raai 3 buiten beschouwing. De reden hiervoor is dat de verticaalgegevens van dit AZTM-meetpunt noch op de HP, noch op tape bewaard zijn (waarschijnlijk is er een fout gemaakt tijdens de "back-up"). Meetpunt 5 kon wél bij de totaal transporten betrokken worden doordat in de meetdienst-notities lijsten met diepte-geïntegreerde transporten zijn opgenomen.

4.2.1 Zandconcentratie- en stroomverticalen rond maximale stroom

Bij het bespreken van de concentratieverticalen van de verschillende meetpunten zal kort worden ingegaan op verschillen en overeenkomsten tussen de AZTM-meetpunten onderling, en op verschillen tussen eb en vloed. Uitspraken over eb/vloed-dominantie worden alleen gedaan als de verschillen in verticaal gemiddelde concentraties een factor 2 of groter zijn. De schaalverdelingen van de x-assen in de figuren 33 t/m 40 zijn niet constant omdat dit om praktische redenen niet haalbaar is.

Het Zuidergat

De stroom- en concentratieverticalen zijn weergegeven in de figuren 33 en 34. Uit deze figuren blijkt het volgende:

- De verticaal gemiddelde concentraties in meetpunt 3 zijn, zowel tijdens ebstroom als tijdens vloedstroom, bijna twee keer zo groot als de verticaal gemiddelde concentraties in meetpunt 2. De concentraties in de verticaal in meetpunt 3 zijn tot op een hoogte $z/h=0.7$ groter dan in meetpunt 2. De stroomsnelheden tijdens eb en vloedstroom zijn in meetpunt 3 ook iets groter;
- De menging in de concentratieverticaal van meetpunt 2 is uniform (een minder steile concentratiegradiënt) dan in meetpunt 3 ;
- Meetpunt 5 is duidelijk vloeddominant: de verticaal gemiddelde concentratie is tijdens maximale vloedstroom bijna vijf keer zo hoog als tijdens maximale ebstroom.

De Schaar van Waarde

De stroom- en concentratieverticalen zijn weergegeven in de figuren 35 en 36. Uit deze figuren kan het volgende worden geconcludeerd:

- Evenals meetpunt 3 in het Zuidergat, worden de concentratieverticalen in de Schaar van Waarde tijdens vloedstroom gekenmerkt door hoge concentraties tot hoog in de verticaal. De verticaal gemiddelde concentraties zijn drie keer zo hoog als de concentraties in meetpunt 3, terwijl de stroomsnelheden en waterdiepte in dezelfde orde grootte liggen;
- De meetpunten in de Schaar van Waarde zijn vloeddominant: dit blijkt onder andere uit de verticaal gemiddelde concentraties;

- Tijdens maximale ebstroom vertoont alleen meetpunt 9 nog relatief hoge concentraties in de verticaal. Deze concentraties zijn vergelijkbaar met de concentraties in meetpunt 3. De verticaal gemiddelde stroomsnelheid is in meetpunt 9 echter kleiner dan in meetpunt 3;
- De verticaal gemiddelde concentraties tijdens ebstroom in de meetpunten 10 en 11 zijn vergelijkbaar met de verticaal gemiddelde concentraties in meetpunt 2 in het Zuidergat.

De Schaar van Valkenisse

De verticalen zijn opgenomen in de figuren 37 en 38. De figuren kunnen als volgt worden geïnterpreteerd:

- Meetpunt 11 (dg11), gelegen in de Schaar van Valkenisse, is zowel in sedimentconcentraties als stroomsnelheden duidelijk vloeddominant: de verticaalgemiddelde concentratie tijdens vloed is vergelijkbaar met de concentraties in de Schaar van Waarde. De verticaal gemiddelde stroomsnelheid in de Schaar van Valkenisse ligt echter een fractie hoger;
- In het inscharende ebgeultje (meetpunt 10, dg10) zijn de verschillen in verticaal gemiddelde concentratie gering. Dit geldt ook voor de maximale verticaal gemiddelde stroomsnelheden;
- De concentratieverticaal van meetpunt 11 (dg11) tijdens ebstroom vertoont onderin een concentratieverloop dat weinig overeen lijkt te komen met een theoretisch parabolische concentratieverdeling.

De Zimmermangeul

In de figuren 39 en 40 zijn de stroom- en concentratieverticalen van de meetpunten 6 en 8 van raai 3 weergegeven. Meetpunt 6 ligt in tegenstelling tot meetpunt 8 niet in de geul maar op de plaat. Door technische storingen is de gegevensset van meetpunt 6 beperkt. Uit de figuren blijkt het volgende:

- De Zimmermangeul is vloeddominant. Dit blijkt zowel uit de concentratieverticalen als de stroomverticalen;
- Op de plaat is er nauwelijks verschil in stroomsnelheden en sedimentconcentraties tussen maximale eb- en vloedstroom.

4.2.2 Enkele genormaliseerde concentratieverticalen

De genormaliseerde gemeten concentratieverticalen zijn samen met de genormaliseerde theoretische concentratieverticalen (Rouse-vergelijking) weergegeven in de figuren 41 t/m 44. In deze figuren kan het volgende worden waargenomen:

- *Meetpunt 2 in het Zuidergat*: zowel tijdens ebstroom als tijdens vloedstroom wijkt het gemeten concentratieprofiel af van het theoretisch concentratie profiel, waarbij de afwijkingen het grootst zijn rond maximale vloedstroom. De afwijkingen uiten zich in de hoge relatieve concentraties op de meethoogten groter dan $\pm z/h=0.3$;
- *Meetpunt 10 in de Schaar van Waarde*: rond maximale vloedstroom komen gemeten en theoretische concentratieverticaal goed met elkaar overeen. Tijdens ebstroom zijn de gemeten concentraties hoger dan op grond van het theoretisch concentratieprofiel te verwachten is;
- *Meetpunt 8 in de Zimmermangeul*: de gemeten en theoretische concentraties komen redelijk tot goed overeen. Rond maximale ebstroom zijn de gemeten concentraties in de bovenste meetpunten van de verticaal hoger dan voorspeld door de theoretische concentratieverticaal;

- *Meetpunt 11 in de Schaar van Valkenisse:* de vorm van de gemeten concentratieverticaal komt goed overeen met de theoretische concentratieverticaal ($k_s=0.01m$). Echter, de relatieve concentraties zijn kleiner dan voorspeld door de theoretische concentratieverticaal. Opvallend in dit meetpunt is de hoge referentieconcentratie (1040 mg/l) die bijna een factor twee groter is dan de referentieconcentratie in meetpunt 10 in de Schaar van Waarde (641 mg/l).

4.2.3 Diepte-geïntegreerde zand- en slibtransporten als functie van de tijd

De diepte-geïntegreerde sedimenttransporten van zand en slib, als functie van de tijd, zijn weergegeven in de figuren 45 t/m 47. De figuren kunnen als volgt worden samengevat:

Het Zuidergat en de Schaar van Waarde, raai 5

- Tijdens de ebstroom zijn de zandtransporten in meetpunt 2 het grootst, gevolgd door de meetpunten 3 en 9. De zandtransporten in de overige meetpunten ontlopen elkaar weinig;
- Ook gedurende de eerste drie uur tijdens de vloedstroom is het zandtransport in meetpunt 2 het grootst. Het maximale vloedtransport in meetpunt 2 is iets kleiner dan het maximale ebtransport;
- Na $\pm 14:00$ uur nemen de transporten in de andere meetpunten sterk toe. Dit gebeurt met name in de Schaar van Waarde. Rond 15:00 uur zijn de transporten maximaal. De transporten in de Schaar van Waarde zijn dan ruim drie keer zo groot als de transporten in het Zuidergat. Na deze transportpiek neemt het transport weer net zo snel af als dat het is toegenomen;
- De slibtransporten tijdens ebstroom vertonen een beeld dat vergelijkbaar is met de zandtransporten. Echter, de waarden van de slibtransporten in de meetpunten 2 en 3 liggen iets lager dan de waarden van de zandtransporten. Gedurende de eerste twee uur na hoogwaterkentering (16:30) is het slibtransport in meetpunt 11 het grootst;
- Tijdens vloedstroom treden in meetpunt 2, twee transportpieken op: om 12:00 uur en 15:00 uur. De grootte van de tweede transportpiek is vergelijkbaar met de transportpiek in meetpunt 11.

De Overloop van Valkenisse en de Zimmermangeul, raai 3

- Tijdens ebstroom is het zandtransport in meetpunt 5 groter dan in meetpunt 8. Echter, gedurende de eerste twee uur na de hoogwaterkentering (16:00) is het ebtransport in meetpunt 8 groter dan in meetpunt 5;
- In meetpunt 8 is de transportpiek tijdens vloedstroom ruim vier keer zo groot als de transportpiek tijdens ebstroom. In meetpunt 5 is de vloedtransportpiek meer dan twee keer zo klein als de ebtransportpiek.
- Het transportbeeld in meetpunt 5 is qua eb/vloeddominantie tegenovergesteld aan het transportbeeld van meetpunt 5 in raai 5, dat ook in de binnenbocht is gelegen;
- De slibtransportpieken zijn in meetpunt 5 tijdens ebstroom groter dan tijdens vloedstroom. In meetpunt 3 zijn de transportpieken ongeveer even groot, en meetpunt 2 is de transportpiek tijdens vloedstroom groter dan tijdens ebstroom;
- De ebtransportpiek in meetpunt 2 treedt ruim twee uur later op dan in dan de overige meetpunten. Meetpunt 8 heeft waarschijnlijk twee transportpieken: na hoogwaterkentering treedt er rond 16:30 ook een transportpiek op;
- Tijdens vloedstroom is er sprake van twee transportpieken. In drie meetpunten treedt de maximale transportpiek op tussen 14:30 uur en 15:00 uur. Meetpunt 2 vormt een

uitzondering: het maximale vloedtransport vindt even voor 12:00 uur plaats.

De Schaar van Valkenisse en het inscharend ebgeultje

- Tijdens ebstroom zijn de zandtransporten van het inscharende ebgeultje (meetpunt 10, dg10) het grootst. Tijdens vloedstroom zijn de transporten in de Schaar van Valkenisse (meetpunt 11, dg11) het grootst: de schaar is duidelijk vloeddominant;
- Beide meetpunten worden tijdens vloedstroom gekenmerkt door twee transportpieken. In meetpunt 10 (dg10) is het verschil in grootte van deze transportpieken niet zo groot. In meetpunt 11 (dg11) is dit wél het geval. De transportpiek in meetpunt 11 is nog iets groter dan de transportpieken in de Schaar van Waarde;
- Het slibtransport in meetpunt 10 (dg10) is extreem groot: gedurende langere tijd is het twee maal zo groot als het zandtransport;
- Het slibtransport in de Schaar van Valkenisse (dg11) is beduidend kleiner.
- Ook het slibtransport wordt tijdens vloedstroom gekenmerkt door twee duidelijke transportpieken. De maximale vloedpiek groter is dan de ebpiek;

4.2.4 Het totale zand- en slibtransport tijdens eb en vloed

De totale slib en zandtransporten per meetpunt, tijdens eb- en vloedstroom zijn weergegeven in figuur 48. Hierbij dient het volgende te worden opgemerkt: een totaal ebtransport is gedefinieerd als de som van transporten waarbij de vectoren van de verticaal gemiddelde stroomsnelheden aan de zeewaartse zijde van de raai liggen. Uit dit figuur blijkt het volgende:

- *Het Zuidergat (Zu2, Zu3 en Zu5)*. De zandtransporten in de meetpunten 2 en 3 zijn ebdominant, waarbij de transporten in meetpunt 2 het grootst zijn. Het zandtransport in meetpunt 5 is vloeddominant. Het slibtransport is in meetpunt 2 ebdominant. Het verschil in slibtransporten tussen eb en vloed is in meetpunt 3 gering. In meetpunt 5 is het slibtransport vloeddominant;
- *De Schaar van Waarde (Sw9, Sw10, Sw11)*. De zandtransporten zijn vloeddominant en praktisch even groot als het vloedtransport in meetpunt 2. De vloedtransporten zijn 2 tot 4 keer zo groot als de ebtransporten. Het verschil tussen eb en vloed is het grootst in meetpunt 10. De verschillen in slibtransport tussen eb en vloed zijn gering, en vergelijkbaar met de verschillen in meetpunt 3 in het Zuidergat;
- *Overloop van Valkenisse (Ov2, Ov3 en Ov5)*. In meetpunt 5 is het zandtransport ebdominant: het transport tijdens eb is vijf keer zo groot als tijdens vloed. Het verschil in slibtransport tussen eb en vloed is in de meetpunten 2 en 3 klein, en vergelijkbaar met de meetpunten 9, 10 en 11 van raai 5. In meetpunt 5 is er sprake van een ebdominant slibtransport;
- *Schaar van Valkenisse (Sv11)*. De grootste vloedtransporten vinden plaats in de Schaar van Valkenisse: het vloedtransport is hier bijna net zo groot als het ebtransport in meetpunt 2 van raai 5. Het verschil in slibtransport tussen eb en vloed is vergelijkbaar met meetpunt 9 in de Schaar van Waarde;
- *Het inscharende ebgeultje (Sv10)*. Opvallend in dit "ebgeultje" is, dat de zandtransporten tijdens eb en vloed bij benadering even groot zijn. De slibtransporten zijn verdacht groot: een factor drie groter dan in het Zuidergat, waar het slibtransport relatief groot is! Tevens is het verschil in slibtransport tussen eb en vloed klein (paragraaf 4.3.4).
- *De Zimmermangeul (Zi8)*. Het zandtransport in de Zimmermangeul is vloeddominant: de transporten tijdens vloed zijn twee keer zo groot als tijdens eb. De slibtransporten zijn

tijdens eb en vloed nagenoeg even groot;

4.2.5 Berekende en gemeten sedimenttransporten

In de figuren 49 t/m 57 zijn de transportdiscrepantie-ratio's per meetpunt als functie van de verticaal gemiddelde stroomsnelheid weergegeven. Tevens is in deze figuren onderscheid gemaakt tussen de eb- en de vloedstroom. In totaal zijn voor de negen AZTM-locaties 161 transporten berekend volgens de methode van Van Rijn en de methode van Engelund-Hansen. Voor beide methoden is nagegaan:

- Hoeveel procent van het totaal aantal berekeningen, waarbij $\bar{u} \geq 0.6$ m/s, binnen het bereik $T(\text{berekend})/T(\text{gemeten}) = 0.5-2$ valt; het percentage van de berekende transporten dat een factor twee onderschat wordt, en; het percentage berekende transporten dat met een factor twee overschat wordt. Tevens is nagegaan wat het aandeel van de vloedstroom is, en wat dat van de ebstroom is;
- Hoeveel procent van de waarnemingen, waarbij $\bar{u} \geq 1$ m/s binnen het voorspelbereik $T(\text{berekend})/T(\text{gemeten}) = 0.5-2$, $T(\text{berekend})/T(\text{gemeten}) < 0.5$ en $T(\text{berekend})/T(\text{gemeten}) > 2$ valt.

De resultaten zijn samengevat in de tabellen 5 t/m 8.

Tabel 5. Voorspellingspercentages van Van Rijn

discrepantie-bereik	0.5-2	<0.5	>2
N	63	90	8
totale percentage	39	56	5
aandeel % vloed (N=75)	22	23	1
aandeel % eb (N=86)	17	33	4

Tabel 6. Voorspellingspercentages van Van Rijn waarbij $\bar{u} \geq 1$ m/s

discrepantie-bereik	0.5-2	<0.5	>2
N	18	6	6
totale percentage	60	20	20
aandeel % vloed (N=15)	50	16.7	6.7
aandeel % eb (N=8)	10	0.3	13.3

Tabel 7. Voorspellingspercentages van Engelund-Hansen.

discrepantie-bereik	0.5-2	<0.5	>2
N	97	54	10
totale percentage	60	34	6
aandeel % vloed (N=75)	22	20	5
aandeel % eb (N=86)	38	14	1

Tabel 8. Voorspellingspercentages van Engelund-Hansen waarbij $\bar{u} \geq 1$ m/s.

discrepantie-bereik	0.5-2	<0.5	>2
N	13	16	10
totale percentage	43.3	53.3	3.3
aandeel % vloed(N=22)	30	30	3.3
aandeel % eb (N=8)	13.3	13.3	0

Uit de figuren 49 t/m 57 en de tabellen 5 t/m 8 blijkt het volgende:

- De berekende discrepantie-ratio's voor de formule van Van Rijn wordt gekenmerkt door een trend, waarbij de berekende transporten worden onderschat bij lage stroomsnelheden en worden overschat bij hoge stroomsnelheden. Deze trend is ook geconstateerd door Voogt et.al. (1991);
- Wanneer alle berekende transporten, waarbij $\bar{u} \geq 0.6$ m/s, in beschouwing worden genomen blijkt de voorspelkracht van de methode van Engelund-Hansen groter te zijn dan de methode van Van Rijn: 60 procent van de berekende ratio's volgens de Engelund-Hansen methode ligt binnen het discrepantiebereik van 0.5 tot 2. Voor de methode van Van Rijn is dit 39 procent. De methode van Van Rijn onderschat het totale transport in sterkere mate dan de methode van Engelund-Hansen. "De winst" van Engelund-Hansen zit in de berekeningen tijdens ebstroom: het percentage van de discrepantie-ratio's dat binnen het bereik van 0.5 tot 2 valt is aanzienlijk hoger dan dat van Van Rijn;
- Wanneer alleen de transporten, waarbij $\bar{u} \geq 1$ m/s, in beschouwing worden genomen blijkt de voorspelkracht van de formule van Van Rijn (60 % in het bereik 0.5-2) groter te zijn dan de formule van Engelund-Hansen (43.3% in het bereik 0.5-2).

De voorspellingspercentages per meetpunt ($\bar{u} \geq 0.6$ m/s), waarbij het discrepantie-ratio binnen het bereik van 0.5 tot 2 valt, zijn samengevat in tabel 9.

Tabel 9. Voorspellingspercentages per meetpunt waarbij $T(\text{berekend})/T(\text{gemeten})=0.5-2$.

meetpunt	N _{totaal}	VR	EH
Zuidergat mp2	19	21	0
Zuidergat mp3	20	55	70
Zuidergat mp5	6	50	83
Sch.v.Waarde mp9	24	46	71
Sch.v.Waarde mp10	9	22	33
Sch.v.Waarde mp11	13	23	54
Zimmermangeul mp8	11	18	27
Sch.v.Valkenisse mp10	27	52	87
Sch.v.Valkenisse mp11	31	41	78

N=aantal berekende transporten per meetpunt

VR=methode van Van Rijn, EH=methode van Engelund-Hansen

Uit deze tabel blijkt dat in de meetpunten 2 en 10 van raai 5 en meetpunt 8 van raai 3 de voorspellingswaarden voor beide methoden lager zijn dan 50 procent: de berekende transporten worden meer dan een factor twee onderschat. In de overige meetpunten ligt de voorspellingspercentages van Englund-Hansen 25 tot 37 procent hoger dan de voorspellingspercentages van Van Rijn.

4.3 Discussie

4.3.1 Stroom- en concentratieverticalen en genormaliseerde concentratieverticalen

Uit de gemeten stroom- en concentratieverticalen en de genormaliseerde concentratieverticalen rond maximale eb- en vloedstroom is het volgende gebleken:

- De absolute concentraties, zowel verticaal gemiddeld als de verticale verdeling van concentraties, worden gekenmerkt door ruimtelijke variaties: meetpunt 2 in het Zuidergat wordt enerzijds gekenmerkt door een lage verticaal gemiddelde concentratie, en anderzijds door een minder steile concentratiegradiënt (de concentratieverticaal is beter gemengd). De meetpunten in de Schaar van Waarde en de Schaar van Valkenisse daarentegen, worden gekenmerkt door hoge verticaal gemiddelde concentraties en een steilere concentratiegradiënt. Ook tussen de meetpunten 3 en 5 in het Zuidergat en de meetpunten in de Schaar van Waarde, waar waterdiepten en stroomsnelheden rond maximale vloedstroom vergelijkbaar zijn, zijn de verschillen in absolute concentraties groot (tijdens vloedstroom een factor 3).
- Wanneer de genormaliseerde concentratieverticalen worden beschouwd valt meetpunt 2 in het Zuidergat eveneens op door de afwijkende vorm van de genormaliseerde concentratieverticaal: de genormaliseerde gemeten concentraties in de bovenste helft van de concentratieverticaal, zijn rond maximale vloed- en ebstroom groter dan voorspeld door de genormaliseerde parabolische Rouse-kromme.

Ruimtelijke variaties in absolute concentraties

Bij de verschillen in absolute concentratie kunnen twee effecten een belangrijke rol spelen:

1. *De beschikbaarheid van sediment in de bodem en de samenstelling van het gesuspendeerde sediment.* Wanneer de beschikbare hoeveelheid sediment in de bodem gering is zal de hoeveelheid gesuspendeerd sediment in de verticaal, zich uitend in de verticaal gemiddelde concentratie, ook gering zijn. Een relatief fijne en uniforme sedimentsamenstelling kan resulteren in een uniformere concentratieverticaal.

Uit geologisch onderzoek in de bocht van Walsoorden (Jelgersma, rapport 10107, 1974) is gebleken dat op een diepte van 28-30 meter beneden NAP een zeer stug Boven-Pliocene kleipakket voorkomt met een minimum dikte van twee meter. Deze Boven-Pliocene klei ligt ter plaatse van meetpunt 2 nagenoeg aan het oppervlak. Door de resistentie van de klei komt er uit de bodem waarschijnlijk weinig sediment vrij dat beschikbaar is voor sedimenttransport, wat kan resulteren in een lage verticaal gemiddelde concentratie. Het materiaal dat vrij komt zal relatief fijn en uniform van samenstelling zijn waardoor het makkelijk in de verticaal wordt verspreid, met als mogelijk gevolg een uniformer concentratieprofiel.

Ook de verschillen in absolute concentraties tussen de meetpunten 2 en 3 in het Zuidergat en de meetpunten in de Schaar van Waarde worden waarschijnlijk veroorzaakt door het sedimentaanbod: (1) in de inloop van de Schaar van Waarde vonden in 1990 stortingen van baggerspecie plaats, (2) de Schaar van Waarde is sterk vloeddominant,

waardoor in combinatie met het "doodlopende" karakter van de schaar, een relatieve "ophoping" van sediment kan ontstaan.

2. *Stroomsnelheden in relatie tot de waterdiepte.* Absolute sedimentconcentraties in de verticaal en verticaal gemiddelde concentraties zullen op locaties waar de waterdiepte groot is, lager zijn dan op locaties waar de waterdiepte kleiner is en de stroomsnelheid hetzelfde is.

De waterdiepte in meetpunt 2 van het Zuidergat is bijna drie keer zo groot als de waterdiepte op de andere locaties in raai 5, terwijl de stroomsnelheden in dezelfde orde grootte liggen. Om in meetpunt 2 vergelijkbare absolute concentratieverticalen te krijgen zal de stroomsnelheid in meetpunt 2 groter moeten zijn dan in de ondiepere meetpunten, en zal tevens het sedimentaanbod toereikend moeten zijn.

Ruimtelijke variatie in genormaliseerde (relatieve) concentraties

Het verschil in genormaliseerde concentratieverticaal tussen meetpunt 2 en de overige meetpunten, hangt mogelijk samen met de aanwezigheid van een helicoïdale beweging in het Zuidergat.

Een naar de binnen- of buitenbocht gerichte secundaire stroming zal op grond van continuïteit gecompenseerd moeten worden door een tegenovergesteld gerichte secundaire stroming en/of een verticale stroomcomponent. Wanneer er sprake is van een verticale stroomcomponent beïnvloedt deze stroomcomponent de valsnelheid van het gesuspendeerde materiaal, die van invloed is op de concentratieverticaal: in geval van een neerwaartse verticale stroomcomponent zal de valsnelheid van het gesuspendeerde sediment (w_s) groter zijn dan wanneer de verticale stroomcomponent afwezig is. Deze grotere valsnelheid zal resulteren in lagere sedimentconcentraties in de verticaal. Een opwaartse verticale stroomcomponent resulteert in een kleinere valsnelheid en hogere sedimentconcentraties.

Op basis van figuur 30 (paragraaf 3.3.2) is het niet mogelijk om na te gaan of de horizontale secundaire stromingen naar de binnen- en buitenbocht elkaar volledig compenseren. Oorzaak hiervoor is het ontbreken van stroomcomponenten in de verticaal: het is niet mogelijk om basis van de berekende stroomcomponenten een secundaire stroomverticaal te tekenen. Om het belang van verticale stroomcomponenten te kunnen afschatten, zijn enkele genormaliseerde concentratieverticalen berekend waarbij de valsnelheid (w_s) varieert, terwijl k_s per figuur constant is gehouden (zie fig.58). Uit figuur 58 blijkt het volgende:

- Een kleinere valsnelheid leidt tot hogere sedimentconcentraties in de gehele concentratieverticaal (fig.58a);
- Wanneer k_s groter wordt (fig.58b) treden de grootste veranderingen in relatieve concentraties op in de concentratieverticaal met de kleinste valsnelheid van het gesuspendeerde materiaal ($w_s = 0.01$ m/s, opwaartse verticale stroomcomponent).

Een kleinere valsnelheid (w_s), in combinatie met een $k_s = 1$ m, resulteert in een theoretische concentratieverticaal die redelijk goed overeenkomt met de gemeten concentratieverticaal. De concentraties in de bovenste helft van de verticaal worden echter nog steeds onderschat terwijl de concentraties in de onderste helft worden overschat.

Omdat de verschillen tussen gemeten en theoretische concentratieverticaal het grootst zijn in de bovenste helft van de verticaal, is tevens nagegaan wat het effect is van een parabolisch constante mengcoëfficiënt op de vorm van de theoretische concentratieverticaal.

Wanneer uit wordt gegaan van een parabolisch constante mengcoëfficiënt (ϵ_t) in plaats van een parabolische mengcoëfficiënt, ziet de vergelijking voor de theoretisch concentratieverticaal er als volgt uit (Van Rijn, 1989),

$$\frac{c}{c_a} = \left(\frac{h-z}{z} \cdot \frac{a}{h-a} \right)^z \quad \text{voor } z/h < 0.5 \quad (20)$$

$$\frac{c}{c_a} = \left(\frac{a}{h-a} \right)^z \cdot (e)^{4Z(\frac{z}{h}-0.5)} \quad \text{voor } z/h \geq 0.5 \quad (21)$$

met,

c_z = de concentratie op hoogte z boven de bodem

c_a = de referentieconcentratie

h = de waterdiepte

z = de meethoogte boven de bodem

a = de hoogte boven de bodem waar de referentieconcentratie is gedefinieerd

$Z = w_s / \beta u$, het suspensiegetal met,

w_s = de valsnelheid van het gesuspenseerde sediment

$\beta = 1 + 2(w_s / u_{*c})^2$

$u_{*c} = g^{0.5} \bar{u} / (18 \log(12h/k_s))$, de bodemschuifspanningssnelheid

De vergelijkingen 19 en 20 zijn op dezelfde wijze genormaliseerd voor de waterdiepte als de Rouse vergelijking (zie paragraaf 4.1.2), waarbij het suspensiegetal Z is berekend door de actuele waarden voor h en $\bar{u}$ te gebruiken.

Het resultaat is weergegeven in figuur 59. Wanneer figuur 59 wordt vergeleken met figuur 58 blijkt dat, de relatieve concentratie van het bovenste meetpunt in de verticaal ($z/h = 0.95$) nog iets beter overeenkomt met het theoretisch profiel, wanneer uit wordt gegaan van een parabolisch constante mengcoëfficiënt en een $k_s \approx 1m$.

Samenvattend kan het volgende worden geconcludeerd: de ruimtelijke variatie in genormaliseerde concentratieverticalen, waarbij de concentraties in de bovenste helft van de concentratieverticaal van meetpunt 2 worden onderschat, wordt waarschijnlijk veroorzaakt door de aanwezigheid van een opwaartse verticale stroomcomponent. Deze opwaartse verticale stroomcomponent zou het gevolg kunnen zijn van de helicoïdale beweging, waarbij een horizontaal secundair stromingspatroon ontstaat, waarvan het secundair debiet in de bovenste helft van de verticaal groter is dan het secundair debiet in de onderste helft van de verticaal. Om de continuïteit in de verticaal te kunnen handhaven ontstaat er verticale opwaartse stroomcomponent. Deze opwaartse stroomcomponent resulteert in kleinere effectieve valsnelheid van het gesuspenseerde sediment, waardoor de concentraties in met name de bovenste helft van de verticaal relatief hoog zijn.

De genormaliseerde gemeten concentratieverticaal in meetpunt 2 wordt het best benaderd door een theoretische concentratieverticaal die gebaseerd is op een parabolisch constante mengcoëfficiënt.

4.3.2 Diepte-geïntegreerd zand- en slibtransporten als functie van de tijd

Wanneer de zand- en slibtransporten worden beschouwd als functie van de tijd, dan blijkt dat er tijdens vloedstroom een duidelijke transportpiek optreedt, die in sommige meetpunten vooraf wordt gegaan door een kleinere transportpiek. Deze transportpieken treden op, op het moment dat de plaatgebieden net zijn ondergelopen. Soortgelijke pieken treden ook op in de verticaal gemiddelde stroomsnelheden (fig. 60), waarbij bovendien de maximale vloedstroomsnelheden bij een hogere waterstand ($h \approx 2.2m + \text{NAP}$) optreden dan de maximale ebstroomsnelheden ($h \approx 0.5m + \text{NAP}$, afhankelijk van de totale waterdiepte). Ook de

maximale stroomsnelheden tijdens vloed worden vooraf gegaan door een kleinere piek in de stroomsnelheden die drie tot vier uur eerder optreedt dan de maximale stroomsnelheidspiek. Tussen deze twee stroomsnelheidspieken in, nemen de stroomsnelheden iets af (fig 60).

Het twee-piekenkarakter van de vloedstroom, dat zich uit in de stroomsnelheden en sedimenttransporten als functie van de tijd, hangt waarschijnlijk samen met de vervorming van de getijgolf wanneer deze het estuarium binnendringt: de astronomische getijgolf die vanaf de Noordzee het estuarium binnendringt bestaat uit een groot aantal componenten, waarvan de M_2 -component dominant is. Deze M_2 -component bepaald in belangrijke mate de niet-lineaire processen die optreden wanneer de getijgolf het estuarium binnendringt (Aubrey en Speer, 1985). Eén van deze niet-lineaire processen is de vervorming van de getijgolf, waarbij de duur van de vloedstroom korter wordt en de intensiteit van de vloedstroom groter wordt. De ebstroom daarentegen duurt langer en heeft een lagere intensiteit.

Deze getij-asymmetrie ontstaat doordat tijdens het binnendringen van de getijgolf in het estuarium, dissipatie en overdracht van energie plaatsvindt, waarbij de M_2 -component energie overdraagt naar de harmonische M_4 -component (en in geringe mate naar de M_6 -component). Deze overdracht van energie naar de harmonische M_4 -component wordt veroorzaakt door wrijving, niet-lineaire advectie, continuïteit en interacties met de geul-geometrie (Aubrey en Speer, 1985). Naarmate de getijgolf verder het estuarium binnendringt neemt de asymmetrie van het getij toe door de groei van de harmonische M_4 -component, waarbij de groei beïnvloed wordt door de geometrie van de geulen (Aubrey en Speer, 1985). De relatieve fase van de M_4 -component t.o.v de M_2 -component bepaald welk type getij-asymmetrie optreedt.

Hoe de niet-lineaire processen, zoals het horizontale getij en het sedimenttransport, in het Valkenisse-gebied precies samen hangen met het binnendringen van de getijgolf is niet duidelijk. Wellicht dat de veranderingen in komberging en wrijving een belangrijke rol spelen bij de waargenomen "dip" in de stroomsnelheden en transporten tijdens vloedstroom.

4.3.3 Totale eb- en vloedtransporten

Bij het doen van uitspraken over eb/vloeddominantie van het sedimenttransport moet de lezer er zich van bewust zijn dat ook de gemeten sedimenttransporten gekenmerkt worden door een bandbreedte/foutenmarge. In dit rapport is geen aandacht besteed aan de grootte van deze bandbreedte. Daarom zullen uitspraken over de eb/vloeddominantie op basis van concentratieprofielen en totale zandtransporten alleen worden gedaan wanneer het verschil tussen eb en vloed méér dan een factor anderhalf is (intuïtieve keuze).

De zandtransporten

Het vloeddominante karakter van de Schaar van Waarde uit zich in de totale zandtransporten: voor de drie AZTM-meetpunten 9, 10 en 11, geldt dat de zandtransporten tijdens vloed een factor twee of meer, groter zijn dan de totale transporten tijdens eb. In het Zuidergat is het totale zandtransport in meetpunt 2 ebdominant, en in meetpunt 5 vloeddominant. In meetpunt 3 zijn de verschillen tussen eb en vloed te klein om een uitspraak over de eb/vloeddominantie te doen. Het Zuidergat lijkt met betrekking tot de sedimenttransporten slechts ten dele ebdominant te zijn.

De Schaar van Valkenisse is duidelijk vloeddominant. Het als "ebgeultje" aangeduide meetpunt 10, dat de verbinding vormt tussen de Schaar van Valkenisse en de Overloop van Valkenisse, blijkt alles behalve ebdominant te zijn: de verschillen in totaal zandtransport tussen eb en vloed zijn zeer klein.

In raai 3 zijn alleen in de meetpunten 5 en 8 zandtransportmetingen beschikbaar. De

Zimmermangeul, een vloedschaar, is ten aanzien van de zandtransporten vloeddominant. Meetpunt 5, in de Overloop van Valkenisse is ebdominant.

De slibtransporten

De slibtransporten vertonen een ander beeld: uitspraken over eb/vloeddominantie kunnen alleen worden gedaan voor de meetpunten 2 en 5 in het Zuidergat. In meetpunt 5 is het slibtransport vloeddominant en relatief klein in vergelijking tot de andere meetpunten. In meetpunt 2 is het slibtransport groot en ebdominant. Het relatief grote slibtransport wordt waarschijnlijk veroorzaakt door de grotere beschikbaarheid van slib in de bodem (paragraaf 4.3.1).

Het slibtransport in het "ebgeultje" is verdacht groot: ondanks de geringe waterdiepte (bodem op 8m-NAP) en vergelijkbare stroomsnelheden zou het slibtransport in dit meetpunt twee keer groter zijn dan in het Zuidergat (meetpunt 2). Waarschijnlijk is bij de gegevensverwerking een fout gemaakt, of de Partech heeft niet goed gewerkt: wanneer de waarden die bij ijklijn staan (bijlage B) worden vergeleken met de verticaal gemiddelde concentraties, blijken de verticaal gemiddelde concentraties een factor vijf groter te zijn dan de meetwaarden die bij de ijklijn staan. Tevens blijkt dat de ftu-waarden duidelijk groter zijn dan de meetwaarden, wat in bij de overige ijklijnen niet het geval is. Het lijkt dan ook verstandig om de slibtransporten in het "ebgeultje" buiten beschouwing te laten.

4.3.4 Berekende en gemeten transporten

De gemeten transporten

Het vergelijken van berekende en gemeten transporten vraagt ook om een kritische beschouwing van de gemeten transporten. Met betrekking tot de gemeten transporten zijn er een drietal punten die de gemeten transporten in belangrijke mate beïnvloeden:

1. Tijdens het meten van de sedimenttransporten zijn de verticaalmetingen begonnen op 1 meter boven de bodem, waarna volgens een vast meetdiepteschema de overige meetpunten in de verticaal gemeten zijn. Echter, een belangrijk deel van het totale sedimenttransport treedt op in deze onderste meter. Bovendien is het aandeel in het totale sedimenttransport van deze onderste meter belangrijker naarmate de waterdiepte kleiner wordt;
2. Het aantal sedimentmonsters waarop de ijklijnen gebaseerd zijn is gering. Bovendien vertegenwoordigen de ± 12 sedimentmonsters een relatief klein meetwaardenbereik, dat niet altijd representatief zal zijn voor het meetwaardenbereik in de gehele verticaal;
3. De extrapolatie-aannamen voor de stroomsnelheden, concentraties en transporten aan de bodem en het oppervlak (zie paragraaf 4.1.1) zijn op een aantal punten met elkaar in strijd. Het sedimenttransport op een bepaalde hoogte boven de bodem, is gedefinieerd als het produkt van stroomsnelheid en sedimentconcentratie. Wanneer de stroomsnelheid aan het oppervlak dezelfde waarde krijgt als de stroomsnelheid in het bovenste meetpunt, en de concentratie aan het oppervlak gelijk wordt gesteld aan nul, dan zou volgens de definitie van sedimenttransport, het sedimenttransport aan het oppervlak ook nul moeten zijn. Echter, bij het construeren van de transportverticalen wordt het transport aan het oppervlak gelijk gesteld aan de helft van het transport in het bovenste meetpunt. Een reëler alternatief zou zijn, om de concentratie aan het oppervlak te berekenen door lineaire extrapolatie vanuit de bovenste twee meetpunten, en op basis van deze concentratie het transport aan het oppervlak te berekenen. De keuze van de extrapolatie-aannamen dicht bij de bodem is minder eenvoudig: de stroomsnelheden zijn hier klein,

maar de concentraties zijn hoog (exponentiële toename naar de bodem toe). De gekozen extrapolatie vormt een compromis, waarbij de concentraties onderschat worden wanneer uit wordt gegaan van een concentratieverticaal gebaseerd op een parabolisch constante mengcoëfficiënt.

Om de kwaliteit van sedimenttransportmetingen te vergroten, verdienen de volgende vijf punten aanbeveling:

1. Met in achtneming van een kenteringsvenster, eventuele golfcondities en baggerstortactiviteiten zal er naar gestreefd moeten worden om met de AZTM-verticaalmeting op de bodem te beginnen. Wanneer de omstandigheden het toelaten zou het meetdiepte schema vlak bij de bodem er als volgt uit mogen zien: op de bodem, bodem + 0.5 meter, bodem + 1 meter;
2. De ijkmonsters zouden moeten worden genomen wanneer de AZTM op de bodem staat (de ijkhoogte is dan ± 15 cm boven de bodem).
3. De ijkmonsters (minimaal 12) zouden zo veel mogelijk gedurende maximale stroomcondities (gedurende ± 2 uur) moeten worden genomen, door aan het begin van iedere verticaalmeting (wanneer de AZTM op de bodem staat), een ijkmonster op te pompen.
4. De ijkmonsters dienen voldoende groot te zijn om ook bij geringe concentraties ($< 100\text{mg/l}$) een nauwkeurige gewichtsbepaling (voor de ijklijn) en eventuele korrelgrootte-analyse (voor de bepaling van de effectieve valsnelheid) te garanderen. In de praktijk betekent dit dat de bemonstering met een PFS dient te geschieden (ca. 25l oppompen en zeven over $50\mu\text{m}$ gaas). Met betrekking tot de korrelgrootte-analyse kan ook worden overwogen om de ijkmonsters te analyseren met behulp van een valbuis, zodat korrelgrootteverdeling en valsnelheid tegelijk worden bepaald.
5. De extrapolatie-aanname voor de concentraties aan het oppervlak aan te passen door deze te berekenen op grond van lineaire extrapolatie vanuit de bovenste twee meetpunten, en op basis van deze concentratie het transport te berekenen.

De berekende transporten

Bij het berekenen van sedimenttransporten volgens de formule van Van Rijn blijkt er sprake te zijn van een trend, waarbij in het geval van lage stroomsnelheden ($\bar{u} < 1\text{m/s}$) de sedimenttransporten worden onderschat, terwijl bij hoge stroomsnelheden de transporten worden overschat. Deze trend is ook geconstateerd door Van den Berg en Van Gelder (in voorbereiding). Van den Berg en Van Gelder schrijven deze trend gedeeltelijk toe aan de formulering van de Shields curve: in de transportformule van Van Rijn wordt de Shields curve beschreven aan de hand van een relatie tussen de deeltje parameter D_* en de drempelwaarde voor de initiatie van sedimentbeweging (θ_{cr}). Echter, de oorspronkelijke Shields curve, zoals deze door Van Rijn wordt gebruikt, overschat de drempelwaarde van de mobiliteitsparameter in het geval van fijn zand en silt (Miller, McCave en Komar 1977, in Van den Berg en Van Gelder, in voorbereiding). Volgens Van den Berg en Van Gelder (in voorbereiding) vormt de benadering van Zanke (1987, in Van den Berg en Van Gelder in voorbereiding) een beter alternatief. Deze benadering ziet er als volgt uit (vergelijk met bijlage F)

$$\theta_{cr} = 0.109 D_*^{-0.5} \quad D_* \leq 6 \quad (22)$$

Het effect van deze aanpassing van de drempelwaarde op de berekende sedimenttransporten, is geïllustreerd in figuur 61b. Figuur 61B suggereert dat de aanpassing van theta, volgens vergelijking 22, resulteert in een verminderde onderschatting: het percentage binnen het bereik $T(\text{gemeten})/T(\text{berekend}) < 0.5$, is 13.3 procent lager dan in de

oorspronkelijke berekeningen (fig.61a).

In figuur 61c is tevens weergegeven wat het effect is van de aanname $\sigma=2$ in combinatie met de oorspronkelijke definitie van theta, in plaats van de aanname $d_s=0.8D_{50}$, op de berekende transporten (Van Rijn heeft deze aanname voor σ ook gebruikt voor het toetsen van berekende transporten aan gemeten transporten, Van Rijn, 1984b). Uit figuur 61c blijkt dat het de aanname $\sigma=2$ eveneens leidt tot een verminderde onderschatting: het percentage van de berekeningen dat binnen het bereik $T(\text{gemeten})/T(\text{berekend}) < 0.5$ is 10 procent lager.

Op basis van figuur 61 kan worden geconcludeerd dat het beter lijkt om bij het berekenen van sedimenttransporten volgens de methode van Van Rijn, uit te gaan van: de aanpassing van Θ_c volgens Zanke (in Van den Berg en Van Gelder, in voorbereiding), en $\sigma=2$ te veronderstellen wanneer de fractiegegevens D_{16} , D_{50} , en D_{84} van het gesuspendeerde materiaal niet bekend zijn.

Bij het berekenen van de transporten is de belangrijkste aanname die gedaan is, de aanname voor de ruwheidshoogte (k_s , paragraaf 3.1.2), waarbij bovendien het stroomsnelheidsbereik verlaagd is naar 0.6 m/s. Deze verlaging heeft als gevolg dat de ruwheidshoogte fors toeneemt wanneer de stroomsnelheid kleiner dan 1 m/s wordt. Om na te gaan wat hiervan te consequentie is voor de berekende transporten, is een kleine gevoeligheidsanalyse uitgevoerd, waarbij k_s , $\bar{u}$ en h variëren. De resultaten zijn samengevat in de figuren 62 en 63. Uit deze figuren blijkt het volgende:

- Variaties in ruwheidshoogte leiden volgens de formule van Engelund-Hansen tot vergelijkbare variaties in het berekende transport: hoe groter de ruwheidshoogte, hoe groter het transport. In de formule van Van Rijn is het verband minder duidelijk. In het algemeen kan uit figuur 62 worden geconcludeerd dat berekende transporten, waarbij de ruwheidshoogte gelijk is aan één meter kleiner zijn dan wanneer de ruwheidshoogte tien centimeter is: een grotere ruwheidshoogte resulteert in een kleiner sedimenttransport.
- Een toename in stroomsnelheid resulteert volgens de formule van Engelund-Hansen in een grotere toename en grotere transporten dan volgens de formule van Van Rijn. Dit is logisch omdat in de formule van Engelund-Hansen de stroomsnelheid tot de vijfde macht wordt gebruikt, terwijl in de formule van Van Rijn een macht van ongeveer drieëneenhalf wordt gebruikt;
- Een grotere waterdiepte resulteert in een reductie van de sedimenttransporten: het effect van een variërende waterdiepte is het grootst wanneer de formule van Engelund-Hansen wordt gebruikt in combinatie met een ruwheidshoogte van 0.5 of 1 meter. Wanneer een ruwheidshoogte van 10 centimeter wordt gebruikt, zijn de relatieve transportreducties ten gevolge van een grotere waterdiepte voor beide methoden vergelijkbaar. Verschillen in de absolute grootte van het sedimenttransport worden veroorzaakt door de macht voor de stroomsnelheid.

De formule van Van Rijn blijkt minder gevoelig te zijn voor variaties in stroomsnelheid, en waterdiepte dan de formule van Engelund-Hansen. In het geval dat $h=10\text{m}$ en $\bar{u} \leq 1.2\text{ m/s}$ is de formule van Van Rijn ook minder gevoelig voor variaties in ruwheidshoogte. In het geval dat $h=25\text{m}$ is de formule van Van Rijn, ongeacht de gekozen verticaal gemiddelde stroomsnelheid, minder gevoelig voor de ruwheidshoogte dan de formule van Engelund-Hansen. De ruwheidshoogte is nog altijd een moeilijk te bepalen parameter. Het feit dat de methode van Van Rijn minder gevoelig is voor variaties in deze parameter maakt het gebruik ervan aantrekkelijk. Deze conclusie is bevestigd door Voogt et.al. (1991).

Bij het vergelijken van berekende en gemeten transporten (paragraaf 4.2.5) blijkt dat, in het geval $\bar{u} \geq 0.6\text{ m/s}$, het voorspellingspercentage waarbij $T(\text{berekend})/T(\text{gemeten}) = 0.5-2$, voor de methode van Engelund-Hansen hoger ligt dan voor de methode van Van Rijn (60 versus 39%). Wanneer uit wordt gegaan van het stroomsnelheidsbereik $\bar{u} \geq 1\text{m/s}$, blijkt het

tegenovergestelde het geval te zijn: het percentage $T(\text{berekend})/T(\text{gemeten})=0.5-2$, is 60% voor de formule van Van Rijn en 43.3% voor de formule van Engelund-Hansen (paragraaf 4.2.5 tabel 6 en 8). Deze getallen suggereren dat, bij een hoger stroomsnelheidsbereik de voorspelkracht van de formule van Van Rijn groter is dan de voorspelkracht van de formule van Engelund-Hansen ($\bar{u} \geq 1\text{ m/s}$), en dat de formule van Engelund-Hansen een grotere voorspelkracht heeft in het lagere stroomsnelheidsbereik ($\bar{u} < 1\text{ m/s}$). Deze uitspraak wordt bevestigd door Voogt et.al. (1991).

De opvallend sterke onderschatting van het sedimenttransport in meetpunt 2 van het Zuidergat, zowel door de formule van Engelund-Hansen als door de formule van Van Rijn, wordt mogelijkerwijs veroorzaakt door de afwijkende vorm van de concentratieverticaal: de concentraties in de bovenste helft van de concentratieverticaal zijn groter dan voorspeld door de theoretische concentratieverticaal. Deze hoge concentraties worden waarschijnlijk veroorzaakt door een opwaartse verticale stroomcomponent (paragraaf 3.4.1).

Gezien de kritiekpunten ten aanzien van de gemeten transporten (en de aannamen bij de berekeningen), lijkt het echter verstandig om op basis van de voorspellingspercentages *geen* conclusies te trekken met betrekking tot de voorspelkracht van beide formules.

5. Samenvatting, conclusies en aanbevelingen

5.1 Samenvatting en conclusies

Op 5, 6 en 10 september 1990 zijn in het kader van het Oostwest-project in het Valkenisse-gebied een aantal 13-uurs metingen uitgevoerd. Tijdens deze metingen zijn onder andere stroommetingen en sedimenttransportmetingen uitgevoerd. Dit rapport beoogt een eerste analyse van deze stroom- en sedimenttransportmetingen, met als belangrijkste doelstellingen: (1) het verkrijgen van inzicht in de stroompatronen in relatie tot de morfologie, (2) het herkennen van eventuele ruimtelijke variaties in sedimentconcentraties en -transporten, en (3) het vergelijken van de gemeten transporten met berekende transporten.

De analyse van de stroommetingen is beperkt tot de tien meetpunten, in het Zuidergat en de Overloop van Valkenisse, waarbij de meetpunten zijn verdeeld over twee raaien. Van de stroomverticalen tijdens maximale eb-en vloedstroom (intotaal 8 tot 10 verticalen) zijn primaire en secundaire stroomverticalen berekend. De primaire stroomverticalen liggen in het vlak evenwijdig aan de locale geulas, de secundaire stroomverticalen liggen in het vlak loodrecht op de geulas. Tijdens maximale eb- en vloedstroom kan de stroming als quasi-stationair worden beschouwd. Op basis van deze aanname zijn de primaire stroomverticalen eerst genormaliseerd en vervolgens rekenkundig gemiddeld. De secundaire stroomverticalen zijn direct gemiddeld. Doel van de normalisatie is het verwijderen van temporele variaties in stroomsnelheid. Doel van de middelingsprocedure is het bepalen van de bandbreedte om de stroomverticalen, waarbij de bandbreedte veroorzaakt wordt door meetfouten en door turbulentie. Uit de analyse van de primaire en secundaire stroomverticalen blijkt het volgende:

1. De hoofdgeul wordt gekenmerkt door ruimtelijke variaties in eb-vloeddominantie van de primaire stroomcomponent: in raai 5 zijn de meetpunten in de binnenbocht vloeddominant en in de buitenbocht ebdominant. In raai 3 is de binnenbocht ebdominant en de buitenbocht vloeddominant. Deze verschillen suggereren dat de eb-vloeddominantie bepaald wordt door de richting van de getijstroom in relatie tot de meandergeometrie (paragraaf 3.3.1).
2. De bandbreedtes om de primaire stroomverticalen bedragen ongeveer 10% van de

gemiddelde waarden. De uitschieters kunnen veroorzaakt zijn door meetfouten (in bijvoorbeeld de stroomrichting), maar ook door een plotselinge toename in turbulentie (paragraaf 3.3.1).

3. De meeste primaire stroomverticalen kunnen goed worden benaderd door een logaritmisch snelheidsprofiel. Bij afwijkingen van het logaritmisch snelheidsprofiel kunnen twee effecten een belangrijke rol spelen: (1) het optreden van versnellingen ten gevolge van kortdurende (10 minuten) variaties in stroomsnelheid (Soulsby en Dyer, 1981). Dergelijke variaties kunnen optreden tijdens het meten van één verticaal, m.n. in de diepere geulen waar de gemiddelde tijdsduur van één verticaalmeting 20 tot 25 minuten bedraagt. (2) de aanwezigheid van stratificatie, veroorzaakt door horizontale en/of verticale gradiënten in zoutgehalte, temperatuur en/of sedimentconcentraties (Soulsby, 1983, Dronkers 1986).
4. Secundaire stroming, zoals deze door De Vriend (1977) en De Vriend en Struiksmā (1983) is gedefinieerd, kan op basis van de berekende stroomcomponenten beperkt worden waargenomen: in raai 5 suggereren de significante stroomcomponenten tijdens maximale ebstroom de aanwezigheid van een helicoïdale beweging. In raai 3 wordt alleen in de buitenbocht tijdens maximale vloedstroom een vrij sterke secundaire stroming ($v \approx 0.15$ m/s) in de onderste 4 meter van de verticaal waargenomen (paragraaf 3.3.2).
5. De berekende secundaire stroomcomponenten zijn zeer gevoelig voor kleine variaties in de gemeten stroomrichting. Om de bandbreedte om de secundaire stroomverticalen te kunnen bepalen kan alleen worden uitgegaan van de maximale stroom, omdat alleen dan de stroming als quasi-stationair kan worden beschouwd: om de secundaire componenten te kunnen berekenen moeten eerst de verticaal gemiddelde stroomrichtingen worden berekend. Wanneer de verschillen in verticaal gemiddelde stroomrichting klein zijn (kleiner dan 10°) kunnen deze richtingen rekenkundig worden gemiddeld. Vervolgens kunnen de 4 tot 5 secundaire stroomverticalen worden berekend waarbij wordt aangenomen dat de secundaire stroming optreedt in het vlak loodrecht op de (rekenkundig) gemiddelde stroomrichting. Na de berekening kunnen de verticalen per meethoogte/stroomcomponent worden gemiddeld en kan de standaarddeviatie worden berekend.

De analyse van de sedimenttransportmetingen is gericht op de concentratie- en stroomverticalen rond maximale stroom, de diepte-geïntegreerde sedimenttransporten als functie van de tijd, en de totaal transporten tijdens vloed. Tevens zijn de concentratieverticalen van een viertal meetpunten genormaliseerd, en vergeleken met de theoretische concentratieverticaal (Rouse verdeling). Uit de analyse blijkt het volgende:

1. De absolute concentratieverticalen tijdens maximale stroom worden gekenmerkt door grote ruimtelijke variatie: in de Schaar van Waarde zijn de absolute sedimentconcentraties aanzienlijk hoger dan in het Zuidergat. Dit wordt waarschijnlijk veroorzaakt door de beschikbaarheid van sediment en het duidelijke vloeddominante karakter van de Schaar van Waarde.
2. Meetpunt 2 in het Zuidergat onderscheidt zich van de andere meetpunten door een flauwere concentratiegradiënt en een lagere verticaal gemiddelde concentratie. Deze flauwere concentratiegradiënt uit zich ook in de genormaliseerde concentratieverticaal: in de bovenste helft van de verticaal zijn de concentraties duidelijk groter dan voorspeld door de genormaliseerde theoretische concentratieverticaal (paragraaf 4.1.2 en 4.3.1). Een betere overeenkomst tussen gemeten en theoretische concentratieverticaal wordt verkregen door uit te gaan van een theoretische concentratieverticaal met effectief lagere valsnelheid, een $k_s = 1$ m en parabolisch constante mengcoëfficiënt (paragraaf 4.3.1). De lagere valsnelheid is een aanwijzing voor de mogelijke aanwezigheid van opwaartse verticale stroomcomponent, die veroorzaakt wordt doordat het secundair debiet in de

bovenste helft van de verticaal groter is dan het secundair debiet in de onderste helft van de verticaal.

3. De vloedstroom wordt gekenmerkt door een twee-pieken karakter, dat zich uit in de sedimenttransporten en de verticaal gemiddelde stroomsnelheden als functie van de tijd. Dit twee-piekenkarakter hangt waarschijnlijk nauw samen met niet-lineaire processen, zoals bijvoorbeeld de vervorming van de getijgolf, die optreden wanneer de getijgolf vanaf de Noordzee het estuarium binnendringt (paragraaf 4.3.2).
4. Uit de totale zandtransporten tijdens eb en vloed blijkt, dat de meetpunten in de Schaar van Waarde, de Schaar van Valkenisse, de Zimmermangeul, en meetpunt 5 in het Zuidergat, vloeddominant zijn. Ebdominant zijn meetpunt 2 in het Zuidergat en meetpunt 5 in de Overloop van Valkenisse.
5. Met betrekking tot de slibtransporten, blijkt er alleen in de meetpunten 2 en 5 van het Zuidergat sprake te zijn van eb-vloeddominantie: meetpunt 2 is ebdominant, meetpunt 5 is vloeddominant. Het relatief grote slibtransport in meetpunt 2 hangt waarschijnlijk samen met de grote beschikbaarheid van slib in de bodem (Boven-Plioceen kleipakket).

De gemeten transporten zijn ook vergeleken met berekende transporten. De transporten zijn berekend volgens de methode van Van Rijn, en volgens de methode van Engelund-Hanssen (paragraaf 4.1.4). De belangrijkste aanname die bij het berekenen gedaan is, is de aanname voor k_s ; bij de berekeningen is gebruik gemaakt van het verband tussen k_s en $\bar{u}$, zoals dat door Van den Berg (1987) is voorgesteld. Wanneer de berekende transporten worden vergeleken met de gemeten transporten blijkt het volgende:

1. De berekende sedimenttransporten volgens de formule van Van Rijn worden gekenmerkt een trend, waarbij de transporten in het lage stroomsnelheidsbereik worden onderschat ($\bar{u} < 1\text{ m/s}$) en in het hoge stroomsnelheidsbereik worden overschat ($\bar{u} \geq 1\text{ m/s}$). Deze trend kan gedeeltelijk worden toegeschreven aan de Shields curve: voor fijn zand en slib wordt de drempelwaarde voor de initiatie van sedimentbeweging overschat. De aanpassing van de mobiliteitsparameter volgens Zanke (1987, in Van den Berg en Van Gelder, in voorbereiding) resulteert in een verminderde onderschatting van de berekende sedimenttransporten.
2. De aanname $\sigma = 2$ in combinatie met de oorspronkelijke definitie van θ_{cr} , in plaats van $d_s = 0.8d_{50}$, resulteert eveneens in een verminderde onderschatting van de berekende sedimenttransporten.
3. Het voorspellingspercentage in het stroomsnelheidsbereik $\bar{u} < 1\text{ m/s}$, waarbij $T(\text{berekend})/T(\text{gemeten}) = 0.5-2$, is voor de methode van Engelund-Hanssen hoger (56%) dan voor de methode van Van Rijn (39%). In het hogere stroomsnelheidsbereik ($\bar{u} \geq 1\text{ m/s}$) is de voorspelkracht van de formule van Van Rijn het grootst (60% versus 43.3%). Dit is ook geconstateerd door Voogt et.al. (1991).
4. Beide transportformules onderschatten het sedimenttransport: het voorspellingspercentage waarbij $T(\text{berekend})/T(\text{gemeten}) < 0.5$, is voor Engelund-Hanssen 34 procent, voor Van Rijn is dit 56 procent. Beide formules onderschatten het sedimenttransport in meetpunt 2 van raai 5 in grote mate. Deze grote onderschatting hangt mogelijkerwijs samen met eventuele aanwezigheid van een opwaartse verticale stroomcomponent, waardoor de concentraties in de bovenste helft van de verticaal relatief groot zijn.
5. Uit een kleine gevoeligheidsanalyse voor de parameters k_s , $\bar{u}$ en h , blijkt dat de formule van Van Rijn minder gevoelig lijkt dan de formule van Engelund-Hanssen. Dit wordt bevestigd door Voogt et.al (1991). Tevens blijkt dat Engelund-Hanssen consequent grotere transporten voorspeld wanneer k_s toeneemt, terwijl de formule van Van Rijn in het algemeen lagere transporten voorspeld wanneer k_s toeneemt ($k_s = 0.1-1\text{ m}$).
6. Uitspraken over de voorspellingswaarde van beide formules worden niet gedaan, omdat de

gemeten transporten om drie redenen niet optimaal zijn: (1) de onderste meter van de transportverticaal is niet bekend, (2) het aantal monsters van de ijklijn is gering (12), en (3) de extrapolatie-aannamen voor de concentraties, stroomsnelheden en transporten aan het oppervlak en de bodem, zijn met elkaar in strijd.

5.2 Aanbevelingen

Op basis van deze eerste analyse van stroom- en sedimenttransportmetingen kunnen een aantal aanbevelingen worden gedaan, met betrekking tot in de toekomst uit te voeren metingen en analyses van meetgegevens.

De kwaliteit van sedimenttransport-metingen. De kwaliteit van gemeten sedimenttransporten kan worden vergroot door: (1) met de verticaalmeting op de bodem te beginnen, zodat de zo belangrijke onderste meter van de verticaal ook gemeten wordt, (2) de ijkmonsters te nemen op het moment dat de AZTM op de bodem staat, (3) de ijkmonsters te nemen aan het begin van iedere verticaalmeting rond maximale stroom (6 monsters tijdens maximale ebstroom en 6 tijdens maximale vloedstroom), en (4) de ijkmonsters te nemen met een PFS om ook bij geringe concentraties ($< 100 \text{ mg/l}$) een nauwkeurige gewichtsbepaling en eventuele korrelgrootte-analyse te garanderen, (5) de sedimentconcentratie aan het oppervlak te berekenen op basis van lineaire extrapolatie vanuit de bovenste twee meetpunten in de verticaal, en op basis van deze concentratie het transport te berekenen.

Het bepalen van de bandbreedte om de gemeten concentratie- en transportverticalen. Bij de analyse van sedimenttransportmetingen in de toekomst, dient aandacht te worden besteed aan de bandbreedten om de gemeten concentratie- en transportverticalen. Wanneer de grootte van de bandbreedten bekend is, is het mogelijk om uitspraken te doen over eventuele significante afwijkingen van de concentratieverticaal ten opzichte van een theoretische concentratieverticaal.

Het berekenen van sedimenttransporten. Bij het berekenen van sedimenttransporten volgens de formule van Van Rijn verdient het aanbeveling om uit te gaan van een aanpassing van θ_{cr} volgens Zanke zoals dit door Van den Berg en Van Gelder (in voorbereiding) is voorgesteld. Het gebruik van deze aanpassing voor θ_{cr} leidt tot een verminderde onderschatting van berekende sedimenttransporten (Van den Berg en Van Gelder, in voorbereiding). Wanneer de fractiegegevens D_{16} , D_{50} en D_{84} onbekend zijn lijkt het vooralsnog beter om te rekenen met de aanname $\sigma=2$, in plaats van de aanname $d_s=0.8D_{50}$. De eerste aanname ($\sigma=2$) leidt eveneens tot een verminderde onderschatting van de berekende sedimenttransporten.

De kwantificatie van verticale stroomcomponenten die ontstaan ten gevolge van secundaire stroming. Deze verticale stroomcomponenten beïnvloeden de vorm van de concentratieverticaal en de grootte van de concentraties, en daardoor de gemeten sedimenttransporten. Inzicht in deze verticale stroomcomponent is tevens van belang voor sedimenttransport-formules waarin de valsnelheid van het gesuspendeerde sediment zit verwerkt.

LITERATUURREFERENTIES

- Aubrey and Speer (1985). A Study of Non-linear Tidal Propagation in shallow Inlet/Estuarine Systems. Part I: Observations. *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 21, p.185-205.
- Anonymous, (1984). Een akoestische zandtransportmeter. In: Deltawerken, Driemaandelijks Bericht nummer 108, mei 1984, p. 430-437.
- Berg, J.H. Van den (1987). Konfontatie sedimenttransportformules met metingen van het suspensief zandtransport in de Westerschelde en de Eendracht. Nota ZL-87.0002, 17 p.
- Berg, J.H. Van den, en A. Van Gelder (In voorbereiding). Prediction of suspended bed material transport in flows over silt and very fine sands.
- Biegel, E. (1991). Equilibrium relations in the ebb tidal delta, inlet and backbarrier area of the frisian inlet system. rapport Geopro 1991.028/GWAO-91.016. 79 p.
- Dronkers, J. (1986). Tidal asymmetry and estuarine morphology. *Netherlands Journal of Sea Research* 20 (2/3), p.117-131.
- Dyer, K.R. (1986). Coastal and Estuarine Sediment Dynamics. John Wiley & Sons, Chichester, 342 p.
- Gastel, K. Van (1987). Velocity profiles of tidal currents over sand waves. *Netherlands Journal of Sea Research* 21 (3). p.159-170.
- Gerritsen, (1990). Morphological Stability of Inlets and Channels of the Western Wadden Sea. nota GWAO-90.019, 86 p.
- Jelgersma, 1974. Geologisch onderzoek in de Bocht van Walsoorden. Rapport 10107 RGD Haarlem 3pp. met 2 bijlagen.
- Kalkwijk, J.P.Th., R. Booij (1983). Secondary flow in estuaries due to the curvature of the main flow and to the rotation of the earth and its development. *Geomor nota* 83.05, 38p.
- Kalkwijk, J.P.Th., R. Booij (1986). Adaptation of secondary flow in nearly horizontal flow. *Journal of Hydraulic Research*, vol.24, no. 1, p 19-37.
- Kruyt, N.M. (1992). Berekende en gemeten zandtransporten over dwarsraaien in de Westerschelde. In: Ribbelpatronen en zandtransporten in de Westerschelde. DGW werkdok-92808X, 126 p.
- McCave (1978). Suspended Sediment. In: Dyer (ed.), 1978. *Estuarine Hydrographs and Sedimentation*, p. 131-185.
- Meene, J.W.H. van de (1992). Velocity profiles of tidal and residual currents over the Dutch shoreface connected ridges. Paper prepared for the Oceanology International 92 Conference, March 10-13, Brighton, UK.
- Pieters, T., C. Storm, T. Walhout, T. Ysebaert (1991). Het Schelde-estuarium, méér dan een vaarweg. nota GWWS-91.081, 135p.
- Rijn, L.C. Van (1984b). Sediment Transport, part II: Suspended Load Transport. *Journal of Hydraulic Engineering*, vol. 110, no.11.
- Rijn, L.C. Van (1989). Handbook of sediment transport in currents and waves. Delft Hydraulics, Delft, The Netherlands.
- Rijn, L.C. Van (1990). Principles of fluid flow and surface waves in rivers, estuaries, seas and oceans. Aqua publications, Amsterdam. 334 p.
- RWS,(1990). Meetresultaten Stroom- en Sedimentmetingen Project Oost-West, Westerschelde Debietraai 3. notitie ZLMD-90.N.116
- RWS, (1990). Meetresultaten stroom- en sedimentmeting t.b.v Oost/West-project, Westerschelde raai 5a. Notitie ZLMD-90.N.122.
- RWS, (1990). Stroom- en sedimentmeting t.b.v. Oost/West- project, Westerschelde, diverse geulen. notitie ZLMD-90.N.123
- Soulshby, R.L. (1981). The form of the Near-Bed Velocity Profile in a Tidally Accelerating Flow. *Journal of Geophysical Research*, vol. 86, no. c9, p.8067-8074.
- Soulshby, R.L. (1983). The bottom boundary layer in shelf seas. In: B. Johns (ed.) *Physical Oceanography of Coastal Shelf Seas*. Elsevier, Amsterdam. p.189-266.
- Voogt, L., L.C. Van Rijn, J.H. Van den Berg (1991). Sediment Transport of Fine Sands at High Velocities. In: *Journal of Hydraulic Research*, 15: 37-54.
- Vriend, H.J. De (1977). A mathematical model of steady flow in curved shallow channels. *Journal of Hydraulic Research*, 15: 37-54.

- Vriend, H.J. De, en N. Struiksmā (1983).** Flow and bed deformation in river bends. In: proc. ASCE spec. conf. "Rivers '83", New Orleans: p.810-828.
- Werkgroep Waterbeheer Westerschelde (1989).** Belcidsplan Westerschelde. Deelrapport 4, Morfologische Structuur en Dynamiek. 75p.

Nota NWL-92.17

**EEN ANALYSE VAN STROOM- EN
SEDIMENTTRANSPORTMETINGEN IN
HET OOSTELIJK DEEL VAN DE
WESTERSCHELDE**

Figuren en appendices

auteur: M.C.J.L. Jeuken
datum: 6 april 1992
bijlagen: 63 figuren, 6 appendices

Lijst van figuren

- Fig.1 Locatie van het onderzoeksgebied
1a het Valkenisse-gebied
1b bagger- en stortlocaties in het Valkenisse-gebied
- Fig.2 Locaties van de 13-uurs metingen
- Fig.3 Dwarsprofielen van raai 5
- Fig.4 Dwarsprofielen van raai 3
- Fig.5 Het gebruikte v,u-assenstelsel voor het berekenen van de primaire en secundaire stroomcomponenten.
- Fig.6 Stroomsnelheids- en richtingsverticalen van Elmar en AZTM tijdens maximale stroom in meetpunt 2, raai 5.
- Fig.7 Stroomsnelheids- en richtingsverticalen van Elmar en AZTM tijdens maximale stroom in meetpunt 3, raai 5.
- Fig.8 Primaire en secundaire stroomverticalen volgens Elmar en AZTM in meetpunt 2 van raai 5
- Fig.9 Primaire en secundaire stroomverticalen volgens Elmar en AZTM in meetpunt 3 van raai 5
- Fig.10 Verticale verdeling van de primaire stroomcomponenten in meetpunt 1 van raai 3
- Fig.11 Verticale verdeling van de primaire stroomcomponenten in meetpunt 2 van raai 3
- Fig.12 Verticale verdeling van de primaire stroomcomponenten in meetpunt 3 van raai 3
- Fig.13 Verticale verdeling van de primaire stroomcomponenten in meetpunt 4 van raai 3
- Fig.14 Verticale verdeling van de primaire stroomcomponenten in meetpunt 5 van raai 3
- Fig.15 Verticale verdeling van de primaire stroomcomponenten in meetpunt 1 van raai 5
- Fig.16 Verticale verdeling van de primaire stroomcomponenten in meetpunt 2 van raai 5
- Fig.17 Verticale verdeling van de primaire stroomcomponenten in meetpunt 3 van raai 5
- Fig.18 Verticale verdeling van de primaire stroomcomponenten in meetpunt 4 van raai 5
- Fig.19 Verticale verdeling van de primaire stroomcomponenten in meetpunt 5 van raai 5
- Fig.20 Genormaliseerde gemiddelde primaire stroomverticalen en gemiddelde secundaire stroomverticalen in meetpunt 2 van raai 3
- Fig.21 Genormaliseerde gemiddelde primaire stroomverticalen en gemiddelde secundaire stroomverticalen in meetpunt 3 van raai 3
- Fig.22 Genormaliseerde gemiddelde primaire stroomverticalen en gemiddelde secundaire stroomverticalen in meetpunt 4 van raai 3
- Fig.23 Genormaliseerde gemiddelde primaire stroomverticalen en gemiddelde secundaire stroomverticalen in meetpunt 5 van raai 3
- Fig.24 Genormaliseerde gemiddelde primaire stroomverticalen en gemiddelde secundaire stroomverticalen in meetpunt 1 van raai 5
- Fig.25 Genormaliseerde gemiddelde primaire stroomverticalen en gemiddelde secundaire stroomverticalen in meetpunt 2 van raai 5
- Fig.26 Genormaliseerde gemiddelde primaire stroomverticalen en gemiddelde secundaire stroomverticalen in meetpunt 3 van raai 5
- Fig.27 Genormaliseerde gemiddelde primaire stroomverticalen en gemiddelde secundaire stroomverticalen in meetpunt 4 van raai 5
- Fig.28 Genormaliseerde gemiddelde primaire stroomverticalen en gemiddelde secundaire stroomverticalen in meetpunt 5 van raai 5
- Fig.29 Ruimtelijke variatie in eb-vloeddominantie van de primaire stroomcomponent: getijstroom in relatie tot meandergeometrie.
- Fig.30 Significante secundaire stroomcomponenten in het Zuidergat (raai 5).
- Fig.31 Significante secundaire stroomcomponenten in de Overloop van Valkenisse (raai 3).
- Fig.32 Extrapolatie-aannamen voor het construeren van stroom-, concentratie- en transportverticalen.
- Fig.33 Stroomsnelheid- en concentratieverticalen in het Zuidergat tijdens maximale ebstroom
- Fig.34 Stroomsnelheid- en concentratieverticalen in het Zuidergat tijdens maximale vloedstroom
- Fig.35 Stroomsnelheid- en concentratieverticalen in de Schaar van Waarde tijdens maximale ebstroom
- Fig.36 Stroomsnelheid- en concentratieverticalen in de Schaar van Waarde tijdens maximale vloedstroom
- Fig.37 Stroomsnelheid- en concentratieverticalen in de Schaar van Valkenisse tijdens maximale ebstroom
- Fig.38 Stroomsnelheid- en concentratieverticalen in de Schaar van Valkenisse tijdens maximale vloedstroom
- Fig.39 Stroomsnelheid- en concentratieverticalen in de Zimmermangeul en op de plaat tijdens maximale ebstroom

- Fig.40 Stroomsnelheid- en concentratieverticalen in de Zimmermangeul en op de plaat tijdens maximale vloedstroom
- Fig.41 Genormaliseerde concentratieverticalen in het Zuidergat (meetpunt 2)
- Fig.42 Genormaliseerde concentratieverticalen in de Schaar van Waarde (mp 10)
- Fig.43 Genormaliseerde concentratieverticalen in de Zimmermangeul (mp8)
- Fig.44 Genormaliseerde concentratieverticaal in de Schaar van Valkenisse
- Fig.45 Totale gemeten zand- en slibtransporten als functie van de tijd in de Schaar van Waarde en het Zuidergat
- Fig.46 Totale gemeten zand- en slibtransporten als functie van de tijd in de Overloop van Valkenisse en de Zimmermangeul
- Fig.47 Totale gemeten zand- en slibtransporten als functie van de tijd in de Schaar van Valkenisse en het inscharend ebgeultje.
- Fig.48 Het totale zand- en slibtransport tijdens eb en vloed
- Fig.49 De transportdiscrepantie-ratio's als functie van de stroomsnelheid in het Zuidergat (meetpunt 2, raai 5)
- Fig.50 De transportdiscrepantie-ratio's als functie van de stroomsnelheid in het Zuidergat (meetpunt 3, raai 5)
- Fig.51 De transportdiscrepantie-ratio's als functie van de stroomsnelheid in het Zuidergat (meetpunt 5, raai 5)
- Fig.52 De transportdiscrepantie-ratio's als functie van de stroomsnelheid in de Schaar van Waarde (meetpunt 9, raai 5)
- Fig.53 De transportdiscrepantie-ratio's als functie van de stroomsnelheid in de Schaar van Waarde (meetpunt 10, raai 5)
- Fig.54 De transportdiscrepantie-ratio's als functie van de stroomsnelheid in de Schaar van Waarde (meetpunt 11, raai 5)
- Fig.55 De transportdiscrepantie-ratio's als functie van de stroomsnelheid in het inscharend ebgeultje (meetpunt 10)
- Fig.56 De transportdiscrepantie-ratio's als functie van de stroomsnelheid in de Schaar van Valkenisse (meetpunt 11)
- Fig.57 De transportdiscrepantie-ratio's als functie van de stroomsnelheid in meetpunt 8 van raai 3
- Fig.58 Het effect van een variabele valsnelheid op de theoretische concentratieverticaal
- $k_s = 0.01m$
 - $k_s = 1m$
- Fig.59 Het effect van een variabele valsnelheid op de theoretische concentratieverticaal, gebaseerd op een parabolisch-constante mengcoëfficiënt en een $k_s = 1m$.
- Fig.60 Verticaal gemiddelde concentraties en stroomsnelheden als functie van de tijd, in het Zuidergat, de Schaar van Waarde en de Schaar van Valkenisse.
- Fig.61 Transportdiscrepantie-ratio's als functie van de stroomsnelheid
- oorspronkelijke berekening volgens Van Rijn
 - aanpassing van theta
 - aanpassing van sigma
- Fig.62 Gevoeligheidsanalyse van de formule van Engelund-Hanssen voor variaties in verticaal gemiddelde stroomsnelheid ($\bar{u}$), ruwheidshoogte (k_s) en waterdiepte (h).
- Fig.63 Gevoeligheidsanalyse van de formule van Van Rijn voor variaties in verticaal gemiddelde stroomsnelheid ($\bar{u}$), ruwheidshoogte (k_s) en waterdiepte (h).

Lijst van appendices

- Bijlage A Meetdiepte-schema voor de Elmar stroommetingen
- Bijlage B Ijklijnen van de akoestische zandtransport meters (AZTM) en de Partech slibmeters
- Bijlage C Genormaliseerde logaritmische snelheidsprofielen
- Bijlage D De afzonderlijke secundaire stroomcomponenten in de meetpunten van raai 3
- Bijlage E Resultaten van de saliniteitsmeting in meetpunt 3 van raai 5.
- Bijlage F Sedimenttransportformule van Van Rijn

FIGUREN

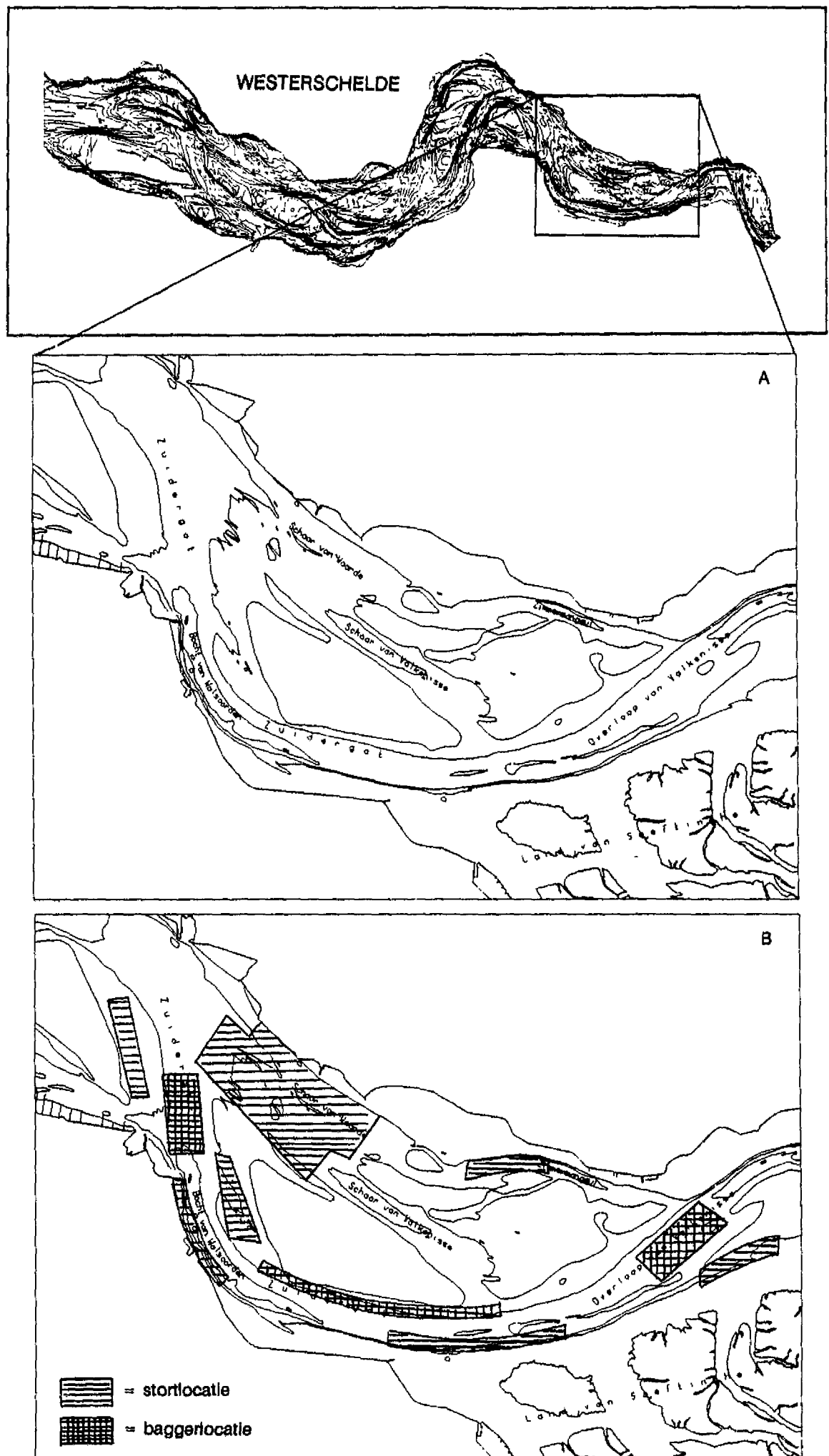


Fig.1 Locatie van het onderzoeksgebied
 1a het Valkenisse-gebied
 1b bagger- en stortlocaties in het Valkenisse-gebied

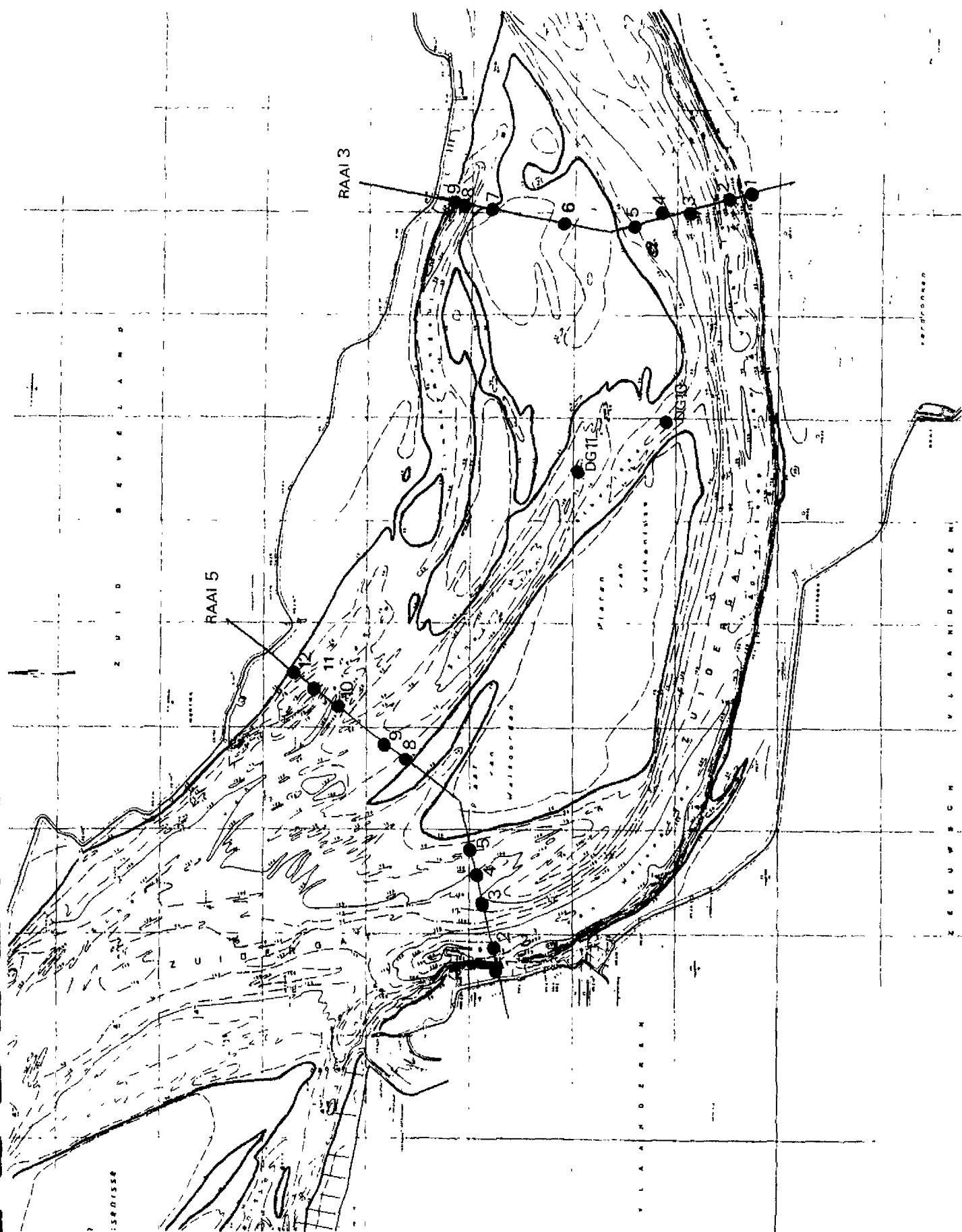


Fig.2 Locaties van de 13-uurs metingen

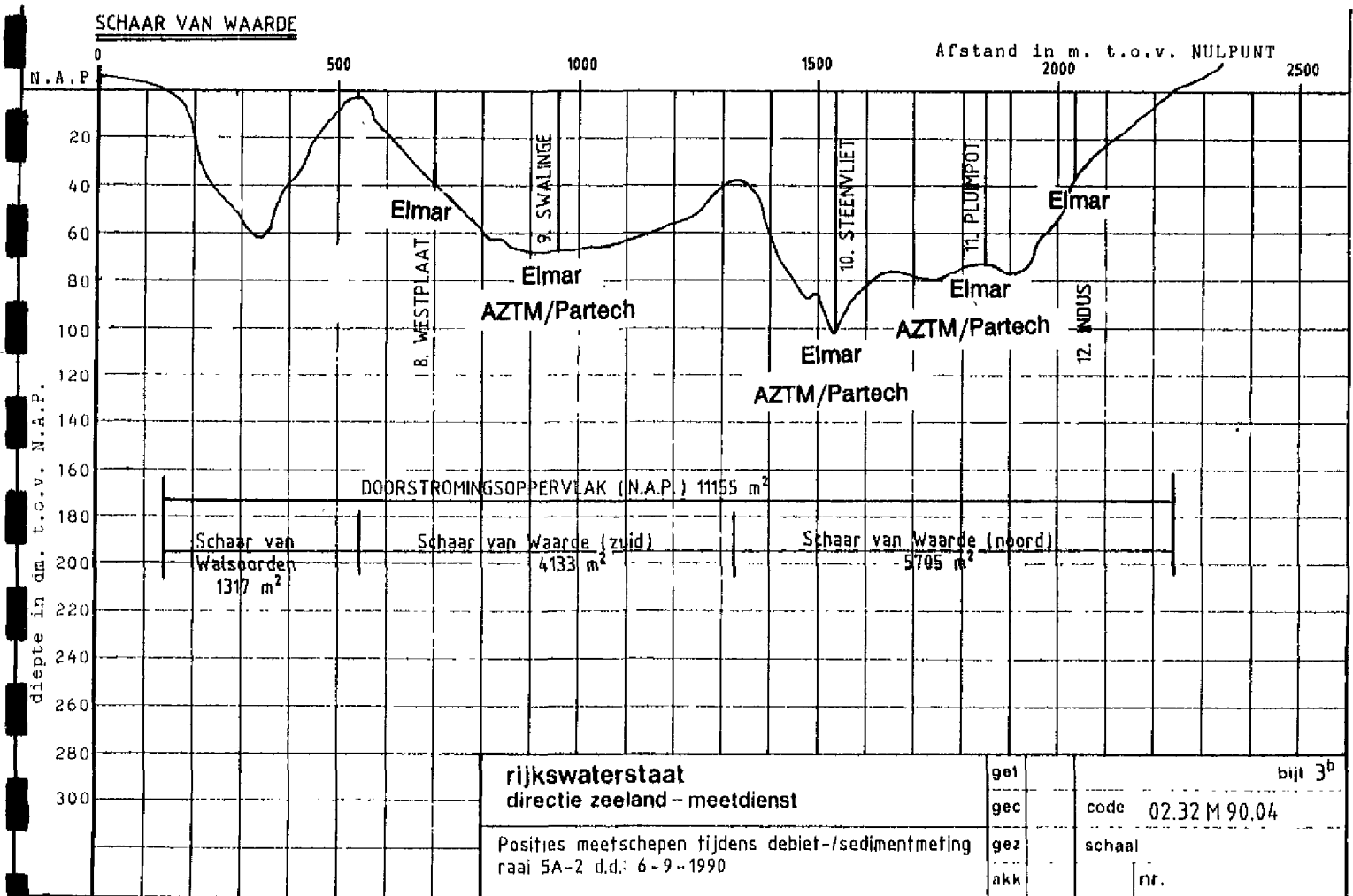
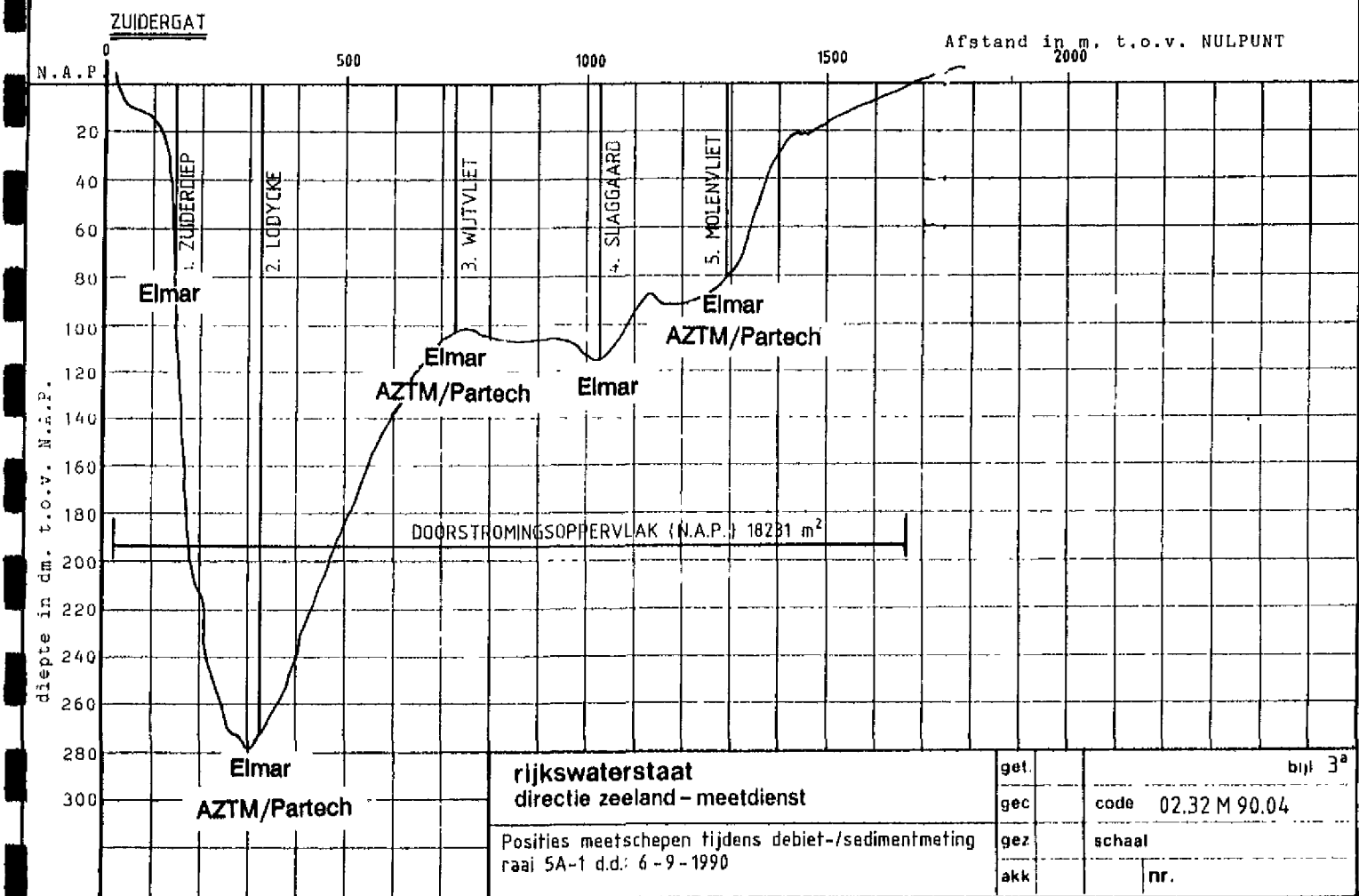


Fig.3 Dwarsprofielen van raai 5

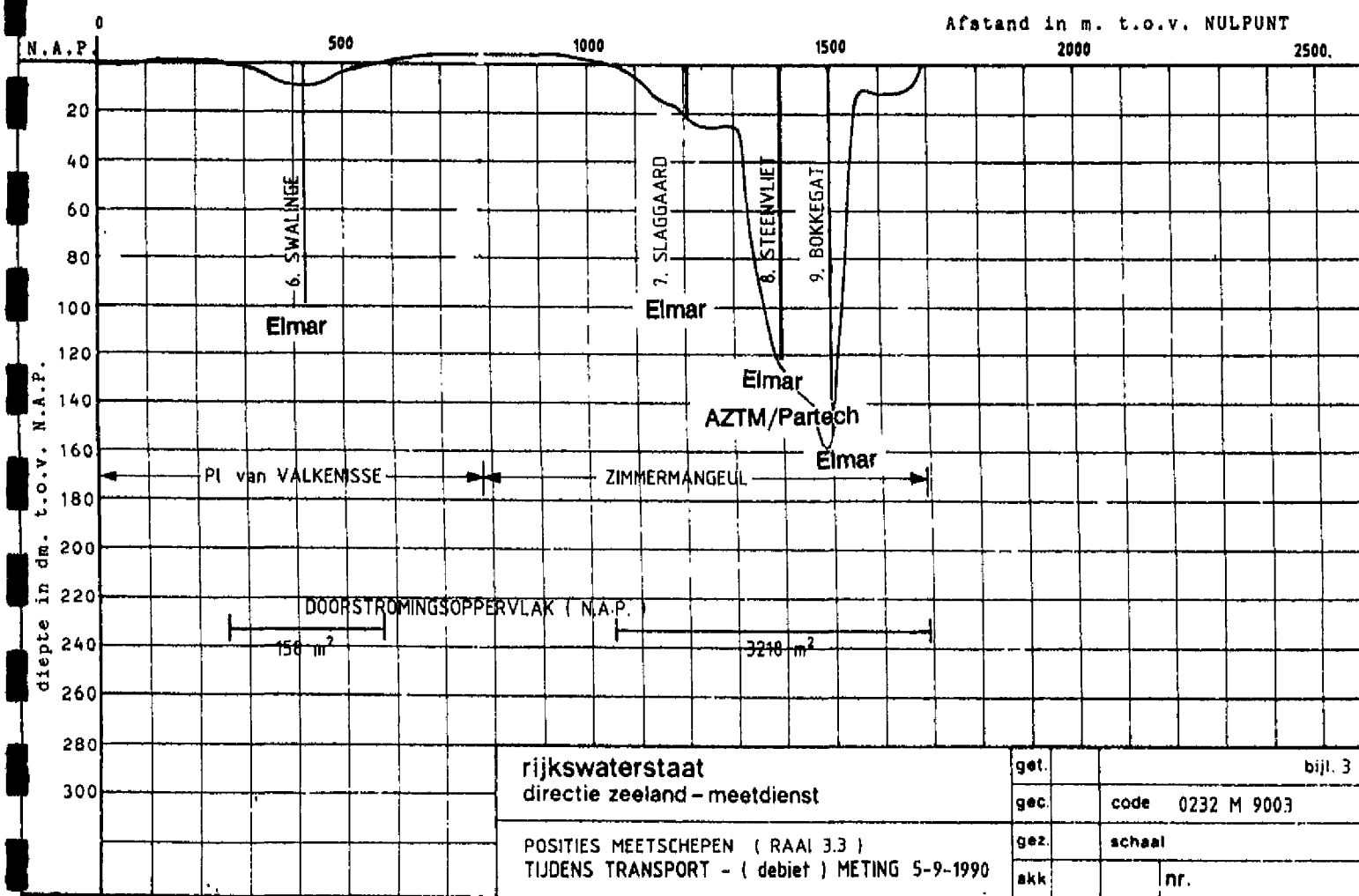
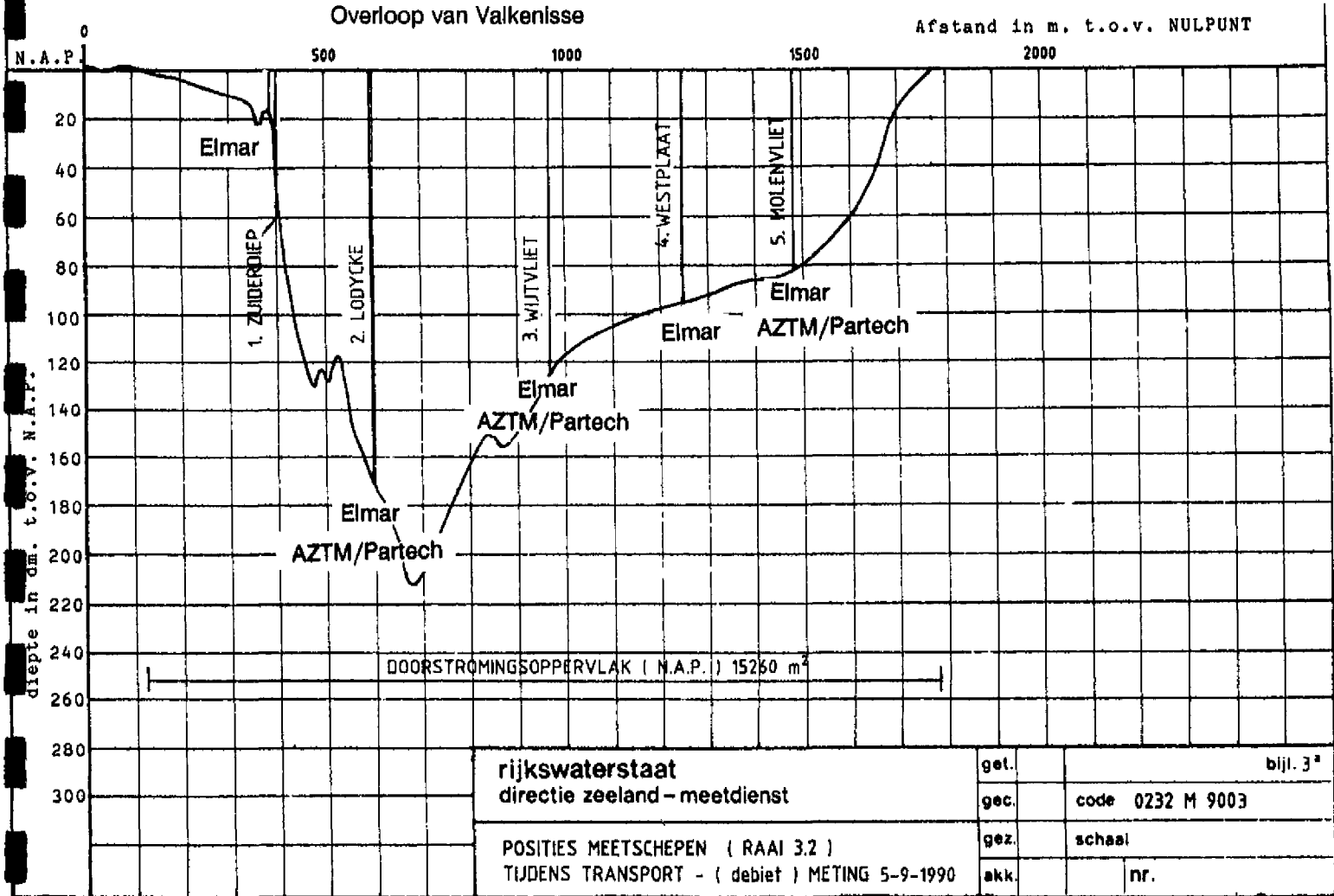


Fig.4 Dwarsprofielen van raai 3

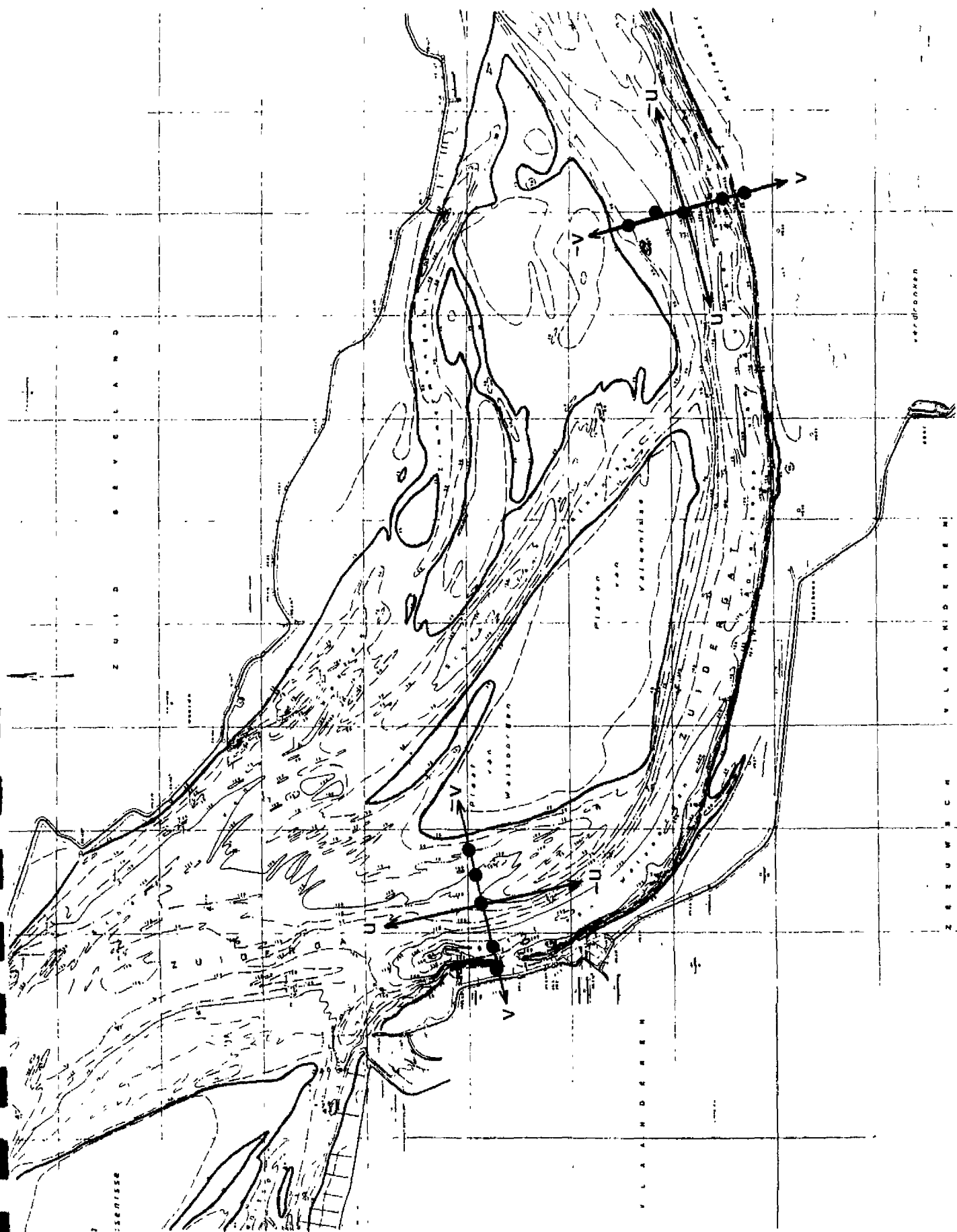
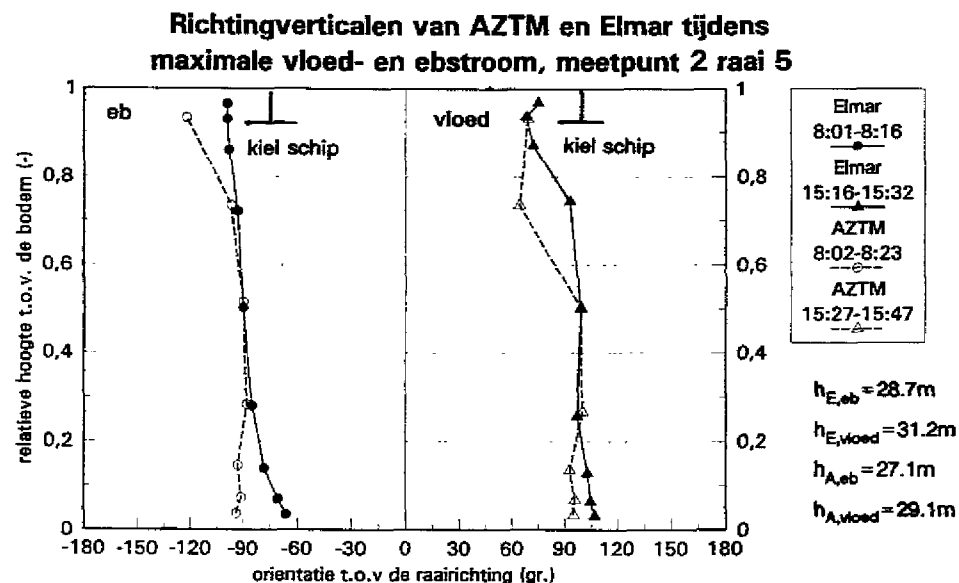
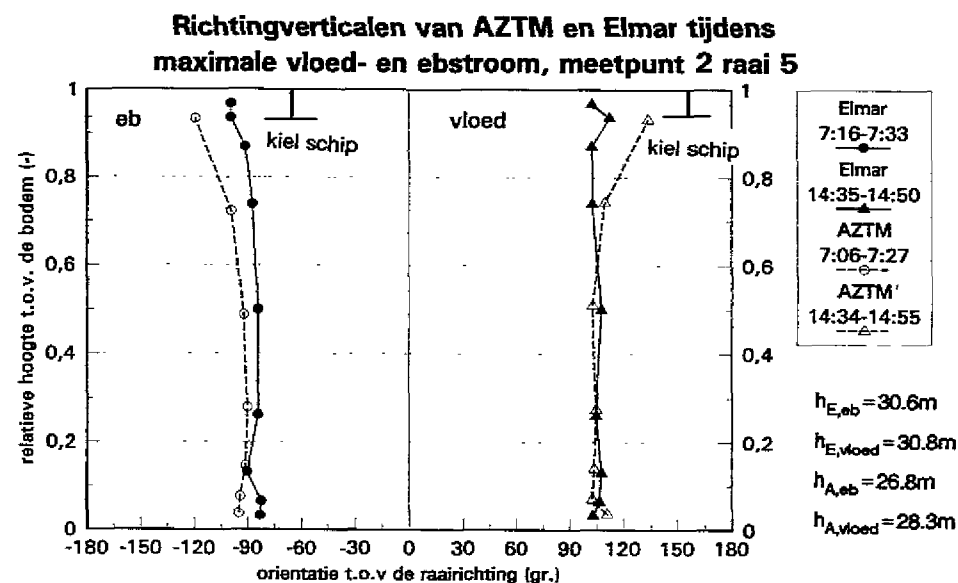


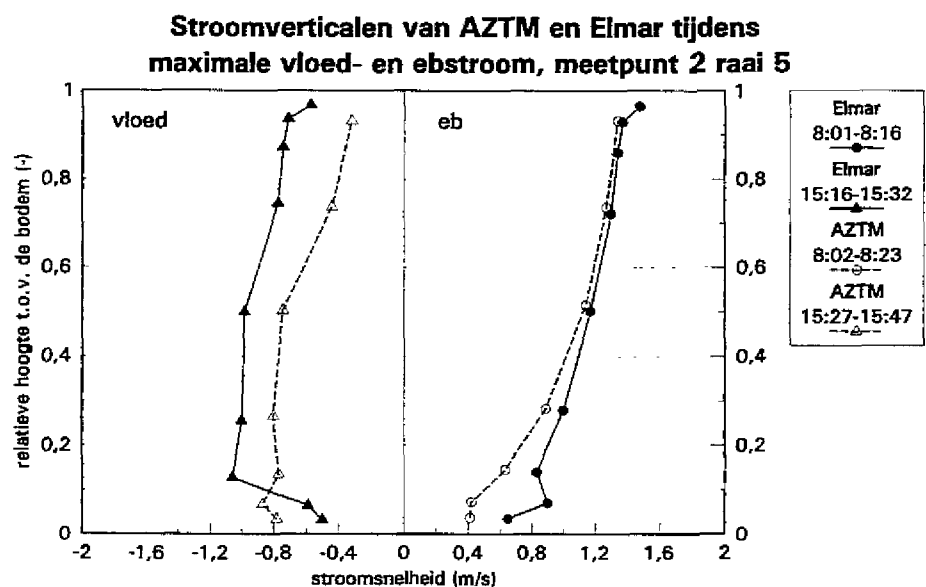
Fig.5 Het gebruikte v,u-assenstelsel voor het berekenen van de primaire en secundaire stroomcomponenten.



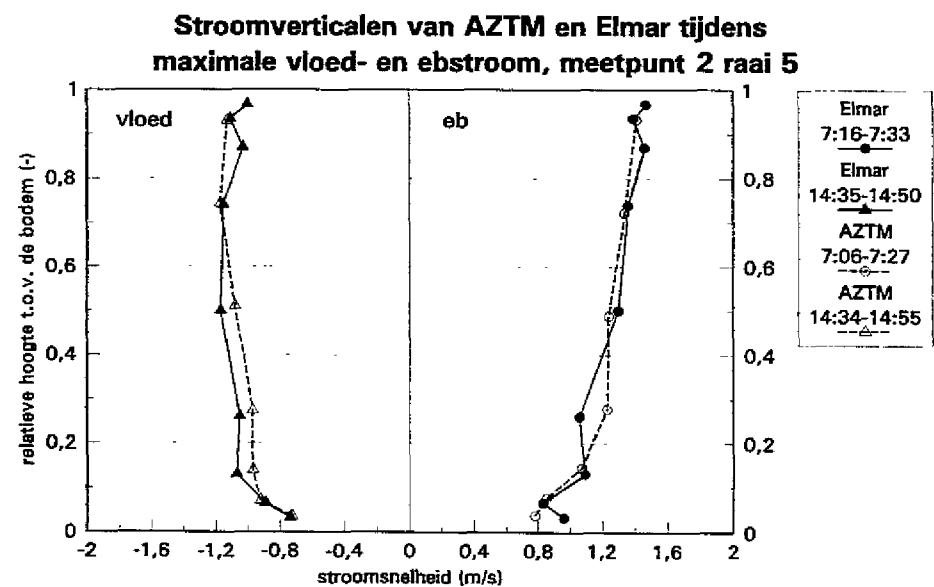
d.d. 06-09-90



d.d. 06-09-90



d.d. 06-09-90



d.d. 06-09-90

Fig.6 Stroomsnelheids- en richtingsverticalen van Elmar en AZTM tijdens maximale stroom in meetpunt 2, raai 5.

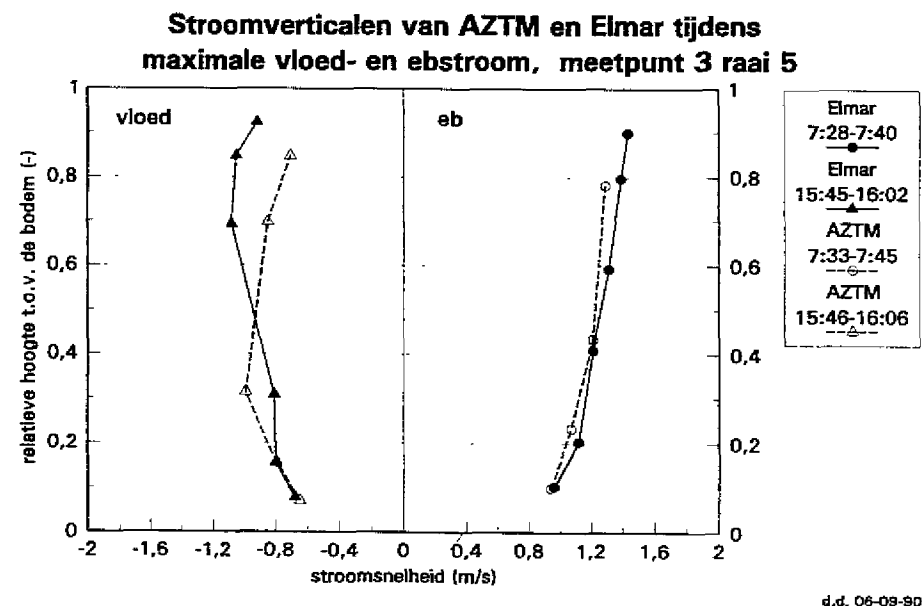
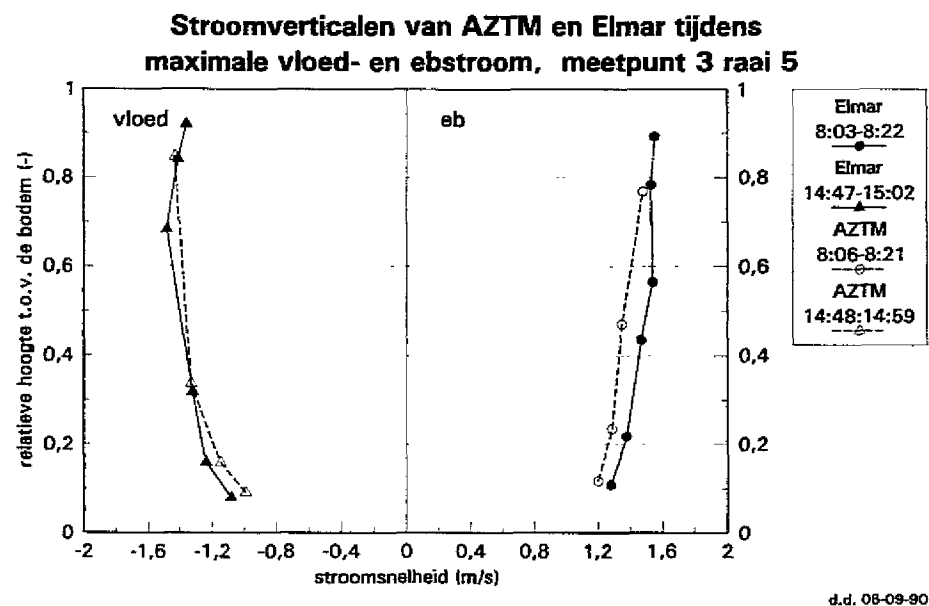
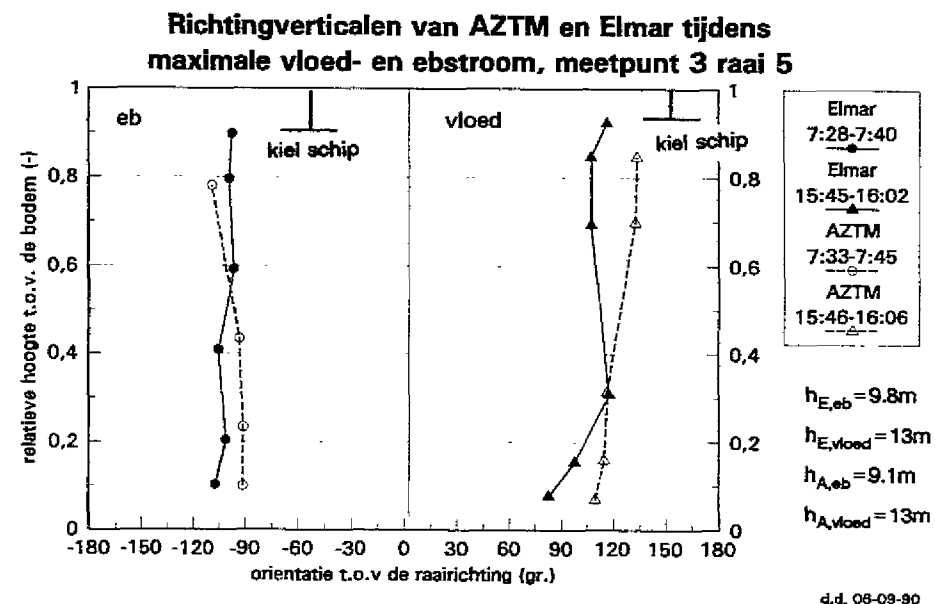
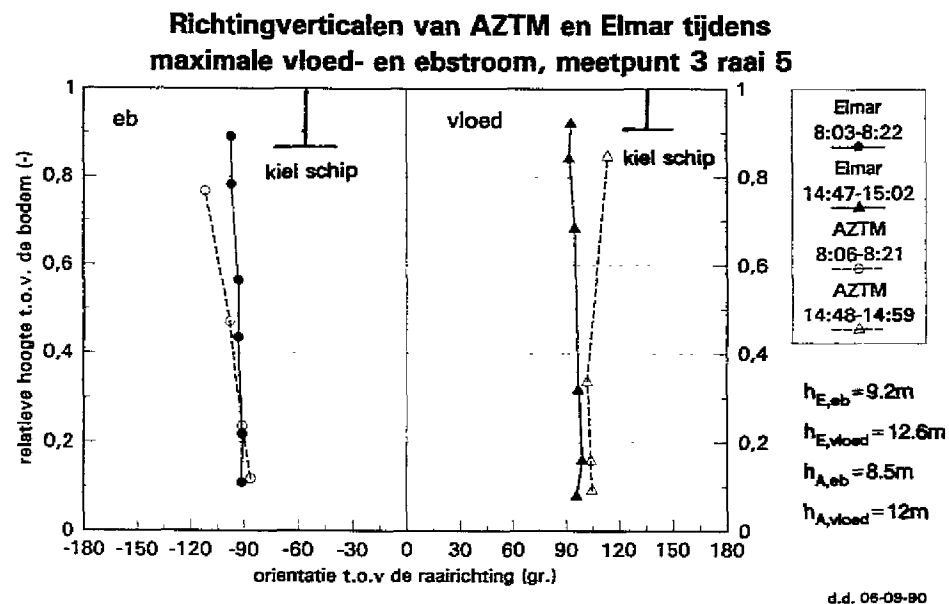
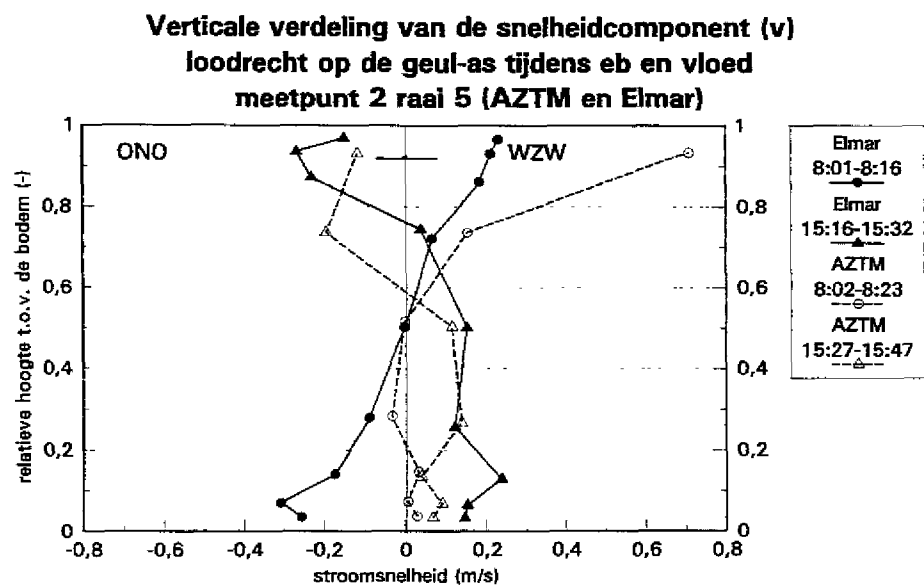
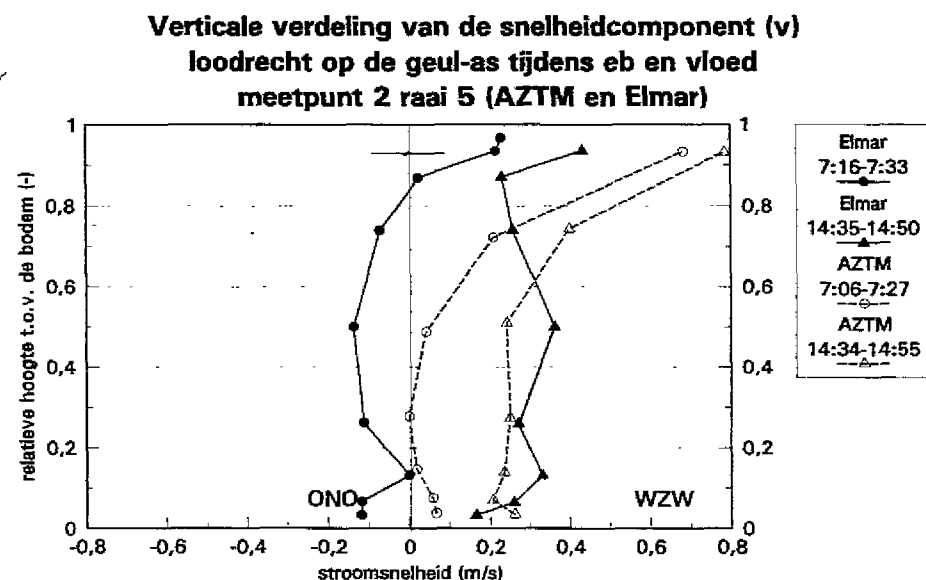


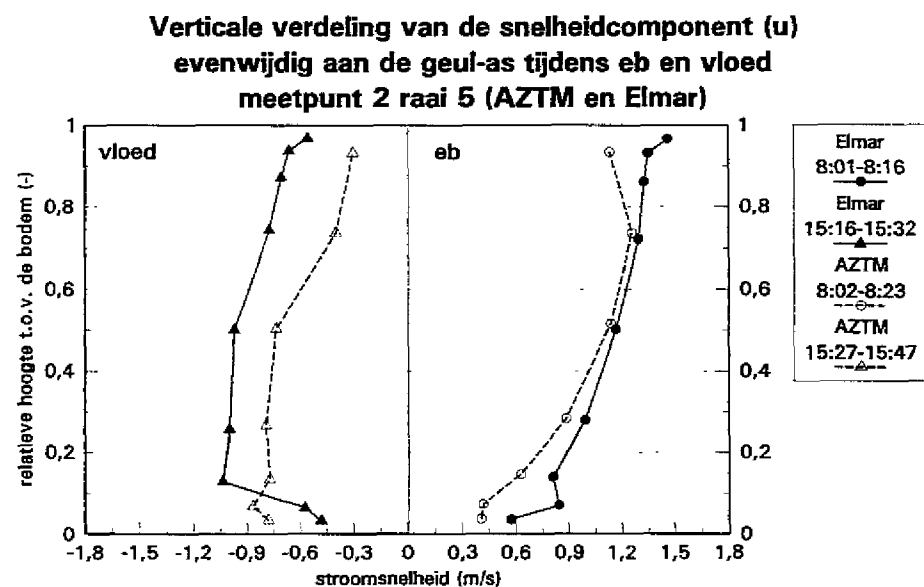
Fig.7 Stroomsnelheids- en richtingsverticalen van Elmar en AZTM tijdens maximale stroom in meetpunt 3, raai 5.



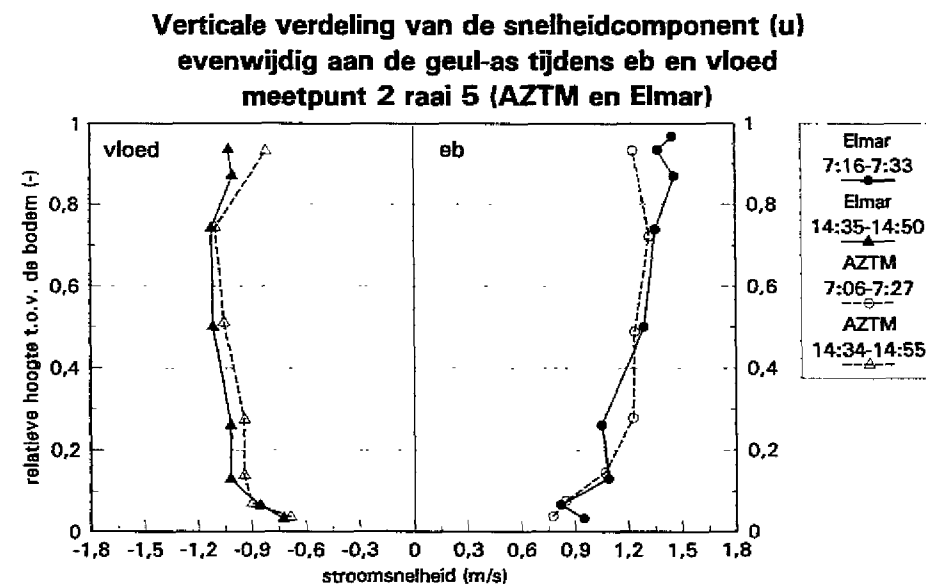
d.d. 06-09-90



d.d. 06-09-90



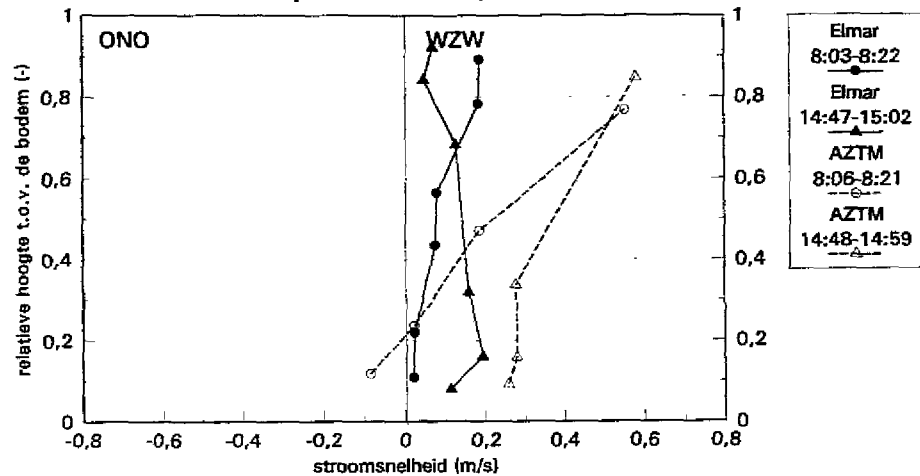
d.d. 06-09-90



d.d. 06-09-90

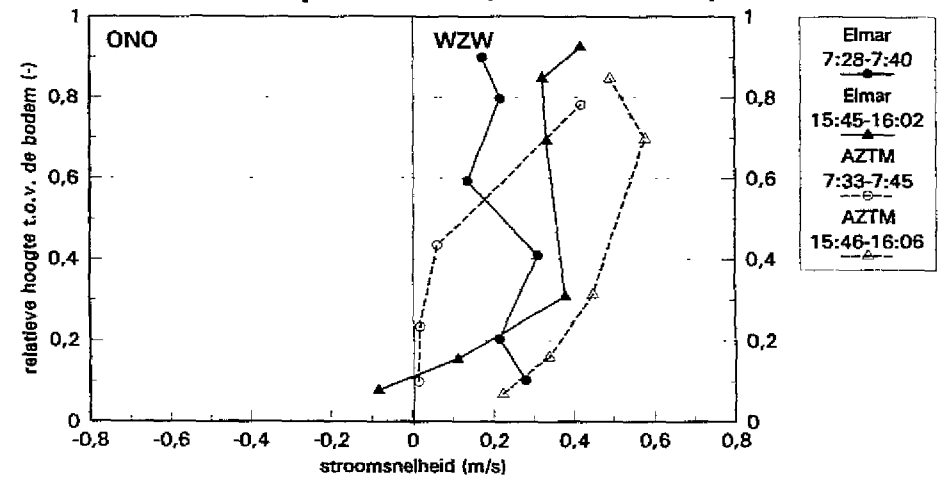
Fig.8 Primaire en secundaire stroomverticalen volgens Elmar en AZTM in meetpunt 2 van raai 5

Verticale verdeling van de snelheidcomponent (v)
loodrecht op de geul-as tijdens eb en vloed
meetpunt 3 raai 5 (AZTM en Elmar)



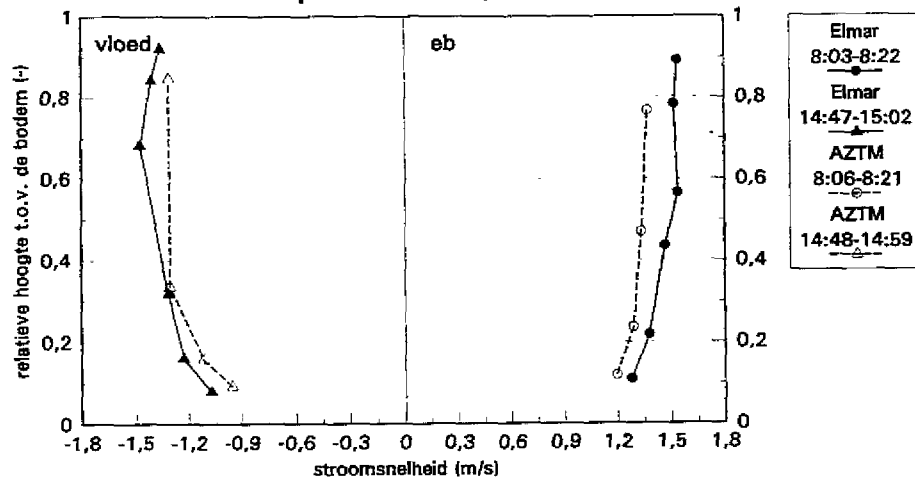
d.d. 06-09-90

Verticale verdeling van de snelheidcomponent (v)
loodrecht op de geul-as tijdens eb en vloed
meetpunt 3 raai 5 (AZTM en Elmar)



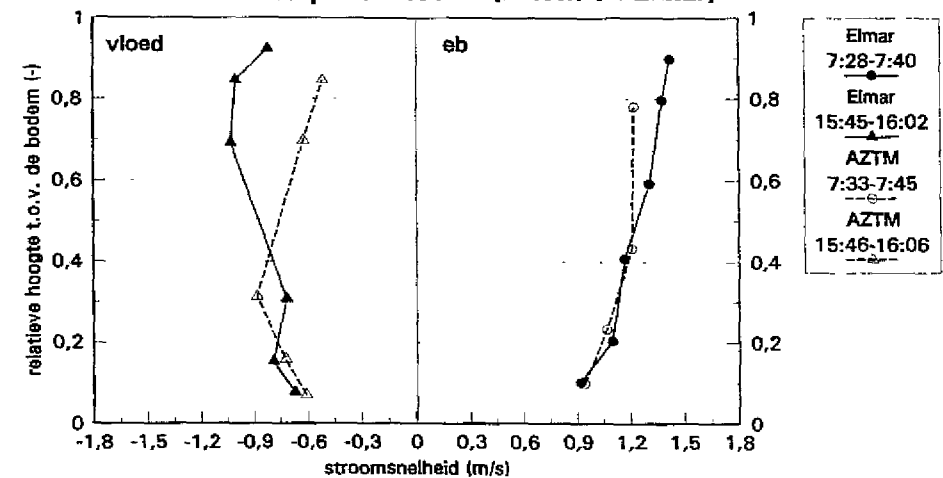
d.d. 06-09-90

Verticale verdeling van de snelheidcomponent (u)
evenwijdig aan de geul-as tijdens eb en vloed
meetpunt 3 raai 5 (AZTM en Elmar)



d.d. 06-09-90

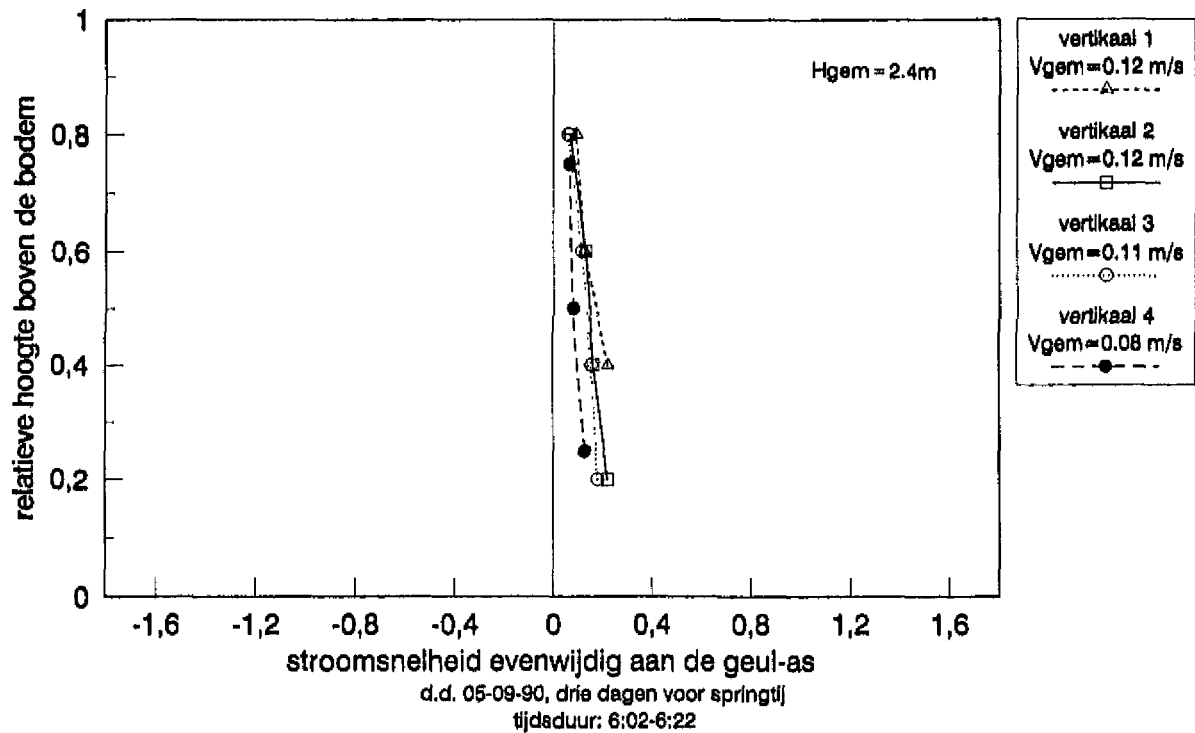
Verticale verdeling van de snelheidcomponent (u)
evenwijdig aan de geul-as tijdens eb en vloed
meetpunt 3 raai 5 (AZTM en Elmar)



d.d. 06-09-90

Fig.9 Primaire en secundaire stroomverticalen volgens Elmar en AZTM in meetpunt 3 van raai 5

De verticale verdeling van de stroomsnelheid (u)
evenwijdig aan de geul-as tijdens ebstroom
meetpunt 1 debietraai 3 (elmar)



De verticale verdeling van de stroomsnelheid (u)
evenwijdig aan de geul-as tijdens vloedstroom
meetpunt 1 debietraai 3 (elmar)

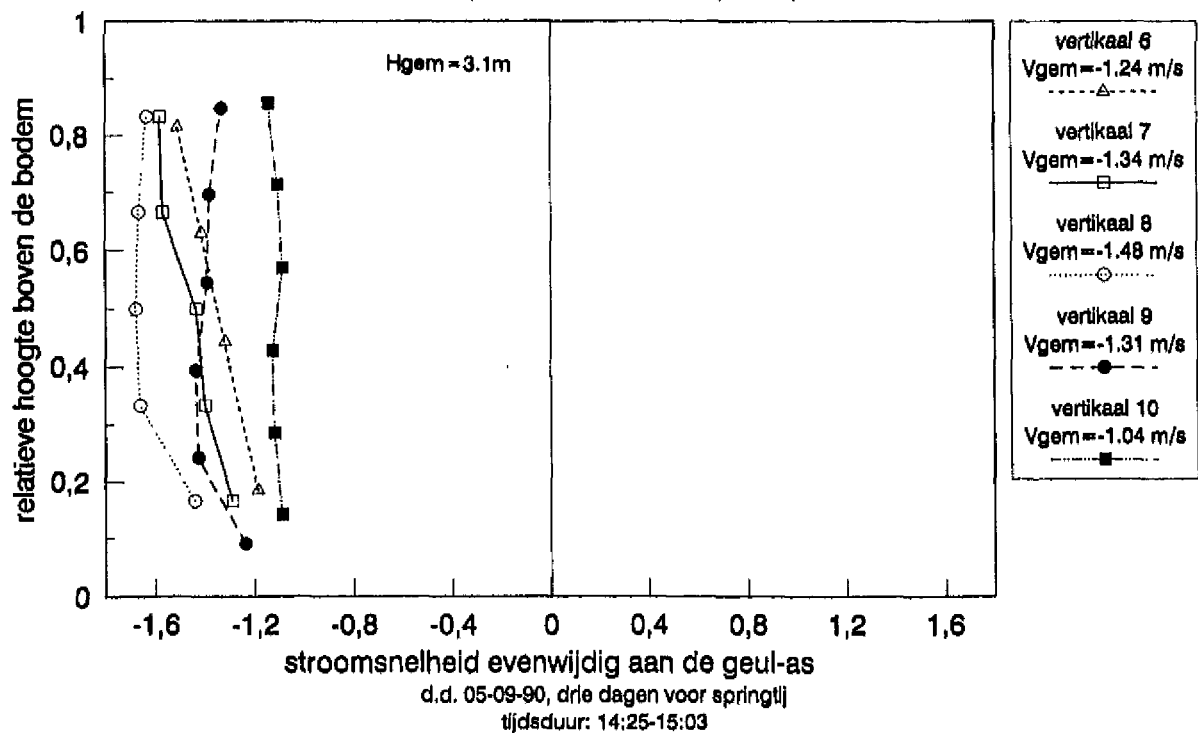
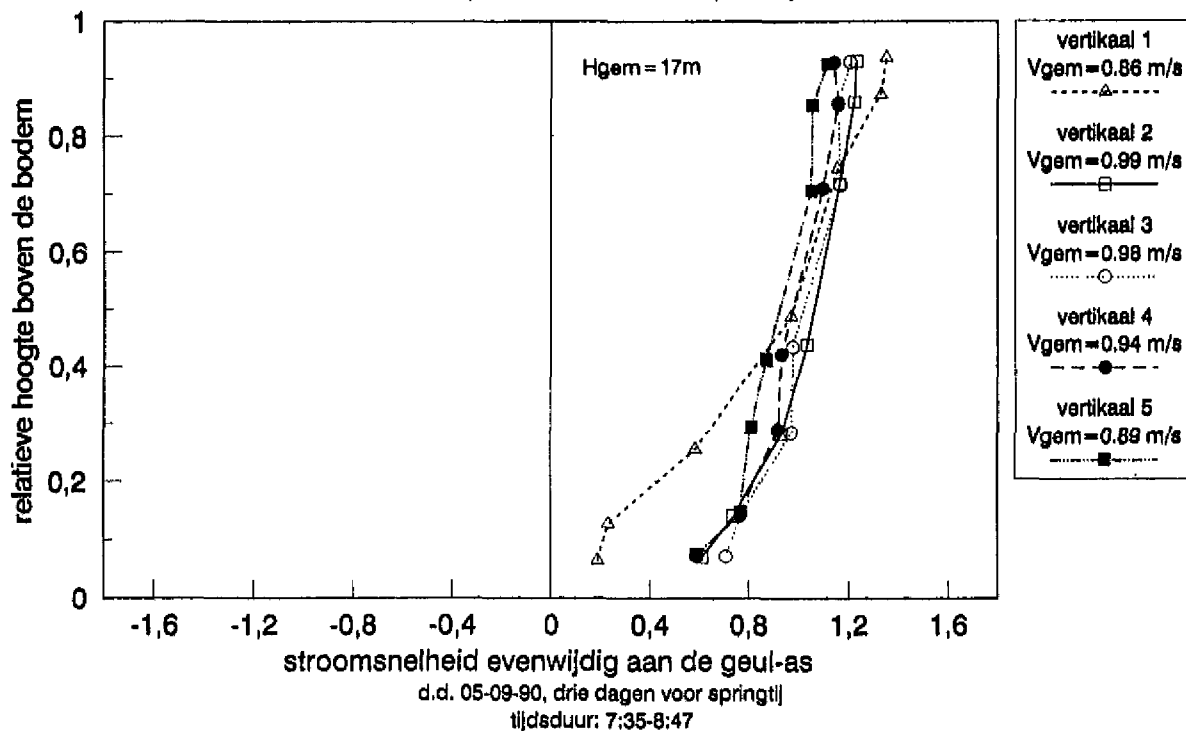


Fig.10 Verticale verdeling van de primaire stroomcomponenten in meetpunt 1 van raai 3

De verticale verdeling van de stroomsnelheid (u)
evenwijdig aan de geul-as tijdens ebstroom
meetpunt 2 debietraai 3 (elmar)



De verticale verdeling van de stroomsnelheid (u)
evenwijdig aan de geul-as tijdens vloedstroom
meetpunt 2 debietraai 3 (elmar)

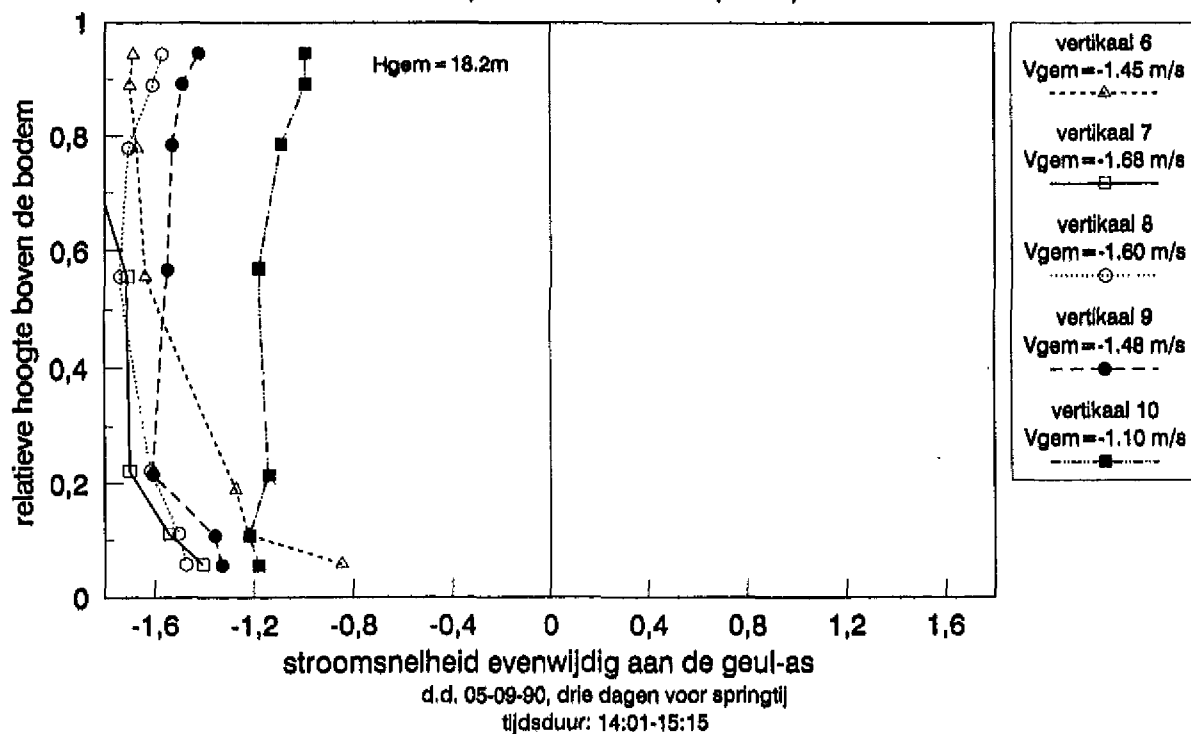
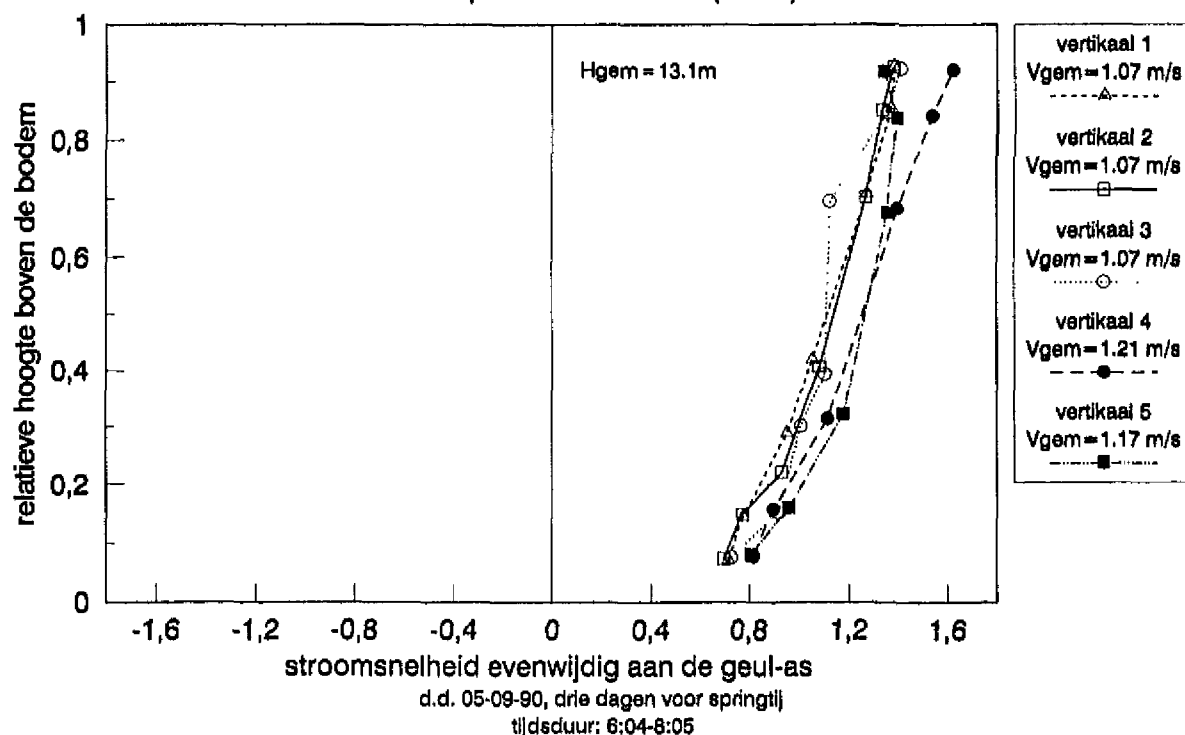


Fig.11 Verticale verdeling van de primaire stroomcomponenten in meetpunt 2 van raai 3

De verticale verdeling van de stroomsnelheid (u)
evenwijdig aan de geul-as tijdens ebstroom
meetpunt 3 debietraai 3 (elmar)



De verticale verdeling van de stroomsnelheid (u)
evenwijdig aan de geul-as tijdens vloedstroom
meetpunt 3 debietraai 3 (elmar)

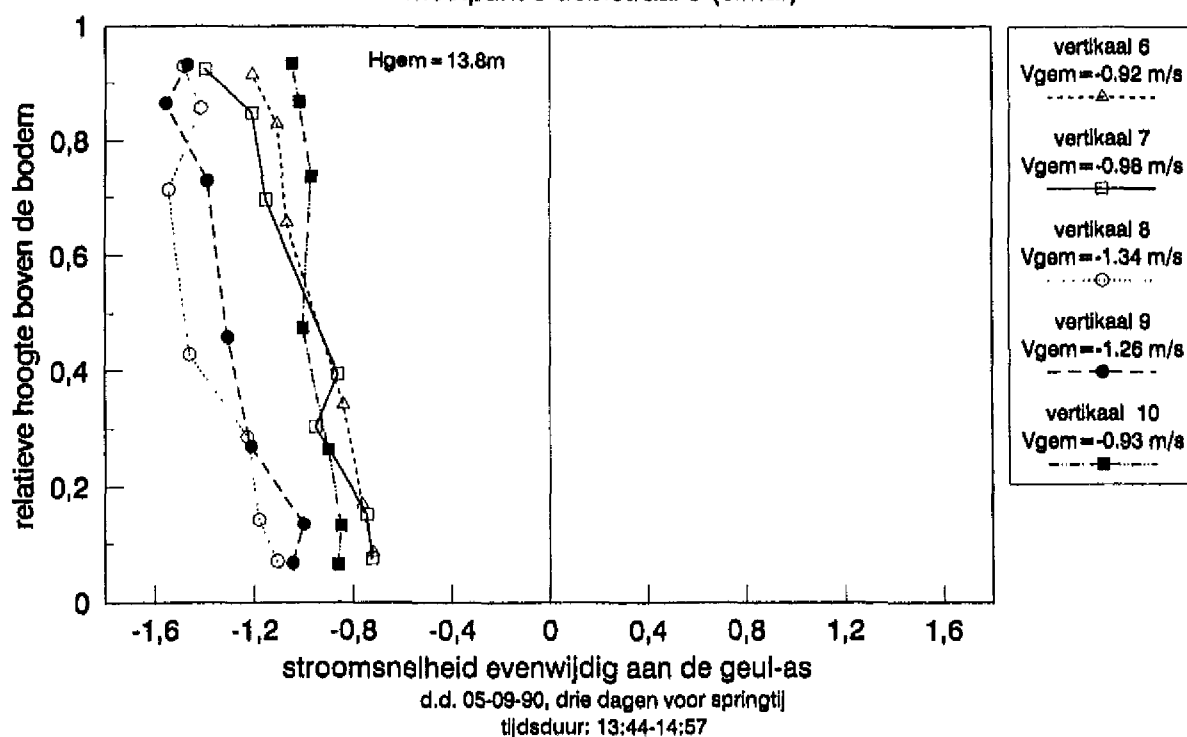
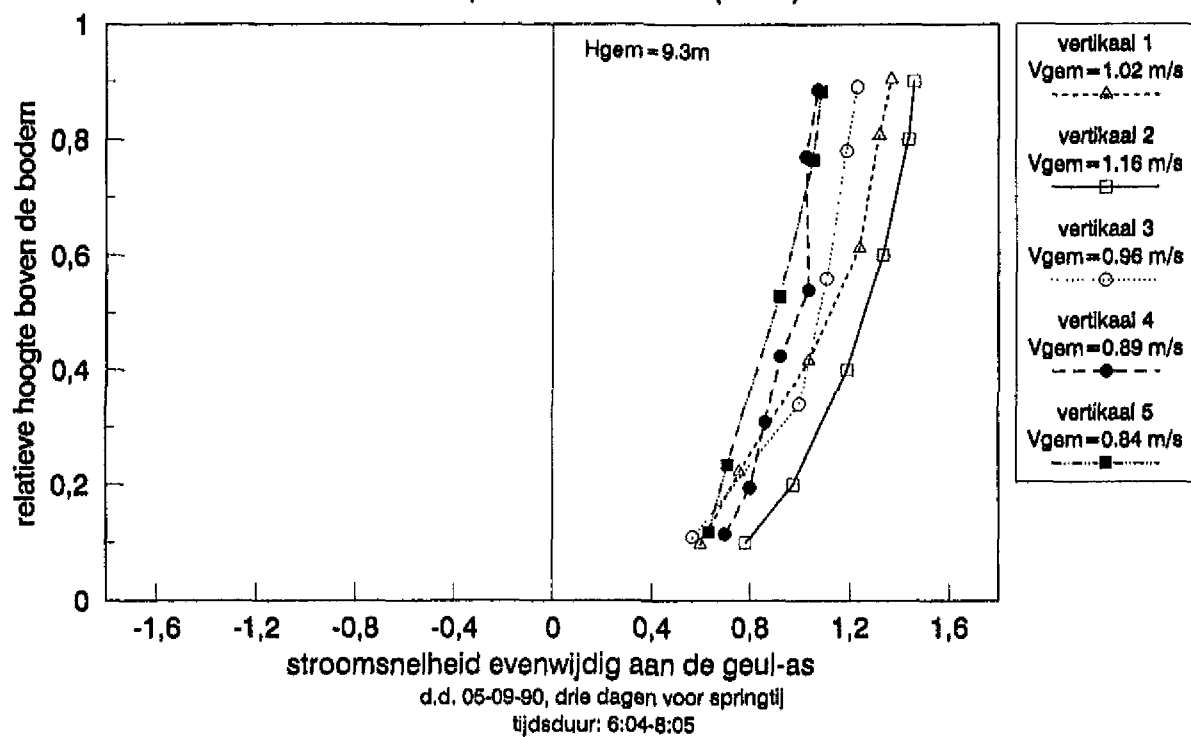


Fig.12 Verticale verdeling van de primaire stroomcomponenten in meetpunt 3 van raai 3

De verticale verdeling van de stroomsnelheid (u)
evenwijdig aan de geul-as tijdens ebstroom
meetpunt 4 debietraai 3 (elmar)



De verticale verdeling van de stroomsnelheid (u)
evenwijdig aan de geul-as tijdens vloedstroom
meetpunt 4 debietraai 3 (elmar)

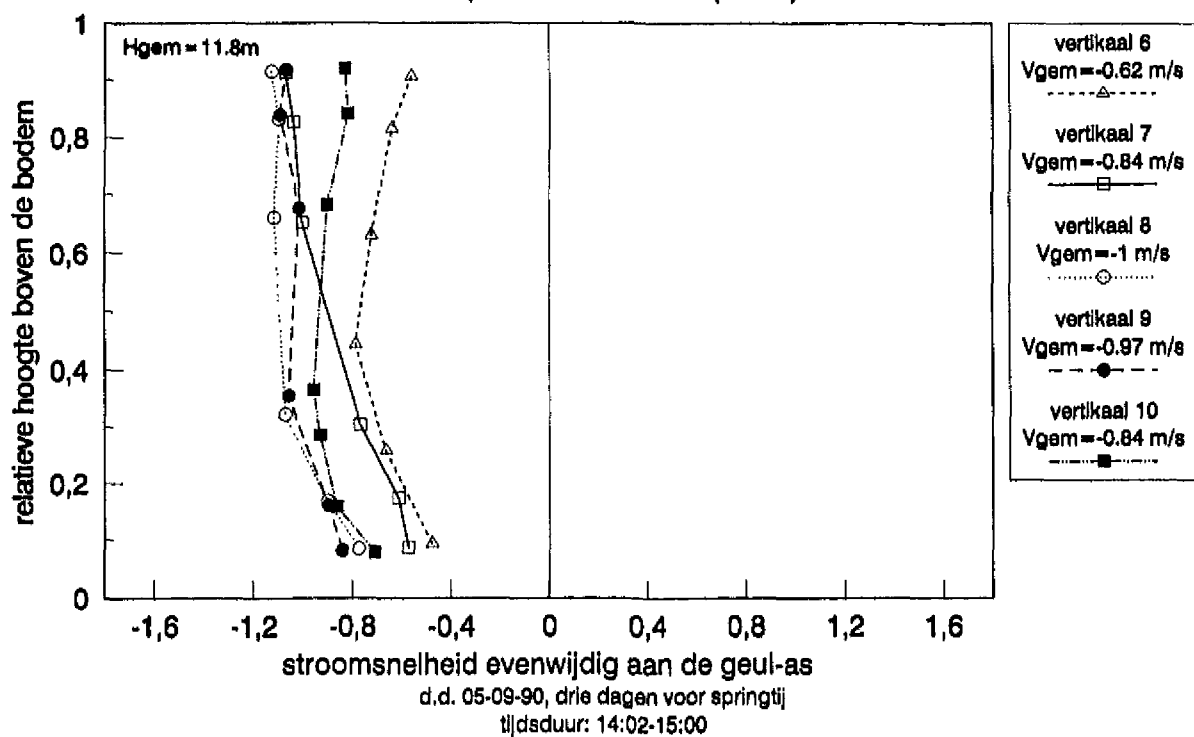
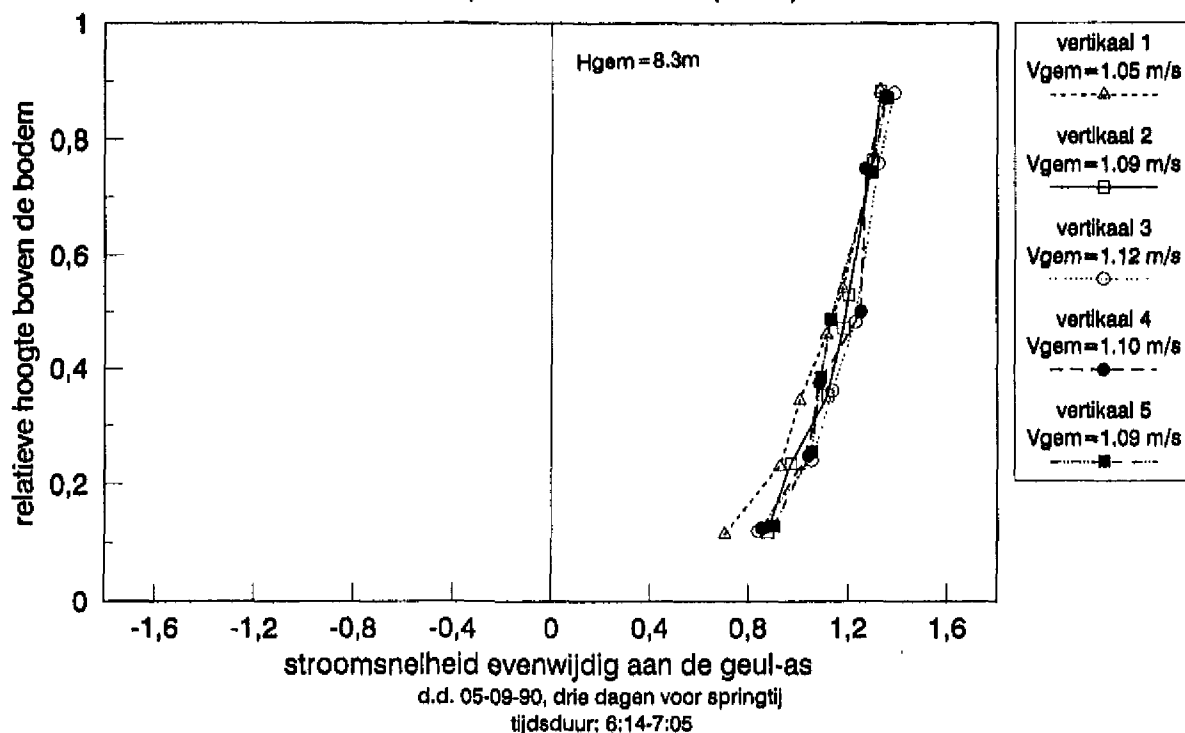


Fig.13 Verticale verdeling van de primaire stroomcomponenten in meetpunt 4 van raai 3

De verticale verdeling van de stroomsnelheid (u)
evenwijdig aan de geul-as tijdens ebstroom
meetpunt 5 debietraai 3 (elmar)



De verticale verdeling van de stroomsnelheid (u)
evenwijdig aan de geul-as tijdens vloedstroom
meetpunt 5 debietraai 3 (elmar)

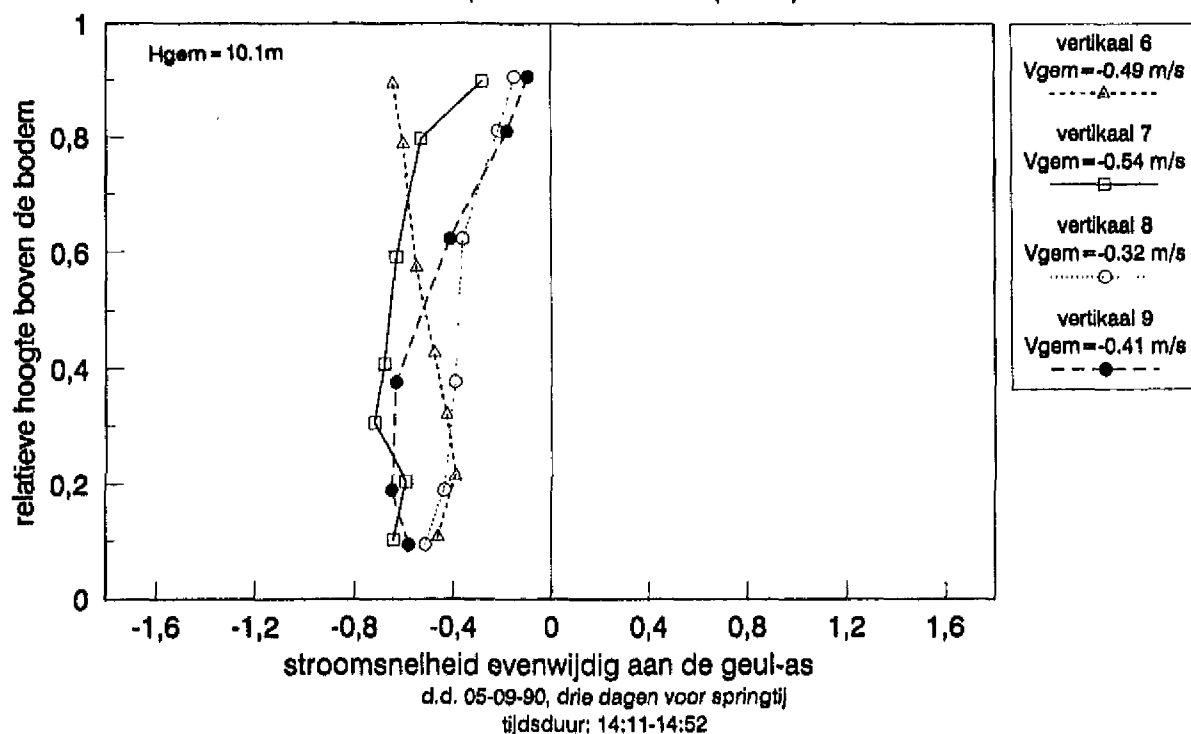
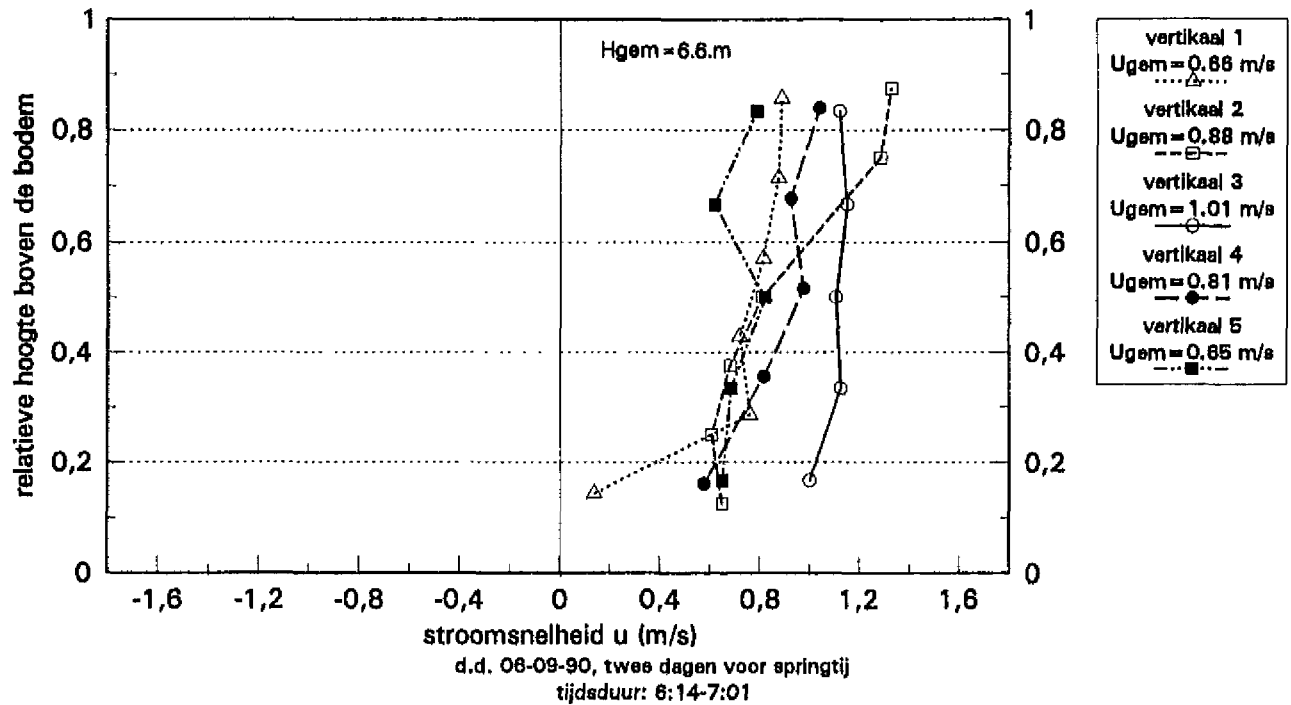


Fig.14 Verticale verdeling van de primaire stroomcomponenten in meetpunt 5 van raai 3

De verticale verdeling van de stroomsnelheid (u) evenwijdig aan de geul-as tijdens ebstroom

meetpunt 1 debietraai 5 (elmar)



De verticale verdeling van de stroomsnelheid (u) evenwijdig aan de geul-as tijdens vloedstroom

meetpunt 1 debietraai 5 (elmar)

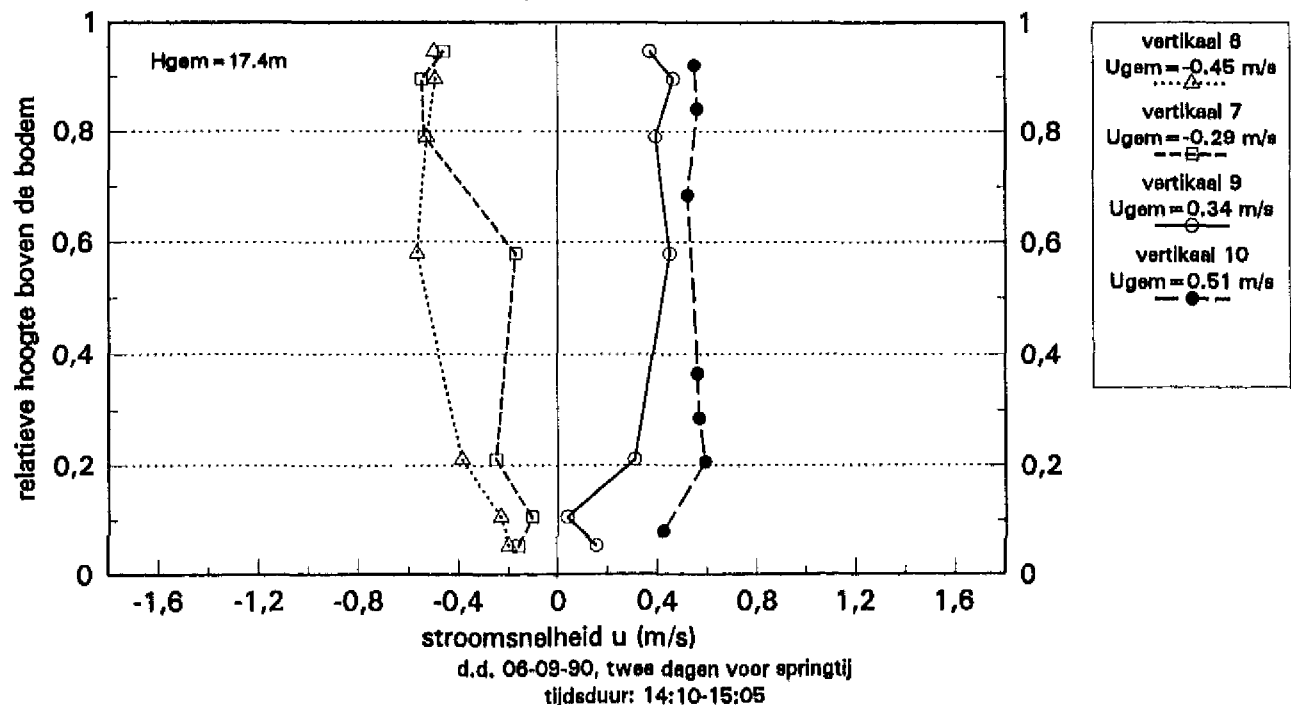
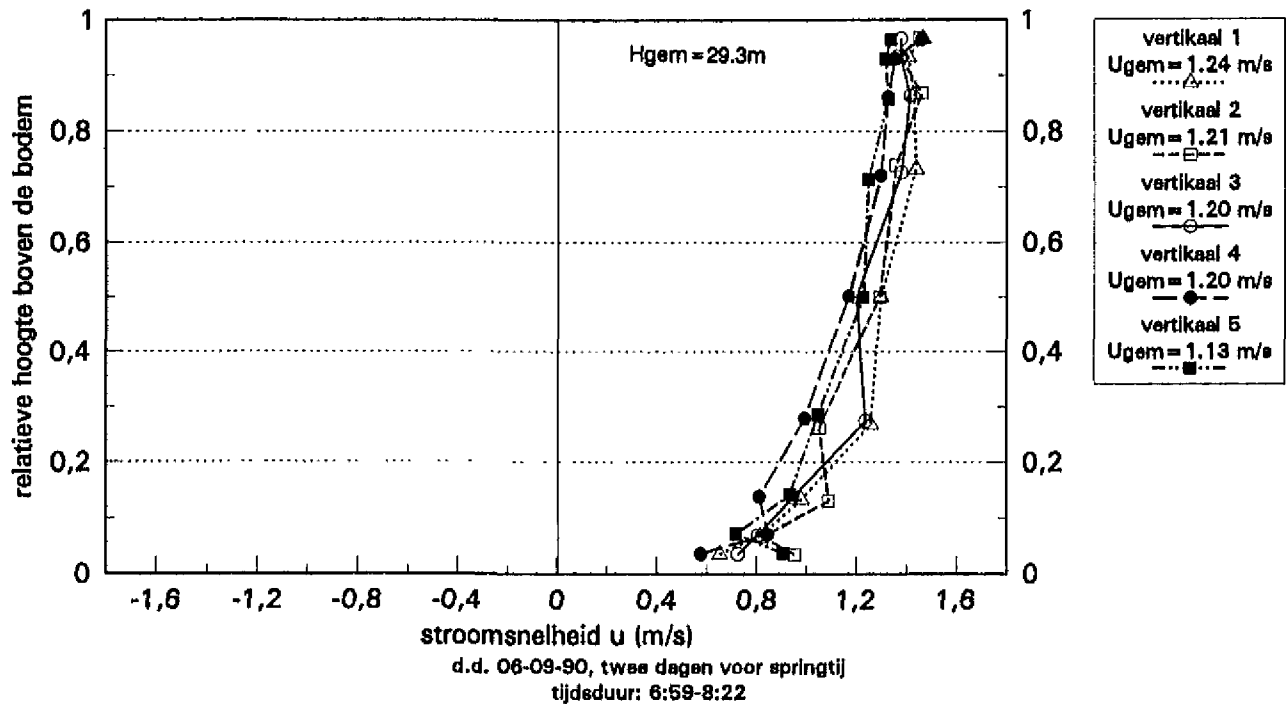


Fig.15 Verticale verdeling van de primaire stroomcomponenten in meetpunt 1 van raai 5

**De verticale verdeling van de stroomsnelheid (u)
evenwijdig aan de geul-as tijdens ebstroom
meetpunt 2 debietraal 5 (elmar)**



**De verticale verdeling van de stroomsnelheid (u)
evenwijdig aan de geul-as tijdens vloedstroom
meetpunt 2 debietraal 5 (elmar)**

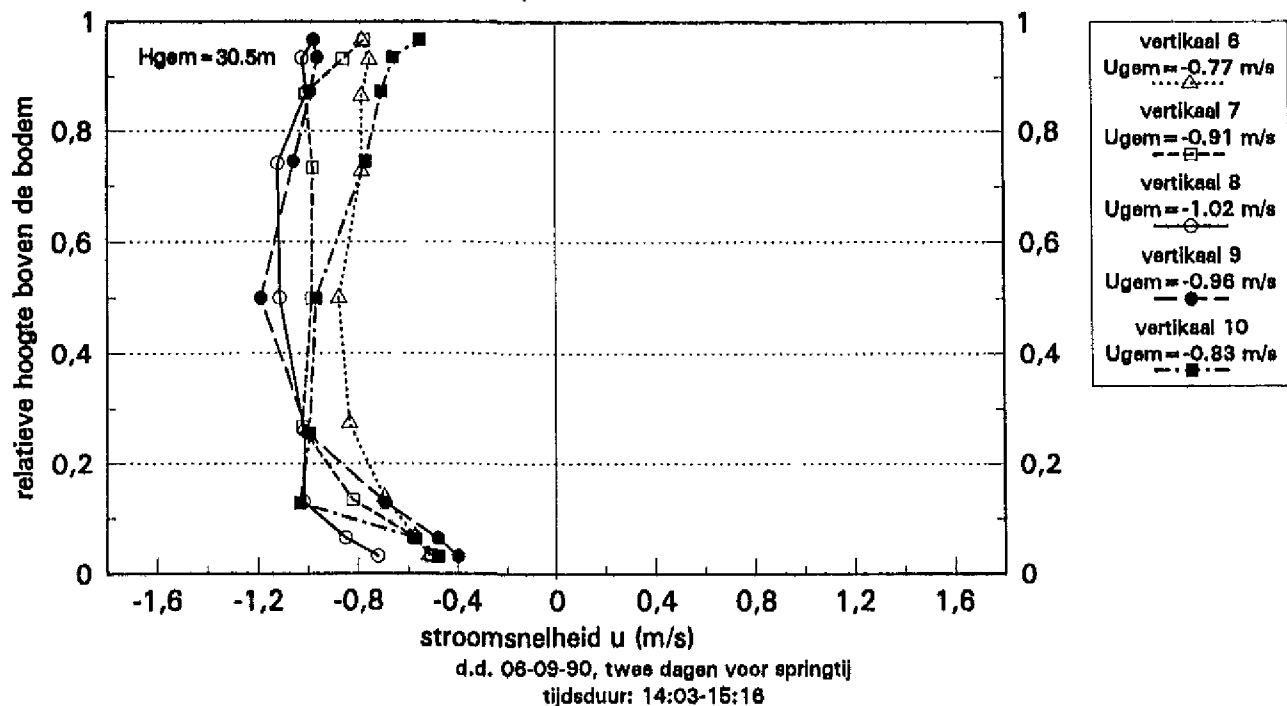
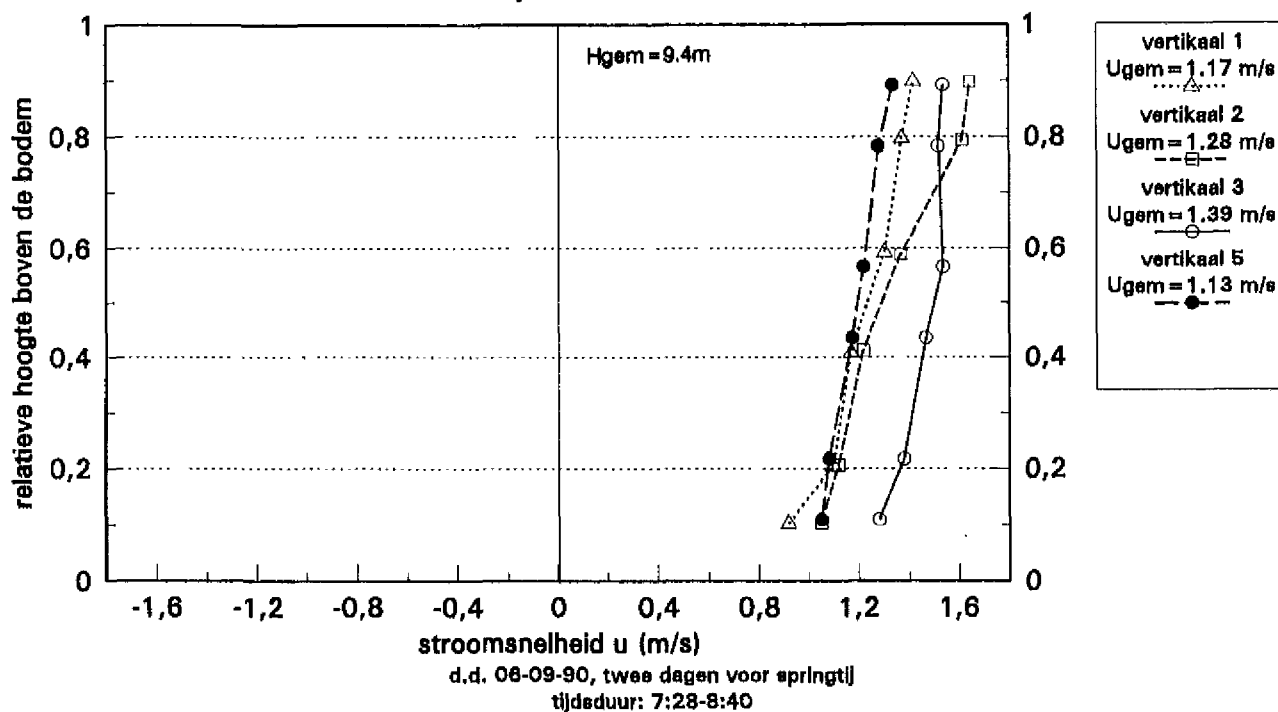


Fig.16 Verticale verdeling van de primaire stroomcomponenten in meetpunt 2 van raai 5

**De verticale verdeling van de stroomsnelheid (u)
evenwijdig aan de geul-as tijdens ebstroom
meetpunt 3 debietraai 5 (elmar)**



**De verticale verdeling van de stroomsnelheid (u)
evenwijdig aan de geul-as tijdens vloedstroom
meetpunt 3 debietraai 5 (elmar)**

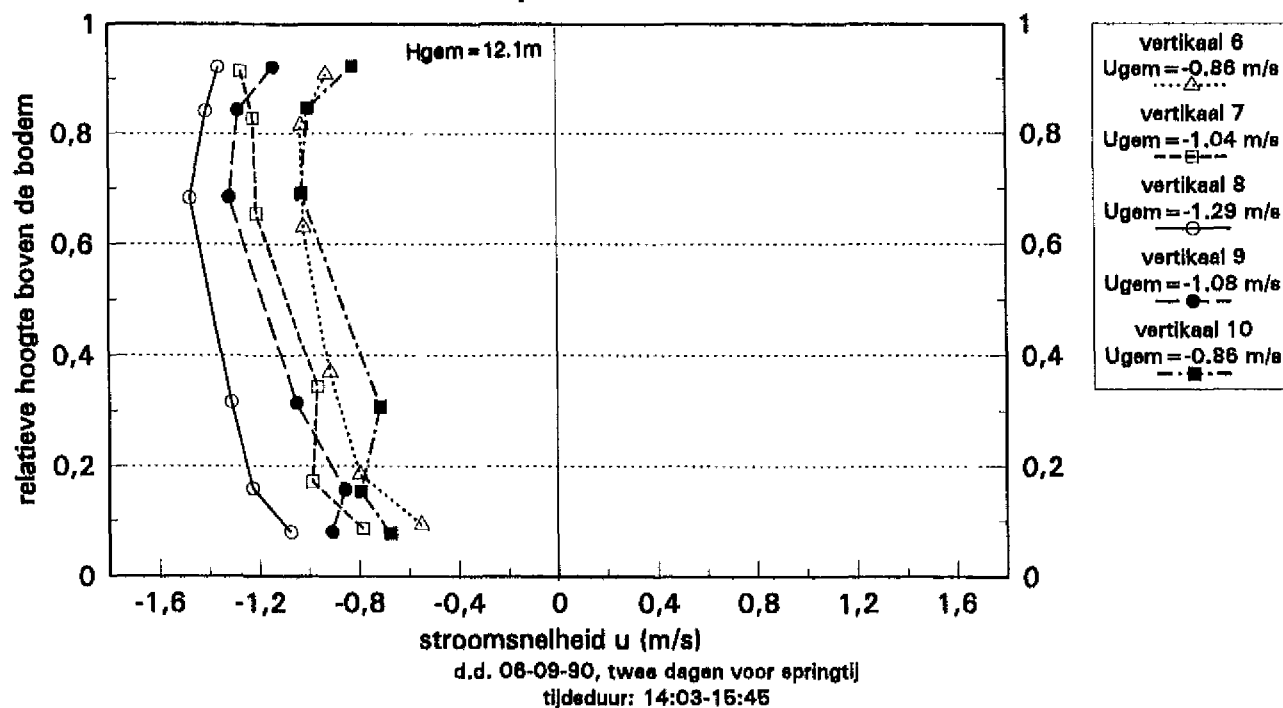
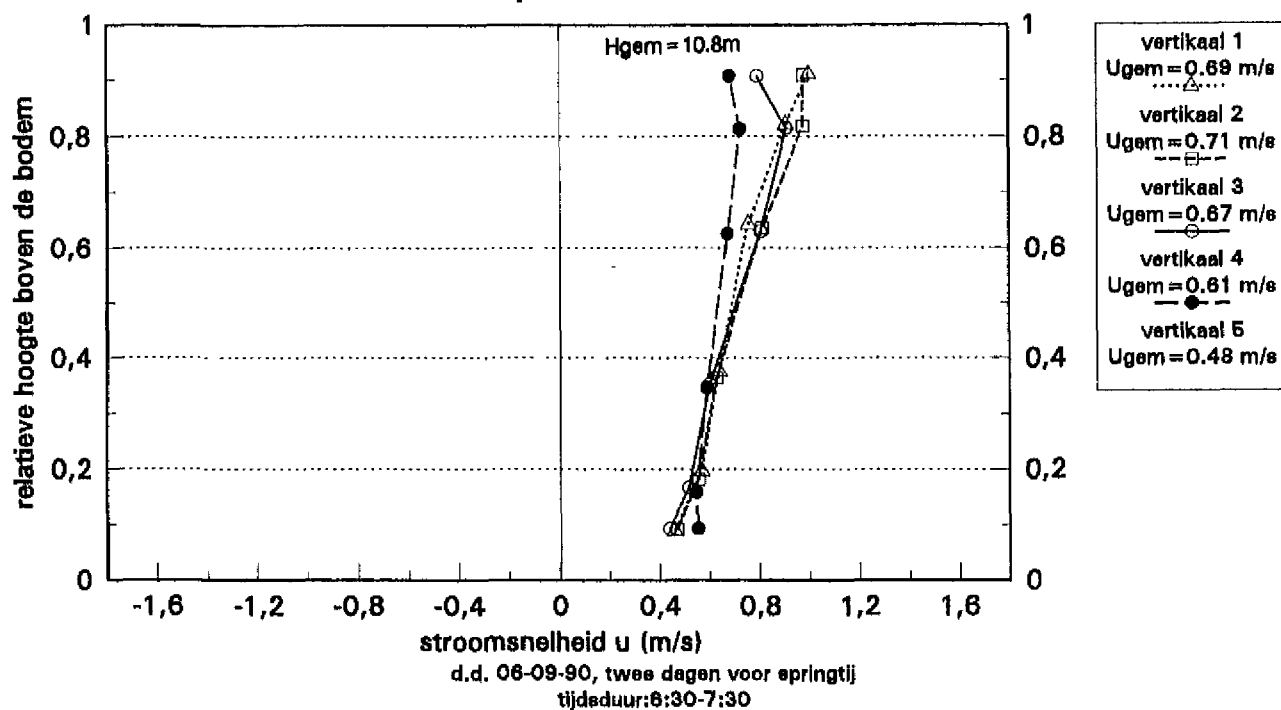


Fig.17 Verticale verdeling van de primaire stroomcomponenten in meetpunt 3 van raai 5

**De verticale verdeling van de stroomsnelheid (u)
evenwijdig aan de geul-as tijdens ebstroom
meetpunt 4 debietraal 5 (elmar)**



**De verticale verdeling van de stroomsnelheid (u)
evenwijdig aan de geul-as tijdens vloedstroom
meetpunt 4 debietraal 5 (elmar)**

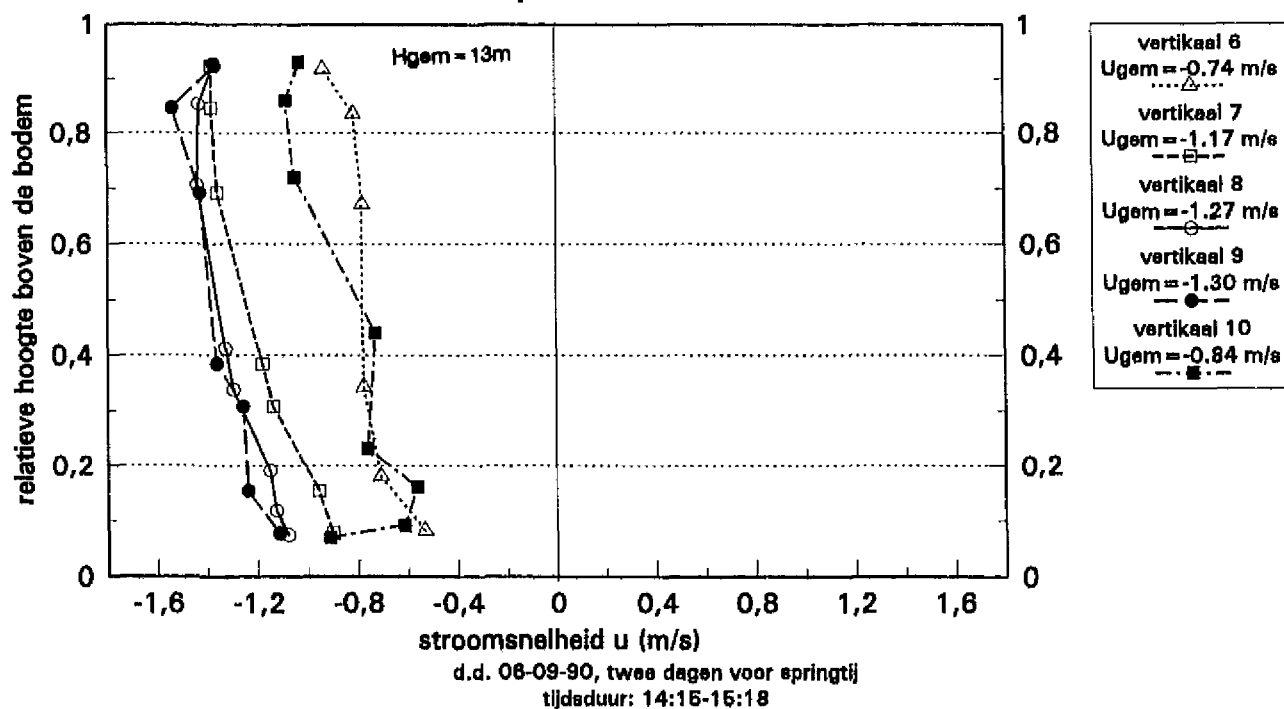
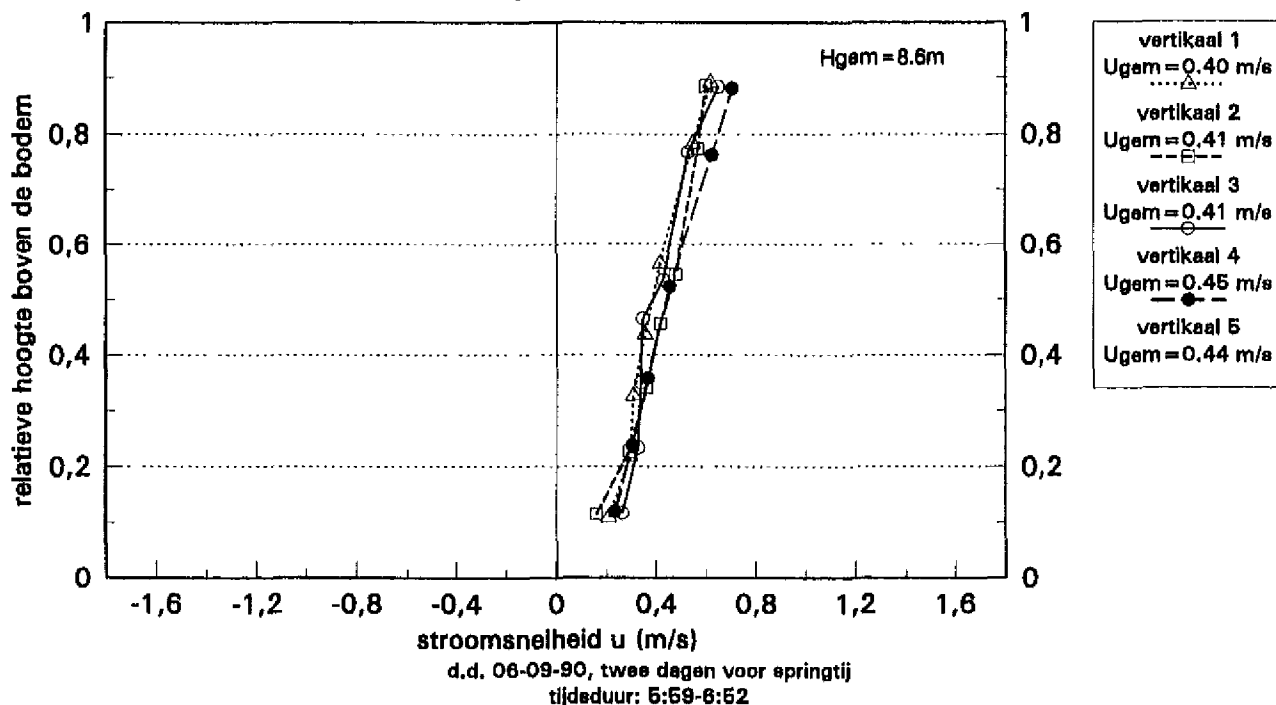


Fig.18 Verticale verdeling van de primaire stroomcomponenten in meetpunt 4 van raai 5

**De verticale verdeling van de stroomsnelheid (u)
evenwijdig aan de geul-as tijdens ebstroom
meetpunt 5 debietraai 5 (elmar)**



**De verticale verdeling van de stroomsnelheid (u)
evenwijdig aan de geul-as tijdens vloedstroom
meetpunt 5 debietraai 5 (elmar)**

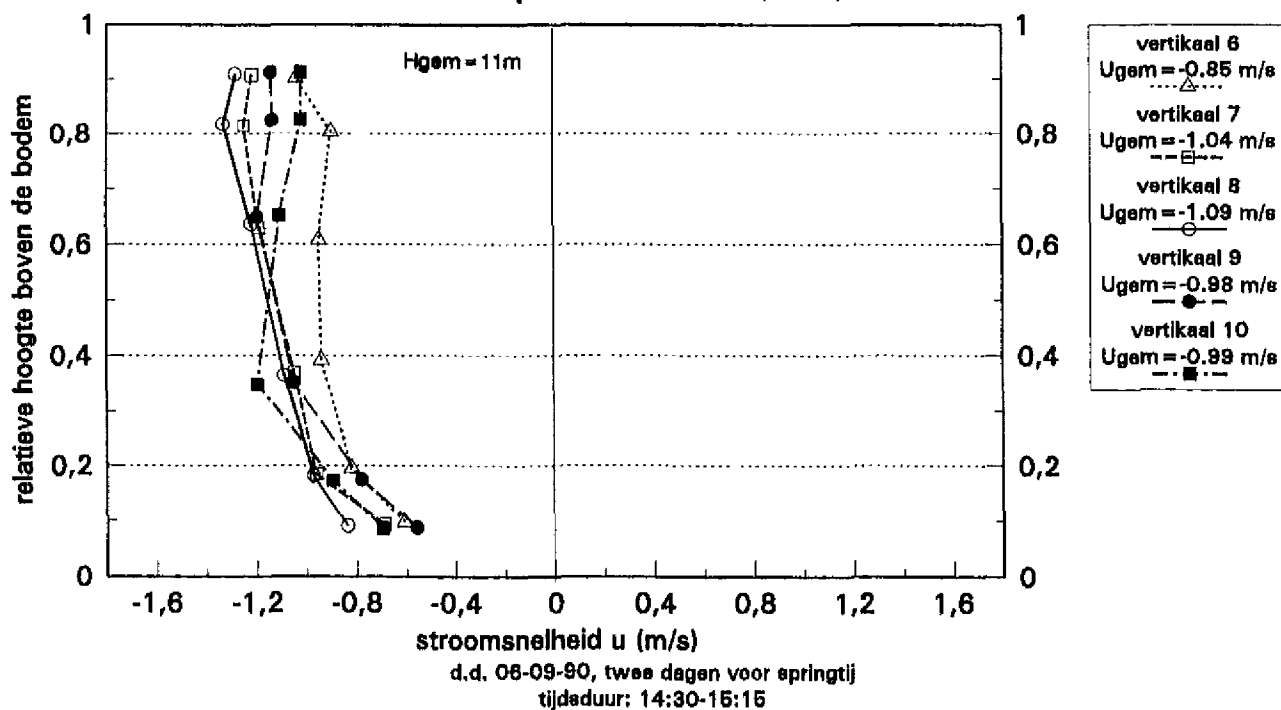
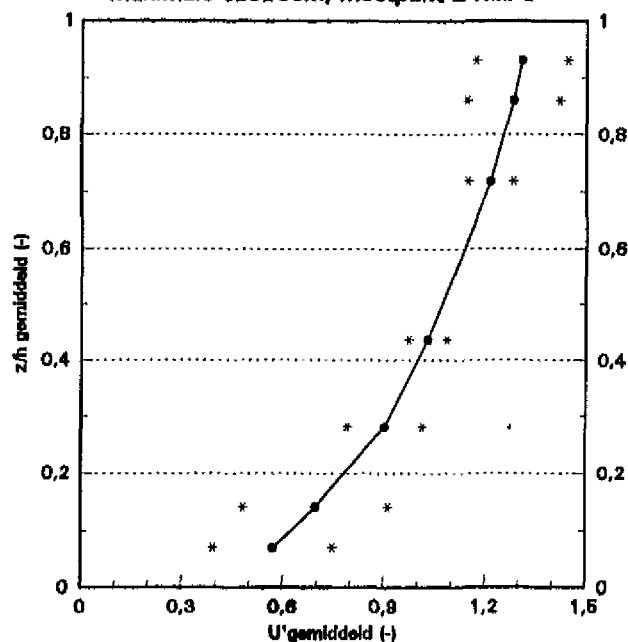


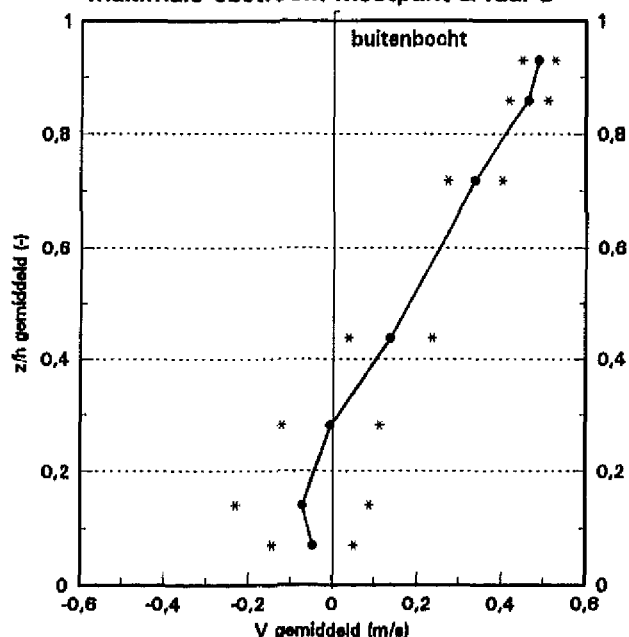
Fig.19 Verticale verdeling van de primaire stroomcomponenten in meetpunt 5 van raai 5

Gestandaardiseerde en gemiddelde stroomverticaal
van de primaire stroomcomponent u
maximale ebstroom, meetpunt 2 raai 3



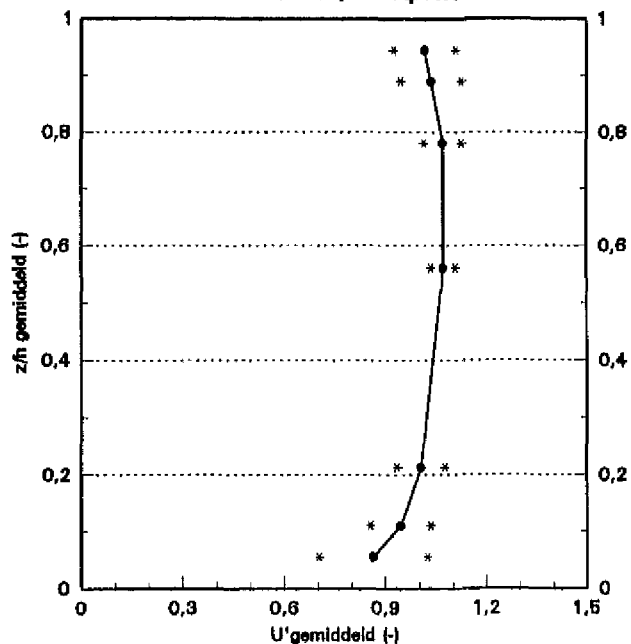
U' sigma
—•— *
middelingstijd: 7:36-8:47, $h(\text{gem}) = 17\text{m}$

Gemiddelde stroomverticaal van de secundaire
stroomcomponent v tijdens
maximale ebstroom meetpunt 2 raai 3



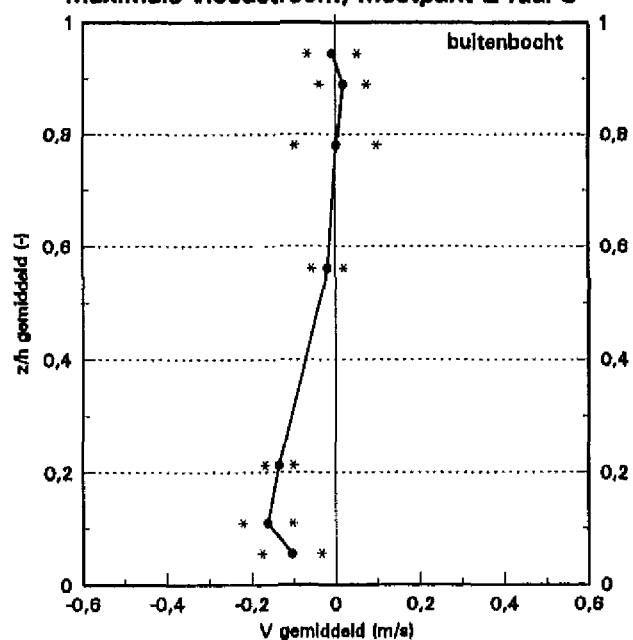
V sigma
—•— *
middelingstijd: 7:36-8:47

Gestandaardiseerde en gemiddelde stroomverticaal
van de primaire stroomcomponent u
maximale vloedstroom, meetpunt 2 raai 3



U' sigma
—•— *
middelingstijd: 14:01-15:15, $h(\text{gem}) = 18.2\text{m}$

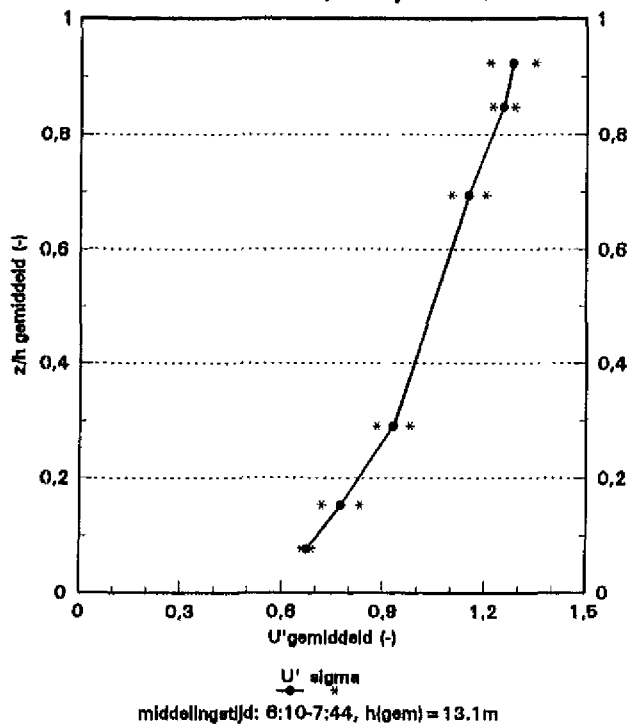
Gemiddelde stroomverticaal van de secundaire
stroomcomponent v
maximale vloedstroom, meetpunt 2 raai 3



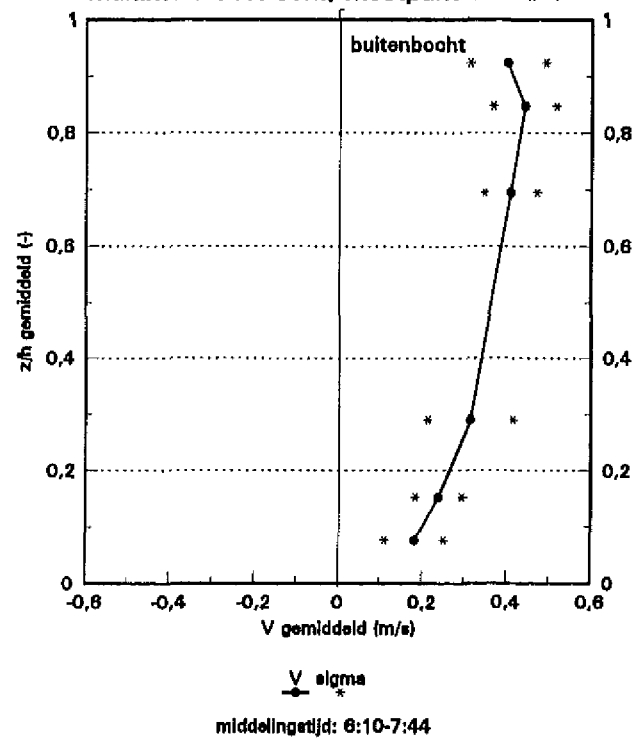
V sigma
—•— *
middelingstijd: 14:01-15:15

Fig.20 Genormaliseerde gemiddelde primaire stroomverticalen en gemiddelde secundaire stroomverticalen in meetpunt 2 van raai 3

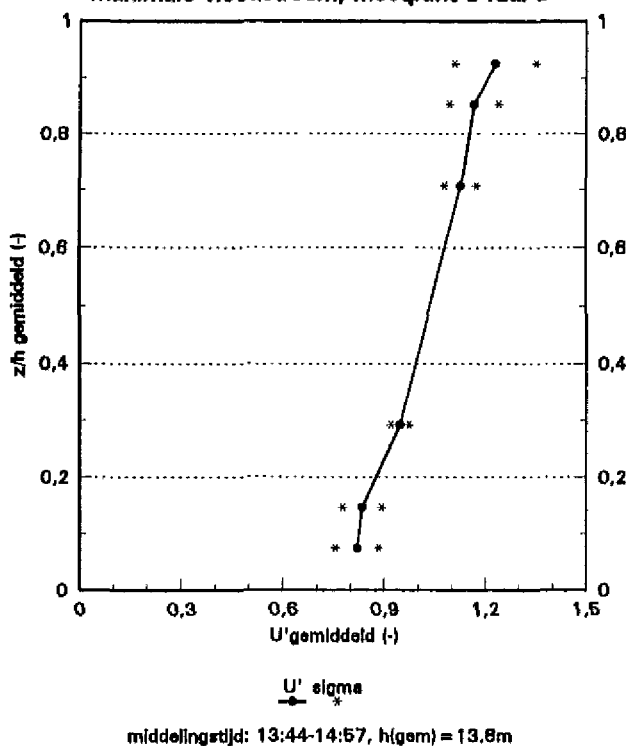
Gestandaardiseerde en gemiddelde stroomverticaal
van de primaire stroomcomponent u
maximale ebstroom, meetpunt 3 raai 3



Gemiddelde stroomverticaal van de secundaire
stroomcomponent v tijdens
maximale ebstroom, meetpunt 3 raai 3



Gestandaardiseerde en gemiddelde stroomverticaal
van de primaire stroomcomponent u
maximale vloedstroom, meetpunt 3 raai 3



Gemiddelde stroomverticaal van de secundaire
stroomcomponent v
maximale vloedstroom, meetpunt 3 raai 3

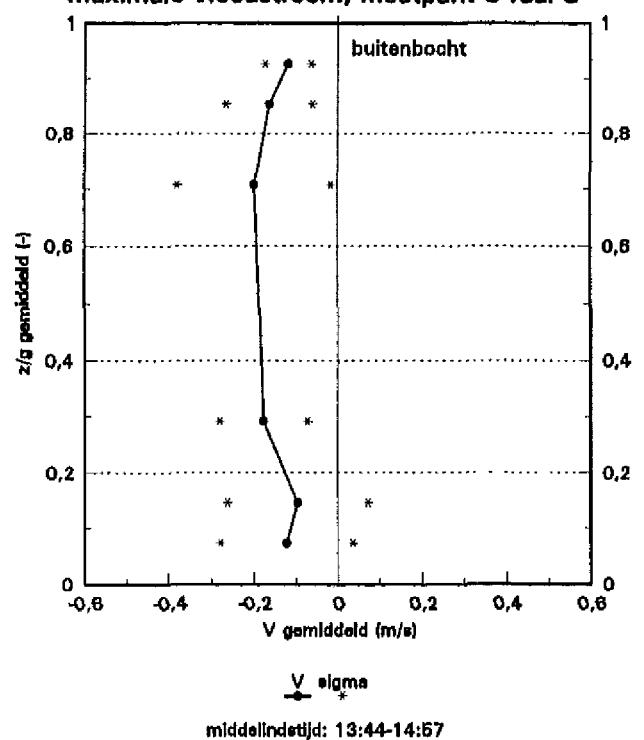
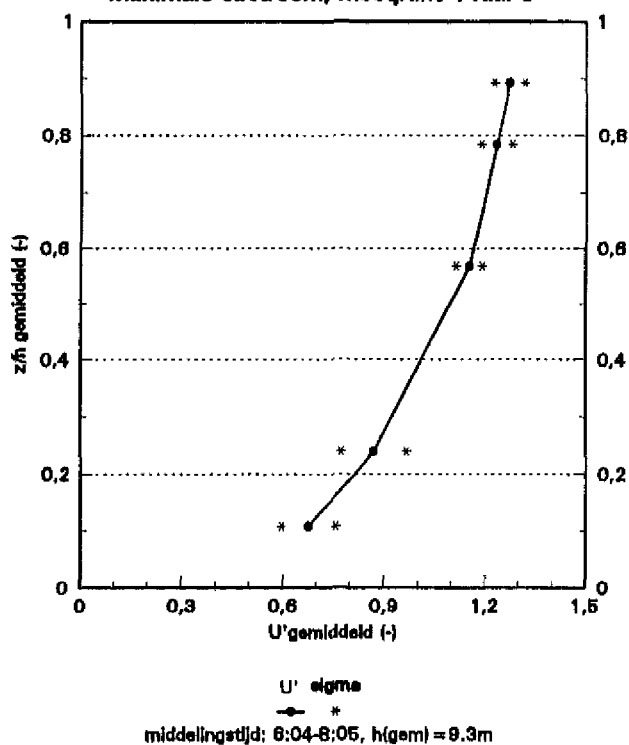
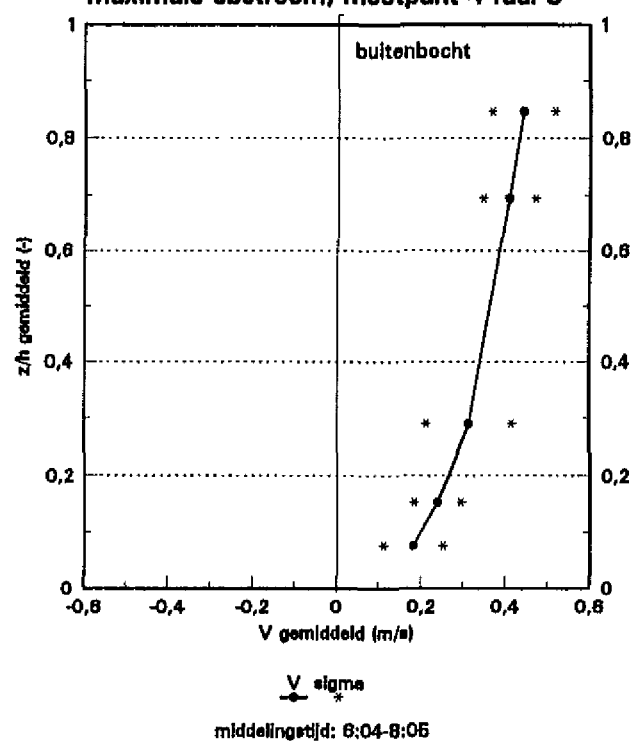


Fig.21 Genormaliseerde gemiddelde primaire stroomverticalen en gemiddelde secundaire stroomverticalen in meetpunt 3 van raai 3

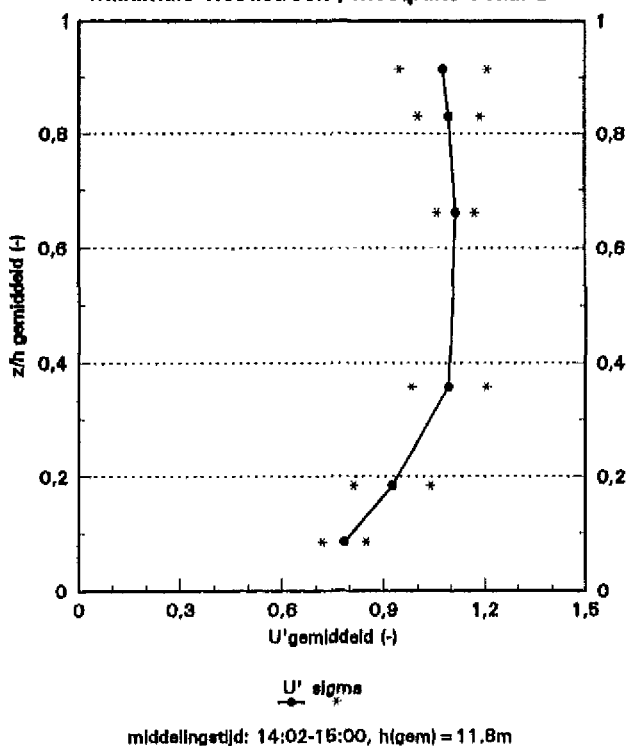
Gestandaardiseerde en gemiddelde stroomverticaal
van de primaire stroomcomponent u
maximale ebstroom, meetpunt 4 raai 3



Gemiddelde stroomverticaal van de secundaire
stroomcomponent v tijdens
maximale ebstroom, meetpunt 4 raai 3



Gestandaardiseerde en gemiddelde stroomverticaal
van de primaire stroomcomponent u
maximale vloedstroom, meetpunt 4 raai 3



Gemiddelde stroomverticaal van de secundaire
stroomcomponent v
maximale vloedstroom, meetpunt 4 raai 3

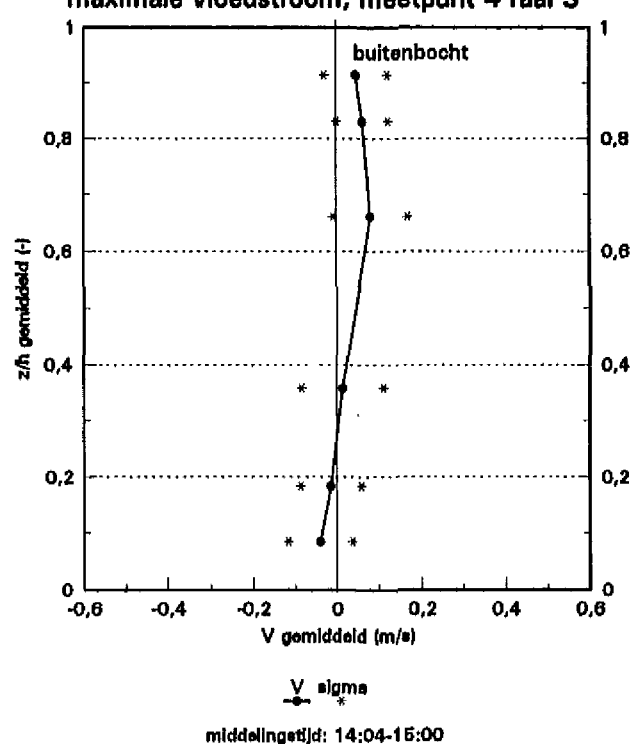
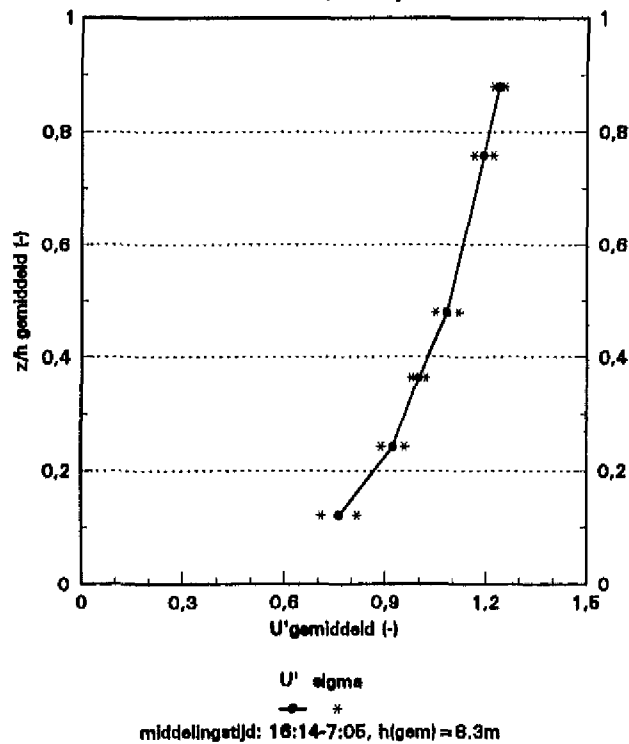
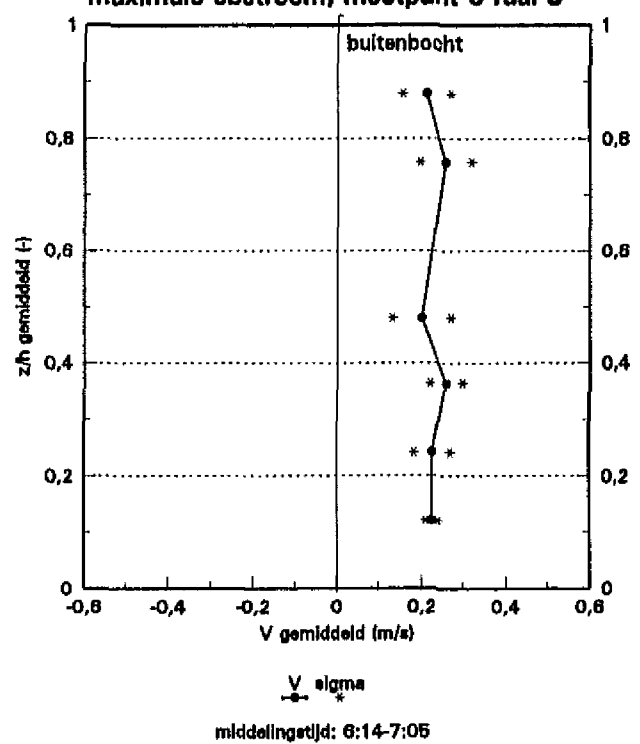


Fig.22 Genormaliseerde gemiddelde primaire stroomverticalen en gemiddelde secundaire stroomverticalen in meetpunt 4 van raai 3

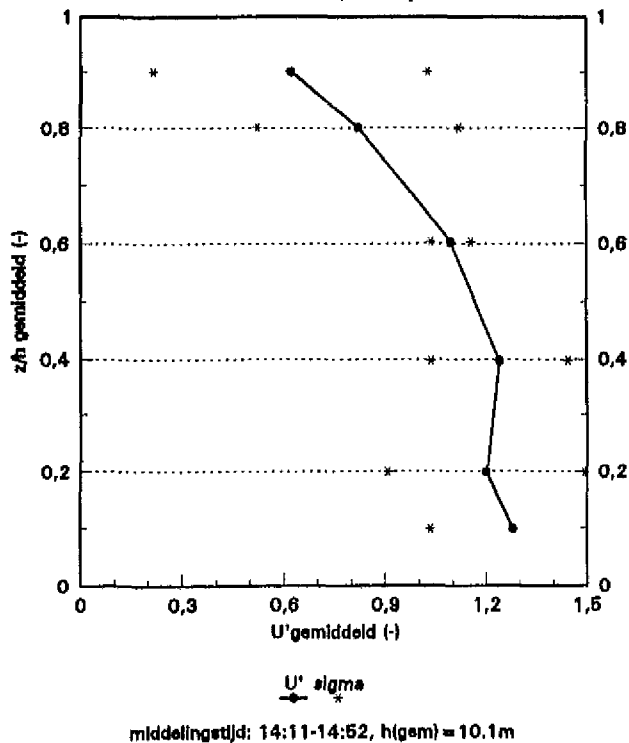
Gestandaardiseerde en gemiddelde stroomverticaal
van de primaire stroomcomponent u
maximale ebstroom, meetpunt 5 raai 3



Gemiddelde stroomverticaal van de secundaire
stroomcomponent v tijdens
maximale ebstroom, meetpunt 5 raai 3



Gestandaardiseerde en gemiddelde stroomverticaal
van de primaire stroomcomponent u
maximale vloedstroom, meetpunt 5 raai 3



Gemiddelde stroomverticaal van de secundaire
stroomcomponent v
maximale vloedstroom, meetpunt 5 raai 3

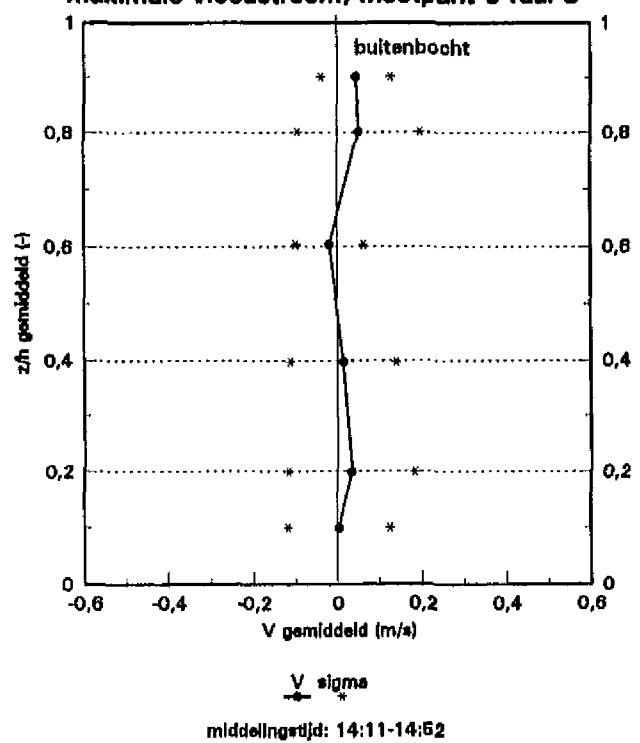
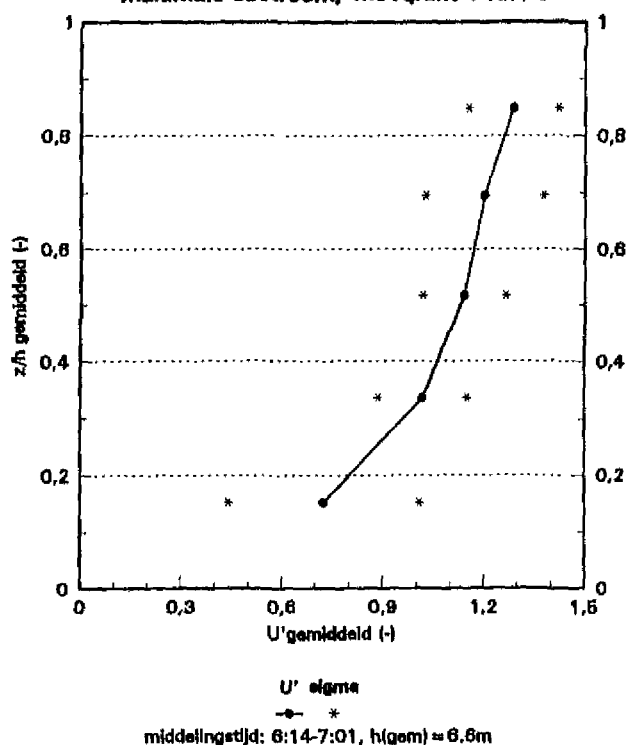
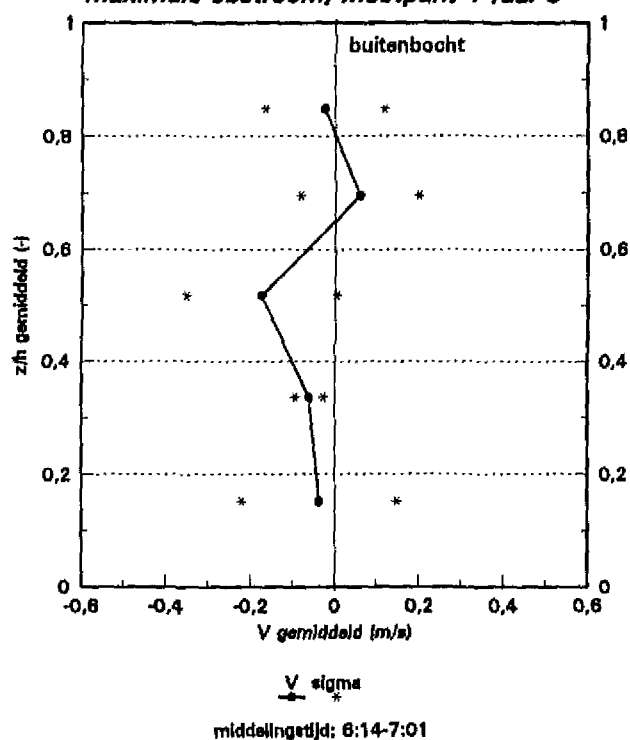


Fig.23 Genormaliseerde gemiddelde primaire stroomverticalen en gemiddelde secundaire stroomverticalen in meetpunt 5 van raai 3

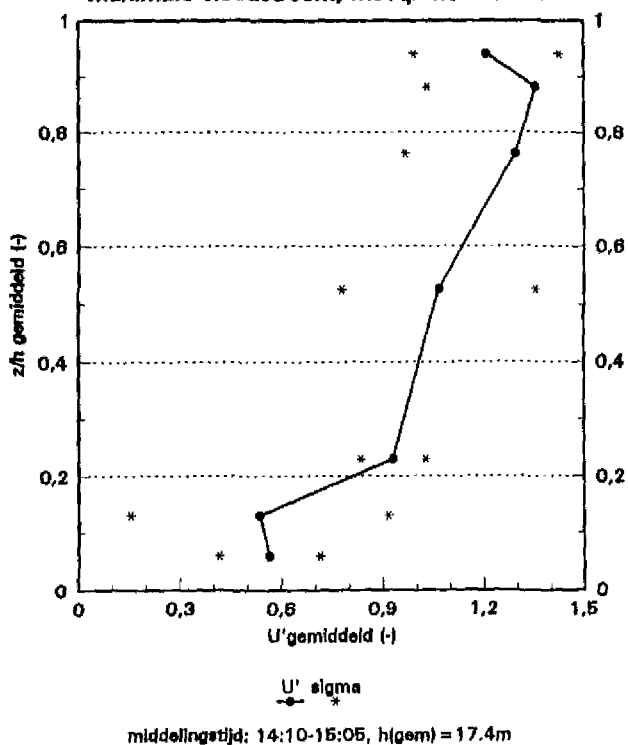
Gestandaardiseerde en gemiddelde stroomverticaal
van de primaire stroomcomponent u
maximale ebstroom, meetpunt 1 raai 5



Gemiddelde stroomverticaal van de secundaire
stroomcomponent v
maximale ebstroom, meetpunt 1 raai 5



Gestandaardiseerde en gemiddelde stroomverticaal
van de primaire stroomcomponent u
maximale vloedstroom, meetpunt 1 raai 5



Gemiddelde stroomverticaal van de secundaire
stroomcomponent v
maximale vloedstroom, meetpunt 1 raai 5

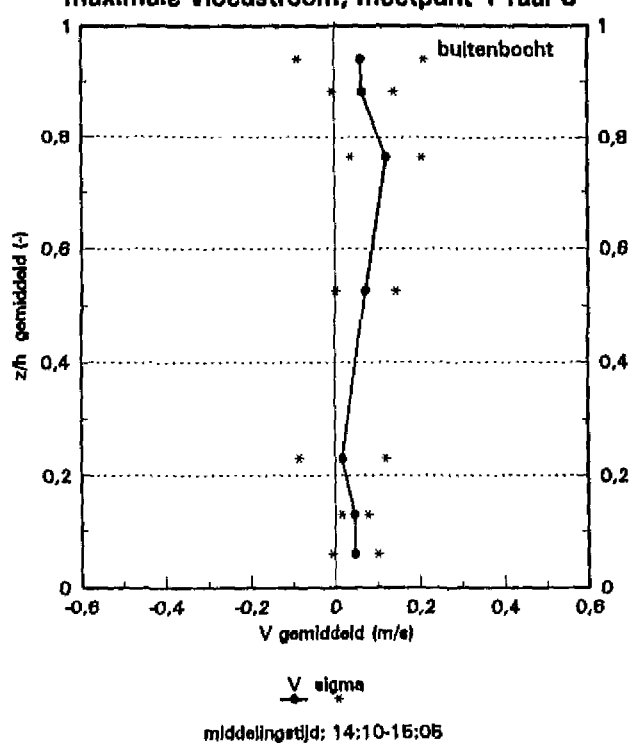
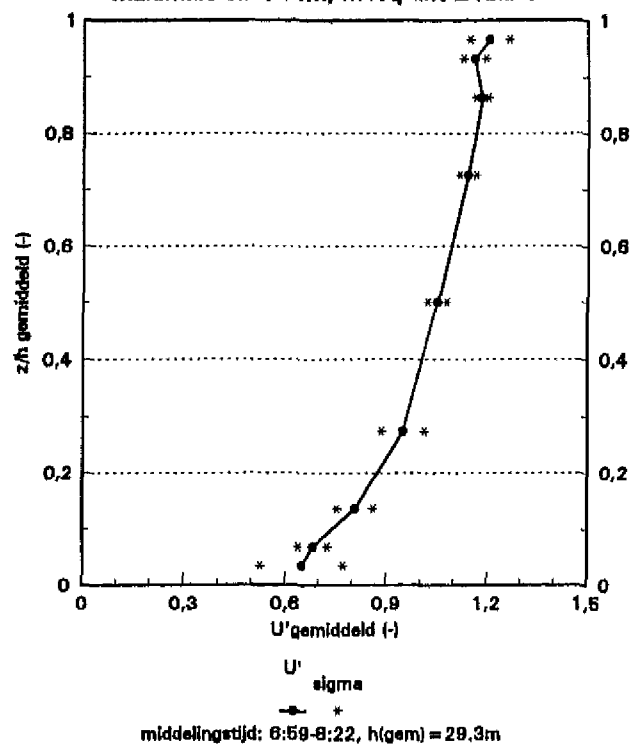
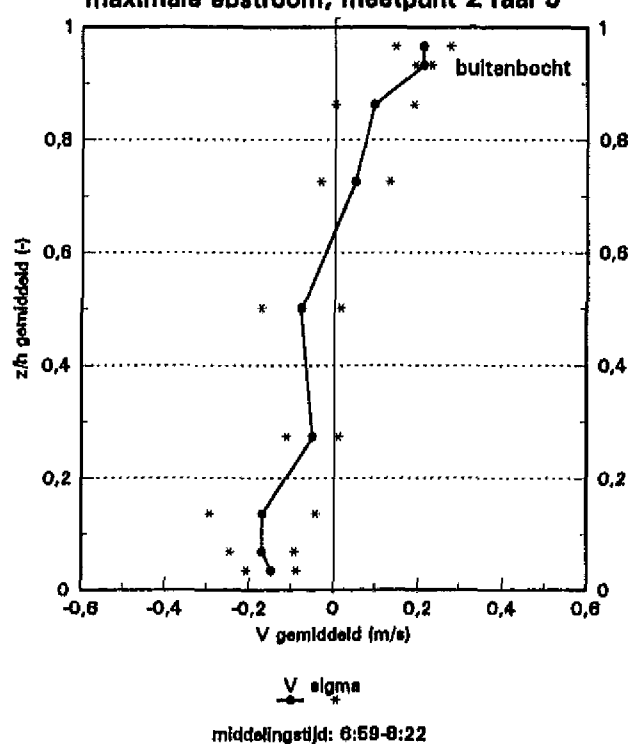


Fig.24 Genormaliseerde gemiddelde primaire stroomverticalen en gemiddelde secundaire stroomverticalen in meetpunt 1 van raai 5

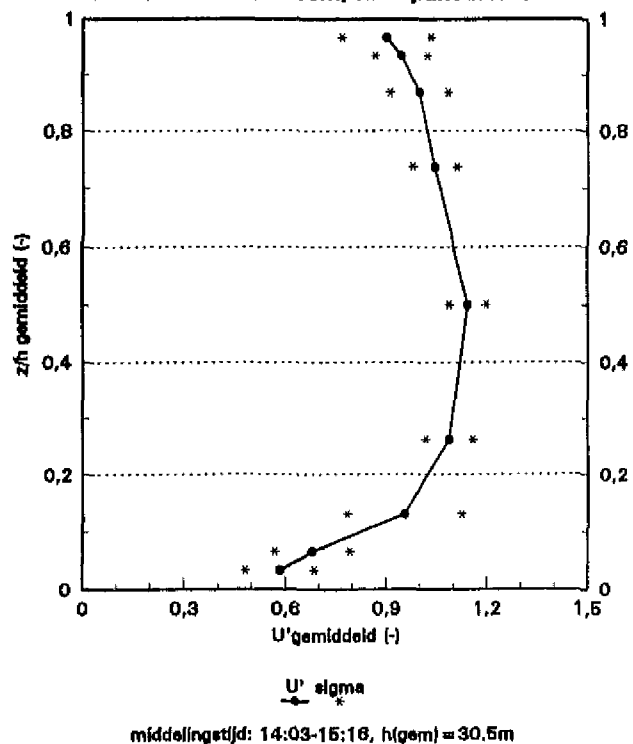
Gestandaardiseerde en gemiddelde stroomverticaal
van de primaire stroomcomponent u
maximale ebstroom, meetpunt 2 raai 5



Gemiddelde stroomverticaal van de secundaire
stroomcomponent v
maximale ebstroom, meetpunt 2 raai 5



Gestandaardiseerde en gemiddelde stroomverticaal
van de primaire stroomcomponent u
maximale vloedstroom, meetpunt 2 raai 5



Gemiddelde stroomverticaal van de secundaire
stroomcomponent v
maximale vloedstroom, meetpunt 2 raai 5

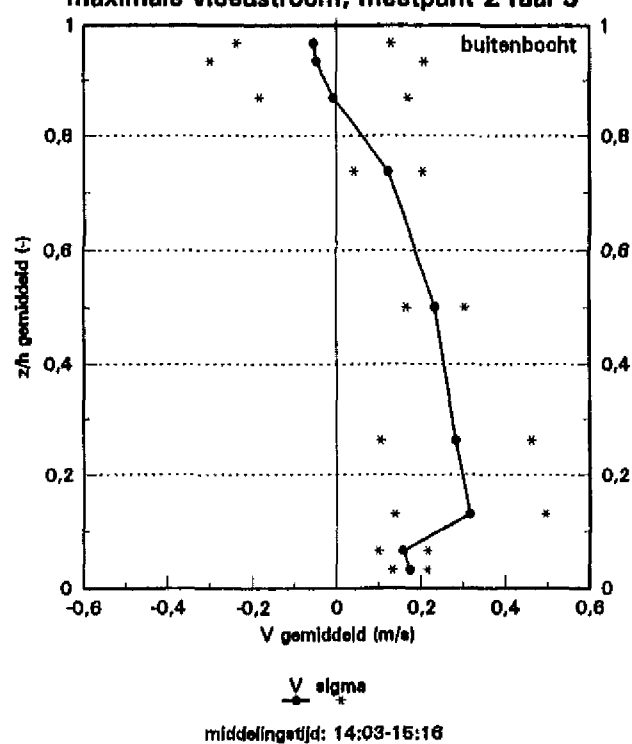
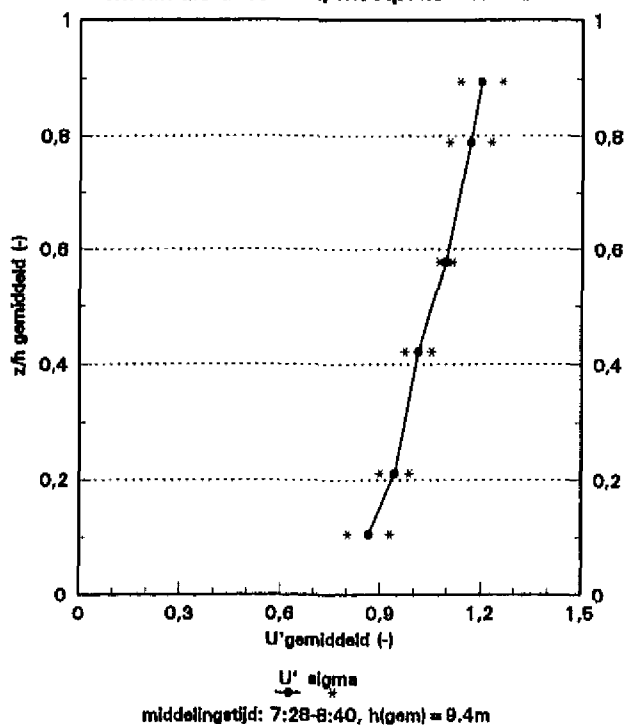
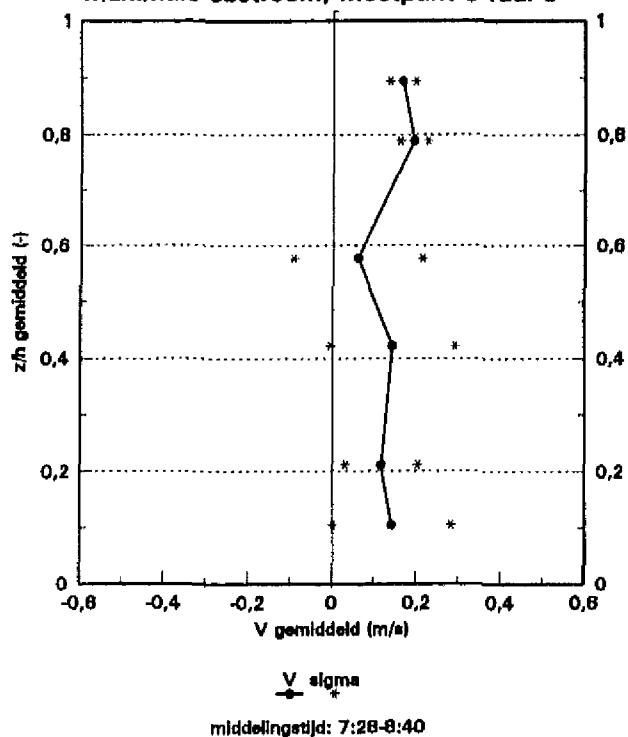


Fig.25 Genormaliseerde gemiddelde primaire stroomverticalen en gemiddelde secundaire stroomverticalen in meetpunt 2 van raai 5

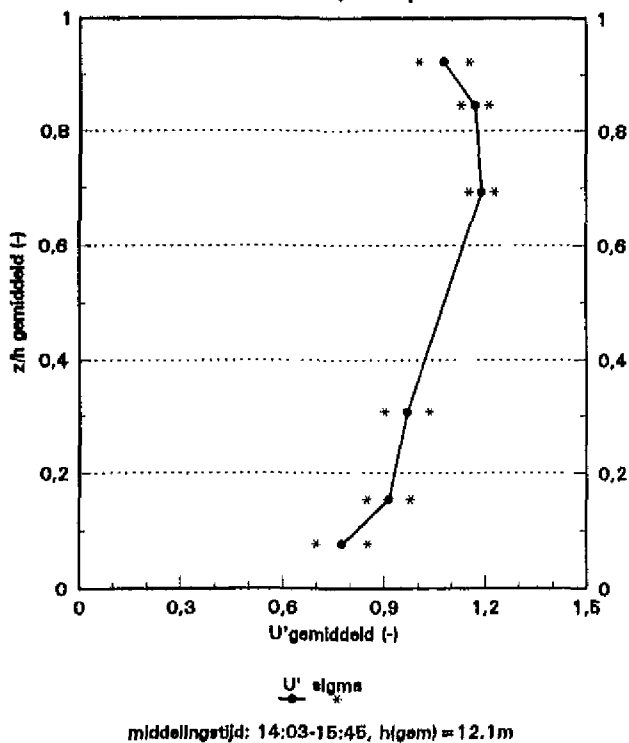
Gestandaardiseerde en gemiddelde stroomverticaal van de primaire stroomcomponent u maximale ebstroom, meetpunt 3 raai 5



Gemiddelde stroomverticaal van de secundaire stroomcomponent v tijdens maximale ebstroom, meetpunt 3 raai 3



Gestandaardiseerde en gemiddelde stroomverticaal van de primaire stroomcomponent u maximale vloedstroom, meetpunt 3 raai 5



Gemiddelde stroomverticaal van de secundaire stroomcomponent v maximale vloedstroom, meetpunt 3 raai 5

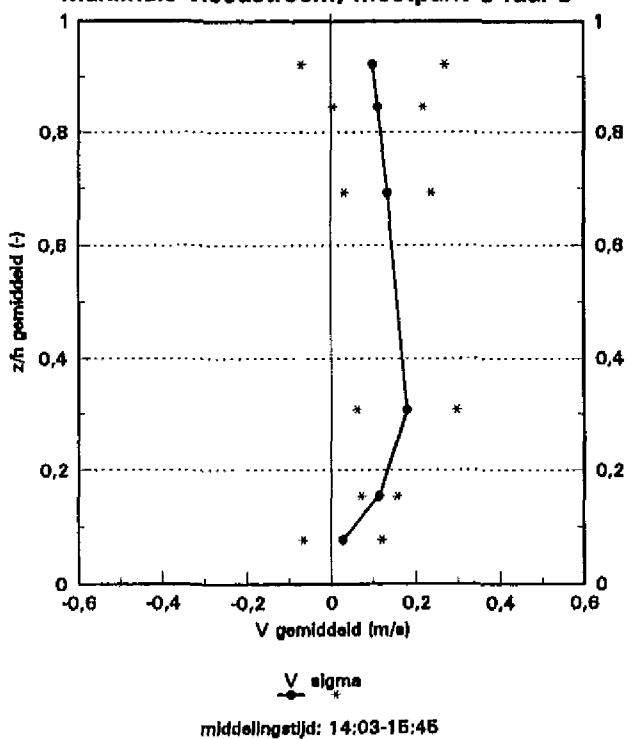
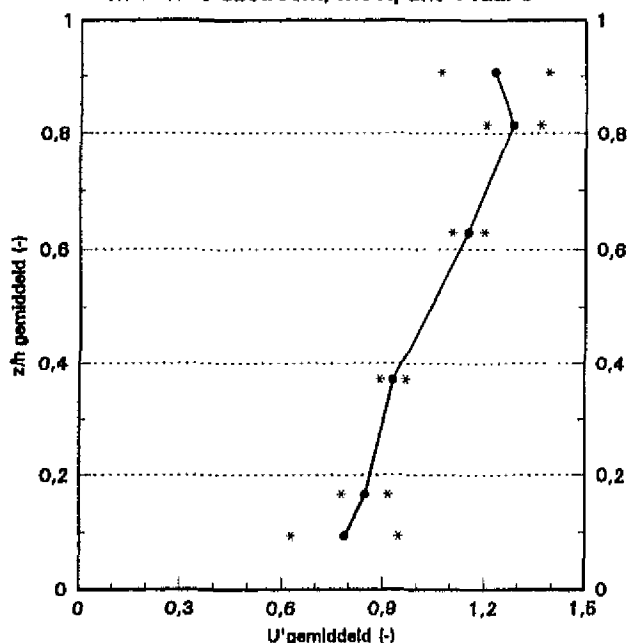


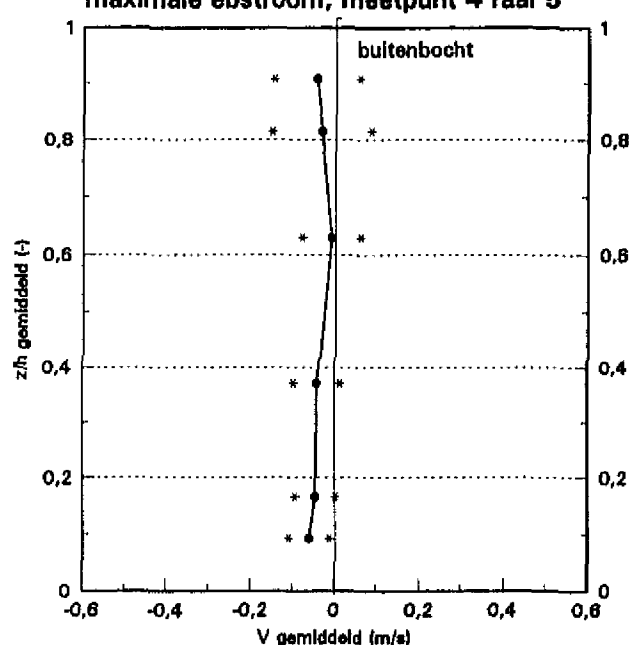
Fig.26 Genormaliseerde gemiddelde primaire stroomverticalen en gemiddelde secundaire stroomverticalen in meetpunt 3 van raai 5

Gestandaardiseerde en gemiddelde stroomverticaal van de primaire stroomcomponent u maximale ebstroom, meetpunt 4 raai 5



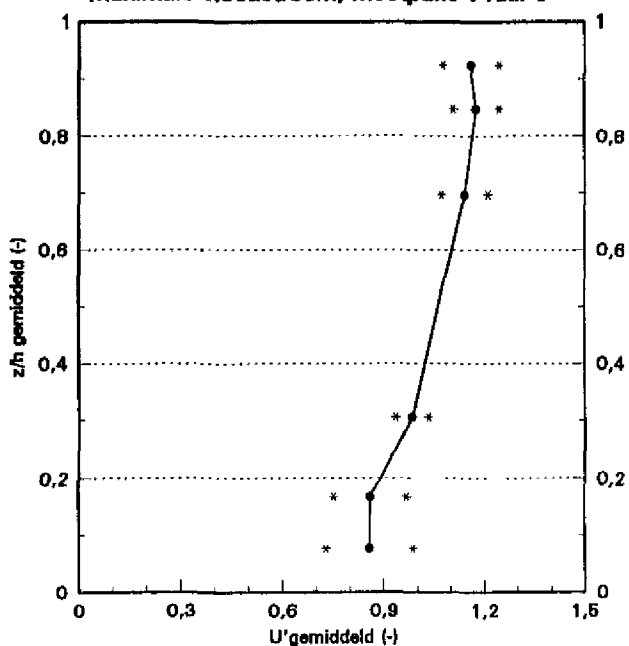
$U' \sigma$
middelingstijd: 6:30-7:30, $h(\text{gem}) = 10.8\text{m}$

Gemiddelde stroomverticaal van de secundaire stroomcomponent v tijdens maximale ebstroom, meetpunt 4 raai 5



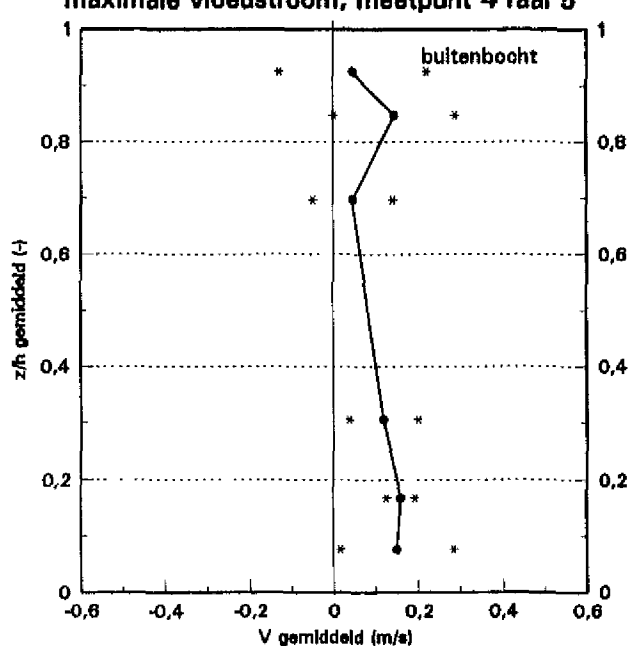
$V \sigma$
middelingstijd: 6:30-7:30

Gestandaardiseerde en gemiddelde stroomverticaal van de primaire stroomcomponent u maximale vloedstroom, meetpunt 4 raai 5



$U' \sigma$
middelingstijd: 14:15-15:18, $h(\text{gem}) = 13\text{m}$

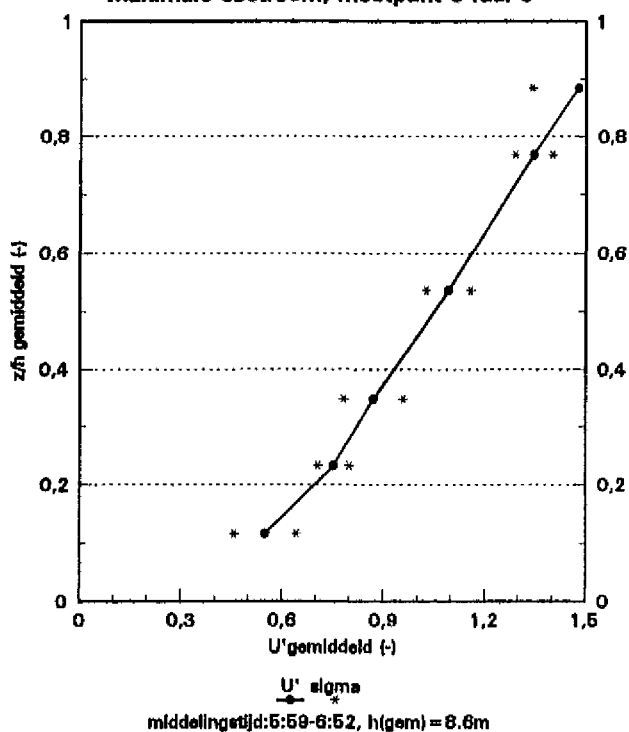
Gemiddelde stroomverticaal van de secundaire stroomcomponent v maximale vloedstroom, meetpunt 4 raai 5



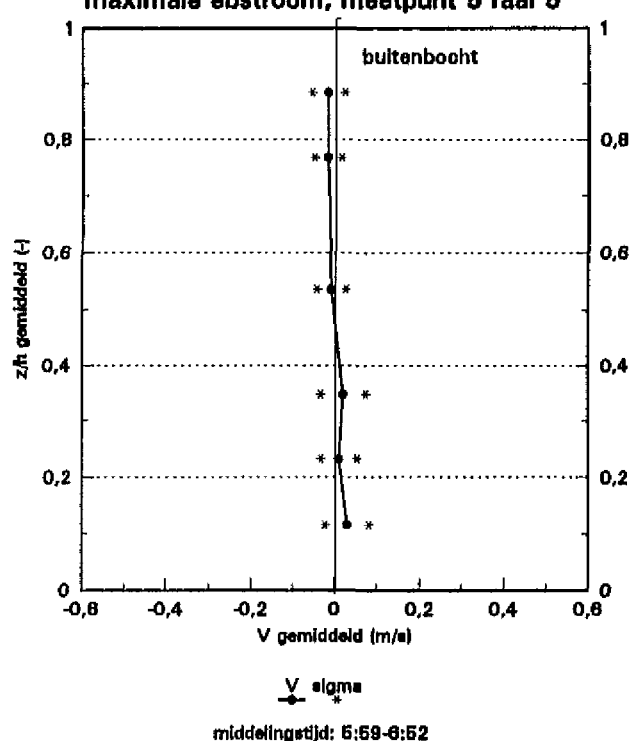
$V \sigma$
middelingstijd: 14:15-15:18

Fig.27 Genormaliseerde gemiddelde primaire stroomverticalen en gemiddelde secundaire stroomverticalen in meetpunt 4 van raai 5

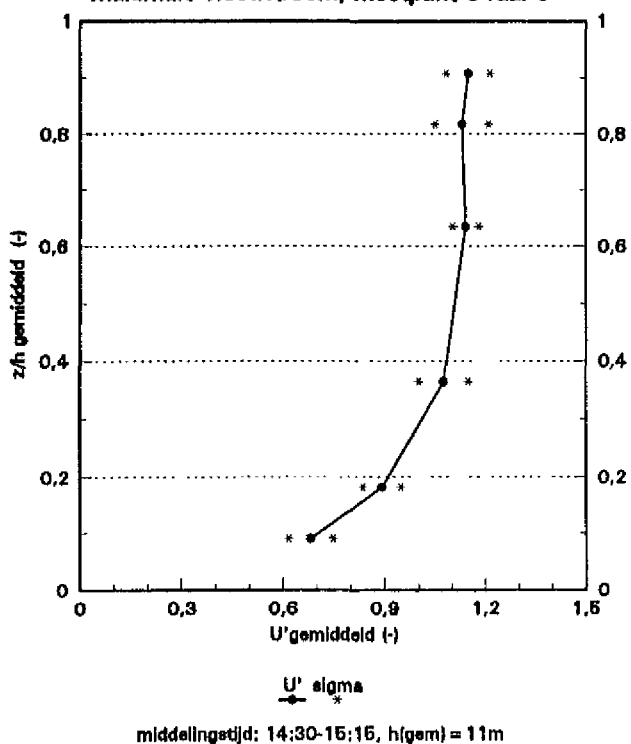
Gestandaardiseerde en gemiddelde stroomverticaal
van de primaire stroomcomponent u
maximale ebstroom, meetpunt 5 raai 5



Gemiddelde stroomverticaal van de secundaire
stroomcomponent v tijdens
maximale ebstroom, meetpunt 5 raai 5



Gestandaardiseerde en gemiddelde stroomverticaal
van de primaire stroomcomponent u
maximale vloedstroom, meetpunt 5 raai 5



Gemiddelde stroomverticaal van de secundaire
stroomcomponent v
maximale vloedstroom, meetpunt 5 raai 5

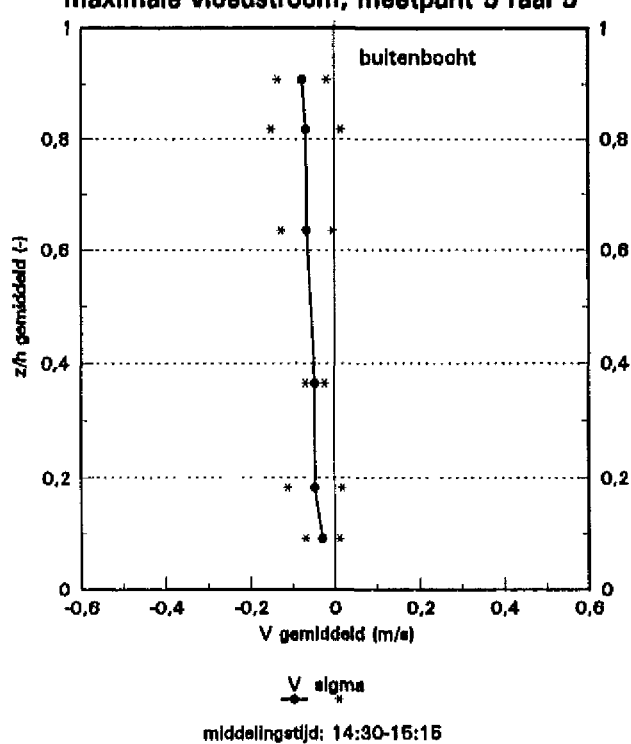


Fig.28 Genormaliseerde gemiddelde primaire stroomverticalen en gemiddelde secundaire stroomverticalen in meetpunt 5 van raai 5

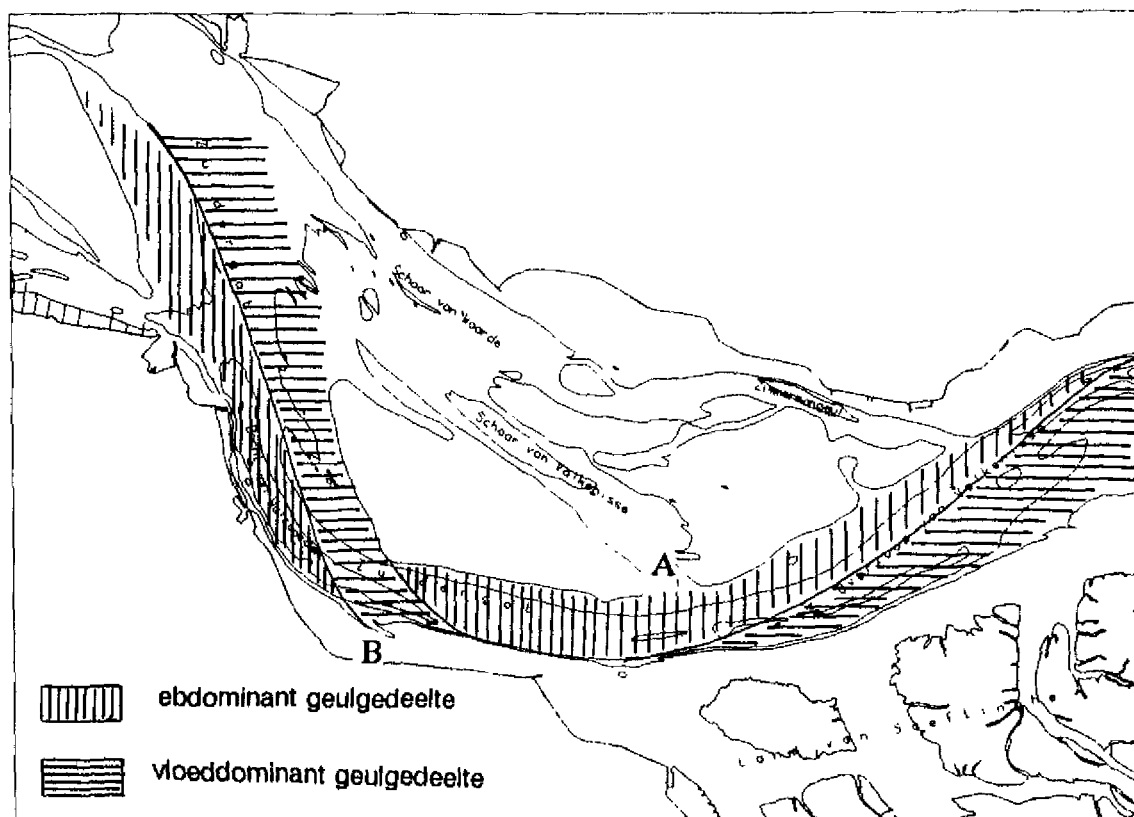


Fig.29 Ruimtelijke variatie in eb-vloeddominantie van de primaire stroomcomponent: getijstroom in relatie tot meandergeometrie.

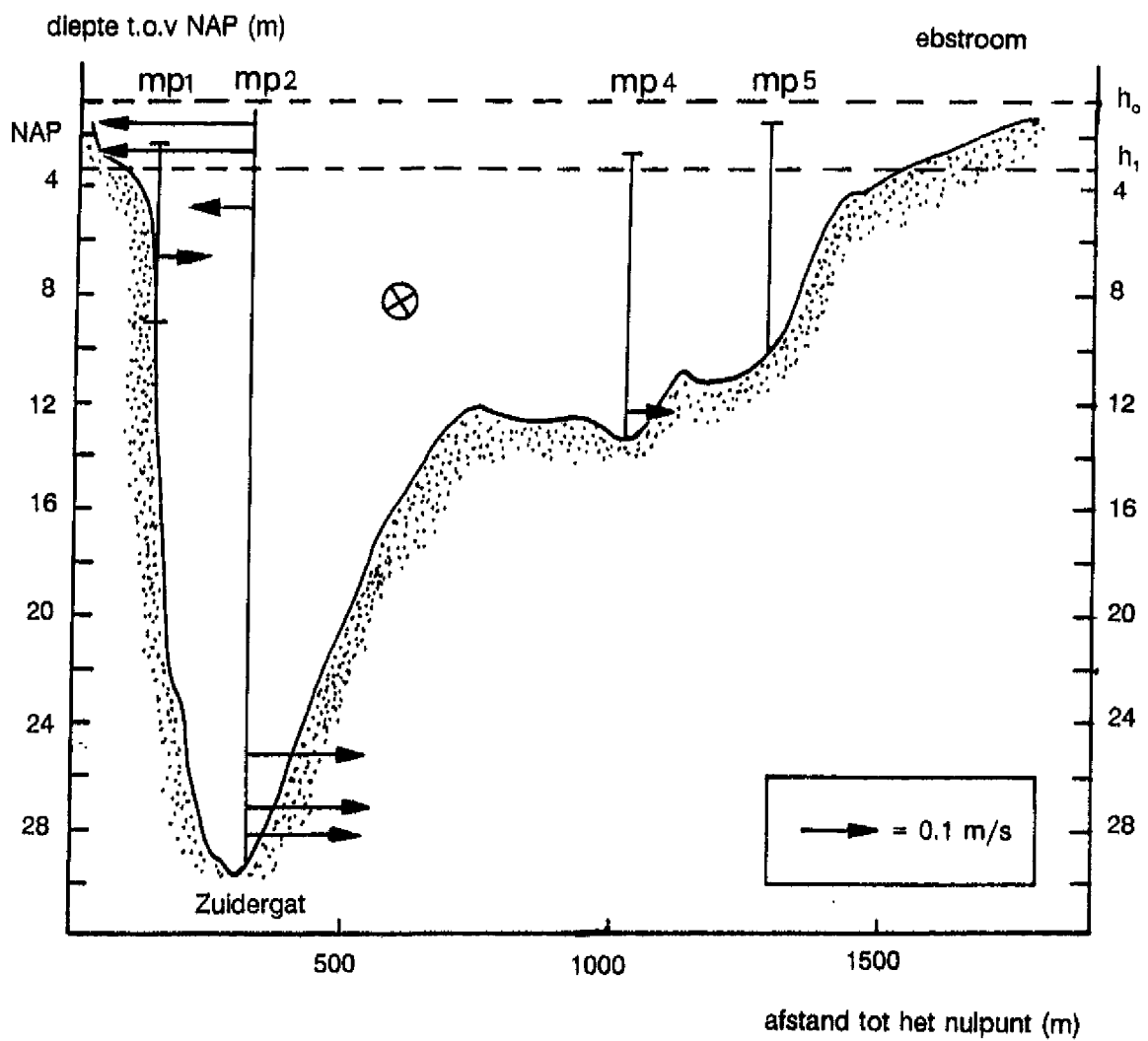


Fig.30 Significante secundaire stroomcomponenten in het Zuidergat (raai 5).

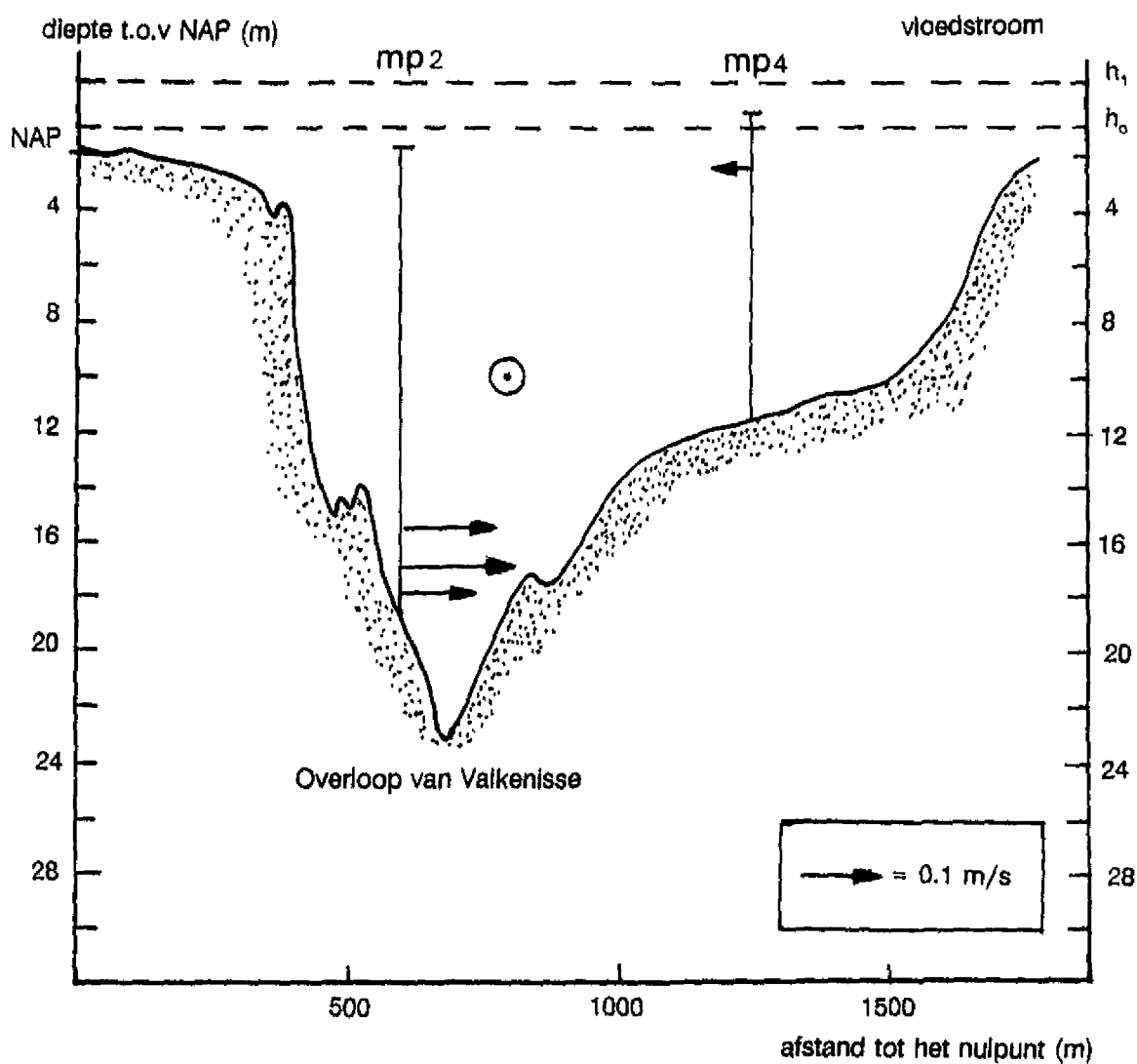
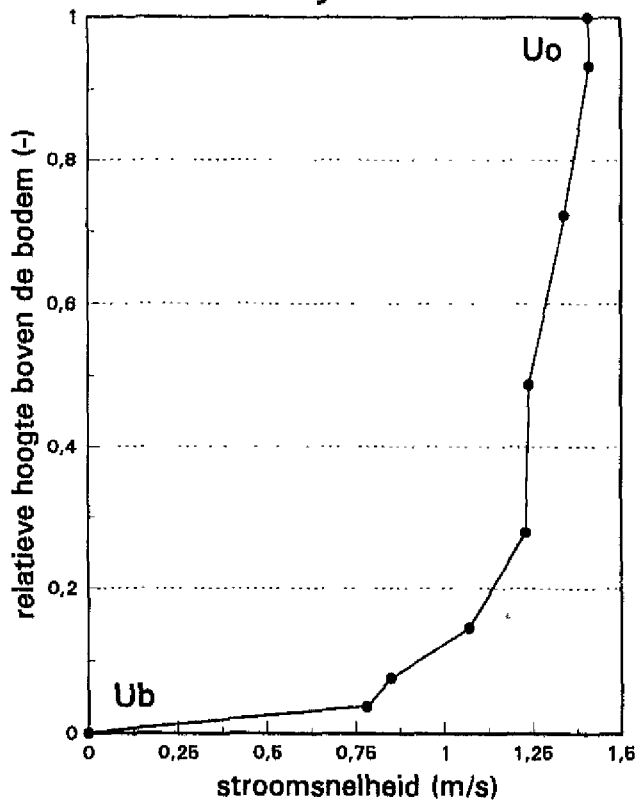
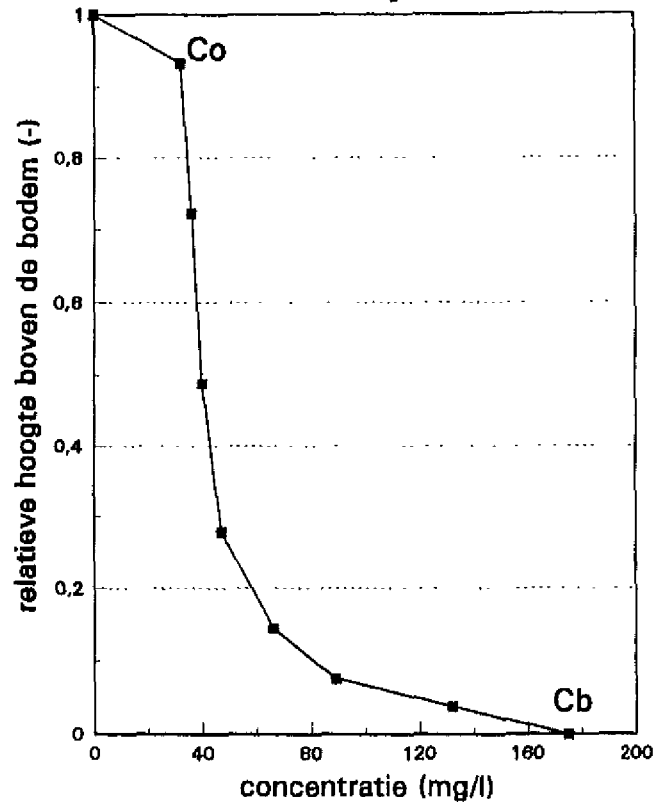


Fig.31 Significante secundaire stroomcomponenten in de Overloop van Valkenisse (raai 3).

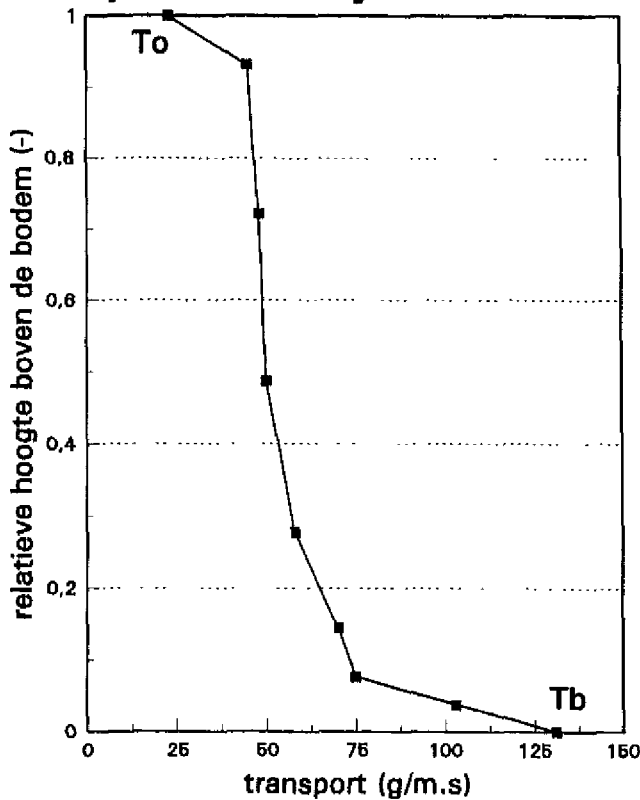
Stroomverticaal tijdens ebstroom



Concentratieververticaal tijdens ebstroom



Transportverticaal tijdens ebstroom



$$U_o = U_{o-1}$$

$$U_b = 0 \text{ m/s}$$

$$C_o = 0 \text{ mg/l}$$

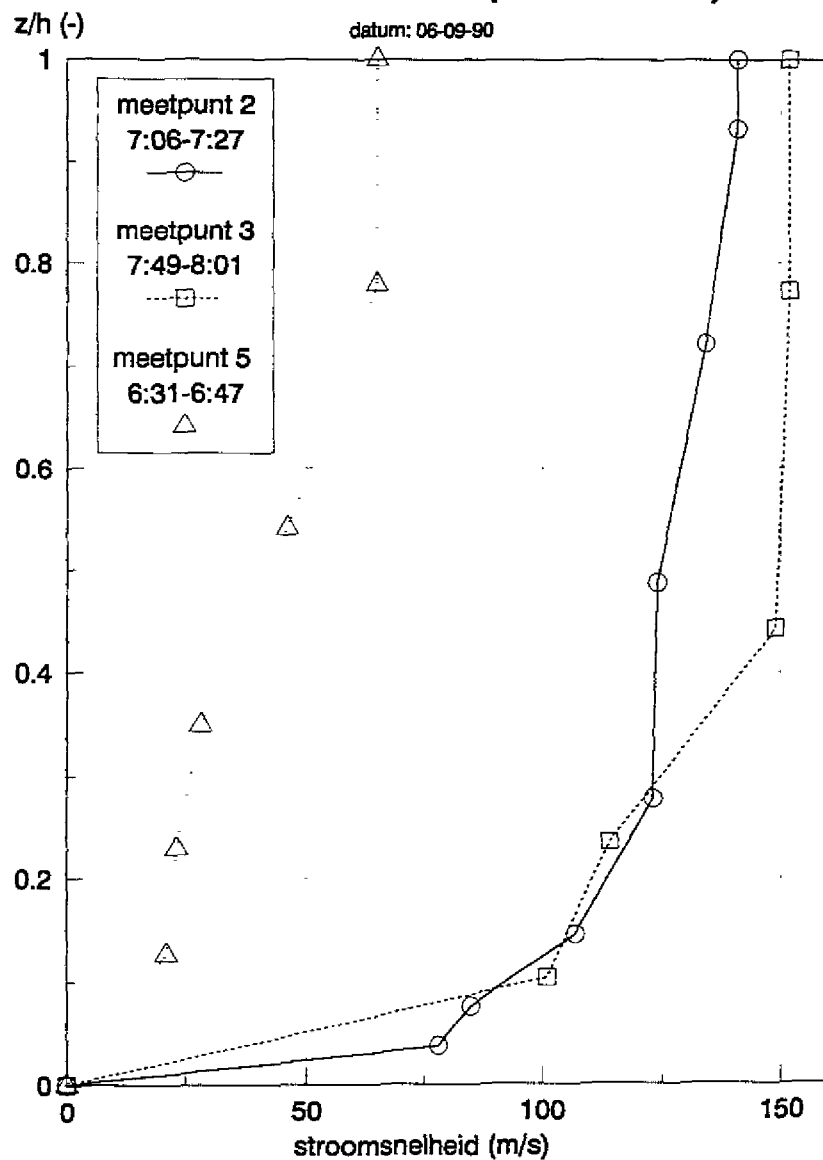
C_b = lineaire extrapolatie
vanuit C_{b+1} en C_{b+2}

$$T_o = (T_{o-1})/2$$

T_b = lineaire extrapolatie
vanuit T_{b+1} en T_{b+2}

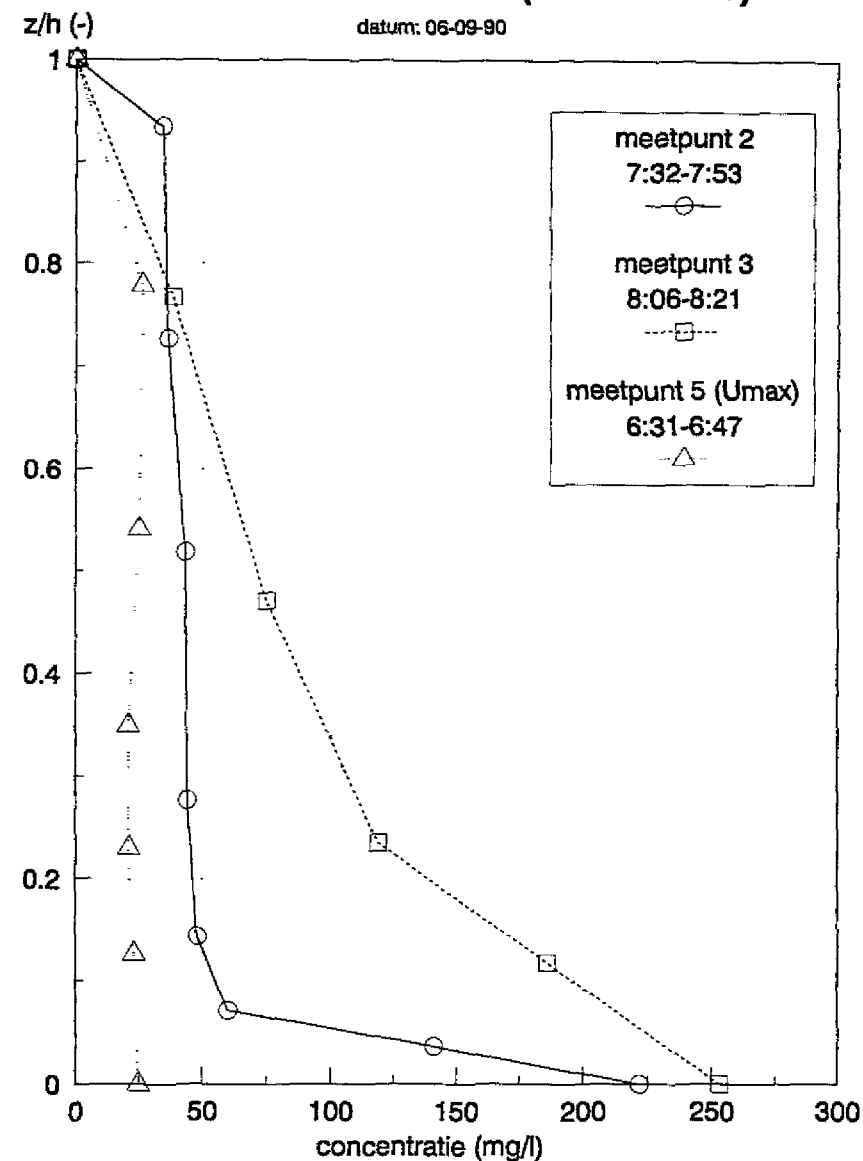
Fig.32 Extrapolatie-aannamen voor het construeren van stroom-, concentratie- en transportverticalen.

stroomverticalen in het Zuidergat tijdens maximale ebstroom (debietraai 5)



$U_{gem}(mp2)=1.2\text{ m/s}$ $U_{gem}(mp3)=1.31\text{ m/s}$ $U_{gem}(mp5)=0.42\text{ m/s}$
 $h(mp2)=26.8\text{ m}$ $h(mp3)=8.7\text{ m}$ $h(mp5)=8.7\text{ m}$

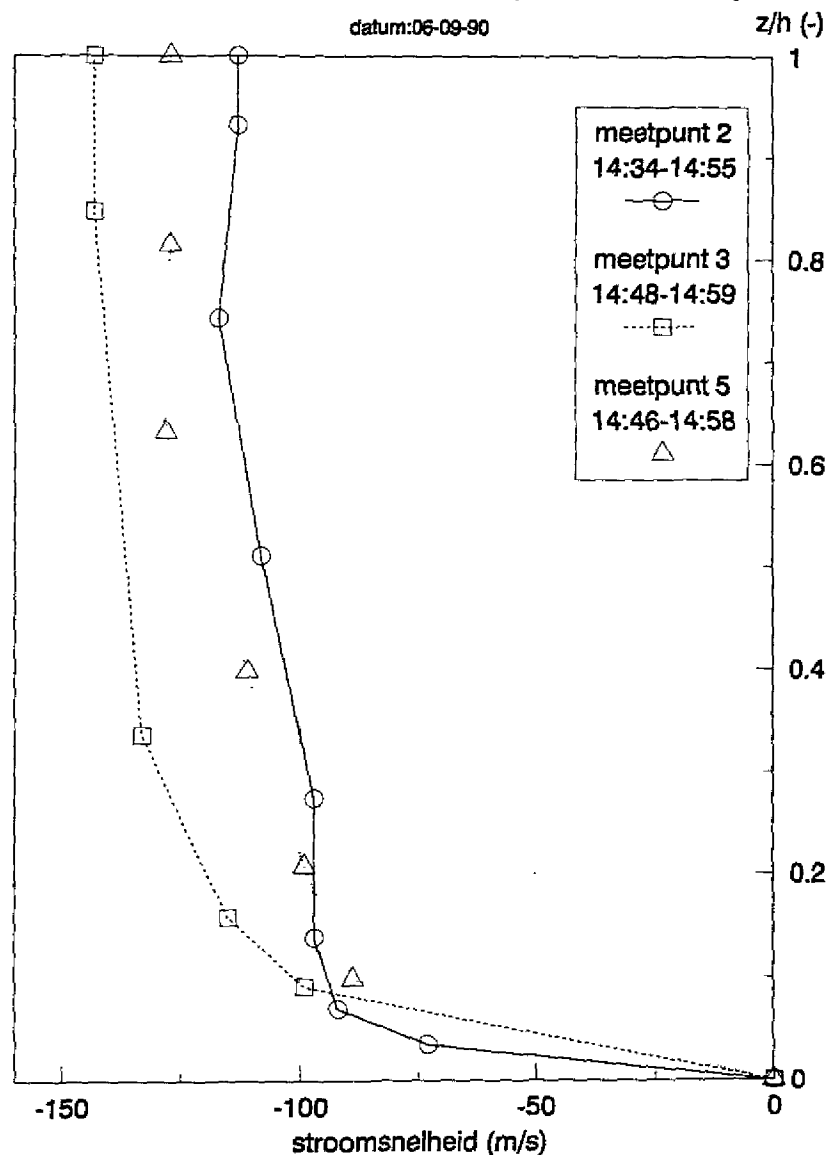
concentratieverticalen in het Zuidergat 20 min. na maximale ebstroom (debietraai 5)



$C_{gem}(mp2)=48\text{ mg/l}$ $C_{gem}(mp3)=88\text{ mg/l}$ $C_{gem}(mp5)=21\text{ mg/l}$

Fig.33 Stroomsnelheid- en concentratieverticalen in het Zuidergat tijdens maximale ebstroom

stroomverticalen in het Zuidergat tijdens maximale vloedstroom (debietraai 5)



concentratieverticalen in het Zuidergat 20 min. na maximale vloedstroom (debietraai 5)

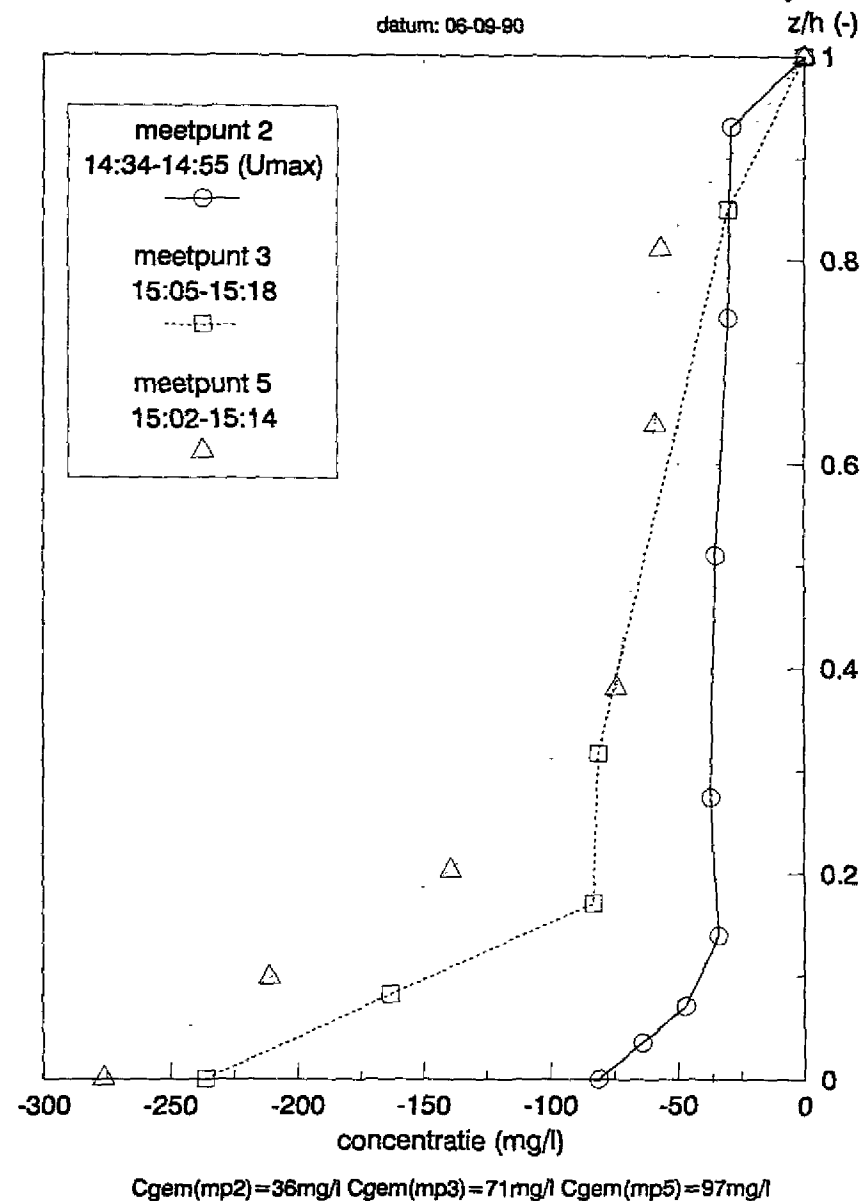
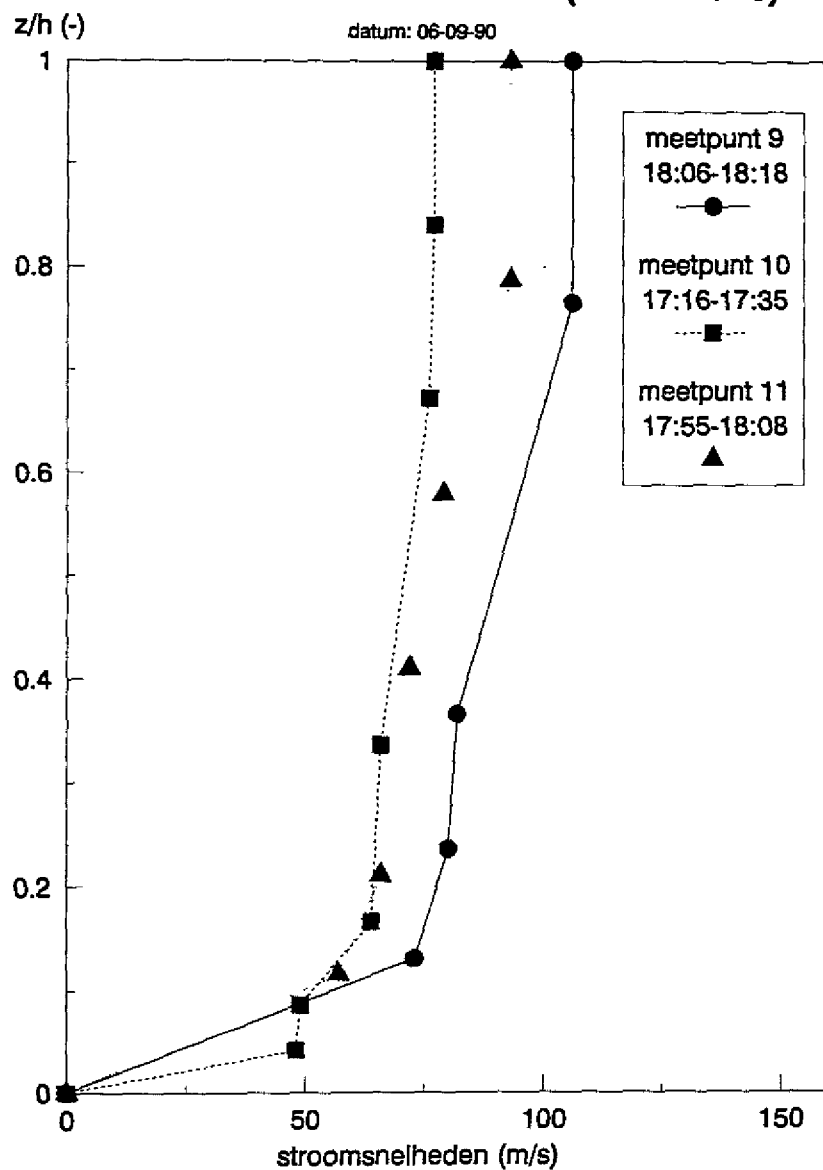


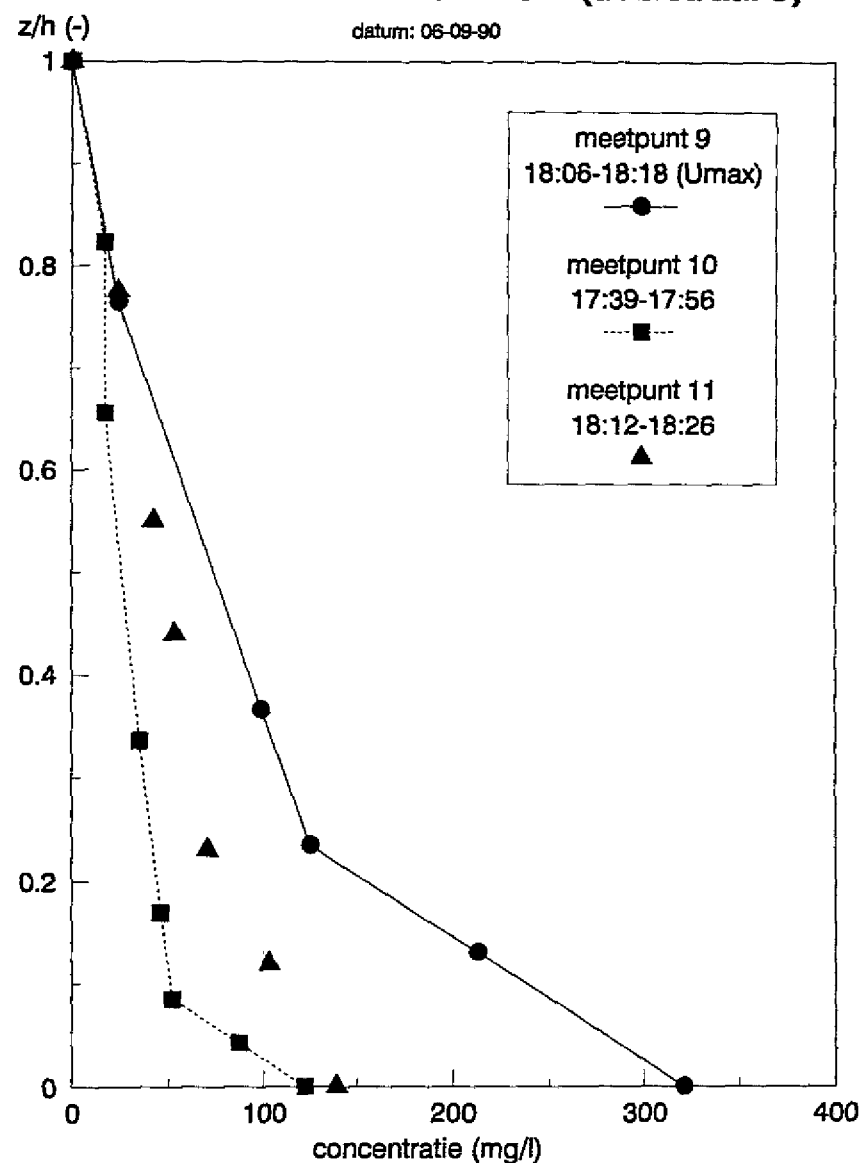
Fig.34 Stroomsnelheid- en concentratieverticalen in het Zuidergat tijdens maximale vloedstroom

**stroomverticalen in de Schaar van Waarde tijdens
maximale ebstroomsnelheden (debietraai 5)**



$U_{gem}(mp9)=0.86m/s$ $U_{gem}(mp10)=0.68m/s$ $U_{gem}(mp11)=0.73m/s$
 $h(mp9)=8.4m$ $h(mp10)=12.3m$ $h(mp11)=9.5m$

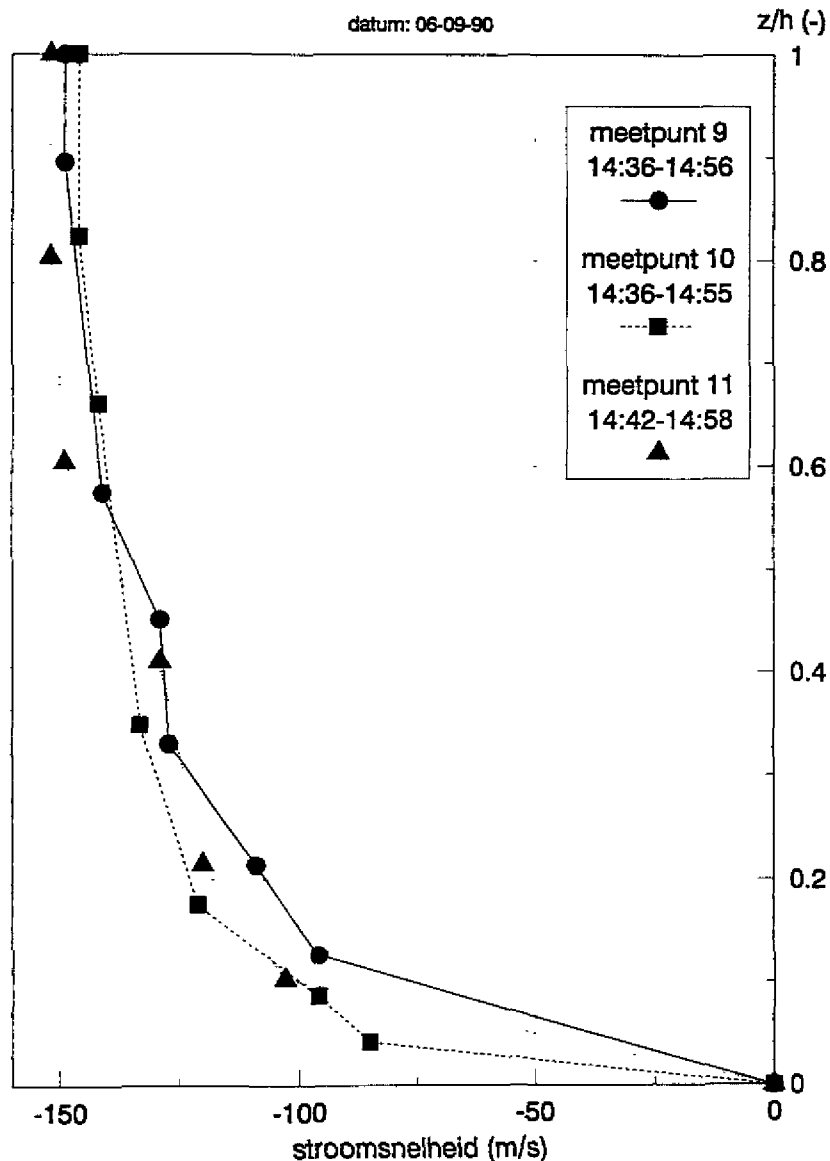
**concentratieverticalen in de Schaar van Waarde
20 min. na maximale ebstroom (debietraai 5)**



$C_{gem}(mp9)=94mg/l$ $C_{gem}(mp10)=31mg/l$ $C_{gem}(mp11)=52mg/l$

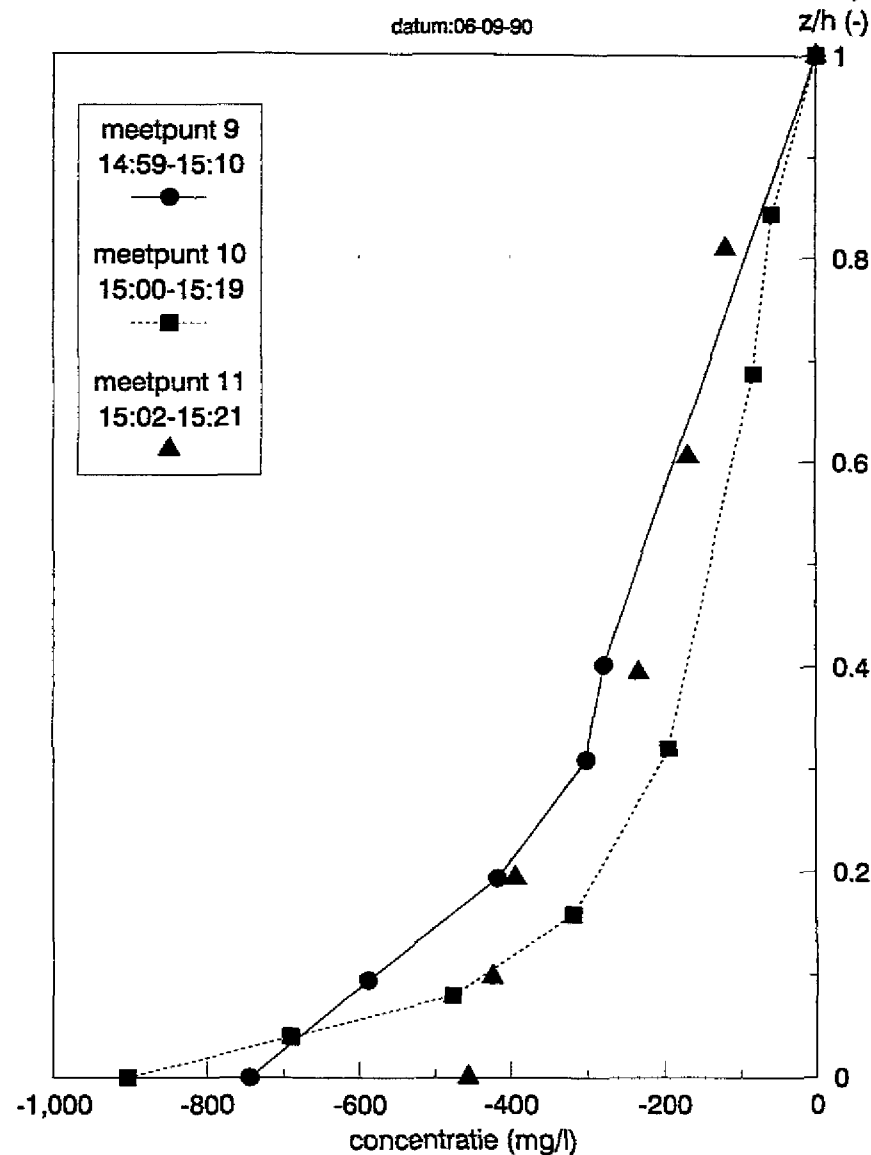
Fig.35 Stroomsnelheid- en concentratieverticalen in de Schaar van Waarde tijdens maximale ebstroom

stroomverticalen in de Schaar van Waarde tijdens maximale vloedstroom (debietraai 5)



Ugem(mp9)=1.22m/s Ugem(mp10)=1.3m/s Ugem(mp11)=1.28m/s
h(mp9)=8.7m h(mp10)=11.8m h(mp11)=9.7m

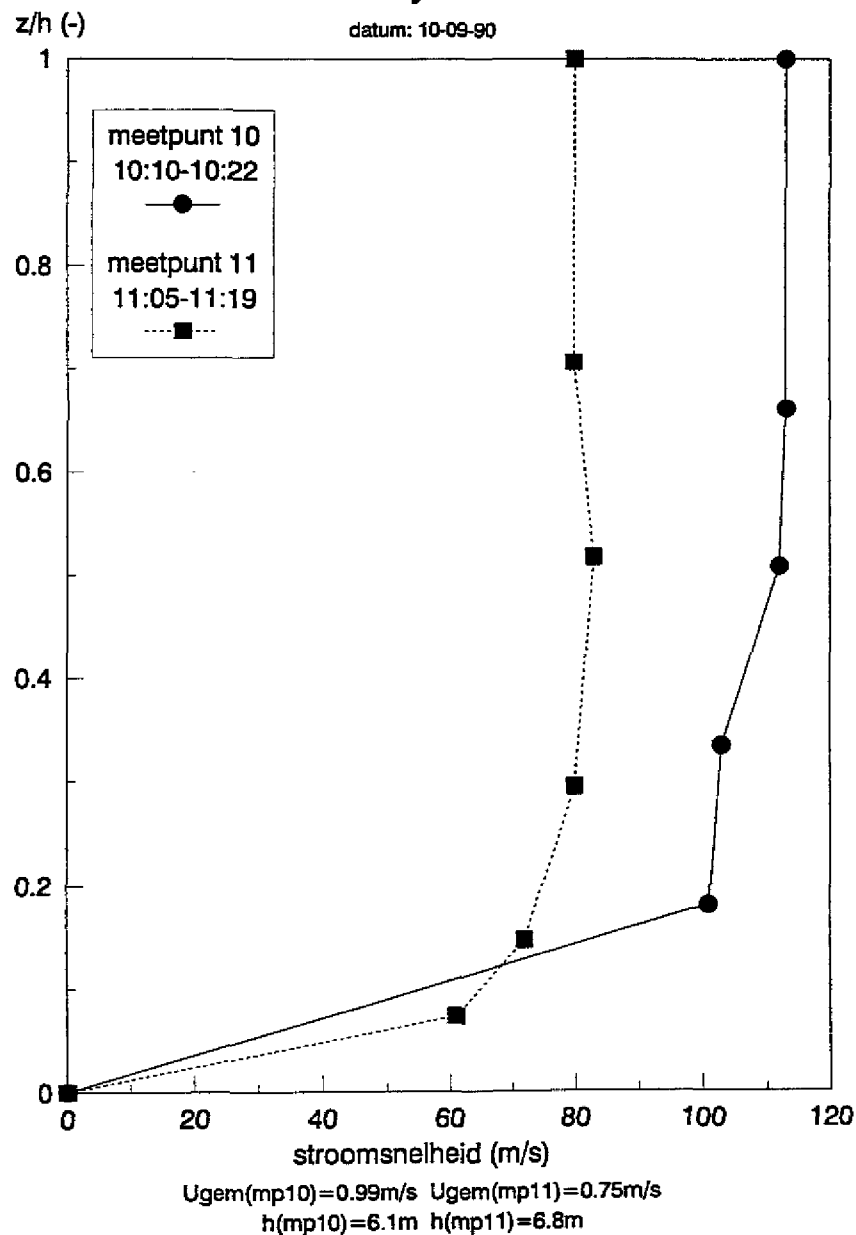
concentratieverticalen in de Schaar van Waarde 20 min. na maximale vloedstroom (debietraai 5)



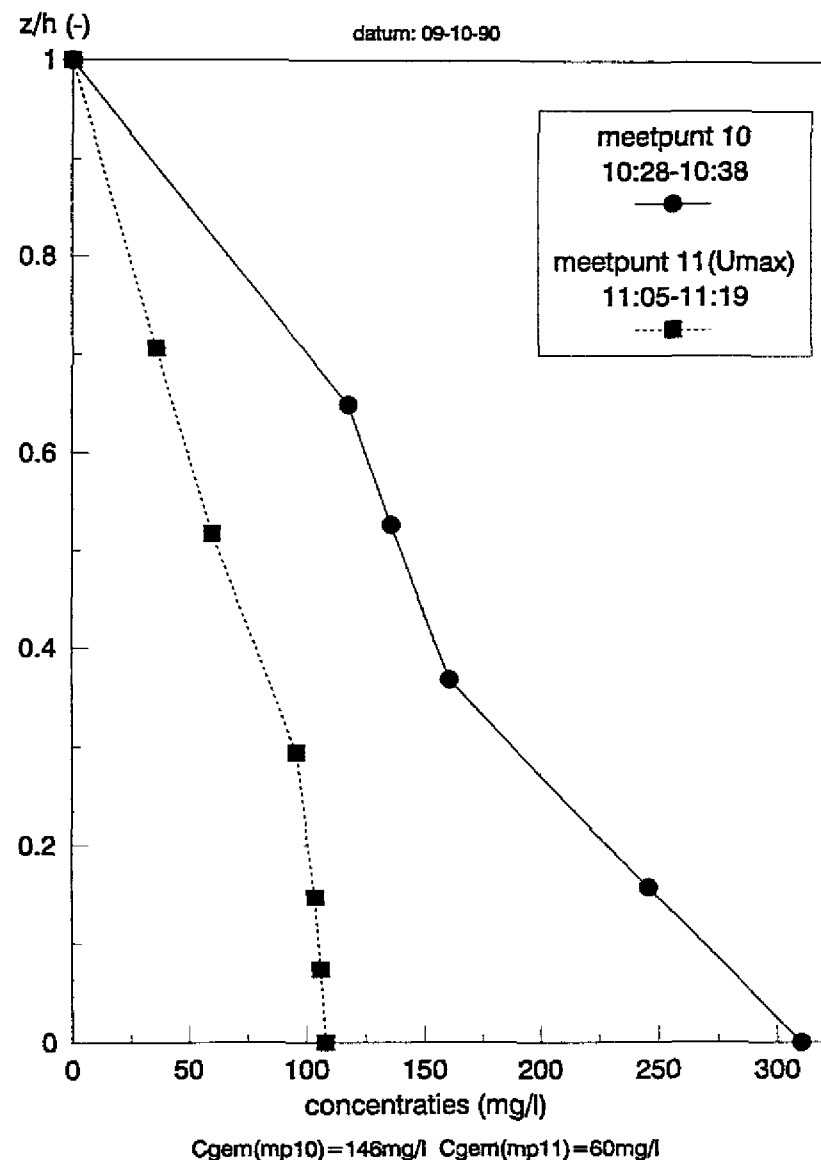
Cgem(mp9)=267mg/l Cgem(mp10)=195mg/l Cgem(mp11)=230mg/l

Fig.36 Stroomsnelheid- en concentratieverticalen in de Schaar van Waarde tijdens maximale vloedstroom

**stroomverticalen in de meetpunten 10 en 11 in de
Schaar van Valkenisse tijdens maximale ebstroom**

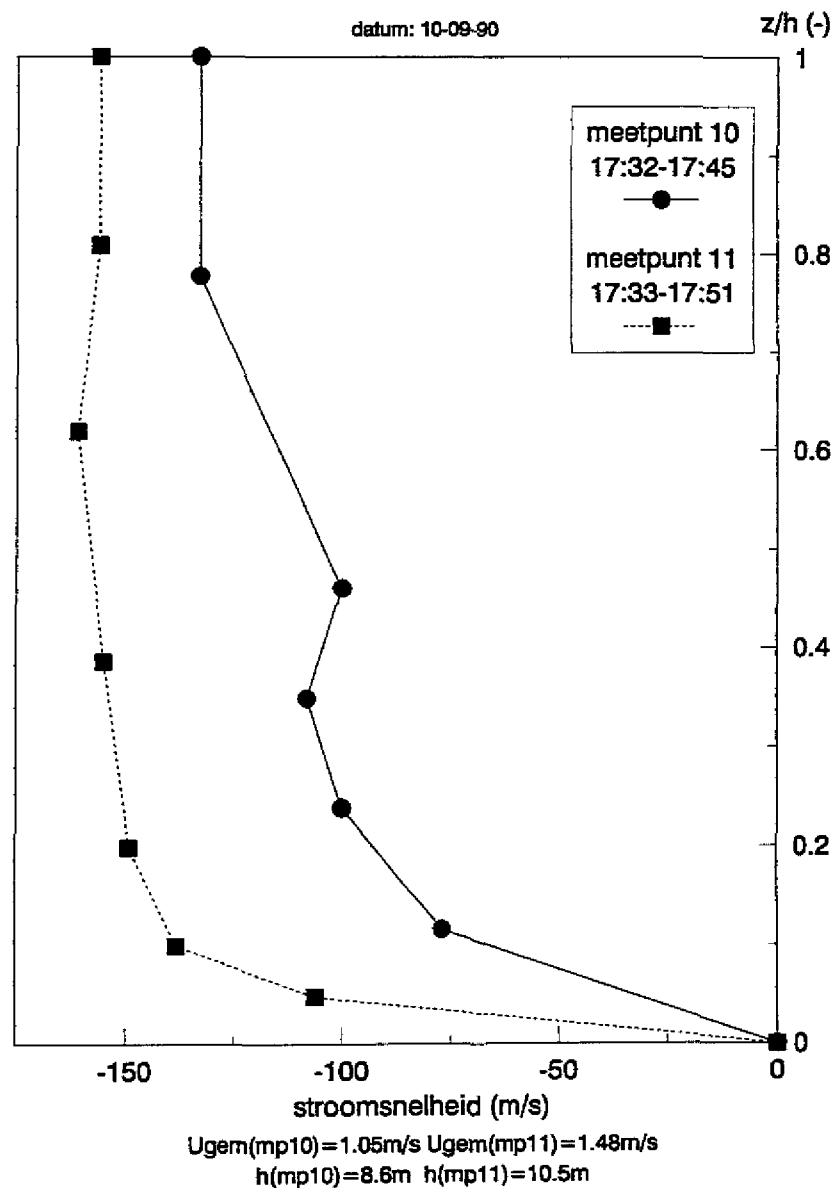


**concentratieverticalen van de meetpunten 10 en
11 in de Schaar van Valkenisse, 20 min. na
maximale ebstroom**

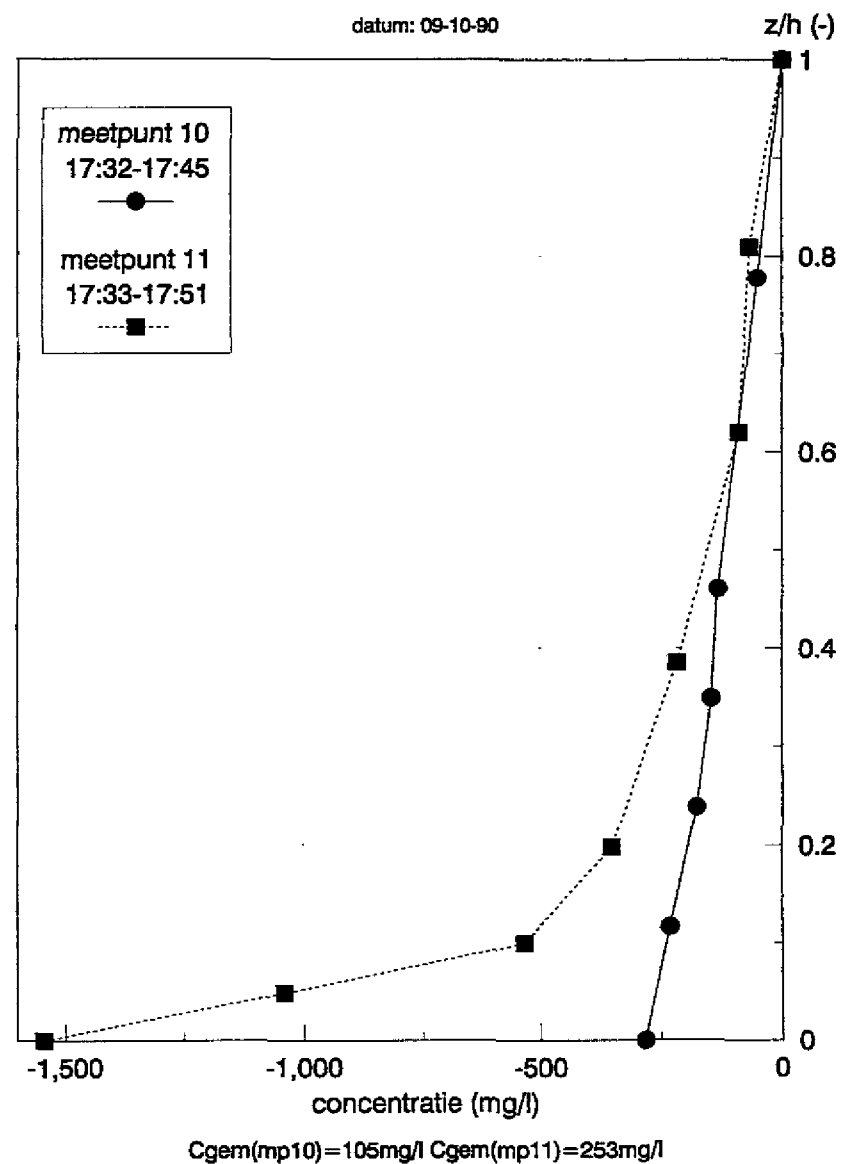


**Fig.37 Stroomsnelheid- en concentratieverticalen in de Schaar van Valkenisse tijdens
maximale ebstroom**

**stroomverticalen in de meetpunten 10 en 11 in de
Schaar van Valkenisse tijdens maximale
vloedstroom**

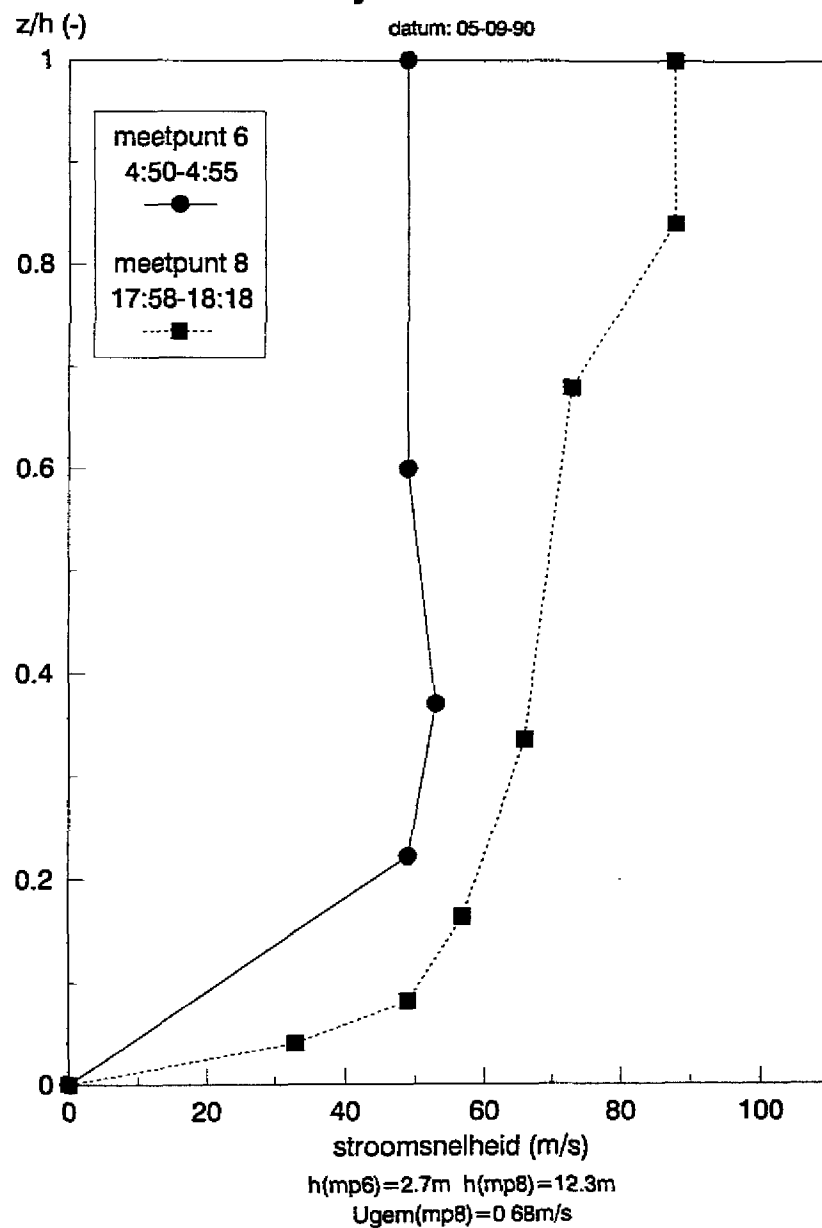


**concentratieverticalen van de meetpunten 10 en
11 in de Schaar van Valkenisse tijdens maximale
vloedstroom**



**Fig.38 Stroomsnelheid- en concentratieverticalen in de Schaar van Valkenisse tijdens
maximale vloedstroom**

stroomverticalen in de meetpunten 6 en 8 in debietraai 3 tijdens maximale ebstroom



concentratieverticalen van de meetpunten 6 en 8 in debietraai 3, 20 min. na maximale ebstroom

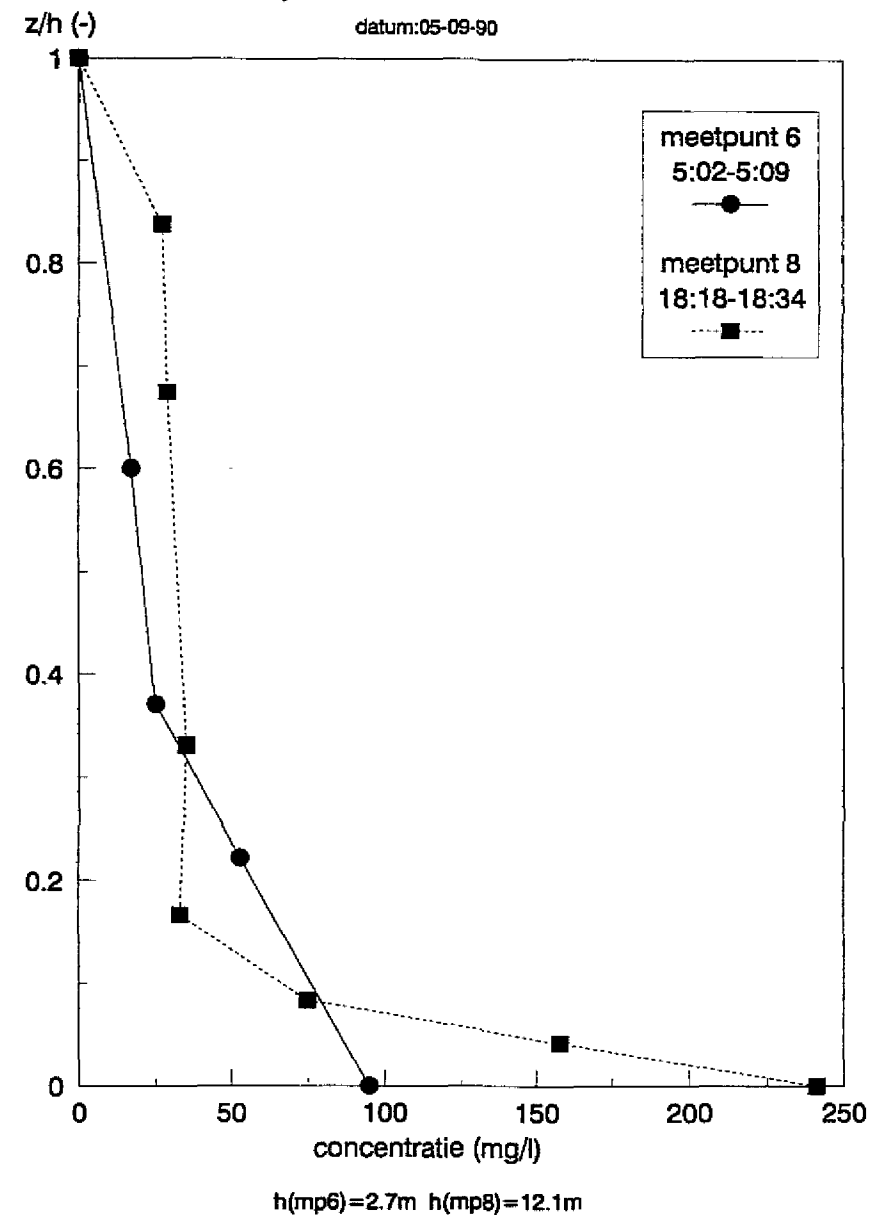
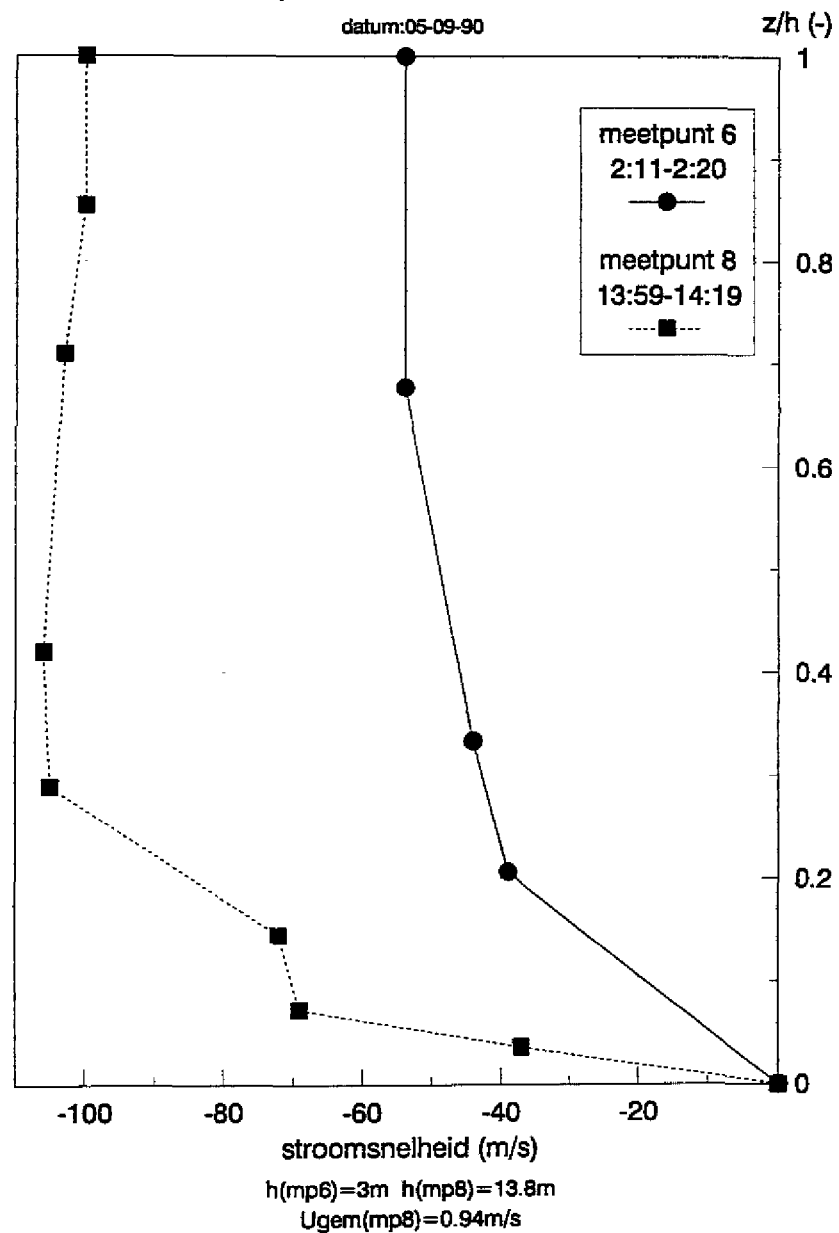


Fig.39 Stroomsnelheid- en concentratieverticalen in de Zimmermangeul en op de plaat tijdens maximale ebstroom

stroomverticalen van de meetpunten 6 en 8 in debietraai 3 tijdens maximale vloedstroom



concentratieverticalen van de meetpunten 6 en 8 in debietraai 3, 20 min. na maximale vloedstroom

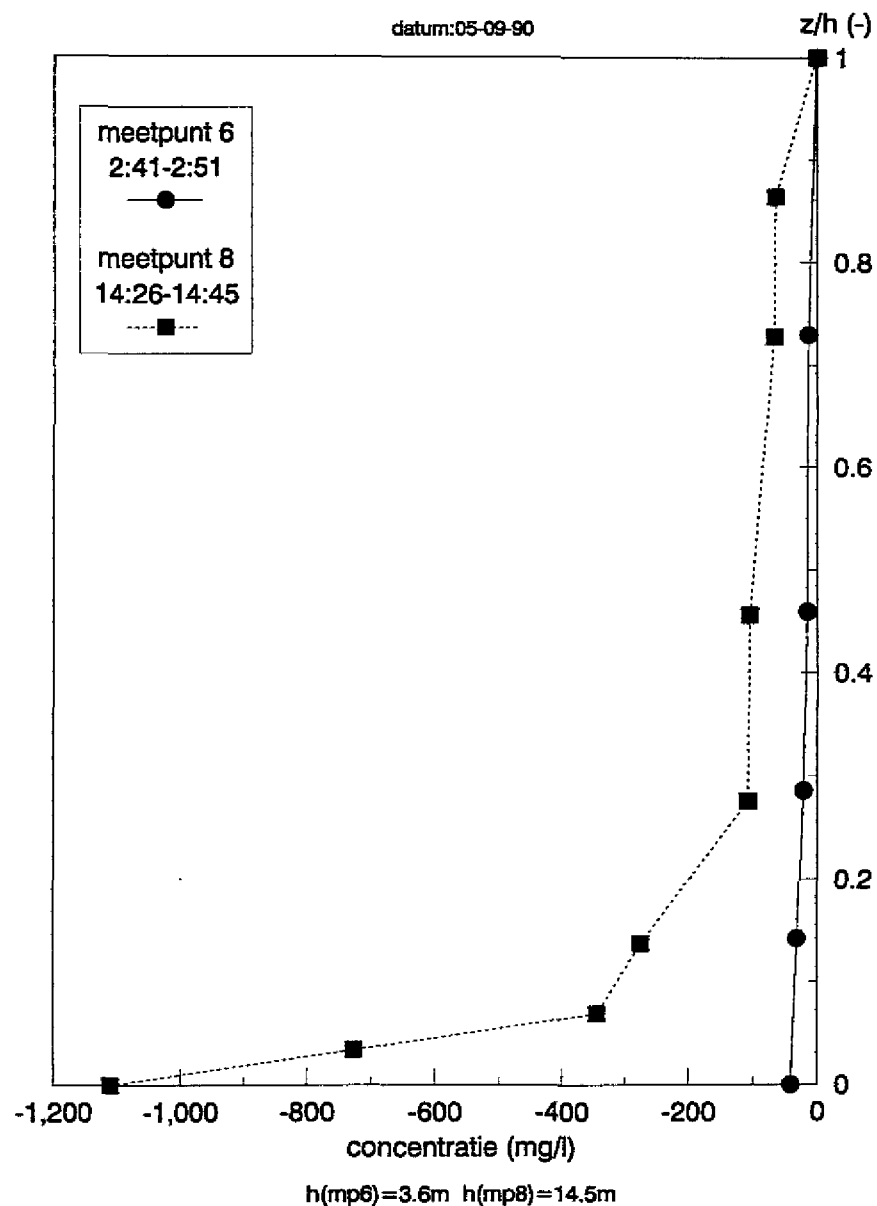
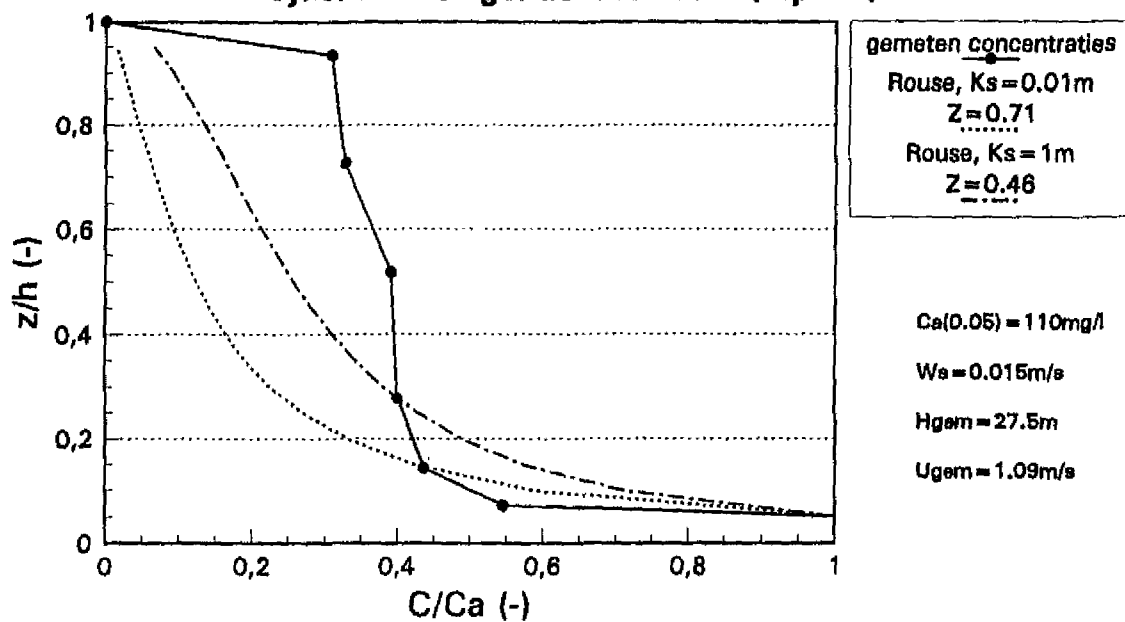


Fig.40 Stroomsnelheid- en concentratieverticalen in de Zimmermangeul en op de plaat tijdens maximale vloedstroom

**Gemeten en theoretische concentratieverticalen
tijdens vertragende ebstroom (mp 52)**



**Gemeten en theoretische concentratieverticalen
tijdens versnellende vloedstroom (mp52)**

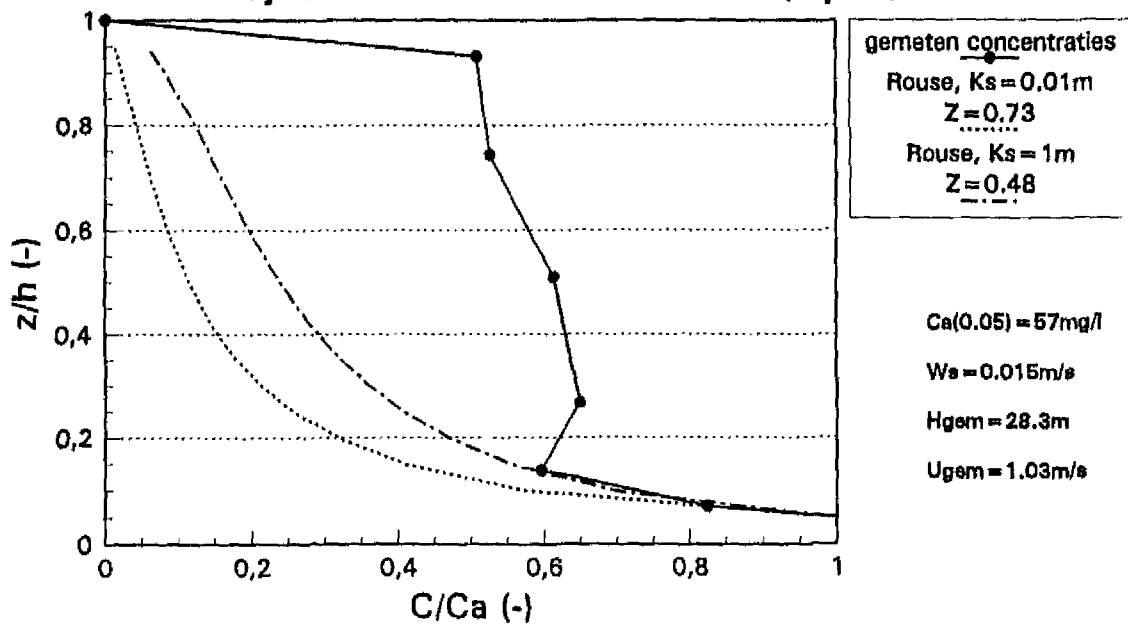
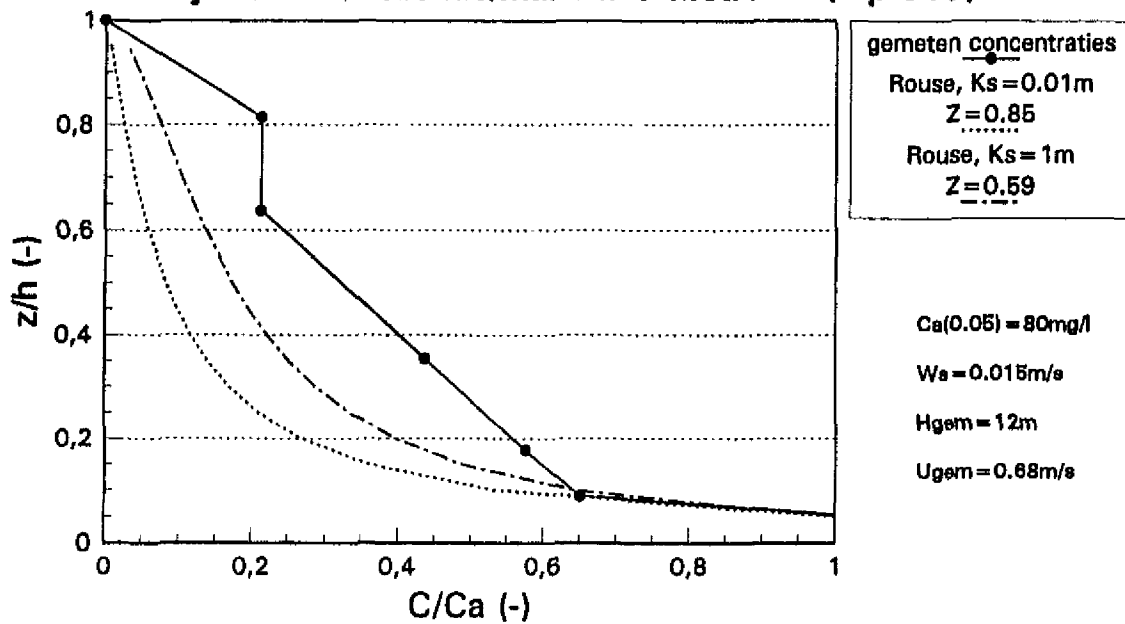


Fig.41 Genormaliseerde concentratieverticalen in het Zuidergat (meetpunt 2)

**Gemeten en theoretische concentratieverticalen
tijdens versnellende/maximale ebstroom (mp 510)**



**Gemeten en theoretische concentratieverticalen
tijdens vertragende vloedstroom (mp 510)**

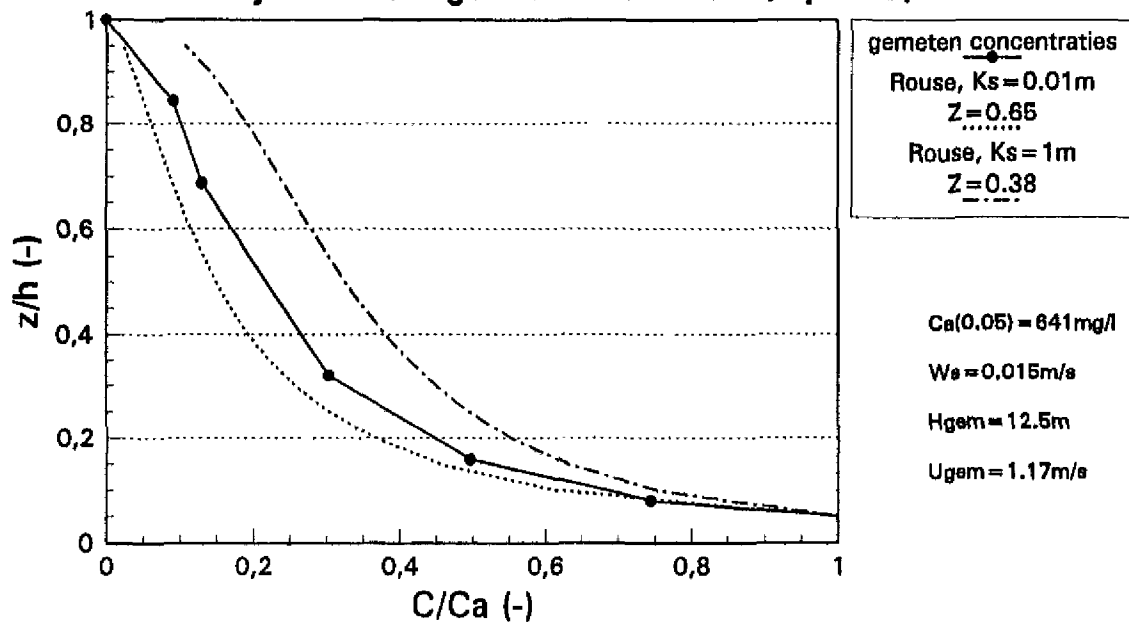
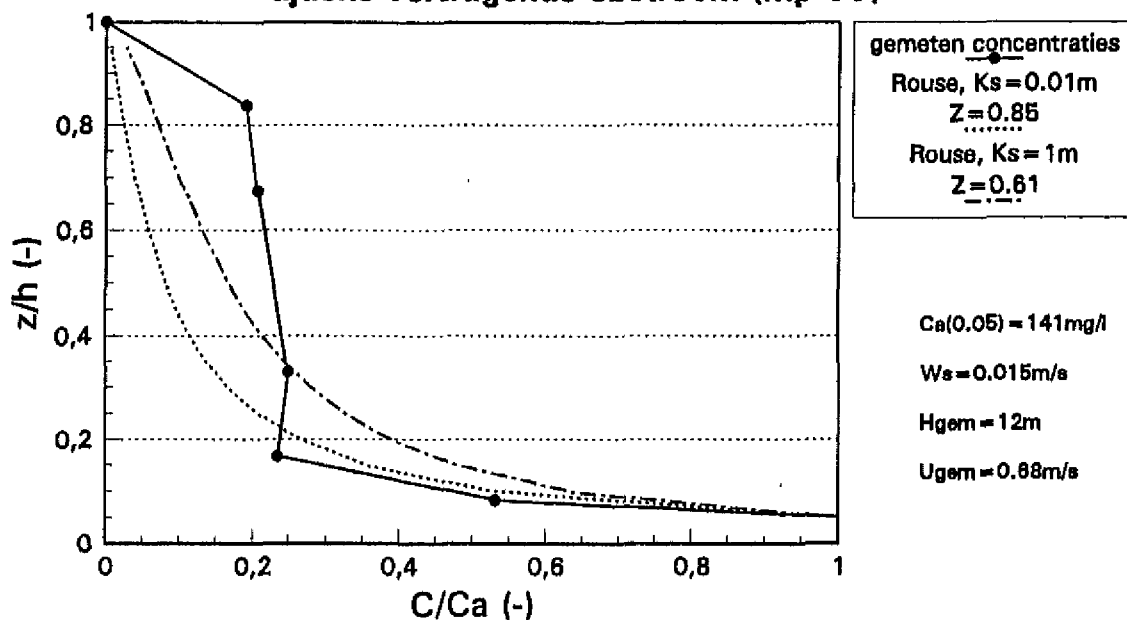


Fig.42 Genormaliseerde concentratieverticalen in de Schaar van Waarde (mp 10)

**Gemeten en theoretische concentratieverticalen
tijdens vertragende ebstroom (mp 38)**



**Gemeten en theoretische concentratieverticalen
tijdens versnellende/maximale vloedstroom (mp38)**

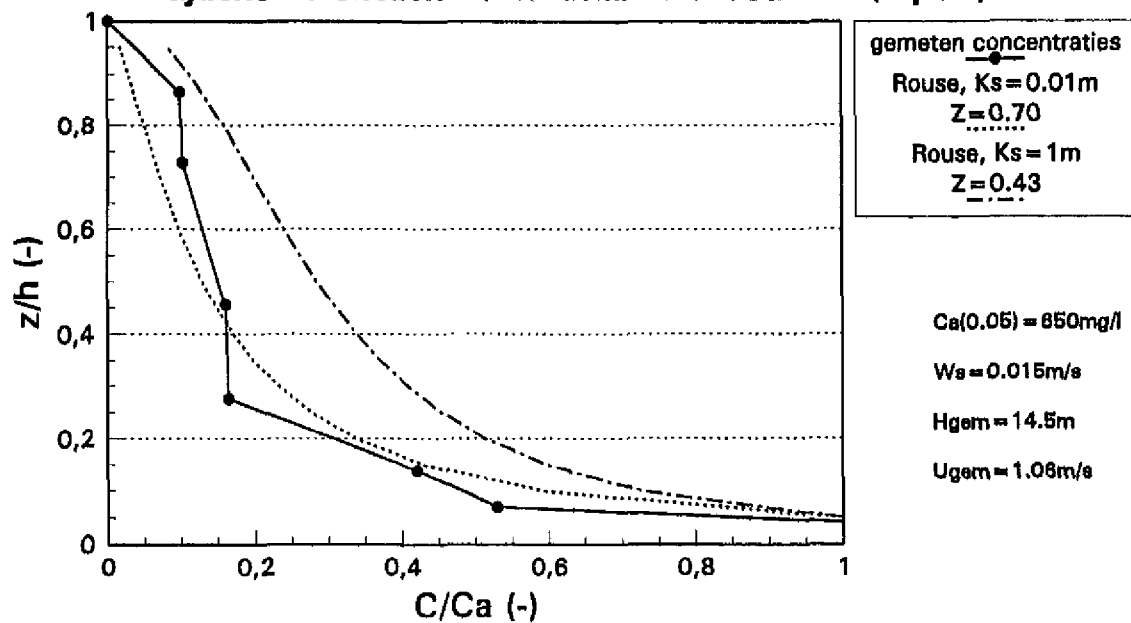


Fig.43 Genormaliseerde concentratieverticalen in de Zimmermangeul (mp8)

**Gemeten en theoretische concentratieverticalen
tijdens versnellende/maximale vloedstroom (dg11)**

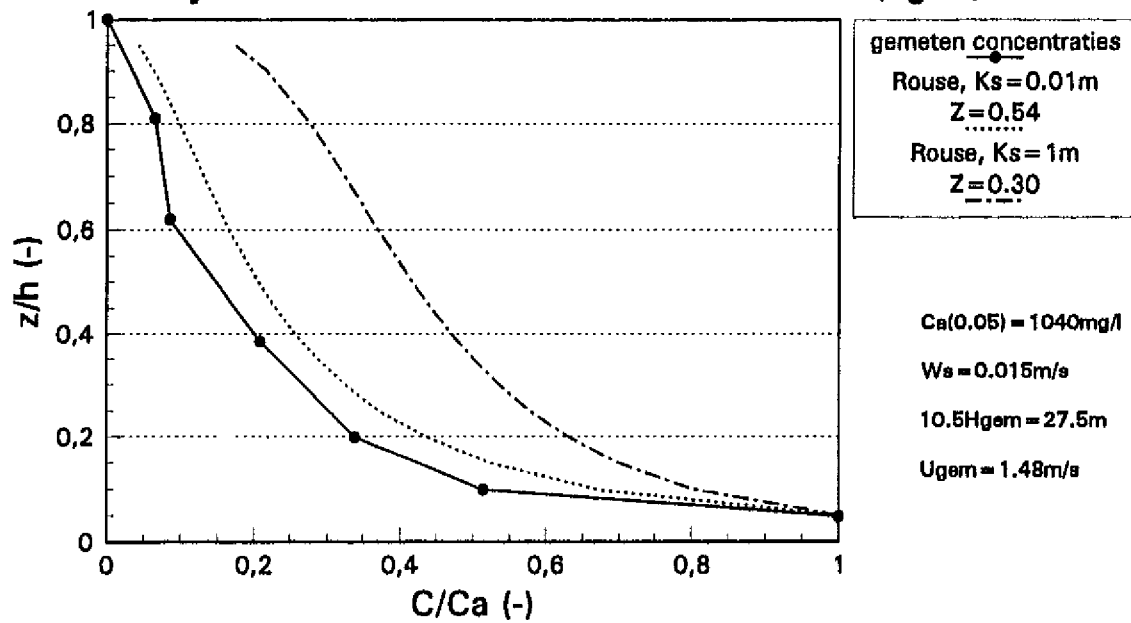
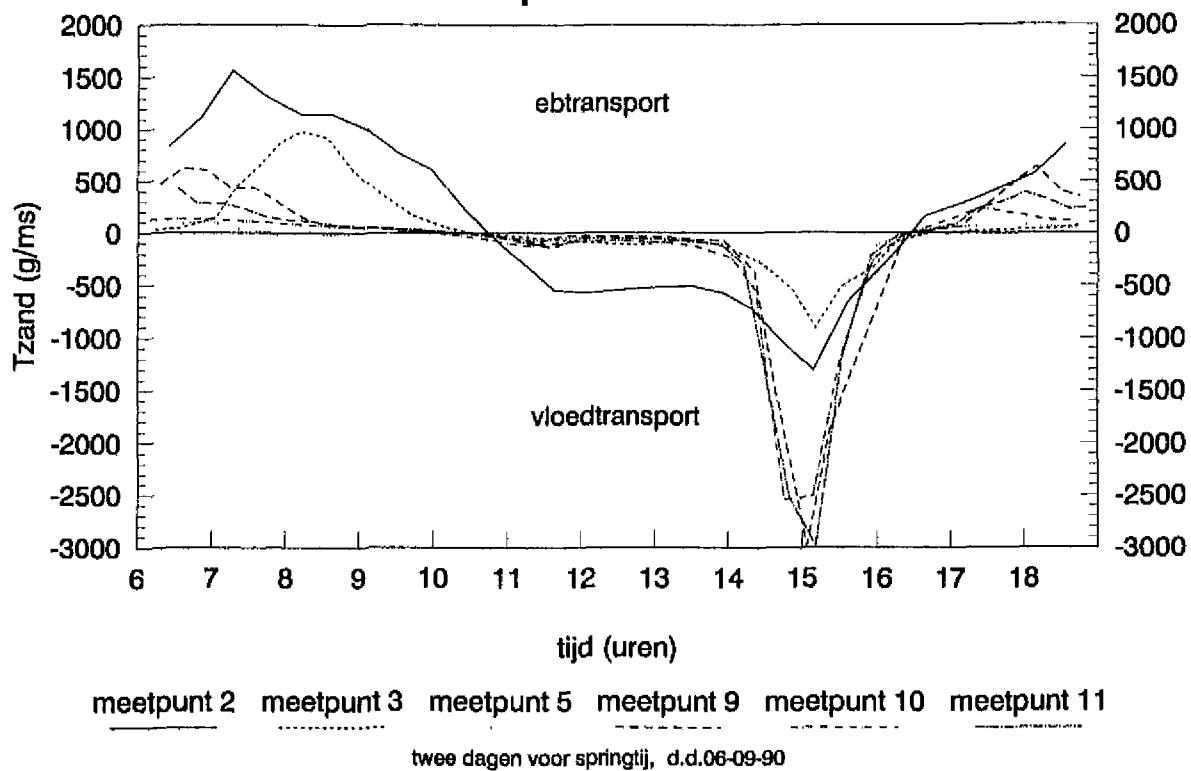


Fig.44 Genormaliseerde concentratieverticaal in de Schaar van Valkenisse

Totale zandtransporten als functie van de tijd voor de meetpunten in debietraai 5



Totale slibtransporten als functie van de tijd voor de meetpunten in debietraai 5

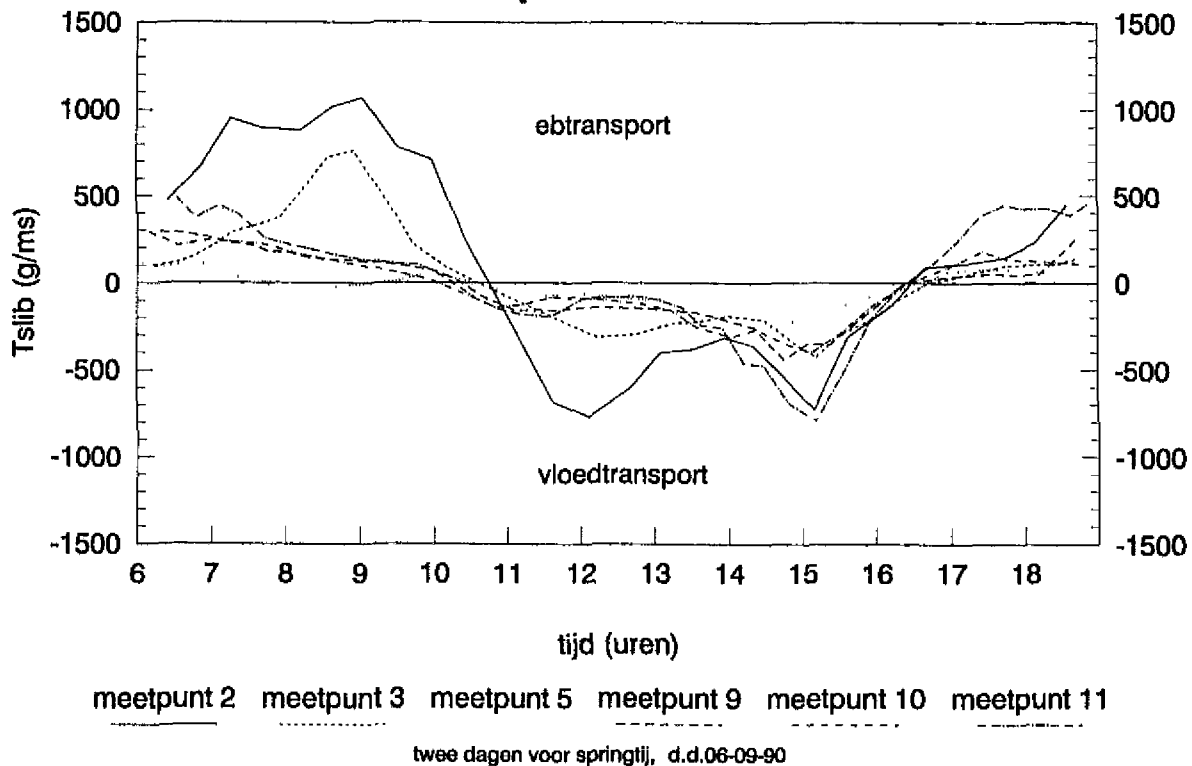
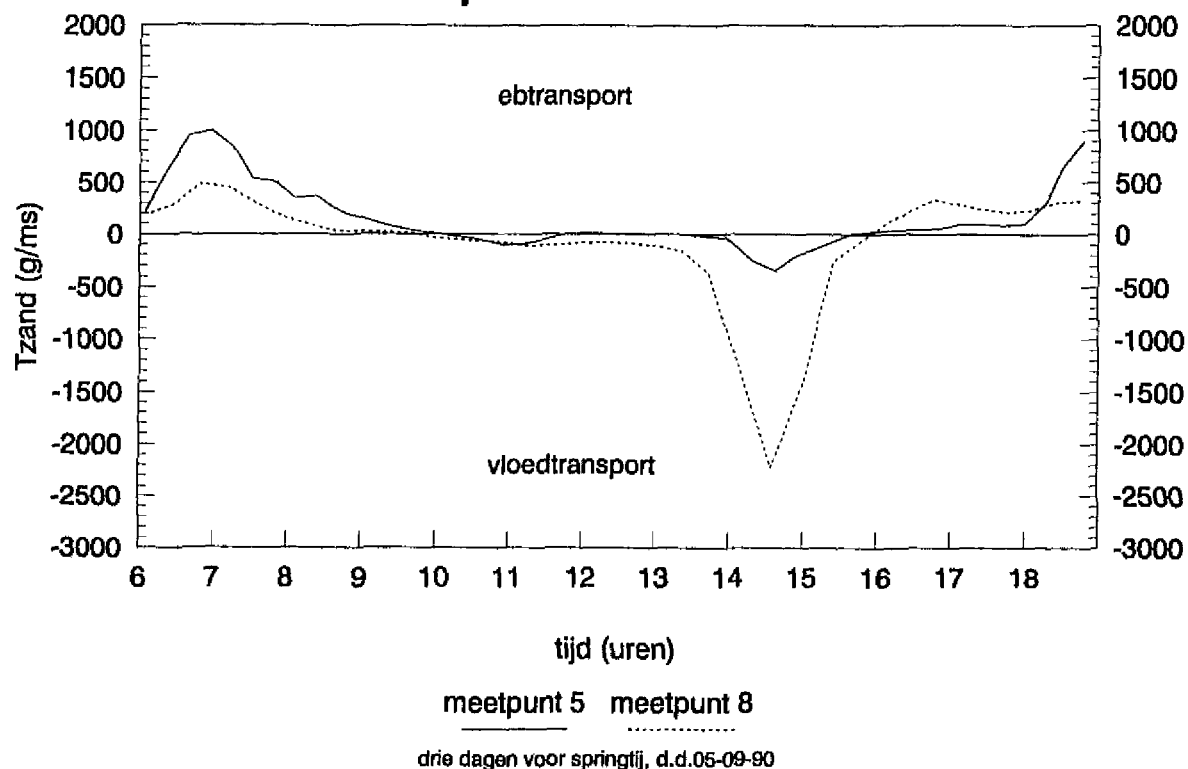


Fig.45 Totale gemeten zand- en slibtransporten als functie van de tijd in de Schaar van Waarde en het Zuidergat

Totale zandtransporten als functie van de tijd voor de meetpunten 5 en 8 in debietraai 3



Totale slibtransporten als functie van de tijd voor de meetpunten in debietraai 3

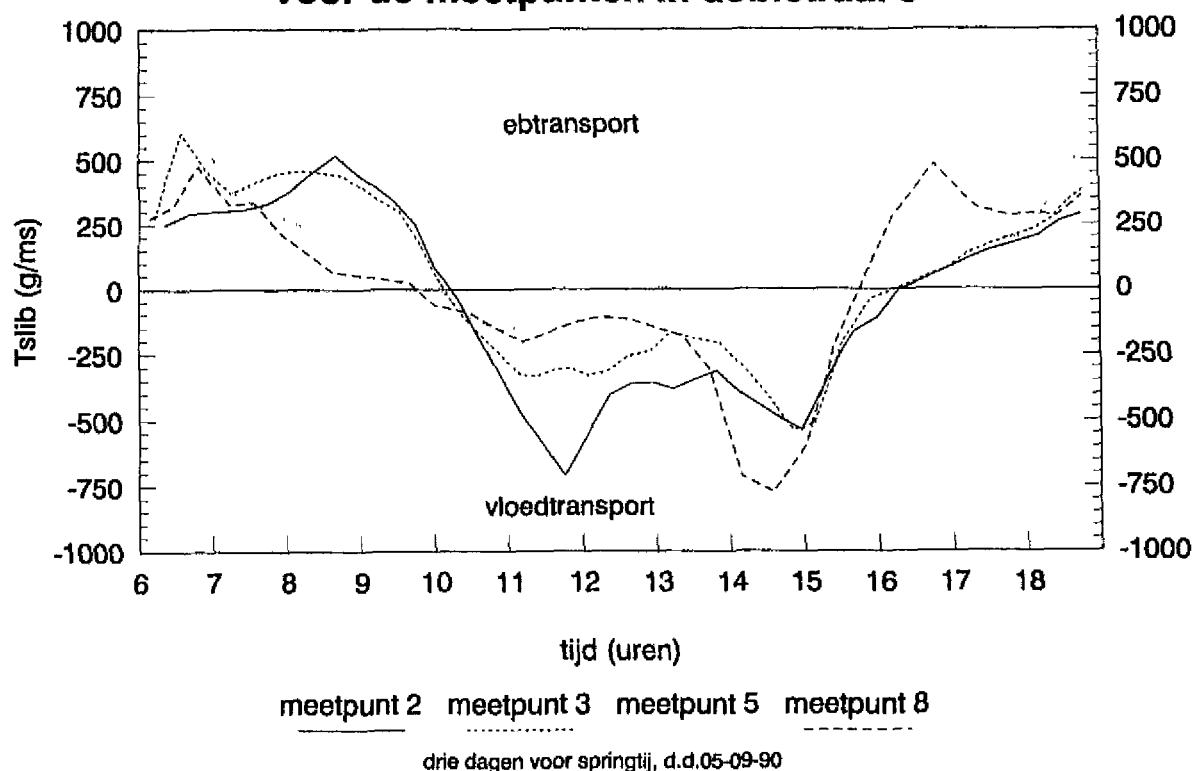
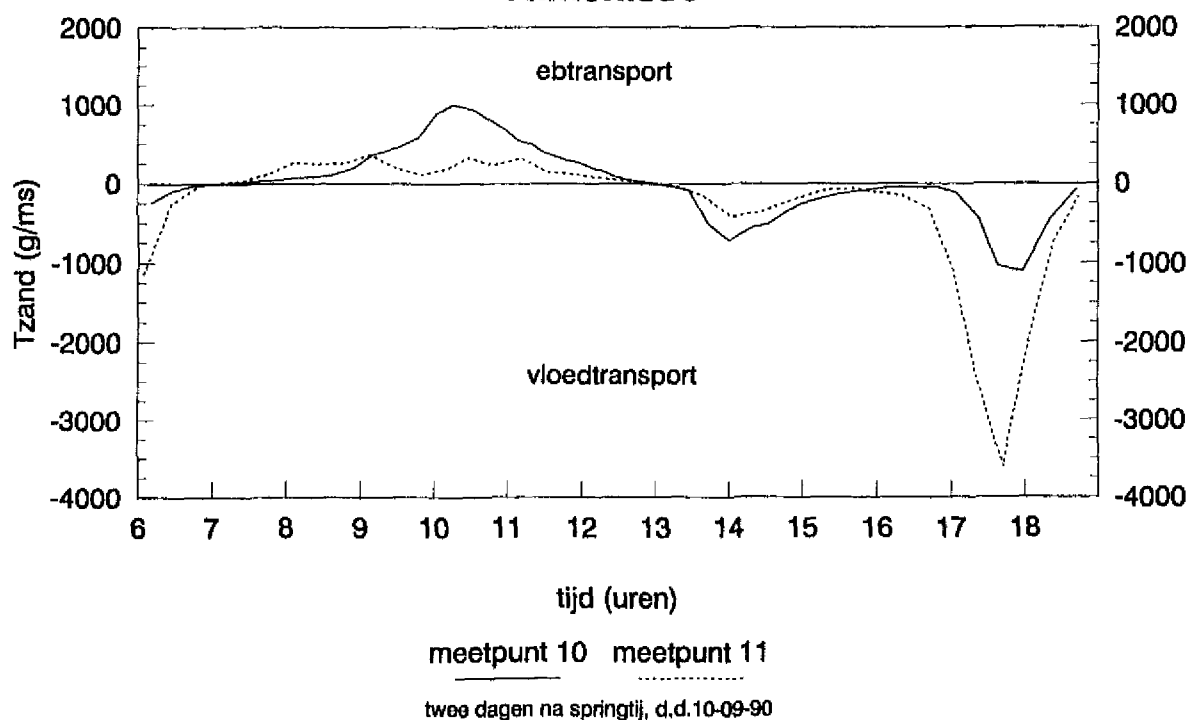


Fig.46 Totale gemeten zand- en slibtransporten als functie van de tijd in de Overloop van Valkenisse en de Zimmermangeul

Totale zandtransporten als functie van de tijd voor de meetpunten 10 en 11 in de Schaar van Valkenisse



Totale slibtransporten als functie van de tijd voor de meetpunten 10 en 11 in de Schaar van Valkenisse

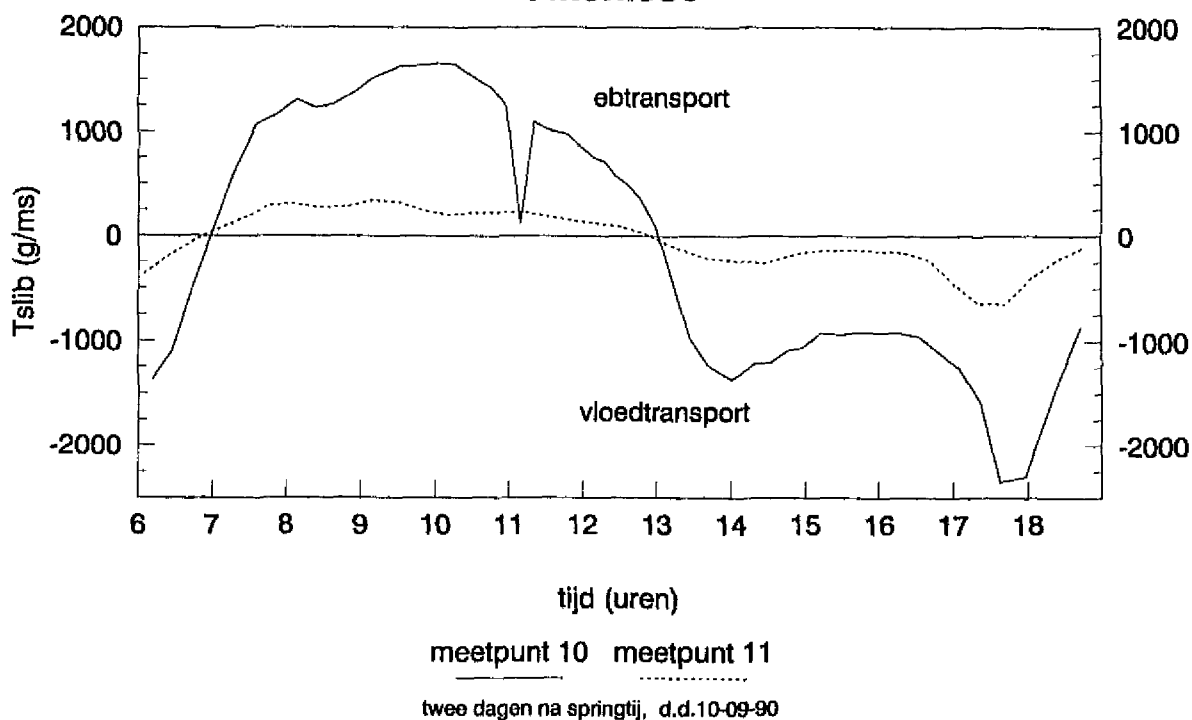


Fig.47 Totale gemeten zand- en slibtransporten als functie van de tijd in de Schaar van Valkenisse en het inscharend ebgeultje.

Totale zand- en slibtransport tijdens vloed- en ebstroom

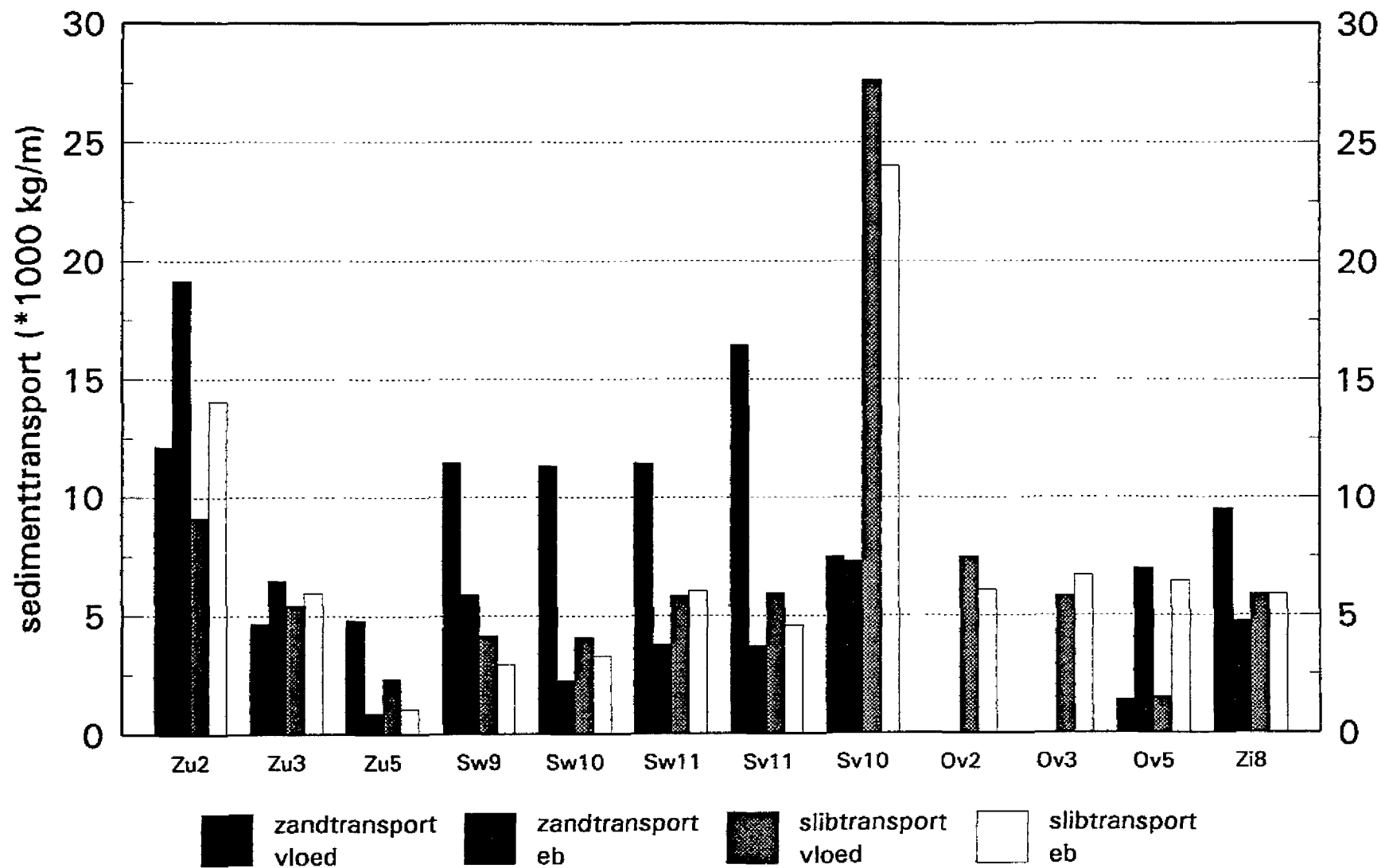
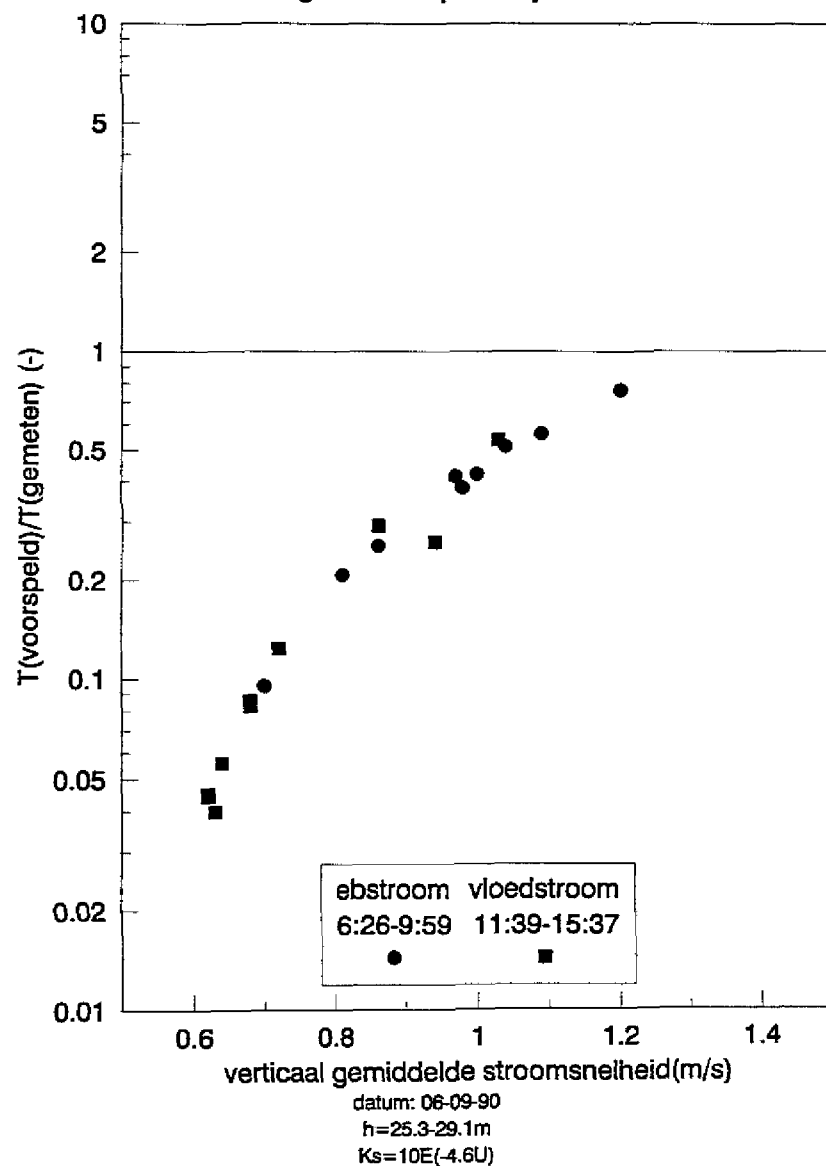


Fig.48 Het totale zand- en slibtransport tijdens eb en vloed

gemeten en voorspeld zandtransport in meetpunt 2
debletraai 5, als functie van de stroomsnelheid
gebaseerd op van Rijn



gemeten en voorspeld zandtransport in meetpunt 2
debletraai 5, als functie van de stroomsnelheid
gebaseerd op Engelund-Hansen

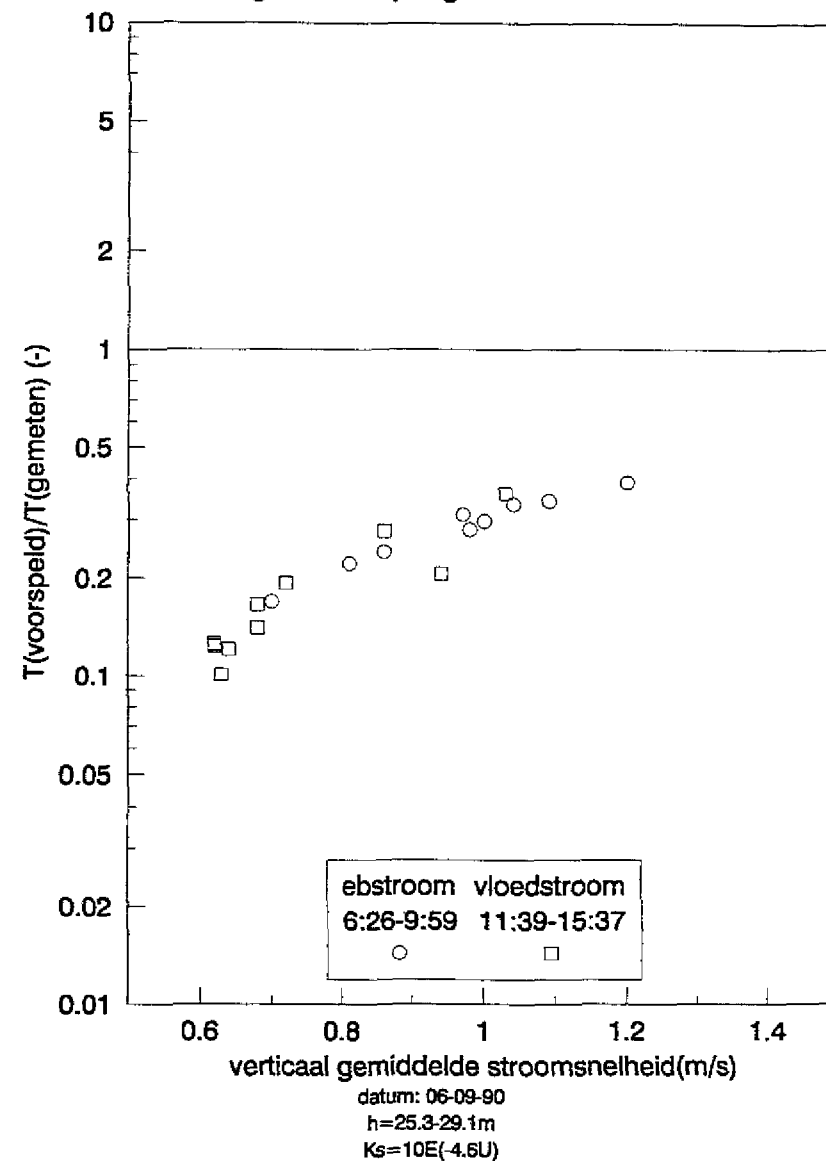
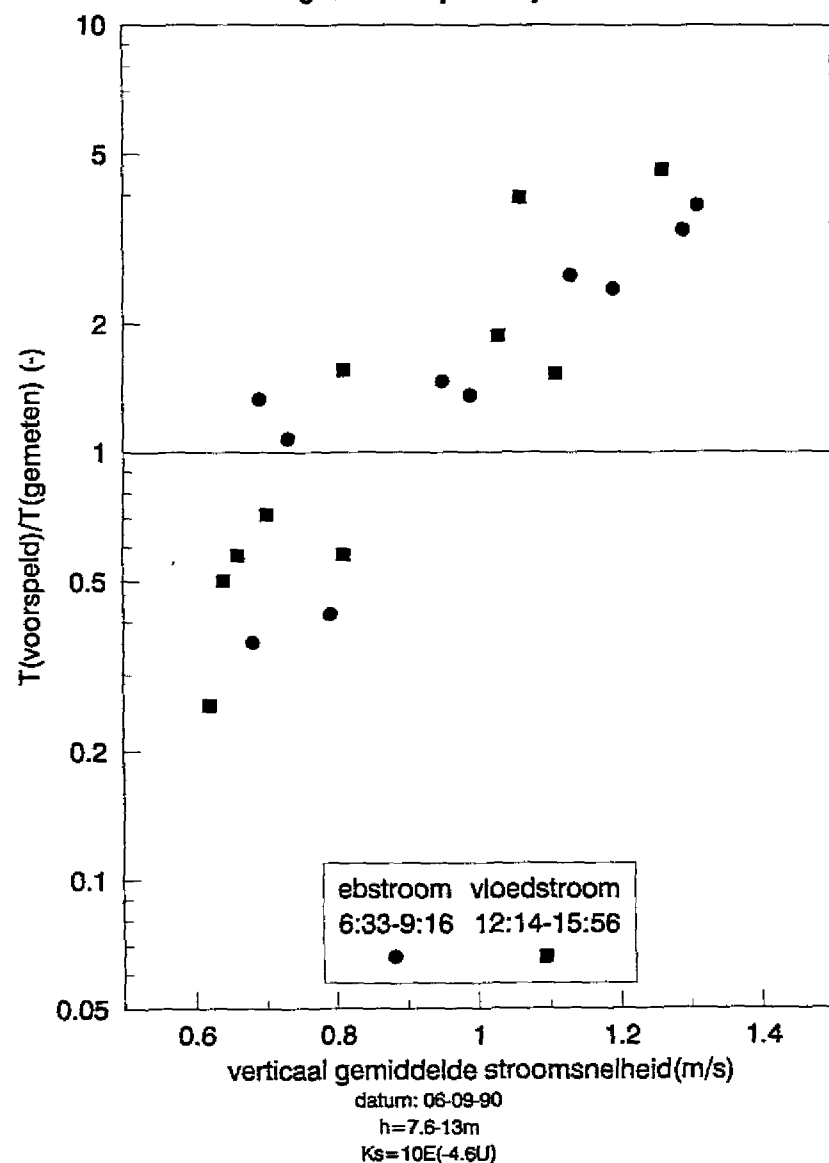


Fig.49 De transportdiscrepantie-ratio's als functie van de stroomsnelheid in het Zuidergat
(meetpunt 2, raai 5)

gemeten en voorspeld zandtransport in meetpunt 3
debletraai 5, als functie van de stroomsnelheid
gebaseerd op van Rijn



gemeten en voorspeld zandtransport in meetpunt 3
debletraai 5, als functie van de stroomsnelheid
gebaseerd op Engelund-Hansen

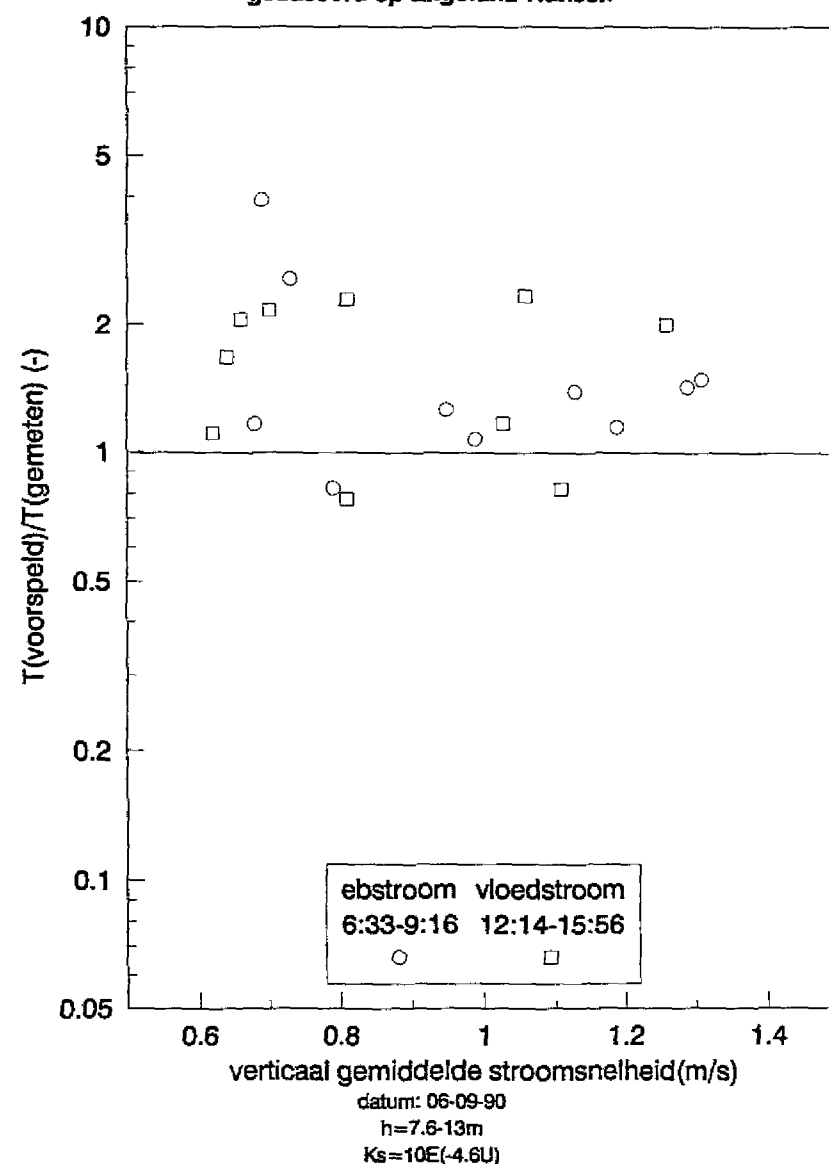
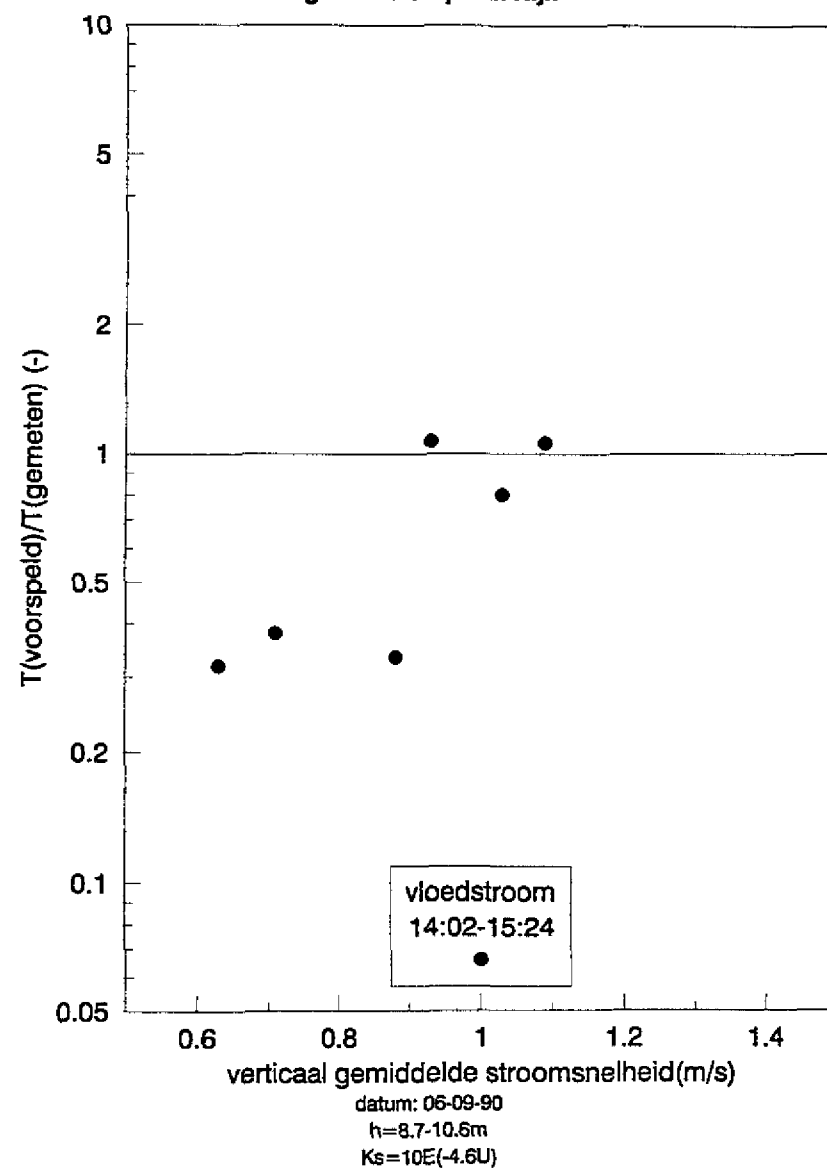


Fig.50 De transportdiscrepantie-ratio's als functie van de stroomsnelheid in het Zuidergat
(meetpunt 3, raai 5)

gemeten en voorspeld zandtransport in meetpunt 5
debietraal 5, als functie van de stroomsnelheid
gebaseerd op van Rijn



gemeten en voorspeld zandtransport in meetpunt 5
debietraal 5, als functie van de stroomsnelheid
gebaseerd op Engelund-Hansen

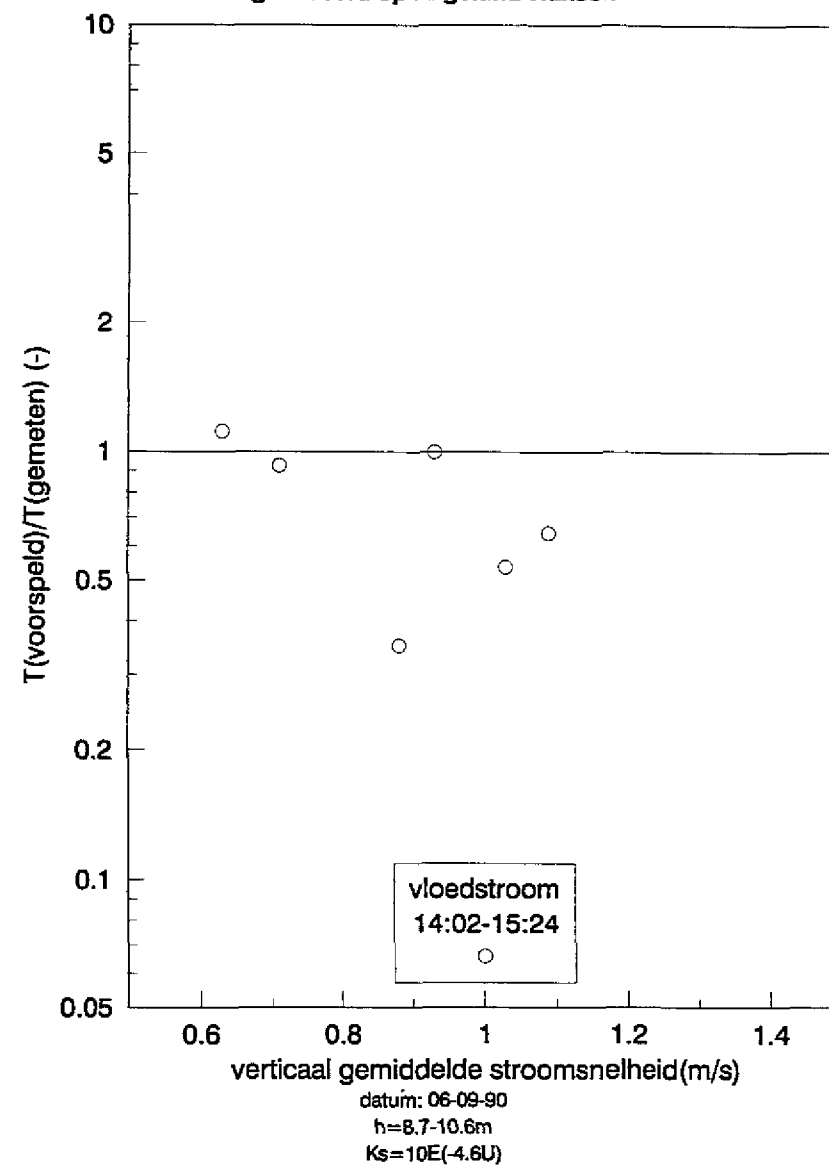
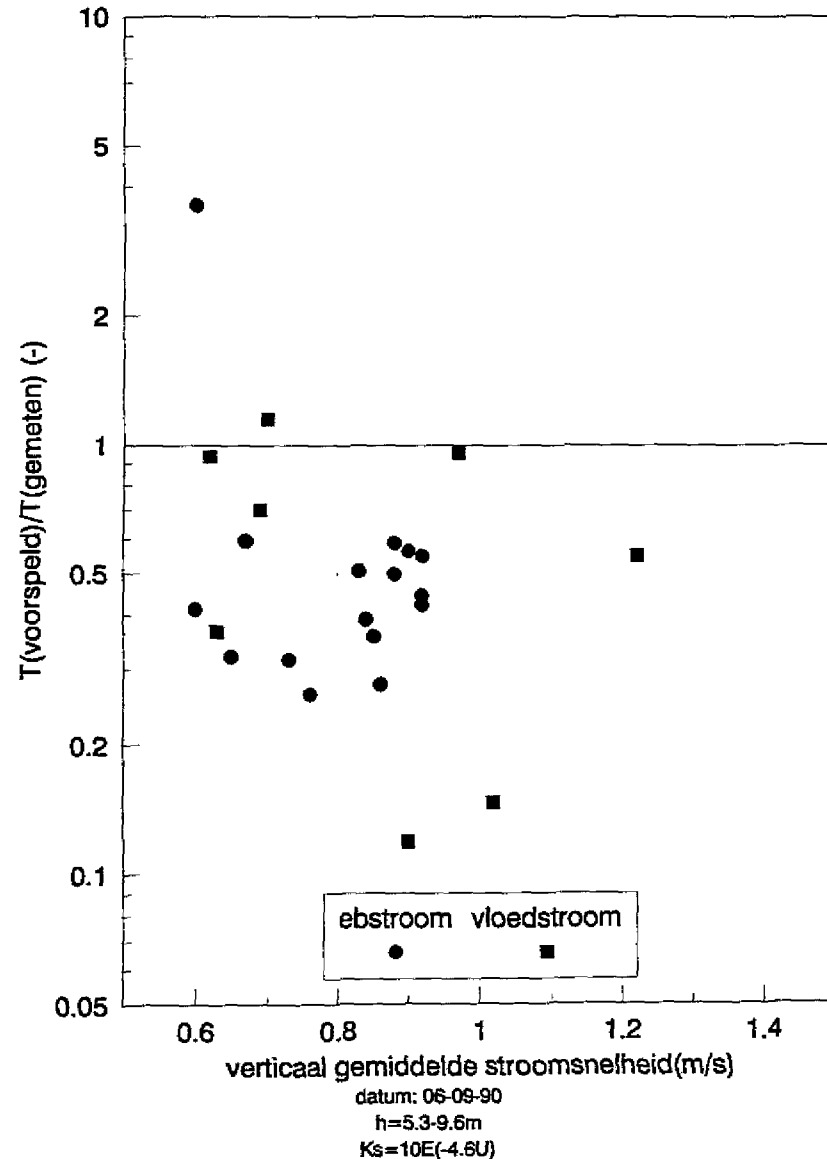


Fig.51 De transportdiscrepantie-ratio's als functie van de stroomsnelheid in het Zuidergat
(meetpunt 5, raai 5)

gemeten en voorspeld zandtransport in meetpunt 9
debletraai 5, als functie van de stroomsnelheid
gebaseerd op van Rijn



gemeten en voorspeld zandtransport in meetpunt 9
debletraai 5, als functie van de stroomsnelheid
gebaseerd op Engelund-Hansen

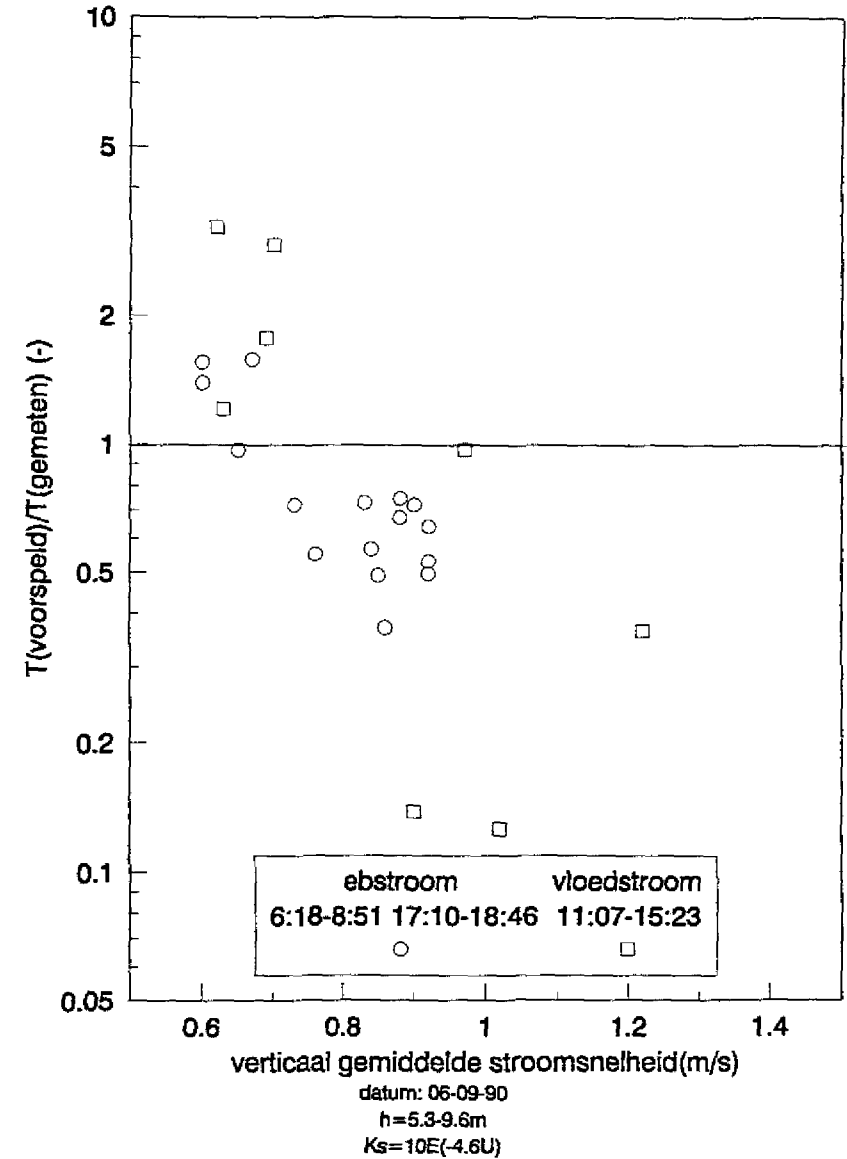
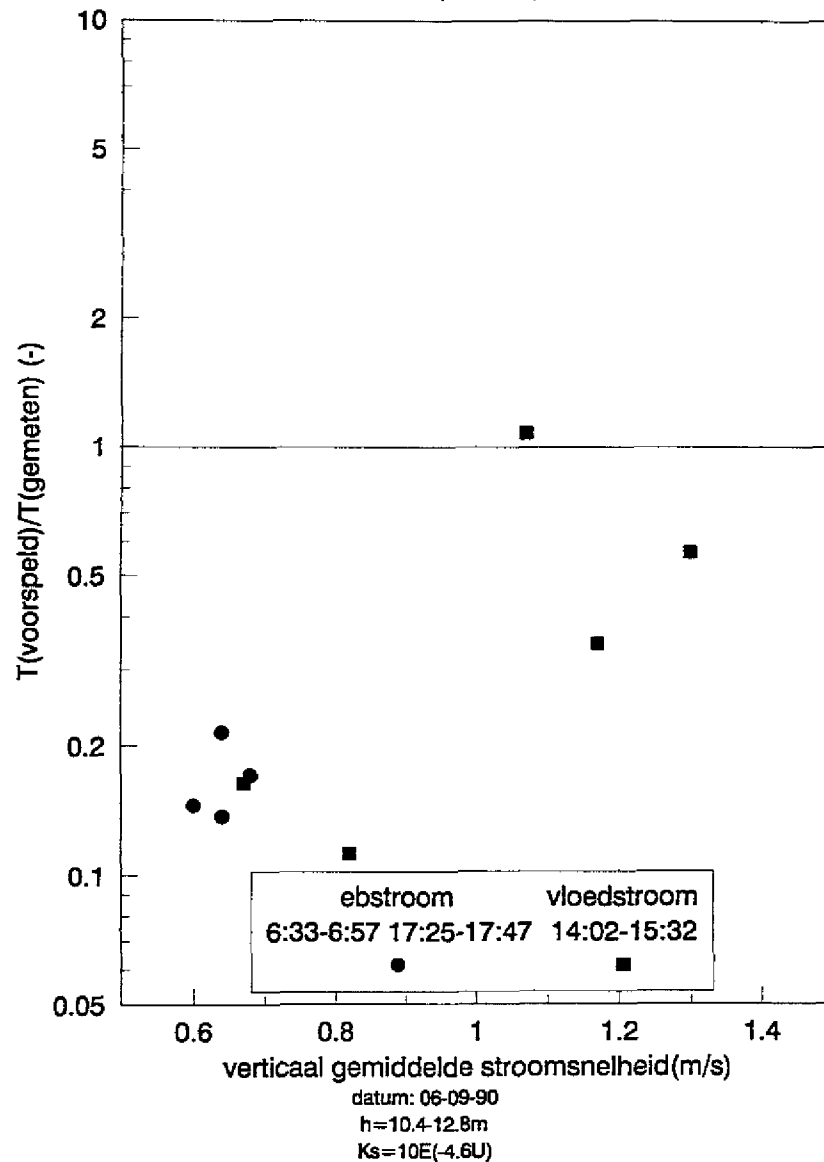


Fig.52 De transportdiscrepantie-ratio's als functie van de stroomsnelheid in de Schaar van
Waarde (meetpunt 9, raai 5)

gemeten en voorspeld zandtransport, meetpunt 10
debietraai 5, als functie van de stroomsnelheid
gebaseerd op van Rijn



gemeten en voorspeld zandtransport, meetpunt 10
debietraai 5, als functie van de stroomsnelheid
gebaseerd op Engelund-Hansen

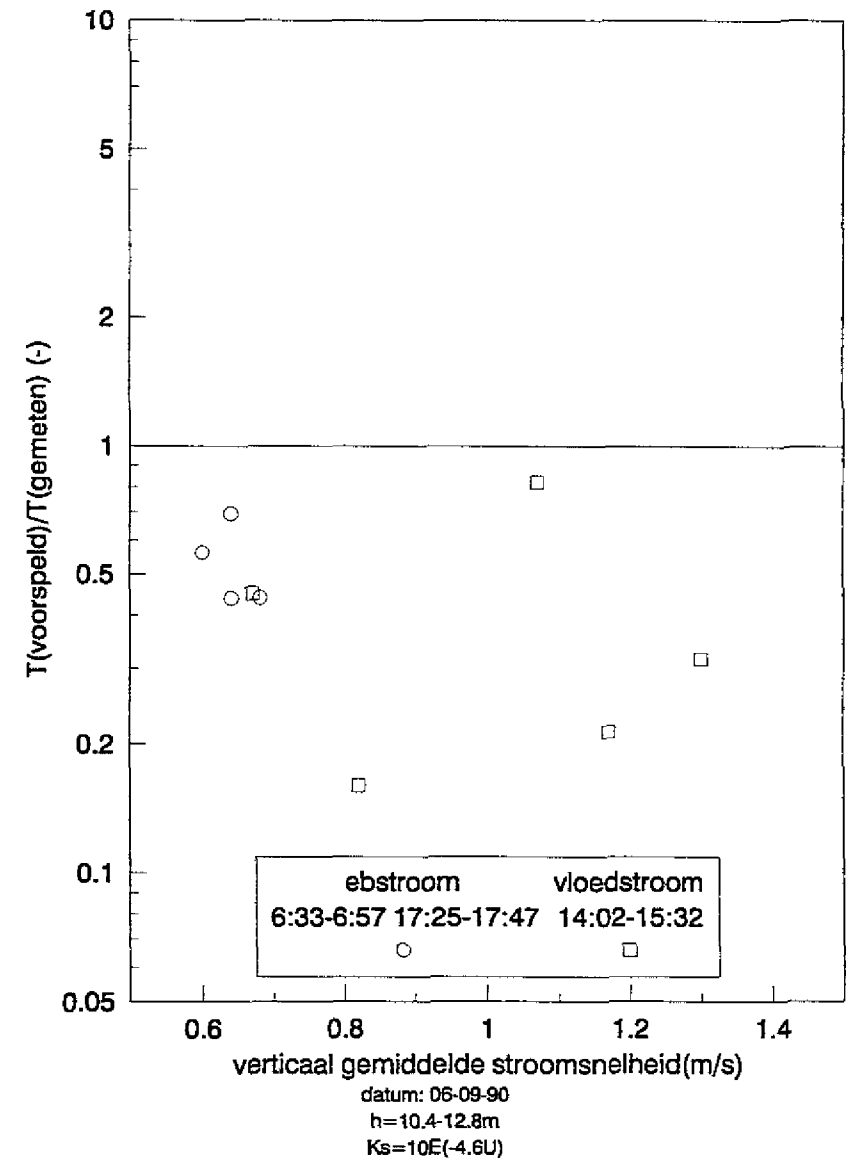
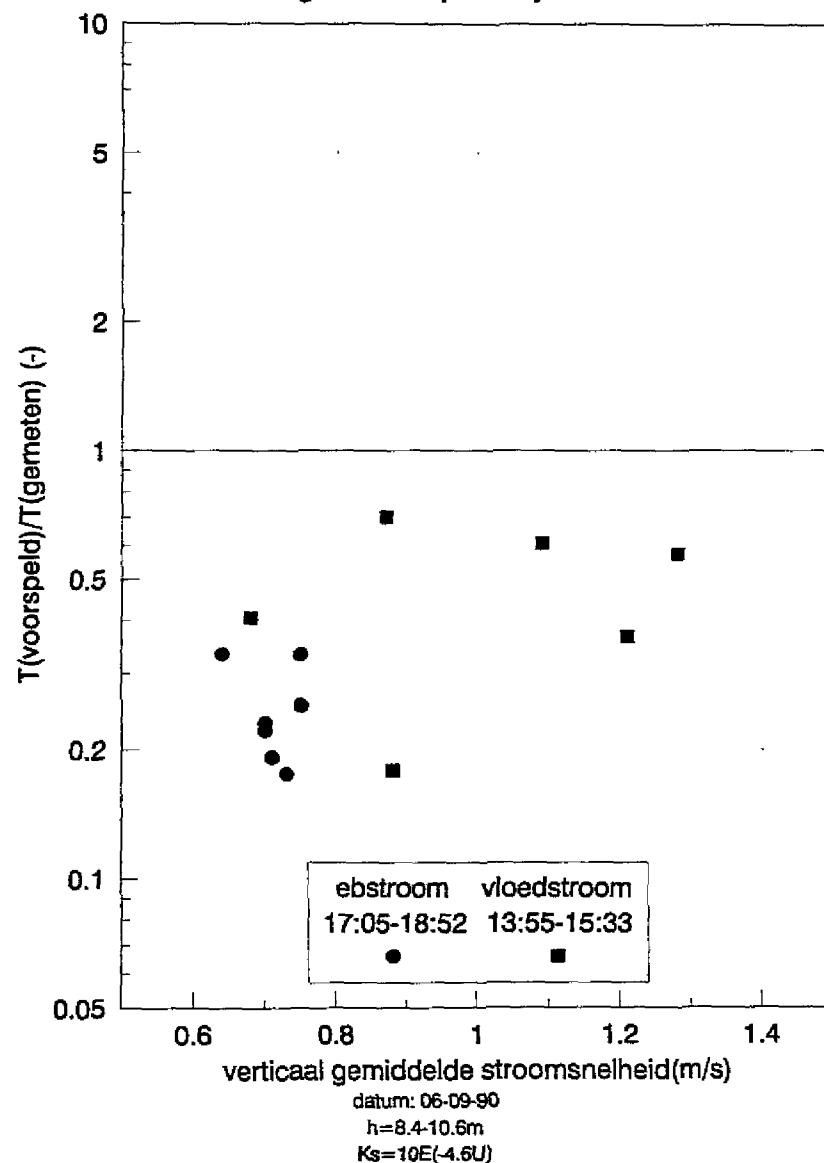


Fig.53 De transportdiscrepantie-ratio's als functie van de stroomsnelheid in de Schaar van Waarde (meetpunt 10, raai 5)

gemeten en voorspeld zandtransport, meetpunt 11
debietraai 5, als functie van de stroomsnelheid
gebaseerd op van Rijn



gemeten en voorspeld zandtransport, meetpunt 11
debietraai 5, als functie van de stroomsnelheid
gebaseerd op Engelund-Hansen

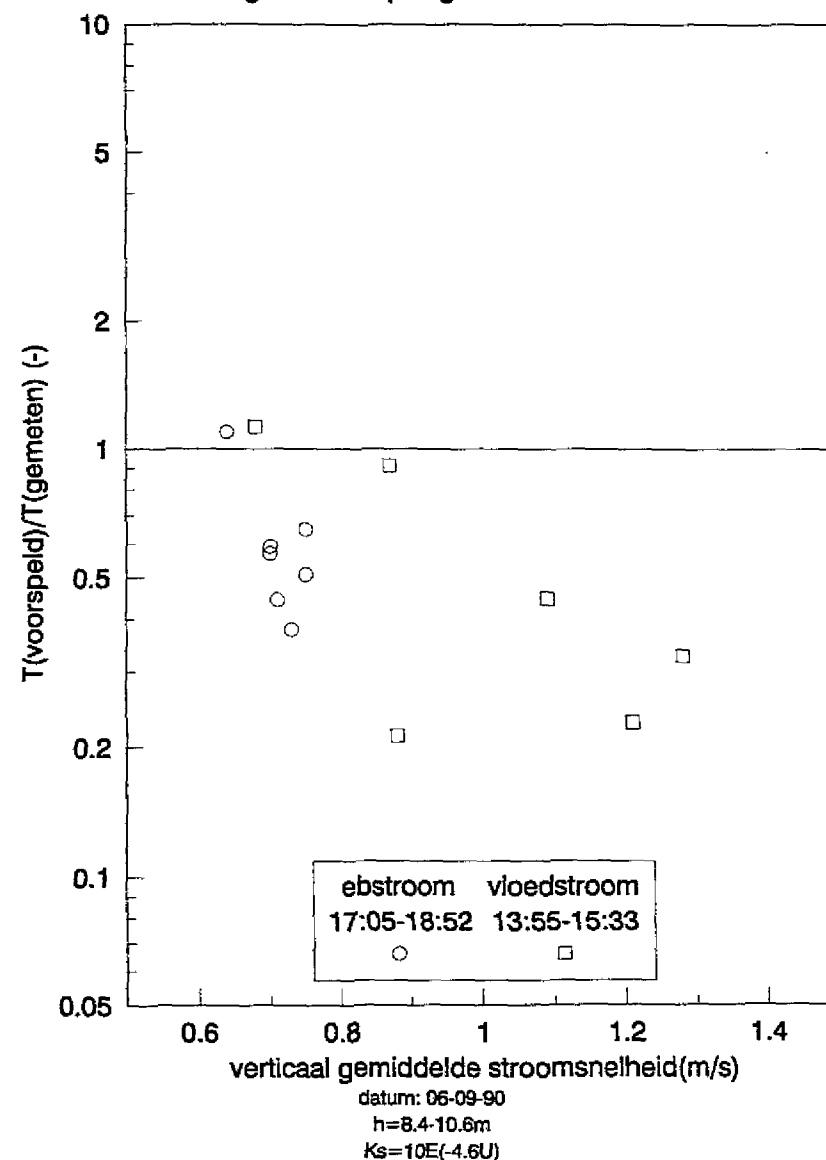
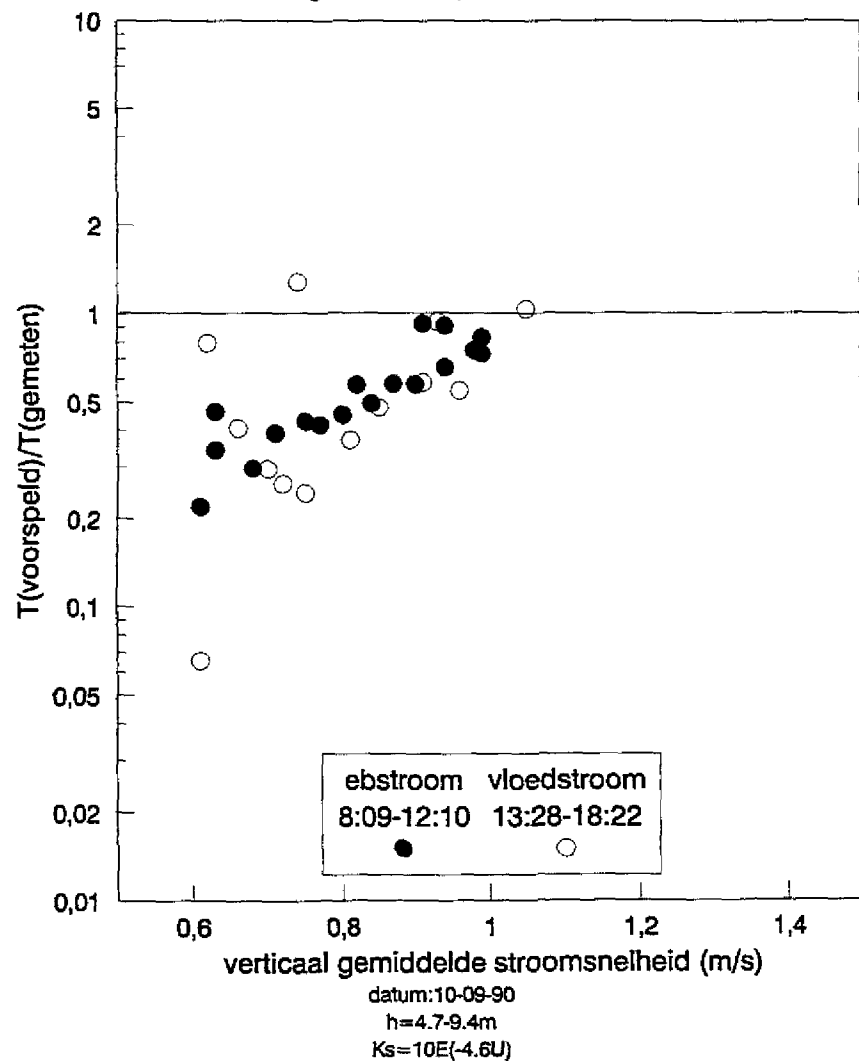


Fig.54 De transportdiscrepantie-ratio's als functie van de stroomsnelheid in de Schaar van Waarde (meetpunt 11, raai 5)

gemeten en voorspeld zandtransport als functie
van de stroomsnelheid in meetpunt 10 (DG)
gebaseerd op van Rijn



gemeten en voorspeld zandtransport als functie
van de stroomsnelheid in meetpunt 10 (DG)
gebaseerd op Englund-Hansen

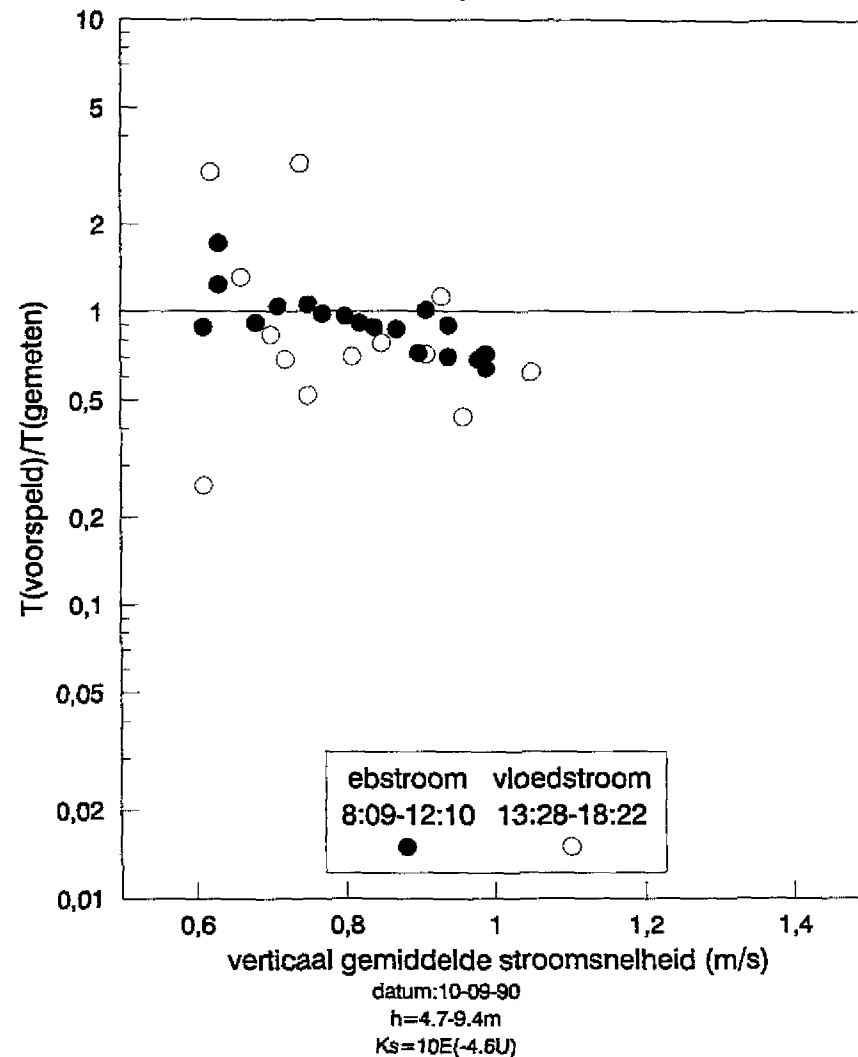
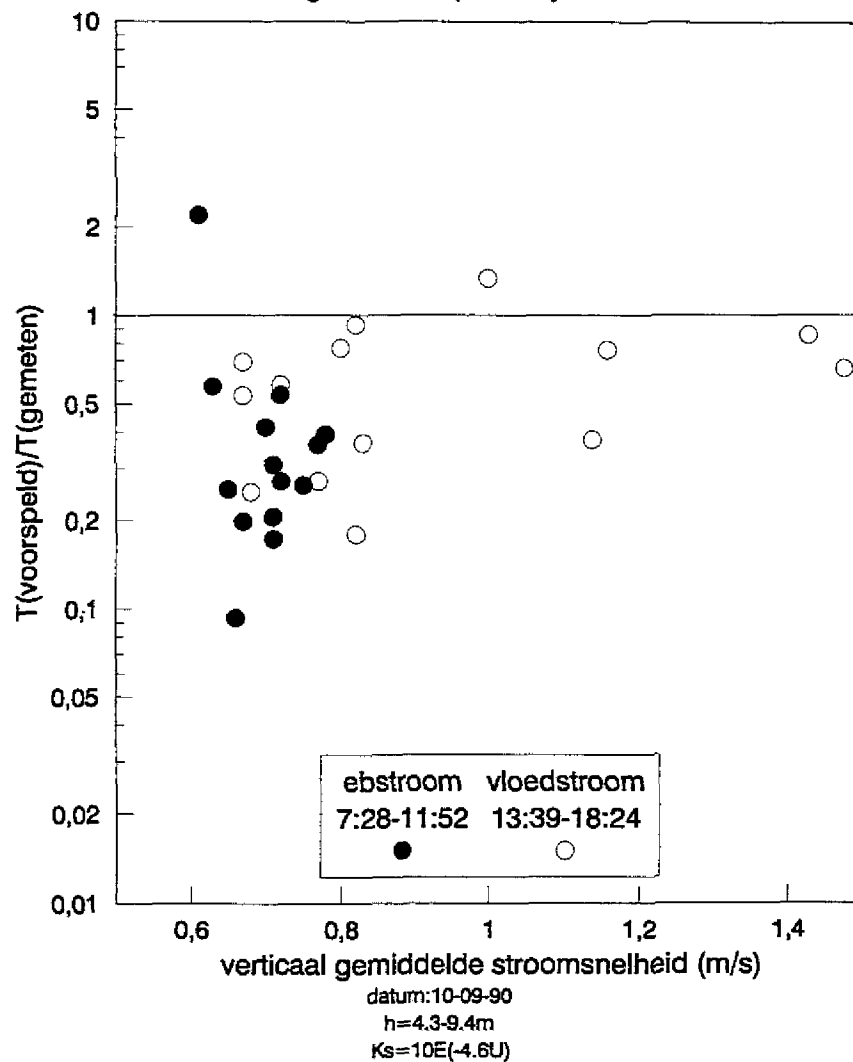


Fig.55 De transportdiscrepantie-ratio's als functie van de stroomsnelheid in het inscharend
ebgeultje (meetpunt 10)

gemeten en voorspeld zandtransport als functie
van de stroomsnelheid in meetpunt 11 (DG)
gebaseerd op van Rijn



gemeten en voorspeld zandtransport als functie
van de stroomsnelheid in meetpunt 11 (DG)
gebaseerd op Engelund-Hansen

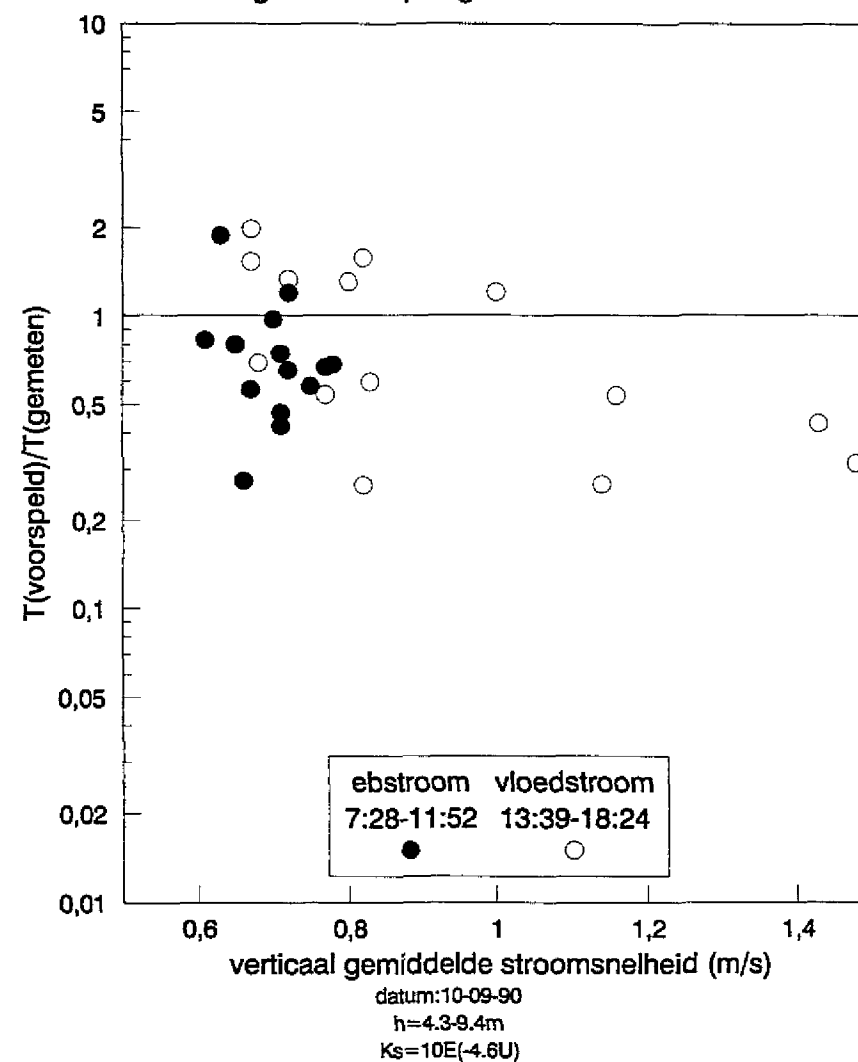
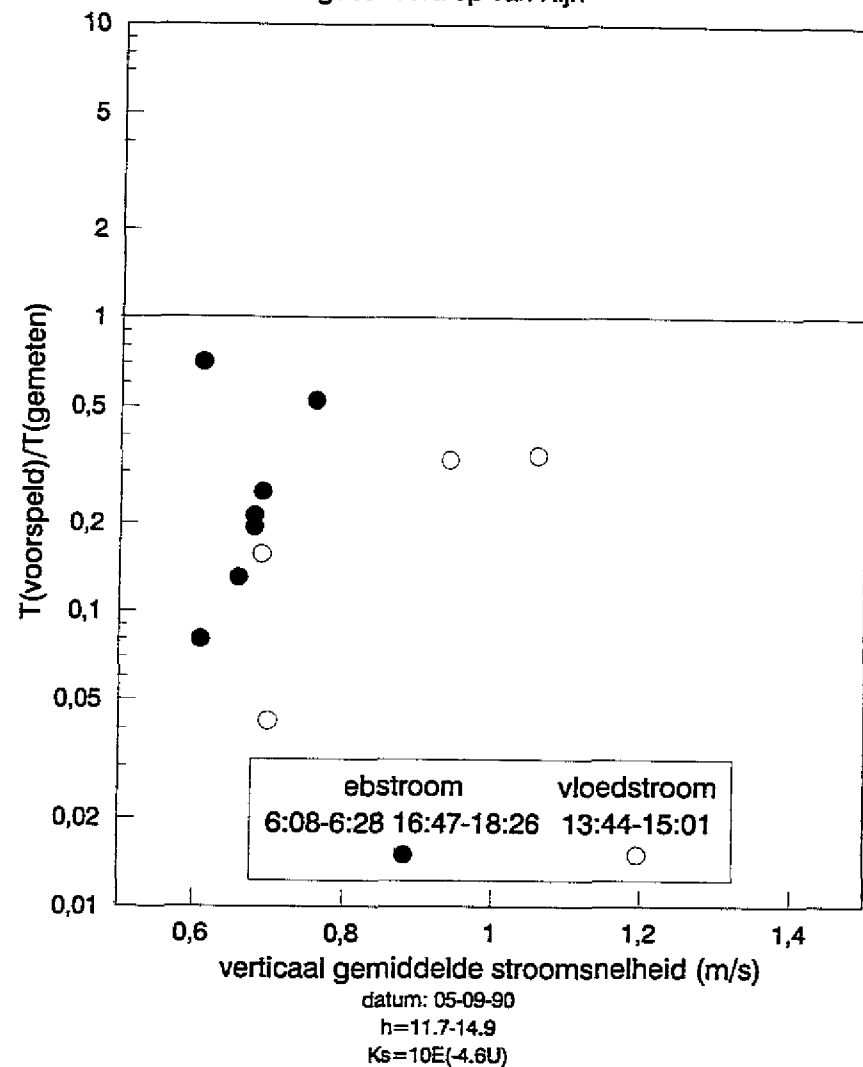


Fig.56 De transportdiscrepantie-ratio's als functie van de stroomsnelheid in de Schaar van Valkenisse (meetpunt 11)

gemeten en voorspeld zandtransport als functie
van de stroomsnelheid in meetpunt 8 (raai 3)
gebaseerd op van Rijn



gemeten en voorspeld zandtransport als functie
van de stroomsnelheid in meetpunt 8 (raai 3)
gebaseerd op Engelund-Hansen

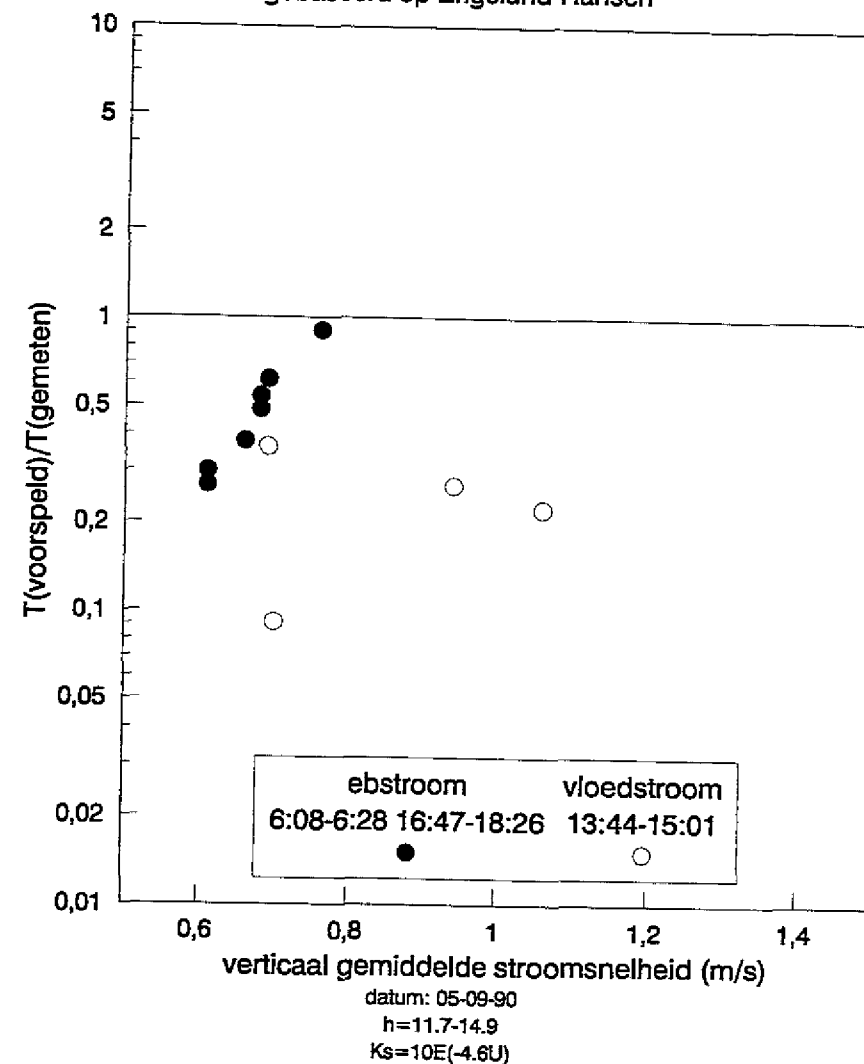
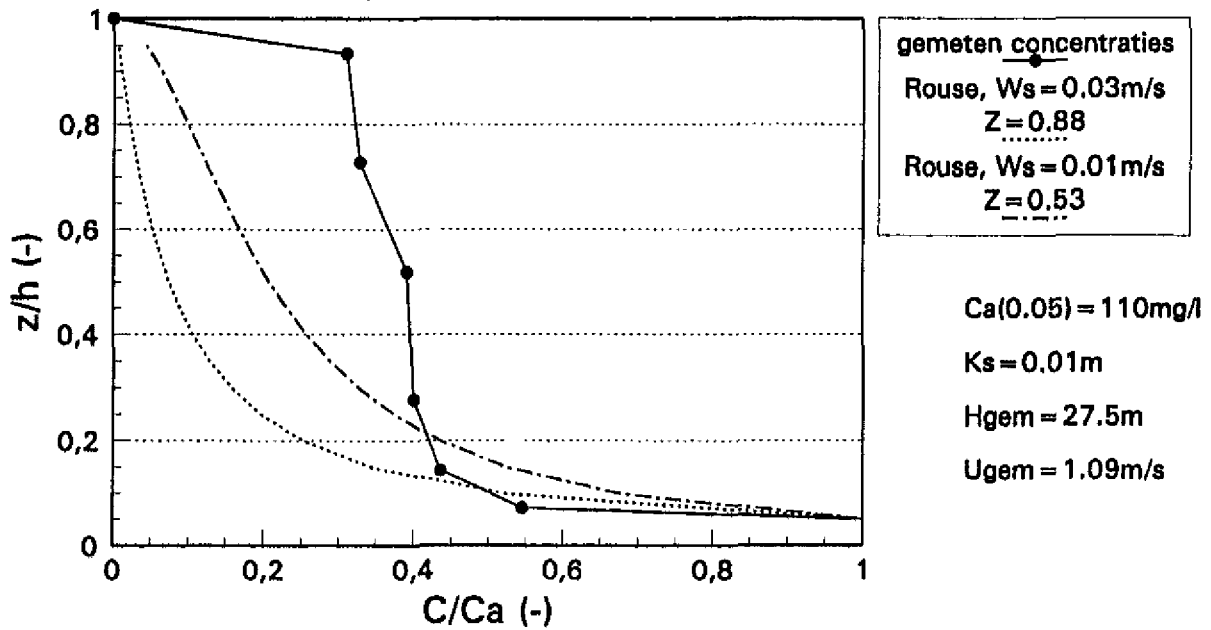


Fig.57 De transportdiscrepantie-ratio's als functie van de stroomsnelheid in meetpunt 8 van
raai 3

**Gemeten en theoretische concentratieverticalen
tijdens vertragende ebstroom (mp 52)**
parabolische verdeling mengcoëfficiënt

A



**Gemeten en theoretische concentratieverticalen
tijdens vertragende ebstroom (mp 52)**
parabolische verdeling mengcoëfficiënt

B

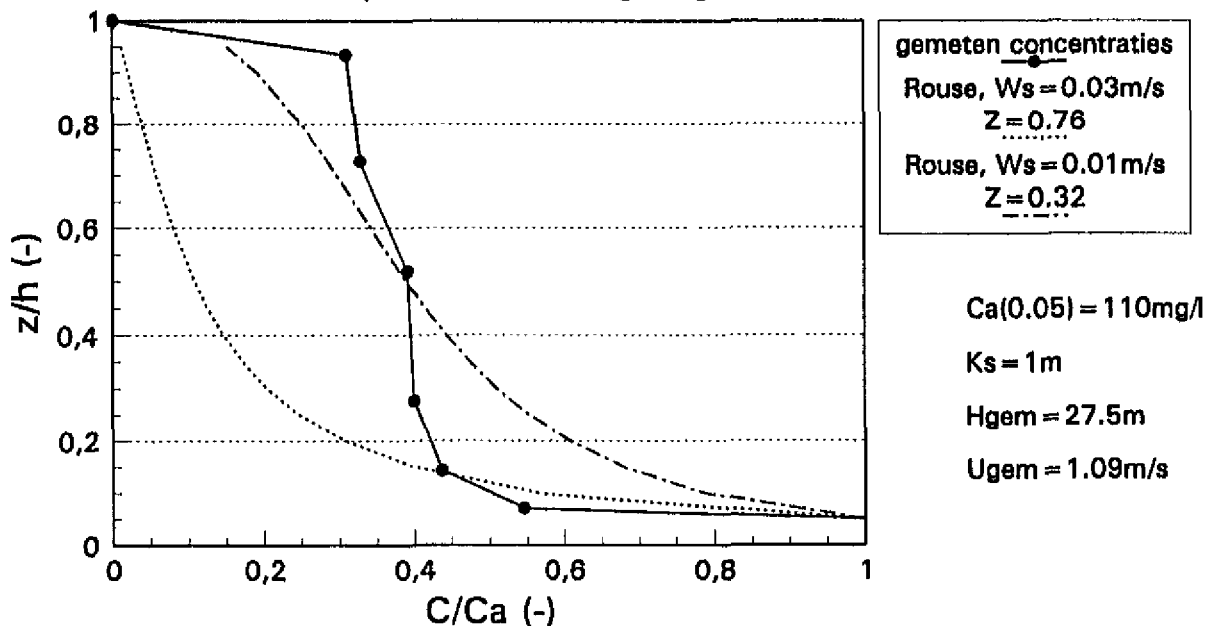


Fig. 58 Het effect van een variabele valsnelheid op de theoretische concentratieverticaal

A. $K_s = 0.01\text{m}$ B. $K_s = 1\text{m}$

**Gemeten en theoretische concentratieverticalen
tijdens vertragende ebstroom (mp52)**

parabolisch constante verdeling mengcoëfficiënt

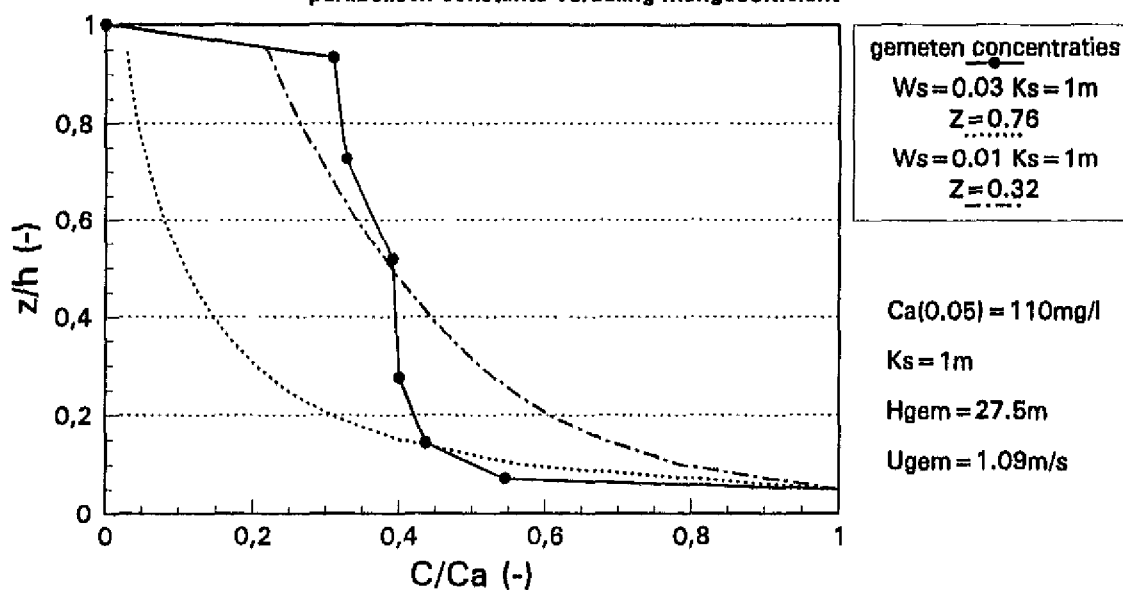
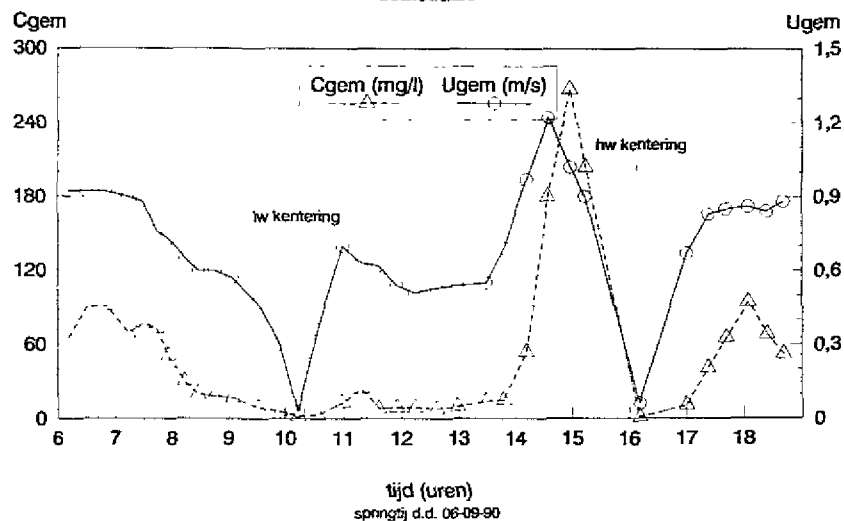


Fig. 59 Het effect van een variabele valsnelheid op de theoretische concentratieverticaal, gebaseerd op een parabolisch-constante mengcoëfficiënt en een $K_s = 1m$

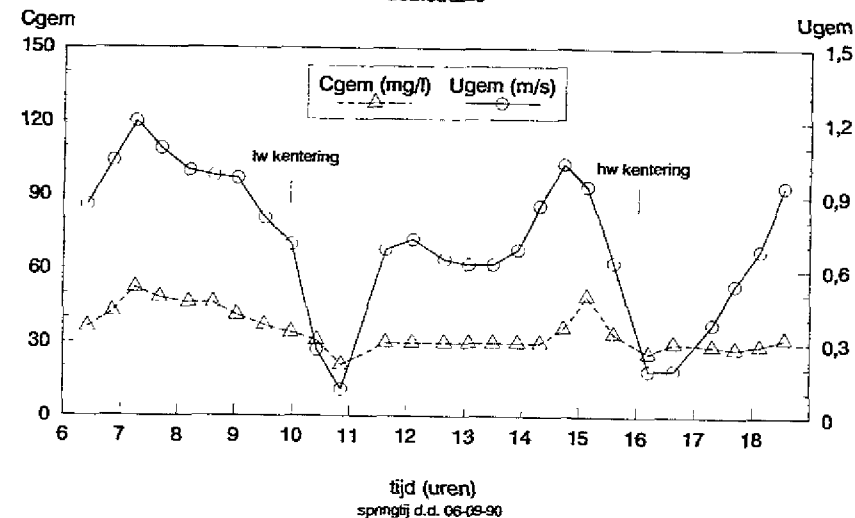
verticaal gemiddelde concentratie en snelheid
als functie van de tijd in meetpunt 9

debietraai5

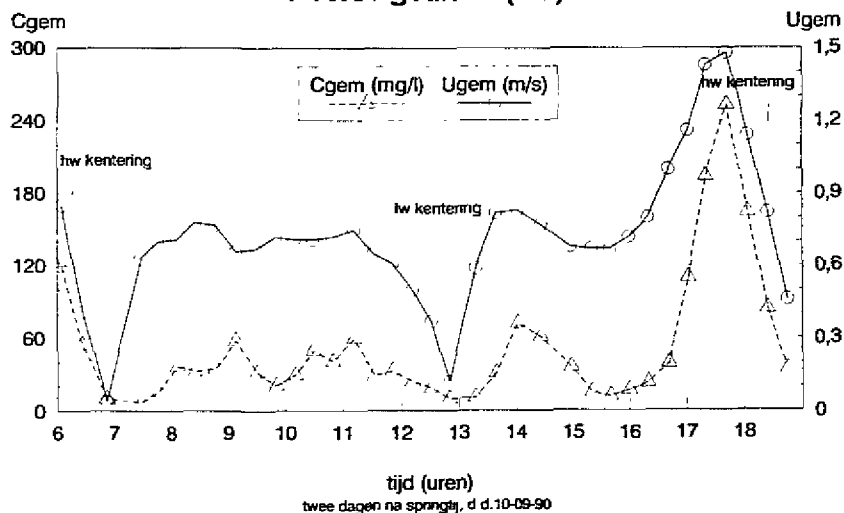


verticaal gemiddelde concentratie en snelheid
als functie van de tijd in meetpunt 2

debietraai5



verticaal gemiddelde concentratie en snelheid
als functie van de tijd, in meetpunt 11
diverse geulen (DG)



verticaal gemiddelde concentratie en snelheid
als functie van de tijd, in meetpunt 3

debietraai5

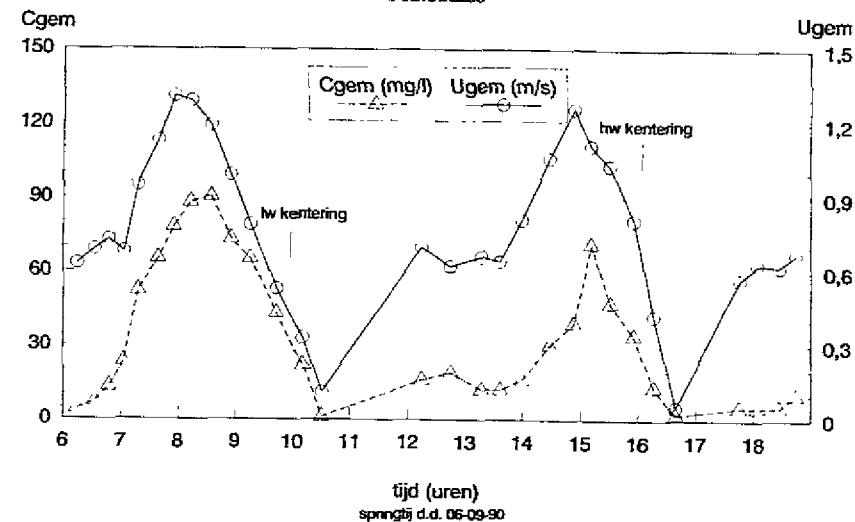
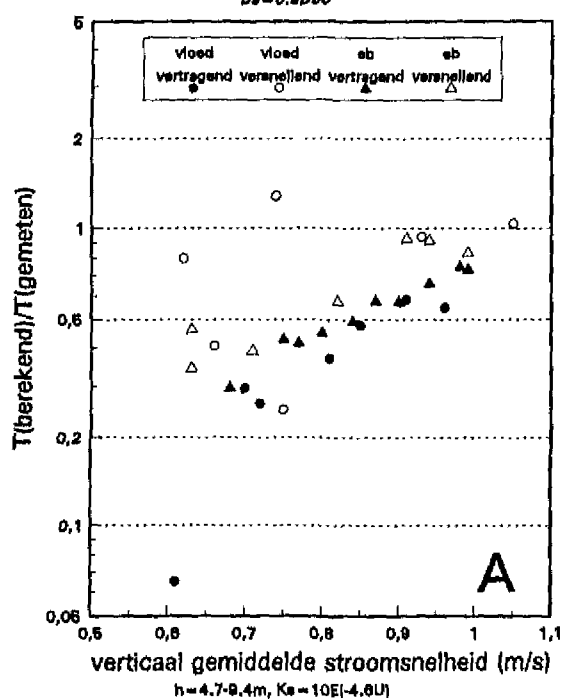


Fig.60 Verticaal gemiddelde concentraties en stroomsnelheden als functie van de tijd, in het Zuidergat, de Schaar van Waarde en de Schaar van Valkenisse.

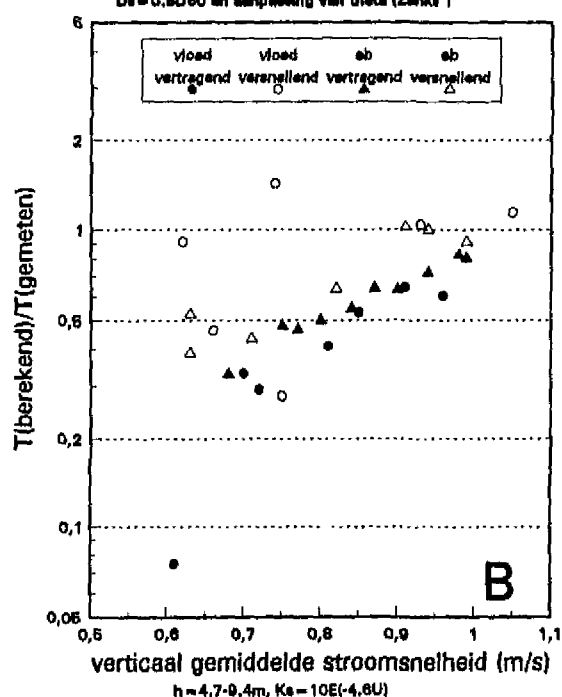
Gemeten en voorspeld zandtransport als functie van de stroomsnelheid (DG 10)

$D_{50} = 0.850$



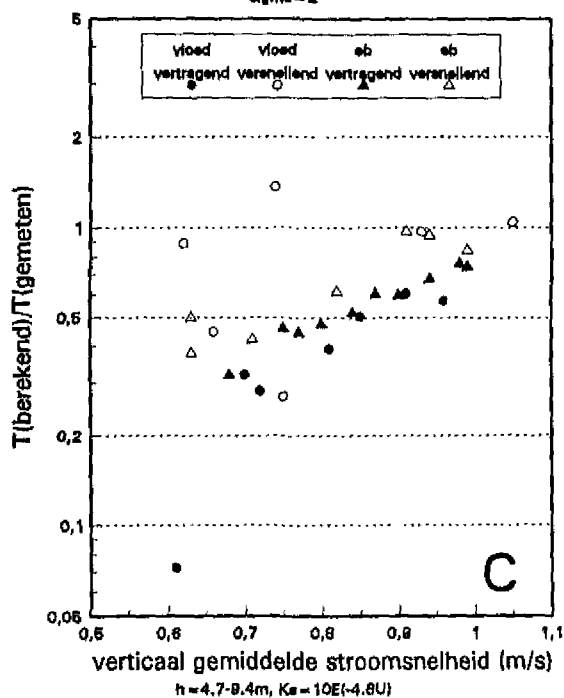
Gemeten en voorspeld zandtransport als functie van de stroomsnelheid (DG 10)

$D_{50} = 0.850$ en aanpassing van theta (Zenk 1)



Gemeten en voorspeld zandtransport als functie van de stroomsnelheid (DG 10)

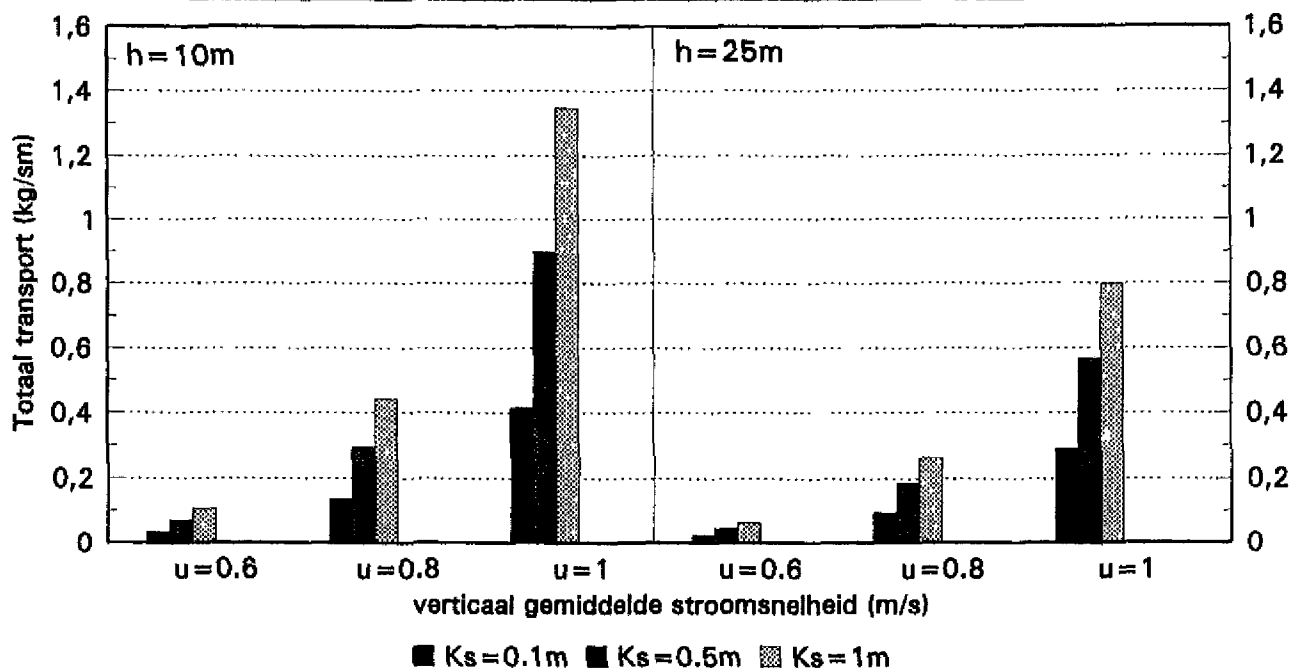
$\sigma_{\text{gms}} = 2$



	<0.5 (%)	0.5-2 (%)
A	50	50
B	36.7	63.3
C	40	60

Fig.61 Transportdiscrepantie-ratio's als functie van de stroomsnelheid
 A. oorspronkelijke berekening volgens Van Rijn
 B. aanpassing van theta
 C. aanpassing van sigma

**Berekende transporten volgens de methode van
Engelund-Hansen**
h = 10m en h = 25m



**Berekende transporten volgens de methode van
Engelund-Hansen**
h = 10m en h = 25m

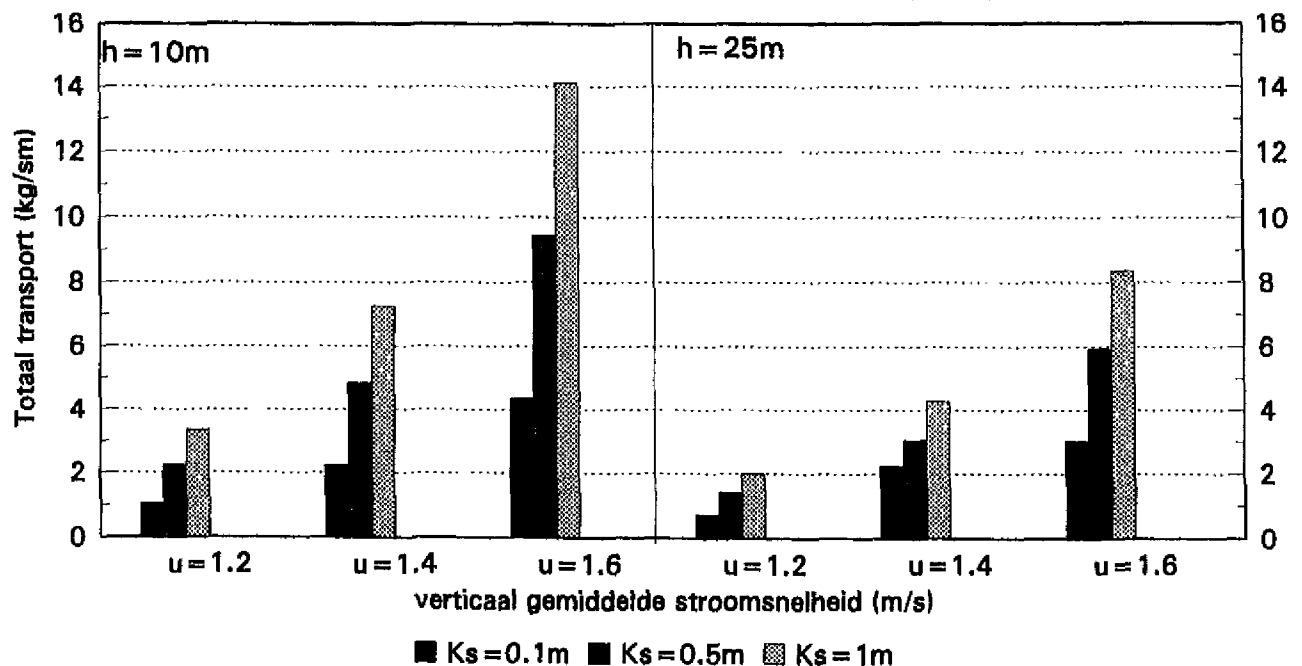
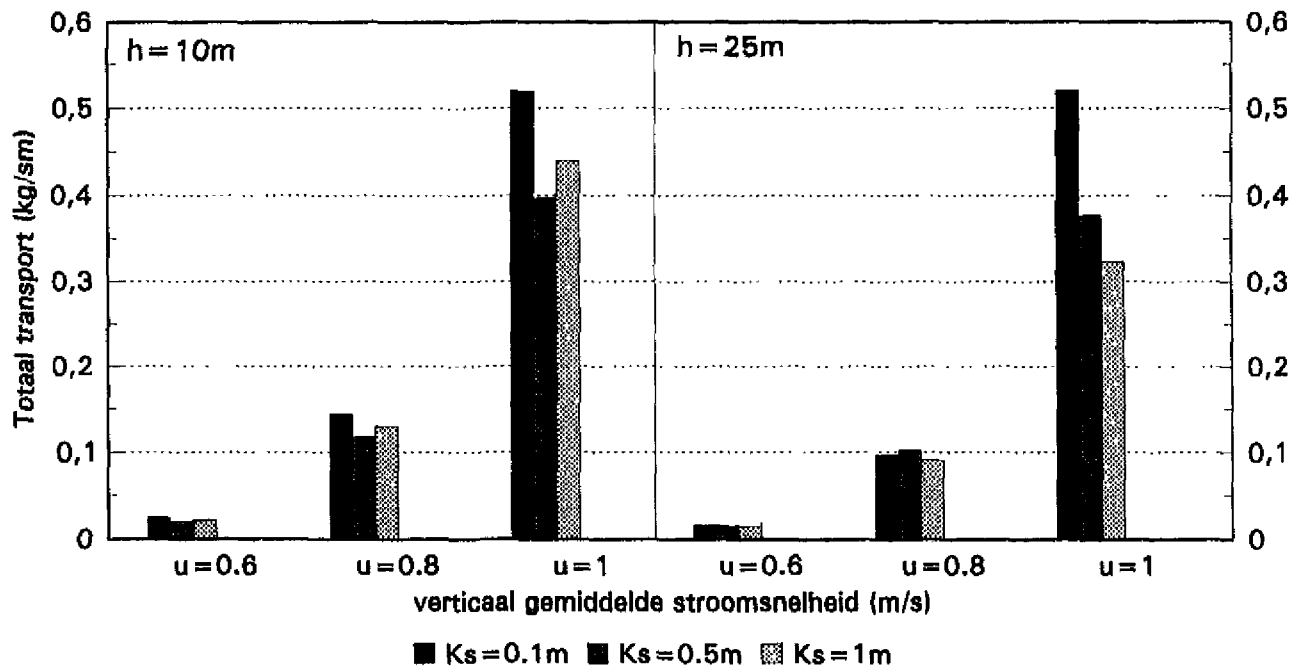


Fig.62 Gevoeligheidsanalyse van de formule van Engelund-Hanssen voor variaties in verticaal gemiddelde stroomsnelheid ($\bar{u}$), ruwheidshoogte (k_s) en waterdiepte (h).

Berekende transporten volgens de methode van Van Rijn

$h = 10\text{m}$ en $h = 25\text{m}$



Berekende transporten volgens de methode van Van Rijn

$h = 10\text{m}$ en $h = 25\text{m}$

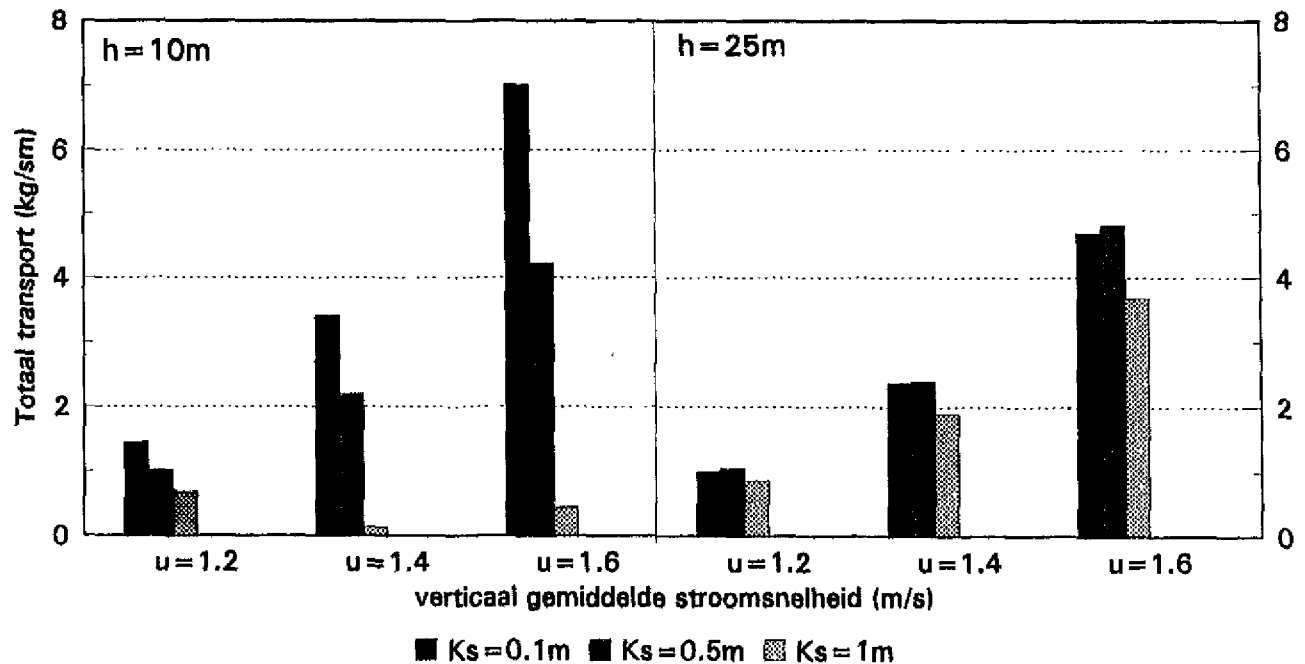
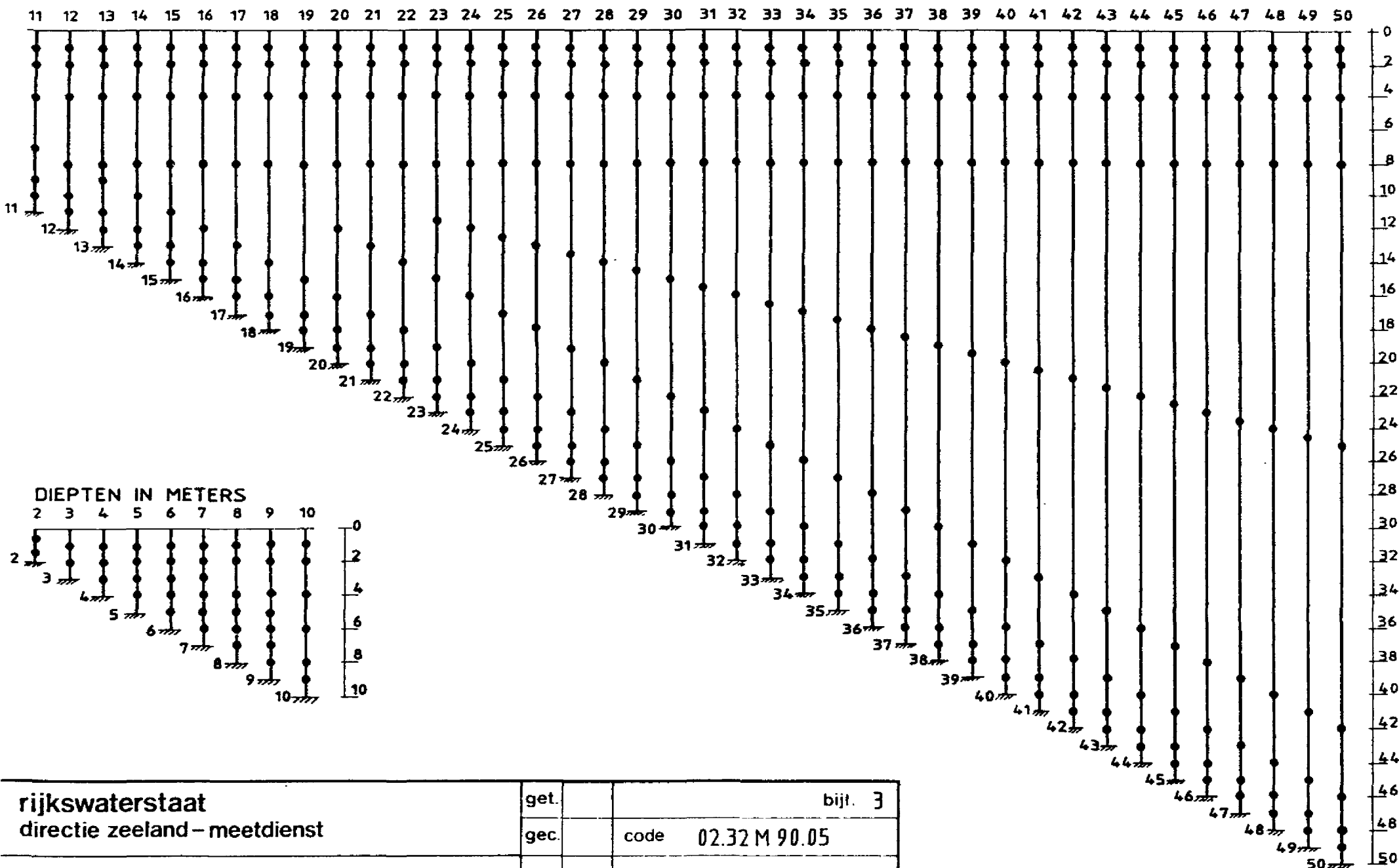


Fig.63 Gevoeligheidsanalyse van de formule van Van Rijn voor variaties in verticaal gemiddelde stroomsnelheid ($\bar{u}$), ruwheidshoogte (k_s) en waterdiepte (h).

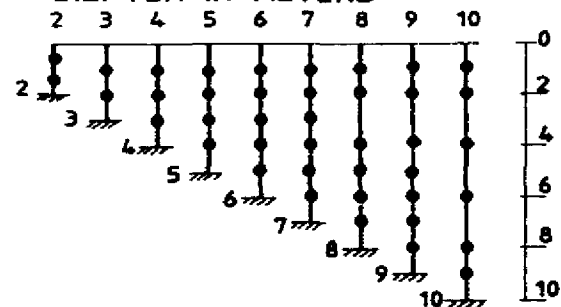
APPENDIX A

Meetdiepte-schema voor de
Elmar stroommetingen

DIEPTEN IN METERS



DIEPTEN IN METERS



rijkswaterstaat
directie zeeland - meetdienst

ELMAR DIEPTESCHEMA

• MEETNIVEAU

get.		bijl. 3
gec.		code 02.32 M 90.05
gez.		schaal
akk.		nr.

JAN. '90

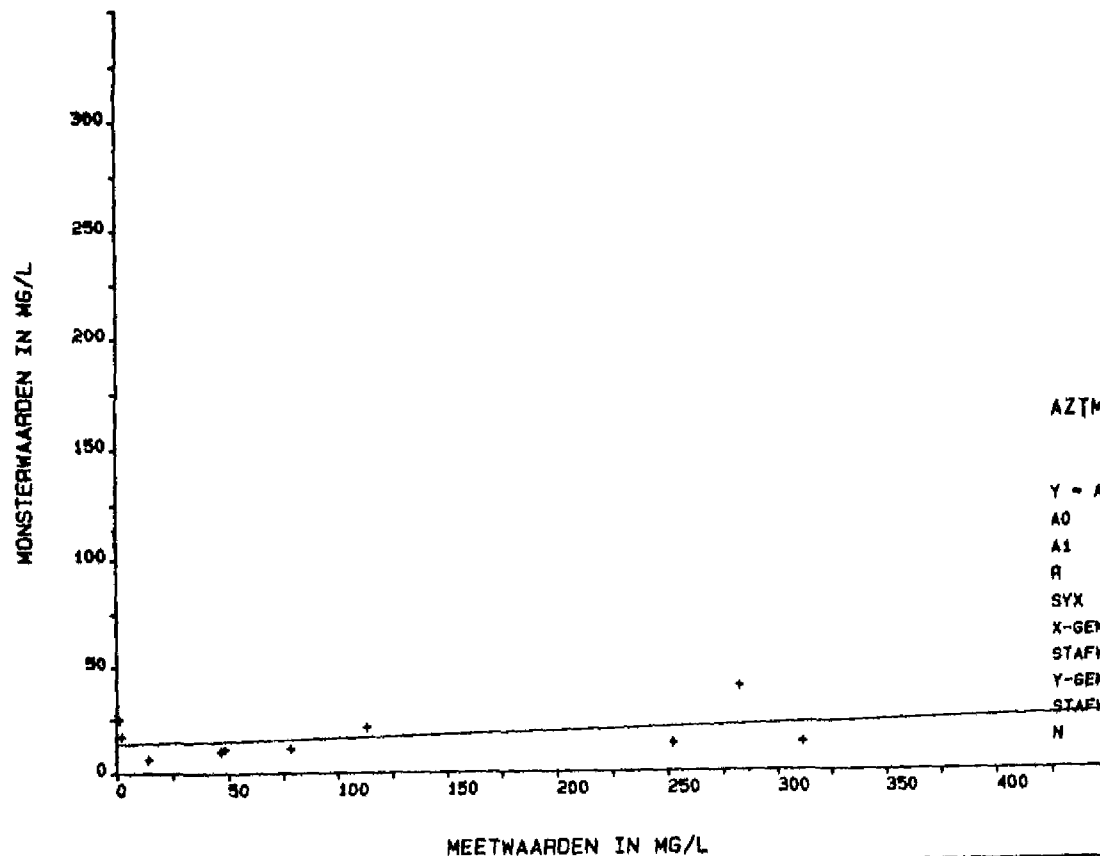
APPENDIX B

IJklijnen van de akoestische
zandtransportmeters (AZTM)
en de Partech slibmeters

Project Oost-West
AZTM-meting Overloop v. Valkenisse

RIJKSWATERSTAAT
DIRECTIE ZEELAND
MEETDIENST

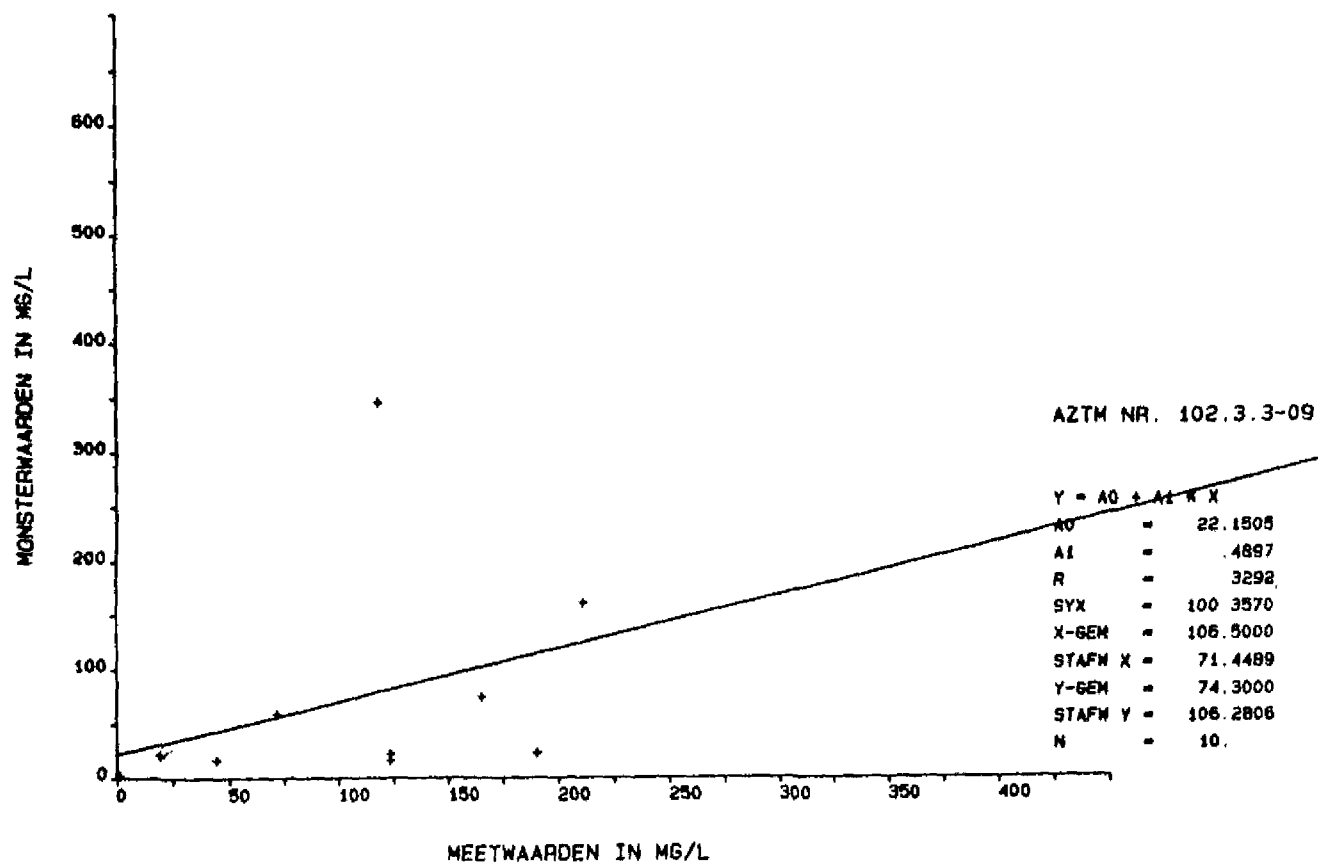
5-9-1990 meetpunt 2
LODYCKE



Project Oost-West
AZTM-meting Overloop v. Valkenisse

RIJKSWATERSTAAT
DIRECTIE ZEELAND
MEETDIENST

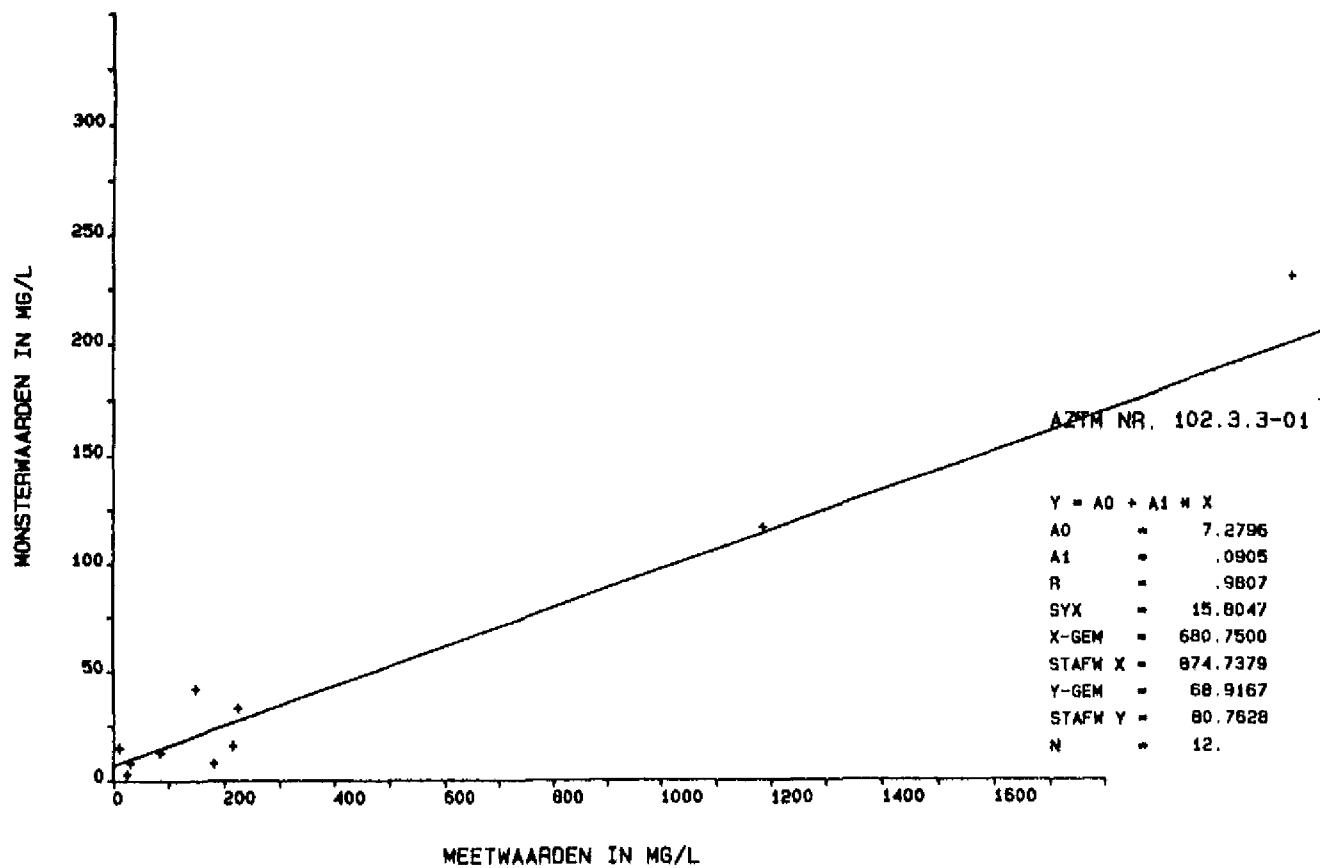
5-9-1990 meetpunt 3
WIJTVLIET



Project Oost-West
AZTM-meting Overloop v. Valkenisse

RIJKSWATERSTAAT
DIRECTIE ZEELAND
MEETDIENST

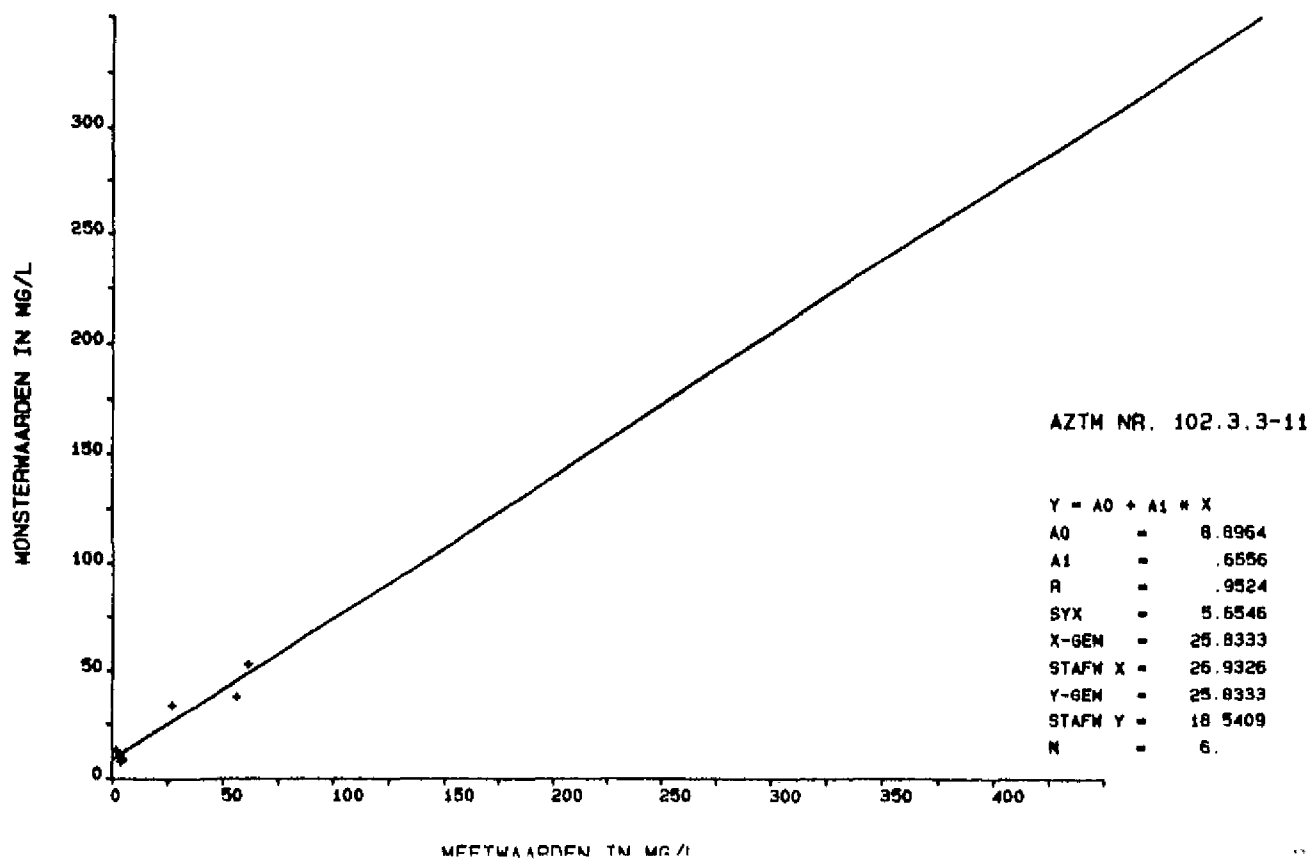
5-9-1990 meetpunt 5
MOLENVLIET



Project Oost-West
AZTM-meting Plaat van Valkenisse

RIJKSWATERSTAAT
DIRECTIE ZEELAND
MEETDIENST

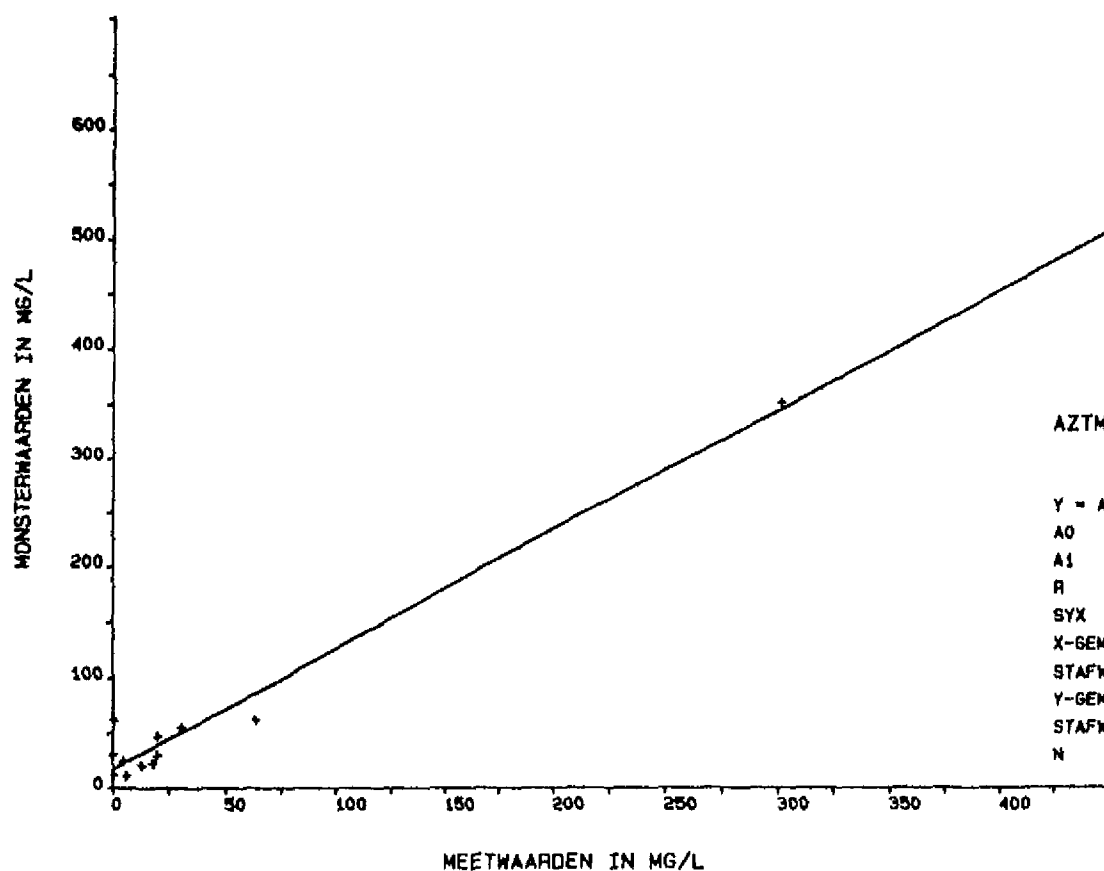
5-9-1990 meetpunt 6
SWALINGE



Project Oost-West
AZTM-meting Zimmermangeul

RIJKSWATERSTAAT
DIRECTIE ZEELAND
MEETDIENST

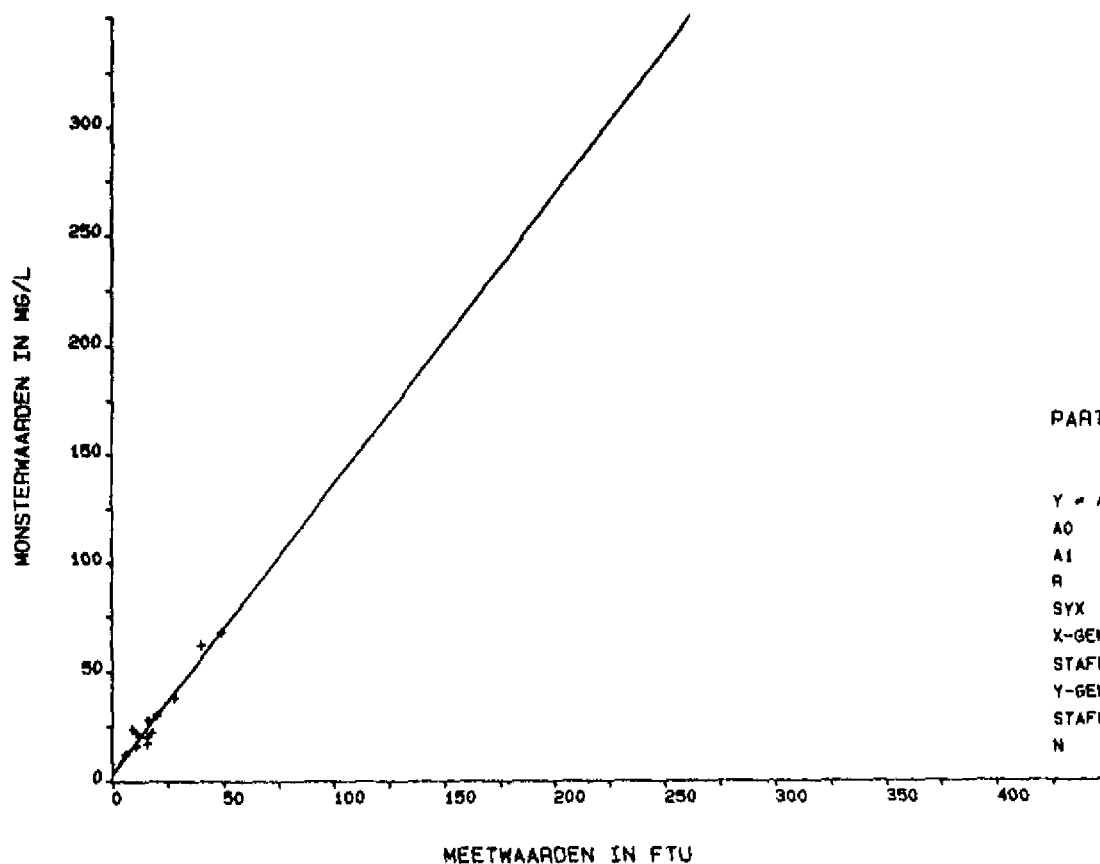
5-9-1990 meetpunt 8
STEENVLIET



Project Oost-West
PARTECH-meting Overl. v. Valkenisse

RIJKSWATERSTAAT
DIRECTIE ZEELAND
MEETDIENST

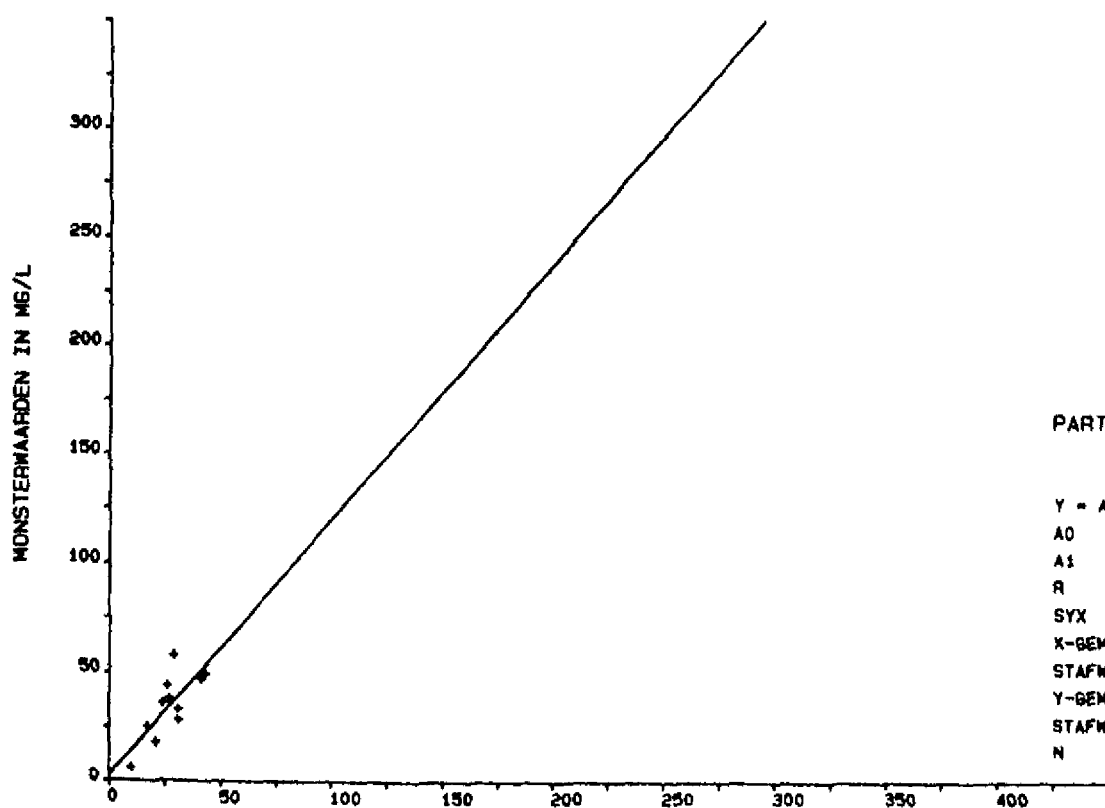
5-9-1990 meetpunt 2
LODYCKE



Project Oost-West
PARTECH-meting Overl. v. Valkenisse

RIJKSWATERSTAAT
DIRECTIE ZEELAND
MEETDIENST

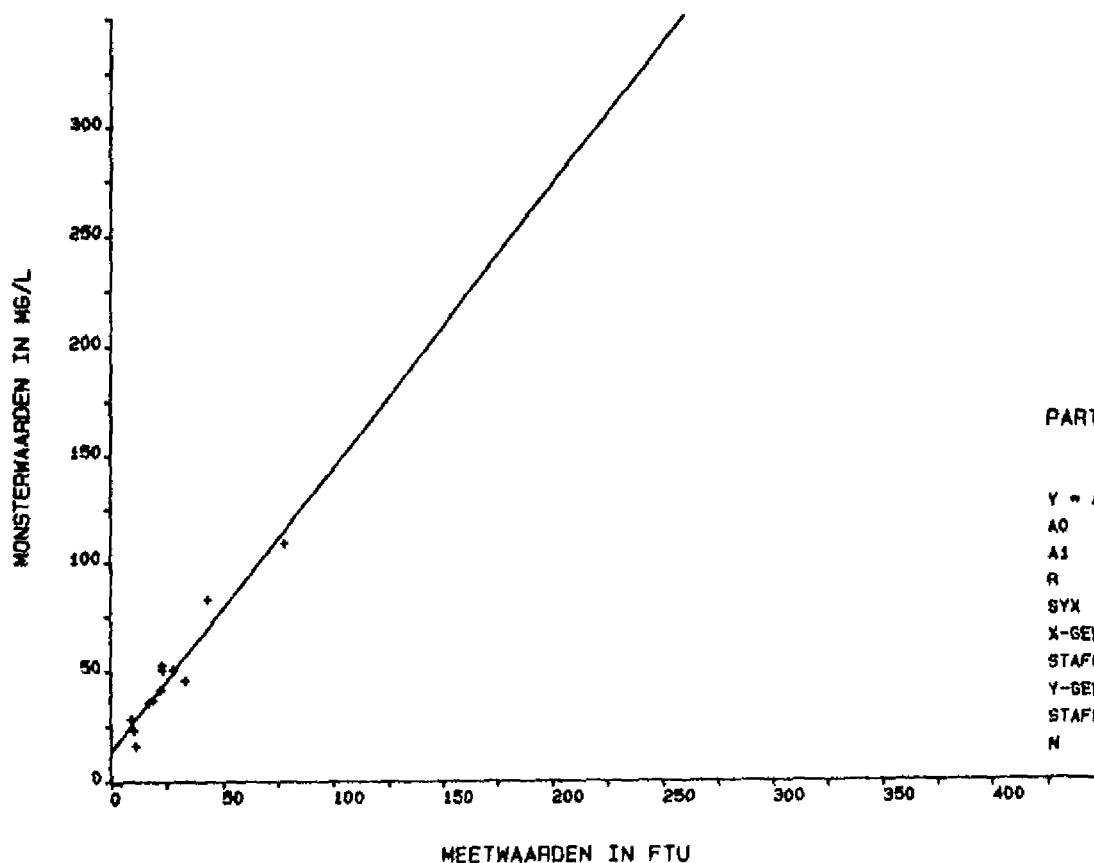
5-9-1990 meetpunt 3
WIJTVLIET



Project Oost-West
PARTECH-meting Overl. v. Valkenisse

RIJKSWATERSTAAT
DIRECTIE ZEELAND
MEETDIENST

5-9-1990 meetpunt 5
MOLENVLIET



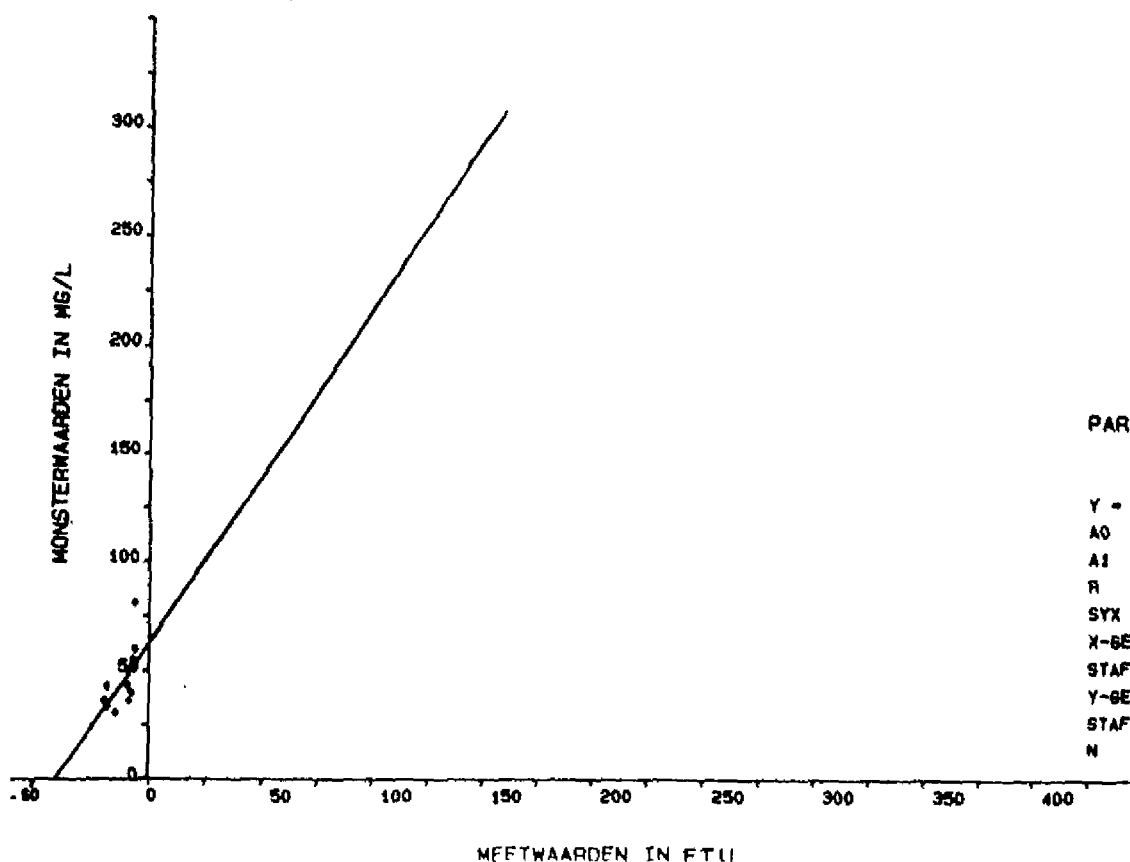
PARTECH NR. 01

Y = A0 + A1 * X
A0 = 13.7358
A1 = 1.2980
R = .9555
SYX = 7.6252
X-GEM = 26.3333
STAFW X = 19.0183
Y-GEM = 47.9167
STAFW Y = 25.8368
N = 12.

Project Oost-West
PARTECH-meting Zimmermangeul

RIJKSWATERSTAAT
DIRECTIE ZEELAND
MEETDIENST

5-9-1990 meetpunt 8
STEENVLIET



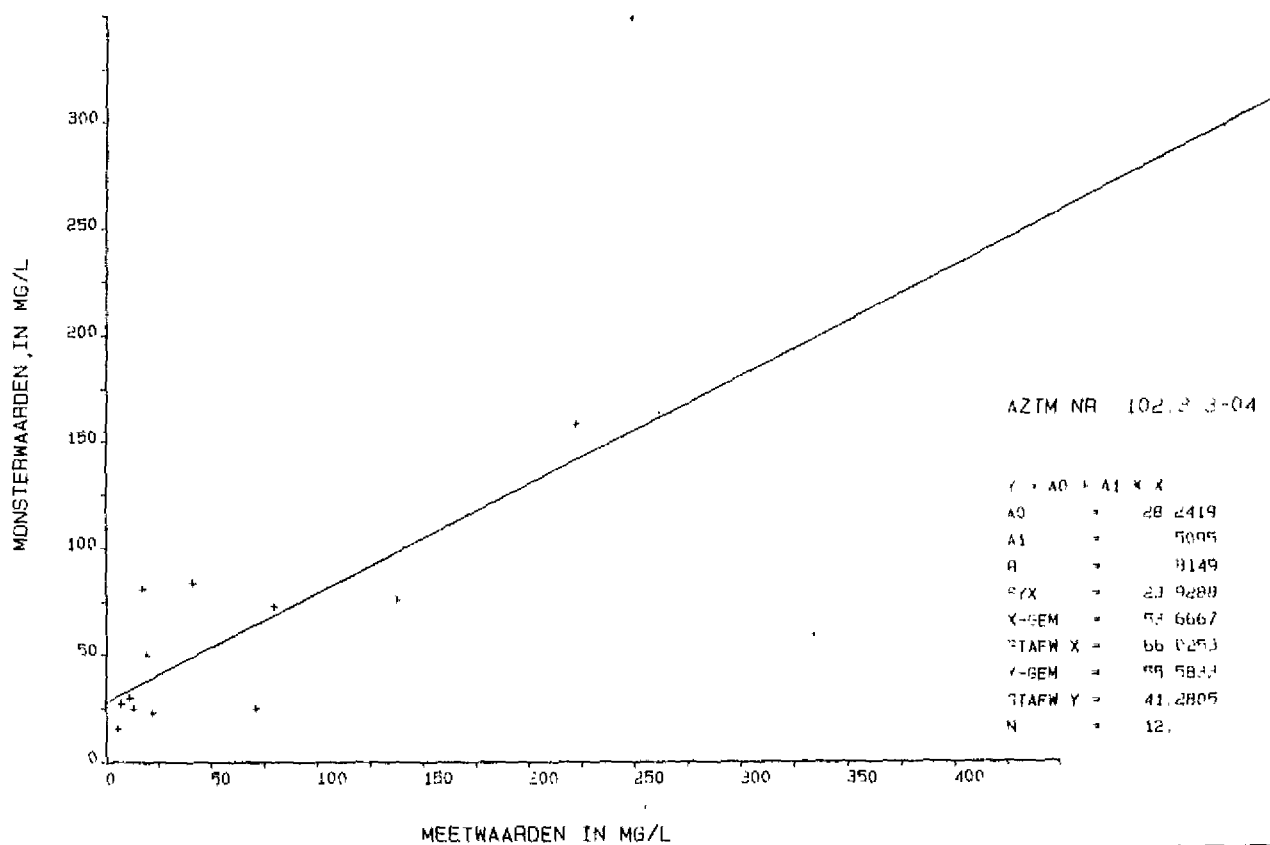
PARTECH NR. 04

Y = A0 + A1 * X
A0 = 61.9211
A1 = 1.5092
R = .6839
SYX = 11.2921
X-GEM = -9.5000
STAFW X = 7.0130
Y-GEM = 47.5833
STAFW Y = 15.4770
N = 12.

Oost-west project Raai 5A
AZTM-METING

RIJKSWATERSTAAT
DIRECTIE ZEELAND
MEETDIENST

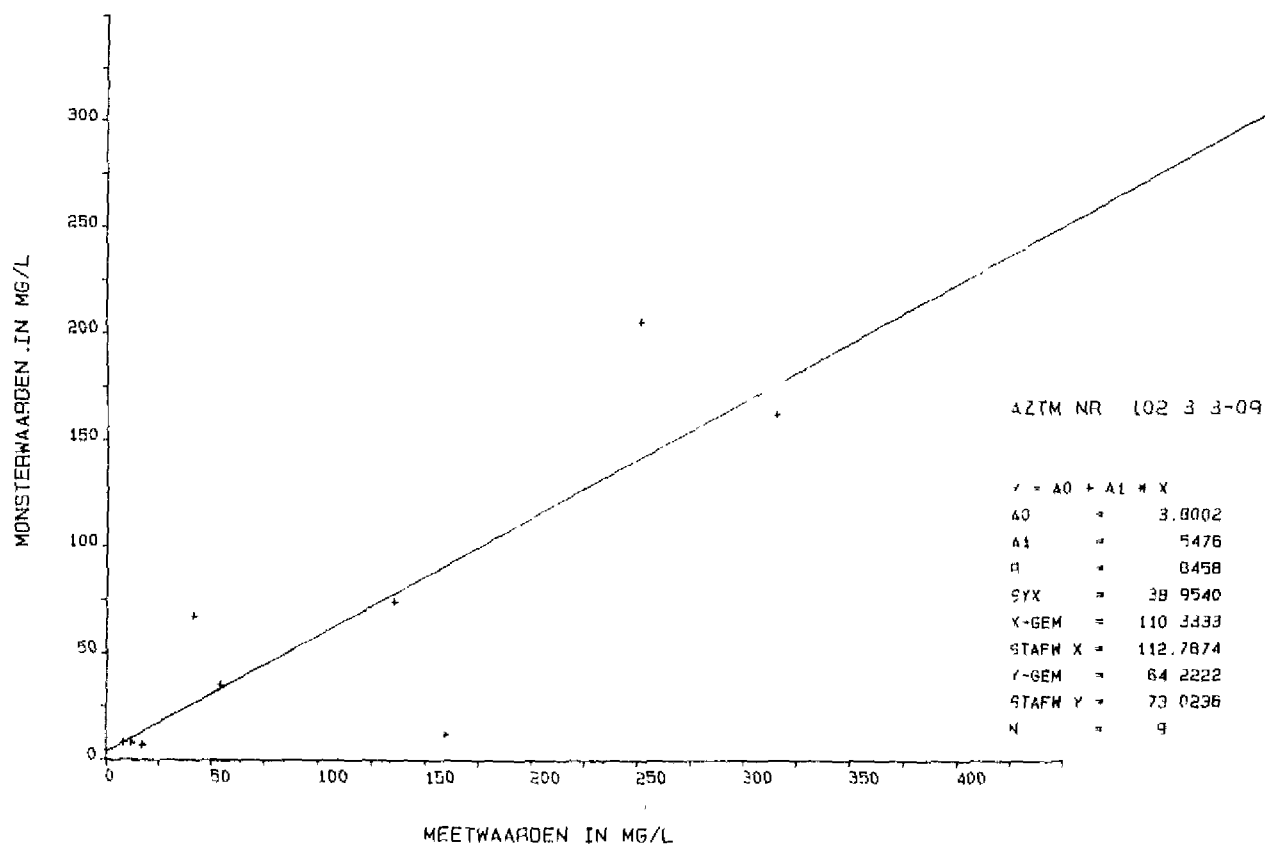
6-9-1990 meetpunt 2
LODYCKE



Oost-west project Raai 5A
AZTM-METING

RIJKSWATERSTAAT
DIRECTIE ZEELAND
MEETDIENST

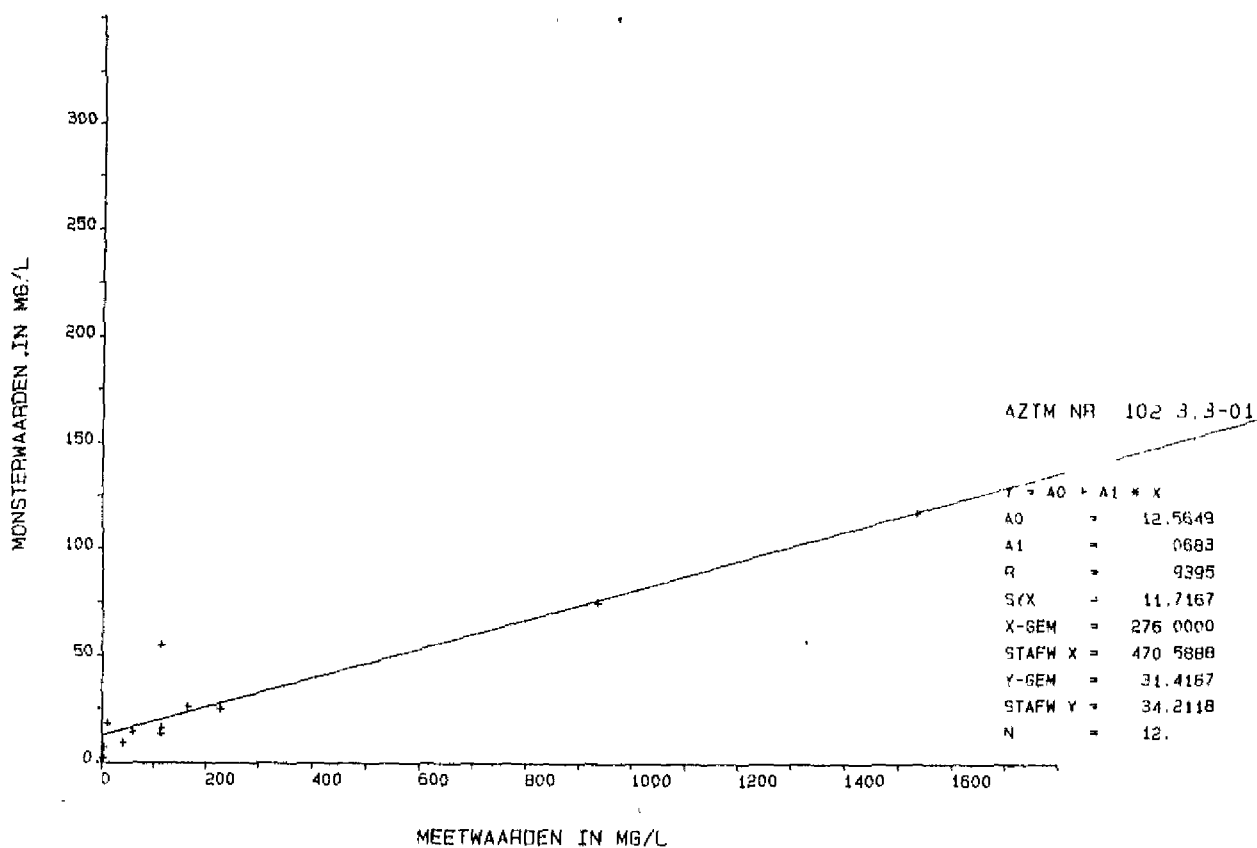
6-9-1990 meetpunt 3
WIJTVLIET



Oost-west project Raai 5A
AZTM-METING

RIJKSWATERSTAAT
DIRECTIE ZEELAND
MEETDIENST

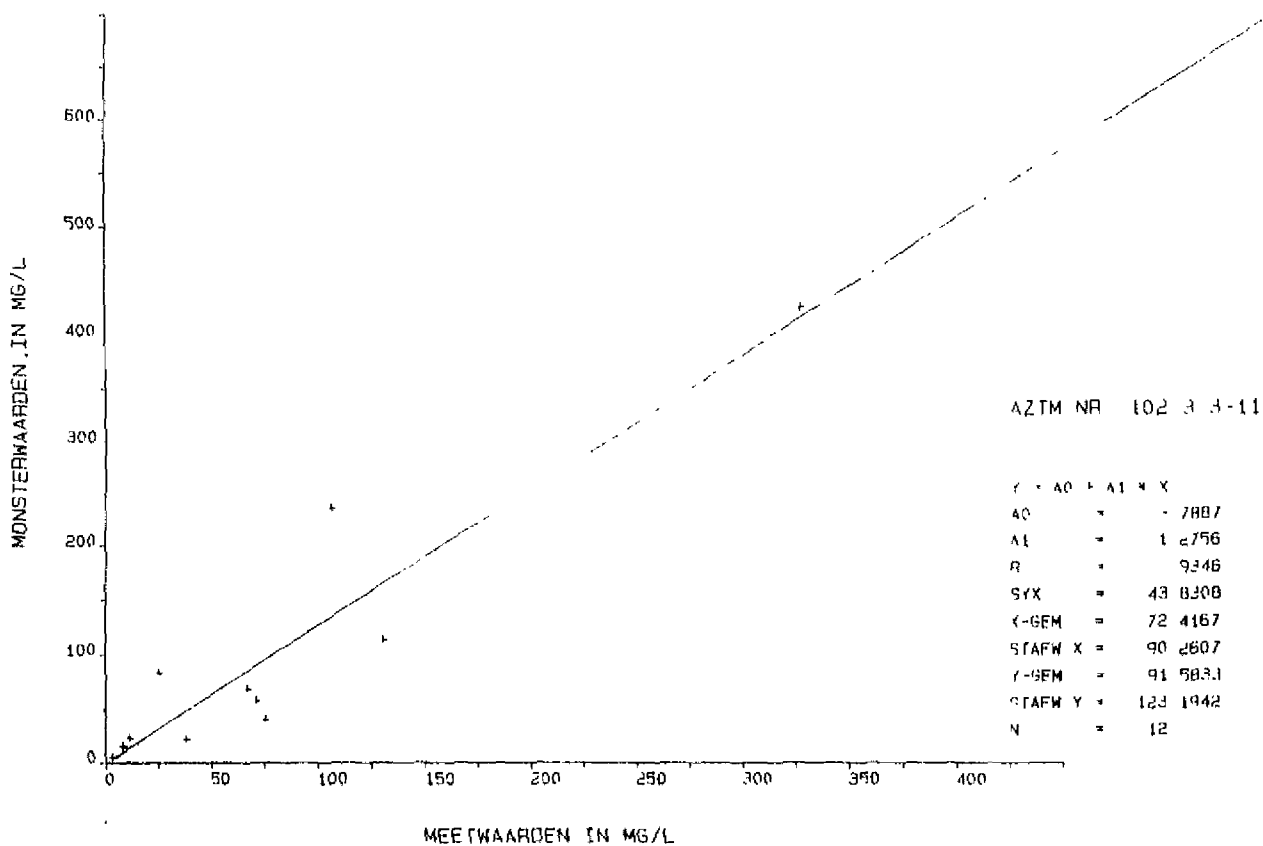
6-9-1990 meetpunt 5
MOLENVLIET



Oost-west project Raai 5A
AZTM-METING

RIJKSWATERSTAAT
DIRECTIE ZEELAND
MEETDIENST

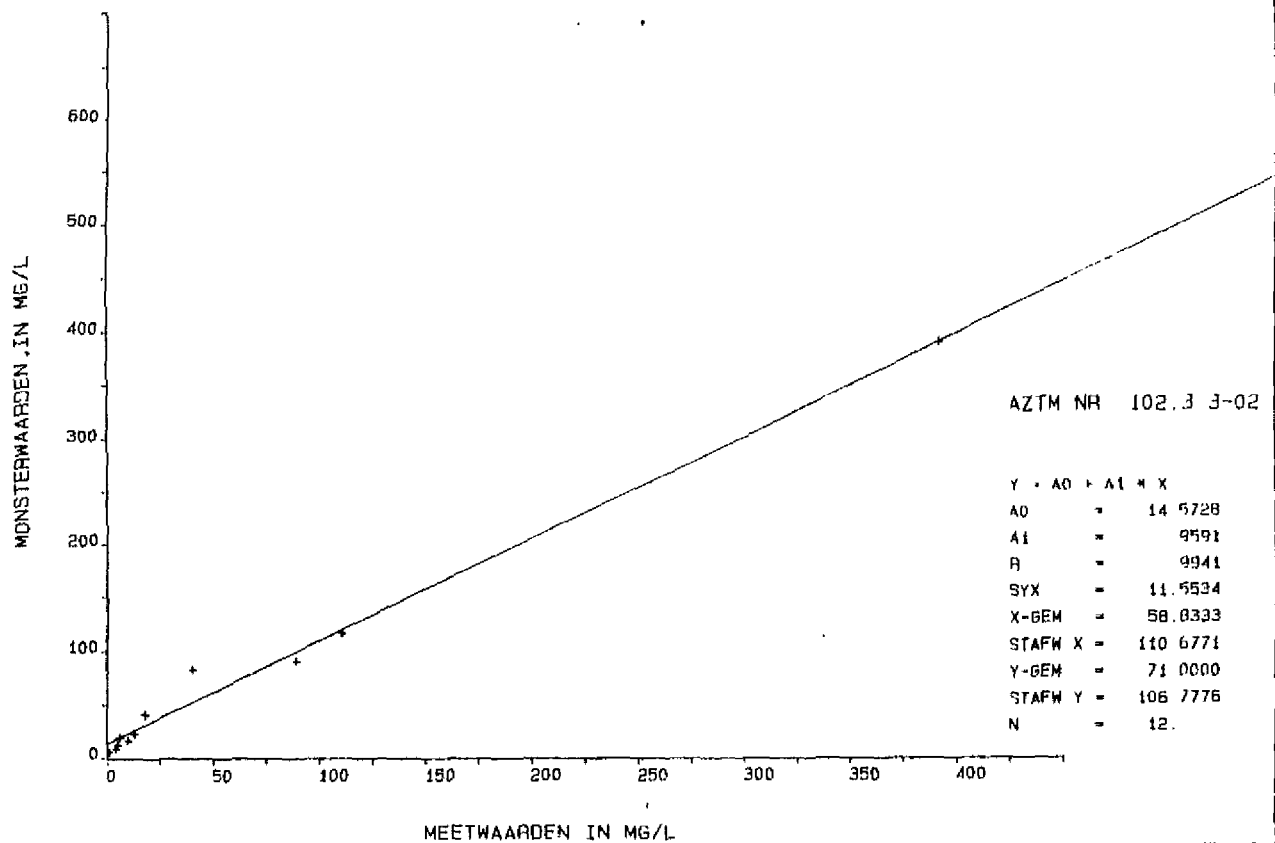
6-9-1990 meetpunt 9
SWALINGE



Oost-west project Raai 5A
AZTM-METING

RIJKSWATERSTAAT
DIRECTIE ZEELAND
MEETDIENST

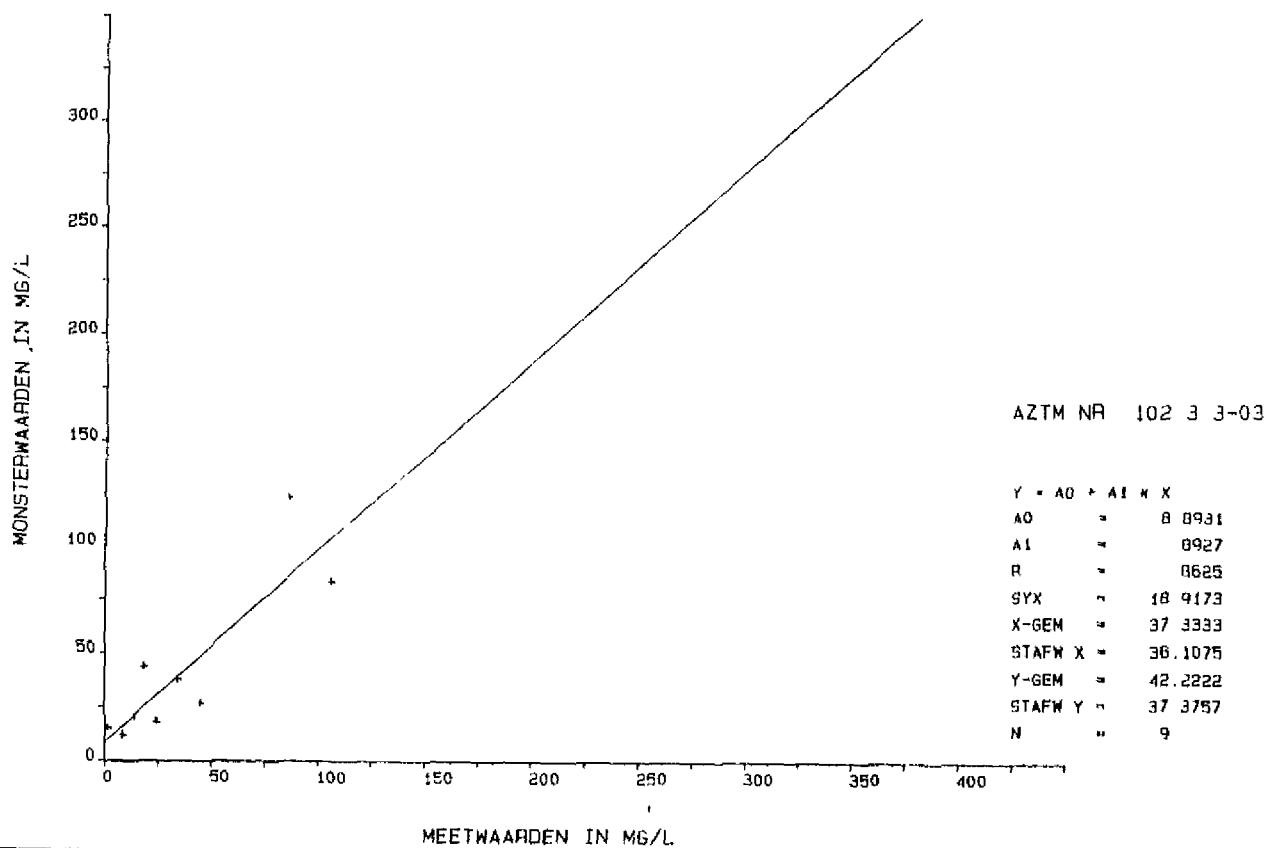
6-9-1990 meetpunt 10
STEENVLIET



Oost-west project Raai 5A
AZTM-METING

RIJKSWATERSTAAT
DIRECTIE ZEELAND
MEETDIENST

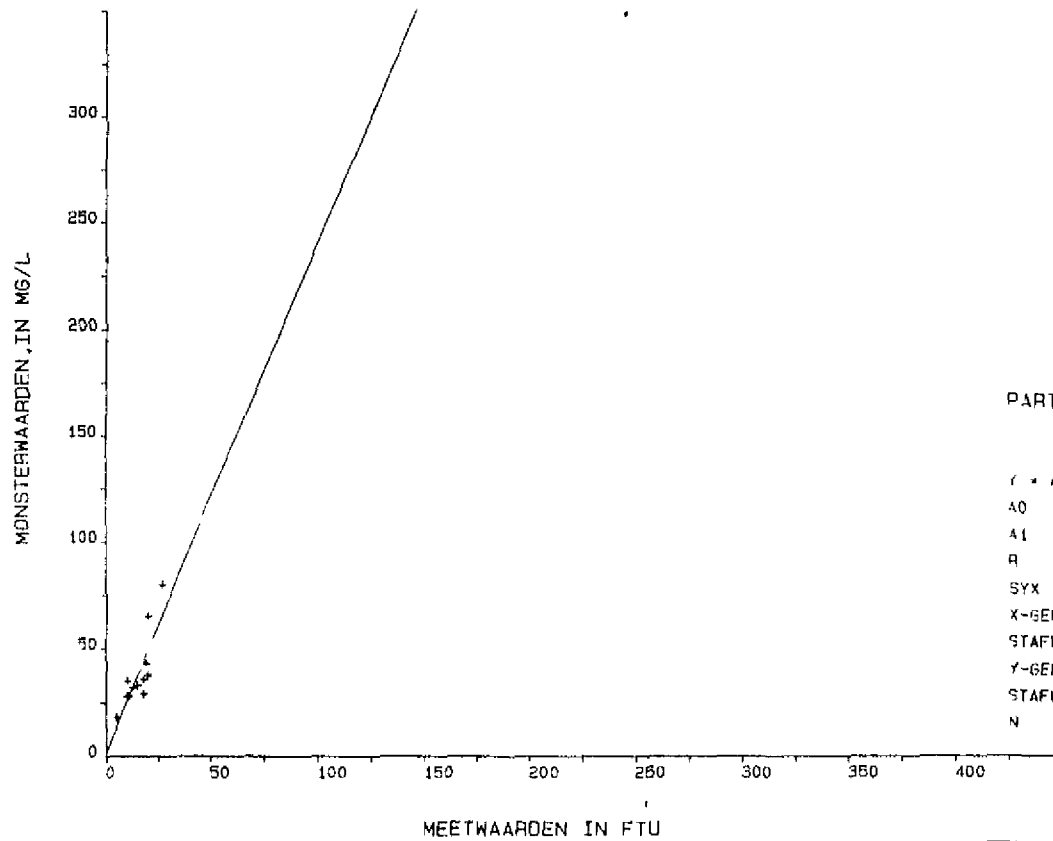
6-9-1990 meetpunt 11
PLUIMPOT



Oost-west project Raai 5A
PARTECH-meting

RIJKSWATERSTAAT
DIRECTIE ZEELAND
MEETDIENST

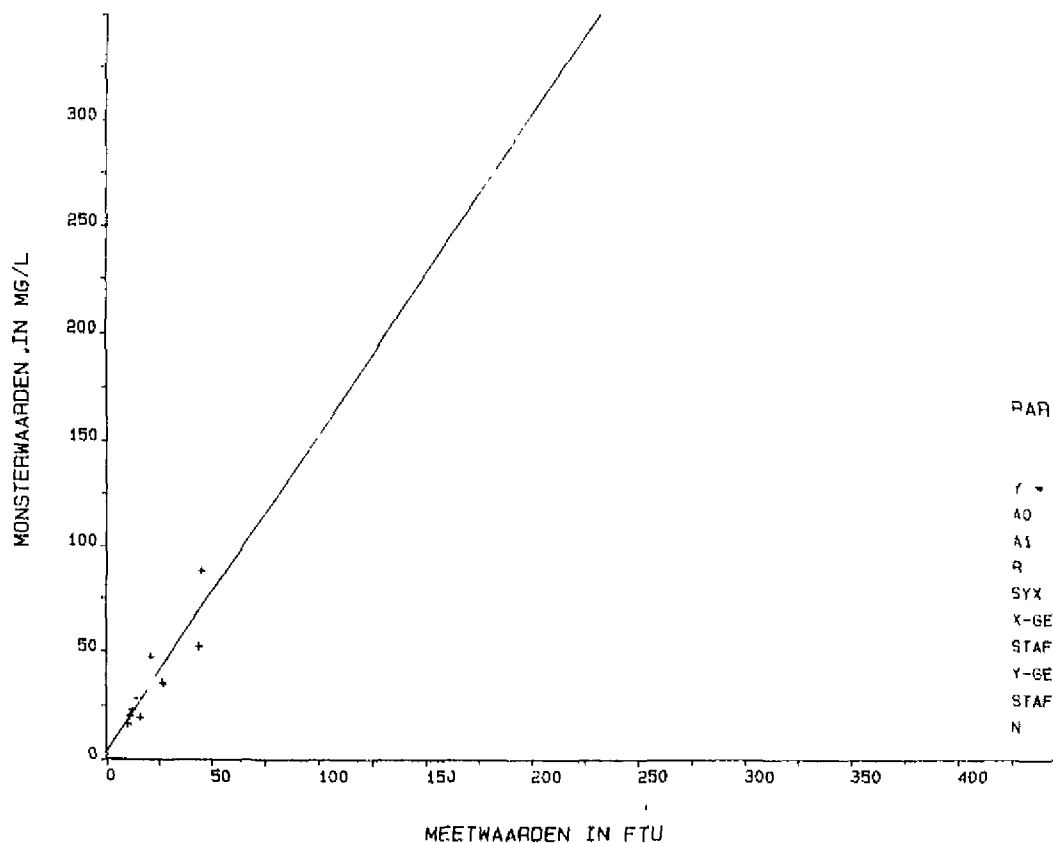
6-9-1990 meetpunt 2
LODYCKE



Oost-west project Raai 5A
PARTECH-meting

RIJKSWATERSTAAT
DIRECTIE ZEELAND
MEETDIENST

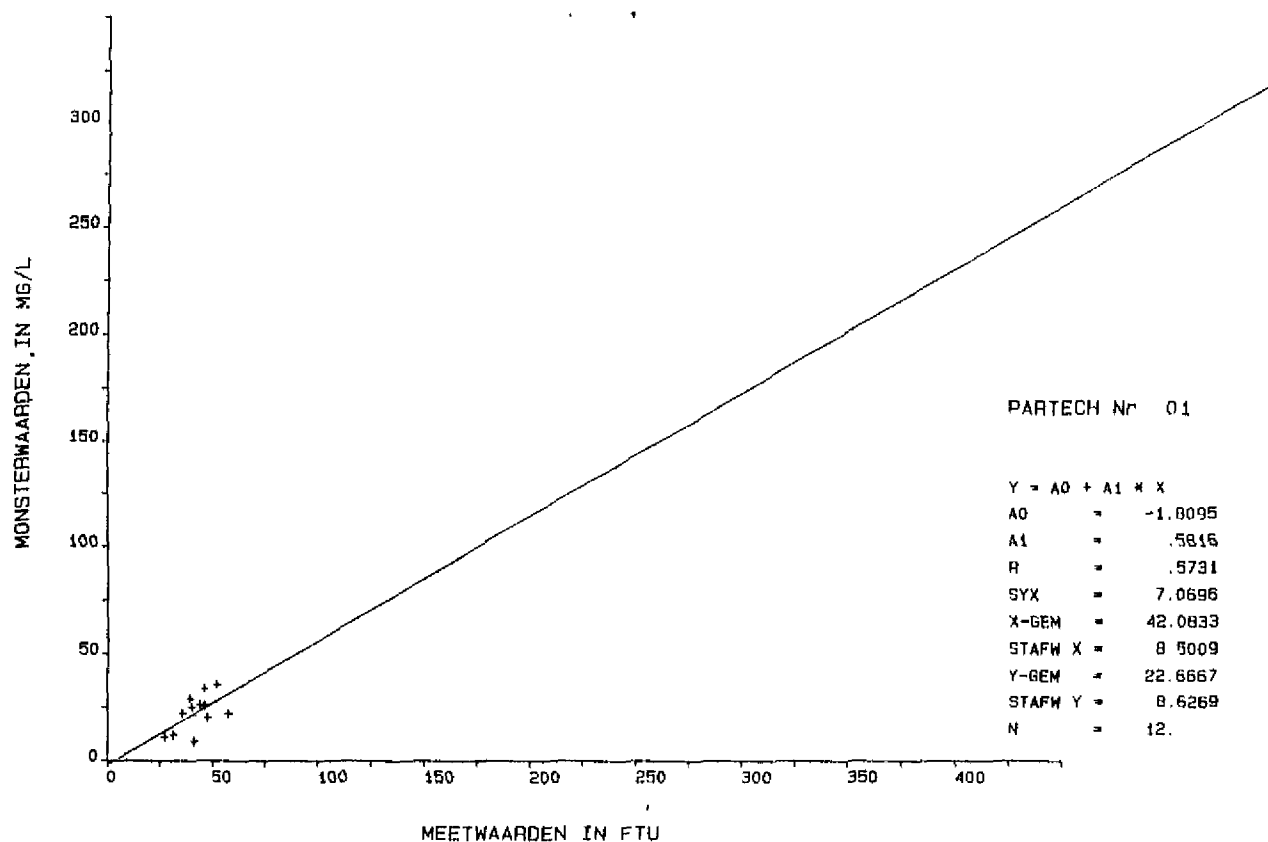
6-9-1990 meetpunt 3
WIJTVLIET



Oost-west project Raai 5A
PARTECH-meting

RIJKSWATERSTAAT
DIRECTIE ZEELAND
MEETDIENST

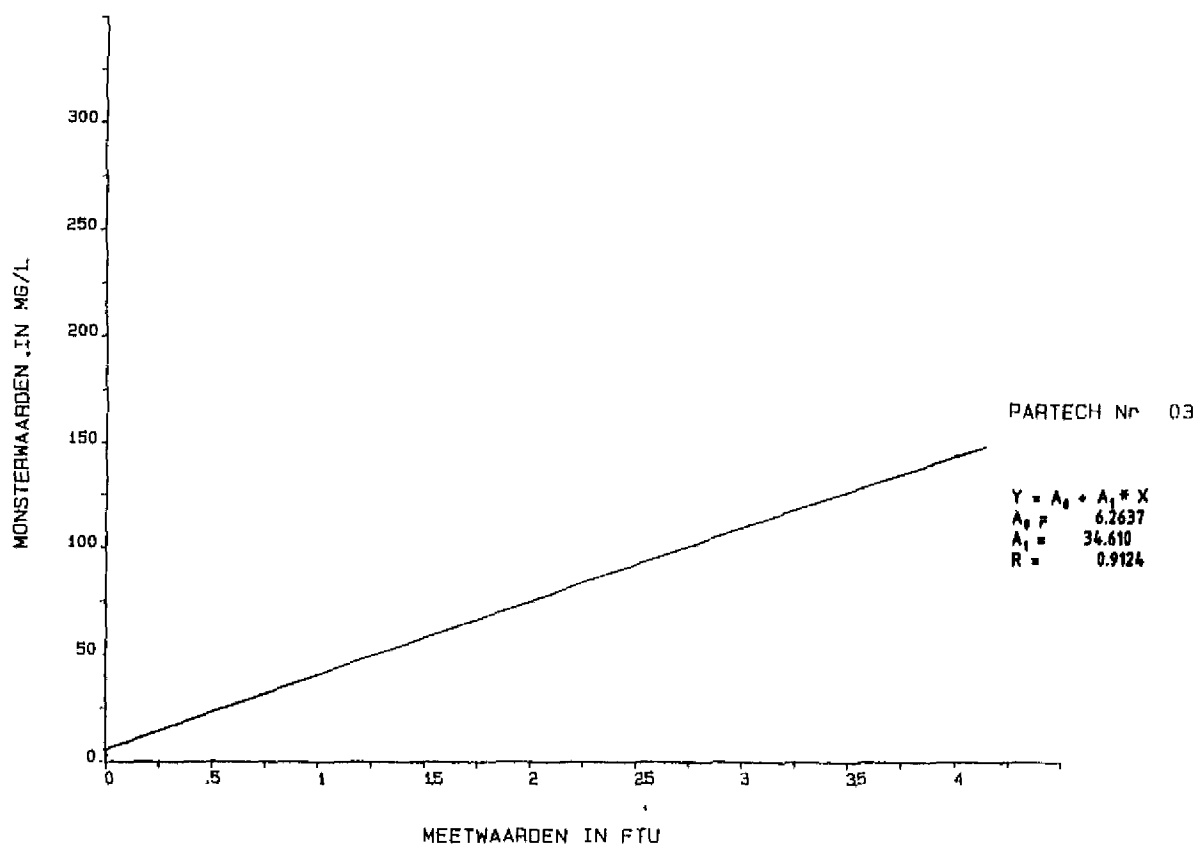
6-9-1990 meetpunt 5
MOLENVLIET



Oost-west project Raai 5A
PARTECH-meting

RIJKSWATERSTAAT
DIRECTIE ZEELAND
MEETDIENST

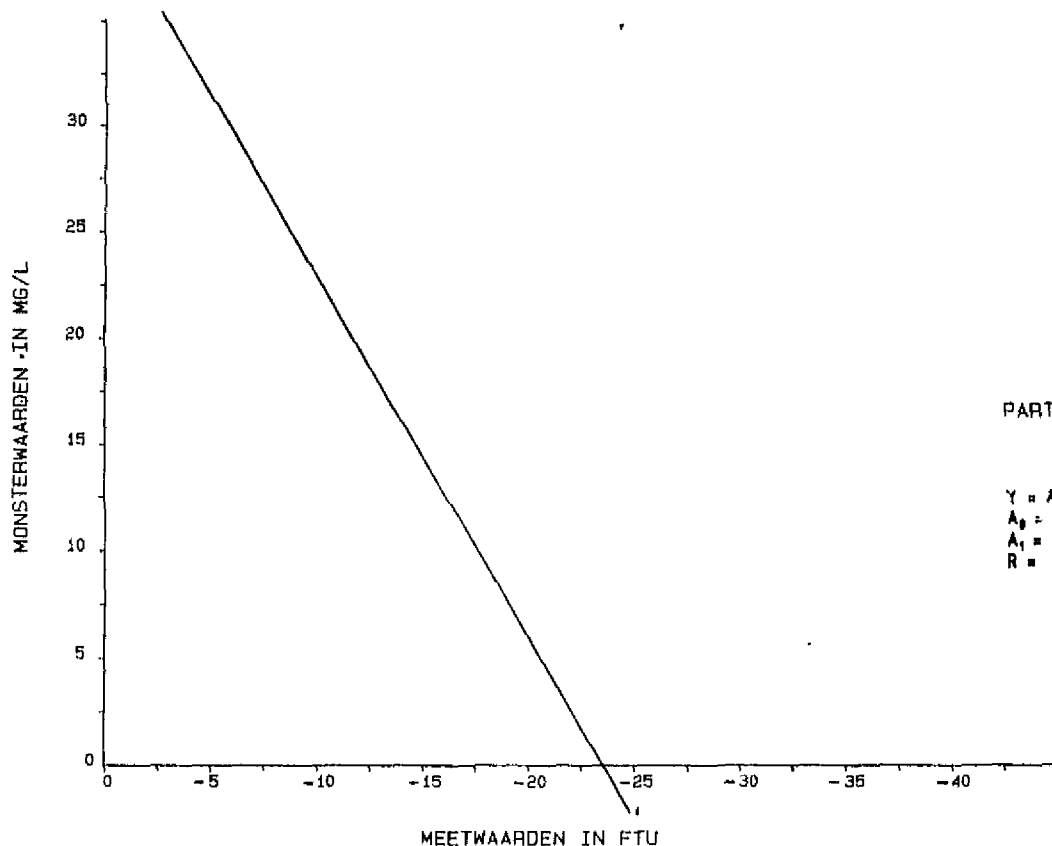
6-9-1990 meetpunt 9
SWALINGE



Oost-west project Raai 5A
PARTECH-meting

RIJKSWATERSTAAT
DIRECTIE ZEELAND
MEETDIENST

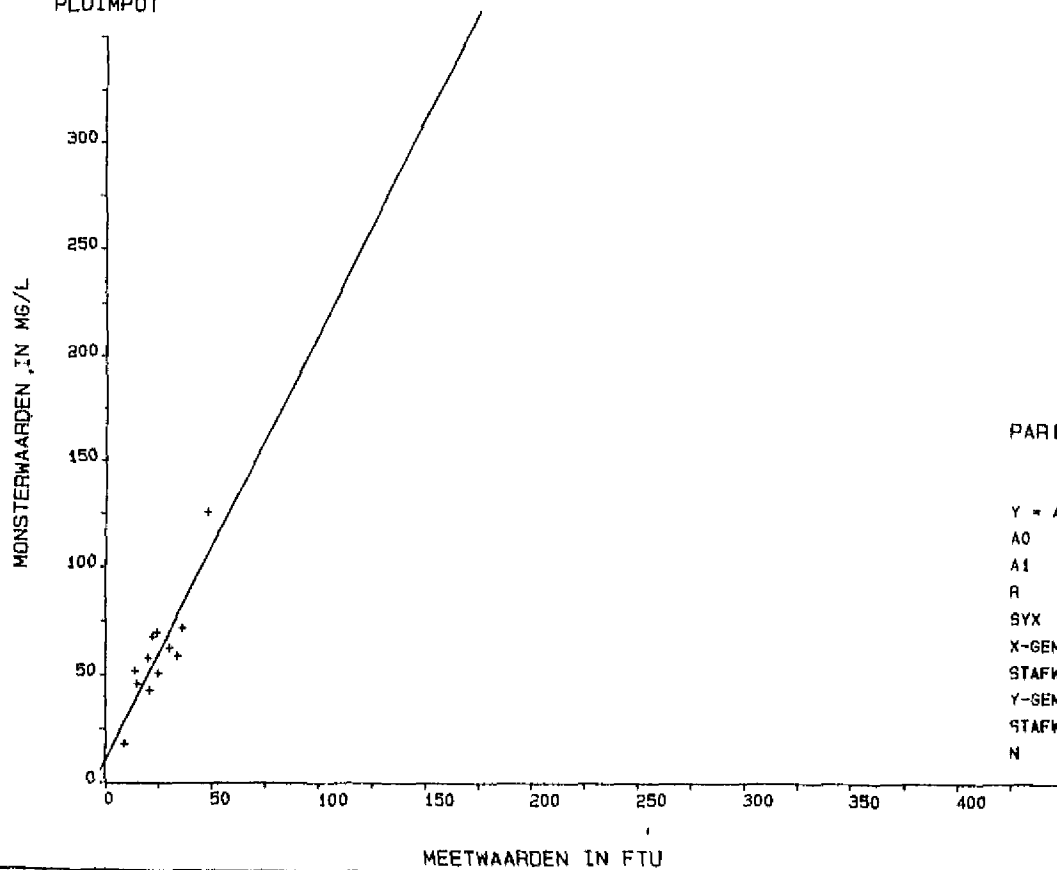
6-9-1990 meetpunt 10
STEENVLIET



Oost-west project Raai 5A
PARTECH-meting

RIJKSWATERSTAAT
DIRECTIE ZEELAND
MEETDIENST

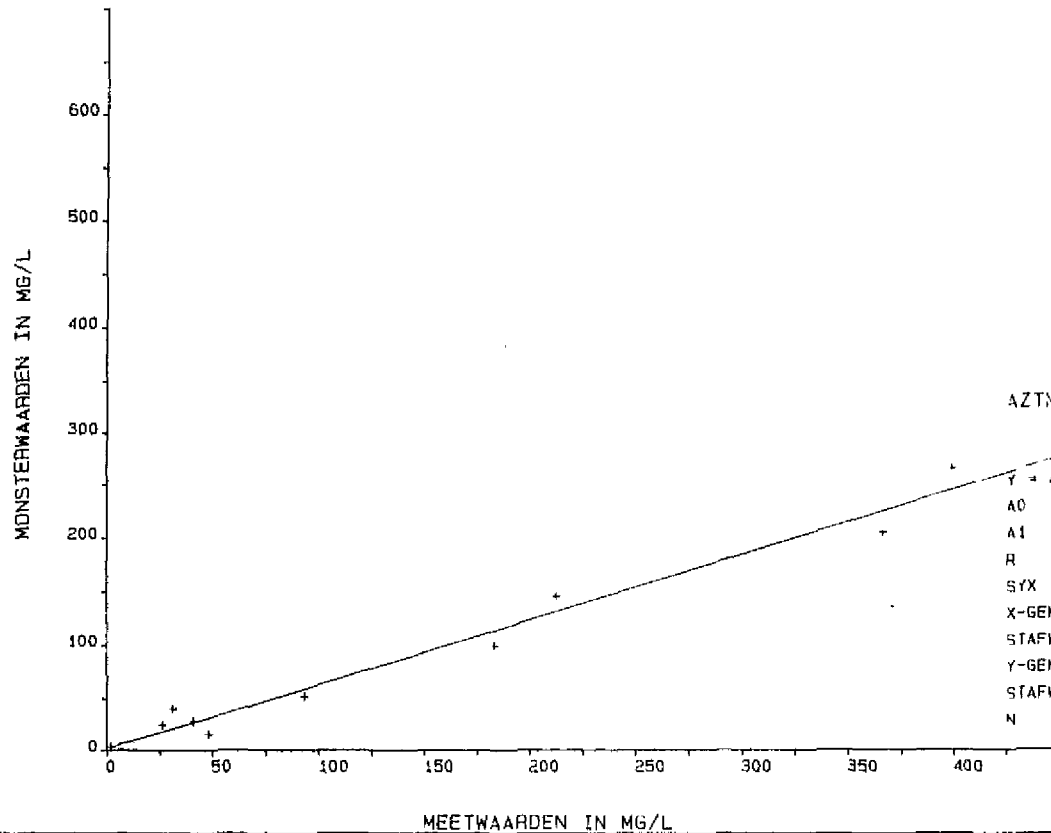
6-9-1990 meetpunt 11
PLUIMPOT



AZTM-meting oost-west project

RIJKSWATERSTAAT
DIRECTIE ZEELAND
MEETDIENST

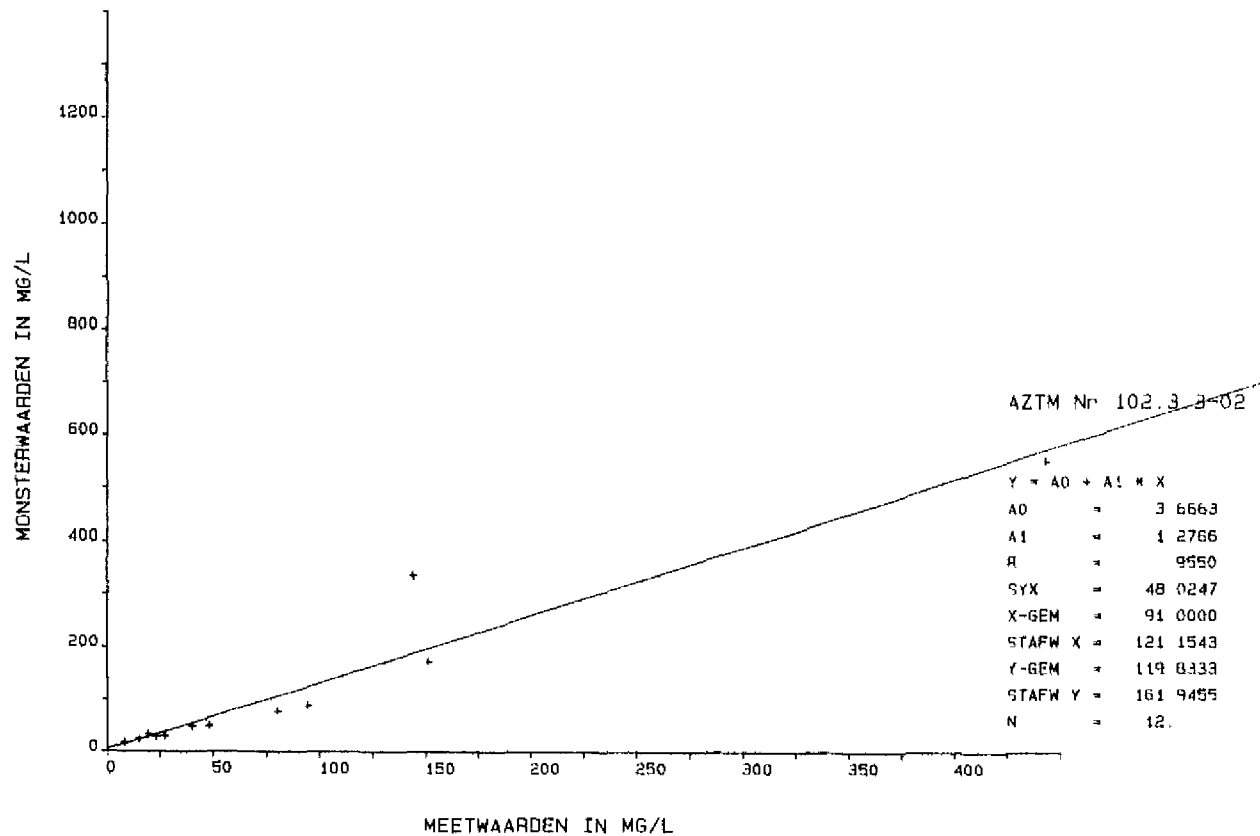
10-9-1990 OSM-meetpunt 10
PLUIMPOT



AZTM-meting oost-west project

RIJKSWATERSTAAT
DIRECTIE ZEELAND
MEETDIENST

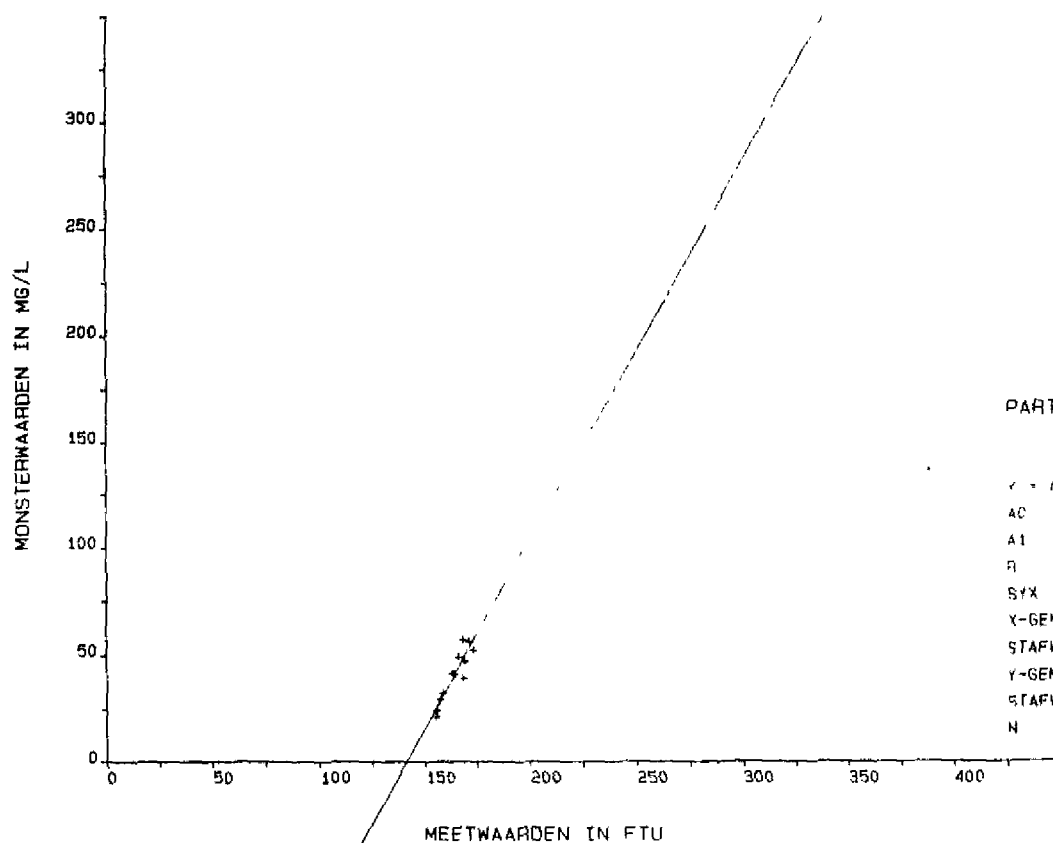
10-9-1990 OSM-meetpunt 11
STEENVLIET



PARTECH-meting oost-west project

RIJKSWATERSTAAT
DIRECTIE ZEELAND
MEETDIENST

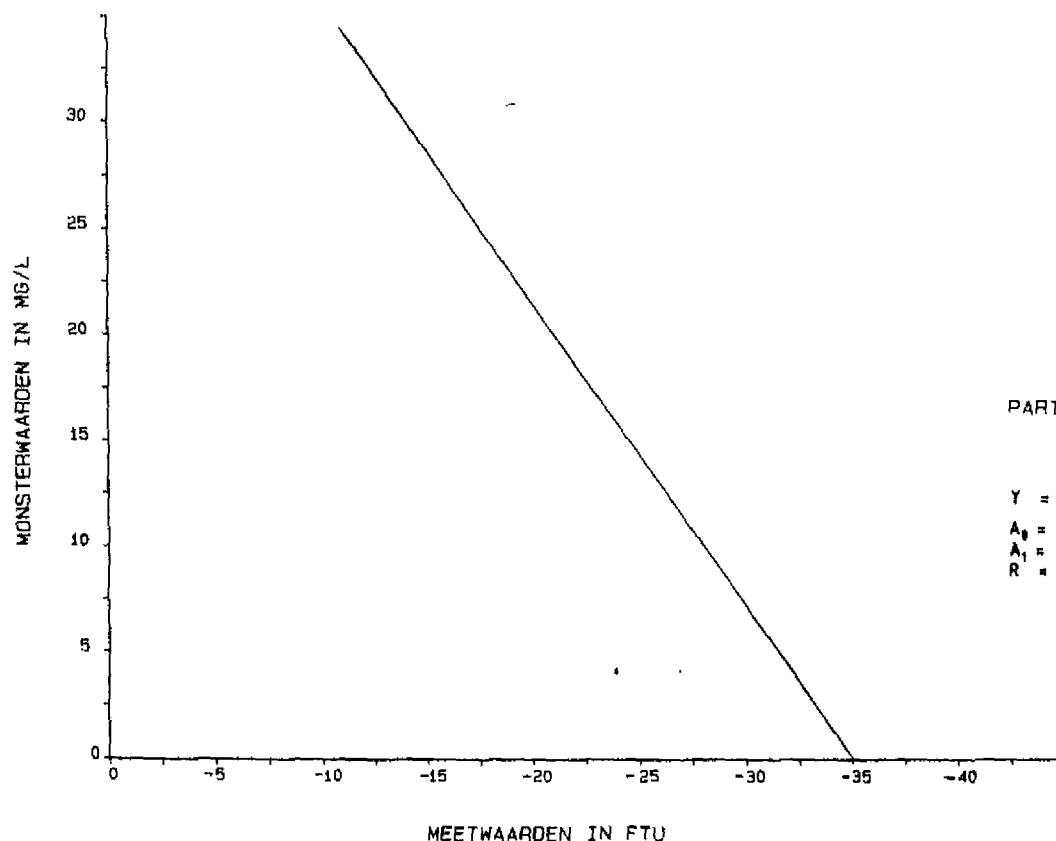
10-9-1990 OSM-meetpunt 10
PLUIMPOT



PARTECH-meting oost-west project

RIJKSWATERSTAAT
DIRECTIE ZEELAND
MEETDIENST

10-9-1990 OSM-meetpunt 11
STEENVLIET



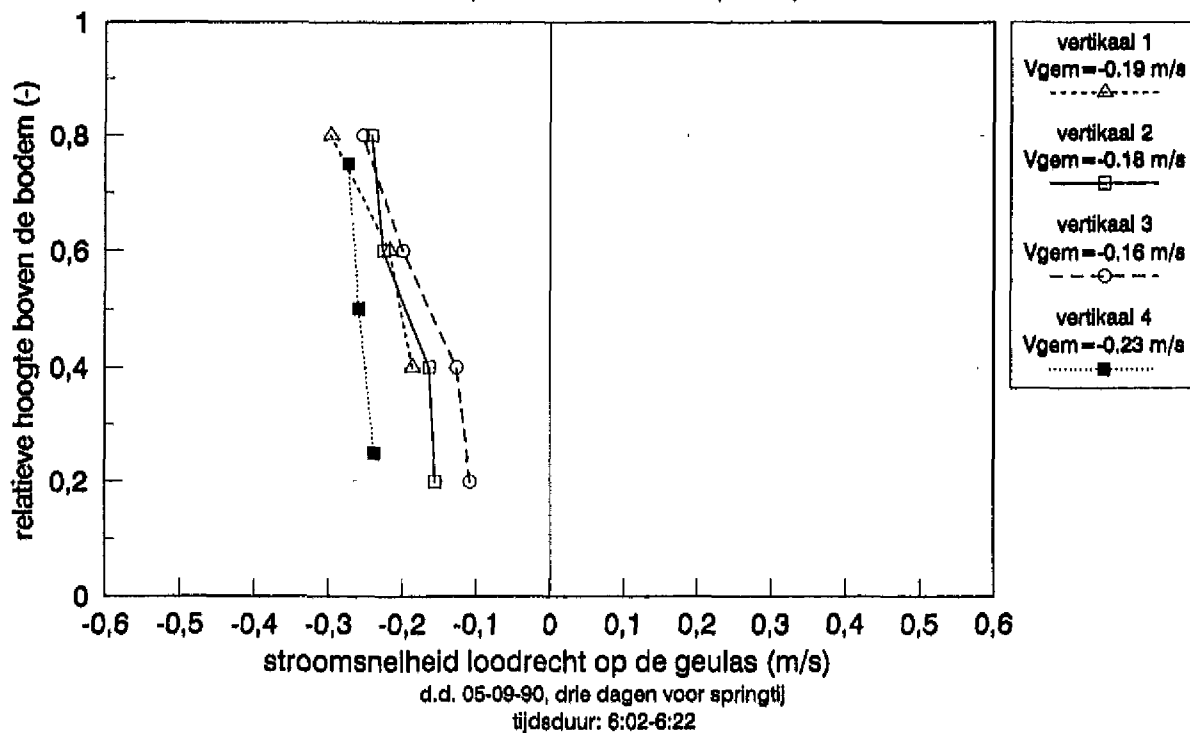
APPENDIX C

Genormaliseerde logaritmische snelheidsprofielen

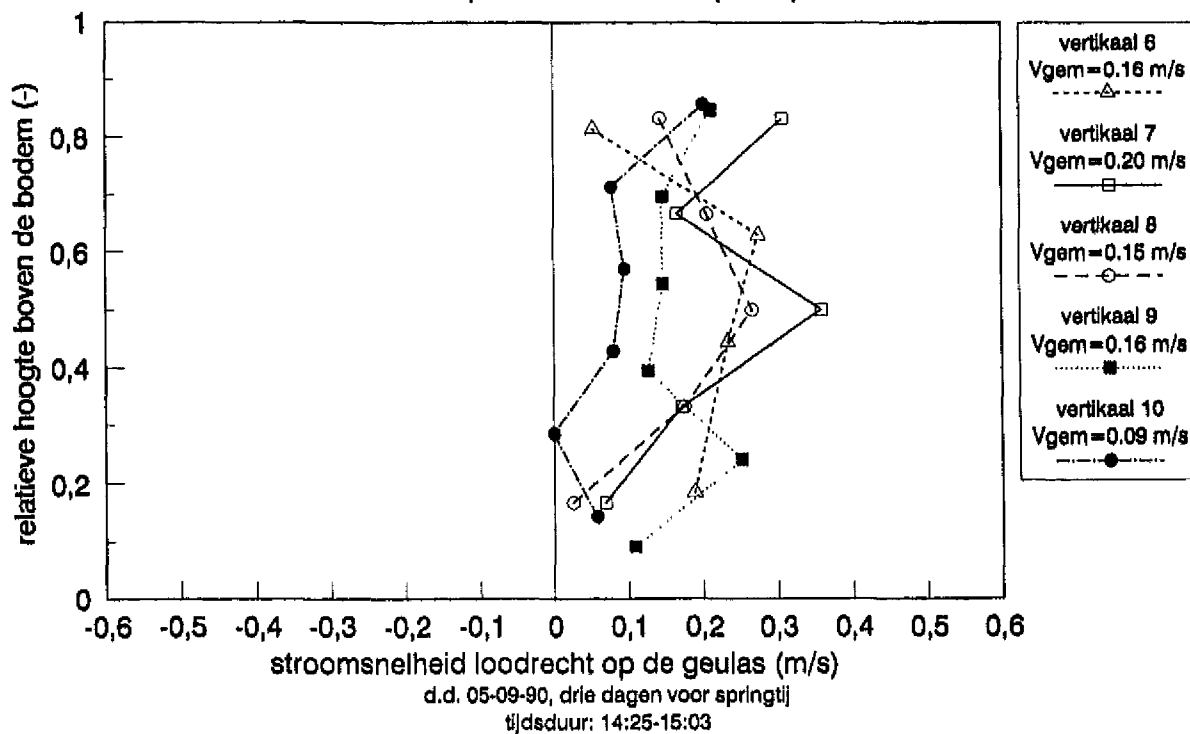
APPENDIX D

De afzonderlijke secundaire stroomcomponenten
in de meetpunten van raai 3

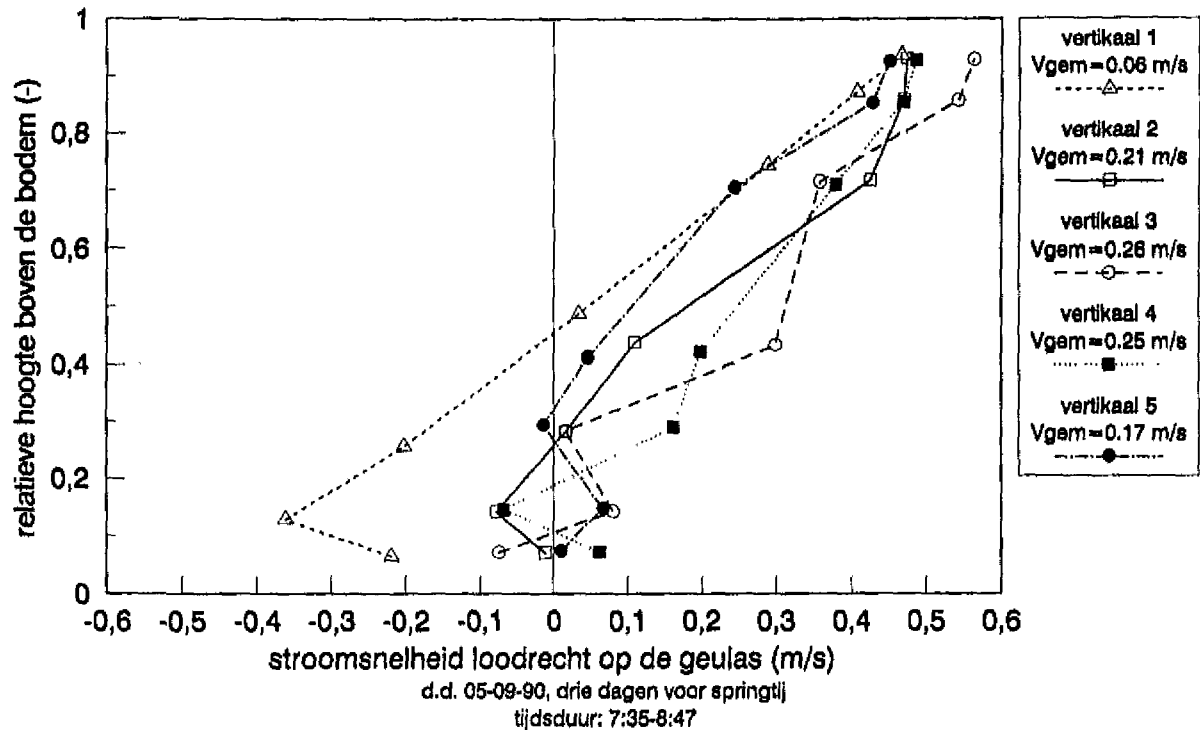
De verticale verdeling van de stroomsnelheid
(v) loodrecht op de geul-as tijdens ebstroom
meetpunt 1 debietraai 3 (elmar)



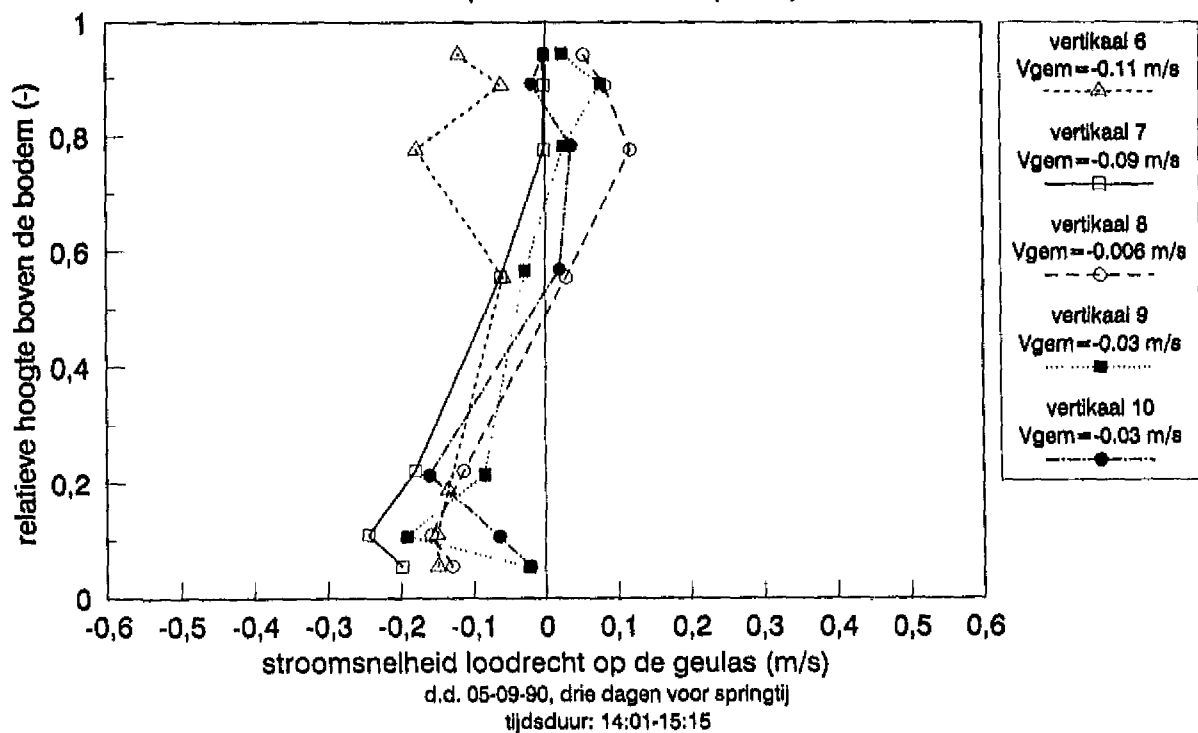
De verticale verdeling van de stroomsnelheid
(v) loodrecht op de geul-as tijdens vloedstroom
meetpunt 1 debietraai 3 (elmar)



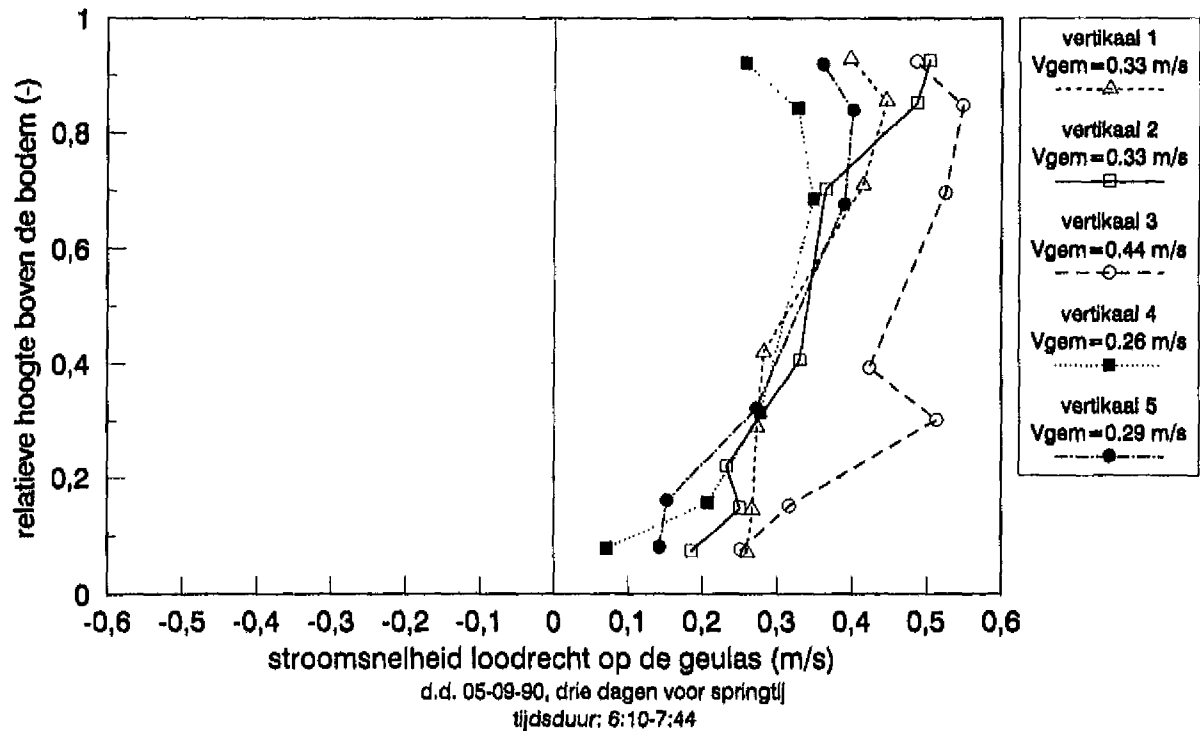
De verticale verdeling van de stroomsnelheid
(v) loodrecht op de geul-as tijdens ebstroom
meetpunt 2 debietraai 3 (elmar)



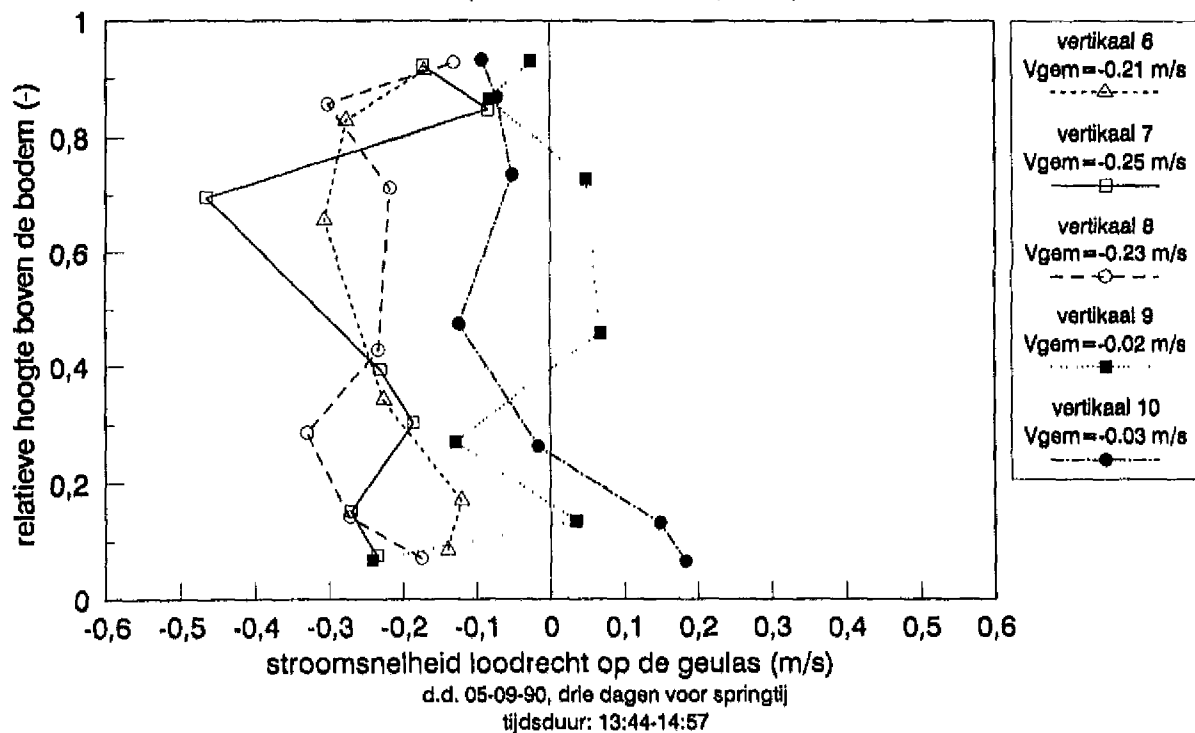
De verticale verdeling van de stroomsnelheid
(v) loodrecht op de geul-as tijdens vloedstroom
meetpunt 2 debietraai 3 (elmar)



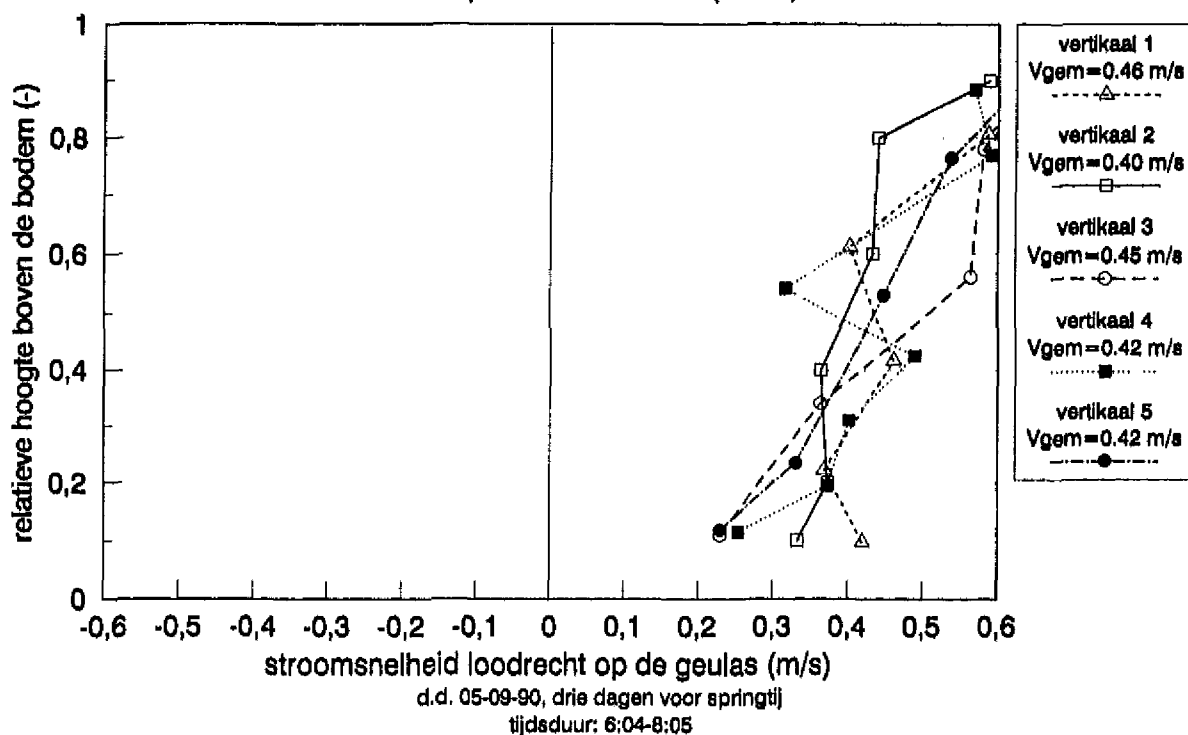
De verticale verdeling van de stroomsnelheid
(v) loodrecht op de geul-as tijdens ebstroom
meetpunt 3 debietraai 3 (elmar)



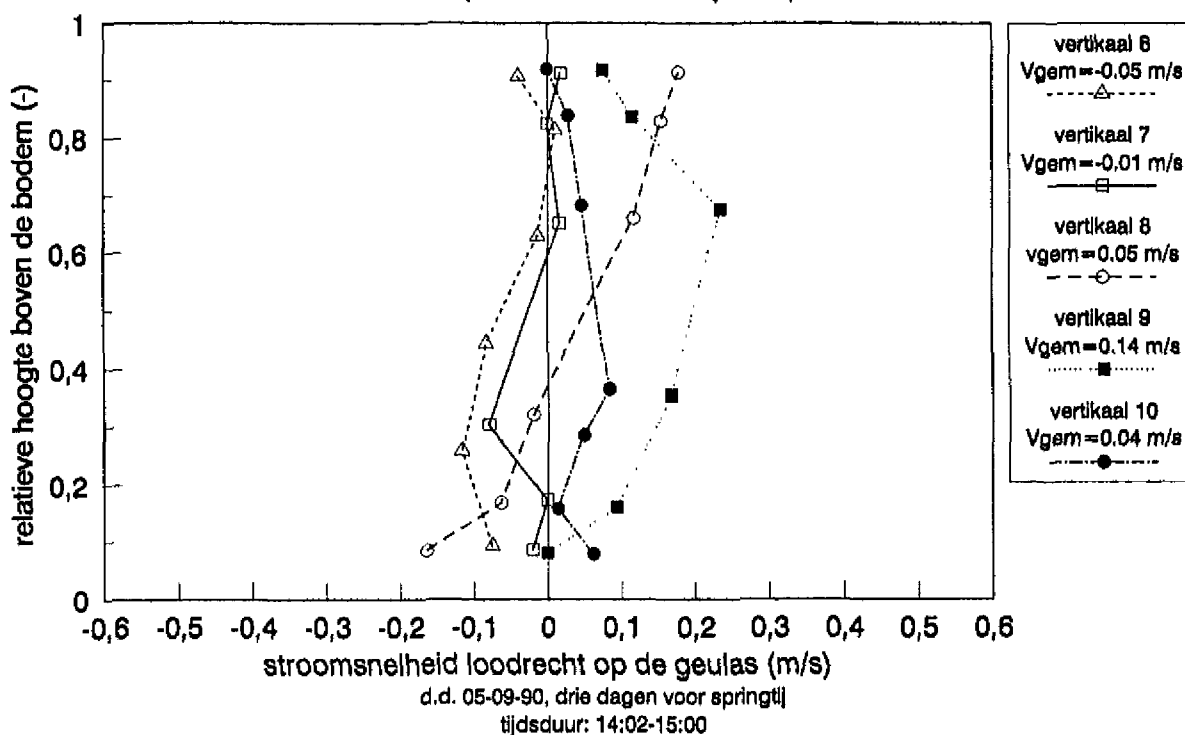
De verticale verdeling van de stroomsnelheid
(v) loodrecht op de geul-as tijdens vloedstroom
meetpunt 3 debietraai 3 (elmar)



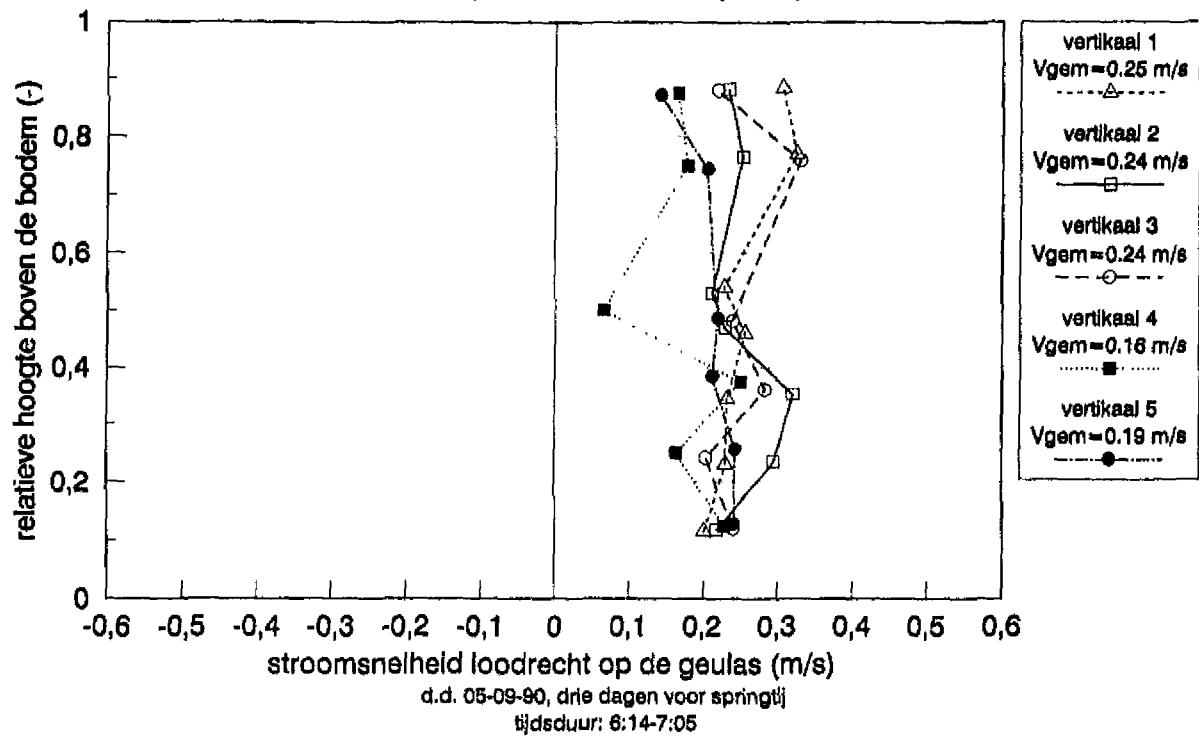
De verticale verdeling van de stroomsnelheid
(v) loodrecht op de geul-as tijdens ebstroom
meetpunt 4 debietraai 3 (elmar)



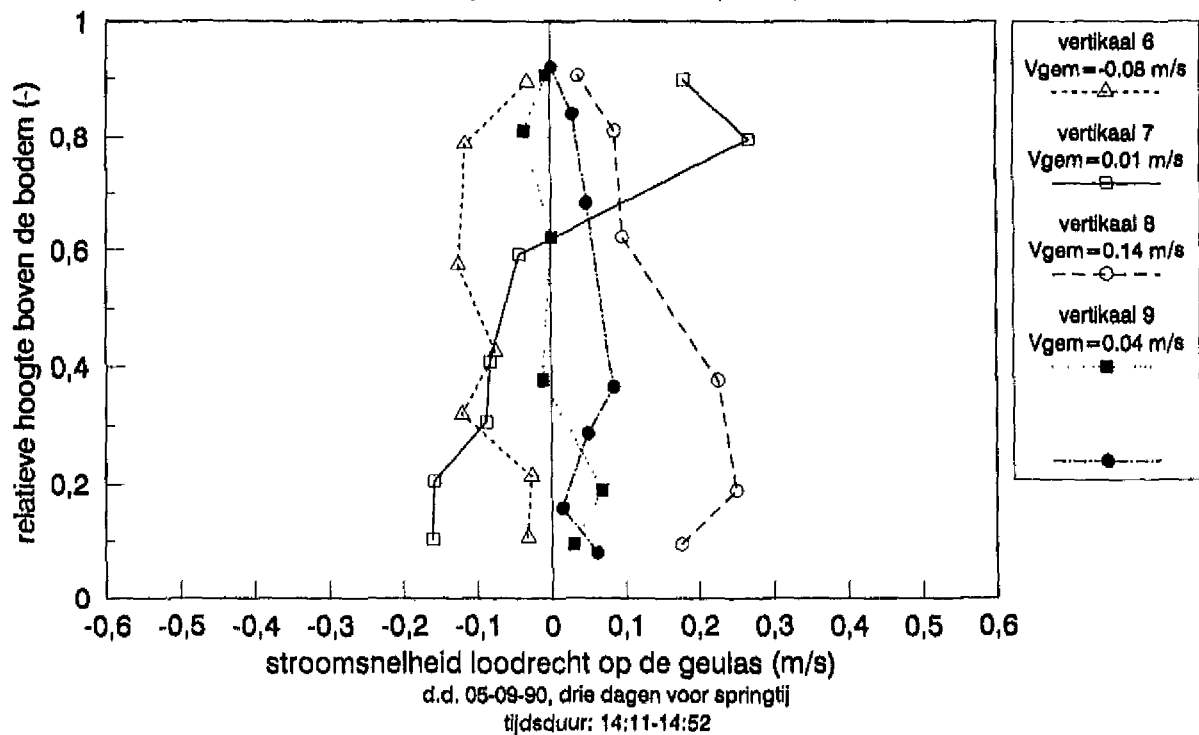
De verticale verdeling van de stroomsnelheid
(v) loodrecht op de geul-as tijdens vloedstroom
meetpunt 4 debietraai 3 (elmar)



De verticale verdeling van de stroomsnelheid
(v) loodrecht op de geul-as tijdens ebstroom
meetpunt 5 debietraai 3 (elmar)



De verticale verdeling van de stroomsnelheid
(v) loodrecht op de geul-as tijdens vloedstroom
meetpunt 5 debietraai 3 (elmar)



APPENDIX E

Resultaten van de saliniteitsmeting
in meetpunt 3 van raai 5

ZOUTMETING 6 - 9 - 1990
MEETRAAI 5A PUNT 3
WIJTVLIET

M.E.T.	MEETWAARDEN =====				WATERST. BAALHOEK cm. N.A.P.	ZOUTGEHALTE gem. uit cond./sal.
	diepte	cond.	sal.	temp.		
6.26	bod.+1m	36.60	27.10	19.60	91	15015 mg/l.
	1/2 D.	-	-	-	-	-
6.46	opp.-1m	35.00	25.90	19.40	54	14342
7.07	bod.+1m	34.30	25.10	19.60	16	13919
	1/2 D.	-	-	-	-	-
7.23	opp.-1m	33.30	24.40	19.40	-12	13527
7.41	bod.+1m	32.70	24.00	19.50	-45	13261
	1/2 D.	-	-	-	-	-
8.00	opp.-1m	32.40	23.70	19.50	-76	13108
8.24	bod.+1m	31.90	23.20	19.50	-113	12853
8.27	1/2 D.	31.70	23.20	19.50	-118	12809
8.32	opp.-1m	31.60	23.20	19.60	-126	12771
8.55	bod.+1m	31.10	22.60	19.50	-158	12504
9.00	1/2 D.	31.00	22.50	19.70	-164	12422
9.05	opp.-1m	30.80	22.40	19.70	-170	12350
9.24	bod.+1m	30.50	22.10	19.70	-194	12198
9.28	1/2 D.	30.40	22.10	19.60	-199	12191
9.34	opp.-1m	30.30	21.90	19.70	-205	12240
9.52	bod.+1m	31.00	22.40	19.50	-223	12424
9.56	1/2 D.	30.10	21.70	19.80	-225	11976
10.01	opp.-1m	29.80	21.60	19.80	-229	11887
10.25	bod.+1m	30.90	22.60	19.60	-232	12444
10.29	1/2 D.	29.50	21.30	19.70	-228	11750
10.36	opp.-1m	29.40	21.30	19.70	-223	11728
	bod.+1m	-	-	-	-	-
12.49	1/2 D.	32.00	23.40	19.50	-34	12933
13.10	opp.-1m	32.20	23.50	19.30	-9	13038
13.28	bod.+1m	32.80	24.30	19.40	13	13094
13.32	1/2 D.	32.90	24.30	19.40	20	13408
13.39	opp.-1m	32.90	22.70	19.30	29	12967
14.03	bod.+1m	33.40	24.50	19.40	65	13578
14.07	1/2 D.	33.60	24.80	19.50	72	13693
14.13	opp.-1m	33.10	24.20	19.50	85	13408
14.23	bod.+1m	34.00	25.00	19.30	107	13874
	1/2 D.	-	-	-	-	-
14.35	opp.-1m	33.70	24.80	19.40	136	13732
15.10	bod.+1m	36.10	26.90	19.50	253	14862
	1/2 D.	-	-	-	-	-
15.32	opp.-1m	36.10	26.70	19.20	297	14859
16.04	bod.+1m	37.30	27.80	19.50	319	15103
16.09	1/2 D.	37.00	27.30	19.50	320	15183
16.16	opp.-1m	36.90	27.40	19.40	319	15207

ZOUTMETING 6 - 9 - 1990

MEETRAAI 5A PUNT 3

WIJTVLIET

M.E.T.	MEETWAARDEN =====				WATERST. BAALHOEK cm. N.A.P.	ZOUTGEHALTE gem. uit cond./sal.
	diepte	cond.	sal.	temp.		
16.33	bod.+1m	37.20	27.70	19.50	312	15344 mg/l.
16.38	1/2 D.	37.00	27.50	19.60	308	15221
16.41	opp.-1m	36.90	26.90	19.60	306	15199
16.59	bod.+1m	36.90	27.50	19.50	285	15218
17.03	1/2 D.	36.40	27.00	19.40	280	14978
17.08	opp.-1m	36.40	27.00	19.20	273	15014
17.35	bod.+1m	36.70	27.30	19.30	231	15151
17.46	1/2 D.	35.70	26.50	19.40	213	14674
17.50	opp.-1m	35.40	26.30	19.40	207	14548
18.41	bod.+1m	36.10	26.50	19.20	119	14802
18.46	1/2 D.	35.40	26.30	19.30	110	14566
18.51	opp.-1m	34.90	25.60	19.30	101	14251

$$\rho = 1000 + 1.455Cl - 0.0065(T_p - 4 + 0.4Cl)^2$$

$$Cl = \frac{S - 0.03}{1.805}$$

met:

Cl = chloorgehalte (‰)

T_p = tempepratuur (° C)

ρ = dichtheid van het water (kg/m³)

S = saliniteit (‰)

APPENDIX F

Sedimenttransportformule van Van Rijn

De transportformule van Van Rijn

De formule voor het berekenen van het bodemtransport q_b (in kg/ms) is als volgt gedefinieerd,

$$q_b = 0,053 \rho_s [(s-1)g]^{0.5} d_{50}^{1.5} D_*^{-0.3} T^{2.1}$$

met:

$$D_* = d_{50} \left[\frac{(\rho_s - \rho)g}{\nu^2} \right]^{\frac{1}{3}} \quad = \text{deeltjes parameter} \quad (-)$$

$$T = \frac{(\tau'_b - \tau_{b,cr})}{\tau_{b,cr}} \quad = \text{bodemschuifspanning parameter} \quad (-)$$

$$\tau'_b = \rho g \left(\frac{\bar{u}}{C'} \right)^2 \quad = \text{effectieve bodemschuifspanning} \quad (\text{N/m}^2)$$

$$\tau_{b,cr} = \theta_{cr} (\rho_s - \rho) g d_{50} \quad = \text{kritische bodemschuifspanning} \quad (\text{N/m}^2)$$

$$C' = 181 \log \left(\frac{12h}{3d_{90}} \right) \quad = \text{korrel gerelateerde Chézy coëfficiënt} \quad (\text{m}^{0.5}/\text{s})$$

$$\theta_{cr} = 0,24 D_*^{-1} \quad \text{als } 1 < D_* \leq 4 \quad = \text{kritieke Shields parameter} \quad (-)$$

$$\theta_{cr} = 0,14 D_*^{-0.64} \quad \text{als } 4 < D_* \leq 10 \quad = \text{kritieke Shields parameter} \quad (-)$$

$$\nu \quad = \text{kinematische viscositeitscoëfficiënt} \quad (\text{m}^2/\text{s})$$

De formule voor het suspensief transport q_s (in kg/ms) is als volgt gedefinieerd,

$$q_s = F \cdot \bar{u} \cdot h \cdot c_a \cdot \rho_s$$

$$F = \frac{\left(\frac{a}{h} \right)^Z - \left(\frac{a}{h} \right)^{1.2}}{\left(1 - \left(\frac{a}{h} \right) \right)^Z (1.2 - Z)}$$

met:

$\bar{u}$	= diepte gemiddelde stroomsnelheid	(m/s)
h	= waterdiepte	(m)
c_a	= referentieconcentratie	(-)
ρ_s	= sedimentdichtheid	(kg/m ³)
F	= vormfactor	(-)
a	= referentie niveau	(-)
Z	= suspensiegetal	(-)

De referentieconcentratie wordt als volgt berekend,

$$c_a = 0,015 \frac{d_{50}}{a} \frac{T^{1.5}}{D_*^{0.3}}$$

Het suspensiegetal is als volgt gedefinieerd,

$$Z = \frac{w_s}{\beta \kappa u_*}$$

met:

$$w_s = \frac{10v}{d_s} \cdot \left[\left(1 + \frac{0.01(s-1)gd_s^3}{v^2} \right)^{0.5} - 1 \right] = \text{valsnelheid van de sedimentdeeltjes} \quad (\text{m/s})$$

$$d_s = (1 + 0.011(\sigma_s - 1)(T - 25)) d_{50} = \text{representatieve korreldiameter} \quad (\text{m})$$

$$\sigma_s = \frac{1}{2} \left(\frac{d_{84}}{d_{50}} + \frac{d_{50}}{d_{16}} \right) = \text{gradatie coëfficiënt bodemmateriaal} \quad (-)$$

$$u_{*,c} = \frac{g^{0.5}}{181 \log \left(\frac{12h}{k_s} \right)} = \text{bodemschuifspanningssnelheid} \quad (\text{m/s})$$

$$\beta = 1 + 2 \left(\frac{w_s}{u_{*,c}} \right)^2 = \text{mengcoëfficiënt} \quad (-)$$

$$\kappa = \text{von Kármán constante} = 0.4$$