



Stabiliteitsparameter opgesteld voor geulen in de Westerschelde 1994



Dwarsdoorsnede van raai 6

Dit onderzoek is uitgevoerd in opdracht van
Rijkswaterstaat, Directie Zeeland.

G.R. Termaat
Vakgroep Fysische Geografie
Universiteit Utrecht

Begeleiding:
Dr. P. Hoekstra
Drs. A.W. Kleef
Drs. M.C.J.L. Jeuken

DT 136005

INHOUDSOPGAVE

Samenvatting

1. Inleiding	5
2. Literatuur onderzoek	6
2.1. Inleiding	6
2.2. Relatie hydraulische-morfologische parameter	6
2.3. Stabiliteitsanalyse	8
2.4. Stroomvoerend vermogen	9
3. Werkwijze	12
3.1. Inleiding	12
3.2. Gegevens	12
4. Getijvolume	14
4.1. Inleiding	14
4.2. Mogelijke correctie methoden voor de getijvolumina	14
4.3. Nauwkeurigheid van het getijvolume	18
4.4. Conclusie	19
5. Dwars Profielen	20
5.1. Dominantie in de geulen	20
6. Evenwichtsanalyse	22
6.1. Inleiding	22
6.2. Regressie-analyse: afzonderlijke geulen	22
6.3. Regressie-analyse: gehele doorsnede	23
6.4. Evenwichtsparemeter (E)	24
7. Analyse van de raaien en geulen	26
7.1. Mogelijke oorzaken afwijkingen	26
7.2. De afzonderlijke raaien en geulen	27

Conclusie

Literatuurlijst

Lijst van figuren

Lijst van tabellen

Lijst van bijlagen

Lijst van symbolen

Lijst van figuren;

Figuur 1: Verschil tussen getijprisma en getijvolume in een lang getijdebekken waarin het getij zich als een golf voortplant.

Figuur 2: Een fictief voorbeeld van een getijkromme tijdens een meetdag.

Lijst van tabellen;

Tabel 1: Overzicht van de veranderingen van streampower onder invloed van de diepte en de breedte.

Tabel 2: Overzicht van correlatie coëfficiënten van Gerritsen en de Jong en die van dit onderzoek.

Lijst van bijlagen;

Bijlage 1: Overzicht van de ligging van de debietraaien in de Westerschelde.

Bijlage 2: Een voorbeeld van de spreiding in de data.

Bijlage 3: De 18,6 jarige cyclus voor de verschillende meetstations.

Bijlage 4: Procentuele verandering van de correcties t.o.v. de correctie springtij- gemiddeld getij.

Bijlage 5: Het verloop van de mate van dominantie van de verschillende raaien in de tijd.

Bijlage 6a en b: Overzicht van de relaties tussen streampower en getijvolume voor de vloedgeul.

Bijlage 7a en b: Overzicht van de relaties tussen streampower en getijvolume voor de ebgeul.

Bijlage 8a en b: Overzicht van de relaties tussen streampower en getijvolume voor de gehele doorsnede.

Bijlage 9: Bepaling evenwichtsparameter (E) voor de geulen en de gehele doorsnede t.p.v. de debietraaien.

Bijlage 10: Een grafisch overzicht van de evenwichtsparameter (E) voor de verschillende debietraaien.

Bijlage 11a en b: Overzicht van de streampower en het doorstroomoppervlak in de tijd voor de verschillende geulen.

Bijlage 12a en b: Overzicht van de streampower en het doorstroomoppervlak in de tijd voor de gehele doorsnede.

lijst van symbolen

a	= constante (-)
Ac	= doorstroomoppervlak beneden NAP (m ²)
b	= constante (-)
B	= breedte (m)
c	= constante (-)
C	= Chézy-coefficient (m ^{1/2} /s)
DV	= dominant volume (m ³)
h	= waterdiepte (m)
i	= verhang (-)
Q	= debiet (m ³ /s)
R	= lokale hydraulische straal (aanname = h)
u	= snelheid (m/s)
W	= stroomvoerend vermogen (streampower) (m ^{5/3})

SAMENVATTING

In dit rapport wordt verslag gedaan van een onderzoek naar een evenwichtsparameter welke is opgesteld voor geulen in de Westerschelde. Het onderzoek is uitgevoerd door G.R. Termaat in het kader van een studie aan de Universiteit Utrecht in opdracht van Rijkswaterstaat.

Het centrale doel van het onderzoek is het verkrijgen van inzicht in de mate waarin de vorm van een dwarsprofiel en de waterbeweging in die geul elkaar beïnvloeden en kan deze kennis worden aangewend om (bestaande) evenwichtsrelaties te verbeteren c.q. te optimaliseren.

Een neven doel van het onderzoek is inzicht te verkrijgen in de mate van de betrouwbaarheid van de gegevens van de debiettraaien en de mogelijke implicaties van de onnauwkeurigheden voor de bruikbaarheid/toepasbaarheid van de geschetste evenwichtrelatie.

Na een verkennend literatuuronderzoek bleek dat bestaande relaties voor de stabiliteit van geulen voornamelijk gebaseerd zijn op getijvolume/getijprisma in relatie met het doorstroomoppervlak in welke de vorm van het geulprofiel niet tot in uitdrukking komt. Gekozen is om het doorstroomoppervlak te vervangen door het stroomvoerend vermogen waardoor de vorm van het profiel wel meegenomen wordt.

Het blijkt dat er een goede relatie bestaat tussen het stroomvoerend vermogen en de waterbeweging welke wordt uitgedrukt in het getijvolume. Aan de hand van deze relatie is een evenwichtsparameter opgesteld. Deze evenwichts-parameter is een belangrijk hulpmiddel bij het karakteriseren van het geulprofiel t.o.v. het evenwichts-geuloppervlak.

Nevenconclusie is dat de gegevens betreffende de debietmetingen een onnauwkeurigheid van 5 à 10 % in zich hebben. Dit heeft tot gevolg dat het getijvolume alleen gecorrigeerd is voor springtij-gemiddeld getij en voor de afvoer van de Schelde.

Het blijkt dat de evenwichtsparameter -waar de vorm van het profiel van de geul in meegenomen wordt- een bruikbare maat is voor het karakteriseren van stabiliteit van de geulen in de Westerschelde.

1. INLEIDING

In het kader van de Doctoraal studie Fysische Geografie aan de Universiteit Utrecht is een stage-onderzoek uitgevoerd in opdracht van Rijkswaterstaat, Directie Zeeland in de periode van 1 mei tot 1 augustus 1994. Het onderzoek richt zich op het opstellen van een stabiliteitsparameter voor geulen in de Westerschelde.

Rijkswaterstaat is verantwoordelijk voor het beheer van de Westerschelde. Eén van de uitgangspunten is om de ontwikkeling van de Westerschelde op een zo natuurlijk mogelijke wijze te laten verlopen. Echter de Westerschelde is een belangrijke vaarroute richting Antwerpen die open gehouden dient te worden. Door baggeren en storten wordt het natuurlijk evenwicht mogelijk verstoord. Om deze antropogene ingrepen te sturen zodat de natuurlijke ontwikkeling zo min mogelijk verstoord wordt, is het van belang om tot een beter begrip te komen van het systeem. In dit onderzoek zal via empirische relaties een benadering van processen worden weergegeven tussen hydraulische en morfologische factoren.

Het centrale doel van het onderzoek is het verkrijgen van inzicht in de mate waarin de vorm van een dwarsprofiel en de waterbeweging in die geul elkaar beïnvloeden en kan deze kennis worden aangewend om (bestaande) evenwichtsrelaties te verbeteren c.q. te optimaliseren. Een nevendoeel van het onderzoek is inzicht te verkrijgen in de mate van de betrouwbaarheid van de gegevens van de debietraaien en de mogelijke implicaties van de onnauwkeurigheden voor de bruikbaarheid/toepasbaarheid van de geschetste evenwichtsrelatie.

In het hoofdstuk 2 wordt een overzicht gegeven van de tot nu toe in de literatuur onderzochte relaties en evenwichtsparameters en zal het begrip stroomvoerend vermogen (streampower, W), behandeld worden.

In hoofdstuk 3 wordt ingegaan op de gegevens die gebruikt zijn tijdens het onderzoek. In hoofdstuk 4 en 5 worden respectievelijk het getijvolume en het dwars profiel besproken. Hoofdstuk 6 wordt de evenwichtsparameter opgesteld en geanalyseerd. Hoofdstuk 7 zal aan de hand van de evenwichtsparameter een beschrijving geven van de afzonderlijke geulen en raaien. In het laatste hoofdstuk worden de belangrijkste conclusies van het onderzoek samengevat.

Van de zijde van Rijkswaterstaat werd het onderzoek begeleid door;

-Drs. A.W. van Kleef

-Drs. M.C.J.L. Jeuken

Begeleiding Universiteit Utrecht;

-Dr. P. Hoekstra

2. LITERATUURONDERZOEK

2.1. Inleiding

In dit hoofdstuk zal een kort overzicht gegeven worden van wat er in de literatuur bekend is betreffende de relatie tussen hydraulische en morfologische parameters voor geulen in estuaria. De meeste bekende relaties die gevonden zijn voor dit type milieu zullen besproken worden. Verder zal het begrip stroomvoerend vermogen behandeld worden.

Vanaf 1931 zijn verschillende onderzoekers bezig geweest om de stabiliteit van geulen in estuaria in semi-empirische relaties vast te leggen. Als er gekeken wordt naar de stabiliteit van geulen moet men bedenken dat er twee soorten stabiliteiten zijn:

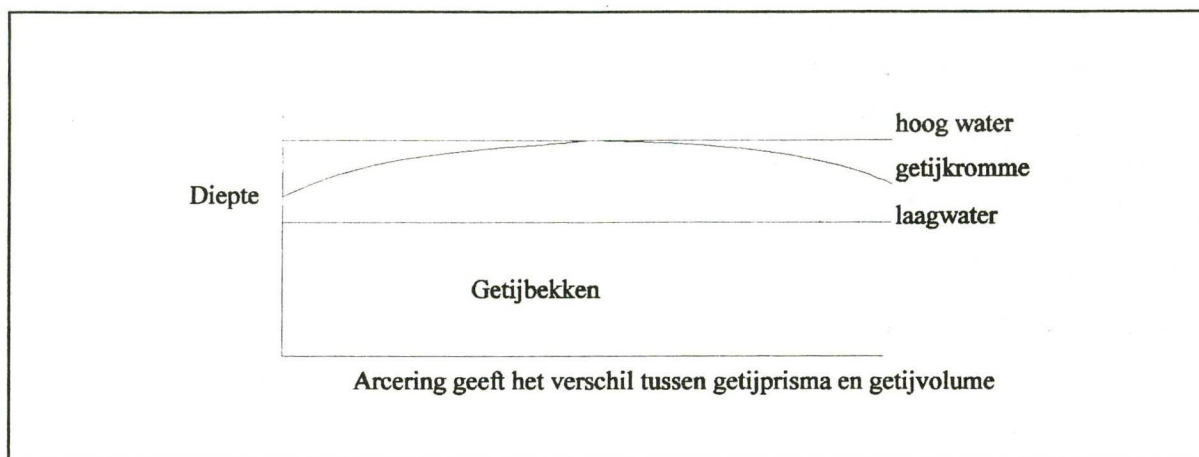
- stabiliteit van de doorsnede (vorm en grootte);
- stabiliteit van de geulligging (t.o.v. de oevers).

In stabiliteitsbeschouwingen wordt de aandacht meestal op het eerste aspect gevestigd. In bepaalde gevallen zal de stabiliteit van de doorsnede in zeker verband staan met de geulligging; in de meeste gevallen werd dit aspect niet in detail in de studies opgenomen. Ook in dit onderzoek wordt de aandacht vooral gevestigd op de stabiliteit van de doorsnede.

2.2. Relatie hydraulische-morfologische parameter

De meest gebruikte empirische relatie tussen morfologische en hydraulische parameters is de relatie tussen het doorstroomoppervlak (A_c) t.o.v. NAP en de hoeveelheid water dat door het oppervlak stroomt, welke wordt uitgedrukt in het getijprisma(P) of het getijvolume(TV).

Zowel het getijvolume als het getijprisma is een maat voor de hoeveelheid water dat gedurende een getijfase in of uit het getijdebekken stroomt. Het verschil tussen beide is dat het getij-prisma geen rekening houdt met de golfbeweging van het getij in een lange getijdebekken, zoals de Westerschelde en dat een getijvolume dat wel doet (figuur 1). In een kort getijdegebied zullen het getijprisma en het getijvolume gelijk zijn.



Figuur 1.: Verschil tussen getijprisma en getijvolume in een lang getijdebekken waarin het getij zich als een golf voortplant.

O'Brien (1931) was de eerste die een empirische relatie opstelde voor getijprisma en het doorstroomoppervlak van zeegaten. De gevonden relatie was een zuiver empirische relatie met een hoge correlatie die geen rekening hield met voor de verschillende zeegaten afwijkende omstandigheden zoals korrelgrootte, rivier afvoer, Chézy-coëfficiënt en antropogene invloeden. In 1969 vond O'Brien met nieuwe gegevens dezelfde relatie. Uit zijn resultaten bleek dat de invloed van de korrelgrootte gering was (v. Kleef, 1991). De door O'Brien gebruikte vergelijking voor de relatie tussen getijprisma(P) en doorstroomoppervlak(Ac) voor zeegaten ziet er als volgt uit:

$$Ac = a * P^{b+c} \quad (1)$$

waarbij a , b en c constanten zijn.

In Zeeland is onderzoek gedaan naar de relatie doorstroomoppervlak-getijprisma door Haring, Gerritsen en de Jong, en Gerritsen (v. Kleef, 1991).

Een andere relatie is die tussen het doorstroomoppervlak(Ac) beneden NAP en het dominante getijvolume(DV). Het dominante getijvolume is het vloedvolume in vloedgeulen en het ebvolume in ebgeulen. De algemene vergelijking tussen het doorstroomoppervlak en het dominante getijvolume ziet er als volgt uit:

$$DV = a * Ac + b \quad (2)$$

waarbij a en b constanten zijn, welke niet gelijk zijn aan die in vgl. 1.

Haring (1967) was de eerste die de relatie doorstroomoppervlak-getijvolume voor de Nederlandse zeegaten onderzocht.

Gerritsen en de Jong (1983) hebben in tegenstelling tot voorgaande onderzoeken naar het gehele estuarium gekeken. Zij onderzochten niet alleen het zeegat maar ook de afzonderlijke geulen in het estuarium. Dit onderzoek is uitgevoerd voor de Westerschelde waarbij zij relaties opstelden tussen het doorstroomoppervlak en stroomparameters voor zowel afzonderlijke geulen als voor de gehele doorsnede.

Uit de resultaten van de verschillende onderzoekers: Haring, Gerritsen en v.d. Berg (Svašek, 1994) blijkt dat er een sterk verband bestaat tussen beide parameters. Dit geeft aan dat de relatie tussen doorstroomoppervlak en getijvolume een goede parameter kan zijn om getijdegeulen te karakteriseren ondanks de onduidelijkheid over de wijze waarop doorstroomoppervlak en dominant getijvolume zijn gedefinieerd. Van Kleef (1991) geeft een uitgebreider overzicht van de momenteel bekende relevante empirische relaties.

2.3. Stabiliteitsanalyse

In 1994 is door het ingenieursbureau Svašek een onderzoek uitgevoerd naar de stabiliteit van geulen in de Westerschelde. Zij stelde een evenwichtsparameter op welke was gebaseerd op een gemeten doorstroomoppervlak gedeeld door een berekend doorstroomoppervlak beiden beneden NAP. Het berekende doorstroomoppervlak kwam uit de relatie doorstroomoppervlak-getijvolume. Het getijvolume dat gebruikt is, werd gelijktijdig met het doorstroomoppervlak gemeten.

De evenwichtsparameter P dus is een maat voor de afwijking van een stabiele situatie. Als P gelijk is aan 1, is de betreffende geul volledig stabiel; het doorstroomoppervlak en het getijvolume zijn volledig in overeenstemming met de evenwichtsrelatie. Een $P > 1$ geeft aan dat het profiel te ruim is en $P < 1$ duidt erop dat het profiel te krap is. De evenwichtsrelatie is bepaald aan de hand van afzonderlijk eb- en vloedgeulen. Uit dit onderzoek bleek dat de relatie tussen het doorstroomoppervlak en het dominante getijvolume (toevalligerwijze?) identiek was voor eb- en vloedgeulen.

In het rapport van Svašek werd een aanbeveling gedaan om een gelijksoortig onderzoek te doen, alleen dan met de relatie tussen het stroomvoerend vermogen en het getijvolume. Het stroomvoerend vermogen is een morfologische parameter waarin de vorm van het profiel tot in uitdrukking komt, dit in tegenstelling tot het doorstroomoppervlak. Terwijl de waarde van het doorstroomoppervlak gelijk kan blijven, kan het stroomvoerend vermogen veranderen omdat het geulprofiel van vorm verandert.

2.4. Stroomvoerend vermogen

Het stroomvoerend vermogen komt op de volgende wijze tot stand: door aan te nemen dat voor de stroming rond zijn maximum snelheid een min of meer permanente stromingssituatie geldt, is het mogelijk om "Chézy" toe te passen (Svašek, 1994). Er geldt dan:

$$u(y) = C(y) \sqrt{R(y) * i} \quad (3)$$

$$Q = \int_0^B u(y) * h(y) dy \quad (4)$$

waarin:

- y: afstand dwars op de geulrichting [m]
- u: vertikaalgemiddelde snelheid [m/s]
- C: Chezy-coefficient
= $h^{1/6} / n$ [m^{1/2} / s]
- n: Manning coefficient [s/m^{1/3}]
- W: Stroomvoerend vermogen (streampower) [m^{8/3}]
- h: lokale waterdiepte t.o.v. NAP [m]
- R: lokale hydraulische straal [m]
aanname: als $B \gg h$ mag gelden dat $R \approx h$
- i: verhang [-]
- B: geulbreedte van waterscheiding tot waterscheiding [m]
- Q: geuldebiet [m³ / s]

Verdere uitwerking geeft:

$$u(y) = \frac{h^{1/6}}{n} * h^{1/2} * i^{1/2} \quad (5)$$

$$u(y) = \text{constante} * h(y)^{(2/3)} \quad (6)$$

constante: $\sqrt{i} * 1/n$

$$Q = \text{constante} * \int_0^B h(y)^{(5/3)} dy \quad (7)$$

Het stroomvoerend vermogen W van de geul wordt gedefinieerd volgens:

$$W = \frac{Q}{\text{constante}} = \int_0^B h(y)^{(5/3)} dy \quad (8)$$

(Svašek, 1994).

De streampower is dus een maat voor het vermogen van de geul om een bepaald volume water per tijdseenheid door te laten. In de volgende alinea is te zien hoe de streampower reageert op verschillende profielvormen en grootte.

Door het nemen van een hypothetisch profiel is het mogelijk om te zien hoe de verschillende parameters effect hebben op de streampower. Het hypothetisch profiel dat gekozen is bestaat uit een rechthoekig profiel. Door verschillende waarden te kiezen voor de gemiddelde diepte, breedte en het doorstroomprofiel is te zien hoe de streampower verandert (tabel 1).

diepte	breedte	W	b/d	Ac
2	10	31.7	5	20
10	2	92.8	0.2	20
4	5	50.4	1.25	20
5	4	58.5	0.8	20
20	1	147.4	0.05	20
1	20	20	20	20
10	2000	92831.8	200	20000
5	4000	58480.4	800	20000
20	1000	147361.3	50	20000

Tabel 1: Overzicht van de veranderingen van streampower onder invloed van de diepte en de breedte.

Uit tabel 1 blijkt dat als het oppervlak gelijk blijft, de streampower groter wordt als het profiel dieper en nauwer wordt. Dit kan worden verklaart door dat in de streampower de bodemruwheid zit verwerkt. Dit heeft tot gevolg dat bij een breed en ondiep profiel de streampower veel lager is dan bij een relatief nauw en diep profiel.

3. WERKWIJZE

3.1. Inleiding

In het voorgaande hoofdstuk is een kort overzicht gegeven van hetgeen men tot op heden onderzocht heeft aan empirische relaties voor geulen. In het rapport van Svašek (1994) is men een stap verder gegaan dan de kwalitatieve verhalen en heeft men geprobeerd om kwantitatieve uitspraken te doen omtrent de stabiliteit van geulen. De methodiek van dit onderzoek zal gelijk zijn aan Svašek, -betreffende het onderzoek naar de geulen-, echter de relatie die gebruikt is voor het opstellen van de evenwichtsparemeter zal anders zijn omdat niet het doorstroomoppervlak (A_c) maar het stroomvoerend vermogen (W) wordt gebruikt. De evenwichtsparemeter is gebaseerd op twee soorten gegevens:

- Getijvolumina;
- Dwars Profielen.

In dit hoofdstuk wordt een overzicht gegeven hoe de gegevens tot stand zijn gekomen.

3.2. Gegevens

De getijvolumina die gebruikt zijn in dit onderzoek zijn gebaseerd op debietmetingen van de Westerschelde. Op initiatief van Dr. J. van Veen werden de eerste simultane debietmetingen in raaien dwars over het estuarium uitgevoerd in het begin van de jaren dertig (Haring, 1977). De debieten van de verschillende raaien zijn in de tijd verschillende keren gemeten. De raaien zijn echter niet allemaal even vaak gemeten. De plaatsen waar de debietraaien liggen in de Westerschelde zijn te zien in bijlage 1. De raaien 4, 8, 11 en 12 zijn niet meegenomen in het onderzoek omdat raai 4 in een kombergingsgebied ligt; raai 8 is tot nu toe 2 keer gemeten waardoor dus geen vergelijkings materiaal aanwezig is en raai 11 en 12 zijn raaien waarvan de getijvolumina berekend zijn in plaats van gemeten.

Tijdens een debietmeting worden op verschillende plaatsen in de raai verticale snelheidsprofielen gemeten. Deze snelheidsprofielen moeten elk representatief zijn voor een deel van het profiel. De meetdienst van Rijkswaterstaat zorgt ervoor dat de meetgegevens omgerekend worden naar getijvolumina. De getijvolumina zijn weergegeven in de nota: "Debietgegevens van de Westerschelde" (de Jong, 1989) GWAO-89.1004. Met de ongecorrigeerde gegevens uit deze nota is verder gewerkt.

De profielnummers van de raaien stonden in dezelfde nota als de getijvolumina. De nummers refereerden aan profielen die opgeslagen liggen bij de Meetdienst in Vlissingen. De vorm van de profielen zijn door lodingen bepaald in dezelfde periode als waarin de

debieten gemeten zijn. Voor het bepalen van het stroomvoerend vermogen uit de profielen werden eerst de profielen gedigitaliseerd. Dit is gebeurd met het programma "Easymap". Het programma "Getparam" berekende uit de gedigitaliseerde profielen verschillende parameters, waaronder het stroomvoerend vermogen.

Met de bovenstaande gegevens kon verder worden gewerkt. Tijdens het onderzoek is gebruik gemaakt van het spreadsheet programma "Excel 5.0".

4. GETIJVOLUME

4.1. Inleiding

Voor elke debietmeting zijn de getijvolumina van de verschillende geulen berekend.

Deze getijvolumina zijn door verschillende factoren beïnvloed. Een van de factoren is het getij. Zo is het getijvolume meestal gemeten tijdens springtij. Andere factoren zijn de afvoer van de Schelde waardoor het ebvolume iets groter is dan het vloedvolume en de 18,6 jarige cyclus welke veroorzaakt wordt door de onderlinge stand van de zon, de maan en de aarde. Om de gegevens van het getijvolume te corrigeren voor deze factoren zijn correctie-methoden onderzocht.

Aan dit onderzoek vooraf ging een verkennend onderzoek van A.W. van Kleef. Tijdens dit onderzoek is alleen gekeken naar raai 6. Uit dit onderzoek bleek dat alle correctie-methoden een verbetering opleverden voor het getijvolume als er gekeken werd naar de relatie met het doorstroomoppervlak. In de volgende paragrafen zullen deze correctie-methoden beschreven worden. Verder zal gekeken worden of deze correcties een significante verbetering opleveren voor het getijvolume.

4.2. Mogelijke correctie methoden

Correctie: springtij-gemiddeldgetij

De getijvolumina zijn volumina die gerelateerd zijn aan de getijslag. Men komt tot een getijslag van een meetdag door de absolute waarden voor de hoog- en laagwaterstanden bij elkaar op te tellen. Per debietmeting zijn dus de hoog- en laagwaterstanden gemeten. De metingen zijn voornamelijk tijdens springtij, de periode waarbij het getij verschil het grootst is, uitgevoerd. Dit resulteert in een duidelijk verschil tussen het gemeten en het gemiddeld getij (van het betreffende jaar). Een getijfactor geeft de verhouding weer tussen het gemeten en het gemiddeld getij.

$$\frac{\text{gemeten getijslag}}{\text{gemiddeld getijslag}} = \text{getijfactor} \quad (9)$$

Om de getijvolumina te herleiden naar gemiddelde getij omstandigheden is een correctie nodig. Er twee mogelijkheden nl:

- A. evenredige verandering getijvolume-getijfactor.
- B. relatie getijvolume-getijfactor;

A. Evenredige verandering getijvolume-getijfaktor

Voorgaande onderzoeken (Gerritsen et al, 1983; Svašek, 1994) hebben de correctie-methode waarbij het getijvolume evenredige verandert met de getijfaktor toegepast. Bij deze correctie gaat men er vanuit dat bij een toename van het getijslag, het getijvolume evenredig toeneemt. Met deze correctie wordt dus geen rekening gehouden met de vorm van de kombergingsgebieden achter iedere raai. Een kombergingsgebied is een gebied dat alleen overstroomt tijdens hoogwater. Een bron van mogelijke fouten in deze correctie is dat er gebruik gemaakt wordt van een moment opname van de getijslag. De getijslag wordt wel gecorrigeerd voor springtij maar andere invloeden zoals opstuwning door wind worden niet meegenomen. Verder wordt het getijvolume bepaald door het hoogteverschil van de vlakken waar kentering optreedt (v. Veen, 1950). In de Westerschelde is er een tijdsverschil van een 1/2 tot ruim 1 uur tussen het tijdstip van hoogwater respectievelijk laagwater en de daarop volgende kentering aanwezig, welk tijdsverschil enigszins kan variëren (Gerritsen, 1983).

B. relatie getijvolume-getijfaktor

De correctie-methode is gebaseerd op een lineair verband tussen het gemeten getijvolume en de getijfaktor. Voor een raai worden de eb- en vloedvolumina uitgezet tegen de getijfaktor. Het verband tussen beide is gebaseerd op het feit dat bij een grotere getijslag, de laagwaterstand lager is en dat de hoogwaterstand hoger is. Dit heeft tot gevolg dat bij springtij een groter gebied droog komt te liggen dan bij laagwater en dat grotere delen van de komberging onderwater komen te liggen bij hoogwater. Voornamelijk het hoogwater tijdens springtij heeft een grote invloed op het volume water dat door het doorstroomoppervlak stroomt. Dit wordt veroorzaakt door het feit dat ten gevolge van een komberging-gebied stroomopwaarts een geringe stijging van de waterspiegel, meer water door het doorstroomoppervlak moet stromen. Hieruit blijkt dat een groot kombergingsgebied bovenstrooms een veel grotere invloed heeft dan een klein kombergingsgebied.

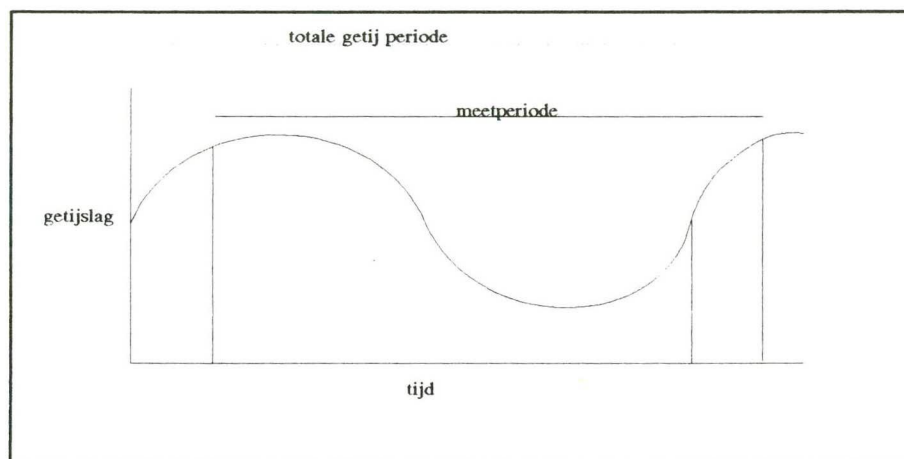
Elke raai heeft een kombergingsgebied stroomopwaarts. De vorm en omvang hiervan is echter voor elke raai verschillend. De relaties zijn dus apart per raai bepaald.

Tijdens het opstellen van de relaties kwam naar voren dat zowel in de getijfaktor als in de getijvolumina een grote spreiding zit. Een duidelijk voorbeeld geeft raai 5 (bijlage 2). Op dag 08-09-'64 is voor eb een getijfaktor (waarden: 1,21 en 1,04) en een getijvolume (waarde: $386 \cdot 10^6 \text{ m}^3$) bepaald. Verwacht zou worden dat een klein getijvolume veroorzaakt wordt door een kleine getijslag wat tot uitdrukking komt in een kleine getijfaktor. Echter tijdens de eb-fasen werden een kleinere en een grotere getijfaktor gevonden hoewel het getijvolume gelijk is. Hieruit blijkt hoe groot de spreiding is tussen 2 opeenvolgende getijfasen. Deze spreiding wordt zeer waarschijnlijk veroorzaakt door meet onnauwkeurigheden.

Het blijkt dus uit de figuur dat het nogal wat uitmaakt welke getijfaktor en getijfase van de

desbetreffende dag gekozen wordt. Het bepalen van een relatie is dus niet zinvol.

De getijfactor is het verhoudingsgetal van het opgetreden getijverschil t.o.v. het gemiddeld getijverschil. Het getij dat gebruikt wordt is gemeten bij het dichtstbijzijnde meetstation. Aangezien het beginpunt van de meetperiode niet altijd samen valt met het begin van een nieuwe getijgolf zal de getijfactor moeten worden samengesteld uit de verhouding van de twee verschillende fasen gedurende de meetperiode (figuur 2). Tijdens het opstellen van de relatie is de getijfactor gebruikt welke het grootste gedeelte van de meetdag bestrijkt.



Figuur 2.: Een fictief voorbeeld van een getijkromme tijdens een meetdag.

Gekozen is voor de correctie methode waarbij het getijvolume evenredig met de getijfactor verandert. Deze correctie methode is minder gevoelig voor onnauwkeurigheden, dan de meer theoretische onderbouwde correctie methode waarbij gebruik gemaakt wordt van een relatie tussen het getijvolume en de getijfactor. De argumenten die de gemaakte keuze nader ondersteunen zijn:

- er zijn te weinig data punten per raai om een duidelijke relatie op te stellen;
- de onnauwkeurigheid van de gegevens is te groot om een significante verbetering aan te tonen.
- in de loop van de tijd kunnen forse veranderingen in de omvang en ligging van de platen en geulen zijn opgetreden. Dit kan invloed hebben op de relatie die over die periode is opgesteld.

Correctie: afvoer Schelde

Uit de gegevens van de getijvolumina blijkt dat de ebvolumina niet overeenstemmen met de vloedvolumina in een bepaalde raai. Om deze reden is besloten om een correctie toe te passen voor de afvoer van de Schelde, die er voor zorgt dat het ebvolume groter is dan het vloedvolume. Het verschil tussen beide volumina is de afvoer van de rivier de Schelde. De Schelde heeft een gemiddelde afvoer van 4.5 miljoen m³/getij (Svašek, 1994). De correctie is als volgt toegepast;

$$\begin{aligned} \text{totale ebvolume} + \text{totale vloedvolume} &= \text{totale getijvolume} \\ \text{totale ebvolume} &= \text{totale vloedvolume} + \text{Scheldeafvoer} \end{aligned} \quad (10)$$

Bij deze correctie is verondersteld dat het totale getijvolume (som van eb en vloed) wel juist is. De correcties zijn toegepast voor de totale eb- en vloedvolumina per raai. Om terug te rekenen naar de verschillende eb- en vloedvolumina van de geulen is de originele verhouding tussen de gemeten totale volume en de afzonderlijke geulvolumina gebruikt.

In bijlage 4 is te zien hoe groot de verandering in percentage is van de waarde voor en na de betreffende correctie t.o.v. de gecorrigeerde waarde volgens de correctie "evenredige verandering getijvolume-getijfaktor". Dit geldt alleen voor de afzonderlijke volumina.

Correctie: 18,6 jarige cyclus

De getijbeweging ontstaat als gevolg van de aantrekkingskrachten van maan en zon op de watermassa's op aarde en is dus afhankelijk van de banen van de maan en de zon en de variaties van die banen. De door maan en zon opgewekte getijbeweging noemt men het astronomisch getij. De getijbeweging veroorzaakt door de zon en de maan is op te splitsen in harmonische componenten. Eén van de componenten resulteert in de 18,6 jarige cyclus. Deze cyclus wordt veroorzaakt door de variaties in de onderlinge stand van de maan, de zon en de aarde.

De 18,6 jarige cyclus is terug te vinden als de gemiddelde getij verschillen per jaar, worden uitgezet tegen de tijd (bijlage 3). Duidelijk is te zien dat voor de verschillende meetstations andere getijverschillen gemeten zijn. Dit wordt veroorzaakt door opstuwing van het water in een trechtermond zoals de Westerschelde gezien mag worden.

Voor de verschillende raaien is gekeken welk meetstation gebruikt is voor de getijmetingen en dat station is gebruikt voor de correctie voor de 18,6 jarige cyclus. Voor de correctie is gezocht naar een relatie tussen de getijslag, gevonden uit de curve uit bijlage 3 en het getijvolume per raai per jaar.

De gegevens welke zijn gebruikt voor de getijslag in bijlage 3 zijn gehaald uit de Tienjarige overzichten van Rijkswaterstaat. De curven die gefit zijn door de data zijn bepaald door trendberekeningen via matrix operaties welke berekend zijn door Dhr. D.

Dillingh. (RIKZ, Den Haag).

De curven geven een getijverschil (getijslag). Als deze worden uitgezet tegen de getijvolumina zal doormiddel van een regressie-vergelijking een gecorrigeerd getijvolume berekend kunnen worden. Op deze wijze is voor elke raai een gecorrigeerd getijvolume te berekenen.

Echter ook voor deze correctie methode geldt dat de onnauwkeurigheden van de gegevens te groot is. De verbetering valt binnen de 5 à 10 % van de meetfout. In bijlage 4 is te zien de procentuele verschillen t.o.v. waarden welke verkregen zijn na de correctie "evenredige verandering getijvolume-getijfaktor".

Verder komt de 18,6 jarige cyclus voor station Vlissingen veel duidelijker naar voren dan bij meetstation Bath. Dit geeft voor stroomopwaartse debietmetingen een duidelijke toename van de onnauwkeurigheid als de correctie zou worden toegepast.

Om deze reden is deze correctie-methode voor dit onderzoek niet toegepast.

Correctie: fase verschuiving t.o.v 18,6 jarige cyclus

Een morfologisch systeem is altijd opzoek naar een evenwichtstoestand. Om dit evenwicht te bereiken is het systeem zich steeds aan het aanpassen. Bij langdurige verandering zoals een 18,6 jarige cyclus is het mogelijk dat het systeem een bepaalde vertragsingsfaktor in zich heeft omdat het systeem de veranderingen niet bij kan houden. Hoe groot deze vertragsingsfaktor is, is afhankelijk van het systeem en zijn omgeving. Zo is het mogelijk dat de geologie van het gebied niet toe laat dat het systeem snel verandert. Een andere oorzaak kan zijn dat de zand toevoer te klein is om de verandering bij te houden.

Deze extra correctie op de 18,6 jarige cyclus zou theoretische gezien een verbetering moeten opleveren van het getijvolume. Maar ook hier geldt dat de onnauwkeurigheid van de basisgegevens te groot is om van een significante verbetering te spreken (bijlage 4).

4.3. Nauwkeurigheid van het getijvolume

Volgens Gerritsen en de Jong (1983) ligt de onnauwkeurigheid van de gemeten getijvolumina rond de 5 à 10%. Ook in dit rapport komt naar voren dat de waarden van de getijvolumina een relatief grote onnauwkeurigheid in zich hebben. De onnauwkeurigheid moet geschat worden rond 5 à 10%. Dit is gebaseerd op de afwijkingen die te zien zijn in bijlage 2.

4.4. Conclusie

In de vorige paragrafen zijn de mogelijkheden bekeken op welke wijze de debieten gecorrigeerd zouden kunnen worden. Alle correctie methodieken die besproken zijn, zouden in theorie een verbetering moeten opleveren voor de waarden van de debieten. Echter blijkt dat gegeven de onnauwkeurigheid van de gegevens de correctie voor de 18,6 jarige cyclus en de maximale verschuiving, geen significante verbetering kunnen leveren aan de getijvolumina. De geschatte onnauwkeurigheid ligt tussen de 5 en 10%.

Tijdens het onderzoek is alleen gecorrigeerd voor springtij-gemiddeld getij met de correctie waarbij het getijvolume evenredig verandert met de getijfactor. Verder zijn de afzonderlijke vloed- en ebvolumina gecorrigeerd voor de Schelde afvoer.

5. DWARS PROFIELEN

De profielen geven dwarsdoorsneden van de Westerschelde. In een profiel zijn vaak duidelijke geulen te herkennen. Deze geulen kunnen eb of vloed gedomineerd zijn. Het is van belang om de geulen op te splitsen in eb- en vloedgeulen omdat de morfologie voornamelijk bepaald wordt door de dominante getijstroom (eb of vloed stroom). De karakteristieken van de eb- en vloedgeulen zijn:

-Ebgeul: een getijgeul die voornamelijk open ligt voor de ebstroom en die aan het zeeinde een drempel heeft (v. Veen, 1950); verder heeft de ebgeul een meanderend karakter en treedt een maximale snelheid op bij een waterstand rond NAP.

-Vloedgeul: een getijgeul die voornamelijk open ligt voor de vloedstroom en die aan het stroomopwaartse einde een drempel heeft (v. Veen, 1950); de stroombaan van de vloedgeul is relatief recht en de maximale snelheid treedt op bij hoogwater.

Het stroomvoerend vermogen is voor de gehele doorsnede als ook voor de aparte geulen bepaald. Voor het stroomvoerend vermogen is het gebied van het profiel beneden NAP genomen. De grens tussen de verschillende geulen werd getrokken op het ondiepste punt tussen de geulen. De mate van onnauwkeurigheid van de gemeten profielen is niet bekend. Daarnaast is het leggen van grenzen tussen geulen in een raai erg subjectief. Vooral omdat voor het bepalen van de debieten ook grenzen tussen de geulen zijn gelegd, welke nergens beschreven zijn.

5.1. Dominantie in de geulen

Om een inzicht te krijgen in hoeverre een raai opgedeeld is in een eb en vloed gedomineerde geul, is de mate van dominantie bepaald. De dominantie is als volgt gedefinieerd:

$$\text{dominantie} = \frac{(\text{maximale vloedvolume} + \text{maximale ebvolume})}{(\text{minimale vloedvolume} + \text{minimale ebvolume})}$$

Hierbij geldt dat als de dominantie gelijk is aan 1 dan dat de geul niet door een bepaalde getijde fase gedomineerd wordt. Bij een dominantie groter dan 1 is er sprake van een vloed gedomineerde alswel een eb gedomineerde geul.

Bijlage 5 geeft een overzicht van de dominantie voor de verschillende raaien waarin is te zien dat de variatie tussen de raaien groot is.

De volgende punten vallen op:

- A De dominantie is per raai verschillend. Deze verschillen worden voornamelijk veroorzaakt door de verhouding tussen de grootte van de eb- en vloedgeul en door in hoeverre de geul samengesteld is uit zowel een ebstroom als wel een vloedstroom gedeelte.

Raai 5 en 6 hebben een duidelijke dominantie in de geulen, wat verklaart kan worden doordat de geulen (de eb- en vloedgeul) een even groot oppervlak hebben en dat de geulen niet intern opgebouwd zijn uit zowel een ebstroom als wel een vloedstroom. Dit is wel duidelijk het geval bij raai 9 en 10. Deze zijn intern opgebouwd uit eb- en vloedgeulen. Bij raai 9 valt dit niet zo op omdat de Honte als een vloedgeul geclassificeerd is en het Vaarwater langs de hoofdplaat als ebgeul. Hier speelt weer het verschil in doorstroomoppervlak een rol. Het was echter beter om de Honte op te delen in een eb- en vloedgeul maar daar ontbraken de gegevens voor. De reden dat raai 1 geen duidelijke dominantie vertoont kan verklaart worden door de aanwezigheid van een leidam. Bij raai 3 blijkt uit de getijvolumina dat de Zimmermangeul en de Overloop van Valkenisse intern zijn opgebouwd uit een eb- en vloedgeul waardoor de dominantie gering is.

- B De trend in de afzonderlijke raaien. Deze trend kan mogelijk verklaard worden door de 18,6 jarige cyclus. Tijdens een maximum in de cyclus is de getijslag groter dan gemiddeld ($\pm 7,5$ cm.). Door een grotere getijslag zal een groter getijvolume door de geulen stromen. Het systeem heeft dus een groter volume water per getijfase te verwerken. Om dit grote volume snel te verwerken zal het systeem trachten het water zo te transporteren dat de wrijving zo klein mogelijk zal worden gehouden. Dit betekent dat tijdens de eb-fase het meanderend karakter van de ebgeulen het snelste het water kan afvoeren. Bij vloed zal het water de kortste weg kiezen, de vloedgeulen. Dit geeft als resultaat dat de separatie van de stromingen groter wordt wat weer tot gevolg heeft dat de dominantie hoger wordt. In bijlage 5 is dit verschijnsel duidelijk te zien in raai 3, 5 en 6. Bij de andere raaien is het minder duidelijk omdat a) er geen genoeg data punten zijn om de trend weer te geven of b) de 18,6 jarige cyclus in het oostelijk gedeelte van de Westerschelde niet duidelijk naar voren komt (bijlage 5).

De geulen zijn opgesplitst in eb- of vloedgeul waarbij de classificatie van de geulen in een eb of vloed gedomineerde geul is gebaseerd op de morfologie en dominantie.

6. EVENWICHTSANALYSE

6.1. Inleiding

Voor het opstellen van de evenwichtsparameter is gekozen voor zowel een eb/vloedgeul analyse als wel een gehele doorsnede analyse. Voor de analyse van afzonderlijke geulen in een raai is gekozen om te zien of er duidelijke veranderingen, met betrekking tot de onderscheiden eb- en vloedgeulen, zijn opgetreden in de tijd. Voor de gehele doorsnede analyse is gekozen om een inzicht te krijgen in de mate van evenwicht van de raaien in de tijd. Voor beide analyses geldt dezelfde procedure. In dit hoofdstuk zullen de regressie-analyses besproken worden welke gebaseerd zijn op getijvolume-streampower. Met deze analyses kan de evenwichtparameter (E) berekend worden.

6.2. Regressie-analyse: afzonderlijke geulen

Voor de regressie-analyse van de afzonderlijke eb- en vloedgeulen zijn alle geulen meegenomen die duidelijk uit één geul bestaan. Hierdoor vallen de volgende raaien af omdat gezien hun profiel geen duidelijk onderscheid is te maken in een vloed gedomineerde dan wel een eb gedomineerde geul.

- raai 1: ballastplaat (vloedgeul), invloed van de leidam;
- raai 3: gehele raai, geen duidelijke dominantie in de geulen;
- raai 9: gehele raai, verdeling van de geulen qua morfologie niet duidelijk;
- raai 10: gehele raai, Honte is een samengestelde geul en is niet te splitsten.

Svašek (1994) heeft deze raaien ook niet meegenomen in zijn regressie-analyse. In het onderzoek van Gerritsen en de Jong zijn alle raaien meegenomen.

In de regressie-analyse van de afzonderlijk vloedgeulen zijn raai 1 en 3 uitgesloten. In bijlage 6a en b is te zien wat de invloed is van 1) een gedwongen nulpunt en 2) het meenemen van de gegevens van raai 9 en 10. Wat opvalt is het volgende:

- Een gedwongen nulpunt geeft een slechte correlatie ($R^2=0.77$);
- Raai 9 en 10 hebben een onevenredig grote invloed op de regressie-analyse;

Er geldt dat voor dit meetbereik een vrij nulpunt de beste oplossing is.

De regressie-analyse van de ebgeulen heeft dezelfde opvallende punten als

de vloedgeul analyse (bijlage 7a en b). Ook hier geldt dat als het nulpunt vrij wordt gelaten dat dit de hoogste correlatie oplevert bij dit meetbereik. De ebgeul van raai 1 wordt hier wel meegenomen omdat deze geen invloed ondervindt van de leidam.

6.3. Regressie-analyse: gehele doorsnede

Voor de regressie-analyse van de totale raaien zijn alle raaien meegenomen met uitzondering van raai 1 omdat het getijvolume verstoord wordt door de aanwezigheid van een leidam. De leidam overstroomt alleen bij hoogwater wat dus invloed heeft op het totale getijvolume. Raai 3, 9 en 10 moeten nu wel meegenomen worden in de analyse omdat het gehele volume in beschouwing wordt genomen.

In de bijlage 8a en b zijn de resultaten weergegeven van de regressie-analyses. In bijlage 8a en b is duidelijk te zien wat de invloeden zijn van een gedwongen nulpunt en het al of niet incorporeren van de raaien 9 en 10. Uit de figuren blijkt dat:

- een ongedwongen nulpunt een beter resultaat geeft;
- de richtingscoëfficiënt van beide lijnen zonder gedwongen nulpunt goed met elkaar overeenkomen wat er op duidt dat raai 9 en 10 geen grote invloed hebben op de regressielijn.

Voor het opstellen van een evenwichtsparameter is dan ook gekozen voor een relatie tussen streampower en volume waarbij alle raaien meedoen met uitzondering van raai 1. Verder is gekozen voor een ongedwongen nulpunt omdat binnen het gemeten gebied dit de beste resultaten oplevert. Bij een ander meetbereik met meer kleine geulen zal de regressielijn mogelijk door het nulpunt moeten worden geforceerd.

Resumerend kan gezegd worden dat voor alle analyses is gekozen voor een ongedwongen nulpunt en dat raai 9 en 10 weggelaten worden voor de afzonderlijke geulen en dat deze raaien wel worden meegenomen in de gehele doorsnede analyse.

Tabel 2 geeft een overzicht van de correlatie-coëfficiënten van de regressie-analyses van Gerritsen en de Jong en van dit onderzoek. Voorop gesteld moet worden dat beide onderzoeken niet conform zijn. Gerritsen en de Jong hebben het doorstroomoppervlak gebruikt als morfologische parameter. Dit onderzoek heeft gebruik gemaakt van de streampower wat fysieke gezien een betere relatie moet opleveren.

correlatie coëfficiën- ten	Gerritsen en de Jong	Dit onderzoek	
		selectie raaien	alle raaien m.u.v. raai 1, 4, 8, 11 en 12
vloedgeul	0.98	0.83	0.97
ebgeul	0.94	0.89	0.93
gehele doorsnede	0.99	0.95	0.98

Tabel 2: Overzicht van correlatie coëfficiënten van Gerritsen en de Jong en die van dit onderzoek.

Uit tabel 2 blijkt dat de correlatie coëfficiënten overeenkomen als alle raaien meegenomen worden. Gerritsen en de Jong hebben echter meer raaien meegenomen in hun beschouwing dan dit onderzoek. Zij hebben de raaien 11 en 12 meegenomen die aan de uiteinden van de regressielijnen liggen, wat de correlatie doet toenemen. Opvallend is dat voor beide onderzoeken de correlaties erg goed zijn.

Als er gekeken wordt naar de selectie raaien zijn de correlatie coëfficiënten niet meer te vergelijken. De waarden van de correlaties liggen lager dan voor alle raaien wat verklaart kan worden door het aantal punten en het dichterbij elkaar liggen van de punten.

Verder is statistische het aantal vrijheidsgraden met 1 toegenomen bij het gebruik van de streampower omdat de vorm van het profiel wordt meegenomen.

Als conclusie mag gelden:

- dat het stroomvoerend vermogen fysisch gezien een betere parameter is dan het doorstroomoppervlak;
- dat de correlatie tussen het getijvolume en de morfologie uitgedrukt in het stroomvoerend vermogen als wel het doorstroomoppervlak erg hoog is;

6.4. Evenwichtsparemeter (E)

De evenwichtsparemeter is gebaseerd op het feit dat bij een bepaald getijvolume een bepaalde streampower behoort. Via een gemeten getijvolume is het mogelijk met behulp van de regressie-analyse welke behandeld is in de vorige paragraaf een streampower te berekenen. Om inzicht te krijgen in het verschil tussen de werkelijke situatie en de berekende situatie, is een evenwichtsparemeter bepaald. De evenwichtsparemeter E is als volgt gedefinieerd:

$$E = \frac{W_{\text{gemeten profiel}}}{W_{\text{berekend uit getijvolume}}} \quad (11)$$

Uit de formule blijkt dat als E groter is dan 1, het werkelijk gemeten profiel ruimer is dan de evenwichtssituatie. Een E kleiner dan 1 geeft aan dat het profiel te krap is. Op basis van de gevonden relaties zijn de evenwichtsparameters voor de afzonderlijke geulen en de totale raai als volgt gedefinieerd:

$$E_{\text{totale raai}} = \frac{W_{\text{gemeten}}}{6,75 \cdot 10^{-4} \cdot \text{totale volume} - 8,72 \cdot 10^4} \quad (12)$$

$$E_{\text{vloedgeul}} = \frac{W_{\text{gemeten}}}{6,15 \cdot 10^{-4} \cdot \text{vloed volume} - 4,28 \cdot 10^4} \quad (13)$$

$$E_{\text{ebgeul}} = \frac{W_{\text{gemeten}}}{5,69 \cdot 10^{-4} \cdot \text{eb volume} - 1,91 \cdot 10^4} \quad (14)$$

7. ANALYSE VAN DE RAAIEN EN GEULEN

De ontwikkeling van de raaïen en geulen in de tijd zal in dit hoofdstuk behandeld worden. De analyse is gebaseerd op de afwijkingen van het evenwichtsprofiel dat d.m.v de evenwichtsparameter E is gekarakteriseerd.

De resultaten zijn te zien in bijlage 9. De resultaten zijn nog eens grafisch uitgezet in bijlage 10. Daarin is te zien dat alle raaïen zijn meegenomen, ook de enkele geulen die bij de regressie-analyse buiten beschouwing zijn gelaten behalve de Ballastplaat.

Rekening dient gehouden te worden, dat de regressie gebaseerd is op profielen die uit evenwicht zijn.

Bijlagen 11a en b geven een overzicht van de streampower (W) en het doorstroomoppervlak (A_c) in de tijd. Er is hier een onderscheid gemaakt tussen de eb- en vloedgeulen. In bijlage 12a en b zijn de streampower en het doorstroomoppervlak van de raai in de tijd weergegeven. In de volgende paragraaf zullen mogelijke afwijkingen van de evenwichtsparameter behandeld worden. In de daarop volgende paragraaf zullen de verschillende raaïen besproken worden.

7.1. Mogelijke oorzaken afwijkingen

Dat de evenwichtsparameter E niet altijd gelijk is aan 1 kan een aantal oorzaken hebben:

A. morfodynamica

Voor deze afwijking is de evenwichtsparameter E ontwikkeld. De afwijking van het profiel t.o.v. zijn evenwichtsprofiel geeft aan hoe onstabiel de geul is. Een onstabiele geul zal gaan veranderen in de tijd, dit is van belang om te weten voor zowel de scheepvaart als de kustverdedingswerken.

Door veranderingen in het grote systeem van banken en geulen, is het mogelijk dat een geul de snelle veranderingen niet kan volgen. De geul heeft een aanpassingstijd nodig. Een voorbeeld is raai 5, in deze raai is te zien dat het geulen systeem verandert. De vloedgeul krijgt een groter en de ebgeul een kleiner getijvolume te verwerken. Hier zal de morfologie zich moeten aanpassen tot dat hetprofiel weer stabiel is.

B. Antropogene invloeden; baggeren- en stortactiviteiten

Hierdoor kan een profiel kunstmatig te groot of te klein zijn.
Een voorbeeld hier van is raai 2.

C. Hydraulische omstandigheden, onder te verdelen in:

- 3-dimensionale effecten, zoals spiraalstromen, waardoor de hoofdstroomrichting gemiddeld wel maar momentaan niet samenvalt met de geulrichting (Svašek, 1994).
- Effect van de vloedstroom in een ebgeul en omgekeerd; in sommige geulen zelfs intern vloed/ebstroomsystemen binnen de geul.

D. Meetfouten, onder te verdelen in:

- meetfouten door stroomoppervlak; deze fout heeft een toevallig karakter; een voorbeeld is raai 9 waar de grens tussen de beide geulen niet gelijk is.
- fouten in de debiet metingen; deze fouten zijn uitgebreid behandeld in hoofdstuk 2.

7.2. De afzonderlijke raaien en geulen

Raai 1

Raai 1 is verdeeld in een ebgeul, het vaarwater boven Bath en een vloedgeul, de ballastplaat als uitloop van de Appelzak. De laatste trekt pas debiet als de leidam overstroomd wordt. In de analyses is daarom de ballastplaat verwaarloosd.

In de raai is in de tijd weinig veranderd, het profiel is altijd te ruim geweest, $E = 1,10$ à $1,20$. Dit lijkt samen te hangen met dichtheidseffecten ter plaatse, waardoor tijdens vloed de bodemsnelheden groter zijn dan de oppervlaktesnelheden. Dit heeft een schijnbare vergroting van het vloedvolume tot gevolg en daarmee een ruimer profiel (Svašek, 1994). Een andere oorzaak kan zijn het baggeren. Door baggerwerkzaamheden stroomafwaarts is veel zand op een natuurlijke wijze getransporteerd naar de baggergaten. Dit heeft tot gevolg dat het profiel dieper wordt.

Raai 2

Raai 2 bestaat uit het Nauw van Bath (ebgeul) en de Schaar van de Noord (vloedgeul). In 1972 was het doorstroomoppervlak beneden NAP van beide geulen gelijk. Echter de evenwichtsparameter laat zien dat de ebgeul te krap is en dat de vloedgeul rond zijn evenwicht zit. Tussen 1972 en 1982 is het nauw van Bath verdiept t.b.v. de scheepvaart van ca. -11,5 m NAP tot ca. -14,0 m NAP. Wellicht heeft als gevolg hiervan een herverdeling van de debieten plaats gevonden. Dit heeft geresulteerd in een stabiel profiel voor de ebgeul en een te ruim profiel voor de vloedgeul. Er zijn echter te weinig datapunten om raai 2 goed te kunnen analyseren. Als de gehele doorsnede bekeken wordt is te zien dat de waarden voor E onevenredig groot zijn. Dit kan verklaard worden door

baggerwerkzaamheden. Uit de vergelijking voor het stroomvoerend vermogen blijkt dat als de diepte met een faktor 1 groter wordt dan het stroomvoerend vermogen met een exponent $5/3$ groter wordt. Dus het verdiepen van een geul, vooral in de al diepere stukken, heeft een grote invloed op het stroomvoerend vermogen, waardoor E een grote waarde kan krijgen.

Raai 3

Raai 3 is de raai die niet is meegenomen in de regressie-analyses voor de afzonderlijke geulen. Toch is wel een evenwichtsparameter bepaald. Voor de totale raai is te zien dat het doorstroomoppervlak is toegenomen maar dat de streampower nog meer is toegenomen. Dit geeft als resultaat dat de raai eerst iets te krap is ($E = \pm 0,85$) en dat in 1990 het profiel te ruim is ($E = \pm 1,19$).

Voor de afzonderlijke geulen is geen uitspraak te doen. De variatie is te groot. Dit bevestigt dat ze niet meegenomen mochten worden in de regressie-analyse. Duidelijke afwijkingen in deze raai zijn door de gecompliceerde samenstelling van de geulen niet te verklaren met deze evenwichtsanalyse.

Raai 5

Raai 5 wordt gevormd door de ebgeul, het Zuidergat, en de vloedgeul, de Schaar van Waarde. Als de gehele doorsnede bekeken wordt, is te zien dat het doorstroomoppervlak en de streampower evenredig veranderen waarbij de totale verandering in de tijd gering is. De raai schommelt rond zijn evenwichtstoestand.

Als echter de geulen apart bekeken worden, blijkt dat het doorstroomoppervlak van de ebgeul ten koste van de vloedgeul vanaf 1957 met wel 50% is toegenomen. Beide geulen blijven onder hun evenwichtssituatie wat inhoudt dat hun profiel te krap is. Dit kan verklaard worden doordat de morfologische aanpassingen de grote veranderingen in de debietverdeling niet kunnen bij houden. Vanaf 1980 tot 1988 is een lichte stagnatie te zien in de verandering van het debiet in de ebgeul. Dit resulteert in een aanpassing van het profiel naar de evenwichtssituatie, wat duidelijk te zien is in de veranderingen van de evenwichtsparameter. De uitschieter in 1988 wordt veroorzaakt door een mogelijke meetfout omdat het debiet veel kleiner is dan gemiddeld. De vloedgeul blijft te krap mogelijk als gevolg van stortingen van ruim $1 \text{ Mm}^3/\text{jaar}$.

Raai 6

In Raai 6 zijn de geulen duidelijk gescheiden door de aanwezigheid van de Rug van Baarland. De totale raai schommelt rondom zijn evenwichtssituatie.

Het gat van Ossenis -de vloedgeul- is in 1968 veel te ruim; de oorzaak is mogelijk een meetfout in de getijregistratie of in de debiet meting omdat de getijfactor groot is waarbij het getijvolume gemiddeld is. In de jaren daarna neemt het doorstroomprofiel sneller af dan de streampower. Dit heeft tot gevolg dat de geul in de periode 1988-1989 zich rond zijn evenwichtssituatie bevindt. In 1988 en 1989 slaat de balans over naar een iets te krap profiel. Dit kan het gevolg zijn van stortingen van 2,5 à 3 Mm³/jaar vanaf 1986.

Het Middelgat -de ebgeul- blijft, ondanks een grote verandering in het doorstroomoppervlak (afname van 25%), te ruim. Dit duidt erop dat hoewel het doorstroomoppervlak kleiner wordt, de vorm van het profiel niet verandert. De veranderingen in het systeem zijn echter te groot om tot een evenwichtsprofiel te komen.

Raai 7

De Pas van Terneuzen en Everingen, respectievelijk ebgeul en vloedgeul, zijn zeer stabiel in de tijd. Ditzelfde geldt voor de gehele raai. Opvallend is dat in Svašek (1994) een te krap profiel gevonden werd voor raai 7. In hun rapport werd al gesuggereerd dat dit te maken kon hebben met de grote waterdiepten in de geulen. In dit rapport -met meenamen van de vorm van het profiel- blijkt dat raai 7 geen uitschieter is. Hier komt duidelijk naar voren dat de streampower een betere maat is voor het karakteriseren van de stabiliteit van een geul dan het doorstroomoppervlak.

Raai 9

Deze raai heeft als ebgeul de Honte en als vloedgeul de Schaar van de Spijkerplaat. De totale raai is in evenwicht. Hoewel de raai niet is gebruikt voor de regressie-analyse, is er toch gekeken wat er globaal gebeurt in de geulen. De ebgeul is te ruim en wordt steeds ruimer en de vloedgeul is te krap en wordt steeds krappere. Dit kan veroorzaakt worden doordat de Schaar van de Spijkerplaat een groter debiet trekt waardoor de Honte steeds minder belangrijk wordt. Dit kan samenhangen met de definitie van het splitsingspunt van beide geulen.

Raai 10

De meest westelijk gelegen raai, raai 10, is zeer stabiel. De ebgeul is de Honte en is iets te ruim net zoals de vloedgeul, Vaarwater langs de Hoofdplaat. Hier geldt voor beide geulen hetzelfde als bij raai 3 namelijk dat de geulen samengesteld zijn uit zowel een ebgeul en een vloedgeul. Dit was ook de reden dat ze niet meegenomen zijn in de regressie-analyse voor de onafhankelijke geulen.

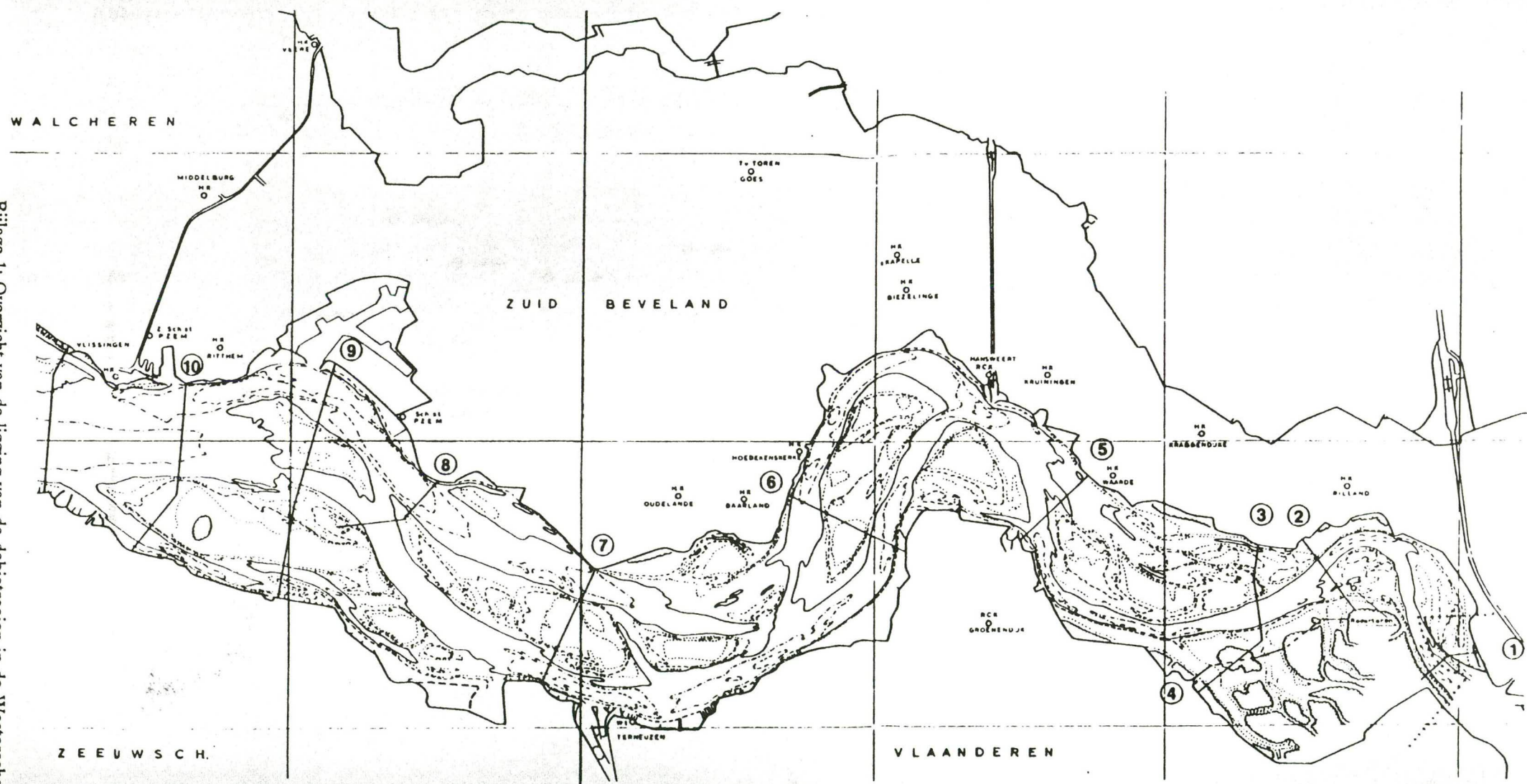
CONCLUSIES

- I. Voor de hydraulische parameter (getijvolume) zijn debietgegevens gebruikt. Deze debietgegevens zijn door verschillende factoren beïnvloed. Een van die factoren is dat de gegevens gemeten zijn tijdens springtij. Andere factoren die een rol kunnen spelen zijn de afvoer van de Schelde en de 18,6 jarige cyclus. Om de gemeten gegevens te corrigeren voor deze factoren zijn correctie-methoden gebruikt. Alle correctie methodieken die besproken zijn, zouden in theorie een verbetering moeten opleveren voor de waarden van de debieten. Echter blijkt dat gegeven de onnauwkeurigheid van de gegevens (5 à 10%), de correctie voor de 18,6 jarige cyclus en de fase verschuiving t.o.v 18,6 jarige cyclus, geen significante verbetering leveren aan de getijvolumina. De debieten zijn gecorrigeerd voor springtij-gemiddeld getij waarbij het getijvolume rechtevenredig verandert met de getijfaktor. Verder zijn de afzonderlijke vloed- en ebvolumina gecorrigeerd voor de Schelde afvoer.
- II. Er bestaat een goede relatie tussen de het getijvolume en het stroomvoerend vermogen. De relatie is opgesteld voor zowel de eb- en vloedgeul als wel voor de totale raai.
Uit deze relatie volgt dat het stroomvoerend vermogen fysisch gezien een betere parameter is dan het doorstroomoppervlak hoewel de correlatie tussen het getijvolume en de morfologie uitgedrukt in het stroomvoerend vermogen als wel het doorstroomoppervlak beide erg goed zijn.
- III. De relatie tussen het getijvolume en het stroomvoerend vermogen is de basis voor een evenwichtsparameter (E). De evenwichtsparameter is zo gedefinieerd dat als $E < 1$ dat het profiel te krap is, als $E > 1$ dan geldt dat het profiel te ruim is. De factoren die er voor zorgen dat E niet gelijk is aan 1 zijn; morfodynamiek van het estuarium systeem, antropogene invloeden (storten/baggeren), meetfouten en hydraulische omstandigheden.
- IV. De evenwichtsparameter kan een belangrijk hulpmiddel zijn bij het karakteriseren van de stabiliteit van de geulen en voor het signaleren van trends in de loop van de tijd.

Literatuurlijst

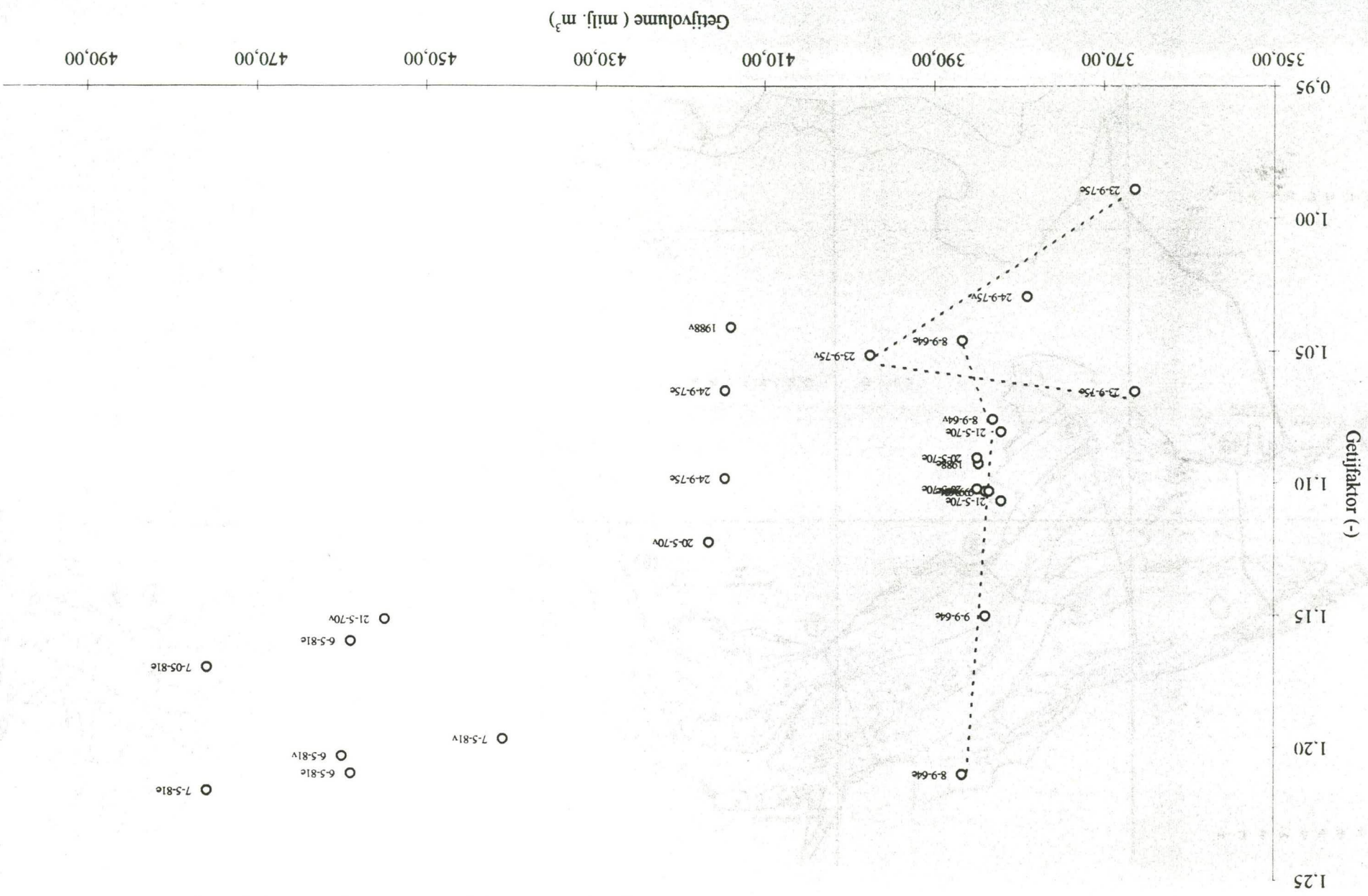
- Jong, H de, 1989. "Debietgegevens van de Westerschelde vanaf 1932".
(voorlopige versie); Nota GWAO-89.1004, Rijkswaterstaat.
- Gerritsen, F. en H. de Jong, 1983. "Stabiliteit van doorstroomprofielen in de Westerschelde"; Nota WWKZ-83.V008, Rijkswaterstaat.
- Kleef, A.W. van, 1991. "Empirical relationships for tidal inlets, basins and deltas";
Rapport Geopro 1991. 019, Rijkswaterstaat, 52p.
- Tienjarig overzicht der waterhoogten, afvoeren en watertemperaturen, 1989. 1971-1980.
Dienst Getijdewateren Rijkswaterstaat, Den Haag.
- Svašek, ingenieursbureau., 1994. "Verklarend onderzoek drempels Westerschelde"; In
opdracht van Rijkswaterstaat (project oostwest), Proj. nr.940.
- Veen, J. van, 1950. "Eb- en vloodschaar systemen in de Nederlandse getijwateren";
tijdschrift KNAG, vol. 67(2), blz 303-325.

Bijlage 1: Overzicht van de ligging van de debietraaien in de Westerschelde.



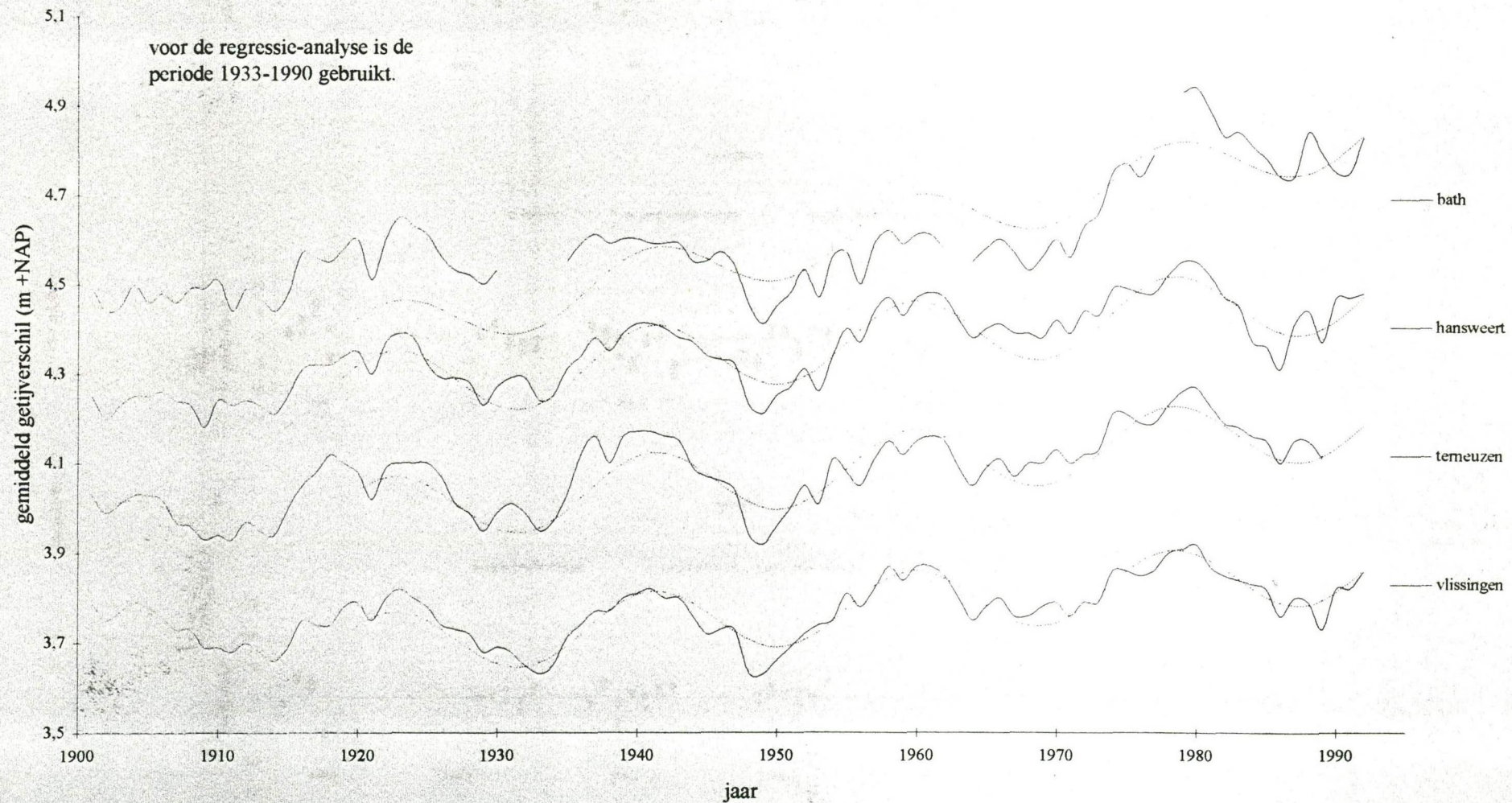
Raai 5 De relatie tussen getijfactor en het debiet

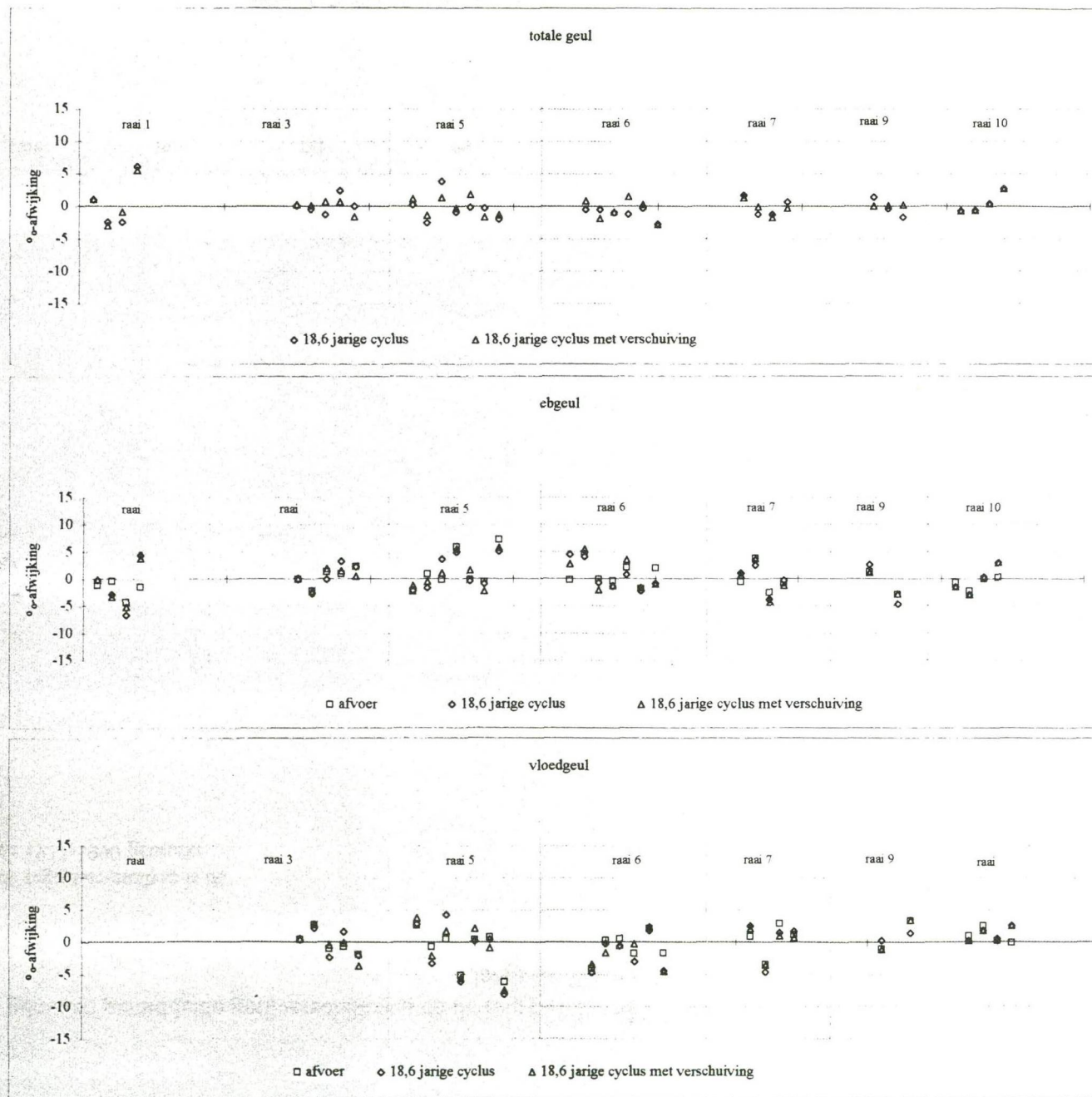
(Voor elke dag zijn er voor eb en vloed getijfactoren berekend. De lijnen geven de koppeling weer tussen de getijfactor en het daarbij behorende getijvolume)



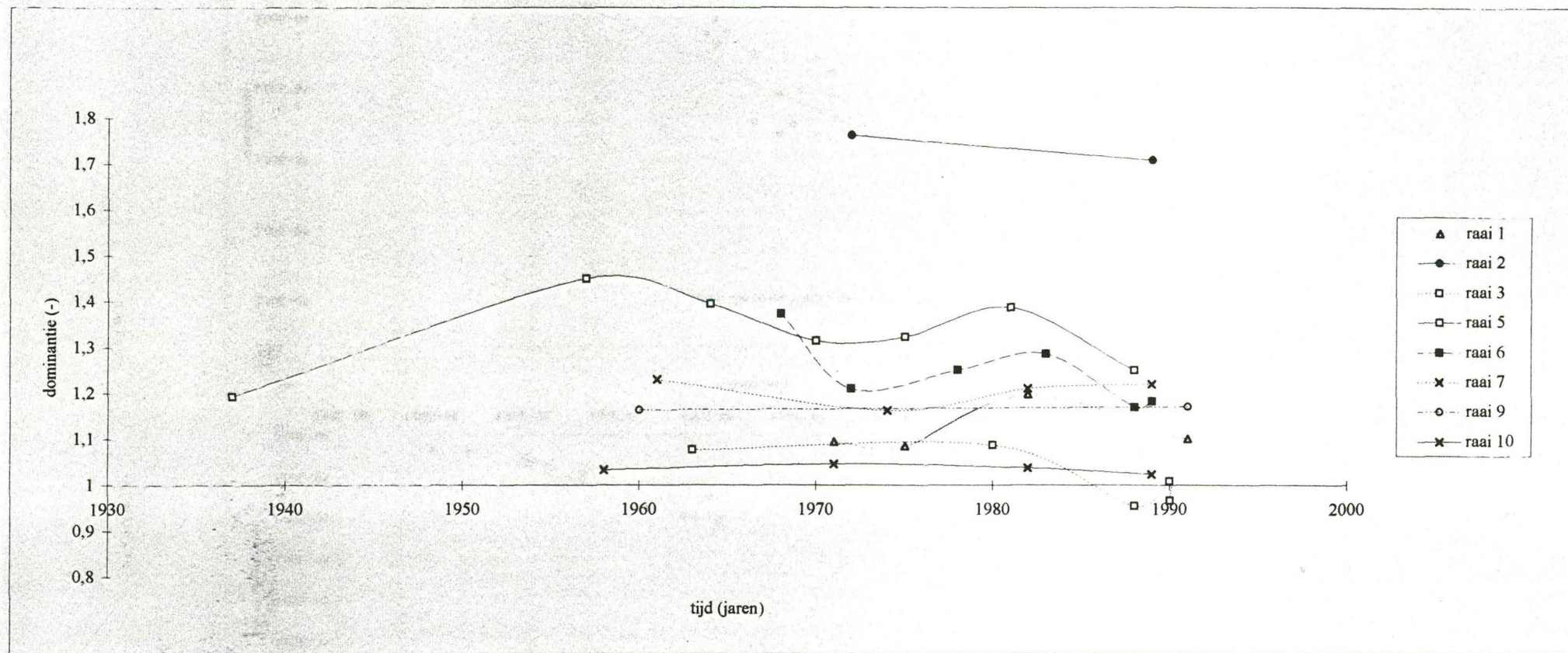
Bijlage 2: Een voorbeeld van de spreiding in de data.

De gemeten gemiddelde getijverschillen en de regressielijnen van de getijverschillen bij de verschillende meetstations langs de Westerschelde

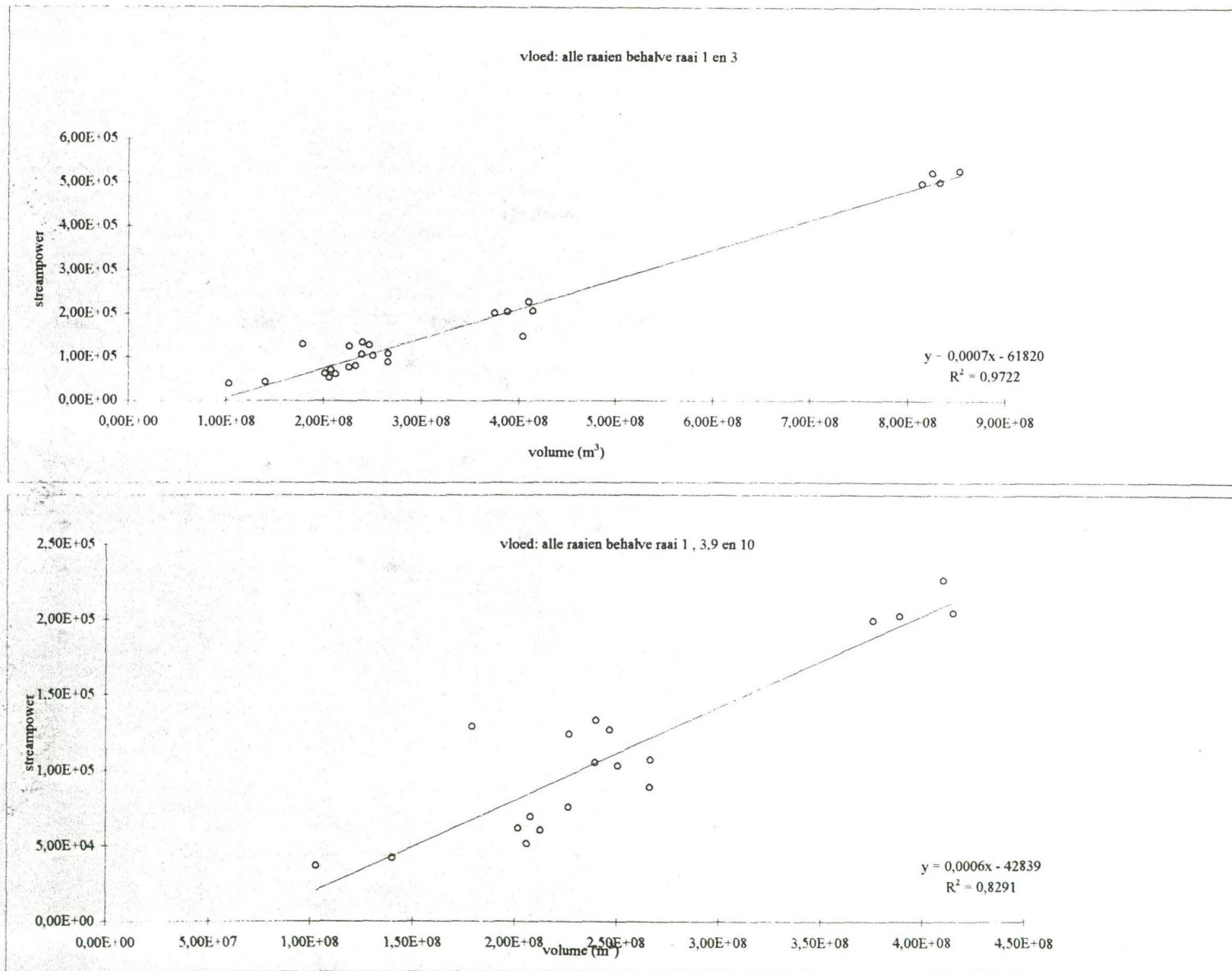




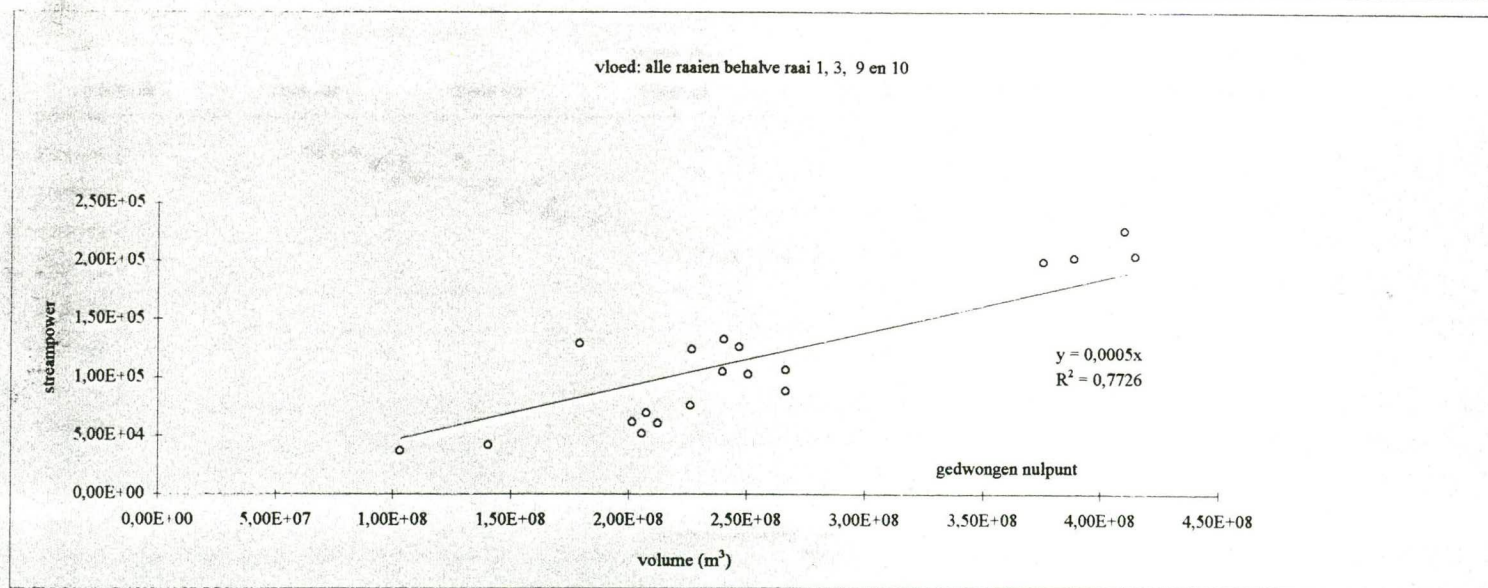
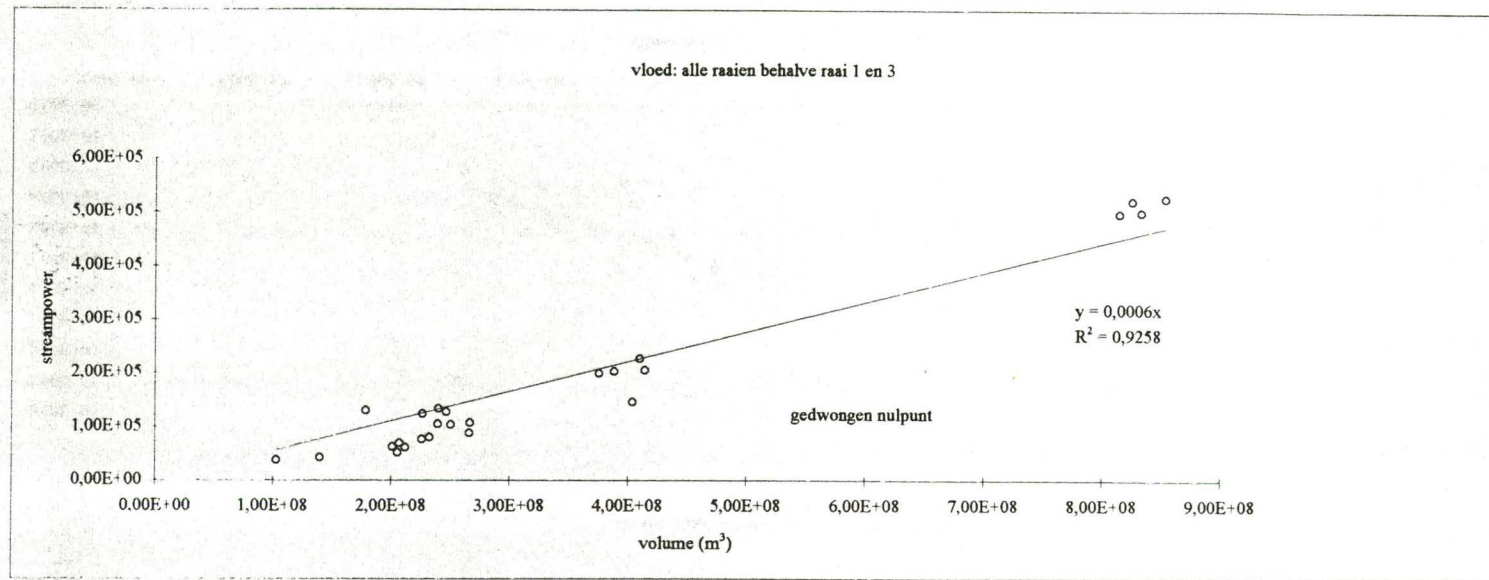
Bijlage 4: Procentuele verandering van de andere correcties t.o.v. de correctie springtij naar gemiddeld getij



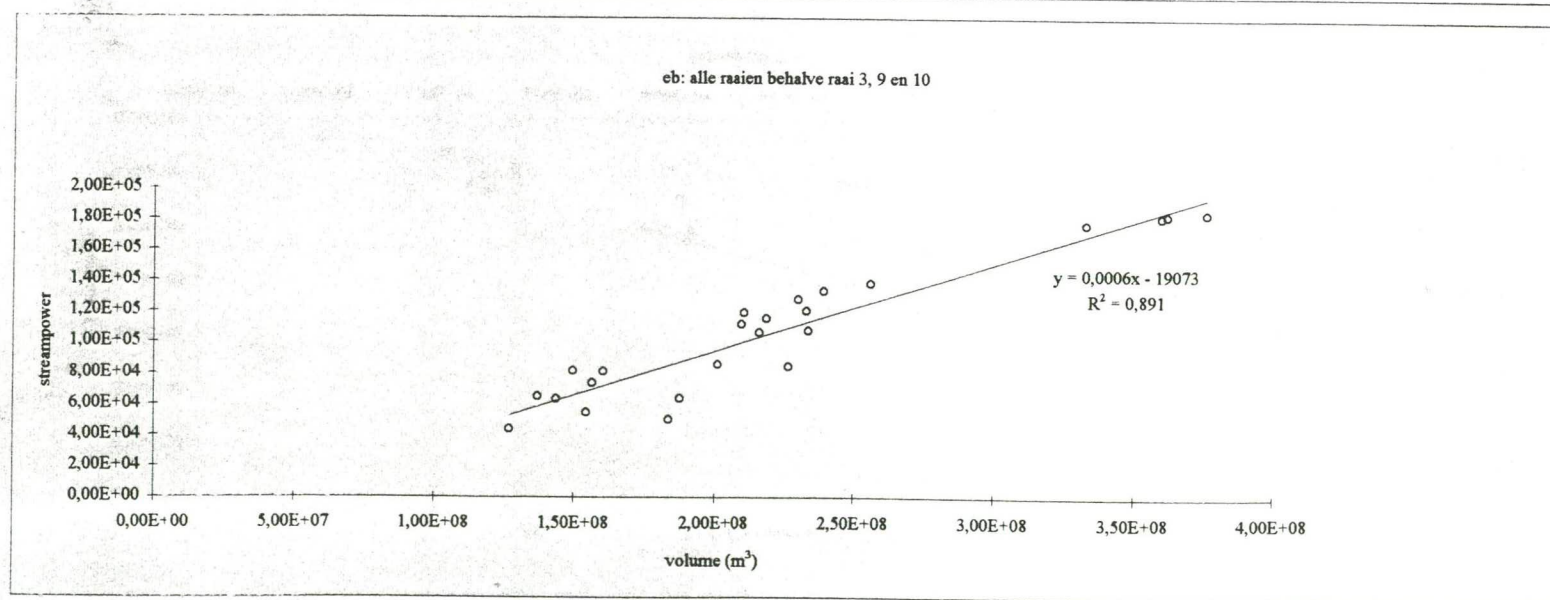
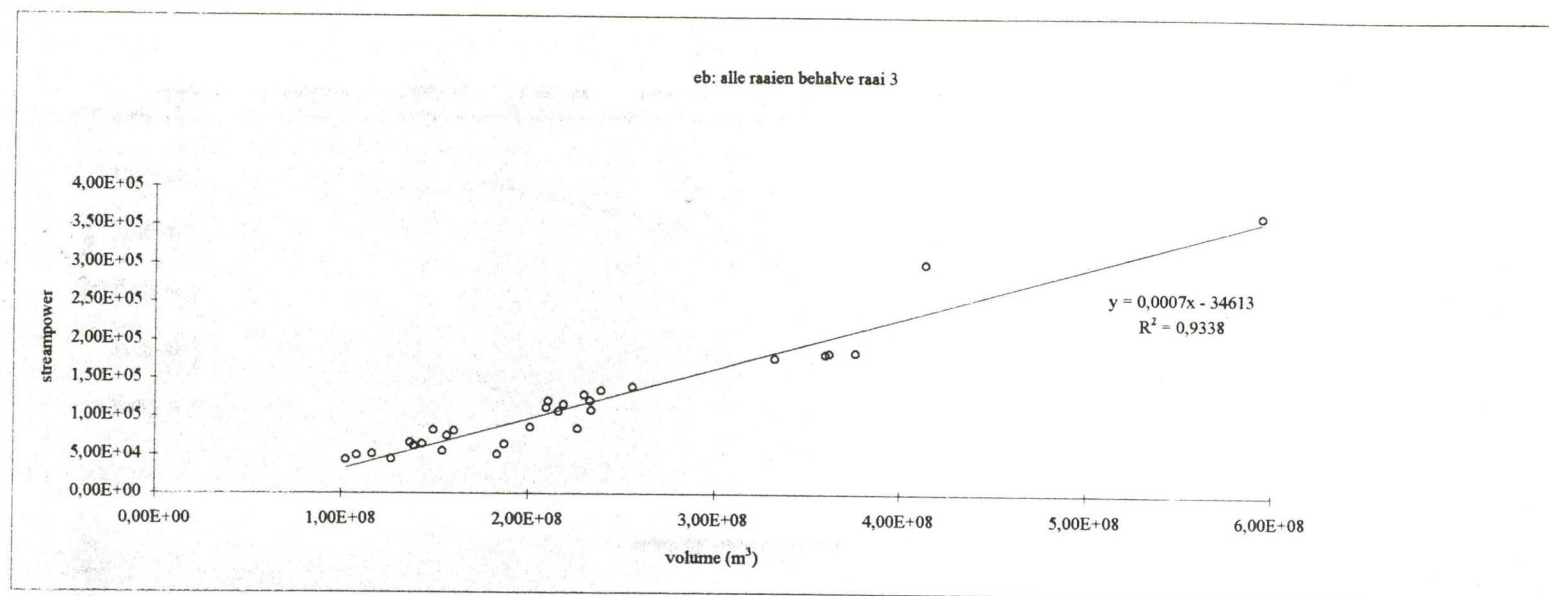
Bijlage 5: Het verloop van de mate van dominantie van de verschillende raaien in de tijd



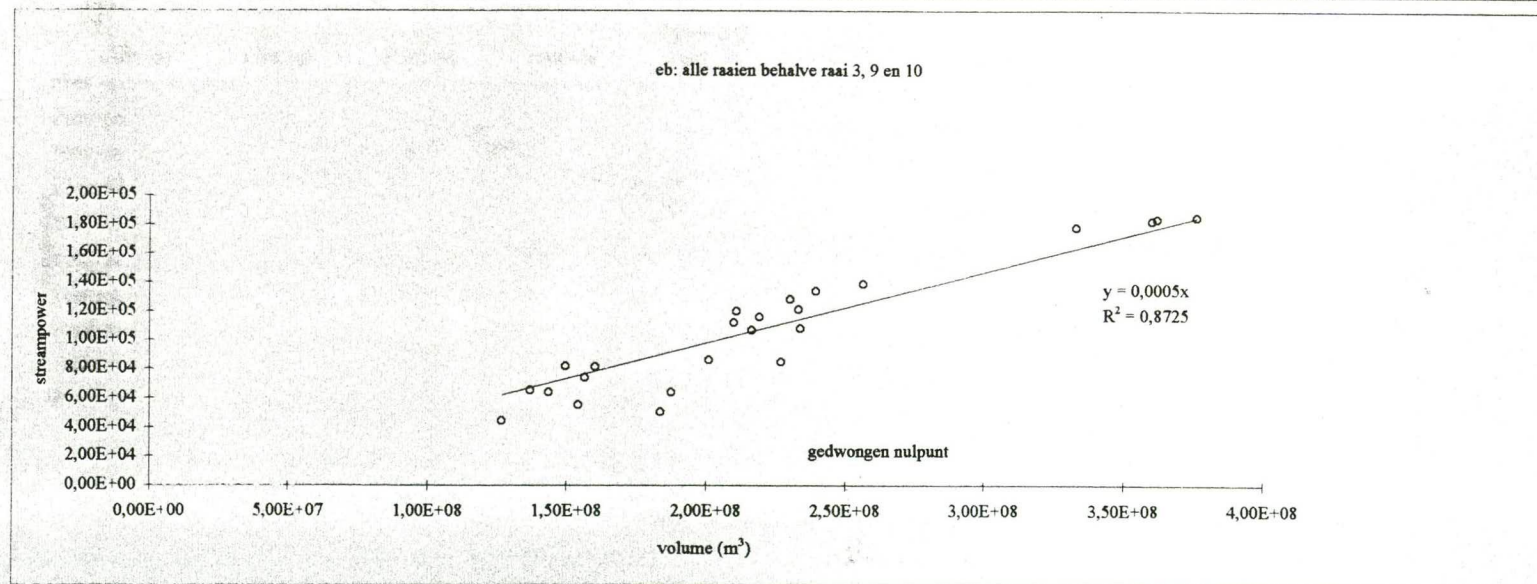
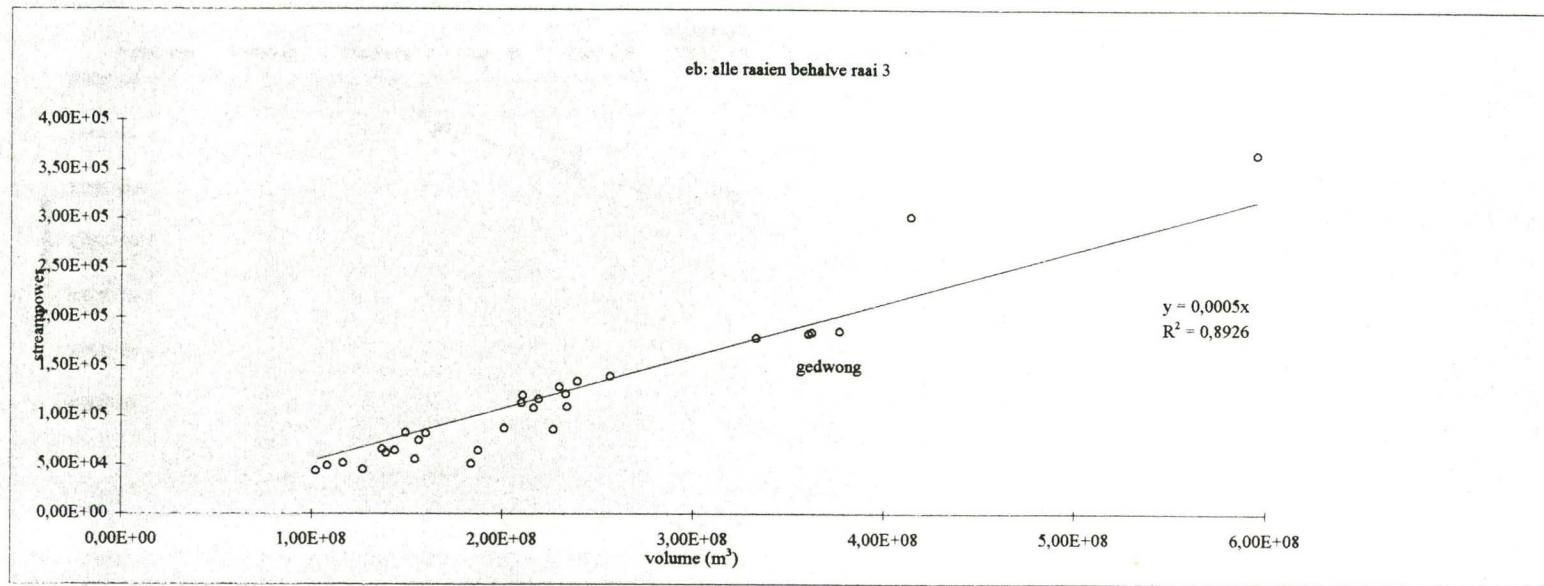
Bijlage 6a: Overzicht van de relatie tussen getijvolume en streampower voor de vloedgeul



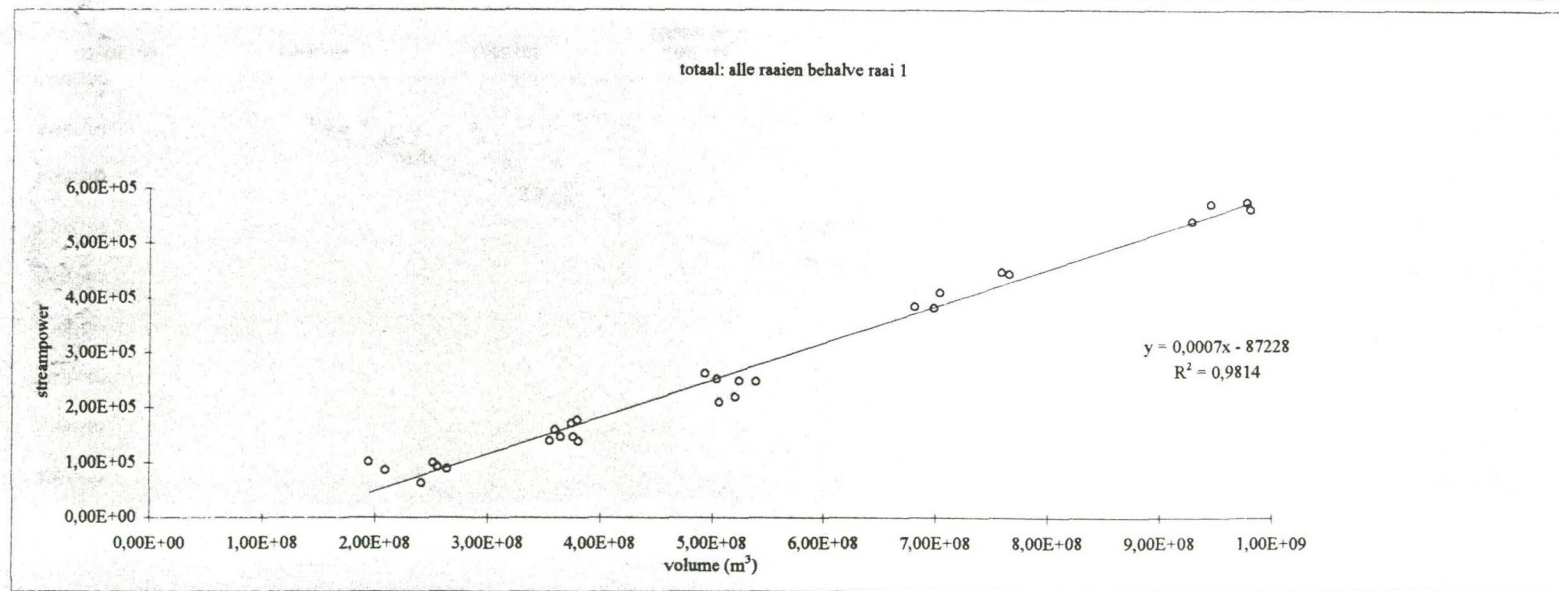
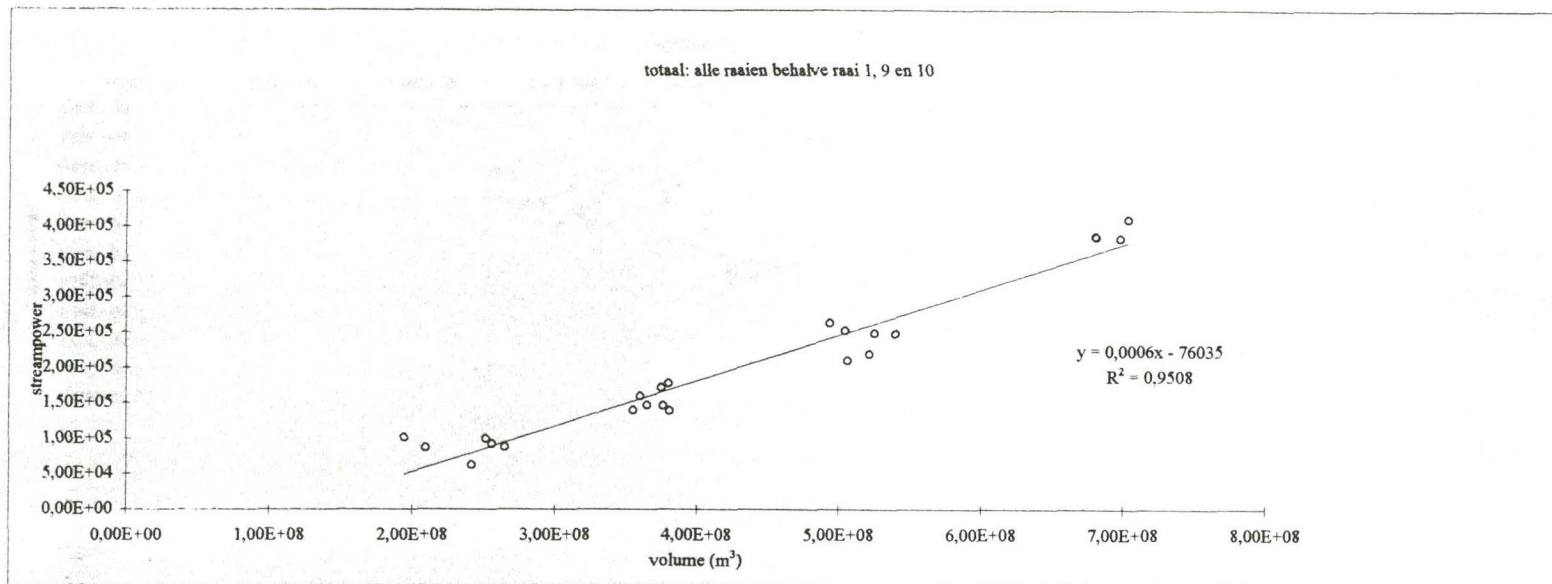
Bijlage 6b: Overzicht van de relatie tussen getijvolume en streampower voor de vloedgeul



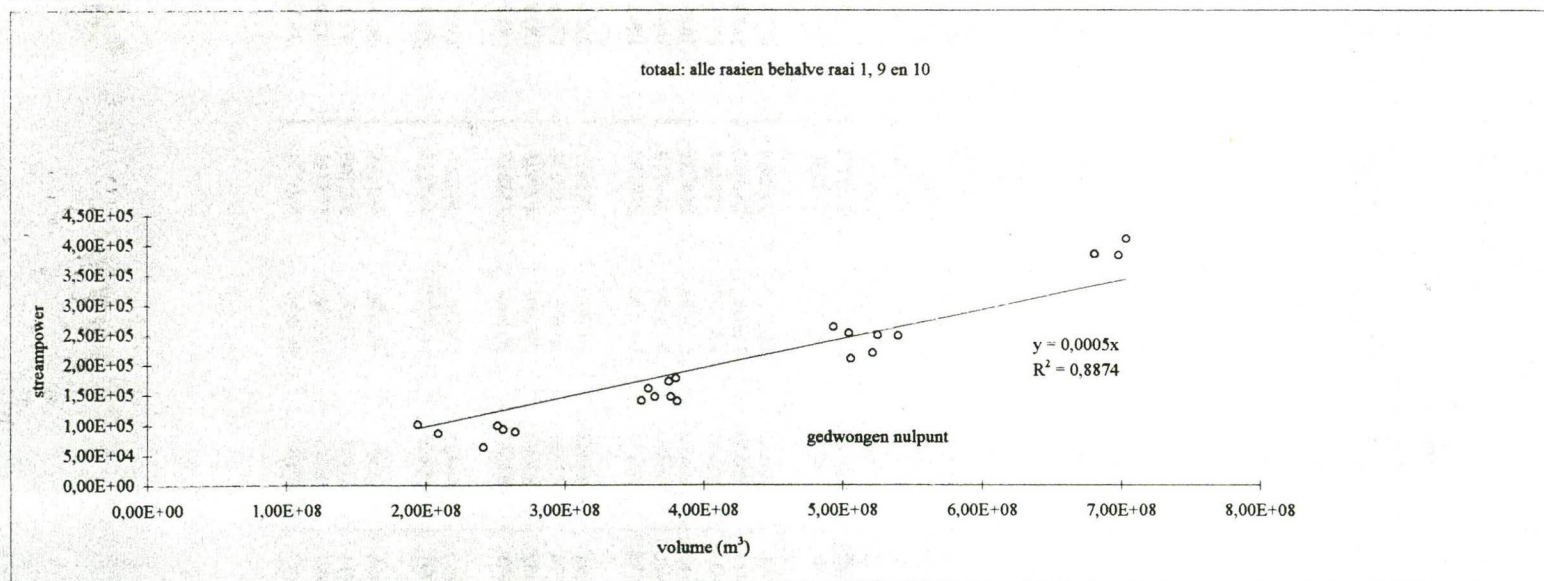
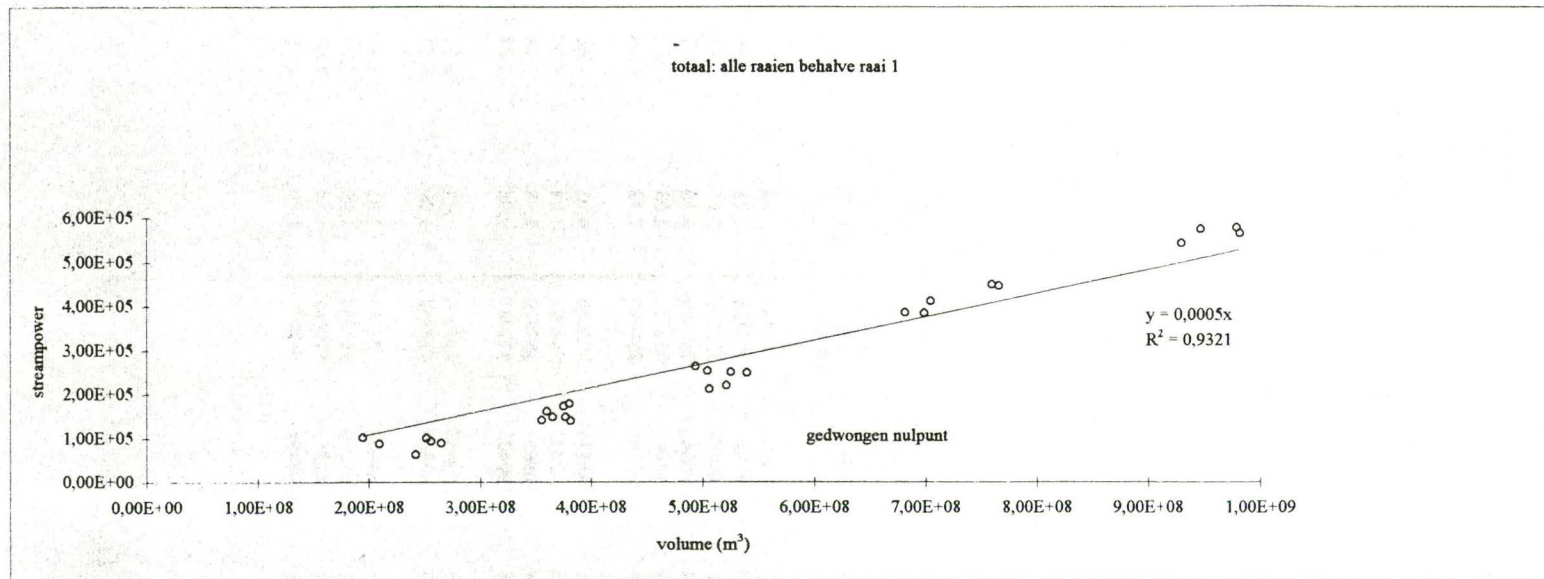
Bijlage 7a: Overzicht van de relatie tussen het getijvolume en de streampower voor de ebgeul



Bijlage 7b: Overzicht van de relatie tussen het getijvolume en de streampower voor de ebgeul



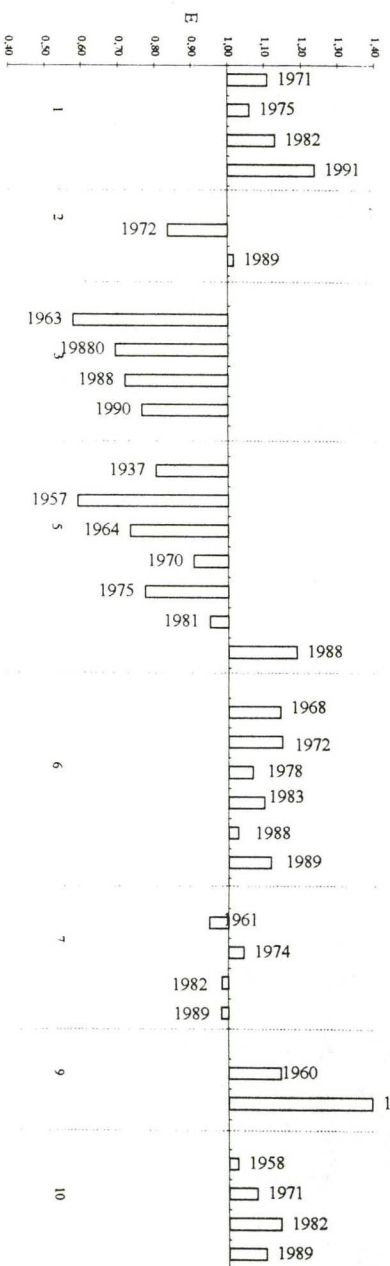
Bijlage 8a: Overzicht van de relatie tussen het getijvolume en de streampower voor de gehele doorsnede



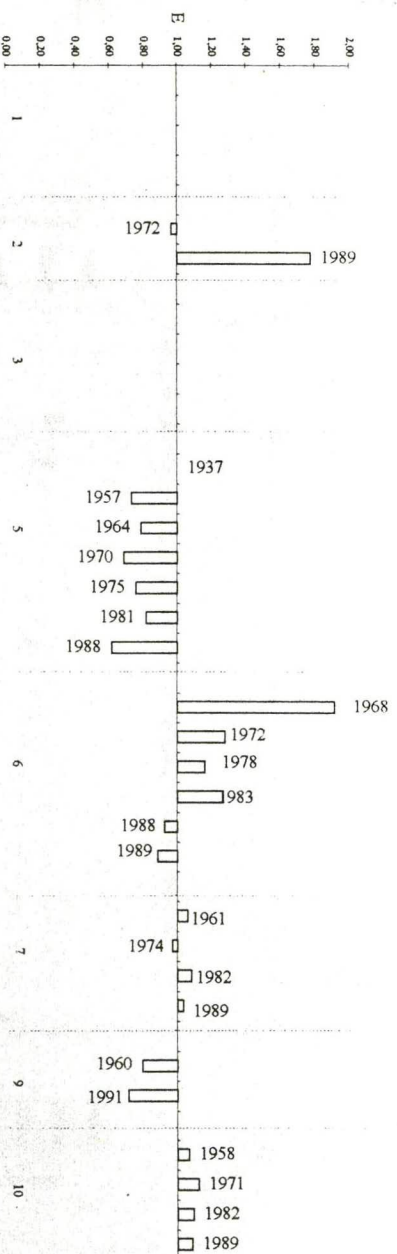
Bijlage 8b: Overzicht van de relatie tussen het getijvolume en de streampower voor de gehele doorsnede

raai	jaar	W-gemeten (uit profielmetingen)			W-berekend (uit regressieberekeningen)			E= W-gemeten/W-berekend		
		ebgeul	vloedgeul	totaal	ebgeul	vloedgeul	totaal	ebgeul	vloedgeul	totaal
1	1971	65361	1344	66705	58941			1,11		
1	1975	74171	658	74832	70002			1,06		
1	1982	81433	1031	82472	72144			1,13		
1	1991	81708	832	82507	66052			1,24		
2	1972	44255	41805	86060	53135	43559	54175	0,83	0,96	1,59
2	1989	63699	36695	100394	62698	20669	44219	1,02	1,78	2,27
3	1963	49360		61963	85968		76101	0,57		0,81
3	1980	68850		87547	99744		91516	0,69		0,96
3	1988	77724		91927	108377		85599	0,72		1,07
3	1990	84490		98694	110887		82869	0,76		1,19
5	1937	54987	104633	159742	68750	104727	155887	0,80	1,00	1,02
5	1957	50231	88316	138545	85515	121257	169918	0,59	0,73	0,82
5	1964	64024	75546	139945	87721	96378	152598	0,73	0,78	0,92
5	1970	86203	60187	146390	95462	87986	159192	0,90	0,68	0,92
5	1975	84878	61354	146232	110070	81279	166870	0,77	0,75	0,88
5	1981	108130	69152	177282	114066	84936	169298	0,95	0,81	1,05
5	1988	119943	51337	171280	101018	83846	165783	1,19	0,61	1,03
6	1968	133812	128752	262564	117192	67434	245934	1,14	1,91	1,07
6	1972	128370	123642	252012	111909	96760	253335	1,15	1,28	0,99
6	1978	121120	126307	247427	113672	109121	277278	1,07	1,16	0,89
6	1983	116012	132724	248735	105644	105045	267319	1,10	1,26	0,93
6	1988	106884	102629	209513	104192	111465	254372	1,03	0,92	0,82
6	1989	112174	106576	218750	100523	121344	264685	1,12	0,88	0,83
7	1961	184543	199395	383937	195111	188415	372610	0,95	1,06	1,03
7	1974	177526	204743	382270	170465	212442	384201	1,04	0,96	0,99
7	1982	183507	226299	409806	187018	209651	387919	0,98	1,08	1,06
7	1989	182145	202662	384807	185956	196422	372447	0,98	1,03	1,03
9	1960	364475	79711	444219	319437	100638	429508	1,14	0,79	1,03
9	1991	300625	146352	447223	216470	206206	424958	1,39	0,71	1,05
10	1958	61491	500416	562168	60039	469762	575135	1,02	1,07	0,98
10	1971	50918	521271	572189	47269	465219	551244	1,08	1,12	1,04
10	1982	48625	526784	575436	42603	482352	573181	1,14	1,09	1,00
10	1989	43169	497441	540714	39220	458458	539675	1,10	1,09	1,00

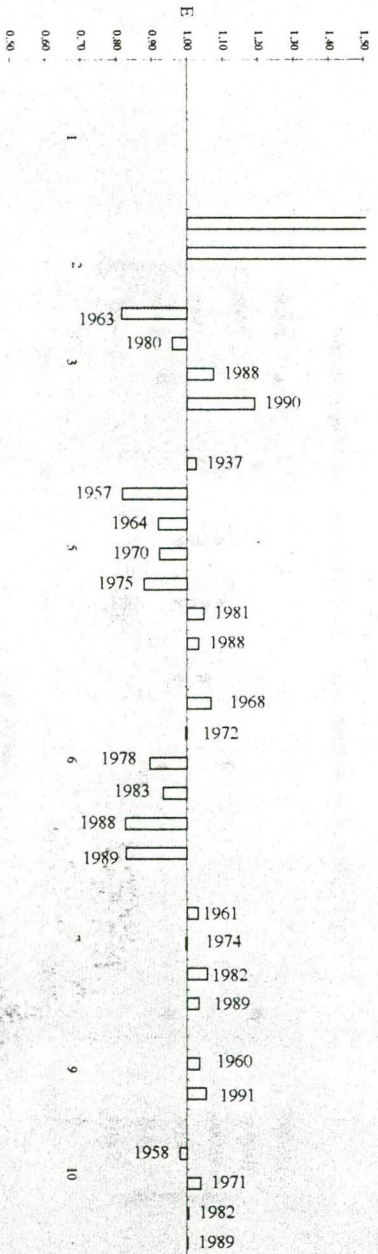
EBGETTEN
Een overzicht van E voor alle raaien in de tijd



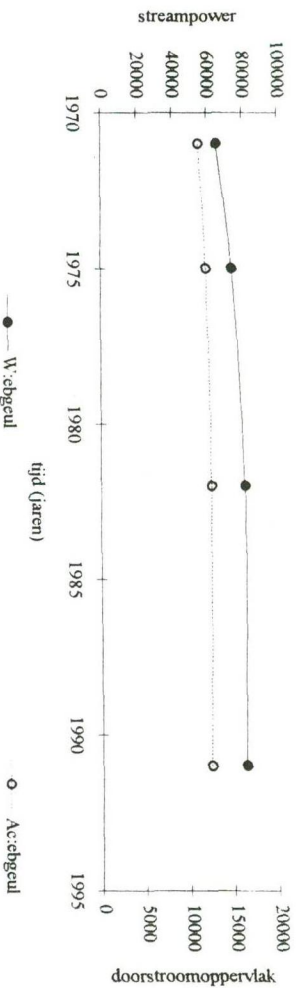
VLOEDGEULEN
Een overzicht van E voor alle raaien in de tijd



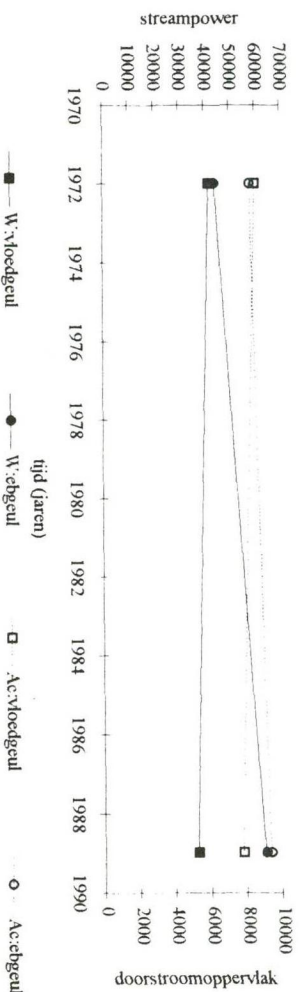
TOTALE GEUL
Een overzicht van E voor alle raaien in de tijd



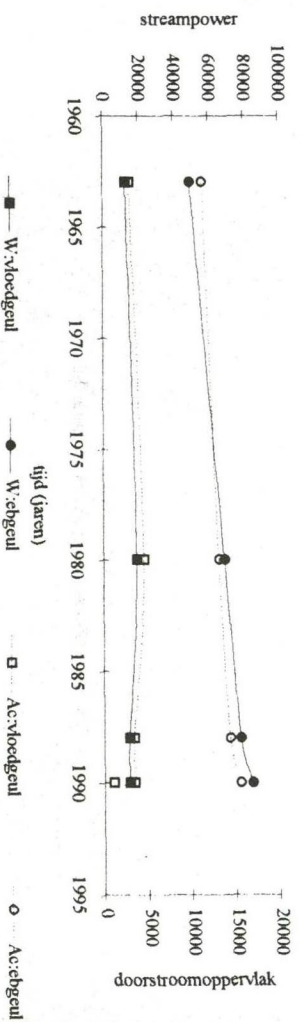
Raai 1
Overzicht van de streampower en het doorstromoppervlak in de tijd



Raai 2
Overzicht van de streampower en het doorstromoppervlak in de tijd



Raai 3
Overzicht van de streampower en het doorstromoppervlak in de tijd



Raai 5
Overzicht van de streampower en het doorstromoppervlak in de tijd

