

Opdrachtgever:

DG Rijkswaterstaat

Rijksinstituut voor Kust en Zee/RIKZ

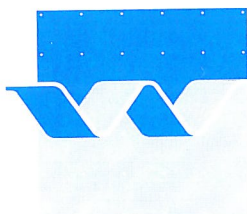
Morfologische interpretatie van de
veranderingen in het getij van de
Westerschelde

Verslag

juni 1999

Morfologische interpretatie van de veranderingen in het getij van de Westerschelde

Herman Gerritsen
Wang Zheng Bing
Arjan van der Weck



wL | delft hydraulics



OPDRACHTGEVER: Directoraat-Generaal Rijkswaterstaat
 Rijksinstituut voor Kust en Zee/RIKZ
 Postbus 20907
 2500 EX 's-Gravenhage

TITEL: **Morfologische interpretatie van de veranderingen in het getij van de Westerschelde**

SAMENVATTING: Uit analyse van waterstandsregistraties is gebleken dat de gemiddelde zeestand, het gemiddelde hoogwaterniveau en het tijverschil in de Westerschelde deze eeuw zijn toegenomen. Om de veiligheid tegen overstromen van de Westerschelde te kunnen blijven waarborgen is een beter begrip en grotere kwantitatieve kennis van het getijgedrag in het estuarium gewenst.

In eerdere analyses van het getij in de Westerschelde is doorgaans weinig aandacht besteed aan de relatie tussen veranderingen in de morfologie en de veranderingen in de getijkarakteristieken. Het huidige onderzoek richt zich juist op deze interactie. Het doel van het hier gerapporteerde onderzoek is het nader analyseren van de relatie tussen de morfologische veranderingen in de Westerschelde en de resultaten van eerder uitgevoerde getijanalyses. Onderdeel hiervan is het opstellen van hypothesen over de relatie tussen de opgetreden veranderingen in het getij en de morfologische veranderingen. Daarnaast worden aanbevelingen gedaan over de wijze waarop de geformuleerde hypothesen kunnen worden getoetst. Het onderzoek is aangepakt als een bureaustudie.

De resultaten van de studie laten zien dat een directe correlatie tussen veranderingen in de verschillende getijcomponenten en veranderingen in de morfologie niet aantoonbaar is. Door de grote hoeveelheid ingrepen en natuurlijke reacties daarop die in de onderzochte periode (1971 - 1997) in de Westerschelde zijn opgetreden, is een eenduidige oorzaak - gevolg relatie niet meer te achterhalen met behulp van eenvoudige correlatie. Wanneer echter wordt gekeken naar de veranderingen die zijn opgetreden in de vorm van de getijkromme blijkt correlatie met morfologische ontwikkelingen wel degelijk mogelijk.

Er zijn voorstellen gedaan om de gevonden correlaties nader te onderzoeken met behulp van modelberekeningen. Uit een korte analyse van de verschillende ter beschikking staande berekeningsmethoden komt naar voren dat een aanpak met behulp van 2D modellen hiervoor het meest geschikt is.

REFERENTIES: Offerte-aanvraag RIKZ/AB-99.60110, 8 maart 1999
 Herziene offerte MCM3064/Z2671/co, 8 april 1999
 Opdrachtbonnummer 67990984, 20 mei 1999

REV.	AUTEUR	DATUM	OPMERKINGEN	REVIEW	GOEDKEURING
1.0	A.W. vd Weck	Mei 1999	Concept	A. Roelfzema	
2.0	H. Gerritsen	23 - 6 - 99	Definitief	Z.B. Wang	T. Schilperoort

TREFWOORDEN	INHOUD	STATUS
morfologie, getijcomponenten, Westerschelde	TEKST: 21 bladzijden TABELLEN: 1 FIGUREN: 10 APPENDICES: A en B PROJECTNUMMER Z2671	<input type="checkbox"/> VOORLOPIG <input type="checkbox"/> CONCEPT <input checked="" type="checkbox"/> DEFINITIEF

Inhoud

1	Inleiding	1
1.1	Achtergrond en probleemstelling.....	1
1.2	Doelstelling.....	1
1.3	Aanpak	1
1.4	Indeling van het rapport	2
2	Observaties veranderingen getij en morfologie	3
2.1	Inleiding	3
2.2	Verdere interpretatie en analyse datarapport getijkomponenten.....	3
2.3	Observaties getijkenmerken.....	4
2.3.1	Observaties.....	4
2.3.2	Toelichting op de interpretatie van 9-jaarlijks gemiddelde getijkomponenten.....	5
2.4	Waarnemingen morfologie.....	5
2.4.1	Intergetijdegebied	6
2.4.2	Inhoudsveranderingen.....	6
2.4.3	Resultaten van de zandbalans	7
3	Interactie tussen morfologie en waterbeweging.....	9
3.1	Inleiding	9
3.2	Mechanismen die de interactie tussen morfologie en getij bepalen	9
3.2.1	Algemeen	9
3.2.2	Lineaire voortplanting van getijgolven.....	10
3.2.3	Niet-lineaire interactie	11
3.2.4	Getijasymmetrie.....	13
3.2.5	Invloed van het getij op de morfologie	14
3.3	Toepassing op de Westerschelde, hypothesen	15
4	Aanpak toetsing hypothesen	17
4.1	Gevoeligheidsanalyse interactie getij met morfologie van de Westerschelde	17
4.1.1	Sturing met een Basisgetij of een Springtij - Doodtij cyclus.....	17

4.1.2	Compenserende maatregelen en terugwaartse berekeningen	17
4.2	1D modellen	18
4.3	2D modellen	19
4.4	3D modellen	20
4.5	Aanbevelingen.....	21
5	Conclusies.....	23
6	Literatuur.....	25

Appendices

A Bespreekverslagen bijeenkomsten expertteam

B Figuren

I Inleiding

I.1 Achtergrond en probleemstelling

Uit analyse van waterstandsregistraties is gebleken dat de gemiddelde zeestand, het gemiddelde hoogwaterniveau en het tijverschil in de Westerschelde deze eeuw zijn toegenomen. In 1997 is de 43'/48' verdieping van de vaarroute in de Westerschelde in gang gezet, waardoor naar verwachting de hoogwaterstanden nog eens extra zullen stijgen. Zowel in Nederland als in België worden plannen gemaakt die de hoogwaterstanden naar alle waarschijnlijkheid verder zullen beïnvloeden. Om de veiligheid tegen overstromen van de Westerschelde te kunnen blijven waarborgen is een beter begrip en grotere kwantitatieve kennis van het getijgedrag in het estuarium gewenst. Bij geplande ingrepen kan hiermee gericht worden gewerkt aan compenserende maatregelen die ongewenste effecten op de hoogwaterstanden geheel of gedeeltelijk kunnen compenseren.

In opdracht van het Rijksinstituut voor Kust en Zee/RIKZ heeft WL | DELFT HYDRAULICS in 1998 een analyse uitgevoerd van getijkcomponenten in zes stations aan de Westerschelde, zoals bekend uit jaaranalyses gedurende de periode 1971-1997. Hierbij is gebruik gemaakt van Principal Component Analysis om de karakteristieke overeenkomsten en verschillen, alsmede veranderingen in de amplitudes en fases van de getijkcomponenten in ruimte en tijd zichtbaar te maken en te kwantificeren (Gerritsen & Van den Boogaard, 1998). In deze studie is beperkt aandacht besteed aan de relatie tussen veranderingen in de morfologie en de veranderingen in de getijkarakteristieken. Het huidige onderzoek richt zich juist op deze interactie.

I.2 Doelstelling

Het doel van het hier gerapporteerde onderzoek is het nader analyseren van de relatie tussen de morfologische veranderingen in de Westerschelde en de resultaten van de eerder door Gerritsen & Van den Boogaard (1998) uitgevoerde getijanalyse. Onderdeel hiervan is het opstellen van hypothesen over de relatie tussen de opgetreden veranderingen in het getij en de morfologische veranderingen. De basis hiervoor is de relatie tussen gesignaleerde trendbreuken in de fasen en amplituden van de getijkcomponenten en opgetreden veranderingen in de morfologie van de Westerschelde. Daarnaast worden aanbevelingen gedaan over de wijze waarop de geformuleerde hypothesen kunnen worden getoetst.

I.3 Aanpak

Het onderzoek is aangepakt als een bureaustudie, waarbij gebruik is gemaakt van reeds bestaande gegevens en onderzoeken. Belangrijk onderdeel van de studie betrof een aantal discussies tussen medewerkers van Rijkswaterstaat, Universiteit Utrecht, Technische Universiteit Delft en WL. De volgende werkzaamheden werden uitgevoerd:

- Het interpreteren van de resultaten van de eerder uitgevoerde data-analyses (Gerritsen & Van den Boogaard, 1998; Mol, 1999) in relatie tot morfologische veranderingen.

- Het consulteren van morfologen met kennis van de Westerschelde van Rijkswaterstaat, de Universiteit Utrecht, de Technische Universiteit Delft en WL | DELFT HYDRAULICS.
- Het opstellen van hypothesen over de relatie tussen opgetreden veranderingen in het getij en morfologische veranderingen.
- Het rapporteren van de interpretaties en hypothesen.

Het onderzoek is uitgevoerd door een projectgroep van medewerkers van WL | DELFT HYDRAULICS bestaande uit:

Wang Zheng Bing	morfoloog, Westerscheldekennis
Arjan van der Weck	morfoloog, Westerscheldekennis, rapportage
Herman Gerritsen	getijkennis, projectleider
Henk van den Boogaard	statistische analyse en interpretatie

Het projectteam heeft de resultaten van eerdere onderzoeken geanalyseerd vanuit het gezichtspunt van de morfologische vraagstelling en de kennis van het systeem. Hierbij is gebruik gemaakt van de beschikbare literatuur. Deze analyse heeft geleid tot een eerste concept van dit rapport met interpretaties, conclusies en hypothesevorming over de relatie tussen getijveranderingen en morfologische veranderingen. Dit concept werd besproken met een expertteam, bestaande uit externe specialisten op het gebied van getij en morfologie van de Westerschelde. Bij de start van het project zijn met de leden van dit team brainstormsessies gehouden. Korte verslagen van deze bijeenkomsten zijn opgenomen in appendix A. De resultaten van de bespreking van het concept-rapport zijn rechtstreeks verwerkt in het huidige rapport. De leden van het expertteam waren:

Prof.dr.ir. J.A. Battjes	TUD, getij
Prof.dr.ir. H.J. de Vriend	TUD, morfologie
Dr. J.H. van den Berg	UU, fysisch geograaf, morfologie Westerschelde
Ir. A. Langerak	RIKZ, getij en morfologie Westerschelde
Ir. J.G. de Ronde	RIKZ, getijexpert

1.4 Indeling van het rapport

Het voorliggende rapport geeft eerst een overzicht van de waargenomen veranderingen in het getij en de morfologie van de Westerschelde (hoofdstuk 2). Vervolgens wordt in hoofdstuk 3 ingegaan op de mechanismes van de relaties tussen waterbeweging en morfologie. In dit hoofdstuk wordt daartoe eerst enige relevante literatuur samengevat, wordt vervolgens een overzicht gegeven van de observaties en wordt tenslotte op basis van deze literatuur en veldwaarnemingen getracht een causaal verband te leggen tussen veranderingen in het getij en de morfologie van de Westerschelde. Dit leidt tot de formulering van nieuwe hypothesen en tot bevestiging van enkele reeds eerder geponeerde verbanden. In hoofdstuk 5 worden aanbevelingen gedaan voor het toetsen van deze hypothesen. In hoofdstuk 6 tenslotte worden de belangrijkste konklusies en aanbevelingen uit dit rapport nog eens samengevat.

2 Observaties veranderingen getij en morfologie

2.1 Inleiding

Het getij in de Westerschelde kan worden gezien als een golfbeweging die wordt aangedreven door de waterstandsvariaties op de Noordzee en de afvoer van de Schelde (bij verwaarlozing van meteorologische invloeden). De uiteindelijke vorm van deze golfbeweging wordt bepaald door deze randvoorwaarden en de geometrie van het bekken: de geomorfologie van de Westerschelde. Veranderingen in de morfologie van de Westerschelde zullen dus invloed hebben op de waterbeweging, terwijl de waterbeweging op haar beurt de morfologie van het bekken mede bepaalt. In het recente verleden is reeds een groot aantal studies uitgevoerd naar de veranderingen die in de loop van de tijd zijn opgetreden in de morfologie van de Westerschelde (zie bijvoorbeeld Uit den Bogaard, 1995; Huijs, 1995, 1996; Vroon, Storm & Coosen, 1997; Van der Slikke, 1997) en de waterbeweging in de Westerschelde (zie bijvoorbeeld Gerritsen & Van den Boogaard, 1998; Mol, 1999). Aanzienlijk minder literatuur is beschikbaar over de interactie tussen veranderingen in de waterbeweging van de Westerschelde en de morfologie (zie bijvoorbeeld Pieters & Verspuy, 1997). Naast een goede beschrijving van de historische ontwikkelingen is juist kennis over die interactie van cruciaal belang bij het ontwikkelen van inzicht in de gevolgen van ingrepen in de morfologie van de Westerschelde op de waterbeweging en daarmee de veiligheid van het estuarium.

In het navolgende wordt een kort overzicht gegeven van de veranderingen die zijn opgetreden in de waterbeweging en de morfologie van de Westerschelde.

2.2 Verdere interpretatie en analyse datarapport getijkomponenten

Aan de hand van de resultaten van de eerder uitgevoerde getijanalyse Westerschelde (Gerritsen & Van den Boogaard, 1998) en de uitvoerig beschreven veranderingen in de morfologie van de Westerschelde (waarvan in het onderstaande een zeer korte samenvatting is gegeven), is getracht een verband te leggen tussen veranderingen in de hoofdkomponenten van het verticale getij. Uitgangspunt was het ruimte - tijd gedrag van de fasen en amplitudes van de twee-, vier- en zesmaaldaagse getijkomponenten en de veranderingen in de morfologie zoals deze beschreven is in de in de vorige sectie geciteerde literatuur. Via diverse schema's en tabellen van diverse complexiteit is gepoogd veranderingen in de tijd en de plaats onderling te correleren. Hierbij bleek dat een dergelijk verband niet kan worden afgeleid uit de beschikbare gegevens. Gedurende de gehele onderzochte periode treden veranderingen op in zowel de morfologie als de waterbeweging. Correlaties zijn niet te leggen door het grote aantal tegengestelde ontwikkelingen tussen getij en morfologie en de verschillende getijkomponenten onderling. Het enige (zeer algemene) verband dat kan worden vastgesteld is dat in de jaren '70 grote veranderingen

optraden in waterbeweging en morfologie en dat de veranderingen na 1985 over het algemeen minder snel zijn gaan verlopen. Ook op deze algemene waarneming zijn echter nog tal van uitzonderingen te vinden, met name in het oostelijke deel van de Westerschelde.

Belangrijkste oorzaak voor het niet kunnen leggen van een verband is de combinatie van verschillende reactietijden tussen waterbeweging en morfologie (de waterbeweging reageert vrijwel instantaan op veranderingen, terwijl de morfologie tenminste enige jaren nodig heeft om zich aan te passen aan grote ingrepen) met de zeer omvangrijke menselijke invloed op de Westerschelde gedurende de gehele onderzochte periode. Kenmerkend voor deze menselijke activiteit is bovendien de sterke variatie in tijd en plaats. Verondersteld mag worden dat wanneer de onderzochte periode wordt uitgebreid met een aantal jaren waarin minder ingrepen hebben plaatsgevonden (bijvoorbeeld de jaren '50 en '60) er meer en sterkere verbanden zijn te herkennen. Tevens kan worden overwogen een verband te zoeken tussen het horizontale getij en de morfologie, daar een dergelijk verband (zoals eerder opgemerkt) meer voor de hand ligt. Op basis van de beschikbare getijkcomponenten en de morfologische gegevens zijn dit soort verbanden echter niet te leggen.

2.3 Observaties getijkenmerken

In deze paragraaf wordt een kort overzicht gegeven van de relatieve veranderingen t.o.v. het station Vlissingen die in de periode 1971 tot 1997 zijn opgetreden in de belangrijkste getijkcomponenten van de zes stations uit (Gerritsen en Van den Boogaard, 1998). Opgemerkt wordt daarbij dat hierbij uitsluitend wordt gekeken naar de amplitude en de fase van het verticale getij. Stroomsnelheden zijn bij deze analyse niet betrokken, wat een belangrijk nadeel zal blijken te zijn bij het leggen van een koppeling tussen getij en morfologie. De figuren 1.1 - 1.12 geven per station voor 13 getijkcomponenten de amplitude en fase relatief ten opzichte van die van Vlissingen. In navolging van Speer *et al.* (1991) worden in figuur 2.1 de parameters uitgezet die relevant zijn voor de asymmetrie van de getijgolf, samengesteld uit M_2 en M_4 . In figuur 2.2 wordt hetzelfde gedaan voor het paar M_2 en M_6 .

2.3.1 Observaties

- Voor de M_2 componenten zijn er twee kenmerkende ontwikkelingen te herkennen: de amplificatiefactor in het oostelijke deel van het estuarium is toegenomen en het faseverschil met de monding is kleiner geworden (figuur 1).
- In het verloop van de verschillende getijkcomponenten zijn relatief grote veranderingen over korte perioden herkenbaar (vooral in het verloop van de vier- en zesmaaldaagse componenten) (figuur 1).
- Wanneer de ontwikkelingen in het verloop van de getijkcomponenten (faseverschillen en amplitudeveranderingen) per deelgebied worden bekeken (mondning, westelijk-, midden- en oostelijk deel van de Westerschelde), kunnen perioden worden herkend waarin per deelgebied relatief grote veranderingen zijn opgetreden. In het mondingsgebied en het westelijke deel van de Westerschelde zijn van 1970 tot 1985 in drie perioden van vijf jaar relatief sterke veranderingen opgetreden. Na 1985 zijn fasen en amplitudes ongeveer constant. In het middendeel zijn faseverschillen en amplitudes in de jaren '70 afgenomen, afgesloten met een sterke afname in 1980. Na die tijd zijn faseverschillen en

amplitudes ongeveer constant gebleven. Het oostelijke deel van de Westerschelde geeft voor het verloop van de verschillende getijkomponenten het minst eenduidige beeld te zien. Gedurende de gehele periode treden veranderingen op, voor de verschillende componenten niet zelden in tegengestelde richting. Rond 1980 is een sterke toename van de faseverschillen (viermaaldaags en zesmaaldaags) te herkennen.

- De grote sprongen in het verloop van de viermaaldaagse en zesmaaldaagse componenten van de stations Hansweert en Bath lopen synchroon in de tijd (begin jaren '80) maar zijn tegengesteld van teken (figuur 1).
- Wanneer wordt gekeken naar de voor asymmetrie maatgevende fasesamenstellingen van de fases van de verschillende componenten ($2M_2-M_4$ en $3M_2-M_6$) wordt het beeld aanzienlijk consistent: de getijasymmetrie neemt over het algemeen af, met name in het oostelijk deel van de Westerschelde (figuur 2).
- De faseverschillen $2M_2 - M_4$ in Hansweert en Bath zijn tegengesteld van teken (figuur 2).

Getijasymmetrie betekent een verschil in steilheid van de opgaande en neergaande flank van de getijcurve. Figuur 10 toont enkele voorbeelden voor verschillende faseverschillen.

2.3.2 Toelichting op de interpretatie van 9-jaarlijks gemiddelde getijkomponenten

In Mol (1999) is het verloop van de amplituden van 13 getijkomponenten voor het station Westkapelle uitgezet voor de periode van 1971 tot 1997, zowel als jaarlijkse waarden als ook gefilterd met een 9-jaarlijks lopend gemiddelde. De gefilterde resultaten zijn weergegeven voor de periode van 1975 tot 1993 (19 jaar). Over deze 19 jaar tonen de figuren een bij benadering lineaire trend met daarop gesuperponeerd een cyclisch gedrag met een periode van orde 19 jaar. Voor een deel zal deze cyclische component verklaard kunnen worden uit het feit dat de getijanalyse uitgevoerd wordt met parameterisaties van de 18,6 jaarlijkse getijvariaties (de astronomische knooppactoren f en u voor respectievelijk amplitude en fase). Uit de literatuur is immers bekend dat deze op het evenwichtsgetij gebaseerde en plaatsonafhankelijke correcties voor werkelijk getij in sterk niet-lineaire gebieden niet voldoen en de 18,6-jaarlijkse variaties niet geheel compenseren (Amin, 1976). In deze gebieden dient de correctie met de plaats te variëren. Rijkswaterstaat heeft daarom in het verleden als extra correctie reeds de zogenaamde X-factoren ingevoerd en de grootte daarvan voor de individuele hoofdstations bepaald. Voor een ander deel zal de variatie in het gefilterde signaal direct samenhangen met de variatie in het niet-gefilterde signaal. Dit lijkt met name voor $2SM_2$ zo te zijn.

De toepassing van het filter verwijdert variaties met tijdschalen kleiner dan orde negen jaar, waaronder de karakteristieke en onfysische 4,5 jaar cycli in bijvoorbeeld de componenten MU_2 en NLK_2 . Het detecteren van mogelijke correlaties met karakteristieke veranderingen in de morfologie is hiermee echter niet beter geworden omdat de herkenbaarheid van veranderingen in het getij na filtering juist verminderd is.

2.4 Waarnemingen morfologie

Voor een beschrijving van de morfologische veranderingen die de afgelopen decennia zijn opgetreden in de Westerschelde (al dan niet ten gevolge van menselijk handelen) wordt

verwezen naar de rapportages die zijn opgesteld voor het Oostwest project (Westerschelde van Vlissingen tot aan de Belgische grens) (Vroon *et al.*, 1997) en het Kust2000 project (mondingsgebied) (Van der Slikke, 1997). Hieronder volgt een samenvatting van de voor het huidige onderzoek meest relevante conclusies uit die onderzoeken.

2.4.1 Intergetijdegebied

In de onderzochte periode (1971 tot 1997) is het areaal slikken en schorren (grenzend aan de vaste oever) afgenomen, deels ten gevolge van inpolderingen (Huijs, 1995). De afname is in het westelijke deel groter dan in het oostelijk deel. Het plaatareaal (omringd door water) is in totaal over de onderzochte periode toegenomen, al is het na 1980 weer iets afgenomen. De grootste toename heeft plaatsgevonden in het oostelijk deel van de Westerschelde (figuur 3, Huijs 1995), met name in het begin van de jaren '70. In het middendeel is het plaatareaal de laatste decennia licht toegenomen en in het westelijk deel is het plaatareaal na een lichte stijging in de jaren '70 sterk afgenomen in de jaren '80.

De plaathoogte is in de gehele Westerschelde vanaf 1971 sterk toegenomen (figuur 4, Huijs, 1995). In het westelijke deel is de plaathoogte vooral in de jaren '70 sterk gestegen en daarna ongeveer constant gebleven. In het middendeel heeft de grootste toename in de tweede helft van de jaren '70 plaatsgevonden en in het oostelijke deel is de sterkste stijging van de plaathoogte in de jaren '80 opgetreden (Huijs, 1995).

2.4.2 Inhoudsveranderingen

In de periode 1971-1997 zijn de geulen in het oostelijke en het westelijke deel van de Westerschelde ('natte inhoud' van alle delen onder NAP -2 meter) ruimer geworden. De snelste verruiming is opgetreden halverwege de jaren '70 en begin jaren '80 (Vroon *et al.*, 1997; Mol *et al.*, 1997; Huijs, 1996). Er zijn enige regionale verschillen te herkennen in het verloop van het geulvolume: de sterkste toename is opgetreden in het oostelijk deel van de Westerschelde (figuur 5). In het middendeel is het geulvolume in tegenstelling tot beide andere delen zelfs iets afgenomen (figuur 6) en in het westelijk deel was de absolute toename vergelijkbaar met het oostelijk deel, maar relatief minder sterk wegens de veel grotere natte inhoud van het westelijke deel.

Tegelijkertijd met de toename van het geulvolume is ook het plaatvolume ('droge inhoud' van alle delen boven NAP -2 meter) sterk gegroeid, met name in de jaren '70 (Vroon *et al.*, 1997). De regionale verschillen bij deze plaatopbouw zijn vrij groot. In het oostelijke deel is de plaatopbouw in de periode 1971-1997 absoluut en relatief het sterkst (van 1971 tot 1993 is de plaatinhoud bijna 2,5 maal groter geworden). In het middendeel is de plaatinhoud over de gehele periode gezien afgenomen, maar er is wel een tweetal perioden herkenbaar waarin ook daar sterke plaatopbouw plaatsvond (tweede helft jaren '70 en tweede helft jaren '80). In het westelijk deel is de plaatinhoud over de gehele periode gezien niet veel veranderd, maar daar heeft in de jaren '80 wel een snelle opbouw plaatsgevonden, gevolgd door een snelle afbraak.

2.4.3 Resultaten van de zandbalans

Observaties:

- De vijfjaarlijks gemiddelde netto oostwaartse transporten tussen het middendeel en het westelijk deel (vak 4 - vak 3) zijn toegenomen en die tussen het middendeel en het oostelijk deel (vak 3 - vak 2) zijn afgenomen (Uit den Bogaard, 1995) (figuur 7).
- De vijfjaarlijks gemiddelde transporten over de genoemde vakgrenzen waren tot in de tweede helft van de jaren '80 tegengesteld van teken, zodanig dat er van twee zijden netto transport richting het middendeel van de Westerschelde plaatsvond (figuur 7).

3 Interactie tussen morfologie en waterbeweging

3.1 Inleiding

Na beschrijving van de veranderingen in de morfologie en de waterbeweging zal in het navolgende worden getracht de relatie tussen deze veranderingen te verduidelijken. Hierbij zal zowel worden gekeken naar correlatie tussen beide factoren als naar adequate verklaring van deze correlatie aan de hand van proceskennis.

3.2 Mechanismen die de interactie tussen morfologie en getij bepalen

3.2.1 Algemeen

Om de waargenomen ontwikkelingen van het getij in de Westerschelde gedurende de beschouwde periode te kunnen begrijpen wordt de interactie tussen getij en morfologie hier nader theoretisch beschouwd. De invloed van veranderingen in de morfologie en de bekkenconfiguratie op het getij worden nader geanalyseerd om een verband te kunnen leggen tussen de waargenomen veranderingen van het getij en de morfologische ontwikkelingen in dezelfde periode. De invloed van het getij op de morfologie wordt ook beschouwd omdat het nodig is voor het begrijpen van de morfologische ontwikkelingen en omdat de kennis hiervan nodig is voor voorspellingen van ontwikkelingen in de toekomst.

De analyse zal worden beperkt tot de hoofdkomponenten van het getij, namelijk de belangrijkste dubbeldaagse, vierdaagse en zesdaagse componenten. De huidige studie laat niet veel meer toe dan een ééndimensionale beschouwing hoewel de stroming in een estuarium zoals de Westerschelde formeel driedimensionaal is. Voor beschrijving van het grootschalige morfologisch gedrag is de verticale component echter minder relevant, zodat een tweedimensionale beschouwing adequaat is. Een ééndimensionale beschouwing betekent dat de horizontale circulatie zoals bijvoorbeeld optreedt binnen een eb- en vloedgeulen systeem niet kan worden geanalyseerd, hoewel dat voor morfologische veranderingen heel belangrijk is en menselijke ingrepen (baggeren en storten) hierop grote invloed hebben.

Om de invloed van morfologische veranderingen op het getij in een estuarium te begrijpen moeten wij de waterbeweging in het estuarium nader beschouwen. Het getij dat vanaf de zee een estuarium binnendringt wordt vertraagd en vervormd. Voor elke getijkomponent geldt dat voor een bepaald station een amplificatiefactor (= verhouding amplitude ten opzichte van die bij de monding) en een faseverschil (ten opzichte van de monding) aanwezig is. Er wordt van uitgegaan dat veranderingen van deze twee parameters direkt te relateren zijn aan de morfologische veranderingen binnen het estuarium.

Bij deze beschouwing moet onderscheid worden gemaakt tussen het dubbeldaagse getij en de hogere harmonische componenten. Veel inzicht in het gedrag van de dubbeldaagse componenten kan men krijgen door gebruik te maken van lineaire getijvoortplantingstheorie terwijl het gedrag van de hogere harmonische componenten sterk door niet-lineaire interactie wordt beïnvloed.

3.2.2 Lineaire voortplanting van getijgolven

Dronkers (1964) beschouwde getijvoortplanting binnen een prismatisch bekken met analytische oplossingen van de volgende gelineariseerde vergelijkingen:

$$b_0 \frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = 0$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + gA_0 \frac{\partial \eta}{\partial x} + \lambda Q = 0$$

Hierin is:

- η = waterniveau
- b_0 = (bergende) breedte estuarium
- A_0 = oppervlakte dwarsprofiel
- Q = debiet
- g = versnelling van zwaartekracht
- λ = $\frac{8}{3\pi} \frac{gQ_m}{C^2 A_0 h_0}$ = wrijvingscoëfficiënt
- Q_m = maximale debiet
- C = Chézy coëfficiënt
- h_0 = waterdiepte
- t = tijd
- x = horizontale coördinaat

Uit deze vergelijkingen kan worden afgeleid dat de voortplantingssnelheid van een lopende getijgolf in het geval zonder weerstand ($\lambda = 0$) gelijk is aan:

$$c_0 = \sqrt{\frac{gA_0}{b_0}}$$

Onder invloed van de weerstandsterm wordt de voortplantingssnelheid kleiner:

$$c = \frac{c_0}{\sqrt{\frac{1}{2} + \frac{1}{2} \sqrt{1 + s_1^2}}} = c_0 \sqrt{1 - \text{tg}^2 \theta} \quad \text{met} \quad \text{tg} 2\theta = s_1$$

Uit deze vergelijkingen blijkt direct dat het faseverschil tussen het getij in het estuarium en dat bij de monding zal veranderen door morfologische veranderingen. In het algemeen is het gedrag van getij in een estuarium echter gecompliceerder door het feit dat de golf terugkaatst, waardoor het getij in een estuarium zoals de Westerschelde het gedrag tussen

een lopende golf en een staande golf vertoont. Voor een gesloten bekken wordt het gedrag van een harmonische getijgolf bepaald door twee parameters:

$$s_1 = \frac{\lambda}{\omega}$$

$$s_2 = \frac{2\omega l}{c_0}$$

In figuur 8 (Dronkers, 1964) wordt de verhouding tussen de amplitude achterin het bekken ten opzichte van die bij de monding als functie van deze twee parameters weergegeven. Hoewel deze oplossing gebaseerd is op een sterke vereenvoudiging van het estuarium (geometrie/bathymetrie constant over de hele lengte), geeft het wel nuttig inzicht in de invloed van morfologische veranderingen op getijvoortplanting in het estuarium. Parameter s_1 representeert het belang van de weerstand, s_2 is direct gerelateerd aan de verhouding tussen de lengte van het bekken en de getijgolfenlengte. Verhoging van de parameter s_1 leidt altijd tot extra demping van het getij, dus een afname van de getijamplitude in het estuarium. De invloed van een verandering van s_2 hangt echter af van in welke range de parameter zelf zit.

Het mechanisme van afname van de getijamplitude door toevoeging van extra komberging, zoals beschreven door Pieters & Verspuy (1997), kan inzichtelijk worden gemaakt door te kijken naar de verandering van s_1 . Extra komberging veroorzaakt een groter debiet benedenstreams, waardoor de coëfficiënt λ groter wordt, en dus ook parameter s_1 .

3.2.3 Niet-lineaire interactie

Voor de hogere harmonische componenten, de vierdaagse en zesdaagse getijden, is de toepassing van lineaire theorie zoals hierboven beschreven niet meer voldoende omdat deze componenten niet alleen vanaf zee komen maar ook binnen het estuarium worden gegenereerd door niet-lineaire interacties. Parker (1991) geeft een review van de niet-lineaire interactie mechanismen met behulp van een 1D model dat wordt beschreven door de volgende momentum- en continuïteitsvergelijkingen:

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{1}{b} \frac{\partial}{\partial x} (b(h + \eta)u) = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} = -g \frac{\partial \eta}{\partial x} - \frac{g}{C^2} \frac{1}{h + \eta} |u|u \quad (2)$$

hierin is:

- η = waterniveau
- b = breedte van het estuarium
- h = waterdiepte onder gemiddeld waterniveau
- u = stroomsnelheid
- g = versnelling van zwaartekracht
- C = Chézy coëfficiënt
- t = tijd

x = horizontale coördinaat

Uit deze vergelijkingen blijkt dat de relevante morfologische parameters de breedte en de diepte zijn. Bij de breedte moet men eigenlijk ook onderscheid maken tussen de bergende breedte en de stroomvoerende breedte. De Chézy coëfficiënt wordt eigenlijk ook beïnvloed door de morfologie via de diepte (c.q. hydraulische straal) en de ruwheidshoogte (c.q. beddingvormen ofwel microschaal morfologie).

Er zijn drie niet-lineaire termen in het stelsel vergelijkingen: de niet-lineaire term in de continuïteitsvergelijking $\partial(\eta u) / \partial x$ en de twee termen in de momentum-vergelijking, de traagheidsterm $u \partial u / \partial x$ en de weerstandsterm. De weerstandsterm heeft twee niet-lineaire aspecten, het kwadratische deel $u|u|$ en de waterstand in de noemer. Het laatste kan worden gerepresenteerd door $\eta u|u|$.

De termen $\partial(\eta u) / \partial x$ en $\eta u|u|$ zijn vooral voor de opwekking van het viermaaldaagse getij van belang. Wanneer reststroming aanwezig is is $u|u|$ ook belangrijk voor het genereren van viermaaldaagse getijden. Theoretisch kan de term $u \partial u / \partial x$ ook viermaaldaagse getijden genereren maar deze term is meestal van ondergeschikt belang ten opzichte van de andere termen. Voor de opwekking van zesmaaldaagse getijden is vooral de weerstandsterm $u|u|$ van belang. Deze theoretische achtergronden zijn belangrijk om de waargenomen veranderingen in het estuarium te interpreteren. Hierbij moet vooral gekeken worden naar hoe de coëfficiënten van de verschillende termen veranderen ten gevolge van morfologische veranderingen.

Opgemerkt wordt dat bij deze beschouwing van Parker (1991) een belangrijke vereenvoudiging is gehanteerd: de bergende breedte en de stroomvoerende breedte zijn gelijk gehouden en onafhankelijk van de waterstand verondersteld. Door de afhankelijkheid (in werkelijkheid) van de bergende breedte van de waterstand ontstaat er een ander niet-lineair aspect dat ook viermaaldaagse getijden genereert. Dit aspect is voor estuaria erg belangrijk vanwege de aanwezigheid van de intergetijdgebieden.

In de beschouwing van Speer *et al.* (1991) wordt juist dit aspect benadrukt. De auteurs onderzoeken de invloed van de estuariumgeometrie op het karakter van de intern opgewekte niet-lineaire getijkomponenten. Als bepalende grootheden hiervoor veronderstellen zij de amplitude/diepteverhouding van het ingaande getij, en de verhouding van intergetijdgebied t.o.v. geulen. Ze beschouwen een ideaal ondiep kanaal van 7 km lengte, opgebouwd uit prismatische kanalen voor het massatransport en ondiepe hellende intergetijdgebieden die voor berging dienen. Aan de monding wordt een M_2 getij voorgeschreven. Aan de hand van 84 numerieke berekeningen en parameterkombinaties wordt aangetoond dat het karakter van de intern gegenereerde viermaaldaagse getijkomponenten, d.w.z. eb-dominantie of vloed-dominantie, inderdaad door deze twee morfologische parameters worden bepaald: de verhouding tussen de getijamplitude en de gemiddelde waterdiepte a/h en de verhouding tussen het getijprisma en het geulvolume onder het gemiddelde waterniveau V_s/V_c , zie figuur 9. Ruwweg gesproken is er voor $a/h > 0.3$ vloed-dominantie, en voor $a/h < 0.2$ eb-dominantie. Voor tussenliggende waarden bepaalt de waarde van V_s/V_c wat het karakter is. Speer *et al.* (1991) laten zien dat het gedrag van een zestal estuaria aan de Amerikaanse oostkust inderdaad deze hypothese bevestigen. Voor alle zes estuaria geldt dat zij vrij goed aan de aannames van het schematisch estuarium voldoen.

3.2.4 Getijasymmetrie

Opgemerkt wordt dat de viermaaldaagse getijkomponenten belangrijk zijn voor de getijasymmetrie, wat weer erg belangrijk is voor de morfologische ontwikkelingen in estuaria. Zowel de amplitudeverhouding als het faseverschil ten opzichte van de dubbeldaagse componenten zijn daarbij van belang. Ook uit de analyse van Dronkers (1986) blijkt dat de intergetijdegebieden van groot belang zijn voor de getijasymmetrie. Uit zijn analyse wordt geconcludeerd dat

$$\Delta t_{vloed} - \Delta t_{eb} \propto H^- H_k^- - H^+ H_k^+$$

Het verschil tussen de vloedduur en de ebduur is een maat voor de getijasymmetrie en H is waterdiepte en $H_k = Hb_s/b$, b_s = stroomvoerende breedte en b = bergende breedte. Met de superindex - wordt laagwater bedoeld en + hoogwater.

Het relatieve faseverschil tussen het vierdaagse getij M_4 en het dubbeldaagse getij M_2 is

$$\Delta\theta = 2\theta_2 - \theta_4$$

Hierin is:

- θ_2 = de fase van het dubbeldaagse getij M_2
- θ_4 = de fase van het viermaaldaagse getij M_4

Dit faseverschil zegt iets over de vorm van de getijkromme, zoals eerder geïllustreerd in figuur 2. Voor $\Delta\theta = 0$ geldt dat het getij symmetrisch is (de waterstand stijgt even snel als hij daalt), maar het laagwater duurt veel langer dan het hoogwater (figuur 10). Voor $\Delta\theta = \pi$ geldt ook dat het getij symmetrisch is maar dan duurt het hoogwater langer dan het laagwater. In het algemeen is het getij asymmetrisch. Voor $0 < \Delta\theta < \pi$ geldt dat de waterstand sneller stijgt dan hij daalt en voor $0 > \Delta\theta > -\pi$ geldt het omgekeerde. De asymmetrie is maximaal bij $\Delta\theta = \pm\pi/2$ (figuur 10).

De asymmetrie van verticale getij heeft direkt invloed op het horizontale getij. Uit de continuïteitsvergelijking is af te leiden dat voor een willekeurig deel van een bekken tussen x_1 en x_2 geldt:

$$Q_1 - Q_2 = \int_{x_1}^{x_2} b(x) \frac{\partial \zeta}{\partial t} dx$$

waarbij

- Q_1 = het debiet bij x_1
- Q_2 = het debiet bij x_2
- b = de bergende breedte

De tijdsafgeleide van de waterstand beïnvloedt dus sterk de grootte van de debiet. Voor het geval dat de waterstand sneller stijgt dan daalt (zoals bij $\Delta\theta = \pi/2$) is de piekwaarde van het vloeddebet (dus ook de stroomsnelheid) groter dan die van het ebdebet en de vloedduur kleiner dan de ebduur. In dit geval spreekt men van vloeddominantie. Het omgekeerde geval noemt men ebdominant. Omdat het sedimenttransport sterk niet-lineair afhankelijk is van de stroomsnelheid is het netto transport bij vloed-dominantie in de vloedrichting (als de reststroming buiten beschouwing wordt gelaten).

Opgemerkt wordt dat voor $\Delta\theta = 0$ laagwaterkentering langer duurt dan de hoogwaterkentering. Dit is ook een vorm van asymmetrie. Deze vorm van asymmetrie heeft

invloed op het netto sedimenttransport in geval van zwevend transport van relatief fijn sediment. Verder wordt dit effect hier buiten beschouwing gelaten.

Het relatieve verschil tussen het zesdaagse getij en het dubbeldaagse getij is

$$\Delta\theta = 3\theta_2 - \theta_6$$

Hierin is:

θ_6 = de fase van het zesmaal daagse getij

Dit faseverschil veroorzaakt op zich geen verschil in vloed- en ebduur in de getijkromme, zoals figuur 10 laat zien. Deze zijn gelijk voor een willekeurige waarde van $\Delta\theta$. Voor $\Delta\theta = 0$ is het getij volledig symmetrisch. Voor $\Delta\theta = \pi/2$ is het verticale getij symmetrisch, maar er kan dan wel asymmetrie ontstaan in het horizontale getij als er intergetijdegebied aanwezig is. Zowel in de periode van waterstandsvaling als in de periode van waterstandsstijging is er een langzame periode en een snelle periode. Maar de periode van snelle stijging vindt plaats bij een hogere waterstand dan de periode van snelle daling. Dit heeft als gevolg dat de piekwaarde van de snelheden bij vloed hoger is dan de piekwaarde van de snelheden bij eb. Dit omdat in een estuarium met droogvallende platen bij een hogere waterstand het kombergingsoppervlak groter is.

3.2.5 Invloed van het getij op de morfologie

Bij het beschouwen van de invloed van het getij op de morfologie is het horizontale getij veel belangrijker dan het verticale getij. Voor deze studie wordt echter alleen gekeken naar het verticale getij. Natuurlijk is er een verband tussen de twee. Bij een bekende geometrie is het in principe mogelijk het horizontale getij uit het verticale getij af te leiden via de continuïteitsvergelijking. Bij een dergelijke beschouwing kunnen de horizontale circulaties, zoals binnen een eb- en vloedgeul systeem, echter niet in rekening worden gebracht.

Er blijven dan twee aspecten over die kunnen worden beschouwd met betrekking tot de invloed van het getij op de morfologie, namelijk het getijvolume en de getijasymmetrie. Volgens empirische relaties heeft een estuarium meestal de neiging om het oppervlak van het dwarsprofiel aan te passen aan het getijvolume. Er bestaat een bijna lineaire relatie tussen die twee. Een toename van getijamplitude leidt tot vergroting van het getijvolume wat weer leidt tot een grotere evenwichtsoppervlakte van het dwarsprofiel. Merk op dat ook een verkleining van het faseverschil ten opzichte van de monding leidt tot een vergroting van het getijvolume door betere vulling van het getijprisma (Vroon *et al.*, 1997).

Zoals hierboven reeds opgemerkt is door de sterke niet-lineaire relatie tussen sedimenttransport en stroomsnelheid de getijasymmetrie erg belangrijk voor het netto transport in een estuarium zoals de Westerschelde, waarin de netto stroming erg klein is (zie Van de Kreeke & Robaczewska, 1993). De verticale zesmaaldaagse getijkomponenten veroorzaken op zich geen getijasymmetrie in de getijkromme. Als men naar het horizontale getij kijkt veroorzaken de zesdaagse componenten wel een asymmetrie in het getij, door de aanwezigheid van intergetijdegebieden.

3.3 Toepassing op de Westerschelde, hypothesen

Op basis van de in hoofdstuk 2 samengevatte observaties en de hierboven samengevatte theoretische beschouwingen over de relatie tussen morfologische veranderingen en veranderingen in het getij kunnen de volgende hypothesen worden opgesteld:

- *Ontwikkeling verschillende getijkomponenten.* In het verloop van de getijkomponenten is een paar duidelijk van elkaar te onderscheiden perioden te herkennen (figuur 1). Deze perioden komen deels overeen met perioden van grote morfologische activiteit in de Westerschelde: de eerste helft van de jaren '70 en de eerste helft van de jaren '80 (grote verdiepingen). Na 1985 is de waterbeweging in het grootste deel van het gebied relatief stabiel, met uitzondering van het meest oostelijke deel waar zowel amplitudes als looptijden van de belangrijkste getijkomponenten nog veranderingen ondergaan.
- *Verband morfologische veranderingen en ontwikkeling afzonderlijke getijkomponenten.* In het verloop van de fasen van de vier- en zesmaaldaagse componenten van bijna alle stations zijn relatief grote veranderingen in korte tijd herkenbaar, alhoewel niet overal op hetzelfde tijdstip en in de dezelfde richting (figuur 1). Deze snelle veranderingen kunnen niet worden gecorreleerd aan gelijktijdige en vergelijkbaar snel verloopende veranderingen in de morfologie.
- *Verband morfologische veranderingen en toename getijverschil.* De geulen van de Westerschelde zijn in de loop van de onderzochte periode ruimer geworden, terwijl de komberging is afgenomen door het toegenomen plaatvolume. Dit verklaart waarschijnlijk de toegenomen amplitude van de hoofdkomponenten van het getij en daarmee de toename van het getijverschil. Deze hypothese is eerder geformuleerd in (Vroon et al., 1997)
- *Verband morfologische veranderingen en vervroeging fase van het getij.* Door de toegenomen diepte in het estuarium is de voortplantingssnelheid van de getijgolf groter geworden. De verklaring hiervoor is waarschijnlijk de als gevolg van intensief baggerwerk toegenomen geuldiepte, waardoor de voortplantingssnelheid is toegenomen en de weerstandscoefficiënt kleiner is geworden. Dit is een bevestiging van de hypothese uit (Vroon et al., 1997)
- *Verband morfologische ontwikkelingen en getijasymmetrie.* Met betrekking tot het faseverschil tussen M_4 en M_2 (figuur 2), dat een maat is voor de getijasymmetrie, zijn er twee opvallende observaties:
 1. In Hansweert (middendeel van de Westerschelde) is het getij ebdominant terwijl in Bath (oostelijk deel) is het getij juist vloeddominant is.
 2. De mate van dominantie in beide stations is in de periode 1970-1985 afgenomen. In Hansweert wordt het getij minder ebdominant en in Bath wordt het minder vloeddominant. Dus niet alleen de dominantie, maar ook de ontwikkeling in de tijd is in de twee stations omgekeerd.

De afname van de getijasymmetrie in Hansweert en Bath correleert met de veranderingen van het diepere gedeelte van de betreffende delen van het estuarium. Een verklaring voor de tegengestelde ontwikkeling van de getijasymmetrie in beide stations

zou dan ook de tegengestelde morfologische ontwikkeling in het middendeel en het oostelijk deel van de Westerschelde kunnen zijn: de geulen in het middendeel zijn gemiddeld ondieper geworden terwijl de geulen in het oostelijk deel dieper zijn geworden in de onderzochte periode (figuur 5 en 6). De afname in de getijasymmetrie correleert voor zowel Hansweert als Bath met de afname in de vijfjaarlijkse netto transporten tussen respectievelijk het middendeel en het westelijke deel en tussen het middendeel en het oostelijke deel van de Westerschelde (figuur 7). Tevens kunnen correlaties gevonden worden tussen de afname van de getijasymmetrie en de vergroting van de gemiddelde plaathoogte en (minder sterk) de uitbreiding van het plaatareaal (figuren 3 en 4).

- De twee morfologische parameters a/h en V_s/V_c die volgens Speer *et al.* (1991) de getijasymmetrie bepalen hebben voor de Westerschelde de volgende waarden:

	Middendeel		Oostelijk deel	
	1970	1985	1970	1985
V_s/V_c	0,40	0,39	0,5	0,43
a/h	0,200	0,202	0,26	0,22

Hierbij is ervan uitgegaan dat het getijprisma V_s gelijk is aan het volume tussen NAP -2 en NAP +2 en dat de getijamplitude 2 meter is. V_c is het geulvolume onder gemiddeld waterniveau. Kwalitatief kan de theorie van Speer *et al.* (1991) op de data in de Westerschelde toegepast worden, zie ook Figuur 9. Uit Figuur 5 zien we dat het middendeel eb-dominant is, maar dat deze eb-dominantie afneemt en over gaat in vloed-dominantie. Bovenstaande tabel geeft dat eveneens een (beperkte) afname van de eb-dominantie aan. Het oostelijk deel heeft een (afnemende) vloed-dominantie, zie Figuur 5, terwijl de theorie van Speer *et al.* een gedrag op de grens van eb- en vloed-dominantie aangeeft. De afnemende vloeddominantie in de veldgegevens, Figuur 5, c.q. toenemende eb-dominantie is min of meer conform Speer *et al.*. Kwantitatief kunnen de verschillen nog wel verklaarbaar zijn vanwege het feit dat Speer's geïdealiseerde estuarium een wel heel sterke schematisatie van de Westerschelde is.

Toetsing van de hier gegeven hypotheses kan op verschillende manieren plaatsvinden. In het volgende hoofdstuk worden aanbevelingen gedaan voor de aanpak van deze toetsing.

4 Aanpak toetsing hypothesen

4.1 Gevoeligheidsanalyse interactie getij met morfologie van de Westerschelde

Voor de verdere analyse van de wederzijdse beïnvloeding van getij en morfologie in de Westerschelde zijn de responsietijd en de achterliggende vraagstelling van belang. Uit de literatuur is bekend dat de responsie van het getij op ingrepen, gewijzigde bekkengeometrie en morfologie zeer snel is: ongeveer vier maal de dempingstijdschaal van de getijgolf (literatuur). Voor de Westerschelde betekent dit maximaal enkele dagen. De tijdschaal van aanpassing van de morfologie op ingrepen bedraagt vele jaren. In het Westerscheldebekken met zijn voortdurende en gedistribueerde ingrepen van baggeren en storten is het zelfs de vraag of er van een echte evenwichtssituatie gesproken kan worden.

Vragen hoe het getij reageert op veranderingen van de morfologie kunnen goed met hydrodynamische getijmodellen (1D, 2D, 3D) onderzocht worden. De verschillen in detail, rekentijd en ervaring die er met de diverse modeltypen in Nederland bestaat maakt het nodig goed af te wegen wat de voor- en nadelen van de modellen voor de beoogde analyse zijn.

4.1.1 Sturing met een Basisgetij of een Springtij - Doodtij cyclus

In de praktijk worden veel berekeningen voor de Westerschelde uitgevoerd met hydrodynamika gebaseerd op een zogenaamd basisgetij (Pieters & Verspuy, 1997). Dit is een cyclisch getij van periode 12,5 uur. Dit leidt vaak tot de aanpak met vijf standaardgetijden (gemiddeld getij, springtij, doottij, maximaal springtij en minimaal doottij). In verband met de wezenlijke verandering van de bijdragen van de voor niet-lineariteiten belangrijke diverse mechanismes gedurende de springtij-doottij cyclus is het sterk aan te bevelen als randsturing voor modelberekeningen een astronomisch getij te gebruiken over een volledige springtij-doottij cyclus, te weten 14,75 dagen (heel precies: 14,76529 dagen), en liever nog 29,5 (29,53059) dagen. Dit maakt het mogelijk een complete getijanalyse op de berekende snelheden, debieten en waterstanden uit te voeren, waarmee de over de spring-doottijperiode veranderende niet-lineaire gedragingen van het systeem in veel meer detail geanalyseerd kunnen worden.

4.1.2 Compenserende maatregelen en terugwaartse berekeningen

Een van de achterliggende vragen van de huidige studie betreft de vraag welke ingrepen de beheerder in het estuarium kan doen die het ongewenste effect van stijgende hoogwaters als gevolg van de recente goulverdieping geheel of gedeeltelijk kunnen tegengaan. Een aanpak via uitvoering van numerieke getijberekeningen in voorwaartse zin door voor een gegeven geometrie, bathymetrie en getijsturing het daarbij behorende getijgedrag te berekenen, kan bij parameterevariaties de gevoeligheid van het getij in kaart brengen. Gegeven de

complexiteit van de Westerschelde zijn hiervoor zeer veel berekeningen met individuele parametervariëaties nodig. Een terugwaarts traject : “gegeven een gewenste getijverandering - welke parameterkombinatie van numerieke bathymetrie, geometrie en wrijving hoort hier dan bij” past veel directer bij deze vraag. Deze aanpak staat bekend als de variationele aanpak. Bij elk voorwaartse modelcode behoort een geadjungeerde code (Engels: adjoint code) waarmee terug in de tijd gerekend kan worden. Stel dat we de gevoeligheid van het getij (in een of andere expliciete norm) voor een aantal gelijktijdige parametervariëaties willen onderzoeken. Via gerichte combinatie van voorwaarts en terugwaarts rekenen is het mogelijk een functionaal in termen van representatieve getijgrootheden te minimaliseren, met als resultaat de daarbij behorende parameteraanpassingen in het voorwaartse model. Voor het tweedimensionale getijpakket WAQUA heeft RIKZ de adjoint code WAQAD laten ontwikkelen. De combinatie WAQUA-WAQAD wordt zeer succesvol gebruikt voor het afregelen van getijmodellen in termen van waterstanden, met als functionaal het verschil van berekende en voorspelde getijwaterstand in een aantal representatieve stations. Zowel bij RIKZ als WL bestaat hiermee goede ervaring. Een voorbeeld hiervan is gegeven in (Ten Brummelhuis et al., 1998), waarin de afregeling van het nieuwe kromlijnige Zuidelijke Noordzeemodel wordt beschreven.

4.2 1D modellen

Er bestaan diverse 1D DUFLOW schematisaties van de Westerschelde van divers ruimtelijk detail (200, 40 en 12 secties) en afgeregeld voor 1960 en 1992. In Pieters en Verspuy (1997) wordt aangetoond dat deze modellen het mogelijk maken de effecten van lokale kobergingsvergroting en/of geulverdieping op de getijslag en debieten af te schatten. Het model TRECOS-W (Verspuy, 1999) is een analysetool dat het mogelijk maakt daarbij ook de verandering in de relatieve bijdragen van weerstandsterm, advectione term en lokale versnelling zichtbaar te maken, waarmee het getijmechanisme ontleed wordt. De berekeningen tonen aan dat de onderzochte ingrepen met name stroomafwaarts (zeewaarts) het grootst zijn. Naast lokale effecten, is er ook sprake van effecten op grotere afstand (Pieters en Verspuy, 1997). Daar de snelheden en debieten sterk door lokale geometrie en dieptes beïnvloed worden, is het erg moeilijk de effecten van ingrepen in een deel van het estuarium te vertalen naar effecten van ingrepen elders. Hierbij speelt niet alleen de complexiteit van het bekken en het daarbij behorende getij een rol, maar ook de sterke parameterisatie van de processen die inherent is aan de 1D aanpak. Dit wordt wel eens “filtering vooraf” of “inputfilter” genoemd. Van het 1D modelsystemen bestaat geen adjoint zoals hierboven in 4.1.2 beschreven. In termen van het zoeken naar optimale compenserende maatregelen voor effecten van verhoogde waterstand als gevolg van geulverdieping betekent dit dat het vinden van een beperkt aantal relatief kleine ingrepen die gezamenlijk de getijverandering compenseren, via een 1D modelaanpak zeer lastig is. Anders gezegd: het is lastig een specifieke 1D modelaanpassing terug te vertalen naar hierbijbehorende ingrepen in geulen, platen, en andere tweedimensionale grootheden van het estuarium. Een praktisch gegeven is dat de modelschematisaties het getijgedrag landwaarts van Antwerpen niet goed weergeven: hiervoor is een wezenlijke calibratieslag nodig.

Samenvattend leidt dit tot de volgende kenschetsing van de 1D aanpak voor het analyseren van effecten op het getij van ingrepen in het bekken:

- 1D modellen geven de mogelijkheid effecten van ingrepen op de getijdoordringing en de waterstanden te berekenen (voorwaartse berekening)
- 1D modellen zijn uitgerust met een goed analysetool voor detailbeschouwingen hoe de relatieve bijdragen van de termen in de 1D vergelijking veranderen, en geven daarmee inzicht in de lokale verandering van de getij asymmetrie
- Er zijn bestaande modelschematisaties; hiermee is bij RIKZ Middelburg veel praktische ervaring
- Het model is rekentechnisch snel
- De getijrepresentatie is zeer sterk geparameteriseerd. Dit vereist een grote kennis om zinvolle veranderingen te definiëren (“input filter”) en de resultaten te interpreteren
- De getijrandsturing met zogenaamde standaardgetijden is onvoldoende voor de hier beoogde analyses. Ook dient de lokatie van de rand eventueel geëvalueerd te worden in het licht van de beoogde analyses
- Als gevolg van de parameterisaties is de vertaling van modelveranderingen naar bijpassende natuurveranderingen veelal niet (niet altijd?) eenduidig
- De modelschematisatie dient nog afgeregeld te worden voor de takken stroomopwaarts van Antwerpen
- Voor het 1D DUFLOW systeem bestaat geen adjoint, waarmee de gevoeligheid voor gelijktijdige parameter veranderingen systematisch onderzocht kan worden (terugwaartse berekeningen)

4.3 2D modellen

Er bestaan diverse 2D modellen voor het Westerscheldebekken. Zeer recent is het kromlijnige SCALWEST model opgeleverd. Dit model is naadloos genest in zowel KUSTSTROOK als het nieuwe Zuidelijke Noordzeemodel en het is deel van de RWS modellentrein. Er bestaat zowel een fijnmazige als een 3x3 vergroefde versie. Beide zijn afgeregeld voor het gedeelte zeewaarts gelegen van Antwerpen. De procesdynamica in 2D modellen is fysisch veel beter: er worden minder aannames gedaan en meer expliciet gemodelleerd. Oevers, geulen en platen worden “herkenbaar” gemodelleerd en variaties in richtingen loodrecht op de hoofdstroomrichting worden expliciet in rekening gebracht. Snelheden hebben in 2D modellen naast een extra vrijheidsgraad meer fysische betekenis, waarmee een gewijzigd modelresultaat ook beter te interpreteren valt. Daar morfologisch gedrag vaak evenredig aangenomen wordt met een derde of vierde macht van de snelheid, is dit voor de vraagstelling getij - morfologie een wezenlijk winstpunt. Variaties in richting en ander gedrag over een springtij-doodtij cyclus worden nu interpreteerbaar en verifieerbaar. Kortom, een 2D model leidt tot een veel betere afbeelding van natuur op model dan in 1D mogelijk is, waardoor modelaanpassingen direct vertaald kunnen worden naar natuuringrepen en vice versa (“output filter”). Zoals hierboven is aangegeven, bestaat voor de 2D modelcode een adjoint model, waarmee ook de vraag van bepaling en optimalisatie van mogelijke compenserende maatregelen gericht beantwoord kan worden.

Samenvattend leidt dit tot de volgende kenschetsing van de 2D aanpak voor het analyseren van effecten van ingrepen:

- 2D modellen beschrijven de werkelijke situatie wezenlijk beter. Met name geulen en platen worden expliciet gemodelleerd, waarmee ook de snelheden en debieten - die nu tweedimensionaal kunnen variëren -, fysisch meer korrekte interpretaties krijgen.
- Er zijn twee kromlijnige modelschematisaties beschikbaar voor de Westerschelde, gekalibreerd in termen van weergave van de getijwaterstanden in het gebied zeewaarts van Antwerpen. Deze zijn onderling consistent en sluiten naadloos aan op resp. het Zuidelijk Noordzeemodel en KUSTSTROOK.
- Randsturing is in termen van het astronomisch getij. Een generiek nabewerkingspakket met daarin getijanalyse, plotprogrammatuur, etc. is beschikbaar (Basisanalyse).
- Er is veel ervaring met 2D modellen bij RIKZ, WL en diverse consultants.
- Een 2D model is rekenintensiever.
- De ligging van de open rand dient mogelijk westwaarts verlegd te worden; dit kan echter eenvoudig via nesting in KUSTSTROOK.
- Bij 2D modellen kan een simultane gevoeligheidsanalyse uitgevoerd worden door gebruik te maken van het pakket WAQAD (terugwaartse berekeningen), waarmee de gevoeligheid voor een aantal parameterveranderingen in termen van hun effect op waterstanden simultaan kan worden bepaald. RIKZ en WL hebben de beschikking over dit pakket en hebben hiermee in diverse toepassingen goede ervaringen opgedaan.

4.4 3D modellen

Driedimensionale modellen modelleren de diepte-afhankelijkheid van de diverse grootheden. Voor de schalen van de Westerschelde (lengte en breedte versus diepte) kan men de hier van belang zijnde grootschalige waterbeweging echter zeer goed met een 2DH-aanpak beschrijven en leidt de toevoeging van de derde dimensie niet tot wezenlijk betere beschrijving.

Op 3D modellen wordt hier dan ook niet verder ingegaan.

4.5 Aanbevelingen

In de paragrafen hierboven zijn de verschillende modeltypes voor waterbeweging en hun relevante aspecten op een rij gezet.

- Voor verder onderzoek naar de relatie tussen getij en morfologie is het belangrijk goede informatie over de snelheden te verkrijgen, waarbij zowel richtingsvariatie als springtij-doodtij variaties belangrijk zijn voor het analyseren van niet-lineair gedrag en de relatie met de morfologie. Tweedimensionale modellering is hiervoor noodzakelijk, waarmee de vertaalslag model - werkelijkheid en omgekeerd ook directer en daarmee eenvoudiger wordt.
- Voor het toetsen van de hypothesen over de relatie tussen veranderingen in het getij en morfologie (of bekkenconfiguratie) wordt de aanpak met 2D modellen met astronomische getijrandsturing en gebruik van terugwaartse berekeningen expliciet aanbevolen. Deze aanpak geeft naast de mogelijkheid veranderingen in waterstanden goed te correleren aan die in snelheden en debieten, ook direct aanwijzingen in termen van compenserende maatregelen.
- Voor 1D modelberekeningen wordt eerder een ondersteunende rol gezien. Het is daarbij de vraag of er nieuwe berekeningen nodig zijn. Waarschijnlijk zijn de reeds uitgevoerde 1D berekeningen in eerste instantie voldoende.
- Aanbevolen wordt om op basis van de bespreking van het huidige rapport in een kort vooronderzoek een plan voor 2D voorwaartse en terugwaartse simulaties op te zetten (detaillering van hypothesen en toetsing per modelrun).

Opgemerkt wordt dat deze aanbevelingen, met name de eerste en de tweede, unaniem ondersteund worden door de leden van het externe expertteam.

5 Conclusies

Reeds langere tijd is bekend dat de gemiddelde zeestand, het gemiddelde hoogwaterniveau en het tijverschil in de Westerschelde deze eeuw zijn toegenomen. Om de veiligheid tegen overstromen van de Westerschelde te kunnen blijven waarborgen is een beter begrip en grotere kwantitatieve kennis van het getijgedrag in het estuarium gewenst. In eerdere analyses van het getij in de Westerschelde is doorgaans weinig aandacht besteed aan de relatie tussen veranderingen in de morfologie en de veranderingen in de getijkarakteristieken. Het huidige onderzoek heeft zich juist op deze interactie gericht.

De resultaten van deze studie laten zien dat de grootschalige veranderingen die de afgelopen decennia zijn opgetreden in het getij van de Westerschelde kunnen worden gekoppeld aan (voor een groot deel door de mens veroorzaakte) veranderingen in de morfologie. Een directe correlatie tussen veranderingen in de verschillende getijkomponenten en veranderingen in de morfologie (zoals inhoudsveranderingen, veranderingen in de arealen intergetijdegebieden of plaathoogte) bleek niet aantoonbaar. De reden hiervoor zou het verschil in reactietijd van waterbeweging en morfologie kunnen zijn. De waterbeweging reageert vrijwel instantaan op wijzigingen in de morfologie, maar de daarop volgende veranderingen van de morfologie nemen al snel een aantal jaren in beslag. Door de grote hoeveelheid ingrepen en natuurlijke reacties daarop die in de onderzochte periode (1971 - 1997) in de Westerschelde zijn opgetreden, is een eenduidige oorzaak - gevolg relatie niet meer te achterhalen met behulp van eenvoudige correlatie.

Wanneer echter wordt gekeken naar de veranderingen die zijn opgetreden in de vorm van de getijkromme (zoals weergegeven door de veranderingen die zijn opgetreden in de relatieve faseverschillen $2M_2 - M_4$ en $3M_2 - M_6$) blijkt correlatie met morfologische ontwikkelingen wel degelijk mogelijk. De tegengestelde veranderingen van de getijasymmetrie in Hansweert en Bath blijken goed overeen te komen met veranderingen in de grootschalige zandbalans in de betreffende delen van de Westerschelde.

Er zijn voorstellen gedaan om de gevonden correlaties nader te onderzoeken met behulp van modelberekeningen. Uit een korte analyse van de verschillende ter beschikking staan de berekeningsmethoden komt naar voren dat een aanpak waarbij onder andere terugwaartse berekeningen met behulp van 2D modellen worden uitgevoerd hiervoor het meest geschikt is. De reeds uitgevoerde 1D berekeningen kunnen daarbij een ondersteunende rol spelen.

6 Literatuur

- Amin, M., 1976. The fine resolution of tidal harmonics. *Geophys. J. Roy. Astr. Soc.*, 14, 293-310
- Brummelhuis, P.G.J. ten, H. Gerritsen en D. Verploegh. Calibration of the ZNZ model. Calibration on tidal water levels using WAQAD. WL | DELFT HYDRAULICS Rapport Z2544, December 1998.
- Dronkers, J.J., 1964. Tidal computations in rivers and coastal waters. North-Holland Publishing company, Amsterdam
- Dronkers, J., 1986. Tidal Asymmetry and Estuarine Morphology. *Neth. Journal of Sea Research* 20, 117-131
- Gerritsen, H. & H.F.P. van den Boogaard, 1998. Getijanalyse Westerschelde. Datarapport getijkomponenten, toepassing van Principal Component Analysis. WL | DELFT HYDRAULICS rapport Z2591
- Huijs, S.E.W., 1995. Geomorfologische ontwikkeling van het intergetijdegebied in de Westerschelde, 1935-1989. IMAU rapport R 95-3, Institute for Marine and Atmospheric Research Utrecht
- Huijs, S.E.W., 1996. De ontwikkeling van de morfologie in de Westerschelde in relatie tot menselijke ingrepen. IMAU rapport R 96-17, Institute for Marine and Atmospheric Research Utrecht
- Kreeke, J. van de & K. Robaczewska, 1993. Tide induced residual transport of coarse sediment; application to the Ems estuary. *Netherlands Journal of Sea Research* 31 (3): 209-220, Netherlands Institute for Sea Research
- Mol, G., 1999. Analyse harmonische componenten in de Westerschelde; periode 1971-1997. Werkdocument RIKZ/AB-99.805x, Rijksinstituut voor Kust en Zee/RIKZ
- Mol, G., A.M. van Berchum, G.M. Krijger, 1997. De toestand van de Westerschelde aan het begin van de verdieping 48'/43'. Rapport RIKZ 97-049, Rijksinstituut voor Kust en Zee/RIKZ
- Parker, B.B., 1991. The relative importance of the various nonlinear mechanisms in a wide range of tidal interactions (review). In B.B. Parker (ed.): *Tidal hydrodynamics*, J. Wiley & Sons, New York
- Pieters, T. & C. Verspuy, 1997. Getijanalyse Schelde-estuarium. Invloed plaatselijke veranderingen bergende oppervlakte op getijvoortplanting, een analyse met Trecos-Westerschelde 1997. Rapport BGW - 97.6, Bureau Getijdewateren
- Slikke, A. van der, 1997. Grootschalige zandbalans van de Westerscheldemonding (1969-1993). Een inventarisatie van de dieptegegevens (1800-1996). IMAU rapport R 97-18, Instituut voor Marien en Atmosferisch Onderzoek Utrecht
- Speer, P., D.C. Aubrey & C.T. Friedrichs, 1991. Nonlinear hydrodynamics of shallow tidal inlet/bay systems. In B.B. Parker (ed.): *Tidal hydrodynamics*, J. Wiley & Sons, New York
- Uit den Bogaard, L.A., 1995. Resultaten zandbalans Westerschelde 1955-1993. IMAU rapport R 95-08, Institute for Marine and Atmospheric Research Utrecht
- Verspuy, C., 1999. Onderzoek New Trecos Westerschelde estuarium. Rapport TUD CT Vloeistofmechanica, 20pp.
- Vroon, J., C. Storm & J. Coosen, 1997. Westerschelde, stram of struis? Eindrapport van het project Oostwest. Rapport RIKZ-97.023, Rijksinstituut voor Kust en Zee/RIKZ

A Bespreekverslagen bijeenkomsten expertteam

BESPREKING-1 bij WL te Delft; 14-4-1999; 11:00 – 13:30

Aanwezig: H.J. de Vriend, Wang, Van der Weck, Gerritsen

Doel: Kick-off; brainstorm over doel, aanpak en inhoud van de studie.

Het rapport Z2591 is bekend en gelezen. WL legt de figuren op tafel waarin voor iedere komponent en ieder station de amplitude en fase t.o.v. de amplitude en fase van Vlissingen voor datzelfde jaar. Deze figuren zijn vergelijkbaar met de serie Bijlage 2 uit de notitie van Mol, d.d. 28-1-1999.

Uitvoerige discussie over de getijvoorstelling en de analyse-aspekten. Onbruikbaarheid NLK2. Tweeledig karakter van de componenten MU2 en 2MN2. Aspect van wisselende meteo in de jaaranalyse en daarmee de wisselende signaal-ruisverhouding van de kleine-amplitude componenten.

Diskussie over de figuren en de mogelijkheden om van buiten komende veranderingen te scheiden van intern opgewekte veranderingen. Konstatering dat de eerste PCA komponent dit in wezen in zich heeft, daar deze het gemeenschappelijk gedrag van de stations weergeeft.

Diskussie over de mogelijkheid om de informatie in termen van getijkcomponenten ("sinussen") om te zetten naar informatie die wat zegt over getij-asymmetrie, niet-lineariteit, weerstand en de veranderingen daarin in plaats en tijd.

Diskussie over de grote tijdschaal waarmee de morfologie zich op een nieuw evenwicht instelt als gevolg van een aangebrachte verandering - veelal orde 10 jaar -, ten opzichte van het getij, dat zich vrijwel momentaan aanpast. De vraag is in hoeverre zelfs de grote ingrepen van baggeren en storten op diverse plaatsen in het bekken nog expliciet herkenbaar zijn in de over tijd en plaats ge-integreerde responsie.

Besloten is dat WL de figuren uit Z2591 en de nieuwe figuren van Mol en WL nog eens kritisch doorloopt en de hierin zichtbare karakteristieke veranderingen toetst aan de karakteristieke veranderingen zichtbaar in Uit den Bogaard en Huijs.

(enddoc)

BESPREKING-2 bij WL te Delft; 19-4-1999; 8:30 – 10:15

Aanwezig: Prof Battjes, Wang, Van den Boogaard, Gerritsen, Langerak (vanaf 9:00 uur)

Doel: Kick-off; brainstorm over doel, aanpak en inhoud van de studie.

Het rapport Z2591 is bekend. WL legt de figuren op tafel waarin voor iedere component en ieder station de amplitude en fase t.o.v. de amplitude en fase van Vlissingen voor datzelfde jaar. Deze figuren zijn vergelijkbaar met de serie Bijlage 2 uit de notitie van Mol, d.d. 28-1-1999.

N.a.v. rapport Z2591 merkt Battjes op dat de PCA een zeer gedetailleerd analysemiddel is, met veel vrijheidsgraden. De vraag is of je dit detail allemaal nodig hebt. Had traditionele interpretatie niet ook gekund. Wat betreft de PCA zou misschien volstaan kunnen worden met een enkele 4x-daagse en 6x-daagse component; of had gewerkt kunnen worden met een gemiddelde component? Aan de andere kant kan het PCA materiaal wellicht nog verder uitgewerkt worden : plotten eigenvectoren; analyse fluctuatie PCA hoofdrichtingen; lumping van componenten; ruimtelijke verdeling, etc.

Gerritsen geeft aan dat de PCA gekozen is omdat deze gedrag ordent naar hoofdaspecten van de variatie, en gemeenschappelijk ruimtelijk gedrag afsplitst van meer lokaal gedrag. Bovendien geeft de PCA kwantitatieve informatie over de verklaarde variantie.

Gekonstateerd wordt dat verdere uitwerking van de PCA resultaten voor de huidige vraagstelling (morfologie) niet relevant is. Ook valt het idee van heranalyse van de tijdreeksen met andere keuze van getijkcomponenten en scheiding MU2/2MS2 en L2/2MN2 buiten het bestek van deze studie.

Suggestie van Langerak: maak hiervoor eventueel een separaat voorstel.

N.a.v. de beschikbaarheid van kwantitatieve gegevens over de morfologie merkt Langerak op dat bij RIKZ dwarsprofielen beschikbaar zijn (rapport SVASEK); interval van 5 jaar. Interpretatie is tot nu toe nog niet gebeurd. Verder zijn er zeer veel DUFLOW berekeningen gemaakt. Daarvoor zijn 2 goed afgeregelde, en enkele minder goed afgeregelde schematisaties beschikbaar. Bezwaar van DUFLOW is wel dat de advectieve termen er maar voor de helft in zitten (wel du/dx ; niet dA/dx).

Met betrekking tot berekeningen stelt WL voor om in plaats van vijf cyclische standaardgetijden liever te sturen met een maand astronomisch getij, en de resultaten dan op getijkcomponenten te analyseren. In verband met de onderliggende vraag (naast kennis van systeemgedrag: welke mitigerende maatregelen leiden bij geulverdieping tot vrijwel konstant blijvende hoogwaternivo's?) stelt WL dat hiervoor 2DH berekeningen wezenlijk meer geschikt zijn dan 1D. Bovendien is daarvoor een inverse module beschikbaar. Via history stations in geulen en op platen kan zowel de verandering in horizontaal getij als vertikaal getij gevolgd worden. Bij gebruik van het model voor beschouwing van veranderingen is een mogelijke nauwkeurigheidfout van het model minder relevant omdat deze in eerste orde wegvalt bij het beschouwen van verschillen.

Langerak wijst op het bestaan van een rapport van Pieters over Getijkennis Westerschelde (Rapport BGW-97.6, oktober 1997). Is bij WL niet bekend. Langerak zal het faxen. Een zelfde situatie geldt voor relevante pagina's uit het rapport van Witteveen en Bos betreffende de data-analyse Westerschelde m.b.t. responsie op ontpoldering.

Langerak: De geulverdieping is inmiddels voor 2/3 deel aangebracht: de vaargeulverbreding moet nog. Er is 8 Mton gebaggerd. Het getij heeft zich uiteraard al aangepast. De vraag is of de sedimentretourstroming al op gang gekomen is; hiervoor is een minimaal verschil van overschot en deficit nodig.

Battjes wijst op de software van Verspuy (TRECOS) voor analyse van effecten van ingrepen in de Westerschelde. Dit is een hulpmiddel voor hypothesestelling, uitvoering en interpretatie van DUFLOW berekeningen. Afspraak: Gerritsen neemt contact op met Verspuy.

Discussie over aard van vervolgberekeningen. Basisvraag: is alleen 1D voldoende, of moet dit met 2D-modellen, al dan niet ondersteund met 1D berekeningen? Bij het gericht zoeken naar compenserende maatregelen heeft 2D wezenlijk meer mogelijkheden omdat de fysica veel beter gemodelleerd is en minder parameterisaties nodig zijn.

(enddoc)

BESPREKING-3 bij WL te Delft; 19-4-1999; 14:00 – 16:00

Aanwezig: J.H. van den Berg, J.G. de Ronde, Van der Weck, Gerritsen

Doel: Kick-off; brainstorm over doel, aanpak en inhoud van de studie.

Het rapport Z2591 is bekend en gelezen. WL legt de figuren op tafel waarin voor iedere komponent en ieder station de amplitude en fase t.o.v. de amplitude en fase van Vlissingen voor datzelfde jaar is weergegeven. Deze figuren zijn vergelijkbaar met de serie Bijlage 2 uit de notitie van Mol, d.d. 28-1-1999.

N.a.v. het datarapport merkt De Ronde op dat je in plaats van voor ieder van de 13 komponenten een PCA met 12 vrijheidsgraden (6 stations; amplitudes en fases) uit te voeren ook 1 PCA op alle variabelen ($6*2*13 = 156$ dimensionale ruimte) had kunnen uitvoeren en analyseren. Data reductie krijg je dan weer omdat volgens hem alleen de eerste drie PCA komponenten echt interessant zijn. Voor de morfologievraag is zo'n extra analyse echter niet relevant.

Van den Berg: In hoeverre geeft de waterstandsanalyse informatie over de snelheden? Dit is beperkt: het snelheidsgedrag is veel sterker lokaal bepaald dan dat van de ge-integreerde grootte waterstand. Bovendien zijn de 4x- en 6x-daagse komponenten in de snelheden veel sterker vertegenwoordigd dan in de waterstand..

De Ronde suggereert het 1D DUFLOW model te gebruiken om synthetisch snelheden te genereren. Dit vereist echter een aanpak met DUFLOW voor jaarreeksen over een periode van 27 jaar, etc. Dit valt buiten het bestek van de huidige studie.

De Ronde suggereert na de huidige studie een tussentraject uit te voeren om te bepalen wat de snelheden doen. Als eerste aanpak zou gekeken kunnen worden naar het getijverschil.

Van den Berg merkt op dat de verlaging van de drempels het maximale eb dichterbij LW toebrengt. Daardoor ontstaat er bij eb een veel grotere bijdrage aan de wrijving.

Van den Berg suggereert dat het omhoogkomen van de Plaat van Valkenisse, waardoor de vloed nu een omweg moet maken, wellicht een hypothese is voor het niet doorgegeven naar Bath van de getijwegverkorting bij Hansweert. (zie ook paper Van den Berg et al. (1996)). De Ronde stelt daarentegen dat verhoging van platen nauwelijks effect heeft op debieten en getijvoortplanting; wel op de komberging.

Van der Weck wijst op de 5 basismechanismes die genoemd worden in par. 5.1 van Z2591. Is dit voldoende en zijn ze voldoende uitgewerkt? Wat zeggen deze over het horizontaal getij? --> verdere uitwerking noodzakelijk.

De Ronde wijst op de modellering van Ed Langendoen, die een nieuwe bodem voor 1890 maakte. Hierbij bleek dat een beperkte modelopzet (te klein modelgebied) of een te simpele modelaansturing directe consequenties heeft voor je hypothesestelling en -toetsing.

Diskussie over vervolgstudie met modellen. In de huidige studie dienen hiervoor morfologische indicatoren te worden bepaald. Bijv.: (1) verdieping van drempels. (2) verdwijning van de functie van vloedscharen. (3) in samenhang met 2.: het omhoog komen van de platen in het oostelijk deel.

Diskussie over 1D versus 2D. Van den Berg geeft dat aspecten als funktiewisselingen plaat vs. geul alleen met een 2D model te onderzoeken zijn. 1D is z.i. in te veel opzichten te sterk geparаметeriseerd. Dit vereist daardoor bovendien veel skill voor aanbrengen relevante verandering, en de interpretatie.

De Ronde geeft aan dat bij gebruik van 2D SCALDIS je de rand naar buiten moet verleggen. Praktisch kan dit goed, want de naadloze koppeling met KUSTSTROOK is gerealiseerd. N.B. Het meenemen van de getijaanloop (Zeebrugge-Breskens) is hierbij het meest relevant.

(enddoc)

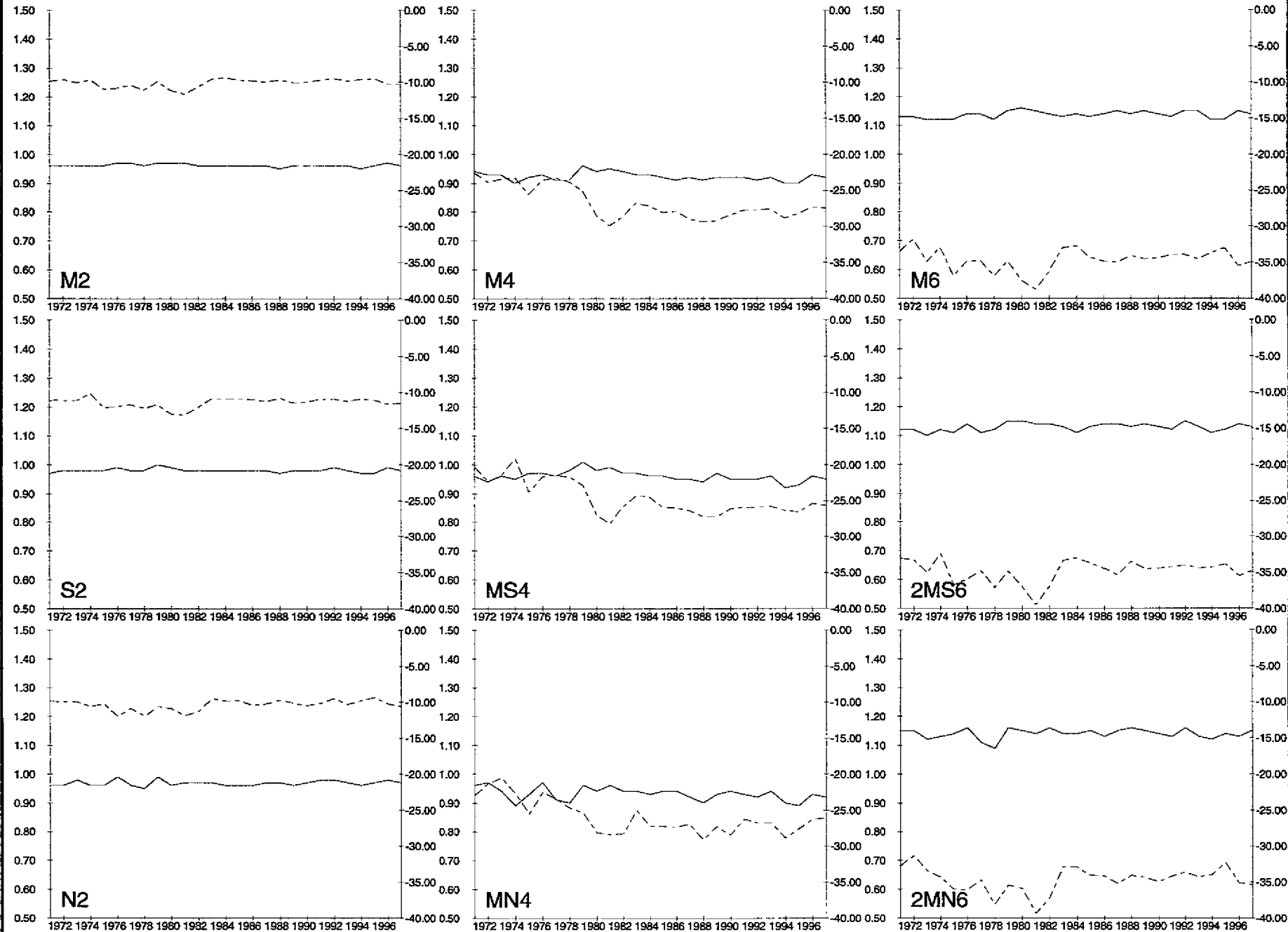
B Figuren

WLIDelft Hydraulics

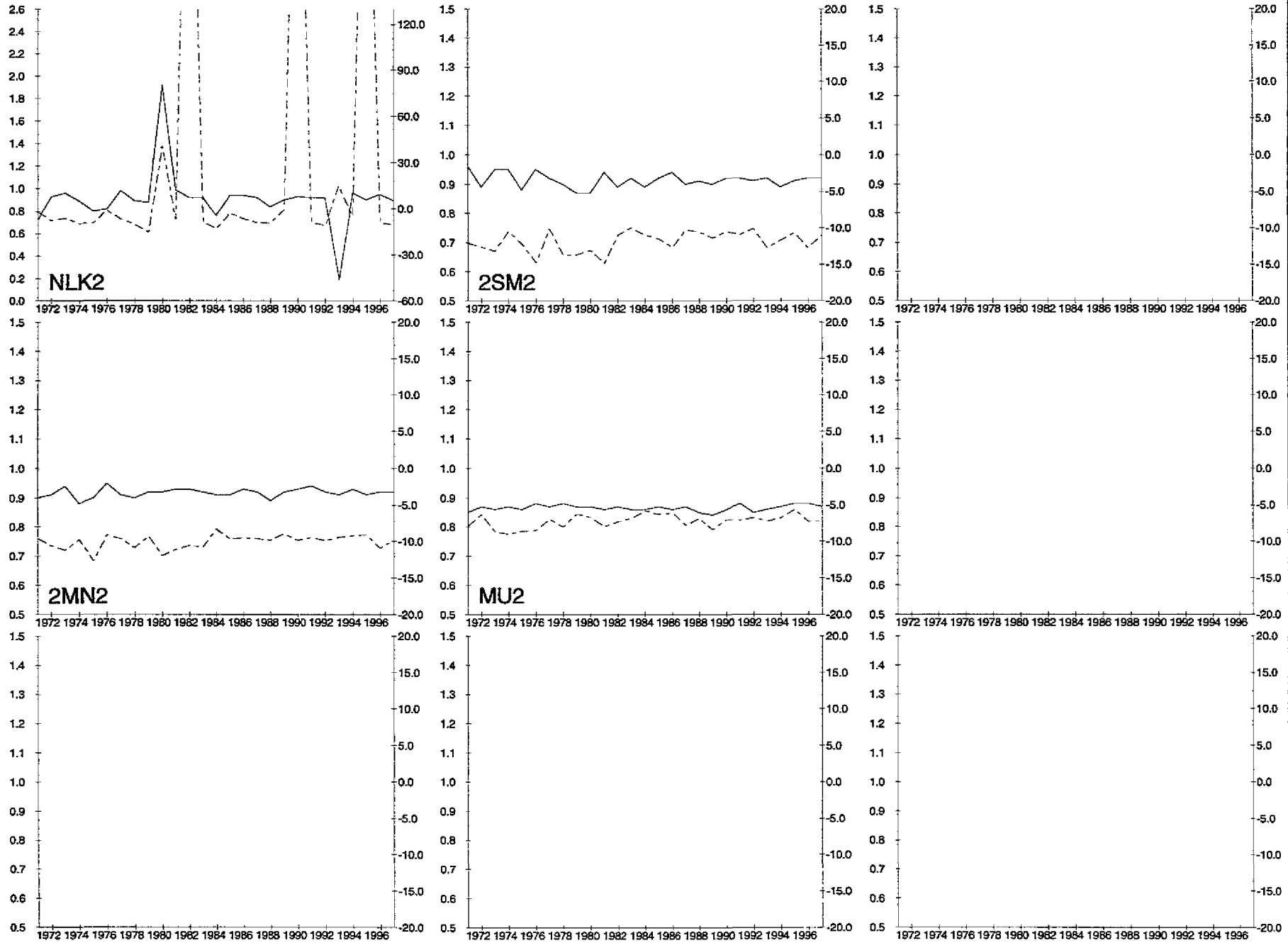
Station : Cadzand

Z-2591

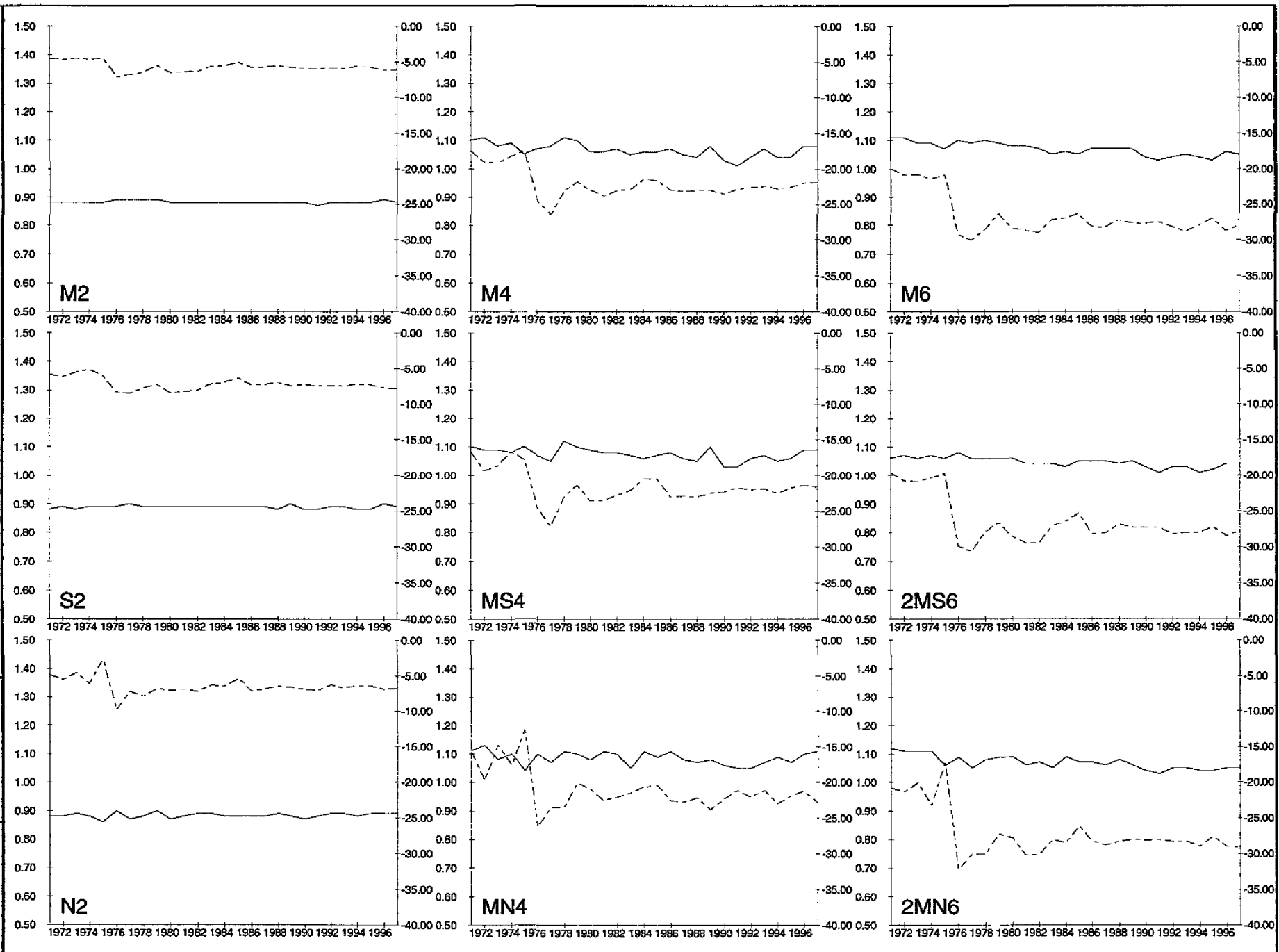
Fig. 1.1



Station : Cadzand

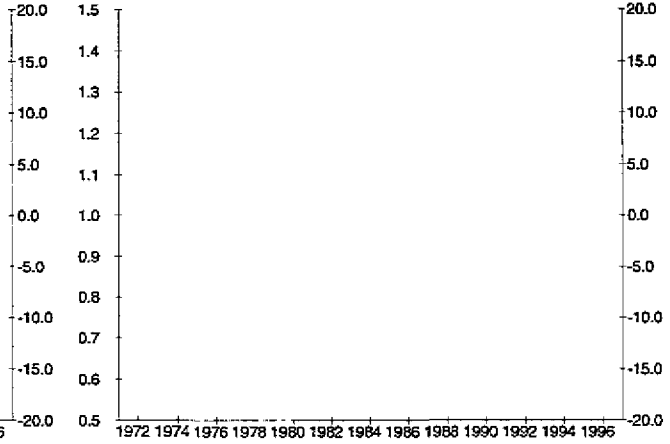
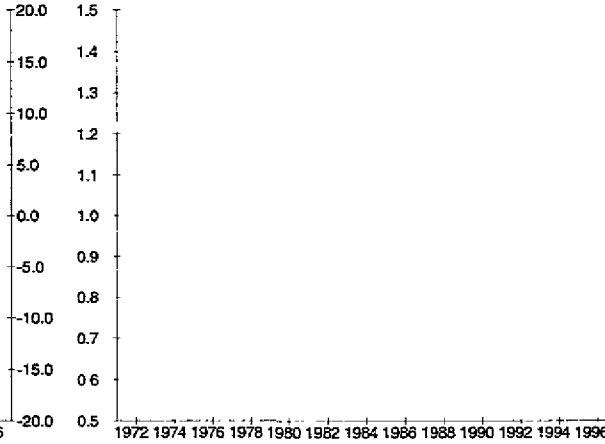
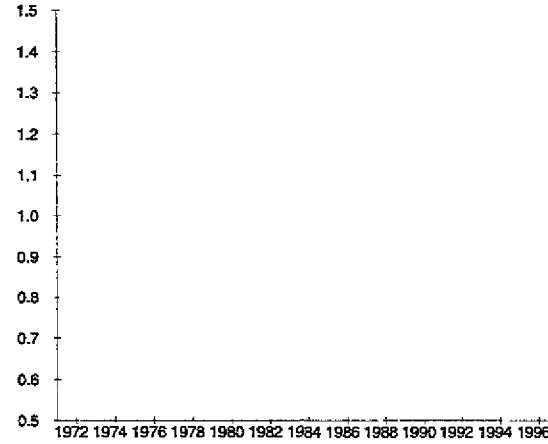
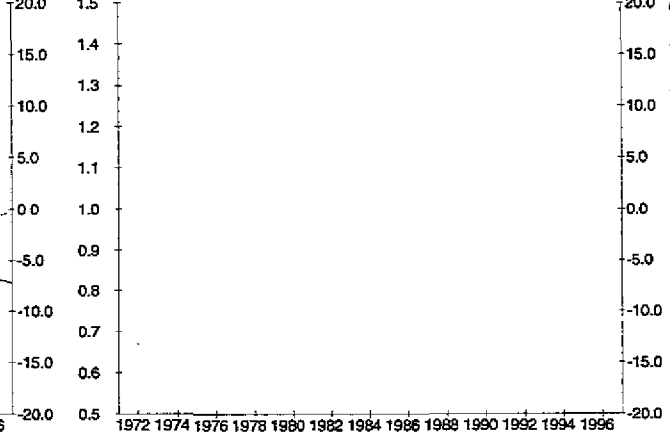
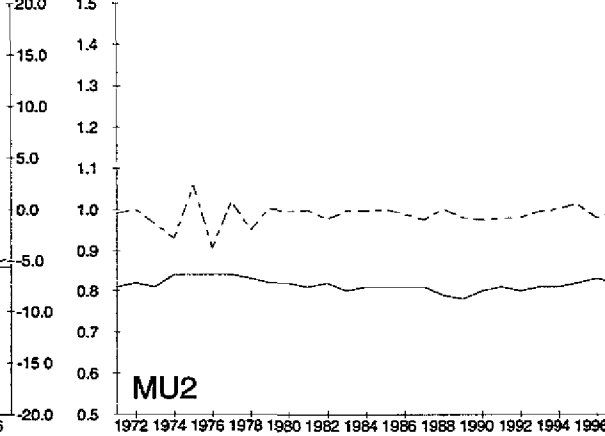
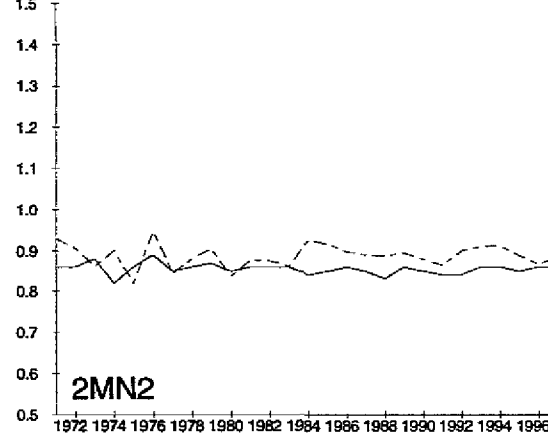
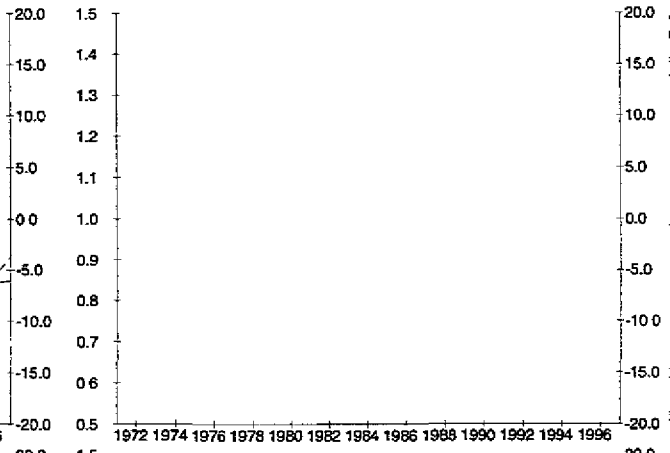
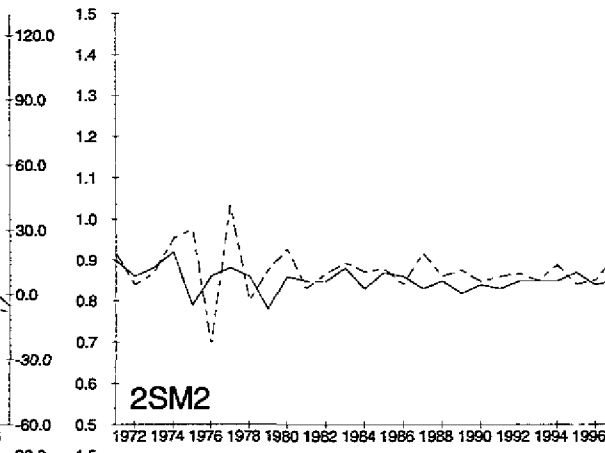
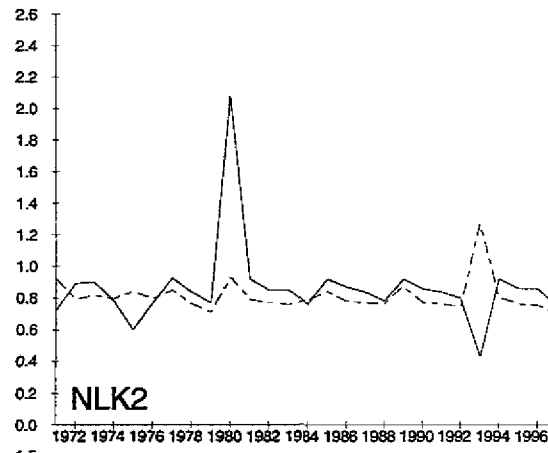


Station : Westkapelle



WLIDelft Hydraulics

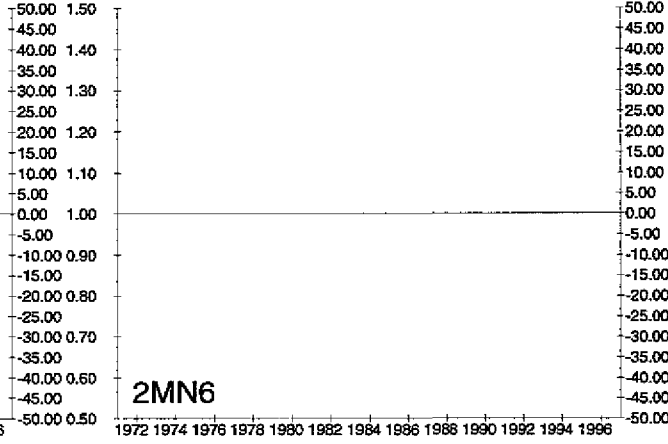
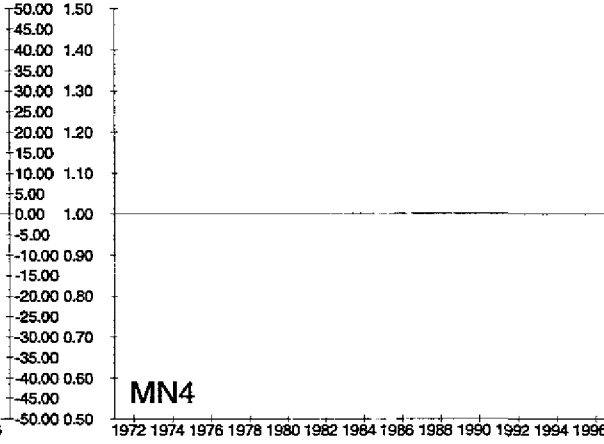
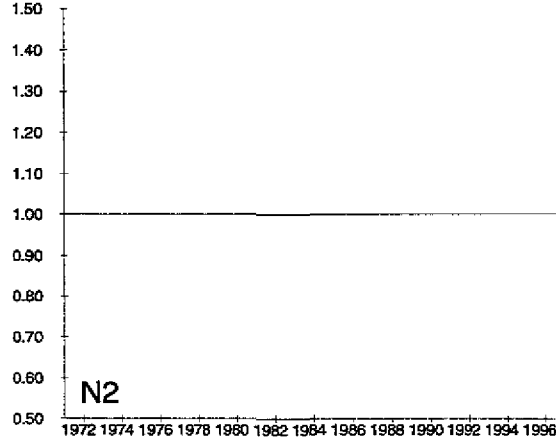
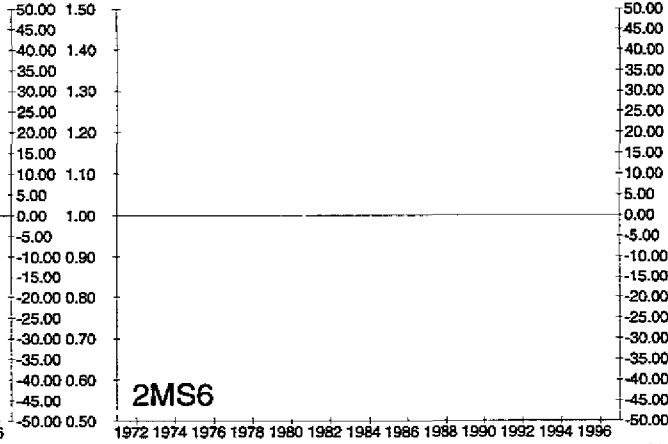
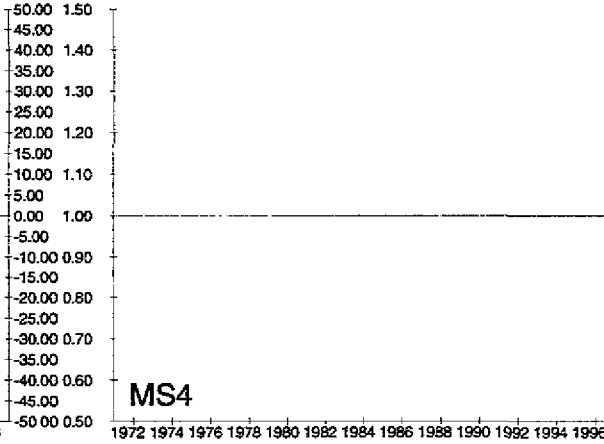
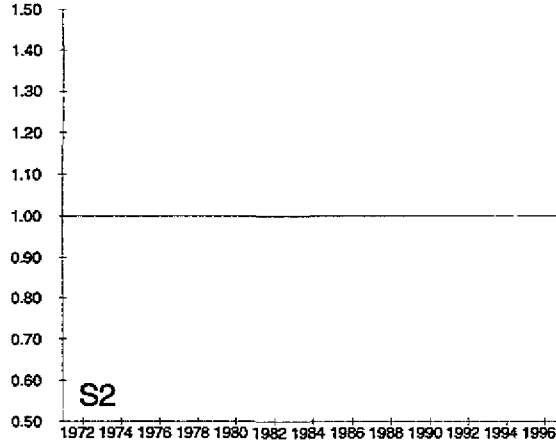
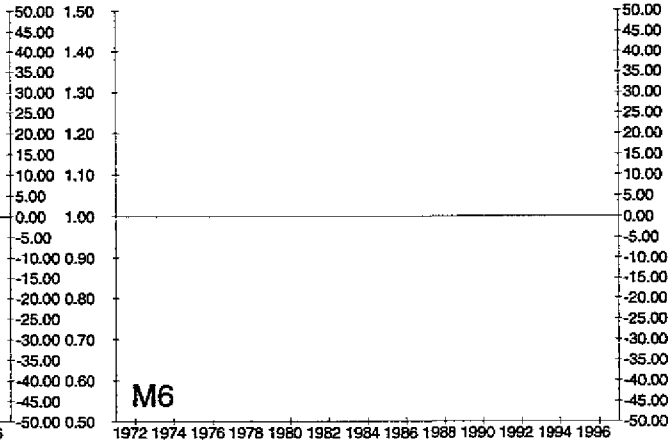
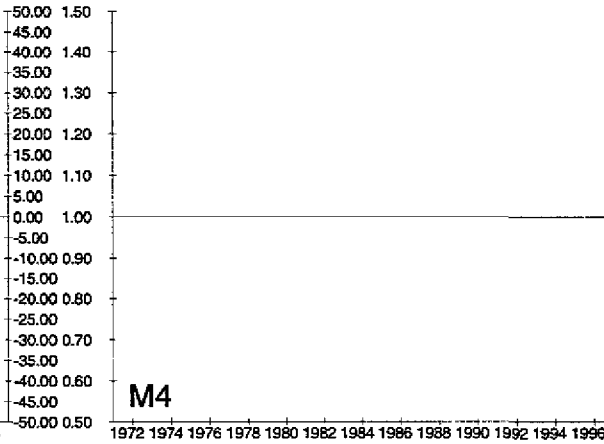
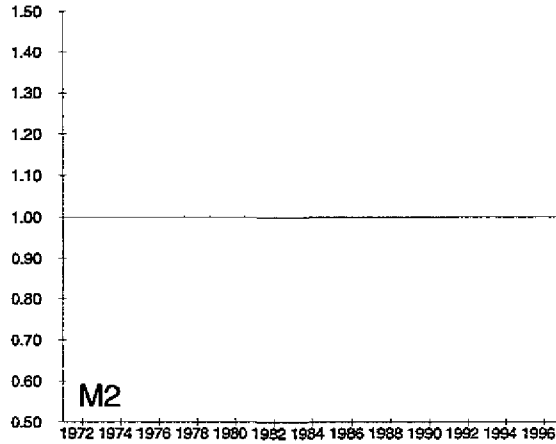
Station : Westkapelle



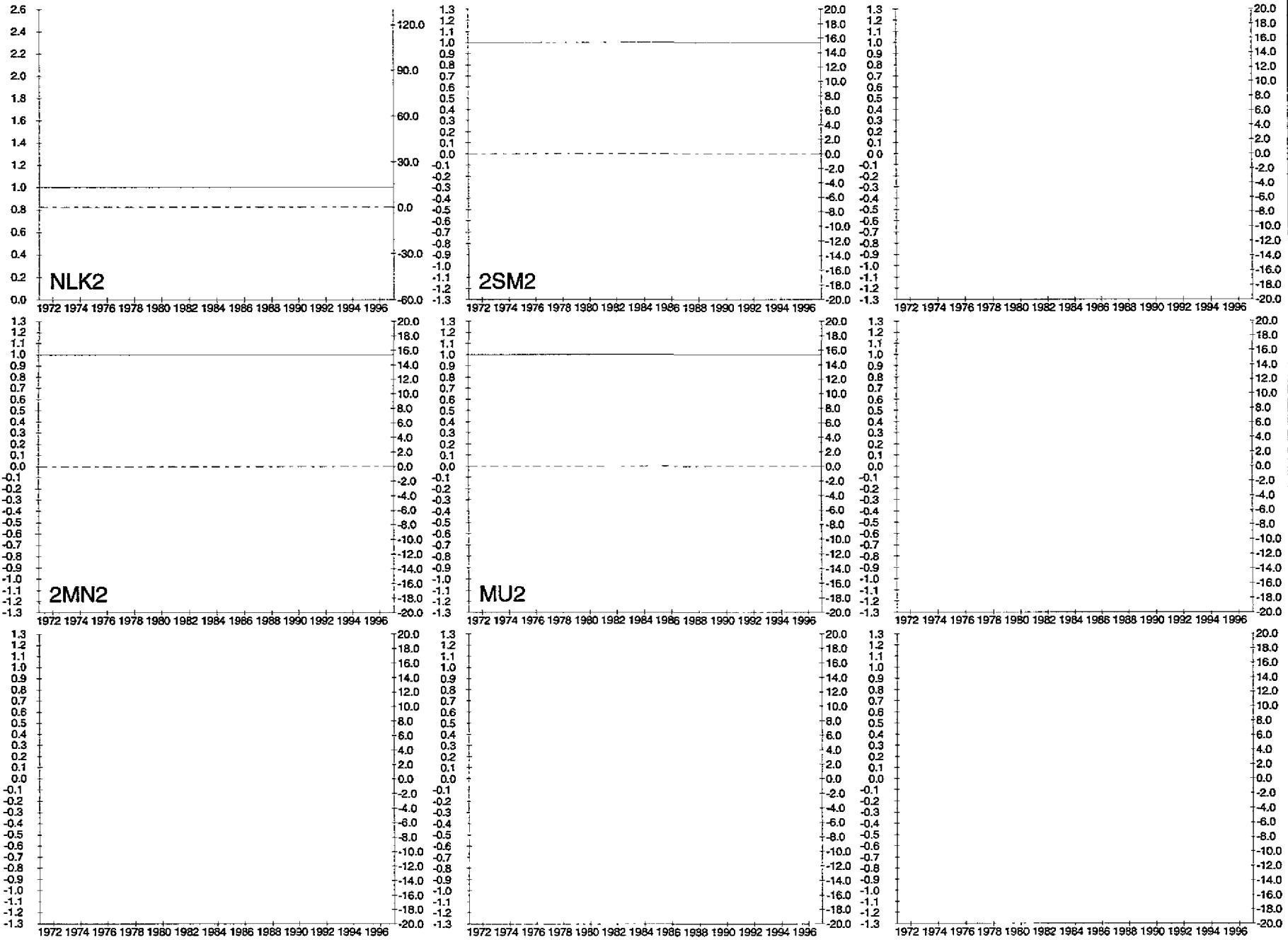
Z-2591

Fig. 14

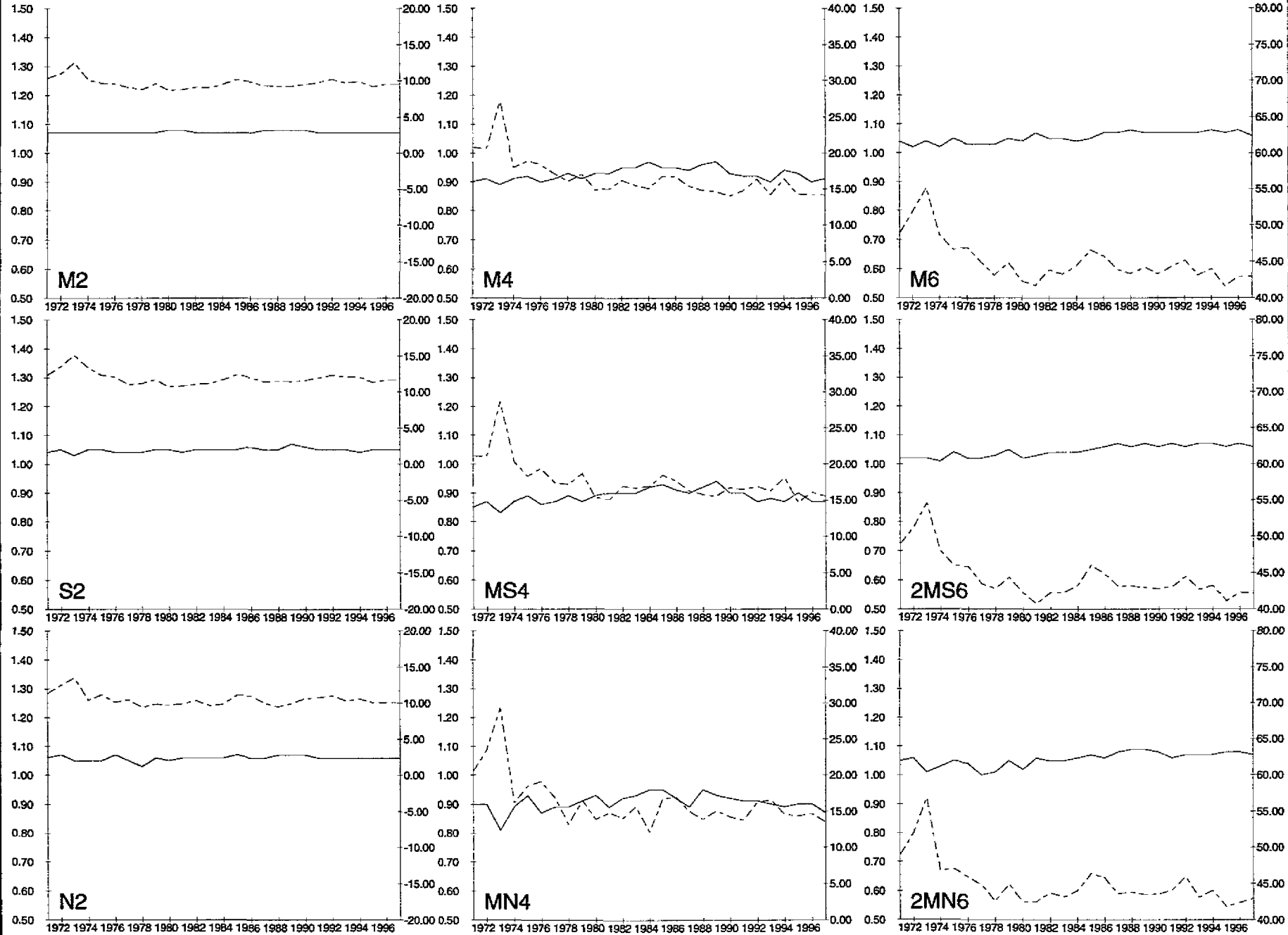
Station : Vlissingen



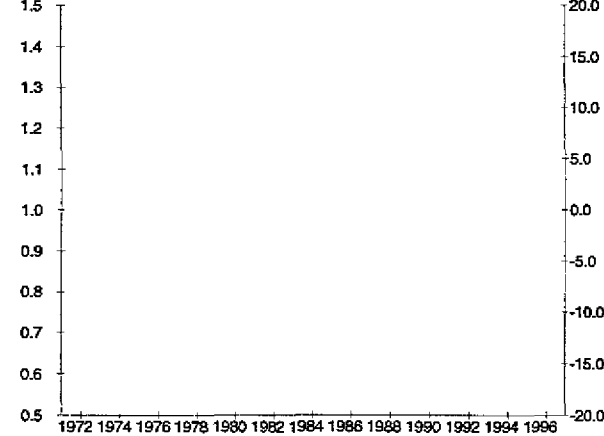
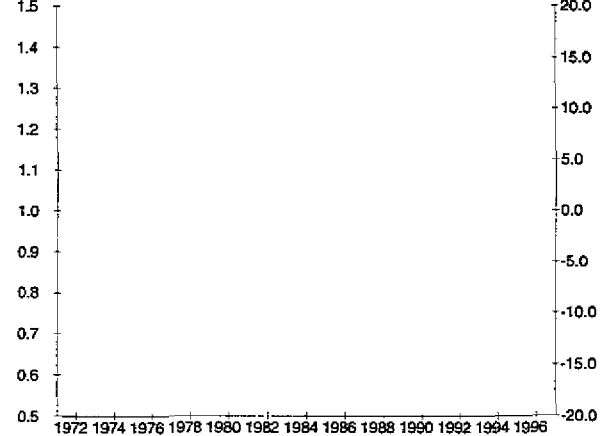
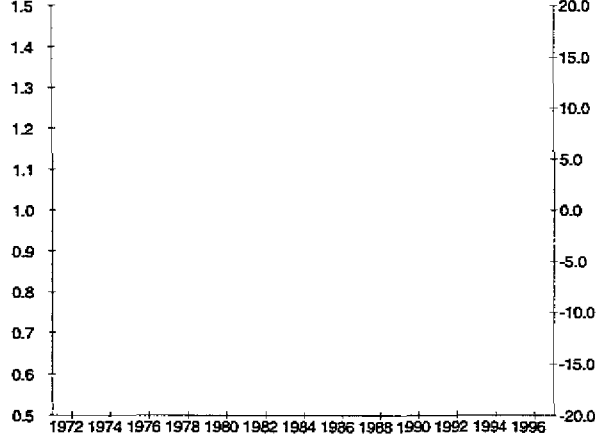
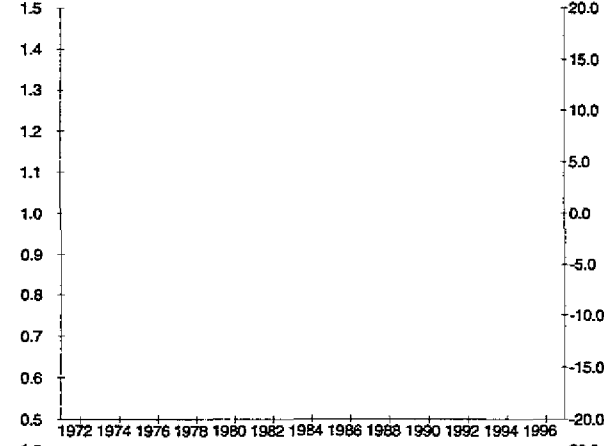
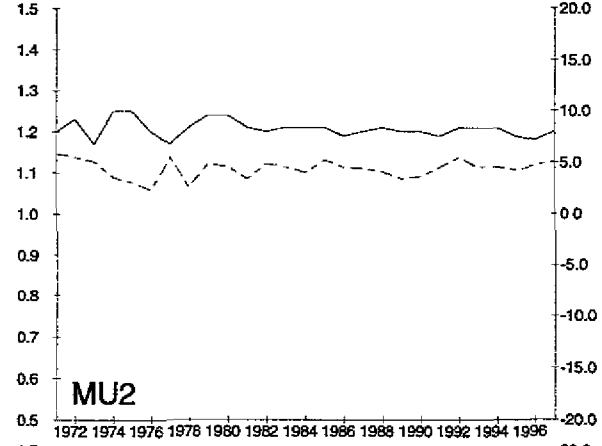
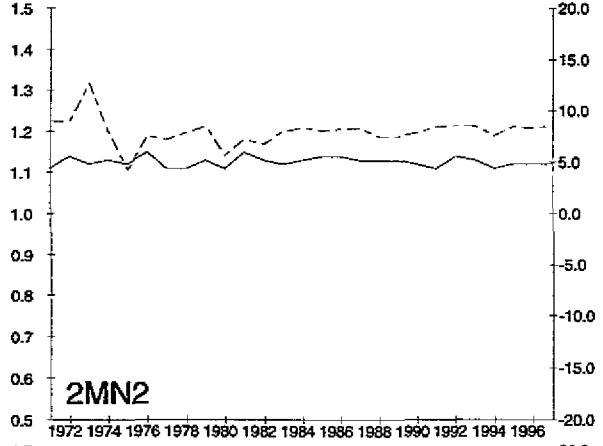
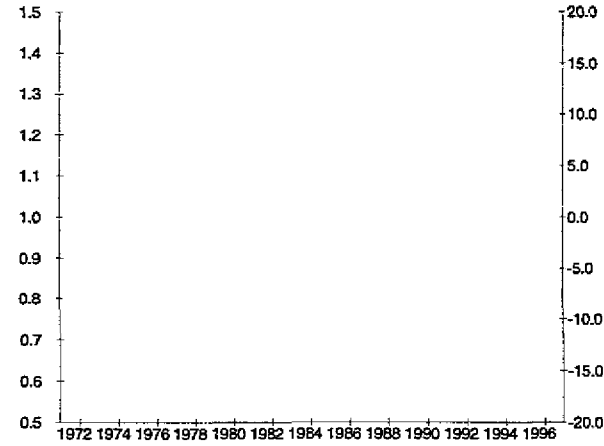
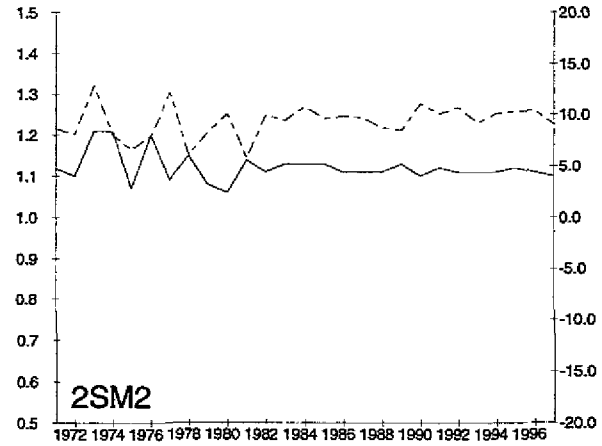
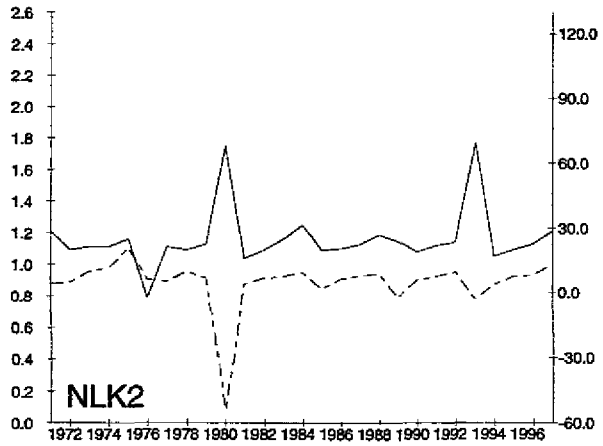
Station : Vlissingen



Station : Terneuzen



Station : Terneuzen

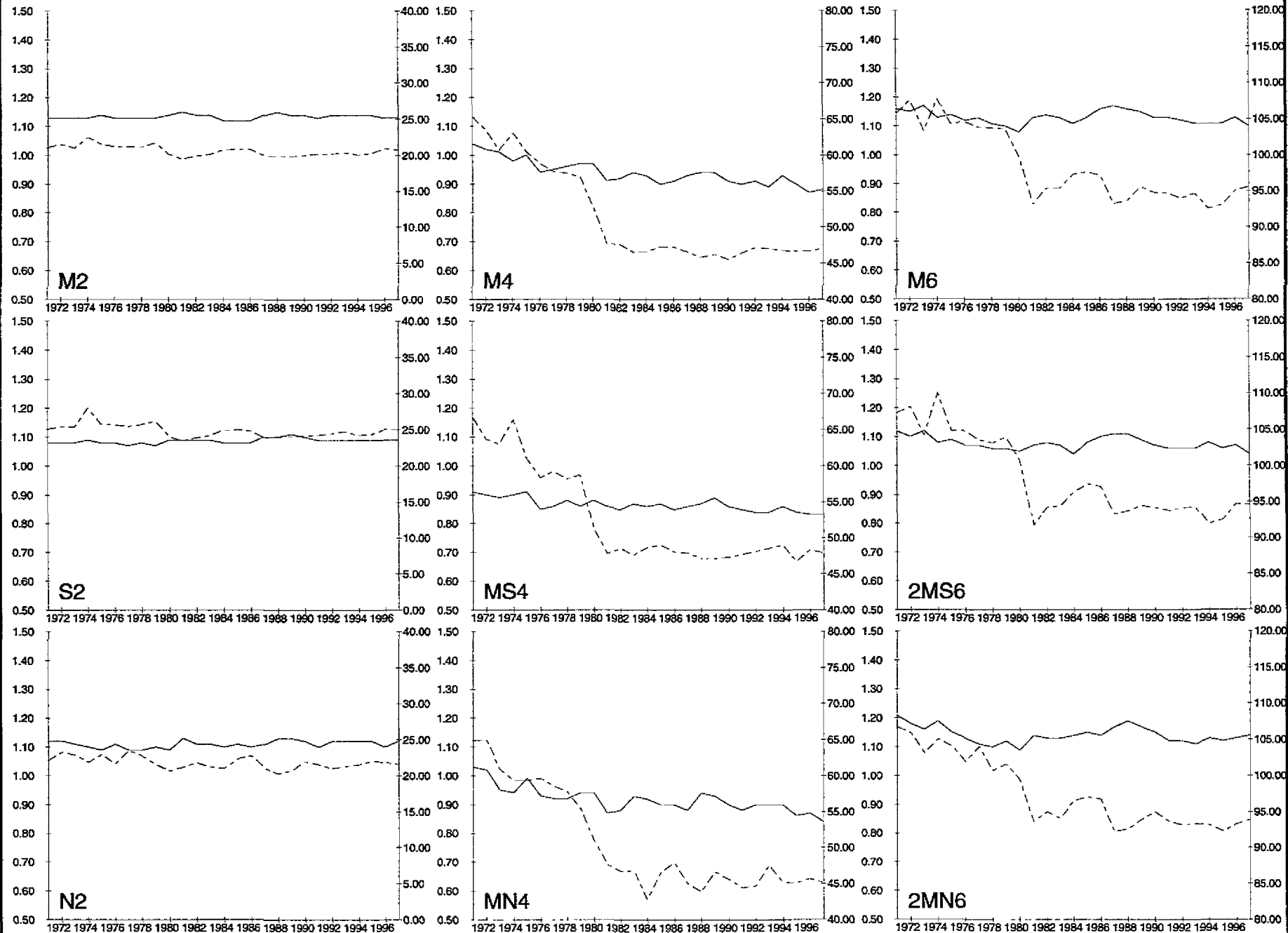


WLIDelft Hydraulics

Z-2591

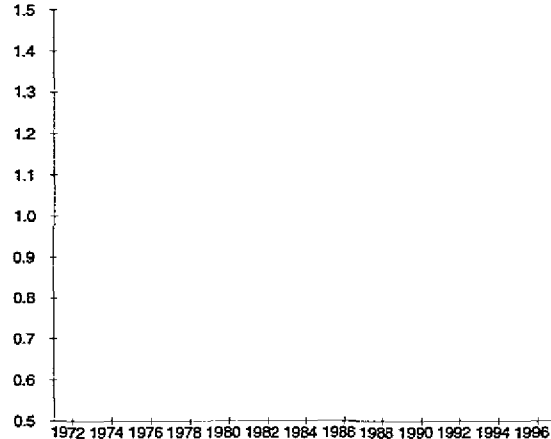
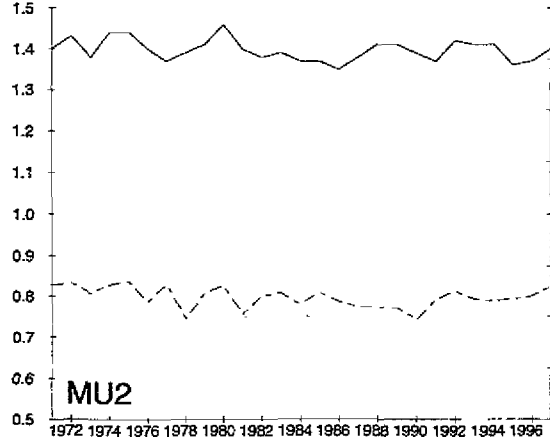
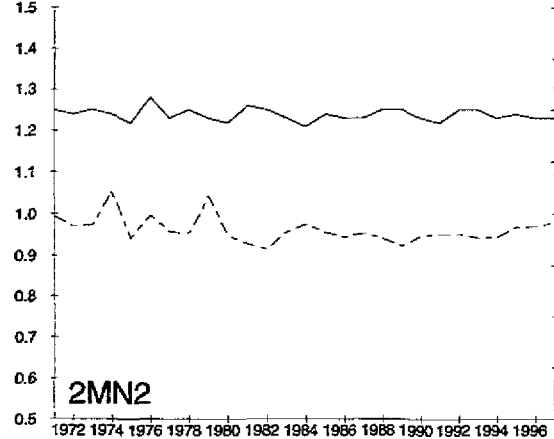
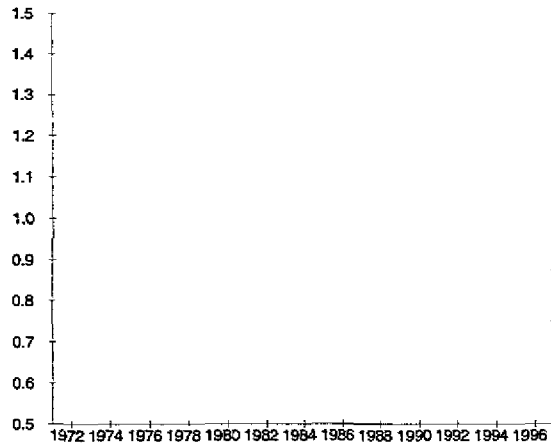
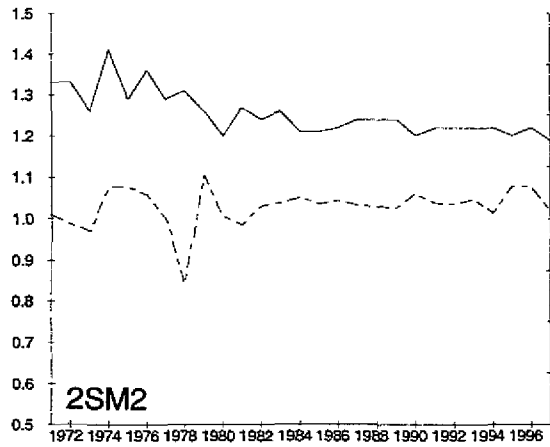
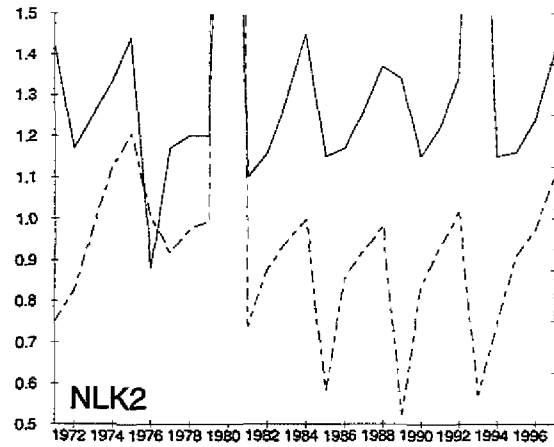
Fig. 19

Station : Hansweert



WLIDelft Hydraulics

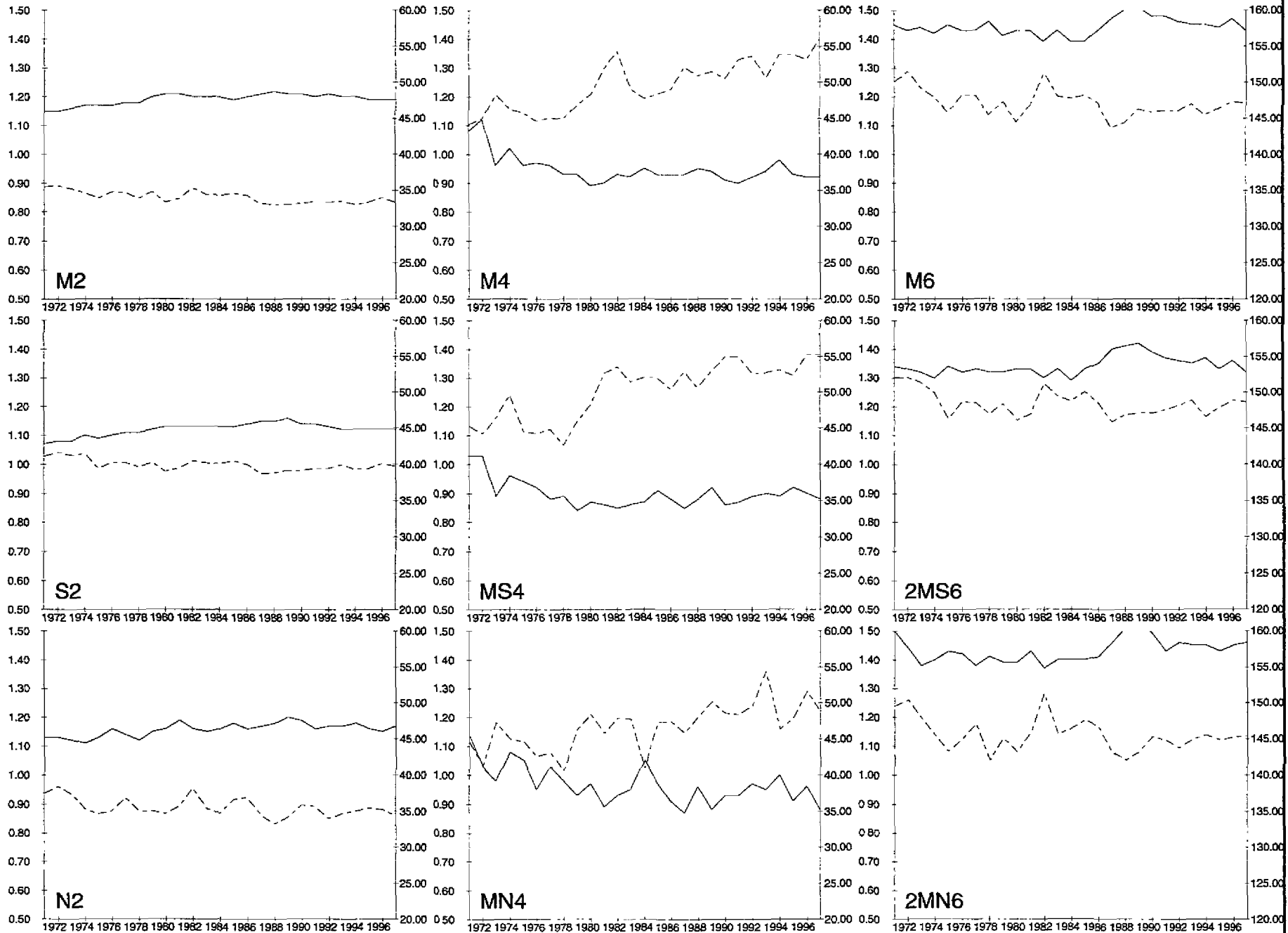
Station : Hansweert



Z-2591

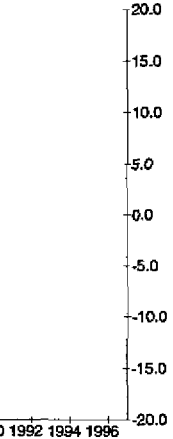
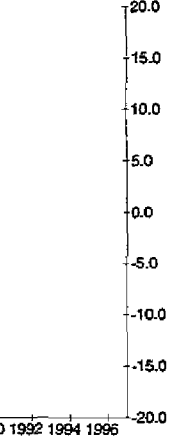
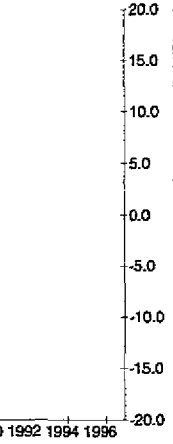
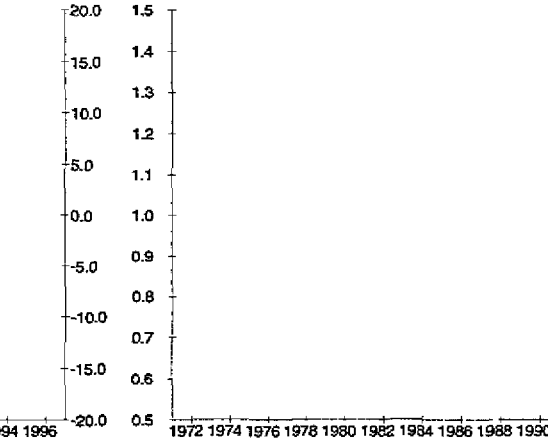
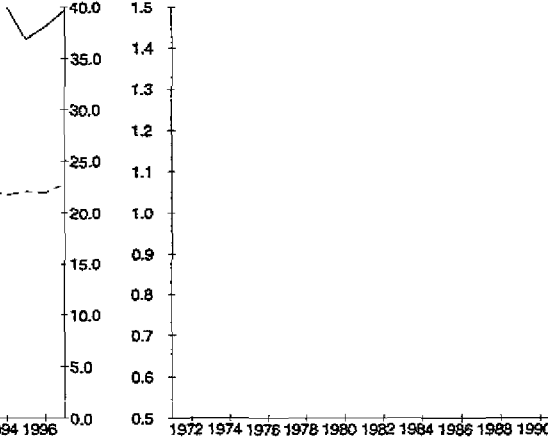
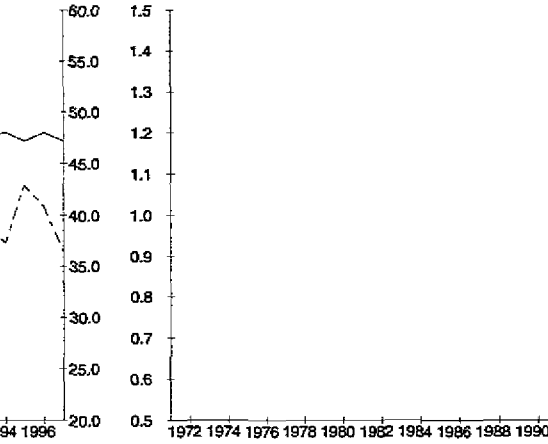
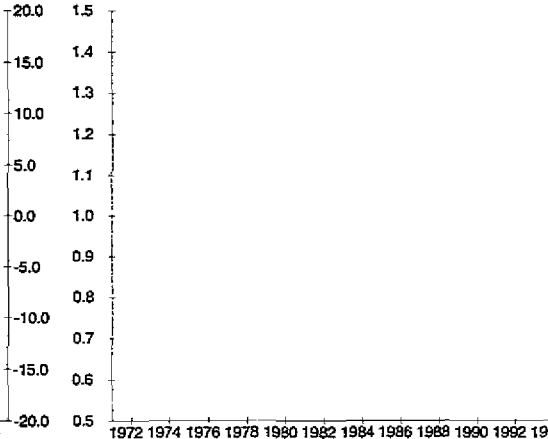
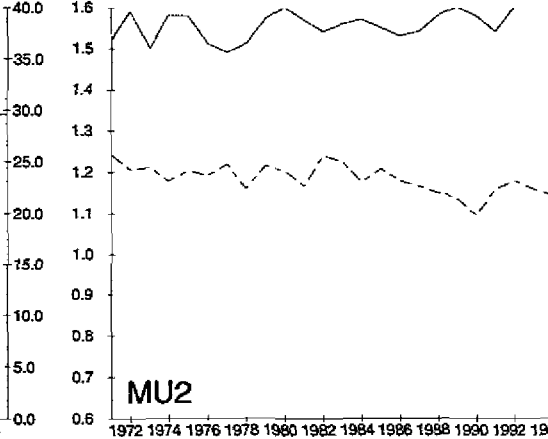
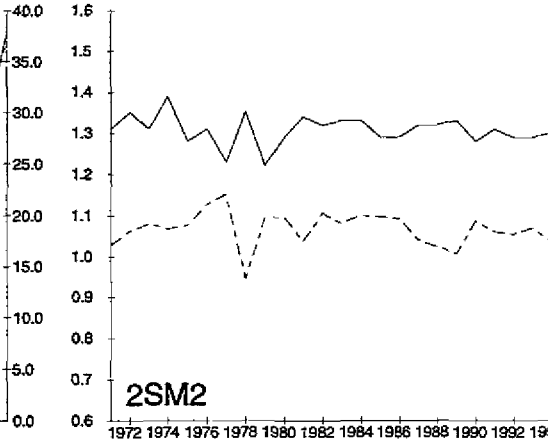
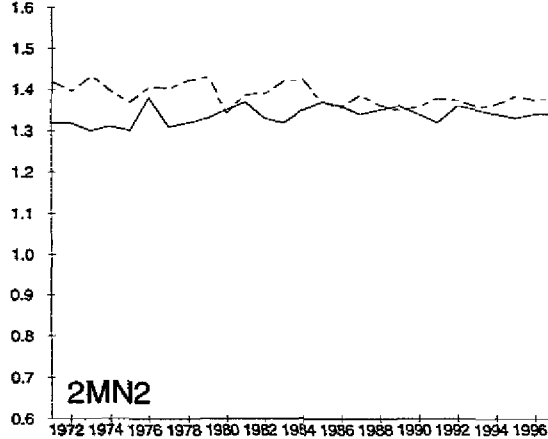
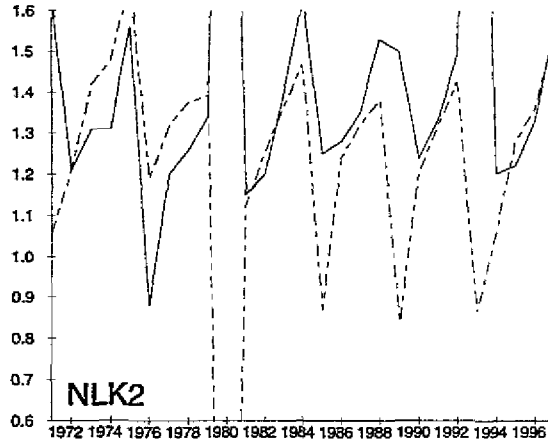
Fig. 1.10

Station : Bath



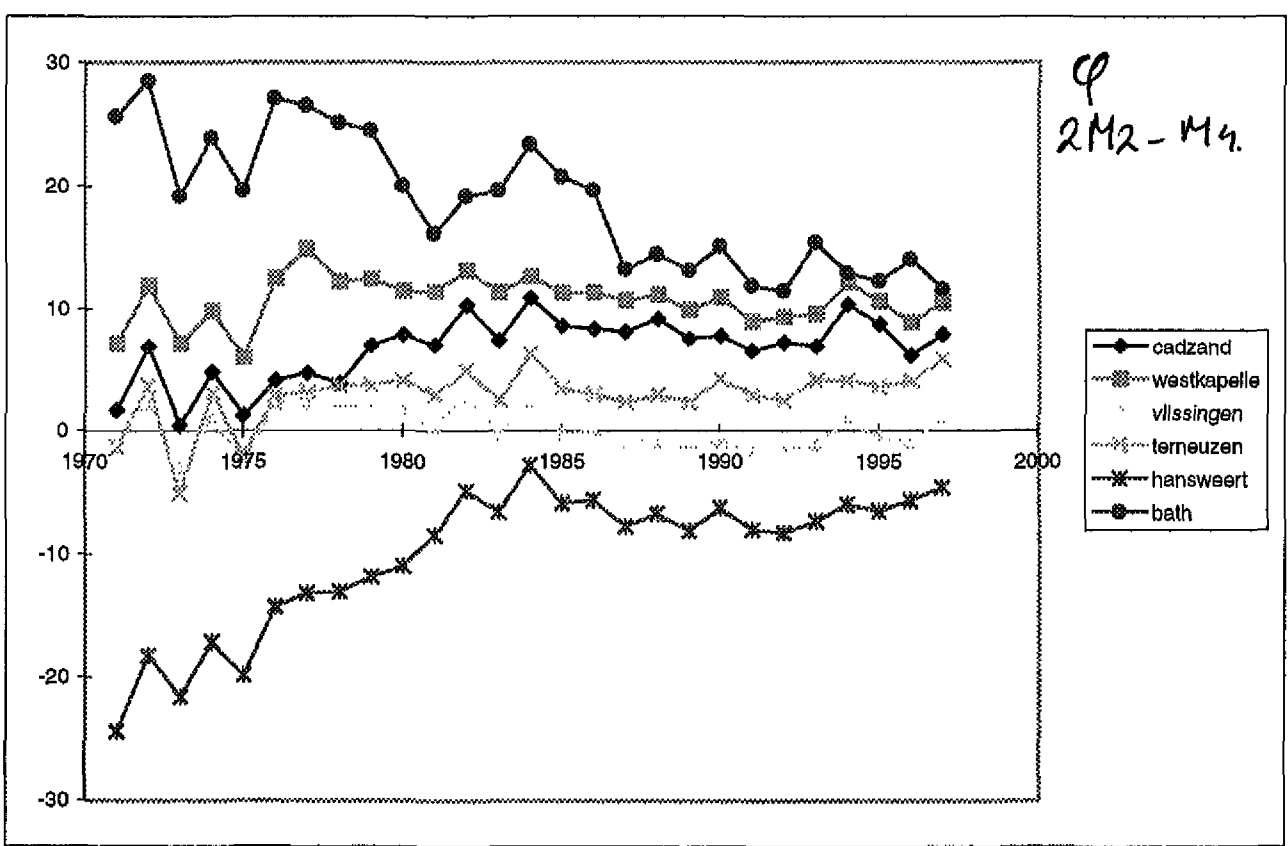
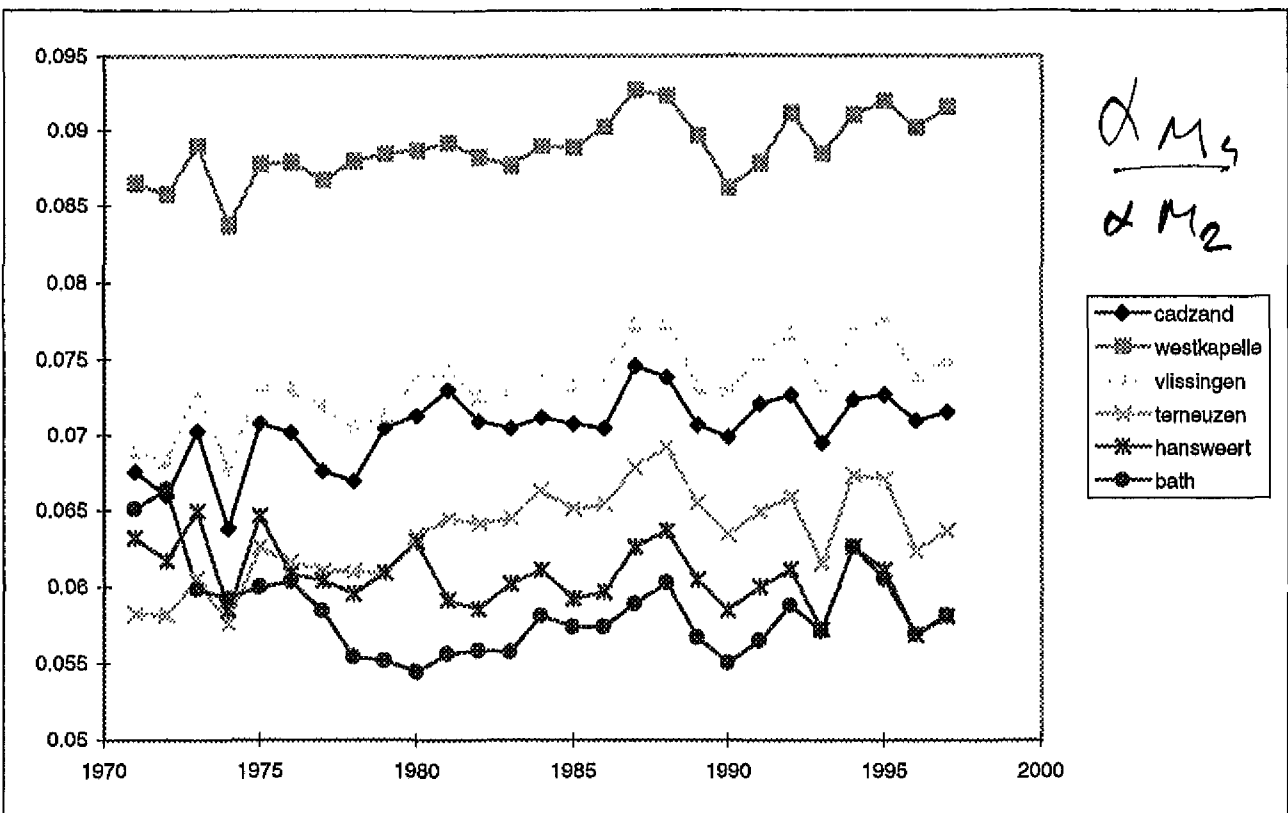
WLIDelft Hydraulics

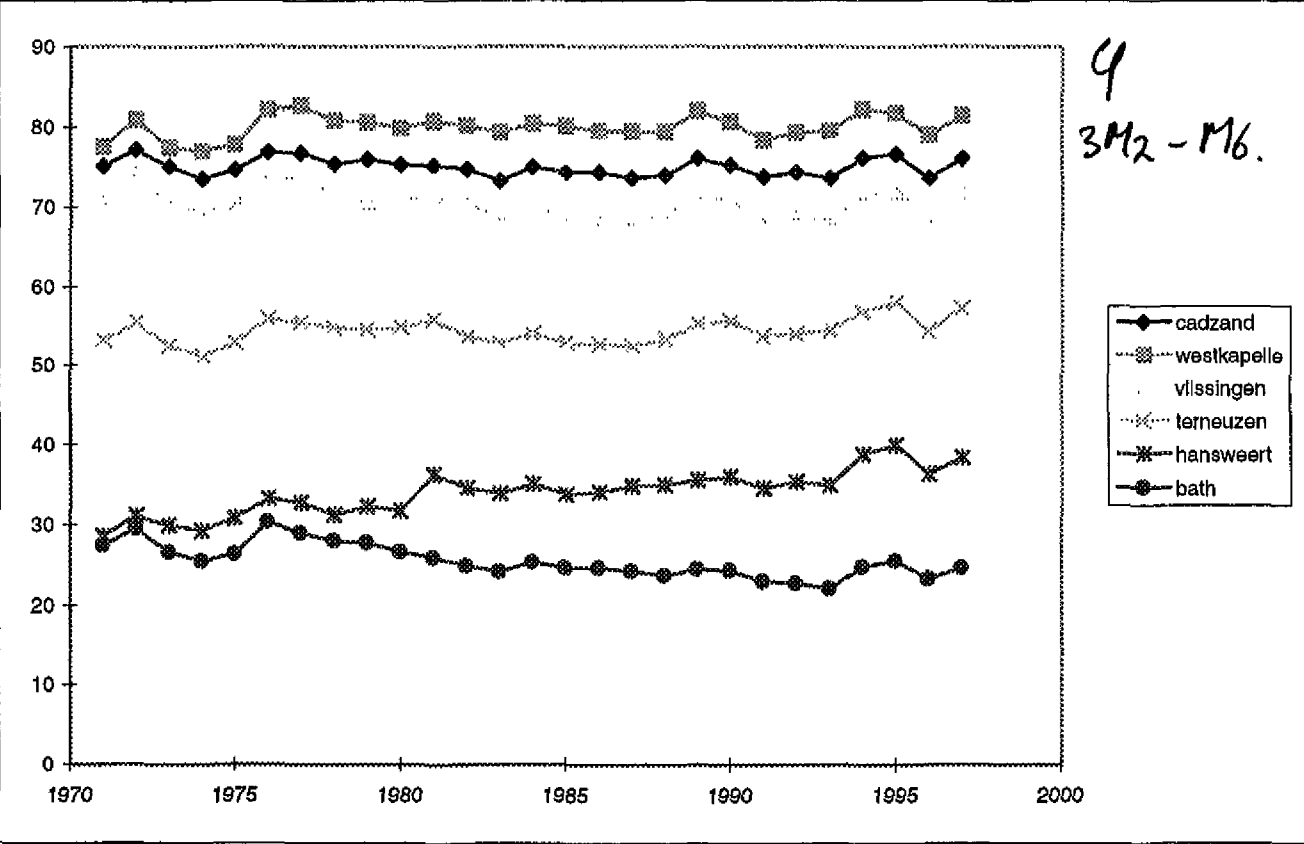
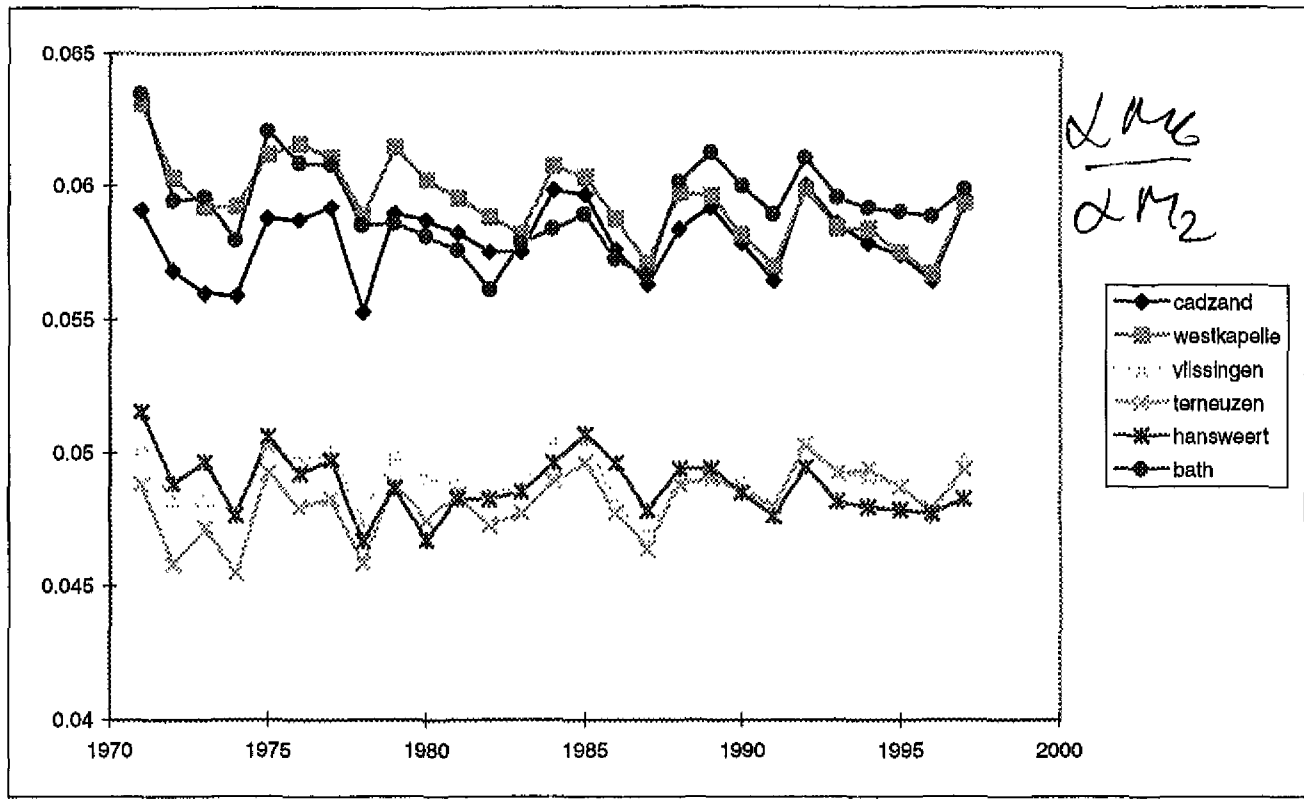
Station : Bath



Z-2591

Fig. 4.12



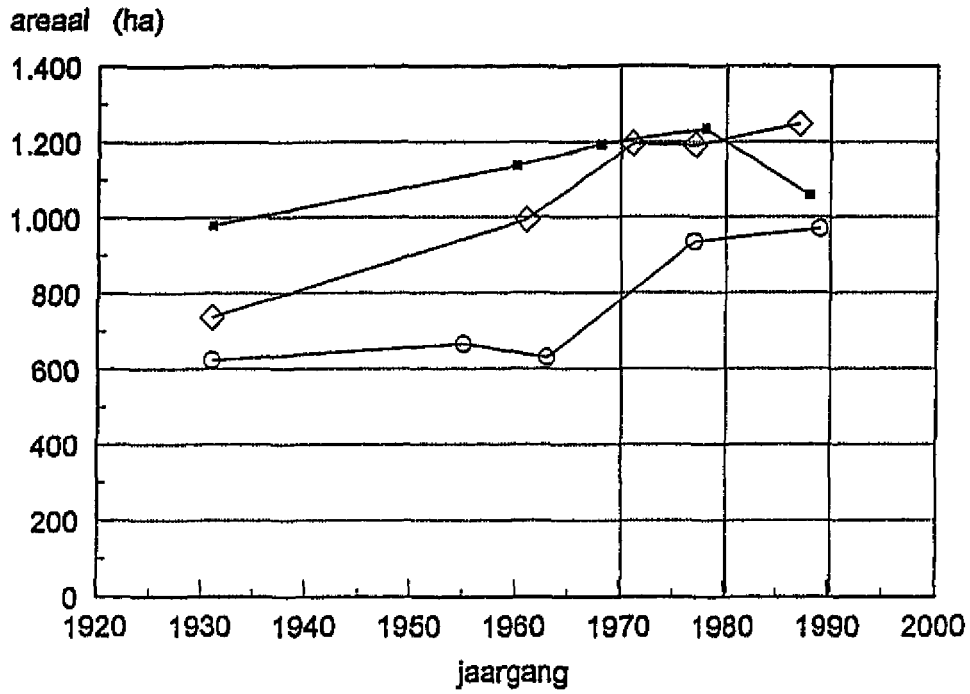


M6

Z2671

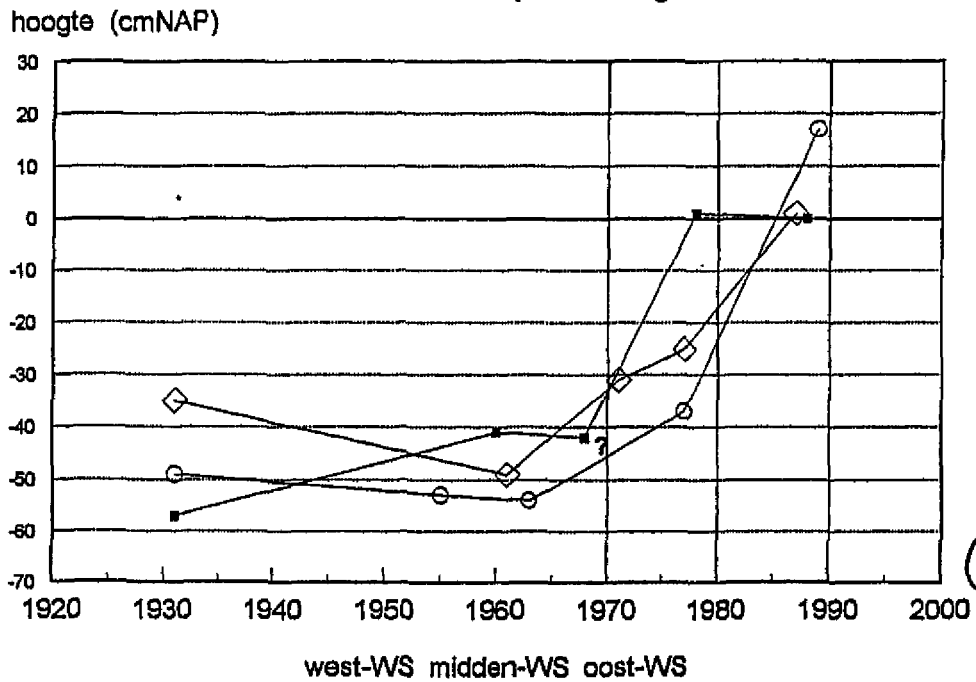
april
1999

Plaatareaal



5

Gemiddelde plaathoogte



6

ondergrens is -2mNAP

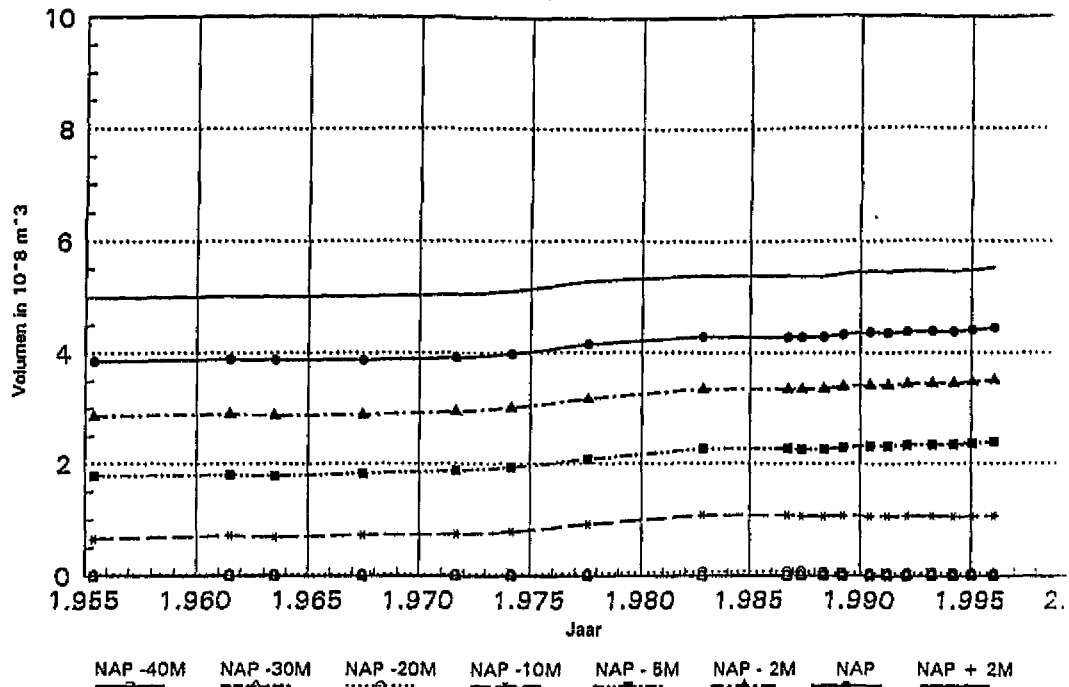
(Huijs, 1995)

Z2671

april
1999

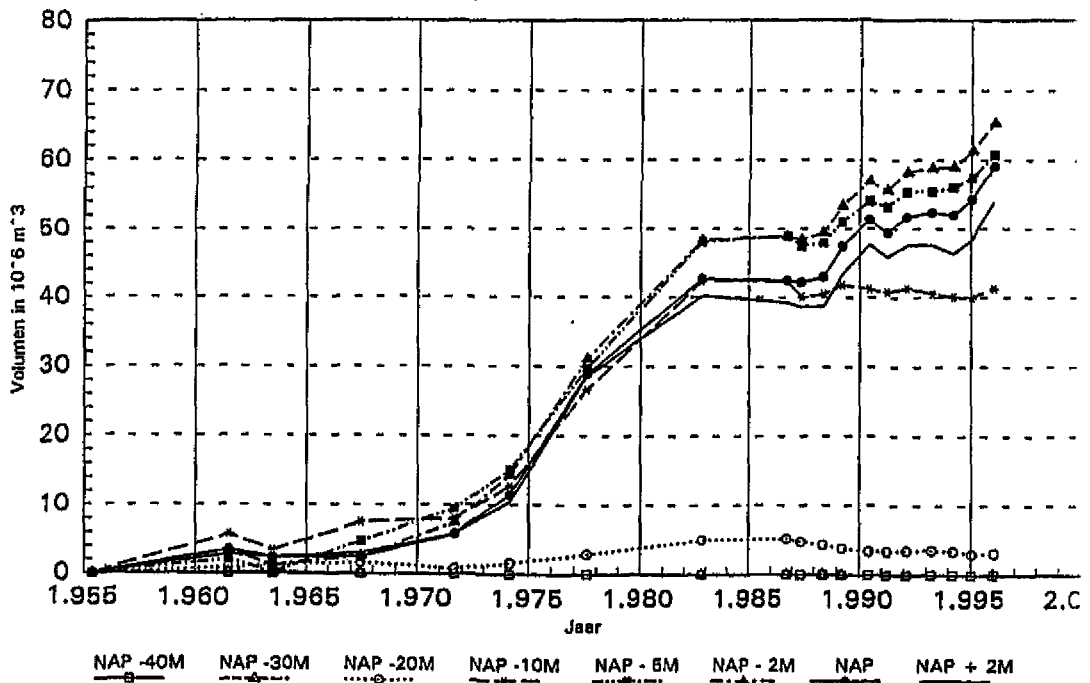
Oostelijk deel Westerschelde

Volumeverloop op diverse niveau's



Oostelijk deel Westerschelde

Volumeverand. op diverse niveau's t.o.v. 1955



(Mol et al., 1997)

Z2671

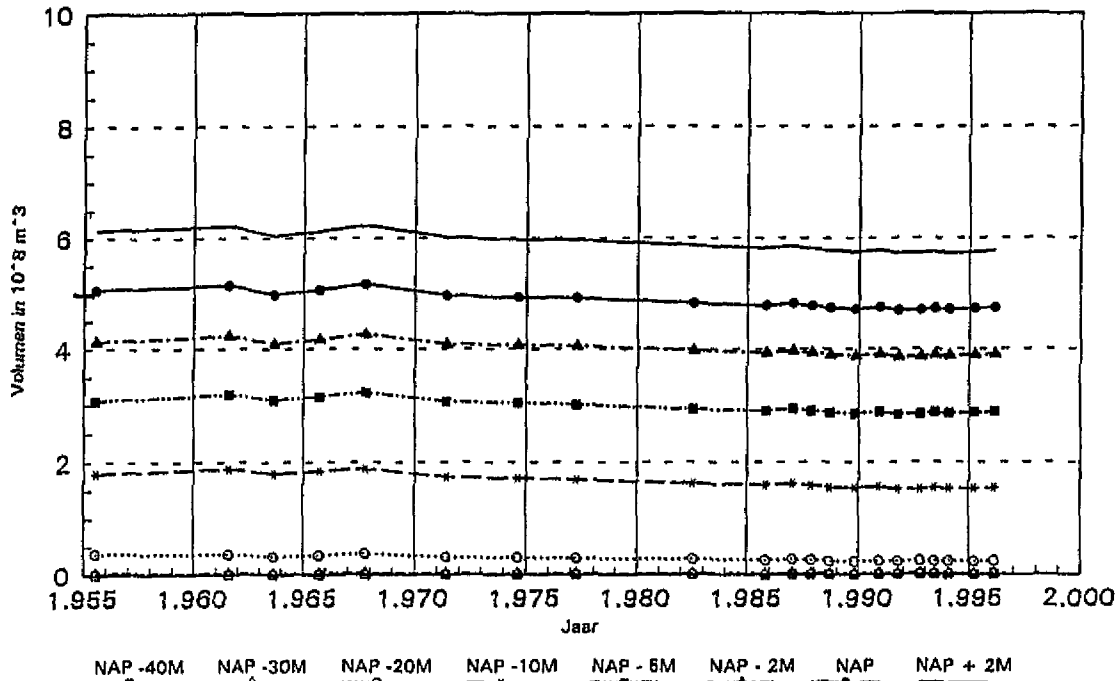
april
1999

WL | DELFT HYDRAULICS

Fig. 5

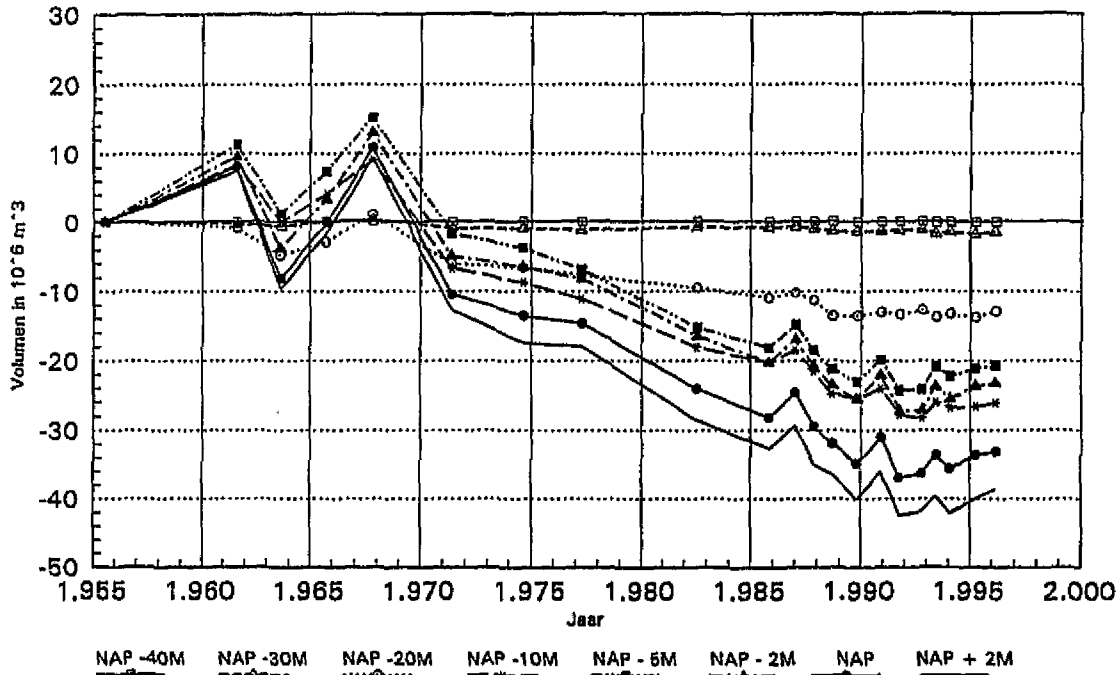
Midden deel Westerschelde

Volumeverloop op diverse niveau's



Midden deel Westerschelde

Volumeverand. op diverse niveau's t.o.v. 1955



(Mud et al., 1997)

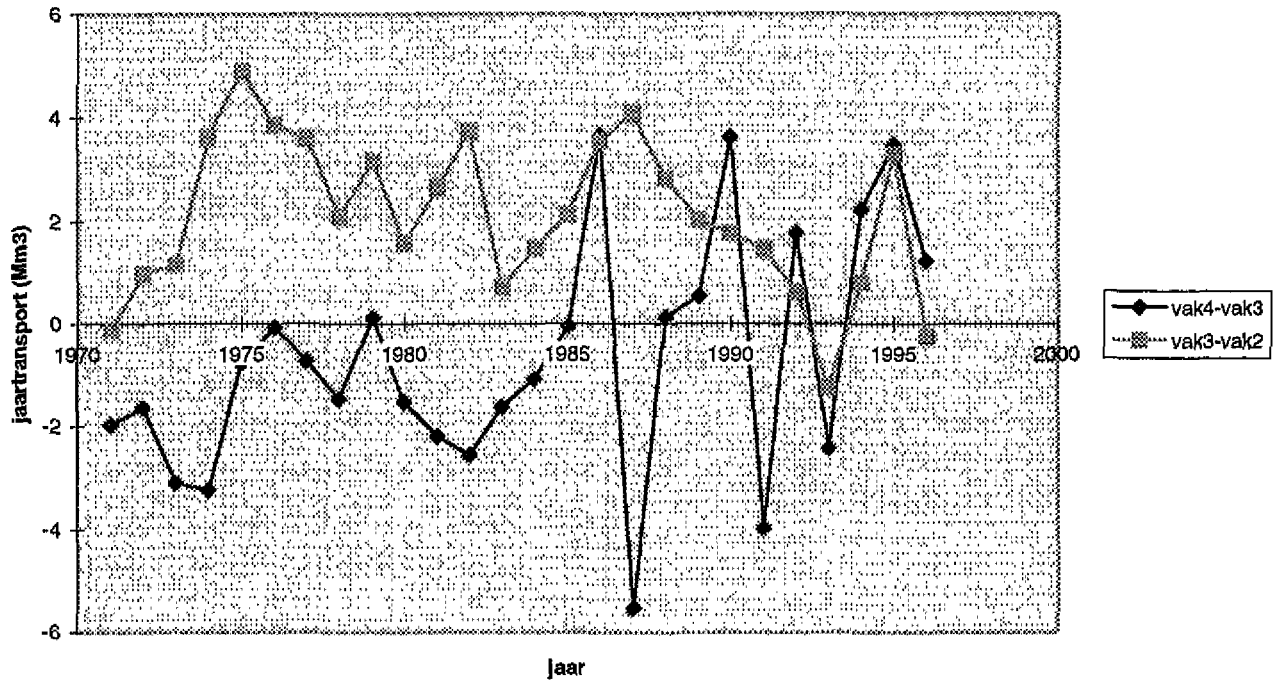
Z2671

april
1999

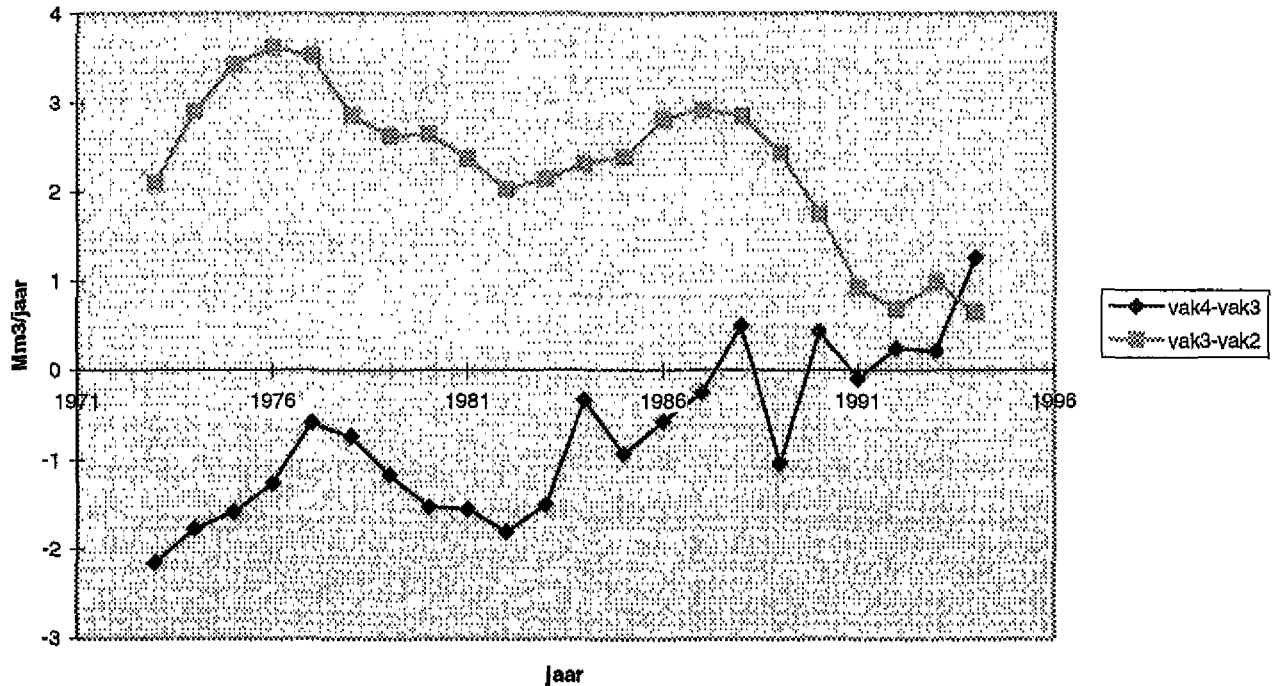
WL | DELFT HYDRAULICS

Fig. 6

Netto transport afgeleid uit zand-balans



5 jaar gemiddeld transport



Netto Transport

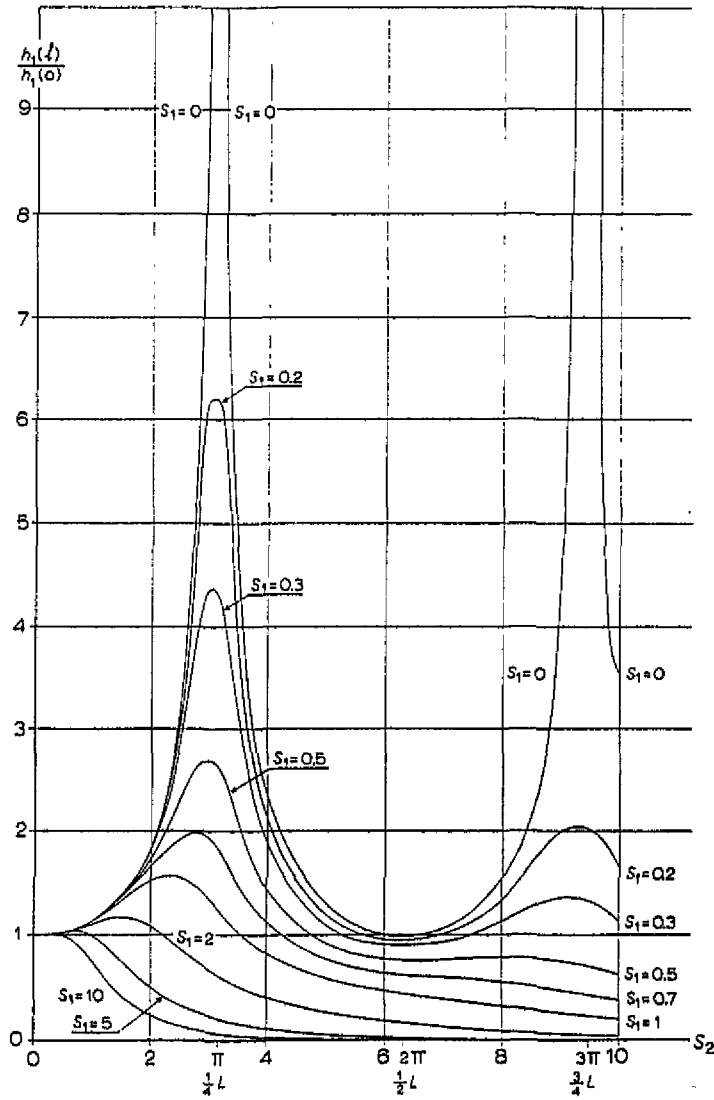
(Natuur uit den Bogaard, 1995)

Z2671

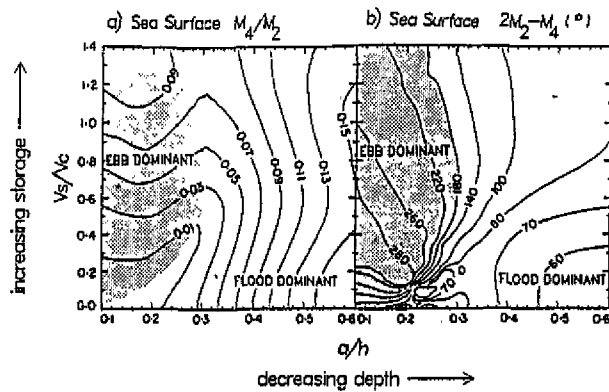
april
1999

WL | DELFT HYDRAULICS

Fig. 7



8



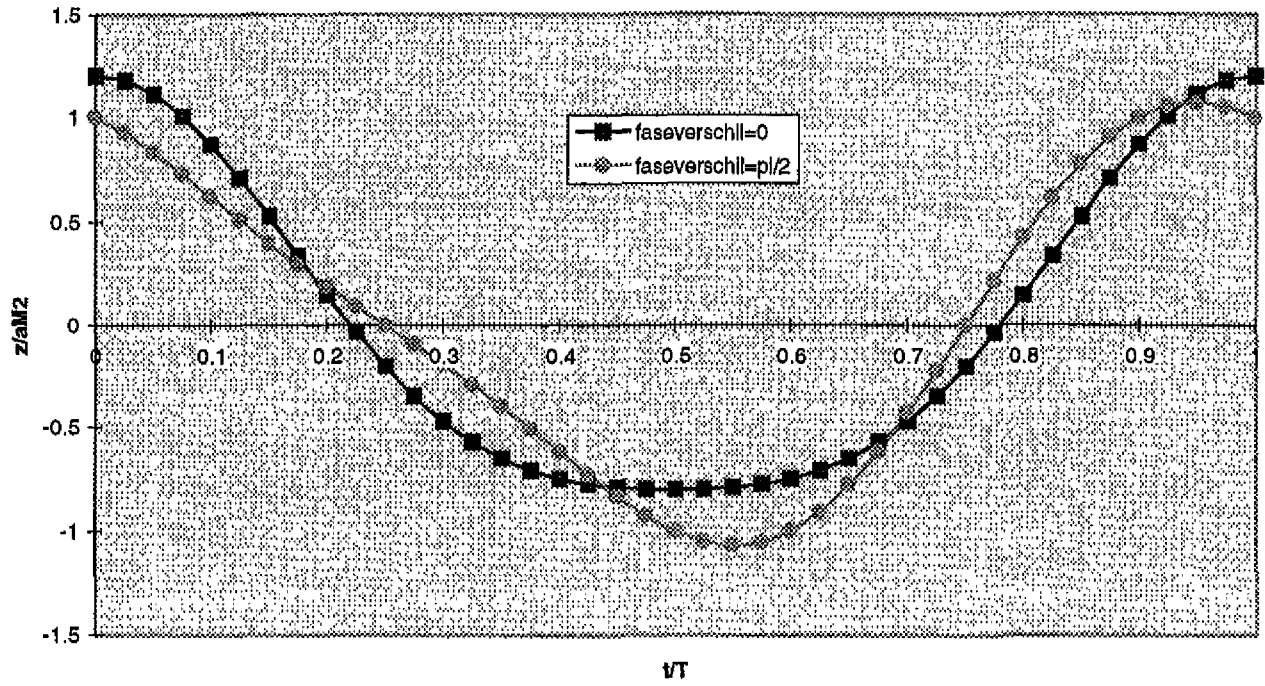
9

Figure 8 (Dronkers, 1964)
 Figure 9 (Speer et al., 1991)

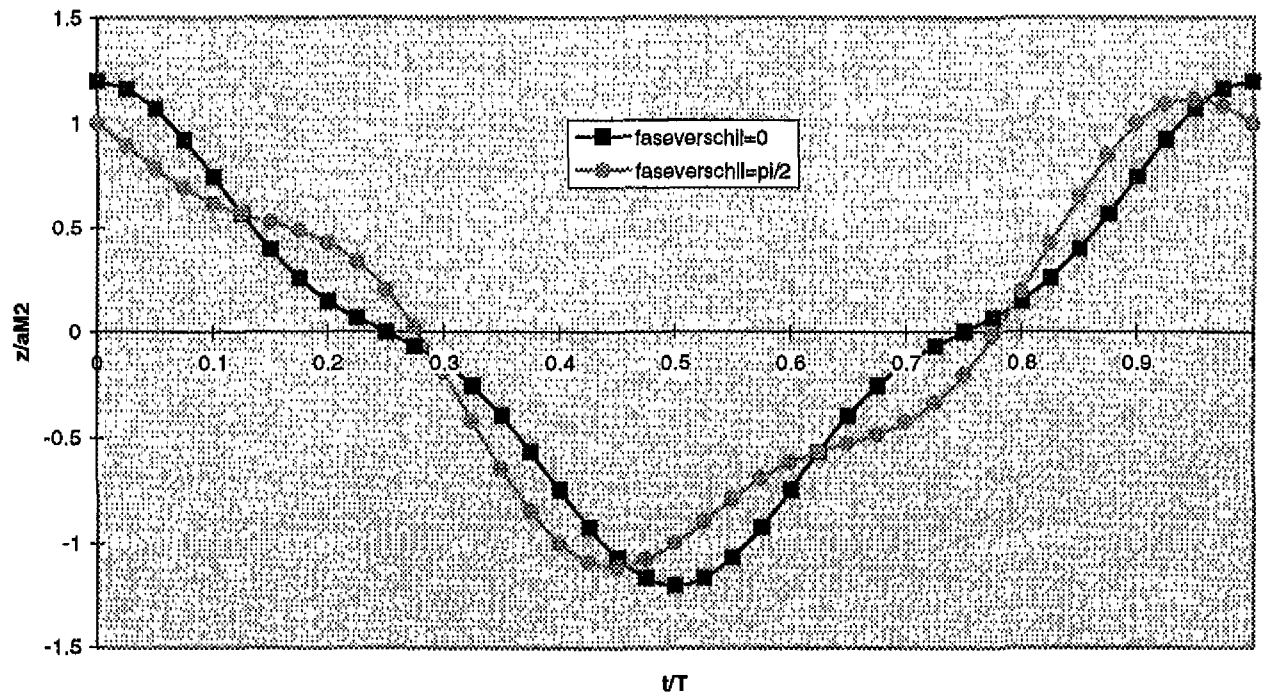
Z2671

april
 1999

M2+M4 met M4/M2=0.2



M2+M6 met M6/M2=0.2



Illustratie effect fase verschil van M4 en M6
t.o.v. M2

Z2671

april
1999



wL | delft hydraulics

**Rotterdamseweg 185
postbus 177
2600 MH Delft
telefoon 015 285 85 85
telefax 015 285 85 82
e-mail info@wldelft.nl
internet www.wldelft.nl**

**Rotterdamseweg 185
p.o. box 177
2600 MH Delft
The Netherlands
telephone +31 15 285 85 85
telefax +31 15 285 85 82
e-mail info@wldelft.nl
internet www.wldelft.nl**

