

*Voorspelling ontwikkeling kustlijn en
buitendelta's Waddenkust over de
periode 1990 - 2040*

WL rapport H1887, project kustgenese

Auteur:
H. Steetzel

***Voorspelling ontwikkeling kustlijn en
buitendelta's Waddenkust over de
periode 1990 - 2040***

WL rapport H1887, project kustgenese

SAMENVATTING

Ten behoeve van de voorspelling van de ontwikkeling van de Waddenkust is een dynamisch balansmodel ontwikkeld waarmee het grootschalige gedrag van de Waddenkust kan worden gesimuleerd.

Uitgangspunt voor de ontwikkeling van dit rekenmodel vormde de **schematisatie van de onderbroken kust**. Hierbij is in langsrichting onderscheid gemaakt tussen 'normale kustvakken' en de feitelijke zeegaten.

Ten opzichte van de normale kustvakken, die vergelijkbaar zijn met die bij een gesloten kust, is er bij een zeegat een optioneel modelleringsprobleem. De aanwezigheid van een geprononceerde buitendelta en de uitwisseling van grote hoeveelheden sediment met het achterliggende vloedbekken maakt immers dat gangbare transportrelaties hier niet toepasbaar zijn. De gebruikte beschrijving van het grootschalige gedrag van een buitendelta is gebaseerd op formuleringen voor een gemodificeerd twee-lijnenmodel [Bakker en de Vriend, 1993]. Hierin is het patroon van vloed- en ebgeulen in een zeegat-buitendelta-systeem ingebracht door het opleggen van een samenhangend systeem van bronnen en putten. De formulering en kwantificering van de hiertoe geforceerde transporten is daarbij onder andere gerelateerd aan de evenwichtsvorm van de betrokken buitendelta.

Op basis van deze uitgangspunten is vervolgens een nadere uitwerking gegeven aan de **ontwikkeling van een algemeen rekenmodel** voor een meer-voudig onderbroken kust.

Voor wat betreft de *zonering* in langsrichting is in de modelvergelijkingen onderscheid aangebracht tussen de normale kustvakken en de buitendelta's. In dwarsrichting worden een uit drie sublagen opgebouwde bovenlaag, bestaande uit een laag waarin zich de brekerzone bevindt, een tot de duinvoet reikende strandlaag en een duinlaag (tot de duintop), alsmede een uit twee sublagen bestaande onderlaag onderscheiden. Op deze wijze is een vijf-lagen/lijnen-model verkregen.

Het *transport* in langsrichting is per sublaag ingebracht door linearisatie van de golf- en/of getijgedreven transportkromme. Bij de modellering van het interne dwarstransport is eveneens gebruik gemaakt van een lineaire benadering in termen van dwarstransportconstanten en evenwichtsafstanden, waardoor het lokale dwarstransport een functie wordt van de relatieve waterdiepte en de lokale bodemhelling.

Het zeegatsysteem is geïmplementeerd door het kwantificeren van transporten in de *fictieve vloed- en ebgeulen* en natuurlijk van het netto transport door de keel van het zeegat.

Na discretisatie en uitwerking van de complete set van vergelijkingen is het stelsel numeriek opgelost, dit rekening houdend met additionele bronnen en putten en de modelrandvoorwaarden. Deze *modelrandvoorwaarden* hebben betrekking op het in- en uitgaande langstransport over de linker- en rechter-modelrand, het netto dwarstransport over diepwaterrand en duintop en natuurlijk het netto zandtransport door elk van de zeegaten.

Een en ander is geïmplementeerd in een onderzoeksversie van het *PC-model* MOBIC, engelstalig acroniem voor 'MOrphological Behaviour of Interrupted Coasts', gericht op de simulatie van het grootschalige gedrag van een onderbroken kust.

Zowel de programmatische correctheid als het feitelijke gedrag van de in het MOBIC-rekenmodel geïmplementeerde vergelijkingen zijn aan de hand van een uitgebreide reeks **test- en validatieruns** nader getoetst. Hierin werd op systematische wijze de invloed van de diverse modelparameters onderzocht.

Ten behoeve van de specifieke toepassing zijn vervolgens de **gegevens voor de Waddenkust** bijeengebracht.

De *grootschalige geometrie* heeft daarbij betrekking op de 'overall' geometrie van het betrokken gebied. Ten behoeve van de modellering is dit kustdeel 'rechtgetrokken' door toepassing van een gekromde referentielijn die de globale ligging van de Waddenkust volgt. Het 150 km lange rekengebied reikt daarbij van Callantsoog in de kop van Noord-Holland tot de oostpunt van Schiermonnikoog en omvat daarbij de vijf grote Waddeneilanden (Texel t/m Schiermonnikoog) en zes zeegaten (Marsdiep t/m Zoutkamperlaag).

Bij de nadere invulling van de verticale begrenzingen van de sublagen is het NAP-20m-niveau aangehouden als zeewaartse onderrand en het NAP-7m-niveau als scheiding tussen de boven- en de onderlaag.

Ten aanzien van de *detailgeometrie* is informatie afgeleid uit JARKUS-bestanden. Per individuele raai is hiertoe het volume in en de karakteristieke positie van een sublaag berekend. Analyse van alle relevante raaien in een specifiek jaar leverde informatie over de langsvariatie van deze positie op, feitelijk de modelinvoer. Met het oog op de tijdsvariatie is voor een 22-tal raaien de ontwikkeling van zowel laagvolumina als de afstand tussen aangrenzende lagen geanalyseerd, dit ten behoeve van de modellering van het dwarstransport.

De kwantificering van de *langstransport*-parameters vond plaats aan de hand van een grote serie van UNIBEST-LT-berekeningen, resulterend in een langsvariatie in langstransportconstanten en nultransport-hoeken. Een soortgelijke aanpak voor de kwantificering van het met name getijgedreven transport in de onderlaag leverde relatief gezien minder betrouwbare resultaten zodat hierbij de getalswaarden moesten worden afgeschat. Als resultaat van deze analyse werd het totale inkomende transport bij Callantsoog geraamd op 1,1 Mm³/jaar en het uitgaande transport over de rechterraand op circa 2,1 Mm³/jaar, resulterend in een netto verlies in langsrichting van 1,0 Mm³ op jaarbasis.

De grootte van de niveau-afhankelijke *dwarstransport*-constante werd gebaseerd op de bij de uitwisseling tussen verschillende lagen van toepassing verondersteld zijnde tijdschaal. De evenwichtsafstand tussen de verschillende lagen werd onder andere gebaseerd op de resultaten van de analyse van de tijdsvariatie van JARKUS-data in de genoemde raaien. Ten aanzien van het dwarstransport over de modelranden is uitgegaan van een langs- en tijdsconstante aanreiking ter grootte van 5 m³/m¹/jaar over de NAP-20m-dieptelijn en een overstuivingsverlies van 2 m³/m¹/jaar over de duintop.

De voor elk *zeegatsysteem* benodigde stuurparameters zijn bepaald aan de hand van een analyse van het gedrag en vorm van elk van de betrokken buitendelta's. Het netto transport door elk zeegat werd gebaseerd op de ontwikkeling van de sedimentvraag voor elk van de zeegaten zoals deze werd toegeleverd door de ISOS-studie [Louters en Gerritsen, 1994]. Voor de periode 1978-1990 bedraagt deze 12,7 Mm³/jaar en heeft daarmee een dominante invloed op het gedrag van de Waddenkust.

De reeds *uitgevoerde suppleties* zijn in het model ingebracht als bronnen. Voor het betrokken kustdeel gaat het hierbij om circa 30 Mm³ in de periode 1978-1993 (2 Mm³/jaar), dit met een toenemende intensivering in de laatste jaren.

Gegeven deze invoerdata is vervolgens gestreefd naar een **afregeling van het balansmodel voor de Waddenkust** (MOBIC-WK-model). Bij deze afregeling zijn verschillende balansniveaus onderscheiden; beginnende op het meest globale niveau, de kinematische balans voor het totale kustvak, tot op het balansniveau van individuele rekencellen. Ten behoeve van afregeling en interpretatie is de 150 km lange Waddenkust opgedeeld in 16 kustsecties, bestaande uit buitendelta's en delen van eilanden.

In eerste instantie is de *verificatie van de globale balans* nader uitgewerkt door de relevante

getalswaarden voor zowel de Waddenkust als het rekenmodel te bepalen. Bij de vaststelling van de winst- en verliesrekening voor de Waddenkust zijn de balanswaarden voor respectievelijk de boven- en onderlaag in de kustvakken en de buitendelta's vastgesteld op basis van een analyse van zowel JARKUS-data en vaklodingen, resulterend in een netto verlies uit het totale kustdeel ter grootte van $(7,2 \pm 3,0)$ Mm³/jaar. De relatief grote onzekerheid van 25% in deze getalswaarde is met name gerelateerd aan de onbekendheid met het gedrag van de diepere lagen. Bij beschouwing van de verdeling van dit verlies over land- en buitendeltavakken blijkt dat 75% van het verlies ten laste komt van de buitendelta's. Voor wat betreft de verdeling van de erosie over boven- en onderlaag blijkt dat 50 à 60% betrekking heeft op de onderlaag.

Uit confrontatie van deze balansdata met het netto effect van de randvoorwaarden in het MOBIC-WK-rekenmodel kwam naar voren dat blijkbaar 70% van de sedimentvraag vanuit de Waddenzee betrekking had op zand dat onttrokken werd uit het kuststelsel. Uitgaande van een correctiefactor van 0,7 op de netto sedimentvraag is de globale balans in orde.

Bij de *nadere afregeling* van het MOBIC-WK-model is getracht de ontwikkeling in de periode 1978-1990 te simuleren. Hiertoe is de berekende vak- en tijdsgemiddelde verplaatsingssnelheid van zowel de boven- als de onderlaag vergeleken met de uit metingen afgeleide waarden en werd de effectieve zandvraag nog iets bijgesteld. Tot slot werden met name de langtransportparameters in detail nog iets bijgestuurd opdat ook op raai-niveau redelijke overeenstemming in tijdsgemiddelde trendwaarden werd verkregen.

Uitgaande van het voor het tijdvak 1965-1978-1990 afgeregelde rekenmodel kan de verdere ontwikkeling van de kust eveneens worden beschouwd. Bij de **specificatie van de scenario's** werd onderscheid gemaakt tussen verschillende situaties.

Teneinde inzicht te krijgen in de betrouwbaarheid van de modelresultaten is het relatieve effect van een geringe wijziging in de modelinvoer op het berekeningsresultaat gekwantificeerd door het doorrekenen van verschillende spreidings-scenario's.

Verder is sprake van een drietal basisscenario's voor (gemiddelde) zeespiegelstijging, respectievelijk scenario A (het huidige scenario; 0,20 m/eeuw), scenario B (0,60 m/eeuw) en scenario Cs.

In het geval van stormscenario Cs is naast een meer extreme waterstandswijziging (0,85 m/eeuw) bovendien sprake van een ongunstig golf- en windklimaat. Teneinde het additionele effect van het ongunstige golf- en windklimaat te bepalen is bovendien een C-scenario geïntroduceerd.

Gegeven een bepaald scenario is vervolgens uitwerking gegeven aan de wijze waarop een en ander in het rekenmodel kan worden ingebracht. Een verzwaring van het golf- en windklimaat komt daarbij onder andere tot uitdrukking in een toename van de langtransportconstanten in de bovenlaag en een relatieve afname van de zandvraag (met 5%) door additionele afbraak van platen.

Zeespiegelstijging leidt tot vergrote zandvraag door de zeegaten en een dwarstransportgeïnduceerde aanpassing van het dwarsprofiel (Bruun-effect). Dit Bruun-effect is in het MOBIC-model ingebracht door het opleggen van een aan de waterstandstijging gekoppelde profielverflauwing.

Bij de interpretatie van de **resultaten van de modelberekeningen** met het MOBIC-WK-model is onderscheid gemaakt tussen de vaststelling van de autonome toekomstige kustlijnontwikkeling, de hierbij van toepassing zijnde betrouwbaarheid, de effecten van vergrote zeespiegelstijgings-snelheid en de relatieve effecten van een toename in de stormaanval.

Ten aanzien van de tijdsontwikkeling van de Waddenkust voor de periode 1990-2040 blijkt dat in grote lijn sprake is van een voortzetting van de huidige trend. Op lange termijn zal de snelheid waarmee veranderingen zich voltrekken langzaam afnemen. Het huidige systeemverlies van 7 à 8 Mm³/jaar zal, bij het achterwege blijven van supplementies, echter het nauwelijks

wijzigen. De erosie van de kustvakken, voorzover gelegen tussen de buitendelta's en boven het NAP-7m-niveau, bedraagt 20 à 25 % van het systeemverlies.

Bij de interpretatie van de absolute modelresultaten moet rekening worden gehouden met een zekere onbetrouwbaarheid in de modeluitkomsten. Aangezien de modeluitkomsten nooit nauwkeuriger kunnen zijn dan de invoer gaat het hierbij om een spreiding in de grootschalige trendwaarden van orde 25%. Uitgedrukt in de tijdsgemiddelde mobiliteit moet hierbij gedacht worden aan orde 1 à 2 m/jaar.

Een extra stijging van de gemiddelde waterstand heeft via een maximaal orde 20% grotere zandvraag, tot 1,6 Mm³/jaar extra, direct effect op de ontwikkeling van de Waddenkust. De extra erosie is daarbij primair geconcentreerd in de zeegaten en is qua grootte evenredig met de extra toename van de zeespiegelstijgingsnelheid. Rekening houdend met een gedeeltelijke concentratie van de achteruitgang ter plaatse van de zeegaten, levert dit 2 m/jaar als orde van grootte van de maximaal mogelijke extra achteruitgang door een toenemende stijgingssnelheid op. Voor de echte kustvakken is gaat het hierbij echter slechts om maximaal circa 0,5 Mm³/jaar extra.

Als gevolg van het dwarstransport-geïnduceerde 'Bruun-effect' gaan met name de echte kustvakken achteruit. Deze extra achteruitgang bedraagt, volgens het aangenomen 'Bruun-model', maximaal orde 1 m/jaar waarbij het gaat om ten hoogste 1 Mm³ op jaarbasis.

Aanwezigheid van een extreem golfklimaat maakt dat relatief gezien sprake is van een iets geringere zandvraag. Gecombineerd met een relatieve toename van de langtransportcapaciteit in de bovenlaag (als gevolg van toename dominante golfhoogte en ongunstige verdraaiing van de dominante golfrichting) zijn de effecten op kustvak-niveau sterk variabel waarbij sprake is van een zekere extra variatie in de orde van ± 1 m/jaar. Voor de echte kustvakken bedraagt het maximale extra verlies ten hoogste 1 Mm³/jaar.

Samenvattend neemt bij afwezigheid van verdere suppleties bij een meer ongunstig scenario de totale erosie van de Waddenkust toe van 7 tot circa 10 Mm³/jaar. Het aandeel van de kusterosie neemt zowel in absolute als relatieve toe, te weten van 2 tot 4 Mm³/jaar, zijnde respectievelijk 25 tot 40% van het systeemverlies.

Teneinde het verband te leggen tussen de berekende kusterosie en de conform het ingezette kustbeleid op het tegengaan van deze erosie gerichte suppletie-inspanning, is het feitelijke kustbeleid in het MOBIC-model ingebracht door implementatie van een zogenaamde 'auto-nourishment-mode'. Hierbij wordt uitgaande van een kritieke kustlijnligging zowel de plaatsafhankelijkheid als het tijdsverloop van de benodigde suppletiehoeveelheden berekend.

Uit de interpretatie van de resultaten van deze berekeningen komt naar voren dat de benodigde suppletiehoeveelheid de gewenste afname in de kusterosie met circa 60% overtreft.

De voor de handhaving van de Waddenkust benodigde gemiddelde suppletie-inspanning bedraagt dan ook 3 tot 6 Mm³ op jaarbasis. Op zich lijkt deze hoeveelheid geen probleem te hoeven vormen. Een en ander maakt echter wel dat in toenemende mate sprake is van een duidelijke beïnvloeding van het kuststelsel, waarbij de verhouding tussen externe toevoer door suppleties en de autonome systeemosie toeneemt van 15% in de afgelopen jaren tot mogelijk 40 à 60% in de toekomst.

De feitelijke ontkoppeling van morfologische deelsystemen als Waddenkust versus Waddenzee en Waddenkust versus Hollandse kust, lijkt dan ook niet (meer) gerechtvaardigd.

Ter afsluiting is een uitgebreid meer beschouwend overzicht gegeven van de voornaamste **conclusies en aanbevelingen**. Ten aanzien van de invulling van vervolgonderzoek wordt onder andere aanbevolen de ingezette ontwikkeling van grootschalige gedragsmodellen parallel aan en in samenhang met procesmodellen voort te zetten. Naast tal van meer specifieke aanbevelingen ten behoeve van de verbetering van het MOBIC-model, wordt ook aanbevolen om ten behoeve van een volgende kustnota te streven naar een de gehele Nederlandse kust omvattend MOBIC-NK-model.

INHOUDSOPGAVE

SAMENVATTING

INHOUDSOPGAVE	i
LIJST VAN TABELLEN	iii
LIJST VAN FIGUREN	v
LIJST VAN SYMBOLEN	vii
1 INLEIDING	1.1
1.1 Doelstelling	1.1
1.2 Kader en achtergronden	1.1
1.3 Gevolgde aanpak	1.2
1.4 Opdracht	1.3
2 BESCHRIJVING ONDERBROKEN KUST	2.1
2.1 Inleiding	2.1
2.2 Hoofdonderdelen onderbroken-kust-systeem	2.1
2.3 Onderlinge interactie hoofdcomponenten	2.3
2.4 Gedrag buitendelta	2.4
3 UITWERKING REKENMODEL	3.1
3.1 Inleiding	3.1
3.2 Basisvergelijkingen	3.2
3.3 Zonering in dwars- en langsrichting	3.3
3.4 Modelleren langtransport	3.4
3.5 Modelleren dwarstransport	3.8
3.6 Modelleren zeegat-systeem	3.12
3.7 Discretisatie en oplosprocedure	3.18
3.8 Beschrijving PC-model	3.27
4 TEST- EN VALIDATIE-BEREKENINGEN	4.1
4.1 Inleiding	4.1
4.2 Langtransport	4.2
4.3 Dwarstransport	4.3
4.4 Combinatie langs- en dwarstransport	4.5
4.5 Gedrag zeegat	4.7
4.6 Bronnen en putten	4.11
4.7 Constructies	4.12
4.8 Rekenparameters	4.13
4.9 Conclusies en aanbevelingen	4.15
5 SPECIFICATIE GEGEVENS WADDENMODEL	5.1
5.1 Inleiding	5.1
5.2 Overzicht benodigde gegevens	5.1
5.3 Grootschalige geometrie	5.2
5.4 Detailgeometrie	5.7
5.5 Specificatie langtransportparameters	5.10
5.6 Specificatie dwarstransportparameters	5.15
5.7 Kenmerken zeegatsysteem	5.17
5.8 Additionele bronnen en putten	5.19
5.9 Rekenproces	5.21

6	AFREGELING WADDENMODEL	6.1
6.1	Inleiding	6.1
6.2	Verificatie globale balans	6.3
6.3	Gevoeligheidsonderzoek	6.8
6.4	Afregeling op kustsectie-niveau	6.10
6.5	Nadere afregeling op raai-niveau	6.11
6.6	Conclusies en aanbevelingen	6.12
7	SPECIFICATIE SCENARIO'S	7.1
7.1	Inleiding	7.1
7.2	Invulling spreidingsscenario's	7.1
7.3	Zeespiegelstijgingsscenario's	7.2
7.4	Effecten op het langstransport	7.3
7.5	Effecten op het dwarstransport	7.4
7.6	Effecten op het transport door het zeegat	7.7
7.7	Zandvraag vloedkommen	7.7
8	VOORSPELLINGEN	8.1
8.1	Inleiding	8.1
8.2	Autonome ontwikkeling kustlijn	8.2
8.3	Vaststelling betrouwbaarheid	8.3
8.4	Effect extra zeespiegelstijging	8.4
8.5	Effect ongunstig golf- en windklimaat	8.8
8.6	Effect handhavingsbeleid	8.10
8.7	Samenvatting en conclusies	8.14
9	CONCLUSIES EN AANBEVELINGEN	9.1
9.1	Inleiding	9.1
9.2	Conclusies	9.1
9.3	Aanbevelingen	9.10
	LITERATUUR	Lit.-1
Appendix A:	Nadere analyse detailberekeningen Eijerlandse Gat	A-1
Appendix B:	Resultaten test- en validatie-runs	B-1

LIJST VAN TABELLEN

3.7.1	<i>Overzicht celcoderingen t.b.v. rekenalgorithme.</i>	3.23
3.8.1	<i>Overzicht basis- en constanten-array's in datafile (MOBIC-0.60).</i>	3.28
3.8.2	<i>Overzicht van de meest relevante files.</i>	3.30
4.1.1	<i>Hoofdingeling beschouwde testgevallen.</i>	4.1
4.1.2	<i>Overzicht testgevallen T100-serie.</i>	4.2
4.2.1	<i>Overzicht testgevallen T200-serie.</i>	4.3
4.3.1	<i>Overzicht testgevallen T300-serie.</i>	4.4
4.3.2	<i>Overzicht resultaten tijdschaal dwarstransport.</i>	4.5
4.4.1	<i>Overzicht testgevallen T400-serie.</i>	4.6
4.5.1	<i>Overzicht testgevallen T500-serie.</i>	4.7
4.5.2	<i>Specificatie testgevallen T570-serie.</i>	4.9
4.5.3	<i>Specificatie testgevallen T580-serie.</i>	4.10
4.5.4	<i>Specificatie testgevallen T590-serie.</i>	4.11
4.6.1	<i>Overzicht testgevallen T600-serie.</i>	4.11
4.7.1	<i>Overzicht testgevallen T700-serie.</i>	4.12
4.8.1	<i>Overzicht testgevallen T800-serie.</i>	4.13
5.3.1	<i>Overzicht parameters referentielijn.</i>	5.4
5.3.2	<i>Overzicht kustsecties Waddenmodel.</i>	5.5
5.3.3	<i>Overzicht zeegaten Waddenmodel en enkele verzamelde kenmerken.</i>	5.6
5.3.4	<i>Overzicht grootschalige segmentering.</i>	5.6
5.4.1	<i>Overzicht scheidingsniveaus lagen.</i>	5.7
5.4.2	<i>Overzicht gemodelleerde lagen.</i>	5.8
5.4.3	<i>Selectie JARKUS-raaien t.b.v. analyse langsvariatie.</i>	5.8
5.4.4	<i>Overzicht geselecteerde detailraaien.</i>	5.9
5.5.1	<i>Overzicht karakteristieke sedimenteigenschappen.</i>	5.11
5.5.2	<i>Overzicht raaien t.b.v. effect horizontaal getij.</i>	5.12
5.5.3	<i>Kustconstanten uit andere studies; naar Bakker [1987].</i>	5.13
5.5.4	<i>Overzicht resultaten langstransport onderlaag.</i>	5.14
5.6.1	<i>Kwantificering dwarstransportconstanten.</i>	5.16
5.7.1	<i>Overzicht geometrie-gerelateerde parameters buitendelta's.</i>	5.17
5.7.2	<i>Overzicht netto sedimentvraag van zeegaten in het Waddenmodel.</i>	5.18
5.8.1	<i>Overzicht reeds uitgevoerde suppleties.</i>	5.20
5.8.2	<i>Overzicht modelinvoer uitgevoerde suppleties.</i>	5.21
6.1.1	<i>Overzicht verschillende balansniveaus.</i>	6.1
6.1.2	<i>Overzicht grootschalige detailsegmentering.</i>	6.2
6.2.1	<i>Overzicht balansdata kustvakken voor bovenlaag (1978-1990).</i>	6.4
6.2.2	<i>Overzicht balansdata kustvakken voor onderlaag.</i>	6.5
6.2.3	<i>Overzicht balansdata buitendelta's.</i>	6.6
6.2.4	<i>Samenstelling globale balans op basis van randtransport (modelwaarden).</i>	6.8
6.3.1	<i>Overzicht uitgevoerde gevoeligheidsberekeningen.</i>	6.9
7.1.1	<i>Totaaloverzicht scenario's.</i>	7.1
7.2.1	<i>Overzicht spreidingsscenario's.</i>	7.2
8.1.1	<i>Totaaloverzicht uitgevoerde berekeningen.</i>	8.1
8.2.1	<i>Resultaten kustlijnontwikkeling in bovenlaag (1990-2040).</i>	8.2
8.2.2	<i>Grootschalige erosiewaarden voor scenario A (1990-2040).</i>	8.3
8.2.3	<i>Grootschalige erosiewaarden voor huidige situatie (1978-1990).</i>	8.3
8.4.1	<i>Resultaten additionele kustlijnbeving in bovenlaag a.g.v. toenemende zandvraag.</i>	8.5
8.4.2	<i>Grootschalige erosiewaarden voor (zandvraag)scenario's A, B en C (periode 1990-2040).</i>	8.6
8.4.3	<i>Netto effect additionele zandvraag uitgedrukt in grootschalige erosiewaarden (periode 1990-2040).</i>	8.6
8.4.4	<i>Resultaten additionele kustlijnbeving in bovenlaag a.g.v. 'Bruun-bijdrage'.</i>	8.7
8.4.5	<i>Grootschalige erosiewaarden voor scenario's C en Cb (periode 1990-2040).</i>	8.7

8.4.6	<i>Netto effect 'Bruun-bijdrage' uitgedrukt in grootschalige erosiewaarden voor scenario C (periode 1990–2040).</i>	8.8
8.5.1	<i>Overzicht berekeningen stormscenario's.</i>	8.9
8.5.2	<i>Resultaten additionele kustlijnbeveiliging in bovenlaag voor ongunstig golf- en windklimaat.</i>	8.9
8.5.3	<i>Grootschalige erosiewaarden voor scenario's C en Cs (periode 1990–2040).</i>	8.10
8.5.4	<i>Netto effect ongunstig golf- en windklimaat uitgedrukt in grootschalige erosiewaarden voor scenario Cs (periode 1990–2040).</i>	8.10
8.6.1	<i>Grootschalige erosiewaarden voor scenario's A en An (periode 1990–2040).</i>	8.12
8.6.2	<i>Netto effect suppletiebeleid uitgedrukt in grootschalige erosiewaarden voor scenario A (periode 1990–2040).</i>	8.13
8.6.3	<i>Schatting/berekening tijdsgemiddelde suppletiebehoefte/inspanning voor kustvakken bij verschillende scenario's (periode 1990–2040).</i>	8.13
A-1	<i>Schematisch overzicht berekeningen Eijerlandse Gat model.</i>	A-1
A-2	<i>Overzicht van komaanduidingen aangepast Eijerlandse Gat model (A-serie).</i>	A-2
A-3	<i>Overzicht van deelsecties Eijerlandse gat.</i>	A-2
A-4	<i>Overzicht geïntegreerde resultaten.</i>	A-2
A-5	<i>Overzicht getijgemiddelde resultaten per vak.</i>	A-3
A-6	<i>Overzicht resultaten per getijfase.</i>	A-3
A-7	<i>Overzicht resultaten per vak voor eb-fase.</i>	A-3
A-8	<i>Overzicht resultaten per vak voor vloed-fase.</i>	A-3
A-9	<i>Overzicht hydraulische condities (B-serie).</i>	A-5
A-10	<i>Totaaloverzicht berekende transportbijdragen.</i>	A-6

LIJST VAN FIGUREN

- 2.2.1 Schematische weergave zeegat-systeem

- 3.2.1 Definitie parameters balansvergelijking
- 3.3.1 Definitie modellagen rekenmodel
- 3.4.1 Linearisatie transportkromme
- 3.5.1 Schematisatie dwarsprofiel
- 3.5.2 Overzicht balansvakken
- 3.5.3 Schematisch dwarsprofielvorm
- 3.6.1 Transportbanen in buitendelta
- 3.6.2 Geometrie buitendelta
- 3.6.3 Definitie transportvectoren
- 3.6.4 Transportbanen delta-systeem; evenwichtssituatie
- 3.7.1 Celcoderingen rekenalgorithme
- 3.8.1 Structuur PC-model MOBIC

- 5.1.1 Overzicht Waddenkust
- 5.1.2 Detail zuid-westelijke Waddenkust
- 5.1.3 Detail noord-oostelijke Waddenkust
- 5.3.1 Overzicht Waddenkust; Prototype en model
- 5.3.2 Details Waddenkust; Ligging JARKUS-raaien
- 5.3.3 Details Waddenkust; Dwarsprofielen JARKUS-raaien
- 5.4.1 Voorbeeld interne laagdynamiek; Noord-Holland, raai 1
- 5.4.2 Voorbeeld laagstemschematisatie kustprofiel; Raai AL2 in 1974
- 5.4.3 Voorbeeld extensie JARKUS-profiel; Raai AL2 in 1980
- 5.4.4 Kustlijnligging $Y1(x)$ en $Y2(x)$; Resultaat JARKUS-analyse; 1965
- 5.4.5 Kustlijnligging $Y1(x)$ en $Y2(x)$; Resultaat JARKUS-analyse; 1978
- 5.4.6 Kustlijnligging $Y1(x)$ en $Y2(x)$; Resultaat JARKUS-analyse; 1990
- 5.4.7 Langsvariatie maximale duinhoogte; Resultaten analyse JARKUS-raaien
- 5.4.8 Langsvariatie niveau duintop; Resultaten analyse JARKUS-raaien
- 5.4.9 Langsvariatie minimaal niveau; Resultaten analyse JARKUS-raaien
- 5.5.1 Langsvariatie langtransport; Resultaat LT-berekeningen
- 5.5.2 Langsvariatie kustconstante; Resultaat LT-berekeningen
- 5.5.3 Langsvariatie nultransporthoek; Resultaat LT-berekeningen
- 5.5.4 Overzicht snelheden o.i.v. getij; Resultaten per raai
- 5.5.5 Overzicht snelheidsklassen getij; Resultaten per raai
- 5.6.1 Tijdsontwikkeling raadata; Resultaat analyse JARKUS-raaien
- 5.6.2 Langsvariatie evenwichtsafstand; Resultaat analyse JARKUS-raaien
- 5.7.1 Tijdsontwikkeling externe sedimentvraag; Resultaat ISOS-studies
- 5.7.2 Tijdsontwikkeling externe sedimentvraag; Resultaat ISOS-studies

- 6.1.1 Overzicht balansniveaus
- 6.1.2 Samenhang afregel- en voorspelniveau
- 6.2.1 Langsvariatie mobiliteit Waddenkust; Boven- en onderlaag (1978-1990)
- 6.2.2 Schematisch overzicht balanswaarden; Periode 1978-1990
- 6.4.1 Schematisch overzicht transporten over modelrand; Periode 1978-1990
- 6.4.2 Berekende langsvariatie mobiliteit; Boven- en onderlaag (1978-1990)
- 6.5.1 Details langsvariatie mobiliteit; 30- en 10-jarige trendwaarden
- 6.5.2 Berekende langsvariatie mobiliteit; Detailvergelijking gedrag bovenlaag

- 7.5.1 Profielaanpassing bij zeespiegelstijging
- 7.5.2 Schematisatie effect aanpassing dwarsprofiel
- 7.5.3 Afleiding volume-mutaties

- 8.2.1 Tijdsontwikkeling mobiliteit; Beweging bovenlaag 1990-2040
- 8.2.2 Tijdsgemiddelde mobiliteit; Vak- en raaiwaarden 1990-2040
- 8.2.3 Ontwikkeling tijdsgemiddelde mobiliteit; Relatieve toename raaiwaarden
- 8.3.1 Effecten onzekerheid modelinvoer; Gemiddelde beweging bovenlaag (1990-2040)
- 8.4.1 Effect toename zandvraag; Gemiddelde beweging bovenlaag (1990-2040)
- 8.4.2 Effect 'Bruun-bijdrage'; Gemiddelde beweging bovenlaag (1990-2040)
- 8.5.1 Effect verzwaring golfklimaat; Gemiddelde beweging bovenlaag (1990-2040)
- 8.6.1 Tijdsgemiddelde suppletiebehoefte; Handhaving huidige kustlijn
- 8.6.2 Tijdsontwikkeling suppletievolume; Handhaving huidige kustlijn
- 8.6.3 Effect kustlijnhandhaving; Gem. beweging bovenlaag (1990-2040)

- A-1 Ligging raai- en vakbegrenzingsen t.b.v. transportberekeningen
- A-2 Dwarsprofiel raai Eijerlandse Gat
- A-3 Detail COMOR-model Texel-studie; Overzicht ligging binnenranden
- A-4 Relatieve grootte transport voor verschillende komgrootten; lin-schaling
- A-5 Relatieve grootte transport voor verschillende komgrootten; log-schaling
- A-6 Resultaten stroommodel; Waterstanden
- A-7 Resultaten stroommodel; Snelheden en richtingen
- A-8 Resultaten stroommodel; Debiet Eijerlandse Gat
- A-9 Resultaten stroommodel; Debieten Engelsmangat en Robbengat
- A-10 Conceptueel model netto transport
- A-11 Geïntegreerd transport door zeegat voor verschillende golfcondities
- A-12 Conceptueel model effect golfaanval
- A-13 Effect wijziging golfhoogte op geïntegreerd transport door zeegat
- A-14 Effect wijziging golfrichting op geïntegreerd transport door zeegat

LIJST VAN SYMBOLEN

a	Kustconstante	$(\text{m}^3/\text{jaar}/^\circ)$
a^*	Gelineariseerde kustconstante	$(\text{m}^3/\text{jaar}/^\circ)$
a_j	(Gelineariseerde) kustconstante laag j	$(\text{m}^3/\text{jaar}/^\circ)$
A	Constante in formule evenwichtsprofiel	$\mathbf{F}\{m\}$
A_b	Oppervlakte binnenbassin/bekken	(m^2)
A_Δ	Oppervlakte buitendelta	(m^2)
b_j	Evenredigheidsconstante in formulering (intern) dwarstransport	(m/jaar)
c_b	Evenredigheidsfactor in relatie komvolume	$(\text{m}^{-2/3})$
c_g	Evenredigheidsfactor in relatie geuldoorsnede	(m^{-1})
c_p	Evenredigheidsfactor in relatie plaatoppervlak	$\mathbf{F}\{\alpha\}$
c_1	Constante in parameterisatie transportkromme	$(\text{m}^3/\text{jaar}/^\circ)$
c_2	Constante in parameterisatie transportkromme	$(^\circ^{-1})$
c_3	Constante in linearisatie transportkromme	$(\text{m}^3/\text{jaar}/^\circ)$
d	Laagdikte	(m)
d_d	Laagdikte (hoogte) duinfront	(m)
d_j	Dikte laag j	(m)
\mathbf{F}	Willekeurige functie	
g	Teller voor kustvak/zeegat-nummer	$(-)$
H	Golfhoogte	(m)
H_{dom}	Dominante golfhoogte	(m)
H_s	Significante golfhoogte	(m)
i	Teller vakken in langsrichting	$(-)$
	Teller golfhoogteklassen per richting	$(-)$
j	Teller lijnen/lagen in dwarsrichting	$(-)$
	Teller golfrichtingsklassen	$(-)$
k	Wegingsfactor	$(-)$
l	Lengte kustdeel langs referentielijn	(m)
L_g	Geullengte	(m)
m	Macht in formule evenwichtsprofiel	$(-)$
p	Percentage van voorkomen specifieke hydraulische conditie	$(-)$
	Poriëngehalte	$(-)$
p^*	Aangepaste percentage van voorkomen specifieke hydraulische conditie	$(-)$
q_j	Dwarstransport (intern) naar laag j	$(\text{m}^3/\text{jaar}/\text{m}^1)$
q_0	(Extern) (dwars)transport (vanuit zeereep) naar duinlaag	$(\text{m}^3/\text{jaar}/\text{m}^1)$
q_5	(Extern) (dwars)transport naar dieper water	$(\text{m}^3/\text{jaar}/\text{m}^1)$
Q_j	Vakgeïntegreerd dwarstransport	(m^3/jaar)
R	Lengte boogstraal t.b.v. definitie referentielijn	(m)
s	Langtransport p.e.v. breedte	$(\text{m}^3/\text{jaar}/\text{m}^1)$
S_j	Langtransport in laag j	(m^3/jaar)

S_j^*	Gelineariseerd langtransport in laag j	(m ³ /jaar)
S_{dl}	Geforceerd (dwars)transport van strandlijn naar vooroever aan linkerkant van zeegat	(m ³ /jaar)
S_{dr}	Geforceerd (dwars)transport van vooroever naar strandlijn aan rechterkant van zeegat	(m ³ /jaar)
T	Golfperiode	(s)
T_{dom}	Dominante golfperiode	(s)
T_p	Piekperiode	(s)
V_g	Geulvolume	(m ³)
W_j	Evenwichtsafstand tussen y_{j-1} en y_j	(m)
x	Positie langs referentielijn (modelrooster)	(m)
X	Plaatscoördinaat in prototype	(m)
y	Horizontale positie t.o.v. referentielijn	(m)
y_c	Karakteristieke positie constructie	(m)
y_o	Positie oorsprong evenwichtsprofiel	(m)
y_j	Karakteristieke positie laag j	(m)
Y	Plaatscoördinaat in prototype	(m)
z	Verticale ordinaat t.o.v. referentievak (bijv. NAP)	(m)
z_e	Evenwichtsniveau	(m)
z_o	Niveau oorsprong formule evenwichtsprofiel	(m)
z_t	Niveau duintop	(m)
z_v	Niveau duinvoet	(m)
Z_j	Bovenbegrenzing laag j	(m)
α	(Hulp-)hoek	(°)
α_j	Richtingsgebonden wegingsfactor	(-)
β	(Hulp-)hoek	(°)
Δh	Toename gemiddelde waterstand (zeespiegelstijging)	(m)
ΔH	Toename (gemiddelde) golfhoogte	(m)
Δt	Tijdstap	(jaar)
Δx	Plaatsstap (langsrichting)	(m)
ϕ	Hoek (= dy/dx)	(°)
ϕ_e	Evenwichtshoek	(°)
ϕ_k	Kusthoek t.b.v. linearisatie	(°)
ϕ_n	Nultransport-hoek	(°)
ϕ_o	Gelineariseerde nultransport-hoek	(°)
ϕ_j	(Gelineariseerde) nultransport-hoek laag j	(°)
θ	Wegingsfactor numeriek schema	(-)
τ	Vermenigvuldigingsfactor netto transport zeegat	(-)
τ_g	Tijdschaal aanpassing geulgeometrie	(jaar)
τ_p	Tijdschaal aanpassing plaatoppervlak	(jaar)
Ω	Getijprisma	(m ³)

1 INLEIDING

1.1 Doelstelling

Het doel van het voorliggende onderzoek is in feite tweeledig en omvat zowel de ontwikkeling van een methode voor, als het geven van een voorspelling van de ontwikkeling van de buitendelta's en de kusten van de Waddeneilanden (van Texel tot en met Schiermonnikoog) over de periode 1990 - 2040.

1.2 Kader en achtergronden

1.2.1 Het KUSTGENESE-project

In het kader van het KUSTGENESE-project wordt de wetenschappelijk onderbouwing van het kustbeheer en kustbeleid ter hand genomen. Deze inspanningen zijn met name op gericht om de grootschalige zandverplaatsingen in het Nederlandse kustgebied te doorgronden en te modelleren om hiermee uiteindelijk een goede basis te verkrijgen voor de nadere invulling van het te hanteren kustbeleid.

1.2.2 Handhaven na 1995

Op basis van eerder onderzoek is in 1990 een eerste kustnota verschenen, waarin het beleid inzake de kust handen en voeten is gegeven. Hierin is gekozen voor een bestrijding van de structurele achteruitgang van de kust(-lijn) door middel van het concept 'dynamisch handhaven' [Rijkswaterstaat, 1990].

In 1995 zal een evaluerende nota over dit beleid verschijnen, gericht op de vraag op welke wijze het thans vigerende beleid moet worden voortgezet, dit in de zin van aanpassing en/of bijstelling.

Het KUSTGENESE-project zal hiervoor de onderbouwing moeten leveren. Daarbij is naast de evaluatie van de beleidskeuze nog sprake van twee andere thema's, te weten de optimalisatie van het ingezette suppletie-beleid (thema 'Omgaan met zand') en de kwantificering van het effect van versnelde zeespiegelstijging op de kustprofielontwikkeling (thema 'Ontwikkeling kustprofiel bij versnelde zeespiegelrijzing').

1.2.3 Evaluatie huidig beleid

Met betrekking tot het onderzoek dat gericht is op de evaluatie van de beleidskeuze dynamisch handhaven zijn twee invalshoeken aanwezig, te weten een beschrijvende methode (JARKUS-analyse) en een verklarende methode (conceptuele modellen).

In de eerstgenoemde staat de analyse van het gegevensbestand van de jaarlijkse kustmetingen (JARKUS) centraal. Uit deze analyse volgt de opgetreden zandvolumeverandering in de Nederlandse kuststrook. Door de waargenomen trend te extrapoleren kan vervolgens een voorspelling van de verwachte kustontwikkeling worden verkregen. Dat aan deze extrapolatiemethode natuurlijk de nodige 'haken en ogen' zitten mag duidelijk zijn. Naast de beperkte extrapolatieduur krijgt men nauwelijks inzicht in de fysische processen die het kustgedrag domineren. Verder moet er per definitie van uit worden gegaan dat de 'kustgedrag-sturende' externe condities gedurende de voorspelperiode ongewijzigd blijven of zich tenminste volgens de aanwezige trend voortzetten.

1.2.4 Conceptuele modellen

Naast de gegevens-analyse wordt ook gebruik gemaakt van zogenaamde conceptuele modellen. Hierin worden voor de verschillende kustvakken de dominante kustprocessen tenminste kwalitatief maar zoveel mogelijk kwantitatief beschreven, resulterend in een verklarend zandbalansmodel.

Voor de evaluatie van de voorspelde kustontwikkeling kan een onderscheid gemaakt worden tussen de conceptuele modellen voor de gesloten Hollandse kust en die voor de Waddeneilanden en Waddenzee (onderbroken kust).

Daar de delta's voor de Zeeuwsche en Zuid-Hollandse eilanden door de Deltawerken ver uit hun evenwicht zijn geraakt, wordt voor dit deel vooralsnog geen conceptueel model ontwikkeld.

Het conceptuele model voor de gesloten Hollandse kust is reeds ontwikkeld ten behoeve van de vorige kustnota. Ten behoeve van de evaluatienota van 1995 zal worden getracht de onzekerheidsmarge in de voorspelling met dit model te verkleinen door een betere modellering van het dwars- en langtransport te hanteren en zo mogelijk een betere calibratie en validatie aan het JARKUS-bestand uit te voeren.

1.2.5 De Waddenkust

De voorspelling van de kustontwikkeling van het Waddengebied was in de vorige kustnota nog gebaseerd op empirische evenwichtsrelaties. In het kader van de evaluatienota 1995 is voor dit gebied een geheel nieuw conceptueel model opgesteld. In dit model is, voor een gegeven randvoorwaarde in elk zeegat (netto zandvraag), de ontwikkeling van de verschillende buitendelta's en de aangrenzende kustvakken gemodelleerd op een tijdschaal van orde 50 jaar. Het voorliggende rapport bundelt de resultaten van dit vernieuwende onderzoek.

1.3 Gevolgde aanpak

1.3.1 Fasering

Het onderzoek is conform de offerte gefaseerd uitgevoerd, waarbij achtereenvolgens aan de orde kwamen:

- Fase I - Systeembeschrijving;
- Fase II - Bouw van een rekenmodel;
- Fase III - Voorspelling en interpretatie.

Deze onderzoeksopzet is als zodanig ook terug te vinden in de opbouw van het voorliggende rapport.

1.3.2 Fase I - Systeembeschrijving

Conform de offerte-aanvraag [Bouwmeester, 1993b] is uitgegaan van de veronderstelling dat de grootschalige ontwikkeling van een buitendelta en de aanliggende kustvakken kan worden beschreven door middel van een gemodificeerd twee-lijnen model als beschreven in het artikel "Sedimentary Processes and Morphological Behaviour Models for Mixed-Energy Tidal Inlets" van W.T. Bakker en H.J. De Vriend [Bakker en de Vriend, 1993]. Een nadere karakterisering en beschrijving van een 'onderbroken-kust-systeem' is gegeven in *Hoofdstuk 2* van dit rapport. Hierin wordt ook kort ingegaan op de eerste validatie van het modelconcept.

1.3.3 Fase II - Modelbouw

Vervolgens is het 'basismodel' omgebouwd tot een meer geavanceerd rekenmodel waarmee de ontwikkeling van een onderbroken kust bestaande uit meerdere zeegaten kan worden gesimuleerd. Deze nadere algemene uitwerking is gegeven in *Hoofdstuk 3* (MOBIC-model). De resultaten aangaande de verschillende testberekeningen en de nadere conceptuele toetsing van dit model komt aan de orde in *Hoofdstuk 4*.

De veelheid van gegevens welke nodig zijn voor de specifieke toepassing van het rekenmodel voor de Waddenkust zijn bijeengebracht in *Hoofdstuk 5*. De afregeling van dit model voor de Waddenkust (MOBIC-WK) komt voor wat betreft de calibratie en verificatie nader aan de orde in *Hoofdstuk 6*.

1.3.4 Fase III - Voorspelling en interpretatie

De voor de uiteindelijke berekeningen benodigde invoergegevens, zoals zeespiegelstijgingsscenario's en de afgeleide effecten, zijn bijeengebracht in *Hoofdstuk 7*. De resultaten van de berekeningen en de daarbij behorende interpretatie komt in *Hoofdstuk 8* aan de orde.

Hoofdstuk 9 vat de voornaamste conclusies van het gehele onderzoek samen. Tevens worden hierin aanbevelingen gedaan voor de verdere invulling van het kustonderzoek.

1.4 Opdracht

Op verzoek van Kustgenese Werkgroep 3 ('Onderbroken kust') van Rijkswaterstaat, alsmede als verwoord in een offerte-aanvraag van de Dienst Getijdewateren met kenmerk AO/935307 d.d. 22 februari 1993 [Bouwmeester, 1993b], heeft het Waterloopkundig Laboratorium een offerte uitgebracht met kenmerk HK3153/H1887/HJS, d.d. 3 mei 1993 inzake de modellering en voorspelling van de ontwikkeling van de Waddenkust.

Door middel van brief AOE/936145, d.d. 14 juni 1993, is onder overeenkomstnummer DG-601, vallend onder het project KUSTGEN*MORF opdracht verleend voor de uitvoering van dit onderzoek. Nadere aanpassing en uitbreiding van deze opdracht zijn uitgevoerd conform wijzigingsovereenkomsten DG-601A als bekrachtigd in brief met kenmerk OSE/946151 d.d. 28 juni 1994 en DG-601B als bekrachtigd in brief met kenmerk OSE/947272 d.d. 29 november 1994.

Het voorliggende rapport beschrijft de resultaten van deze studie.

Vanuit Werkgroep 3 is het onderzoek begeleid door o.a. ir. E.C. Bouwmeester (projectbegeleider RIKZ) en drs. F.C. Groenendijk (RIKZ).

Voor de getalswaarden aangaande de verwachte zandvraag is gebruik gemaakt van de onderzoeksresultaten van het ISOS*2-project als toegeleverd door drs. T. Louters (RIKZ), terwijl JARKUS-informatie werd toegeleverd door R. Kalf en L. Walburg (RIKZ).

Het onderzoek en de hiermee verband houdende modelontwikkeling is uitgevoerd door en onder verantwoordelijkheid van dr.ir. H.J. Steetzel, die tevens verantwoordelijk is voor deze verslaggeving. Bij de vaststelling van de langstransportcoëfficiënten werd deze bijgestaan door ir. J.H. de Vroeg.

2 BESCHRIJVING ONDERBROKEN KUST

2.1 Inleiding

Een onderbroken kust is in feite niets anders dan een plaatselijk door zeegaten onderbroken gesloten kust. Met het oog op de nagestreefde modellering en begripsvorming omtrent het onderbroken-kust-systeem als geheel, vraagt met name de feitelijke onderbreking in de vorm van een zeegat nadere aandacht.

Een dergelijk zeegat kan in zeer algemene termen worden omschreven als een lokale, relatief smalle opening in de kustlijn waardoor een open verbinding aanwezig is tussen een vloedkom en de zee. Als gevolg van een overwegend extern bepaalde combinatie van verticaal en horizontaal getij vindt in- en uitstroming van water door het zeegat plaats hetgeen, in samenhang met een niet-erosiebestendige ondergrond, door de interactie tussen sediment en water leidt tot een morfodynamisch complex systeem. Binnen dit systeem zijn (netto) sedimentuitwisselingen te onderkennen welke de grootschalige sedimentbalans in het gebied bepalen.

De morfologische karakteristieken van een dergelijk zeegat-systeem hangen samen met de karakteristieken van de hydraulische stuurparameters. De twee belangrijkste zijn hierbij het (verticale) getij en het golfklimaat. Het golfklimaat kan hierbij als een echt onafhankelijke stuurparameter worden beschouwd. Bij het getij ligt het iets ingewikkelder daar het hieraan gerelateerde getijprisma (de hoeveelheid water welke per getijfase naar binnen of naar buiten gaat) mede afhankelijk is van de geometrie van het zeegat zelf. Bij verwaarlozing van deze koppeling zijn getijprisma en (karakteristieke) golfaanval echter uitermate geschikt voor de kwalificatie en kwantificatie van relevante morfologische grootheden. Omdat bovendien de vaststelling van met name het getijprisma Ω relatief simpel is wordt deze vaak gebruikt in empirische relaties welke dergelijke verbanden beschrijven.

In dit hoofdstuk is de relevante kennis met betrekking tot de beschrijving van zowel de onderdelen als de werking van een onderbroken-kust-systeem systematisch maar kort samengevat. Hierbij is de eerste doelstelling van deze studie, te weten de modellering van het onderbroken-kust-systeem als uitgangspunt aangehouden.

Een nadere uitwerking van de te onderscheiden hoofdonderdelen is gegeven in Sectie 2.2, waarna in Sectie 2.3 nader zal worden ingegaan op de onderlinge interactie tussen deze componenten. Vervolgens is in Sectie 2.4 een poging gedaan om het gedrag van een buitendelta nader te specificeren.

2.2 Hoofdonderdelen onderbroken-kust-systeem

2.2.1 Algemeen

Figuur 2.2.1 geeft een schematische weergave van een zeegat-systeem.

Hierin kunnen achtereenvolgens een doorgaande onderlaag, een lokaal door de buitendelta van een zeegat onderbroken bovenlaag en een achter het zeegat liggende vloedkom worden onderscheiden. Een nadere uitwerking van elk van deze hoofdonderdelen is gegeven in het volgende.

2.2.2 Buitendelta

Een buitendelta kan worden omschreven als een min of meer ringvormige ondiepte die het zeegat aan de zeezijde begrensd. Gezien haar omvang en de hiermee samenhangende hoeveelheid sediment vormt de buitendelta een belangrijke schakel in de sedimenthuishouding van een (onderbroken) kuststrook. Daar ook in de beschrijving van het kustgedrag de buitendelta een centrale plaats in neemt, wordt hier in Sectie 2.4 nader op ingegaan.

2.2.3 Aangrenzende kustvakken

De veelal vrij geprononceerde vorm van de buitendelta gaat aan beide zijden vloeiend over in de kustvorm van de naastgelegen kustvakken. De aangrenzende kustvakken gedragen zich in principe als normale kustvakken, zij het dat ter plaatse van de overgang naar het zeegat sprake kan zijn van een onderlinge beïnvloeding.

2.2.4 Vooroever

De doorgaande vooroever vormt de buitenbegrenzing van de onderbroken kust. Afhankelijk van het beschouwde overgangsniveau is de aanwezigheid van een buitendelta in de bovenlaag, meer of minder merkbaar.

2.2.5 Vloedkom

Het aan het zeegat grenzende binnengebied wordt gevormd door een gecompliceerd stelsel van geulen en platen. Ofschoon relatief weinig kennis beschikbaar is over de dominante fysische processen is wel de nodige informatie over het gedrag van de meest belangrijke morfologische onderdelen.

De geulen in de vloedkom variëren van diep en breed nabij het zeegat tot ondiep en smal op grotere afstand van de monding. Bovendien is in landwaartse richting in toenemende mate sprake van vertakkingen. De grootte van de geuldoorsnede beneden gemiddeld zeeniveau A_g (in m²) hangt sterk samen met het getijprisma Ω (in m³ per getijfase) en wel volgens een lineair verband:

$$A_g = c_g \Omega \quad (2.2.1)$$

waarin c_g een evenredigheidsfactor. Dit verband is ook van toepassing voor de geulen welke op grotere afstand van de monding liggen, zij het dan met een afwijkende c_g -waarde.

Het komvolume beneden de gemiddelde zeestand V_b (in m³) is eigenlijk te zien als de inhoud van het totale geulstelsel en volgt dan ook uit:

$$V_b = \sum V_g \quad (2.2.2a)$$

waarin V_g het (individuele) geulvolume, zodat:

$$V_b = \sum (L_g A_g) \quad (2.2.2b)$$

Omdat de geullengte L_g evenredig is met $\sqrt{A_b}$ en het getijprisma evenredig is met het komoppervlak A_b volgt na verdere uitwerking:

$$V_b = c_b \Omega^{1,5} \quad (2.2.3)$$

De afmetingen van de platen variëren van klein nabij de monding tot groot achterin de kom. Het totale plaatoppervlak A_p hangt af van het totale bassinoppervlak A_b . De relatie aangaande het relatieve plaatoppervlak luidt:

$$\frac{A_p}{A_b} = 1 - c_p A_b^\alpha \quad (2.2.4)$$

waaruit blijkt dat het relatieve plaatoppervlak afneemt bij toenemende komgrootte. Voor de macht geldt voor het Waddengebied ongeveer $\alpha \approx 0,4$ [Eijsink, 1992].

Overeenkomstig het plaatoppervlak is ook voor wat betreft het plaatniveau sprake van ruimtelijke verschillen. Nabij het zeegat is sprake van een gemiddeld laag niveau terwijl achterin veelal hogere niveaus worden gevonden. Ook is sprake van een significant verschil in gemiddelde korreldiameter, van grof nabij het zeegat tot fijn achterin de kom.

Naast de beschrijving van mogelijke evenwichtsvoorwaarden is bovendien iets te zeggen over de wijze waarop afwijkingen van het veronderstelde evenwicht worden gecorrigeerd. Het meest waarschijnlijke gedrag bij een verstoring van de evenwichtstoestand kan voor bijvoorbeeld het geuloppervlak A_g worden beschreven door:

$$\frac{\delta A_g}{\delta t} = \frac{A_{g,e} - A_g}{\tau_g} \quad (2.2.5)$$

waarin $A_{g,e}$ de evenwichtsgrootte en τ_g de tijdschaal voor de aanpassing.

Voor bijvoorbeeld de grootte van het plaatoppervlak A_p geldt een soortgelijke relatie. De hierbij optredende tijdschaal τ_p is echter groter ($\tau_p > \tau_g$).

In het kader van het ISOS-project is veel aandacht besteedt aan deze empirische relaties [Louters en Gerritsen, 1994]. Een eerste aanzet om te komen tot een morfodynamische beschrijving van de vloedkom is gegeven door Van Dongeren en de Vriend, uitgaande van een ontkoppeling van de sedimentuitwisseling tussen kanalen en platen en het sedimenttransport in de kanalen zelf [Van Dongeren en De Vriend, 1993]. Een en ander is nogal complex zodat een volledige simulatie van dit systeem met behulp van een morfologisch veldmodel vooralsnog niet haalbaar lijkt.

De vloedkom valt in de huidige '0-optie' eigenlijk buiten het te ontwikkelen rekenmodel. De effecten van het gebied vormen echter een randvoorwaarde voor de aansturing van het netto transport door het zeegat (zie Sectie 2.3.3).

2.2.6 Kuststrook

De kuststrook omvat het totaal van kustvakken, buitendelta en doorgaande vooroever.

Voor het beschrijven van het gedrag van een onderbroken kust (de doorgaande kuststrook) vormt de buitendelta wel maar de binnendelta/vloedkom in eerste instantie nog geen onderdeel van het te ontwikkelen model.

2.3 Onderlinge interactie hoofdcomponenten

2.3.1 Algemeen

Gegeven de hoofdonderdelen van het onderbroken-kust-systeem zijn met het oog op een dynamische modellering natuurlijk de onderlinge interacties tussen de verschillende componenten van belang.

2.3.2 Buitendelta-aangrenzende kustvakken

De interactie tussen de buitendelta en de aangrenzende kustvakken is met het oog op de ontwikkeling van de kustvakken van groot belang. Of en in welke mate erosie van een buitendelta leidt tot achteruitgang van de naastgelegen kustvakken vormt immers een van de meest relevante onderzoeksvragen.

Het onderbrengen van de beide componenten in een model lijkt daartoe de aangewezen weg. Een van de problemen bij de modellering is de vaststelling van de wijze waarop het 'updrift' transport zich verdeelt. Met andere woorden, welk percentage van het transport verdwijnt via de vloedgeul door het zeegat naar de vloedkom en waarvan is dit afhankelijk.

Het doorgaande transport langs de buitenrand van de delta vindt plaats onder invloed van de zowel de golfwerking (golfgedreven transport) als de in- en uitstroom van water als gevolg van het verticale getij. Als resultaat zal dit een soort zig-zag transport tot gevolg hebben.

De grootte van dit transport en de relaties met de bepalende grootheden zijn hierbij van cruciaal belang.

2.3.3 Buitendelta-achterliggende vloedkom

De wijze waarop netto zandtransport door het zeegat plaatsvindt hangt samen met de werking van het geulenstelsel in de keel van het zeegat. Voor het te ontwikkelen model vormt de zandstroom van/naar de vloedkom immers een sturende randvoorwaarde.

De terugkoppeling van ontwikkelingen in de buitendelta en naastgelegen kustvakken op die in de vloedkom moeten in een volgende versie van het model worden meegenomen (zie Sectie 9.3).

2.3.4 Kuststrook-vooroever

De interactie tussen kuststrook (als geheel van bovenlaag en buitendelta) en vooroever (de diepere onderwateroever) is in principe vergelijkbaar met de dwarsuitwisseling bij een normaal kustvak, zij het dat afhankelijk van het overgangsniveau de aanwezigheid van een buitendelta lokaal nog enige invloed kan hebben.

2.4 Gedrag buitendelta

2.4.1 Algemeen

Uitgaande van de veronderstelling dat de onderlinge interactie tussen enerzijds de buitendelta en aangrenzende kustvakken en anderzijds tussen kuststrook en vooroever niet wezenlijk afwijkt van de situatie bij een gesloten kust blijft nog een probleem over, te weten de beschrijving van het interne gedrag van de buitendelta.

Ten aanzien van dit aspect kan onder andere worden verwezen naar de resultaten van een aantal morfologische studies die betrekking hebben op het Waddengebied. Te noemen zijn die van het Zeegat van Texel [Sha, 1990], het Eijerlandse Gat [Ribberink, 1992] en het Friesche Zeegat [Steijn, 1992].

2.4.2 Transportbanen

Het gedrag van een buitendelta wordt gestuurd door min of meer geconcentreerde sedimentstromen. De eb-geul is meestal vrij centraal in het zeegat gelegen en levert een netto zeewaarts gerichte sedimentstroom op waarbij het materiaal wordt afgezet op de kop van de delta.

Vloedgeulen treden daarentegen meestal op langs de randen van het zeegat.

De benaming eb- of vloedgeul heeft hierbij betrekking op het teken van het residu in de getijgeïntegreerde snelheidsverloop. In alle gevallen is een relatie tussen geometrie en het getijprisma. Het gedrag van geulen is beschreven in [Allersma, 1993] en [Huys, 1993].

De geulbeweging is, zeker over de kortere termijn, gering.

2.4.3 Grootschalige geometrie

Aan de buitenzijde van de buitendelta is sprake van een zandrug, welke op sommige plaatsen doorbroken is door een geul. Van deze geulen is de (centrale) ebgeul de voornaamste.

Het zandvolume in de buitendelta V_{Δ} is primair gerelateerd aan het getijprisma conform:

$$V_{\Delta} = c_{\Delta} \Omega^p \quad (2.4.1)$$

De invloed van de golfaanval komt tot uitdrukking in de grootte van de gehanteerde evenredigheidscoëfficiënt [Walton and Adams, 1976].

De uitbouw van de buitendelta λ_{Δ} volgt in principe uit het volume en de vorm, waarbij onder evenwichtsomstandigheden sprake is van een min of meer vaste vorm [Sha en van de Berg, 1992]. Het gebruik van een vaste vorm van de buitendelta als uitgangspunt voor een model lijkt dan ook een goede basis [Bakker en de Vriend, 1993].

2.4.4 Kwantificering transporten

Voor de lange-termijn sediment balans is met name inzicht in het netto transport door het zeegat van belang. In het kader van deze studie is hiertoe, met gebruikmaking van een reeds bestaand mathematisch model en grotendeels reeds aanwezige rekenresultaten, een nadere analyse uitgevoerd naar het sedimenttransport door het Eijerlandse Gat. Een uitwerking van de nadere analyse van relevante detailberekeningen is gegeven in Appendix A.

2.4.5 Gedragsmodel

Uitgaande van het empirische gegeven dat de natuur streeft naar een buitendelta met een zekere vorm en volume kan het gedrag van de kust bij een zeegat worden 'gevangen' in een twee-lijnmodel [Bakker en de Vriend, 1993; Bakker e.a., 1994]. De formuleringen die aan dit 'basiemodel' ten grondslag liggen zullen worden gebruikt voor een formulering en bouw van een meer algemeen toepasbaar rekenmodel (zie Hoofdstuk 3).

Het grote voordeel van een dergelijk model is dat de problemen welke aanwezig zijn bij het doen van lange-termijn voorspellingen met behulp van een morfologisch 2DH-veldmodel op deze wijze kunnen worden omzeild.

3 UITWERKING REKENMODEL

3.1 Inleiding

3.1.1 Algemeen

In dit hoofdstuk is het gemodificeerde twee-lijnen model van Bakker en de Vriend [De Vriend en Bakker, 1993], het 'basismodel', nader uitgewerkt en omgebouwd tot een meer algemeen toepasbaar rekenmodel. In eerste instantie is daarbij conform het basismodel uitgegaan van twee lijnen. In de loop van het project werd duidelijk dat het meenemen van de diepere lagen in de sedimentbalans noodzakelijk was. Het rekenmodel is uiteindelijk dan ook voorzien van meerdere lagen/lijnen.

In het volgende zijn de overwegingen aangegeven op basis waarvan uiteindelijk is gekomen tot de gehanteerde modelopzet.

3.1.2 Schematisatie multi-inlaat systeem

Bij de modelopzet is uitgegaan van een beperkt aantal, onderling onafhankelijke vloedkammen. In werkelijkheid, en zeker voor de Waddenzee, is dit natuurlijk niet zo. Grote delen van de Waddenzee kunnen immers beschouwd worden als onderling gekoppelde enkelvoudige inlaatsystemen waarbij tussen de verschillende door wantijen gescheiden vloedkammen een niet te verwaarlozen uitwisseling van water en sediment aanwezig is. Deze uitwisseling over de gebiedsgrenzen is daarbij ondermeer het gevolg van faseverschillen tussen de getijaansturing per zeegat en de door de wind geïnduceerde opzetverschillen. Dit is onder andere het geval bij het Zeegat van Texel (Marsdiep) en het Zeegat van Terschelling (Vlie). Het Eijerlandse Gat is redelijk geïsoleerd.

3.1.3 Schematisatie gedrag individuele vloedkammen

De interactie tussen vloedkom, buitendelta en naastliggende kustvakken, maakt dat per zeegat sprake is van een samenhangend morfologisch systeem. De onderlinge koppeling tussen het binnengebied (vloedkom) en het buitengebied (buitendelta) vindt plaats door het in het zeegat gelegen geulenstelsel. De in deze geulen geconcentreerde transportstromen vormen hierbij de verbinding. Teneinde het rekenmodel niet te ingewikkeld te maken, is bij de modelopzet een splitsing gemaakt tussen de modellering van het binnengebied en die van het buitengebied. In feite wordt het kustsysteem daarbij in de keel van elk zeegat feitelijk ontkoppeld van het binnengebied. Teneinde het effect van deze ontkoppeling deels te verrekenen is het netto transport door deze modelrand als sturende randvoorwaarde in het model ingebracht. De grootte van deze zandvraag is, met gebruikmaking van de resultaten uit het ISOS-onderzoek, per individueel zeegat bepaald. De resultaten van het hierin ontwikkelde MORRES-model vormen de basis voor de kwantificering van deze randvoorwaarden.

3.1.4 Nadere uitwerking

In de rest van dit hoofdstuk zal worden ingegaan op de nadere mathematische formulering van het model. Hiertoe komt eerst de algemene balansvergelijking aan de orde.

Uiteindelijk zal met het verbouwde model de voorspelling voor de Waddenkust conform de doelstelling van dit onderzoek worden uitgevoerd. De specifieke gegevens benodigd voor deze toepassing komen in het Hoofdstuk 5 aan de orde.

3.2 Basisvergelijkingen

3.2.1 Algemeen

In het volgende is een korte behandeling gegeven van de feitelijke grondslag van het rekenmodel, te weten de gediscretiseerde balansvergelijkingen. In Figuur 3.2.1 zijn de gebruikte definities schematisch weergegeven.

3.2.2 Balansvergelijking per cel

Beschouwing van een vakje met afmeting $\Delta x_i (= x_i - x_{i-1})$ in de x -richting levert aan mogelijke volumetoename ΔVol per tijdseenheid Δt :

$$\frac{\Delta Vol_{j,i}}{\Delta t} = (S_{j,i-1} - S_{j,i}) + (Q_{j,i} - Q_{j+1,i}) + \frac{\Delta V_{j,i}}{\Delta t} \quad (3.2.1)$$

waarin S en Q respectievelijk het transport in langs- en dwarsrichting en ΔV een door een bron of put geïnduceerde bijdrage.

Als volgens het lijnmodelconcept de volumetoename $\Delta Vol_{j,i}$ in rekencel i wordt uitgedrukt in een verschuiving van lijn j in y -richting volgens:

$$\Delta y_{j,i} = \frac{\Delta Vol_{j,i}}{\Delta x_i d_{j,i}} \quad (3.2.2)$$

waarin $d_{j,i}$ de laagdikte (lijn j , vak i), dan volgt na substitutie:

$$\frac{\Delta y_{j,i}}{\Delta t} = \frac{1}{d_{j,i}} \frac{S_{j,i-1} - S_{j,i}}{\Delta x_i} + \frac{1}{d_{j,i}} \frac{Q_{j,i} - Q_{j+1,i}}{\Delta x_i} + \frac{\Delta V_{j,i}}{d_{j,i} \Delta x_i \Delta t} \quad (3.2.3)$$

Voor een specifiek vak (met weglating van plaatsindex i) volgt de verschuiving van lijn met volgnummer j (uitgedrukt in $\Delta y_j/\Delta t$) dan uit:

$$\frac{\Delta y_j}{\Delta t} + \frac{1}{d_j} \frac{\Delta S_j}{\Delta x} + \frac{\Delta q_j}{d_j} = \frac{\Delta V_j}{d_j \Delta x \Delta t} \quad (3.2.4)$$

en is daarbij dus afhankelijk van de (lokale) laagdikte d_j , de langtransportgradiënt $\Delta S_j/\Delta x$ en het transportverschil in dwarsrichting $\Delta q_j = q_{j+1} - q_j$.

3.2.3 Lijn-modellering

Uitwerking voor meerdere lijnen (met $j = 0, \dots, 4$; zie later) levert als lokale vergelijking:

$$\frac{\Delta y_j}{\Delta t} + \frac{1}{d_j} \frac{\Delta S_j}{\Delta x} + \frac{q_{j+1} - q_j}{d_j} = \frac{\Delta V_j}{d_j \Delta x \Delta t} \quad (3.2.5)$$

waarin q het (interne) dwarstransport vertegenwoordigd.

Een positieve waarde van q_j impliceert een verlies in van materiaal in laag $j-1$ en materiaalwinst voor laag j . Voor de eerste (bovenste) laag en de laatste (onderste) laag heeft het dwarstransport betrekking op het dwarstransport over de modelrand.

De term in het rechterlid is te zien als een bronfunctie, waarbij een positief rechterlid resulteert in een zeewaartse verplaatsing van de betrokken lijn.

3.2.4 Nadere specificering

Voor nog nader te specificeren laagdikten d_j en een gegeven waarde van de externe dwarstransporten (q_0 en q_5), volgt de ontwikkeling van de y_j -waarde uit de nader te specificeren grootte van de langtransportgradiënt $\Delta S_j/\Delta x$ en de grootte van het interne dwarstransportverschil $q_{j+1} - q_j$.

In de volgende secties zal nader worden ingegaan op de laagdikten, langtransporten (en de daarmee samenhangende gradiënt) en het (interne) dwarstransport.

3.3 Zonering in dwars- en langsrichting

3.3.1 Algemeen

Bij de zonering kan onderscheid worden gemaakt tussen de zonering in verticale richting gericht op de vaststelling van de laagdikten per lijn en de zonering in langsrichting.

Voor wat betreft de verticale zonering dienen de onder- en bovenbegrenzing van de te modelleren zone te worden vastgesteld, alsmede de ligging van de scheidingsniveaus tussen de verschillende lagen.

3.3.2 Hoofddeling modellagen

Met betrekking tot de verticale zonering, als nader gespecificeerd in Figuur 3.3.1, is primair onderscheid gemaakt tussen een bovenlaag en een onderlaag, waarbij de onderlinge scheiding Z_3 is aangebracht op een niveau van orde NAP-8m.

Teneinde de ontwikkeling van de diepere laag op een nette manier te kunnen modelleren dient de onderbegrenzing van deze laag Z_5 zodanig te worden gekozen dat de grootte van het dwarstransport over deze modelrand slechts minimaal is. Hierbij is gedacht aan het NAP-20m-niveau.

De bovenbegrenzing van de bovenlaag Z_0 komt overeen met het niveau van de duintoppen.

Op deze wijze vormen zowel de actieve bovenlaag als de minder actieve onderlaag deel van het model.

3.3.3 Nadere verfijning laagindeling

De bovenlaag is opgedeeld in drie verschillende lagen. Laag 0 vormt hierbij een apart geval en heeft betrekking op de hoogte van het duinfront. De overige twee lagen zijn gelijkelijk verdeeld over het strand en de brekerzone, respectievelijk laag 1 en laag 2.

Verder is de onderlaag nog gesplitst in twee verschillende ongeveer even dikke lagen: laag 3 en laag 4.

Na vaststelling van de verschillende niveaus Z_j voor $j = 0, \dots, 5$ zijn de gerelateerde laagdikten ook bekend. De dikte van de laag j volgt nu immers uit:

$$d_j(x) = z_j(x) - z_{j+1}(x) \quad (3.3.1)$$

en blijft, in de tijd gezien, constant.

3.3.4 Zonering in langsrichting

In langsrichting is sprake van een tweetal duidelijk verschillende secties, waarbij in ieder geval onderscheid gemaakt zal moeten worden tussen kustsecties en zeegaten.

De formulering van de balansvergelijkingen per individuele rekencel zijn hierbij natuurlijk afhankelijk van de lokatie. Ten opzichte van de 'standaardvergelijkingen' als van toepassing voor een 'normale kustsectie' zullen ter plaatse van de zeegaten de formuleringen moeten worden aangepast.

Bij de opzet van het rekenmodel is gekozen voor een aanpak waarbij aan elk rekencel een specifieke identificatiecode is toegekend. Deze code geeft aan in welk deel van de kust de rekencel zich bevindt en dus welke set van vergelijkingen (zie later) voor een specifiek rekencel van toepassing is (zie Sectie 3.7.9).

3.4 Modellering langtransport

3.4.1 Algemeen

Het lokale (totale) langtransport S (in m^3/jaar) is afhankelijk van het verticale en horizontale getij en het golfklimaat, waarbij de grootte van de golfbijdrage afhankelijk is van de (relatieve) hoek van golfval. Voor de vaststelling van de grootte van het netto transport voor een gegeven dwarsprofiel en hydraulisch klimaat zijn verschillende formules voorhanden.

Voor de vaststelling van de kustlijnonwikkeling is met name de relatie tussen het totale (netto) transport S en de grootte van de kusthoek ϕ van belang. De vorm van deze $S(\phi)$ -relatie wordt voornamelijk bepaald door de grootte van de golfgedreven component welke afhankelijk is van de hoek van ϕ_{golf} en de hoek van de lokale kustlijn ϕ .

3.4.2 Parameterisatie transportkromme

De totale, veelal S-vormige (transport-)functie die de afhankelijkheid van de kusthoek beschrijft, kan in zeer algemene termen worden beschreven door (zie Figuur 3.4.1):

$$S = S^o + c_1 \phi_r \exp[-(c_2 \phi_r)^2] \quad (3.4.1)$$

waarin S^o de kusthoek-onafhankelijke bijdrage (getijcomponent), c_1 en c_2 nader te definiëren constanten en de relatieve hoek ϕ_r is gedefinieerd als de verschilhoek $\phi - \phi_e$, waarin ϕ_e de evenwichtshoek waarbij geen (netto) golfgedreven transport optreedt [Waterloopkundig Laboratorium, UNIBEST-CL-handleiding, 1993]. De constanten samenhangend met deze parameterisatie (c_1, c_2, ϕ_e) vormen het resultaat van een UNIBEST-berekening (zie Sectie 5.5).

De c_1 -waarde geeft de helling van de $S(\phi)$ -relatie rond $\phi_r = 0$ en is dus vergelijkbaar met de 'standaard' kustconstante a .

De (negatief) exponentiële term zorgt voor een afwijking (damping) van de lineaire trend voor significant van $\phi = \phi_e$ afwijkende hoeken. De reciproque waarde van c_2 is dan ook gerelateerd aan de verschilhoek waarvoor een reductie ter grootte van $1/e$ ten opzichte van de lineaire bijdrage optreedt. Een grote c_2 -waarde impliceert dus een sterke kromming.

Gezien het verwarrende karakter van de benaming evenwichtshoek is de kusthoek waarbij geen netto transport optreedt in het vervolg aangegeven met ϕ_o .

3.4.3 Linearisatie transportkromme

Zoals al eerder aangegeven is voor de modellering met name de grootte en formulering van de transportgradiënt van belang. Uitwerking van de geparametriseerde relatie levert:

$$\frac{dS}{dx} = \frac{dS^o}{dx} + \frac{d}{dx} \left(c_1 (\phi - \phi_o) \exp[-(c_2 (\phi - \phi_o))^2] \right) = \dots \quad (3.4.2)$$

hetgeen voor $c_2 \neq 0$ per definitie tal van niet-lineaire termen oplevert.

Implementatie van deze geparametriseerde $S(\phi)$ -relatie (met $c_2 \neq 0$) in het te ontwikkelen model is niet mogelijk vanwege het niet-lineaire karakter van de verschillende termen. De gebruikte oplossingsmethode (zie Sectie 3.7) is immers alleen geschikt voor een lineair stelsel van vergelijkingen.

Voor de volledigheid kan nog worden opgemerkt dat in principe ook gebruik zou kunnen worden gemaakt van een discretisatie van de transportkromme, waarbij de vorm van deze kromme is vastgelegd in een tabel. Bij bepaling van afgeleiden $dS/d\phi$ kan dan direct gebruik worden gemaakt van deze tabelwaarden. Een dergelijke aanpak heeft echter als groot nadeel dat de feitelijke kenmerken van de transportkromme (nultransporthoek, langtransportconstante) niet meer als zodanig tot uitdrukking komen in de afgeleide vergelijkingen. Een en ander komt niet ten goede aan de wens om inzicht in de afgeleide formuleringen te verkrijgen.

In aansluiting op de standaard beschrijving dient dan ook hier gezocht te worden naar een transportrelatie volgens:

$$S^* = S^o + a^* (\phi_o^* - \phi) \quad (3.4.3)$$

waarin a^* en ϕ_o^* gelineariseerde waarden voor respectievelijk de grootte van de kustconstante en de evenwichts- of 'nultransport'-hoek, welke in deze versie een positief transport levert voor $\phi < \phi_o^*$.

Een linearisatie van het golfgedreven deel van $S(\phi)$ rond een zekere kushoek $\phi = \phi_k$ levert:

$$S^*(\phi) = S(\phi_k) + c_3 (\phi - \phi_k) \quad (3.4.4)$$

waarin c_3 , voorstellende de helling van de raaklijn aan $S(\phi)$ in $\phi = \phi_k$, volgt uit:

$$c_3 = \frac{dS}{d\phi}(\phi_k) \quad (3.4.5)$$

Uitwerking levert:

$$\frac{dS}{d\phi} = c_1 \exp[-(c_2(\phi - \phi_o))^2] (1 - 2(c_2(\phi - \phi_o))^2)$$

zodat:

$$c_3 = c_1 \exp[-(c_2(\phi_k - \phi_o))^2] (1 - 2(c_2(\phi_k - \phi_o))^2) \quad (3.4.6)$$

waarmee de linearisatie rond kushoek $\phi = \phi_k$ uiteindelijk resulteert in:

$$S^*(\phi) = c_1 \exp[-(c_2(\phi_k - \phi_o))^2] [(\phi_k - \phi_o) + (\phi - \phi_k)(1 - 2(c_2(\phi_k - \phi_o))^2)] \quad (3.4.7)$$

Met gebruikmaking van de gewenste uitdrukking:

$$S^*(\phi) = a^* \phi_o^* - a^* \phi$$

volgt de a^* -waarde nu uit:

$$c_1 \exp[-(c_2(\phi_k - \phi_o))^2] (\phi (1 - 2(c_2(\phi_k - \phi_o))^2)) = -a^* \phi$$

zodat:

$$a^* = -c_1 [\exp[-(c_2(\phi_k - \phi_o))^2] (1 - 2(c_2(\phi_k - \phi_o))^2)] \quad (3.4.8a)$$

De term tussen rechte haken resulteert in een reductie van de grootte van de kustconstante bij afwijkende kushoeken, mits $|\phi_k - \phi_o| < 1/(\sqrt{2} c_2)$ (overgang instabiele toestand rond $a^* = 0$).

De referentiehoek ϕ_o^* volgt uit:

$$c_1 \exp[-(c_2(\phi_k - \phi_o))^2] ((\phi_k - \phi_o) + (\phi - \phi_k)(1 - 2(c_2(\phi_k - \phi_o))^2)) = a^* \phi_o^*$$

en levert na substitutie van de uitdrukking voor a^* :

$$\phi_o^* = \frac{\phi_o - \phi_k 2(c_2(\phi_k - \phi_o))^2}{1 - 2(c_2(\phi_k - \phi_o))^2} \quad (3.4.9a)$$

Op deze wijze is uit de geparametriseerde resultaten van een langtransportberekening (UNIBEST-LT), de grootte van zowel een goede afschatting van de kustconstante a als de 'nultransport'-hoek ϕ_o af te leiden.

Voor een linearisatie rond het transportnulpunt $\phi_k = \phi_o$ volgt respectievelijk:

$$a^* = -c_1 \quad (3.4.8b)$$

en:

$$\phi_o^* = \phi_o \quad (3.4.9b)$$

De afgefallen termen geven de correctie op deze standaardwaarden voor $\phi \ll \phi_o$ en $\phi \gg \phi_o$ en hangen dus sterk af van de kromming van de $S(\phi)$ -curve en daarmee dus van de c_2 -waarde. In het algemeen kunnen voor $\phi \approx \phi_k$ ongewijzigde a^* - en ϕ_o^* -waarden worden gebruikt, mits de momentane kusthoek ϕ 'niet te veel' afwijkt van de voor de parameterisatie gebruikte kusthoek ϕ_o^* , zeg voor het interval $\phi_k - \Delta\phi < \phi < \phi_k + \Delta\phi$. De grootte van de toelaatbare verschilhoek $\Delta\phi$ is hierbij (onder andere) een functie van de krommingsparameter c_2 volgens:

$$\Delta\phi \leq \mathbb{F} \left\{ \phi_o, \phi_k, \frac{1}{c_2}, \dots \right\}$$

In het rekenprogramma kunnen mogelijke problemen worden voorkomen door op bepaalde tijdstippen de diverse langtransportconstanten te 'updaten'.

Vooralsnog is echter nog geen rekening gehouden met de kromming van de transportcurve en zijn de vergelijkingen geïmplementeerd voor $c_2 = 0$.

3.4.4 Uitwerking langtransportgradiënt

Voor de kustlijn veranderingen zijn met name de gradiënten in het langtransport van belang. Uitwerking van de gelineariseerde vergelijking volgens:

$$S^* = S^o + a^* \left(\phi_o^* - \frac{dy}{dx} \right)$$

levert:

$$\frac{dS^*}{dx} = \frac{dS^o}{dx} + \frac{d}{dx} \left[a^* \left(\phi_o^* - \frac{dy}{dx} \right) \right] \quad (3.4.10)$$

Voor $S^o(x) = 0$, $a^*(x) = a^*$ en $\phi_o^*(x) = \phi_o^*$ levert dit:

$$\frac{dS^*}{dx} = -a^* \frac{d^2y}{dx^2} \quad (3.4.11)$$

Deze situatie is (voor $a^* = a$) nader uitgewerkt in het basisconcept van het rekenmodel.

In het meer algemene geval zijn zowel de langtransportconstante a^* en de referentiehoek ϕ_o^* functies van de x -coördinaat en zal de vorige vergelijking moeten worden uitgebreid met extra termen. Verdere uitwerking levert immers:

$$\frac{dS^*}{dx} = \frac{dS^o}{dx} + a^* \frac{d\phi_o^*}{dx} + \left(\phi_o^* - \frac{dy}{dx} \right) \frac{da^*}{dx} - a^* \frac{d^2y}{dx^2} \quad (3.4.12)$$

Bij gegeven scheidingsniveaus kan een dergelijke uitdrukking voor elke lijn worden gegeven. De transportgradiënt in de verschillende lagen zijn hierin dus beschreven door de afzonderlijke gelineariseerde kustconstanten a_j^* en referentiehoeken ϕ_j^* . De referentiehoek ϕ_j^* voor de verschillende lijnen hoeft nu dus niet per definitie gelijk te zijn.

3.4.5 Discretisatie langtransportgradiënt

Ten behoeve van het numerieke schema dient de basisvergelijking te worden gediscetiseerd. Beschouwing per lijn van een rekencel (vak) i met celbreedte $\Delta x_i = x_i - x_{i-1}$ ($= \Delta x$) en lijnpositie $y_{j,i}$ levert uitgaande van waarden van S^* , ϕ_o^* en a^* op de celranden, de volgende vergelijking:

$$\frac{dS^*}{dx} = \frac{dS^o}{dx} + \overline{a^*} \frac{d\phi_o^*}{dx} + \left(\overline{\phi_o^*} - \frac{dy}{dx} \right) \frac{d\overline{a^*}}{dx} - \overline{a^*} \frac{d^2y}{dx^2} \quad (3.4.14)$$

De *-aanduiding inzake het gelineariseerde karakter van de kustconstante(n) a en de referentiehoeke(n) ϕ_o is in het volgende gemakshalve weggelaten. Hierin zijn de beide vakgemiddelde grootheden:

$$\bar{a} = (a_{i-1} + a_i)/2 \quad (3.4.15)$$

en:

$$\bar{\phi}_o = (\phi_{o,i-1} + \phi_{o,i})/2 \quad (3.4.16)$$

Voor de lokale d/dx -waarden geldt respectievelijk:

$$\frac{dS}{dx} = (S_i - S_{i-1})/\Delta x_i \quad (3.4.17)$$

$$\frac{da}{dx} = (a_i - a_{i-1})/\Delta x_i \quad (3.4.18)$$

$$\frac{d\phi_o}{dx} = (\phi_{o,i} - \phi_{o,i-1})/\Delta x_i \quad (3.4.19)$$

en:

$$\frac{dy}{dx} = \frac{2(y_{i+1} - y_{i-1})}{\Delta x_i + \Delta x_{i+1}} \quad (3.4.20a)$$

$$= \frac{y_{i+1} - y_{i-1}}{\Delta x} \quad (3.4.20b)$$

De tweede afgeleide is gelijk aan:

$$\frac{d^2y}{dx^2} = \frac{2}{\Delta x_i} \left(\frac{y_{i+1} - y_i}{\Delta x_i + \Delta x_{i+1}} - \frac{y_i - y_{i-1}}{\Delta x_{i-1} + \Delta x_i} \right) \quad (3.4.21a)$$

of in het geval van een equidistant rekengrid:

$$\frac{d^2y}{dx^2} = \frac{y_{i+1} - 2y_i + y_{i-1}}{\Delta x^2} \quad (3.4.21b)$$

Een nadere uitwerking van de totale set van vergelijkingen is gegeven in Sectie 3.7.

3.5 Modellering dwarstransport

3.5.1 Algemeen

De intensiteit van de (interne) uitwisseling tussen twee lagen is primair gerelateerd aan de afwijking van het aanwezige dwarsprofiel ten opzichte van een evenwichtsprofiel. Uitgaande van dit concept wordt het momentane dwarstransport dan in algemene termen bepaald door een maat welke karakteristiek is voor de evenwichtssituatie en een parameter welke iets zegt over de snelheid waarmee afwijkingen van deze evenwichtssituatie worden gecorrigeerd.

3.5.2 Specificatie

Het dwarstransport q_j (in $m^3/m^1/jaar$) tussen twee lagen (van laag $j-1$ naar laag j ter plaatse van niveau Z_j) wordt in een lineaire benadering beschreven door:

$$q_j = q_j^o + b_j (W_j - \Delta y_j) \quad (3.5.1)$$

waarin q_j^o een autonome bijdrage, W_j de evenwichtsafstand en $\Delta y_j (= y_j - y_{j-1})$ de aanwezige afstand tussen de beschouwde lagen/lijnen.

In het geval van een te kleine afstand, dus $\Delta y_j < W_j$ en dus een relatief te steil dwarsprofiel, is sprake van een positief zeewaarts gericht transport ($q_j > 0$) en zal door verplaatsing van materiaal van laag $j-1$ naar laag j een minder steil profiel ontstaan. Voor het geval van een te flauw profiel geldt natuurlijk het tegenovergestelde.

Uitgeschreven geldt dus:

$$q_j = q_j^o + b_j (y_{j-1} - y_j + W_j) \quad (3.5.2)$$

De evenredigheidsfactor b_j , met $b_j \geq 0$, zegt iets over de snelheid van de aanpassing en is uitgedrukt in $m^2/m/jaar$ of $m/jaar$.

In het navolgende zal nader op deze beide constanten worden ingegaan.

In Figuur 3.5.1 is de schematisatie van het dwarsprofiel ter plaatse van laag j gegeven. Figuur 3.5.2 geeft een overzicht van de balansvakken, waarin q_0 en q_5 betrekking hebben op het dwarstransport over de modelranden.

3.5.3 Evenwichtsafstand

De evenwichtsafstand is, bij gegeven laagdefinitie, afhankelijk van de aanwezige korrelkarakteristieken (zeg fijn of grof zand) en de (morfologisch) gemiddelde, hydraulische omstandigheden. In het geval van een in (dynamisch) evenwicht verkerend dwarsprofiel is de lokale tijdsgemiddelde waarde van het afstandsverschil tussen twee lijnen per definitie gelijk aan de evenwichtsafstand. Deze volgt dus uit:

$$W_j(x) = \frac{1}{n} \sum^n (y_j(x) - y_{j-1}(x)) \quad (3.5.3)$$

waarin n refereert aan het aantal waarnemingen.

Een nadere uitwerking voor het specifieke rekengeval is gegeven in Sectie 5.3.

In de volgende secties is getracht een analytische uitdrukking te geven voor deze evenwichtsafstand uitgaande van een algemene formulering van het evenwichtsprofiel. Uitgaande van deze formulering kunnen ook de consequenties van een stijging van de gemiddelde waterstand (zeespiegelstijgingsscenario) op de formuleringen in een meer-lijnen-model worden onderzocht (zie Sectie 7.4).

3.5.4 Beschrijving evenwichtsprofiel

Het evenwichtsprofiel $z_e(y)$ kan in eerste benadering worden beschreven door een analytische uitdrukking welke in zeer algemene termen luidt:

$$z_e(y) = \mathbf{F}\{y\} \quad (3.5.4)$$

waarin z_e de evenwichtsligging van de bodem op ordinaat y vanaf een referentielijn.

Omdat het bij een zandig kustprofiel veelal gaat om een samenhangend systeem van vooroever, strand en duin (actief deel van het kustprofiel) is voor de analytische beschrijving van het evenwichtsprofiel uitgegaan van twee afzonderlijke delen, te weten:

- een duinprofiel met een (gemakshalve) verticaal duinfront;
- een concaaf profiel volgens een machtsfunctie.

Het overgangsniveau van het verticale en het hellende deel van het dwarsprofiel is gelegen in de zogenaamde duinvoet en wel op het niveau $z = z_v$.

De top van het duinprofiel is gelegen op het niveau $z = z_t$, waarmee het duinfront dus een hoogte (laagdikte) heeft van $d_d = z_t - z_v$.

Het concave deel van het kustprofiel (voor $z \leq z_v$) wordt geacht te worden beschreven door een machtsfunctie welke luidt:

$$z(y) = z_o - A(y - y_o)^m \quad (3.5.5)$$

ofwel:

$$y(z) = y_o + \left(\frac{z_o - z}{A} \right)^{1/m} \quad (3.5.6)$$

waarbij de nulpunt van de functie is gelegen in (y_o, z_o) met natuurlijk $z_o \geq z_v$.

De niet-dimensieloze parameter A in deze formulering is onder andere afhankelijk van de korrel diameter en de gemiddelde hydraulische condities. Voor de macht m geldt als orde-van-grootte $0,5 < m < 0,8$.

De positie van het duinvoet y_v volgt voor gegeven duinvoetniveau z_v uit:

$$z(y_v) = z_o - A(y_v - y_o)^m = z_v$$

ofwel:

$$y_v = y_o + \left(\frac{z_o - z_v}{A} \right)^{1/m} \quad (3.5.7)$$

Op deze wijze ligt het dwarsprofiel vast (zie Figuur 3.5.3).

3.5.5 Analytische uitdrukking karakteristieke laagpositie

De karakteristieke waarde van de ligging van een laag j met $j > 0$, volgt voor een gegeven laagbegrenzing met $z_{j+1} \leq z \leq z_j$ uit:

$$\int_{z_{j+1}}^{z_j} (y_j - y(z)) dz = 0$$

ofwel:

$$y_j(z_j - z_{j+1}) = \int_{z_{j+1}}^{z_j} y(z) dz \quad (3.5.8)$$

Nadere uitwerking van de integraal in het rechterlid resulteert na substitutie van Vgl.(3.5.6) voor het concave kustdeel (met $z_j \leq z_v$) achtereenvolgens in:

$$\begin{aligned} \int_{z_{j+1}}^{z_j} y(z) dz &= y_o(z_j - z_{j+1}) + \int_{z_{j+1}}^{z_j} \left(\frac{z_o - z}{A} \right)^{1/m} dz \\ &= y_o(z_j - z_{j+1}) + \left(\frac{1}{A} \right)^{1/m} \frac{-m}{m+1} (z_o - z)^{\frac{m+1}{m}} \Big|_{z_{j+1}}^{z_j} \end{aligned}$$

$$= y_o (z_j - z_{j+1}) + \left(\frac{1}{A}\right)^{1/m} \frac{m}{m+1} \left((z_o - z_{j+1})^{\frac{m+1}{m}} - (z_o - z_j)^{\frac{m+1}{m}} \right) \quad (3.5.9)$$

De representatieve y_j -waarde (met $z_j \leq z_v$ en laagdikte $d_j = z_j - z_{j+1}$) volgt dan uit:

$$y_j = y_o + \frac{m}{m+1} \frac{1}{A^{1/m} d_j} \left((z_o - z_j + d_j)^{\frac{m+1}{m}} - (z_o - z_j)^{\frac{m+1}{m}} \right) \quad (3.5.10)$$

3.5.6 Analytische uitdrukking evenwichtsafstand

Voor de gezochte evenwichtsafstand W_j met:

$$W_j = y_j - y_{j-1} \quad (3.5.11)$$

wordt na substitutie (met $M = 1/m$) gevonden:

$$W_j = \frac{1}{A^M (M+1)} \left\{ \frac{(z_o - z_j + d_j)^{M+1} - (z_o - z_j)^{M+1}}{d_j} - \frac{(z_o - z_{j-1} + d_{j-1})^{M+1} - (z_o - z_{j-1})^{M+1}}{d_{j-1}} \right\} \quad (3.5.12)$$

Nadere beschouwing van deze uitdrukking leert dat de evenwichtsafstand W_j , voor gegeven laagbegrenzingsen, sterk afhankelijk is van de vorm van het dwarsprofiel. Tevens is er een sterke afhankelijkheid van de korreldiameter. Deze uitdrukking kan ook worden gebruikt om het effect van een stijging van de gemiddelde zeespiegel op de grootte van de evenwichtsafstand uit te werken. In dit geval zal er in principe sprake zijn van een algehele ophoging van het profiel waarbij geldt $\Delta z_o = \Delta h$. Een nadere uitwerking van dit effect is gegeven in Sectie 7.5.

3.5.7 Dwarstransportconstante

De dwarstransportconstante b_j zegt iets over de snelheid waarmee afwijkingen van de evenwichtssituatie worden gecorrigeerd.

Voor wat betreft de orde van grootte moet gedacht worden aan $b_j = 0,1$ à 10 m/jaar, waarbij met name een sterke afhankelijkheid is met het niveau van het scheidingsvlak [Bakker, 1987]. Inzicht in de feitelijke betekenis van deze dwarstransportconstante kan worden verkregen door de uitwisseling tussen twee lagen procesmatig te beschrijven.

In dit geval geldt voor het helling-gerelateerde dwarstransport:

$$q = b (W - (y_2 - y_1)) \quad (3.5.13)$$

en bij restrictie tot de interne uitwisseling tussen laag 1 met laagdikte d_1 en laag 2 met laagdikte d_2 (dus zonder langtransportgradiënten en bij afwezigheid van bronnen en putten) zelfs:

$$q = -d_1 \frac{dy_1}{dt} \quad (3.5.14a)$$

en:

$$q = +d_2 \frac{dy_2}{dt} \quad (3.5.14b)$$

Bij gebruikmaking van de hulpparameters Y en D conform:

$$y_1 d_1 + y_2 d_2 = YD \quad (3.5.15a)$$

en dus:

$$y_2 = \frac{YD - y_1 d_1}{d_2} \quad (3.5.15b)$$

geldt voor het dwarstransport:

$$q = b \left(W - \left(\frac{YD - y_1 d_1}{d_2} - y_1 \right) \right) \quad (3.5.16a)$$

ofwel:

$$q = b \left(1 + \frac{d_1}{d_2} \right) y_1 - b \left(\frac{YD}{d_2} - W \right) \quad (3.5.16b)$$

Combinatie met Vgl.(3.5.14a) levert:

$$\frac{dy_1}{dt} + b \frac{d_1 + d_2}{d_1 d_2} y_1 = \frac{b}{d_1} \left(\frac{YD}{d_2} - W \right) \quad (3.5.17a)$$

of in vereenvoudigde vorm:

$$\frac{dy_1}{dt} + C_1 y_1 = C_2 \quad (3.5.17b)$$

De oplossing van deze eerste-orde differentiaalvergelijking is:

$$y_1(t) = A e^{-C_1 t} + \frac{C_2}{C_1} \quad (3.5.18)$$

waarin A gerelateerd is aan de initiële verstoring.

Voor het hierbij optredende dwarstransport geldt:

$$q(t) = d_1 C_1 A e^{-C_1 t} \quad (3.5.19a)$$

of in vereenvoudigde vorm:

$$q(t) = q(t_0) e^{-t/T^*} \quad (3.5.19b)$$

resultierend in een gestage afname van het transport.

De ontwikkeling naar een stabiele evenwichtswaarde vindt plaats via de e -macht, waarin voor de karakteristieke tijdschaal geldt:

$$T^* = \frac{1}{C_1} \quad (3.5.20a)$$

of:

$$T^* = \frac{d_1 d_2}{b (d_1 + d_2)} \quad (3.5.20b)$$

De grootte van de T^* is daarbij gerelateerd aan de tijdsduur waarbinnen een initieel aanwezig verschilvolume (verstoring uit het evenwicht) met een factor $1/e$ afneemt.

Deze meer inzichtelijke tijdschaal maakt het mogelijk om bij gegeven laagbegrenzingsen een betere kwantificering te geven voor de benodigde dwarstransportcoëfficiënt b . Er geldt nu immers:

$$b = \frac{d_1 d_2}{T^* (d_1 + d_2)} \quad (3.5.21a)$$

of in het meer algemene geval:

$$b_j = \frac{d_{j-1} d_j}{T_j^* (d_{j-1} + d_j)} \quad (3.5.21b)$$

De grootte van de karakteristieke tijdschaal neemt toe met de waterdiepte, resulterend in een afname van de dwarstransportconstante.

3.6 Modellering zeegat-systeem

3.6.1 Algemeen

In de volgende secties komen eerst de vorm van de buitendelta en de verdeling van het aankomende transport in de strand- en brekerlijn aan de orde. Vervolgens zijn de grootte van het totale vloedkomgerichte vloedtransport en het zeewaartsgerichte ebtransport gekwantificeerd. Het netto transport als mogelijk verschil tussen het aangeboden vloedtransport en het geleverde ebtransport komt als laatste aan de orde. Tot besluit van zijn de gebruikte stuur/afregelingsparameters samengebracht in Sectie 3.6.9.

Figuur 3.6.1 geeft een overzicht van de globale vorm van een buitendelta en de daarbij te onderscheiden transportstromen.

3.6.2 Evenwichtsvorm buitendelta

In Figuur 3.6.2 is de vorm van de buitendelta geschematiseerd en zijn de voor de kwantificering van deze vorm gebruikte parameters samengebracht.

Uitgangspunt is een zekere verhouding tussen de grootte van de maximale uitbouw van de buitendelta λ en de breedte van de buitendelta B (per definitie veel groter dan de breedte van het zeegat). Voor deze verhouding (relatieve deltauitbouw λ_r) geldt:

$$\lambda_r = \frac{\lambda}{B} = 0,2 \sim 0,4$$

De grootte van deze verhouding lijkt mede afhankelijk van de intensiteit van de golfaanval, dus:

$$\lambda_r = \mathbf{F}\{H, \dots\} \quad (3.6.1)$$

Opgemerkt moet worden dat de λ_r -parameter voor een gegeven breedte van de buitendelta natuurlijk van belang is voor het zandvolume in de buitendelta V_Δ .

Deze is immers gerelateerd aan:

$$V_\Delta = \frac{\lambda_r}{2} d_2 B^2 \quad (3.6.2)$$

waarin d_2 betrekking heeft op de relevante laagdikte; de buitendelta bevindt zich per definitie in laag 2.

Daarnaast heeft de relatieve uitbouw λ_r ook effect op de oriëntatie van de brekerlijn (laag 2) welke lokaal een zekere bijdraaiing ondergaat. De grootte van deze bijdraaiing $\Delta\phi$ is voor een driehoekige symmetrische deltavorm (onder veronderstelling dat $\tan(\Delta\phi) \sim \Delta\phi$) gelijk aan:

$$|\Delta\phi| = 2 \lambda_r \quad (3.6.3)$$

waarbij de bijdraaiing ter plaatse van de linkerflank van de buitendelta $\Delta\phi_l$ en die van de rechterflank $\Delta\phi_r$ gelijk zijn. De totale verdraaiing ter plaatse van de punt van de delta is gelijk aan:

$$\Delta\phi_t = \Delta\phi_l + \Delta\phi_r = 4 \lambda_r \quad (3.6.4)$$

Voor het geval van een asymmetrische, scheve buitendelta is dit iets anders. Bevindt zich de ebgeul niet in het midden van de buitendelta, maar op een afstand van δB uit de linkerrand en is bovendien sprake van een zekere scheefheid van de gehele delta ϕ_Δ , waarbij de rechterrands over een afstand $\phi_\Delta B$ zeewaarts is verschoven, dan valt af te leiden dat voor de hoekverdraaiing van de linkerflank geldt:

$$\Delta\phi_l = \frac{\lambda_r}{\delta} + \phi_\Delta \quad (3.6.5)$$

Voor de verdraaiing van de rechterflank valt af te leiden:

$$\Delta\phi_r = \frac{\lambda_r}{1-\delta} - \phi_\Delta \quad (3.6.6)$$

waarbij voor de totale verdraaiing ter plaatse van de punt van de buitendelta geldt:

$$\Delta\phi_t = \Delta\phi_l + \Delta\phi_r = \frac{\lambda_r}{(1-\delta)\delta} \quad (3.6.7)$$

dit onafhankelijk van de globale verdraaiing van de buitendelta ϕ_Δ . Voor $\delta = 0,5$ wordt conform Vgl.(3.6.4) weer $\Delta\phi_t = 4\lambda_r$ gevonden.

3.6.3 Verdeling langstransport strandlijn (laag 1)

De gebruikte definitie van de onderscheiden transporten is gegeven in Figuur 3.6.3.

Het langstransport in de strandlijn S_1 zal zich aan de rand van de buitendelta moeten splitsen in een transport richting zeegat via de vloedgeul S_{vl1} en een (dwars-)transport naar de laag 2 S_{dl} . Hierbij worden de transporten aangeduid met T_{spj} , waarin T het (langs-)transport (S) of eventueel dwarstransport (Q), g de getijfase vloed (v) of eb (e), p de positie hetzij de linker- (l) of rechterzijde (r) van de delta en j het lijnnummer dus strandlijn (1) of (2) voorstelt. Er geldt voor dit specifieke geval natuurlijk:

$$S_1 = S_{vl1} + S_{dl} \quad (3.6.8)$$

Voor de onderlinge verdeling wordt aangenomen dat:

$$S_{vl1} = \alpha S_1 \quad (3.6.9)$$

waarbij α dus een eerste afregelingsparameter is met $\{0 < \alpha < 1\}$. Voor de grootte kan gedacht worden aan $\alpha \approx 0,5$, waarbij vermoedelijk een afhankelijkheid aanwezig is met zowel de grootte van het getijprisma Ω en het totale langstransport S :

$$\alpha = \mathbb{F}\{S, \Omega, \dots\} \quad (3.6.10)$$

Voor het geconcentreerde dwarstransport naar de diepere laag geldt derhalve:

$$S_{dl} = (1 - \alpha) S_1 \quad (3.6.11)$$

De effecten van de α -waarde moeten nog nader worden onderzocht (zie Hoofdstuk 4).

3.6.4 Verdeling langstransport brekerlijn (laag 2)

Ter plaatse van de brekerlijn geldt een iets ingewikkelder verdeelsleutel, namelijk:

$$S_2 + S_{dl} = S_{l\Delta} + S_{vl2} \quad (3.6.12)$$

waarin $S_{l\Delta}$ het (doorgaande) transport langs de (linker) buitenrand van de delta en S_{vl2} het transport dat vanaf de brekerlijn ten goede komt aan het transport door de vloedgeul.

Omwerking en substitutie levert:

$$S_{vl2} = S_2 - S_{l\Delta} + (1 - \alpha) S_1 \quad (3.6.13)$$

De grootte van het transport langs de buitenrand van de delta, S_Δ , komt in het volgende aan de orde.

3.6.5 Transport langs buitenrand

De grootte van het langstransport langs de (linker en rechter) buitenrand van de delta S_Δ volgt in principe een soortgelijk verband als van toepassing voor de grootte van het transport in laag 2:

$$S_2 = a_2 \left(\phi_{o,2} - \frac{dy_2}{dx} \right) \quad (3.6.14)$$

Er zijn echter twee significante verschillen. Ten eerste wijkt de hoek van deze laag hierbij systematisch af van die in het aangrenzende kustvak en wel met een hoek $\Delta\phi_l$ of $\Delta\phi_r$.

Bovendien zijn immers nog additionele effecten van het in- en uitstromende getij aanwezig.

Er geldt derhalve:

$$S_\Delta = a_2 (1 + \beta) \left(\phi_{o,2} - \frac{dy_2}{dx} \mp \Delta\phi \right) \quad (3.6.15)$$

ofwel, voor respectievelijk de linker- en rechterflank van de delta:

$$S_{l\Delta} = S_2 (1 + \beta) - a_2 (1 + \beta) \Delta\phi_l \quad (3.6.16a)$$

en:

$$S_{r\Delta} = S_2 (1 + \beta) + a_2 (1 + \beta) \Delta\phi_r \quad (3.6.16b)$$

Het transport is dus opgebouwd uit twee termen, waarbij de eerste term recht evenredig is met het normale langstransport in deze laag en de tweede term qua grootte en teken samenhangt met de wijziging in de oriëntatie ter plaatse van de delta-uitbouw.

De β -waarde betreft de (relatieve) vergrotingsfactor voor het transport als gevolg van de getijwerking, met:

$$\beta = \mathbb{F} \{ \Omega, \dots \} \quad (3.6.17)$$

Voor deze (tweede) transport-gerelateerde afregelingsparameter geldt $\{ \beta > 0 \}$.

Een nadere indicatie omtrent de grootte van deze factor kan worden verkregen door het effect op de netto snelheden en transporten als functie van de door de getijstroom veroorzaakte relatieve dwarscomponent van de snelheid te beschouwen.

Als in het referentiegeval het karakteristieke langstransport S_l is gerelateerd aan een karakteristieke langssnelheid v_l , dan geldt voor de onderlinge afhankelijkheid:

$$S_l \sim (v_l)^m \quad (3.6.18)$$

waarin m een zekere macht.

Bij aanwezigheid van door in- en uitstroming geïnduceerde additionele dwarsstroming v_d zal het resulterende langstransport toenemen zodat geldt $S_l^* > S_l$.

Voor het geval dat geldt:

$$v_d = \mu v_l \quad (3.6.19)$$

geldt voor de resulterende snelheid v_r :

$$v_r = \sqrt{1 + \mu^2} v_l \quad (3.6.20)$$

en dus voor het resulterende transport S_r :

$$S_r \sim (v_r)^m = (1 + \mu^2)^{m/2} (v_l)^m \quad (3.6.21)$$

Voor de gezochte langscomponent S_l^* geldt daarbij:

$$S_l^* = \frac{1}{\sqrt{1 + \mu^2}} S_r \quad (3.6.22)$$

zodat:

$$S_l^* = S_l (1 + \mu^2)^{\frac{m-1}{2}} \quad (3.6.23)$$

Volgens deze uitwerking is de gezochte vergrotingsfactor gelijk aan:

$$(1 + \beta) = (1 + \mu^2)^{\frac{m-1}{2}} \quad (3.6.24)$$

ofwel:

$$\beta = (1 + \mu^2)^{\frac{m-1}{2}} - 1 \quad (3.6.25)$$

Voor $m \approx 3$ levert dit:

$$\beta = \mu^2 \quad (3.6.26)$$

Gezien het fluctuerende karakter van de snelheden gaat het hierbij om een bovengrensbenadering. Als orde-van-grootte schatting geldt dus blijkbaar:

$$0 < \beta < \left(\frac{v_d}{v_l}\right)^2 \quad (3.6.27)$$

Gevoeligheidsonderzoek naar het feitelijke effect van deze β -waarde komt in Hoofdstuk 4 aan de orde.

3.6.6 Grootte totale vloedtransport

De grootte van het netto vloedtransport volgt uit de sommatie van de toelevering uit de strand- en brekerlijn voor zowel de linker- als de rechter vloedgeul. Dus:

$$S_{vl} = S_{vl1} + S_{vl2} \quad (3.6.28)$$

en:

$$S_{vr} = S_{vr1} + S_{vr2} \quad (3.6.29)$$

Na uitwerking van de individuele transportbijdragen wordt voor de linker vloedgeul gevonden:

$$\begin{aligned} S_{vl1} &= \alpha S_1 \\ S_{vl2} &= S_2 - S_2(1 + \beta) + a_2(1 + \beta)\Delta\phi_l + (1 - \alpha)S_1 \\ &= (1 - \alpha)S_1 - \beta S_2 + a_2(1 + \beta)\Delta\phi_l \end{aligned}$$

zodat het totale vloedtransport door de linker geul gelijk is aan:

$$S_{vl} = S_1 - \beta S_2 + a_2(1 + \beta)\Delta\phi_l \quad (3.6.30)$$

De grootte van het totale inkomende vloedtransport is afhankelijk van de β -waarde en de grootte van de (relatieve) verdraaiing van deze lijn (en niet meer van α !).

Voor de transporten in het rechter geulstelsel geldt min of meer analoog:

$$\begin{aligned} S_{vr1} &= -\alpha S_1 \\ S_{vr2} &= -(1 - \alpha)S_1 + \beta S_2 + a_2(1 + \beta)\Delta\phi_r \end{aligned}$$

zodat:

$$S_{vr} = -S_1 + \beta S_2 + a_2(1 + \beta)\Delta\phi_r \quad (3.6.31)$$

Het totale (aangeboden) vloedtransport volgt uit:

$$S_v = S_{vl} + S_{vr} \quad (3.6.32)$$

en is daarmee gelijk aan:

$$S_v = a_2 (1 + \beta) (\Delta\phi_l + \Delta\phi_r) \quad (3.6.33a)$$

ofwel:

$$S_v = a_2 (1 + \beta) \frac{\lambda_r}{(1 - \delta) \delta} \quad (3.6.33b)$$

Het vloedtransport is afhankelijk van zowel de β -waarde als de relatieve delta-uitbouw λ_r en de relatieve positie van de ebgeul δ .

3.6.7 Grootte totale ebtransport

De grootte van het netto ebtransport volgt uit de balans in het 'koppunt'. Hiervoor geldt:

$$\begin{aligned} S_{l\Delta} + S_e &= S_{r\Delta} \\ \text{ofwel:} \quad S_e &= S_{r\Delta} - S_{l\Delta} \end{aligned} \quad (3.6.34)$$

Substitutie van de termen in het rechterlid levert:

$$S_e = a_2 (1 + \beta) (\Delta\phi_r + \Delta\phi_l) \quad (3.6.35a)$$

ofwel:

$$S_e = a_2 (1 + \beta) \frac{\lambda_r}{(1 - \delta) \delta} \quad (3.6.35b)$$

In feite kan dit worden gezien als de benodigde grootte van het transport om de deltavorm (ter plaatse van de positie van de ebgeul) in stand te houden. Een en ander is voor een evenwichtssituatie weergegeven in Figuur 3.6.4.

3.6.8 Grootte netto transport

De grootte van het resulterende netto transport door het zeegat S_r volgt uit het verschil tussen het (totale) inkomende vloedtransport S_v en het uitgaande ebtransport S_e .

Ofwel:

$$S_r = S_e - S_v \quad (3.6.36)$$

Voor de evenwichtssituatie geldt natuurlijk $S_e = S_v$ en dus $S_r = 0$.

Voor een niet-evenwichtssituatie geldt $S_r \neq 0$, waarbij het netto transport in algemene termen kan worden beschreven door:

$$S_r = -\gamma S_v + \tau S_g(t) \quad (3.6.37)$$

waarin de eerste term een evenredigheid met de (absolute) grootte van het vloedtransport geeft. De tweede term S_g is te zien als een (geforceerde) bronfunctie, waaraan nog een vermenigvuldigingsfactor τ is toegevoegd. Deze waarde kan in principe worden gebruikt voor de afregeling van het rekenmodel voor een specifieke toepassing (zie ook Sectie 5.7.5).

Uitgaande van een gegeven aanbod uit de vloedgeulen S_v zal het geleverde transport door de ebgeul moeten volgen uit:

$$\begin{aligned} S_e &= S_r + S_v \\ &= \tau S_g(t) + (1 - \gamma) S_v \end{aligned} \quad (3.6.38)$$

Voor een situatie zonder geforceerde toe- of afvoer ($S_g = 0$) wordt voor $\gamma = 0$ de stabiele evenwichtssituatie gevonden. Voor $\gamma > 0$ is sprake van een netto verlies van materiaal aan de kom (zandvraag). De grootte van de γ -waarde hangt samen met de mate waarin de morfologische grootheden (in het vloedbekken) afwijken van de evenwichtssituatie, zeg:

$$\gamma = \mathbf{F}\{\dots\} \quad (3.6.39)$$

De nadere definitie is nog een punt van onderzoek.

3.6.9 Overzicht stuurparameters

De geïntroduceerde stuurparameters bestaan uit twee groepen, te weten:

- Geometrie-gerelateerde parameters;
- Transport-gerelateerde parameters.

De geometrie van de buitendelta ligt vast door:

- De λ_r -waarde als maat voor de relatieve uitbouw λ_r van de buitendelta;
- De δ -waarde als maat voor de relatieve positie van de ebgeul ten opzichte van de ligging van de randen van de buitendelta;
- De door de ϕ_Δ -waarde beschreven globale scheefheid van de buitendelta.

Er zijn vier transport-gerelateerde parameters welke maatgevend zijn voor de ontwikkeling van de buitendelta, te weten:

- De α -waarde t.b.v. de verdeling van het strandtransport;
- De β -waarde als maat voor de relatieve bijdrage van het in- en uitstromende getij ten opzichte van het 'normale' langstransport;
- De γ -waarde als maat voor het netto transport uitgedrukt als fractie van het inkomende vloedtransport;
- De τ -waarde als vermenigvuldigingsfactor voor het extern opgelegde netto transport.

De laatste twee hebben hierbij betrekking op de sturing van het netto transport.

In Hoofdstuk 4 is de gevoeligheid van de verschillende parameters op de ontwikkeling van een buitendelta nader uitgewerkt.

3.7 Discretisatie en oplosprocedure

3.7.1 Algemeen

Na een discretisatie van de vergelijkingen en nadere uitwerking volgens de (volledig impliciete) methode van Crank-Nicholson, is het dan verkregen stelsel van (lineaire) vergelijkingen opgelost met behulp van een zogenaamde LU-decompositie. In de volgende secties wordt deze methode nader toegelicht en komen de definities van de gebruikte (band)-matrix en bronvector aan de orde.

Vervolgens zijn de vergelijkingen voor de verschillende kustsecties nader gespecificeerd en zijn de daarmee samenhangende termen voor de matrices vastgesteld.

Tot slot worden de randvoorwaarden voor modelranden (links/rechts) gespecificeerd.

Bij de discretisatie is uitgegaan van de veronderstelling dat de aan het langtransport gerelateerde parameters op de celranden (resp. linkerrand $i-1$ en rechterrand i voor rekencel i) gegeven zijn (dus S_j , a_j en ϕ_j) en het dwarstransport (dus q_j , b_j en W_j) en de lijnposities y_j in het midden van de cel.

Bovendien is in principe uitgegaan van een niet-equidistant rekengrid (variabele Δx -waarden).

3.7.2 Gebruikte oplosmethode

De complete set van vergelijkingen als beschreven in Sectie 3.2 t/m 3.6 is na discretisatie teruggebracht tot een stelsel lineaire vergelijkingen in de vorm van:

$$\begin{aligned} a_{11}x_1 + a_{12}x_2 + \dots + a_{1n}x_n &= f_1 \\ a_{21}x_1 + a_{22}x_2 + \dots + a_{2n}x_n &= f_2 \\ a_{n1}x_1 + a_{n2}x_2 + \dots + a_{nn}x_n &= f_n \end{aligned} \quad (3.7.1)$$

Dit stelsel kan in het kort worden geschreven als:

$$\mathbf{A} \mathbf{x} = \mathbf{F} \quad (3.7.2)$$

waarin \mathbf{A} de zogenaamde systeemmatrix en \mathbf{F} de bronvector.

Voor de oplossing van de \mathbf{x} -vector is gebruik gemaakt van de zogenaamde LU-decompositie van de (systeem-)matrix \mathbf{A} , waarbij geldt $\mathbf{LU} = \mathbf{A}$. Hierbij wordt \mathbf{A} opgesplitst in een onderdriehoeksmatrix \mathbf{L} en een bovendriehoeksmatrix \mathbf{U} waarin alle elementen onder en boven de diagonaal gelijk zijn aan 0. In de \mathbf{L} -matrix zijn bovendien alle elementen op de hoofddiagonaal gelijk aan de eenheid. Voor deze decompositie is gebruik gemaakt van een standaard rekenroutine.

Gegeven de \mathbf{L} - en de \mathbf{U} -matrix kan per tijdstip uit de bronvector de oplossing worden bepaald. De samenstelling van de systeemmatrix \mathbf{A} en bronvector \mathbf{F} komen in de volgende sectie aan de orde.

3.7.3 Nadere uitwerking linker- en rechterlid

Eerst dienen de coëfficiënten van de systeemmatrix te worden bepaald. Deze zijn (in principe) tijdsafhankelijk en blijven derhalve ongewijzigd.

De gezochte \mathbf{x} -vector bevat de $y_{j,i}$ -waarden voor de lijnen $j=0, \dots, 4$ en de celposities $i=1, 2, \dots, n$ en omvat $5n$ elementen. Deze is te schrijven als:

$$\mathbf{x} = [y_{0,1}, y_{1,1}, y_{2,1}, y_{3,1}, y_{4,1}, y_{0,2}, y_{1,2}, \dots, y_{j,i}, \dots, y_{3,n}, y_{4,n}] \quad (3.7.3)$$

waarin $y_{j,i}$ betrekking heeft op de lijnligging van laag j in positie i .

Met gebruikmaking van de (hulp-)index k , met:

$$k = 5(i-1) + 1 \quad (3.7.4)$$

heeft het element x_{k+j} , het $(k+j)$ ^e element, betrekking op laag j .

De relevante vergelijkingen voor lijn j in positie i kunnen vervolgens worden geschreven als:

$$\sum_{t=1}^{5n} \mathbf{A}_{k+j,t} \mathbf{x}_t = \mathbf{F}_{k+j} \quad (3.7.5)$$

waarin t een hulpteller.

Slechts een beperkt aantal van de $5n$ beschikbare punten is van belang, $y_{j,i}$ is immers slechts gerelateerd aan het punt in de hoger gelegen laag $y_{j-1,i}$, de beide naastgelegen punten $y_{j,i-1}$ en $y_{j,i+1}$ en het lager gelegen punt $y_{j+1,i}$.

In het totaal zijn bij 5 lagen 11 punten nodig, te weten:

$$\sum_{t=k+j-5}^{k+j+5} \mathbf{A}_{k+j,t} \mathbf{x}_t = \mathbf{F}_{k+j} \quad (3.7.6)$$

De overige rij-elementen van de matrix zijn dan gelijk aan nul. Bij gebruikmaking van een bandmatrix met bandbreedte 11 gaat dit over in:

$$\sum_{t=-5}^5 \mathbf{A}_{k+j,t} \mathbf{x}_{k+j+t} = \mathbf{F}_{k+j} \quad (3.7.7)$$

Uitschrijven van de 5 echt relevante termen levert:

$$\mathbf{A}_{k+j,-5} \mathbf{x}_{k+j-5} + \mathbf{A}_{k+j,-1} \mathbf{x}_{k+j-1} + \mathbf{A}_{k+j,0} \mathbf{x}_{k+j} + \mathbf{A}_{k+j,+1} \mathbf{x}_{k+j+1} + \mathbf{A}_{k+j,+5} \mathbf{x}_{k+j+5} = \mathbf{F}_{k+j} \quad (3.7.8)$$

waaruit blijkt dat, naast de centrale term op de hoofddiagonaal $\mathbf{A}_{k+j,0}$, slechts twee van de omliggende termen van belang zijn.

Als nu bovendien de elementen van de \mathbf{x} -vector nu worden vervangen door de betreffende y -waarden dan resulteert een en ander in:

$$\mathbf{A}_{k+j,-5} y_{j,i-1} + \mathbf{A}_{k+j,-1} y_{j-1,i} + \mathbf{A}_{k+j,0} y_{j,i} + \mathbf{A}_{k+j,+1} y_{j+1,i} + \mathbf{A}_{k+j,+5} y_{j,i+1} = \mathbf{F}_{k+j} \quad (3.7.9)$$

Uitschrijven van de relevante vergelijkingen (afhankelijk van de geïntroduceerde codering) levert de formuleringen voor de elementen van de bandmatrix in het linkerlid.

De bronvector \mathbf{F} in het rechterlid omvat $5n$ elementen, waarbij met gebruikmaking van teller k voor elke i -waarde per laag j de grootte van \mathbf{F}_{k+j} moet worden bepaald. Afhankelijk van de positie i en de daarbij behorende codering en de betrokken laag is voor deze bronvector een andere formulering van toepassing.

3.7.4 Algemene oplosprocedure

Voor de verdere oplosprocedure wordt uitgegaan van de lokale balansvergelijking voor een individuele rekencel, te weten:

$$\frac{\Delta y_{j,i}}{\Delta t} + \frac{S_{j,i} - S_{j,i-1}}{d_{j,i} \Delta x_i} + \frac{q_{j+1,i} - q_{j,i}}{d_{j,i}} = \frac{\Delta V_{j,i}}{d_{j,i} \Delta x_i \Delta t} \quad (3.7.10a)$$

of in herschreven vorm:

$$\frac{\Delta y_{j,i}}{\Delta t} + \frac{1}{d_{j,i} \Delta x_i} \Delta S_{j,i} + \frac{1}{d_{j,i}} \Delta q_{j,i} = \frac{\Delta V_{j,i}}{d_{j,i} \Delta x_i \Delta t} \quad (3.7.10b)$$

Na substitutie van de linearisatie van de langs- en dwarstransportterm (tweede en derde term in het linkerlid; zie volgende twee secties) kan bovenstaande vergelijking worden herschreven tot:

$$\frac{\Delta y_{j,i}}{\Delta t} + [...] = \{...\} \quad (3.7.11)$$

waarin in [...] in het linkerlid alle aan y gerelateerde termen zijn samengebracht en het rechterlid {...} de overige termen bevat.

Uitgaande van bekende getalswaarden in de punten $i-1$, i en $i+1$ op het tijdstip t , volgt bij gebruik van een impliciet rekenschema de schatting voor de $y_{j,i}$ -waarde op tijdstip $t+\Delta t$ uit:

$$\frac{y_{j,i}^{t+\Delta t} - y_{j,i}^t}{\Delta t} + \theta [\dots]^{t+\Delta t} + (1-\theta) [\dots]^t = \{\dots\}^t \quad (3.7.12a)$$

of in herschreven vorm:

$$(y_{j,i} + \theta \Delta t [\dots])_{\text{I}}^{t+\Delta t} = (y_{j,i} - (1-\theta) \Delta t [\dots])_{\text{II}}^t + (\Delta t \{\dots\})_{\text{III}}^t \quad (3.7.12b)$$

Het linkerlid in deze vergelijking heeft betrekking op het nieuwe tijdstip $t+\Delta t$, terwijl het rechterlid waarden op tijdstip t betreft.

Hierin is θ een wegingsfactor welke in feite resulteert in een benadering van $\Delta y/\Delta t$ op het tijdstip $t+\theta\Delta t$. Voor numerieke stabiliteit moet daarbij gelden $\frac{1}{2} \leq \theta \leq 1$ en wordt meestal $\theta \approx 0,55$ aangehouden.

Uit de term in het linkerlid (term I) van Vgl.(3.7.13b) kunnen nu de elementen van de bandmatrix worden gedestilleerd. De termen II en III in het rechterlid leveren de bronterm. Nadere algemene uitwerking is gegeven in Sectie 3.7.7 en 3.7.8. Eerst zal echter de discretisatie van de langs- en dwarstransportterm ter hand worden genomen.

3.7.5 Nadere uitwerking langstransportverschil

In het volgende is de grootte van het langstransportverschil $\Delta S_{j,i}$ als gegeven in de lokale balansvergelijking van Vgl.(3.7.10b), nader uitgewerkt, waarbij:

$$\Delta S_{j,i} = S_{j,i} - S_{j,i-1} \quad (3.7.13)$$

Voor het langstransport in laag j en positie x_i (celrand) geldt:

$$S_{j,i} = S_{j,i}^o + a_{j,i} \left(\phi_{j,i} - \left(\frac{dy}{dx} \right)_{j,i} \right) \quad (3.7.14)$$

waarin de discretisatie van de laatste term gelijk is aan:

$$\left(\frac{dy}{dx} \right)_{j,i} = \frac{2(y_{j,i+1} - y_{j,i})}{\Delta x_i + \Delta x_{i+1}} \quad (3.7.15)$$

Substitutie van deze vergelijking in Vgl.(3.7.14) en uitschrijven van het transport in x_{i-1} levert uiteindelijk de discretisatie voor $\Delta S_{j,i}$, te weten:

$$\begin{aligned} \Delta S_{j,i} = & \left[\frac{-2 a_{j,i-1}}{\Delta x_{i-1} + \Delta x_i} \right] y_{j,i-1} + \\ & \left[\frac{2 a_{j,i-1}}{\Delta x_{i-1} + \Delta x_i} + \frac{2 a_{j,i}}{\Delta x_i + \Delta x_{i+1}} \right] y_{j,i} + \\ & \left[\frac{-2 a_{j,i}}{\Delta x_i + \Delta x_{i+1}} \right] y_{j,i+1} + \\ & [(S_{j,i}^o - S_{j,i-1}^o) + (a_{j,i} \phi_{j,i} - a_{j,i-1} \phi_{j,i-1})] \end{aligned} \quad (3.7.16)$$

Hierin zijn de aan y -gerelateerde termen gegroeped.

3.7.6 Nadere uitwerking dwarstransportverschil

In het volgende is de grootte van het dwarstransportverschil $\Delta q_{j,i}$ over cel i in laag j als gegeven in de lokale balansvergelijking van Vgl.(3.7.10b), nader uitgewerkt, waarbij:

$$\Delta q_{j,i} = q_{j+1,i} - q_{j,i} \quad (3.7.17)$$

Voor het dwarstransport geldt:

$$q_{j,i} = q_{j,i}^{\circ} + b_{j,i} (W_{j,i} - y_{j,i} + y_{j-1,i}) \quad (3.7.18)$$

Verdere uitwerking levert:

$$\begin{aligned} \Delta q_{j,i} = & [-b_{j,i}] y_{j-1,i} + \\ & [b_{j,i} + b_{j+1,i}] y_{j,i} + \\ & [-b_{j+1,i}] y_{j+1,i} \\ & [(q_{j+1,i}^{\circ} - q_{j,i}^{\circ}) + (b_{j+1,i} W_{j+1,i} - b_{j,i} W_{j,i})] \end{aligned} \quad (3.7.19)$$

3.7.7 Specificatie basiselementen bandmatrix

De elementen van de bandmatrix volgen na uitschrijving van de linkerterm uit:

$$(\dots)_{\mathbf{I}} = \mathbf{A}_{k+j,-5} y_{j,i-1} + \mathbf{A}_{k+j,-1} y_{j-1,i} + \mathbf{A}_{k+j,0} y_{j,i} + \mathbf{A}_{k+j,+1} y_{j+1,i} + \mathbf{A}_{k+j,+5} y_{j,i+1} \quad (3.7.20)$$

Uitgaande van de basisformulering voor de eerste term:

$$(\dots)_{\mathbf{I}} = y_{j,i} + \theta \Delta t [\dots] \quad (3.7.21)$$

levert substitutie van de aan y -gerelateerde termen van de langs- en dwarstransportbijdrage als gegeven in Vgl.(3.7.16) en (3.7.19) in Vgl.(3.7.10b) de in (3.7.20) gegeven elementen van de bandmatrix, te weten:

$$\mathbf{A}_{k+j,-5} = \frac{\Delta t \theta}{d_{j,i} \Delta x_i} \left[\frac{-2 a_{j,i-1}}{\Delta x_{i-1} + \Delta x_i} \right] \quad (3.7.22)$$

$$\mathbf{A}_{k+j,-1} = \frac{\Delta t \theta}{d_{j,i}} [-b_{j,i}] \quad (3.7.23)$$

$$\mathbf{A}_{k+j,0} = I + \frac{\Delta t \theta}{d_{j,i} \Delta x_i} \left[\frac{2 a_{j,i-1}}{\Delta x_{i-1} + \Delta x_i} + \frac{2 a_{j,i}}{\Delta x_i + \Delta x_{i+1}} \right] + \frac{\Delta t \theta}{d_{j,i}} [b_{j,i} + b_{j+1,i}] \quad (3.7.24)$$

$$\mathbf{A}_{k+j,+1} = \frac{\Delta t \theta}{d_{j,i}} [-b_{j+1,i}] \quad (3.7.25)$$

$$\mathbf{A}_{k+j,+5} = \frac{\Delta t \theta}{d_{j,i} \Delta x_i} \left[\frac{-2 a_{j,i}}{\Delta x_i + \Delta x_{i+1}} \right] \quad (3.7.26)$$

De overige 6 gebruikte elementen zijn gelijk aan 0.

3.7.8 Specificatie basisvorm bronvector

Met $k=5(i-1)+1$ geldt voor de bronvector:

$$\mathbb{F}_{k+j} = (y_{j,i} - (1 - \theta) \Delta t [\dots])_{\text{II}} + (\Delta t \{ \dots \})_{\text{III}} \quad (3.7.27)$$

Met gebruikmaking van:

$$\psi = \frac{1 - \theta}{\theta} \quad (3.7.28)$$

gaat dit over in:

$$\mathbb{F}_{k+j} = (y_{j,i} - \psi \theta \Delta t [\dots])_{\text{II}} + (\Delta t \{ \dots \})_{\text{III}} \quad (3.7.29)$$

waarin de eerste term (II-term), afgezien van de ψ -factor, vergelijkbaar is met die van de oorspronkelijke systeemmatrix. Uitwerking levert immers:

$$(y_{j,i} - \psi \theta \Delta t [\dots])_{\text{II}} = y_{j,i} - \psi ((\dots)_{\text{I}} - y_{j,i}) \quad (3.7.30a)$$

ofwel:

$$(\dots)_{\text{II}} = (1 + \psi) y_{j,i} - \psi (\dots)_{\text{I}} \quad (3.7.30b)$$

waarbij de formuleringen voor de I-term dus direct volgen uit de eerder gegeven afleiding. Deze worden nu echter betrokken op de y -waarden op tijdstip t in plaats van $t + \Delta t$, dit conform Vgl.(3.7.20).

Verdere uitwerking van de andere term (term III) levert als uiteindelijk resultaat voor de bronvector:

$$\begin{aligned} \mathbb{F}_{k+j} = & (1 + \psi) y_{j,i} - \psi (\dots)_{\text{I}} + \\ & \frac{-\Delta t}{d_{j,i} \Delta x_i} (S_{j,i}^{\circ} - S_{j,i-1}^{\circ}) + \\ & \frac{-\Delta t}{d_{j,i} \Delta x_i} (a_{j,i} \phi_{j,i} - a_{j,i-1} \phi_{j,i-1}) + \\ & \frac{-\Delta t}{d_{j,i}} (q_{j+1,i}^{\circ} - q_{j,i}^{\circ}) + \\ & \frac{-\Delta t}{d_{j,i}} (b_{j+1,i} W_{j+1,i} - b_{j,i} W_{j,i}) + \\ & \frac{\Delta V_{j,i}}{d_{j,i} \Delta x_i} \end{aligned} \quad (3.7.31)$$

Hierin hebben de tweede en derde term betrekking op het langstransport, de vierde en de vijfde term op het dwarstransport en de laatste term op externe bronnen en putten.

3.7.9 Codering rekencellen

In de twee voorafgaande secties zijn de basisformuleringen voor zowel de bandmatrix als de bronvector uitgewerkt. In principe zijn deze vergelijkingen van toepassing voor elke rekencel. Zoals reeds aangegeven in Sectie 3.3.4 moet er in langsrichting onderscheid worden gemaakt tussen verschillende secties, onder andere de echte kustdelen en de zeegaten. Uitgaande van een gegeven rekengrid moet dus per individuele rekencel worden vastgesteld welke aanpassing van de basisvergelijkingen nodig is.

Om een en ander gestructureerd te doen verlopen is aan elke rekencel, met $i = 1, \dots, n$, een specifieke twee-cijferige celcode toegekend, bestaande uit het volgnummer van elk kustdeel (normaal kustdeel en naastgelegen zeegat), aangegeven met g , en een getal dat het soort cel aangeeft. Een overzicht van de gehanteerde codes is gegeven in Tabel 3.7.1 en voor de situatie bij een zeegat nader uitgewerkt in Figuur 3.7.1.

celcode ^{*)}	specificatie/cellokatie
g0	Standaard kustvak
g1	Naast 'bovenstroomse' vloedgeul / laatste punt strandlijn naast zeegat
g2	Bovenstroomse/linker flank buitendelta
g3	Positie egeul/punt van de buitendelta
g4	Benedenstroomse/rechter flank buitendelta
g5	Naast 'benedenstroomse' vloedgeul / eerste punt strandlijn naast zeegat
g*	Standaard kustvak met constructie (nog niet geïmplementeerd)

*) g fungeert als index voor het volgnummer van het kustvak/zeegat.

Tabel 3.7.1 *Overzicht celcoderingen t.b.v. rekenalgorithme.*

Een rekencel met celcode 20 verwijst dus naar het tweede normale kustvak, 54 naar de benedenstroomse/rechter flank van de buitendelta van het vijfde zeegat. Dergelijke codes kunnen eveneens gebruikt worden om rekencellen met constructies en dus afwijkende formuleringen aan te duiden (optioneel). Na vaststelling van de ligging van de zeegaten en het te gebruiken rekenrooster ligt de (initiële) codering van de rekenpunten vast.

In het volgende komen de meer specifieke aanpassingen voor de onderscheiden cellen komen aan de orde.

3.7.10 Detailuitwerking voor standaard kustvak (code 0)

De in Sectie 3.7.7 en 3.7.8 gegeven uitwerking voor de elementen van de bandmatrix en de bronvector zijn van toepassing voor elke laag, dus voor $j = 0, \dots, 4$. De enige extra restricties betreffen de langtransportconstanten in de bovenste laag, waarvoor geldt:

$$a_{0,i-1} = 0 \quad (3.7.32)$$

en:

$$a_{0,i} = 0 \quad (3.7.33)$$

en de dwarstransportconstanten voor het transport over de modelgrenzen:

$$b_{j-1,i} = 0 \quad \text{voor } j = 0 \quad (3.7.34)$$

en:

$$b_{j+1,i} = 0 \quad \text{voor } j = 4 \quad (3.7.35)$$

3.7.11 Detailuitwerking voor positie linker vloedgeul (code 1)

Afgezien van de standaard aanpassingen als van toepassing bij een normaal kustvak moeten de langtransportconstanten op de rechter celrand worden aangepast.

Vanwege het ontbreken van de strandlaag ($j = 1$) geldt:

$$a_{1,i} = 0 \quad (3.7.36)$$

Het uitgaande langtransport in laag 2 is vergroot volgens:

$$a_{2,i} = (1 + \beta_g) a_{2,i} \quad (3.7.37)$$

De effecten van de geulen komen tot uitdrukking in het opleggen van de autonome langstransporten in laag 1 en laag 2. Voor laag 1 is deze gelijk aan het transport in de landwaartse vloedgeul:

$$S_{1,i}^o = S_{vl1,g} \quad (3.7.38)$$

Voor laag 2 geldt:

$$S_{2,i}^o = S_{vl2,g} \quad (3.7.39)$$

Verder is het dwarstransport tussen de beide lagen nog vergroot conform:

$$q_{2,i}^o = q_{2,i}^o + S_{dl,g} \quad (3.7.40)$$

3.7.12 Detailuitwerking voor linkerflank buitendelta (code 2)

Ter plaatse van de buitendelta geldt wegens het ontbreken van laag 0 en laag 1 voor de langtransport constanten:

$$a_{1,i-1} = 0 \quad (3.7.41)$$

en:

$$a_{1,i} = 0 \quad (3.7.42)$$

De a -waarden voor laag 2 zijn echter vergroot conform:

$$a_{2,i-1} = (1 + \beta_g) a_{2,i-1} \quad (3.7.43)$$

en:

$$a_{2,i} = (1 + \beta_g) a_{2,i} \quad (3.7.44)$$

Voor de autonome langstransporten in laag 0 geldt:

$$S_{0,i-1}^o = 0 \quad (3.7.45)$$

$$S_{0,i}^o = 0 \quad (3.7.46)$$

en evenzo voor laag 1:

$$S_{1,i-1}^o = 0 \quad (3.7.47)$$

$$S_{1,i}^o = 0 \quad (3.7.48)$$

Voor de dwarstransportconstanten geldt bij afwezigheid van de hogere lagen:

$$b_{1,i} = 0 \quad (3.7.49)$$

en:

$$b_{2,i} = 0 \quad (3.7.50)$$

Bovendien geldt daarbij voor de autonome dwarstransporten:

$$q_{0,i}^o = 0 \quad (3.7.51)$$

$$q_{1,i}^o = 0 \quad (3.7.52)$$

en:

$$q_{2,i}^o = 0 \quad (3.7.53)$$

3.7.13 Detailuitwerking voor positie ebgeul (code 3)

Ter plaatse van de positie van de ebgeul gelden dezelfde aanpassingen als voor de linker flank van de buitendelta. In aanvulling hierop is echter ook nog een dwarstransportcomponent aanwezig gelijk aan het transport in de ebgeul.

$$q_{2,i}^o = \frac{S_{e,g}}{\Delta x_i} \quad (3.7.54)$$

waarin:

$$S_{e,g} = \tau_g S_g(t) + (1 - \gamma_g) S_{v,g} \quad (3.7.55)$$

3.7.14 Detailuitwerking voor rechterflank buitendelta (code 4)

De aanpassingen voor deze punten zijn gelijk aan die bij de linkerflank van de buitendelta.

3.7.15 Detailuitwerking voor positie rechter vloedgeul (code 5)

Afgezien van de standaard aanpassingen als van toepassing bij een normaal kustvak moeten de langstransportconstanten op de linker celrand worden aangepast.

Vanwege het ontbreken van de strandlaag ($j = 1$) geldt:

$$a_{1,i-1} = 0 \quad (3.7.56)$$

Het inkomende langstransport in laag 2 is vergroot volgens:

$$a_{2,i-1} = (1 + \beta_g) a_{2,i-1} \quad (3.7.57)$$

De effecten van de geulen komen tot uitdrukking in het opleggen van de autonome langstransporten in laag 1 en laag 2. Voor laag 1 is deze gerelateerd aan het transport in de landwaartse vloedgeul:

$$S_{1,i-1}^o = -S_{vr1,g} \quad (3.7.58)$$

Voor laag 2 geldt:

$$S_{2,i-1}^o = -S_{vr2,g} \quad (3.7.59)$$

Verder moet het dwarstransport tussen de beide lagen nog worden aangepast conform:

$$q_{2,i}^o = q_{2,i}^o - S_{dr,g} \quad (3.7.60)$$

3.7.16 Detailuitwerking randvoorwaarden (cel $i=1$ en $i=n$)

De sturing van het transport over de linker- en rechter modelrand is geregeld door het 'hard opleggen' van tijdsfuncties voor het in- en uitgaande transport.

Hiertoe zijn de relevante langstransportconstanten op de modelranden, respectievelijk $a_{j,0}$ en $a_{j,n}$ voor $j=1, \dots, 4$ gemodificeerd en de autonome (rand)transporten $S_{j,0}^o$ en $S_{j,n}^o$ voor $j=0, \dots, 4$ aangepast aan de opgelegde randvoorwaarden.

3.7.17 Grootschalige balans

De toe- en afvoer van materiaal vindt plaats door de beide zijranden van het model voor $x=x_0$ en $x=x_n$, door de (gehele) zeewaartse rand via op te geven q_5 -relaties, door de landwaartse rand (voor zover er sprake is van een strandlijn) via op te geven q_0 -relaties en door de zeegaten (S_g).

Zijranden

De totale invoer door de linker modelrand volgt uit:

$$\Sigma S_0(t + \Delta t) = \Sigma S_0(t) + [(1 - \theta)(S_{1,0} + S_{2,0})^t + \theta(S_{1,0} + S_{2,0})^{t+\Delta t}] \Delta t \quad (3.7.61)$$

terwijl het verlies door de rechterrاند gelijk is aan:

$$\Sigma S_n(t + \Delta t) = \Sigma S_n(t) + [(1 - \theta)(S_{1,n} + S_{2,n})^t + \theta(S_{1,n} + S_{2,n})^{t+\Delta t}] \Delta t \quad (3.7.62)$$

Zeerland

Het totale (opgelegde) verlies door de zeerand is gelijk aan:

$$\Sigma Q_5(t + \Delta t) = \Sigma Q_5(t) + \sum_{i=1}^n Q_{5,i}^t \Delta t \quad (3.7.63)$$

Landrand(en)

Voor de totale (externe) toevoer aan de strandlijn geldt:

$$\Sigma Q_0(t + \Delta t) = \Sigma Q_0(t) + \sum_{i=1}^n Q_{0,i}^t \Delta t \quad (3.7.64)$$

waarbij alleen de cellen meetellen waarvoor de strandlijn is gedefinieerd.

Zeegat(en)

Voor de toevoer van materiaal vanuit een enkele vloedkom (met index g) geldt:

$$\Sigma S_g(t + \Delta t) = \Sigma S_g(t) + (S_g(t) + (1 - \gamma_g) S_{v,g}^t) \Delta t \quad (3.7.65)$$

waarin S_g het extern opgelegde transport en $(1 - \gamma_g) S_{v,g}$ een fractie van het berekende totaaltransport door de vloedgeulen.

Als totaal transport voor m zeegaten geldt:

$$\Sigma S_G(t + \Delta t) = \sum_{g=1}^m (\Sigma S_g(t + \Delta t)) \quad (3.7.66)$$

$$= \Sigma S_G(t) + \sum_{g=1}^m (S_g + (1 - \gamma_g) S_{v,g}) \Delta t \quad (3.7.67)$$

Totaalbalans

De totaalbalans na $t - t_o$ jaar volgt uit:

$$(\Sigma S_0 + \Sigma Q_0 + \Sigma S_G) - (\Sigma S_n + \Sigma Q_5) = \Delta V_S(t - t_o)$$

waarin ΔV_S de uit de randtransporten afgeleide toename van het volume in het rekengebied is.

Als een en ander sluitend is zal deze volumetoename ook tot uitdrukking moeten komen in een (lokale) verschuiving van de y_j -lijnen. Deze volgt uit:

$$\Delta V_y(t - t_o) = \sum_{j=0}^4 \sum_{i=1}^n (y_{j,i}^t - y_{j,i}^{t_o}) d_{j,i} \quad (3.7.68)$$

Als het goed is moet (afgezien van afrondfouten) altijd gelden:

$$\Delta V_y(t - t_o) = \Delta V_S(t - t_o) \quad (3.7.69)$$

De getalswaarden aangaande deze balansdata vormen een belangrijke controle op de consistentie van het rekenmodel.

3.8 Beschrijving PC-model

3.8.1 Algemeen

Het rekenmodel is operationeel in de vorm van een onderzoeksversie van een (engelstalig) menu-gestuurd PC-model (in FORTRAN-code).

Het programma zelf is modulair opgebouwd, zodat nieuwe inzichten en formuleringen op een eenvoudige wijze kunnen worden geïmplementeerd.

Bij de opzet en ontwikkeling van dit programma is gebruik gemaakt van de ervaring welke is opgedaan bij de ontwikkeling van het tijdsafhankelijke duinafslagprogramma DUROSTA [Steetzel, 1991, 1993] en het nog in ontwikkeling zijnde tijdsafhankelijke bresgroeiprogramma BREACH [Steetzel, 1993, 1994] en kustbeheersmodel SCOPE [Steetzel, 1995].

In het volgende is de structuur van het rekenmodel nader toegelicht. Voor meer informatie kan worden verwezen naar het helpmenu van het rekenprogramma.

3.8.2 Modelstructuur

Het PC-programma (met de naam MOBIC.EXE, engelstalig acroniem voor 'MORphological Behaviour of Interrupted Coasts') bestaat feitelijk uit drie verschillende hoofdonderdelen, te weten:

- een invoerprogramma (pre-processor);
- een eigenlijke rekenprogramma (processor);
- een nabewerkingsprogramma (post-processor).

De structuur van het rekenprogramma is gegeven in Figuur 3.8.1.

Met het *invoerprogramma* kunnen een of meerdere datafiles (naam.DAT) worden gegenereerd waarin de voor het rekenprogramma benodigde invoergegevens zijn samengebracht.

Het *rekenprogramma* berekent, op basis van de in elk van de datafiles opgenomen gegevens, de tijdsontwikkeling van de kustlijnen de daarmee gepaard gaande volumeveranderingen. De resultaten van een berekening worden, mede volgens de in de datafile gegeven specificaties, weggeschreven in de bijbehorende ASCII-resultatenfile (naam.MAT).

Het *nabewerkingsprogramma* biedt de mogelijkheid om de inhoud van deze ASCII-resultatenfile nader te inspecteren en te presenteren.

Een nadere uitwerking van elk van deze programma-modulen is gegeven in de volgende secties.

3.8.3 Benodigde invoer

De benodigde invoer voor het rekenprogramma is (per rekengeval) samengebracht in een datafile (naam.DAT). Deze file bevat een groot aantal zogenaamde basis-array's met plaats- of tijdsinformatie. Een (gedateerd) overzicht van de basis-array's in de datafile en de bijbehorende array-code is gegeven in Tabel 3.8.1.

Elk van de array's bestaat uit respectievelijk:

- een toelichtende tekst voorafgegaan door een *-teken (optioneel);
- een vaste array-code (zie tabel; maximaal 4 karakters);
- het aantal elementen van de array (n groter of gelijk aan 0);
- de array zelf (n (X)- of n (X-Y)-combinaties).

karakter	array-code	omschrijving inhoud array
Algemeen	CMT	Commentaarregels ter identificatie van de datafile
Geometrie	XID	Positie overgangspunten land/zeegat(delta) en zeegat(delta)/land
	Z _j X	Bovenbegrenzing van laag j (j=0,...,4); Z5X heeft betrekking op de onderbegrenzing van laag 4
	Y _j X	Initiële positie van laag j (j=0,...,4)
	STRC	Positie eventuele constructies (nog niet geïmplementeerd)
Langtransport	A _j X	Hydraulische langtransportconstante voor laag j (j=1,...,4)
	P _j X	Hydraulische nultransporthoek voor laag j (j=1,...,4)
	c _j X	Krommingsmaat transportkromme voor laag j (j=1,...,4) (nog niet geïmplementeerd)
	S _j X	Autonoom langtransport voor laag j (j=0,...,4); A.g.v. getij en/of windwerking
Dwarstransport	B _j X	Dwarstransportconstante voor het (dwarstransport van laag j-1 naar laag j (j=1,...,4)
	W _j X	Evenwichtsafstand tussen laag j-1 en laag j (j=1,...,4)
	q _j X	Autonoom dwarstransport van laag j-1 naar laag j (j=0,...,5); q0X heeft betrekking op netto transport richting duin, q5X op netto zeewaarts verlies
Transport in zeegat	ZGP	Diverse ZeeGatParameters
	S _g T	Tijdsfunctie netto transport voor zeegat met volgnummer g
Bronnen en putten	SXZT	Bronfuncties (S) in termen van volumina per plaatsvak (X), verticale zone (Z) en tijdsinterval (T), t.b.v. suppletie-scenario's
Rekenparameters	XX	Rekenrooster
	S _{ii} T	Tijdsfunctie voor het langtransport door modelrand voor de linker (i=0) en de rechterrand (i=n), voor respectievelijk de boven (l=u) en de onderlaag (l=l)
	TC	Rekentijdarray met o.a. begin- en eindtijd
	CST	Constanten aangaande tijdstapsturing
	SOD	Specifieke uitvoerdata (lokatie, kustvak)

Tabel 3.8.1 *Overzicht basis- en constanten-array's in datafile (MOBIC-0.60).*

De laatstgenoemde basis-array CST bevat een blok met verschillende rekenconstanten, die o.a. betrekking hebben op de grootte van de rekestijdstap (maximale rekestijdstap en maximale lijnverplaatsing per tijdstap).

Voor manipulatie van de basis-array's binnen een datafile (bekijken, wijzigen, invoeren, uitvoeren), kan worden gebruik gemaakt van de menu-gestuurde pre-processor.

Voor het lezen en wegschrijven van de inhoud van een datafile is een tweetal universele subroutines in gebruik, te weten READDATA en SAVEDATA. Eerstgenoemde wordt ook gebruikt om de gegevens voor het rekenprogramma te laden. De onderlinge volgorde van de array's in de datafile is niet van belang.

Bewerking van een ASCII-datafile is echter ook buiten het programma om mogelijk, door met een willekeurige 'editor' wijzigingen in de basis-array's aan te brengen.

3.8.4 Uitvoering berekeningen

Het rekenprogramma is in principe eenvoudig van opzet. Voor de theoretische formuleringen en mathematische vertaling kan worden verwezen naar Sectie 3.7.

Bij het berekenen van de tijdsafhankelijke ontwikkeling van de kustlijnen wordt een vaste set van rekenonderdelen meerdere keren (aantal afhankelijk van de totale berekeningsduur $t_n - t_0$ en tijdstapsturing) doorlopen. Deze berekening wordt uitgevoerd voor elke datafile op de directory waarvoor (nog) geen resultatenfile aanwezig is.

3.8.5 Gegeneerde uitvoer

De uitvoer van het rekenprogramma bestaat een ASCII-file naam.MAT, met een aantal array's, te weten:

- een of meer plaatsarray's $\mathbb{F}(x|t)$;
- een tijdsarray $\mathbb{F}(t)$;
- een overzicht van globale volumebalans.

Een *plaatsarray* wordt aangemaakt voor de initiële kustlijnligging, de eindsituatie en elke gewenste tussensituatie. Elke plaatsarray $\mathbb{F}(x|t)$ geeft, voor een gegeven tijdstip t , de waarde van een aantal parameters als functie van de positie.

De array wordt voorafgegaan door een blokcode (met per tijdsblok een oplopend volgnummer conform #X01, #X02, #X03, enz.) gevolgd door het aantal array-elementen: aantal rijen (= aantal rekenposities) en aantal kolommen (= aantal parameters).

Blok #A01 e.v. hebben betrekking op celdata (midden van elke rekencel) en bevat dus telkens n punten (van $i=1$ tot $i=n$), zoals o.a. de lijnposities $y_j(x)$ (voor $j=0, \dots, 4$) en de grootte van het dwarstransport $q_j(x)$ (voor $j=0, \dots, 5$).

Blok #B01 e.v. hebben betrekking op data op het x -grid (randen van rekencel) en bevat dus telkens $n+1$ punten (van $i=0$ tot $i=n$), zoals bijv. de grootte van het langstransport $S_j(x)$.

Blokken #C01/#D01 e.v. bevatten de resultaten aangaande de zandbalans per rekencel, terwijl blokken #E01 e.v. de geïntegreerde zandbalansresultaten meerder rekencellen bevatten.

De informatie in de blokken #F01 e.v. heeft betrekking op de momentane verplaatsingssnelheid van de verschillende lijnen/lagen.

Opgemerkt kan nog worden dat bij de plaatsfuncties onderscheid is gemaakt tussen momentane waarden en tijdsgemiddelde waarden. De tijdsgemiddelde waarden hebben betrekking op de gemiddelde ontwikkeling (trend) van bijvoorbeeld de karakteristieke positie van de strandlijn $y_1(t)$ in een zekere positie welke op $t = t_1$ gelijk is aan $\Delta y_1 / (t_1 - t_0)$ met $\Delta y_1 = y_1(t_1) - y_1(t_0)$.

De momentane waarde $\delta y_1(t) / \delta t$ is daarbij op elk tijdstip beschikbaar en gelijk aan $[y_1(t + \delta t) - y_1(t)] / \delta t$, waarbij voor de tijdstap in de gediscretiseerde vorm $\delta t = 0,05$ jaar is aangehouden.

Op deze wijze kan bij dergelijke plaatsfuncties onderscheid gemaakt worden tussen het initiële (op $t = t_0$), het uiteindelijke (op $t = t_n$) momentane verloop en het tijdsgemiddelde verloop.

De *tijdsarray* $F(t)$ geeft de momentane waarde van een aantal parameters als functie van de tijd. Ook deze array wordt voorafgegaan door een (in dit geval vaste) code #000, gevolgd door het aantal array-elementen: aantal rijen (= aantal rekentijdstippen) en aantal kolommen (= aantal parameters). Deze array bevat onder andere de ontwikkeling van de positie van de kustlijnen in een specifieke cel en de volumina binnen een specifiek balansgebied.

De globale *volumebalans* geeft een overzicht van de toe- en afvoer van materiaal en de wijziging van het volume in het rekengebied (zie Sectie 3.7.17).

De invulling van de bewerkingsopties van de resultaten-file is in dit stadium van de programma-ontwikkeling (versie 0.60) slechts beperkt gespecificeerd. De uitvoerblokken in deze ASCII-files kunnen overigens direct worden gebruikt door TEKAL/TEKUNI-routines voor het nader presenteren van deze data in de vorm van gewenste plotjes.

3.8.6 Overzicht files

Een overzicht van de programma-files is gegeven in Tabel 3.8.2.

filenaam	omschrijving programmadeel
T.b.v. de programma-directory:	
MOBIC.EXE	(Hoofd-)programma
MOBIC.CFG	Configuratie-file
MOBIC.MTR	File met menu's en (fout-)meldingen
MOBIC.HLP	File met help-info per keuzemenu
T.b.v. een willekeurige data-directory:	
NAAM.DAT *)	Invoer-file
NAAM.MAT *)	Resultaten-file

*) unieke naam met vaste extensie voor een specifieke berekening in een aparte directory.

Tabel 3.8.2 *Overzicht van de meest relevante files.*

Het hoofdprogramma van de huidige versie, omvat zowel de pre-processor, de processor als de post-processor. De configuratiefile bevat informatie over o.a. het beeldscherm (bijv. EGA) en de aangesloten printer (bijv. LPT1).

Naast genoemde files zijn nog een aantal files met een tijdelijk karakter aanwezig, zoals MOBIC.ERR (t.b.v. wegschrijven van foutmeldingen) en MOBIC.TMP (t.b.v. de tijdelijke opslag van diverse, o.a. tijdsafhankelijke, parameters) en een meer permanent karakter, met name MOBIC.LOG (wegschrijven algemene informatie/foutmeldingen per som; soort logboek). Deze laatste file moet af en toe worden verwijderd, daar hieraan na elke som/sessie informatie aan wordt toegevoegd.

4 TEST- EN VALIDATIE-BEREKENINGEN

4.1 Inleiding

4.1.1 Algemeen

In dit hoofdstuk is een kort overzicht gegeven van een deel van de berekeningen die zijn uitgevoerd om de werking van het MOBIC-rekenmodel te testen, dit laatste in de ruimste zin van het woord. Deze berekeningen hebben in principe nog niets te maken met de in het kader van dit project nagestreefde toepassing. Dat het bij de ontwikkeling en het gebruik van een nieuw rekenmodel doorlopen van een systematisch testprogramma noodzakelijk is, mag overigens duidelijk zijn.

4.1.2 Doelstelling testberekeningen

Het doel van de in dit hoofdstuk beschreven exercitie is tenminste tweeledig, te weten het controleren van de werking van het rekenprogramma, alsmede het onderzoeken van de uitwerking van de geïmplementeerde vergelijkingen op het gemodelleerde kustgedrag. Met het oog op deze laatste doelstelling is aan de hand van systematische gevoeligheidsberekeningen de invloed van diverse modelparameters onderzocht. Bij het testen van het rekenprogramma op correctheid van de geïmplementeerde vergelijkingen (programma-code) gaat de aandacht zowel uit naar de volumebalans als naar de ligging van de kust in een stabiele eindsituatie.

4.1.3 Aanpak

Bij de definitie van de testberekeningen is een indeling gemaakt op basis van de gemodelleerde processen. Een overzicht van de op deze wijze verkregen testgevallen is gegeven in Tabel 4.1.1.

Code	Aandachtspunt
T1**	Stabiele basisgevallen (geometrie)
T2**	Onderzoek effecten langstransport
T3**	Onderzoek effecten dwarstransport
T4**	Onderzoek effecten gecombineerd langs- en dwarstransport
T5**	Gedrag buitendelta (lokaal onderbroken kust)
T6**	Onderzoek effecten bronnen en putten
T7**	Onderzoek effecten constructies
T8**	Onderzoek effect instelling rekenparameters

Tabel 4.1.1 Hoofdingeling beschouwde testgevallen.

Hierin is elk testgeval voorzien van een vier-cijferige code, waarbij code bijvoorbeeld 'T3**' in principe duidt op de testgevallen T300 t/m T399, daarmee verwijzend naar bijbehorende invoerfiles voor het rekenprogramma (file T3**.dat).

In de drie eerstvolgende secties (Sectie 4.2 t/m 4.4) zijn eerst enkele resultaten beschreven aangaande de conceptuele validatie ten aanzien van respectievelijk het langstransport, het dwarstransport en de combinatie van langs- en dwarstransport.

Vervolgens is in Sectie 4.5 het gedrag van een enkel zeegat nader uitgewerkt. In Sectie 4.6 komen de effecten van geforceerde bronnen en putten aan de orde.

Tenslotte zijn in Sectie 4.7 de effecten van harde constructies besproken, waarna in Sectie 4.8 zal worden ingegaan op de gevoeligheid voor een aantal numerieke rekengrootheden.

In Sectie 4.9 zijn de voornaamste uitkomsten nog eens bijeengebracht en zijn enkele aanbevelingen voor modelverbetering gegeven.

In Appendix B is een selectie van grote hoeveelheid beschikbare figuren samengebracht. Het betreft hier slechts enkele van de meest relevante figuren.

4.1.4 Specificatie basisgeval

De testberekeningen zijn alle gebaseerd op een zogenaamde basisgeval bestaande uit een 10 km lange kustsectie met vijf evenwijdige (diepte)lijnen, gelegen op respectievelijk 100, 150, 250, 450 en 900 m uit de referentielijn: $Y_0(x)$ t/m $Y_4(x)$. De onderlinge (evenwichts)afstand tussen deze lijnen $W_1(x)$ t/m $W_4(x)$, bedraagt respectievelijk 50, 100, 200 en 400 m. Bij een duintopniveau $Z_0(x)$ van +10m en een ondergrens $Z_5(x)$ op -20m en overgangsniveaus op +3, -2, -7 en -13 m, respectievelijk $Z_1(x)$ t/m $Z_4(x)$, ligt de geometrie vast. In Tabel 4.1.2 is dit basisgeval aangegeven met code T110 (verwijzend naar invoerfile T110.dat). In dit geval is nog geen transport gedefinieerd en zijn de langs- en dwarstransportconstanten dus gelijk aan nul.

Code	Omschrijving/doel
T110	Geen transport
T120	Alleen langstransport; uitgangspunt T200-serie
T130	Alleen dwarstransport; uitgangspunt T300-serie
T140	Zowel dwars- als langstransport
....	

Tabel 4.1.2 Overzicht testgevallen T100-serie.

Voor test T120 zijn de langstransportconstanten a_j voor de (diepte)lijnen 1 t/m 4 respectievelijk gelijk aan 1.000, 5.000, 3.000 en 1.000 m³/°/jaar, dit nog met loodrecht inkomende golfaanval (evenwichtshoek per laag ϕ_j gelijk aan 0°).

Bij test T130 is alleen het dwarstransport aangezet, waarbij voor de respectievelijke dwarstransportconstanten b_j respectievelijk 10, 2, 1 en 0,1 m/jaar is aangenomen.

In het laatste geval (test T140) is zowel sprake van potentieel langs- en dwarstransport. Deze situatie zal dienen als uitgangspunt voor de overige testseries (T400- t/m T800-serie).

Uitvoeren van lange-termijn-berekeningen voor deze vier basisgevallen laat zien dat in alle gevallen sprake is van een stabiele ligging van de kust, dit natuurlijk geheel volgens de verwachting.

4.2 Langstransport

4.2.1 Algemeen

In de T200-serie is het effect van het langstransport op de kustontwikkeling onderzocht. Omdat er geen dwarstransport plaatsvindt betreft het hier in feite een standaard kustlijnmodel, vergelijkbaar met UNIBEST-CL.

4.2.2 Overzicht testserie

Een overzicht van enkele van de beschouwde testgevallen is gegeven in Tabel 4.2.1.

Code	Omschrijving/doel
T200	Basisgeval (= test T120); stabiele kustligging
T21*	Onderzoek effect scheve golfval (5°) en effect grootte langtransportconstante; Ontwikkeling tot stabiele kustligging voor verschillende constanten
T22*	Onderzoek effect langsvariatie hoek van golfval (voor lineair verlopende invalshoek); Ontwikkeling gekromde kust in evenwicht (tot cirkelsegment)
T23*	Toevoeging in-/uitgaand transport over de beide modelranden; Stabiele kustligging als bij test T200
T24*	Effect blokkade uitgaand transport bij voortgezet ingaand transport; Ontwikkeling dynamisch-stabiele situatie met uniforme verplaatsing dieptelijnen
T2..	

Tabel 4.2.1 Overzicht testgevallen T200-serie.

Het doel van de berekeningen is eveneens in de tabel aangegeven. Hierbij moet worden opgemerkt dat in de gevallen waarbij sprake is van verplaatsende kustlijnen de grootte van de langtransportconstanten tijdelijk moest worden aangepast. Gebruik van de in Sectie 4.1.4 gegeven basis-waarden maakt dat de verplaatsing van de kustlijnen met onderling verschillende snelheden gebeurt, resulterend in elkaar passerende dieptelijnen, iets wat fysisch onwaarschijnlijk lijkt. Opgemerkt moet worden dit bij aanwezigheid van dwarstransport niet zo snel het geval zal zijn; mogelijke overhangende lagen worden dan immers voorkomen door dwarsuitwisseling van materiaal. In het onderhavige geval is uitgegaan van $a_2 = 5.000 \text{ m}^3/\text{jaar}$ in laag 2, zijnde $1.000 \text{ m}^3/\text{jaar/m}$ laagdikte, dus $30.000 \text{ m}^3/\text{jaar}$ voor het totale 30 m hoge profiel.

4.2.3 Resultaten

Voor een situatie met scheve golfaanval vindt bij afwezigheid van transport over de modelranden een kustverdraaiing plaats tot een situatie is bereikt waarbij sprake is van loodrecht invallende golven (test T211). De hiervoor benodigde tijd is recht evenredig met de grootte van de grootte van de kustconstanten als mag blijken uit de tijdsontwikkeling van de volumetoename in de rechterhelft van het beschouwde kustsegment (tests T211/T213).

Ook in het geval van een langsvariatie van de langtransportconstanten gaat het goed. Voor het opgelegde lineaire verloop (van $+5^\circ$ aan de linkerrand tot -5° aan de rechterrاند) ontstaan keurige cirkelvormige dieptelijnen (test T221).

Toevoeging van transport door de linker- en rechterrاند (randvoorwaardesturing; $150.000 \text{ m}^3/\text{jaar}$) maakt dat de initiële situatie stabiel is (test T231). Voor het geval dat alleen sprake is van inkomend transport vindt aanzanding plaats tegen de rechter modelbegrenzing, waarbij een dynamisch-stabiele situatie ontstaat, dit bij een uniforme zeewaartse verplaatsing van alle dieptelijnen met $0,5 \text{ m/jaar}$ (test T241; $150.000 \text{ m}^3/\text{jaar}$ per 10.000 m kust met 30 m laagdikte).

4.2.4 Conclusies

De resultaten van de testberekeningen geven aan dat het rekenmodel voor wat betreft de modellering van langtransport en opgelegde randvoorwaarden voldoet.

Ten aanzien van de situatie met getijgedreven transport moeten de formuleringen nog verder worden aangepast, teneinde de effecten van profielversteiling en daarmee versmalling van een zekere laag te verrekenen. Ook de effecten van de niet-lineariteit van de $S(\phi)$ -kromme moeten nog worden geïmplementeerd.

4.3 Dwarstransport

4.3.1 Algemeen

In de T300-serie is het effect van het dwarstransport op de ontwikkeling van het dwarsprofiel onderzocht. Door slechts een kustvak met een lengte van 1 m te beschouwen (een enkele cel)

betreft het hier in feite een dynamisch dwarstransportmodel.

4.3.2 Overzicht testserie

Een overzicht van enkele van de beschouwde gevallen is gegeven in Tabel 4.3.1.

Code	Omschrijving/doel
T300	Basisgeval (= test T130); stabiele ligging dwarsprofiel
T31*	Onderzoek effect initiële afwijking van de evenwichtsligging; Ontwikkeling tot stabiele ligging conform evenwichtsafstanden
T32*	Onderzoek effect grootte dwarstransportconstante op ontwikkeling naar evenwicht; Ontwikkeling dieptelijnen en volumina voor verschillende dwarstransportconstanten
T33*	Onderzoek effect netto dwarstransport
T3..	

Tabel 4.3.1 Overzicht testgevallen T300-serie.

Uitgaande van een evenwichtssituatie (test T300) zal bij een afwijking van dit evenwicht door intern dwarstransport een uiteindelijk herstel van het evenwichtsprofiel optreden. Of dit gebeurt en zoja of hoe snel, is nader onderzocht.

4.3.3 Resultaten

In het geval van een afwijking van het evenwichtsdwarsprofiel, waarbij ter plaatse van de overgang tussen de verschillende lagen geldt $y_j - y_{j-1} \neq W_j$, zal op den duur een situatie ontstaan waarbij het dwarstransport tussen de verschillende lagen q_j weer gelijk aan nul is en de onderlinge afstand gelijk aan de evenwichtswaarde conform $\Delta y_j = y_j - y_{j-1} = W_j$. De resultaten van test T311 laten zien dat dit inderdaad het geval is.

De snelheid waarmee deze aanpassing zich voltrekt is afhankelijk van de grootte van de dwarstransportconstante b_j . In tests T321/T325 is het effect van deze parameter nader onderzocht.

Hiervoor is de onderlinge uitwisseling tussen laag 2 en 3 berekend voor verschillende waarden van de relevante dwarstransportconstante b_3 . De overige dwarstransportconstanten zijn gelijk aan nul gesteld en omwille van de uitwerking is de ondergrens van laag 3 met 1 m opgetrokken, zodat de beide lagen een gelijke dikte hadden.

Door nu initieel het dwarsprofiel te verstoren (laag 2 100 m zeewaarts en laag 3 100 m landwaarts) zal dwarstransport optreden, conform:

$$q_j = b_j (W_j - (y_j - y_{j-1})) \quad (4.3.1)$$

Als beschreven in Sectie 3.5 valt af te leiden dat de hier beschouwde dwarstransportconstante b_3 omgekeerd evenredig is met de karakteristieke aanpassingstijd T_3^* ; een lagere b_3 -waarde impliceert een grotere tijdschaal.

De algemene formulering voor deze relatie luidt:

$$b_j = \frac{d_{j-1} d_j}{(d_{j-1} + d_j) T_j^*} \quad (4.3.2)$$

Met betrekking tot de ontwikkeling van bijvoorbeeld het volume $\Delta V(t)$ is de T_j^* -waarde gelijk aan de tijd $t^* - t_0$ waarop het oorspronkelijk aanwezige verschilvolume met een factor $1/e$ is afgenomen, ofwel:

$$\Delta V(t^* - t_0) = \frac{\Delta V(t_0)}{e} \quad (4.3.3)$$

Het beschouwde geval met $d_2 = d_3 = 5$ m levert de in Tabel 4.3.2 gegeven resultaten.

Code	Dwarstransportconstante [m/jaar]	Tijdschaal [jaar]	Opmerkingen
T321	1,0	2,5	Basisgeval
T322	2,0	1,25	Kleinere tijdschalen
T323	10,0	0,25	
T324	0,5	5	Grotere tijdschalen
T325	0,1	25	

Tabel 4.3.2 *Overzicht resultaten tijdschaal dwarstransport.*

Deze waarden volgen zowel direct uit Vgl.(4.3.2), als uit de interpretatie van de berekeningsresultaten via Vgl.(4.3.3).

In test T331 is het effect van een netto transport in dwarsrichting onderzocht, door op de modelranden een netto transport op te leggen. In dit specifieke geval is aangenomen $\hat{q} = q_0 = q_5 = -10 \text{ m}^3/\text{m}^1/\text{jaar}$, waarbij de aanreiking vanaf dieper water gelijk is aan het overstuivingsverlies over de duintop. De resultaten geven aan dat er een verflauwing van het dwarsprofiel op gaat treden, waarbij de onderlinge afstand tussen de laag $j-1$ en laag j met een afstand Δw_j toeneemt, waarbij:

$$\Delta w_j = W_j - (y_j - y_{j-1}) \quad (4.3.4)$$

zodat geldt:

$$q_j = b_j(-\Delta w_j) \quad (4.3.5)$$

en dus:

$$\Delta w_j = -\frac{\hat{q}}{b_j} \quad (4.3.6)$$

De toename in de onderlinge afstand is dus recht evenredig is met het geforceerde dwarstransport en omgekeerd evenredig met de van toepassing zijnde dwarstransportconstante. Voor het dwarstransport door het Z_1 -niveau (tussen de duinlaag en de strandlaag) levert dit dus een toename in de onderlinge laagafstand van 1 m terwijl 100 m verflauwing wordt gevonden voor de lagen ter plaatse van het Z_4 -niveau. De onderlinge afstand tussen de y_4 - en y_0 -lijn neemt conform de berekeningsresultaten met 116 m toe.

4.3.4 Conclusies

Op grond van de gegeneerde resultaten blijkt dat ook de dwarstransportcomponent in het rekenmodel correct werkt. De relatie tussen de rekentechnische dwarstransportconstante b_j en de meer inzichtelijke karakteristieke tijdschaal T_j^* lijkt de aangewezen weg om tot een weloverwogen keuze van de benodigde b_j -waarden te komen. Nader onderzoek lijkt echter aan te bevelen. Hierbij lijkt een relatie met onder andere de relatieve golfhoogte als maat voor de intensiteit van het dwarstransport conform:

$$b(z) = F\left\{\frac{H_{rms}}{d(z)}, \dots\right\} \quad (4.3.7)$$

nadere aandacht waard.

4.4 Combinatie langs- en dwarstransport

4.4.1 Algemeen

In de T400-serie is het gecombineerde effect van langs- en dwarstransport op de kustontwikkeling onderzocht.

4.4.2 Overzicht testserie

Een overzicht van enkele van de beschouwde gevallen is gegeven in Tabel 4.4.1.

Code	Omschrijving/doel
T400	Basisgeval (= test T130); stabiele ligging dwarsprofiel
T41*	Onderzoek effect langsvariatie in profielsteilheid; Ontwikkeling tot stabiele ligging.
T42*	Onderzoek eroderende kust; Ontwikkeling tot dynamisch-stabiele situatie bij verschillende oorzaken.
T4..	

Tabel 4.4.1 Overzicht testgevallen T400-serie.

Het eerste geval betreft de ontwikkeling tot een stabiele kustvorm waarbij langs de kust sprake is van een lineair afnemende profielsteilheid. Hiervoor is de evenwichtsafstand ter plaatse van de rechterrاند met 50% vergroot.

In het tweede geval is gekeken naar verschillende vormen van kusterosie, te weten oorzakelijke erosie van de vooroever als gevolg van gradiënten in bijvoorbeeld de getijstroom en oorzakelijke erosie in de bovenlaag als gevolg van bijvoorbeeld een gradiënt in het golfgedreven transport.

4.4.3 Resultaten

De uitgevoerde berekening van test T411 laat een ontwikkeling van de kust zien waarbij de positie van de kustlijnen ter plaatse van de rechterbegrenzing zich reeds spoedig instelt. In de stabiele eindsituatie is in de boven- en onderlaag sprake van tegengesteld langstransport; in de bovenlaag naar links en in de onderlaag naar rechts. De uitwisseling tussen boven- en onderlaag is geconcentreerd aan de randen; aan linkerkant landwaarts gericht en aan de rechterkant naar buiten. Op deze wijze is sprake van een intern transportpatroon in de vorm van een gesloten cel.

Vergelijking van de resultaten van test T422 en T423 laat zien dat er bij eenzelfde netto verlies van $30.000 \text{ m}^3/\text{jaar}$ in beide gevallen sprake is van een globale kusterosie van $r = 0,1 \text{ m/jaar}$. In het geval van een oorzakelijk eroderende bovenlaag (T422) vindt de erosie van de onderlaag plaats door landwaarts gericht dwarstransport. Hiertoe is een relatief minder steile vooroever nodig teneinde dit transport te kunnen genereren. Het transport door het Z_3 -niveau moet uitgaande van $q_5 = 0 \text{ m}^3/\text{m}^1/\text{jaar}$ immers gelijk worden aan:

$$q_3 = r(Z_3 - Z_5) \quad (4.4.1)$$

waarbij:

$$q_3 = b_3(-\Delta w_3) \quad (4.4.2)$$

zodat voor de noodzakelijke verflauwing geldt:

$$\Delta w_3 = \frac{-r(Z_3 - Z_5)}{b_3} \quad (4.4.3)$$

en evenzo:

$$\Delta w_4 = \frac{-r(Z_4 - Z_5)}{b_4} \quad (4.4.4)$$

In het geval van een oorzakelijke erosie van de vooroever erodeert de bovenlaag door zeewaarts gericht dwarstransport, dit vanwege een relatief te steil dwarsprofiel in deze laag.

4.4.4 Conclusies

Het toevoegen van een dwarstransportcomponent in een kustlijnmodel maakt dat onder evenwichtsomstandigheden, zelfs bij loodrechte golfval toch sprake kan zijn van niet-parallelle dieptelijnen. Deze worden in stand gehouden door aanwezigheid van interne circulatiepatronen.

4.5 Gedrag zeegat

4.5.1 Algemeen

In de T500-serie is het gedrag van een buitendelta in een lokaal onderbroken kustsectie nader uitgewerkt. Omdat het hierbij gaat om nieuwe vergelijkingen is de gepresenteerde testserie uitgebreider.

4.5.2 Overzicht testserie

Uitgangspunt voor de testserie is de stabiele kustligging met loodrechte golfval conform test T400, waarbij zich ter plaatse van het interval $4 \leq x \leq 6$ km een 2 km breed zeegat bevindt. Een overzicht van de beschouwde gevallen is gegeven in Tabel 4.5.1.

Code	Omschrijving/doel
T500	Basisgeval (= test T400); zonder zeegat
T51*	Ontwikkeling buitendelta (inactieve onderlaag); Ontwikkeling tot stabiele ligging
T52*	Ontwikkeling buitendelta (inactieve onderlaag); Geometriesturing: effect positie ebgeul (delta-waarde)
T53*	Idem: effect positie ebgeul (delta-waarde)
T54*	Idem: effect relatieve uitbouw (lambda-waarde)
T55*	Ontwikkeling buitendelta (inactieve onderlaag); Transportsturing: effect verdeelsleutel strandtransport (alfa-waarde)
T56*	Idem: effect vergrotingsfactor golfgedreven transport (beta-waarde)
T57*	Ontwikkeling buitendelta (inactieve onderlaag); Verschillende effecten t.g.v. evenwichtsverstoringen
T58*	Ontwikkeling buitendelta (actieve onderlaag); Relatief effect actieve onderlaag
T59*	Ontwikkeling buitendelta (actieve onderlaag); Verschillende effecten t.g.v. evenwichtsverstoringen
T5..	...

Tabel 4.5.1 Overzicht testgevallen T500-serie.

Omdat de in het rekenmodel geïmplementeerde vergelijkingen in principe zijn afgeleid voor een tweelijnen-model, dus zonder diepere lagen, is in tests T51*/T57* in eerste instantie de situatie met een in-actieve onderlaag bekeken. In dit geval is de uitwisseling door dwarstransport tussen laag 2 en 3 tijdelijk 'uitgezet' ($b_3 = 0$ m/jaar).

Daartoe komt eerst uitgaande van een situatie met kustparallele dieptelijnen de ontwikkeling van de buitendelta aan de orde (tests T51*), waarna vervolgens zal worden ingegaan op de parameters die deze ontwikkeling sturen. Hierbij is onderscheid gemaakt tussen de geometrie-gerelateerde parameters, zoals δ , λ_r en ϕ (tests T52*/T54*) en de transport-gerelateerde parameters α en β (tests T55*/T56*).

Vervolgens is in test T57* gekeken naar de effecten van onder andere het netto transport door het zeegat.

Het relatieve effect van de aanwezigheid van mogelijke uitwisseling met de onderlaag komt in test T58* aan de orde. In test T59* zijn tenslotte enkele van de T57*-gevallen herhaald voor een situatie met een wel actief reagerende onderlaag.

De nadere invulling en verkregen resultaten komen in de volgende secties aan de orde.

4.5.3 Ontwikkeling stabiel zeegatsysteem

Uitgaande van de een gegeven parameterinstelling zal zich na verloop van tijd een stabiele kustvorm ontwikkelen. Het voor de vorming van de buitendelta benodigde zand wordt daarbij onttrokken aan de naastgelegen kustvakken. De uiteindelijke evenwichtsvorm is afhankelijk van de instelling van de geometrie-gerelateerde parameters (zie volgende sectie). In dit geval is uitgegaan van een centrale ebgeul ($\delta = 0,50$), een niet-versprongen kust ($\phi = 0$) en een

relatieve uitbouw $\lambda_r = 0,10$, zodat sprake is van een uitbouw λ van laag 2 gelijk aan $\lambda_r B = 200$ m.

In test T512 is een soortgelijke berekening uitgevoerd, waarbij echter het voor de vorming van de buitendelta benodigde volume, zijnde $1,0 \text{ Mm}^3 (= \frac{1}{2} \lambda B d_2)$ aan de bovenlaag is toegevoegd. In dit geval blijft de uiteindelijke ligging van de lijnen aan weerszijden van het zeegat ongewijzigd en ligt de punt van de delta op een afstand van 450 m uit de referentielijn.

4.5.4 Effect geometrie-gerelateerde parameters

De evenwichtsvorm van de buitendelta hangt onder andere samen met de positie van de ebgeul. In het rekenprogramma moet de relatieve ligging van de ebgeul in het zeegat worden opgegeven. In het basisgeval (test T521) is hierbij uitgegaan van een centrale ligging, ofwel $\delta = 0,50$. Voor afwijkende δ -waarden wordt een asymmetrische buitendelta gevonden als mag blijken uit tests T522/T523 met respectievelijk $\delta = 0,25$ en $\delta = 0,75$.

De relatieve uitbouw van de buitendelta ligt vast door de λ_r -waarde. In tests T532/T533 is voor respectievelijk $\lambda_r = 0,05$ en $0,20$ de ontwikkeling tot een stabiele situatie berekend. Teneinde een vergelijkbare kustligging te krijgen is conform test T512 het benodigde volume toegevoegd.

Tot slot is in tests T541/T543 het effect van de ϕ -parameter onderzocht voor respectievelijk $\phi = 0,0$ (basisgeval test T541), $+0,05$ en $-0,05$. Omdat sprake is van een centrale ligging van het zeegat valt in alle gevallen de uiteindelijke positie van de punt van de buitendelta samen.

Samenvattend lijkt de uitwerking van de geometrie-gerelateerde parameters correct.

4.5.5 Effect transport-gerelateerde parameters

In de gebruikte formuleringen zijn een tweetal transport-gerelateerde parameters te onderkennen, te weten de α - en de β -waarde.

De α -waarde heeft betrekking op de wijze waarop het inkomende strandtransport zich verdeelt over de vloedgeul (recht door) en de diepere laag (buitenom). Ten opzichte van het basisgeval met $\alpha = 0,5$ (test T551) is in tests T552/T553 het effect van respectievelijk $\alpha = 0,0$ en $1,0$ onderzocht. Onderlinge vergelijking laat zien dat de stabiele eindsituatie natuurlijk volledig identiek is, maar dat bovendien geen waarneembaar verschil aanwezig is in de ontwikkeling van de kust. De resultaten zijn dus zeer ongevoelig voor de exacte grootte van deze verdelingsparameter, zodat kan worden aanbevolen om de standaardwaarde van $\alpha = 0,5$ aan te houden.

De andere parameter betreft een vergrotingsfactor β voor het golfgedreven langstransport in laag 2, waarbij voor een specifiek zeegat geldt:

$$a_2^*(x) = (1 + \beta) a_2(x) \quad (4.5.1)$$

Als blijkt uit onderlinge vergelijking tussen de resultaten voor het basisgeval met $\beta = 1,0$ (test T551) en tests T552/T554 met respectievelijk $\beta = 0, 2, 5$ en 10 heeft de β -waarde natuurlijk geen invloed op de uiteindelijke evenwichtsvorm.

Enig effect op de snelheid waarmee deze situatie wordt bereikt is echter wel aanwezig. Bij een kleinere waarde ($0 < \beta < 1$) verloopt een en ander minder snel, bij een grotere waarde ($\beta > 1$) juist sneller. Beschouwing van de ontwikkeling van het totale volume in de buitendelta laat echter zien dat deze afhankelijkheid kwantitatief slechts beperkt is. Voor $\beta = 0$ is sprake van een circa 30 % tragere uitbouw, terwijl voor extreem hoge waarde van $\beta = 10$ slechts sprake is van een 40 % sneller verlopende uitbouw. Samenvattend is voor $\beta = 1$ à 2 slechts een zeer beperkte invloed aanwezig, zodat vooralsnog kan worden uitgegaan van $\beta = 1$ als basiswaarde. Opgemerkt kan nog worden dat voor het theoretische geval van $\beta = -1$ de uitbouw van de buitendelta rechthoekig wordt.

4.5.6 Effect evenwichtsverstoringen bij inactieve onderlaag

In het volgende is uitgaande van de stabiele evenwichtssituatie conform test T512, het effect van verstoringen onderzocht. Een overzicht van de hiervoor beschouwde gevallen is gegeven in Tabel 4.5.2.

Code	Omschrijving/doel
T571	Stabiele evenwichtsligging (eindsituatie test T512)
T572	Effect verplaatsing (centrale) ebgeul
T573	Effect verplaatsing vloedgeulen
T574	...
T575	Effect netto transport door zeegat
T576	Effect fluctuerende zandvraag
T576	...

Tabel 4.5.2 Specificatie testgevallen T570-serie.

Uitgaande van de centrale ligging van de ebgeul is in test T572 gekeken naar het effect van een instantane verplaatsing van de positie van deze geul. Hiertoe werd de δ -waarde aangepast (0,75 in plaats van 0,50). De bereikte eindsituatie is conform het eindresultaat van test T523. Voor wat betreft de ontwikkeling is al spoedig sprake van een geprononceerde kustligging ter plaatse van de nieuwe positie van de ebgeul. Een deel van het hiervoor benodigde materiaal wordt tijdelijk onttrokken aan het naastgelegen kustvak.

In test T573 is de kustontwikkeling bij een instantane verdubbeling van de breedte van het zeegat (verplaatsing van de vloedgeulen) onderzocht, waarbij omwille van volumebehoud de relatieve uitbouw van de buitendelta is teruggebracht tot $\lambda_r = 0,025$.

In test T575 is gekeken naar het relatieve effect van een netto verlies door het zeegat. In dit geval verplaatst de buitendelta zich min of meer vormvast naar binnen en vindt erosie van naastgelegen kustvakken plaats. In de dynamisch-stabiele eindsituatie is sprake van een uniform eroderend kustvak. Dit gedrag is overeenkomstig de waargenomen ontwikkelingen bij de zeegaten in de Waddeneilanden.

Het effect van een fluctuerende zandvraag is in test T576 gesimuleerd. In dit geval is deze fluctuatie natuurlijk aanwezig in het volume van de buitendelta, maar ook als een soort van zandgolf in de naastgelegen kustvakken. De effecten ten aanzien van vakvolumina en de posities van de verschillende lijnen nemen daarbij af met toenemende afstand van het zeegat.

Samenvattend lijkt het rekenmodel het kustgedrag als gevolg van verstoringen kwalitatief goed te beschrijven. Met name het min of meer vormvast blijven van een eroderende buitendelta geeft vertrouwen.

4.5.7 Relatief effect actieve onderlaag

In de voorafgaande is de mogelijke uitwisseling van materiaal met de onderlaag nog niet meegenomen. Een overzicht van de beschouwde gevallen gericht op het relatieve effect van het mede-actief zijn van deze onderlaag is gegeven in Tabel 4.5.3.

Code	Omschrijving/doel
T581	Basisgeval (= test T511); zonder uitwisseling met onderlaag
T582	Ontwikkeling buitendelta bij actieve onderlaag; Basisgeval
T583	Ontwikkeling buitendelta actieve onderlaag; Relatief effect golfgedreven transport in onderlaag
T584	Idem; halvering golfgedreven transport
T585	Idem; verdubbeling golfgedreven transport
T586	Ontwikkeling buitendelta actieve onderlaag; Relatief effect halvering dwarstransportconstante
T587	Idem; verdubbeling dwarstransportconstante
T58.	...

Tabel 4.5.3 Specificatie testgevallen T580-serie.

Onderlinge vergelijking van de resultaten voor test T581 (zonder uitwisseling; $b_3 = 0$ m/jaar) en test T582 (met uitwisseling; $b_3 = 1$ m/jaar) laat zien dat voor $b_3 > 0$ m/jaar de uitbouw van de buitendelta zich ook voordoet in de diepere lagen, zij het minder geprononceerd.

Het hiervoor extra benodigde materiaal wordt onttrokken aan de bovenlaag.

Beschouwing van de stabiele eindsituatie laat zien dat zich een tweetal gesloten transportcellen vormen, waarbij ter plaatse van de centrale ebgeul zeewaarts gericht dwarstransport naar dieper water plaatsvindt (het dwarsprofiel is hier plaatselijk te steil). Dit transport wordt toegeleverd door extra langtransport langs de flanken van de buitendelta, waarvan de piek van de 'diepwaterbron' aanwezig is ter plaatse van de randen van de buitendelta (het dwarsprofiel is hier plaatselijk te flauw). De zijdelingse langtransporten in de diepere laag completeren het optredende circulatiepatroon.

Als gevolg van deze uitwisseling met dieper water is de vorm van de buitendelta iets minder geprononceerd; ter plaatse van de flanken is de kustligging iets verdraaid, zodat extra netto langtransport naar de punt van de buitendelta kan plaatsvinden.

Een voorwaarde voor het ontstaan van een dergelijke circulatiepatroon is de aanwezigheid van enig golfgedreven transport in de onderlaag. Bij afwezigheid ervan ($a_3 = 0$ m³/°/jaar) als in test T583 maakt dat de uitbouw voor de diepere lagen volledig gelijkvormig wordt, waarbij in de eindsituatie zowel het langs- als dwarstransport gelijk aan nul is, dit onafhankelijk van de dwarstransportconstanten. Deze situatie lijkt ongelooftwaardig.

Het relatieve effect van de grootte van het golfgedreven transport in de onderlaag is onderzocht in tests T584/T585. Bij toenemende a_3 -waarden en dus toenemende zijdelingse uitwisseling wordt de uitbouw van de buitendelta in met name de diepere lagen minder geprononceerd.

Vergelijking van het relatieve effect van de dwarstransportconstante voor een lagere waarde van $b_3 = 0,5$ m/jaar (test T586) en hogere waarde van 2,0 m/jaar (test T587) met die van de referentietest (test T582; 1,0 m/jaar) laat zien dat een relatief grotere dwarstransportconstante aanleiding geeft tot een iets meer geprononceerde uitbouw van de deltavorm in de onderlaag. Ten opzichte van de effecten van een wijziging in het golfgedreven transport zijn deze effecten echter gering te noemen.

4.5.8 Effect evenwichtsverstoringen bij actieve onderlaag

In het volgende is voor een situatie met een actieve onderlaag het effect van een aantal verstoringen van het evenwicht onderzocht. Een overzicht van de beschouwde gevallen is gegeven in Tabel 4.5.4.

Code	Omschrijving/doel
T591	Basisgeval (= test T582); stabiele situatie
T592	Effect instantane verplaatsing (centrale) ebgeul
T593	Effect instantane verplaatsing (centrale) ebgeul bij vormbehoud; Effect 'updrift shift'
T594	Effect netto transport door zeegat
T59.	...

Tabel 4.5.4 Specificatie testgevallen T590-serie.

In alle gevallen is hierbij uitgegaan van de stabiele eindsituatie van test T582.

Voor het geval van een instantane verplaatsing van de centrale ebgeul (test T592) conform test T572) moet worden opgemerkt dat de aanpassing van de diepere lagen relatief gezien natuurlijk veel langer duurt.

In test T593 is het effect van een eenzelfde verplaatsing bekeken, waarbij nu echter tegelijkertijd een 'updrift shift' is geïntroduceerd. In dit geval is sprake van een zeewaartse verplaatsing van de kustlijnen aan de bovenstroomse zijde van het zeegat.

Test T594 toont tenslotte het effect van netto transport door het zeegat. De resultaten zijn vergelijkbaar met die van test T575, waarbij nu natuurlijk ook de vooroever aan erosie onderhevig is. Het uniform volgen van de beweging van de bovenlaag vindt daarbij pas na een zekere reactietijd plaats.

4.5.9 Conclusies

Ofschoon het hier slechts gaat om een eerste verkenning van de waarde van het modelconcept als oorspronkelijk gepresenteerd in [Bakker en de Vriend, 1993] en als nader uitgewerkt en uitgebreid in Sectie 3.6, blijkt uit de uitkomsten van zowel een conceptuele als meer specifieke validatie dat een dergelijke schematisatie het gedrag van een zeegat kwalitatief goed blijkt te beschrijven en derhalve als element binnen een grootschalig gedragsmodel uiterst bruikbaar is.

4.6 Bronnen en putten

4.6.1 Algemeen

Door het definiëren van bronnen en putten kan lokaal materiaal aan het kuststelsel worden toegevoegd of worden onttrokken. In het volgende is aan de hand van enkele indicatieve berekeningen nader onderzocht in hoeverre de geïmplementeerde vergelijkingen het effect van met name suppleties op de kustontwikkeling kunnen simuleren.

4.6.2 Overzicht testserie

Een overzicht van enkele van de beschouwde gevallen is gegeven in Tabel 4.6.1.

Code	Omschrijving/doel
T600	Basisgeval (= test T140); stabiele ligging
T61*	Onderzoek effect lokale suppletie op kustontwikkeling
T62*	Onderzoek effect herhalingsuppleties in eroderend kustvak
T6..	

Tabel 4.6.1 Overzicht testgevallen T600-serie.

4.6.3 Resultaten

Uitgaande van test T140 is in de test T611 de kustontwikkeling berekend voor het geval dat na 10 jaar lokaal op het interval $2 \geq x \geq 3$ km $1.000 \text{ m}^3/\text{m}^1$ in laag 2 wordt toegevoegd. In het totaal gaat het hierbij dus om een toevoeging van $1,0 \text{ Mm}^3$. Door diffusie in dwars- en

langsrichting zal het volume in de bovenlaag van het suppletievak vervolgens in de tijd afnemen. Toevoeging van dit volume in de onderlaag in plaats van bovenin (test T612) maakt dat ook in de bovenlaag tijdelijk van enige, zij het relatief minder, winst sprake is.

In test T621 is het effect bekeken van een herhalingsuppletie op de kustontwikkeling van een eroderend kustvak bekeken. Het gestage uniforme verlies van sediment uit een kustvak kan op deze manier worden omgebogen in een 'zaagtandvormig, maar stabiel' verloop.

4.6.4 Conclusies

Ofschoon het hierbij slechts gaat om enkele indicatieve berekeningen, lijken de berekeningsresultaten geloofwaardig. Het rekenmodel heeft zeker toepassingsmogelijkheden.

4.7 Constructies

4.7.1 Algemeen

Ofschoon de implementatie van constructies in feite buiten het huidige kader van de modelontwikkeling valt is om reden van volledigheid toch enige aandacht gegeven aan deze opties. Het karakter van de effecten van de verschillende constructievormen dient immers wel goed door het model te worden gesimuleerd.

4.7.2 Overzicht testserie

Een overzicht van de beschouwde gevallen is gegeven in Tabel 4.7.1.

Code	Omschrijving/doel
T700	Basisgeval (= test T230); stabiele kustligging
T71*	Onderzoek effect niet-erodeerbare positie (dijkeffect)
T72*	Onderzoek effect lokale blokkade langtransport (dwarsdammeffect)
T73*	Onderzoek effect lokale aanpassing langtransport in combinatie met volledige blokkade dwarstransport (langsdameffect)
T7..	

Tabel 4.7.1 Overzicht testgevallen T700-serie.

Er is hierbij een onderscheid gemaakt tussen een drietal constructies, namelijk dijkachtige constructies (duinvoetverdedigingen, harde lagen) die lokaal de achteruitgang van een kustlijn kunnen beïnvloeden, dwarsdammen (dammen, strandhoofden) die lokaal het doorgaande langtransport kunnen beïnvloeden/onderbreken en langsdammen (kustparallele dammen, offshore golfbrekers) die lokaal de golfgeïnduceerde aandrijving van het langtransport achter de constructie en het dwarstransport door/achter de constructie kunnen beïnvloeden.

4.7.3 Resultaten

De toetsing van de effecten van het lokaal aanwezig zijn van niet-erodeerbare zones, is zonder implementatie van de benodigde aanpassing van de vergelijkingen niet goed mogelijk.

Simulatie van het kwalitatieve effect van een dwarsdam is relatief simpeler. In test T721 zijn uitgaande van test T230 lokaal de langtransportconstanten voor de bovenlaag op nul gezet, teneinde het langtransport in de bovenlaag volledig te blokkeren. Na verloop van tijd ontstaat vervolgens een situatie waarbij aan de bovenstroomse zijde een versteiling van het dwarsprofiel plaatsvindt zodanig dat het hiermee samenhangende, zeewaarts gerichte dwarstransport gelijk wordt aan het inkomende langtransport in de bovenlaag. De onderlagen vertonen een zekere verdraaiing waarmee de transportcapaciteit van de onderlaag lokaal zodanig wordt opgekrikt dat het via dwarstransport toegeleverde inkomende transport uit de bovenlaag netjes buiten de dam kan passeren. Aan de benedenstroomse zijde is het dwarsprofiel relatief te flauw met als gevolg

de toelevering vanuit de onder- naar de bovenlaag.

In het geval van een langsdam (test T731) ontstaan vergelijkbare transportpatronen. In dit geval zijn tussen $4 \leq x \leq 6$ km, de langtransportconstanten in de bovenlaag gehalveerd en is de uitwisseling tussen de boven- en de onderlaag 'uitgezet' door lokaal $b_3 = 0$ m/jaar aan te nemen. Ook hier gaat een deel van het inkomende 'bovenlaag-transport' buitenom.

4.7.4 Conclusies

Verkennde berekeningen laten zien dat het rekenmodel de effecten van constructies in principe correct zou moeten weergeven. Nadere formulering en implementatie van feitelijke vergelijkingen in het rekenmodel moet echter nog plaatsvinden.

4.8 Rekenparameters

4.8.1 Algemeen

In het volgende zijn de effecten van een aantal meer rekentechnische parameters nader onderzocht. Als het rekenmodel correct is mag de exacte instelling van deze parameters geen noemenswaardig effect hebben op de berekeningsresultaten, dit natuurlijk binnen nog nader te definiëren grenzen.

4.8.2 Overzicht testserie

Een overzicht van de beschouwde gevallen is gegeven in Tabel 4.8.1. Als uitgangspunt is daarbij de ontwikkeling van een buitendelta gekozen.

Code	Omschrijving/doel
T800	Basisgeval (= test T582); Ontwikkeling stabiele buitendelta
T81*	Onderzoek effect gridafstand Onderlinge vergelijking tussen verschillende gevallen.
T82*	Effect tijdstapsturing: grootte vaste tijdstap; Onderlinge vergelijking tussen resultaten voor verschillende stapgrootte
T83*	Effect tijdstapsturing: maximaal toelaatbare mutatie; Onderlinge vergelijking tussen resultaten voor verschillende waarden
T84*	Effect wegingsfactor numeriek schema bij dynamische tijdstapsturing
T85*	Effect wegingsfactor numeriek schema bij 'harde' tijdstapsturing
T8..	

Tabel 4.8.1 Overzicht testgevallen T800-serie.

Achtereenvolgens komen daarbij de effecten van het rekenrooster (gridafstand; T81*-serie), de tijdstapsturing (tests T82*/T83*) en de wegingsfactor in het numerieke schema aan de orde (tests T84*/T85*). In de volgende secties zijn de resultaten per aspect samengevat.

4.8.3 Dichtheid rekenrooster

De dichtheid van het rekenrooster bepaalt het aantal rekencellen en daarmee het oplossend vermogen. In test T811 is de ontwikkeling van de kust berekend ter plaatse van een zeegat, waarna deze berekening is herhaald voor afwijkende plaatsstappen. Vergelijking van de modelresultaten voor halvering (test T812) en verdubbeling (test T813) van deze plaatsstap laat zien dat nauwelijks enig verschil aanwezig is. Dit geldt zowel voor de lokale ontwikkeling van de lijnposities en volumina in specifieke kustvakken (tijdschaal) als voor de eindsituatie.

4.8.4 Tijdstapsturing

De tijdstap in het rekenprogramma wordt vastgesteld op basis van een op te geven maximale tijdstap Δt_{max} en een maximaal toelaatbare absolute mutatie in de positie van de verschillende lijnen Δy_{max} per tijdstap.

In het geval van het gebruik van een *vaste tijdstap* (dus met uitschakeling van laatstgenoemde beperking; $\Delta y_{max} = \infty$) is in test T821 de ontwikkeling berekend voor $\Delta t_{max} = 1,0$ jaar. Vergelijking van de berekeningsresultaten voor kleinere tijdstappen (tests T822/T824 met resp. 0,5, 0,2 en 0,1 jaar) en grotere tijdstappen (tests T825/T827 met resp. 2, 5 en 10 jaar) laat zien dat de ontwikkeling van bijvoorbeeld de positie van de uitmonding van de ebgeul (de punt van de delta) bij grotere tijdstappen minder vloeiend verloopt. In alle gevallen wordt echter eenzelfde stabiele eindsituatie gevonden. Het rekenschema (zie volgende sectie) is blijkbaar dermate stabiel dat bij de vaststelling van stabiele eindsituaties nauwelijks rekening hoeft te worden gehouden met enige beperking van de tijdstap.

In het geval van het gebruik van een maximaal *toelaatbare mutatie* per tijdstap (dus met uitschakeling van maximale tijdstap; $\Delta t_{max} = \infty$) is in test T831 de ontwikkeling berekend voor $\Delta y_{max} = 5\text{m}$. Deze beperking maakt dat de feitelijke tijdstap in de tijd toeneemt. Vergelijking van de berekeningsresultaten voor kleinere (tests T832/T833 met resp. 2 en 1 m) en grotere waarden (tests T834/T837 met resp. 10, 20, 50 en 100 m) laat zien dat de ontwikkeling van de positie van de uitmonding van de ebgeul bij grotere tijdstappen minder vloeiend verloopt, maar dat in alle gevallen opnieuw eenzelfde stabiele eindsituatie wordt gevonden. Omdat de gerealiseerde tijdstap in de tijd toeneemt is voor het verkrijgen van eenzelfde nauwkeurigheid in de ontwikkeling echter een veel geringer aantal tijdstappen nodig. Hierdoor verdient het opleggen van een beperking in de mutatie per tijdstap dus duidelijk de voorkeur.

4.8.5 Numeriek schema

In het gebruikte Crank-Nicholson-schema heeft de θ -waarde betrekking op de relatieve bijdragen van de informatie op de tijdstippen t en $t + \Delta t$. Voor een stabiele oplossing geldt normaal gesproken $0,5 < \theta < 1,0$.

In de T84*-serie is voor een aantal θ -waarden de ontwikkeling van de buitendelta berekend voor het geval van een dynamische tijdstapsturing, met $\Delta y_{max} = 5\text{m}$.

Vergelijking van dit resultaat (test T841) met dat van tests T842/T844 met resp. $\theta = 0,5, 1,0$ en $0,4$ laat zien dat de ontwikkeling van de positie van de uitmonding van de ebgeul gelijkwaardig is en dat eenzelfde stabiele eindsituatie wordt gevonden. Opmerkelijk is hierbij dat voor het randgeval met $\theta = 0,50$ en zelfs voor $\theta = 0,40$ een stabiele ontwikkeling wordt verkregen. Blijkbaar is de dynamische tijdstapsturing dermate robuust dat zelfs voor deze instelling geen stabiliteitsproblemen optreden.

In de T85*-serie is de mutatie-beperking $\Delta y \leq \Delta y_{max}$ 'uitgezet' (dus $\Delta y_{max} = \infty$) en zijn de berekeningen herhaald voor een vaste tijdstap met $\Delta t = \Delta t_{max} = 2$ jaar (test T851). In dit geval 'ontploft' de ontwikkeling voor $\theta = 0,40$ (test T854). Vergelijking van het basisresultaat (test T851) met dat van test T852 met $\theta = 0,5$ laat zien dat de ontwikkeling van de positie van de uitmonding van de ebgeul minder vloeiend verloopt. Voor test T853 met $\theta = 1,0$ (in feite een expliciet rekenschema) wordt een iets afwijkende ontwikkeling gevonden. De eindsituatie is in alle gevallen gelijk.

4.8.6 Conclusies

De modelresultaten zijn slechts in beperkte mate gevoelig voor de parameterinstelling. Met betrekking tot de tijdstapsturing blijkt de dynamische sturing door beperking van de mutatie per tijdstap een goede optie. Op deze wijze wordt de tijdstap geoptimaliseerd en kunnen berekeningen over zeer lange perioden relatief snel worden afgerond.

4.9 Conclusies en aanbevelingen

4.9.1 Conclusies

De resultaten van de testberekeningen geven aan dat het rekenmodel programma-technisch behoudend is (blijvend kloppende balans).

Het robuuste karakter van het rekenmodel maakt het onderzoek naar het gedrag van een kuststelsel feitelijk zeer eenvoudig.

4.9.2 Aanbevelingen

De aanbevelingen kunnen per procesdeel als volgt worden samengevat:

Aanbevolen wordt een gerichte studie naar de dwarstransportmodellering uit te voeren om zo te komen tot een algemeen bruikbare formulering voor de dwarstransportconstanten.

Een verdere verbetering van het rekenmodel kan worden bereikt door aanpassing van met name de langstransporten. Hierbij moet gedacht worden aan het 'meenemen' van de niet-lineariteit van de $S(\phi)$ -kromme en de langsvariëteit van het getijtransport.

De testberekeningen met suppleties laten zien dat het rekenmodel geschikt is om de effecten van suppletie-scenario's te kwantificeren. Er wordt dan ook aanbevolen om dit aspect in een vervolgstudie nader uit te diepen.

Met betrekking tot de aanwezigheid van constructies wordt aanbevolen om geschikte vergelijkingen te formuleren en vervolgens in het rekenmodel te implementeren.

5 SPECIFICATIE GEGEVENS WADDENMODEL

5.1 Inleiding

De (natuurlijke) Waddenkust, als gegeven in Figuur 5.1.1 en in meer detail in Figuur 5.1.2 en 5.1.3 wordt gekenmerkt door een structureel verlies van zand aan de Waddenzee. In het totaal gaat het hierbij om orde $10 \text{ Mm}^3/\text{jaar}$. Naast de natuurlijke opvulling van het volgens evenwichtsrelaties te omvangrijke vloedbekken, speelt hierbij de winning van zand uit de Waddenzee, alsmede het (netto) verlies van materiaal door verdiepings- en onderhoudsbaggerwerk van geulen een rol. Een bijzondere vorm van sedimentverlies vindt bovendien plaats als gevolg van bodemdaling door gaswinning. Een en ander maakt dat het hier gaat om een zeer dynamisch gebied.

In dit hoofdstuk zijn al de voor de bouw en afregeling van het rekenmodel voor de Waddenkust, (MOBIC-WK-model) benodigde gegevens geïnventariseerd en samengebracht. Een totaaloverzicht van de benodigde data is gegeven in de volgende sectie.

5.2 Overzicht benodigde gegevens

5.2.1 Inleiding

In het volgende zijn de voor een berekening benodigde gegevens groepsgewijs bijeengebracht en kort toegelicht. Achtereenvolgens komen daartoe o.a. de geometrie en de uitwisselingen in langs- en dwarsrichting aan de orde.

Een nadere uitwerking alsmede een verdere specificatie voor het huidige rekengeval van elk van de parameters is gegeven in Sectie 5.3 tot en met 5.9.

5.2.2 Geometrie

Bij de geometrie, zeg de verschillende $y = F\{x\}$ -functies, dient onderscheid te worden gemaakt tussen de grootschalige geometrie en de detailgeometrie.

De *grootschalige geometrie* heeft betrekking op de 'overall' geometrie van het te modelleren gebied. Het betreft hierbij dus (in principe) tijdsonafhankelijke basisinformatie zoals de positie van de overgang tussen een normaal kustvak en de linker- en rechterbegrenzing van een zich voor een zeegat bevindende buitendelta en natuurlijk de ligging van de modelbegrenzingen. Deze informatie legt in feite het rekengebied in langsrichting vast. In combinatie met het gehanteerde rekenrooster vormt dit bovendien de basis voor het toekennen van een (initiële?) code aan elke rekencel als gegeven in Sectie 3.7.9. De uitwerking ten aanzien van deze grootschalige geometrie is gegeven in Sectie 5.3.

Gegeven de grootschalige geometrie legt de *detailgeometrie* de posities van de te gebruiken rekenlijnen per dwarsprofiel vast, d.w.z. $y_j(x)$ voor $\{0 \leq j \leq 4\}$.

Uitgaande van tijdsonafhankelijke opsluitniveaus voor de verschillende lagen in het rekenmodel, te weten $Z_j(x)$ voor $\{0 \leq j \leq 5\}$, kunnen eveneens de laagdikten worden vastgesteld.

Gegeven deze laagdikten kunnen de feitelijke posities van de lijnen worden bepaald.

De initiële positie volgt uit vorm van het kustprofiel en maakt deel uit van de invoer van het rekenmodel. De positie van deze lijnen is een maat voor de hoeveelheid sediment in een bepaald deel van het profiel. Een nadere uitwerking is gegeven in Sectie 5.4.

5.2.3 Uitwisseling in langsrichting

De uitwisseling van sediment in langsrichting, langstransport $S(x)$, vindt plaats onder invloed van golven en getij. Bij beschouwing van een zeker dwarsprofiel, zal het gemiddelde netto jaarlijkse langstransport afhankelijk zijn van o.a. de hydraulische condities en de oriëntatie van de betrokken laag in het kustprofiel.

De functie die per positie de relatie geeft tussen het netto langtransport $S_j(x)$ en de relatieve lijnoriëntatie ligt in gelineariseerde vorm per laag vast door een autonoom transport $S_j^o(x)$, een langtransportconstante $a_j(x)$ en de bijbehorende nultransport-hoek $\phi_j(x)$ als beschreven in Sectie 3.4. De nadere kwantificering van deze (tijdsonafhankelijke) plaatsfuncties is uitgewerkt in Sectie 5.5. Hierbij zal ook worden ingegaan op de langtransporten over de modelranden.

5.2.4 Uitwisselingen in dwarsrichting

Bij de uitwisseling in dwarsrichting (dwarstransport $q_j(x)$) kan onderscheid worden gemaakt tussen interne uitwisseling tussen de verschillende lagen ($q_j(x)$ voor $\{1 \leq j \leq 4\}$) en externe uitwisselingen (landwaartse toevoeging aan duinlaag en zeewaartse onttrekking aan de diepste laag: respectievelijk $q_0(x)$ en $q_5(x)$). Bij de interne uitwisseling wordt de grootte van het netto dwarstransport $q_j(x)$ tussen de twee lagen (van laag $j-1$ naar laag j) gekwantificeerd door een relatie waarbij naast een autonome bijdrage $q_j^o(x)$, de grootte van een dwarstransportconstante $b_j(x)$ en de onderlinge evenwichtsafstand $W_j(x)$ van belang is. Een nadere uitwerking is gegeven in Sectie 5.6.

5.2.5 Geometrie/gedrag buitendelta

In eerste instantie moet per zeegat de vorm van de buitendelta worden gekwantificeerd met behulp van de in Sectie 3.6 geïntroduceerde geometrie-gerelateerde parameters. Hierbij kan verder worden gedacht aan de sturingsparameters voor het transport door de eb- en vloedgeul, alsmede aan de grootte van het netto transport door het zeegat (effectieve zandvraag). De nadere kwantificering van deze parameters is gegeven in Sectie 5.7.

5.2.6 Externe toevoegingen/onttrekkingen

Externe uitwisselingen (bronnen en putten) hebben betrekking op uitgevoerde en/of geplande suppleties. Deze randvoorwaarden moeten worden gespecificeerd in de vorm van blokfuncties (zie Sectie 5.8).

5.2.7 Sturingsparameters rekenproces

Naast genoemde transport-randvoorwaarden moeten nog enkele sturingsparameters aangaande het rekenproces worden gekwantificeerd. Hierbij valt te denken aan bijvoorbeeld de nagestreefde rekentijdstap Δt , het rekeninterval t_0, \dots, t_n , het rekenrooster Δx en de stabiliteits-coëfficiënt θ ten behoeve van het rekenschema. Meer informatie is samengebracht in Sectie 5.9.

5.3 Grootschalige geometrie

5.3.1 Algemeen

Bij de opzet van het rekenmodel is ervan uitgegaan dat de grootschalige geometrie binnen de tijdszone van de modellering (50 jaar) niet wijzigt. De posities van de aan elk zeegat gekoppelde rand van de buitendelta zijn derhalve (in principe) gefixeerd.

In het navolgende zijn de karakteristieken van de verschillende kustsecties en zeegaten nader beschreven. Voorafgaand komt echter eerst nog het gehanteerde modelrooster aan de orde.

5.3.2 Rekenrooster

Bij het rekenmodel wordt in principe gebruik gemaakt van een rechthoekig rekenrooster. Daar het bij de Waddenkust zeker niet gaat om een echt 'rechte kust' is gekozen voor een gekromde referentielijn (X -as van het modelrooster) die de globale ligging van de verschillende eilanden goed volgt.

Deze referentielijn bestaat uit drie zones, aangeduid met respectievelijk I, II en III, en is samengesteld uit een gedeelte van een cirkelboog (in zone II, met booglengte l_2) welke aan beide zijden overgaat in een rechte lijn (resp. zone I met lengte l_1 en zone III met lengte l_3). Als te zien in Figuur 5.3.1 volgt het cirkeldeel hierbij de globale ligging van de eilanden Texel, Vlieland en Terschelling.

5.3.3 Definitie referentielijn (DEFRSTR)

De aldus beschreven referentielijn ligt vast door de coördinaten van het overgangspunt tussen zone I en II (coördinaat X_0, Y_0 ergens in de kop van Noord-Holland), en de ligging van de referentielijn in zone III. Deze laatste ligt vast door specificatie van een eindcoördinaat (X_e, Y_e), (ergens oostelijk van Schiermonnikoog) en de (positieve) hoek α_{III} (ca. 8°) welke de referentielijn hier maakt de west-oost-richting. Het nulpunt van het modelcoördinatensysteem (x_0, y_0) wordt hierbij verondersteld samen te vallen met het begin van de cirkelboog (X_0, Y_0).

Af te leiden valt dat de grootte van de kromtestaal R (in m) volgt uit:

$$R = \frac{(Y_e - Y_0) - (X_e - X_0) \tan \alpha}{\tan((90 - \alpha)/2)} \quad (5.3.1)$$

waarbij de coördinaten van het middelpunt van deze cirkel (X_M, Y_M) volgen uit:

$$X_M = X_0 + R \quad (5.3.2a)$$

en:

$$Y_M = Y_0 \quad (5.3.2b)$$

en de ligging van het overgangspunt (X_t, Y_t) gelijk is aan:

$$X_t = X_M - R \sin \alpha \quad (5.3.3a)$$

met:

$$Y_t = Y_M + R \cos \alpha \quad (5.3.3b)$$

De booglengte van de gebruikte deel van de cirkel l_2 (in m) is gelijk aan:

$$l_2 = \frac{90 - \alpha}{360} 2\pi R \quad (5.3.4)$$

terwijl voor sectie III geldt:

$$l_3 = \sqrt{(X_e - X_t)^2 + (Y_e - Y_t)^2} \quad (5.3.5)$$

Het begin van het rekenrooster valt samen met $x = -l_1$, terwijl het laatste punt is gelegen in $x = l_2 + l_3$. De totale modellengte wordt aldus $l_{tot} = l_1 + l_2 + l_3$.

De hoek welke de referentielijn in het rekenmodel maakt met de west-oost-richting, aangegeven met α , is afhankelijk van de positie langs de lijn, dus $\alpha = \alpha(x)$. Voor zone I (met $x \leq 0$) geldt $\alpha(x) = \alpha_I = 90^\circ$, terwijl voor zone III (met $l_2 \leq x \leq (l_2 + l_3)$) natuurlijk geldt $\alpha(x) = \alpha_{III} = 8^\circ$. Voor zone II geldt $\alpha_I > \alpha(x) > \alpha_{III}$, waarbij:

$$\alpha(x) = \begin{cases} 90^\circ & \{-l_1 \leq x \leq 0\} \\ 90^\circ - \frac{360}{2\pi R} x & \{0 < x \leq l_2\} \\ 8^\circ & \{l_2 < x \leq (l_2 + l_3)\} \end{cases} \quad (5.3.6)$$

De exacte oriëntatie van het rekenrooster is met name van belang voor de vaststelling van de lokale golfinvalshoek. Deze moet immers worden gegeven ten opzichte van de normaal met de referentielijn.

Een overzicht van de onafhankelijke en afhankelijke parameterwaarden is gegeven in Tabel 5.3.1.

onafhankelijke parameters			afhankelijke parameters		
Ligging oorsprong	X_0	115.000 m	Kromtestraal cirkelboog	R	59.866,75 m
	Y_0	545.000 m	Ligging beginpunt	X_b	110.000,00 m
Ligging eindsectie	X_e	220.000 m		Y_b	535.000,00 m
	Y_e	612.500 m	Ligging middelpunt boog	X_M	169.865,80 m
				Y_M	545.000,00 m
Oriëntatie eindsectie	α	8°	Ligging overgang II-III	X_t	161.534,00 m
				Y_t	604.283,10 m
Lengte beginsectie	l_1	10.000 m	Lengte sectie II	l_2	85.678,07 m
			Lengte sectie III	l_3	59.041,54 m
			Totaallengte	l_{tot}	154.718,60 m

Tabel 5.3.1 *Overzicht parameters referentielijn.*

In het definitieve rekenmodel is de lengte van sectie III iets ingekort, zodat de totale lengte van het rekenmodel gelijk werd aan 150 km.

5.3.4 Coördinatenconversie prototype - model (PMCONV)

In het volgende is aangegeven op welke wijze prototype coördinaten (X_p, Y_p) kunnen worden uitgedrukt in modelcoördinaten (x, y).

Voor **zone I**, met $\{Y_p \leq Y_0\}$ (en $\{Y_p \geq Y_0 - l_1\}$), is het nogal eenvoudig:

$$x = -(Y_0 - Y_p) \quad (5.3.7a)$$

en:

$$y = X_0 - X_p \quad (5.3.7b)$$

en worden per definitie negatieve x -waarden gevonden.

Als β de hoek tussen de verbindinglijn (X_p, Y_p) - (X_M, Y_M) en de noord-zuid-as is, volgens:

$$\beta = \text{atan} \left(\frac{X_M - X_p}{Y_p - Y_M} \right)$$

dan geldt voor **zone II**, met $\{Y_p > Y_0\}$ en $\{\beta > \alpha\}$, dat:

$$x = \frac{90 - \beta}{360} 2\pi R \quad (5.3.8a)$$

en:

$$y = \sqrt{(X_0 + R - X_p)^2 + (Y_p - Y_0)^2} - R \quad (5.3.8b)$$

Voor **zone III**, met $\{\beta \leq \alpha\}$, volgt na enige uitwerking:

$$x = l_2 + (X_p - X_t) \cos \alpha + (Y_p - Y_t) \sin \alpha \quad (5.3.9a)$$

en:

$$y = (Y_p - Y_t) \cos \alpha - (X_p - X_t) \sin \alpha \quad (5.3.9b)$$

5.3.5 Coördinatenconversie model - prototype (MPCONV)

De conversie van model- naar prototype-coördinaten is voor **zone I**, met $\{x \leq 0\}$, luidt:

$$X_p = X_0 - y \quad (5.3.10a)$$

en:

$$Y_p = Y_0 + x \quad (5.3.10b)$$

De prototype-coördinaten voor **zone II**, met $\{0 < x \leq l_2\}$ en $\{y > -R\}$, volgen uit:

$$\text{en: } X_p = X_M - (R + y) \cos\left(\frac{x}{R}\right) \quad (5.3.11a)$$

$$Y_p = Y_M + (R + y) \sin\left(\frac{x}{R}\right) \quad (5.3.11b)$$

Voor **zone III**, met $\{x > l_2\}$, volgt na enige uitwerking:

$$\text{en: } X_p = X_t + \sqrt{(x - l_2)^2 + y^2} \cos\beta \quad (5.3.12a)$$

$$Y_p = Y_t + \sqrt{(x - l_2)^2 + y^2} \sin\beta \quad (5.3.12b)$$

waarbij:

$$\beta = \alpha + \text{atan}\left(\frac{y}{x - l_2}\right)$$

is gedefinieerd als hulphoek.

5.3.6 Korte beschrijving kustsecties

Het totale model omvat de vijf grootste Waddeneilanden alsmede het noordelijke deel van de Noord-Hollandse kust. Een overzicht van de kustsecties is samengebracht in Tabel 5.3.2.

kustsectie / eiland		lengte [km]	opmerkingen
1	Noord-Holland NH	> 15,0?	alleen vanaf Hondsbosche Zeewering
2	Texel TX	23,5	
3	Vlieland VL	17,5	
4	Terschelling TS	30,0	
5	Ameland AL	23,5	
6	Engelsmanplaat EP	2,5	ligt feitelijk achter een gecombineerde buitendelta
7	Schiermonnikoog SO	< 15,5	rechter modelgrens valt samen met oostpunt

Tabel 5.3.2 Overzicht kustsecties Waddenmodel.

Het eerste deel wordt gevormd door een kustdeel van de kop van Noord-Holland. De lengte van dit deel is zodanig dat ter plaatse van het eerste zeegat (Marsdiep) geen ongewenste randeffecten optreden. De rechterbegrenzing van het model valt samen met de oostkant van Schiermonnikoog. Engelsmanplaat is eveneens als een soort van eiland beschouwd (zie later).

Er is uiteindelijk sprake van een 7-tal secties. In Figuur 5.3.2 is een detail gegeven van de Waddenkust op het modelrooster. Het aanwezige JARKUS-stelsel is hierin tevens aangegeven, waarbij moet worden opgemerkt dat de raai-lengte ten opzichte van het nulpunt geen maat is voor de werkelijk aanwezige lengte.

5.3.7 Beschrijving zeegaten

Een overzicht van enkele van de verzamelde kenmerken van de verschillende zeegaten is gegeven in Tabel 5.3.3. Hierbij moet worden opgemerkt dat bij de modellering van het Friesche Zeegat (tussen Ameland en Schiermonnikoog) rekening is gehouden met de aanwezigheid van de Engelsmanplaat. Dit 'eiland' verdeelt het stroomgat in twee afzonderlijke delen, namelijk het Pinkegat en de Zoutkamperlaag. Bij de interpretatie van de modelresultaten zal deze kustsectie (Pinkegat/Engelsmanplaat/Zoutkamperlaag) als een geheel worden beschouwd.

zeegat (ebgeul)		getijprisma [Mm ³]	getijverschil [m]	geuldiepte [m]	breedte [km]	bekkenopp. [km ²]	deltaopp. [km ²]
1	Zeegat van Texel - Marsdiep MD	1050	1,40	50,0	3,0	680	110
2	Eijerlandse gat - Engelsmangat EG	160	1,60	19,0	3,0	160	27
3	Zeegat van Terschelling - Vliestroom VS	880	1,80	45,0	7,0	720	110
4	Zeegat van Ameland - Borndiep BD	430	2,00	28,5	2,5	310	50
5	Friesche zeegat FZ - Pinkegat PG	100	2,20	16,0	3,0	290	50
6	- Zoutkamperlaag ZL	200		20,0	4,5		

Tabel 5.3.3 *Overzicht zeegaten Waddenmodel en enkele verzamelde kenmerken.*

Vele van de in de tabel gegeven parameters zijn onderling afhankelijk. De maximale geuldiepte (als maat voor de totale omvang van de aanwezige geulen) is bijvoorbeeld gerelateerd aan de grootte van het getijprisma.

5.3.8 Grootschalige segmentering

De 150 km lange kust is op basis van de aanwezigheid van de buitendelta's in elf verschillende hoofdsecties. De buitendelta's bevinden zich zeewaarts van de kust, direct buiten de in Tabel 5.3.3 genoemde zeegaten. In de meeste gevallen hangen zij samen met één enkel zeegat. In het geval van het Friesche Zeegat zijn de delta's van twee kleinere zeegaten, te weten het Pinkegat en de Zoutkamperlaag, samengevloeid tot een groter systeem.

De overgang tussen een normaal kustvak en de buitendelta is vastgesteld aan de hand van de positie waarop de van oorsprong evenwijdig lopende dieptelijnen zeewaarts afbuigen, dit gebaseerd op zeekaarten en de ligging van de NAP-5m-dieptelijn. Op deze wijze is gekomen tot de in Tabel 5.3.4 gegeven grootschalige langs-segmentering.

nr.	kustsegment		interval [km]		lengte [km]		km-raai		opmerkingen
	land	delta	van	tot	land	delta	van	tot	
1	NH		-10	-2	8		17.48	9.08	
2		MD	-2	16		18	9.08	12.30	
3	TX		16	32	16		12.30	28.80	
4		EG	32	42		10	28.80	39.00	
5	VL		42	52	10		39.00	49.15	
6		VS	52	67		15	49.15	5.20	
7	TS		67	84	17		5.20	22.60	
8		BD	84	99		15	22.60	6.80	
9	AL		99	115	16		6.80	22.80	
10		FZ	115	132		17	22.80	5.60	
11	SO		132	140	8		5.60	13.60	
					75	75			

Tabel 5.3.4 *Overzicht grootschalige segmentering.*

Als blijkt uit de tabel reikt de buitendelta van het Marsdiep van km9 in Noord-Holland tot km-raai 12 op Texel. De totale breedte ervan bedraagt 18 km en gaat daarmee de breedte van het feitelijke zeegat van circa 2 km ver te boven.

Voor de afregeling en voorspelling zijn de eilanden nog gesplitst in een deelsecties (zie Hoofdstuk 6). Deze segmentering in kustvakken (eilanden) en kustsecties (delen van eilanden) is toegevoegd in de al genoemde Figuur 5.3.2.

5.4 Detailgeometrie

5.4.1 Algemeen

De detailgeometrie legt, uitgaande van nader te definiëren laagdikten, de positie van de rekenlijnen $y_j(x)$ ten opzichte van de gehanteerde referentielijn vast. Uit de tijds- en plaatsafhankelijkheid van de onderlinge afstand tussen de lagen kan informatie worden verkregen over de voor het interne dwarstransport bepalende parameters (zie ook Sectie 5.6).

5.4.2 Niveau laagbegrenzungen

De definitie van de te onderscheiden lagen hangt samen met het niveau van de verschillende laagbegrenzungen, $Z_j(x)$ voor $\{0 \leq j \leq 5\}$.

De onderbegrenzing van het model Z_5 is gekozen op NAP-20m, dit conform het gebruik in andere balansmodellen. Teneinde de mogelijke koppeling met de nog diepere lagen op correcte wijze in het model in te brengen vormt het autonome dwarstransport door het NAP-20m-niveau $q_5^o(x)$ een randvoorwaarde voor het model (zie Sectie 5.6).

De bovenbegrenzing Z_0 valt samen met de top van de buitenste zeereep en zal daarmee langs de kust variëren. Het $Z_0(x)$ -verloop is vastgesteld aan de hand van de analyse van JARKUS-data. Een overzicht van de gebruikte verticale segmentering is gegeven in Tabel 5.4.1.

code	niveau	toelichting	opmerkingen
Z_0	$> Z_1$	niveau duintop	varieert langs de kust
Z_1	NAP+3	niveau duinvoet	
Z_2	NAP -2	iets onder laagwater	
Z_3	NAP -7	iets onder actieve zone; binnen bereik JARKUS	scheiding tussen boven- en onderlaag
Z_4	NAP-13		
Z_5	NAP-20	standaardbegrenzing	onder/buitengrens van model

Tabel 5.4.1 Overzicht scheidingsniveaus lagen.

Voor de bovenzijde van de strandlaag Z_1 is het gemiddelde niveau van de duinvoet, zijnde NAP+3m, aangehouden.

De keuze van het Z_3 -niveau vormt in feite een compromis tussen het feitelijk gewenste NAP-8m-niveau en het laagste niveau dat binnen het bereik van de JARKUS-raaien ligt. Op basis van een volledig gebruik van de beschikbare data zou hiervoor zelfs het NAP-6m-niveau in aanmerking komen. Uiteindelijk is toch gekozen voor NAP-7m-niveau vanwege het wel zeer dynamische profieldeel tussen NAP-2m en NAP-7m (brekerbanken). Bovendien bleek dat de kunstmatige verlenging van te korte raaien tot het NAP-7m-niveau goed mogelijk.

In met name 2-lijn-modellen is het een goed gebruik om het Z_2 -niveau rond gemiddeld laag water (hier variërend van NAP-0,8m bij het Marsdiep tot NAP-1,3m bij Schiermonnikoog) te kiezen. In dit geval is dit niveau nog iets lager gekozen teneinde de onderlinge verhouding tussen de langstransporten in de beide aangrenzende modellagen niet te veel uit balans te brengen (zie Sectie 5.5). Een voorbeeld van de dynamica van de profielen binnen de onderscheiden lagen is gegeven in Figuur 5.4.1. De sterke fluctuaties (brekerbanken) vallen binnen laag 2.

Tenslotte kan worden opgemerkt dat de keuze van het Z_4 -niveau voornamelijk is ingegeven door het streven naar een min of meer gelijke dikte voor de onderste twee lagen.

5.4.3 Laagdikten

Gegeven de verschillende opsluitniveaus zijn nu de laagdikten bekend. Een overzicht van de gehanteerde waarden is gegeven in Tabel 5.4.2.

laag	dikte [m]	toelichting	opmerkingen
0	variabel	duinlaag	vormen samen de bovenlaag
1	5	strandlaag	
2	5	hoogactieve laag	
3	6	vooroeverlaag	vormen samen de onderlaag
4	7	diepe vooroever	

Tabel 5.4.2 Overzicht gemodelleerde lagen.

De laagdikten maken impliciet deel uit van de modelinvoer en relateren een wijziging in de ligging van een van de lijnen met de daarmee gepaard gaande volumeverplaatsingen.

5.4.4 Ligging karakteristieke lijnen

Uitgaande van een laagdikte d_j voor laag j en een niveau van de boven- en onderbegrenzing van de laag van respectievelijk Z_j en Z_{j+1} (met natuurlijk $d_j = Z_j - Z_{j+1}$) volgt voor een gegeven dwarsprofiel met $z = F(y)$ de grootte van de (karakteristieke) y_j -waarde uit:

$$y_j = \frac{1}{d_j} \int_{Z_{j+1}}^{Z_j} y(z) dz \tag{5.4.1}$$

Deze bewerking is uitgevoerd voor wat betreft de bovenlaag voor een zeer groot aantal JARKUS-raaien. Overzicht en doelstelling van deze analyse zijn samengebracht in de volgende sectie. Als resultaat van deze uitwerking is de ligging van de lijnen in de bovenlaag bekend, dus $y_j(x)$ voor $j \leq 2$.

Voor de onderlaag met $j = 3, 4$ is dit recept niet toepasbaar omdat gemeten dwarsprofielen reikend tot het NAP-20m-niveau uiterst schaars zijn. De karakteristieke ligging van de beide lijnen in de onderlaag is vastgesteld aan de hand van de (conversie van) respectievelijk de NAP-9m- en de NAP-16m-dieptelijn als afgeleid uit de bodemligging van een nieuw (HYDRA) 2DH-stromingsmodel voor de Waddenkust. Deze bodem bestond uit een samenvoeging van bodeminformatie uit het 'Kuststrookmodel' en het westelijk en oostelijk 'Waddenmodel' en is gebaseerd op informatie uit de 90-er jaren.

5.4.5 Aanpak analyse JARKUS-bestanden

Teneinde inzicht te verkrijgen omtrent zowel de dynamiek als de feitelijke ligging van de kust in met name de bovenlaag is een, in de volgende secties nader omschreven, vrij uitgebreide analyse uitgevoerd voor een selectie van de in het interesse-gebied gelegen JARKUS-raaien. Hiertoe is zowel de plaats- als tijdsvariatie van de verkregen resultaten onderzocht.

Met betrekking tot de *langsvariatie* zijn alle JARKUS-raaien van de jaren 1965, 1978 en 1990 bestudeerd, dit natuurlijk gericht op de feitelijke vaststelling van de posities van de verschillende lagen $y_j(x)$, alsook op de bepaling van de langsvariatie in het niveau van de top van de buitenste duinregel $Z_0(x)$. In eerste instantie zijn hiertoe voor elk van de drie beschouwde jaren de echt relevante raaien geselecteerd (de naar het zeegat gerichte raaien zijn in dit kader immers niet relevant), waarna voor elke individuele raai (zie Tabel 5.4.3) een nadere analyse is uitgevoerd.

kustsectie	km-raaien		opmerkingen
NH	19.90	0.20	Noord-Holland
TX	8.00	31.00	Texel
VL	35.16	51.65	Vlieland
TS	1.08	29.00	Terschelling
AL	3.04	25.00	Ameland
SO	3.04	16.00	Schiermonnikoog

Tabel 5.4.3 Selectie JARKUS-raaien t.b.v. analyse langsvariatie.

De resultaten van deze bewerking komen in de volgende sectie aan de orde.

Mede met het oog op het onderzoek naar de *tijdsvariatie* is voor een beperkt aantal raaien alle beschikbare JARKUS-profielen (1963 t/m 1992) doorgelicht. Een overzicht van de 22 hiertoe geselecteerde raaien is gegeven in Tabel 5.4.4. Per kustsectie/eiland zijn 3 tot 5 raaien gedefinieerd. De in de tabel gegeven *X*-locatie is gebaseerd op de conversie van het nulpunt van de betrokken raai (overeenkomstig de bij het JARKUS-bestand behorende raai-administratie) naar het modelrooster. De gegeven oriëntatie heeft betrekking op de relatieve oriëntatie van een raai ten opzichte van de *Y*-as in het model (zie Sectie 5.5).

nr.	raai	locatie		oriëntatie	opmerkingen
	code	km-raai	model		
1	NH1	16.06	-8.727	+18,0	Noord-Holland
2	NH2	8.08	-0.977	+9,9	
3	NH3	2.10	4.938	-2,9	
4	TX1	10.00	13.763	-26,7	Texel
5	TX2	17.93	21.453	+11,0	
6	TX3	24.00	27.304	+6,3	
7	TX4	29.00	32.205	+5,2	
8	VL1	39.00	41.985	+4,8	Vlieland
9	VL2	45.00	47.897	+7,3	
10	VL3	50.23	53.007	+14,1	
11	TS1	6.00	67.744	+5,4	Terschelling
12	TS2	11.00	72.650	+2,5	
13	TS3	17.00	78.543	-3,2	
14	TS4	23.00	84.400	-3,7	
15	TS5	28.00	89.348	-4,6	
16	AL1	5.00	97.254	+6,2	Ameland
17	AL2	11.00	103.240	+5,3	
18	AL3	17.00	109.214	+2,6	
19	AL4	23.00	115.143	+13,4	
20	SO1	6.00	132.446	+7,5	Schiermonnikoog
21	SO2	11.00	137.449	+7,5	
22	SO3	16.00	142.417	+7,5	

Tabel 5.4.4 Overzicht geselecteerde detailraaien.

Deze raaien zijn gebruikt voor de nadere bestudering van zowel het optredende langs- en dwarstransport.

5.4.6 Analyse individuele JARKUS-raaien

Per individuele raai is uitgaande van de laagdefinitie van de lagen 1 en 2, onder gebruikmaking van Vgl.(5.4.1), de ligging van de y_1^* en de y_2^* -lijn vastgesteld. Hierbij moet worden opgemerkt dat de y^* -ordinaat is gegeven ten opzichte van het nulpunt van de beschouwde raai en bovendien is gemeten in de richting van de raai.

Het niveau van de top van de buitenste duinregel is vastgesteld onder aanname van de veronderstelling dat het hierbij, komende van af zee, gaat om de eerste richel waarachter zich een verdieping van (enigszins arbitrair) tenminste 2 m bevindt.

5.4.7 Zeewaartse extensie JARKUS-raaien

Voor het gekozen opsluithniveau van NAP-7m blijkt een groot aantal van de raaien te kort. Hierdoor is de vaststelling van het volume in laag 2 en dus de kwantificering van de ligging van de y_2^* -lijn niet altijd mogelijk.

In Figuur 5.4.3 is aangegeven op welke wijze in een dergelijk geval gekomen is tot een

verantwoorde extensie van het betrokken dwarsprofiel opdat vaststelling van de y_2 -waarde wel mogelijk is.

5.4.8 Resultaat onderzoek langsvariatie

Elk van de per raai verkregen resultaten is voor wat betreft de ten opzichte van het nulpunt van de betrokken raai gegeven y^* -waarde, rekening houdend met de oriëntatie van de raai, omgewerkt naar een (x,y) -locatie op het gebruikte modelrooster.

De resultaten van deze bewerking zijn samengebracht in Figuur 5.4.4 t/m 5.4.9, waarin de y_1 - en y_2 -waarden in de beschouwde jaren, de grootschalige langsvariatie in de duinhoogte en het minimale JARKUS-niveau zijn gegeven.

De individuele y_j -waarden vormen de basis voor een meer vloeiend $y_j(x)$ -verloop zoals dat voor de invoer van het rekenmodel zal worden gebruikt.

Het niveau van de meest zeewaartse duintop (Figuur 5.4.8) blijkt voor de drie beschouwde jaren redelijk stabiel en neemt in langs de kust in oostelijke richting af. Ook is per eiland een differentiatie te onderkennen, als bijvoorbeeld mag blijken uit de positie van de Slufter op Texel en de strandvlakte aan de west-kant van Vlieland. In de figuur is ook het voor het rekenmodel gebruikte verloop van de $Z_0(x)$ -waarde gegeven.

Het verloop van het minimale door JARKUS-profielen bereikte niveau (Figuur 5.4.9) neemt globaal in oostelijke richting toe, waardoor de noodzaak tot extensie van de dwarsprofielen met name op Schiermonnikoog aanwezig is. De dwarsprofielen zijn hier in het algemeen veel flauwer en reiken bij een gegeven strookbreedte tot een minder diep niveau.

5.5 Specificatie langstransportparameters

5.5.1 Algemeen

De morfologische veranderingen in de kustzone worden onder andere gestuurd door het optredende langstransport. In deze sectie is aangegeven op welke wijze het grootschalige verloop van de parameters die dit langstransport bepalen is vastgesteld.

5.5.2 Aanpak

Het verloop van de in Sectie 3.4 beschreven parameters, zijnde de langstransportconstante a_j , de evenwichtshoek ϕ_j , de 'niet-lineariteits-parameter' c_j en het autonome langstransport S_j^0 , is per individuele laag bepaald aan de hand van een afschatting van deze parameters voor een aantal specifieke lokaties. Voor deze lokaties zijn de in Tabel 5.4.4 gegeven detailraaien gebruikt. De per individuele parameter en per raai verkregen resultaten vormen (als een soort steunpunt) de basis voor de vaststelling van het globale langsverloop van de betrokken parameter en daarmee voor de invoer van het rekenmodel.

Bij de verdere uitwerking is uit praktische overwegingen een onderscheid gemaakt tussen het langstransport in de bovenlaag (boven het NAP-7m-niveau) en dat van de onderlaag (tussen NAP-7m en NAP-20m). In eerste instantie komt daarbij de vaststelling van de transportparameters voor de bovenlaag aan de orde. Het langstransport in de onderlaag wordt in Sectie 5.5.10 e.v. besproken, waarna in Sectie 5.5.13 een en ander is samengevat.

5.5.3 Langstransport in de bovenlaag

Het langstransport in de laag boven het NAP-7m-niveau is vastgesteld door het uitvoeren van gedetailleerde langstransportberekeningen met het UNIBEST-LT-model. Dit model levert, gegeven een bepaald dwarsprofiel en een gediscretiseerd hydraulisch klimaat de parameters die de vorm van de netto $S(\phi)$ -curve beschrijven.

De per individuele berekening gebruikte randvoorwaarden zijn samengebracht in de volgende sectie. Per raai zijn berekeningen uitgevoerd voor drie verschillende dwarsprofielen, respectievelijk gebaseerd op de JARKUS-profielen van 1965, 1978 en 1990. Bovendien is elk van

deze berekeningen uitgevoerd voor een situatie waarbij de $S(\phi)$ -curve bepaald is voor een specifieke laag, teneinde de parameters voor zowel laag 1 als laag 2 beschikbaar te krijgen.

5.5.4 Gebruikte randvoorwaarden LT-berekeningen

Voor het nearshore gedeelte van de *kustprofielen* is gebruik gemaakt van de eerder genoemde JARKUS-profielen. Deze profielen zijn aangevuld tot het NAP-20m-niveau (het niveau waarop de golfrandvoorwaarden zijn opgelegd) door gebruik te maken van lodingsgegevens [Van Alphen, 1987].

Voor het *golfklimaat* is gebruik gemaakt van het DTBEST-bestand met golfklimaten langs de Nederlandse kust [Roskam, 1988]. Tussen de drie relevante stations YM6, ELD en SON is lineair geïnterpoleerd op basis van de afstand tot de beschouwde raai.

De golven in deze stations zijn gemeten met een waverider op diepten van respectievelijk 21, 26 en 19 m. Voor de berekeningen zijn alle klimaten aangenomen op een diepte van 20 m.

Met betrekking tot de *sedimenteigenschappen* is uitgegaan van per kustsectie karakteristieke waarden als gegeven in Tabel 5.5.1 [TAW, 1984].

kustsectie	D_{50} [μm]	w_s [m/s]	opmerkingen
NH	220	0,024	Betreft eerste 20 km
TX	200	0,022	
VL	195	0,021	
TS	190	0,021	
AL	170	0,019	
SO	160	0,018	

Tabel 5.5.1 Overzicht karakteristieke sedimenteigenschappen.

Gaande van west naar oost wordt het sediment dus geleidelijk fijner.

Voor informatie aangaande het *horizontale getij* is gebruik gemaakt van resultaten van een 2DH-stromingsmodel (zie Sectie 5.5.6).

Voor de berekeningen van de uiteindelijke transporten is tenslotte gebruik gemaakt van de Bijker-formule.

5.5.5 Resultaten golfgedreven transport

In Figuur 5.5.1 t/m 5.5.3 zijn de geconverteerde totaalresultaten (totale bovenlaag; van NAP-7m tot 'droog') voor de verschillende jaren samengebracht.

De berekende kustconstanten vertonen wat spreiding langs de kust zonder dat duidelijk sprake is van een trend. De spreiding lijkt voor een groot deel verklaard te kunnen worden uit de toevallige ligging van het nearshore dwarsprofiel in de beschouwde jaren. Voor verschillende profielen kunnen verschillen in de kustconstanten worden gevonden welke van dezelfde orde-grootte zijn als de gevonden spreiding langs de kust.

Het verloop van de 'niet-lineariteits-parameter' c_j is opvallend constant, te weten altijd $c_j \sim 1/60^\circ$. Blijkbaar zijn alle beschouwde $S(\phi)$ -curven even 'krom'. Aan deze parameter is verdere geen aandacht geschonken (bovendien is het effect van de kromming nog niet in het rekenmodel geïmplementeerd).

5.5.6 Additioneel effect (horizontaal) getij

Voor getij-informatie is gebruik gemaakt van het 2DH WADDEN-model (grid 500mx500m). Alhoewel het grid van dit model wellicht wat grof is voor het verkrijgen van gedetailleerde informatie in de nearshore zone, werd toepassing van dit model toch als nuttig beschouwd voor het verkrijgen van consistente getij-informatie langs de Waddenkust, nodig voor het bepalen van de globale tendens van het getij-effect op het langtransport langs de kust.

Voor de berekeningen met het stromingsmodel is uitgegaan van een iets hoger dan gemiddeld getij, het zogenaamde 'morfologische getij'. Hiervoor is het getij van 14, 15 en 16 oktober 1992 genomen.

De invloed van het horizontale getij is onderzocht voor alle 22 raaien maar meer in detail berekend voor elk van de in Tabel 5.5.2 gegeven lokaties.

raai	d_{ref} [m]	opmerkingen
NH1	10,0	
TX2	9,9	
VL2	9,0	
TS3	10,2	
AL2	8,6	
SO2	6,4	Relatief ondiep gelegen

Tabel 5.5.2 Overzicht raaien t.b.v. effect horizontaal getij.

Op alle 22 lokaties werd het getijsnelheden bepaald op diepten tussen de NAP-13m en de NAP-6m. Deze snelheden werden vervolgens met behulp van de benadering van Chézy (welke ook wordt toegepast in UNIBEST-LT) omgerekend naar snelheden op een diepte van NAP-7m, dit om de snelheden enigszins met elkaar te kunnen vergelijken. Deze snelheden werden vervolgens, voor de in de tabel gegeven raaien, in het UNIBEST-model ingevoerd, samen met de al eerder ingevoerde golfklimaat. Om de berekeningen niet te omvangrijk te laten worden is alleen het horizontale getij in een aantal snelheidsklassen gemodelleerd en is aangenomen dat het resulterend effect van verticale getij te verwaarlozen is. Dit is later geverifieerd met een gevoeligheidsberekening.

De met het WADDEN-model bepaalde snelheden op lokatie TX2 zijn wat kleiner dan de snelheden gebruikt in de Texel-studie [Ribberink, 1991]. De met het model bepaalde snelheden op lokatie AL4 komen redelijk goed overeen met snelheden gepresenteerd met eerdere resultaten [Hartsuiker, 1992]. De door Hartsuiker gepresenteerde getijsnelheden liggen echter iets dichterbij het zeeget, waardoor het getij wat a-symmetrischer is.

De kustconstante wordt vrijwel geheel door de golven bepaald. Het getij geeft voornamelijk een verticale verschuiving van de $S(\phi)$ -curve, waardoor vooral de evenwichtshoek ϕ verandert, maar de kustconstante a nagenoeg constant blijft.

Ook de grootte van de resulterende langstransporten verandert slechts in beperkte mate als gevolg van het vrij symmetrische getij.

Uit de resultaten volgt dat de $S(\phi)$ -curve op de beschouwde lokaties in verschillende mate en richting verschuiven. Voor de raaien TX2, VL2, AL2 is geen merkbaar effect aanwezig. Voor NH1, TS3, SO2 is sprake van een kleine verschuiving naar rechts (orde 2°) wijzend op een geringe toename van het netto transport.

De mate en richting van deze verschuivingen kan redelijk worden verklaard op basis van de richting en mate van asymmetrie van de berekende getijsnelheden, zoals gepresenteerd in Figuur 5.5.4. Op basis van de transportberekeningen en snelheidsplotjes kan worden geconcludeerd dat het effect van het getij op de kustconstanten klein is. Er is geen duidelijke tendens langs de kust waarneembaar.

Bedacht moet overigens worden dat deze conclusies zijn gebaseerd op een voor dit doel (nearshore transporten) nogal grofmazig rooster. Dit rooster en de schematisatie van de randen langs de eilanden is wellicht wat te grof om de rest-effecten van het getij in het nearshore gebied voldoende nauwkeurig te beschrijven.

Gemakshalve is voor de bovenlaag het autonome, niet-golfgedreven transport verwaarloosd, met ander woorden:

$$S_j^o(x) = 0 \text{ voor } j \leq 2 \quad (5.5.1)$$

In de bovenlaag is dus alleen het eerder gekwantificeerde golfgedreven transport aanwezig.

5.5.7 Grootschalig transportpatroon

De berekende totale langtransporten als gegeven in Figuur 5.5.1, zijn voor wat betreft de bovenlaag in het volgende vergeleken met de resultaten van andere studies in dit gebied.

Door Reinalda wordt voor Ameland een transport van 0,40 Mm³/jaar aan de westrand van het daar gebruikte model opgelegd en een transport variërend tussen 0,2 en 0,8 Mm³/jaar aan de oostrand van het model [Reinalda, 1987]. De UNIBEST-sommen geven op Ameland een transport tussen de 0,4 en 0,7 Mm³/jaar boven het NAP-7m-niveau. Dit lijkt qua orde-grootte redelijk overeen te komen. In Annex V van de 'Manual for artificial beach nourishment' [CUR, 1983], wordt met de CERC-formule langs Ameland een transport van 0,25 a 0,30 Mm³/jaar berekend.

Door Ribberink wordt voor de noordelijke helft van de Texel een langtransport van de orde van 0,2 à 0,3 Mm³/jaar berekend boven de NAP-6m [Ribberink, 1991]. Eenzelfde orde-grootte wordt gevonden met de huidige sommen voor de punten TX2 en TX3. In TX1 wordt een zuidwest-gaand transport gevonden. Dit is in overeenstemming met Stive die hier een zuid-west-gaand transport in de orde van 0,25 Mm³/jaar vindt [Stive, 1983].

Geconcludeerd kan worden dat de met UNIBEST berekende transporten redelijk goed overeenkomen met de in voorgaande studies gevonden waarden voor het langtransport. Gaande van west naar oost lijkt het voornamelijk golfgedreven langtransport toe te nemen van 0,2 Mm³/jaar op Texel tot 0,6 Mm³/jaar bij Terschelling. Tussen Terschelling en Schiermonnikoog is de transportcapaciteit vrijwel constant rond de 0,6 Mm³/jaar.

5.5.8 Langsverloop langtransportconstanten

Indien de gehele zone boven de NAP-7m-dieptelijlijn wordt beschouwd, dan wordt een constante van circa 0,04 Mm³/°/jaar gevonden. Uitgaande van een effectieve laagdikte van 10 m is dat 0,004 Mm³/°/jaar/m laagdikte.

Bakker heeft waarden voor kustconstanten langs de Nederlandse kust samengevat [Bakker, 1987]. Deze kustconstanten zijn afgeleid van verschillende studies en bovendien op verschillende wijzen bepaald. De resultaten zijn samengebracht in Tabel 5.5.3.

locatie	laag	d [m]	langtransportconstante [Mm ³ /°/jaar]		opmerkingen
			totaal	per m	
Sylt	-8 / +4	12	0,011	0,0009	
Ameland	-5 / +8	13	0,024	0,0019	
Vliehors	-5 / 0	5	0,034	0,0068	
Texel	-5 / +10	15	0,035	0,0023	
Holl. kust	-5 / +20	25	0,030	0,0012	
Scheveningen	-7 / +18	25	0,051	0,0020	
Cadzand	-8 / +4	12	0,008	0,0007	

Tabel 5.5.3 Kustconstanten uit andere studies; naar Bakker [1987].

De berekende waarde van 0,004 Mm³/°/jaar/m laagdikte komt redelijk overeen met de in de tabel gepresenteerde waarden voor Vliehorst en Texel.

In de Texel-studie zijn UNIBEST-berekeningen uitgevoerd, waarin een vergelijkbare kustconstante werd gevonden. De goede overeenkomst met de in deze studie bepaalde waarde is niet zo verwonderlijk omdat ook hier het golfklimaat van Roskam (in een wat andere vorm) werd toegepast en het transport eveneens werd berekend met de Bijker-formule [Ribberink, 1991].

Geconcludeerd kan worden dat de berekende waarden voor de kustconstanten qua orde-grootte goed overeenkomen met in voorgaande studies gevonden waarden. De voorgaande studies zijn

te beperkt in aantal en te inconsistent qua methodiek om een trend in de kustconstante langs de kust te onderkennen. De hier uitgevoerde UNIBEST-berekeningen suggereren dat een dergelijke trend wel aanwezig is (zie Figuur 5.5.2). De kustconstante lijkt ter plaatse van Texel relatief het grootst, iets wat gelet op de globale kustvorm ook aannemelijk lijkt.

Voor de onderlinge verhouding tussen de a_j -waarden in laag 1 en laag 2 blijkt globaal de $a_1(x)$ -waarde 20% van de $a_2(x)$ -waarde te bedragen.

Het voor de modellering gebruikte $a_j(x)$ -verloop is in de figuren toegevoegd.

5.5.9 Langsverloop nultransporthoeken

Vergelijking tussen de resultaten van de beide lagen laat zien dat de nultransporthoek voor de hoger gelegen laag relatief gezien iets in de nul-richting is verschoven, eigenlijk een vrij marginaal maar verwacht effect. In de modellering is de nultransporthoek voor de beide lagen gelijk verondersteld.

De voor het rekenmodel in te voeren $\phi_j(x)$ -relatie is gegeven in Figuur 5.5.3. De twee knikken in het verloop vallen samen met de overgangspunten in de oriëntatie van de referentielijn (zie Sectie 5.3.3).

5.5.10 Langstransport in de onderlaag

Het netto langstransport in de onderlaag tussen de NAP-7m- en de NAP-20m-dieptelijn, wordt voornamelijk bepaald door het horizontale getij en additionele reststromingen als gevolg van meer grootschalige circulaties. De golfwerking uit zich slechts in een beperkte toename van de grootte van het netto transport. Het aandeel van het echt golfgedreven transport, zeg het effect van de globale oriëntatie van een zekere laag op het transport, is slechts gering. De langstransportconstanten a_j voor laag 3 en 4 zijn dan ook relatief klein, zo niet gelijk aan nul.

5.5.11 Nadere kwantificering

Conform de voor de bovenlaag uitgevoerde berekeningen, zijn ook UNIBEST-LT-berekeningen uitgevoerd voor de onderlaag.

De resultaten van deze berekeningen zijn samengebracht in Tabel 5.5.4.

kustsectie	breedte [km]	langstransport		Opmerkingen
		[Mm ³ /jaar]	[m ³ /m ¹ /jaar]	
NH1	8,5	0,9	100	Conform [Van Rijn, 1994]
TX2	8,0	0,2	(25)	
VL2	9,0	0,6	(70)	
TS3	14,0	1,2	(85)	
AL2	6,5	(0,6)	(100)	Oorspronkelijke berekening onbetrouwbaar
SO2	12,0	(1,5)	(120)	idem

Tabel 5.5.4 Overzicht resultaten langstransport onderlaag.

De resultaten van deze exercitie zijn echter omgeven met vele onzekerheden.

De tussen haakjes gegeven waarden hebben betrekking op afgeleide of geschatte waarden.

De grootte van het bij Callantsoog (km14) inkomende transport in de onderlaag kan ook op basis van de resultaten van de transportberekeningen voor de gesloten kust [van Rijn, 1994] worden afgeschat door beschouwing van het op de NAP-8m- en de NAP-20m-dieptelijn berekende langstransport van respectievelijk 75 en 150 m³/m¹/jaar (inclusief poriën). Uitgaande van een 8 km brede zone levert dit 0,9 Mm³/jaar.

Een en ander laat zien dat een globale toename van het transport in oostelijke richting niet moet worden uitgesloten.

5.5.12 Afschatting globale langsgradiënt

Gezien het niet echt eenduidige resultaat van de detailberekeningen is in het volgende een poging gedaan om het globale verloop van het transport in de onderlaag op basis van een meer

indicatieve methode af te schatten.

Hiertoe is uitgegaan van de veronderstelling dat het totale transport voldoet aan:

$$\frac{S}{S_{ref}} = \frac{b}{b_{ref}} \left(\frac{D}{D_{ref}} \right)^{\alpha_1} \frac{u^3}{u_{ref}^3} \left(\frac{H}{H_{ref}} \right)^{\alpha_2} \quad (5.5.2)$$

waarbij het transport evenredig is met de breedte van de beschouwde zone, toeneemt met afnemende korreldiameter (halvering van de korreldiameter resulteert globaal in 50% meer transport, dus $\alpha_1 \approx -0,6$), toeneemt met de asymmetrie en de gemiddelde snelheid en natuurlijk met de golfaanval.

Substitutie van de karakteristieke verhoudingen levert ten opzichte van de linker modelrand maximaal een verdubbeling op in de grootte van het langstransport, zodat:

$$S_{uit} = (1 \sim 2) S_{in} \quad (5.5.3)$$

ofwel, uitgaande van 0,9 Mm³/jaar inkomend langstransport (Callantsoog), een netto transport door de rechterrond van orde 1,5 Mm³/jaar bij Schiermonnikoog.

5.5.13 Overzicht globaal langstransportverloop

Op basis van de gepresenteerde verkenning is in de onderlaag een lineaire toename van het getijgedreven langstransport aangenomen, dit bij afwezigheid van significant golfgedreven transport, terwijl in de bovenlaag alleen golfgedreven transport is verondersteld.

Het totale inkomende transport is gelijk aan 1,1 Mm³/jaar terwijl aan de oostkant orde 2,1 Mm³/jaar het gebied verlaat. Als gevolg hiervan is sprake van een netto jaarlijks verlies in langrichting ter grootte van orde 1,0 Mm³/jaar.

5.5.14 Conclusies

De grootte van het getijgedreven transport in de onderlaag is aan grote onzekerheid onderhevig. Voor wat betreft het transportverloop in de bovenlaag lijken de getalswaarden beter onderbouwd. Bij modelberekeningen zal rekening moeten worden gehouden met deze onzekerheden.

5.6 Specificatie dwarstransportparameters

5.6.1 Algemeen

Onder dwarstransport wordt hier primair verstaan de natuurlijke uitwisseling van materiaal tussen de verschillende lagen. Blijkens de voor dit transport gehanteerde formulering is hierbij zowel de dwarstransportconstante b_j als de evenwichtsafstand W_j van belang.

5.6.2 Aanpak

In de volgende secties is getracht om onder meer aan de hand van de op JARKUS-profielen gebaseerde posities van de modellijnen inzicht te krijgen over de grootte van de evenwichtsafstand, waarna aansluitend de grootte van verschillende dwarstransportconstanten is vastgesteld. Tot slot zijn de autonome dwarstransporten over de modelranden gekwantificeerd.

5.6.3 Tijdreeksanalyses JARKUS-raaien

Voor onderzoek naar de interne dynamiek aangaande de uitwisseling door dwarstransport is voor de in Tabel 5.5.4 gegeven JARKUS-raaien de onderlinge afstand tussen laag 1 en 2 van belang, conform:

$$\Delta y(x, t) = y_2(x, t) - y_1(x, t) \quad (5.6.1)$$

De tijdsgemiddelde waarde van het afstandsverschil geeft informatie over de evenwichtswaarde van dit verschil. Deze volgt uit:

$$W(x) = \frac{1}{n} \sum \Delta y(x) \quad (5.6.2)$$

of voor een individuele raai:

$$W = \frac{1}{N} \sum_{t=1}^N [y_{2t} - y_{1t}] \tag{5.6.3}$$

waarin y_{jt} de positie van lijn y_j ($j = 1, 2$) op tijdstip t ($t = 1, \dots, N$).

5.6.4 Kwantificering evenwichtsafstand

Beschouwing van de gemiddelde laagafstand per individuele raai laat zien dat deze in de tijd slechts marginaal varieert, dit zeker ten opzichte van de tijdsvariatie van de laagposities zelf (zie Figuur 5.6.1). Het beschouwen van volumina in plaats van dieptelijnen resulteert op zich natuurlijk aan een sterk gedempte fluctuaties en lijkt op zich al een rechtvaardiging om bij de meer grootschalige gedragsmodellering van een kust lagen in plaats van het totale dwarsprofiel te beschouwen, dit conform de in deze studie nagestreefde modellering.

Aangezien globaal sprake is van een stabiele kust is de tijdsgemiddelde laagafstand een goede indicatie omtrent de feitelijke evenwichtsafstand (zie ook Sectie 4.3).

Beschouwing van de langsvariatie van de gemiddelde laagafstand als verkregen na conversie van de resultaten per individuele raai laat zien dat sprake is een grootschalige langsvariatie in de evenwichtsafstand. Blijkens Figuur 5.6.2 neemt deze in oostelijke richting toe, hetgeen duidt op een dwarsprofielen met afnemende steilheid.

De in het rekenmodel gebruikte $W_2(x)$ -relatie is in de figuur toegevoegd.

Voor de evenwichtsafstand voor de diepere lagen is uitgegaan van de initieel aanwezige afstand tussen de betrokken lagen, dit gecorrigeerd voor de op basis van de effecten van de aanwezige verplaatsing van de beschouwde laag.

5.6.5 Kwantificering dwarstransportconstante

Voor de dwarstransportconstante wordt meestal een waarde tussen de 0,1 en 10 m/jaar aangehouden. Teneinde te komen tot een meer weloverwogen afchatting van deze constante is gekeken naar de tijdschaal waarop door dwarstransport geïnduceerde aanpassingen van het dwarsprofiel zich manifesteren.

Als beschreven in Sectie 3.5 valt af te leiden dat de dwarstransportconstante b_j omgekeerd evenredig is met de karakteristieke aanpassingstijd T_j^* .

De algemene formulering voor deze relatie luidt:

$$b_j = \frac{d_{j-1} d_j}{(d_{j-1} + d_j) T_j^*} \tag{5.6.4}$$

In Tabel 5.6.1 is voor de verschillende laagovergangen een afchatting gegeven van een meest waarschijnlijk geachte karakteristieke tijdschaal, variërend van maanden/seizoenen voor de uitwisseling tussen het duin en het strand tot vele jaren voor de interne uitwisseling tussen de diepere lagen.

niveau	tijdschaal [jaar]	b-waarde [m/jaar]	opmerkingen
Z ₁ NAP +3m	0,2 / 0,5	6 à 15 10	Relatief snelle aanpassingen
Z ₂ NAP -2m	0,5 / 2	1,2 à 5 2,0	
Z ₃ NAP -7m	2 / 10	0,3 à 1,4 1,0	
Z ₄ NAP -13m	5 / 50	0,06 à 0,6 0,1	Grottere tijdschalen

Tabel 5.6.1 Kwantificering dwarstransportconstanten.

Uitgaande van de laagdikten als gegeven in Tabel 5.4.2 is voor elke laag de bijbehorende grootte van de gezochte b -waarde gegeven. De laatste kolom betreft de uiteindelijk in het rekenmodel gebruikte constanten. Hierbij is gezien de aanwezige onzekerheden in de vaststelling van deze waarden per laag geen nadere verdeling langs de kust aangenomen, dus $b_j(x) = b_j$.

5.6.6 Landwaarts verlies door overstuiving

Het verlies van zand uit het systeem door landwaartse overstuiving lijkt niet te verwaarlozen. Lokaal kan het hierbij gaan om grote transporten tot tientallen $\text{m}^3/\text{m}^1/\text{jaar}$ [Arens, 1994]. Aangezien meer gedetailleerde getalswaarden ontbreken is in dit geval uitgegaan van een jaarlijks netto verlies van $2 \text{ m}^3/\text{m}^1$, zodat:

$$q_0^o = -2 \text{ m}^3/\text{m}^1/\text{jaar} \quad (5.6.5)$$

Uitgaande van een 75 km lange duinkust gaat het hierbij dus om een verlies van $0,15 \text{ Mm}^3/\text{jaar}$.

5.6.7 Aanreiking over NAP–20m-dieptelij

De natuurlijke uitwisseling met deze laag vindt plaats door netto zandtransport vanaf de continental shelf. De (absolute) grootte van dit transport wordt geraamd op orde 0 à $10 \text{ m}^3/\text{m}^1/\text{jaar}$ (o.a. afhankelijk de beschouwde locatie en de wijze van vaststelling ervan). In dit geval is uitgegaan van een jaarlijks netto influx van $5 \text{ m}^3/\text{m}^1$ conform [Van Rijn, 1994], zodat:

$$q_5^o = -5 \text{ m}^3/\text{m}^1/\text{jaar} \quad (5.6.6)$$

Uitgaande van een in plaats en tijd uniforme toelevering gaat het voor de 150 km lange buitengrens hierbij dus om een bron van $0,75 \text{ Mm}^3/\text{jaar}$.

5.6.8 Conclusies

De evenwichtsafstand voor de diepere lagen is onzeker. De orde-van-grootte van de dwarstransportconstanten lijkt redelijk onderbouwd, maar verdient bij de toepassing in modelberekeningen nog enige aandacht door uitvoering van gerichte gevoeligheidsommen. De netto winst door dwarstransport in de 150 km lange kustsectie bedraagt uitgaande van het transport over de modelranden circa $0,6 \text{ Mm}^3/\text{jaar}$.

5.7 Kenmerken zeegatsysteem

5.7.1 Algemeen

Voor elk van de beschouwde zeegaten moeten zowel de geometrie als de netto transportpatronen worden vastgelegd. In het volgende zijn deze nader gekwantificeerd.

5.7.2 Kwantificering geometrie-gerelateerde parameters

Overeenkomstig de in Sectie 3.6 gegeven beschrijving is per buitendelta de grootte van de verschillende parameters vastgelegd. In Tabel 5.7.1 is achtereenvolgens de aldus verkregen totale breedte B , de relatieve uitbouw λ_r , de relatieve positie van de ebgeul δ en de globale verdraaiing ϕ_Δ gegeven.

buitendelta	positie randen [km]		breedte [km]	relatieve uitbouw [-]	rel.locatie ebgeul [-]	'updrift shift' [-]
1 Zeegat van Texel	-2	16	18	0,33	0,53	0,07
2 Eijerlandse gat	32	42	10	0,30	0,50	0,00
3 Zeegat van Terschelling	52	67	15	0,20	0,53	0,17
4 Zeegat van Ameland	84	99	15	0,28	0,53	0,03
5 Pinkegat	115	123	8	0,21	0,78	0,00
6 Zoutkamperlaag	125	132	7	0,40	0,29	0,24

Tabel 5.7.1 *Overzicht geometrie-gerelateerde parameters buitendelta's.*

Uit dit overzicht blijkt dat ondanks de grootte variatie in de breedte van de buitendelta, de relatieve uitbouw in alle gevallen ongeveer 0,3 bedraagt, hetgeen dus bemoedigend is ten aanzien van de op de geometrie gestoelde kwantificering van het gedrag van een buitendelta.

5.7.3 Kwantificering transportsturings-parameters

Voor de α -waarde is voor alle buitendelta's eenzelfde waarde aangehouden, dus:

$$\alpha_g = 0,5 \text{ voor } g = 1, \dots, 6 \quad (5.7.1)$$

Enige variatie hierin heeft overigens geen waarneembaar effect (zie Sectie 4.5.5).

Voor de grootte van de factor die de aanwezigheid van de in- en uitstromende getijgolf op het langtransport verrekent, de β -waarde, is in eerste instantie ook uitgegaan van een voor alle delta's gelijke waarde, te weten:

$$\beta_g = 1,0 \text{ voor } g = 1, \dots, 6 \quad (5.7.2)$$

hetgeen duidt op een verdubbeling van het netto langtransport langs de buitenrand van de buitendelta. Bij modelberekeningen zal het effect van afwijkende waarden door uitvoering van gericht gevoeligheidsonderzoek nog moeten worden vastgesteld.

5.7.4 Kwantificering netto zandvraag

Het transport is voor de verschillende zeegaten aan de Waddenkust naar binnen gericht.

De zandvraag wordt bepaald door een vijftal oorzaken, te weten zeespiegelstijging, gaswinning, afsluiting Zuiderzee en Lauwerszee, zandwinning en de oppervlakteafname door verlandings.

Een overzicht van onder andere de huidige netto *sediment*-vraag per vloedkom (situatie 1990) is gegeven in de Tabel 5.7.2. Een en ander is gebaseerd op de informatie zoals die werd verkregen uit overleg over de resultaten van de ISOS-studie [Louters en Gerritsen, 1994]. Hierbij moet worden opgemerkt dat er mede ten aanzien van de sedimentvraag van het Zeegat van Texel verschil van mening bestaat [Rakhorst, 1992]. Bovendien hebben de getalswaarden betrekking op de *sediment*-vraag als totaal van zand- en slibfractie. Uitgaande van een slibpercentage van 20 à 30 % zal de effectieve *zand*-vraag 70 à 80 % van de in de tabel gegeven waarden betreffen.

zeegat (ebgeul)	sedimentvraag (1990) [Mm ³ /jaar]	ontwikkeling vraag			gerealiseerde vraag (1978-1990)	toekomstige vraag (2040)
		1965	1978	1990		
1 Marsdiep MD	4,2	4,2	5,7	4,2	4,9	3,7 à 4,7
2 Engelsmangat EG	0,5	0,5	0,9	0,5	0,7	0,5 à 1,3
3 Vliestroom VS	3,9	3,1	4,1	3,9	4,0	4,0 à 5,3
4 Borndiep BD	1,0	1,0	1,5	1,0	1,3	1,1 à 1,8
5 Pinkegat PG	0,2	0,2	0,3	0,2	0,2	0,3 à 0,6
6 Zoutkamperlaag ZL	1,4	0,6	1,8	1,4	1,6	0,7 à 1,4
totalen	11,2	9,6	14,3	11,2	12,7	10,3 à 15,1

Tabel 5.7.2 Overzicht netto sedimentvraag van zeegaten in het Waddenmodel.

De sedimentvraag betreft natuurlijk een tijdsfunctie. De verschillende tijdsfuncties $S_g(t)$ per zeegat zijn gegeven in Figuur 5.7.1 en 5.7.2.

In de tabel is ter indicatie een overzicht gegeven van de grootte van de sedimentvraag in de jaren 1965, 1978 en 1990. Ook is de gemiddeld gerealiseerde vraag over de laatste periode gegeven (zie ook Sectie 6.2). Deze bedraagt orde 13 Mm³/jaar.

De toekomstige sedimentvraag (in de tabel gegeven voor 2040) hangt sterk af van het gebruikte zeespiegelstijgingsscenario (zie Hoofdstuk 7), maar is in de orde van 10 à 15 Mm³/jaar.

5.7.5 Kwantificering netto transport

Het feitelijke transport door een zeegat wordt weliswaar in sterke mate bepaald door de grootte van de aanwezige vraag, maar zal niet per definitie gelijk zijn aan deze waarde. Bij een zeer grote vraag kan het immers zo zijn dat de toelevering van deze hoeveelheid vanuit de kust niet voldoende snel kan plaatsvinden. Het geleverde transport blijft in dat geval (tijdelijk) achter bij

de aanwezige vraag.

Teneinde met dit verschil rekening te houden wordt het netto transport per zeegat berekend uit:

$$S_{r,g}(t) = \tau S_g(t) - \gamma_g S_{v,g} \quad (5.7.3)$$

waarin voorlopig is uitgegaan van:

$$\gamma_g = 0,0 \text{ voor } g = 1, \dots, 6 \quad (5.7.4)$$

De τ_g -waarde geeft in feite de verhouding aan tussen de grootte van het gerealiseerde transport en de feitelijke vraag. Hierbij moet in principe gelden:

$$\tau_g \leq 1,0 \quad (5.7.5)$$

Vooralsnog is echter uitgegaan van de maximale waarde, conform:

$$\tau_g = 1,0 \text{ voor } g = 1, \dots, 6 \quad (5.7.6)$$

Gegeven het feit dat voor de zandvraag de sedimentvraag zal worden gebruikt, zal rekening houdend met het slibpercentage waarschijnlijk gelden $\tau_g = 0,7 \sim 0,8$.

Een nadere specificatie zal plaatsvinden aan de hand van de globale balansdata als uitgewerkt in Sectie 6.2.

5.7.5 Conclusies

Met betrekking tot de huidige (en zeker de toekomstige) zandvraag bestaat er, verwijzend naar de talrijke discussies in de Werkgroep, nog veel verschil van mening. Feitelijk betreft het hierbij het afwijkend inschatten van de optredende relaxatietijden. Hierom zal bij de berekeningen met het model veelvuldig gebruik worden gemaakt van de geïntroduceerde vermenigvuldigingsfactor. Voor het geval dat de koppeling tussen het binnen- en het buitengebied deel uitmaakt van het rekenmodel (als voorzien in een volgende modelversie; zie Sectie 9.3) bestaat dit afregelingsprobleem in mindere mate.

5.8 Additionele bronnen en putten

5.8.1 Algemeen

De extern opgelegde 'bronnen' en 'putten' hebben betrekking op de reeds in het gebied uitgevoerde zandsuppleties. Aangezien het hierbij, zeker cumulatief gezien, gaat om een niet verwaarloosbare omvang zijn alle relevante suppleties in het kustgebied in de berekeningen meegenomen.

5.8.2 Overzicht uitgevoerde suppleties

Een overzicht van de in het rekengebied uitgevoerde, relevante (zeewaartse) suppleties is gegeven in Tabel 5.8.1. Het betreft hier in het totaal 17 suppleties, verdeeld over de kop van Noord-Holland (6), Texel (6), Terschelling (1) en Ameland (4).

nr	lokatie	km-raai	jaartal	volume		opmerkingen
				Mm ³	m ³ /m ^l	
1	Callantsoog	11.5 - 13.6	1978/79	0,35	167	strandsuppletie (uit Malzwin)
2	Callantsoog	11.5 - 13.6	1979/80	0,47	224	strandsuppletie (uit Malzwin)
3	Callantsoog	11.5 - 13.6	1986	1,30	325	strand/duinsuppletie (uit Schulpengat)
4	Zwanenwater	13.8 - 18.1	1987	1,85	308	strand/duinsuppletie (uit Schulpengat)
5	Callantsoog	11.0 - 14.0	1991	0,54	180	kustlijnhandhaving
6	Den Helder	1.0 - 7.5	1992/93	0,88	137	kustlijnhandhaving
7	Eierland	26.2 - 31.0	1979	3,05	635	duinverzwarend (uit Robbengat)
8	de Koog	18.0 - 24.2	1984	3,02	487	strand/duinverzwarend
9	Eierland	26.0 - 31.0	1985	2,85	570	strand/duinverzwarend
10	Eierland	25.6 - 31.0	1990	2,54	463	strandsuppletie
11	de Koog	18.3 - 23.4	1991	2,00	392	kustlijnhandhaving
12	zuid - west Texel	9.0 - 18.0	1993	3,00	333	kustlijnhandhaving
13	midden Terschelling	13.8 - 17.8	1993	2,00	500	vooroerversuppletie
14	Hollum	1.6 - 2.3	1979	0,31	443	strandsuppletie
15	Nes	10.0 - 16.0	1980	2,20	366	duinverzwarend
16	midden Ameland	12.4 - 16.0	1990	0,97	269	strandsuppletie
17	midden Ameland	11.5 - 17.5	1992	1,60	267	kustlijnhandhaving

Tabel 5.8.1 *Overzicht reeds uitgevoerde suppleties.*

Dit overzicht werd gedistilleerd uit verschillende notities, waaronder [Kalf, 1994].

5.8.3 Bron/put-functies

Bij de definitie van elk van deze bron/put-functies is uitgegaan van een vaste vorm bestaande uit een plaatsvak, een laagspecificatie, een tijdvak en een totaalvolume.

De ruimtelijke positie is gegeven door de x-waarden van respectievelijk de linker- en de rechterbegrenzing (X_{1j} en X_{2j}) en de z-waarden van respectievelijk de onder- en bovenbegrenzing (Z_{1j} en Z_{2j}). Voor het begin- en eindtijdstip geldt analoog T_{1j} en T_{2j} .

Het (positieve of negatieve) totaalvolume V_j wordt verondersteld in plaats en tijd gelijkmatig te worden aangesproken. De blokfunctie, met volgnummer j , bestaat dus uit 7 getalswaarden.

5.8.4 Specificatie suppletiescenario

Een overzicht van de gebruikte randvoorwaarden is gegeven in Tabel 5.8.2. Hiervoor is onder andere de lokatie omgezet naar een kustvak op het referentiegrid.

De totale suppletiehoeveelheid bedraagt 28,9 Mm³ (gemiddeld 1,7 Mm³/jaar). In de periode tussen 1978 en 1990 zijn er 8 suppleties uitgevoerd met een totale omvang van 15,8 Mm³, zijnde gemiddeld 1,3 Mm³/jaar.

De intensiteit van deze suppleties neemt sterk toe als mag blijken uit de ontwikkeling na 1990. In de afgelopen 4 jaar is er in het totaal maar liefst 14,5 Mm³ gesuppleerd, resulterend in een gemiddelde toevoeging van 3,6 Mm³/jaar.

nr	lokatie (van tot)		niveau (van tot)		tijdvak (van tot)		volume	opmerkingen
	[km]		[m tov NAP]		[jaar]			
	X ₁	X ₂	Z ₁	Z ₂	T ₁	T ₂	[Mm ³]	
1	-6,4	-4,3	-2	3	1977,0	1978,0	0,35	
2	-6,4	-4,3	-2	3	1979,0	1980,0	0,47	
3	-6,5	-4,6	-2	8	1986,0	1987,0	1,30	
4	-10,7	-6,5	-2	8	1987,0	1988,0	1,85	
5	-6,8	-3,9	-2	8	1991,0	1992,0	0,54	
6	-5,8	-0,4	-2	8	1992,0	1993,0	0,88	
7	29,4	34,0	-2	8	1979,0	1980,0	3,05	
8	21,4	27,5	-2	8	1984,0	1985,0	3,02	
9	29,2	34,0	-2	8	1985,0	1986,0	2,85	
10	28,9	34,0	-2	3	1990,0	1991,0	2,54	
11	21,7	26,7	-2	8	1991,0	1992,0	2,00	
12	12,8	21,6	-2	8	1993,0	1994,0	3,00	
13	75,3	79,3	-7	8	1993,0	1994,0	2,00	
14	99,4	94,8	-2	3	1979,0	1980,0	0,31	
15	102,2	108,2	+3	8	1980,0	1981,0	2,20	
16	104,6	108,2	-2	3	1990,0	1991,0	0,97	
17	103,7	109,7	-2	8	1992,0	1993,0	1,60	

Tabel 5.8.2 Overzicht modelinvoer uitgevoerde suppleties.

5.9 Rekenproces

Voor de sturing van de (reken-)tijdstep Δt is uitgegaan van een maximaal toegestane mutatie per rekentijdstep van $\Delta y_{max} < 10$ m, dit bij een maximaal toelaatbare stapgrootte Δt_{max} van 2 jaar. Modeluitvoer is steeds gegenereerd op een aantal gewenste tussen tijdstippen. Voor de voorspellingen is hierbij uitgegaan van 10, 25 en 50 jaar.

Voor de (reken-)plaatsstep Δx is gekozen voor een vaste waarde van 500 m in de landsecties en 1000 m ter plaatse van de buitendelta's. Hierdoor blijft het aantal rekenpunten beperkt tot ca. 220. Vergelijking met nog kleinere of grotere plaatsstappen laat nauwelijks verschil in de uitkomsten zien (zie ook Sectie 4.8).

Voor de numerieke stabiliteitscoëfficiënt is de (standaard-)waarde van $\theta = 0,55$ aangehouden.

6 AFREGELING WADDENMODEL

6.1 Inleiding

6.1.1 Algemeen

In dit hoofdstuk is aangegeven op welke wijze is gekomen tot een afgeregelde versie van het rekenmodel waarmee in een later stadium de relatieve consequenties van wijzigingen in de externe randvoorwaarden zullen worden afgeschat.

6.1.2 Gestructureerde aanpak

Gegeven het complexe karakter van het totale model en de veelheid aan benodigde stuurparameters is de feitelijke modelafregeling niet eenvoudig. In het volgende is getracht een en ander op een zo gestructureerd mogelijke wijze te volbrengen. Hiertoe heeft de afregeling op verschillende niveaus plaatsgevonden. Een overzicht van de bij het dynamische balansmodel te onderscheiden balansniveaus is uitgewerkt in de volgende subsectie.

Na een eerste globale afregeling op het hoogste balansniveau ('niveau 0') als uitgewerkt in Sectie 6.2, is in Sectie 6.3 gericht onderzoek uitgevoerd naar de effecten van een beperkt aantal voor de kustontwikkeling belangrijke stuurparameters. Mede om te komen tot een optimale afregeling van het model is het immers gewenst inzicht te hebben in de gevolgen van het enigszins bijstellen van de invoer, zodat met enig beleid aan de verschillende 'knoppen' kan worden gedraaid.

Na deze exercitie is in Sectie 6.4 het model in meer detail, dat wil zeggen op het niveau van kustsecties ('niveau 3') afgeregeld, waarna in Sectie 6.5 nog een poging is gedaan om te komen tot een betere overeenkomst op raainiveau ('niveau 4').

In Sectie 6.6 zijn de voornaamste conclusies en bevindingen van deze afregelingsexercitie samengevat.

6.1.3 Overzicht balansniveaus

Gegeven de buitengrenzen van het rekenmodel, zijnde in 'langsrichting' de linker- en rechtergrens (km 17 in Noord-Holland en km 14 op Schiermonnikoog) en in 'dwarsrichting' de duintop (of de aansluiting op een vloedkom) en de NAP-20m-dieptelij, kan de kinematische balans van het rekengebied worden gekwantificeerd. Het gaat daarbij nog om de balans op het hoogste, meest globale niveau, in het volgende aangegeven met 'niveau 0'.

Er kan echter ook een balans voor een lager niveau worden opgesteld door bijvoorbeeld de winst- en verliesrekening van een specifiek kustvak te beschouwen.

Een overzicht van de te onderscheiden balansniveaus is gegeven in Figuur 6.1.1 en Tabel 6.1.1.

balans-niveau	aantal cellen	additionele indeling	toelichting
0	1	hoogste niveau met 4 randen	globale balans (= modelinvoer)
1	2	splitsing in boven- en onderlaag	
2	22	onderverdeling kust/buitendelta	
3	32	nadere segmentering kustsecties	onderverdeling eilanden in twee balanssecties
4	448	rekengrid/raainiveau	plaatsstappen van 500 à 1000 m
5	1120	detail/reken-niveau (meer lagen)	vijf i.p.v. twee lagen

Tabel 6.1.1 *Overzicht verschillende balansniveaus.*

Uitgaande van 'niveau 0', neemt bij elk volgend niveau, door verdergaande verfijning in langs- of dwarsrichting, zowel de mate van detail als het aantal te onderscheiden balanscellen toe. Voor 5 lagen en 224 gridpunten is er op rekenniveau uiteindelijk sprake van 1120 verschillende balanscellen.

Het rekenmodel levert in principe resultaten op 'niveau 5'. De betrouwbaarheid van dit detailresultaat hangt samen met het succesvol behaalde afregelingsniveau als geïllustreerd in Figuur 6.1.2 waarin de samenhang tussen afregelings- en voorspelniveau schematisch is weergegeven. Voor het specifieke geval dat afregeling op raainiveau ('niveau 4') mogelijk blijkt, mag bij de feitelijke interpretatie van de modelresultaten ten hoogste naar dit niveau worden teruggegaan. Bij een toenemende tijdshorizon (lange-termijn voorspellingen) moet worden teruggegaan naar een nog hoger niveau. Met het oog op de uit te voeren voorspelling valt daarbij te denken aan 'niveau 2' of ten hoogste 'niveau 3'. Voor een zeer lange tijdsduur zou feitelijk moeten worden teruggegrepen naar het hoogste voorspelniveau, zijnde 'niveau 0'. Aangezien het resultaat op dit niveau volledig wordt bepaald door de opgelegde randvoorwaarden levert dit echter geen aanvullende informatie op. De toepassing van een dergelijk model is dan ook niet meer als zinvol aan te merken.

6.1.4 Overzicht balansgrootheden

Per individuele balanscel kan de winst- en verliesrekening worden opgesteld, per tijdstap resulterend in een volumewijziging uitgedrukt in Mm^3 /jaar. Bij onderlinge vergelijking tussen de balanswaarden van naast elkaar gelegen cellen heeft echter een gemiddelde volumewijziging per m^1 in langsrichting meer zin. Uitgedrukt in m^3/m^1 /jaar heeft de individuele cellengte nu immers geen effect meer.

Nog meer inzichtelijk wordt het bij deling door de relevante laagdikte, zodat de balanstoestand van een cel wordt uitgedrukt in m^2/m^1 /jaar of m /jaar. Dit maakt ook onderlinge vergelijking van de ontwikkeling tussen verschillende lagen mogelijk.

Bij de verdere uitwerking van de balansgegevens zullen vooral de ' Mm^3 /jaar-waarden' en ' m /jaar-waarden' worden gebruikt.

6.1.5 Overzicht gebruikte segmentering

Alvorens de balans verder te kwantificeren is in Tabel 6.1.2 de gebruikte langssegmentering (tot 'niveau 3') nader gespecificeerd. Hiertoe is de 150 km lange kust opgedeeld in zestien verschillende kustsecties, dit conform [Bouwmeester, 1994].

nr.	kustsegment		interval [km]		lengte [km]		km-raai		opmerkingen
	land	delta	van	tot	land	delta	van	tot	
1	NH		-10	-2	8		17.48	9.08	
2		MD	-2	16		18	9.08	12.30	
3	TX _l		16	28	12		12.30	24.80	
4	TX _r		28	32	4		24.80	28.80	
5		EG	32	42		10	28.80	39.00	
6	VL _l		42	47	5		39.00	44.14	
7	VL _r		47	52	5		44.14	49.15	
8		VS	52	67		15	49.15	5.20	
9	TS _l		67	72	5		5.20	10.40	
10	TS _r		72	84	12		10.40	22.60	
11		BD	84	99		15	22.60	6.80	
12	AL _l		99	105	6		6.80	12.80	
13	AL _r		105	115	10		12.80	22.80	
14		FZ	115	132		17	22.80	5.60	betreft samengesteld vak
15	SO _l		132	136	4		5.60	9.60	
16	SO _r		136	140	4		9.60	13.60	
					75	75			

Tabel 6.1.2 Overzicht grootschalige detailsegmentering.

Als blijkt uit de tabel is het aandeel van land en buitendelta toevallig gelijk verdeelt over de totale kustlengte. Deze segmentering van de kust is zowel gebruikt voor de samenstelling van de globale balansgegevens als uitgewerkt in Sectie 6.2, als voor de in Sectie 6.4 gegeven nadere afregeling op 'niveau 3'. Bij de verticale segmentering is het NAP-7m-niveau als scheiding aangehouden tussen de bovenlaag (laag 0, 1 en 2) en de onderlaag (laag 3 en 4).

6.2 Verificatie globale balans

6.2.1 Inleiding

Voor dat kan of zelfs mag worden overgegaan tot de interne afregeling van het rekenmodel moet in ieder geval de globale kinematische balans, zijnde de winst- en verliesrekening van het transport over de modelranden, worden geverifieerd. Op basis hiervan kunnen de modelrandvoorwaarden eventueel nog iets worden bijgesteld.

6.2.2 Nadere uitwerking

Teneinde deze globale balans ('niveau 0' in Tabel 6.1.1) te verifiëren is het nodig om de relevante getalswaarden in zowel het prototype als het model te bepalen.

Voor het prototype is daartoe gebruik gemaakt van een veelheid aan soms minder betrouwbare lodingsgegevens, resulterend in een gemiddelde jaarlijkse volume-mutatie voor het totale kustvak (uitgedrukt in $Mm^3/jaar$).

Voor het rekenmodel is de opstelling van de globale balans relatief simpel, daar het tijdsgemiddelde verlies direct gerelateerd is aan op te geven, hier dus nader te verifiëren randvoorwaarden.

6.2.3 Vaststelling globale prototypebalans

Bij de vaststelling van de winst- en verliesrekening voor het prototype zijn uit praktische overwegingen drie verschillende zones onderscheiden, te weten de door JARKUS-data bestreken vakken in de bovenlaag (boven NAP-7m) en de bijbehorende, nauwelijks door JARKUS-data bestreken, vakken in de onderlaag en de slechts door incidentele vaklodingen bestreken buitendelta's.

Voor de onderlinge begrenzing tussen land- en deltavakken is gebruik gemaakt van de in Tabel 6.1.2 gegeven segmentering. De nadere uitwerking komt in de volgende secties aan de orde. Hierbij is getracht deze getalswaarde te vast te stellen voor de laatste helft van de JARKUS-periode, in feite voor de tijdvak tussen 1978 en 1990.

6.2.4 Balansdata per kustsegment in de bovenlaag

De, op een door RIKZ uitgevoerde JARKUS-analyse gebaseerde, balansdata zijn voor de verschillende kustvakken gegeven in Tabel 6.2.1. Per balansvak is ook de vaklengte en de gemiddelde laagdikte gegeven. Deze laatste betreft het gewogen niveauverschil tussen de top van de eerste duinregel $Z_0(x)$ en het NAP-7m-niveau ($=Z_3$) en varieert per vak.

De cursief aangegeven waarden hebben in deze en de volgende tabellen betrekking op afgeleide getalswaarden. Per vak is, uitgaande van een schatting van de gemiddelde volumetrische volumeverandering (in $m^3/m^1/jaar$) in de door RIKZ gedefinieerde 4 m dikke strandlaag, een schatting gegeven van de karakteristieke 'm/jaar-waarde'. Mede op basis van de erosie van aanliggende lagen en de tijdsontwikkeling van vakvolumina is hieraan nog een zekere spreiding toegekend. De vakgeïntegreerde waarde, uitgedrukt in $Mm^3/jaar$, is vervolgens bepaald voor de verwachtingswaarde van de karakteristieke verplaatsingssnelheid.

nr.	segment	interval [km]		km-raai		l [km]	d [m]	balansdata			opm.	
		van	tot	van	tot			[Mm ³ /jaar]	[m ³ /m ¹ /jaar]	[m/jaar]		
1	NH	-10	-2	17.48	9.08	8	20,4	-0,1	-10	-1/-0		
3	TX _l	16	28	12.30	24.80	12	17,7	-0,8	-70	-6/-2		
4	TX _r	28	32	24.80	28.80	4	19,3	-0,5	-110	-8/-4		
6	VL _l	42	47	39.00	44.14	5	14,3	+0,1	+20	+0/+3		
7	VL _r	47	52	44.14	49.15	5	20,1	-0,1	-30	-3/+1		
9	TS _l	67	72	5.20	10.40	5	17,7	+0,1	+30	-1/+4		
10	TS _r	72	84	10.40	22.60	12	18,7	+0,1	+10	-1/+2		
12	AL _l	99	105	6.80	12.80	6	17,1	+0,4	+70	+2/+6		
13	AL _r	105	115	12.80	22.80	10	15,6	-0,3	-30	-3/-1		
15	SO _l	132	136	5.60	9.60	4	10,9	+0,2	+40	+2/+6		
16	SO _r	136	140	9.60	13.60	4	11,2	-0,2	-50	-3/-6		
							75	17,1	-1,1±0,6	-15±8	0,9±0,5	

Tabel 6.2.1 Overzicht balansdata kustvakken voor bovenlaag (1978-1990).

Een korte toelichting op achtergronden van deze getalswaarden is gegeven in het volgende.

Voor het betrokken kustvak in *Noord-Holland* (km 9.1 - km 17.5) is uitgegaan van een slechts minimale erosie van 0 à 1 m/jaar in de betrokken laag, dit conform [Rakhorst, 1989] en de ontwikkeling van de vakvolumina [Bouwmeester, 1994].

De erosie op *Texel* is relatief ernstig. In het lange linkervak (km 12.3 - km 24.8) is er sprake van een gemiddelde erosie van 2 à 6 m op jaarbasis. Rechts van de Slufter (km 24.8 - km 28.8) neemt de gemiddelde erosie nog verder toe tot orde 4 à 8 m/jaar.

Hierbij moet worden opgemerkt dat de feitelijke erosie over de linker kustsectie in zuidwestelijke richting toeneemt, dit met een maximale waarde van orde 10 m/jaar bij het Marsdiep.

Voor *Vlieland* vindt in het linker kustvak (km 39.0 - km 44.1) aanzanding plaats resulterend in een gemiddelde vooruitgang met 0 à 3 m/jaar. In het rechtervak is deze aangroei niet aanwezig en lijkt de kust stabiel tot licht erosief met waarden tussen -3 en +1 m/jaar.

De balansdata voor *Terschelling* laten voor het zandgolfgedomineerde linkerdeel (km 5.2 - km 10.4) karakteristieke snelheden zien van -1 à +4 m/jaar. Het rechterdeel (tot km 22.6) lijkt relatief iets stabiel met waarden van -1 tot +2 m/jaar.

Voor de linkerzijde van *Ameland* (km 6.8 - km 12.8) is sprake van een zeewaartse kustlijnverplaatsing in de orde van 2 à 6 m/jaar, dit als gevolg van 'aanlandende zandgolven'. Het rechterdeel (km 12.8 - km 22.8) vertoont een min of meer autonome erosie in de orde van 1 à 3 m/jaar.

De getalswaarden voor *Schiermonnikoog* laten een vergelijkbaar patroon zien, te weten aanzanding van orde 2 à 6 m/jaar aan de westkant (km 5.6 - km 9.6) en erosie ter grootte van 3 à 6 m/jaar aan de oostkant (km 9.6 - km 13.6).

Het totale verlies in de beschouwde zone bedraagt 1,1 Mm³/jaar of rekening houdend met de onzekerheid in de onderliggende getalswaarden 0,5 à 1,7 Mm³/jaar. Zoals blijkt uit de tabel vindt het overgrote deel van dit verlies plaats op Texel. Als karakteristieke waarde voor de bovenlaag van de betrokken kustvakken (totale lengte 75 km) gaat het om een gemiddelde erosie van (15±8) m³/m¹/jaar. Voor een karakteristieke gewogen laagdikte van 17,1 m levert dit voor de kustvakken in de bovenlaag uiteindelijk een gemiddelde erosiesnelheid op ter grootte van (0,9±0,5) m/jaar.

6.2.5 Balansdata per kustsegment in de onderlaag

De getalswaarden van soortgelijke balansdata voor de 13 m dikke onderlaag (van NAP-20m tot NAP-7m) zijn vanwege het ontbreken van betrouwbare gegevens aan relatief veel meer onzekerheid onderhevig.

Bij de kwantificering is primair getracht een schatting te geven voor de gemiddelde, gewogen verplaatsingssnelheid van de dieptelijnen. Daarbij is bovendien gekeken naar de bekende resultaten voor de bovenlaag. Met betrekking tot de balanswaarden mag er immers geen al te grote discrepantie bestaan tussen de 'm/j'-waarden voor onder- en bovenlaag.

nr.	segment	interval [km]		km-raai		l [km]	balansdata		opmerkingen
		van	tot	van	tot		[Mm ³ /jaar]	[m/jaar]	
1	NH	-10	-2	17.48	9.08	8	-0,0	-1/-0	redelijk stabiel achteruitgaande kust
3/4	TX	16	32	12.30	28.80	16	-0,8	-6/-2	
6/7	VL	42	52	39.00	49.15	10	-0,1	-5/+3	
9/10	TS	67	84	5.20	22.60	17	+0,2	-2/+4	
12/13	AL	99	115	6.80	22.80	16	0,0	-3/+3	
15/16	SO	132	140	5.60	13.60	8	0,0	-3/+3	
						75	-0,7		

Tabel 6.2.2 Overzicht balansdata kustvakken voor onderlaag.

De uiteindelijke resultaten, samengebracht in Tabel 6.2.2, zijn in het volgende nader toegelicht.

Voor het kustvak in *Noord-Holland* is er ten opzichte van het gedrag van de bovenlaag sprake van een vergelijkbare situatie als blijkt uit de resultaten van doorlodingen [Rakhorst, 1989]. Voor km 8-20 wordt voor tijdvak 1965-1985 melding gemaakt van een verlies van orde 0,35 Mm³, zijnde een verlies van ongeveer 1 m³/m¹/jaar. Voor een effectieve laagdikte van orde 5 m (einde JARKUS-raai op NAP-7m; einde doorloding op 3000m op NAP-12m) een netto achteruitgang van slechts 0,2 m op jaarbasis waarmee het totale verlies in de onderlaag komt op 0,02 Mm³/jaar (0,0 à 0,1 Mm³/jaar).

Het gedrag van de onderlaag bij *Texel* is mede gekwantificeerd op basis van een analyse van de ontwikkeling van de NAP-10m-dieptelijn uit vaklodingskaarten in de periode 1965-1993. De gemiddelde trend werd daarbij geschat ergens te liggen tussen de 0 en -10 m/jaar. Ook is gebruik gemaakt van de volumetrische resultaten van doorlodingen [Rakhorst, 1989]. Voor km 10-18 wordt voor tijdvak 1965-1985 melding gemaakt van een verlies van 1,1 Mm³, zijnde een verlies van ongeveer 7 m³/m¹/jaar. Voor km 19-29 wordt voor de zelfde periode 4,5 Mm³ vermist, hetgeen overeenkomt met 22 m³/m¹/jaar. Uitgaande van een gemiddelde erosie van 10 à 20 m³/m¹/jaar levert dit bij een effectieve laagdikte van orde 5 m (einde JARKUS-raai op NAP-7m; einde doorloding op 3000m op NAP-12m) een netto achteruitgang van 2 à 4 m op jaarbasis. Bij de opstelling van de globale kinematische balans is uitgegaan van een achteruitgang van 2 à 6 m/jaar, waarbij 4 m/jaar is aangehouden als beste schatting. Deze waarden sluiten redelijk aan bij de waarden zoals die voor de bovenlaag zijn bepaald (zie Tabel 6.2.1). Het totale verlies in de onderlaag komt daarmee op 0,8 Mm³/jaar (0,4 à 1,2 Mm³/jaar).

Voor de onderlaag voor *Vlieland* ontbreekt bruikbare informatie, ofschoon de indruk bestaat dat hier de onderlaag wel degelijk aan erosie onderhevig is. Bij de opstelling van de balans is veiligheidshalve uitgegaan van een verplaatsing van -4 tot +2 m/jaar (-1 ± 3 m/jaar). Voor het totale vak levert dit een verwacht jaarlijks verlies op van 0,1 Mm³.

Voor *Terschelling* is eveneens de ontwikkeling van de NAP-10m-dieptelijn bekeken. In de rechterhelft van het beschouwde kustvak lijkt (conform de beweging van de bovenlaag) sprake te zijn van een zeewaartse verplaatsing van deze dieptelijn met maximaal orde 10 m op jaarbasis. In de tabel is uitgegaan van (1 ± 3) m/jaar als karakteristiek vakgemiddelde. Dit levert

voor het totale vak een jaarlijkse winst op van $0,2 \text{ Mm}^3$.

Met betrekking tot het gedrag van de vooroever van *Ameland* is nauwelijks bruikbare informatie voorhanden. Gezien het min of meer stabiele gedrag van de totale bovenlaag als som van erosie en aanzanding, zal er netto in de onderlaag eveneens niet als te veel gebeuren. Gezien de onzekerheid lijkt de aanname van een forse spreiding echter raadzaam. Bij de opstelling van de balansdata is derhalve uitgegaan van $(0 \pm 3) \text{ m/jaar}$ als karakteristieke trend.

Voor de vooroever van *Schiermonnikoog* geldt vanwege het ontbreken van betrouwbare informatie een soortgelijke benadering resulterend in $(0 \pm 3) \text{ m/jaar}$.

Sommatie van de balansdata maakt dat het voor wat betreft de onderlaag gaat om $0,7 \text{ Mm}^3/\text{jaar}$. Uitgaande van de boven- en ondergrens van de 'm/j-waarden' wordt als betrouwbaarheidsindicatie circa $1,5 \text{ Mm}^3/\text{jaar}$ gevonden, hetgeen de onzekerheid met betrekking tot deze getalswaarden nog eens benadrukt.

Beschouwing van de verwachtingswaarde leert dat het hierbij gaat om een voor het totale kustvak gemiddelde erosie van $9 \text{ m}^3/\text{m}^1/\text{jaar}$, ofwel $0,7 \text{ m/jaar}$. Deze laatste waarde sluit goed aan bij de gemiddelde getalswaarden voor de bovenlaag ($0,9 \text{ m/jaar}$).

6.2.6 Balansdata per buitendeltasegment

Per buitendelta is de totale dieptezone tot de NAP-20m-dieptelijn beschouwd, resulterend in een 18 m dikke laag (beneden $Z_2(x)$ op NAP-2m). De in Tabel 6.2.3 gegeven balansdata zijn primair gebaseerd op interpretatie van grootschalige volumeveranderingen als gepresenteerd in verschillende RWS-rapporten (o.a. Studiedienst Hoorn).

nr.	segment	interval [km]		km-raai		l [km]	balansdata		opmerkingen
		van	tot	van	tot		[Mm ³ /jaar]	[m/jaar]	
2	MD	-2	16	9.08	12.30	18	-3,0/-2,0	-12/-6	
5	EC	32	42	28.80	39.00	10	+0,3/+0,5	+2/+3	
8	VS	52	67	49.15	5.20	15	-1,5/-1,0	-5/-3	
11	BD	84	99	22.60	6.80	15	-1,0/-0,5	-4/-2	
14	FZ	115	132	22.80	5.60	17	-1,5/-1,0	-5/-3	
						75	-5,4		

Tabel 6.2.3 Overzicht balansdata buitendelta's.

Een korte toelichting op de totstandkoming van deze getalswaarden is gegeven in het volgende.

Voor de buitendelta van het *Marsdiep* is er sprake van een doorgaande erosie van de totale buitendelta [Glim e.a., 1988]. Op basis van de verwerking van lodingsgegevens lijkt er daarbij sprake van een enigszins afnemende erosiesnelheid. Tussen 1950 en 1973 orde $5,2 \text{ Mm}^3/\text{jaar}$ afnemend tot $3,0 \text{ Mm}^3/\text{jaar}$ in de periode 1973 tot 1981. Voor de opstelling van de globale balans is uitgegaan van een gemiddelde erosie van $2,0$ à $3,0 \text{ Mm}^3$ op jaarbasis. Dit leidt tot een gemiddelde erosiesnelheid van 6 à 12 m/jaar .

In de buitendelta van het *Eijerlandse Gat* lijkt op basis van de kuberingsgegevens enige sedimentatie plaats te vinden [Glim e.a., 1990]. Voor de periode 1971-1976 $0,6 \text{ Mm}^3/\text{jaar}$ afnemend tot $0,5 \text{ Mm}^3/\text{jaar}$ in de periode 1976-1981 [Kool en Lieshout, 1991].

Voor de globale balans is uitgegaan van een aanzanding in de orde van $0,3$ à $0,5 \text{ Mm}^3/\text{jaar}$.

Voor de ontwikkeling van het *Vlie* is uitgegaan van de volumina in 1972 en 1982 resulterend in een tijdsgemiddelde erosie van $1,3 \text{ Mm}^3/\text{jaar}$ [Glim e.a., 1986]. Deze waarde blijft iets achter bij de trend welke voor de periode 1933-1982 werd gevonden ($2,8 \text{ Mm}^3/\text{jaar}$). Beschouwing van de individuele getalswaarden op het tijdstraject 1972-1974-1976-1978-1980-1982 laat zien dat er een grote variatie aanwezig is (tussen $-16,3$ en $+9,4 \text{ Mm}^3/\text{jaar}$). Bij de globale balans is

uitgegaan van $-1,0$ à $-1,5$ Mm^3/jaar .

De ontwikkeling van de buitendelta van het *Borndiep* is gebaseerd op resultaten uit [Boer e.a., 1991] en [Rakhorst e.a., 1993]. De resultaten voor de periode 1974-1979 en 1979-1989 bedragen respectievelijk $+3,2$ en $-2,4$ Mm^3/jaar . Voor de totale periode 1974-1989 levert dit een gemiddelde erosie op van $0,5$ Mm^3/jaar . Rekening houdend met een mogelijk iets grotere erosie in de laatste periode is bij de opstelling van de globale balans uitgegaan van een erosie ter grootte van $0,5$ à $1,0$ Mm^3 op jaarbasis.

Voor het *Friesche Zeegat* is uitgegaan van de balansdata van 1972 en 1982, resulterend in een gemiddelde erosie van $1,0$ à $1,5$ Mm^3/jaar [Oost en de Haas, 1993]. Deze waarde sluit aan bij data van Biegel: $-1,22$ Mm^3/jaar voor de periode 1970-1987 [Biegel, 1992].

Sommatie van de gegeven balanswaarden resulteert uiteindelijk in een totaal verlies ter grootte van $(5,4 \pm 1,4)$ Mm^3/jaar . Bij het gelijkmatig volgen van boven- en onderlaag bedraagt het bovenlaagaandeel circa 30%. Als wordt uitgegaan van de veronderstelling dat de gemiddelde beweging in de onderlaag iets achterblijft bij die van de bovenlaag, dan kan voor dit percentage 30 à 50% worden aangehouden. Zonder rekening te houden met de prototypespreiding van 25%, betekent dit voor de verdeling over boven- en onderlaag dat de gemiddelde erosie in de bovenlaag $(2,1 \pm 0,6)$ Mm^3/jaar en in de onderlaag $(3,3 \pm 0,7)$ Mm^3/jaar bedraagt.

De gemiddelde erosiesnelheid van de buitendelta's bedraagt (4 ± 1) m/jaar. Deze overtreft de gemiddelde erosie van de aanliggende kustvakken welke orde 1 m/jaar bedraagt. Hieruit zou reeds kunnen worden afgeleid dat de erosie van de Waddenkust voornamelijk is geconcentreerd rond de zeegaten.

6.2.7 Samenstelling globale prototypebalans

Sommatie van de prototypebalansdata als gegeven in Tabel 6.2.1 t/m 6.2.3 levert netto verlies uit het totale kustvak op van $(7,2 \pm 3,0)$ Mm^3/jaar . De relatief grote onzekerheid in deze getalswaarde is vooral gerelateerd aan de onbekendheid met het gedrag van de diepere lagen (Tabel 6.2.2).

Bij beschouwing van de verdeling van dit verlies over land- en deltavakken blijkt dat 75% van het verlies ten laste komt van de buitendelta's (respectievelijk $1,8$ en $5,4$ Mm^3/jaar). Voor wat betreft de verdeling van de erosie over boven- en onderlaag (respectievelijk $3,2$ en $4,0$ Mm^3/jaar), blijkt dat 50 à 60% ten laste komt van de onderlaag.

In Figuur 6.2.1 is de langsvariatie van de gemiddelde verplaatsingssnelheid in zowel de boven- als de onderlaag gegeven. Deze manier van presenteren maakt dat de samenhang tussen het gedrag van de verschillende kustsecties duidelijk wordt. Naast het grootschalige verloop van de verwachtingswaarde van de mobiliteit is ook een onzekerheidsband gegeven.

Deze figuren zullen de basis vormen voor de nadere afregeling van het rekenmodel.

Nadere beschouwing van deze figuur laat zien dat er globaal gezien voornamelijk aan de noordwestzijde van de Waddenkust (kop van Noord-Holland tot Eijerlandse Gat) sprake is van ernstige kustachteruitgang (zeg tot orde 5 m/jaar). Ook lijkt de erosie veelal geconcentreerd te zijn ter plaatse van de zeegaten en is er op het niveau van eilanden vaak een zeker neiging tot globale verdraaiing door aanzanding van de westzijde en erosie aan de oostzijde.

6.2.8 Samenstelling globale modelbalans

De samenstelling van de globale modelbalans is uitgewerkt in Tabel 6.2.4, waarin de in Hoofdstuk 5 afgeleide modelrandvoorwaarden zijn samengebracht.

bijdrage	specificatie	Mm ³ /jaar	opmerkingen
langsrichting	inkomend (links)	+1,1	
	uitgaand (rechts)	-2,1	
dwarsrichting	aanreiking vanaf diep water	+0,8	
	overstuiwingsverlies	-0,2	
zeegaten	gem. totale sedimentvraag	-12,7	als vraag volledig wordt gehonoreerd (zie Sectie 5.8.4)
suppleties	gemiddelde toevoer	+1,3	
	totaal	-11,8	

Tabel 6.2.4 Samenstelling globale balans op basis van randtransport (modelwaarden).

Het netto effect is een sommatie van de netto bijdragen van het langs- en dwarstransport (incl. zeegaten) en de uitgevoerde suppleties. In het totaal gaat het hierbij om een verlies ter grootte van 11,8 Mm³/jaar. De grootte van dit verlies wordt voor het overgrote deel bepaald door de grote zandvraag vanuit de Waddenzee (zie Tabel 5.7.2). De som van de overige bijdragen is zelfs positief, te weten +0,9 Mm³/jaar.

6.2.9 Confrontatie balansdata

Vergelijking tussen de netto balansdata laat zien dat de waargenomen jaarlijkse mutatie van 7,2 Mm³/jaar (verwachtingswaarde) achter blijft bij het netto resultaat van de initiële modelinstelling van -11,8 Mm³/jaar. Ofschoon er natuurlijk sprake is van een aanzienlijke spreiding in de prototypewaarden (zeg 4 tot 10 Mm³/jaar), lijkt het resultaat van de modelinstelling aanleiding te geven tot een relatief te groot verlies van materiaal uit de Waddenkust.

Gezien de onzekerheid in en de relatieve bijdrage van de zandvraag vanuit de Waddenzee is voor het grotendeels opheffen van dit verschil gebruik gemaakt van de eerder geïntroduceerde τ -parameter (zie Sectie 3.6.8). Deze geeft de verhouding aan tussen het werkelijke netto transport en de grootte van de feitelijke zandvraag. Teneinde het verschil van 4,6 Mm³/jaar te verrekenen is voor deze correctiefactor de afgeronde (in feite gewogen) waarde van 0,7 aangehouden. Deze waarde is fysisch te verklaren uit het percentage zand dat deel uitmaakt van de aangenomen sedimentvraag (zie ook Sectie 5.7.4). Hiermee wordt het effectieve netto transport door de zeegaten gelijk aan 8,9 Mm³/jaar in plaats van 12,7 Mm³/jaar. Voor de globale balans resulteert dit in een netto verlies van 8,0 Mm³/jaar, dit vergelijkbaar met de eerder vastgestelde prototypewaarde van $(7,2 \pm 3,0)$ Mm³/jaar. Beschouwing van de onderlinge verhouding tussen de in Tabel 5.7.2 gegeven gemiddelde zandvraag en de schatting van de erosie van de buitendelta's (zie Tabel 6.2.3) lijkt deze aanname te onderbouwen.

6.2.10 Conclusies

Op basis van de samengestelde globale balans is de grootte van het op te geven netto transport door de zeegaten enigszins naar beneden bijgesteld. De globale kinematische modelbalans is nu in overeenstemming met prototype data.

Uitgaande van de veronderstelling dat de verdeling van de transporten over de verschillende randen correct is kan vervolgens het model intern worden afgeregeld.

Aanbevolen wordt om bij de voorspellingen het effect van de exacte grootte van de correctiefactor nader te kwantificeren.

6.3 Gevoeligheidsonderzoek

6.3.1 Algemeen

Een belangrijk onderdeel van de modelafregeling betreft het onderzoek naar de gevoeligheid van het rekenmodel voor de invoer. Mede om te komen tot een verdere afregeling van het model is het immers gewenst inzicht te hebben in de gevolgen van het bijstellen van de invoer, dit opdat met enig beleid aan de verschillende 'knoppen' kan worden gedraaid.

6.3.2 Gevolgde methode

Bij deze systematische variatie van de modelinvoer is steeds uitgegaan van de in Hoofdstuk 5 gegeven parameterinstelling.

Het effect van een afwijkende input is vervolgens onderzocht door voor zowel de ondergrens als de bovengrens de modelresultaten te vergelijken met die van het referentiegeval.

Een overzicht van de aard van de uitgevoerde gevoeligheidsberekeningen is gegeven in Tabel 6.3.1.

code	onderzocht aspect	opmerkingen
G0	-	basisinstelling (=referentie)
G1*	initiële geometrie	invloed exacte lijnposities
G2*	langtransportparameters	invloed (lokale) aanpassing langtransportconstanten en nultransporthoeken
G3*	dwartransportparameters	invloed aanpassing dwartransportconstanten en evenwichtsafstanden
G4*	zeegatparameters	invloed diverse parameters
G5*	zandvraag zeegaten	effect verhouding netto transport/zandvraag
G6*	suppleties	effect suppleties
G7*	rekenparameters	effect rekengrid, tijdstap en positie modelranden

Tabel 6.3.1 *Overzicht uitgevoerde gevoeligheidsberekeningen.*

6.3.3 Referentiegeval en toetsingsgrondslag

Uitgangspunt voor het gevoeligheidsonderzoek is de basisinvoer van het model als beschreven in Hoofdstuk 5, inclusief de op basis van de globale balans gekwantificeerde correctiefactor voor de zandvraag in de zeegaten (zie Sectie 6.2.9).

Voor de kwantificering van de modelresultaten is primair gebruik gemaakt van tijdsgemiddelde vakwaarden, te weten de over de periode 1978-1990 gemiddelde verplaatsingssnelheid van de bovenlaag, dit uitgedrukt in m/j.

Enkele opmerkingen aangaande de meest relevante resultaten zijn samengebracht in de volgende subsecties.

6.3.4 Effect initiële geometrie

De initiële ligging van de verschillende kustlijnen heeft natuurlijk effect op de kustlijnontwikkeling. Bij het beschouwen van de kustlijnbeving in de zin van momentane of tijdsgemiddelde kustlijnverplaatsingen heeft de exacte initiële geometrie echter minder invloed. Dit geldt nog sterker voor de situatie waarbij er wordt gekeken naar tijds- en ruimtgemiddelde vakgrootheden.

6.3.5 Effect langtransportparameters

Daar de grootschalige erosie voor een belangrijk deel wordt veroorzaakt door de met het langtransport samenhangende transportgradiënten heeft een aanpassing van het langtransport direct effect op de kustlijnontwikkeling. Lokale aanpassing van de relevante parameters maakt dat de lokale kustlijnontwikkeling iets kan worden bijgestuurd.

6.3.6 Effect dwartransportparameters

Een wijziging in de grootte van de dwartransportconstanten heeft, zeker ten opzichte van een wijziging in de evenwichtsafstand relatief weinig effect. Conform Sectie 4.3 kan voor een gegeven waarde van de dwartransportconstante een initiële verplaatsing van een bepaalde laag worden bereikt door het iets aanpassen van de evenwichtsafstand.

6.3.7 Effect sturingsparameters zeegaten

Vergelijking van de resultaten voor verschillende waarden van de geometrie- en transportgerelateerde sturingsparameters leert dat het er geen significant effect optreedt op de algehele kustlijnverplaatsing. Voor de α - en de β -waarde zijn deze effecten zelfs marginaal.

6.3.8 Effect netto transport zeegaten

De grootte van het netto transport door de zeegaten heeft, zoals al duidelijk werd bij de opstelling van de globale kinematische balanswaarden, grote invloed op de kustontwikkeling. Reductie van de grootte van het netto transport voor een gegeven zeegat door verkleining van de τ -waarde (zie Sectie 3.7), leidt tot verminderde erosie van de buitendelta. Deze invloed blijft echter veelal beperkt tot de directe omgeving van het betrokken zeegat.

6.3.9 Effect suppleties

De uitvoering van suppleties heeft lokaal gezien een relatief gunstig effect op de gemiddelde kustlijnverplaatsing, iets wat duidelijk blijkt uit de vergelijking tussen een de resultaten van een berekening met (de basissom) en een berekening zonder suppleties.

6.3.10 Effect rekenparameters

Het gebruikte rekengrid en de lokatie van de modelranden hebben (ook voor dit specifieke rekengeval) binnen zekere grenzen geen invloed op de ontwikkeling van de kust (zie ook Sectie 4.8).

6.3.11 Conclusies gevoeligheden

Samenvattend kan worden geconcludeerd dat voor de verdere afregeling met name gebruik gemaakt zal moeten worden van een lokale aanpassing van de beide langtransportparameters en van de evenwichtsafstand.

6.4 Afregeling op kustsectie-niveau

6.4.1 Inleiding

Uitgaande van een correcte afregeling op het globale niveau (zie Sectie 6.2) is in deze sectie de nadere afregeling op 'niveau 3' uitgewerkt.

6.4.2 Nadere uitwerking

Bij de verdere interne afregeling van het rekenmodel is getracht de ontwikkeling van de kust in de periode van 1965 tot 1990 te simuleren, dit bij een dergelijke instelling van de parameters dat de trendwaarden over de tweede helft gelijkenis vertonen met de prototypewaarden.

Bij de afregeling op het niveau van kustsecties is gebruik gemaakt van de in Tabel 6.2.1 grootschalige segmentering en de in Tabel 6.2.1 t/m 6.2.3 verzamelde balansdata.

Hiertoe zijn de modeluitkomsten zijn betrokken op de periode 1978 t/m 1990 en vergeleken met de in Figuur 6.2.1 gegeven langsverdeling van de mobiliteit.

6.4.3 Nadere afregeling

Naar aanleiding van de resultaten van de eerste testberekeningen werd geconcludeerd dat de globale modelinstelling correct was, maar dat er met name bij de buitendelta's van het Marsdiep en de Vliestroom sprake was van een onjuiste weergave van het gedrag. De erosie van de buitendelta van het Zeegat van Texel bleef achter bij de waargenomen trend terwijl bij het Zeegat van Terschelling het tegenovergestelde het geval was. Nader beschouwen van de verhouding tussen de effectieve zandvraag voor het Marsdiep en die voor het Vlie ($3,4/2,8 = 1,2$) laat zien dat deze ver achter blijft bij de verhouding tussen de erosie in de respectievelijke buitendelta's ($2,5/1,25 = 2,0$) of die van de aanzanding in de respectievelijke vloedkommen ($4,5/2,6 = 1,7$).

Om hiervoor te corrigeren is de onderlinge verhouding aangepast door een verschil aan te brengen in de gebruikte τ -waarden. Uitgaande van een instelling van $\tau_g = 0,7$ voor elk zeegat ($g = 1, \dots, 6$; zie kolom (1) in Tabel 6.4.1.) is deze voor het Marsdiep vergroot tot $\tau_I = 0,8$ en die voor het Vlie teruggebracht tot $\tau_3 = 0,6$. Deze resultaten zijn samengebracht in de met (2) aangegeven kolom.

Een overzicht van de uiteindelijk gebruikte waarden is gegeven in Tabel 6.4.1.

zeegat (ebgeul)	vaststelling effectieve zandvraag [Mm ³ /jaar]			opmerkingen
	sedimentvraag (0)	netto transport (1)	netto transport (2)	
1 Marsdiep MD	4,9	3,4	3,8	(1)->(2) toename
2 Engelsmangot EG	0,7	0,5	0,5	
3 Vliestroom VS	4,0	2,8	2,4	(1)->(2) reductie
4 Borndiep BD	1,3	0,9	0,9	
5/6 Pinkegat/Zoutk.laag FZ	1,8	1,3	1,3	
totalen	12,7	8,9	8,9	

Tabel 6.4.1 *Overzicht netto transport van zeegaten in het Waddenmodel (1978-1990).*

Naast het doorvoeren van deze correctie zijn nog een aantal andere kleinere aanpassingen aan de modelinvoer aangebracht. Het finale resultaat van deze bewerkingen is samengebracht in Figuur 6.4.1 en toont een op hoofdlijnen goede reproductie van het waargenomen kustgedrag.

6.4.4 Conclusies

Bij de huidige instelling van de verschillende parameters is er een redelijke overeenstemming bereikt tussen de vakgemiddelde kustlijnbeving. Uitgaande van deze instelling is in de volgende sectie het model nader afgeregeld door de tijdsgemiddelde kustlijnbeving op raai-niveau te beschouwen.

6.5 Nadere afregeling op raai-niveau

6.5.1 Inleiding

Bij een nadere afregeling van het rekenmodel op raai-niveau (of feitelijk het niveau van het rekengrid) is getracht te komen tot een nadere afregeling van de meer kleinschalige kustlijnonwikkeling in de bovenlaag (boven NAP-7m).

6.5.2 Nadere uitwerking

Bij de afregeling op raai-niveau is gebruik gemaakt met per km-raai gemiddelde trend (uitgedrukt in m¹/jaar), dit gebaseerd op de eerste resultaten van de JARKUS-analyse [Bouwmeester, 1994]. Deze resultaten omvatten per km-raai de 10- en 30-jarige trendwaarden voor een drietal verschillende lagen, dit echter uitgedrukt in 'm³/m¹/jaar-waarden'. De omzetting van deze resultaten naar 'm/j-waarden' is voor zowel de duinlaag (boven NAP+3m) als de onderlaag (tussen NAP-1m en NAP-6m) niet goed mogelijk. Ten aanzien van de bovenlaag is de betrokken duinhoogte en daarmee de feitelijke laagdikte per raai onbekend. Voor de onderlaag geldt dat de ondergrens samenvalt met de meest zeewaartse grens van de JARKUS-raai. Omdat in een groot aantal gevallen het NAP-6m-niveau niet gehaald wordt en de betrokken laagdikte per raai varieert is deze vertaling eveneens problematisch. De getalswaarden voor de altijd 4m dikke strandlaag hebben dit probleem niet en zijn direct vertaalbaar naar 'm/jaar-waarden'. Bovendien kan het tijdsgemiddelde gedrag van deze laag als min of meer karakteristiek voor de bovenlaag worden beschouwd.

Deze 'strandlaag-waarden' zijn dan ook voor de verdere analyse gebruikt. Hiertoe zijn de afgeleide getalswaarden per (prototype)raai, via een eerder gespecificeerde conversieslag, omgezet naar waarden op het rekengrid, dit voor zover betrekking hebbende op de echte kustvakken. Uiteindelijk levert een goede indicatie omtrent het meer samenhangende grootschalige verloop van deze trend op.

De resultaten zijn gegeven in Figuur 6.5.1, waarin achtereenvolgens de langsvariatie in de 30-jarige en de 10-jarige trend en het verschil tussen deze trendwaarden.

Zowel de 30-jarige als de 10-jarige trendwaarden slingeren rond de eerder gedefinieerde vakgemiddelde waarden (zie Figuur 6.2.1). Opvallend is de daarbij ogenschijnlijk geringere erosie op Texel. Dit kan echter worden verklaard uit het feit dat hier de erosie met name plaats vindt in de diepere lagen en dat er bovendien sprake is van significante suppleties. Dit laatste

maakt ook dat zowel voor Noord-Holland als voor Texel de 10-jarige trend gunstiger uitvalt dan de 30-jarige trend (onderste figuur).

Verder is er voor zowel Vlieland, Terschelling, Ameland als Schiermonnikoog sprake van een aanzanding aan de west- en erosie aan de oostkant. Tot besluit valt op dat er ter hoogte van de Slufter op Texel een discontinuïteit in de trendwaarden aanwezig is. Op dit niveau werkt deze slufter blijkbaar als een put.

6.5.3 Resultaten

Teneinde te komen tot een nette confrontatie is voor de vergelijking met de resultaten van het rekenmodel eenzelfde resultaat gegenereerd, te weten het langsverloop van de over het tijdvak 1978-1990 tijdsgemiddelde balans per rekenpunt, dit eveneens uitgedrukt in m/jaar.

De resultaten van de afregeling zijn gegeven in Figuur 6.5.2, waarin naast de eerder gegeven 30-en 10-jarige trendwaarden uit het prototype ook het modelresultaat is gegeven.

Teneinde de projectvoortgang niet te veel te stagneren werd de hierbij bereikte mate van afregeling als voldoende gekwantificeerd.

6.5.4 Conclusies

De nadere afregeling op raainiveau heeft geresulteerd in een voor de voorspellingen bruikbare modelinstelling. Hierbij is het mobiliteitspatroon binnen de kustvakken zo goed mogelijk gereproduceerd, dit zonder de in Hoofdstuk 5 afgeleide initiële modelinstelling te veel geweld aan te doen.

6.6 Conclusies en aanbevelingen

6.6.1 Conclusies

Blijkens de resultaten van de afregelingsexercitie lijkt de voorspellende waarde van het model voldoende om te komen tot inzicht in de grootschalige kustvoorspelling.

Hierbij moet echter wel rekening worden gehouden met de onzekerheden in de sturende parameters.

6.6.2 Aanbevelingen

Aanbevolen wordt dan ook om voor elk van de nog te definiëren basisscenario's niet te volstaan met een enkele som, maar met een serie sommen waarbij op een systematische wijze de voornaamste stuurparameters enigszins rond hun verwachte (gemiddelde) waarde zijn gevarieerd.

7 SPECIFICATIE SCENARIO'S

7.1 Inleiding

7.1.1 Algemeen

Uitgaande van het voor het tijdvak 1965-1978-1990 afgeregelde versie van het rekenmodel kunnen nu resultaten worden gegenereerd voor het tijdvak 1990-2040. In dit hoofdstuk zijn de uit te voeren berekeningen nader gespecificeerd. Uitgangspunt bij de invulling hiervan vormen een aantal scenario's die onder andere worden gekenmerkt door de effecten van een onderling verschillende stijgingsnelheid van de gemiddelde zeespiegel.

7.1.2 Overzicht scenario's

Als aangegeven in Tabel 7.1.1, is bij de uitgevoerde berekeningen onderscheid gemaakt tussen twee verschillende soorten van scenario's, te weten de 'spreidings-scenario's' en 'zeespiegelstijgingsscenario's'.

zeespiegelstijging		scenario	
[m/eeuw]	kwalificatie	code	toelichting
0,20	huidige stijging	Ag*	meerdere gevoeligheidsberekeningen tbv kwantificering (on)nauwkeurigheid
0,60	verwachte stijging	A	verschillende zeespiegelstijgings-scenario's waarbij de laatste het additionele effect van extra stormen betreft (stormscenario)
0,85	extreem	B	
	extreem, inclusief stormscenario	C	
		Cs	

Tabel 7.1.1 Totaaloverzicht scenario's.

Bij de eerste groep zijn, voor een voortzetting van de huidige zeespiegelstijging (conform scenario A), de effecten van kleine wijzigingen in de modelinvoer op het berekeningsresultaat gekwantificeerd. Dit is met name gedaan om, gegeven de feitelijke onzekerheid in de in Hoofdstuk 5 samengebrachte en in Sectie 6.4/5 nader aangepaste modelinvoer te vertalen in een (on)nauwkeurighedsband. Een nadere uitwerking hiervan is gegeven in Sectie 7.2.

Bij de tweede groep gaat het met name om de vooral relatieve effecten als gevolg van een van de huidige tendens afwijkende zeespiegelstijgingsnelheid. Hiertoe zijn in Sectie 7.3 een aantal aanvullende scenario's gedefinieerd.

7.2 Invulling spreidingsscenario's

7.2.1 Algemeen

Teneinde inzicht te krijgen in de betrouwbaarheid van de modelresultaten is het relatieve effect van een wijziging in de modelinvoer op het berekeningsresultaat gekwantificeerd. Voor elk van de onderscheiden parameters is, uitgaande van de basisinstelling een berekening uitgevoerd voor een of meer relatief of absoluut afwijkende instellingen, dit op basis van de geschatte onzekerheid in de feitelijke basiswaarde.

7.2.2 Overzicht spreidingsscenario's

Een overzicht van de onderscheiden scenario's (berekeningscodes) is gegeven in Tabel 7.2.1.

scenario	onderzocht aspect	opmerkingen
A	-	basisinstelling (=referentie)
Ag1*	langtransportparameters	langsverdeling kustconstanten bovenlaag en getijtransport onderlaag
Ag2*	dwarstransportparameters	toelevering diepere lagen
Ag3*	zandvraag zeegaten	invloed correctiefactor

Tabel 7.2.1 *Overzicht spreidingsscenario's.*

Mede naar aanleiding van de resultaten van eerder beschreven gevoeligheidsonderzoek zijn in dit kader de effecten van de lokale geometrie, de 'zeegatparameters' en de effecten van suppleties niet verder bekeken. Ook zijn de effecten van de diverse rekenparameters buiten beschouwing gelaten. Voor elk van de onderscheiden berekeningen is het relatieve verschil met de uitkomst van de basissom bekeken. Voor de verdere uitwerking en resultaten kan worden verwezen naar Sectie 8.3.

7.3 Zeespiegelstijgingsscenario's

7.3.1 Inleiding

De ontwikkeling van de Waddenkust hangt tenminste af van een tweetal 'externe' stuurparameters, te weten het hydraulische klimaat en de geconcentreerde uitwisseling van zand van kust, buitendelta en aanliggende kustvakken met de achterliggende vloedkom. Het hydraulische klimaat is onder andere gerelateerd aan het verwachte klimaatscenario, terwijl de zandvraag vanuit de Waddenzee mede samenhangt met het 'volgedrag' van de platen.

7.3.2 Overzicht scenario's

Als reeds gegeven in Tabel 7.1.1 is sprake van een drietal basisscenario's voor gemiddelde zeespiegelstijging, respectievelijk scenario **A**, **B** en **C**.

In het geval van scenario **A** (het huidige of beleidsscenario) gaan zowel het gemiddelde hoog- en laagwater als het basispeil met 0,20 m/eeuw omhoog.

Voor het anticiperende (verwachte) scenario **B** is sprake van 0,65 m/eeuw.

In het geval van stormscenario **Cs** is naast een meer extreme waterstandswijziging bovendien sprake van een ongunstig golf- en windklimaat. Voor de gemiddelde omstandigheden is uitgegaan van een vergroting van de significante golfhoogte op de 20m-dieptelijn van +10%, dit bij een verdraaiing van de dominante golfrichting over 10 graden in ongunstige zin.

Teneinde het additionele effect van het ongunstig golf- en windklimaat te bepalen is bovendien het **C**-scenario geïntroduceerd.

7.3.3 Inbreng gewijzigde randvoorwaarden

De wijze waarop een wijziging van de externe randvoorwaarde (het gemiddelde hydraulische klimaat) doorwerkt in het rekenmodel is op voorhand niet duidelijk. Duidelijk is wel dat een dergelijke wijziging tot uitdrukking moet komen in de transportbepalende parameters, dus op zowel het langs- als het dwarstransport, en natuurlijk in de modelrandvoorwaarden.

Een nadere uitwerking van de verwachte effecten voor scenario's **A**, **B**, **C** en **Cs** op de transportbepalende parameters is gegeven in de volgende secties.

De gewijzigde randvoorwaarde vormt nauwelijks een probleem daar de netto zandvraag als randvoorwaarde in het rekenmodel is opgenomen. Enkele opmerkingen aangaande de kwantificering van de ontwikkeling van de zandvraag van de Waddenzee zijn samengebracht in Sectie 7.7.

7.4 Effecten op het langtransport

7.4.1 Inleiding

In het volgende is het effect van een waterstandsverhoging en/of ongunstig golf- en windklimaat op de grootte van de voor het langtransport bepalende parameters uitgewerkt.

Bij de kwantificering van dit effect is uitgegaan van de veronderstelling dat de effecten van de waterstandsverhoging en het gewijzigde golf- en windklimaat onafhankelijk zijn.

7.4.2 Effect waterstandsverhoging

Voor elk van de onderscheiden zeespiegelstijgingsscenario's is sprake van een verhoging van het middenstandsvlak als gecombineerd effect van een stijging van de zeespiegel en een daling van het land.

Een en ander heeft tot gevolg dat het golf- en getij-geïnduceerde langtransport op een relatief hoger gedeelte van het dwarsprofiel zal aangrijpen. Gelet op de wijze waarop het langtransport in het rekenmodel is ingebracht zou dit betekenen dat de onderlinge verhouding tussen de langtransportconstanten voor laag 1 en laag 2 wijzigt ten gunste van het transport in de strandlaag (laag 1).

Teneinde dit effect te kwantificeren zijn voor een drietal raaien, te weten TX3, TS4 en AL2, conform Sectie 5.4 langtransportberekeningen uitgevoerd voor een vijf verschillende waterstandsverhogingen van respectievelijk 0,1, 0,2, 0,3, 0,4 en 0,5 m. Met betrekking tot de langtransportconstanten voor de strandlaag (boven het NAP-2m-niveau) blijkt in elk van de drie raaien sprake van een relatief sterke toename van de a_1 -waarde. Het overheersende langtransport in laag 2 neemt af, waardoor absoluut gezien voor het over laag 1 en 2 geïntegreerde transport nauwelijks een significante wijziging aanwezig is.

Samenvattend lijkt de effectieve mutatie gering en heeft een verhoging van de gemiddelde waterstand geen effect op de grootschalige langtransportgradiënten. Voor de scenario's A t/m C kan dus de basisinstelling gehandhaafd blijven.

7.4.3 Effect verzwaring golf- en windklimaat

Het effect van een wijziging in de golfhoogte en de golfrichting zoals dat voor scenario Cs van toepassing is, is tweeledig.

De vergroting van de diepwatergolfhoogte (met 10%; $p = 0,10$) zal leiden tot een lokale vergroting van de het golfgedreven langtransport S_x , waardoor sprake is van een vergroting van de langtransportconstanten a_j .

Uitgaande van een niet-plaats/laagafhankelijke correctiefactor K_o geldt dan:

$$a_j^*(x) = K_o a_j(x) \quad (7.4.1)$$

De orde van grootte van deze correctiefactor volgt uit de algemene CERC-formulering voor het langtransport conform:

$$S_x \propto (H_s)^\alpha \sin(2\phi_r) \quad (7.4.2)$$

waarin de golfhoogtemacht $\alpha \approx 2$ en de relatieve invalshoek $\phi_r = \phi - \phi_o$.

Omdat de langtransportconstante a per definitie gelijk is aan $dS_x/d\phi$ zal een wijziging van de golfhoogte met een factor $(1 + p)$ leiden tot een correctiefactor gelijk aan:

$$K_o = (1 + p)^\alpha \quad (7.4.3)$$

Voor $p = 0,1$ en $\alpha \approx 2$ geldt dan $K_o \approx 1,2$.

De grootte van deze factor is eveneens bepaald door uitvoering van een aantal langtransportberekeningen voor drie raaien (TX3, TS5 en AL2), waarbij de grootte van de golfhoogte telkens met 5% werd verhoogd. De resultaten laten zien dat de grootte van de langtransportconstante in de strandlaag bij een 10%'s toename van de diepwatergolfhoogte met orde 5% toeneemt. In laag 2 (van NAP-7m tot NAP-2m) bedraagt deze toename ongeveer 20%.

Conform het resultaat van de eerste oriënterende afschatting is ten behoeve van scenario Cs uitgegaan van een vergroting van 20% van de langtransportconstanten voor zowel laag 1 als laag 2.

Bij aanwezigheid van een significant aandeel van het getijgedomineerde transport heeft deze vergroting van de langtransportconstante a ook invloed op de grootte van de nultransporthoek ϕ_o . Bij een positieve getijtransportcomponent zal dit leiden tot een verkleining van deze hoek, conform:

$$\Delta \phi_o = S_{xgetij} \left(\frac{1}{K_o a} - \frac{1}{a} \right) = \frac{S_{xgetij}}{a} (1 - K_o) \quad (7.4.4)$$

Deze laatste correctie is niet toegepast.

7.4.4 Effect ongunstige verdraaiing dominante golfrichting

Een additionele verdraaiing van de golfvalsrichting over 10 graden in ongunstige zin is eenvoudig in het model in te brengen. Hiertoe is verondersteld dat de golfaanval meer uit westelijke richting zal plaatsvinden, waardoor de nultransporthoek voor laag 1 en 2 10° zal verschuiven.

7.4.5 Conclusies

Ten behoeve van scenario A t/m C kunnen de langtransportparameters ongewijzigd blijven. Voor het stormscenario Cs moeten de langtransportconstanten voor de lagen 1 en 2 met een factor 1,2 worden verhoogt en de nultransporthoek met 10° worden vergroot. Teneinde geen randeffecten te verkrijgen dient het transport over de modelranden eveneens te worden aangepast.

7.5 Effecten op het dwarstransport

7.5.1 Inleiding

In het volgende is het effect van een waterstandsverhoging en/of ongunstig golf- en windklimaat op de grootte van de voor het dwarstransport bepalende parameters uitgewerkt.

7.5.2 Effect waterstandsverhoging

Als gevolg van een verhoging van de gemiddelde waterstand zal het niveau van de overgang tussen de strandlaag en de vooroeverlaag op een relatief lager peil komen te liggen. De uitwisseling van sediment in dwarsrichting zal dan bij gelijkblijvende golfaanval veelal minder snel plaatsvinden, waardoor vermoedelijk sprake is van een fractie lagere b -waarde.

Deze afname is een functie van de waterstandsverhoging. Gezien de onzekerheid in de grootte van de dwarstransportconstanten is dit effect niet in de voorspellingen meegenomen.

Door de verhoging van de waterstand zal uiteindelijk een wijziging van het dwarsprofiel optreden. Daar uitgegaan wordt van absoluut gelijkblijvende scheidingsniveaus heeft dit invloed op de grootte van de evenwichtsafstand. Als sprake is van een algehele of gedeeltelijke verplaatsing van het evenwichtsprofiel naar een relatief hoger niveau (deze hangt immers vast aan de gemiddelde waterstand) zal het dwarsprofiel in de beschouwde laag per definitie minder steil worden en derhalve resulteren in een relatief grotere evenwichtsafstand. De mutatie in de evenwichtsafstand is daarbij een functie van de mate van zeespiegelstijging waarin de zeespiegelstijging op dit niveau doorwerkt in een verhoging van de bodemligging en natuurlijk van de reeds aanwezige niveau-gerelateerde waarde. Uitwerking van een dergelijke relatie leert dat conform de 'Bruun-regel' er sprake is van een zekere kustachteruitgang in de bovenlaag.

Een nadere uitwerking van een mogelijke methode om dit effect in het rekenmodel mee te nemen is uitgewerkt in het volgende.

7.5.3 Modelling 'Bruun-effect'

Als aangegeven in Figuur 7.5.1 zal uitgaande van een gegeven dwarsprofiel $z_b(x)$, de bodem onder invloed van een zeespiegelstijging Δh met een zekere maat worden opgehoogd tot $z_b'(x)$. Deze ophoging met $\Delta z_b(x)$ zal in principe gelijk moeten zijn aan de waterstandsverhoging Δh . Daar deze gewenste ophoging op grotere waterdiepte waarschijnlijk nooit gerealiseerd zal worden betreft dit een bovengrens, waarbij dus geldt: $\Delta z_b(x) \leq \Delta h$.

Als wordt verondersteld dat de verhouding tussen de wel gerealiseerde profielophoging $\Delta z_b(x)$ en de waterstandsverhoging Δh afhankelijk is van de waterdiepte (of eigenlijk de verhouding tussen een karakteristieke golfhoogte en de waterdiepte), dan kan de volgende relatie worden aangenomen:

$$\Delta z_b(z) = \sigma(z) \Delta h \quad (7.5.1)$$

waarin $\sigma(z)$ een verdelingsfunctie waarvoor geldt:

$$\sigma = 0 \quad \text{voor: } z > z_1 \quad (7.5.2a)$$

$$\sigma = 1 \quad \text{voor: } z = z_1 \quad (7.5.2b)$$

$$0 \leq \sigma \leq 1 \quad \text{voor: } z_5 < z < z_1 \quad (7.5.2c)$$

$$\sigma = 0 \quad \text{voor: } z \leq z_5 \quad (7.5.2d)$$

Hierbij is dus aangenomen dat het duinniveau niet wijzigt, terwijl er tussen het duinvoetniveau z_1 en het opsluitingsniveau z_5 sprake is van een geleidelijk afnemende σ -waarde.

Als gegeven in Figuur 7.5.2 is bij dit (gewenste) opgehoogde dwarsprofiel $\Delta z_b'(x)$ per laag sprake van een zekere volumetoename ΔA_j . Bij schematisatie van het prototype dwarsprofiel tot een lagenmodel, is er per laag een zeewaartse verschuiving van het zwaartepunt van elke laag aanwezig over ΔX_j . Omdat deze verschuiving voor elke afzonderlijke laag verschillend is zal de onderlinge laagafstand W_j wijzigen in W_j' .

De afleiding van de volumemutaties per laag is toegelicht in Figuur 7.5.3 en is zowel afhankelijk van de ophoging (afhankelijk van de lokale σ -waarde) als van de lokale bodemhelling s_j . Na enige uitwerking wordt gevonden:

$$\Delta A_0 = \frac{\Delta h}{2} \left(\frac{1}{s_1} \right) \Delta h \quad (\sigma_1 = 1) \quad (7.5.3a)$$

$$\Delta A_1 = \frac{\Delta h}{2} \left(\frac{1}{s_1} + \frac{\sigma_2}{s_2} \right) d_1 \quad (\sigma_1 = 1) \quad (7.5.3b)$$

$$\Delta A_2 = \frac{\Delta h}{2} \left(\frac{\sigma_2}{s_2} + \frac{\sigma_3}{s_3} \right) d_2 \quad (7.5.3c)$$

$$\Delta A_3 = \frac{\Delta h}{2} \left(\frac{\sigma_3}{s_3} + \frac{\sigma_4}{s_4} \right) d_3 \quad (7.5.3d)$$

$$\Delta A_4 = \frac{\Delta h}{2} \left(\frac{\sigma_4}{s_4} \right) d_4 \quad (\sigma_5 = 0) \quad (7.5.3e)$$

Een bruikbare schatting van de lokale bodemhelling s_j volgt uit:

$$s_1 = \frac{d_1}{2 W_1} \quad (7.5.4a)$$

$$s_2 = \frac{(d_1 + d_2)}{2 W_2} \quad (7.5.4b)$$

$$s_3 = \frac{(d_2 + d_3)}{2 W_3} \quad (7.5.4c)$$

$$s_4 = \frac{(d_3 + d_4)}{2 W_4} \quad (7.5.4d)$$

waarbij natuurlijk geldt: $s_4 \leq s_3 \leq s_2 \leq s_1$.

De uiteindelijke wijziging in de evenwichtsafstand volgt in algemene termen uit:

$$\begin{aligned} \Delta W_j &= \Delta X_j - \Delta X_{j-1} \\ &= \frac{\Delta A_j}{d_j} - \frac{\Delta A_{j-1}}{d_{j-1}} \end{aligned} \quad (7.5.5)$$

Substitutie van de volumemutaties ΔA_j conform Vgl.(7.5.3a/e), resulteert in:

$$\Delta W_1 = \frac{\Delta h}{2} \left(\frac{\sigma_2}{s_2} + \frac{(1 - \Delta h/d_0)}{s_1} \right) \quad (7.5.6a)$$

$$\Delta W_2 = \frac{\Delta h}{2} \left(\frac{\sigma_3}{s_3} - \frac{1}{s_1} \right) \quad (7.5.6b)$$

$$\Delta W_3 = \frac{\Delta h}{2} \left(\frac{\sigma_4}{s_4} - \frac{\sigma_2}{s_2} \right) \quad (7.5.6c)$$

$$\Delta W_4 = \frac{\Delta h}{2} \left(- \frac{\sigma_3}{s_3} \right) \quad (7.5.6d)$$

zodat met Vgl.(7.5.4a/d) gevonden wordt:

$$\Delta W_1 = \Delta h \left(\frac{\sigma_2 W_2}{d_1 + d_2} + \frac{(1 - \Delta h/d_0) W_1}{d_1} \right) \quad (7.5.7a)$$

$$\Delta W_2 = \Delta h \left(\frac{\sigma_3 W_3}{d_2 + d_3} - \frac{W_1}{d_1} \right) \quad (7.5.7b)$$

$$\Delta W_3 = \Delta h \left(\frac{\sigma_4 W_4}{d_3 + d_4} - \frac{\sigma_2 W_2}{d_1 + d_2} \right) \quad (7.5.7c)$$

$$\Delta W_4 = \Delta h \left(\frac{\sigma_3 W_3}{d_2 + d_3} \right) \quad (7.5.7d)$$

waarbij voor $\Delta h > 0$ het profiel ter hoogte van $z = z_1$ verflauwt ($\Delta W_1 > 0$) en ter hoogte van $z = z_4$ steiler wordt ($\Delta W_4 < 0$).

In het rekenmodel dient het verloop voor de tussenliggende σ -waarden te worden opgegeven: σ_j voor $j=2, \dots, 4$. De bijbehorende mutaties in de evenwichtsafstand liggen daarna vast en zijn direct gekoppeld aan de momentane grootte van de waterstandstijging. De tijdschaal waarop het profiel zich vervolgens aanpast hangt af van de grootte van de dwarstransportconstanten.

7.5.4 Effect vergroting dominante golfhoogte

Een vergroting van de dominante golfhoogte zal aanleiding geven tot een intensivering van het dwarstransport en daarmee in een toename van de dwarstransportconstante b in met name de bovenlaag. Gegeven de onbekendheid met de feitelijke afhankelijkheid tussen golfhoogte en

dwarstransportconstante is hier geen kwantitatieve invulling aan gegeven.

Uitgaande van de veronderstelling dat een grotere golf primair een zeewaartse verlenging van het evenwichtsprofiel tot gevolg heeft, heeft een dergelijke wijziging waarschijnlijk geen invloed op de grootte van de evenwichtsafstand W .

7.5.5 Effect verdraaiing golfrichting

Een kleine verdraaiing van de dominante golfrichting heeft geen significante invloed op de grootte van het dwarstransport. De b -waarde blijft hierdoor dus ongewijzigd, iets wat ook geldt voor de W -waarde.

7.5.6 Conclusies

Voor de scenario's waarbij sprake is van een alleen een stijging van de waterstand (A, B en C), is vooralsnog uitgegaan van gelijkblijvende waarden van de dwarstransportconstanten en aangepaste evenwichtsafstanden. Gezien de onzekerheid aangaande zowel het echte fysische effect van zeespiegelstijging als de methode waarop hier dit effect in rekening is gebracht wordt aanbevolen om dit 'Bruun-effect' als aanvullend en dus afzonderlijk kwantificeerbaar scenario in de voorspellingen mee te nemen.

In het geval dat sprake is van een toename van de golfaanval (Cs) is uitgegaan van een verder ongewijzigde grootte van de beide parameters.

7.6 Effecten op het transport door het zeegat

7.6.1 Inleiding

In het volgende zijn de effecten op de geometrie- en transportbepalende parameters voor het zeegat besproken.

7.6.2 Geometrie-gerelateerde parameters

Er wordt verondersteld dat de globale vorm van de buitendelta onafhankelijk is van de grootte van de zeespiegelstijgingssnelheid.

Een relatieve toename van de golfaanval zou aanleiding kunnen geven tot een minder geprononceerde vorm van de buitendelta, de λ_r -waarde. Dit mogelijke effect is echter niet meegenomen.

7.6.3 Transport-gerelateerde parameters

Met betrekking tot de transport-gerelateerde stuurparameters α en β is aangenomen dat deze onafhankelijk zijn van het beschouwde scenario.

7.6.4 Conclusies

Bij de berekeningen is verondersteld dat de afregelingsparameters voor de zeegaten niet beïnvloed worden door de mate van zeespiegelstijging. Ook voor wat betreft de invloed van een toename van de golfaanval is hiervan uitgegaan.

De netto zandvraag in elk zeegat komt in de volgende sectie aan de orde.

7.7 Zandvraag vloedkommen

7.7.1 Inleiding

Voor de bepaling van de toekomstige netto zandvraag voor elk van de vloedkommen per scenario van zeespiegelstijging (resp. A, B en C) dient een aanname te worden gedaan omtrent de wijze waarop de platen reageren op een gewijzigde gemiddelde waterstand. Hierbij is aangenomen dat de platen de gemiddelde waterstand vertraagd volgen.

7.7.2 Uitwerking verwacht volgedrag

Bij het verwachte procesgedrag (resp. scenario A, B en C) is sprake van een vertraagd reageren op de toegenomen waterstand. Hierdoor neemt het plaatoppervlak af en ontstaat een (groter)

verschil tussen het actuele en het evenwichtsplaatoppervlak (resp. $A_p(t)$ en A_{pe}). De netto zandvraag S_n (in m^3/jaar) zal waarschijnlijk reageren op dit verschil volgens:

$$S_n \propto [A_{pe} - A_p(t)] \quad (7.7.1)$$

Het evenwichtsplaatoppervlak A_{pe} is hierbij afhankelijk van de grootte van het totale oppervlak van de vloedkom A_b . De grootte van de evenredigheidsfactor in een dergelijke 'gedragsvergelijking' is afhankelijk van de aanpassingssnelheid en is derhalve gerelateerd aan de tijd waarbinnen een zeker deel van het verschil wordt goedge maakt.

Voor een situatie waarbij additioneel sprake is van extra golfaanval zal de groei van de platen relatief minder snel plaatsvinden. De hiermee samenhangende zandvraag zal derhalve minder groot zijn, wat maakt dat dit voor de platen vrij ongunstige stormscenario juist relatief gunstige effecten heeft op de toeleverende eilandkusten.

Conform de resultaten van de in Appendix A gegeven detailanalyse van veldmodel-berekeningen voor het Eijerlandse Gat, zijn in principe nog twee aanvullende effecten aanwezig.

Een toename van de dominante golfaanval zal leiden tot een relatief grotere bijdrage van het vloedtransport en daarmee tot extra verliezen richting vloedkom. Voor een toename van 10% in de dominante golfhoogte leidt dit tot een 3%'s toename van het vloedtransport.

Een ongunstige verdraaiing van de dominante golfrichting over 10° heeft een kwalitatief vergelijkbaar effect (2%'s wijziging in het transport) (zie Appendix A).

In verhouding tot het eerder genoemde effect van de verminderde plaataangroei zijn beide effecten echter marginaal. Bij de berekeningen is hier dan ook verder geen rekening mee gehouden.

7.7.3 Nadere specificatie

Voor elk van de zeegaten is per scenario de tijdsontwikkeling van de netto sedimentvraag berekend [Louters en Gerritsen, 1994]. De resultaten van deze berekeningen zijn samengebracht in de reeds genoemde Figuur 5.7.1 en 5.7.2. Deze tijdsfuncties maken deel uit van de randvoorwaarden van het model. Afhankelijk van het beschouwde scenario wijzigt, uitgaande van $11,2 \text{ Mm}^3/\text{jaar}$ in 1990, de sedimentvraag de volgende 50 jaar in $10,3$ à $15,1 \text{ Mm}^3/\text{jaar}$. Rekening houdend met een correctiefactor van 0,7 ter verrekening van onder andere het slibaandeel, neemt de effectieve zandvraag toe van $7,8 \text{ Mm}^3/\text{jaar}$ tot $7,2$ à $10,6 \text{ Mm}^3/\text{jaar}$.

8 VOORSPELLINGEN

8.1 Inleiding

8.1.1 Algemeen

In dit hoofdstuk komen de resultaten en interpretatie van de met het MOBIC-WK-model uitgevoerde voorspellingen aan de orde, waarbij in eerste instantie de berekende trend in de natuurlijke kustlijnontwikkeling (als gevolg van de zandvraag onder invloed van de huidige zeespiegelstijging) zal worden besproken. Vervolgens zal worden ingegaan op de betrouwbaarheid van deze resultaten en komen de relatieve effecten van een toename in de zeespiegelstijgingssnelheid en een ongunstig golf- en windklimaat aan de orde. Ter afsluiting zal nog kort worden ingegaan op de als gevolg van het ingezette kustbeleid benodigde suppletie-inspanning.

8.1.2 Nadere uitwerking

Uitgangspunt voor de uitgevoerde berekeningen vormt de 1990-situatie, waarbij een 'doorstart' is gemaakt met het over de periode 1978-1990 afgeregeld model. De kustontwikkeling wordt hierbij in belangrijke mate gestuurd door de tijdsfuncties voor netto transport door de verschillende zeegaten (zie Sectie 5.7/6.3). De voorspellingen zijn primair gebaseerd op de interpretatie van een beperkt aantal specifieke berekeningen.

8.1.3 Overzicht berekeningen

De uitgevoerde berekeningen zijn primair gebaseerd op de in Hoofdstuk 7 gegeven scenario's en zijn, conform het in Tabel 8.1.1 gegeven overzicht, in te delen in een vijftal sets met elk een eigen doelstelling.

code	zeespiegelstijging [m/eeuw]	doelstelling
A	0,20	vaststelling (relatieve) kustlijnontwikkeling
Ag	0,20	vaststelling betrouwbaarheid
B	0,60	vaststelling relatief effect wijziging zandvraag Waddenzee
C	0,85	a.g.v. extra zeespiegelstijging
Cb	0,85	vaststelling relatief effect 'Bruun-bijdrage' a.g.v. extra zeespiegelstijging
Cs	0,85	vaststelling relatief effect toename stormaanval
An	0,20	vaststelling relatief effect kustlijnhandhaving

Tabel 8.1.1 *Totaaloverzicht uitgevoerde berekeningen.*

In de eerste plaats komt natuurlijk de ontwikkeling van de Waddenkust onder invloed van scenario A (voortzetten huidige ontwikkeling) aan de orde.

De tweede groep (scenario Ag) omvat een aantal gevoeligheidsberekeningen, gericht op de vaststelling van de mate van nauwkeurigheid van de gegenereerde modelresultaten.

Scenario B en C hebben betrekking op het (relatieve) effect van toenemende zandvraag als gevolg van extra zeespiegelstijging, waarbij de modelresultaten zullen worden vergeleken met die van scenario A. Daarnaast is het maximaal te verwachten effect van de 'Bruun-bijdrage' bepaald aan de hand van de vergelijking tussen de resultaten voor scenario Cb en C.

Het relatieve effect van een extreem golf- en windklimaat komt in scenario Cs aan de orde, waarbij de resultaten scenario C als referentie dienen. Hiertoe zijn naast het geïntegreerde scenario ook de effecten van de afzonderlijke mutaties bekeken.

In alle tot nu toe onderzochte situaties is er sprake van een (versnelde) erosie van de kust. Aan de hand van een vergelijking van de resultaten voor het basisscenario A met een suppletie-scenario An is onderzocht welke relatie bestaat tussen de optredende kusterosie en de met het beleid van kustlijnhandhaving samenhangende suppletie-inspanning.

De resultaten en interpretatie van deze vijf sets komen in respectievelijk in Sectie 8.2 t/m 8.6 aan de orde. In Sectie 8.7 zijn de voornaamste resultaten nog eens samengebracht.

8.2 Autonome ontwikkeling kustlijn

8.2.1 Algemeen

In het volgende is in meer detail de ontwikkeling van de Waddenkust voor scenario A bekeken. Hiertoe is de tijdsontwikkeling van de Waddenkust berekend voor de periode 1990-2040. In eerste instantie is daarbij gekeken naar de tijdsontwikkeling van vakgeïntegreerde grootheden. Later komen tijdsgemiddelde resultaten aan de orde.

8.2.2 Resultaten

De resultaten van de uitgevoerde berekeningen zijn samengebracht in Figuur 8.2.1 t/m 8.2.3. In de eerste figuur zijn de vakgemiddelde momentane waarden gegeven in de verplaatsingssnelheid van de bovenlaag. In de tijd gezien is er nauwelijks sprake van enige wijziging, iets wat overigens ook niet te verwachten is. De vakgemiddelde waarden zijn nog eens samengebracht in Tabel 8.2.1.

nr.	kustsegment		interval [km]		km-raai		verplaatsingssnelheid [m/jaar]			
	land	delta	van	tot	van	tot	2000	2015	2040	1990-2040
1	NH		-10	-2	17.48	9.08	-0,3	-0,3	-0,4	-0,2
2		MD	-2	16	9.08	12.30	-4,4	-4,3	-3,7	-3,7
3	TX _l		16	28	12.30	24.80	-5,0	-4,4	-4,0	-4,2
4	TX _r		28	32	24.80	28.80	-0,8	-0,2	-0,2	-0,1
5		EG	32	42	28.80	39.00	+0,3	-0,6	-1,0	-0,1
6	VL _l		42	47	39.00	44.14	-3,5	-3,0	-2,7	-3,1
7	VL _r		47	52	44.14	49.15	-2,9	-3,0	-3,1	-3,0
8		VS	52	67	49.15	5.20	-4,6	-5,1	-5,4	-4,5
9	TS _l		67	72	5.20	10.40	-4,6	-4,2	-3,7	-4,3
10	TS _r		72	84	10.40	22.60	+0,5	+0,3	+0,0	+0,5
11		BD	84	99	22.60	6.80	-2,2	-2,4	-2,5	-2,2
12	AL _l		99	105	6.80	12.80	-1,4	-1,3	-1,2	-1,2
13	AL _r		105	115	12.80	22.80	-0,1	+0,1	-0,1	+0,3
14		FZ	115	132	22.80	5.60	-3,2	-2,2	-1,0	-2,3
15	SO _l		132	136	5.60	9.60	-1,0	-1,1	-1,1	-1,1
16	SO _r		136	140	9.60	13.60	-1,9	-1,7	-1,6	-1,7
			0	140	17.48	13.60				-1,8

Tabel 8.2.1 Resultaten kustlijnontwikkeling in bovenlaag (1990-2040).

Naast een drietal momentane verplaatsingssnelheden is in de laatste kolom de tijdsgemiddelde waarde gegeven. Deze laatste zal ook worden gebruikt om de relatieve effecten van de andere scenario's te kwantificeren.

De langsvariatie in de tijdsgemiddelde (1990-2040) mobiliteit is gegeven in Figuur 8.2.2, waarbij voor de kustvakken ook de grid/raai-waarden zijn gegeven. Opvallend is de vrij sterke kustregressie aan de zuid-westkant van Texel. Ter vergelijking zijn in de figuur ook de tijdsgemiddelde waarden voor de periode 1978-1990 gegeven.

Een vergelijking van de toekomstige ontwikkeling (1990-2040) van het gedrag van de bovenlaag met de huidige trend (1978-1990) is gegeven in Figuur 8.2.3. Hierin is per kust-raai (rekengrid-niveau) de toename van de mobiliteit uitgezet. Voor kustvak Noord-Holland is er sprake van een toename van de erosie. Deze toenemende erosie wordt deels verklaart uit het in dit scenario niet doorzetten van het huidige suppletie-beleid. Bovendien zal deze teruggang door het aanwezig zijn van onder andere de Helderse Zeewering worden tegengegaan.

De erosie op Texel zal zeker in het midden- en rechterdeel versterkt doorzetten. De thans

extreme erosie aan de zuid-westpunt lijkt iets af te nemen. Voor de overige eilanden lijken de middensecties aan iets meer erosie onderhevig, dit afgezien van de situatie op Schiermonnikoog waar de huidige trend zich klaarblijkelijk voorzet.

In Tabel 8.2.2 is een overzicht gegeven van de grootschalige tijdsgemiddelde erosiewaarden (in Mm^3/jaar), waarbij het totale kustvak (Waddenkust) is opgedeeld in zowel kust- en buitendelta-secties, als in een boven- en onderlaag.

scenario	trendwaarde in Mm^3/jaar						opmerkingen
		kustvakken		buitendelta's		totaal	
A (0,2 m/eeuw)	bovenlaag	-1,9	24%	-1,1	-3,0	38%	kusterosie 1,9 Mm^3/jaar
	onderlaag	-1,0		-3,8	-4,8	62%	
	totaal	-2,9	37%	-4,9	-7,8	100%	

Tabel 8.2.2 Grootschalige erosiewaarden voor scenario A (1990-2040).

Het totale verlies uit het kuststelsel bedraagt (gemiddeld over de periode 1990-2040) $7,8 \text{ Mm}^3/\text{jaar}$. Het overgrote deel van dit verlies, te weten 63 %, is geconcentreerd in de buitendelta's, terwijl de kust (tussen de buitendelta's en boven het NAP-7m-niveau) $1,9 \text{ Mm}^3/\text{jaar}$ verlies vertoont, zijnde circa 25% van het systeemverlies.

Ter vergelijking zijn in Tabel 8.2.3 vergelijkbare getalswaarden samengebracht voor de periode 1978-1990, waarbij de balanswaarden echter 'verstoord' zijn door het uitvoeren van suppleties in deze periode.

scenario	trendwaarde in Mm^3/jaar						opmerkingen
		kustvakken		buitendelta's		totaal	
1978-1990	bovenlaag	-1,1	15%	-2,1	-3,2	45%	kusterosie 1,1 Mm^3/jaar suppleties 1,3 Mm^3/jaar
	onderlaag	-0,7		-3,3	-4,0	55%	
	totaal	-1,8	25%	-5,4	-7,2	100%	

Tabel 8.2.3 Grootschalige erosiewaarden voor huidige situatie (1978-1990).

Het verlies uit het kuststelsel zou bij afwezigheid van de suppleties (en bij het ontbreken van een relatie met de netto zandvraag; ontkoppeld systeem) $7,2 + 1,3 = 8,5 \text{ Mm}^3/\text{jaar}$ bedragen, hetgeen dus inderdaad duidt op een verdere afname van de erosie (de gestuurde zandvraag neemt in de tijd af, zie Tabel 8.2.2). Voor de gecorrigeerde kusterosie geldt een waarde die in ieder geval de waargenomen $1,1 \text{ Mm}^3/\text{jaar}$ te boven gaat maar ten hoogste gelijk is aan $1,1 + 1,3 = 2,4 \text{ Mm}^3/\text{jaar}$ ($1,9 \text{ Mm}^3/\text{jaar}$ in Tabel 8.2.2).

Ten aanzien van de fractie kust/systeem-erosie is 15% dus een echte ondergrens en 28% (= $2,4/8,5$) een bovengrens, hetgeen aansluit bij het resultaat van het A-scenario (24%).

8.3 Vaststelling betrouwbaarheid

8.3.1 Algemeen

Het mag duidelijk zijn dat de in Sectie 8.2 gegeven modelresultaten een zekere mate van onnauwkeurigheid in zich hebben.

De betrouwbaarheid van de modelresultaten hangt daarbij af van de onzekerheid in de modelinvoer en natuurlijk van de fysische correctheid van het rekenmodel zelf.

Voor wat betreft de correctheid van het model mag duidelijk zijn dat gezien de verregaande schematisatie van de onderliggende, soms nog niet geheel begrepen, fysische processen er nog veel te verbeteren valt. De kwantificering van dit aspect is voor een dergelijk rekenmodel echter niet eenvoudig.

De betrouwbaarheid van de uitkomsten hangt daarnaast natuurlijk ook af van de betrouwbaarheid van de gebruikte modelinvoer. De kwantificering van deze laatste bijdrage is in het

volgende nader uitgewerkt.

8.3.2 Nadere uitwerking

Conform het in Tabel 7.2.1 gegeven overzicht zijn uitgaande van de basisinstelling van het rekenmodel als gebruikt voor de in Sectie 8.2 gegeven voorspelling (scenario A) enkele aanvullende berekeningen uitgevoerd. In scenario's Ag1* zijn diverse mutaties op de langtransportconstanten doorgevoerd, iets wat in scenario's Ag2* voor het dwarstransport is gedaan. Scenario's Ag3* hebben betrekking op de invloed van de eerder besproken correctiefactor op de sedimentvraag (zie Sectie 5.7/6.3).

In alle gevallen is de invoer gevarieerd binnen aannemelijk veronderstelde marges.

8.3.3 Resultaten

De in Figuur 8.3.1 samengebrachte resultaten geven aan dat er de hier beschouwde tijds- en vakgemiddelde mobiliteit enigszins afhankelijk is van de exacte modelinvoer.

Beschouwing van de hierbij optredende verschillen (onderste figuur) laat echter zien dat dit het hierbij veelal gaat om relatief geringe mutaties. Het anders kwantificeren van de zandvraag van de Waddenzee (scenario Ag3) door de τ -waarde met 0,1 te wijzigen (in feite een 15%'s spreiding zijnde 1,3 Mm³/jaar) heeft daarentegen een relatief grote impact op de modelresultaten. Kwantitatief is dit echter vergelijkbaar met het effect van een afwijkend zandvraagscenario (zie volgende sectie).

8.4 Effect extra zeespiegelstijging

8.4.1 Algemeen

In het volgende komen de resultaten van scenario A t/m C en scenario Cb aan de orde. Relatief ten opzichte van het basis-scenario (A met 0,20 m/eeuw) is in de andere gevallen sprake van een snellere toename van de gemiddelde waterstand. Dit uit zich voor scenario's B en C (en Cb) in de modelrandvoorwaarden door de aanwezigheid van een relatief grotere zandvraag. Voor de periode 1990-2040 bedraagt het totale netto zandtransport (rekening houdend met de correctiefactoren) voor scenario A 376 Mm³ (gemiddeld 7,5 Mm³/jaar), terwijl er voor scenario B en C respectievelijk 430 en 459 Mm³ nodig is (8,6 en 9,2 Mm³/jaar). In het laatste geval bedraagt de relatieve toename 22% en is er gemiddeld genomen sprake van een extra vraag van 1,6 Mm³/jaar.

Een toename van de gemiddelde waterstand zal ook aanleiding geven tot een aanpassing van het dwarsprofiel. Teneinde de bijdrage van dit 'Bruun-effect' te kwantificeren is in scenario Cb dit additionele effect meegenomen (zie Sectie 7.5.3).

8.4.2 Nadere uitwerking

Bij de nadere uitwerking is in eerste instantie gekeken naar het relatieve effect van de scenario's met extra zandvraag, door vergelijking van de modelresultaten met die van het A-scenario. Hiertoe is gebruik gemaakt van de tijds- en vakgemiddelde kustlijnverplaatsing (in m/jaar) in de bovenlaag. Deze getalswaarden zijn verkregen door de tijdsgeïntegreerde toename van het volume in elk van de onderscheiden kustsecties te delen door de tijdvaklengte (50 jaar) en het oppervlak.

Het effect van een geleidelijke wijziging van het dwarsprofiel is bepaald door de resultaten van het 'Bruun-scenario' Cb te vergelijken met die van scenario C. Dit betreft tevens de maximaal te verwachten bijdrage van het 'Bruun-effect', daar het hierbij gaat om het scenario met de grootste stijgsnelheid (0,85 m/eeuw).

8.4.3 Resultaten toename zandvraag

De resultaten van de uitgevoerde berekeningen zijn gegeven in Figuur 8.4.1.

De bovenste figuur geeft hierbij de absolute resultaten voor elk van de drie scenario's. Extra zeespiegelstijging en dus additionele zandvraag resulteert in een relatief grotere achteruitgang van de kust. De getalswaarden voor het meer extreme C-scenario gaan die van het B-scenario te boven.

De onderste figuur geeft de verschillen ten opzichte van de huidige trend. De extra erosie is primair geconcentreerd in de zeegaten en is qua grootte evenredig met de extra toename van de zeespiegelstijgingsnelheid en daarmee ook met de extra zandvraag.

In Tabel 8.4.1 zijn deze resultaten vaksgewijs samengebracht.

nr.	kustsegment		interval [km]		km-raai		add. tijdsgem. verplaatsingsnelheid [m/jaar]	
	land	delta	van	tot	van	tot	0,60 ipv 0,20 m/eeuw	0,85 ipv 0,20 m/eeuw
1	NH		-10	-2	17.48	9.08	-0,0	-0,0
2		MD	-2	16	9.08	12.30	-1,4	-2,1
3		TX _l	16	28	12.30	24.80	-0,0	-0,1
4		TX _r	28	32	24.80	28.80	-0,2	-0,3
5		EG	32	42	28.80	39.00	-1,3	-2,1
6		VL _l	42	47	39.00	44.14	-0,1	-0,2
7		VL _r	47	52	44.14	49.15	-0,1	-0,1
8		VS	52	67	49.15	5.20	-1,5	-2,3
9		TS _l	67	72	5.20	10.40	-0,1	-0,1
10		TS _r	72	84	10.40	22.60	-0,0	-0,0
11		BD	84	99	22.60	6.80	-0,9	-1,4
12		AL _l	99	105	6.80	12.80	-0,0	-0,1
13		AL _r	105	115	12.80	22.80	-0,0	-0,0
14		FZ	115	132	22.80	5.60	-1,0	-1,6
15		SO _l	132	136	5.60	9.60	-0,1	-0,2
16		SO _r	136	140	9.60	13.60	-0,0	-0,0
			0	140	17.48	13.60	-0,3	-0,5

Tabel 8.4.1 Resultaten additionele kustlijnbeveiliging in bovenlaag a.g.v. toenemende zandvraag.

Kwantitatief liggen de resultaten in de lijn der verwachting. Het gaat immers maximaal om een toename van gemiddeld 1,6 Mm³ op jaarbasis. Voor het geval waarbij deze zou leiden tot een uniforme erosie van de gehele 150 km lange Waddenkust betekent dit een additioneel verlies van 11 m³/m¹/jaar. Als de onderlaag de bovenlaag zou volgen wordt op basis van een gemiddelde totale laagdikte van 24,2 m een extra achteruitgang van 0,5 m/jaar gevonden. Verwaarlozen van de capaciteit van de onderlaag levert een verdubbeling op tot orde 1 m/jaar. Rekening houdend met een gedeeltelijke concentratie van de achteruitgang ter plaatse van de zeegaten levert 2 m/jaar als orde van grootte van de maximaal mogelijke extra achteruitgang door een toenemende stijgingsnelheid op.

In Tabel 8.4.2 is voor de scenario's **A**, **B** en **C** een overzicht gegeven van de afgeronde grootschalige tijdsgemiddelde erosiewaarden (in Mm³/jaar), waarbij het totale kustvak weer is opgedeeld in zowel kust- en buitendelta-secties als in een boven- en onderlaag.

scenario	trendwaarde in Mm ³ /jaar						opmerkingen
		kustvakken		buitendelta's		totaal	
A (0,2 m/eeuw)	bovenlaag	-1,9	24%	-1,1	-3,0	38%	kusterosie 1,9 Mm ³ /jaar
	onderlaag	-1,0		-3,8	-4,8	62%	
	totaal	-2,9	37%	-4,9	-7,8	100%	
B (0,6 m/eeuw)	bovenlaag	-2,0	22%	-1,5	-3,5	39%	kusterosie 2,0 Mm ³ /jaar
	onderlaag	-1,1		-4,3	-5,4	61%	
	totaal	-3,1	35%	-5,8	-8,9	100%	
C (0,85 m/eeuw)	bovenlaag	-2,0	21%	-1,7	-3,7	39%	kusterosie 2,0 Mm ³ /jaar
	onderlaag	-1,1		-4,6	-5,7	61%	
	totaal	-3,1	33%	-6,3	-9,4	100%	

Tabel 8.4.2 Grootschalige erosiewaarden voor (zandvraag)scenario's A, B en C (periode 1990-2040).

Bij een 'zwaarder' scenario en dus toenemende zandvraag, neemt de grootschalige systeemosie toe (van 7,8 voor scenario A tot 9,4 Mm³/jaar voor scenario C. Het relatieve aandeel van de kusterosie neemt daarbij echter af (van 24 naar 21%), al is er in absolute zin nog wel sprake van een geringe toename.

In Tabel 8.4.3 is het netto effect van een vergrote zandvraag uitgedrukt door het verschil in de balanswaarden van scenario C en A te beschouwen.

scenario	trendwaardemutatie in Mm ³ /jaar						opmerkingen
		kustvakken		buitendelta's		totaal	
C - A (verschil)	bovenlaag	-0,1	6%	-0,6	-0,7	44%	extra erosie 0,1 Mm ³ /jaar
	onderlaag	-0,1		-0,8	-0,9	56%	
	totaal	-0,2	12%	-1,4	-1,6	100%	

Tabel 8.4.3 Netto effect additionele zandvraag uitgedrukt in grootschalige erosiewaarden (periode 1990-2040).

Een eventuele extra zandvraag (maximaal 1,6 Mm³/jaar) komt dus voor slechts een klein deel ten laste van de kustvakken. De extra achteruitgang zit voornamelijk in de buitendelta's (en de daarachter liggende kust). Blijkbaar fungeren de buitendelta's als een soort van buffer voor het opvangen van deze achterliggende zandvraag.

8.4.3 Resultaten bijdrage 'Bruun-effect'

De tijds- en vakgemiddelde resultaten voor de scenario's C en Cb zijn gegeven in Figuur 8.4.2. De bovenste figuur geeft hierbij de absolute resultaten voor beide scenario's. Extra zeespiegelstijging resulteert via additioneel zeewaarts gericht dwarstransport in een relatief grotere achteruitgang van de bovenlaag van de kust. In Tabel 8.4.4 zijn deze resultaten vaksgewijs samengebracht.

nr.	kustsegment		interval [km]		km-raai		'Bruun-effect' [m/jaar] (voor 0,85 m/eeuw)	opmerkingen
	land	delta	van	tot	van	tot		
1	NH		-10	-2	17.48	9.08	-0,9	
2		MD	-2	16	9.08	12.30	+0,6	
3	TX _l		16	28	12.30	24.80	-0,5	
4	TX _r		28	32	24.80	28.80	-1,1	
5		EG	32	42	28.80	39.00	+0,6	
6	VL _l		42	47	39.00	44.14	-0,6	
7	VL _r		47	52	44.14	49.15	-1,4	
8		VS	52	67	49.15	5.20	+1,6	
9	TS _l		67	72	5.20	10.40	-0,6	
10	TS _r		72	84	10.40	22.60	-0,6	
11		BD	84	99	22.60	6.80	+1,3	
12	AL _l		99	105	6.80	12.80	-0,7	
13	AL _r		105	115	12.80	22.80	-0,4	
14		FZ	115	132	22.80	5.60	+1,9	
15	SO _l		132	136	5.60	9.60	-1,0	
16	SO _r		136	140	9.60	13.60	-0,1	
			0	140	17.48	13.60	-0,3	

Tabel 8.4.4 Resultaten additionele kustlijnbeweging in bovenlaag a.g.v. 'Bruun-bijdrage'.

Deze bijdrage bedraagt voor de kustvakken maximaal orde 1 m op jaarbasis. Opvallend daarbij is dat in de bovenlaag van de buitendelta's enige winst geboekt wordt.

In Tabel 8.4.5 is voor de scenario's C en Cb een overzicht gegeven van de afgeronde grootschalige tijdsgemiddelde erosiewaarden (in Mm³/jaar), waarbij het totale kustvak weer is opgedeeld in zowel kust- en buitendelta-secties als in een boven- en onderlaag.

scenario	trendwaarde in Mm ³ /jaar						opmerkingen	
		kustvakken		buitendelta's		totaal		
C	bovenlaag	-2,0	21%	-1,7		-3,7	39%	kusterosie 2,0 Mm ³ /jaar
	onderlaag	-1,1		-4,6		-5,7	61%	
	totaal	-3,1	33%	-6,3	67%	-9,4	100%	
Cb (Bruun-effect)	bovenlaag	-2,9	31%	-1,3		-4,2	45%	kusterosie 2,9 Mm ³ /jaar
	onderlaag	-0,4		-4,8		-5,2	55%	
	totaal	-3,3	35%	-6,1	65%	-9,4	100%	

Tabel 8.4.5 Grootschalige erosiewaarden voor scenario's C en Cb (periode 1990-2040).

Bij het meenemen van het 'Bruun-effect' blijft de grootschalige systeemosie natuurlijk ongewijzigd (9,4 Mm³/jaar). Het relatieve aandeel van de kusterosie neemt echter in zowel absolute als relatieve zin toe.

In Tabel 8.4.6 is het netto resultaat van de Bruun-bijdrage gekwantificeerd door het verschil in de balanswaarden van scenario C en Cb te beschouwen.

scenario	trendwaardemutatie in Mm ³ /jaar			opmerkingen	
		kustvakken	buitendelta's		totaal
Cb - C (verschil)	bovenlaag	-0,9	+0,4	-0,5	extra erosie 0,9 Mm ³ /jaar
	onderlaag	+0,7	-0,2	+0,5	
	totaal	-0,2	+0,2	0,0	

Tabel 8.4.6 *Netto effect 'Bruun-bijdrage' uitgedrukt in grootschalige erosiewaarden voor scenario C (periode 1990-2040).*

Het 'Bruun-effect' leidt vooral tot extra erosie van de kustvakken (0,9 Mm³/jaar). Deze erosie komt echter ten goede aan de onderlaag (0,7 Mm³/jaar) en aan de buitendelta's (0,2 Mm³/jaar). De kusterosie is recht evenredig met de toename in de zeespiegelstijgingsnelheid (hier voor 0,85 m/eeuw).

In hoeverre de door het model gegenereerde erosiewaarden reëel zijn mag blijken uit een eenvoudige orde-van-grootte afschatting. Bij een ophoging van een 1 km brede en 75 km lange kuststrook en een stijgsnelheid van 0,85 m/eeuw ofwel orde 0,01 m/eeuw, volgt het jaarlijks benodigde volume immers uit $0,01 \cdot 75 \cdot 10^3 \cdot 10^3$, resulterend in 0,7 à 0,8 Mm³/jaar. Deze waarde sluit goed aan bij de eerder gegeven erosie, hetgeen enig extra vertrouwen geeft in het modelresultaat.

8.5 Effect ongunstig golf- en windklimaat

8.5.1 Algemeen

In het volgende komt het resultaat van storm-scenario Cs aan de orde, waarbij een vergelijking is gemaakt met de resultaten van het C-scenario (ook 0,85 m/eeuw, maar nu zonder de effecten van een ongunstig golf- en windklimaat).

8.5.2 Nadere uitwerking

Conform het in Hoofdstuk 7 uitgewerkte scenario, uit zich een ongunstig golf- en windklimaat op drie fronten, te weten door:

- een toename van dominante golfhoogte;
- een verdraaiing van de hoek van dominante golfaanval;
- een aanpassing van de (netto) zandvraag vanuit de Waddenzee.

De 10%'s toename van de dominante golfhoogte uit zich in een 20%'s toename van de langtransportconstanten in de bovenlaag, terwijl de verdraaiing van de dominante golfrichting door een evenredige verschuiving van de nultransporthoek in rekening is gebracht.

De aanpassing van de netto zandvraag uit zich in de modelrandvoorwaarden door de aanwezigheid van een relatief geringere zandvraag. Voor de periode 1990-2040 bedraagt de totale gecorrigeerde effectieve zandvraag voor storm-scenario Cs 435 Mm³ (gemiddeld 8,7 Mm³/jaar), terwijl er voor scenario C 459 Mm³ nodig is (9,2 Mm³/jaar). De effectieve zandvraag is derhalve orde 5% lager en daarmee vergelijkbaar met die van het B-scenario.

Het storm-scenario Cs omvat het geïntegreerde resultaat van genoemde effecten. Teneinde inzicht te verkrijgen in de bijdrage van elk van deze effecten zijn, conform het in Tabel 8.5.1 gegeven overzicht, drie aanvullende scenario's onderscheiden, te weten Cs1 t/m Cs3.

code	beschouwde effecten	opmerkingen
Cs	alle effecten	vaststelling relatief effect ongunstig golf- en windklimaat
Cs1	alleen toename golfhoogte	vaststelling invloed deeeffecten
Cs2	alleen verdraaiing golfrichting	
Cs3	alleen reductie zandvraag	

Tabel 8.5.1 *Overzicht berekeningen stormscenario's.*

Verder mag duidelijk zijn dat er bij de resultaten zal worden gekeken naar optredende verschillen ten opzichte van het C-scenario. Het gaat immers om het relatieve effect van een ongunstig golf- en windklimaat.

8.5.3 Resultaten

Bij het analyseren van de verkregen resultaten is primair de tijds- en vakgemiddelde kustlijnverplaatsing (in m/jaar) in de bovenlaag in beschouwing genomen.

Het resultaat voor scenario C en Cs is gegeven in Figuur 8.5.1. Ten opzichte van het C-scenario blijkt er sprake te zijn van zowel positieve als negatieve effecten. De relatieve bijdragen van de onderscheiden effecten zijn gegeven in de onderste figuur. Vooral het enigszins vreemde sub-scenario met 10° verdraaiing van de dominante golfrichting (Cs1) geeft sterk afwijkende resultaten. In dit geval draait het netto transport in het kustvak Noord-Holland van teken om, resulterend in een extreme toename van de lokale erosie.

In Tabel 8.5.2 zijn deze resultaten vaksgewijs samengebracht.

nr.	kustsegment		interval [km]		km-raai		add. tijdsgem. verplaatsingssnelheid [m/jaar]			
	land	delta	van	tot	van	tot	totaal	golfhoogte	golfrichting	zandvraag
1	NH		-10	-2	17.48	9.08	-4,6	+0,0	-3,9	+0,0
2		MD	-2	16	9.08	12.30	+0,8	+1,1	-0,5	+0,3
3	TX _l		16	28	12.30	24.80	-0,8	-0,8	-0,0	+0,0
4	TX _r		28	32	24.80	28.80	+0,3	+0,0	+0,2	+0,0
5		EG	32	42	28.80	39.00	+1,0	+0,1	+0,2	+0,7
6	VL _l		42	47	39.00	44.14	-0,3	-0,6	+0,2	+0,1
7	VL _r		47	52	44.14	49.15	-0,3	-0,5	+0,1	+0,0
8		VS	52	67	49.15	5.20	+1,6	+0,7	+0,1	+0,8
9	TS _l		67	72	5.20	10.40	-0,6	-0,7	+0,1	+0,0
10	TS _r		72	84	10.40	22.60	+0,1	+0,0	+0,0	+0,0
11		BD	84	99	22.60	6.80	+0,6	+0,0	+0,1	+0,5
12	AL _l		99	105	6.80	12.80	-0,2	-0,3	+0,1	+0,0
13	AL _r		105	115	12.80	22.80	+0,1	+0,0	+0,1	+0,0
14		FZ	115	132	22.80	5.60	+0,7	+0,2	+0,1	+0,4
15	SO _l		132	136	5.60	9.60	-0,0	-0,1	+0,1	+0,0
16	SO _r		136	140	9.60	13.60	-0,3	-0,4	+0,1	+0,0
			0	140	17.48	13.60	-0,4	-0,1	-0,3	+0,1

Tabel 8.5.2 *Resultaten additionele kustlijnbeweging in bovenlaag voor ongunstig golf- en windklimaat.*

In Tabel 8.5.3 is voor de scenario's C en Cs een overzicht gegeven van de afgeronde grootschalige tijdsgemiddelde erosiewaarden (in Mm³/jaar).

scenario	trendwaarde in Mm ³ /jaar						opmerkingen
		kustvakken		buitendelta's		totaal	
C	bovenlaag	-2,0	21%	-1,7	-3,7	39%	kusterosie 2,0 Mm ³ /jaar
	onderlaag	-1,1		-4,6	-5,7	61%	
	totaal	-3,1	33%	-6,3	-9,4	100%	
Cs (storm-effect)	bovenlaag	-3,0	30%	-1,4	-4,4	44%	kusterosie 3,0 Mm ³ /jaar
	onderlaag	-1,5		-4,1	-5,6	56%	
	totaal	-4,5	45%	-5,5	-10,0	100%	

Tabel 8.5.3 Grootschalige erosiewaarden voor scenario's C en Cs (periode 1990-2040).

Door een ongunstige wijziging in het golfklimaat neemt de grootschalige systeumerosie iets toe. Het aandeel van de kusterosie neemt echter in zowel absolute als relatieve zin significant toe. In Tabel 8.5.4 is het netto effect van de storm-bijdrage uitgewerkt door het verschil in de balanswaarden van scenario C en Cs te beschouwen.

scenario	trendwaardemutatie in Mm ³ /jaar				opmerkingen	
		kustvakken		totaal		
Cs - C (verschil)	bovenlaag	-1,0	167%	+0,3	-0,7	extra erosie 1,0 Mm ³ /jaar
	onderlaag	-0,4		+0,5	+0,1	
	totaal	-1,4		+0,8	-0,6	

Tabel 8.5.4 Netto effect ongunstig golf- en windklimaat uitgedrukt in grootschalige erosiewaarden voor scenario Cs (periode 1990-2040).

Een ongunstige klimaatwijziging resulteert primair in extra erosie van de bovenlaag en is daarbij voornamelijk geconcentreerd in de kustvakken. De toename van de netto systeumerosie is hoofdzakelijk het gevolg van een groter verlies over de linker- en rechterbegrenzing van het totale kustvak.

8.6 Effect handhavingsbeleid

8.6.1 Algemeen

Bij geen van de tot nu toe besproken voorspellingen is rekening is gehouden met het uitvoeren van suppleties in het kader van het handhavingsbeleid. Slechts de tot 1993 uitgevoerde suppleties zijn in de berekeningen meegenomen (zie Sectie 5.8).

Bij handhaving van het kustbeleid zijn de voor de kustvakken berekende erosiewaarden in feite niet relevant, daar de voorspelde erosie door consequente uitvoering van suppleties juist wordt tegengegaan.

8.6.2 Kusterosie versus suppletiebehoefte

Er bestaat een fundamenteel onderscheid tussen (voorspelde) kusterosie en de voor kustlijnhandhaving benodigde suppletie-inspanning.

Bij stringente lokale handhaving van een zekere kustlijnligging (in feite het vasthouden van tenminste een minimaal volume in een horizontale laag rond de waterlijn) zal een deel van het aangebrachte suppletievolume uit het (eroderende) suppletievak verdwijnen.

Dit gebeurt enerzijds door verlies naar diepere lagen (door impliciete versteiling van de vooroever) en anderzijds in zijwaartse richting als gevolg van de per definitie meer geprononceerde ligging van de vast te houden kustsectie.

Ten aanzien van het verlies in dwarsrichting geldt daarbij immers dat initieel alleen de teruggang van de bovenlaag hoeft te worden tegengegaan (suppletie-inspanning gelijk aan erosie van de bovenlaag), maar dat uiteindelijk ook de teruggang van de onderlaag moet worden gecompenseerd. Bij vasthouden van de bovenlaag zal de onderlaag verder eroderen, hetgeen

leidt tot versteiling van het dwarsprofiel en daarmee tot een vergroting van het (hellingsafhankelijke) dwarstransportverlies uit de bovenlaag. Daar deze extra achteruitgang van de bovenlaag niet mag plaatsvinden dient er extra te worden gesuppleerd. Dit extra volume zal door dwarstransport over het steilere dwarsprofiel direct ten goede komen aan de onderlaag. In de eindsituatie zal de erosie van de onderlaag dan ook volledig worden gecompenseerd door de benodigde 'overmaat' aan suppletievolume.

Teneinde een zekere eroderende kustsectie met een netto verlies van E_k (uitgedrukt in Mm^3/jaar) te kunnen vasthouden, is een suppletievolume/inspanning V_n nodig dat hieraan tenminste gelijk is. De bovengrens van de benodigde suppletie-inspanning is gerelateerd aan de totale erosiewaarde van het (erosieve) kuststelsel E_s , zodat:

$$E_k < V_n < E_s \quad (8.6.1)$$

De suppletiebehoefte V_n (de te realiseren suppletie-inspanning uitgedrukt in Mm^3/jaar) zal dus per definitie groter zijn dan berekende erosievolumina, maar kleiner dan de erosie van het betrokken kuststelsel. Opgemerkt moet worden dat bij uitvoering van deze suppleties de dan optredende systeemosie E_s^* natuurlijk reduceert conform:

$$E_s^* = E_s - V_n \quad (8.6.2)$$

Vooralsnog dient een relatie te worden gelegd tussen de lokale kusterosie en de suppletiebehoefte volgens:

$$V_n = \xi E_k \quad (8.6.3)$$

waarbij voor de evenredigheidsconstante geldt $\xi > 1$. Voor de blijvende kusterosie E_k^* geldt dan:

$$E_k^* = E_k - \frac{V_n}{\xi} \quad (8.6.4)$$

waarbij bij volledige opheffing natuurlijk geldt $E_k^* = 0$.

Uit alleen dwarstransportoverwegingen zal voor de grootte van deze evenredigheidsconstante moeten gelden:

$$\xi = \frac{V_n}{E_k} \leq \frac{E_s}{E_k} \approx \frac{\bar{e} d_t}{\bar{e} d_u} = \frac{d_t}{d_u} \quad (8.6.5)$$

waarin \bar{e} de (diepte)gemiddelde kustachteruitgang (in m/jaar), d_t de totale laagdikte en d_u de dikte van de bovenlaag. Voor het onderhavige geval geldt voor de echte kustvakken $d_u = 17,1$ m en $d_t = 13$ m zodat $d_t/d_u = 30,1/17,1 = 1,76$. Voor de ξ -waarde levert dus als orde van grootte voor de bovengrens $\xi < 1,8$.

8.6.3 Aanpak

Teneinde inzicht te krijgen in de relatie tussen de voorspelde erosie in de kustvakken E_k en het suppletievolume V_n dat nodig is om juist deze erosie tegen te gaan, is in het MOBIC-model een zogenaamde 'auto-nourishment-mode' ingebouwd.

Naast een initiële kustlijnligging moet daartoe ook een kritieke ligging van de strandlijn (karakteristiek voor de laag tussen het NAP-2m- en NAP+3m-niveau) worden opgegeven. Het principe is vrij eenvoudig. Na uitvoering van een normale rekentijdstep wordt per gridpunt de momentane positie van de strandlijn vergeleken met de kritieke waarde. Voor het geval dat deze achter de kritieke waarde ligt wordt deze, door lokale toevoeging van het daartoe benodigde volume aan de rekencel, weer naar voren gebracht, een procedure die voor elke rekentijdstep wordt herhaald. Door nu per gridpunt het totaal in de tijd ingebrachte volume te sommeren, ontstaat een beeld omtrent de langsvariatie van de suppletiebehoefte. Langsintegratie over het

rekening geeft de tijdsontwikkeling van de blijkbaar gerealiseerde en dus benodigde suppletie-inspanning.

Opgemerkt moet worden dat het hierbij in feite gaat om een zeer specifieke uitwerking van het kustbeleid, te weten het herhaaldelijk uitvoeren van strandsuppleties waarbij het suppletiemateriaal afkomstig is van buiten het systeem.

Voor het maken van een vergelijking tussen de kustontwikkeling voor een situatie zonder kustlijnhandhaving en een situatie met kustlijnhandhaving is scenario **A** herhaald als suppletie-scenario **An**. Hierbij is voor de echte kustvakken (naast/tussen de buitendelta's) de strandlijnligging van 1990 als kritieke waarde aangehouden.

8.6.4 Resultaten

De resultaten van dit handhavings-scenario zijn samengebracht in Figuur 8.6.1 t/m 8.6.3. Figuur 8.6.1 heeft een overzicht van de tijdsgemiddelde suppletiebehoefte bij handhaving van de initiële kustlijn (ligging strandlaag in 1990), waarbij zowel de waarden per gridpunt (raaiwaarden) als de vakgemiddelde waarden zijn gegeven. De benodigde inspanning is maximaal bij de overgangen naar de buitendelta's. Op vak/eiland-niveau is de benodigde inspanning het grootst op Texel en bedraagt orde $100 \text{ m}^3/\text{m}^1/\text{jaar}$. In oostelijke richting neemt deze waarde verder af.

De tijdsontwikkeling van de suppletiebehoefte is gegeven in Figuur 8.6.2 en laat zien dat er sprake is van een in de tijd toenemende suppletiebehoefte. Dit sluit aan bij eerder gegeven overwegingen aangaande een zichzelf versterkende vraag.

Initieel lijkt met $1 \text{ Mm}^3/\text{jaar}$ (extra) te kunnen worden volstaan, hetgeen aansluit bij de waargenomen erosie van $1,1 \text{ Mm}^3/\text{jaar}$ in de periode 1978-1990 (zie Tabel 8.2.3). Later is er echter $4,2 \text{ Mm}^3$ op jaarbasis nodig (voor alleen Texel: $1,6 \text{ Mm}^3/\text{jaar}$). De tijdsgemiddelde suppletiebehoefte voor de gehele Waddenkust bedraagt $3,2 \text{ Mm}^3/\text{jaar}$ (160 Mm^3 in 50 jaar; 75% van de maximale behoefte in 2040).

Het effect van de kustlijnhandhaving op de mobiliteit van de bovenlaag is gegeven in Figuur 8.6.3, waarin een vergelijking is gegeven tussen de tijds- en vakgemiddelde verplaatsing van de bovenlaag voor scenario **A** en **An**. In elk der kustsecties is sprake van een sterk verminderde achteruitgang. De reductie, als uitgezet in de onderste figuur, is zodanig dat er ter plaatse van de kustvakken sprake is van opheffing van de erosieve trend. Uit deze figuur blijkt ook dat er een zijdelingse 'uitstraling' is; de buitendelta's gaan ook iets minder achteruit.

8.6.5 Interpretatie

Een nadere analyse van het 'geautomatiseerde' handhavingsbeleid volgt op basis van een overzicht van de grootschalige tijdsgemiddelde erosiewaarden als gegeven in Tabel 8.6.1.

scenario	trendwaarde in Mm^3/jaar						opmerkingen
		kustvakken		buitendelta's		totaal	
A	bovenlaag	-1,9	24%	-1,1	-3,0	38%	kusterosie $1,9 \text{ Mm}^3/\text{jaar}$
	onderlaag	-1,0		-3,8	-4,8	62%	
	totaal	-2,9	37%	-4,9	-7,8	100%	
An (handhaving)	bovenlaag	+0,1		-0,8	-0,7	15%	kusterosie $-0,1 \text{ Mm}^3/\text{jaar}$ suppleties $3,2 \text{ Mm}^3/\text{jaar}$
	onderlaag	-0,4		-3,5	-3,9	85%	
	totaal	-0,3	7%	-4,3	-4,6	100%	

Tabel 8.6.1 Grootschalige erosiewaarden voor scenario's **A** en **An** (periode 1990-2040).

Toevoeging van $3,2 \text{ Mm}^3/\text{jaar}$ maakt dat het verlies uit het kustsysteem met 40% afneemt (van 7,8 naar $4,6 \text{ Mm}^3/\text{jaar}$). De erosie in de bovenlaag wordt omgebogen in een marginale vooruitgang.

In Tabel 8.6.2 is het netto effect van de suppleties gekwantificeerd door het onderlinge verschil in de balanswaarden van scenario **An** en **A** te beschouwen.

scenario	trendwaardemutatie in Mm ³ /jaar						opmerkingen
		kustvakken		buitendelta's		totaal	
An - A (verschil)	bovenlaag	+2,0	62%	+0,3	+2,3	44%	afname erosie 2,0 Mm ³ /jaar bij suppletie 3,2 Mm ³ /jaar
	onderlaag	+0,6	19%	+0,3	+0,9	56%	
	totaal	+2,6	81%	+0,6	19%	+3,2	

Tabel 8.6.2 Netto effect suppletiebeleid uitgedrukt in grootschalige erosiewaarden voor scenario **A** (periode 1990–2040).

Deze tabel laat zien dat voor dit scenario 62% van de totale suppletiehoeveelheid effectief ten goede komt aan de kustvakken. De rest wordt blijkbaar gelijkmatig verdeeld over de diepere lagen (beneden NAP–7m) en de buitendelta's.

Voor de gezochte verhouding tussen de suppletie- en erosiehoeveelheid conform Vgl.(8.6.3) geldt dus blijkbaar $\xi = 1,6$. Ter bestrijding van elke 1,0 Mm³/jaar aan kusterosie (boven NAP–7m; in JARKUS-zone) moet dus 1,6 Mm³/jaar worden gesuppleerd. Deze verhouding sluit goed aan bij de eerder gegeven afschatting van de maximaal te verwachten ξ -waarde.

8.6.6 Benodigde suppletie-inspanning

Uitgaande van een scenario-onafhankelijke verhoudingsfactor $\xi = 1,6$, kan voor elk van de betrokken kustnota-scenario's een schatting worden gegeven omtrent de bij handhaving van de 1990-kustlijn gemiddeld te leveren suppletie-inspanning. Een nadere uitwerking hiervan is gegeven in Tabel 8.6.3 waarin de kustnota-scenario's zijn aangegeven met respectievelijk **A***, **B*** en **C***.

scenario	erosiewaarde kustvakken [Mm ³ /jaar]				suppletie-inspanning [Mm ³ /jaar]	systeem-erosie [Mm ³ /jaar]	opmerkingen
	basis-waarde	'Bruun-effect'	storm-effect	totaal			
1978 - 1990				1,9 22%	0,0	8,5	gecorrigeerd 'gemeten'
				1,1	1,3 15%	7,2	
A*	1,9	0,2	-	2,1 27%	0,0	7,8	schattingen (zonder en met suppleties)
				0,0	3,4 43%	4,4	
B*	2,0	0,6	-	2,6 29%	0,0	8,9	
				0,0	4,2 47%	4,7	
C*	2,0	0,9	1,0	3,9 39%	0,0	10,0	berekeningen (als toetsing)
				0,0	6,2 62%	3,8	
Cx				3,92 39%	0,00	10,05	berekeningen (als toetsing)
Cxn				-0,21	5,87 58%	4,18	

Tabel 8.6.3 Schatting/berekening tijdsgemiddelde suppletiebehoefte/inspanning voor kustvakken bij verschillende scenario's (periode 1990–2040).

In deze tabel zijn per scenario de samenstelling van de kusterosie E_k , de suppletie-inspanning V_n en de systeemerosie E_s gegeven, waarbij ook de getalswaarden voor de huidige situatie (1978–1990) zijn vermeld.

De bij een gerealiseerde suppletie-spanning van 1,3 Mm³/jaar waargenomen systeemerosie ter grootte van 7,2 Mm³/jaar heeft in feite betrekking op de E_s^* -waarde. De (cursief gegeven) echte systeemerosie bedraagt dan ook $E_s = 8,5$ Mm³/jaar (basis-waarde). Uitgaande van $\xi = 1,6$ is van de uitgevoerde suppleties 0,8 Mm³/jaar ten goede gekomen aan de kust, zodat uitgaande van $E_k^* = 1,1$ Mm³/jaar voor de basiswaarde van de kusterosie geldt $E_k = 1,9$ Mm³/jaar. Het aandeel van de kusterosie komt daarmee op 22% (= 1,9/8,5).

De resultaten voor de drie samengestelde kustnota-scenario's zijn op soortgelijke wijze bepaald. Eerst is voor elk scenario de feitelijke kusterosie E_k bepaald als som van een basisbijdrage (conform scenario A, B en C), het 'Bruun-effect' en het stormeffect. Het 'Bruun-effect' is daarbij recht evenredig verondersteld met de optredende stijgsnelheid van de gemiddelde zeestand (0,9 Mm³/jaar voor 0,85 m/eeuw; zie Sectie 8.4.4). De systeemosie E_s volgt ook uit de resultaten van de scenario's A, B en C. Bij een meer ongunstig scenario neemt het aandeel van de kusterosie toe van 27% bij scenario A* tot 39% bij scenario C*. Deze waarden hebben alle nog betrekking op de situatie zonder suppleties.

Teneinde de kusterosie op te heffen is per scenario de suppletie-inspanning V_n gerelateerd aan de grootte van de kusterosie. Voor een scenario-onafhankelijke verhoudingsfactor $\xi = 1,6$, levert dit de vet aangegeven suppletie-behoeften, variërend van minimaal 3,4 Mm³/jaar voor scenario A* tot 6,2 Mm³/jaar voor scenario C*.

Deze waarden hebben betrekking op de tijdsgemiddelde behoefte en bedragen orde 75% van de maximale behoefte. De waarde blijft in alle gevallen achter bij de systeemosie ($V_n < E_s$). De resulterende kusterosie E_k^* wordt in elk der scenario's genivelleerd, terwijl de resulterende systeemosie E_s^* significant afneemt van 7,2 Mm³/jaar in de huidige situatie tot slechts 3,8 Mm³/jaar voor scenario C*.

Vergelijking van de '1978-1990-waarden' met die van scenario A* laat zien dat de kusterosie E_k nagenoeg gelijk is (1,9 versus 2,1 Mm³/jaar) en dat de systeemosie naar verwachting iets afneemt (van 8,5 naar 7,8 Mm³ op jaarbasis). De voor scenario A* berekende tijdsgemiddelde suppletiebehoefte van 3,4 Mm³/jaar sluit goed aan bij de in de laatste jaren reeds gerealiseerde suppletie-inspanning (3,6 Mm³/jaar sinds 1990; zie Sectie 5.8.4).

Niet alleen neemt bij meer ongunstige scenario's de te leveren suppletie-inspanning in absolute zin sterk toe (van circa 1 Mm³/jaar in de afgelopen tijd tot circa 6 Mm³/jaar voor het meest ongunstige scenario), maar wordt de beïnvloeding van het totale kuststelsel door uitvoering van het kustbeleid significant. Als deze beïnvloeding wordt uitgedrukt in de verhouding tussen de suppletie-inspanning V_n en de erosie van het totale kuststelsel E_s (als cursief toegevoegd achter de in de tabel geven suppletie-waarden) dan neemt deze toe van 15% (1,3/8,5) in de afgelopen tijd tot maar liefst 43 à 62% (voor respectievelijk het gunstigste en het meest ongunstige scenario). Enig effect van deze significant belangrijke sturing van het Waddenkuststelsel op het totale Waddensysteem lijkt daarbij niet uitgesloten. De nu gehanteerde ontkoppeling van het binnen- en buitensysteem (respectievelijk de verschillende vloedkommen en de hier gemodelleerde Waddenkust) door het opleggen van de zandvraag als randvoorwaarde, is dan in feite niet meer toelaatbaar.

Teneinde deze conclusies nader te onderbouwen is naast de schatting op basis van een samengesteld scenario nog een aanvullende MOBIC-berekening uitgevoerd voor het meest ongunstige scenario waarin zowel de vergrote zandvraag, het 'Bruun-effect' als de windklimaatverzwaring is meegenomen. Voor dit rekenscenario is zowel de situatie zonder als met kustlijnhandhaving bekeken. De in Tabel 8.6.3 gegeven erosiewaarden geven aan dat de gegeven schattingen correct zijn. De noodzakelijk te reduceren erosie waarde is blijkbaar iets geringer dan de eerder aangenomen 3,9 Mm³/jaar. De 'effectiviteitswaarde' van de suppleties blijkt nu 1,58, hetgeen opnieuw aansluit bij de eerder gedane aanname.

8.7 Samenvatting en conclusies

8.7.1 Algemeen

In het navolgende zijn de voornaamste resultaten van de uitgevoerde berekeningen samengevat. Als algemene conclusie kan worden gesteld dat het beschouwen van de modelresultaten op een hoog aggregatie-niveau (tijds- en/of vakmiddeling) eenduidige en inzichtelijke resultaten oplevert. Dit geldt in nog sterkere mate voor de relatieve verschillen tussen dergelijke modelresultaten.

8.7.2 Ontwikkeling kustlijngedrag

De modelresultaten ten aanzien van de ontwikkeling van de Waddenkust laten zien dat in ieder geval de grootschalige ontwikkeling van de Waddenkust goed in een dynamisch balansmodel te vangen is. Op basis van de tijds- en vakgeïntegreerde berekeningsresultaten kan worden geconcludeerd dat de verschillen tussen de grootschalige trendwaarden relatief gering zijn. Op termijn zal de snelheid waarmee zich veranderingen voltrekken echter langzaam afnemen. Het niet doorzetten van het ingezette suppletie-beleid zal op zowel de kop van Noord-Holland als Texel aanleiding geven tot een relatief gezien toenemende erosiesnelheid.

De verhouding tussen de kusterosie E_k (volumetrisch verlies in de kustvakken gelegen naast/tussen de buitendelta's en boven het NAP-7m-niveau) en de erosie van het totale Waddenkust-systeem E_s ligt tussen de 20 en 25%.

8.7.3 Betrouwbaarheid modelresultaten

Bij de interpretatie van de absolute modelresultaten moet rekening worden gehouden met een zekere onbetrouwbaarheid in de modeluitkomsten. Uitgedrukt in de tijdsgemiddelde mobiliteit moet hierbij gedacht worden aan orde 1 à 2 m/jaar, waarbij vooral de onzekerheid in de zandvraag vanuit de Waddenzee een belangrijke rol speelt. Ook het gedrag van de onderlaag leidt tot een grote onzekerheid.

Opgemerkt moet worden dat deze onbetrouwbaarheid in mindere mate van toepassing is voor zogenaamde 'relatieve modelresultaten'. Hierbij kan bijvoorbeeld worden gedacht aan de kwantificering van het effect van extra zeespiegelstijging of een zwaarder golf- en windklimaat. Verder wordt door het dominante effect van de gewijzigde zandvraag bij verschillende rekenscenario's bij de voorspelling impliciet met deze bron van onzekerheid rekening gehouden.

8.7.4 Relatief effect zeespiegelstijgingsnelheid

Een extra stijging van de gemiddelde waterstand leidt tot extra zandvraag vanuit de Waddenzee en tot een extra aanpassing van het dwarsprofiel onder invloed van het zogenaamde 'Bruun-effect'. Afhankelijk van de toename van de stijgsnelheid treedt er dus aanvullende erosie op van de Waddenkust.

Een maximaal orde 20% grotere zandvraag leidt tot een achteruitgang die primair is geconcentreerd in de buitendelta's. Dit maakt dat zowel de buitendelta's als de direct achterliggende kustvakken aan extra erosie onderhevig zullen zijn waarbij maximaal gedacht moet worden aan een extra erosie van 2 m op jaarbasis. Voor de kustvakken die naast/tussen buitendelta's zijn gelegen bedraagt de extra erosie slechts 0,1 Mm³/jaar. Dit lijkt echter een ondergrens. Als gevolg van het dwarstransportgeïnduceerde 'Bruun-effect' gaan met name de echte kustvakken achteruit. Deze achteruitgang bedraagt maximaal orde 1 m/jaar waarbij het gaat om ten hoogste 1,0 Mm³/jaar. In verhouding tot de extra zandvraag is het dwarstransportgeïnduceerde verlies dus veruit overheersend.

8.7.5 Relatief effect extreem golf- en windklimaat

Het effect van een ongunstig golf- en windklimaat is niet eenduidig. De soms tegengestelde effecten van de verschillende bijdragen maken dat er sprake is van een zekere extra variatie in de orde van ± 1 m/jaar. De reductie in de feitelijke zandvraag als gevolg van verminderde plaataangroei, maakt dat de erosie van de buitendelta's relatief afneemt. Gecombineerd met een relatieve toename van de langstransportcapaciteit in de bovenlaag (als gevolg van toename dominante golfhoogte en ongunstige verdraaiing van de dominante golfrichting) zijn de lokale effecten op kustvak-niveau sterk variabel, maar in de orde van ± 1 m/jaar. Voor wat betreft de grootschalige kusterosie moet worden gerekend op een extra erosie van orde 1,0 Mm³/jaar.

8.7.6 Kustlijnhandhaving

Door toevoeging van een zogenaamde 'auto-nourishment-mode' aan het MOBIC-model is een relatie gelegd tussen kusterosie en de suppletie-inspanning die nodig is om deze erosie tegen te gaan. Het gemodelleerde kustbeleid heeft hierbij betrekking op het herhaaldelijk uitvoeren van strandsuppleties met materiaal afkomstig van buiten het systeem.

Deze resultaten geven aan dat de tijdsgemiddelde suppletiebehoefte de optredende kusterosie met orde 60% overtreft.

De suppletie-behoefte varieert van minimaal 3,4 Mm³/jaar voor scenario A* tot 6,2 Mm³/jaar voor scenario C*. Bij zwaardere scenario's en de daarmee verband houdende toenemende suppletiebehoefte wordt de beïnvloeding van het Waddenkust-systeem zodanig dat de ont koppeling tussen buiten- en binnengebied in feite ontoelaatbaar wordt.

9 CONCLUSIES EN AANBEVELINGEN

9.1 Inleiding

Met betrekking tot de tweeledige doelstelling van de onderhavige studie, te weten het ontwikkelen van een methode voor en het geven van voorspellingen van de ontwikkeling van de Waddenkust, is noodgedwongen relatief veel inspanning gestopt in de ontwikkeling van het voor deze voorspelling benodigde 'gereedschap'.

Ten behoeve van de eigenlijke toelevering aan de kustnota van 1995 zijn voornamelijk de resultaten van de toepassing ervan van belang. Het mag echter duidelijk zijn dat juist met de geforceerde ontwikkeling van dit 'gereedschap' in de vorm van een rekenmodel een significante bijdrage is geleverd aan de begripsvorming omtrent een onderbroken-kust-systeem.

In het volgende is getracht een zo goed mogelijk overzicht te geven van de resultaten van deze studie, waarbij zowel zal worden ingegaan op de kwantitatieve modelresultaten als op de meer kennis-inhoudelijke voortgang als geboekt tijdens de uitvoering van dit onderzoek.

De op basis van beide gezichtspunten geformuleerde aanbevelingen zijn samengebracht in Sectie 9.3.

9.2 Conclusies

9.2.1 Het onderbroken-kust-systeem

Een onderbroken kust bestaat per definitie uit een door zeegaten onderbroken aaneenschakeling van 'gesloten-kust-secties'. De lokale periodieke uitwisseling van grote hoeveelheden water en sediment door de keel van een specifiek zeegat is tot op grote afstand ervan merkbaar. De invloed van een individueel zeegat breidt zich dan ook ten minste uit tot de rand van de bij dit zeegat behorende, morfologisch geforceerde buitendelta.

De afmeting van een buitendelta gaat daarbij de feitelijke zeegatbreedte beduidend te boven (voor het Zeegat van Texel is de buitendelta 18 km breed, dit bij een breedte van het Marsdiep van slechts 2 km).

De direct door een zeegat gestuurde kustmorfologie omvat dan ook vaak een significant deel van de totale kust. Voor de Waddenkust geldt dit maar liefst voor de helft van de totale kustlengte. De tussen individuele buitendelta's gelegen kustvakken worden echter ook, zij het meer indirect, gestuurd door de naastliggende zeegatsystemen die morfologisch gezien een soort van 'steunpunt-functie' vervullen. De mate waarin met deze randvoorwaarden rekening moet worden gehouden hangt natuurlijk samen met de beschouwde tijdschaal.

Bij het maken van meer lange-termijn voorspellingen voor de Waddenkust dient de volledige kust in een beschrijvend model moeten worden samengebracht. Het is zelfs denkbaar dat dit ook geldt voor de totale Nederlandse kust. Voor het zuidelijke Delta-gebied is dit evident, terwijl de lange termijn-ontwikkeling van Hollandse kust tenminste indirect wordt gestuurd door het morfologisch gedrag van het Zeegat van Texel (zie ook Sectie 9.3.4).

9.2.2 De modellering op hoofdlijnen

Gelet op de doelstelling van deze studie, te weten het leveren van lange-termijn voorspellingen ten aanzien van de grootschalige kustontwikkeling, zal het morfologische gedrag van een onderbroken-kust-systeem in een 'model' moeten worden gevangen.

Een dergelijk 'gedragsmodel' zal de ontwikkeling van de kust moeten kunnen simuleren. De 'gedragsbeschrijving' zal daarbij in principe zoveel mogelijk moeten aansluiten bij de onderliggende fysische processen ('process-based'). Voor het geval dat deze kennis nog niet voorhanden is kan deze beschrijving ook worden gebaseerd op waargenomen gedrag ('empirical-based').

Ten behoeve van deze beschrijving is de kust eerst geschematiseerd in een aantal morfologische eenheden. Uitgangspunt bij deze schematisatie vormt het gedrag van de kust in een vlak

loodrecht op de kustlijn. Voor een gemiddeld genomen concaaf, primair door golfwerking gevormd kustprofiel, kunnen daarin verschillende lagen worden onderscheiden, elk met een min of meer eigen proces-gedrag. Per individuele laag richt de gedragsbeschrijving zich op de ontwikkeling van het volume binnen de laag. Bij beschouwing van bijvoorbeeld de zeer dynamische laag tussen het laagwater- en NAP-7m-niveau, wordt dus voorbijgegaan aan de profiel/bank-ontwikkeling binnen de laag. Op deze wijze is gekomen tot een 'process-based' schematisatie van het kustprofiel in een vijftal lagen, waarbij er een directe relatie ligt tussen het volume in een bepaalde laag en haar positie in het dwarsprofiel.

De boven het NAP-20m-niveau onderscheiden lagen hebben daarbij betrekking op de laag boven de duinvoet (duinlaag), een primair golfgedomineerde strand- en 'surfzone'-laag en twee primair getijgedomineerde diepere lagen. Bij de verdere schematisatie van het 'onderbroken-kust-systeem' vormt een dergelijk multi-laagmodel een goede basis voor de gedragsbeschrijving van de kust.

Gelet op het streven naar een 'process-based' gedragsmodel, dient de basisbeschrijving betrokken te worden op het netto sedimenttransport. Deze is immers verantwoordelijk voor de ontwikkeling van de kust. Teneinde ook het kustgedrag volgens empirische relaties in een dergelijk model in te kunnen brengen, moeten deze empirische relaties worden 'vertaald' in termen van transportpatronen. Gelet op de kustschematisatie dienen daarbij zowel het sedimenttransport in langs- als in dwarsrichting te worden beschreven.

9.2.3 Gedragsmodellering

Ten aanzien van het karakter van een gedragsmodel vervult een dergelijk model een soort van 'brugfunctie' tussen de vaak vrij ingewikkelde, korte-termijn procesmodellen en de probleemstelling van een kustbeheerder. Het 'model' maakt daarbij gebruik van de resultaten van de onderliggende procesmodellen en genereert resultaten op het 'beheerders-niveau': van 'intra-wave' transporten naar tijdsgemiddelde volumemutaties per kustvak.

Naast de nagestreefde modelresultaten bestaan er ook in de toepassing grote verschillen met de procesmodellen. Het doorrekenen van bijvoorbeeld verschillende lange-termijn-scenario's vormt met een goed werkend gedragsmodel geen probleem. Normale problemen, welke aanwezig zijn bij het maken van lange-termijn voorspellingen met behulp van een morfologisch veldmodel zoals COMOR/DELFT2D (de selectie van de karakteristieke hydraulische condities, de berekening van het netto transport patroon in het interessegebied), worden immers omzeild.

Duidelijk moet echter wel worden gesteld dat een dergelijk model slechts de 'vertaling' geeft van proceskennis naar een bepaalde toepassing. De beschikbaarheid van proceskennis is daarbij van evident belang en een gedragsmodel mag dan ook nimmer worden gezien als een 'vervanger' van een procesmodel.

Een gedragsmodel kan overigens meer zijn dan alleen een 'doorgeefluik' van kennis van de procesmodellen. Door de directe, op kustbeheer toegesneden, modelresultaten kunnen ook vanuit de vraagstelling gericht aanbevelingen worden gedaan voor een als noodzakelijk ervaren detaillering van de proceskennis. In deze zin zou een gedragsmodel dan ook 'sturend' kunnen/moeten werken voor de invulling/afweging van procesonderzoek en als zodanig als een 'tweerichtingen-doorgeefluik' kunnen fungeren.

De conclusie kan dan ook niet anders zijn dan dat proces- en gedragsmodellen naast elkaar moeten worden ontwikkeld.

9.2.4 Nadere uitwerking van de modellering

Bij de nadere uitwerking van de modellering moet een nadere invulling worden gegeven aan de formuleringen voor het transport als sturende proces in de 'gedragsbeschrijving'. Meer specifiek: op welke wijze het langstransport S en het dwarstransport q reageren op onder andere een wijziging in respectievelijk de kustoriëntatie en het dwarsprofiel. Voor elke transportcomponent is hierbij in eerste instantie uitgegaan van een algemene eerste-orde gedragsbeschrijving.

Het langtransport $S(x,z)$ hangt dan samen met de oriëntatie van de kust dy/dx , volgens:

$$S(x,z) = S_o(x,z) + a(x,z) [\phi_o(x,z) - dy/dx] \quad (9.2.1)$$

waarin $\phi_o(x,z)$ de evenwichtsoriëntatie die optreedt bij afwezigheid van het autonome langtransport $S_o(x,z)$ en $a(x,z)$ een plaatsafhankelijke langtransportcoëfficiënt.

Het dwarstransport $q(x,z)$ reageert op een soortgelijke wijze primair op de lokale bodemhelling dz/dy , conform:

$$q(x,z) = q_o(x,z) + b'(x,z) [s_o(x,z) + dz/dy] \quad (9.2.2)$$

waarin $s_o(x,z)$ betrekking heeft op de lokale evenwichtshelling bij afwezigheid van de autonome bijdrage $q_o(x,z)$ en $b'(x,z)$ een plaatsafhankelijke dwarstransportcoëfficiënt.

In zowel de langs- als de dwarstransportformulering zegt de evenredigheidsconstante iets over de snelheid waarmee afwijkingen van de evenwichtssituatie worden gereduceerd en dus over de daarbij optredende tijdschalen. Deze constante is dan ook gerelateerd aan de effectieve golfintensiteit.

Het mag duidelijk zijn dat voor de kwantificering van de verschillende parameters in de beide vergelijkingen, in principe zal moeten worden teruggegrepen op de in procesmodellen vervatte proceskennis (bijvoorbeeld het UNIBEST-LT-programma voor het langtransport en UNIBEST-TC/DUROSTA-programma's voor het dwarstransport).

De gegeven vergelijkingen zijn alleen van toepassing voor de min of meer gesloten kust. Ter plaatse van een zeegat moet er dan ook iets anders worden 'verzonnen'. Gezien de huidige stand van de wetenschap is het nog niet mogelijk om ook voor dit kustdeel volledig terug te vallen op aanwezige proces-modellen. De wel beschikbare kennis omtrent de werking van zeegatsystemen berust veelal op een empirische grondslag.

Uitgangspunt bij de gedragsbeschrijving van een zeegatsysteem vormt het empirische gegeven dat vorm en grootte van de bijbehorende buitendelta in de evenwichtssituatie gerelateerd zijn aan het getijvolume [Bakker en de Vriend, 1993]. Uitgaande van deze evenwichtsvorm en het kwalitatieve transportpatroon zoals zich voordoet in de buitendelta, zijn deze transporten vervolgens gekwantificeerd.

Als karakterisering van de globale vormgeving van de buitendelta is daarbij vooralsnog uitgegaan van een driehoekige vorm, in stand gehouden door een geforceerde sedimentbron ter plaatse van de punt van de buitendelta. Deze bron valt samen met de uitmonding van de vaak centraal gelegen eb-geul. Dit sediment wordt onttrokken door de aan weerszijden van de buitendelta gelegen zeegat-gerichte vloedgeulen.

Ten opzichte van het door Bakker en de Vriend geformuleerde modelconcept zijn er tal van uitbreidingen/verbeteringen aangebracht. Naast het onderbrengen van het concept in een model met meerdere zeegaten, is ook de afhandeling per individueel zeegat verbeterd door het gebruik van tal van geometrie- en transportgerelateerde stuurparameters. Voor wat betreft de geometrie zijn hierbij te noemen de relatieve uitbouw van de buitendelta, de relatieve positie van de ebgeul en de globale scheefheid van de buitendelta. Met betrekking tot het transport: de verdeling van het strandtransport, de relatieve vergroting van het transport langs de buitenkant van de delta onder invloed van het in- en uitstromende getij en de netto transportsturing als functie van inkomend vloedtransport en netto sedimentvraag vanuit het binnengebied.

Als resultaat van deze speciale formuleringen inzake de transportbanen binnen het zeegat is het mogelijk een complex, samenhangend systeem van eilanden en zeegaten in een enkel model te vangen. Met nadruk wordt er hierbij op gewezen dat deze wijze van gedragsmodellering dus zowel gebaseerd is op proceskennis als empirie. Deze flexibele opzet maakt het dan ook mogelijk om toekomstige ontwikkelingen in het model onder te brengen.

9.2.5 Implementatie in een rekenmodel MOBIC

Op basis van de algemene formuleringen voor het langs- en dwarstransport en schematisatie van de kust in een multi-laagmodel zijn de vergelijkingen gediscrèteerd.

De langstransportformulering is daarbij betrokken op een willekeurig rekenrooster (grid) en bovendien per modellaag van toepassing. Voor laag j en gridpunt i geldt dan:

$$S_{j,i} = S_{j,i}^o + a_{j,i} \left[\phi_{j,i}^o - \frac{d}{dx} y_{j,i} \right] \quad (9.2.3)$$

Het langstransport in de bovenste laag (duinlaag) heeft daarbij in principe betrekking op windtransport.

Door toepassing van een vaste laag-schematisatie in dwarsrichting kunnen de hellingsgerelateerde parameters worden omgezet naar onderlinge laagafstanden. De evenwichtshelling $s_o(x,z)$ gaat daarbij over in een evenwichtsafstand $W_{j,i}$, resulterend in:

$$q_{j,i} = q_{j,i}^o + b_{j,i} [W_{j,i} - (y_{j,i} - y_{j-1,i})] \quad (9.2.4)$$

Op zowel de bovenste als de onderste modelbegrenzing kan een autonoom dwarstransport worden opgelegd, de $q_{j,i}^o$ -bijdrage. Voor de duintop heeft deze dan betrekking op het netto transport over de duintop en voor het NAP-20m-niveau op het daar aanwezig veronderstelde netto dwarstransport.

Bij de opzet van het rekenmodel is meer dan speciale aandacht gegeven aan een open modelstructuur, dit met het oog op toekomstige uitbreidingen en mutaties. Verder is bij de modelaansturing door middel van de 'user-interface' de benodigde invoer zo simpel mogelijk gehouden. Voor wat betreft de tijdstapsturing is gebruik gemaakt van een dynamische, semi-automatische vaststelling van een verantwoorde rekentijdstap. Dit laatste maakt het mogelijk om zelfs ultra-lange-termijn berekeningen uit te voeren.

Ook bestaat er de mogelijkheid om voor meer simpeler gevallen al gebruik te maken van een semi-automatische modelafregeling. Hierbij wordt voor een gegeven kustlijnverandering de bijbehorende verdeling van de langstransportcoëfficiënten gegenereerd.

Naast de mogelijkheid tot het opgeven van tijdsfuncties voor de transporten over de modelranden (in/uitgaand transport in boven/onderlaag en de transporten door de individuele zeegaten) is tevens voorzien in speciale suppletie-scenario's.

Naast het opgeven van een serie door volume, plaats en tijd gekarakteriseerde suppleties kan ook door middel van het voorschrijven van een te onderhouden kustligging de hiervoor benodigde suppletie-inspanning worden berekend. In deze 'auto-nourishment-mode' genereert het model dus zelf de uit te voeren suppleties.

Tot slot moet met enige nadruk nog worden gewezen op de inherente flexibiliteit van gedragsmodellen in het algemeen en het MOBIC-model in het bijzonder, daar hier sprake is van een optimale integratie van kennis van processen enerzijds en empirische kennis anderzijds.

9.2.6 Toepasbaarheid MOBIC-model

Het (nog in ontwikkeling zijnde) rekenmodel betreft dus in feite gezien een soort van grootschalig gedragsmodel voor een onderbroken-kust-systeem. Het betreft daarmee overigens niets anders dan een dynamisch balansmodel, waarbij de interne transportprocessen (interne uitwisseling tussen rekencellen/deelsegmenten) zo goed mogelijk zijn gemodelleerd.

De flexibele opzet van het model maakt het mogelijk om naast simulaties voor meervoudig onderbroken kustsecties (tot 9 onafhankelijke zeegaten), ook de ontwikkeling van een gesloten kustsectie (zonder zeegat) en zelfs alleen een enkel dwarsprofiel (kustsectie van 1 m¹) te onderzoeken.

Met enige nadruk wordt gewezen op het feit dat het model nooit beter is dan de in het model geïmplementeerde fysica. Het blijft bijvoorbeeld een lagenmodel en zal dan ook nooit informatie kunnen leveren over zich binnen deze lagen aanwezige processen (brekerbanken).

Verder is het zo dat het model zich primair richt op grootschalige effecten en dus betrekking heeft op de meer geleidelijke ontwikkelingen in de kustlijn. Slechts de eventuele structurele erosie is beschreven. Het model in de huidige versie levert geen informatie over de kortetermijn fluctuaties in de kustlijn als gevolg van bijvoorbeeld individuele stormen.

Door het 'meenemen' van het dwarstransport in de kustlijnontwikkeling wordt een betere beschrijving gegeven van een natuurlijk kuststelsel, zeker in gevallen waarbij de toepassing van een een-laag-model als UNIBEST-CL bezwaarlijk wordt.

Ten aanzien van het dwarstransport is een benadering met diepte-afhankelijke tijdschalen nuttig gebleken. Op deze wijze kon enige onderbouwing worden gegeven aan het gebruikte modelconcept en de te gebruiken dwarstransportcoëfficiënten.

Voor wat betreft de modellering van een zeegat blijkt zowel op basis van een conceptuele als meer specifieke validatie, de gebruikte schematisatie het grootschalige gedrag van een buitendelta kwalitatief goed te beschrijven en derhalve als component binnen een grootschalig gedragsmodel uiterst bruikbaar.

Ten aanzien van de behandeling van bron- en put-systemen (suppleties) genereert het model geloofwaardige resultaten en lijkt er met het oog op het ingezette handhavingsbeleid zeker sprake van toepassingsmogelijkheden.

Verkennde berekeningen met constructies laten zien dat het rekenmodel de effecten van constructies op de kustontwikkeling in principe goed lijkt weer te geven. Nadere formulering en implementatie van de feitelijke vergelijkingen moet echter nog plaatsvinden.

De modelresultaten zijn slechts in beperkte mate gevoelig voor de instelling van de rekenparameters. Met betrekking tot de tijdstapsturing blijkt de dynamische sturing door beperking van de mutatie per tijdstap een goede optie. Op deze wijze wordt de tijdstap geoptimaliseerd en kunnen berekeningen over zeer lange perioden relatief snel worden afgerond.

De resultaten van een uitgebreide serie test- en validatieberekeningen geven verder aan dat het MOBIC-rekenmodel programma-technisch correct is, waarbij het robuuste karakter van het rekenmodel onderzoek naar het gedrag van een kuststelsel uiteindelijk relatief eenvoudig maakt.

9.2.7 De toepassing voor de Waddenkust (MOBIC-WK-model)

Ten behoeve van de kustnota van 1995 is het MOBIC-model toegepast voor de Waddenkust.

Ten aanzien van de grootschalige geometrie is dit kustdeel 'rechtgetrokken' door toepassing van een gekromde referentielijn die de globale ligging van de Waddenkust volgt. Het 150 km lange rekg gebied reikt daarbij van Callantsoog in de kop van Noord-Holland tot de oostpunt van Schiermonnikoog en omvat daarbij de vijf grote Waddeneilanden. Het NAP-20m-niveau is daarbij aangehouden als zeewaartse onderrand en het NAP-7m-niveau als scheiding tussen de boven- en de onderlaag.

Ten aanzien van de detailgeometrie is informatie afgeleid uit JARKUS-bestanden. Voor de bovenlaag leverde dit goede resultaten, voor de onderlaag echter beduidend minder.

De kwantificering van de langstransport-parameters vond plaats aan de hand van een grote serie van UNIBEST-LT-berekeningen. Een soortgelijke aanpak voor de kwantificering van het met name getij-gedreven transport in de onderlaag leverde relatief gezien minder betrouwbare resultaten zodat hierbij de getalswaarden moesten worden afgeschat. Als resultaat van deze analyse werd het totale inkomende transport bij Callantsoog geraamd op 1,1 Mm³/jaar en het uitgaande transport over de rechterraand op circa 2,1 Mm³/jaar, resulterend in een netto verlies in langsrichting van 1,0 Mm³ op jaarbasis.

De grootte van de niveau-afhankelijke dwarstransport-constante werd gebaseerd op de bij de uitwisseling tussen verschillende lagen van toepassing verondersteld zijnde tijdschaal. De evenwichtsafstand tussen de verschillende lagen werd onder andere gebaseerd op de resultaten van de analyse van de tijdsvariatie van JARKUS-data. Ten aanzien van het dwarstransport over de modelranden is uitgegaan van een langs- en tijdsconstante aanreiking ter grootte van 5³/m³/jaar over de NAP-20m-dieptelijn en een overstuivingsverlies van 2 m³/m³/jaar over de duintop.

De voor elk zeegatsysteem benodigde stuurparameters zijn bepaald aan de hand van een analyse

van het gedrag en vorm van elk van de betrokken buitendelta's. Het netto transport door elk zeegat werd gebaseerd op de ontwikkeling van de sedimentvraag voor elk van de zeegaten zoals deze werd toegeleverd door de ISOS-studie. Voor de periode 1978-1990 bedraagt deze 12,7 Mm³/jaar en heeft daarmee een dominante invloed op het gedrag van de Waddenkust. De uitgevoerde suppleties zijn in het model ingebracht als bronnen. Voor het betrokken kustdeel gaat het hierbij om circa 30 Mm³ in de periode 1978-1993.

Bij de afregeling van het MOBIC-WK-model zijn verschillende balansniveaus onderscheiden en is de 150 km lange Waddenkust opgedeeld in 16 kustsecties, bestaande uit buitendelta's en delen van eilanden. Bij de vaststelling van de winst- en verliesrekening voor de globale balans voor de Waddenkust zijn de balanswaarden voor respectievelijk de boven- en onderlaag in de kustvakken en de buitendelta's vastgesteld op basis van een analyse van zowel JARKUS-data en vaklodingen, resulterend in een netto verlies uit het kustdeel ter grootte van ongeveer 7,2 Mm³/jaar. Vergelijking met het netto effect van de randvoorwaarden in het MOBIC-WK-rekenmodel leert dat blijkbaar 70% van de sedimentvraag vanuit de Waddenzee betrekking heeft op zand dat blijkbaar onttrokken wordt uit het kuststelsel.

Bij de nadere afregeling van het MOBIC-WK-model is getracht de ontwikkeling in de periode 1978-1990 te simuleren. Hiertoe is de berekende vak- en tijdsgemiddelde verplaatsingssnelheid van zowel de boven- als de onderlaag vergeleken met de uit metingen afgeleide waarden.

Bij de specificatie van de scenario's is onderscheid gemaakt tussen verschillende situaties. Teneinde inzicht te krijgen in de betrouwbaarheid van de modelresultaten is het relatieve effect van een geringe wijziging in de modelinvoer op het berekeningsresultaat gekwantificeerd door het doorrekenen van verschillende spreidings-scenario's. Verder is sprake van een drietal basisscenario's voor (gemiddelde) zeespiegelstijging. In het geval van het stormscenario is naast een meer extreme waterstandswijziging, bovendien sprake van een ongunstig golf- en windklimaat. Gegeven een bepaald scenario is vervolgens uitwerking gegeven aan de wijze waarop een en ander in het rekenmodel kan worden ingebracht. Een verzwaring van het golf- en windklimaat komt daarbij onder andere tot uitdrukking in een toename van de langtransportconstanten in de bovenlaag en een relatieve afname van de zandvraag (met 5%) door additionele afbraak van platen. Zeespiegelstijging leidt tot vergrote zandvraag door de zeegaten en een dwarstransportgeïnduceerde aanpassing van het dwarsprofiel (Bruun-effect). Dit Bruun-effect is in het MOBIC-model ingebracht door het opleggen van een inherent aan de waterstandstijging gekoppelde profielaanpassing.

9.2.8 De resultaten van het MOBIC-WK-model

Bij de interpretatie van de modelresultaten van het MOBIC-WK-model ligt de nadruk op de kwantificering van de relatieve effecten van een aanpassing van de invoer.

Bij de resultaten van de modelberekeningen is onderscheid gemaakt tussen de vaststelling van de autonome toekomstige kustlijnontwikkeling, de hierbij van toepassing zijnde betrouwbaarheid, de effecten van vergrote zeespiegelstijgingssnelheid en de relatieve effecten van een toename in de stormaanval.

Ten aanzien van de tijdsontwikkeling van de Waddenkust voor de periode 1990-2040 blijkt dat in grote lijn sprake is van een voortzetting van de huidige trend. Op lange termijn zal de snelheid waarmee veranderingen zich voltrekken langzaam afnemen. Het huidige systeemverlies van 7 à 8 Mm³/jaar zal, bij het achterwege blijven van suppleties, echter het nauwelijks wijzigen. De erosie van de kustvakken, voorzover gelegen tussen de buitendelta's en boven het NAP-7m-niveau, bedraagt 20 à 25 % van het systeemverlies.

Bij de interpretatie van de absolute modelresultaten moet rekening worden gehouden met een zekere onbetrouwbaarheid in de modeluitkomsten. Aangezien de modeluitkomsten nooit nauwkeuriger kunnen zijn dan de invoer gaat het hierbij om een spreiding in de grootschalige trendwaarden van orde 25%. Uitgedrukt in de tijdsgemiddelde mobiliteit moet hierbij gedacht worden aan orde 1 à 2 m/jaar.

Een extra stijging van de gemiddelde waterstand heeft via een maximaal orde 20% grotere zandvraag, tot 1,6 Mm³/jaar extra, direct effect op de ontwikkeling van de Waddenkust. De

extra erosie is daarbij primair geconcentreerd in de zeegaten en is qua grootte evenredig met de extra toename van de zeespiegelstijgingsnelheid. Rekening houdend met een gedeeltelijke concentratie van de achteruitgang ter plaatse van de zeegaten, levert dit 2 m/jaar als orde van grootte van de maximaal mogelijke extra achteruitgang door een toenemende stijgingsnelheid op. Voor de echte kustvakken is gaat het hierbij echter slechts om maximaal circa 0,5 Mm³/jaar extra.

Als gevolg van het dwarstransport-geïnduceerde 'Bruun-effect' gaan met name de echte kustvakken achteruit. Deze extra achteruitgang bedraagt, volgens het aangenomen 'Bruun-model', maximaal orde 1 m/jaar waarbij het gaat om ten hoogste 1 Mm³ op jaarbasis.

Aanwezigheid van een extreem golfklimaat maakt dat relatief gezien sprake is van een iets geringere zandvraag. Gecombineerd met een relatieve toename van de langtransportcapaciteit in de bovenlaag (als gevolg van toename dominante golfhoogte en ongunstige verdraaiing van de dominante golfrichting) zijn de effecten op kustvak-niveau sterk variabel waarbij sprake is van een zekere extra variatie in de orde van ± 1 m/jaar. Voor de echte kustvakken bedraagt het maximale extra verlies ten hoogste 1 Mm³/jaar.

Samenvattend neemt bij afwezigheid van verdere suppleties bij een meer ongunstig scenario de totale erosie van de Waddenkust toe van 7 tot circa 10 Mm³/jaar. Het aandeel van de kusterosie neemt zowel in absolute als relatieve zin toe, te weten van 2 tot 4 Mm³/jaar, zijnde respectievelijk 25 tot 40% van het systeemverlies.

Uit de resultaten van berekeningen met de 'auto-nourishment-mode' komt naar voren dat de benodigde suppletiehoeveelheid de gewenste afname in de kusterosie met circa 60% overtreft. De voor de handhaving van de Waddenkust benodigde gemiddelde suppletie-inspanning bedraagt dan ook 3 tot 6 Mm³ op jaarbasis. Op zich lijkt deze hoeveelheid geen probleem te hoeven vormen. Een en ander maakt echter wel dat in toenemende mate sprake is van een duidelijke beïnvloeding van het kuststelsel, waarbij de verhouding tussen externe toevoer door suppleties en de autonome systeemosie toeneemt van 15% in de afgelopen jaren tot mogelijk 40 à 60% in de toekomst. De feitelijke ontkoppeling van morfologische deelsystemen als Waddenkust versus Waddenzee en Waddenkust versus Hollandse kust, lijkt dan ook niet (meer) gerechtvaardigd.

De toepassing voor de Waddenkust laat zien dat een dergelijk model een nuttig hulpmiddel is bij de analyse van een dergelijk gecompliceerd morfologisch systeem. Met name het verkregen inzicht in de samenhang tussen de verschillende componenten van dit kustdeel kan als een belangrijke stap vooruit worden gezien.

9.2.9 Samenvatting

In het volgende is een puntsgewijze samenvatting van de voornaamste conclusies gegeven.

Het onderbroken-kust-systeem:

- De morfologische invloed van een zeegat is relatief groot;
- De helft van de Waddenkust valt achter de buitendelta's;
- Bij samenhangende beschouwing van lange-termijn morfologie moet de Nederlandse kust in één model worden 'gevangen';
- Lange-termijn-morfologie kan goed worden beschreven met gedragsmodellen;
- De laagstemschematisatie dient te worden gebaseerd op proceskennis;
- Een goed gedragsmodel dient te worden gebaseerd op een karakterisering van het netto transporten in zowel dwars- als langsrichting.

Gedragsmodellering:

- Een gedragsmodel vormt een intermediair tussen procesmodellen en de vraagstelling van een kustbeheerder;
- Het gedragsmodel vormt daarbij een 'vertaling' van zowel proceskennis als empirie;
- Een gedragsmodel kan ook sturend werken voor de definitie van procesonderzoek;
- Gedragsmodellen en procesmodellen moeten naast elkaar worden ontwikkeld;
- Het netto transport vormt de basis voor de gedragsbeschrijving;

- Voor zowel het dwars- als het langstransport levert een eerste orde linearisatie bruikbare resultaten;
- Het langstransport is gerelateerd aan de kustoriëntatie terwijl het dwarstransport samenhangt met de bodemhelling;
- De transportformuleringen zijn in feite parameterisaties van het gedrag van procesmodellen;
- Het transportpatroon ter plaatse van een buitendelta is gebaseerd op het modelconcept van Bakker en de Vriend;
- Hierbij is uitgegaan van een min of meer stabiele evenwichtsvorm van de buitendelta;
- De gebruikte formuleringen zijn uitgebreid met tal van aanvullende stuurparameters die zowel effect hebben op de evenwichtsgeometrie als de transportsturing;
- Het flexibele karakter van een gedragsmodel maakt het mogelijk een complex samenhangend systeem van eilanden en zeegaten in een enkel model te vangen.

Het rekenmodel:

- Het MOBIC-model vormt een algemeen toepasbaar, dynamisch balansmodel voor een multi-onderbroken kuststelsel;
- De modelopzet is flexibel en geschikt voor verdere uitbreiding;
- De 'user-interface' is gebruikersvriendelijk van opzet en vergt minimale data-invoer;
- De dynamische tijdstapsturing werkt optimaal;
- Diverse suppletie-scenario's kunnen eenvoudig worden doorgerekend;
- Door toevoeging van een 'auto-nourishment-mode' is een eerste uitwerking van het kustbeleid in het model geïmplementeerd;
- Het beschikbaar maken van modelresultaten op hogere aggregatie-niveaus (plaats- en/of tijdsmiddeling) levert inzichtelijke resultaten;
- Verschillen tussen afwijkende scenario's kunnen op deze wijze eenvoudig worden gekwantificeerd;
- Gedragsmodellen in het algemeen en het MOBIC-model in het bijzonder vormen een optimale integratie van proces- en empirische kennis;
- Het MOBIC-model is zowel geschikt voor een onderbroken kust, een gesloten kust als een enkel dwarsprofiel;
- Het model is slechts geschikt voor grootschalige veranderingen (structurele erosie);
- Het gebruik van diepte-afhankelijke tijdschalen levert informatie over de grootte van de dwarstransportcoëfficiënten;
- Test- en validatieberekeningen geven aan dat het model programma-technisch correct is;
- Het robuuste karakter van het rekenmodel maakt onderzoek naar het gedrag van een kuststelsel relatief simpel.

De toepassing:

- Ten behoeve van de toepassing voor de Waddenkust is succesvol gebruik gemaakt van JARKUS-informatie, waarbij de informatie over de onderlaag veelal te beperkt was;
- De beschrijving van het langstransport is gebaseerd op de UNIBEST-LT-berekeningen, waarbij ook hier de informatie over de onderlaag minder goed was;
- De sedimentvraag uit de Waddenzee bedraagt orde 12,7 Mm³ op jaarbasis.
- De uit lodingen afgeleide systeemosie van de Waddenkust bedraagt orde 7,2 Mm³/jaar;
- Ongeveer 70% van de sedimentvraag heeft betrekking op uit dit kuststelsel afkomstig zand;
- Zeespiegelstijging heeft effect op de grootschalige zandvraag vanuit de Waddenzee;
- Deze extra vraag wordt voornamelijk opgevangen door de buitendelta's;
- Het zogenaamde 'Bruun-effect' levert in de kustsecties een extra achteruitgang op van de strandlijn;
- Dit dwarstransport-geïnduceerde effect is in het MOBIC-model geïmplementeerd door opleggen van een aan de waterstandstijging gerelateerde profielaanpassing;
- De lange-termijn ontwikkeling wijkt slechts beperkt af van de thans waargenomen

trends, waarbij het huidige systeemverlies van 7 à 8 Mm³/jaar nauwelijks wijzigt;

- De erosie van de echte kustvakken bedraagt 20 à 25 % van dit verlies;
- Een extra stijging van de gemiddelde waterstand leidt via een tot maximaal 20% grote zandvraag;
- Deze extra vraag komt voornamelijk ten laste van de buitendelta's;
- Als gevolg van het 'Bruun-effect' gaan met name de echte kustvakken achteruit;
- Bij meer ongunstige scenario's neemt de globale systeemosie toe van 7 tot circa 10 Mm³/jaar;
- De echte kusterosie neemt zowel in relatieve als absolute zin toe van 2 tot 4 Mm³/jaar (van 25 tot 40% van het systeemverlies);
- De benodigde suppletie-inspanning gaat de in de JARKUS-zone optredende kusterosie met circa 60% te boven;
- De voor de handhaving van de huidige kustlijn te leveren suppletie-inspanning bedraagt 3 tot 6 Mm³/jaar;
- Mede door het uitvoeren van suppleties neemt de beïnvloeding van het kuststelsel sterk toe;
- De ontkoppeling van morfologische deelsystemen is (dan) niet meer toelaatbaar.

9.3 Aanbevelingen

9.3.1 Inleiding

In het volgende zijn de aanbevelingen voor vervolgonderzoek in kaart gebracht. Naast suggesties voor de verdere verbetering/ontwikkeling van het MOBIC-model zijn ook aanbevelingen gedaan voor in het kader van de volgende kustnota te initiëren onderzoek.

9.3.2 Gedragsmodellering conform MOBIC-model

Uit de resultaten van de uitgevoerde studie komt naar voren dat het ontwikkelde gedragsmodel goede mogelijkheden biedt tot analyse van een complex morfologisch systeem. Er wordt dan ook aanbevolen om de ontwikkeling van dit model met kracht voort te zetten. Ideaal is daarbij de situatie waarbij zowel proces- als gedragsmodellen naast elkaar worden ontwikkeld.

9.3.3 Toepassing Waddenkust (MOBIC-WK-model)

Met betrekking tot de toepassing voor de Waddenkust wordt aanbevolen om op termijn opnieuw een voorspelling te maken met dit rekenmodel.

Het mag duidelijk zijn dat het gebruikte zeegatconcept veel nadere aandacht verdient. Met name het goed meenemen van het getijtransport en de directe koppeling met het getijprisma zijn hierbij van belang.

Ten aanzien van de effecten van zeespiegelstijging op het dwarstransport en de ontwikkeling van het dwarsprofiel (Bruun-effect) zal moeten worden gestreefd naar een eenduidige goed onderbouwde benadering.

Onzekerheden in het golf- maar met name het getijgedreven transport in de onderlaag dienen te worden gereduceerd. Verder is meer informatie gewenst over het dwarstransport over de NAP-20m-dieptelijn.

Een verdere aanbeveling heeft betrekking op de afhandeling van de randvoorwaarden in het zeegat. De morfologische respons van de binnendelta/vloedkom zou eigenlijk een onderdeel moeten vormen van het rekenmodel. Dit geldt zeker bij verdere uitvoering van het handhavingsbeleid.

Verder mag natuurlijk duidelijk zijn dat verdere kennisvermeerdering over zeegatsystemen in het algemeen en het Zeegat van Texel in het bijzonder, van groot belang is. Te denken valt daarbij bijvoorbeeld aan het bepalen en kwantificeren van de echt optredende transportpatronen.

9.3.4 Uitbreiding balans-model (van MOBIC-WK tot MOBIC-NK)

Om te komen tot een meer eenduidige behandeling van de gehele Nederlandse kust wordt aanbevolen om ten behoeve van de volgende kustnota, de huidige linker grens van het dynamische balansmodel voor de Waddenkust (MOBIC-WK) minimaal te verleggen naar de Nieuwe Waterweg. Hierdoor valt het huidige balansmodel voor de Hollandse kust [conform Van Rijn, 1994] binnen dit nieuwe model.

Deze uitbreiding heeft, afgezien van de reeds genoemde meer eenduidige behandeling van de kust, nog tal van andere voordelen. Te noemen zijn onder andere het ontbreken van discrepanties bij modelovergangen, het gebruiken van gelijkwaardige formuleringen voor de transporten en het eenduidig omgaan met de effecten van bijvoorbeeld zeespiegelstijging op de kustontwikkeling.

Als eerste stap in deze richting wordt aanbevolen om een deelversie van het MOBIC-model voor de Hollandse Kust te formuleren (MOBIC-HK). Het balansmodel voor het kustdeel Hoek van Holland-Den Helder gaat daarmee bovendien over van een 'star balansmodel' (alleen autonoom intern dwarstransport [conform Van Rijn, 1994]) naar een 'dynamisch balansmodel' (interne transporten procesgestuurd; MOBIC-HK).

Verder zou zelfs moeten worden overwogen om ook de meer zuidelijk gelegen Deltakust binnen het model te laten vallen of daar in ieder geval een submodel voor te formuleren (MOBIC-DK). In dit ideale geval omvat het balansmodel dan de gehele Nederlandse kust (MOBIC-NK), te weten van het Zwin bij Cadzand tot de oostpunt van Schiermonnikoog, dit samengesteld uit drie submodellen, waarbij in feite geldt: MOBIC-DK + MOBIC-HK + MOBIC-WK = MOBIC-NK.

Ten slot moet nog worden opgemerkt dat een dergelijke aanpak vrijwel 'automatisch' zal moeten leiden tot een veel betere afstemming van de werkzaamheden zoals die zullen worden uitgevoerd in de verschillende Kustgenese/NCK-werkgroepen. De (geforceerde) toelevering aan dit MOBIC-NK-model, maakt immers dat onderlinge afstemming (meer) noodzakelijk is.

9.3.5 Verdere verbetering MOBIC-model

Ten aanzien van de verdere verbetering van het MOBIC-gedragsmodel wordt aanbevolen om te komen tot een verdere onderbouwing/verbetering van de gedragsbeschrijving van de buitendelta en bij de modellering van het zeegat eveneens rekening te houden met het getijgedreven transport.

Voor de koppeling met het binnengebied moeten in eerste instantie de empirische relaties als opgenomen in het MORRES-model, in het MOBIC-model worden ingebracht. Op deze wijze ontstaat er een directe koppeling tussen buiten- en binnengebied.

Ten aanzien van het dwarstransport wordt aanbevolen om te komen tot een niet-lineaire beschrijving van het dwarstransport, waarbij er een verschil aanwezig is in de tijdschaal voor kusterosie en kustaanwas. In dit kader moet ook worden gekeken naar het nader kwantificeren van het dwarstransport in het algemeen maar met name van de diepte-variantie van de dwarstransportconstante. Deze laatste is immers boven water afhankelijk van de netto transportrichting (zie ook relatie met profielgedragsmodel in Sectie 9.3.8 en eolisch transport in Sectie 9.3.9).

Voor de beschrijving van het langstransport zal de niet-lineariteit van de transportkromme moeten worden meegenomen door het introduceren van een aangepaste eerste-orde benadering. Verder moet ook de continuïteit van de getijgedreven langsstroom beter worden gewaarborgd.

Verder wordt aanbevolen om de effecten van de verschillende constructies in het model in te bouwen. Hierbij moet in ieder geval gedacht worden aan dammen (zowel in langs- als dwarsrichting). Dit is ook voor de nadere analyse van verdedigingsvarianten van belang (zie Sectie 9.3.7).

9.3.6 Evaluatie/invulling handhavingsbeleid

Het ingezette handhavingsbeleid zal in toenemende mate vragen om een doelmatige invulling van het suppletiebeleid. Deze invulling vereist naast een *optimalisatie van de suppletie-uitvoering*, ook onderzoek naar andere ondersteunende alternatieven.

Het beleid is primair gericht op het tegengaan van de structurele erosie. Omdat de meer *temporele/incidentele erosie* niet wordt tegengegaan, en in principe alleen maar zal toenemen, wordt ook aanbevolen om gericht onderzoek uit te voeren naar de kwantificering hiervan.

Naar verwachting zal er verder in de toekomst in toenemende mate sprake zijn van integraal kustbeheer, waarbij een verschuiving zal optreden van kustlijn-zorg naar *kustzone-zorg*. Hierdoor zal in toenemende mate het effect van eolisch transport van belang worden.

Een nadere uitwerking van de drie genoemde aspecten is gegeven in het volgende.

9.3.7 Invulling suppletiebeleid

Het huidige gedragsmodel biedt goede mogelijkheden om te komen tot een meer optimale invulling van het suppletiebeleid. De benodigde tijdsgemiddelde suppletie-inspanning kan immers op verschillende wijzen worden gerealiseerd. Te denken valt daarbij aan verschillende tijdsfaseringen, maar ook verschillende posities in het profiel. Dit laatste zowel in dwarsrichting (strand- versus vooroeversuppletie) als in langsrichting (lokale in plaats van gespreide voeding). Verder kunnen ook opties worden bekeken waarbij het suppletiezand binnen het kuststelsel wordt verplaatst (winning binnen de NAP-20m-dieptelijn).

Hierbij dient ook gekeken te worden naar een combinatie met bijvoorbeeld harde constructies. Te noemen zijn de aanleg van langere dammen (conform dam bij Eierland) en de aanleg van duinvoetverdedigingen en/of langsdammen.

Als modeluitbreiding is het in principe ook mogelijk om naast de benodigde hoeveelheden ook een indicatie te geven over de hieraan verbonden kosten. Hiertoe dient zowel informatie te

worden toegeleverd over de mobilisatiekosten als de diepte-afhankelijke eenheidskosten per m³. Voor onderlinge vergelijking van verschillende suppletie-scenario's kan dan gebruik worden gemaakt van een zogenaamde disconteringsmethode.

9.3.8 Structurele versus temporele erosie

Door het beleid van kustlijnhandhaving wordt de indruk gewekt dat alle kustafslag zal worden tegengegaan. Dat dit natuurlijk onterecht is, is voor insiders wel duidelijk. Toch zal het steeds zo zijn dat bij elke winterstorm er weer (vervelende) berichten de ronde doen over grote kustafslag en 'dat het zo niet verder kan'. Het lijkt dus zinnig om naast de aandacht die er terecht is voor de meer structurele erosie, ook aandacht te geven aan de grootte van de temporele erosie.

Uitgaande van de veronderstelling dat deze erosie primair gerelateerd is aan dwarstransportprocessen kan hieraan een raai-beschouwing ten grondslag liggen. Het jaarlijkse klimaat zorgt immers voor wat betreft de ligging van de duinvoet voor een zekere spreiding rond de gemiddelde trend. Door karakteristieke klimaten te koppelen aan een 'process-based' gedragsmodel conform Vgl.(9.2.2), kunnen de te verwachte marges worden afgeschat en eventuele onderhoudsmaatregelen (teenconstructies in duinvoet, banketten tegen de duinvoet, e.d.) worden geoptimaliseerd. Ten opzichte van de dwarstransportversie van het MOBIC-model is hierbij dus sprake van een minder verregaande schematisatie (geen lagen meer).

Een eerste aanzet tot de verdere ontwikkeling een dergelijk profielgedragsmodel is reeds onder de naam SCOPE, acroniem voor 'Simulation of COastal Profile Evolution', in het kader van TAW-C-onderzoek opgestart [Steetzel, 1995a]. Dit SCOPE-model bevindt zich als het ware tussen het grootschalige MOBIC-model en de proces-modellen UNIBEST-TC en DUROSTA. Aanbevolen wordt om dit de ontwikkeling van dit model (gezamenlijk) verder op te pakken.

9.3.9 Hydraulisch versus eolisch transport

Tijdens stormen is er zowel in langs- als dwarsrichting sprake van veel windtransport, op sommige plaatsen zelfs zoveel dat een significant deel van de te handhaven strandlaag structureel verlies vertoont. Tot nu toe is relatief weinig aandacht gegeven aan dit aspect en wordt het netto effect van winderosie bij uitvoering van kustlijnberekeningen impliciet ondergebracht in de hydraulische langstransportparameters.

Ook bij het herstel van temporele erosie door stormafslag speelt eolisch transport een cruciale rol. In dit licht wordt dan ook aanbevolen om meer onderzoek te doen naar de modellering van windtransport, teneinde vanuit de hierdoor opgedane kennis te komen tot een meer optimaal beheer van de kustzone in plaats van de kustlijn.

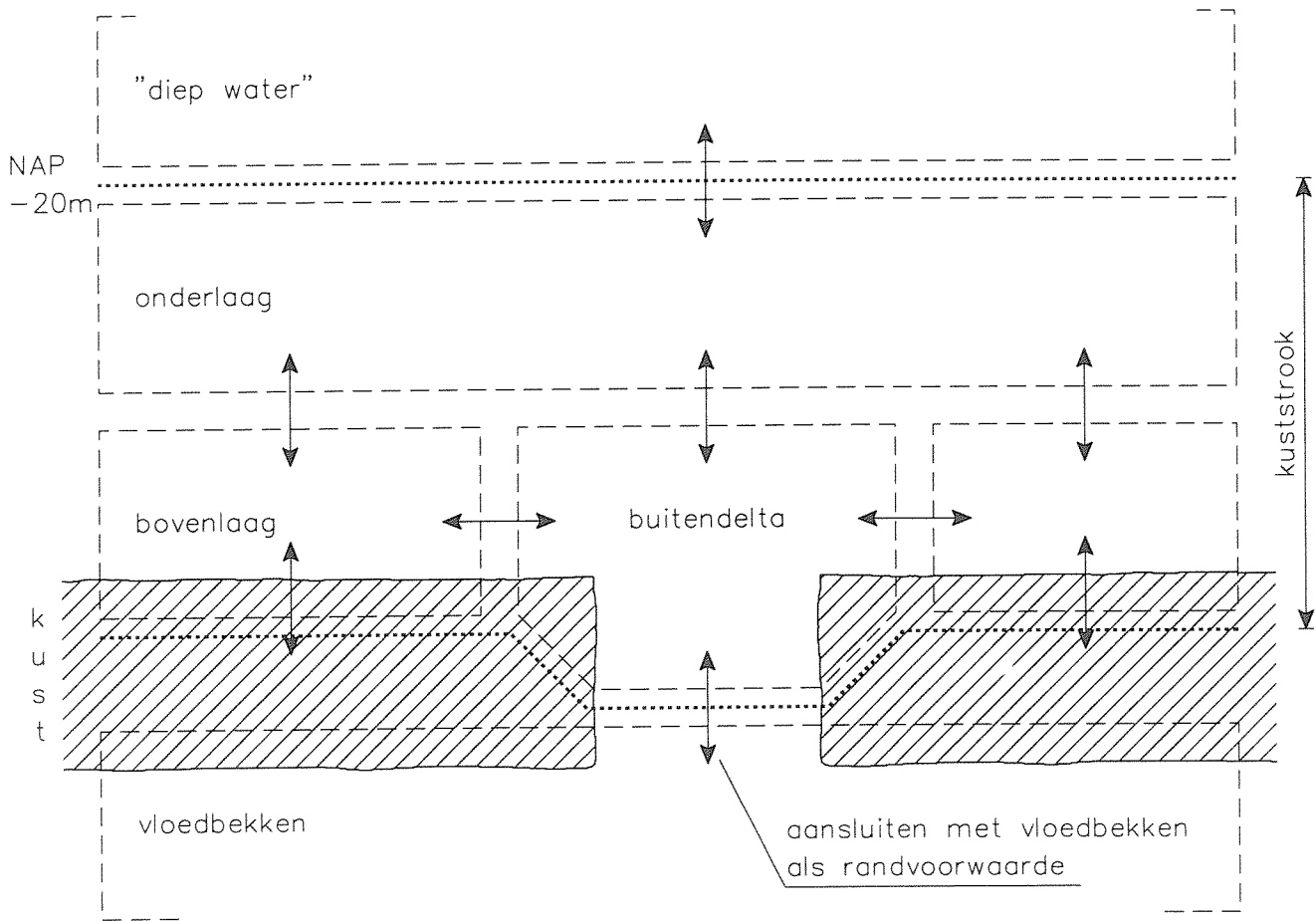
Een eerste aanzet tot een dergelijk, op ontwikkeling van een proces-model gericht onderzoek is reeds in het kader van TAW-C-onderzoek opgestart [Steetzel, 1995b]. Het betreft hier een samenwerking tussen de Universiteit van Amsterdam en het Waterloopkundig Laboratorium. Aanbevolen wordt om ook dit onderzoek gezamenlijk uit te bouwen.

LITERATUUR

- Allersma, E. (1992), *Geulmigratie in buitendelta's*, Verslag van een bureaustudie, Waterloopkundig Laboratorium, Rapport onderzoek H840.55.
- van Alphen, J.S.L.J. and M.A. Damoiseaux (1987), *A morphological map of the Dutch shoreface and adjacent part of the continental shelf*, Nota NZ-N-87.21/MDLK-R-87.18.
- Arens, S.M. (1994), *Aeolian processes in the Dutch foredunes*, Proefschrift, Universiteit van Amsterdam.
- Aubrey, D.G. and L. Weishar (eds) (1988), *Hydrodynamics and sediment dynamics of tidal inlets*, Lecture notes on coastal and estuarine studies, Vol.29.
- Bakker, W.Th. (1972), *Cursus kustdynamica en kustverdediging; Dynamica van kusten*, Stichting postdoctoraal onderwijs in de civiele techniek, dictaat CT-KK6.
- Bakker, W.Th. (1987), *Waarheden omtrent kustgedrag*, Rijkswaterstaat, Dienst Getijdewateren, nota GWAO-87.004
- Bakker, W.Th., C. van de Kerk en J.H. de Vroeg (1988), *Determination of coastal constants in mathematical line models*, Second European Workshop on Coastal Zones, Loutraki.
- Bakker, W.Th. (1993), *Effect of tidal resonance on the morphology of wadden and estuaries*, Presented at ECSA-23, Haren.
- Biegel, E.J. (1991a), *Equilibrium relations in the ebb tidal delta, inlet and backbarrier area of the Frisian Inlet system*, Rijkswaterstaat, Dienst Getijdewateren, Nota GWAO-91.06.
- Biegel, E.J. (1991b), *De ontwikkelingen van de ebgetijde delta en het komberginsgebied van het Friesche zeegat in relatie tot de afsluiting van de Lauwerszee*, R.V.V., Vakgroep Fysische Geografie, Rapport GEOPRO 1991.07.
- Bilse, D.P. (1993), *A large scale model of the morphological behaviour of the outer delta of tidal inlets*, Waterloopkundig Laboratorium, rapport onderzoek H1887.
- Boer, M. de, G. Kool, M.F. Lieshout en D.L. Ulm (1991), *Erosie en sedimentatie in de buitendelta van het Zeegat van Ameland 1926-1982, Rapportage ANVX-91.H205, Deelonderzoek nr.8*, Rijkswaterstaat, directie Noord-Holland.
- Bouwmeester, E.C. (1993a), *Projectplan KUSTGEN*MORF, periode 1993-1994*. Rijkswaterstaat, Dienst Getijdewateren, AOF.
- Bouwmeester, E.C. (1993b), *Offerte-aanvraag Waddenmodellering*, Rijkswaterstaat, Dienst Getijdewateren, notitie AO/935307.
- Bouwmeester, E.C. (1994), *Statistische analyse en voorspelling van de nederlandse kustontwikkeling*, Rijkswaterstaat, rapport RIKZ/94-045.
- Bruun, P. (1986), *Morphological and navigational aspects of tidal inlets on littoral drift shores*, Journal of Coastal Research, Vol.2, No.2, pp.123-145.
- CUR (1987), *Manual on artificial beach nourishment*, Report 130.
- Dijkman, M.J., J.H. de Vroeg en W.T. Bakker (1989), *Twee-lijn model van de Hollandse kust, Voorspelling kustlijn 1990-2090, Fase 3, deelrapport 3.2 (van Technisch Rapport 5)*, Technische Universiteit Delft, Faculteit der Civiele Techniek, vakgroep Waterbouwkunde.
- Dongeren, A. van (1992), *A model of the morphological behaviour and stability of channels and flats in tidal basins*, Technische Universiteit Delft, Faculteit der Civiele Techniek, Delft.
- Ehlers, J. (1988), *The morphodynamics of the Wadden Sea*, Balkema, Rotterdam.
- Glim, G.W., G. Kool, M.F. Lieshout, M. de Boer e.a. (1986), *Erosie en sedimentatie in de buitendelta van het Zeegat van het Vlie 1933-1982, Rapportage ANWX-86.H210, Deelonderzoek nr.7*, Rijkswaterstaat, directie Noord-Holland.
- Glim, G.W., N. de Graaff, G. Kool, M.F. Lieshout, M. de Boer e.a. (1988), *Erosie en sedimentatie in de buitendelta van het Zeegat van Texel en aangrenzende kuststroken 1925-1981, Rapportage ANWX-88.H201, Deelonderzoeken nrs. 5 en 9*, Rijkswaterstaat, directie Noord-Holland.

- Glim, G.W., G. Kool, M.F. Lieshout en M. de Boer (1990), *Erosie en sedimentatie in de buitendelta van het Eierlandse Gat en aangrenzende kuststroken 1926-1983, Rapportage ANWX-90.H204, Deelonderzoeken nrs.6 en 10*, Rijkswaterstaat, directie Noord-Holland.
- Hartsuiker, G (1992), *Morphodynamic Response of a Tidal Inlet after a Reduction in Basin Area, Numerical simulation of hydro- and morphodynamics of the mesotidal inlet "Het Friesche Zeegat"*, Waterloopkundig laboratorium in samenwerking met Rijkswaterstaat, Dienst Getijdewateren
- Karssen, B. en Z.B. Wang (1991), *Morphological modelling in estuaries and tidal inlets, part I, a literature survey*, Waterloopkundig Laboratorium, rapport Z473.
- Kleef, A.W. van (1991), *Empirical relationships for tidal inlets, basins and deltas*, Inst. voor Ruimtelijk Onderzoek, Utrecht.
- Kool G. en M.F. Lieshout (1991), *Erosie en sedimentatie in de buitendelta van het Eierlandse Gat 1981-1987, Rapportage ANVX-91.H201, Supplement deelonderzoek 6*, Rijkswaterstaat, directie Noord-Holland.
- Louters, T. en F. Gerritsen (1994), *Het mysterie van de Wadden, hoe een getijdesysteem inspeelt op de zeespiegelstijging, Rapport RIKZ-94-040*, Rijkswaterstaat, Rijksinstituut voor Kust en Zee.
- Reinalda, R., Kollen, J. en W.D. Eysink (1987), *Gaswinning op Ameland-oost, effecten van de bodemdaling*, Waterloopkundig Laboratorium en Rijksinstituut voor Natuurbeheer Arnhem, Leersum en Texel, rapport H114
- Negen, E.H. (1994), *Morfologisch onderzoek met 2DH numerieke veldmodellen bij Eierland (Texel)*, Afstudeerverslag H1887/H460, Technische Universiteit Delft.
- Perlin, M. and R.G. Dean (1983), *A Numerical model to simulate sediment transport in the vicinity of coastal structures*, U.S. Army Corps of Engineers, Coastal Engineering Research Center, Miscellaneous report no. 83-10.
- Rakhorst, H.D., G. Kool en M.F. Lieshout (1993), *Erosie en sedimentatie in de buitendelta van het Zeegat van Ameland en aangrenzende kuststroken 1926-1989, Rapportage ANV-92.201, Deelonderzoek nr.12. Supplement deelonderzoek nr.8*, Rijkswaterstaat, directie Noord-Holland.
- Ribberink, J.S. en J.H. de Vroeg (1991), *Kustverdediging Eierland (Texel), hydraulisch morfologische effectstudie, fase I, deel I, morfologische analyses*, Waterloopkundig Laboratorium, Onderzoek H1241.
- Rijkswaterstaat/Waterloopkundig Laboratorium (1986), *Manual on Artificial Beach Nourishment, Annex V*.
- Rijkswaterstaat (1990), *Kustverdediging na 1990: discussienota*.
- Roskam, A.P. (1988), *Golfklimaten voor de Nederlandse kust*, Rijkswaterstaat, Nota GWAO-88.046
- Sha, L.P. (1991), *Sedimentological studies of the ebb-tidal deltas along the West Frisian Islands, the Netherlands*, Mededelingen van het Instituut voor Aardwetenschappen der Rijksuniversiteit te Utrecht, No.64.
- Sha, L.P. en J.H. van den Berg (1993), *Variation in ebb-tidal delta geometry along the coast of the Netherlands and the German bight*, Journal of Coastal Research, Vol.9, No.3, pp.730-746.
- Skou, A. (1990), *On the geometry of cross-section areas in tidal inlets*, Technical University of Denmark, Series Paper No.51.
- Smit, E.S.P. (1987), *De invloeden van zeegaten op de kust*, Afstudeerverslag Technische Universiteit Delft.
- Stive, M.J.F., Boer, S. en G.K.F.M. van Banning (1983), *Beleidsanalytische Studie Kustverdediging Texel, Voortgangsverslag Deelstudie Kustmorfologie*, KUSTEX S92, Waterloopkundig Laboratorium, rapport R 1709-01.
- Steezel, H.J. (1991), *DUROSTA-1.11; Tijdsafhankelijk dwarstransportmodel voor extreme condities*, Waterloopkundig Laboratorium, Onderzoek H298.
- Steezel, H.J. (1993a), *Onderzoeksvoorstel "Modellering Waddenkust"*, Waterloopkundig Laboratorium, offerte onderzoek H1887.
- Steezel, H.J. (1993b), *Cross-shore transport during storm surges*, Ph.D. Thesis, Delft University of Technology.

- Steetzel, H.J. (1994), *Bresgroei; Mathematisch model BREACH*, Waterloopkundig Laboratorium, Rapport H1242, deel I.
- Steetzel, H.J. (1995a), *Gedragsmodel; Opzet en formulering SCOPE-model*, Waterloopkundig Laboratorium, Rapportage H2144 (in voorbereiding).
- Steetzel, H.J. (1995b), *Formulering windtransportmodule t.b.v. SCOPE-model*, Waterloopkundig Laboratorium, Rapportage H2132 (in voorbereiding).
- Steyn, R.C. (1991), *Some considerations on tidal inlets; literature survey*, Waterloopkundig Laboratorium, rapport H840.
- Stive, M.J.F. (ed.) (1989), *Kustverdediging na 1990: Kustvoorspelling*, Technisch rapport 5.
- Swart, D.H. (1974), *Offshore sediment transport and equilibrium beach profiles*, Ph.D. Thesis, Delft University of Technology.
- Thijssse, J.Th. (1972), *Een halve eeuw Zuiderzeewerken 1920-1970*, H.D. Tjeenk Willink b.v., Groningen.
- Vreugdenhil, C.B. (1985), *Numerieke berekeningen in waterbouwkunde en hydrologie*, Technische Universiteit Delft, Faculteit der Civiele Techniek, sectie Vloeistofmechanica, collegedictaat b84N.
- Vriend, H.J. de, and W.T. Bakker (1993), *Sedimentary Processes and Morphological Behaviour Models for Mixed-Energy Tidal Inlets*, WL/NCK, rapport H1887, mei 1993.
- Vriend, H.J. de, en J.A. Roelvink (1989), *Kustverdediging na 1990: Innovatie van kustverdediging, inspelen op het kuststelsel*, Technisch rapport 19.
- Walton, T.L. en W.D. Adams (1976), *Capacity of inlet outer bars to store sand*, Proceedings 15th Conference on Coastal Engineering, pp.1919-1937, Honolulu, Hawaii.
- Zwiers, M. (1990), *Kustdynamiek van vooroeversuppleties*, Afstudeerverslag Technische Universiteit Delft.



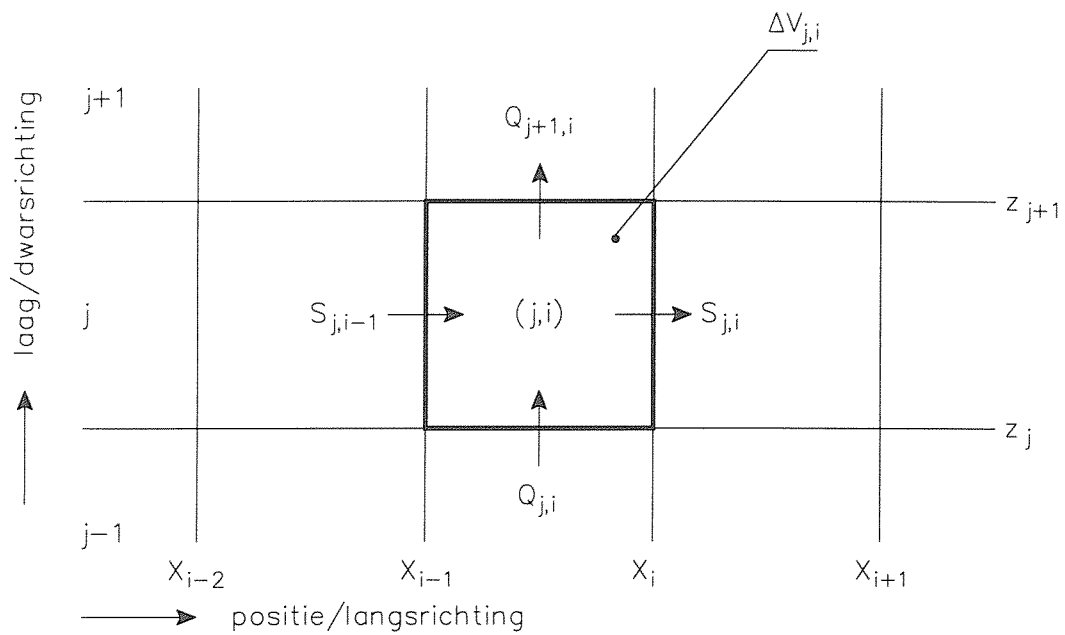
SCHEMATISCHE WEERGAVE ZEEGAT-SYSTEEM

"SWZS"

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

H1887

FIG.2.2.1

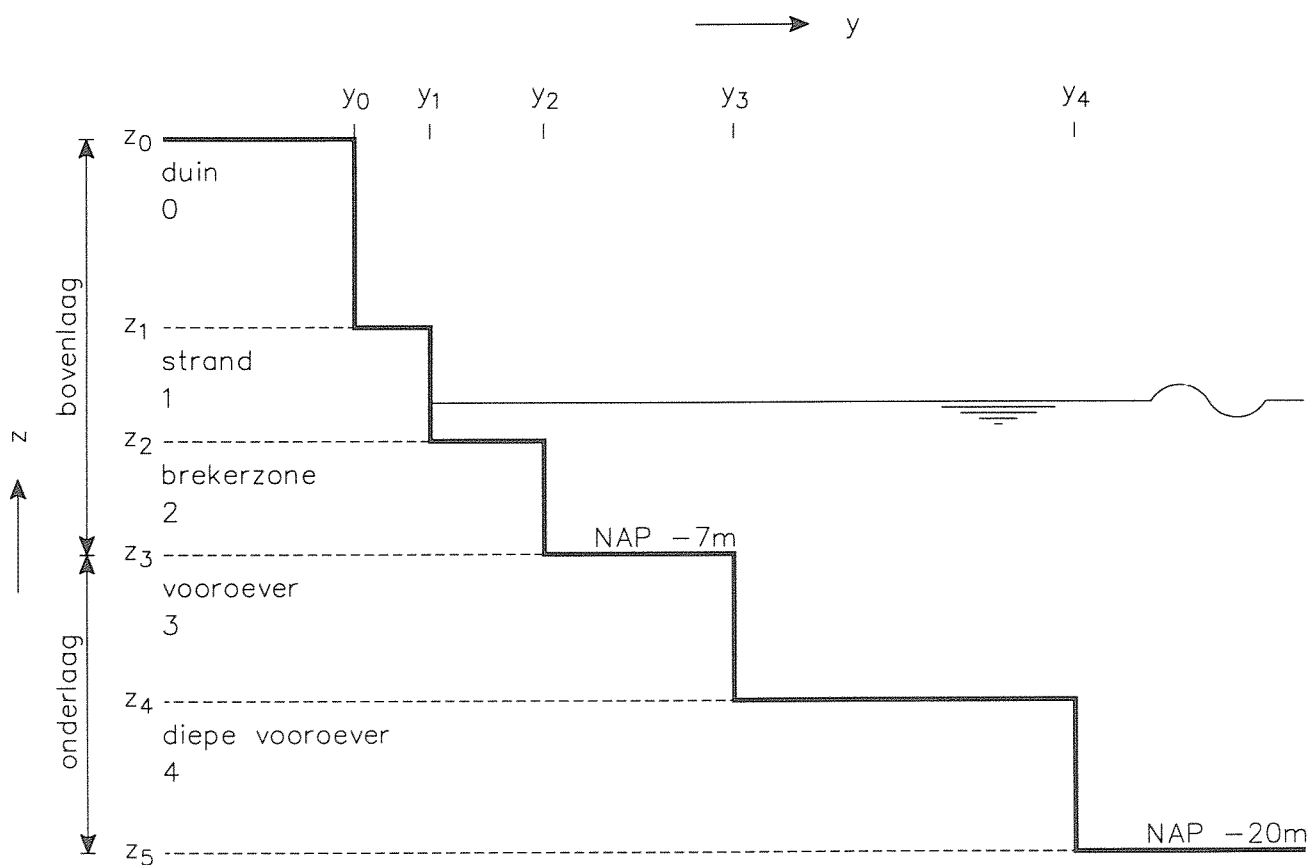


$$\frac{\Delta \text{Vol}_{j,i}}{\Delta t} = (S_{j,i-1} - S_{j,i}) + (Q_{j,i} - Q_{j+1,i}) + \frac{\Delta V_{j,i}}{\Delta t}$$

↑
langtransport
↑
dwarstransport
↑
bron

DEFINITIE PARAMETERS BALANS-
VERGELIJKING

"DPBV"



DEFINITIE MODELLAGEN REKENMODEL

MOBIC

"DMLRM"

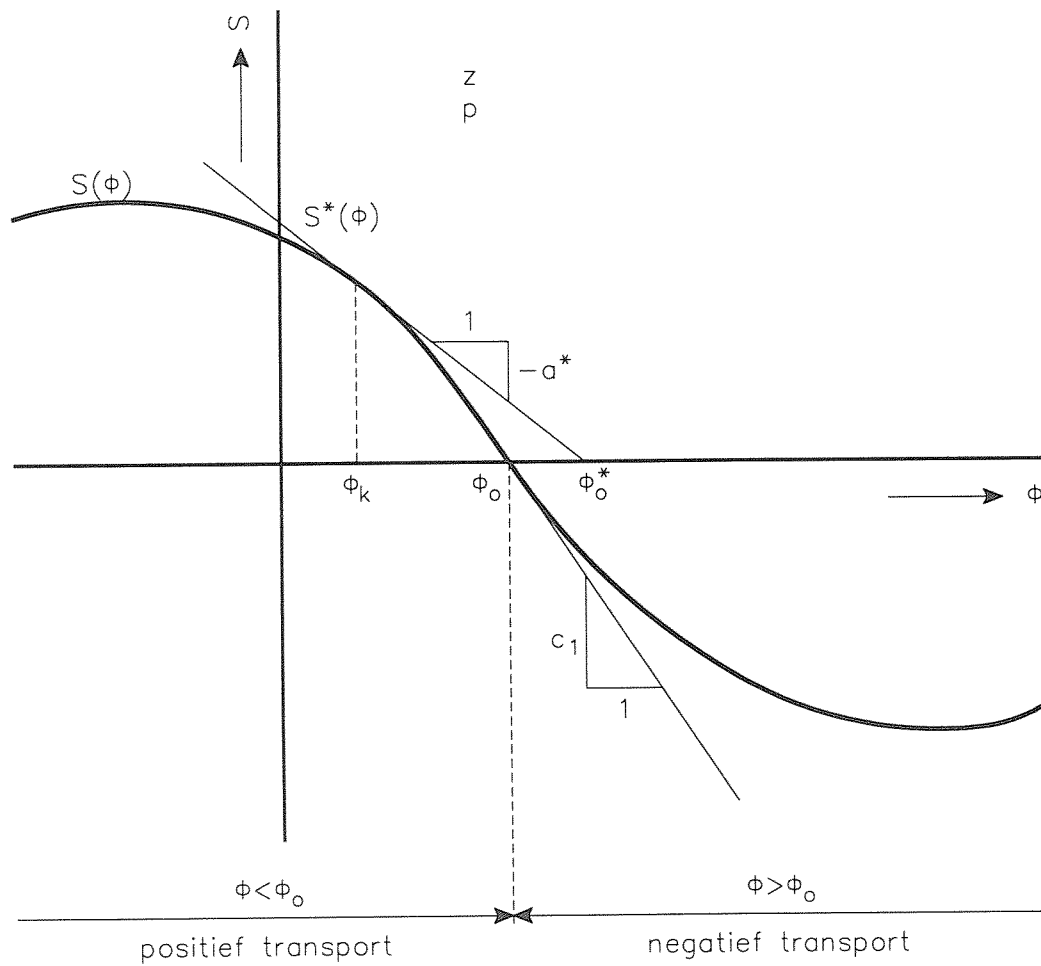
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

H1887

FIG.3.3.1

parametrisatie : $S(\phi) = c_1(\phi - \phi_0) \cdot \exp[-(c_2 \cdot (\phi - \phi_0))^2]$

linearisatie : $S^*(\phi) = a^*(\phi_0^* - \phi)$



ϕ_0 nultransporthoek

ϕ_k basishoek linearisatiepunt

LINEARISATIE TRANSPORTKROMME

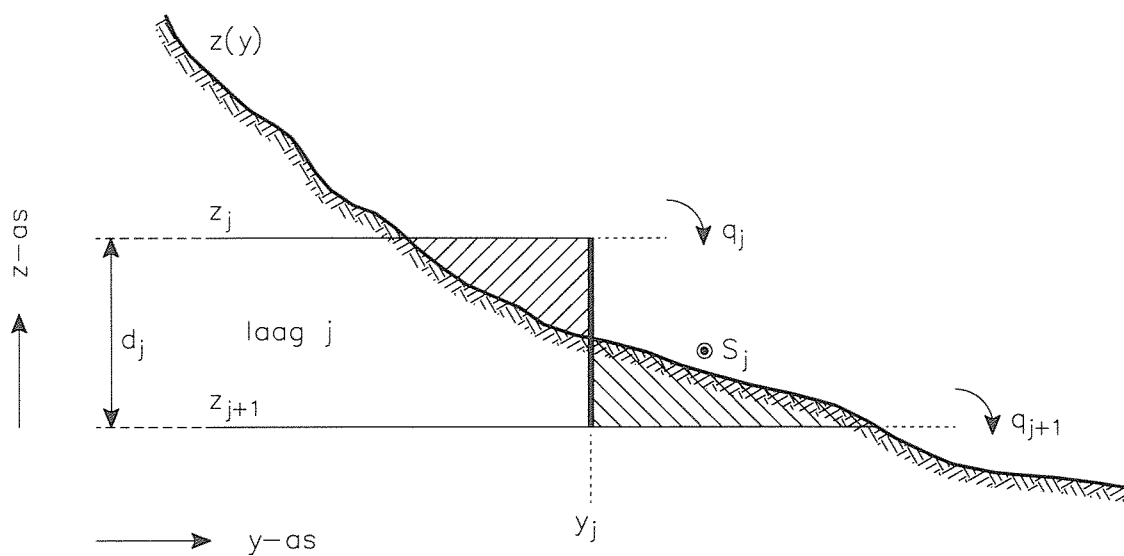
MOBIC

"LTPK"

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

H1887

FIG.3.4.1



$$y_j = \frac{1}{d_j} \int_{z_{j+1}}^{z_j} y(z) dz$$

SCHEMATISATIE DWARSPROFIEL

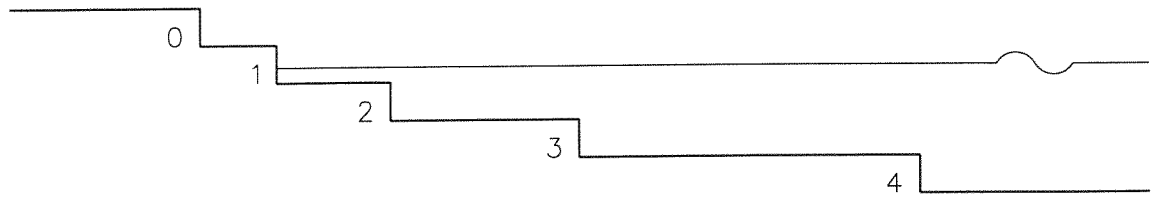
MOBIC

"SDP"

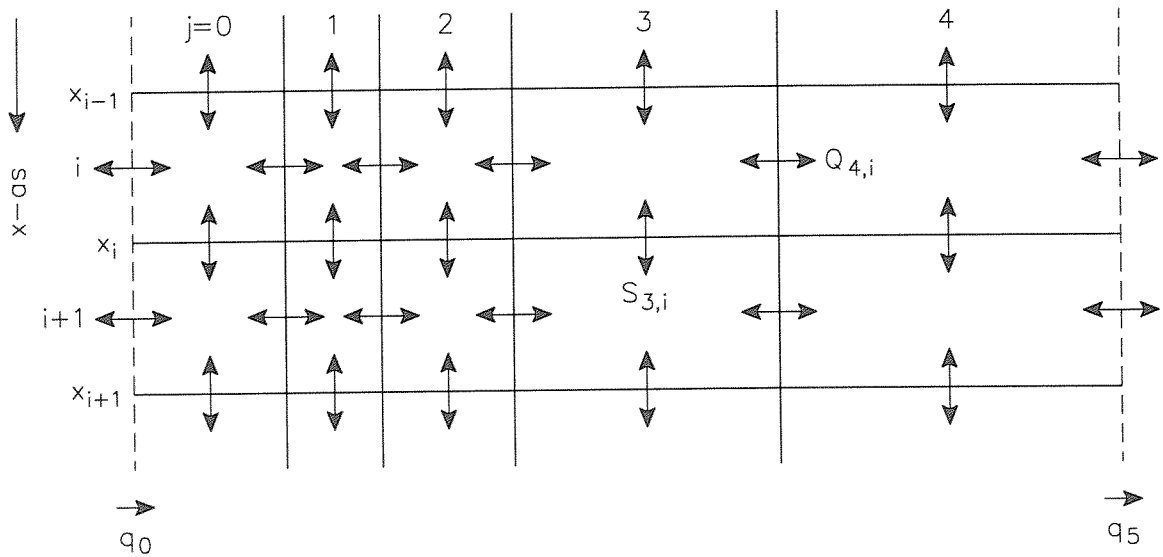
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

H1887

FIG.3.5.1



→ y-as



OVERZICHT BALANSVAKKEN

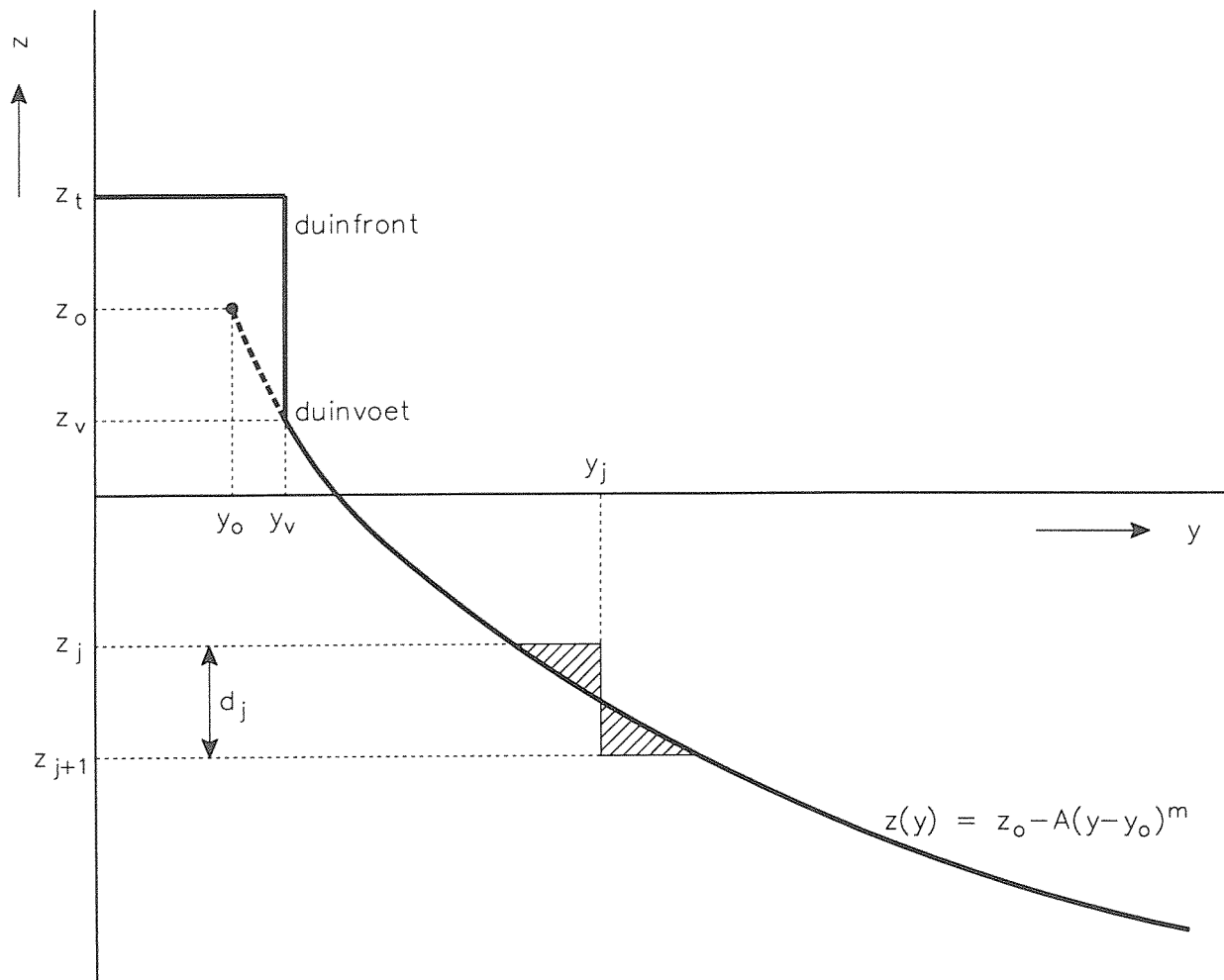
MOBIC

"OBV"

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

H1887

FIG.3.5.2



SCHEMATISATIE DWARSPROFIELVORM

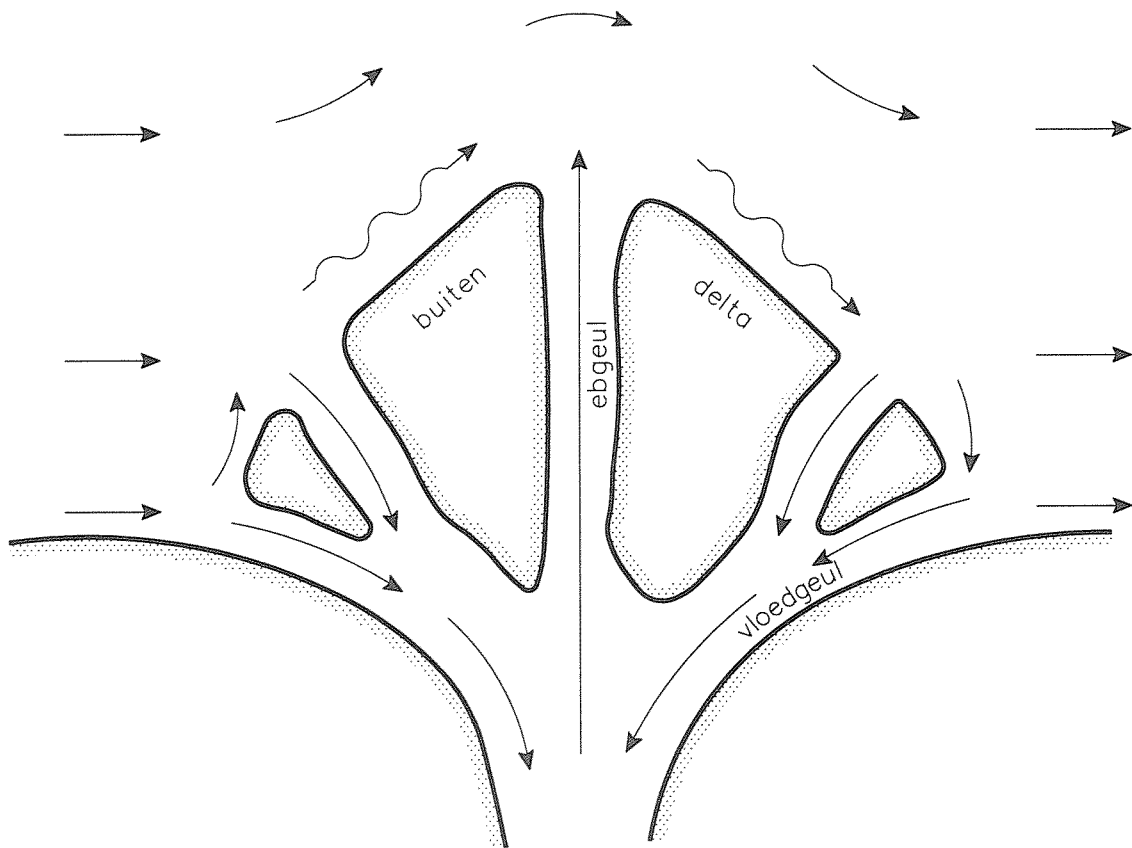
MOBIC

"SDPV"

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

H1887

FIG.3.5.3



TRANSPORTBANEN IN BUITENDELTA

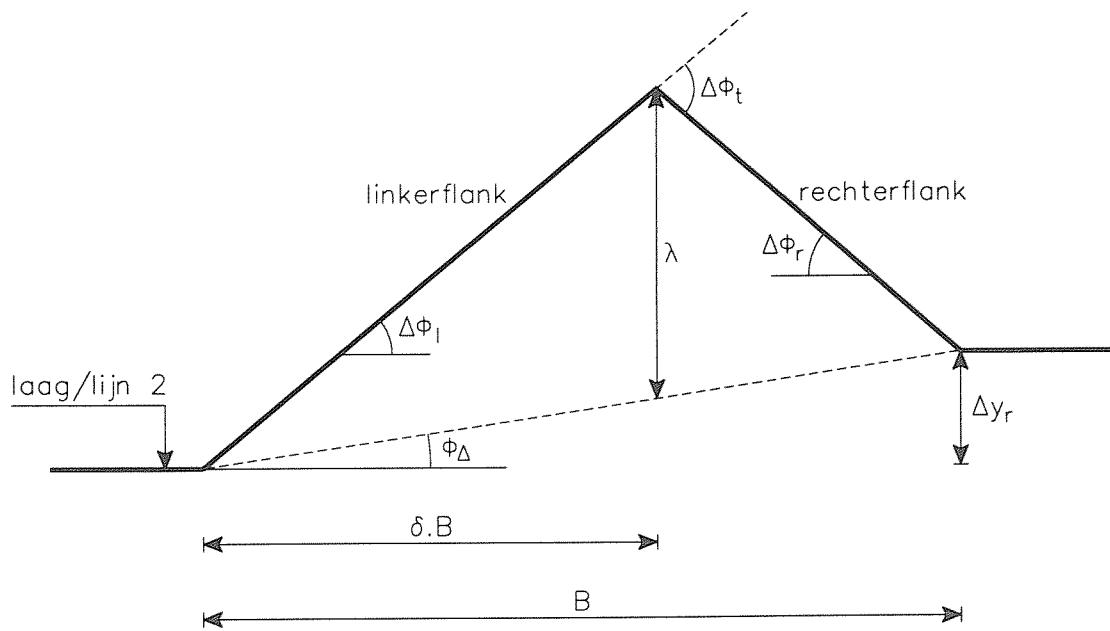
MOBIC

'TBIBD'

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

H1887

FIG.3.6.1



relatieve positie ebgeul : $\lambda_r = \lambda/B$

globale scheefheid delta : $\phi_\Delta = \Delta y_r / B$

verdraaiing links : $\Delta\phi_l = \lambda_r / \delta + \phi_\Delta$

rechts : $\Delta\phi_r = \lambda_r / (1-\delta) - \phi_\Delta$

top : $\Delta\phi_t = \lambda_r / (1-\delta)\delta$

GEOMETRIE BUITENDELTA

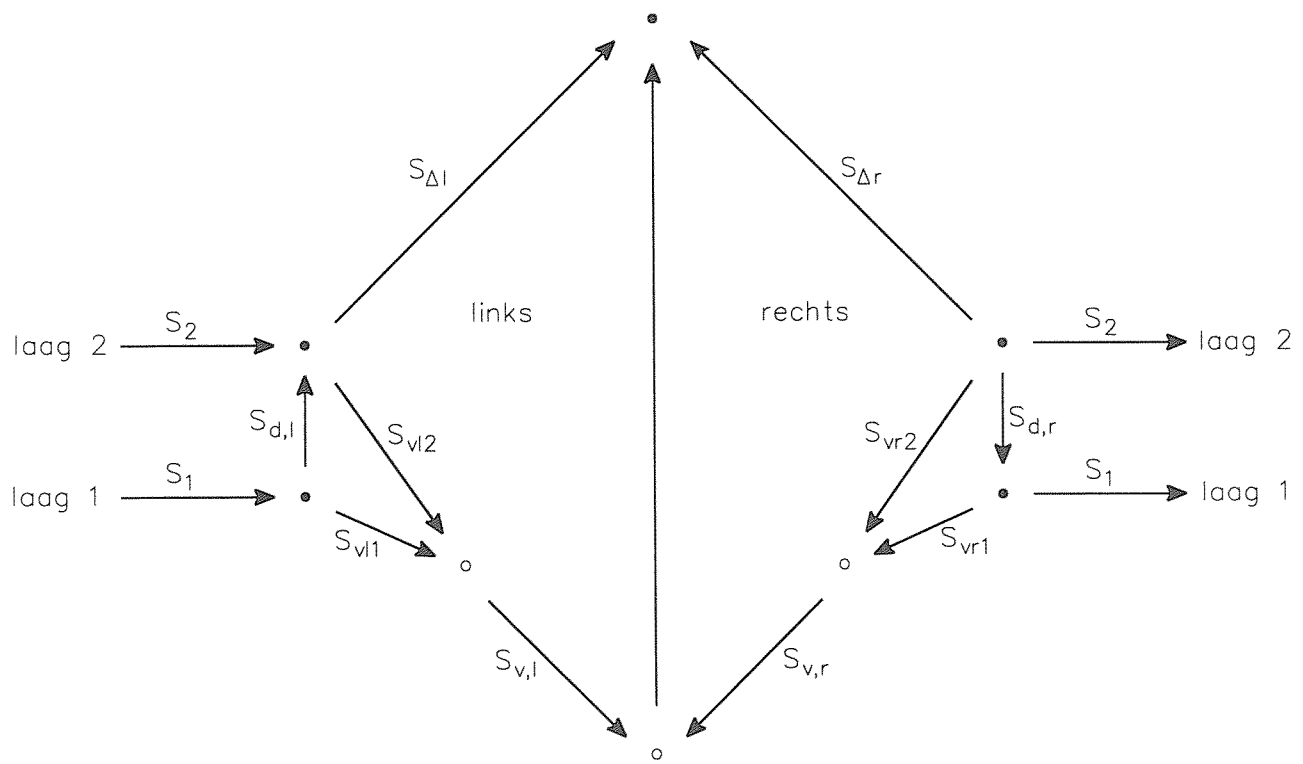
MOBIC

'GMTBD'

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

H1887

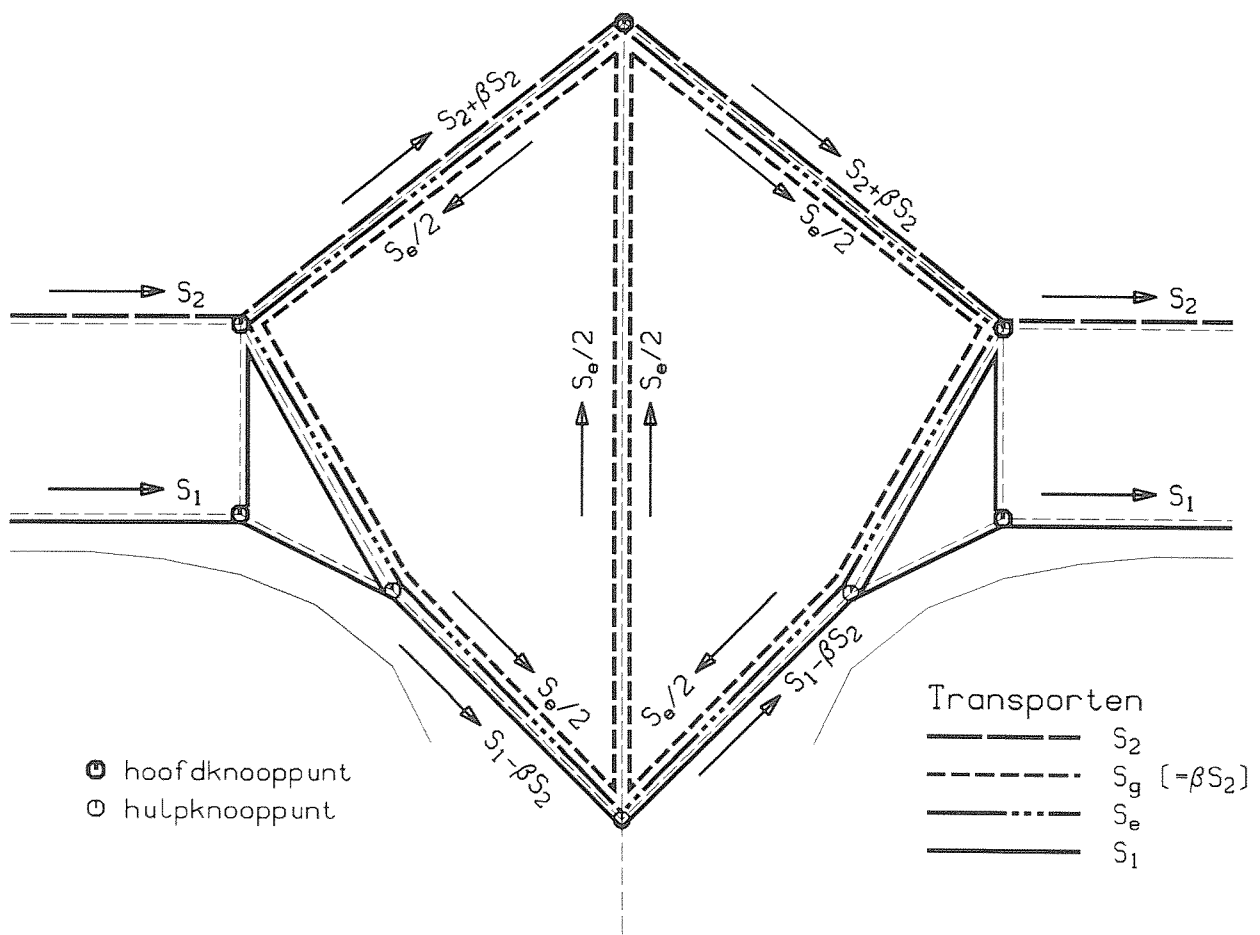
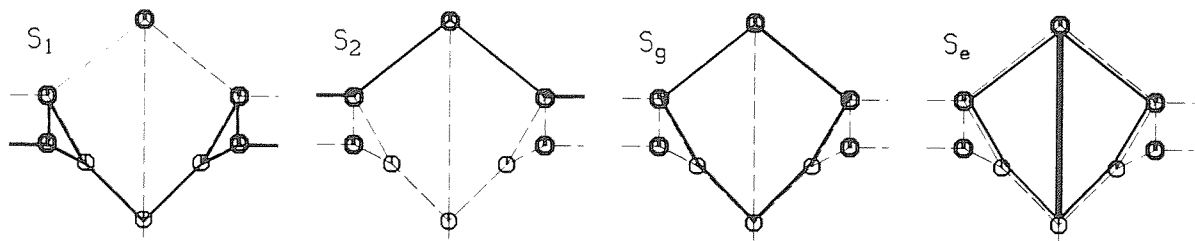
FIG.3.6.2



- knooppunt
- o hulpknooppunt

DEFINITIE TRANSPORTVECTOREN

MOBIC	"DTV"
H1887	FIG.3.6.3



feb. 1994

TRANSPORTBANEN DELTA-SYSTEEM

Evenwichtssituatie

MOBIC

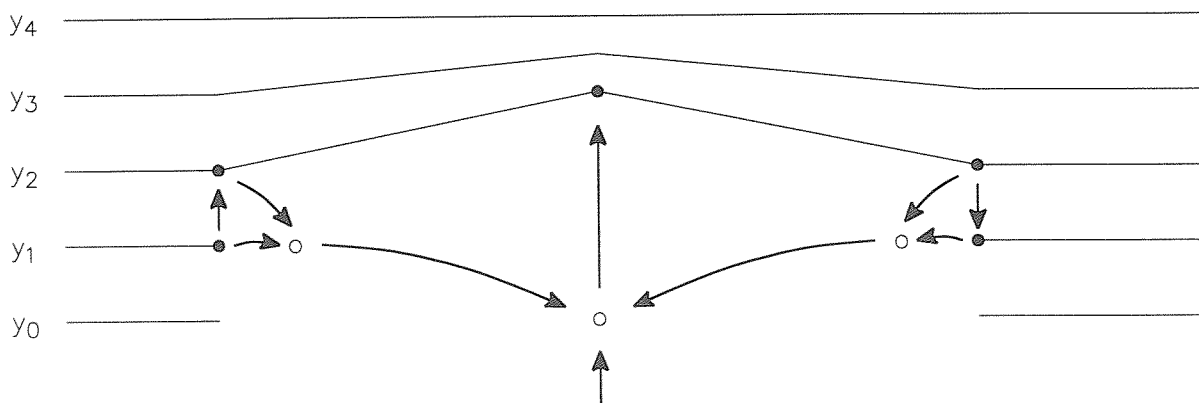
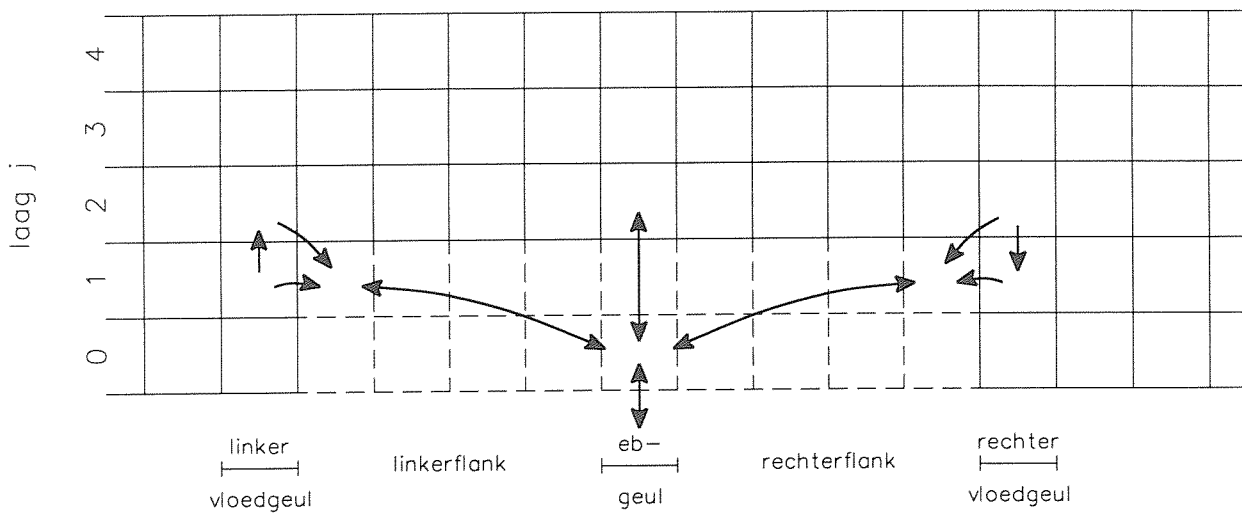
'DELTA'

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

H1887

FIG.3.6.4

celcode
 ...0.....0 1 2.....2.....2.....2 3 4.....4.....4.....4 5 0.....0...



CELCODERINGEN REKENALGORITHME

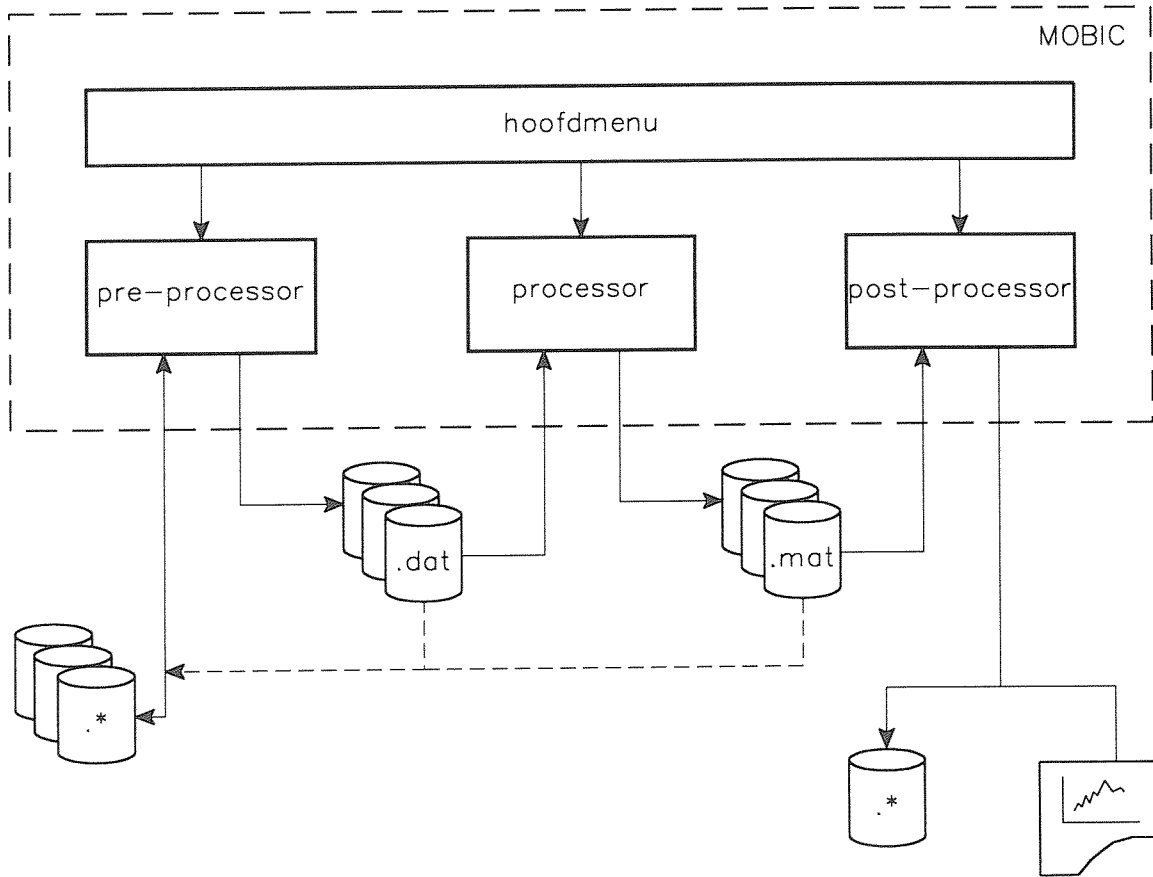
MOBIC

"CCRA"

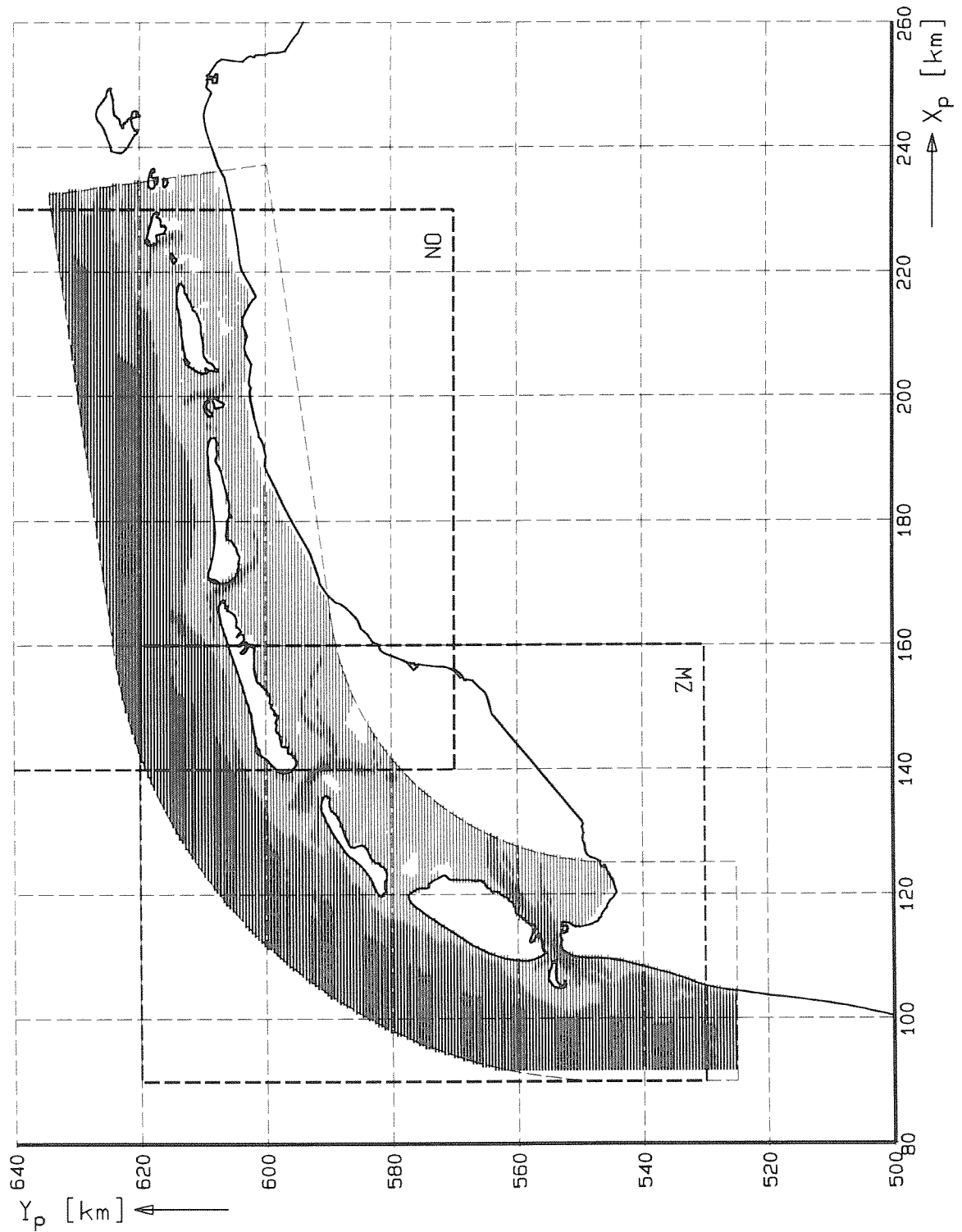
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

H1887

FIG.3.7.1



STRUCTUUR PC-MODEL MOBIC	MOBIC	"SPCM"
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM	H1887	FIG.3.8.1



okt. 1993

OVERZICHT WADDENKUST

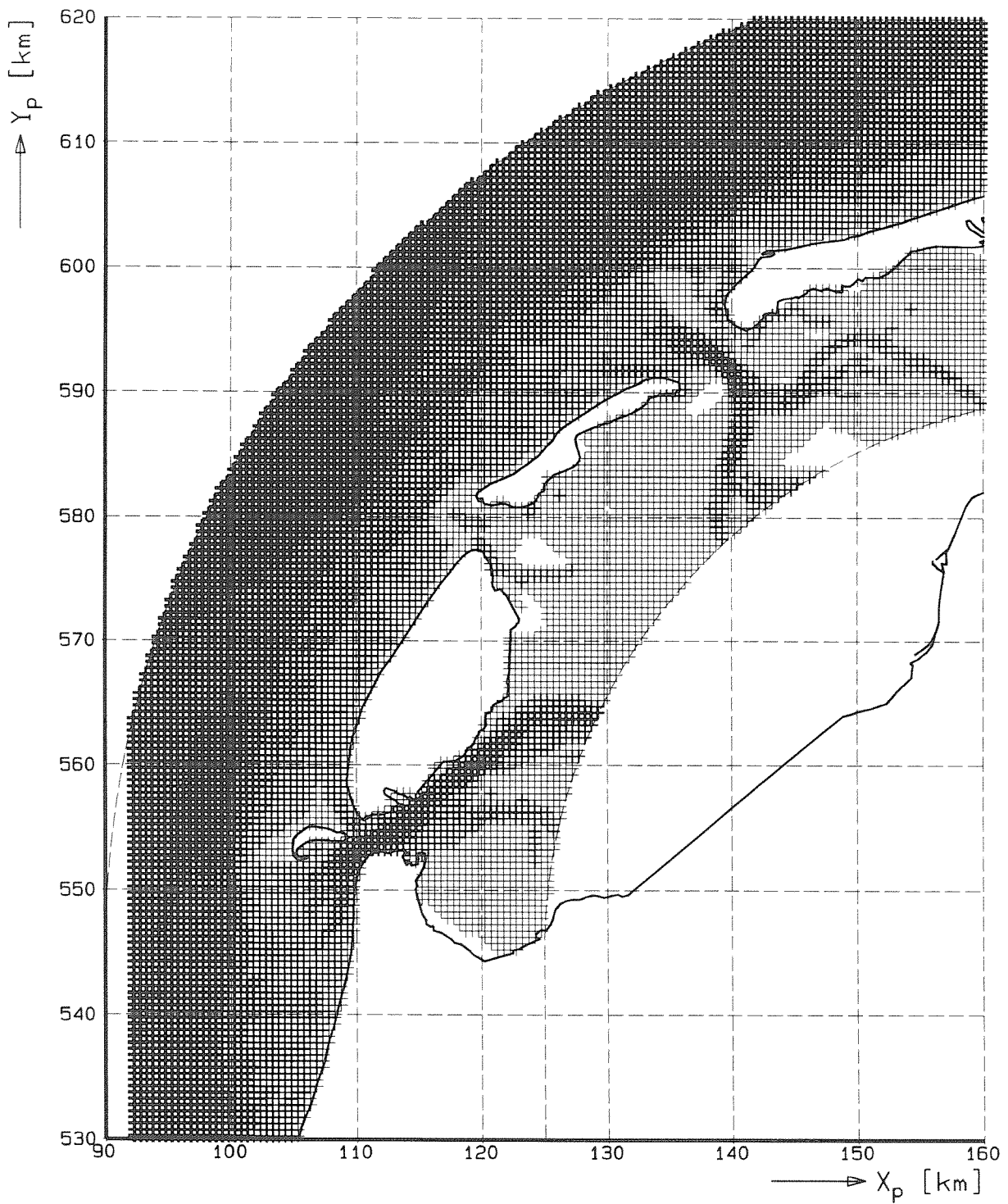
"WADDEN"

schaal 1 : 1.000.000

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

H1887

FIG.5.1.1



okt. 1993

DETAIL ZUID-WESTELIJKE WADDENKUST

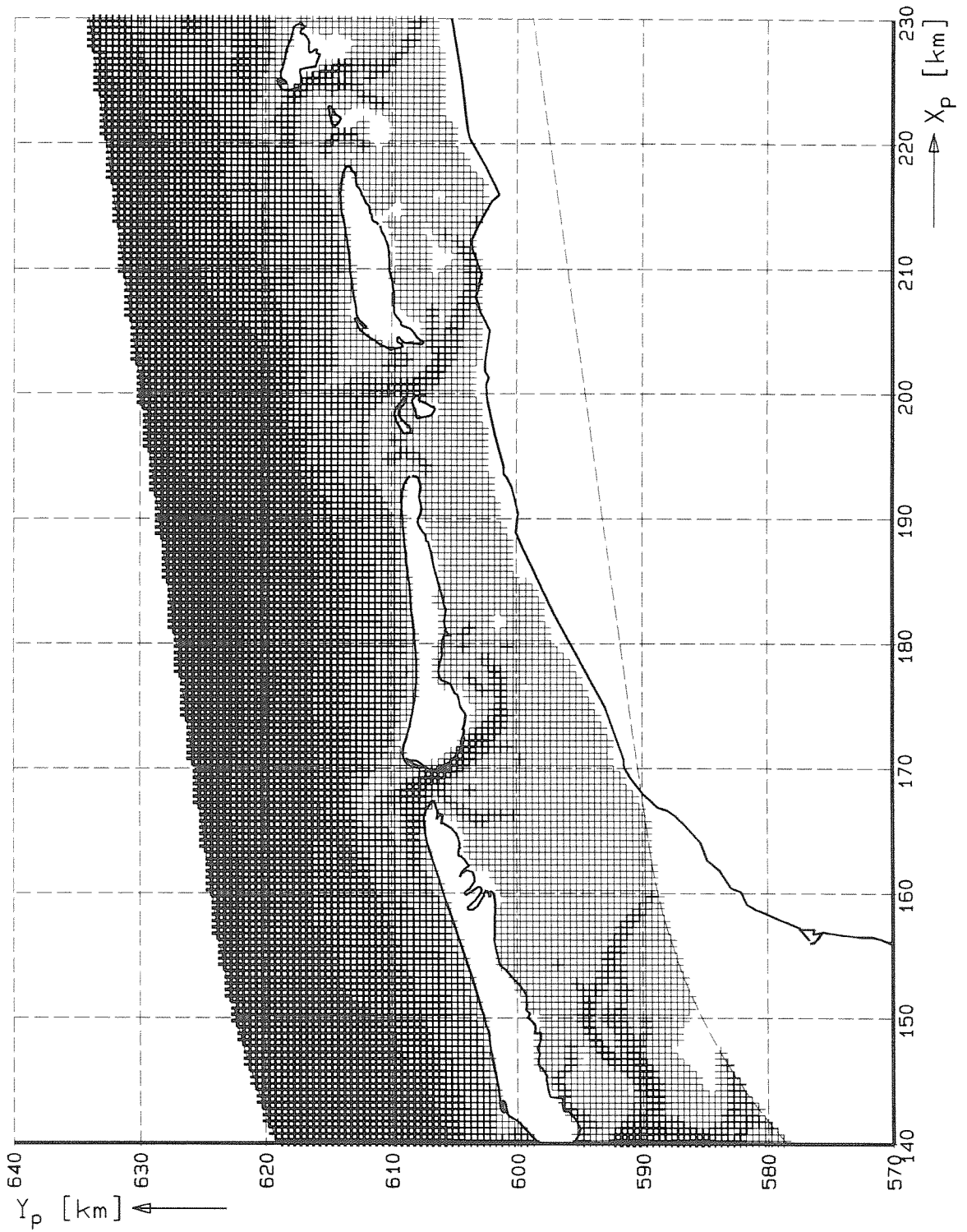
"WADDENZW"

schaal 1 : 500.000

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

H1887

FIG.5.1.2



o.v.t., 1993

DETAIL NOORD-OOSTELIJKE WADDENKUST

"WADDENNO"

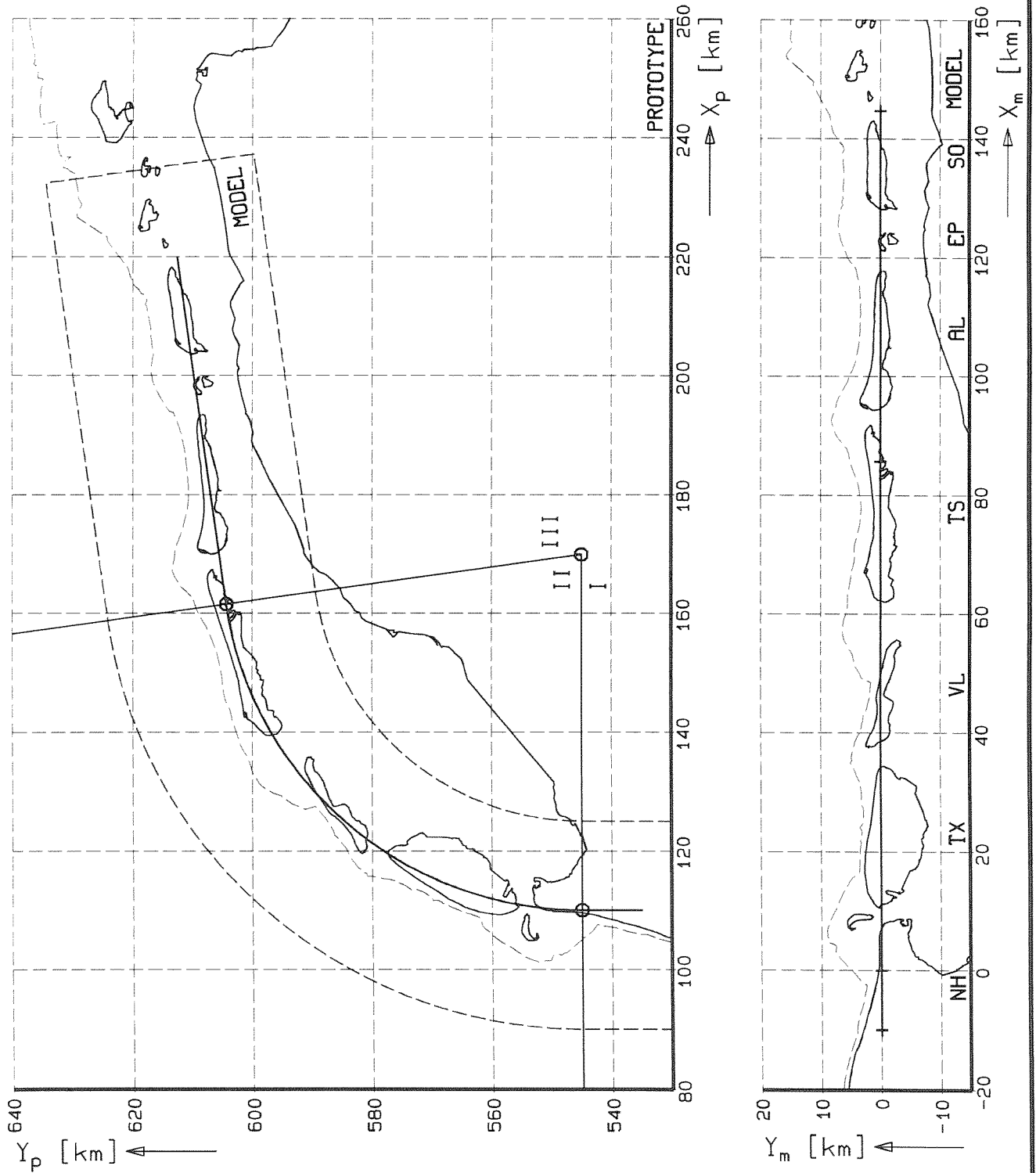
schaal 1 : 500.000

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

H1887

FIG.5.1.3

aug. 1993



OVERZICHT WADDENKUST
 Prototype en model

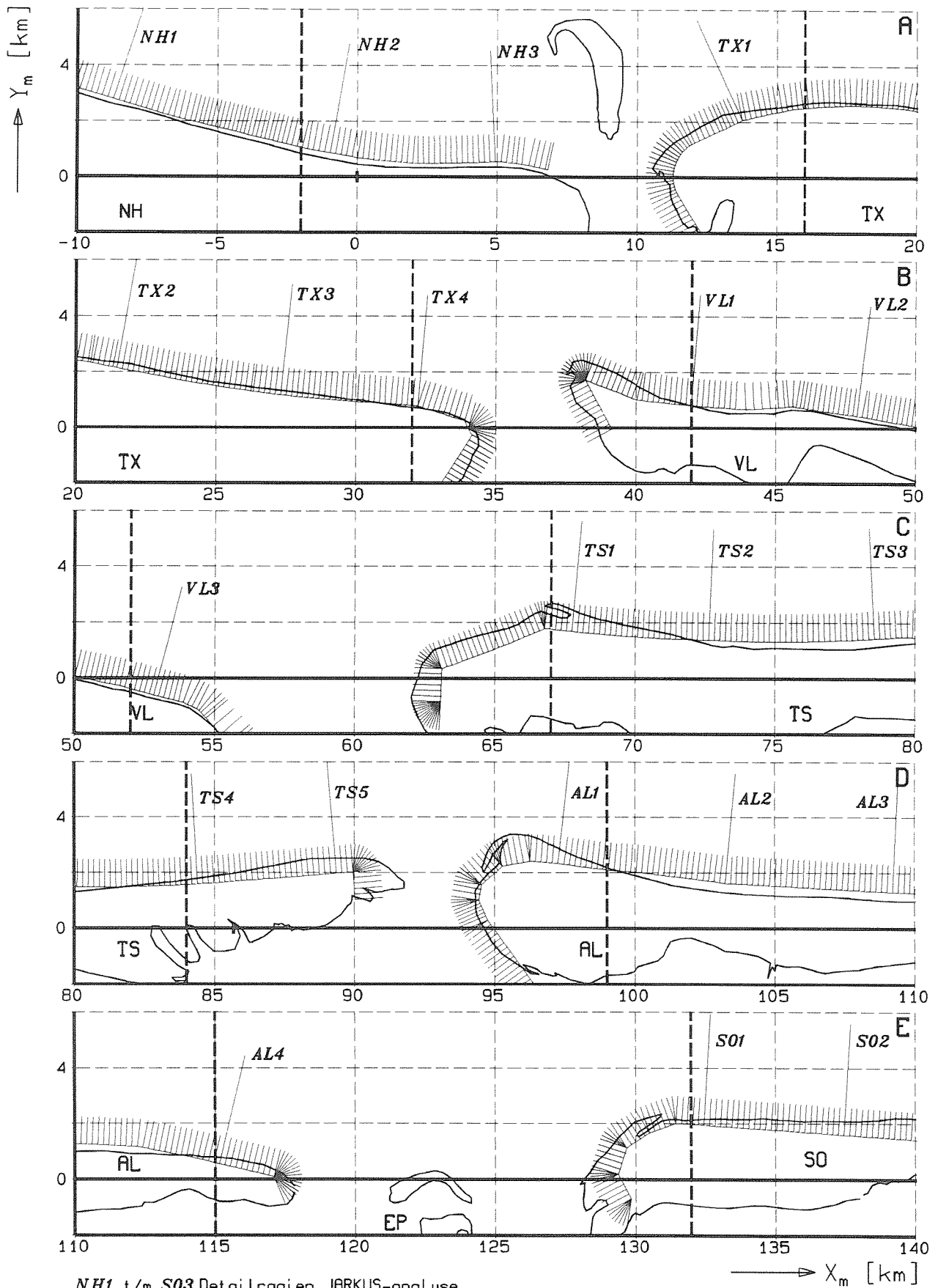
'REFLIJN'

schaal 1 : 1.000.000

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

H1887

FIG.5.3.1



NH1 t/m S03 Detailraaien JARKUS-analyse

----- Rand buitendelta

aug. 1993

DETAILS WADDENKUST
Ligging JARKUS-raaien

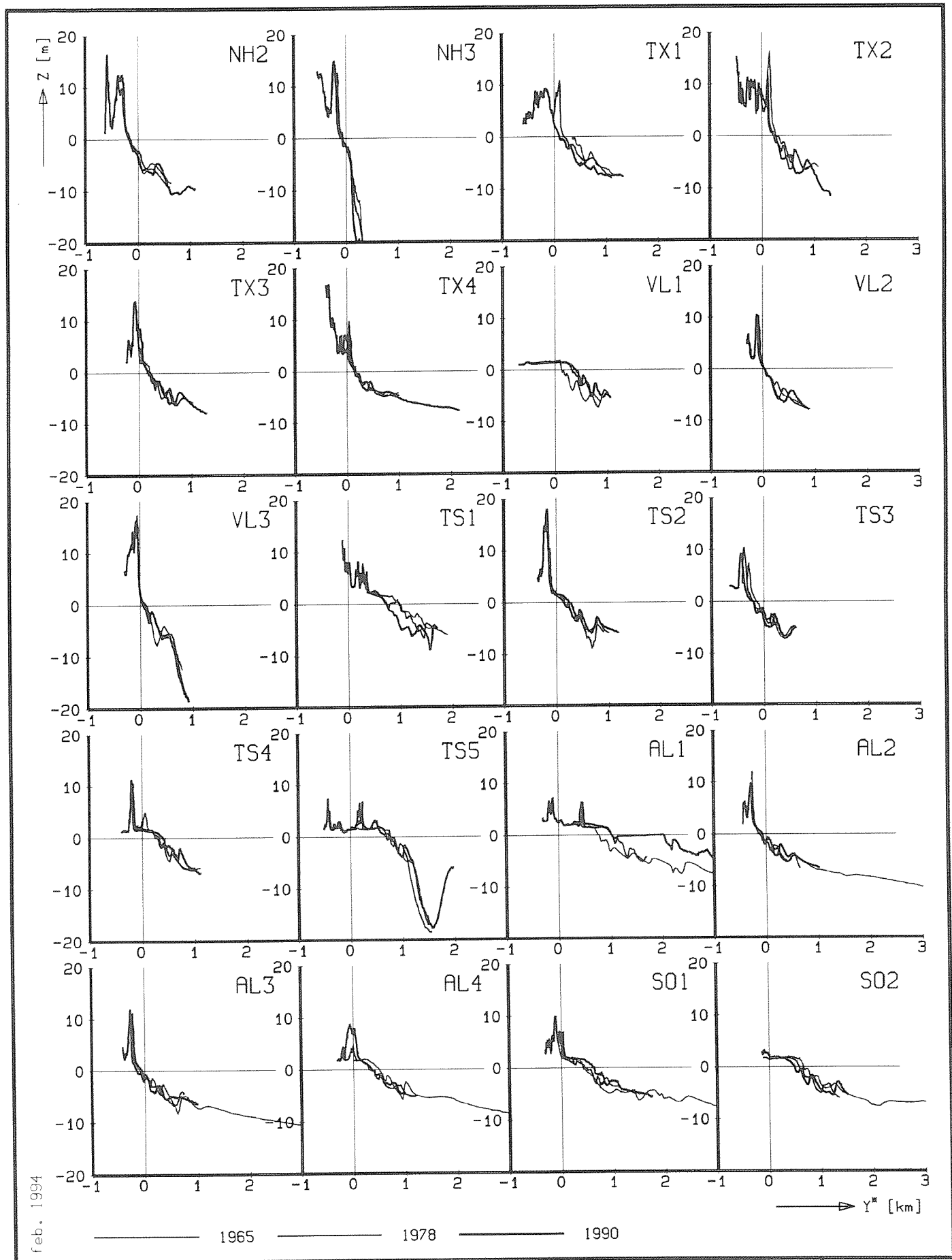
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

'DETLIJN'

schaal 1 : 200.000

H1887

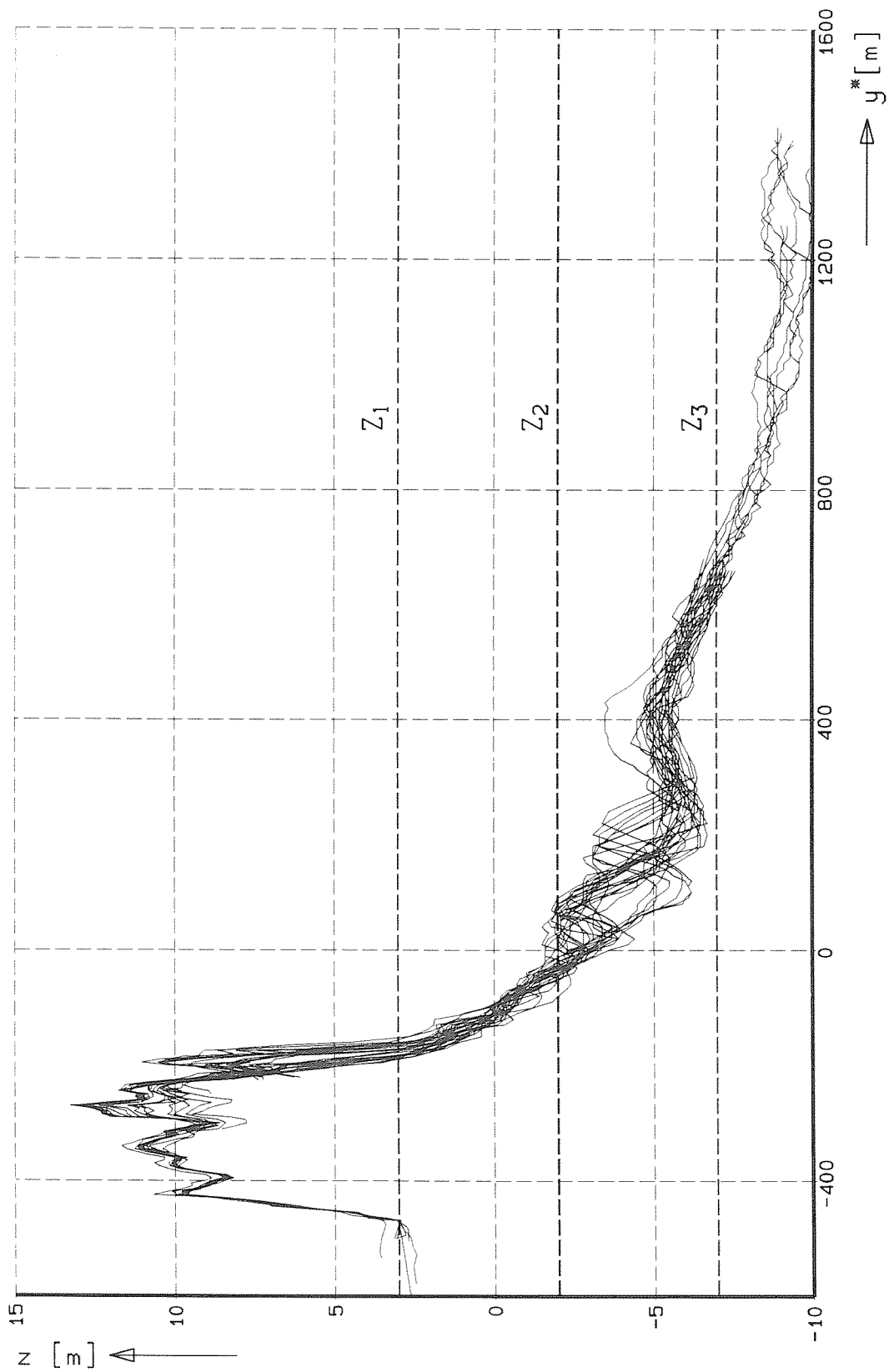
FIG.5.3.2



feb. 1994

DETAILS WADDENKUST		MOBIC	"DEIPRF"
Dwarsprofielen JARKUS-raaien			
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM		H1887	FIG.5.3.3

nov. 1993



1965 t/m 1992

VOORBEELD INTERNE LAAGDYNAMIEK
Noord-Holland; Raai 1

MOBIC

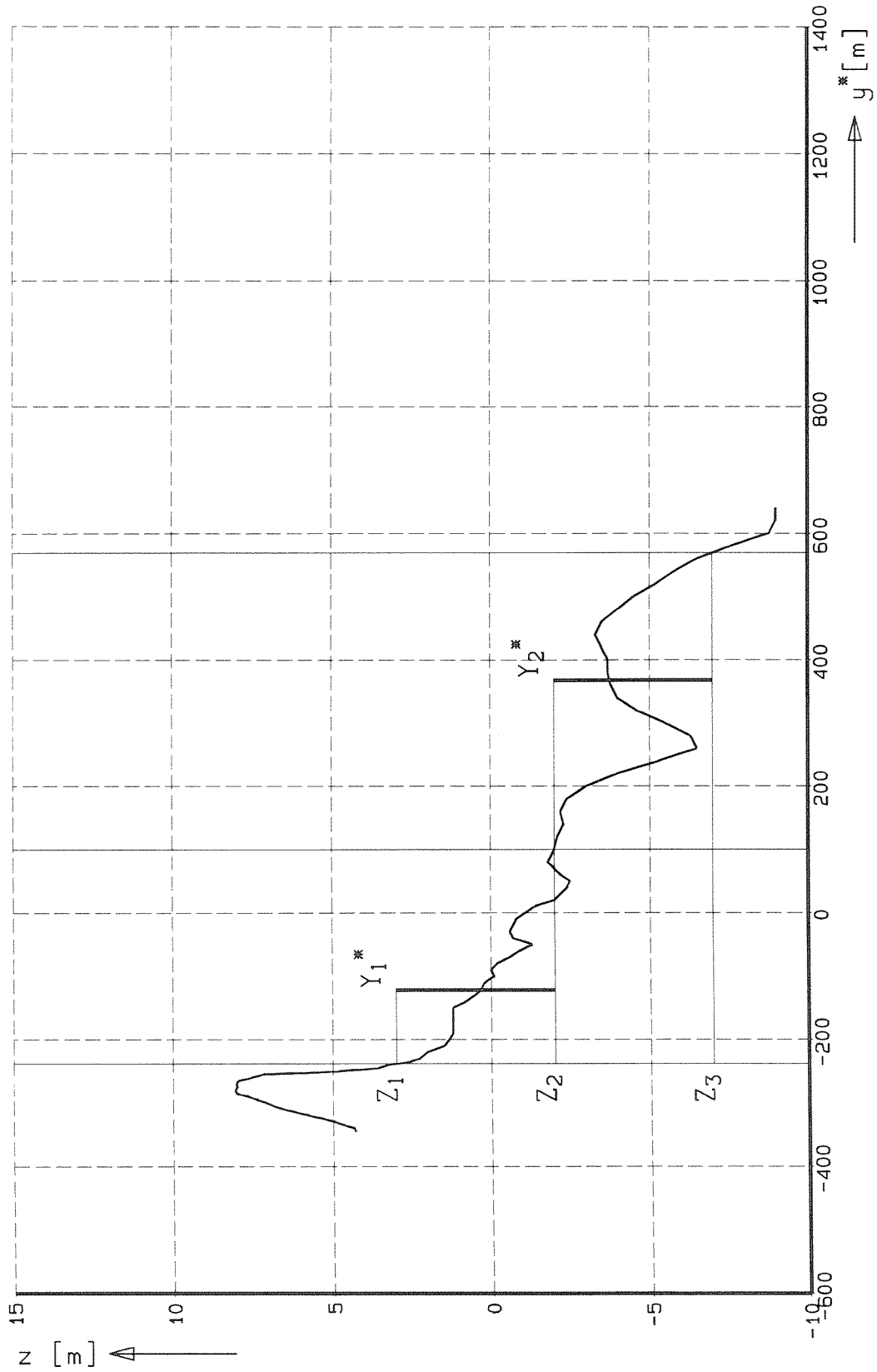
'DYN'

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

H1887

FIG.5.4.1

jan. 1994



VOORBEELD LAAGSCHEMATISATIE KUST-
PROFIEL; Raai AL2 in 1974

MOBIC

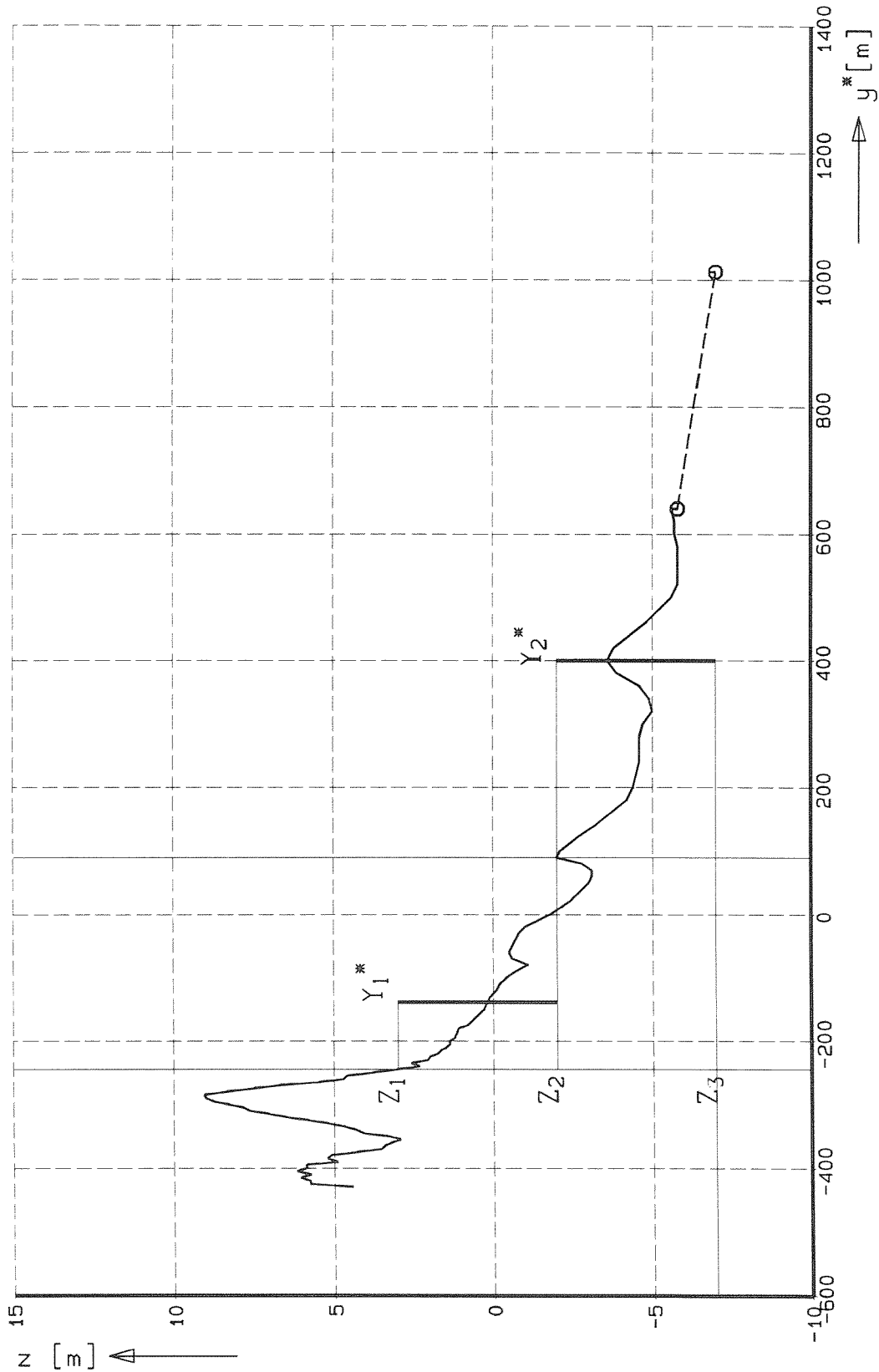
'LGSCH'

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

H1887

FIG.5.4.2

Jan. 1994



VOORBEELD EXTENSIE JARKUS-PROFIEL
Raai AL2 in 1980

MOBIC

'LGEXT'

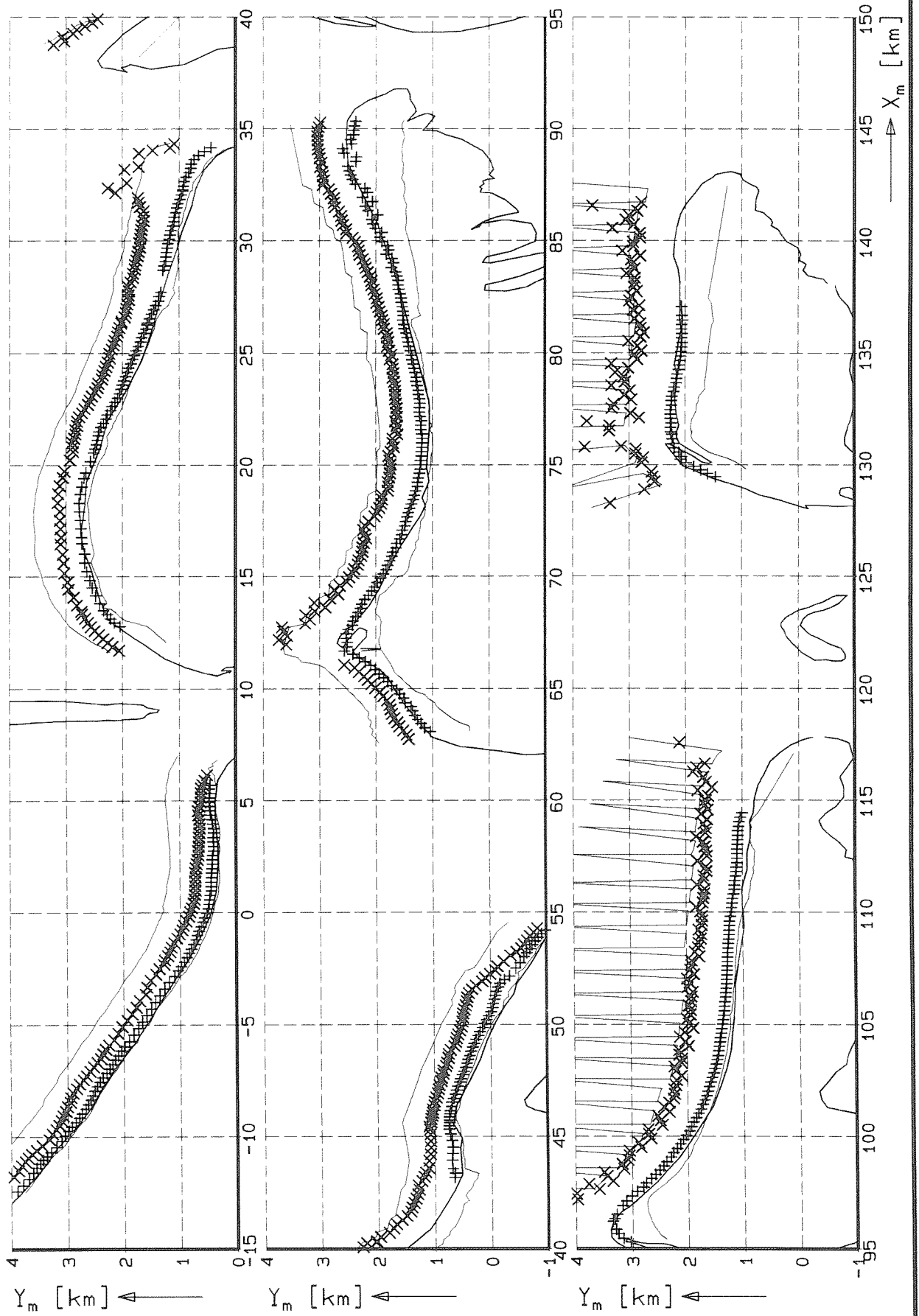
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

H1887

FIG.5.4.3

jan. 1994

Momentane waarden
+ Y1 X Y2



KUSTLIJNLIGGING: Y1(x) en Y2(x)
Resultaat analyse JARKUS-raaien

MOBIC

'Y-65(x)'

Situatie 1965

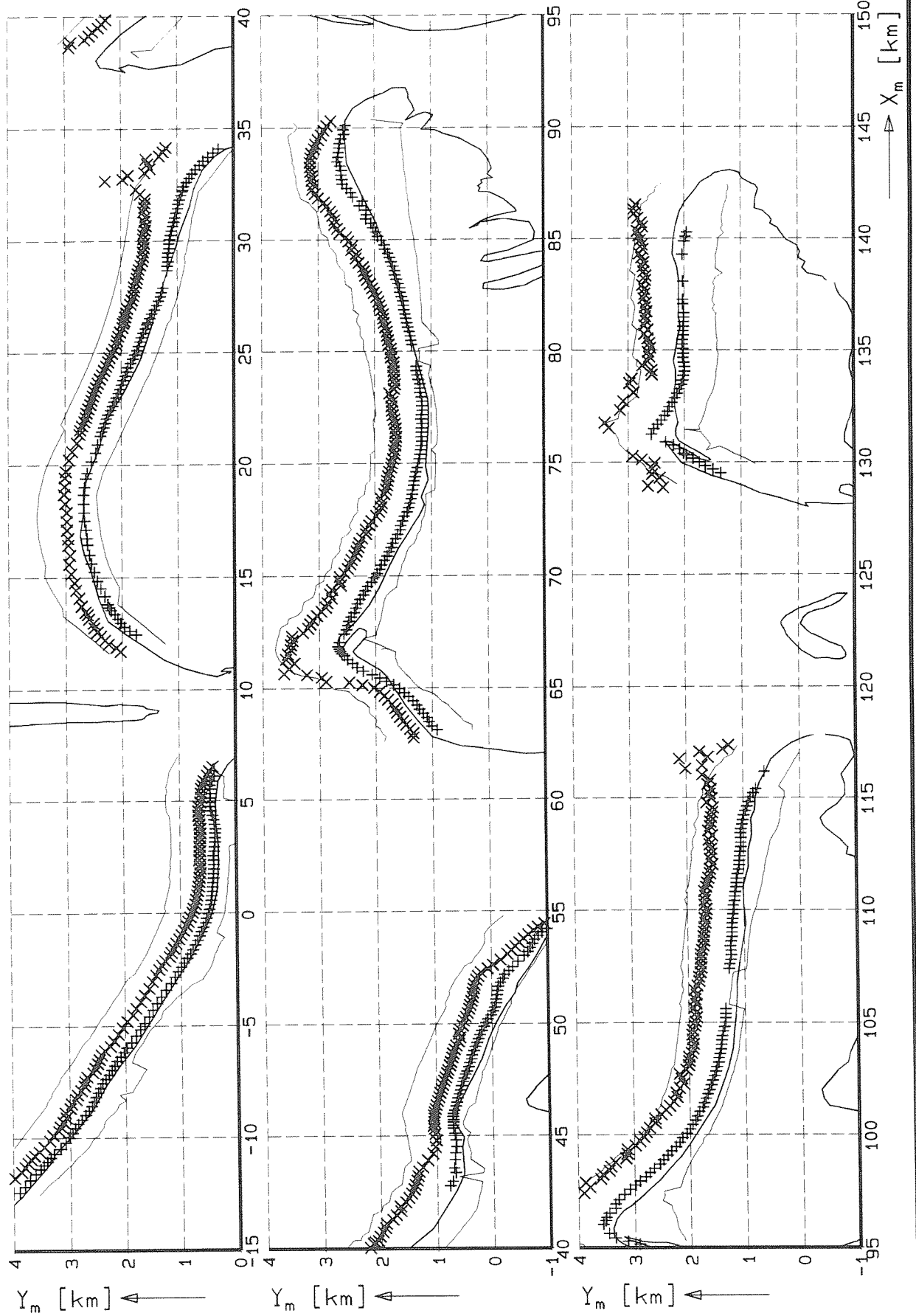
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

H1887

FIG.5.4.4

jan., 1994

Momentane waarden
 + Y1
 X Y2



KUSTLIJNLIGGING: Y1(x) en Y2(x)
 Resultaat analyse JARKUS-raaien

MOBIC

'Y-78(x)'

Situatie 1978

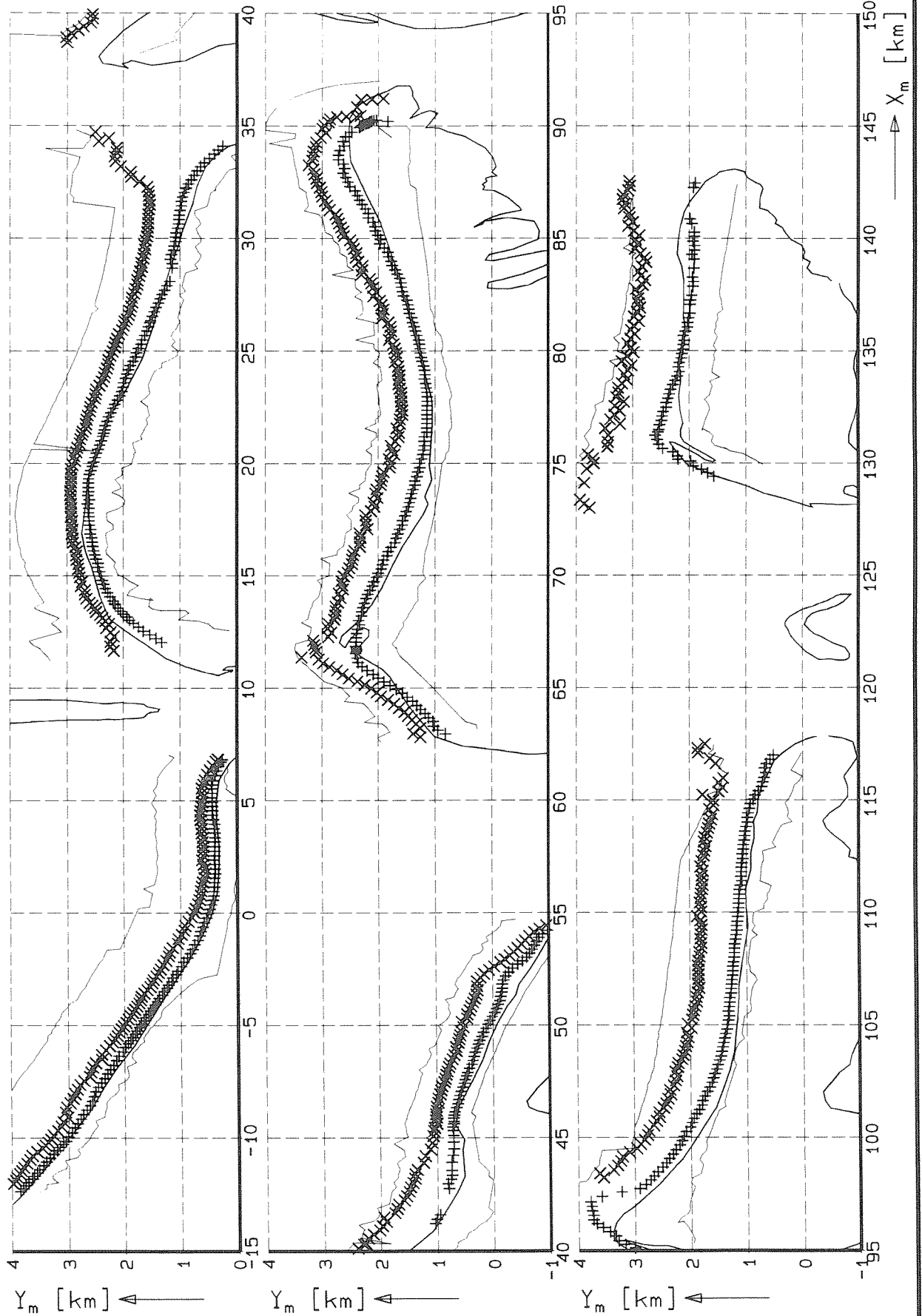
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

H1887

FIG.5.4.5

Jan. 1994

Momentane waarden
+ Y1 X Y2



KUSTLIJNLIGGING: $Y_1(x)$ en $Y_2(x)$
Resultaat analyse JARKUS-raaien

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

MOBIC

'Y-90(x)'

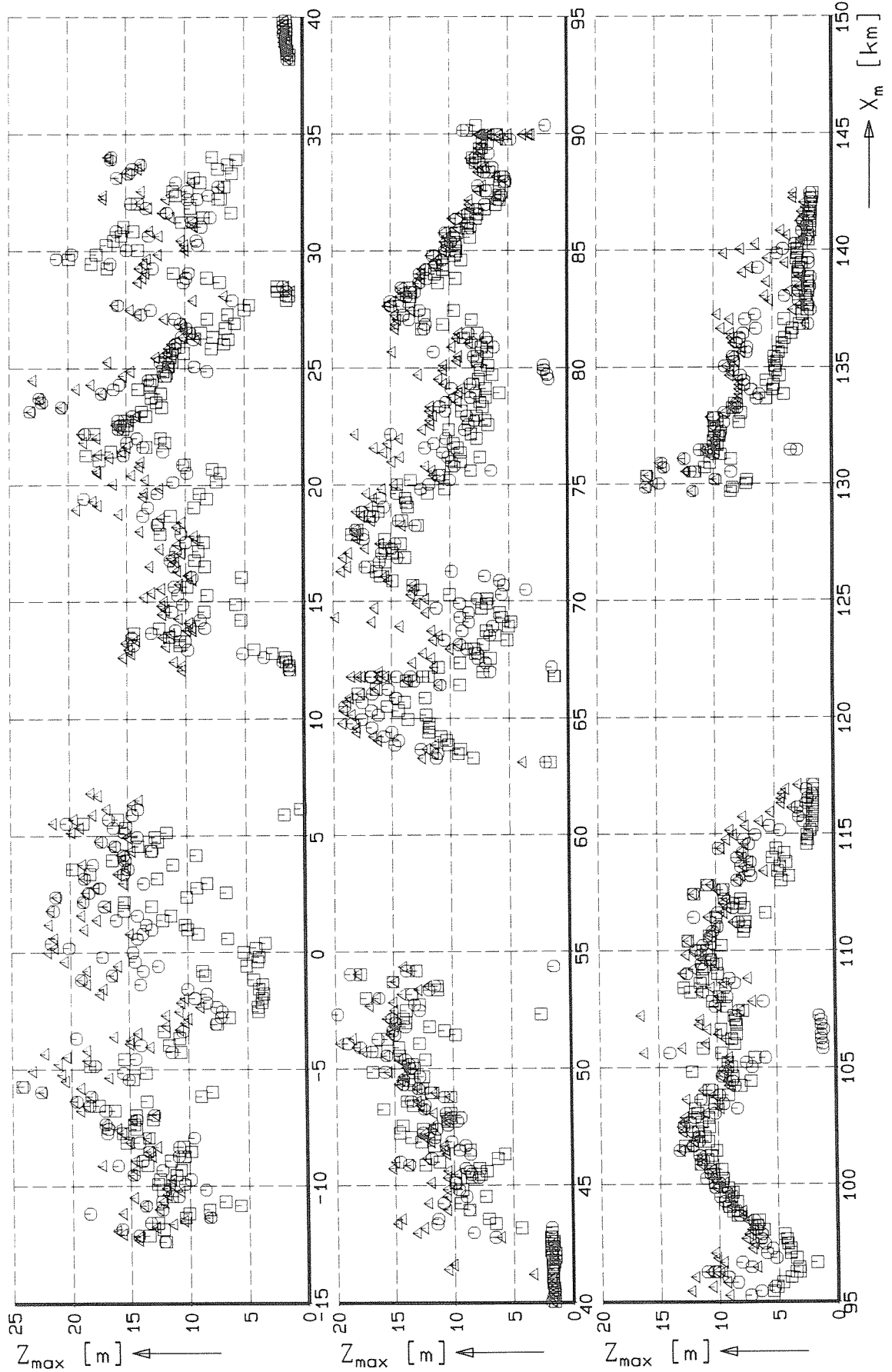
Situatie 1990

H1887

FIG.5.4.6

jan. 1994

Momentane waarden [Z_{max}]
 □ 1965 ○ 1978 ▲ 1990



NB: Betreft maximaal niveau binnen JARKUS-raai.

LANGSVARIATIE MAXIMALE DUINHOOGTE
 Resultaat analyse JARKUS-raaien

MOBIC

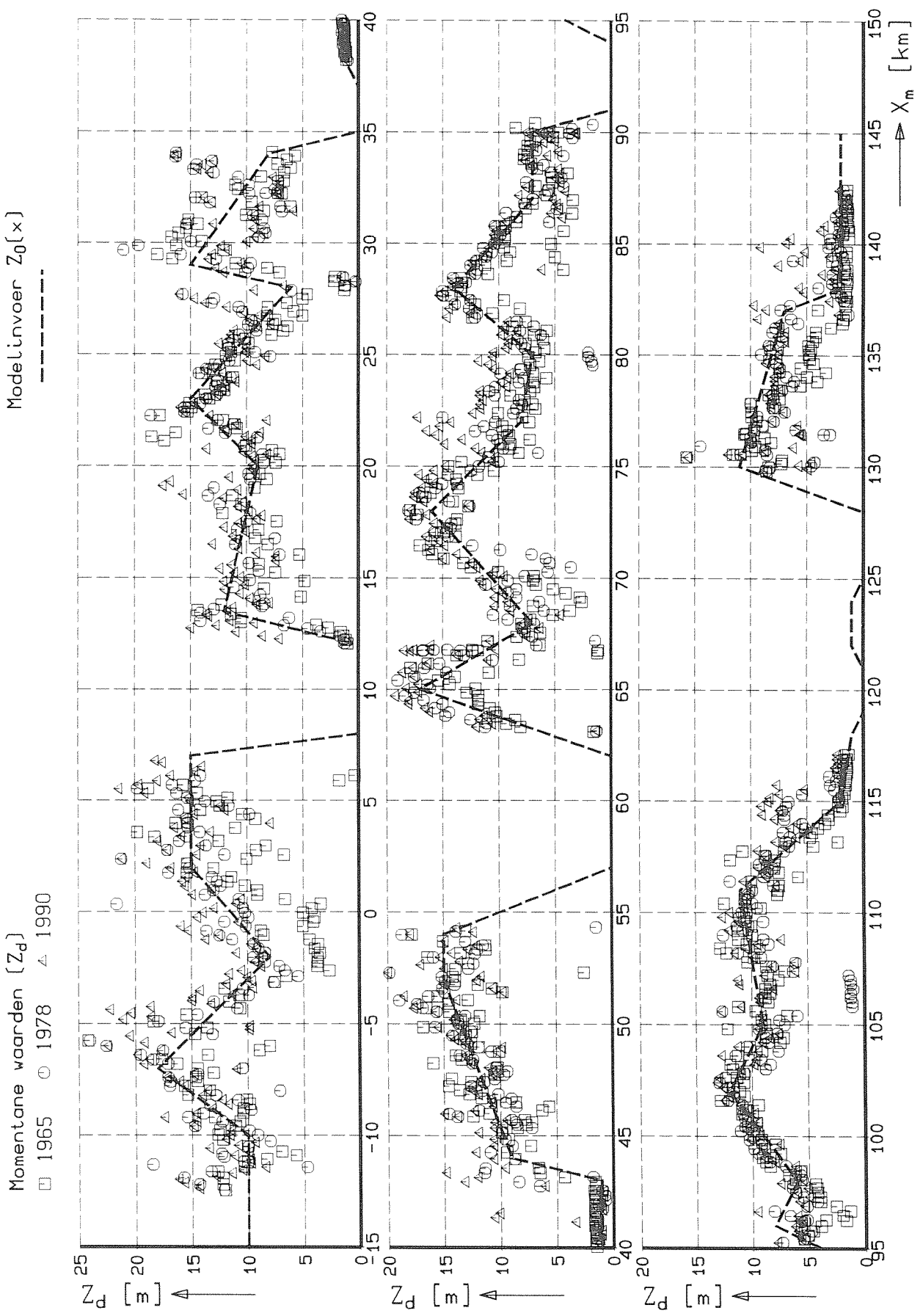
' $Z_{max}(x)$ '

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

H1887

FIG.5.4.7

jan., 1994



Modelinvoer $Z_0(x)$

Momentane waarden [Z_d]
 □ 1965 ○ 1978 ▲ 1990

NB: Betreft eerste droge 'duintop' ($Z_i < (Z_{i+1} - 2) \Rightarrow Z_d = Z_{i+1}$)

LANGSVARIATIE NIVEAU DUINTOP
 Resultaat analyse JARKUS-raaien

MOBIC

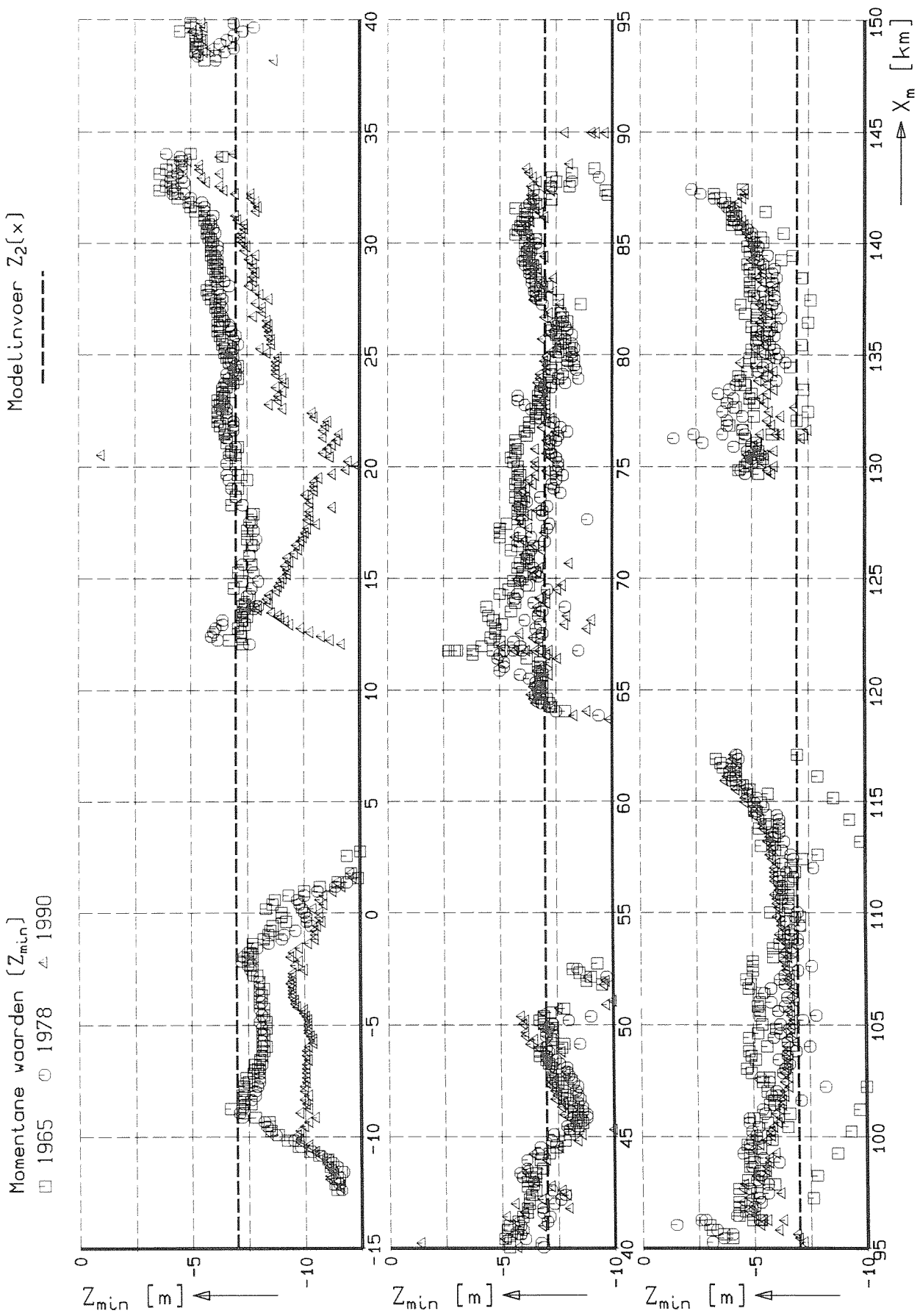
"Zd(x)"

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

H1887

FIG.5.4.8

Jan. 1994



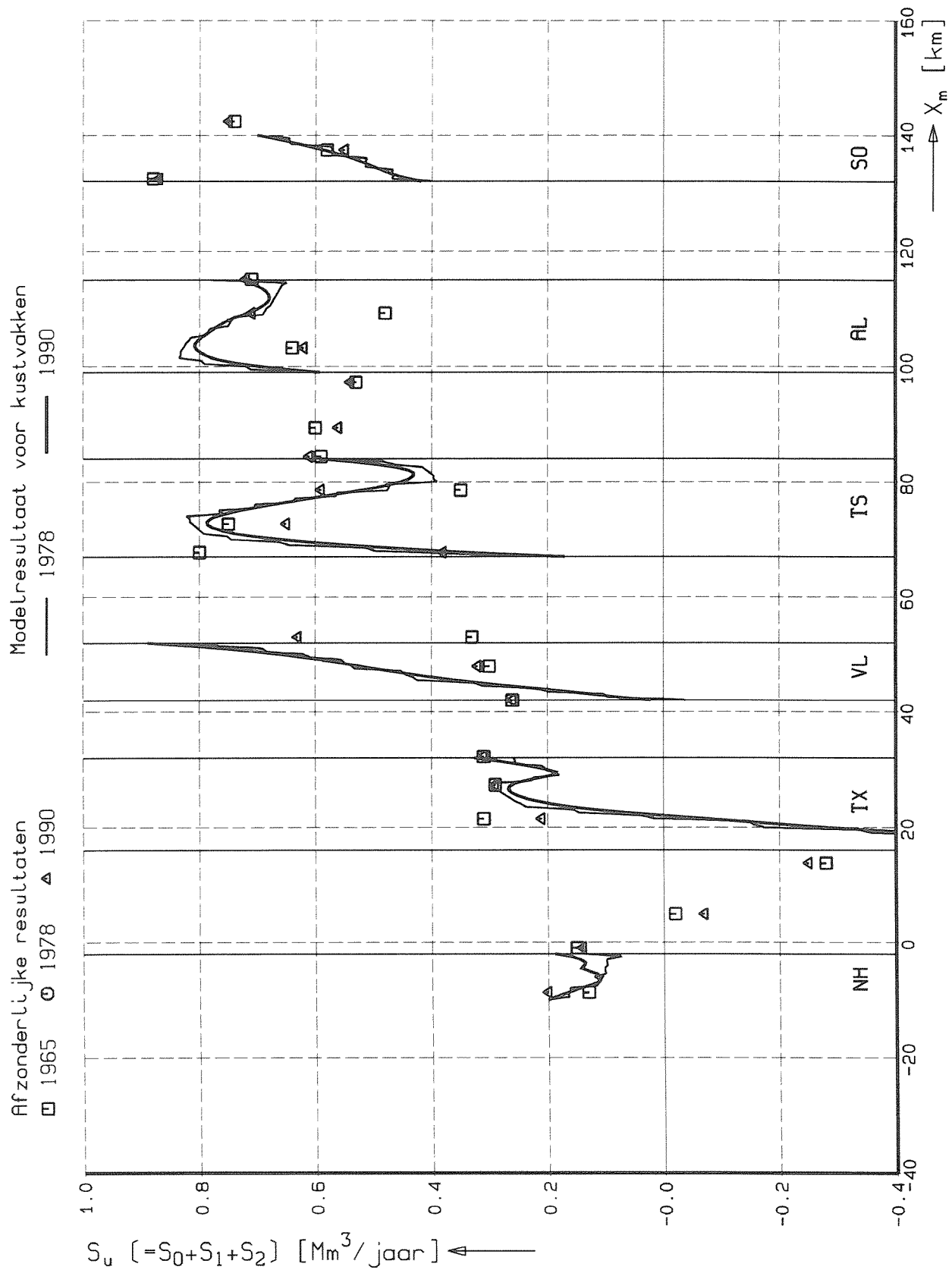
NB: Betreft minimaal niveau binnen JARKUS-raai.

LANGSVARIATIE MINIMAAL NIVEAU
 Resultaat analyse JARKUS-raaien

MOBIC	'Zmin(x)'
H1887	FIG.5.4.9

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

feb. 1994



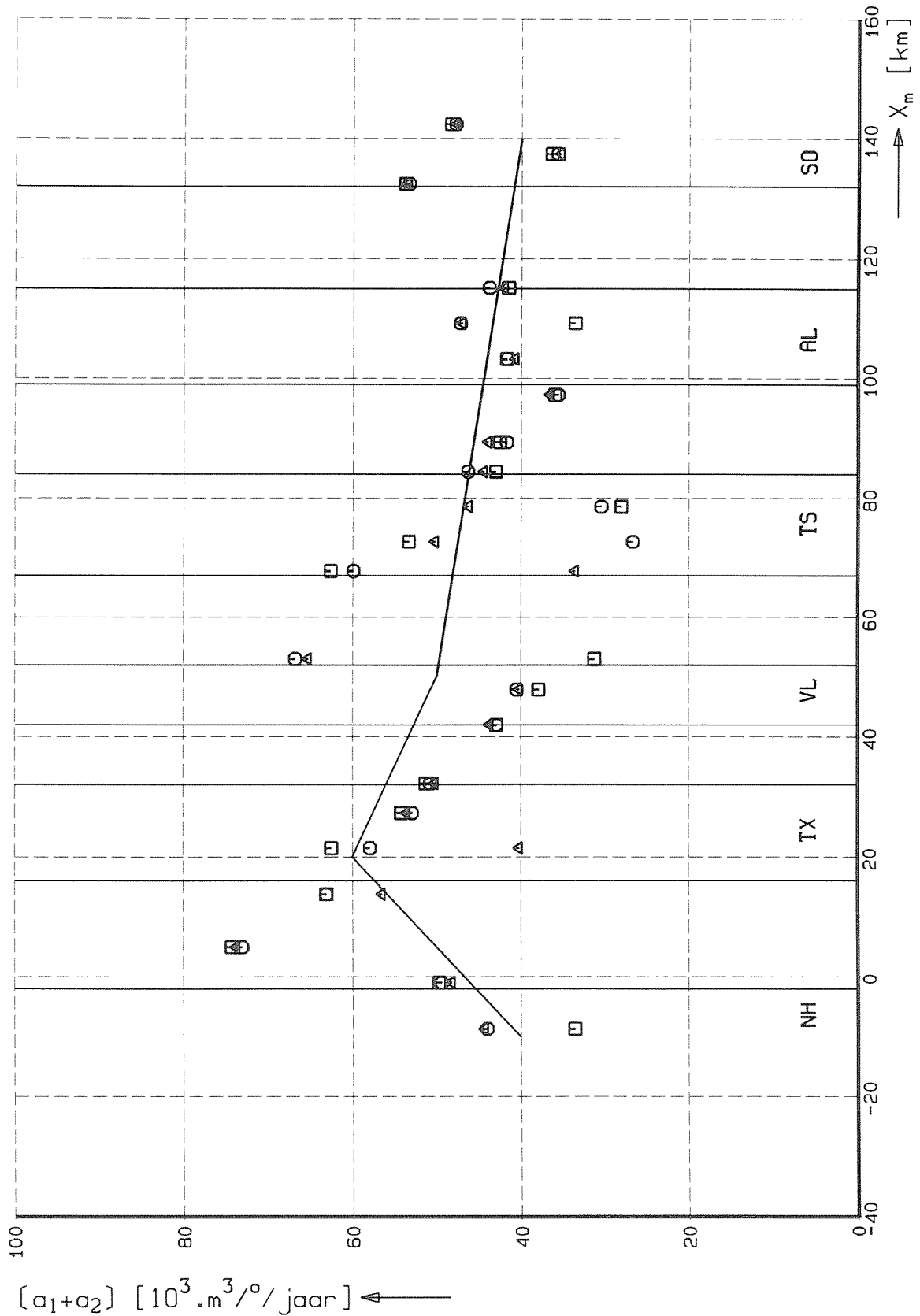
LANGSVARIATIE LANGSTRANSPOORT
 Resultaat LT-berekeningen

MOBIC	'S(x)'
boven NAP-7m	
H1887	FIG.5.5.1

feb. 1994

Invoer rekenmodel

Afzonderlijke resultaten
 □ 1965 ○ 1978 ▲ 1990



LANGSVARIATIE KUSTCONSTANTE
 Resultaat LT-berekeningen

MOBIC

'a(x)'

boven NAP-7m

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

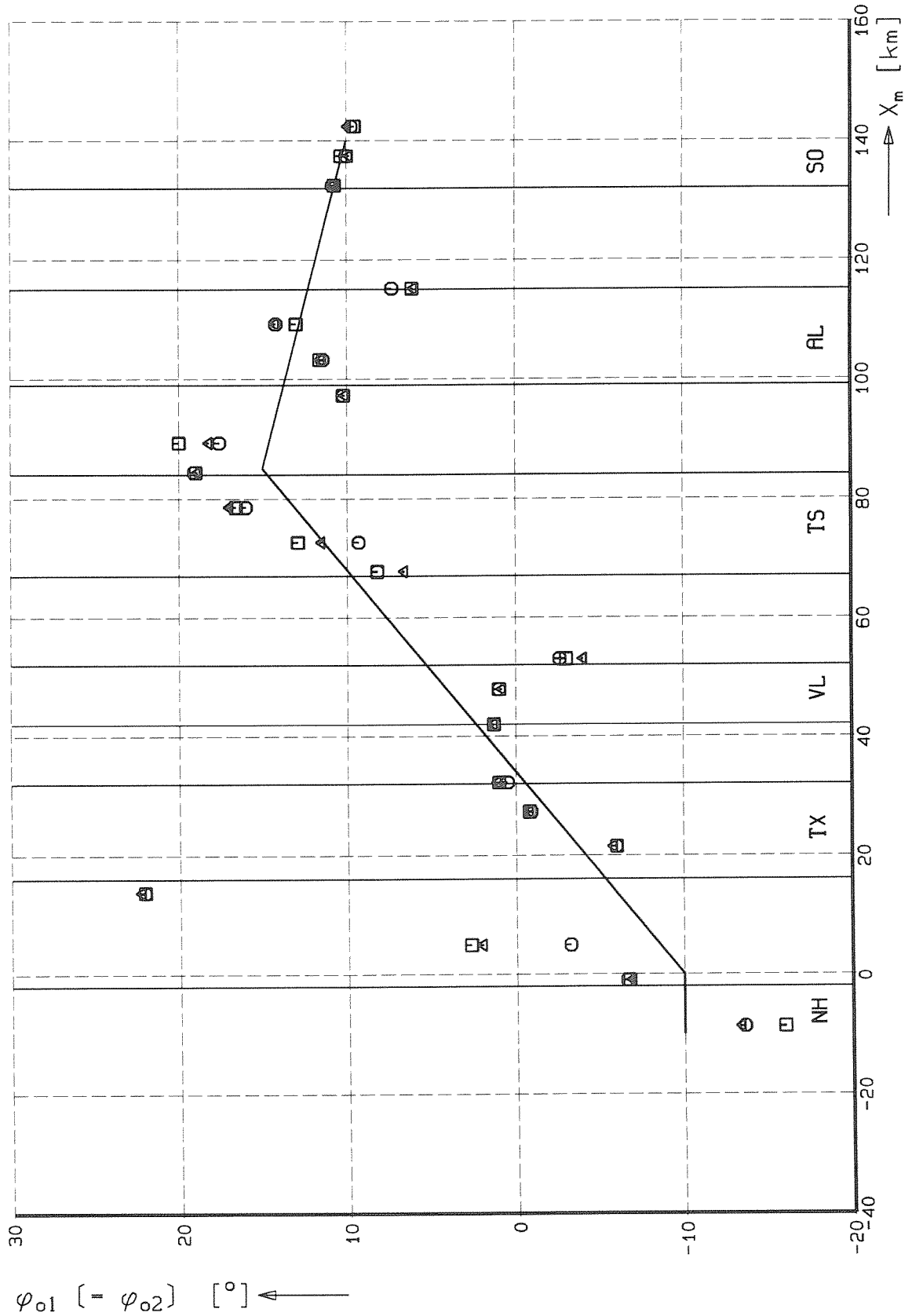
H1887

FIG.5.5.2

Feb. 1994

Invoer rekenmodel

Afzonderlijke resultaten
 □ 1965 ○ 1978 ▲ 1990



LANGSVARIATIE NULTRANSPORTHOEK
 Resultaat LT-berekeningen

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

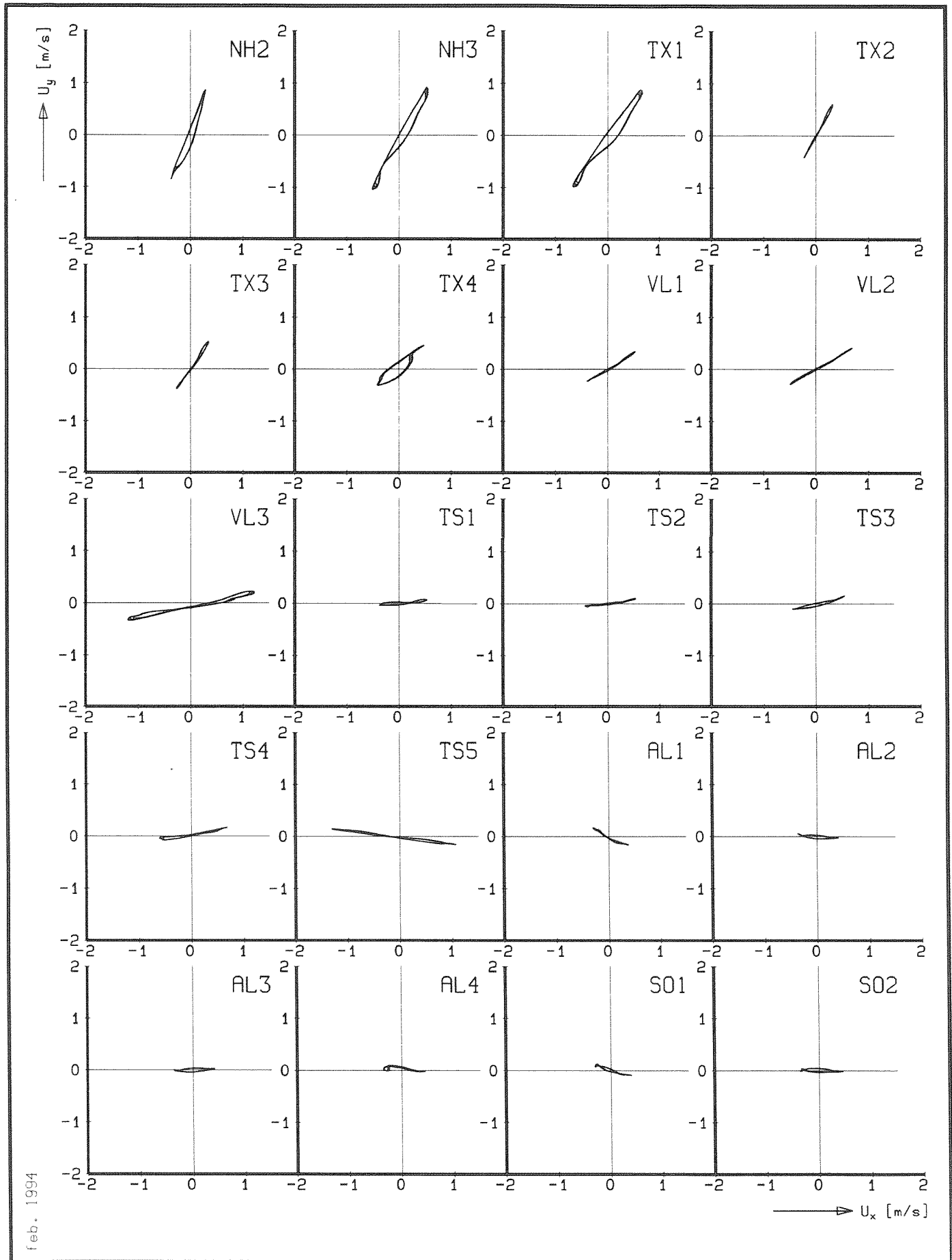
MOBIC

'p(x)'

boven NAP-7m

H1887

FIG.5.5.3



feb. 1994

OVERZICHT SNELHEDEN OIV GETIJD
 Resultaten per raai (NH2 t/m SO2)

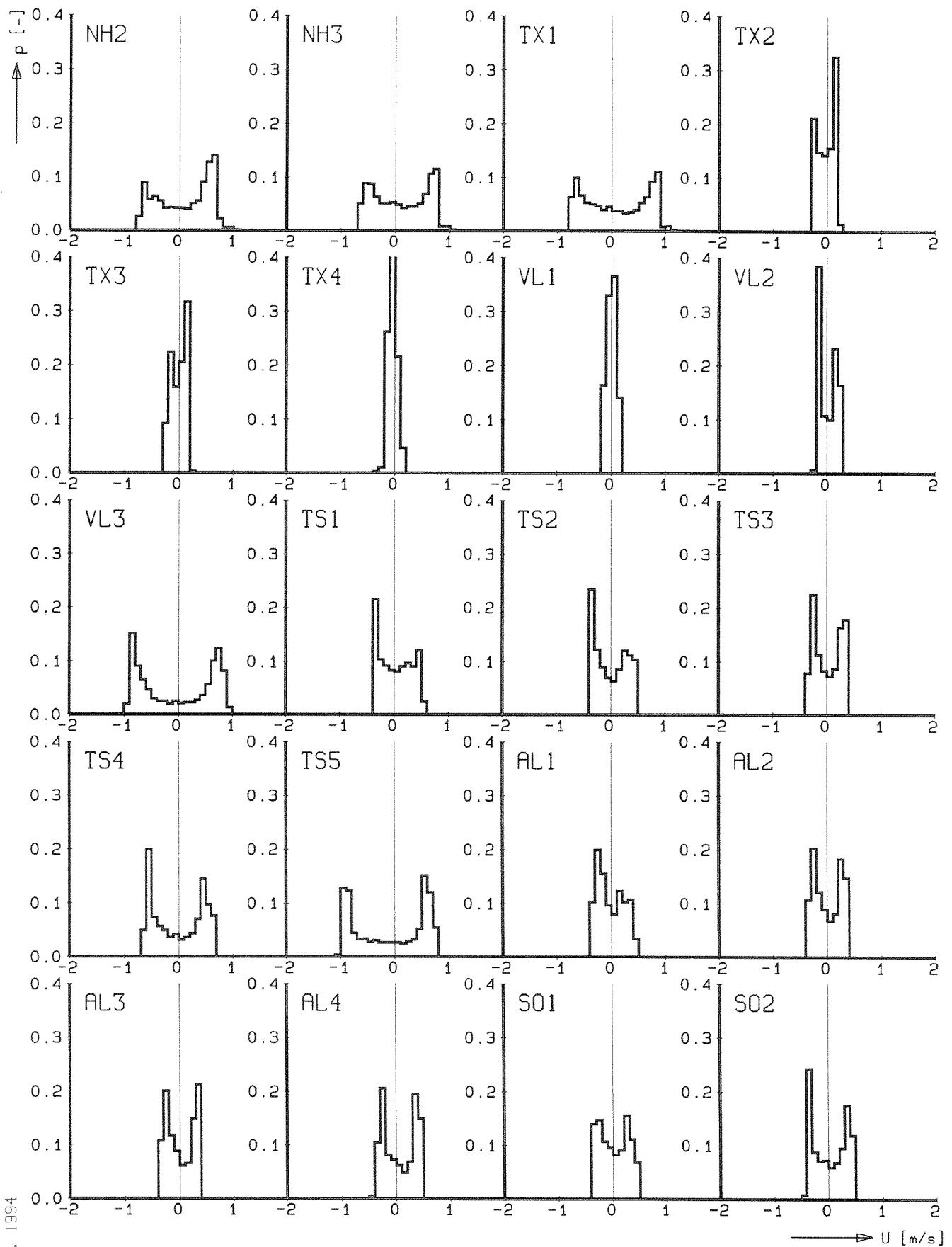
MOBIC

'ROZ-U(2)'

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

H1887

FIG.5.5.4



feb. 1994

OVERZICHT SNELHEIDSKLASSEN GETIJ
 Resultaten per raai (NH2 t/m S02)

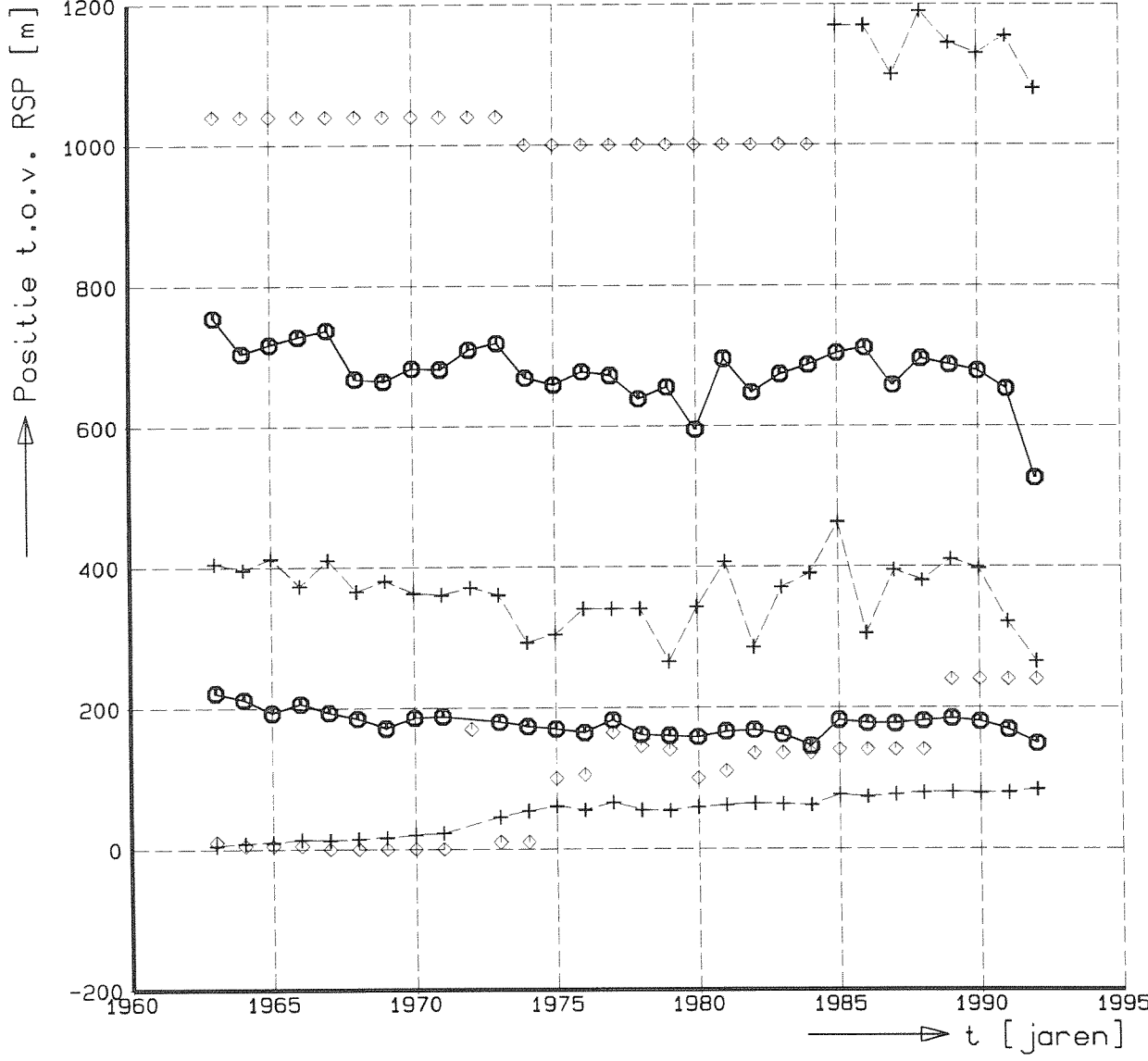
MOBIC

"ROZ-shk"

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

H1887

FIG.5.5.5

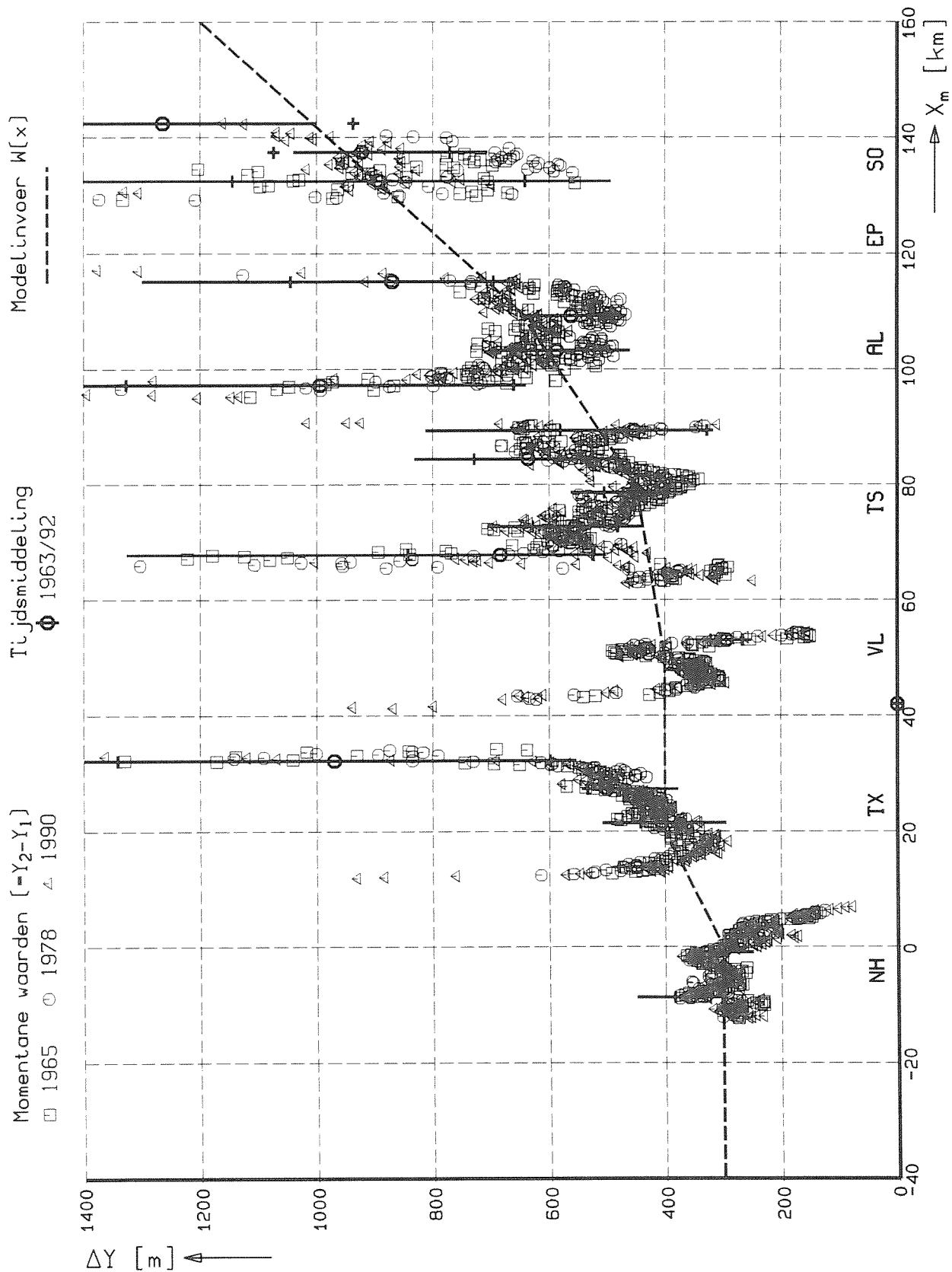


◇ X_{min}, X_{max} + NAP+3, -2, -7m ○ Y_1, Y_2 ★ $Y_2 - Y_1$

jan. 1994

TIJDSONTWIKKELING RAAIDATA Resultaat analyse JARKUS-raaien	MOBIC	"PAR(t)"
	Raaï TX3	
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM	H1887	FIG.5.6.1

jan. 1994



LANGSVARIATIE EVENWICHTSAFSTAND
 Resultaat analyse JARKUS-raaien

MOBIC

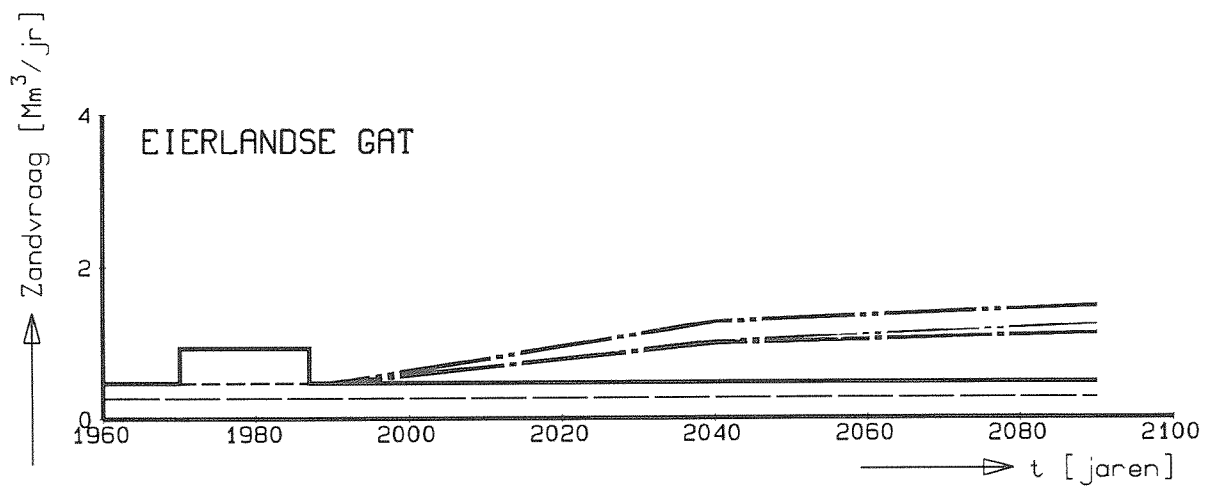
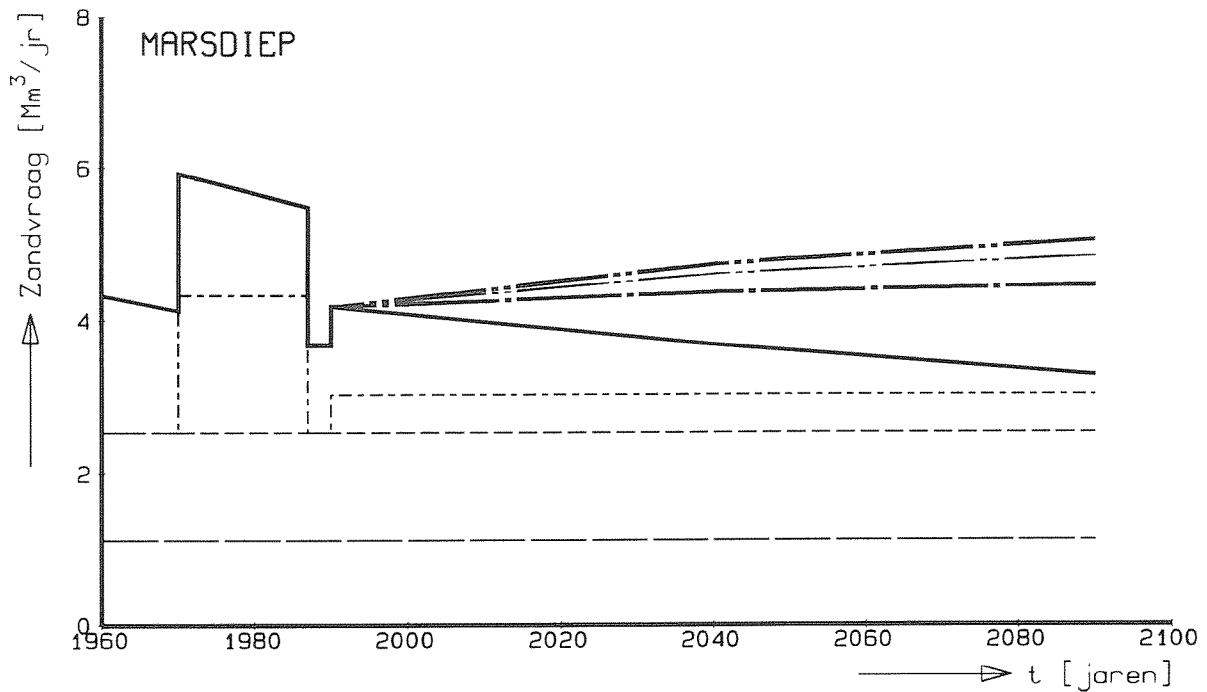
'W(x)'

Z₁^{*} = +3m; Z₂ = -2m; Z₃ = -7m

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

H1887

FIG.5.6.2



- bijdrage zeespiegelstijging (0,20 m/eeuw)
- + natuurlijke aanzanding
- + [netto] zand/gas-winning
- + afsluitingswerken (=A_v-scenario)
- B_v-scenario [0,60 i.p.v. 0,20 m/eeuw vanaf 1990]
- C_v-scenario [0,85 i.p.v. 0,20 m/eeuw vanaf 1990]
- C_o-scenario [als C_v met plaaterosie a.g.v. stormen]

feb. 1994

TIJDSONTWIKKELING SEDIMENTVRAAG
 Resultaat ISOS-studies

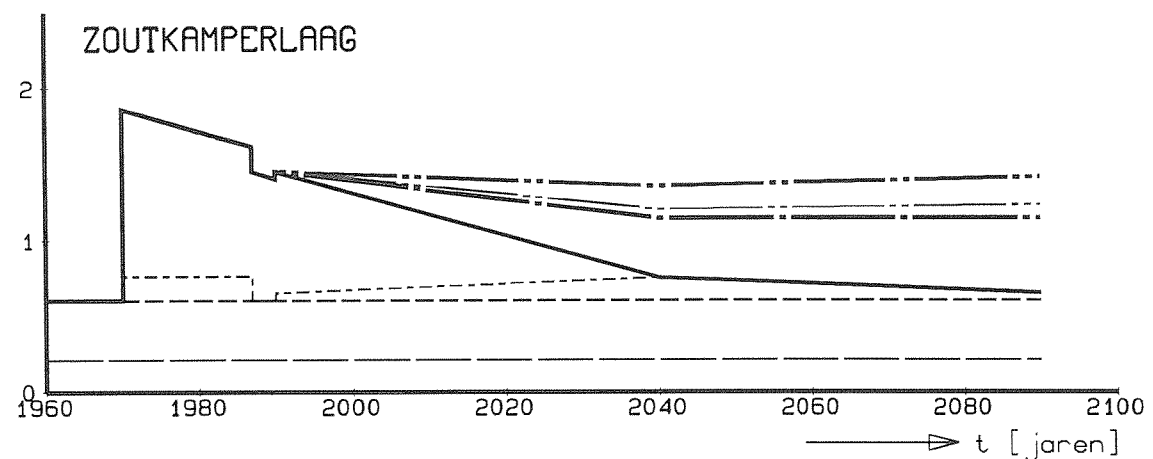
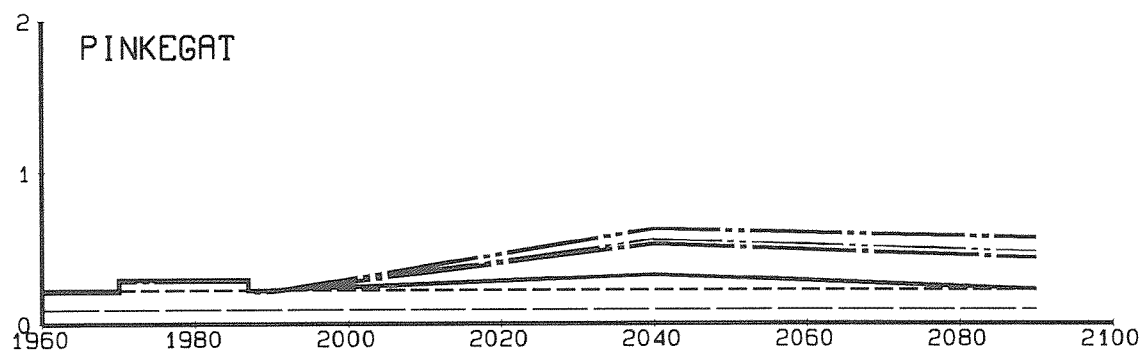
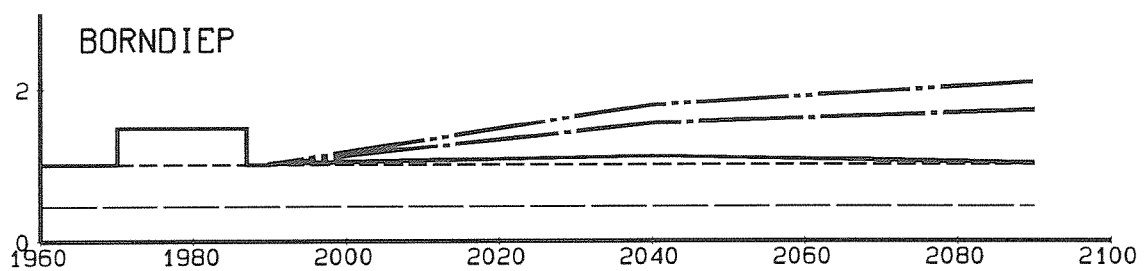
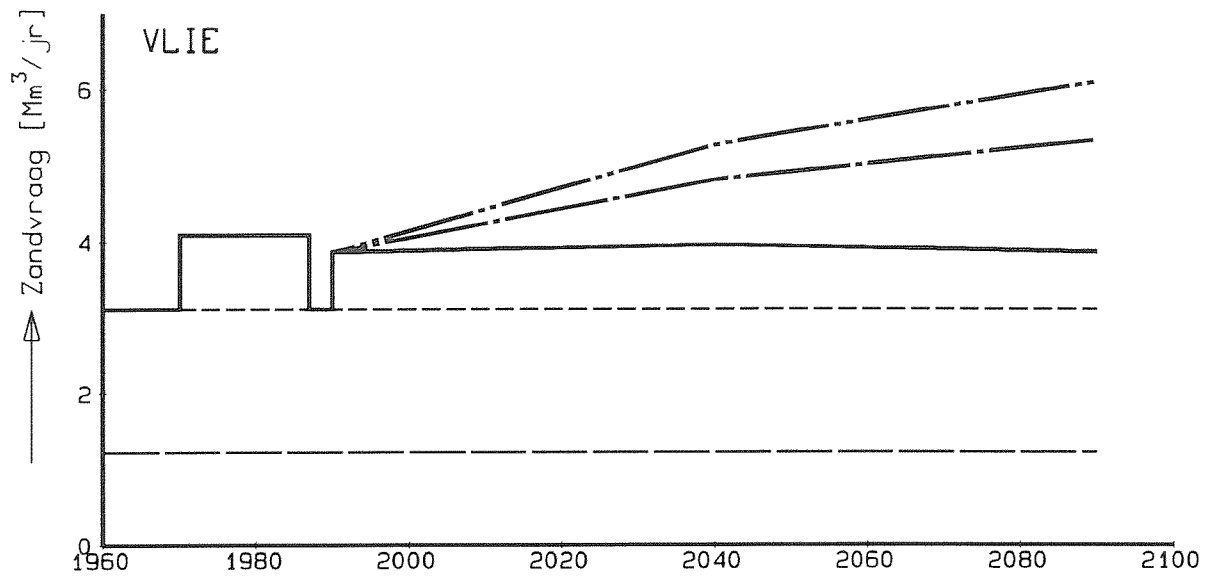
MOBIC

"Sg(t)1"

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

H1887

FIG.5.7.1



feb. 1994

→ t [jaren]

TIJDSONTWIKKELING SEDIMENTVRAAG
 Resultaat ISOS-studies

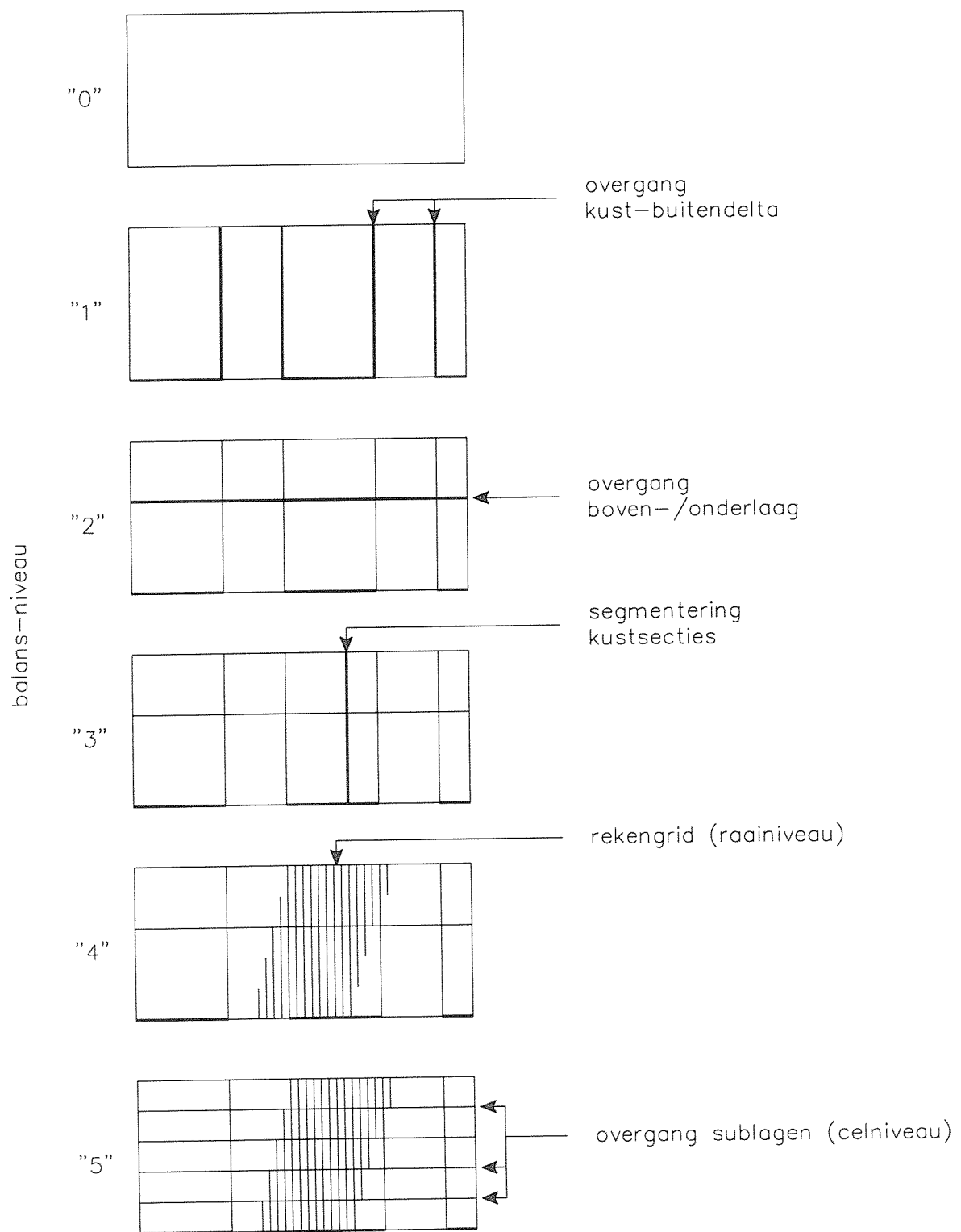
MOBIC

'Sg(t)2'

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

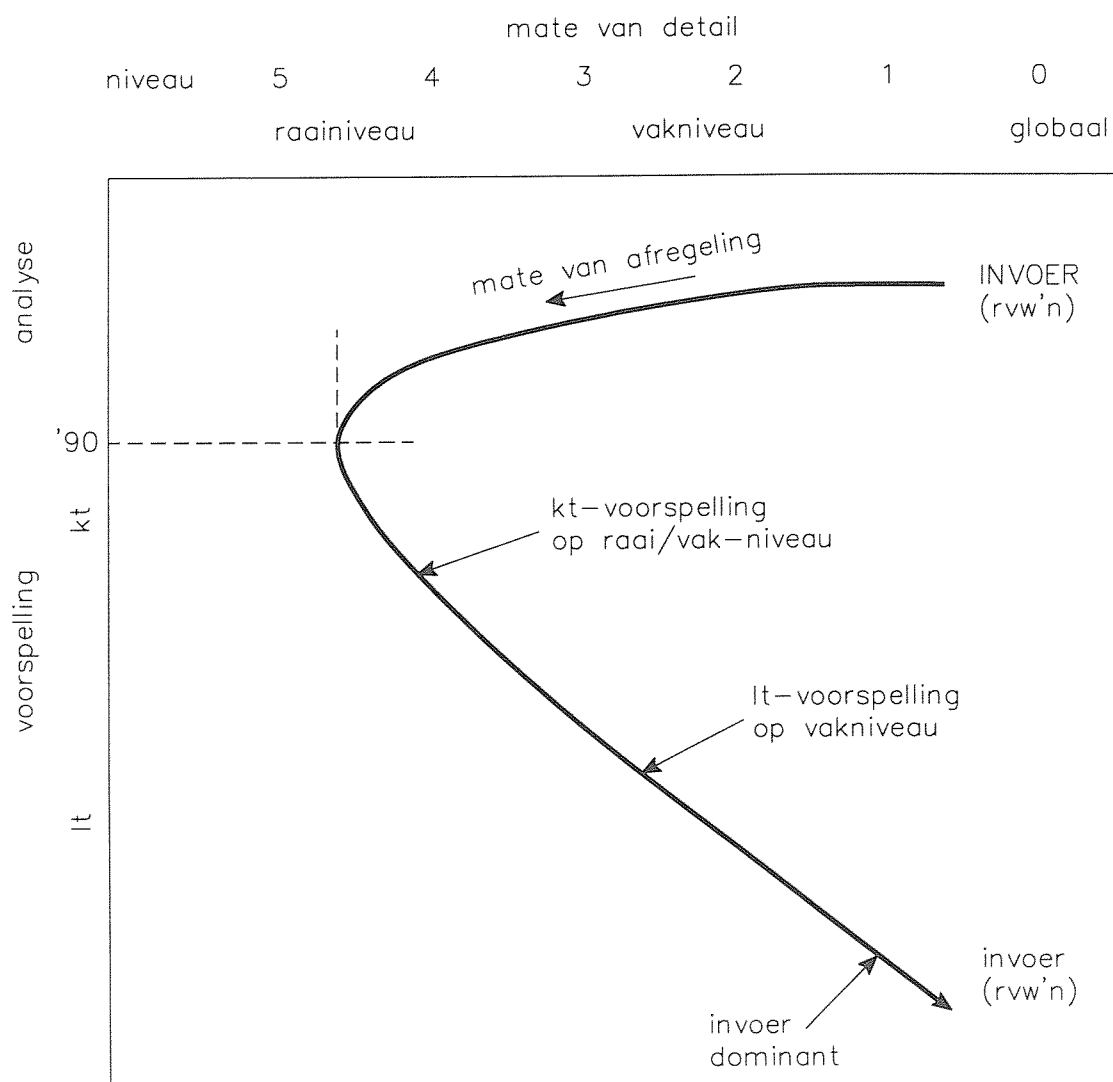
H1887

FIG.5.7.2



OVERZICHT BALANSNIVEAUS

MOBIC	"OBN"
-------	-------



SAMENHANG AFREGEL- EN VOORSPEL-
NIVEAU

MOBIC

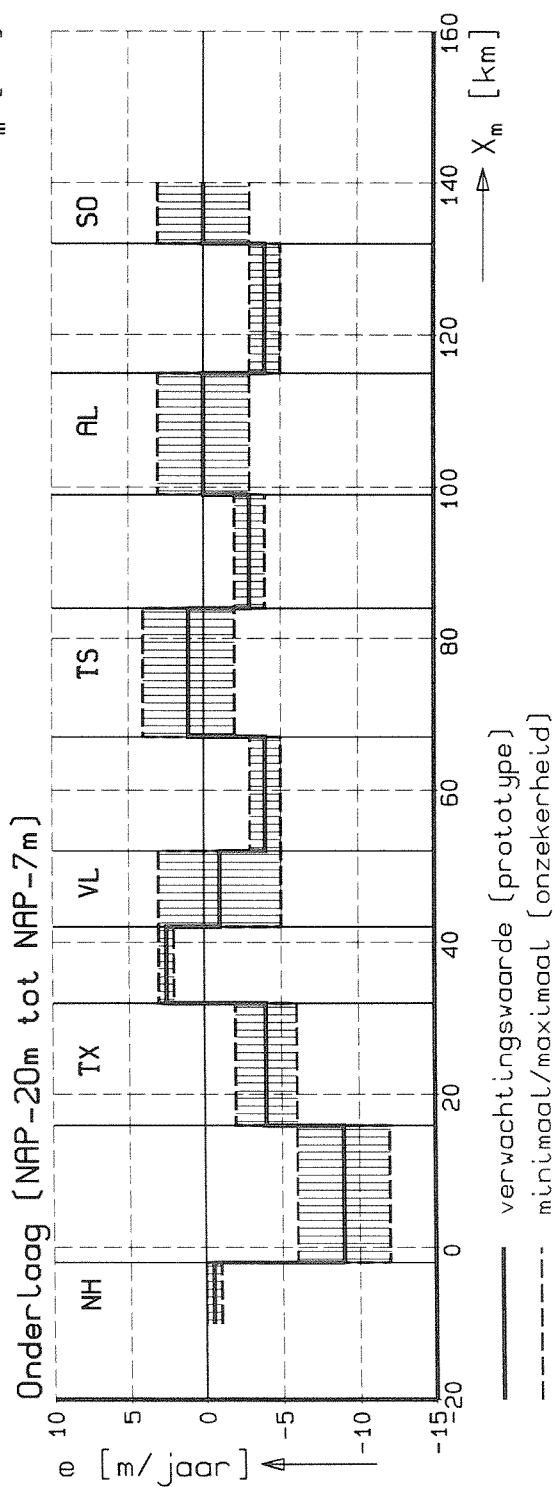
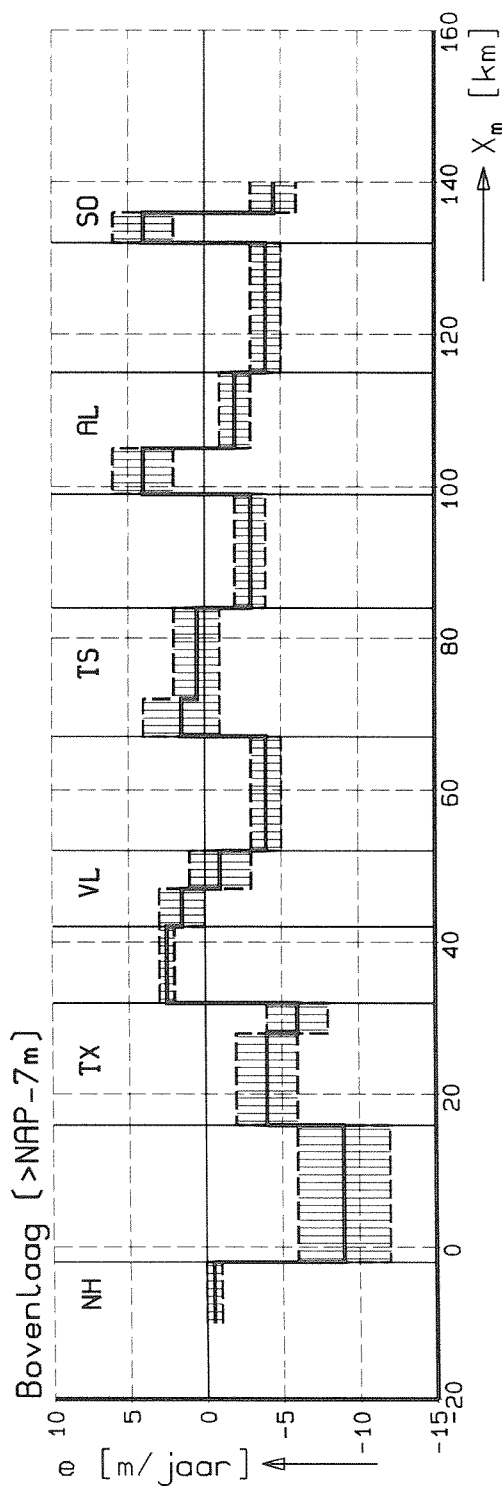
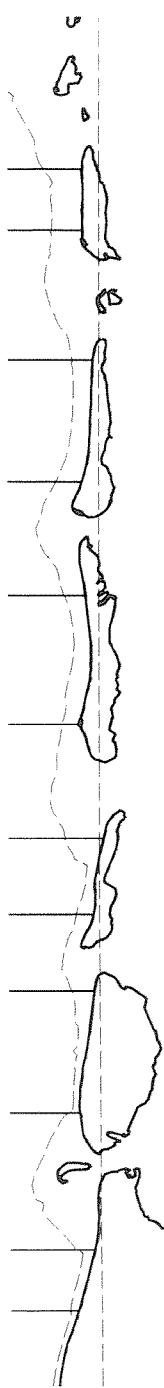
"SAEVN"

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

H1887

FIG.6.1.2

aug. 1994



LANGSVARIATIE MOBILITEIT WADDENKUST
 Boven- en onderlaag (1978-1990)

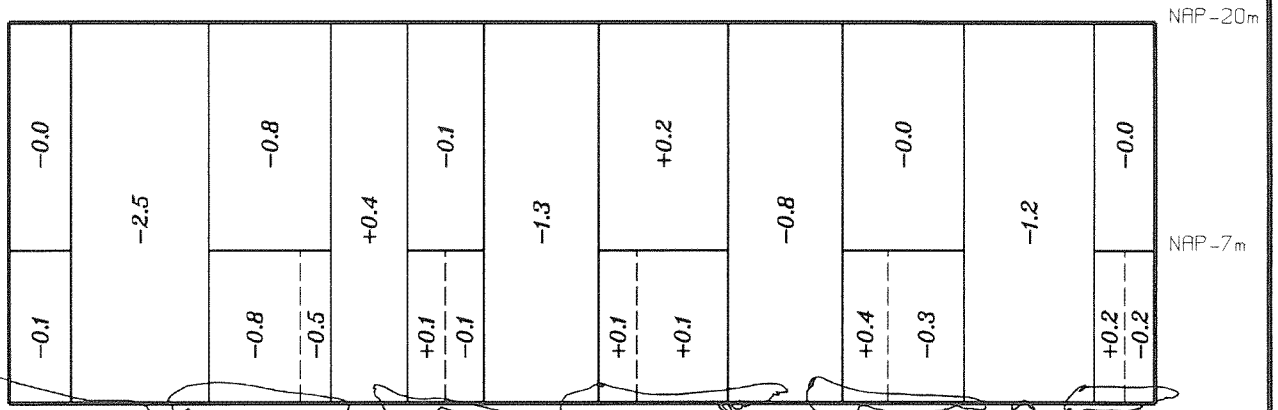
MOBIC

"e(x)"

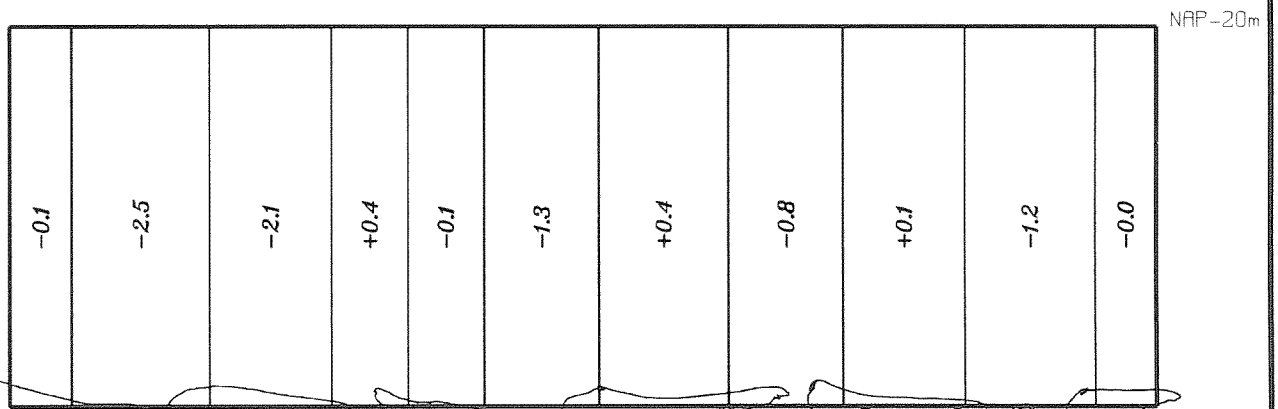
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

H1887

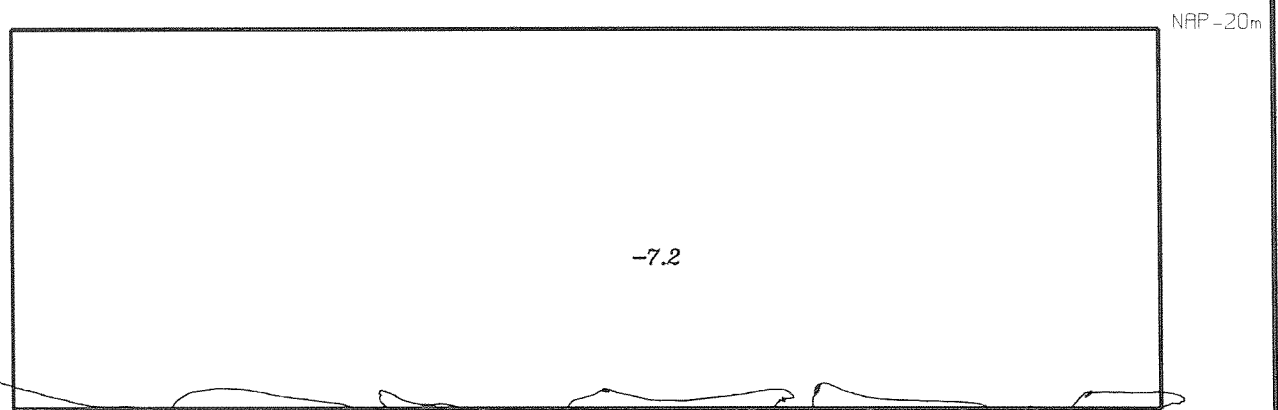
FIG.6.2.1



Balanswaarden per balansvak [Mm³/jaar]



Samengestelde balanswaarden per kustvak [Mm³/jaar]

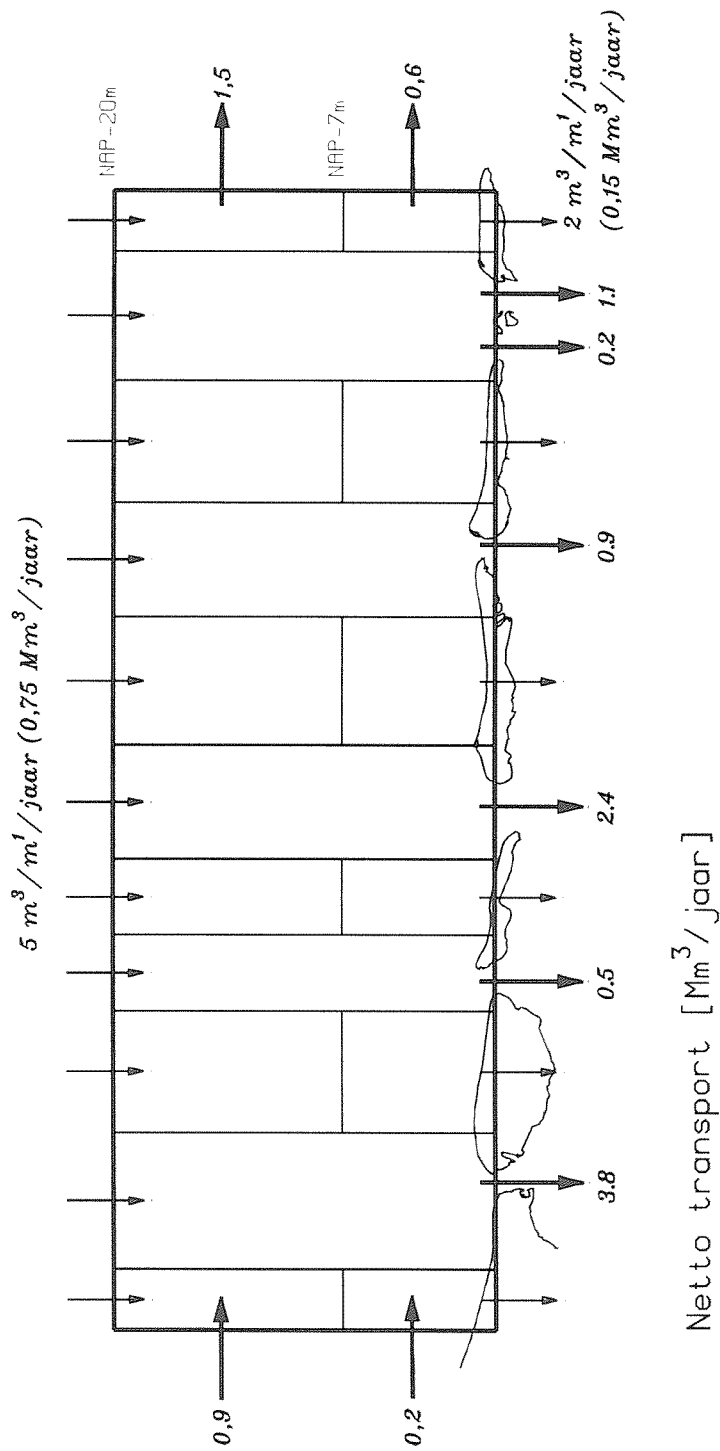


Globale balanswaarde Waddenkust [Mm³/jaar]

nov. 1994

SCHEMATISCH OVERZICHT BALANSWAARDEN Periode 1978-1990	MOBIC	"kust"
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM	H1887	FIG.6.2.2

nov. 1994



SCHEMATISCH OVERZICHT TRANSPORTEN
OVER MODEL RAND; Periode 1978-1990

MOBIC

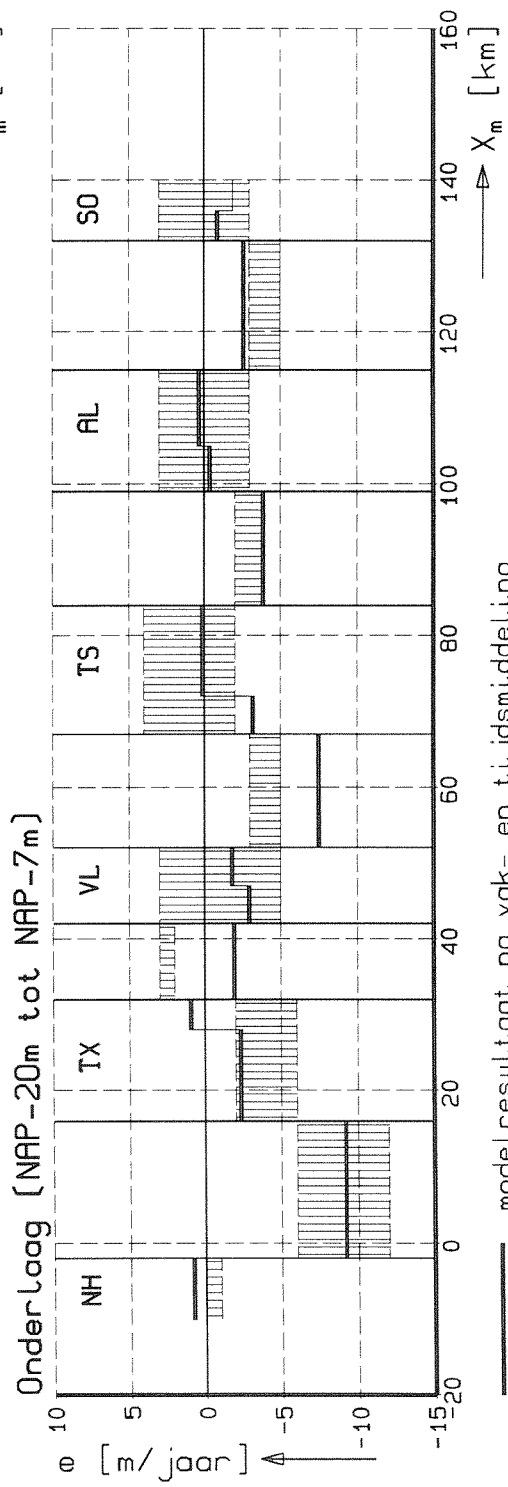
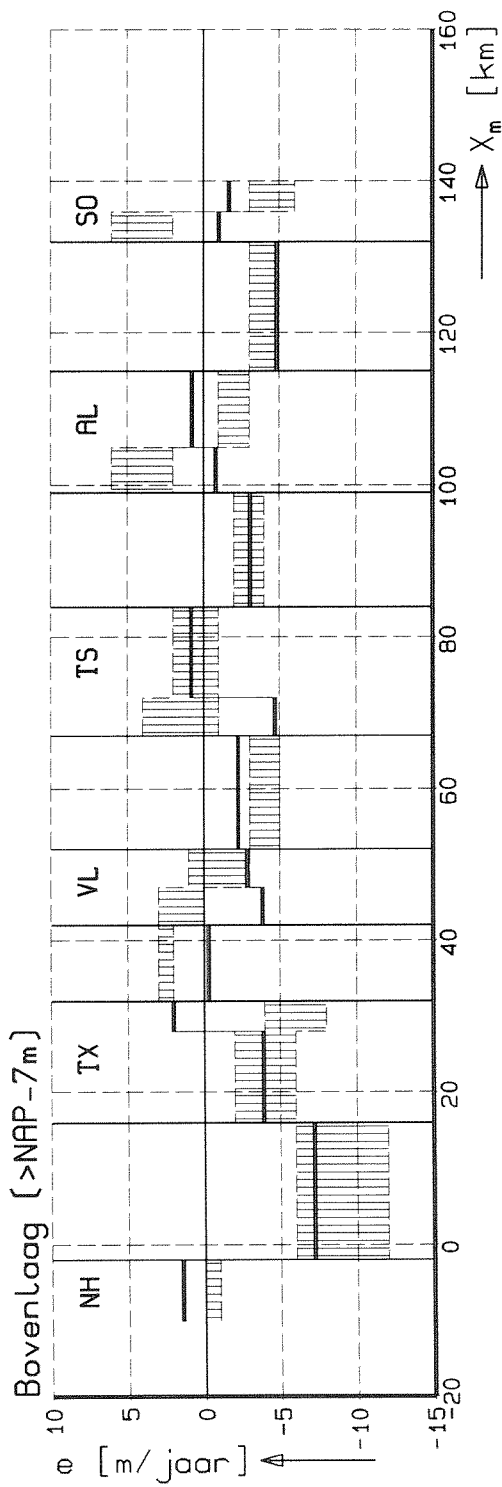
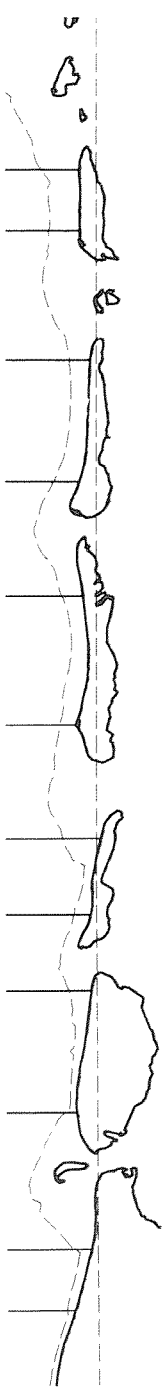
'transp'

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

H1887

FIG.6.4.1

aug. 1994



— modelresultaat na vak- en tijdsmiddeling
 - - - - - minimaal/maximaal (spreidingsband prototype)

BEREKENDE LANGSVARIATIE MOBILITEIT
 Boven- en onderlaag (1978-1990)

MOBIC

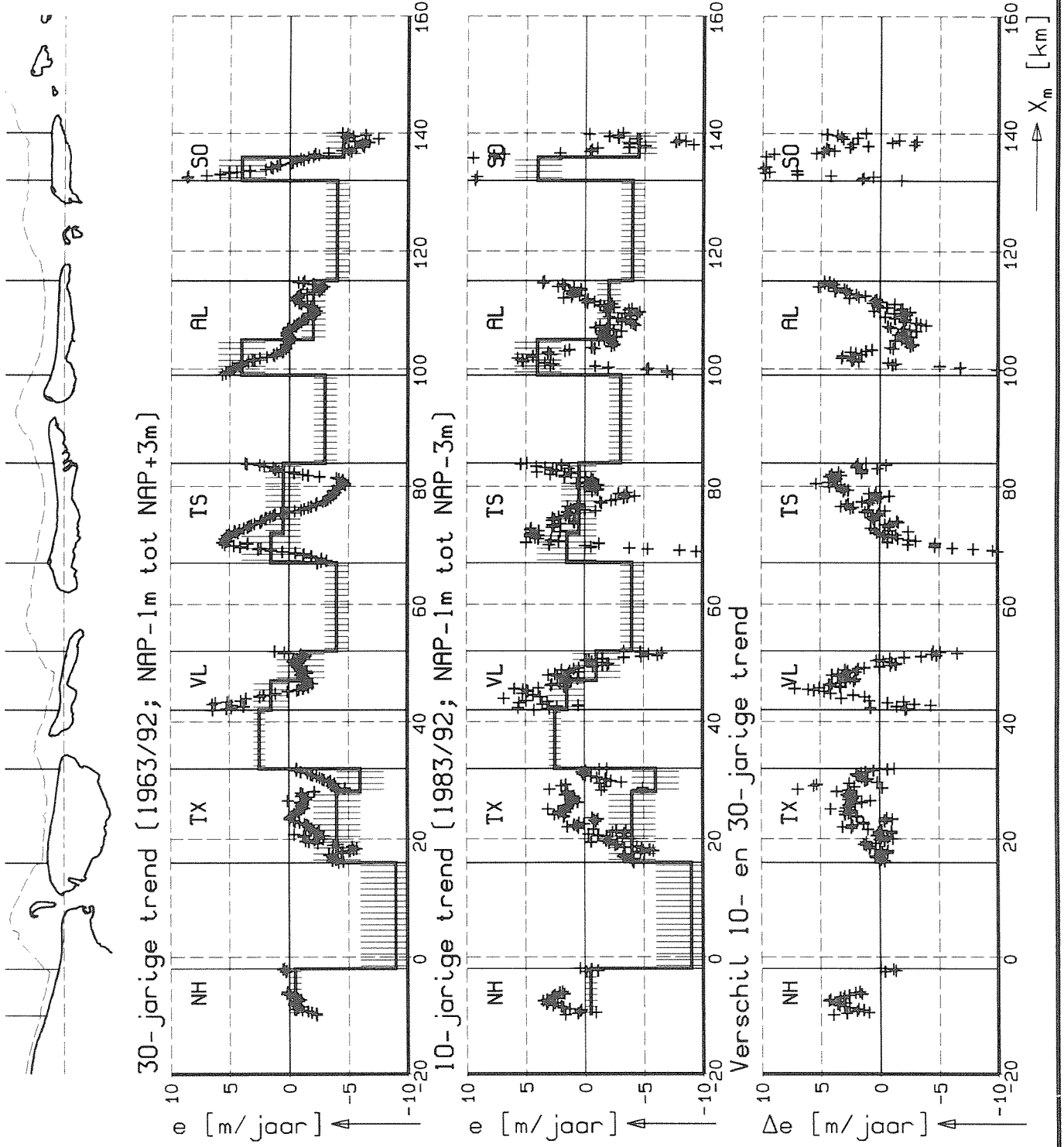
$r(x)$

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

H1887

FIG.6.4.2

sept. 1994

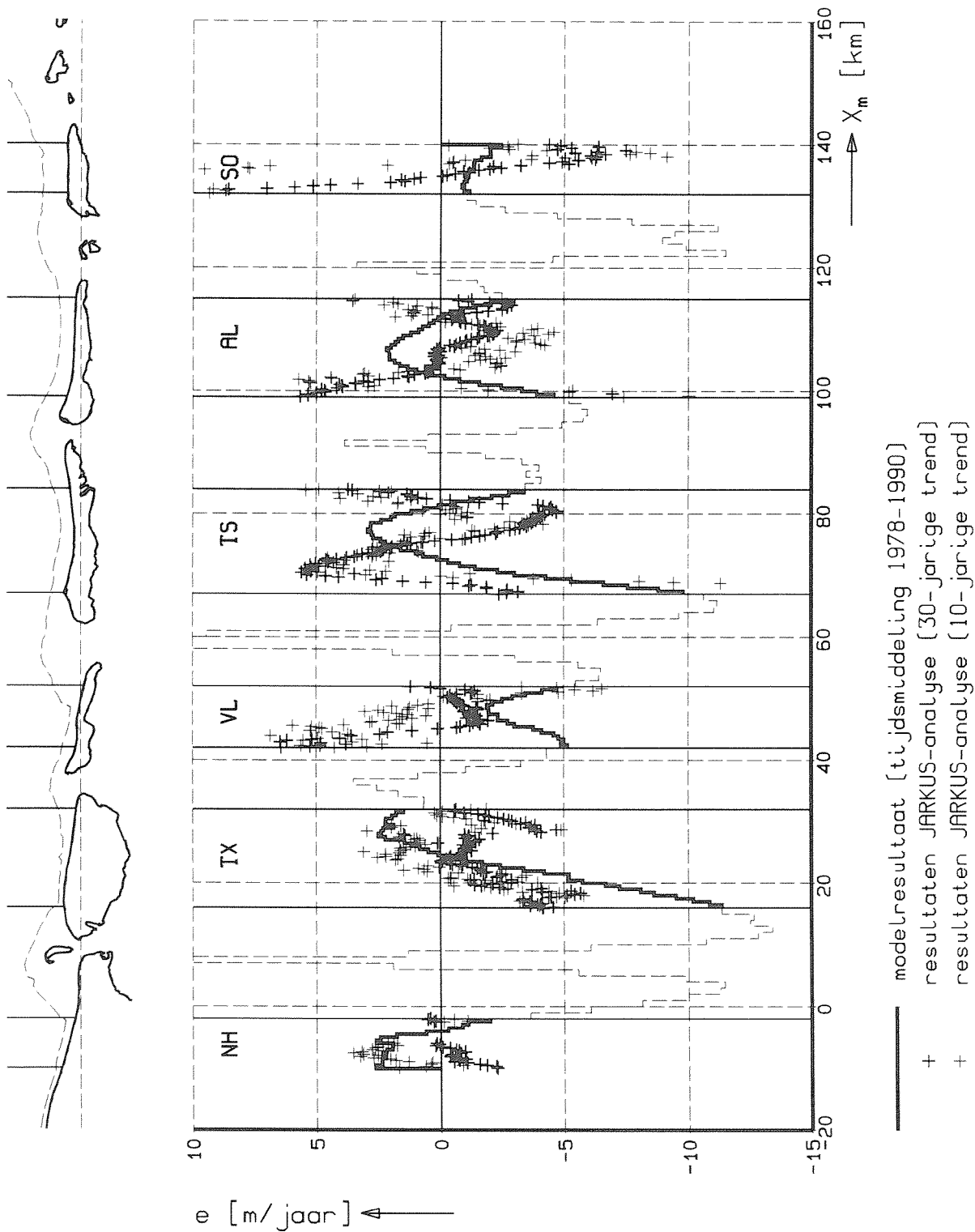


DETAILS LANGSVARIATIE MOBILITEIT
30- en 10-jarige trendwaarden

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

MOBIC	"t1(x)"
H1887	FIG.6.5.1

sept. 1994



BEREKENDE LANGSVARIATIE MOBILITEIT
Detailvergelijking gedrag bovenlaag

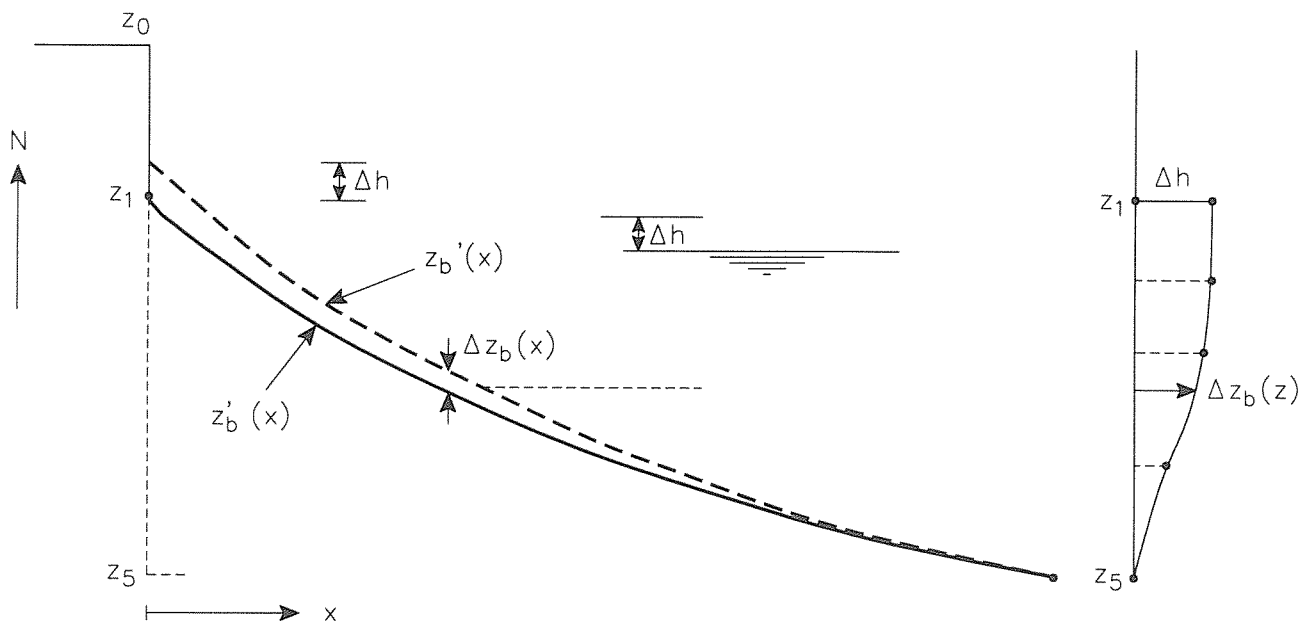
MOBIC

"t2(x)"

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

H1887

FIG.6.5.2



$$z_b'(x) = z_b(x) + \Delta z_b(x)$$

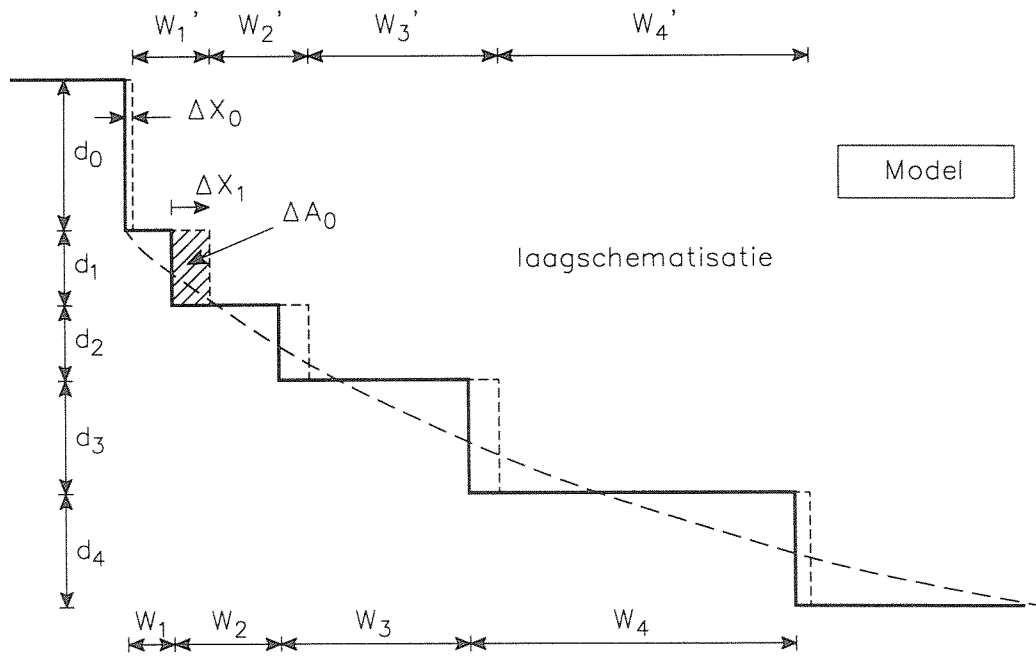
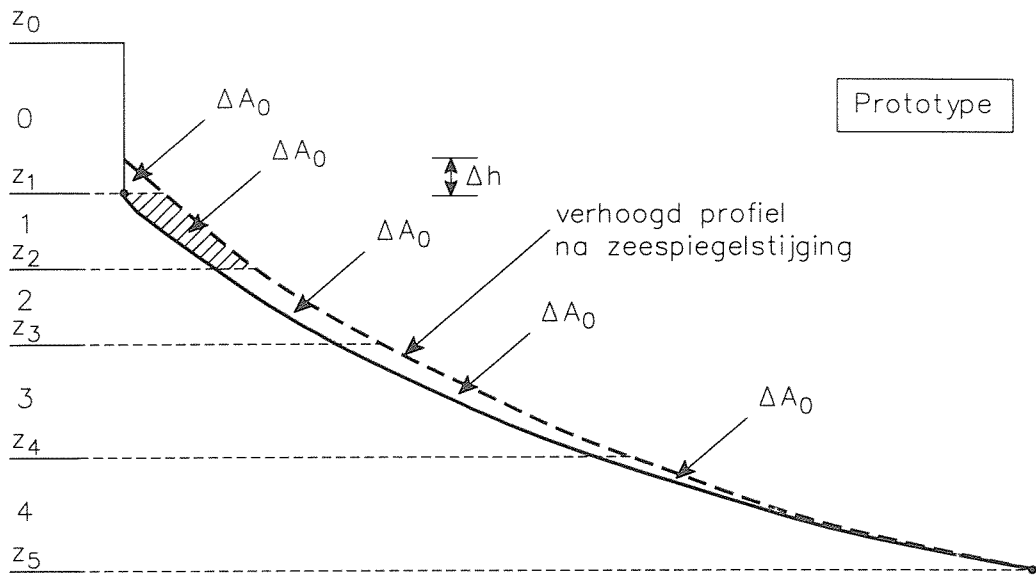
$$\Delta z_b(z) = \sigma(z) \cdot \Delta h$$

↑
verdelingsfunctie

$$\left\{ \begin{array}{l} z > z_1 : \sigma = 0 \\ z = z_1 : \sigma = 1 \\ z_5 < z < z_1 : 0 \leq \sigma \leq 1 \\ z \leq z_5 : \sigma = 0 \end{array} \right.$$

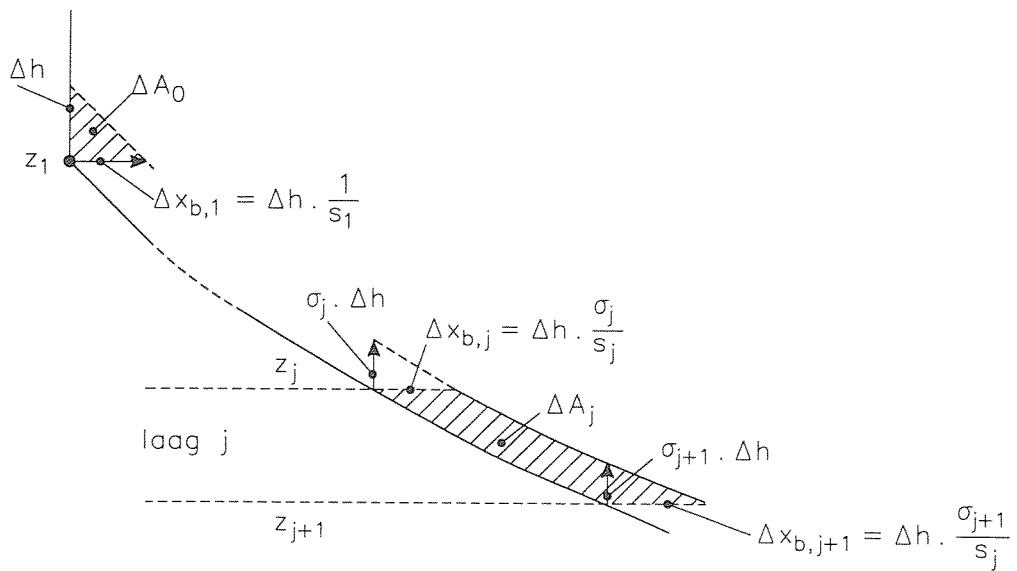
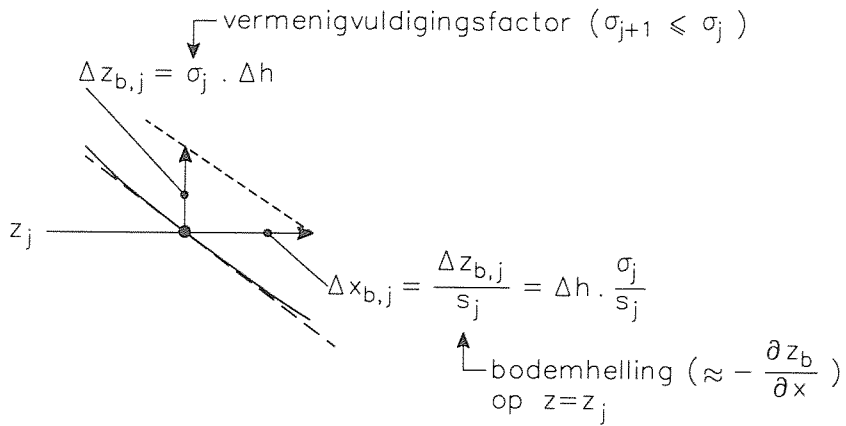
Let op: $z_b'(x)$ is gewenst profiel!

PROFIELAANPASSING BIJ ZEESPIEGEL- STIJGING	MOBIC	"PABZSS"
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM	H1887	FIG.7.5.1



Let op: $z_b'(x)$ is gewenst profiel!

SCHEMATISATIE EFFECT AANPASSING DWARSPROFIEL	MOBIC	"SEPAP"
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM	H1887	FIG.7.5.2



AFLEIDING VOLUME-MUTATIES

MOBIC

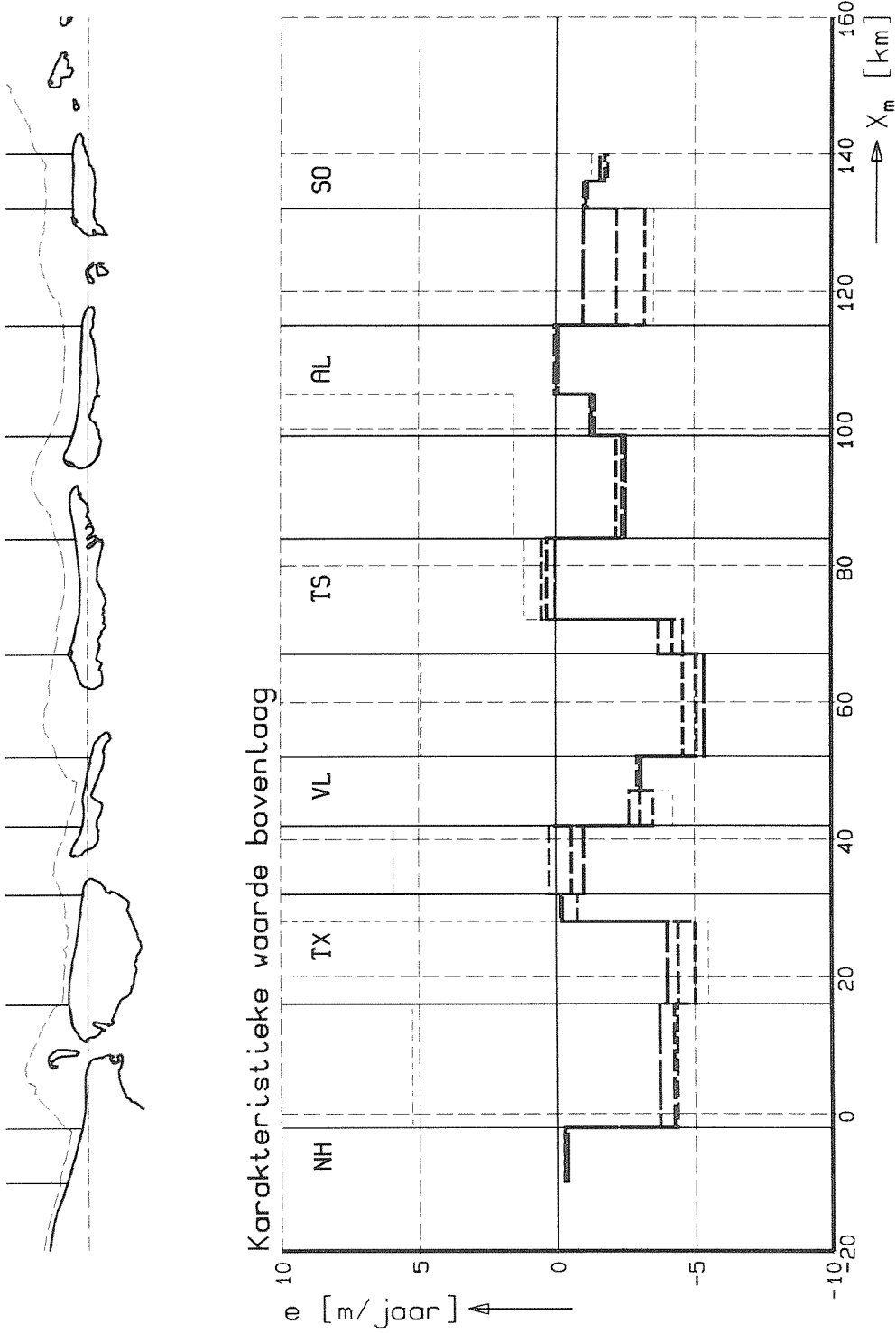
"AVM"

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

H1887

FIG.7.5.3

aug. 1994



TIJDSONTWIKKELING MOBILITEIT
 Beweging bovenlaag 1990-2040

MOBIC

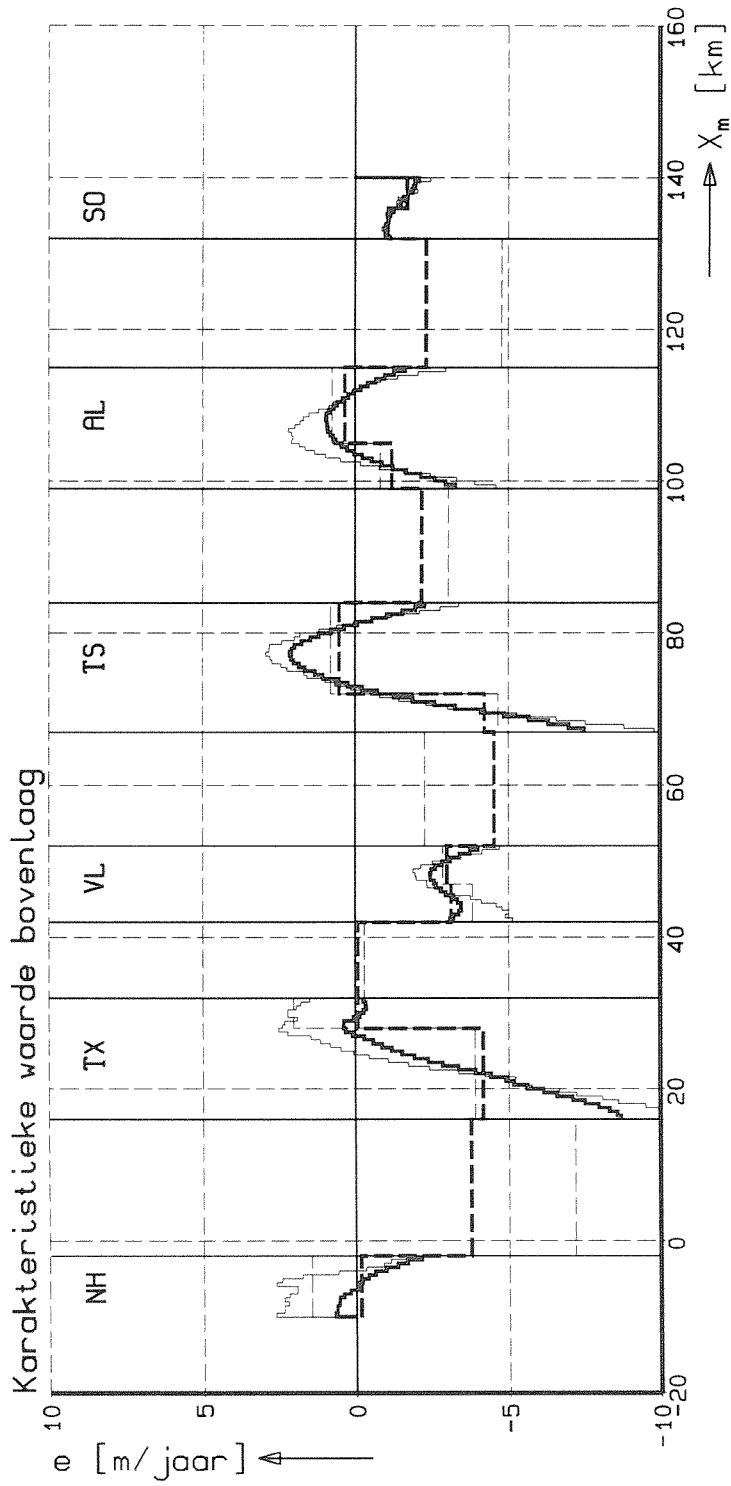
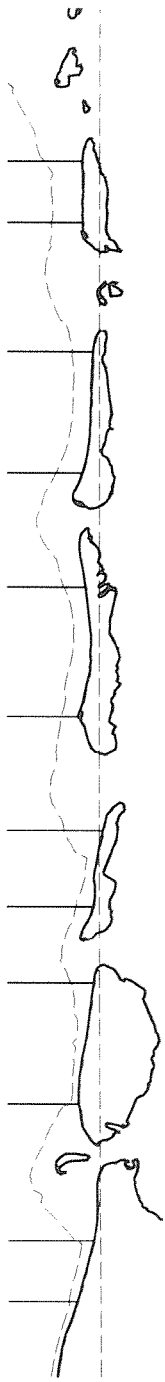
'01(x)'

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

H1887

FIG.8.2.1

aug. 1994



- vakgemiddeld periode 1990-2040
- idem, 1978-1990
- raai-waarden periode 1990-2040 [kustvakken]
- .- idem, 1978-1990

TIJDSGEMIDDELTE MOBILITEIT
 Vak- en raaiwaarden 1990-2040

MOBIC

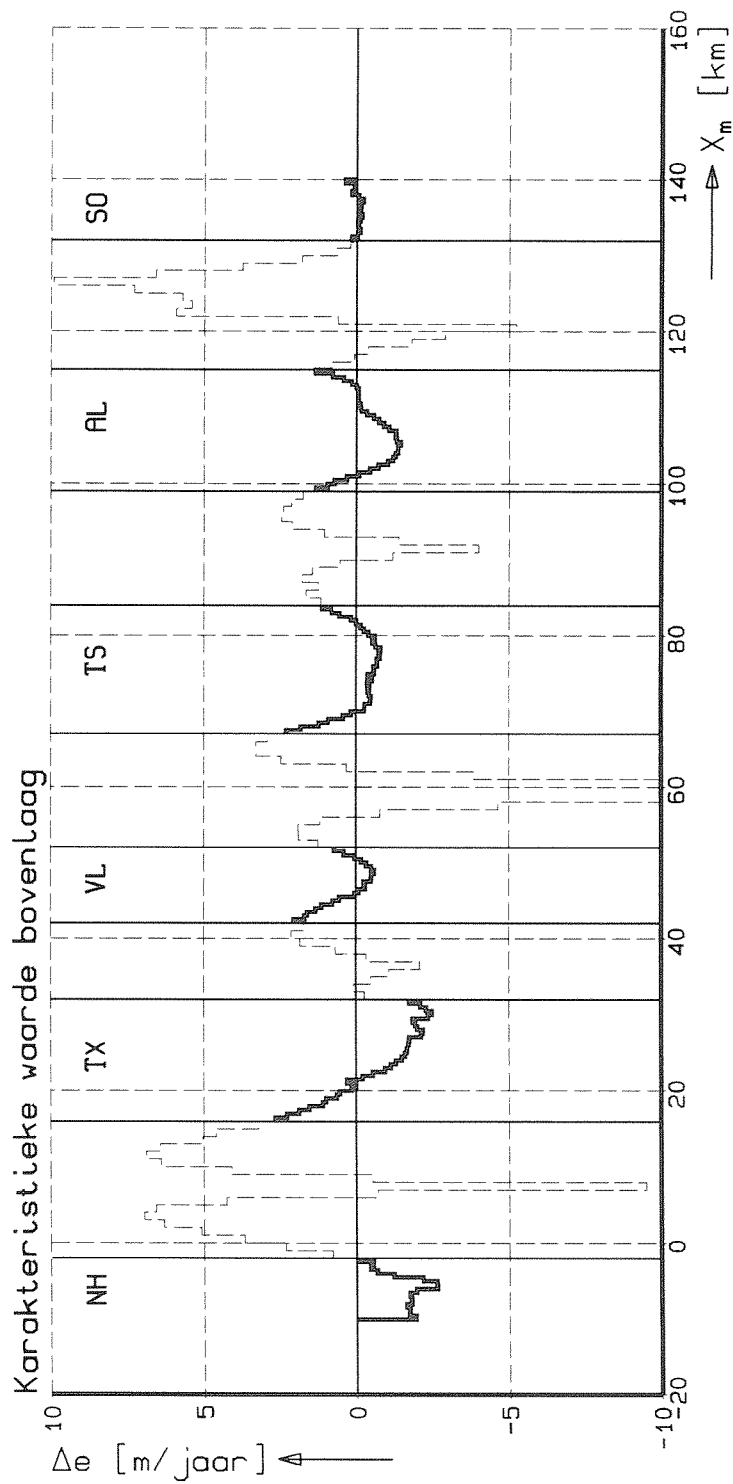
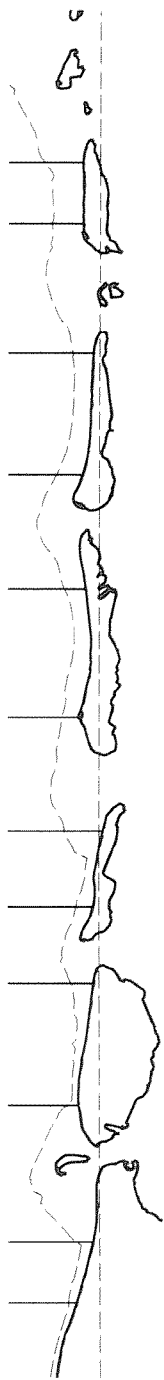
"o2(x)"

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

H1887

FIG.8.2.2

sept. 1994



ONTWIKKELING TIJDGEM. MOBILITEIT
 Relatieve toename railwaarden

MOBIC

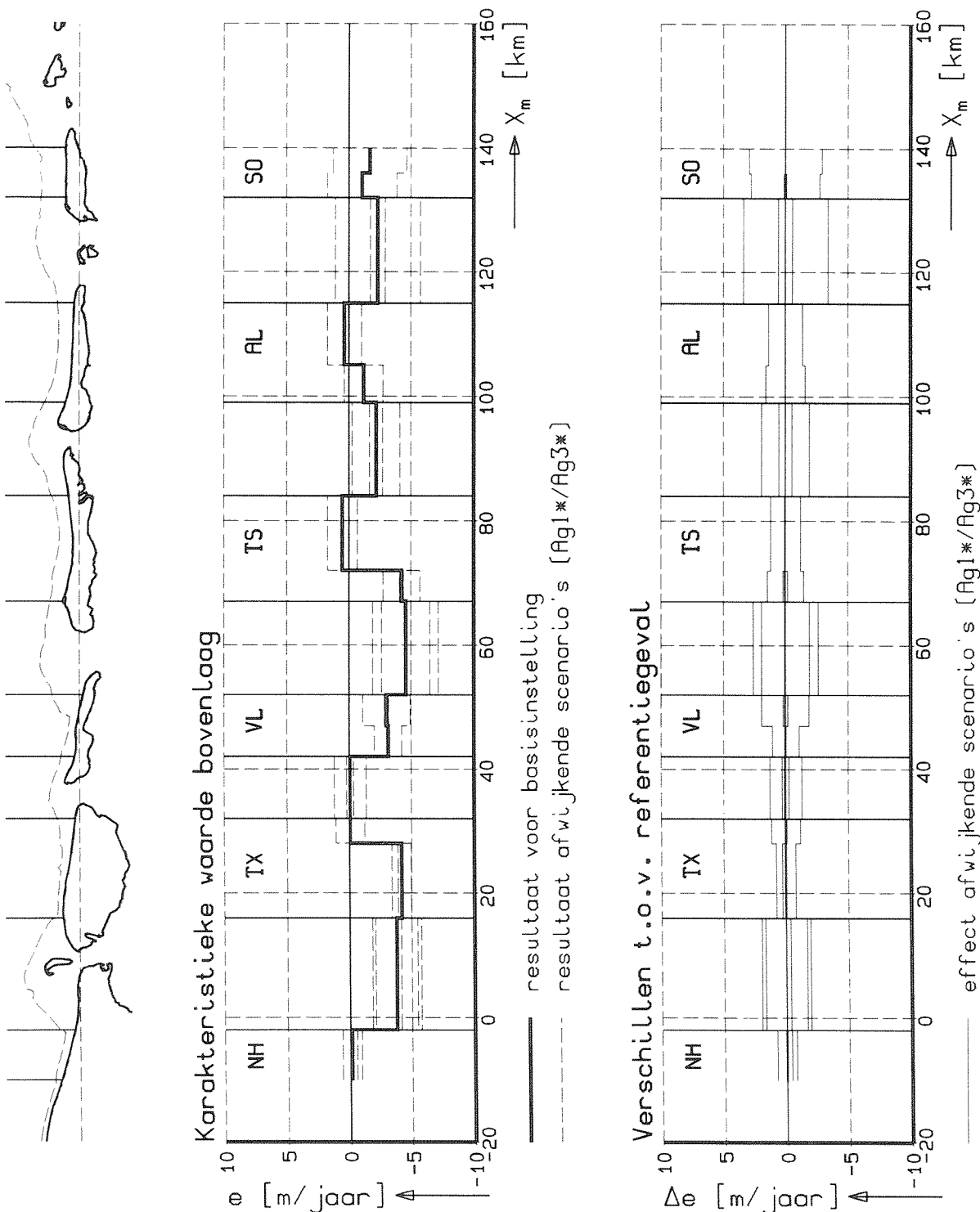
103(x)

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

H1887

FIG.8.2.3

aug. 1994



EFFECT ONZEKERHEID MODELINVOER
 Gem. beweging bovenlaag (1990-2040)

MOBIC

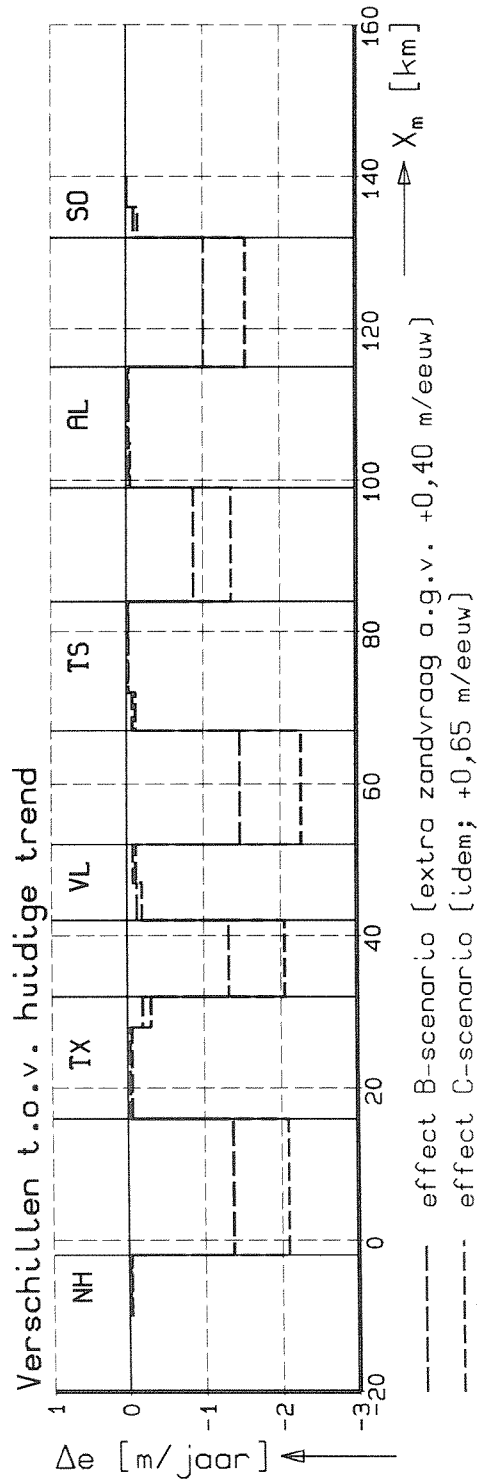
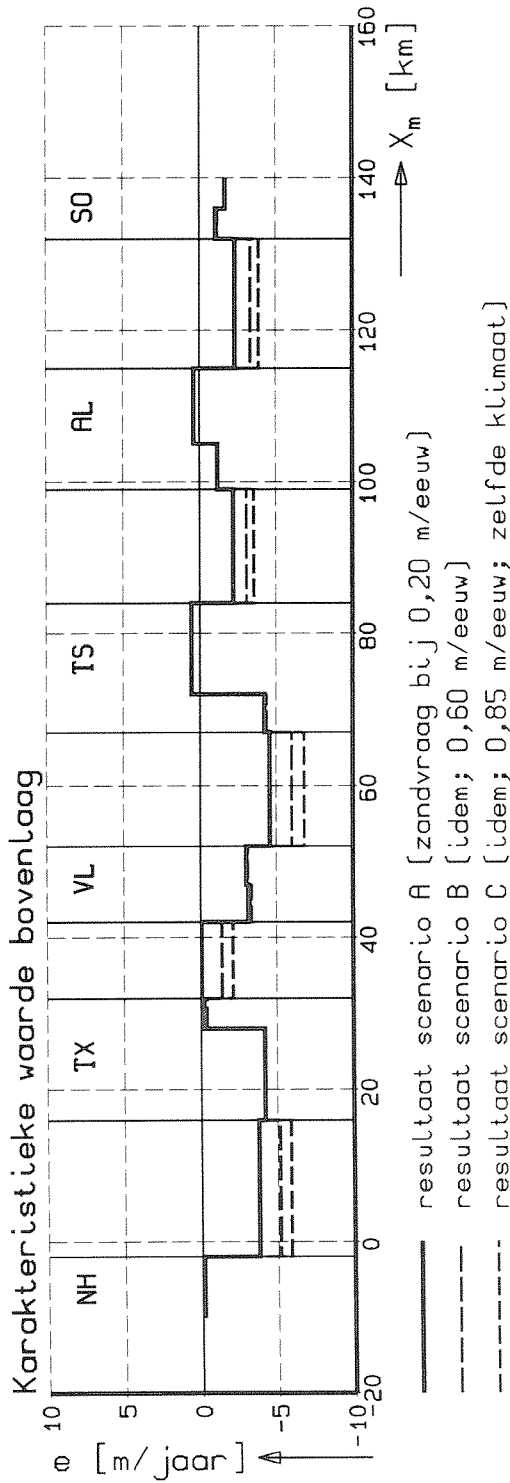
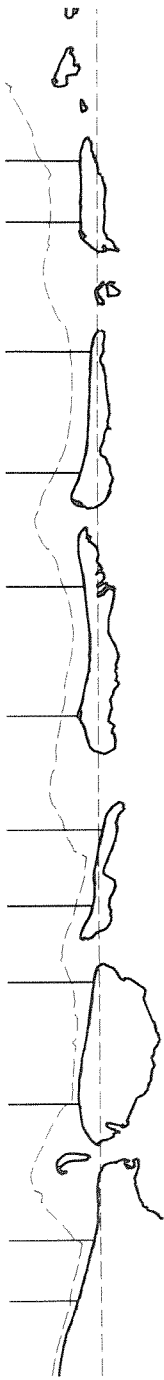
'b(x)'

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

H1887

FIG.8.3.1

aug. 1994



EFFECT TOENAME ZANDVRAAG
 Gem. beweging bovenlaag (1990-2040)

MOBIC

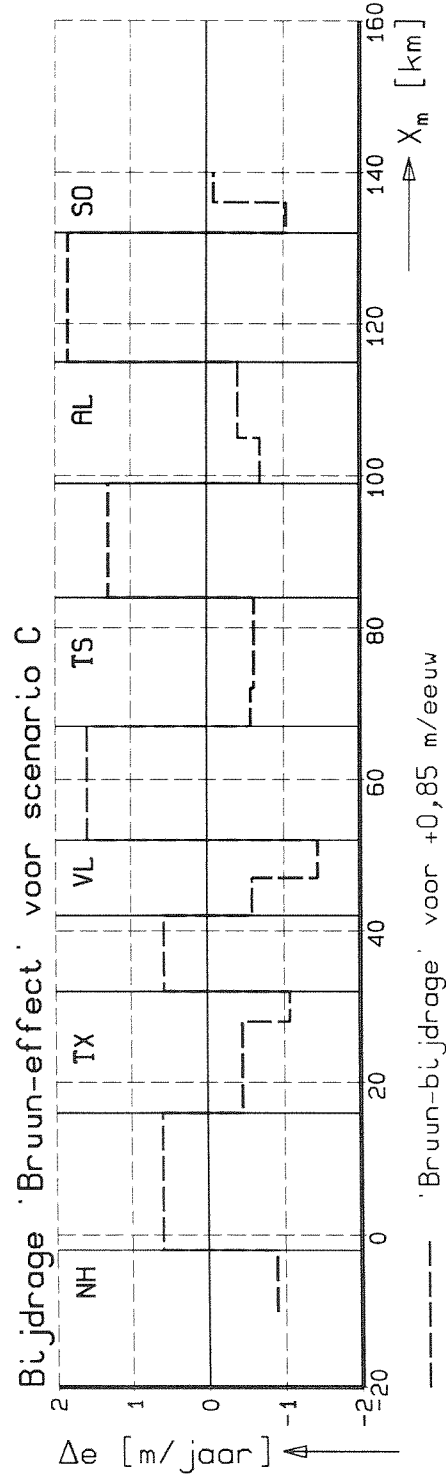
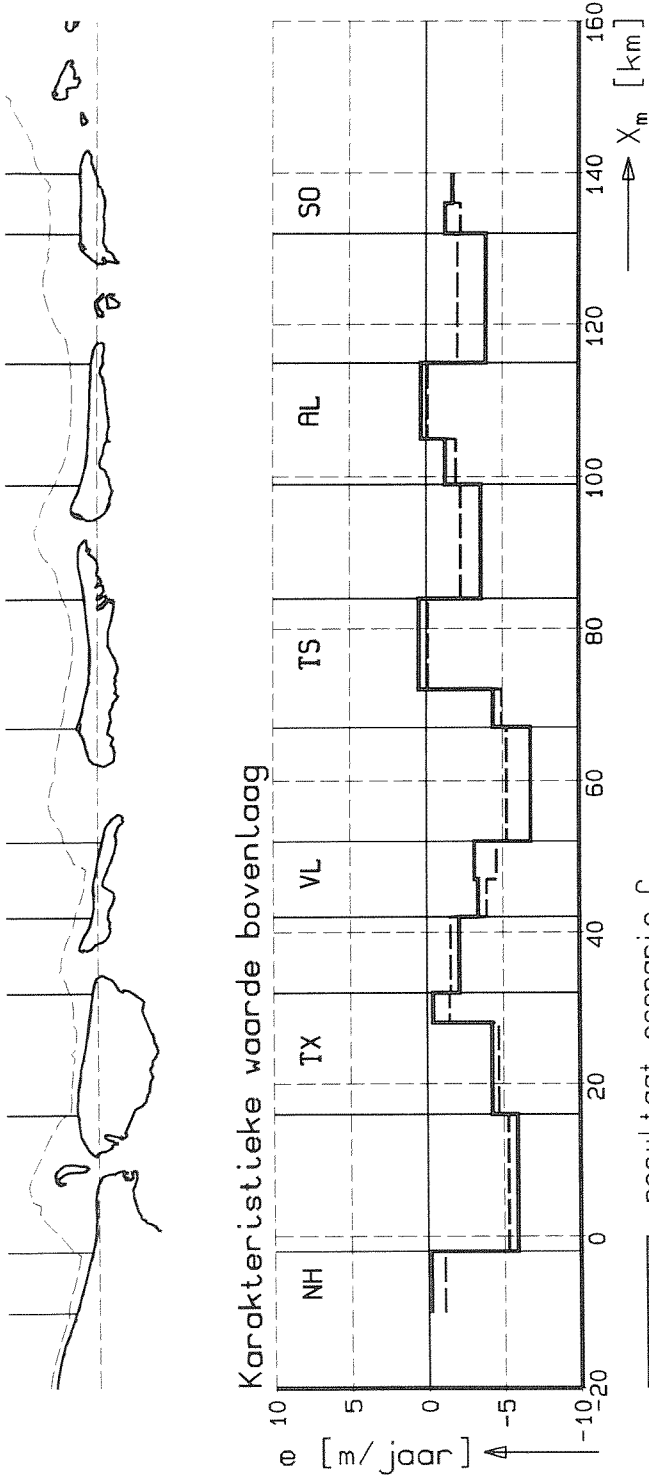
'z1(x)'

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

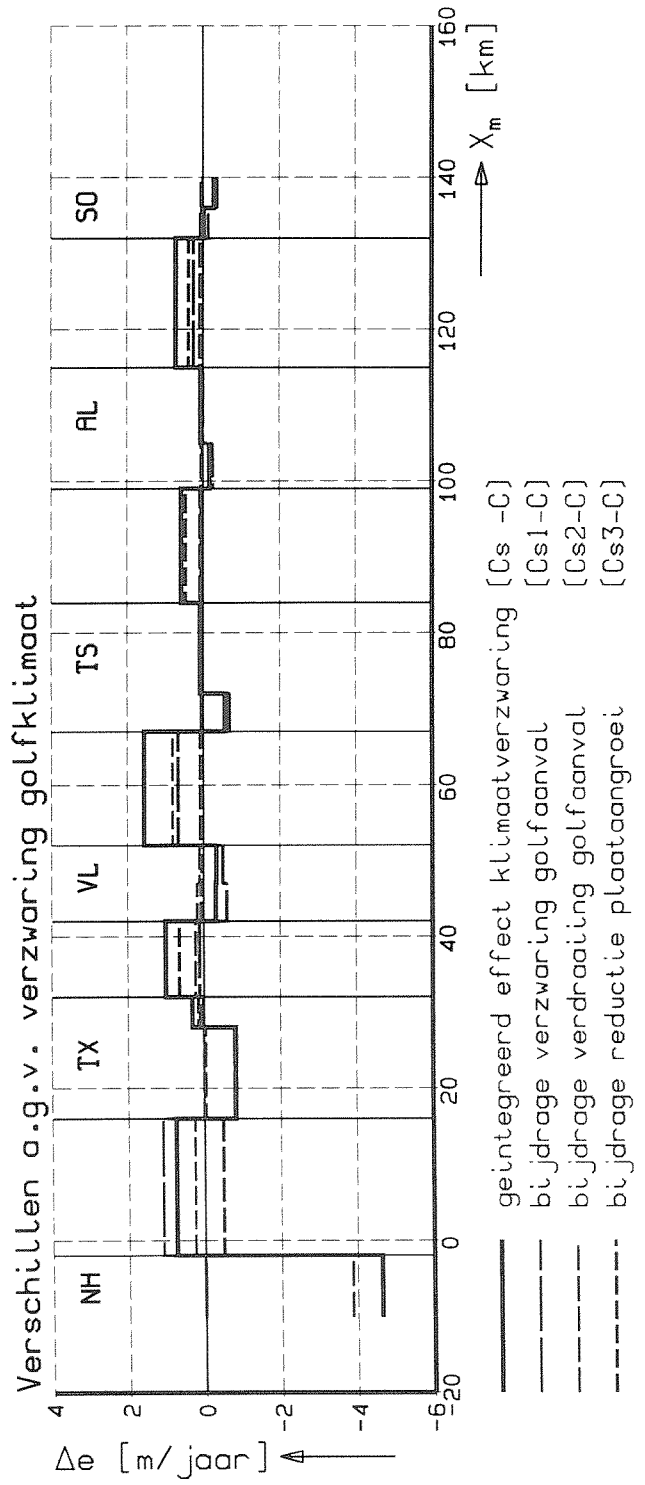
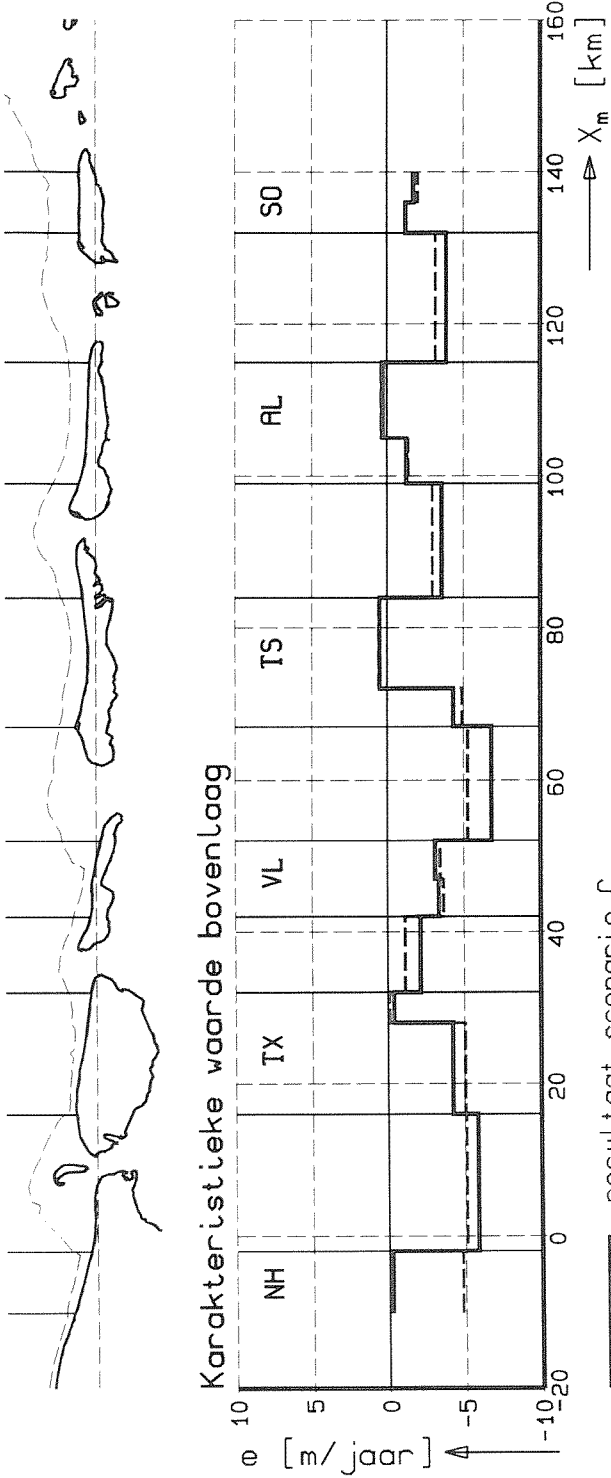
H1887

FIG.8.4.1

sept. 1994

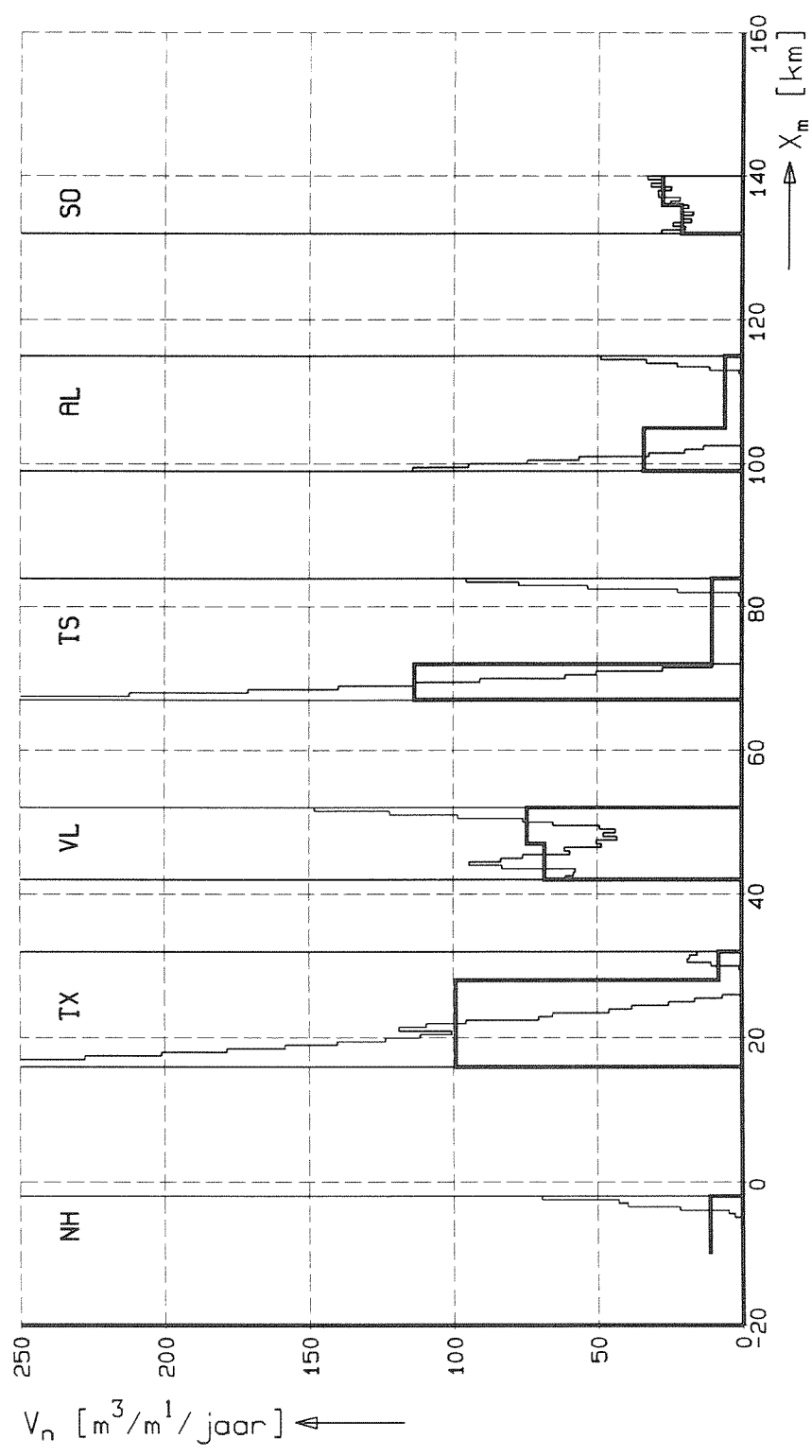
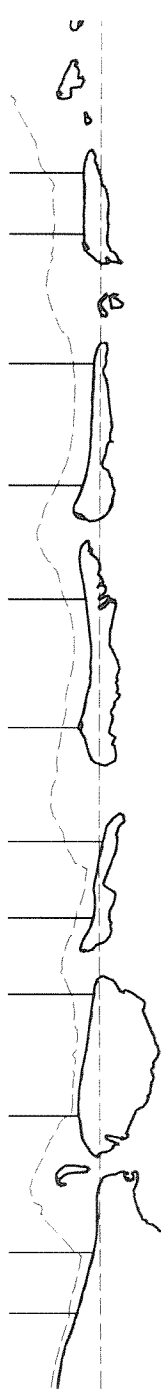


EFFECT 'BRUUN-BIJDRAGE' Gem. beweging bovenlaag (1990-2040)	MOBIC	'z2(x)'
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM	H1887	FIG.8.4.2



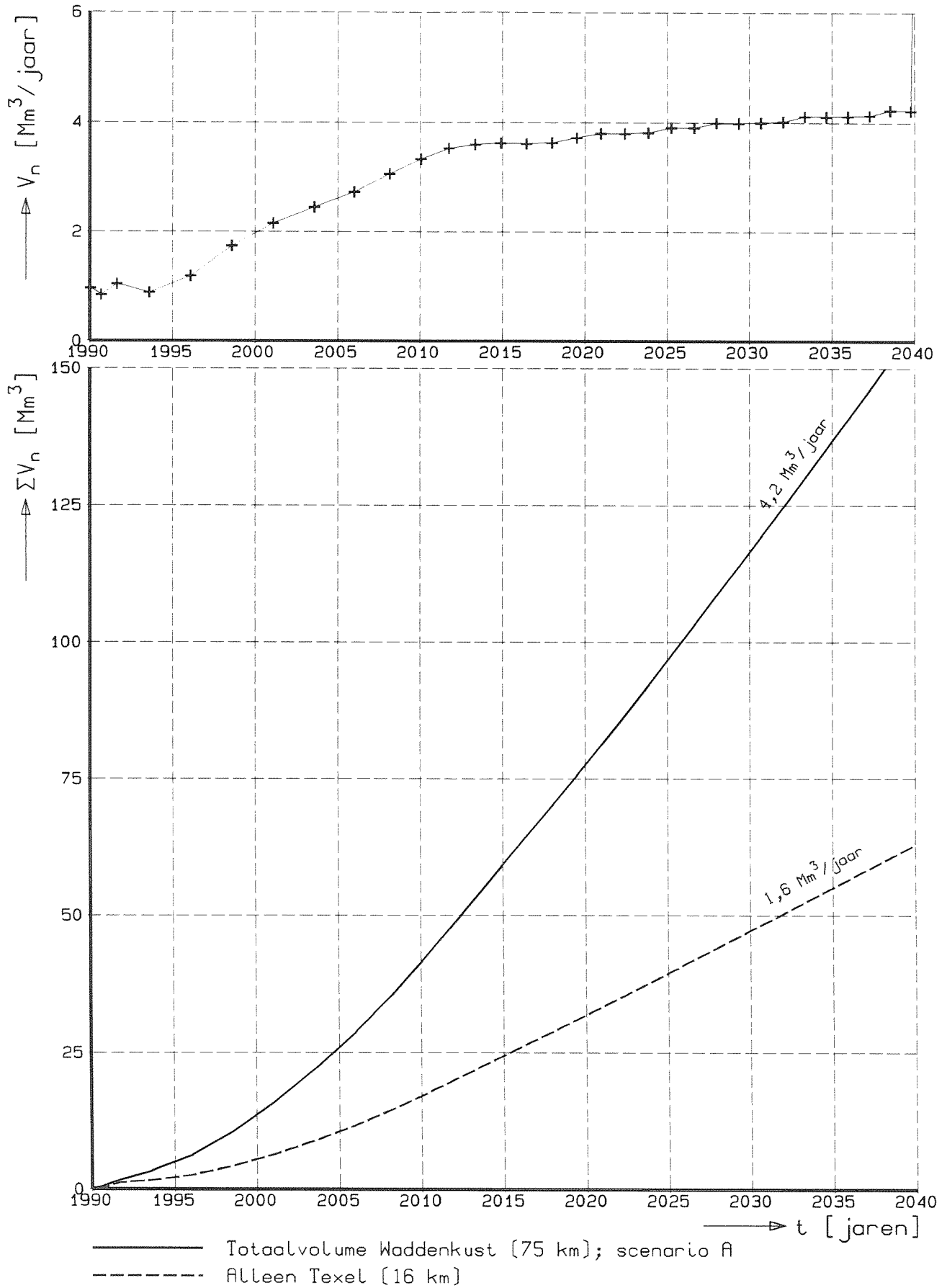
EFFECT VERZWARING GOLFKLIMAAT Gem. beweging bovenlaag (1990-2040)	MOBIC	"k(x)"
	WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM	H1887

okt. 1994



— Raai-waarden [tijdsgemiddeld 1990-2040; scenario An]
 — Vak-waarden [idem]

TIJDGEMIDDELDDE SUPPLETIEBEHOEFTE Handhaving huidige kustlijn	MOBIC	"An(x)"
	WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM	H1887



TIJDSONTWIKKELING SUPPLETIEVOLUME
Handhaving huidige kustlijn

MOBIC

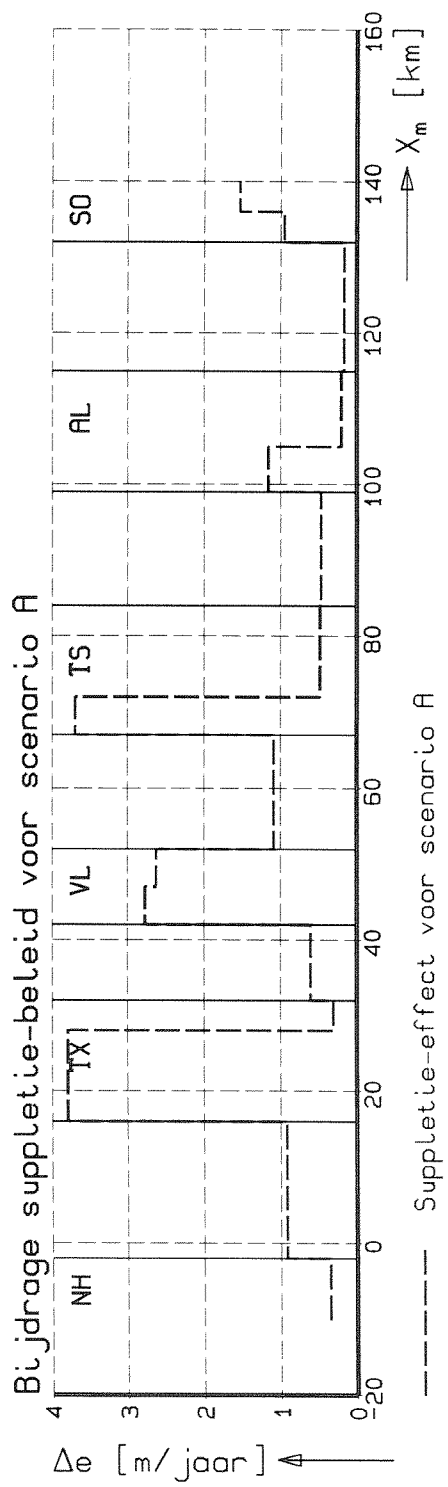
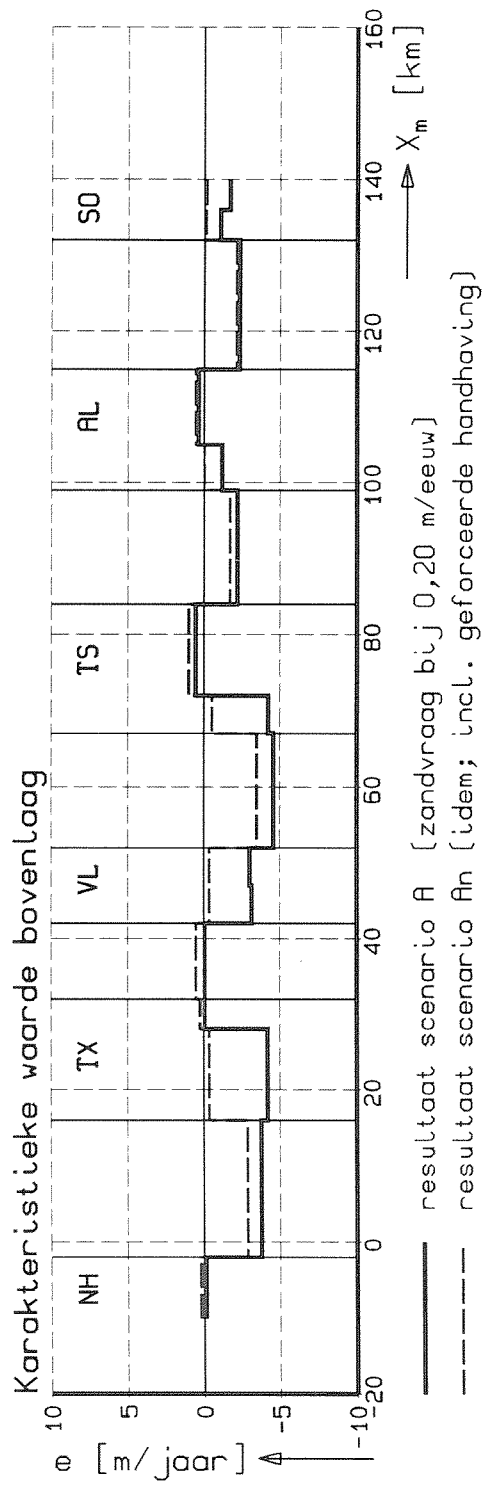
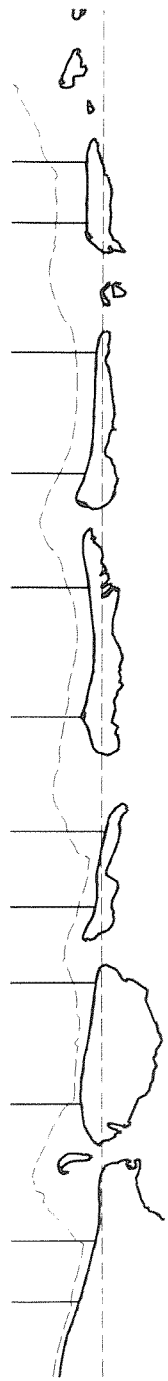
'An(t)'

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

H1887

FIG.8.6.2

nov. 1994



EFFECT KUSTLIJNHANDHAVING
 Gem. beweging bovenlaag (1990-2040)

MOBIC	"n(x)"
H1887	FIG.8.6.3

Appendix A

Nadere analyse detailberekeningen Eijerlandse Gat

Appendix A: Nadere analyse detailberekeningen Eijerlandse Gat

A-1 Inleiding

Voor het vergroten van het inzicht in het netto transport door de keel van een zeegat zijn met het bestaande mathematische model van het Eijerlandse Gat enkele aanvullende berekeningen uitgevoerd. Voor een meer uitgebreide verhandeling over het gebruikte model wordt verwezen naar het afstudeerrapport van E. Negen [Negen, 1994].

Een schematisch overzicht van de uitgevoerde berekeningen is gegeven in Tabel A-1.

Serie	aantal cond.	toepassing getijfactoren *)	binnenrand	Netto transport [10 ³ m ³ /jaar]	Opmerkingen
'0'	3+1	ja	open	+15	Resultaat oorspronkelijke studie
'A'	3+1	nee	dicht	+130/-170	Extra: t.b.v. effect komverkleining
'B'	15+1	ja	open	-12	Extra: t.b.v. effect klimaatschematisatie

*) Vermenigvuldiging eb- en vloedbijdragen met resp. 0,80 en 1,20.

Tabel A-1 Schematisch overzicht berekeningen Eijerlandse Gat model.

Het netto transport is positief als er sprake is van zeewaarts transport.

A-2 Doelstelling en aanpak

Voor de huidige studie relevante uitkomsten hebben betrekking op:

- Het effect van (kunstmatige) komverkleining (A-serie);
- Het effect van het golfklimaat (B-serie).

Het onderzoek naar het effect van een komverkleining (en dus ook een verkleining van het getijprisma) is met name van belang voor de voorspelling van de effecten van een stijging van de gemiddelde zeespiegel. Hierdoor zal immers ook sprake zijn van een (in ieder geval initiële) wijziging (in dit geval een vergroting) van het getijprisma.

Het nader onderzoeken van de effecten van een golfklimaatwijziging (golfhoogte, golfrichting) houdt verband met het feit dat er bij het doorrekenen van een extreem zeespiegelstijgingsscenario ook rekening zou moeten worden gehouden met een verzwaring van het golfklimaat en een verdraaiing van de golfrichting.

Voor het onderzoek naar het effect van een kunstmatige komverkleining zijn een drietal extra berekeningen uitgevoerd. In Sectie A.6.3 wordt hierop nader ingegaan.

Voor de B-serie is slechts een extra berekening uitgevoerd waarbij het resultaat van de oorspronkelijke studie is vergeleken met de uitkomst van een berekening voor een minder geschematiseerd golfklimaat (16 i.p.v. 4 verschillende hydraulische condities). De uitwerking als geven in de secties A.6.4 e.v. is gebaseerd op een nadere analyse van de resultaten van deze uitgebreide berekening.

Hierbij zijn drie verschillende zaken onderscheiden, te weten:

- Het relatieve effect van (additionele) golfaanval;
- Het effect van een verzwaring van het golfklimaat;
- Het effect van een verdraaiing van de maatgevende golfrichting.

Teneinde een kwantitatief oordeel te kunnen geven aangaande de relatieve effecten is het resultaat van een berekening uitgedrukt in de grootte van het transport door een raai in het zeegat als gegeven in Figuur A-1. Figuur A-2 geeft een dwarsprofiel met daarin aangegeven de vier subsecties, waaronder het Robbengat en het Engelsmangat.

A-3 Effect komverkleining

Het doel van deze exercitie is het inzicht in het effect van een instantane wijziging van het komoppervlak (en daarmee het getijprisma) te vergroten.

Uitgaande van het bestaande model voor het Eijerlandse Gat is het binnengebied voorzien van een dichte rand (over het wantij). Uitgaande van deze configuratie, aangegeven als 'kom 0' is de binnenrand zodanig opgeschoven dat er tweemaal een oppervlaktereductie van circa 25%

werd verkregen (zie Figuur A-3 en Tabel A-2).

komnr.	vloedvolume		Omschrijving
	[10 ⁶ m ³]	[%]	
0	178	100	als oorspronkelijk model maar nu met gesloten binnenranden
1	134	75,3	als vorige, maar kleiner
2	98	55,1	als vorige, maar kleiner

Tabel A-2 *Overzicht van komaanduidingen aangepast Eijerlandse Gat model (A-serie).*

Door voor elke configuratie het transportpatroon te bepalen is het effect van deze wijziging op de uitwisseling door het zeegat onderzocht. Bruikbare kwantitatieve informatie is verkregen door het netto transport door een raai dwars over het zeegat te beschouwen als eerder gegeven in Figuur A-2.

Er zijn verschillende niveaus te onderkennen waarop de modelresultaten zijn bekeken, te weten:

- Plaats- en tijdsgemiddelde waarden (gehele raai, compleet getij);
- Per raaisgment maar getijgemiddeld;
- Per getijfase maar over totale gatbreedte;
- Per getijfase en per raaisgment.

De eerste optie levert hierbij alleen het netto transport door het zeegat door integratie over de gatbreedte van de over het getij gemiddelde transporten.

Bij de tweede (en vierde) optie is het 3,050 km brede zeegat opgedeeld in een viertal segmenten, terwijl er bij de laatste twee gekeken is naar de bijdragen van de afzonderlijke eb- en vloedfase. Een overzicht van de gebruikte vakken is gegeven in Tabel A-3, waarbij vak 1, het Robbengat, en vak 3, het Engelsmangat, vermoedelijk de voornaamste transportbanen betreffen.

vaknr.	breedte *) [m]	Omschrijving
1	1100	zuid-westelijke vloedgeul langs Bolwerk Texel ; Robbengat
2	500	hoger gelegen tussengebied
3	700	(centrale) ebgeul, Engelsmangat
4	750	hoger gelegen gebied naast Vliehors

*) Op NAP-niveau.

Tabel A-3 *Overzicht van deelsecties Eijerlandse gat.*

Een overzicht van de getijgemiddelde, ruimte-geïntegreerde grootte van het transport door het zeegat is voor de verschillende komgrootten gegeven in Tabel A-4.

komnr.	Netto transport [10 ³ m ³ /jaar]	Opmerkingen
0	+130	Netto toelevering van zand aan buitendelta
1	-167	Netto inwaarts transport
2	-170	Idem

Tabel A-4 *Overzicht geïntegreerde resultaten.*

Uit dit overzicht komt naar voren dat er blijkbaar geen eenduidig (simpel) verband bestaat tussen de grootte van de kom en het hiermee samenhangende netto transport door het zeegat. Bij een verkleining van de kom is er zelfs sprake van een tekenwisseling. Er vindt in toenemende mate netto transport door het zeegat naar binnen plaats.

Een uitsplitsing per vak is gegeven in Tabel A-5.

komnr.	Netto transport [10 ³ m ³ /jaar]				Opmerkingen
	vak 1	vak 2	vak 3	vak 4	
0	+174	-18	-14	-12	netto toelevering van zand aan buitendelta
1	-44	-29	-82	-12	
2	-72	-22	-63	-13	

Tabel A-5 *Overzicht getijgemiddelde resultaten per vak.*

Gezien het reeds opgemerkte belang van met name de vakken 1 en 3 is het niet verwonderlijk dat in deze vakken ook het grootste verschil optreedt. Opmerkelijk is overigens wel dat (voor de basissituatie) in vak 1 het uitgaande transport overheerst terwijl in vak 3 het ingaande transport domineert, ofschoon men op basis van vloed- en ebgeul (misschien) anders zou verwachten.

In hoeverre de opmerkelijke afhankelijkheid (Tabel A-4) is te toe te schrijven is aan een afnemende bijdrage van het (zeewaarts gerichte en dus positieve) ebtransport of een afname van het 'landwaarts' gerichte vloedtransport blijkt uit Tabel A-6 waarin de resultaten per getijfase zijn samengebracht.

komnr.	Netto transport				Opmerkingen
	ebfase		vloedfase		
	[10 ³ m ³ /jaar]	[%]	[10 ³ m ³ /jaar]	[%]	
0	+711	100	-581	100	netto toelevering van zand aan buitendelta
1	+369	52	-536	92	
2	+146	21	-316	54	

Tabel A-6 *Overzicht resultaten per getijfase.*

Opvallend is de sterke reductie in het transport tijdens de ebfase.

Deze verschillen zijn ook terug te vinden in de resultaten voor de afzonderlijke vakken als samengebracht in Tabel A-7 en A-8.

komnr.	Netto transport tijdens eb-fase [10 ³ m ³ /jaar] en [%]								Opmerkingen
	vak 1		vak 2		vak 3		vak 4		
0	+494	100	+63	100	+115	100	+39	100	
1	+252	51	+38	60	+53	46	+26	67	
2	+94	19	+18	29	+21	18	+13	33	

Tabel A-7 *Overzicht resultaten per vak voor eb-fase.*

komnr.	Netto transport tijdens vloed-fase [10 ³ m ³ /jaar] en [%]								Opmerkingen
	vak 1		vak 2		vak 3		vak 4		
0	-320	100	-81	100	-129	100	-51	100	
1	-296	93	-67	83	-135	105	-38	75	
2	-166	52	-40	49	-84	65	-26	51	

Tabel A-8 *Overzicht resultaten per vak voor vloed-fase.*

Voor vak 2 en 4 is dit verschil in afname zodanig dat er netto weinig wijzigt (zie ook Tabel A-5).

De resultaten voor de verschillende vakken zijn samengebracht in Figuur A-4 en A-5, waarin de relatieve grootte van het netto transport voor de verschillende raavakken is gegeven bij gebruikmaking van lineaire en logaritmische assen.

De afname van het inwaarts gerichte vloedtransport blijkt globaal evenredig met de grootte van

het vloedvolume.

Nader beschouwen van de tijdsontwikkeling van waterstanden, snelheden en debieten (als gegeven in Figuur A-6 t/m A-9), laat zien dat bij een (in principe) ongewijzigd verloop van de buitenwaterstand het verloop van snelheden en debieten niet beïnvloed wordt door de grootte van de kom. In het eerste deel van de vloedfase zijn de momentane snelheden en debieten (en dus ook de transporten) voor een situatie met een kleinere kom dan ook vergelijkbaar met die van de uitgangssituatie. De periode waarover er sprake is van een vergelijkbaar verloop is echter afhankelijk van de grootte van de kom; een kleiner oppervlak leidt tot een kleiner vloedvolume en dus een kortere effectieve vloedduur. De grootte van het momentane transport blijft gedurende het eerste deel van de vloedfase nagenoeg ongewijzigd, terwijl in het tweede deel er sprake is van een aanzienlijke transportreductie. Als goede benadering kan het netto vloedtransport dan ook worden bepaald uit het produkt van het momentane transport en de effectieve vloedduur. Omdat de effectieve tijdsduur nagenoeg recht evenredig is met de komgrootte (continuïteit) zal ook het netto vloedtransport een dergelijk verband laten zien.

Het leegstromen van de kom (de ebfase) wordt primair gestuurd door het waterstandsverschil tussen binnen- en buitengebied. Een vergelijkbare afstroming leidt al snel tot een afnemende binnenwaterstand en dus tot een afname van de grootte van het sturende waterstandsverschil. Als gevolg hiervan zijn bij kleinere komgrootten de snelheden en debieten over de gehele ebfase lager. De wijziging in het netto transport is voor wat betreft het uitgaande ebtransport dus veel meer het gevolg van een wijziging in de grootte van de snelheden en debieten, dan een afname in de tijdsduur (dit in tegenstelling tot de situatie bij de instroming). Daar het transport niet-lineair afhankelijk is van de snelheid (machtsfunctie met macht groter dan de eenheid) zal het netto transport meer dan evenredig afnemen bij een reductie van het komoppervlak.

Voor een (normale) snelheidsmacht van 2 à 3 volgt dan een afname van het gemiddeld transport met 0,42 à 0,56 en 0,17 à 0,30 voor respectievelijk kom 1 en kom 2. Als blijkt uit Figuur A-5, waarin de transportreductie is gegeven op een log-logschaal, sluit deze machts-relatie goed aan bij de berekeningsresultaten.

Een (eerste versie van een) soort van conceptueel model voor de verrekening van de effecten van een wijziging van het komoppervlak op de grootte van het netto transport door een zeeget is gegeven in Figuur A-10.

Daar het resulterende transport (S_r) wordt bepaald door het verschil tussen het eb- en vloedtransport ($S_e - S_v$) hangt de absolute grootte van de wijziging in het netto transport (ΔS_r) sterk af van het onderlinge verschil tussen de reductiefactoren. Als R_e en R_v respectievelijk de reductiefactoren voor het eb- en vloed transport voorstellen dan geldt immers in de uitgangssituatie:

$$S_r = S_e - S_v \quad (A-3.1)$$

en voor een afwijkende configuratie:

$$S_r = R_e S_e - R_v S_v \quad (A-3.2)$$

A-4 Relatief effect golfaanval

De hydraulische condities welke gebruikt zijn voor de B-serie zijn samengebracht in Tabel A-9.

Code	Invalsrichting [° t.o.v. N]	Golfeconditie		Bijdrage		Opmerkingen
		H _s [m]	T _p [s]	[%]		
0	-	-	-	39,40	39,40	alleen getij (j = 0)
A1	225	0,89	6,1	6,32		getij + golven uit zuid-west (j = 1)
2		1,86	7,1	2,62		
3		2,90	8,2	0,76	9,70	
B1	255	1,17	6,4	12,57		getij + golven uit west-zuid-west (j = 2)
2		2,32	7,7	3,04		
3		3,49	8,6	0,79	16,40	
C1	285	1,42	6,8	10,38		getij + golven uit west-noord-west (j = 3)
2		2,81	8,2	1,79		
3		4,06	9,6	0,92	13,09	
D1	315	1,44	6,7	6,33		getij + golven uit noord-west (j = 4)
2		2,79	8,1	1,11		
3		4,05	9,6	0,36	7,80	
E1	345	1,16	6,4	10,50		getij + golven uit noord-noord-west (j = 5)
2		2,31	7,7	2,38		
3		3,60	9,0	0,73	13,61	
totaal				100,00	100,00	

Tabel A-9 Overzicht hydraulische condities (B-serie).

Gedurende 60,4 % van de tijd is er sprake van golven, voornamelijk uit westelijke richtingen. Uit de veelheid aan getalswaarden per individuele berekening zijn de gemiddelde transportgrootte per getijfase en vak bepaald. Deze resultaten zijn samengebracht in Tabel A-10, alsmede in Figuur A-11.

Beschouwing van het netto transport als gegeven in de bovenste figuur laat zien dat golfaanval leidt tot een afname van het zeewaarts gerichte transport dan wel een toename van het landwaarts gerichte transport.

Ofschoon er zowel tijdens de eb- als de vloedfase sprake is van een vergroting van het transport zijn er toch opmerkelijke verschillen aanwezig. Voor de ebfase is de vergroting van het transport het sterkst bij golfaanval uit zuid-westelijke richtingen. Voor de andere sectoren maakt het niet veel uit. Blijkbaar werkt de aanwezigheid van golfaanval primair door in een enigszins vergrote opwoeling van sediment. Dit is waarschijnlijk de oorzaak van de geringe toename van het eb-transport tussen zeg golven van 0 en 2 m. Een verdere toename van het effect van deze opwoeling voor grotere golfhoogten is afwezig, dit vermoedelijk vanwege het feit dat de hogere golven al op de buitendelta breken. Het dieptegelimiteerd zijn van de golven in het zeegat maakt dat de afhankelijkheid van de golfhoogte bij zwaardere golfaanval afwezig is.

Code	Grootte transport(bijdrage) [m³/s]ⁿ										
	Vak 1		Vak 2		Vak 3		Vak 4		Vak 1/4		totaal
	eb	vloed	eb	vloed	eb	vloed	eb	vloed	eb	vloed	
0	0,0175	-0,0060	0,0015	-0,0007	0,0058	-0,0030	0,0011	-0,0001	0,0259	-0,0098	+0,0161
A1	0,0167	-0,0071	0,0022	-0,0020	0,0055	-0,0034	0,0028	-0,0024	0,0273	-0,0149	+0,0123
2	0,0204	-0,0142	0,0046	-0,0057	0,0062	-0,0051	0,0043	-0,0052	0,0355	-0,0303	+0,0053
3	0,0238	-0,0218	0,0056	-0,0080	0,0073	-0,0084	0,0053	-0,0077	0,0420	-0,0459	-0,0039
B1	0,0182	-0,0107	0,0038	-0,0055	0,0057	-0,0042	0,0026	-0,0042	0,0303	-0,0246	+0,0057
2	0,0217	-0,0202	0,0046	-0,0082	0,0056	-0,0059	0,0026	-0,0056	0,0345	-0,0400	-0,0055
3	0,0230	-0,0263	0,0048	-0,0104	0,0053	-0,0079	0,0026	-0,0071	0,0357	-0,0517	-0,0160
C1	0,0220	-0,0171	0,0046	-0,0071	0,0049	-0,0040	0,0018	-0,0040	0,0333	-0,0322	+0,0010
2	0,0249	-0,0276	0,0046	-0,0095	0,0039	-0,0054	0,0015	-0,0049	0,0349	-0,0474	-0,0125
3	0,0226	-0,0299	0,0039	-0,0102	0,0028	-0,0065	0,0010	-0,0050	0,0303	-0,0517	-0,0213
D1	0,0177	-0,0134	0,0023	-0,0037	0,0042	-0,0034	0,0020	-0,0030	0,0262	-0,0235	+0,0028
2	0,0174	-0,0177	0,0021	-0,0041	0,0033	-0,0042	0,0018	-0,0032	0,0246	-0,0293	-0,0047
3	0,0168	-0,0221	0,0020	-0,0052	0,0027	-0,0057	0,0016	-0,0040	0,0232	-0,0370	-0,0138
E1	0,0177	-0,0070	0,0018	-0,0013	0,0046	-0,0033	0,0016	-0,0008	0,0257	-0,0124	+0,0133
2	0,0166	-0,0079	0,0019	-0,0016	0,0041	-0,0038	0,0017	-0,0013	0,0242	-0,0146	+0,0096
3	0,0184	-0,0132	0,0022	-0,0029	0,0040	-0,0059	0,0019	-0,0019	0,0264	-0,0239	+0,0025

*) Gemiddeld per getijfase, zonder wegingsfactoren en getijfactoren.

Tabel A-10 Totaaloverzicht berekende transportbijdragen.

Voor de vloedfase is de situatie compleet anders. Naast de hier ook aanwezige extra opwoeling wordt er nu ook een extra inwaartse stroming aangedreven (i.p.v. golfopzet als bij een gesloten kust nu instroming door het zeegat).

Bovendien is er nauwelijks (of hoogstens bij een grotere golfhoogte) sprake van een dieptegelimiteerd zijn van de golven.

De verschillen tussen de eb- en vloedfase zijn schematisch weergegeven in Figuur A-12.

A-5 Effect wijziging zwaarte golfaanval

Het effect van een wijziging in de zwaarte van het golfklimaat op het transport door het zeegat is onderzocht door dit transport te berekenen voor een golfklimaat met een afwijkende karakteristieke golfhoogte. Hierbij is uitgegaan van de basisinformatie aangaande de individuele golven en de daarmee samenhangende transport als gegeven in Tabel A-9 en A-10. Een afwijkend golfklimaat werd hierbij verkregen door aanpassing van het percentage van voorkomen van de individuele golfbijdragen, zeg p_{ij}^* i.p.v. p_{ij} , en met de nieuwe percentages het netto transport te bepalen.

Als referentie waarde voor een dergelijke benadering is de grootte van de energie-gerelateerde dominante golfhoogte H_{dom} gebruikt. Voor een situatie met $j=5$ golfrichtingen met elk $i=3$ golfhoogteklassen volgt deze (bij een weging op basis van inkomende golfenergie) uit:

$$\sum_{j=1}^5 (\sum_{i=1}^3 (p_{ij} T_{ij})) H_{dom}^2 = \sum_{j=1}^5 (\sum_{i=1}^3 (p_{ij}^* T_{ij} H_{ij}^2)) \tag{A-5.1}$$

waarin voor T_{ij} en H_{ij} respectievelijk de T_p -waarde en de H_{sig} -waarde per conditie kunnen worden aangenomen.

Voor het basisklimaat als gegeven in Tabel A-9, met $\sum_{j=1}^5 \sum_{i=1}^3 p_{ij} = \sum p = 0,6060$, resulteert deze uitdrukking in $H_{dom} = 1,81$ m.

Een meer (of minder) extreem golfklimaat, met $H_{dom} = H_{dom}^*$, kan daarbij worden verkregen door het percentage van voorkomen van de verschillende golfcondities per golfrichting zodanig aan te passen dat er na weging sprake is van de gewenste toe- of afname van de dominante golfhoogte. Er moet dan gelden:

$$\sum_{j=1}^5 (\sum_{i=1}^3 p_{ij}^* T_{ij}) (H_{dom}^*)^2 = \sum_{j=1}^5 (\sum_{i=1}^3 p_{ij}^* T_{ij} H_{ij}^2) \tag{A-5.2a}$$

ofwel:

$$(H_{dom}^*)^2 = \frac{\sum_{j=1}^5 \left(\sum_{i=1}^3 (p_{ij}^* T_{ij} H_{ij}^2) \right)}{\sum_{j=1}^5 \left(\sum_{i=1}^3 (p_{ij}^* T_{ij}) \right)} \quad (A-5.2b)$$

De met een *-teken aangegeven symbolen hebben hierin betrekking op gewijzigde waarden. Als per golfrichting (A t/m E) het totale percentage van voorkomen ongewijzigd wordt gelaten, dan kan voor een kleine toename van het percentage van voorkomen voor golfklasse $i=3$ (en derhalve een even grote afname voor klasse $i=1$) met Δp_j voor $j=1, \dots, 5$ kan deze uitdrukking nader worden uitgewerkt. Nadere uitwerking van de term in de teller resulteert in:

$$\begin{aligned} \sum_{i=1}^3 (p_{ij}^* T_{ij} H_{ij}^2) &= (p_{1j} - \Delta p_j) T_{1j} H_{1j}^2 + p_{2j} T_{2j} H_{2j}^2 + (p_{3j} + \Delta p_j) T_{3j} H_{3j}^2 \\ &= \sum_{i=1}^3 (p_{ij} T_{ij} H_{ij}^2) + \Delta p_j (T_{3j} H_{3j}^2 - T_{1j} H_{1j}^2) \end{aligned} \quad (A-5.3)$$

Een analoge uitwerking voor de term in de noemer van Vgl.(A-5.2b) levert:

$$\sum_{i=1}^3 (p_{ij}^* T_{ij}) = \sum_{i=1}^3 (p_{ij} T_{ij}) + \Delta p_j (T_{3j} - T_{1j}) \quad (A-5.4)$$

zodat na substitutie volgt:

$$(H_{dom} + \Delta H_{dom})^2 = \frac{\sum_{j=1}^5 \left(\sum_{i=1}^3 (p_{ij} T_{ij} H_{ij}^2) \right) + \sum_{j=1}^5 (\Delta p_j (T_{3j} H_{3j}^2 - T_{1j} H_{1j}^2))}{\sum_{j=1}^5 \left(\sum_{i=1}^3 (p_{ij} T_{ij}) \right) + \sum_{j=1}^5 (\Delta p_j (T_{3j} - T_{1j}))} \quad (A-5.5)$$

Zowel de absolute grootte als de onderlinge verhouding van de Δp_j -waarden voor $j=1, \dots, 5$ zijn bepalend voor de wijziging in de dominante golfhoogte ΔH_{dom} . Door nu de grootte van Δp_j uit te drukken als het produkt van een richtingsgebonden constante α_j en niet-richtingsgebonden constante k volgens:

$$\Delta p_j = \alpha_j k \quad (A-5.6)$$

zijn de effecten van de onderlinge verhouding en de absolute grootte van de Δp_j -waarden ontkoppeld. Door vervolgens per richting de α_j -waarde te bepalen welke voor de situatie met $k = 1$ nodig is om een relatieve toename van de dominante golfhoogte (voor iedere richting) van $(\Delta H/H)_{dom} = 0,10$ te verkrijgen. De α -waarde per golfrichting is dus te zien als een soort van gevoeligheidscoëfficiënt. De grootte van α_j volgt dus uit:

$$(1,1 H_{dom})^2 = \frac{\sum_{i=1}^3 (p_{ij} T_{ij} H_{ij}^2) + \alpha_j (T_{3j} H_{3j}^2 - T_{1j} H_{1j}^2)}{\sum_{i=1}^3 (p_{ij} T_{ij}) + \alpha_j (T_{3j} - T_{1j})} \quad (A-5.7)$$

Voor gegeven α_j -waarden volgt de relatieve toename van de dominante golfhoogte uit:

$$(A-5.8)$$

welke nu nog slechts een functie is van de (vrij te kiezen) k -waarde, zodat:

$$\left(\frac{\Delta H}{H} \right)_{dom} = F\{k\} \text{ met } \left(\frac{\Delta H}{H} \right)_{dom} = 0 \text{ voor } k = 0 \quad (A-5.9)$$

Voor de bij een bepaalde relatieve wijziging van de golfhoogte behorende k -waarde is nu het gewijzigde percentage van de bijdrage van de verschillende hydraulische condities bekend.

$$p_{ij}^* = \begin{cases} p_{1j} - k \alpha_j & \{i = 1\} \\ p_{2j} & \{i = 2\} \\ p_{3j} + k \alpha_j & \{i = 3\} \end{cases} \quad (A-5.10)$$

De gewogen grootte van het transport op jaarbasis S volgt nu uit:

$$S = p_o s_o + \sum_{j=1}^5 \sum_{i=1}^3 p_{ij} s_{ij} \quad (A-5.11)$$

waarin p_o en s_o respectievelijk het percentage van voorkomen en de grootte van het transport voor alleen getij-omstandigheden voorstellen. Deze transport-sommatie is uitgevoerd voor de individuele vakbijdragen alsmede voor de verschillende getijfasen.

Door deze bewerking uit te voeren voor een reeks van (negatieve en positieve) k -waarden (en dus verschillende golfhoogten) kan het effect van een wijziging in de zwaarte van de golfaanval op de grootte van het transport door het zeegat in kaart worden gebracht.

De uiteindelijke resultaten voor zowel de eb- en vloedfase afzonderlijk als die voor het netto effect zijn weergegeven in Figuur A-13.

Beschouwing van de resultaten van de verschillende getijfasen, als gegeven in de onderste figuur, laat zien dat een verzwaring van het golfklimaat zowel een vergroting van het eb- als het vloedtransport tot gevolg heeft. Relatief gezien is er hierbij echter sprake van een groot verschil. Het zeewaartse eb-transport neemt slechts in zeer geringe mate toe van ca. $710 \cdot 10^3$ tot $713 \cdot 10^3$ m³/j, dus slechts 0,4%. Het naar binnen gerichte vloedtransport neemt daarentegen met 3,2% toe (van ca. $722 \cdot 10^3$ tot $745 \cdot 10^3$ m³/j). In vergelijking tot het effect op het ebtransport werkt een toename van de golfaanval werkt hier dus bijna 10 maal zo sterk door op het transport.

De overheersing van het effecten op de vloedtransporten komt ook tot uitdrukking in het netto effect (zie bovenste figuur). Een toename van 10% in de golfaanval resulteert derhalve in een afname van het transport door het zeegat (of een toename van het inwaartse gerichte transport) van orde 3% van het totale vloedtransport. Afhankelijk van de referentie-grootte van het aanwezige netto transport gaat er daarmee dus minder transport naar buiten, wisselt het teken van het transport of wordt het transport naar binnen versterkt.

Duidelijk is immers dat de balans tussen positieve en negatieve transporten nogal gevoelig ligt. Uitdrukken van het deze wijziging in de grootte van het netto transport is dan ook niet zinvol. Een uitspraak aangaande het netto effect bij het gebruik van numerieke modellen moet dan ook in het licht worden gezien van de grootte van de beide bepalende componenten.

De resultaten geven aan dat er bij de modellering uit zou moeten worden gegaan van de afzonderlijke grootten van de verschillende componenten.

De verhouding tussen de bijdragen van het getij alleen en de effecten van de golven zullen hierdoor echter niet wezenlijk veranderen.

Nadere informatie omtrent de herkomst van het extra inwaarts gerichte transport is er niet. De indruk bestaat echter dat dit voornamelijk afkomstig zal moeten zijn van de buitendelta zelf.

Deze zal waarschijnlijk eroderen en uiteindelijk een minder geprononceerde vorm aannemen. Ten behoeve van de berekeningen volgens het Cs-scenario (zie Hoofdstuk 7 in het hoofd rapport) wordt derhalve aanbevolen om de wijziging van het netto transport uit te drukken in de grootte van het vloedtransport (orde 3% van het vloedtransport voor een toename van 10% in dominante golfhoogte).

A-6 Effect wijziging richting golfaanval

Het effect van een wijziging in de gemiddelde richting van het golfveld is onderzocht door het netto transport door het zeegat te berekenen voor een vergelijkbaar klimaat met een 10° afwijkende dominante golfrichting. Hierbij is eveneens gebruik gemaakt van de basisinformatie als gegeven in Tabel A-9 en A-10.

Een aangepast golfklimaat werd verkregen door het percentage van voorkomen van elk van de vijf verschillende golfrichtingsbijdragen (A t/m E) zodanig aan te passen dat er na weging sprake is van de gewenste verdraaiing van de karakteristieke golfrichting.

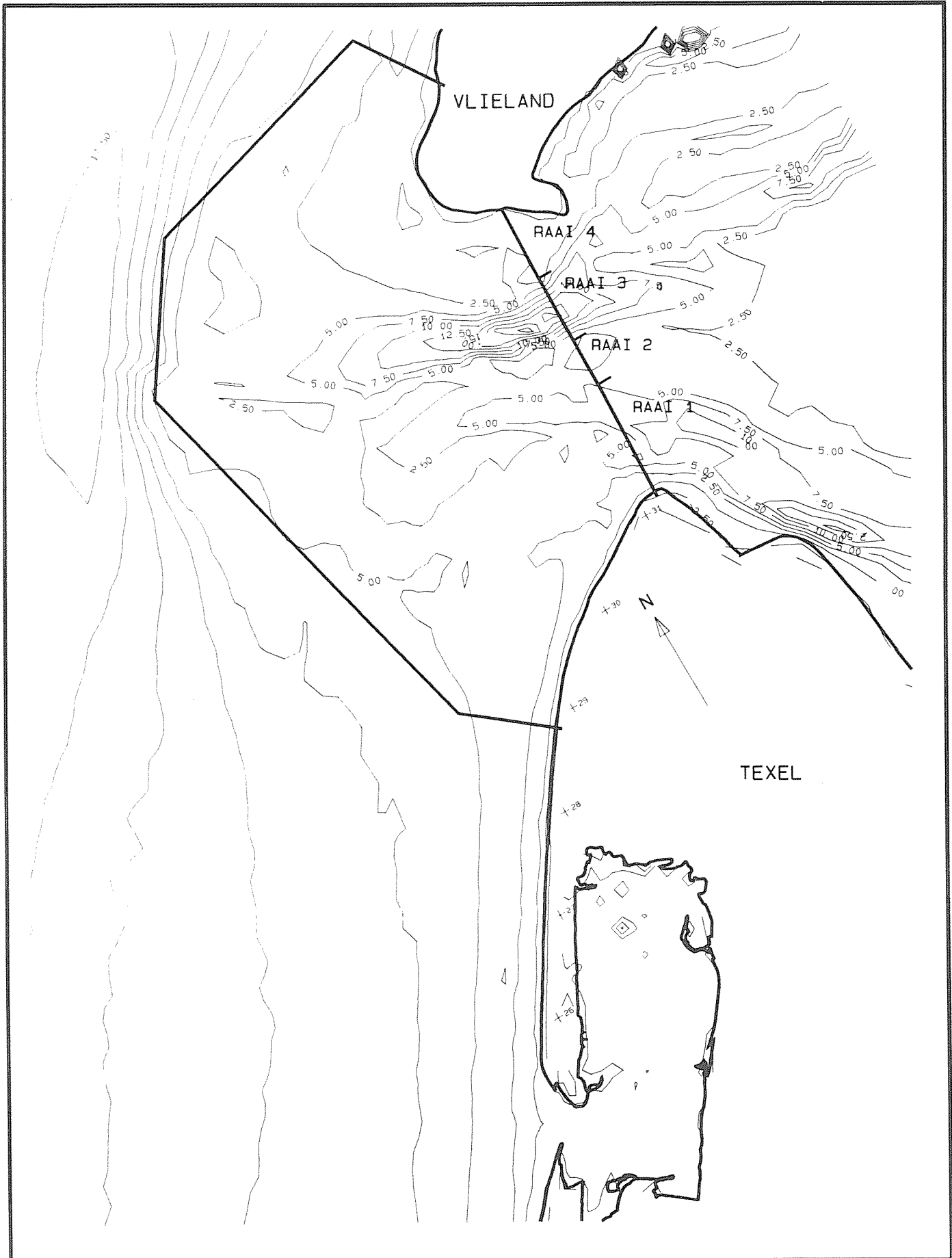
De onderlinge verdeling van de te onderscheiden bijdragen werd zodanig gemaakt dat de grootte van de dominante golfhoogte ongewijzigd bleef.

De resultaten als gegeven in Figuur A-15 laten zien dat een verdraaiing van de dominante golfrichting zowel effect heeft op de grootte van het eb- als het vloedtransport. Het feit dat het transport tijdens vloed en eb anders reageert maakt dat er sprake is van een significant netto effect. Zowel de grootte van het eb- als het vloedtransport nemen af bij een verdraaiing in noordelijke richting, iets wat gezien de oriëntatie van het betrokken zeegat plausibel lijkt. Omdat de afname van het vloedtransport relatief sterker is neemt het netto transport bij een verdraaiing in noordelijke richting iets toe. Door de toenemende afscherpende werking van de buitendelta zal het effect van de golfwerking verminderen en conform Sectie A.6.4 leiden tot een afname van het inwaartse transport dan wel een toename van het uitwaartse transport. Ten behoeve van de berekeningen volgens het Cs-scenario (zie Hoofdstuk 7 in hoofdrapport) wordt derhalve aanbevolen om overeenkomstig het effect van een golfhoogtevergroting, het effect uit te drukken in een percentage van het vloedtransport.

A-7 Conclusies aanvullende analyse

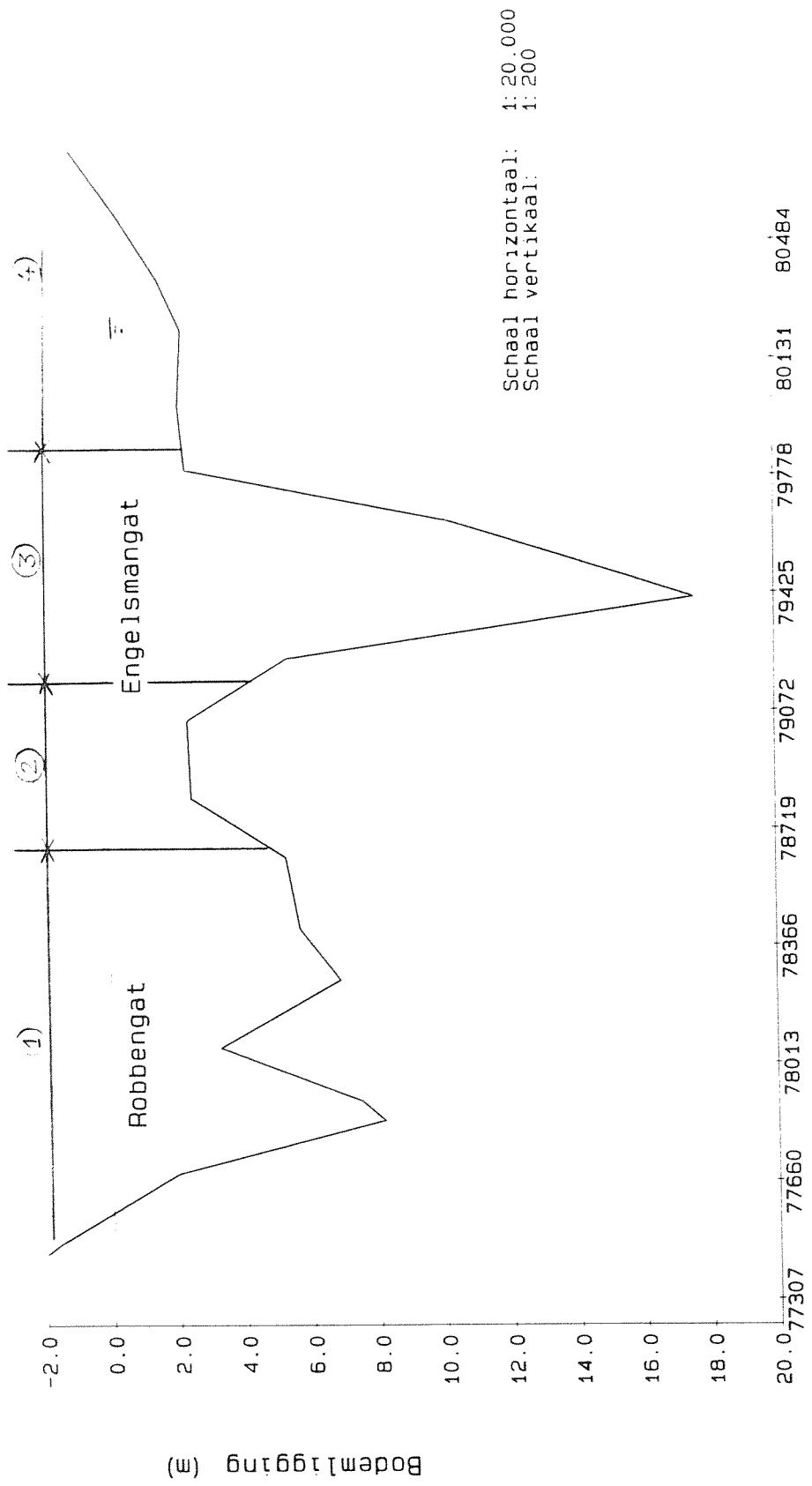
Ofschoon het hier natuurlijk slechts gaat om getalswaarden welke gebaseerd zijn op numerieke modellen lijken de waargenomen tendensen waardevol. Door bij de verdere modellering uit te gaan van aparte modules voor het vloed- en het ebtransport kunnen waargenomen effecten in het rekenmodel worden meegenomen.

Opgemerkt moet overigens worden dat de voorliggende resultaten voornamelijk zijn gebaseerd op de uitwerking van reeds uitgevoerde berekeningen, resultaten die anders niet boven water zouden zijn gekomen.



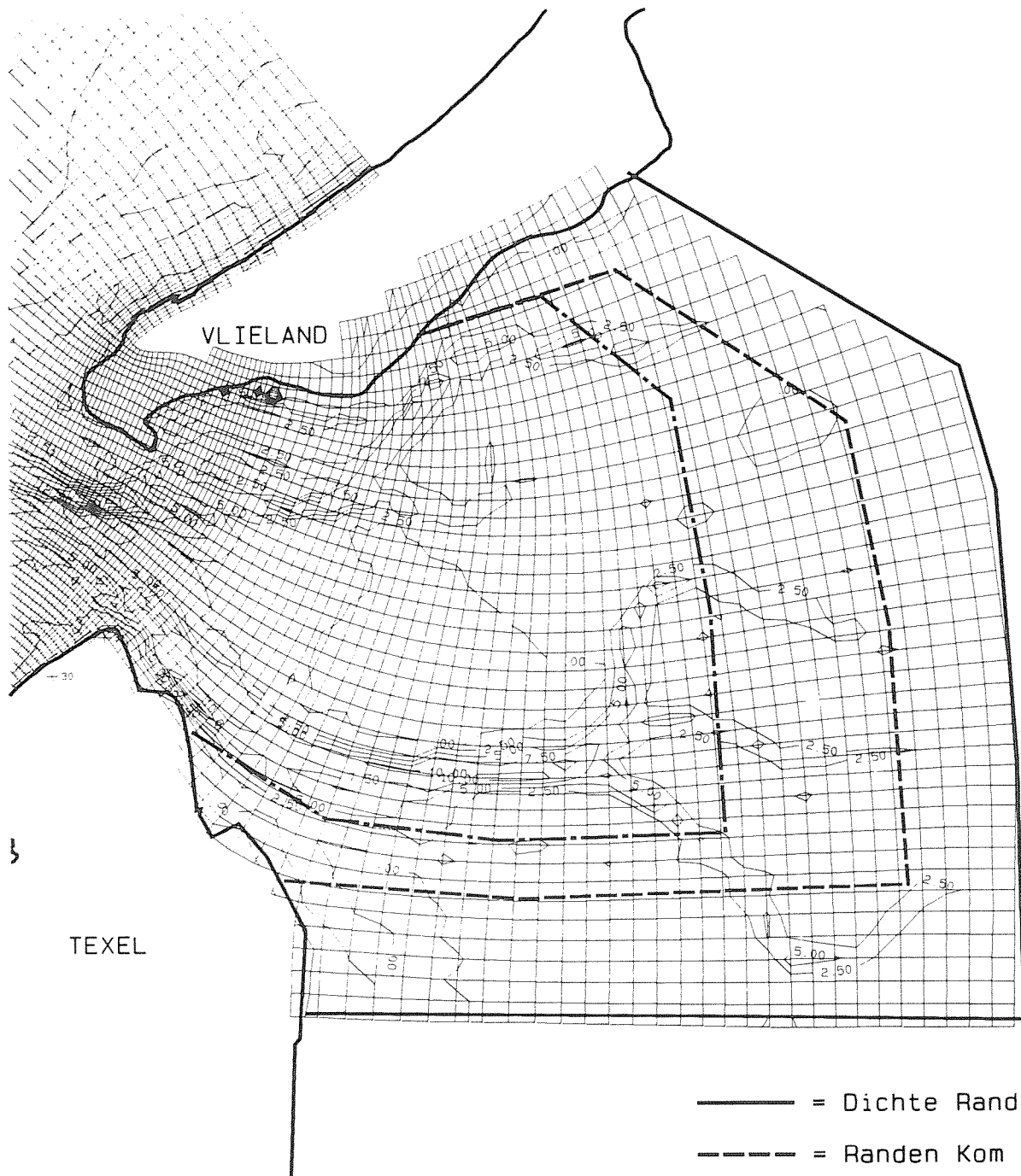
LIGGING RAAI- EN VAKBEGREZINGEN T.B.V. TRANSPORTBEREKENINGEN	DELTA	"EGvak"
	Eijerlandse Gat	
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM	H1887	FIG. A-1

sept. 1993



[Negen, 1993]

DWARSPROFIEL RAAI EIJERLANDSE GAT	DELTA	"EGraai"
	Eijerlandse Gat	
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM	H1887	FIG. A-2

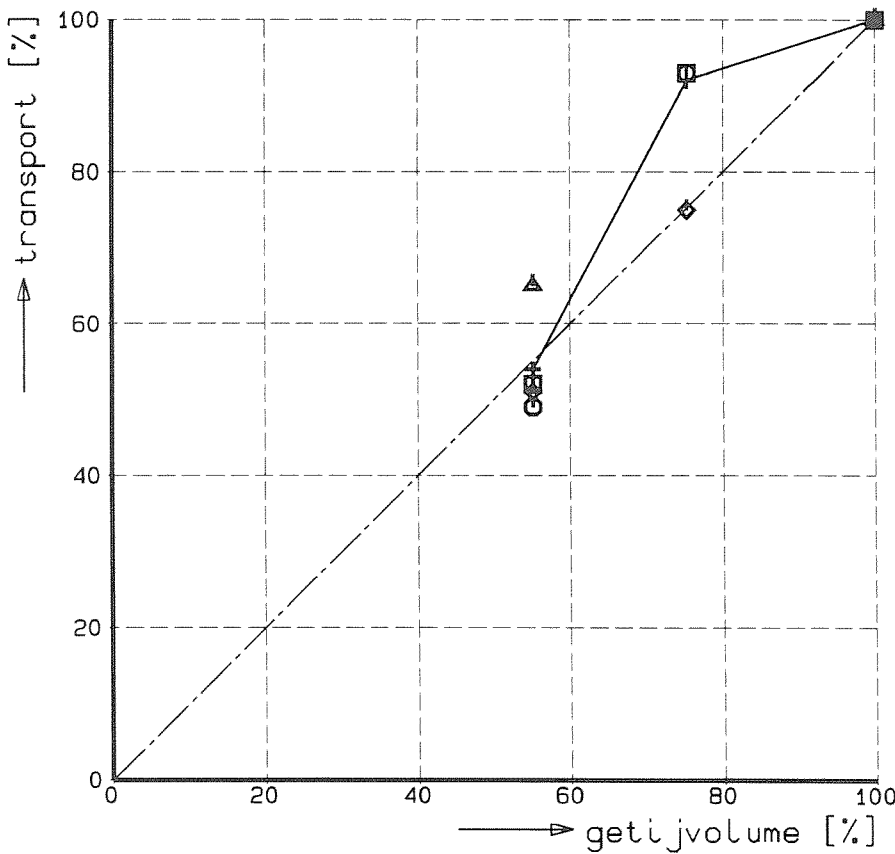
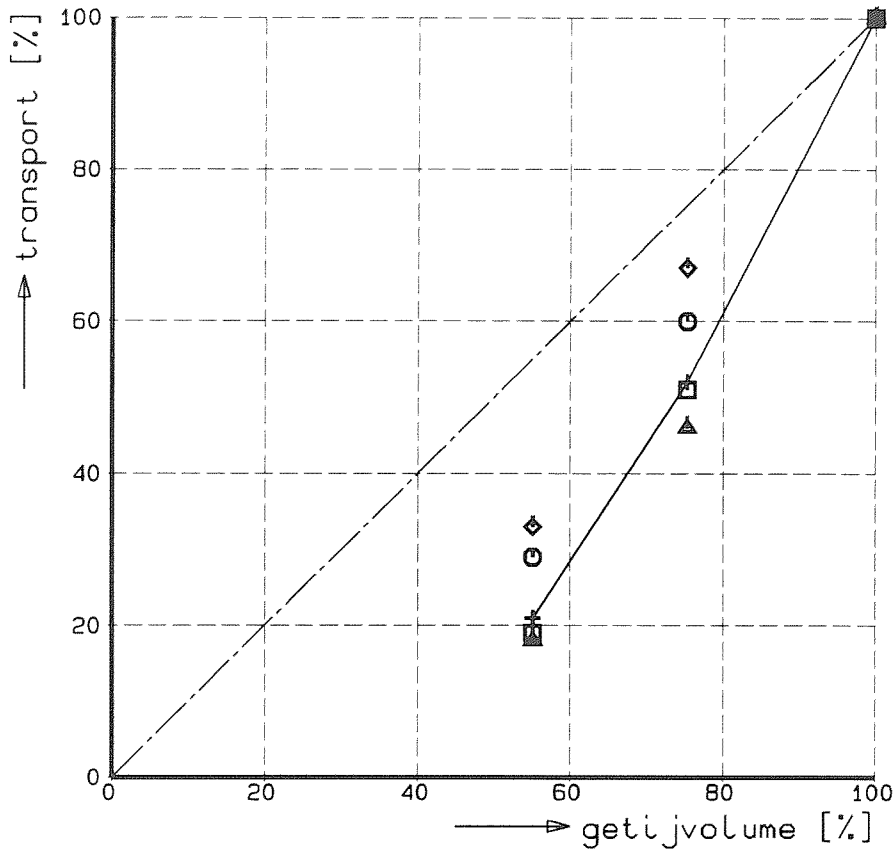


- = Dichte Randen
- = Randen Kom 1
- · - · - · = Randen Kom 2

sept. 1993

[Negen, 1993]

DETAIL COMOR-MODEL TEXEL-STUDIE OVERZICHT LIGGING BINNENRANDEN	DELTA	"EGkom"
	Ei jerlandse Gat	
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM	H1887	FIG. A-3

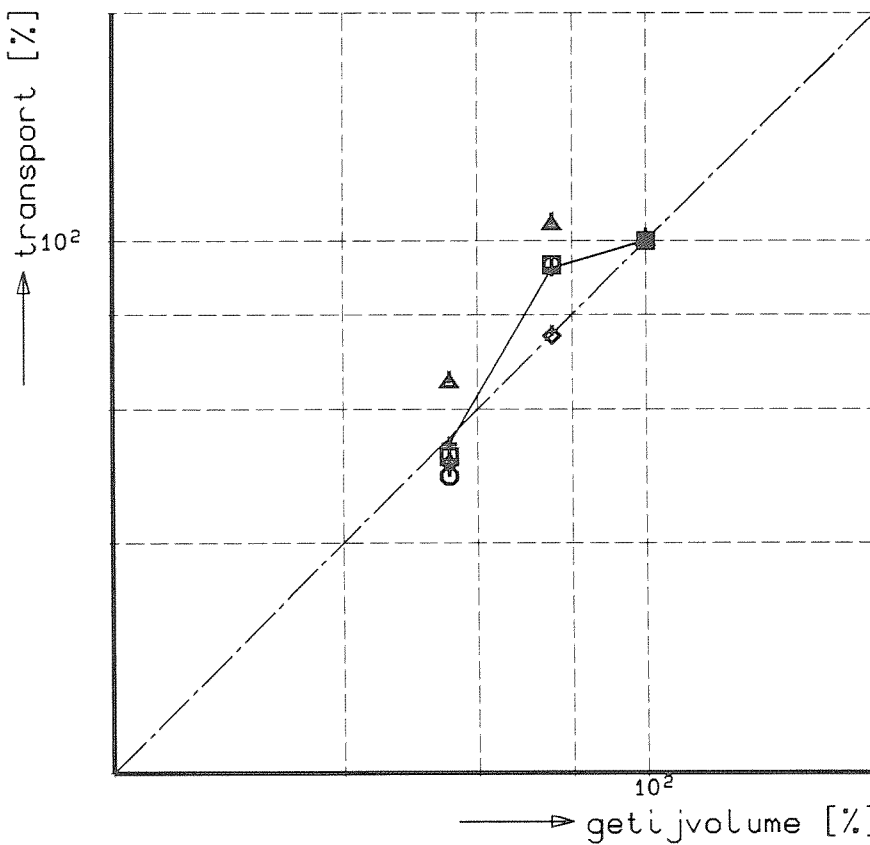
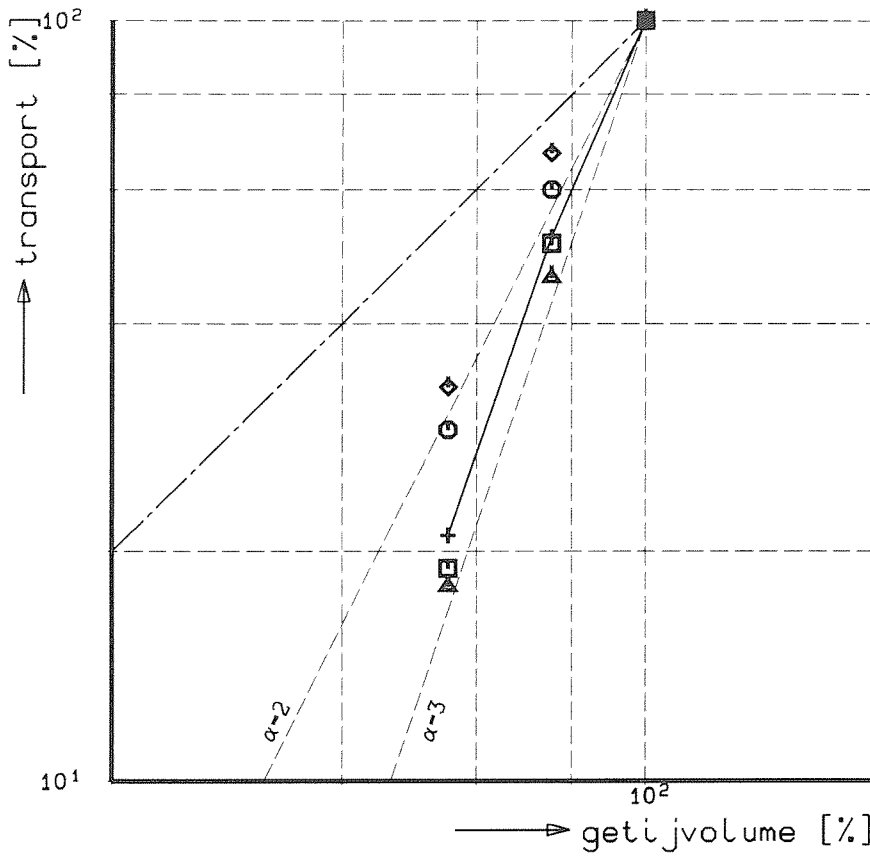


- ▣ vak 1 [vloedgeul]
- vak 2
- ▲ vak 3 [ebgeul]
- ◆ vak 4
- + vak 1/4 [totaal]

[Negen, 1993]

sept. 1993

RELATIEVE GROOTTE TRANSPORT VOOR VERSCHILLENDE KOMGROOTTEN	DELTA	"KOM"
	Eijerlandse gat	
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM	H1887	FIG. A-4



- ▣ vak 1 [vloedgeul]
- vak 2
- ▲ vak 3 [ebgeul]
- ◆ vak 4
- + vak 1/4 [totaal]

[Negen, 1993]

sept. 1993

RELATIEVE GROOTTE TRANSPORT
VOOR VERSCHILLENDE KOMGROOTTEN

DELTA

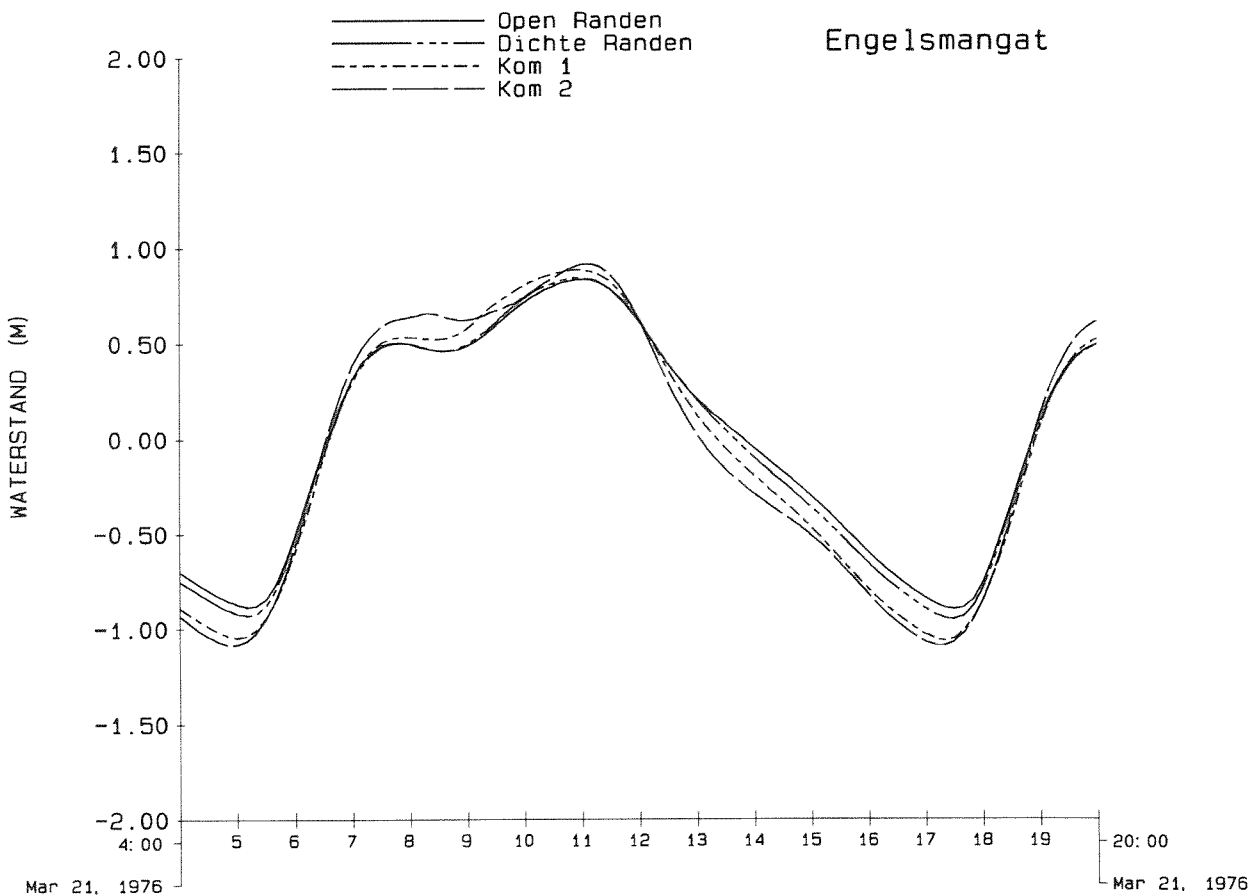
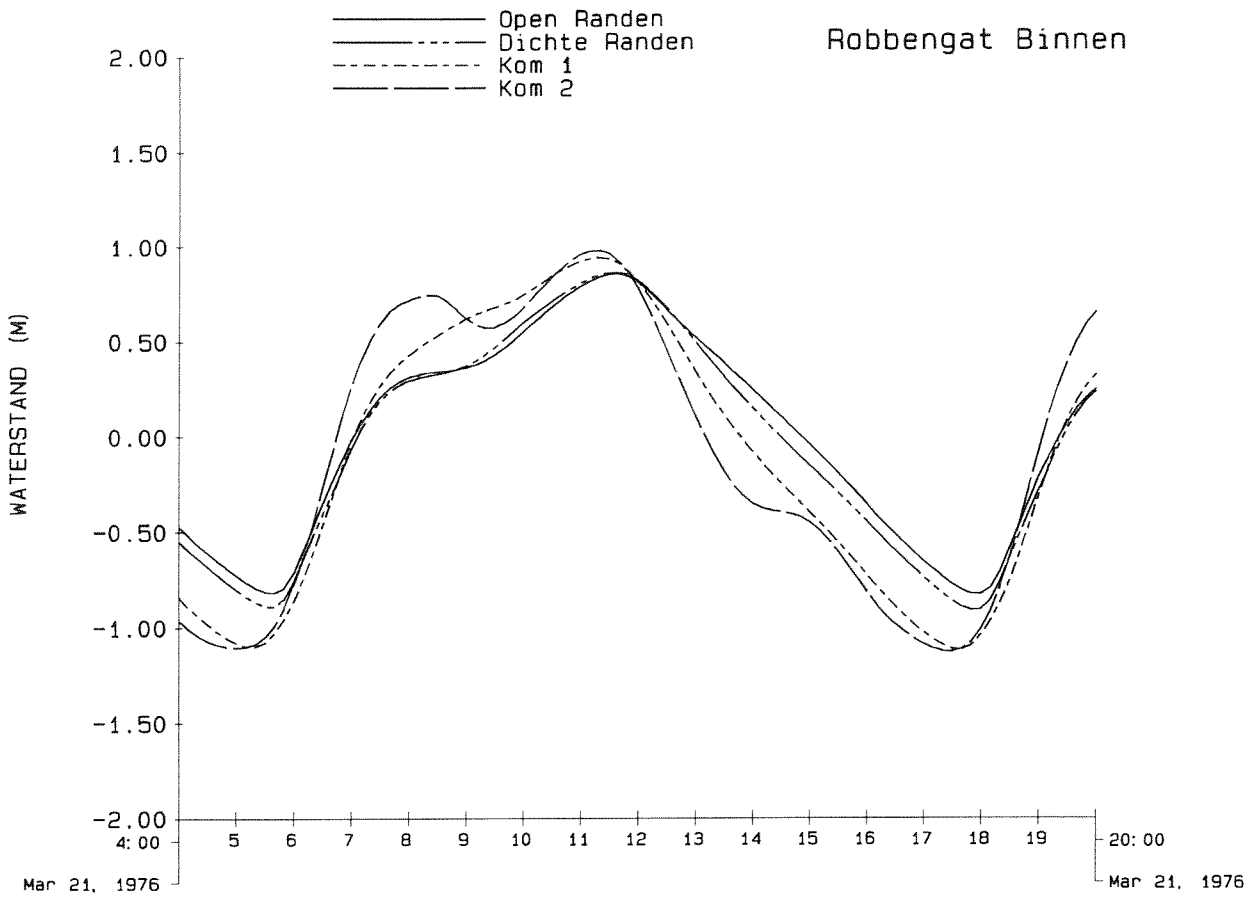
"KOMLOG"

Ei jerlandse gat

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

H1887

FIG. A-5



RESULTATEN STROOMMODEL
Waterstanden

DELTA

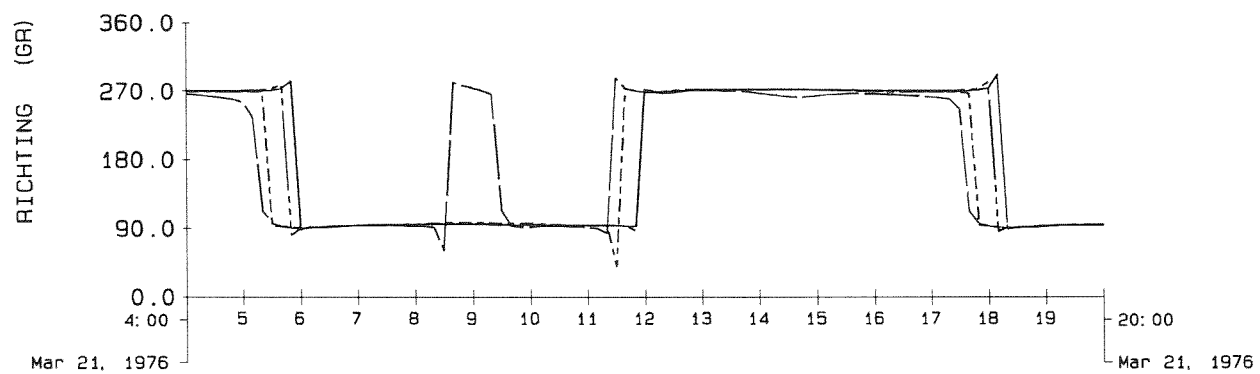
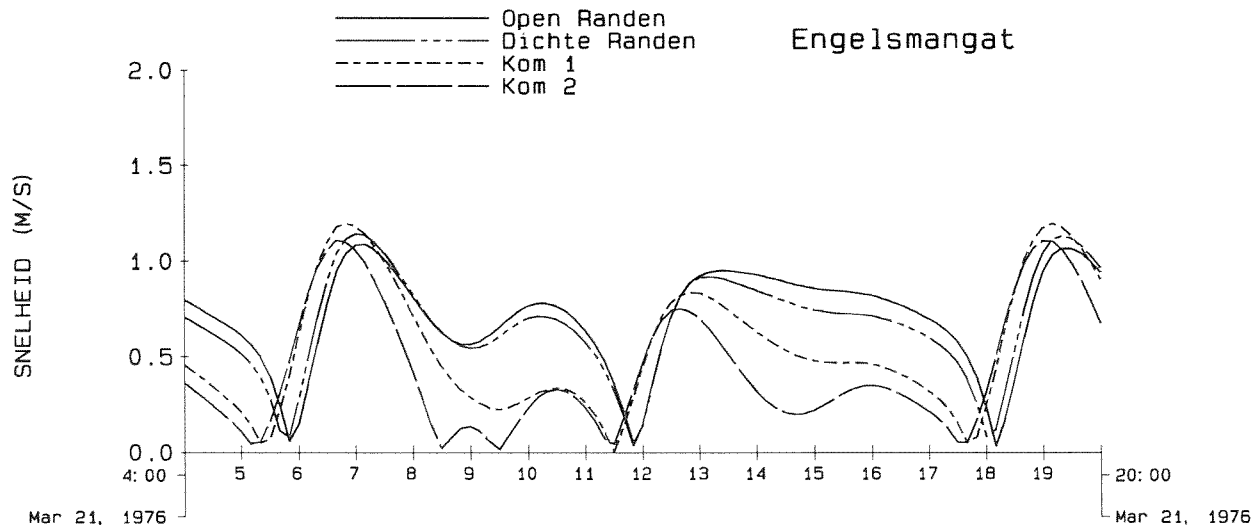
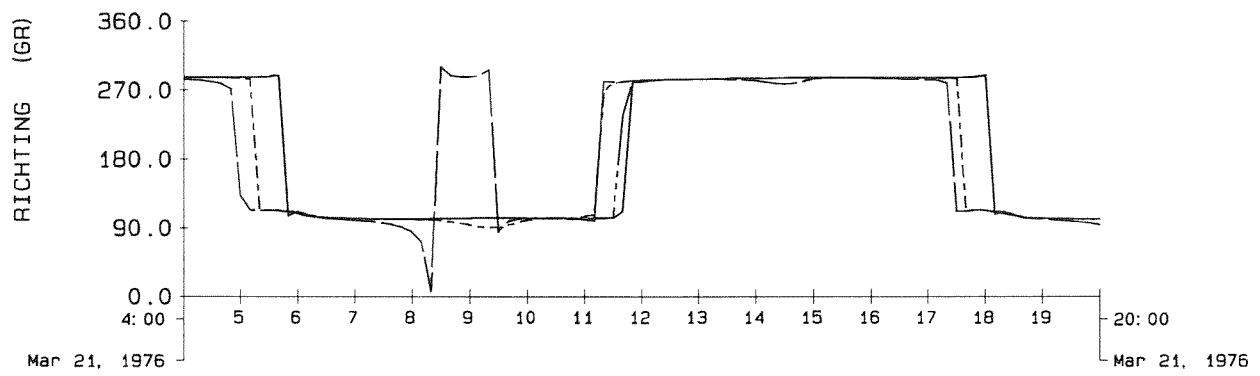
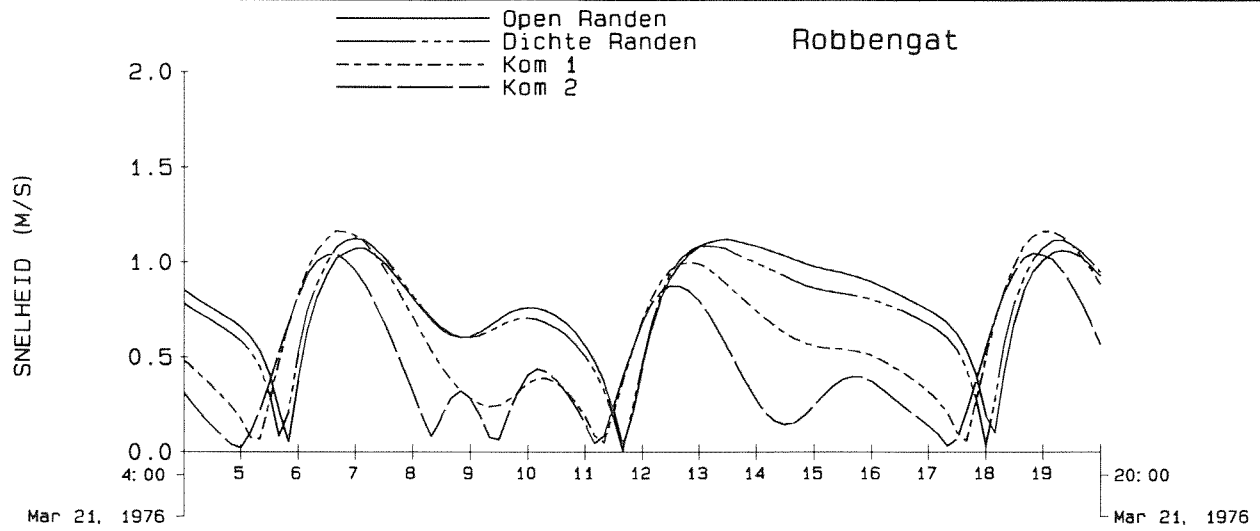
"EGwstd"

Ei jerlandse Gat

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

H1887

FIG. A-6



RESULTATEN STROOMMODEL
 Snelheden en richtingen

DELTA

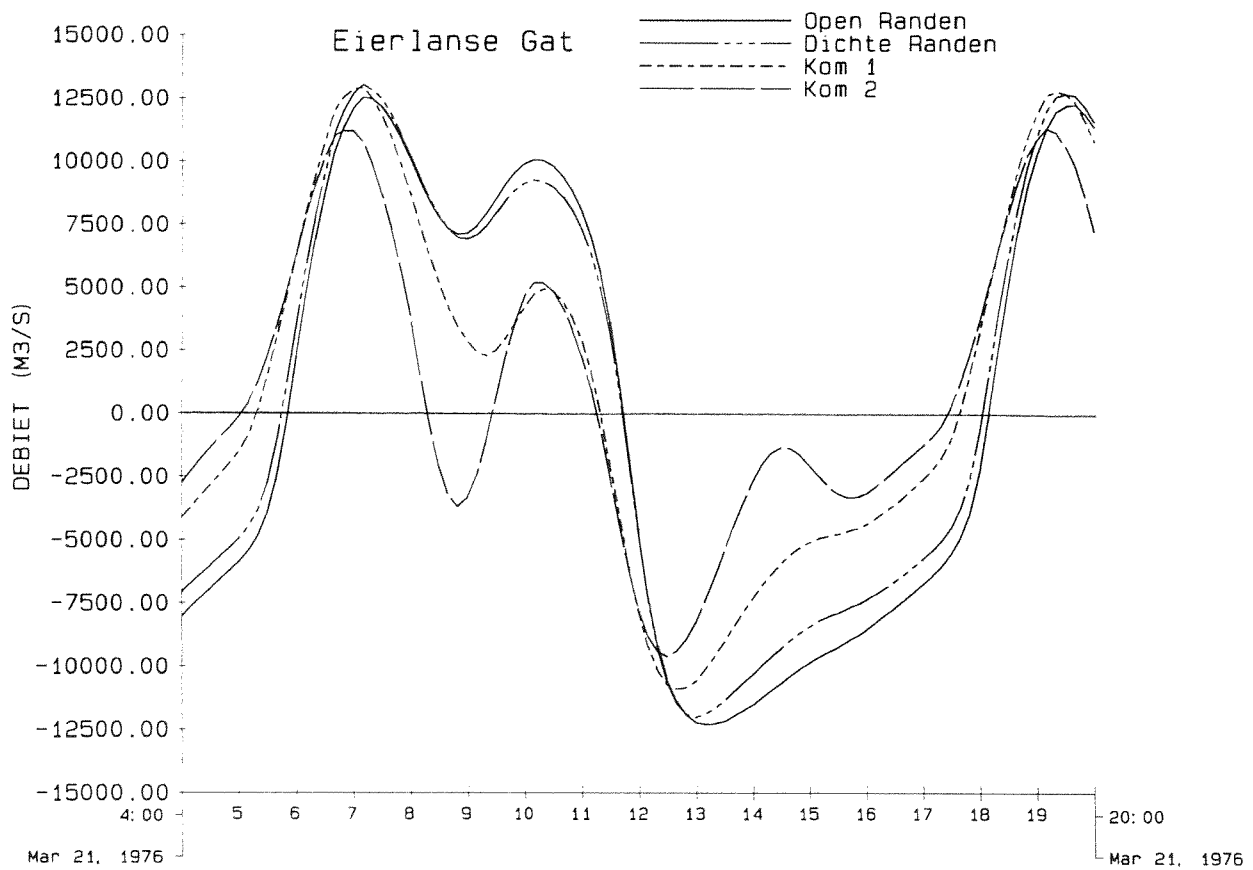
"EGsnelh"

Eijerlandse Gat

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

H1887

FIG. A-7



sept. 1993

[Negen, 1993]

RESULTATEN STROOMMODEL
 Debieten

DELTA

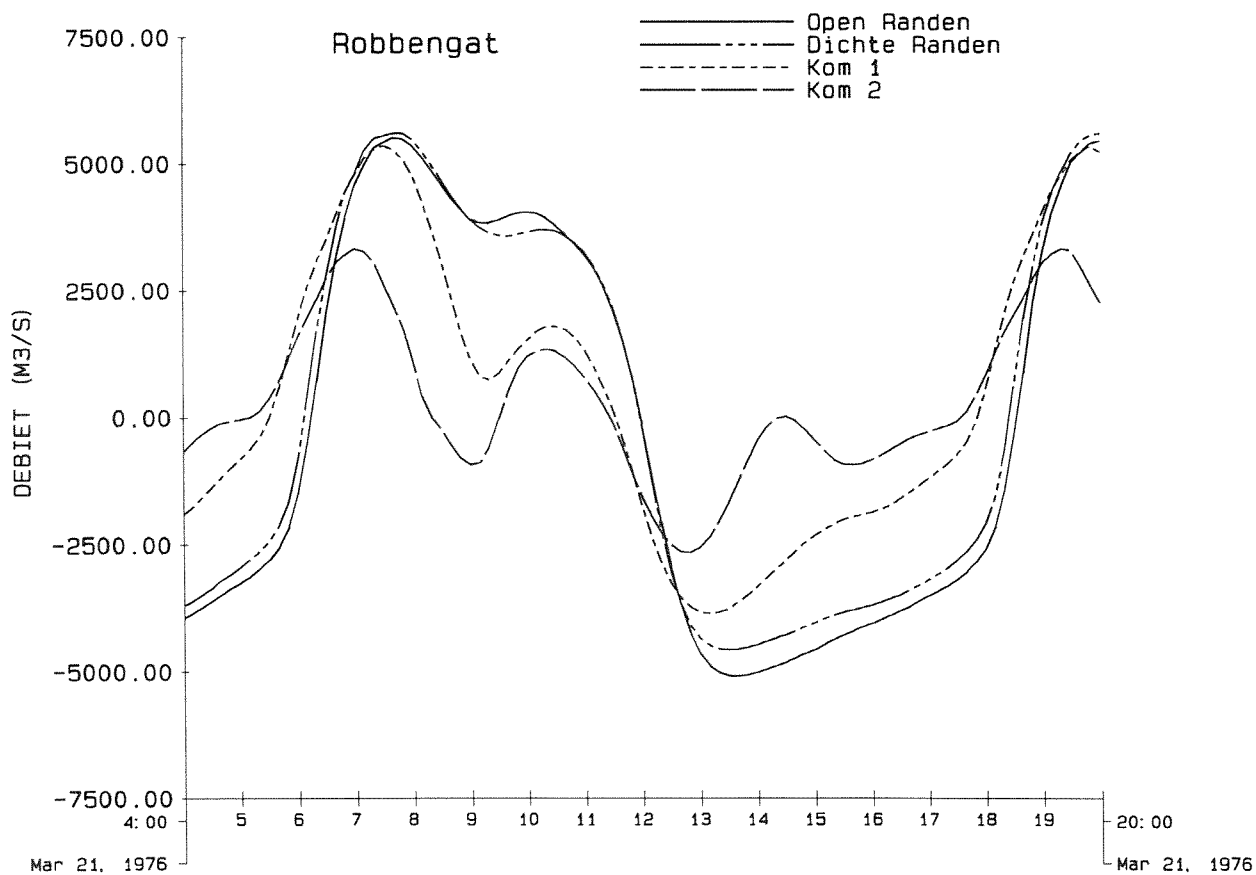
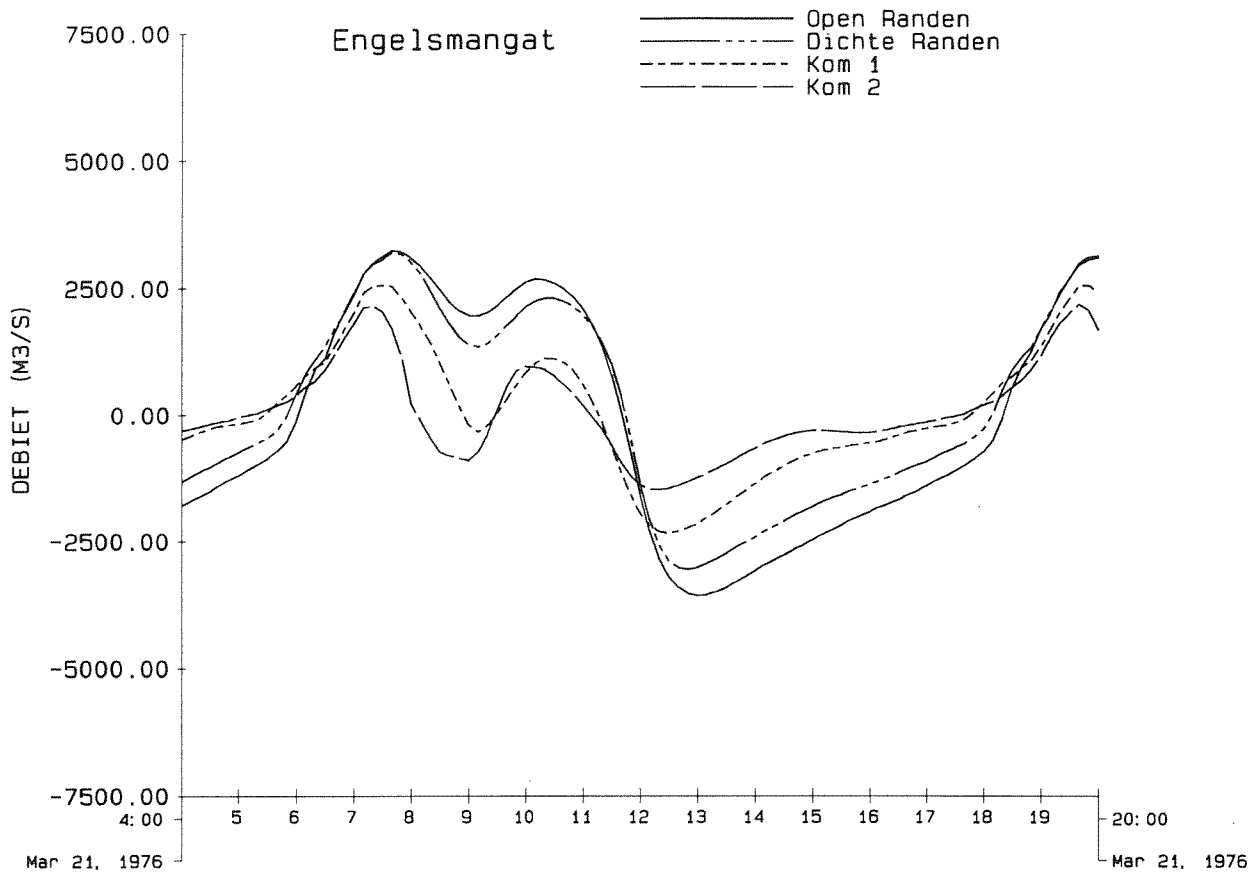
'EGdebitet'

Ei jerlandse Gat

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

H1887

FIG. A-8



RESULTATEN STROOMMODEL

Debiten

DELTA

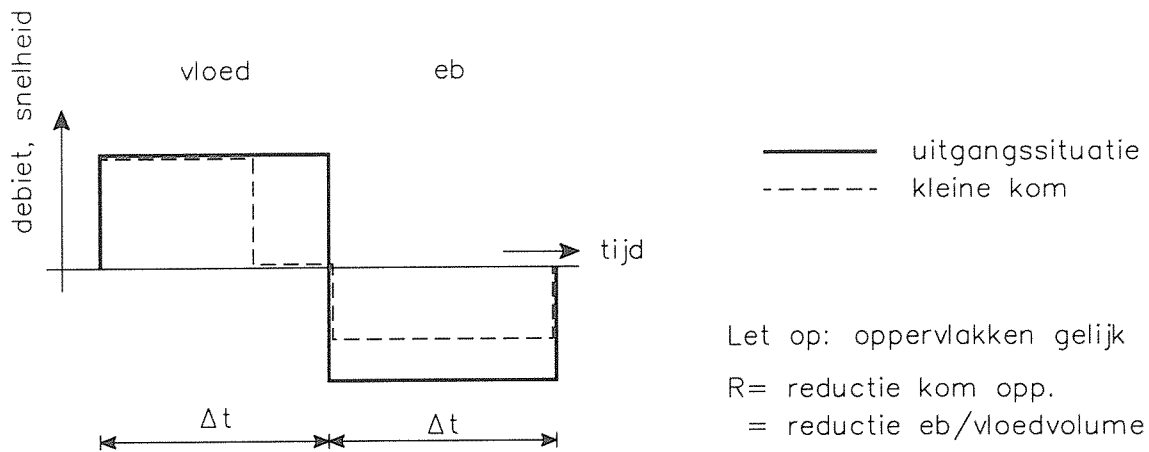
"EGdebit"

Eijerlandse Gat

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

H1887

FIG. A-9



$$S_{\text{netto}} = S_{\text{vloed}} + S_{\text{eb}} \Rightarrow S_{\text{netto}} + \Delta S_{\text{netto}} = S_{\text{vl}} + \Delta S_{\text{vl}} + S_{\text{eb}} + \Delta S_{\text{eb}}$$

↑
negatief

Algemeen:

$$S = B \int s(t) dt = B.M. \int_t (u(t))^\alpha dt$$

└───┬───┘
integraal

vloedfase

$$(u(t))^\alpha \cdot R \cdot \Delta t$$

$$R \cdot [u(t)^\alpha \cdot \Delta t]_0$$

ebfase

$$(R \cdot u(t))^\alpha \cdot \Delta t$$

$$R^\alpha \cdot [u(t)^\alpha \cdot \Delta t]_0$$

Dus: $S_{\text{vl}} + \Delta S_{\text{vl}} = R \cdot S_{\text{vl}}$

$S_{\text{eb}} + \Delta S_{\text{eb}} = R^\alpha \cdot S_{\text{eb}}$

CONCEPTUEEL MODEL NETTO TRANSPORT

DELTA

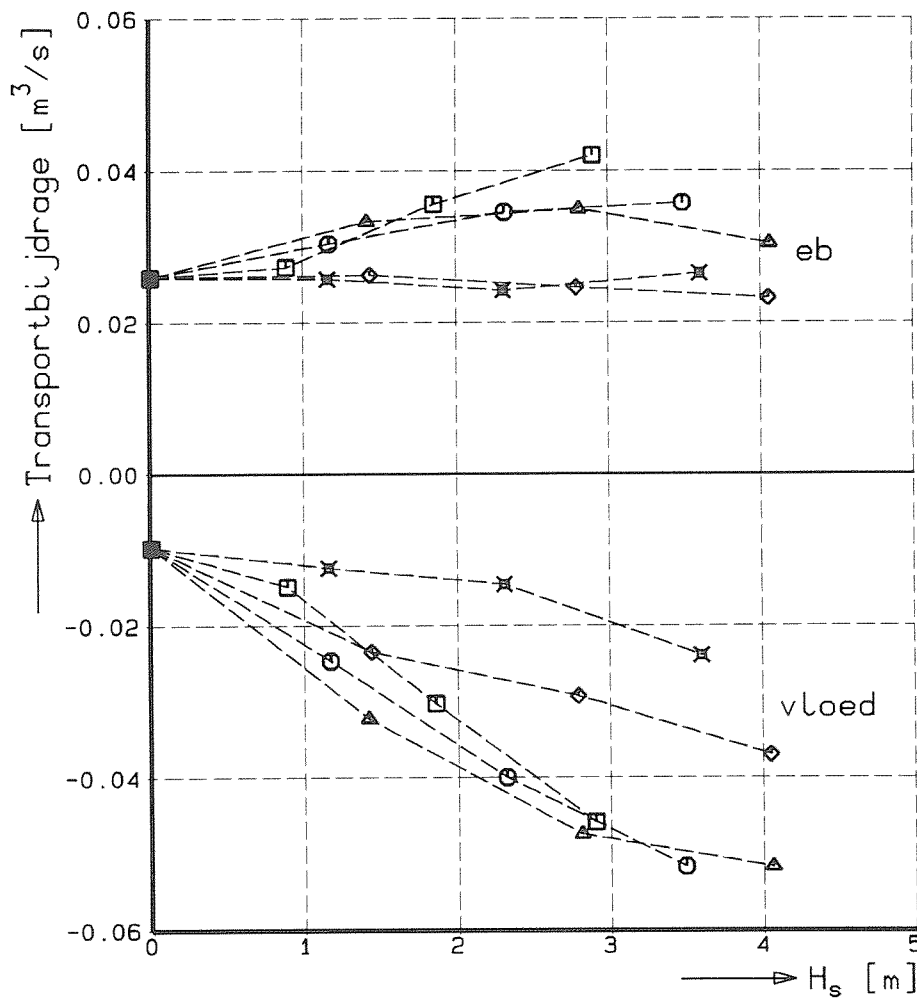
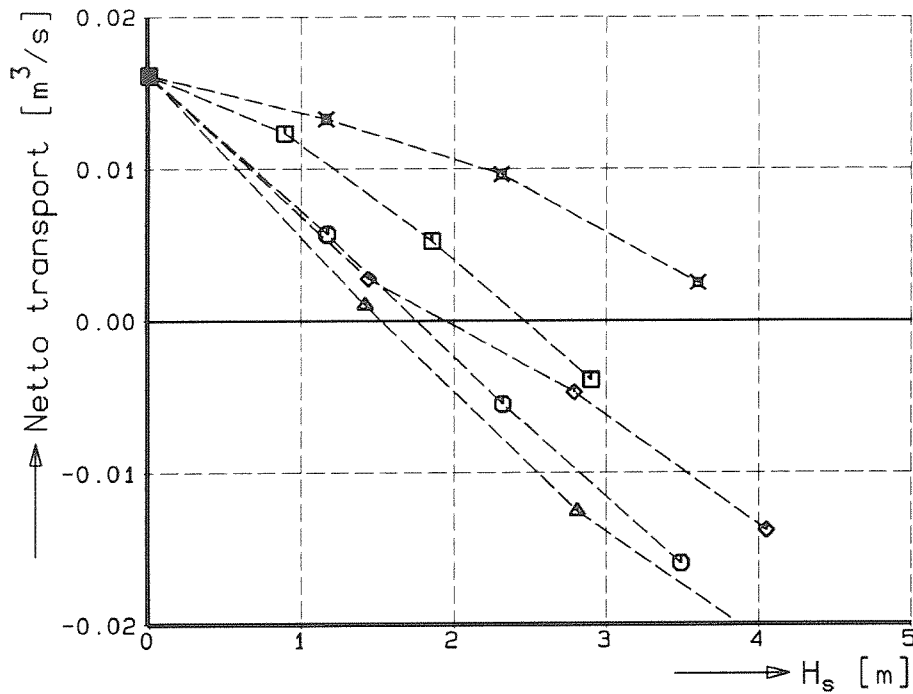
"Tkkmr-1"

Eijerlandse Gat

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

H1887

FIG. A-10



- 225°
- 255°
- △ 285°
- ◇ 315°
- × 345°

sept. 1993

GEINTEGREERD TRANSPORT DOOR ZEEGAT
VOOR VERSCHILLENDE GOLFCONDITIES

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

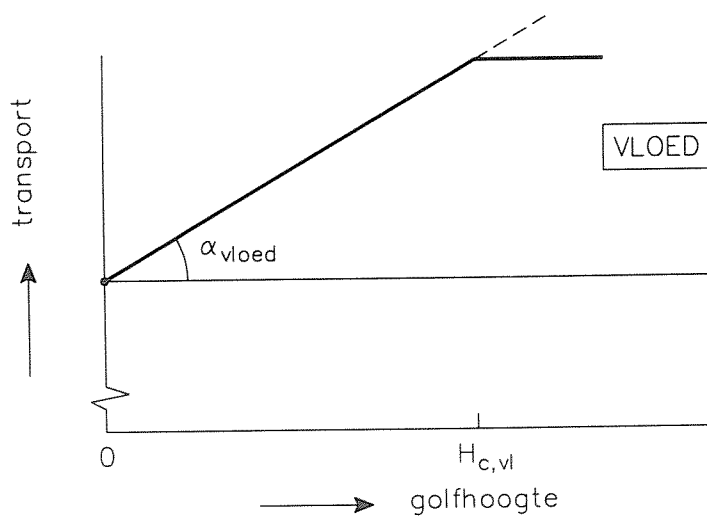
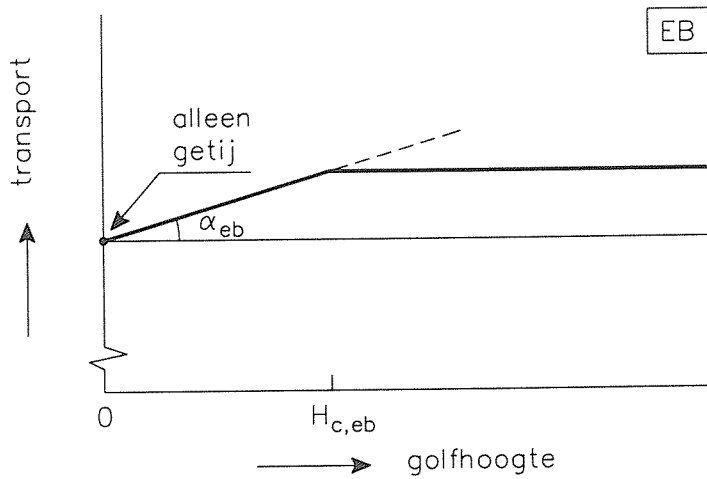
DELTA

'EffHs'

Eijerlandse Gat

H1887

FIG. A-11



$$\alpha_{vl} \gg \alpha_{eb}$$

$$H_{c,vl} \gg H_{c,eb}$$

CONCEPTUEEL MODEL EFFECT GOLFAANVAL

DELTA

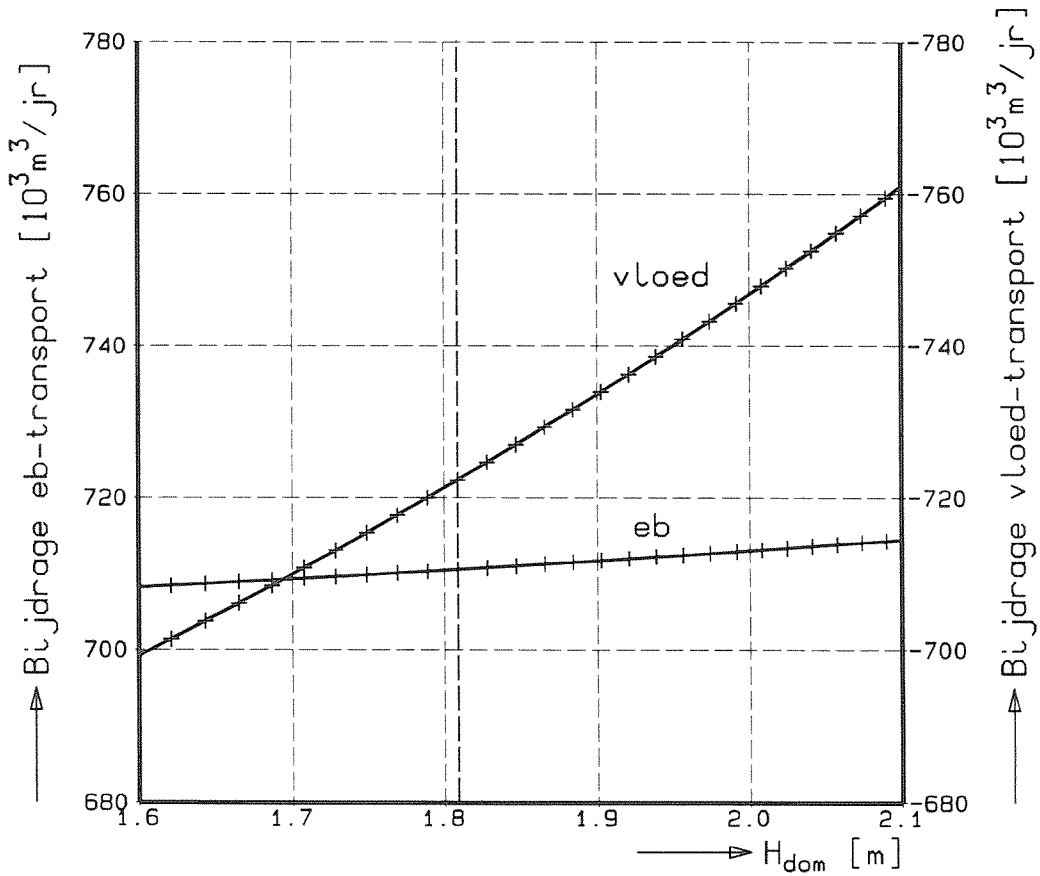
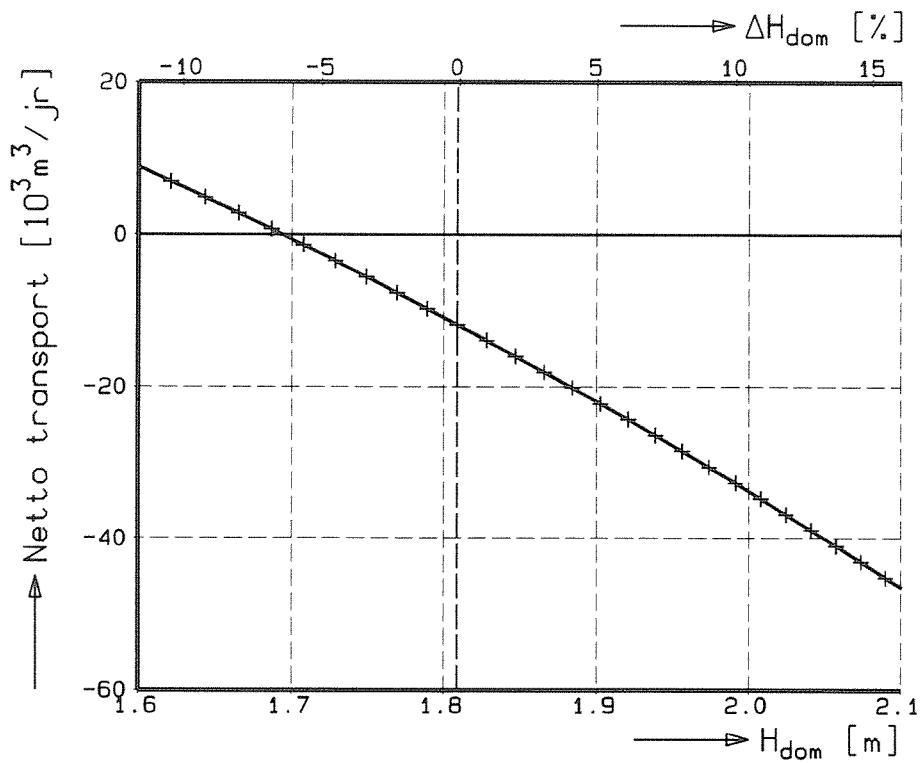
"Tkkmr-2"

Ei jerlandse Gat

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

H1887

FIG. A-12



sept. 1993

EFFECT WIJZIGING GOLFHOOGTE OP
GEINTEGREERD TRANSPORT DOOR ZEEGAT

DELTA

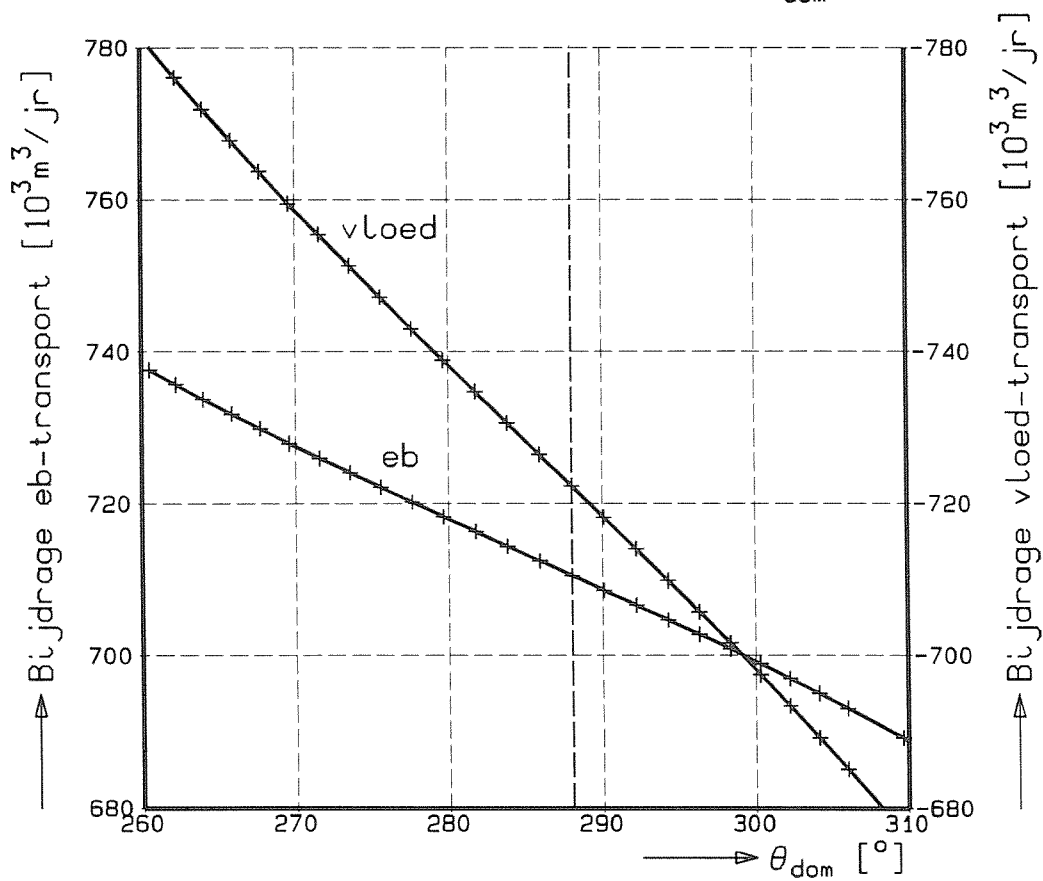
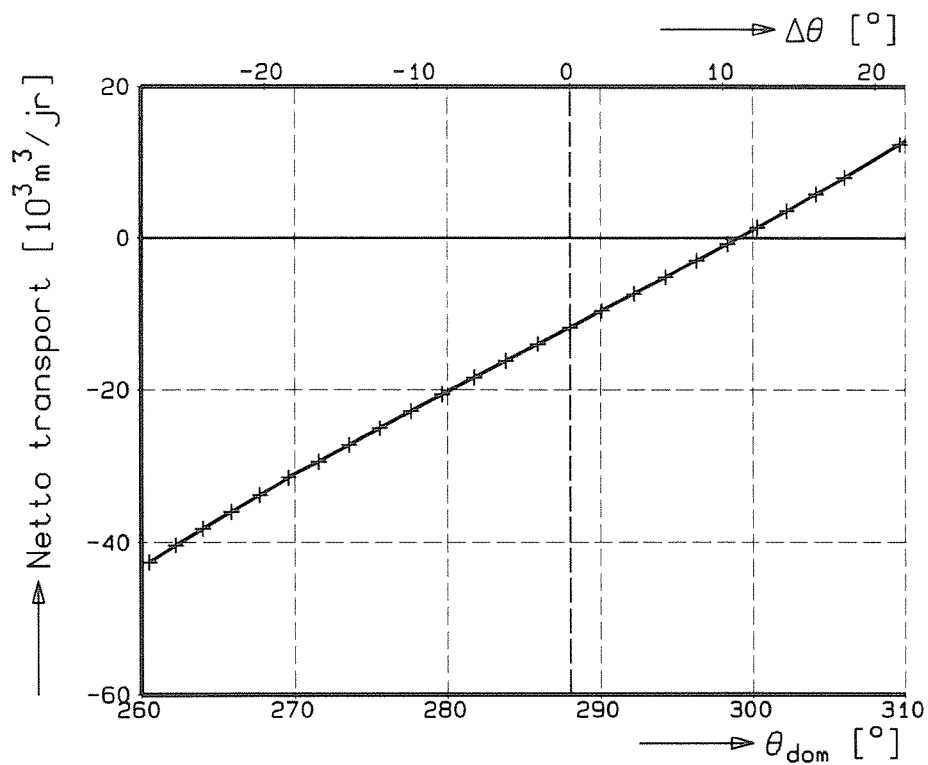
"EffHdom"

Eilanderlandse Gat

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

H1887

FIG. A-13



sept. 1993

EFFECT WIJZIGING GOLFRICHTING OP
GEINTEGREERD TRANSPORT DOOR ZEEGAT

DELTA

'EffHoek'

Eijerlandse Gat

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

H1887

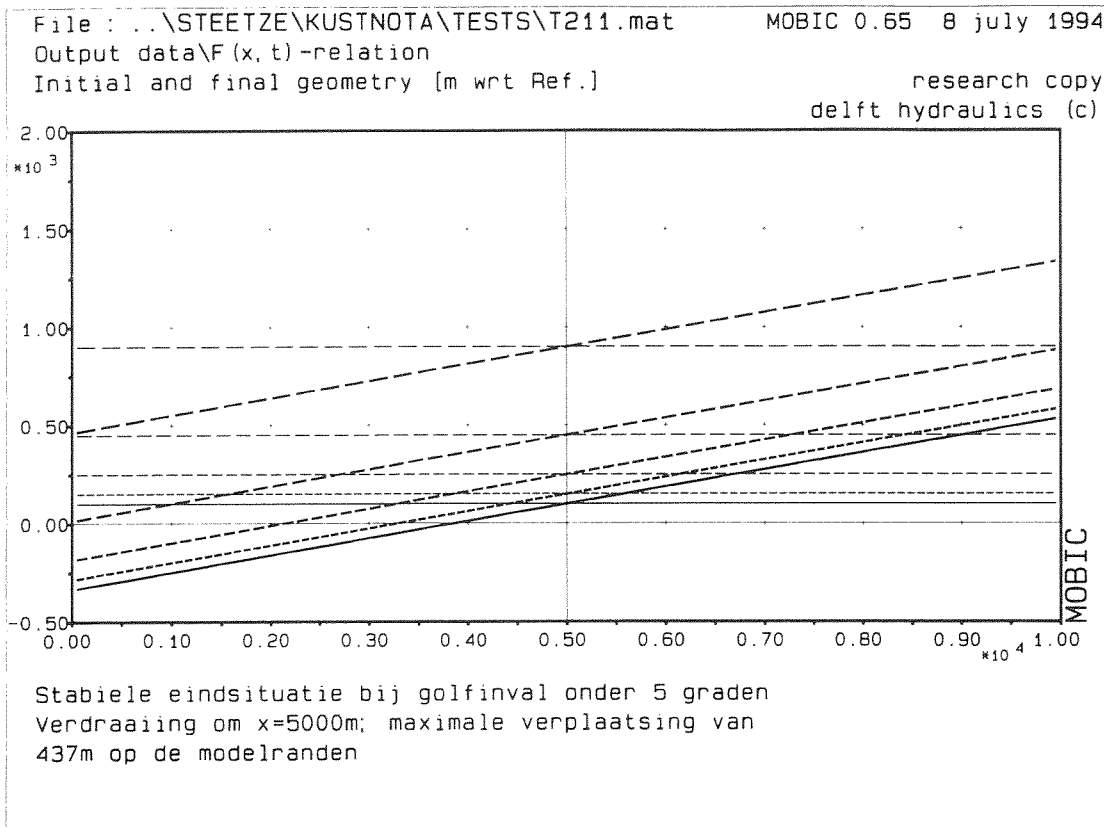
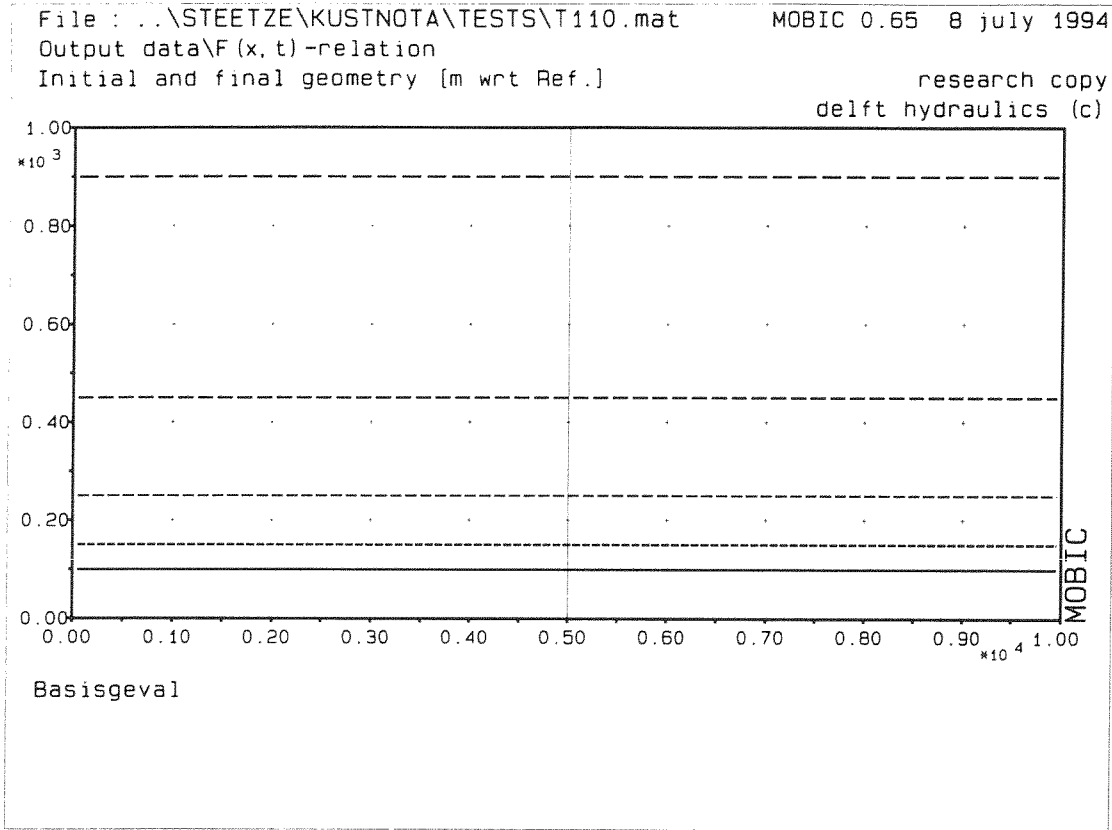
FIG. A-14

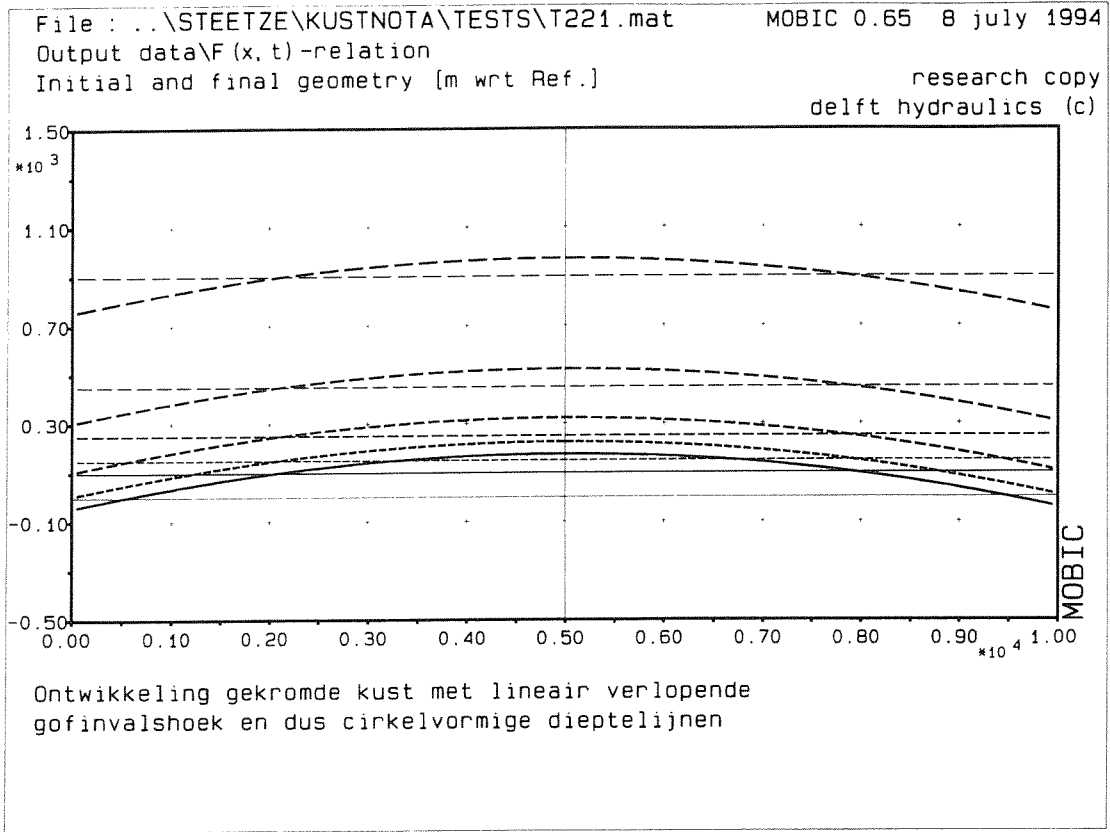
Appendix B

Resultaten test- en validatie-runs

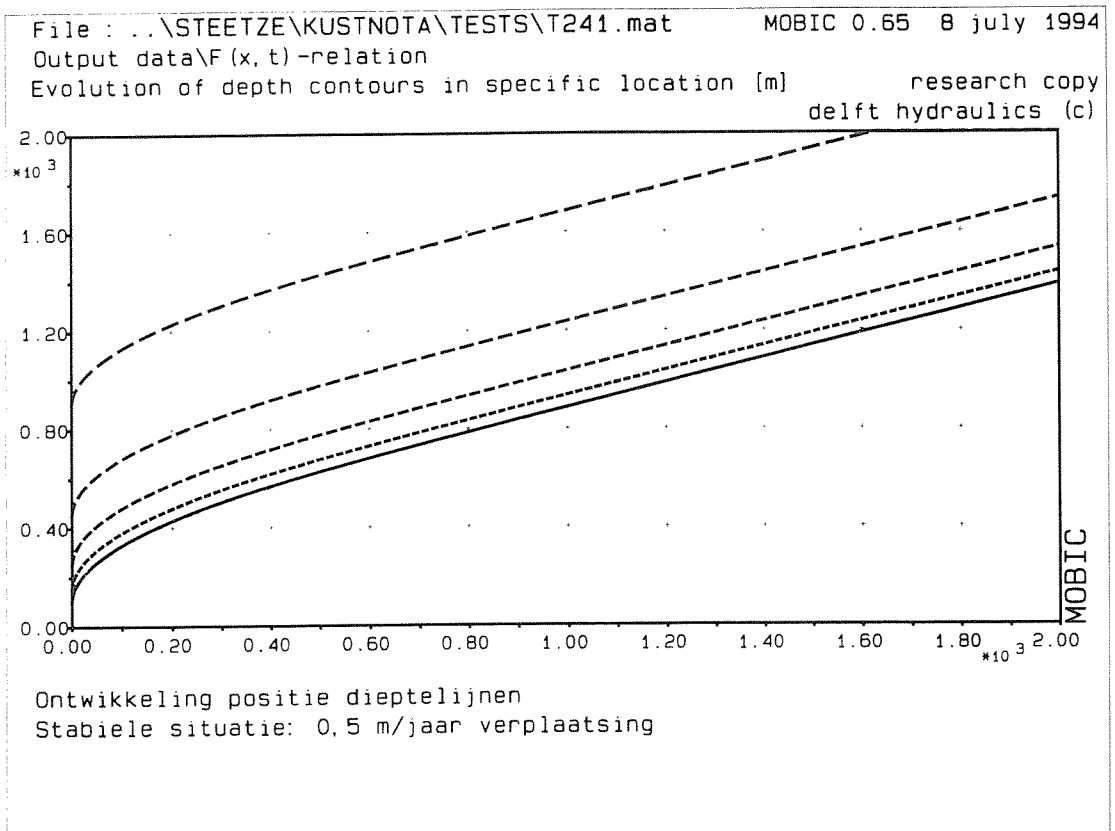
Appendix B: Resultaten test- en validatie-runs

In het volgende is een selectie van de resultaten van test- en validatieruns bijeengebracht. De verschillende figuren (plot-files) zijn genummerd aan de hand van de betreffende testberekening. Voor een nadere toelichting kan worden verwezen naar Hoofdstuk 4 in het hoofdrapport.

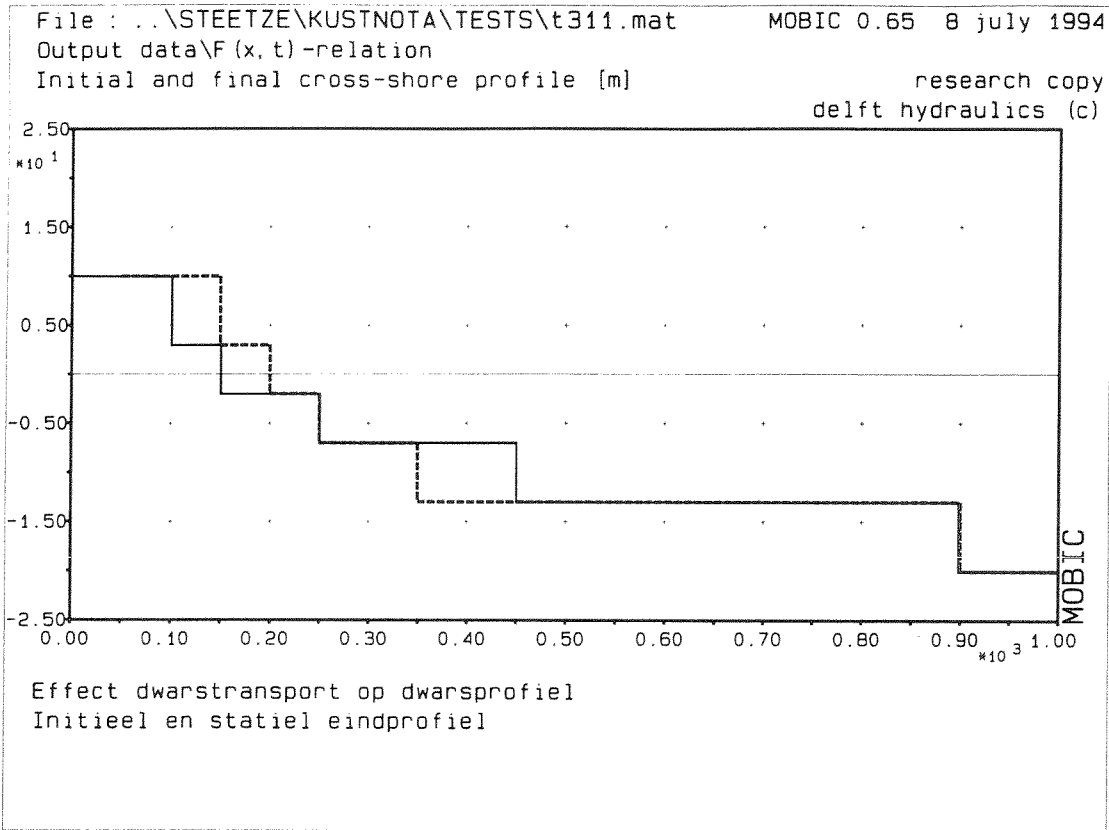




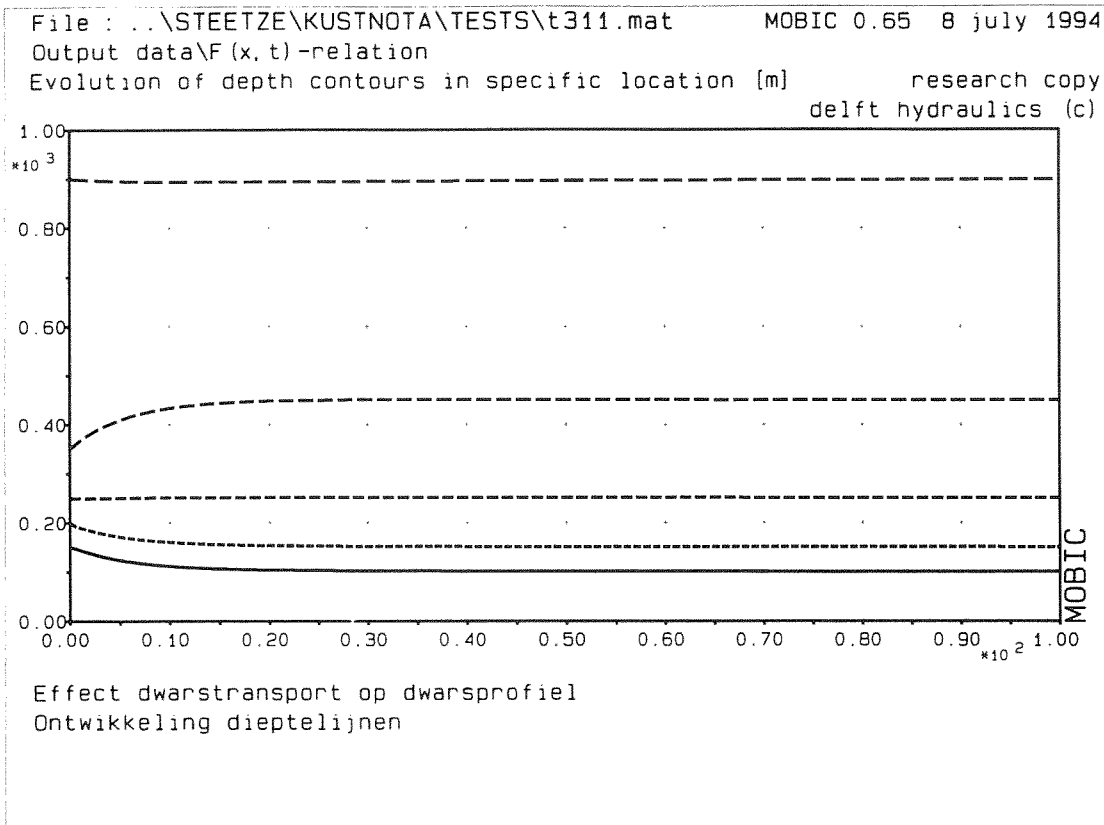
Plotfile : 0:\MOBIC\STEETZE\KUSTNOTA\TESTS\T221.PF1



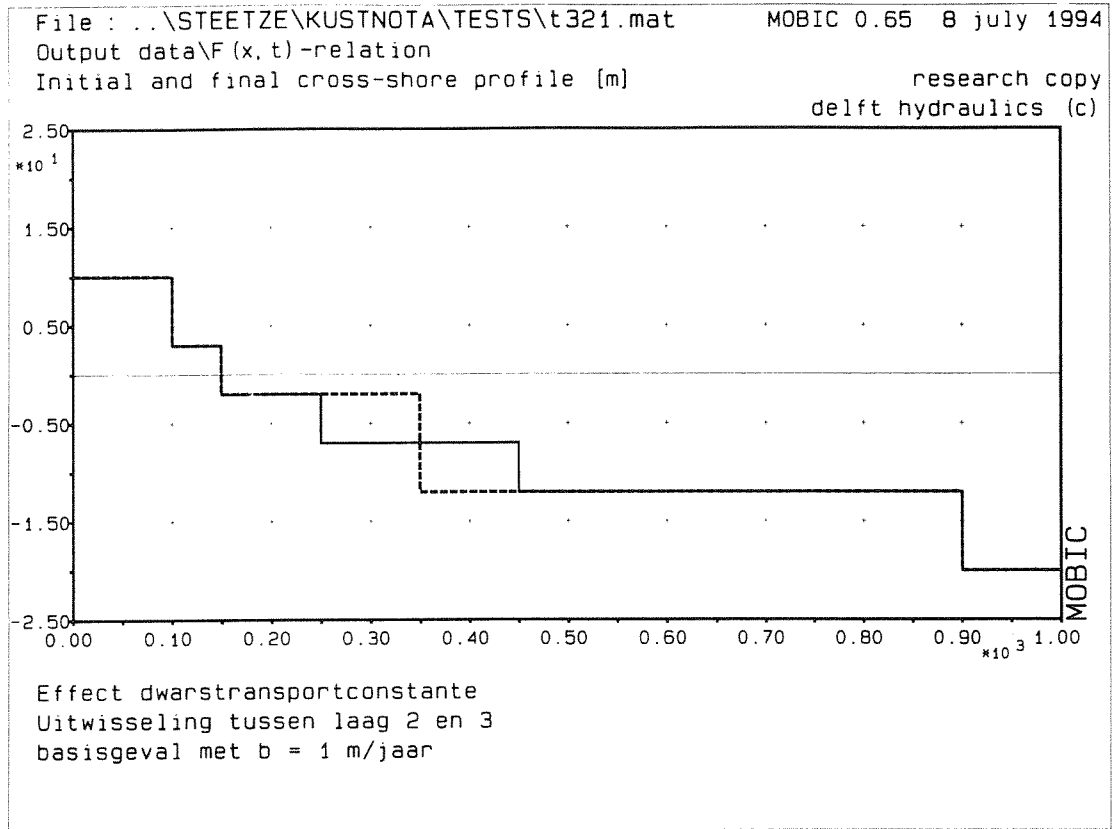
Plotfile : 0:\MOBIC\STEETZE\KUSTNOTA\TESTS\T241.PF2



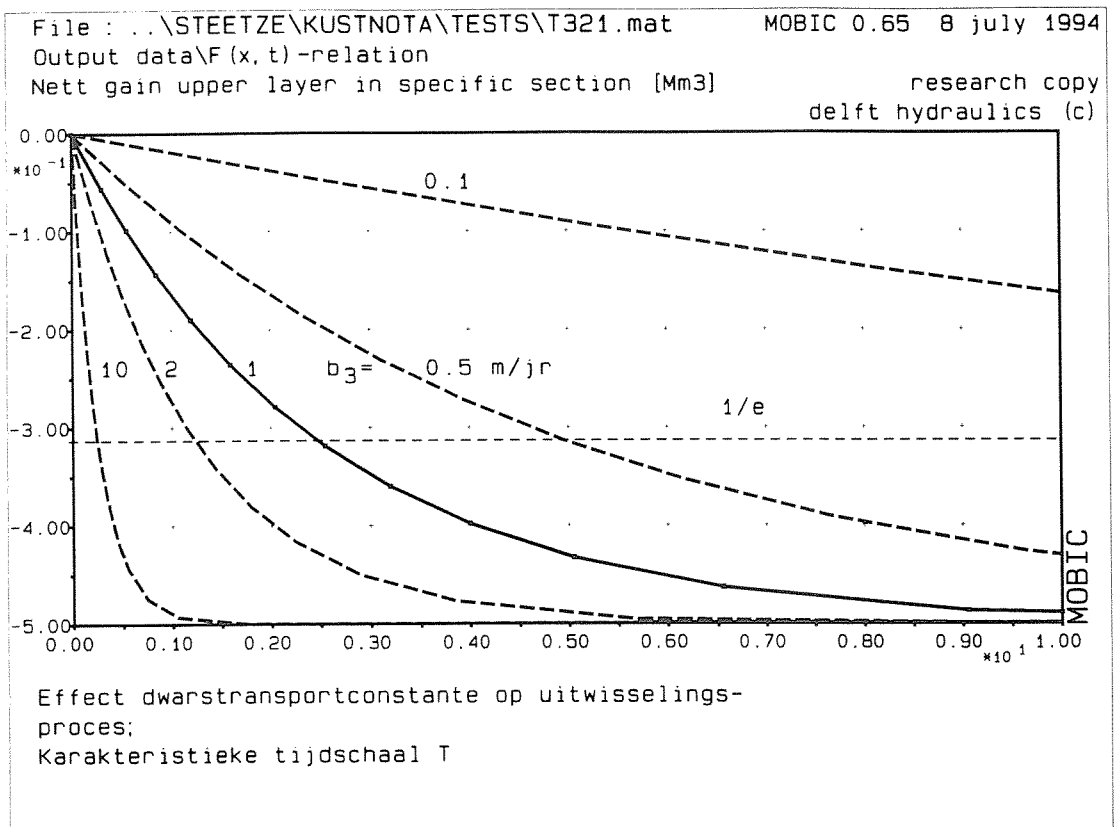
Plotfile : 0:\MOBIC\STEETZE\KUSTNOTA\TESTS\t311.prf1



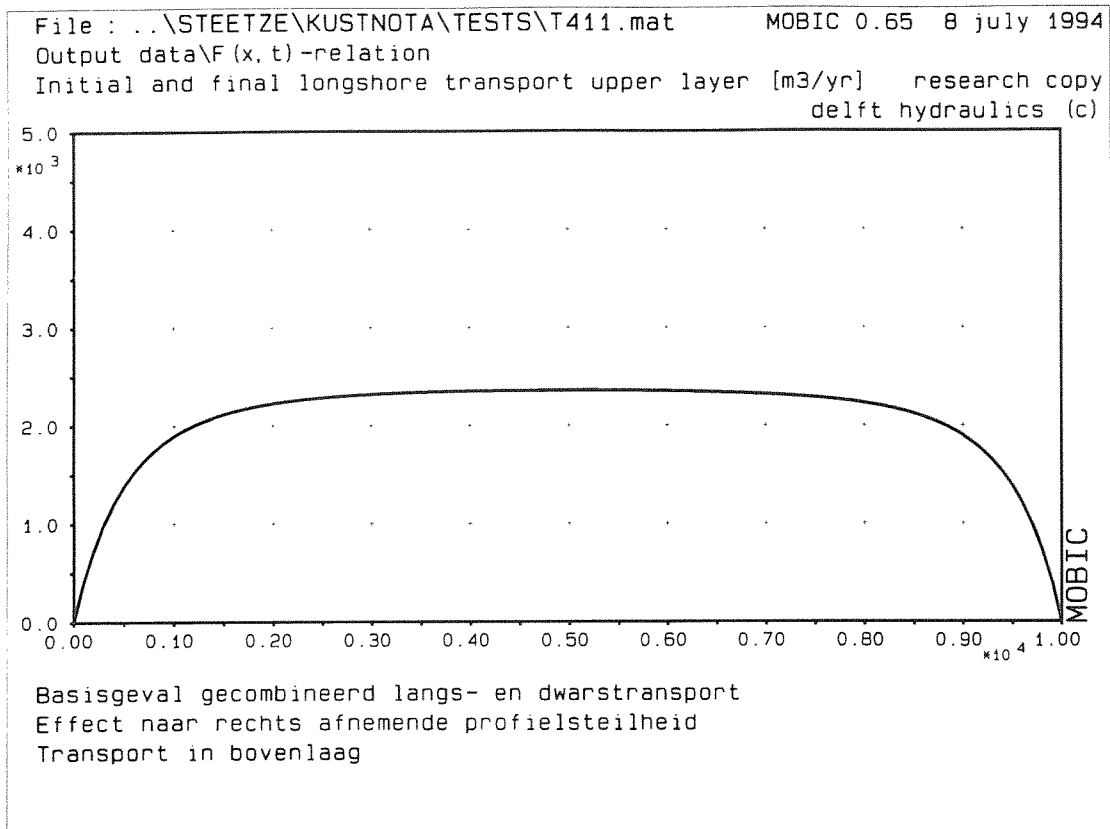
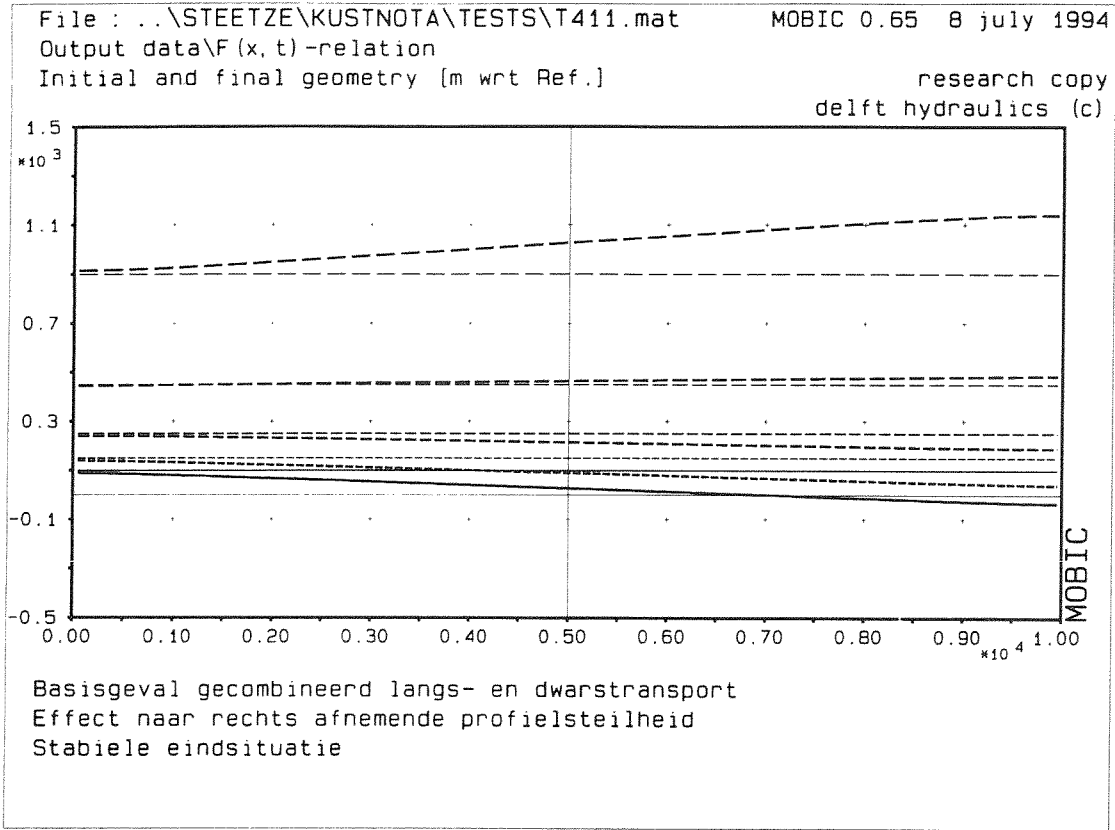
Plotfile : 0:\MOBIC\STEETZE\KUSTNOTA\TESTS\t311.prf2

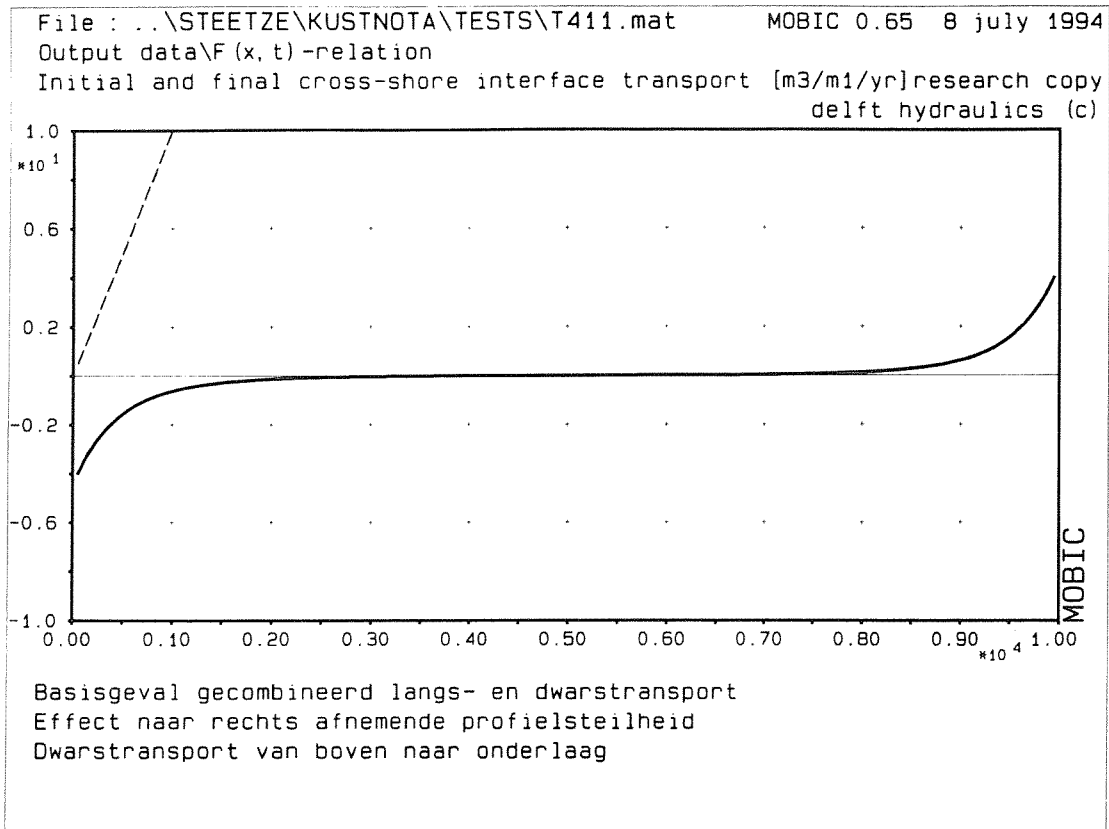


Plotfile : D:\MOBIC\STEETZE\KUSTNOTA\TESTS\T321.PFI

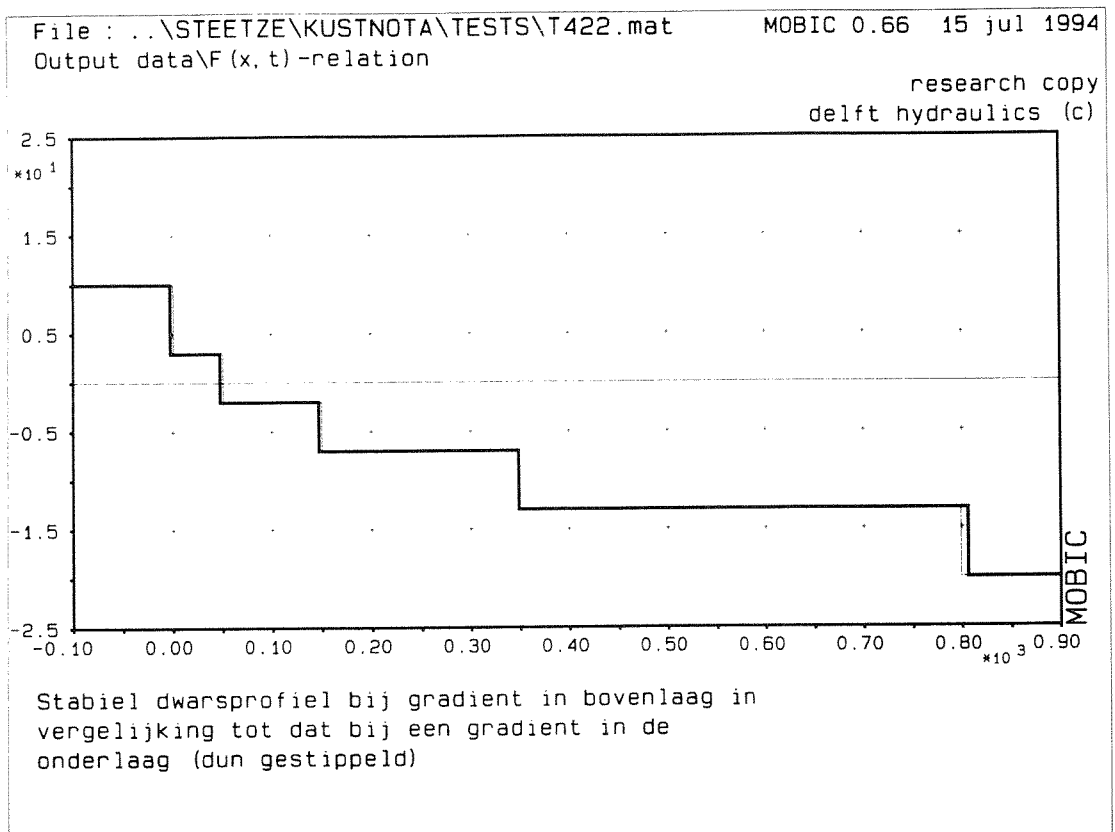


Plotfile : D:\MOBIC\STEETZE\KUSTNOTA\TESTS\T325.PFI

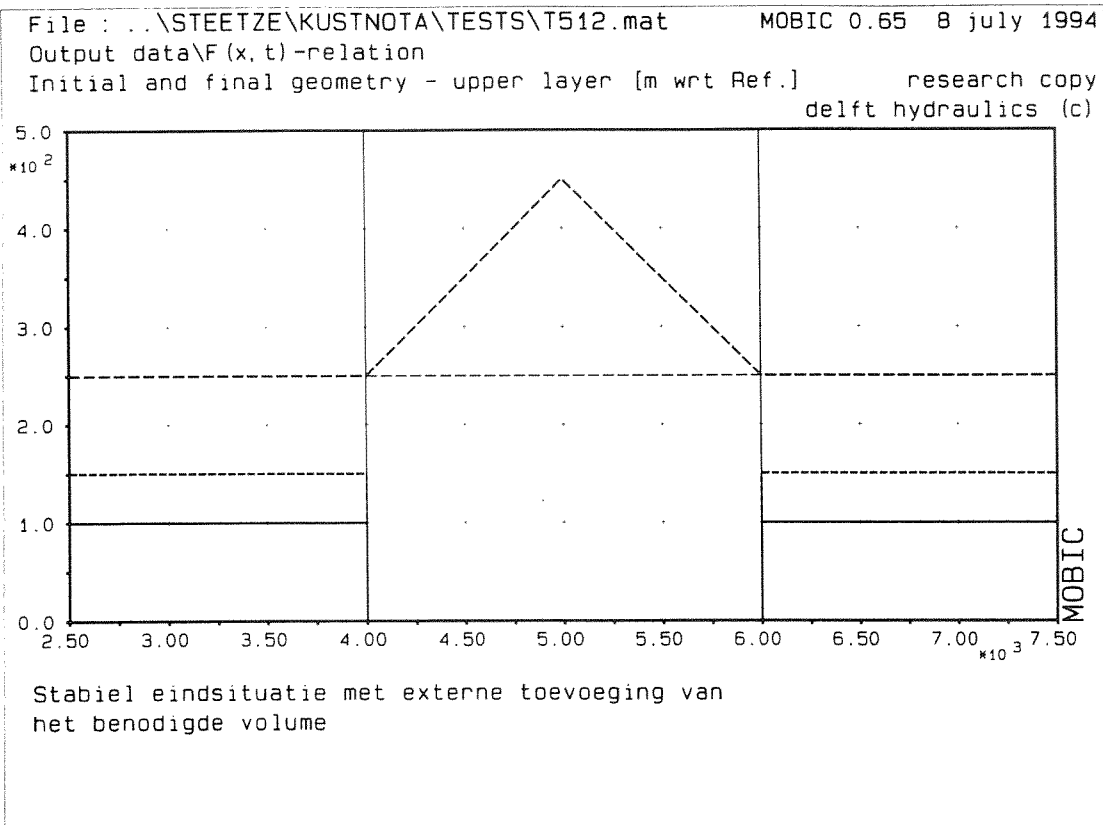
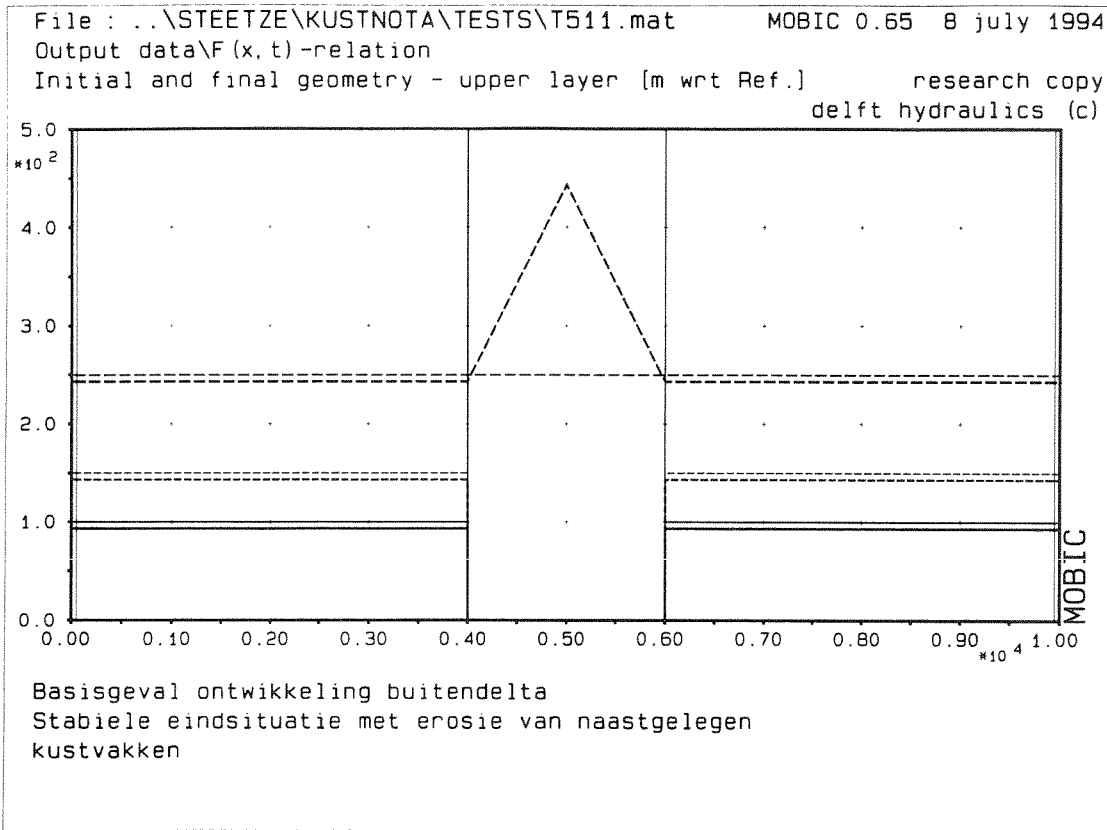


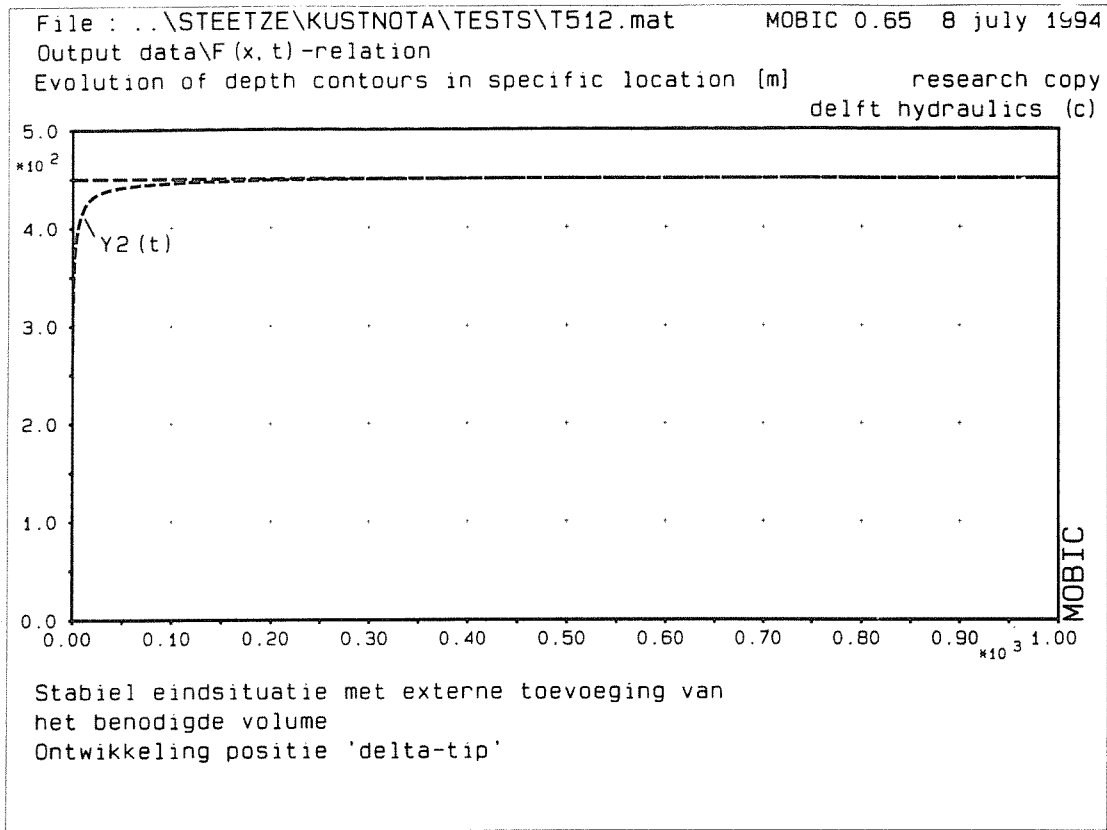


Plotfile : 0:\MOFFO\STEETZE\KUSTNOTA\TESTS\T411.PFB

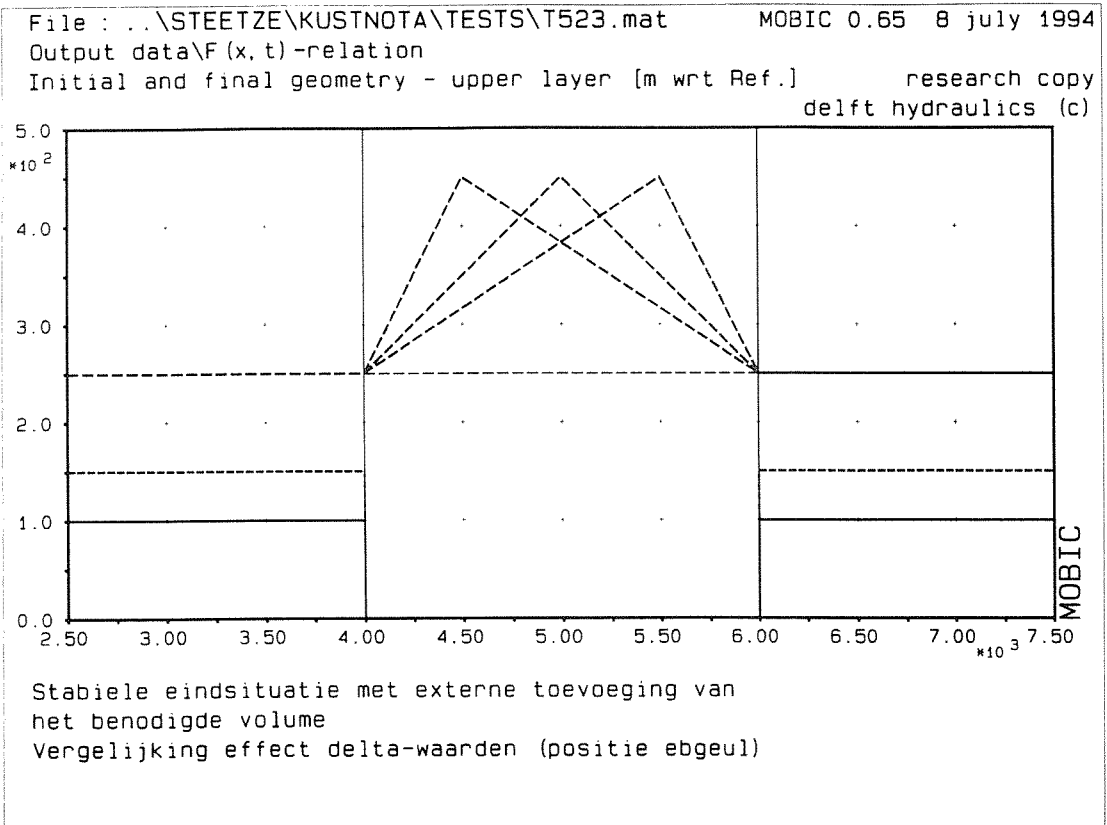


Plotfile : 0:\MOFFO\STEETZE\KUSTNOTA\TESTS\T422.PFB

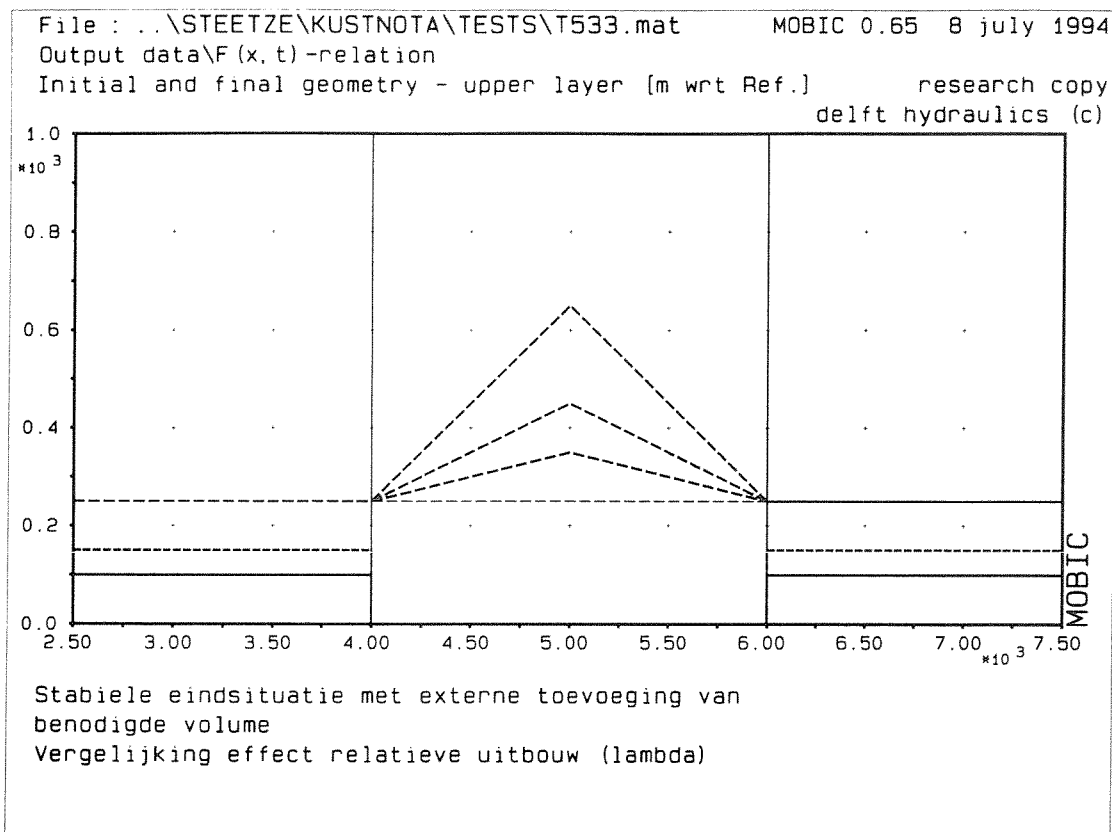




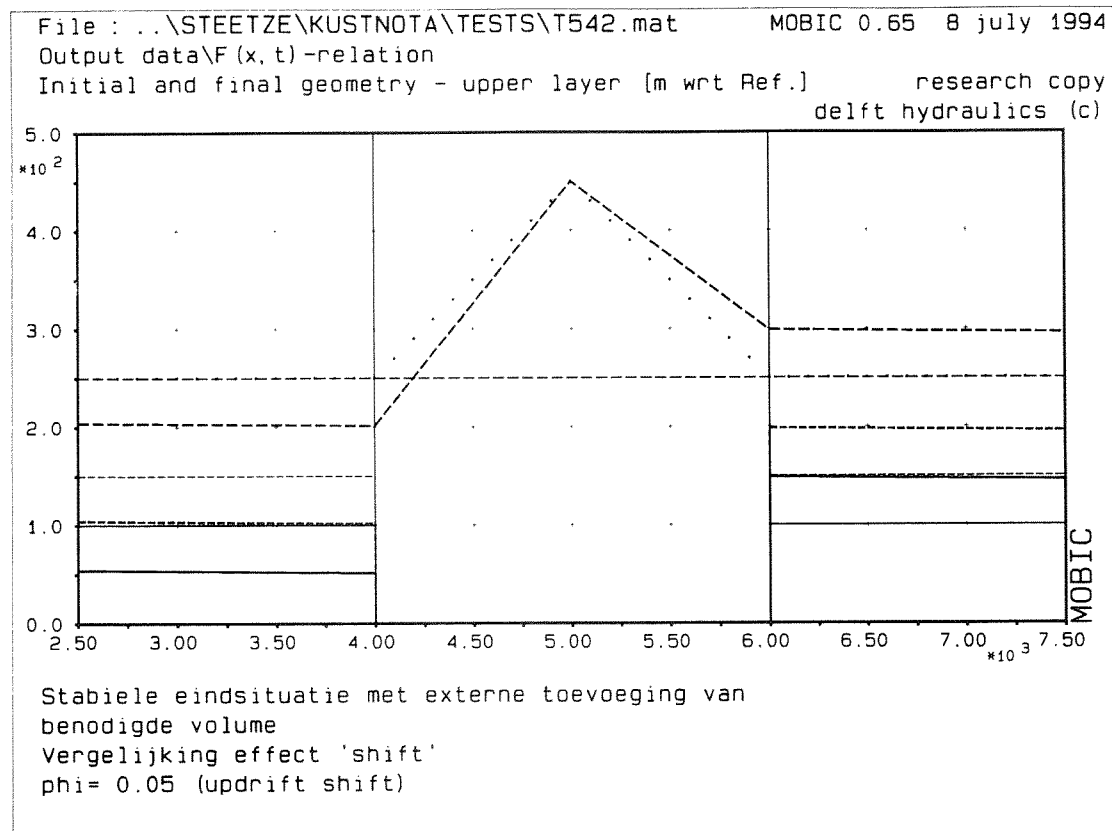
Plotfile : 0:\MOBIC\STEETZE\KUSTNOTA\TESTS\T512.PF2



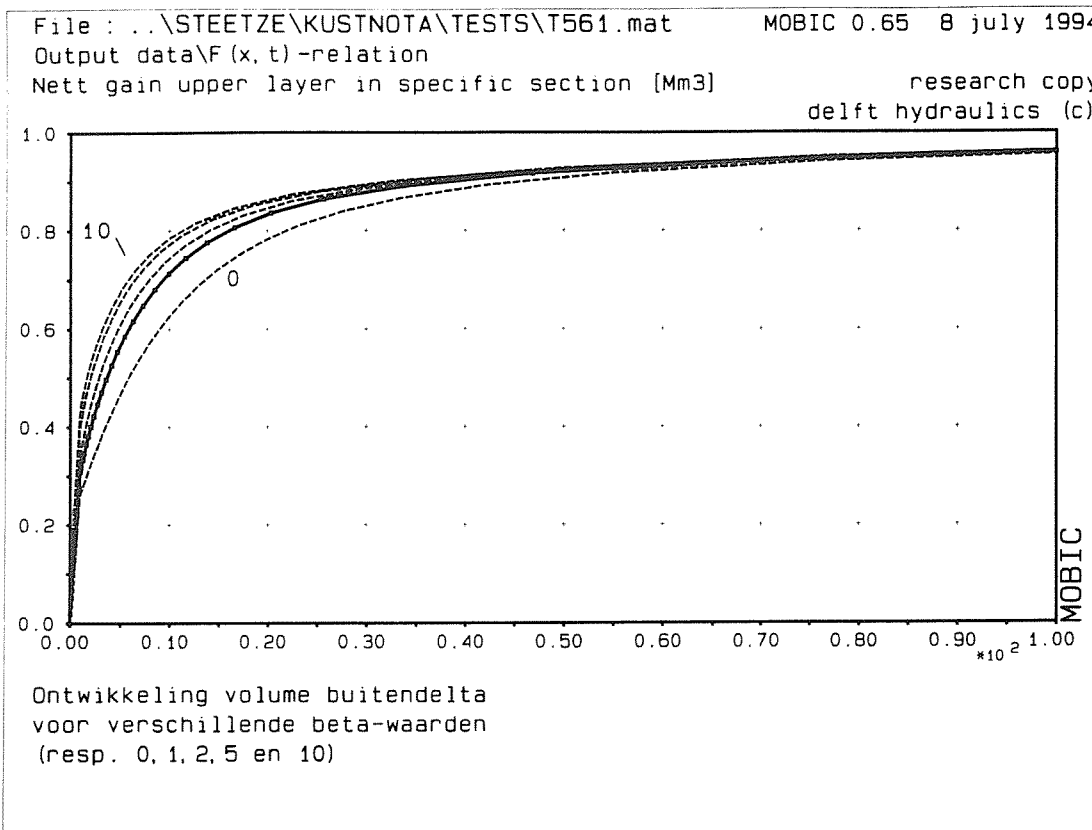
Plotfile : 0:\MOBIC\STEETZE\KUSTNOTA\TESTS\T523.PF1



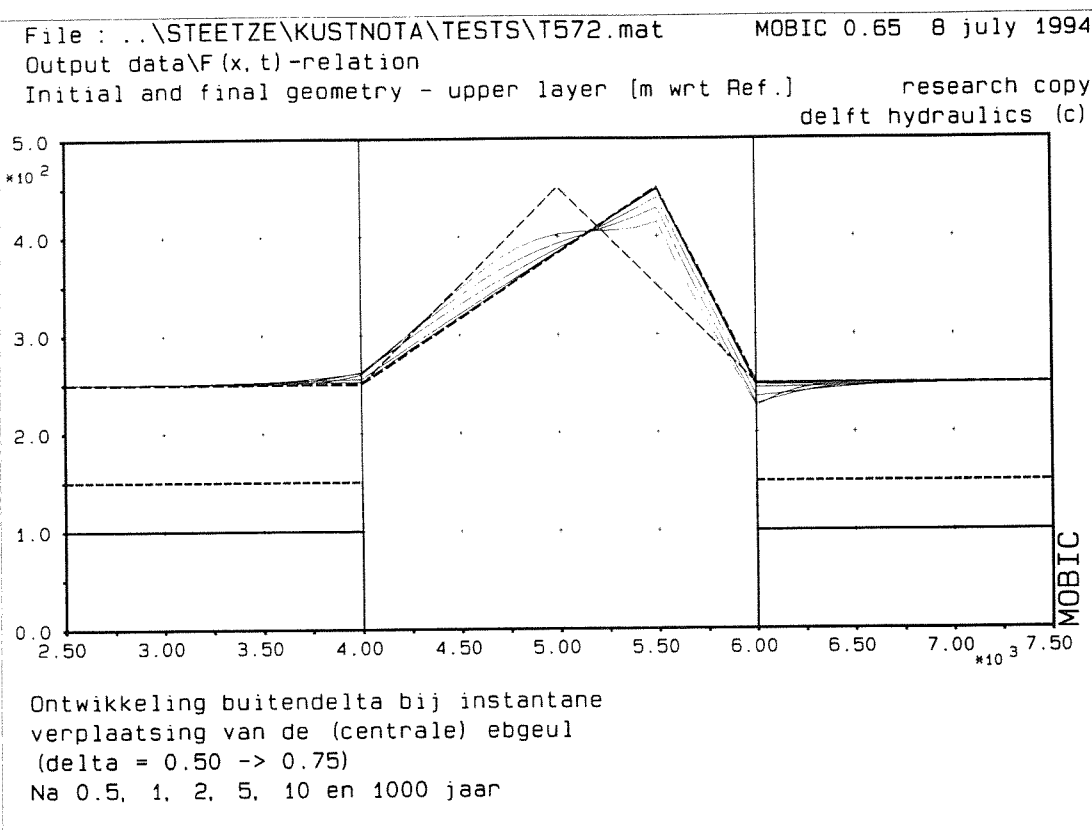
Plotfile : 0:\MOBIC\STEETZE\KUSTNOTA\TESTS\T533.PF1



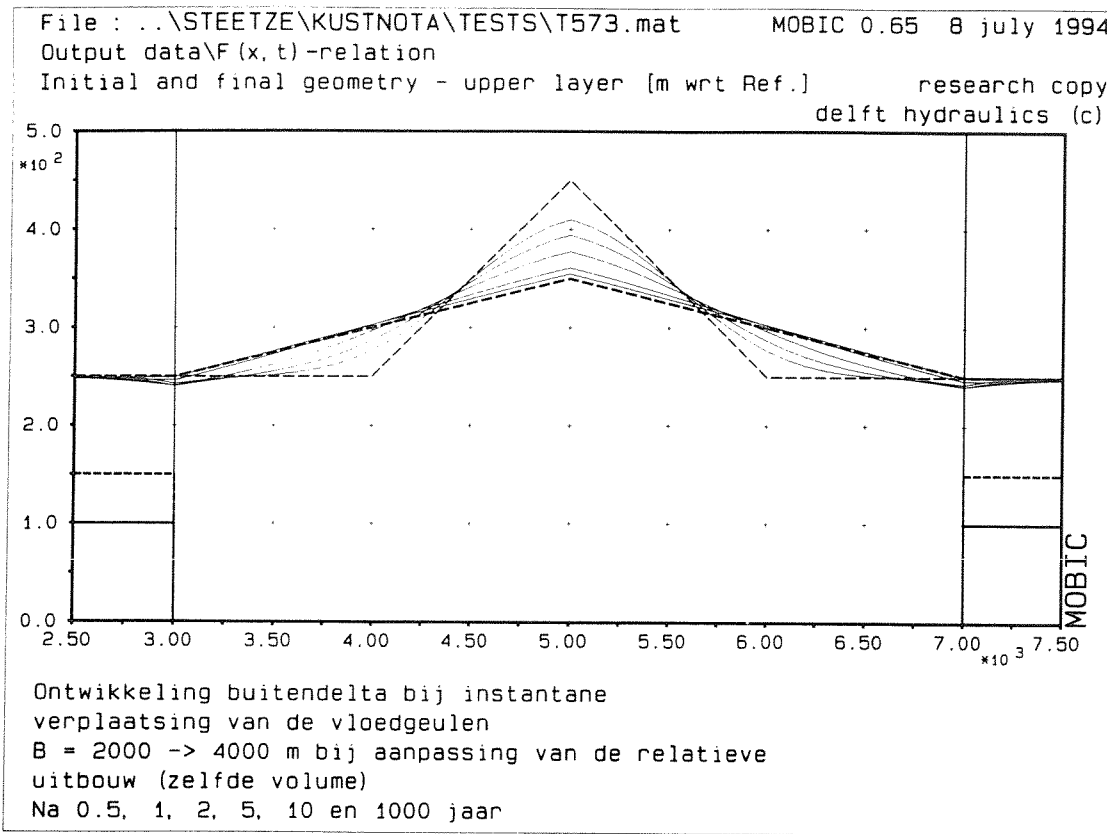
Plotfile : 0:\MOBIC\STEETZE\KUSTNOTA\TESTS\T542.PF1



Plotfile : 0:\MOBIC\STEETZE\KUSTNOTA\TESTS\T561.PF2

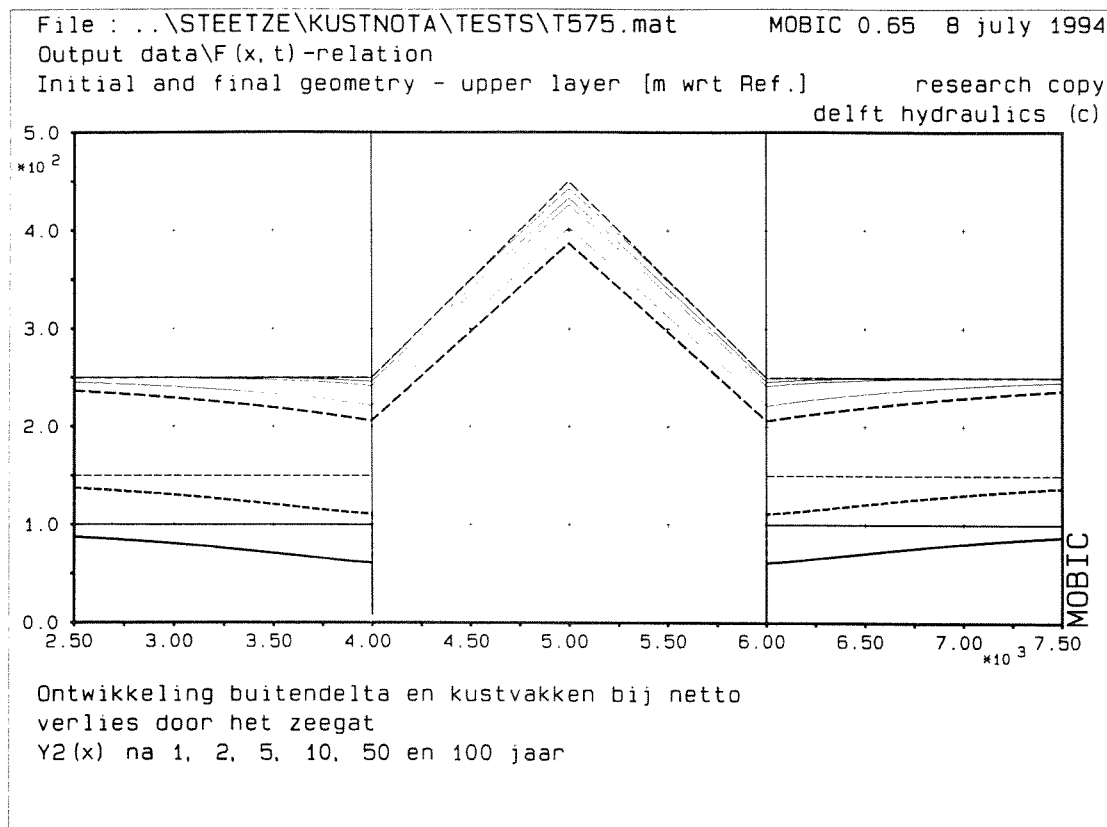


Plotfile : 0:\MOBIC\STEETZE\KUSTNOTA\TESTS\T572.PF2



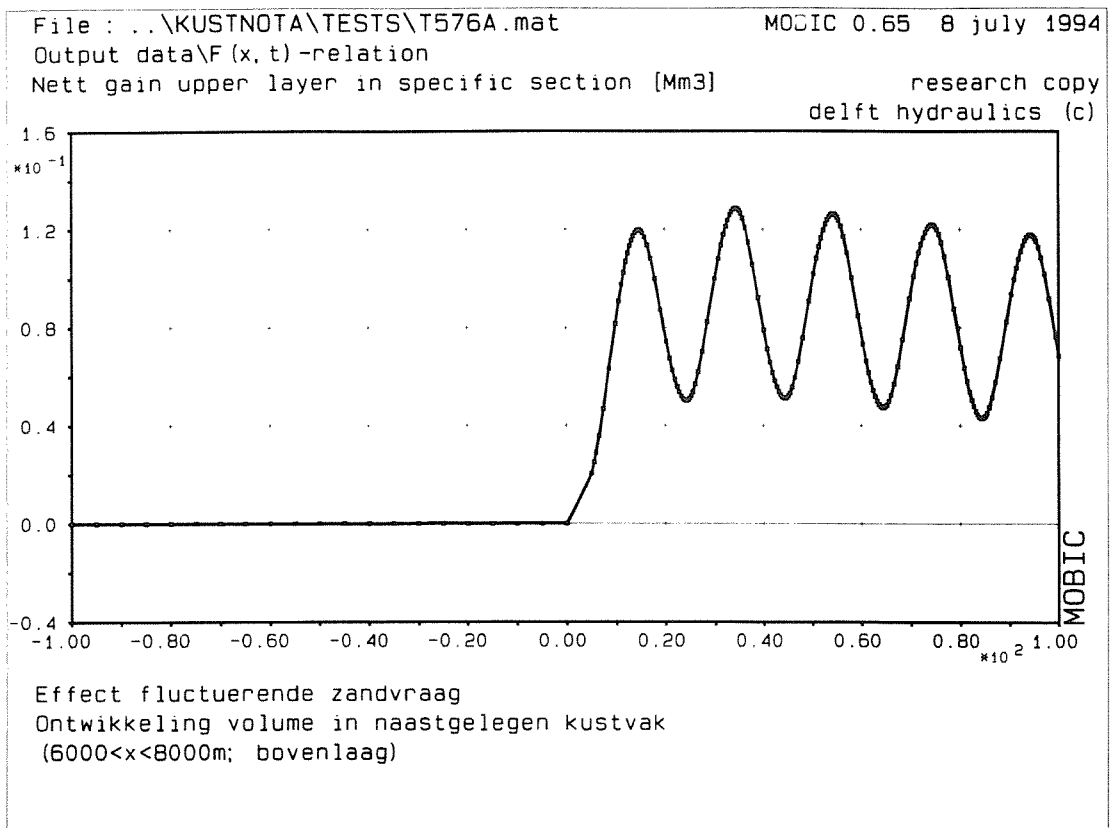
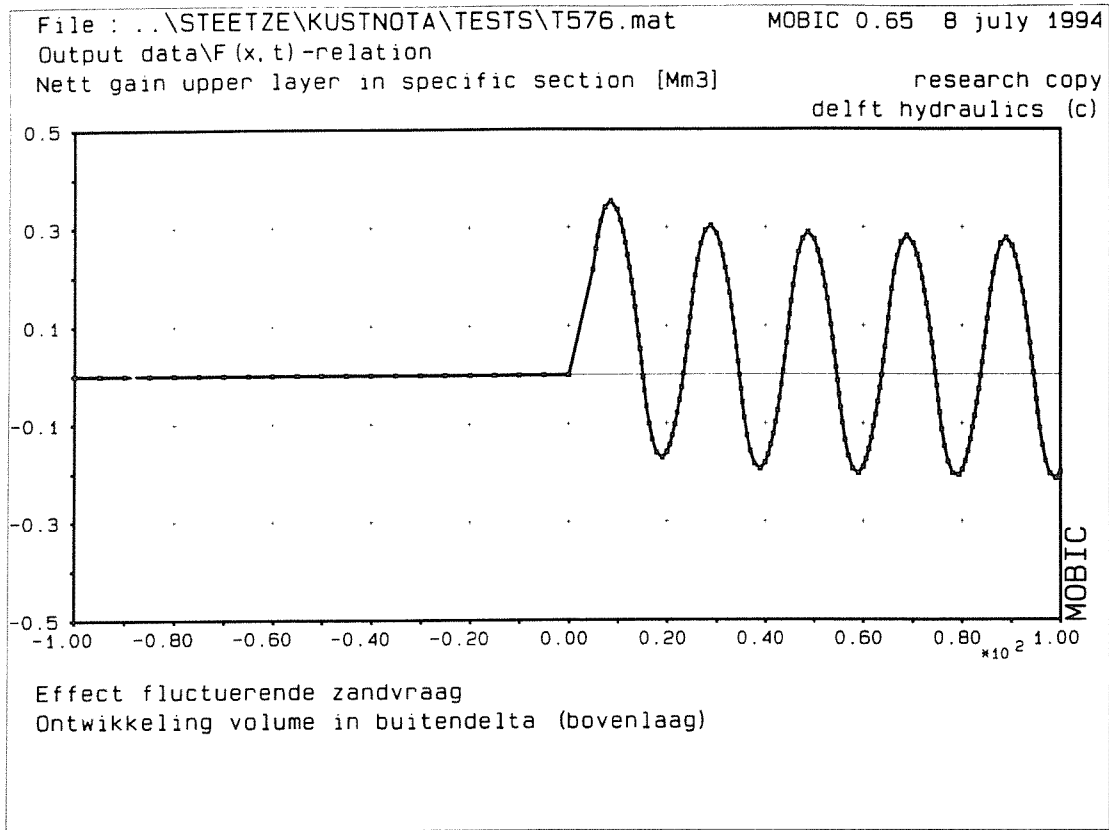
Plotfile : 0:\MOBRO\STEETZE\KUSTNOTA\TESTS\T573.PF2

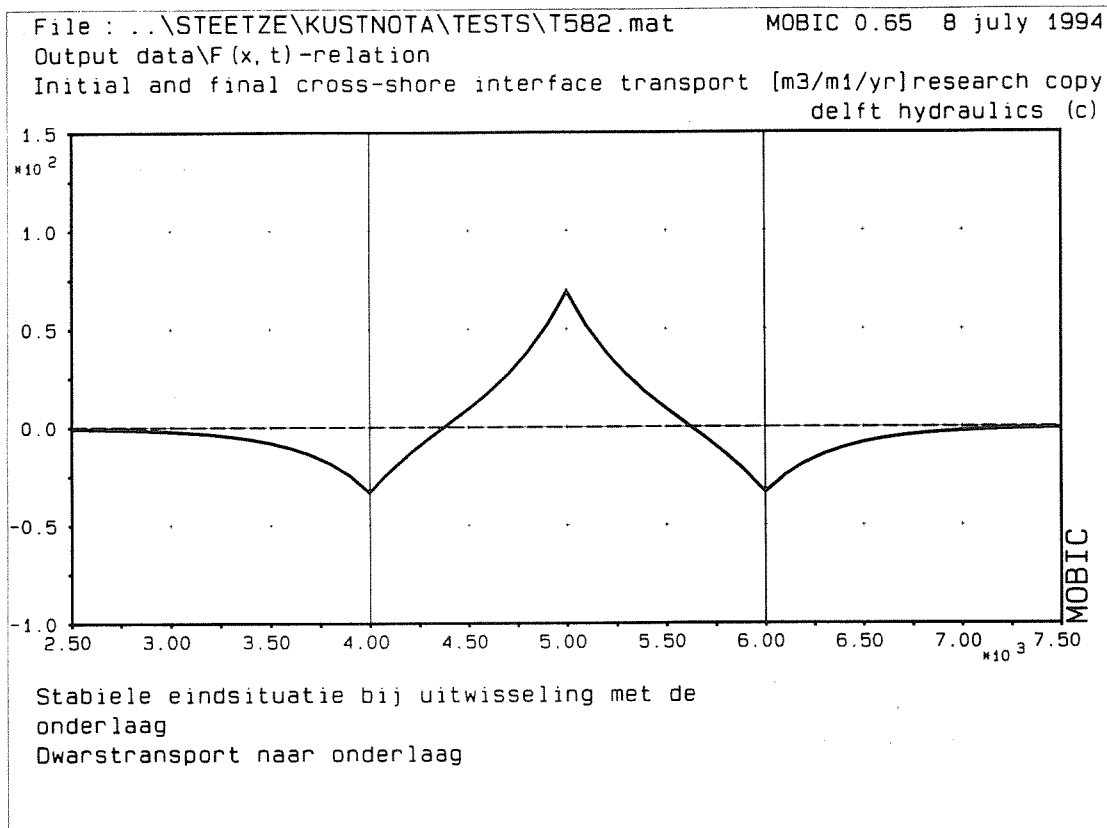
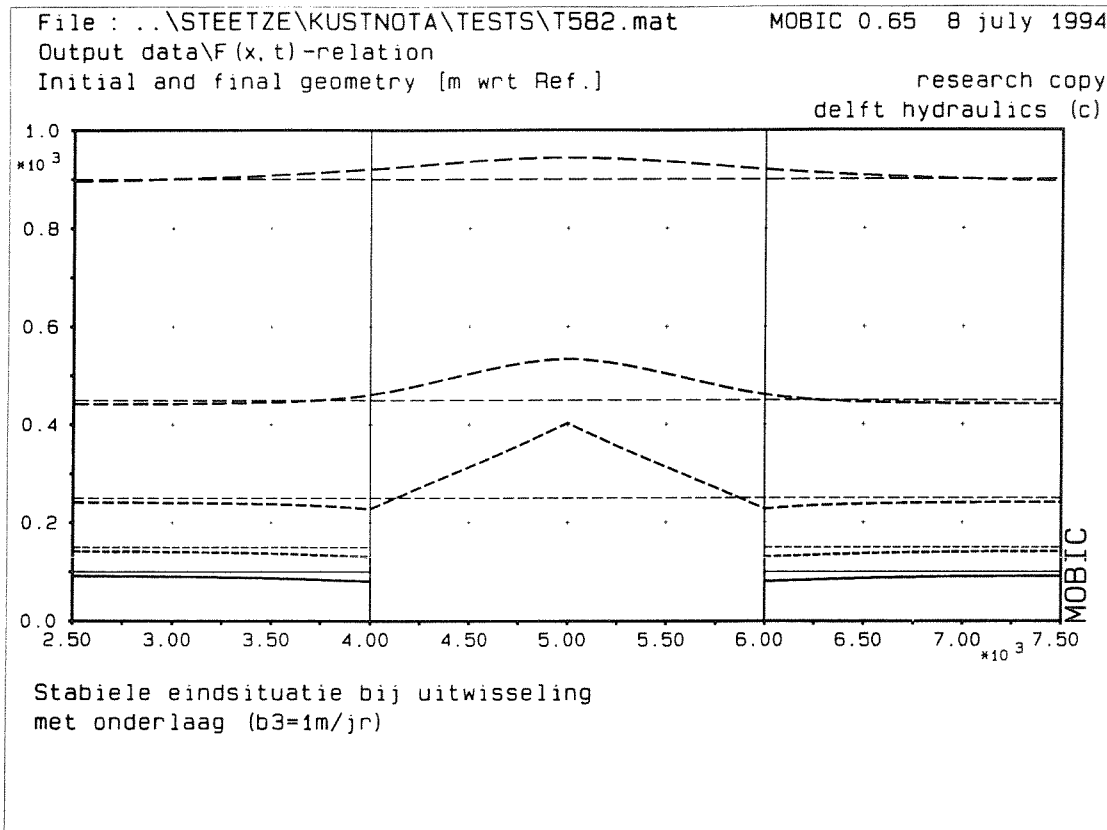
MOBIC

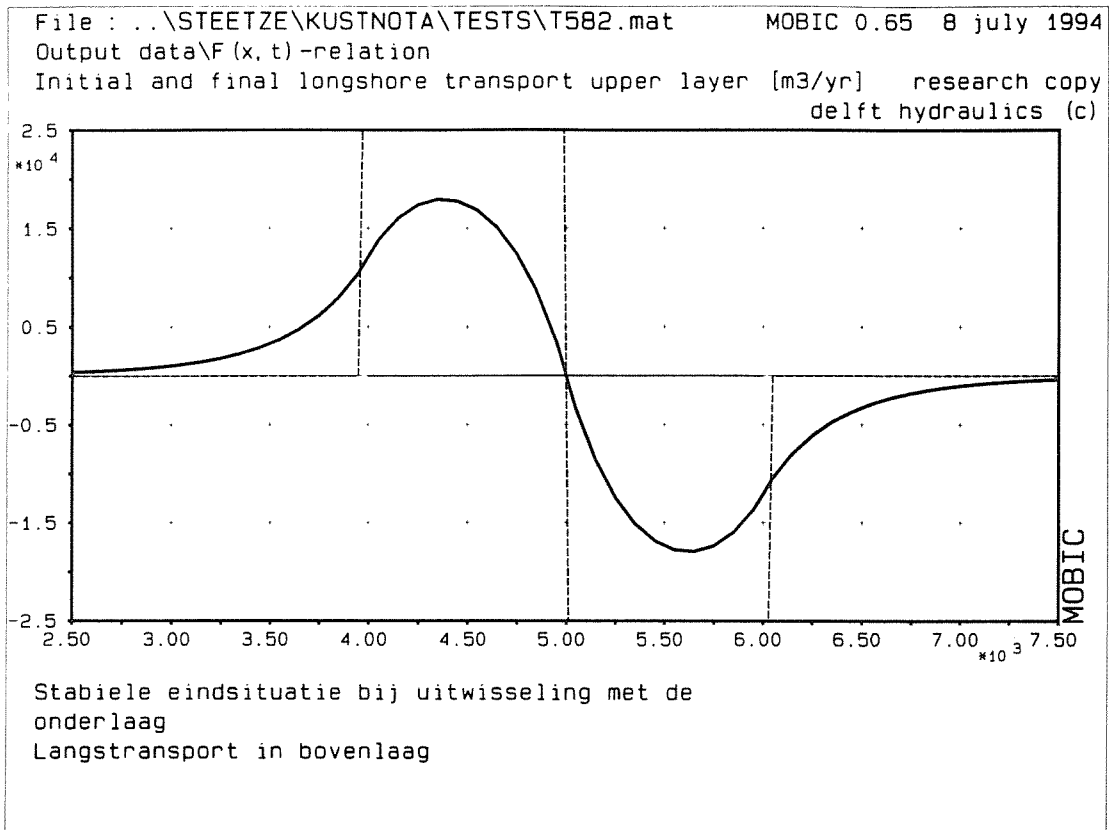


Plotfile : 0:\MOBRO\STEETZE\KUSTNOTA\TESTS\T575.PF2

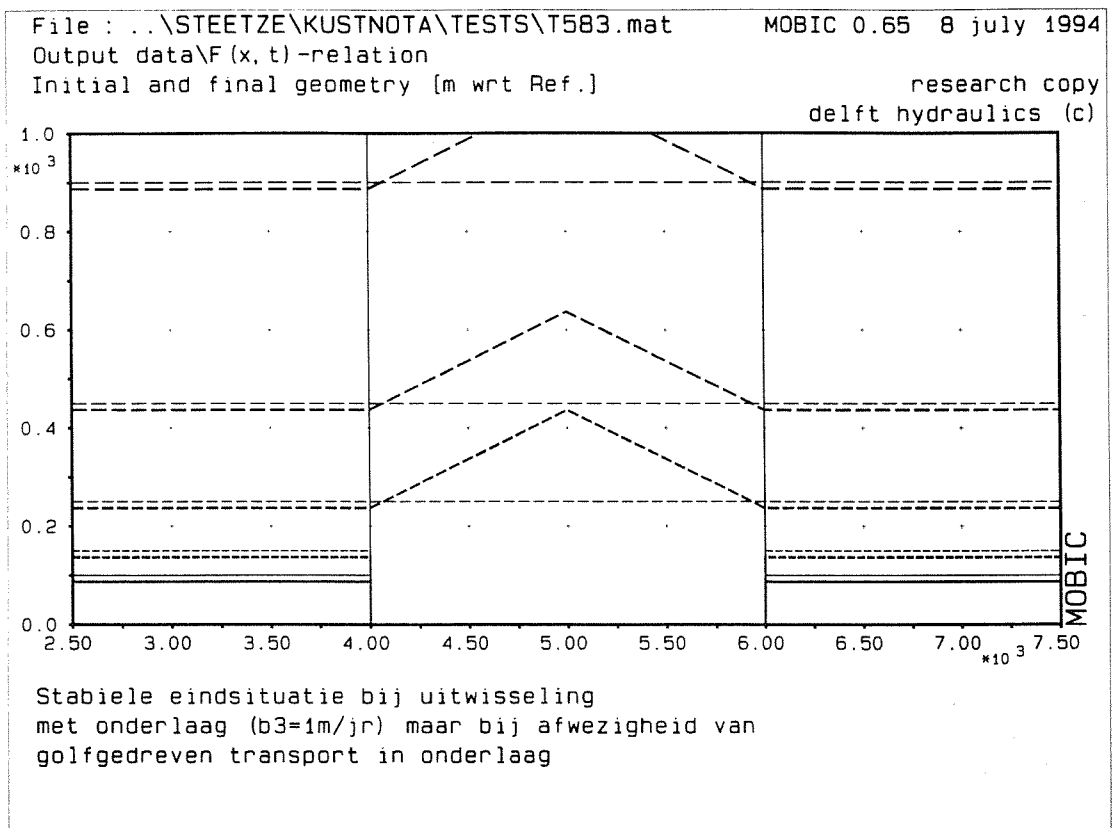
MOBIC



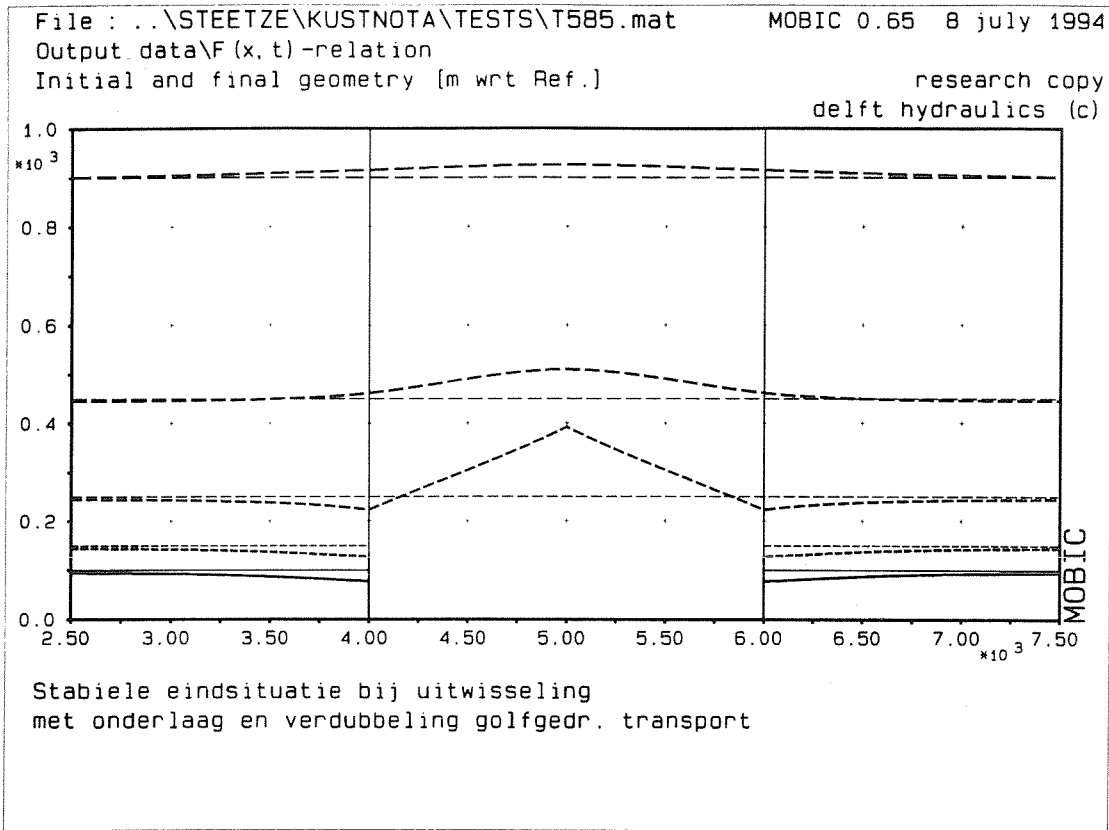




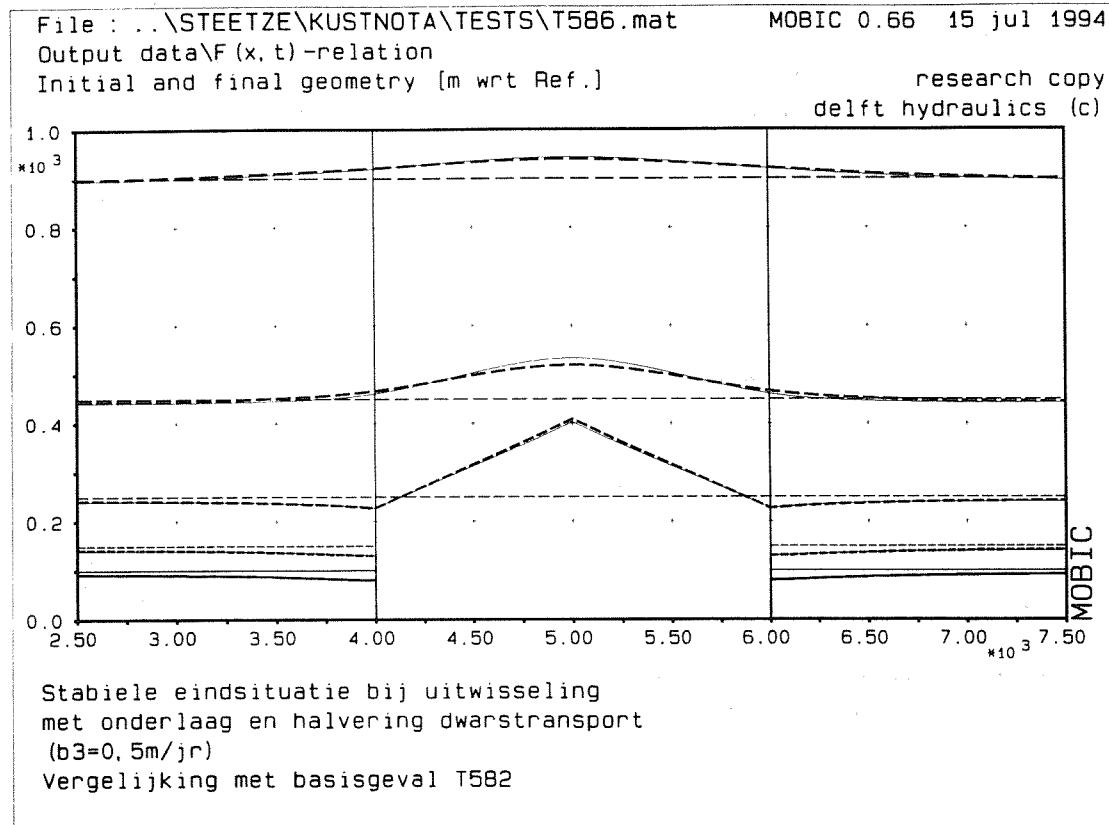
Plotfile : 0:\MOBIC\STEETZE\KUSTNOTA\TESTS\T582.PF5



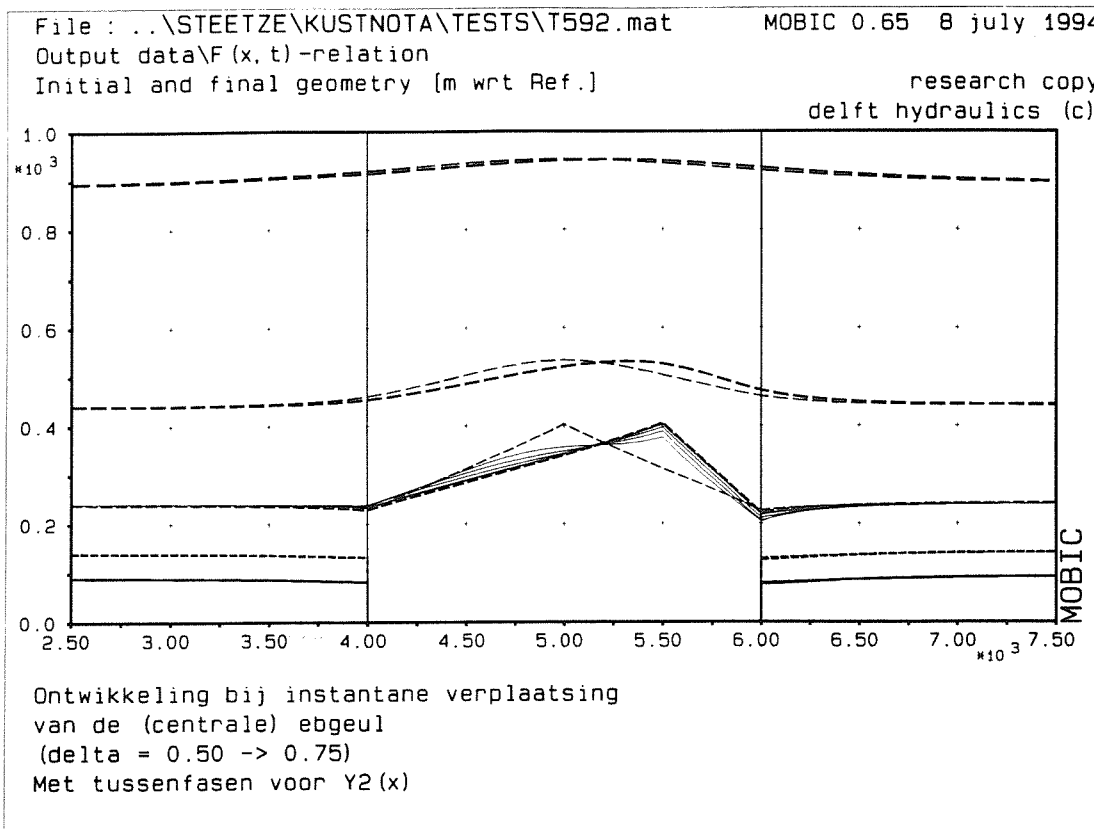
Plotfile : 0:\MOBIC\STEETZE\KUSTNOTA\TESTS\T583.PF1



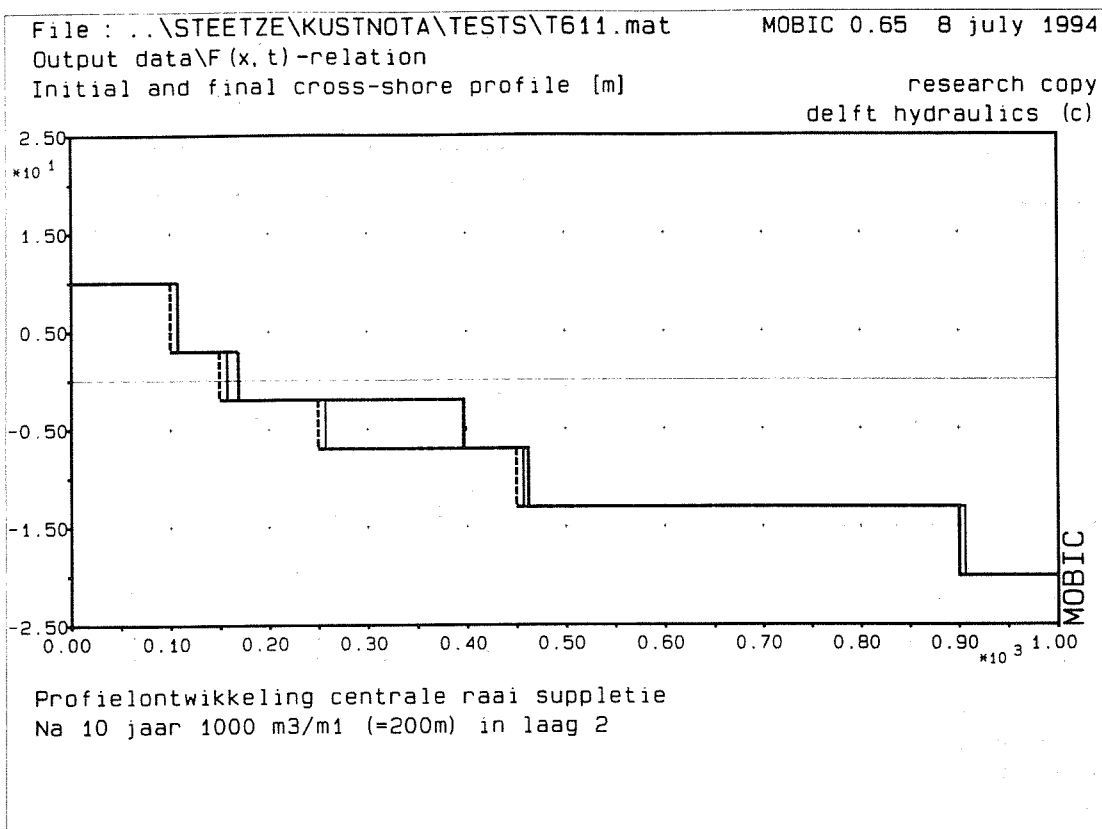
Plot118 : 0:\MOBIC\STEETZE\KUSTNOTA\TESTS\T585.PF1



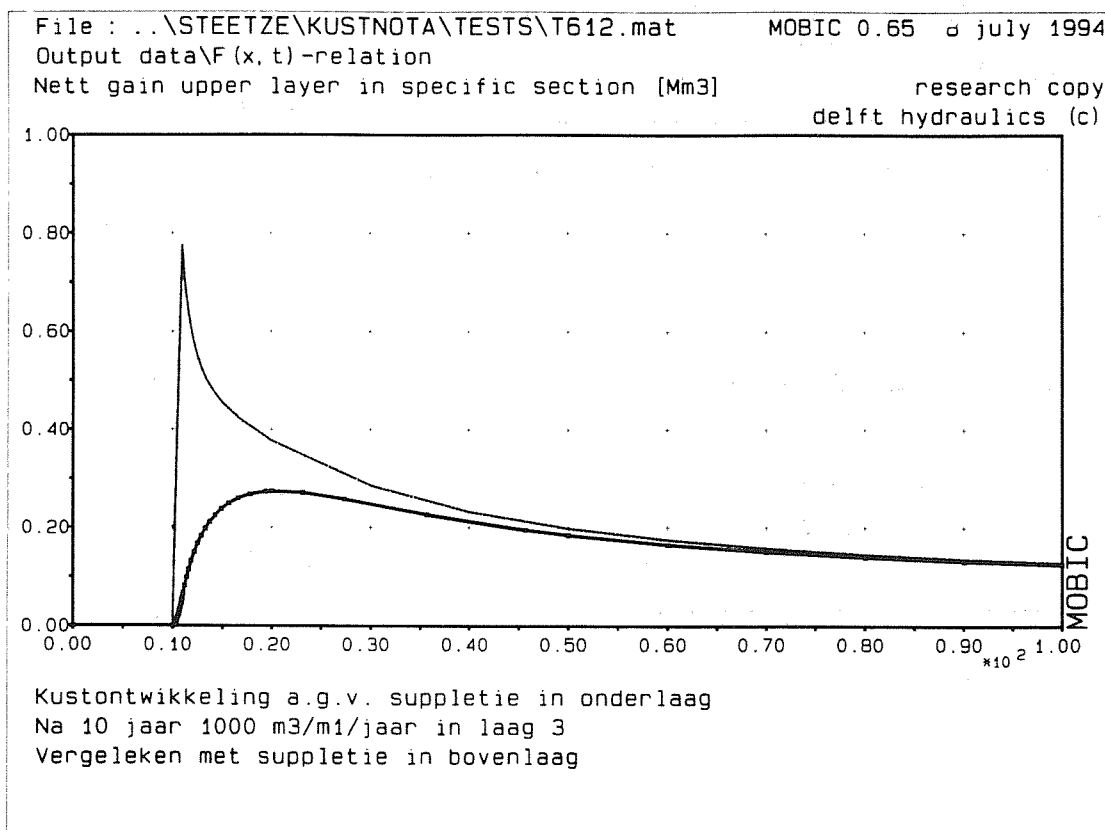
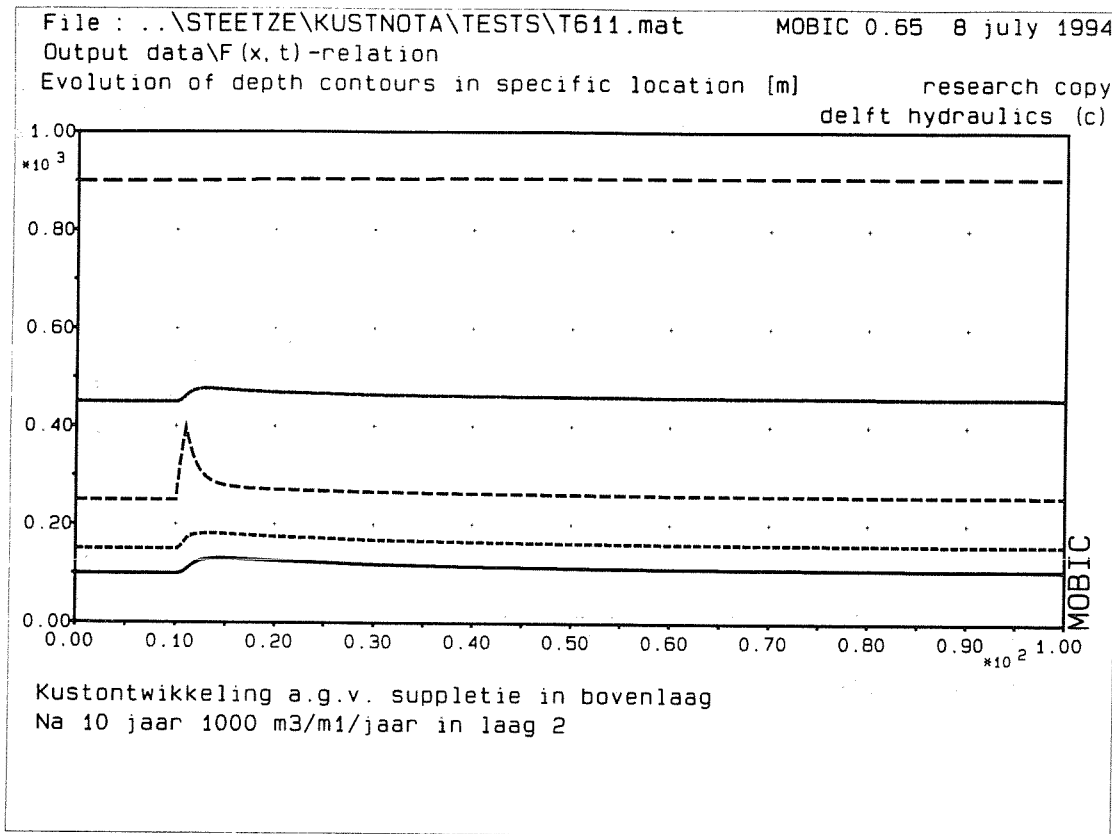
Plot118 : 0:\MOBIC\STEETZE\KUSTNOTA\TESTS\T586.PF2

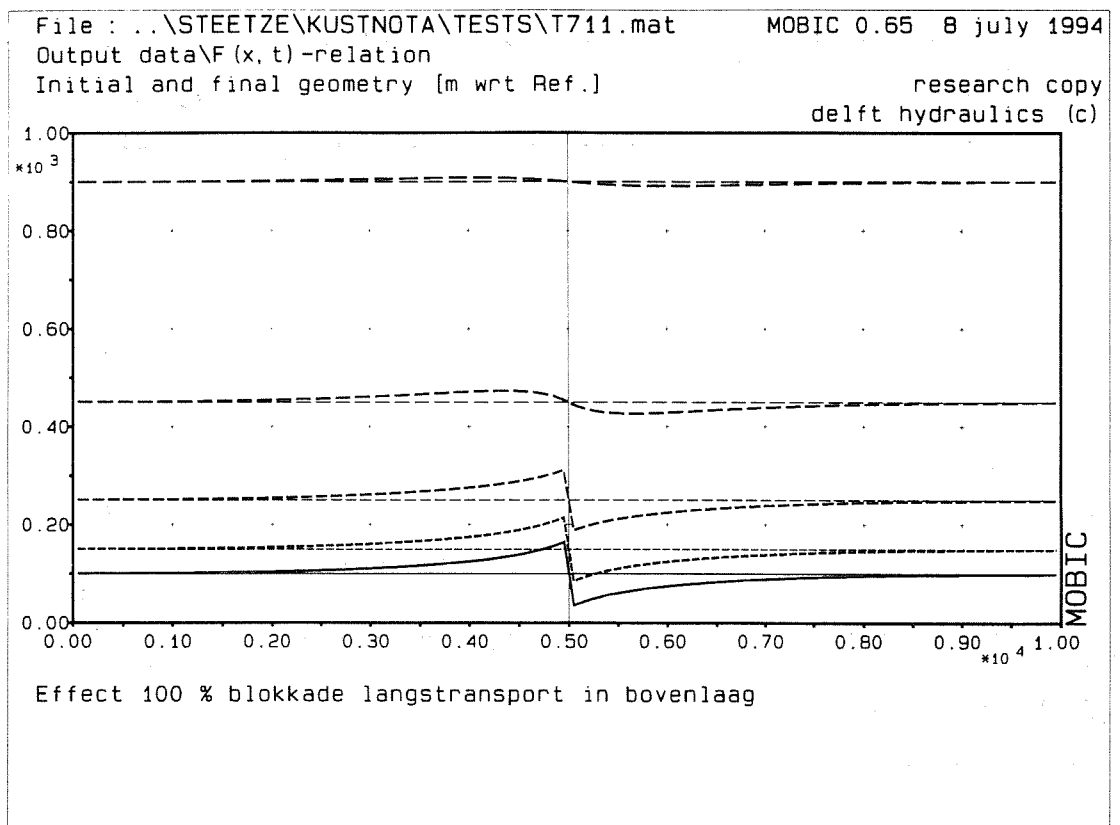
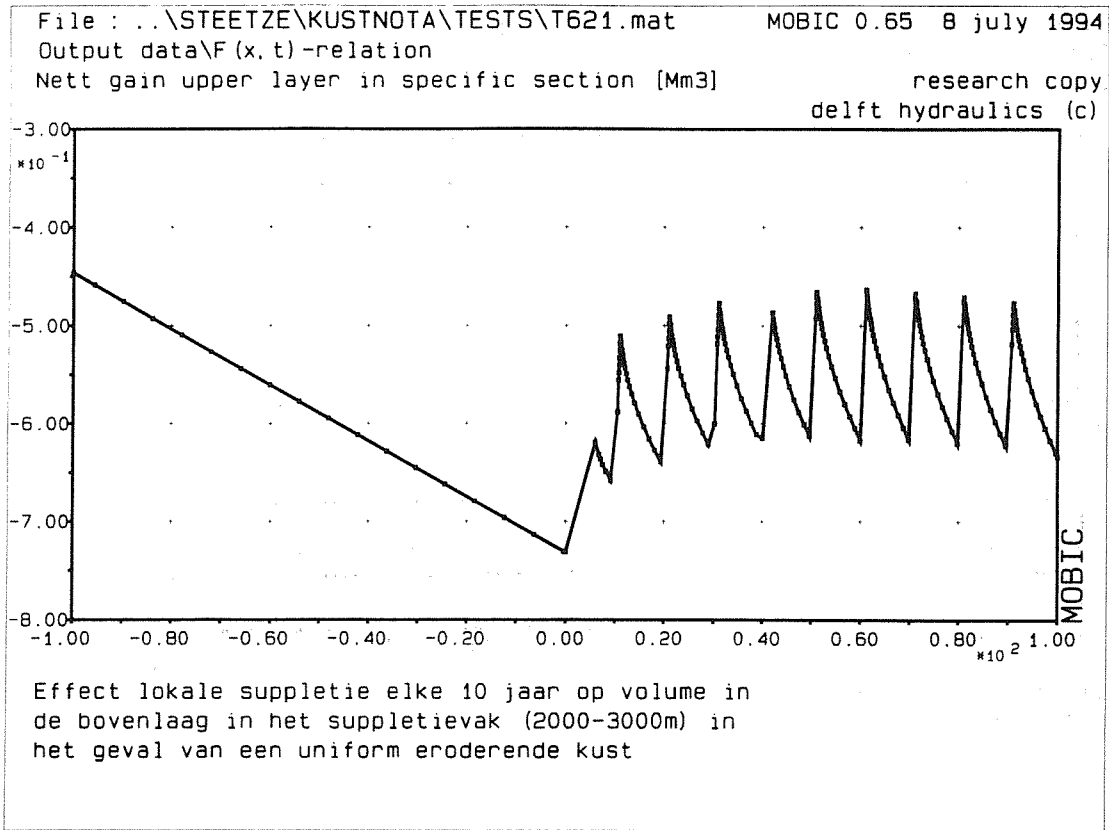


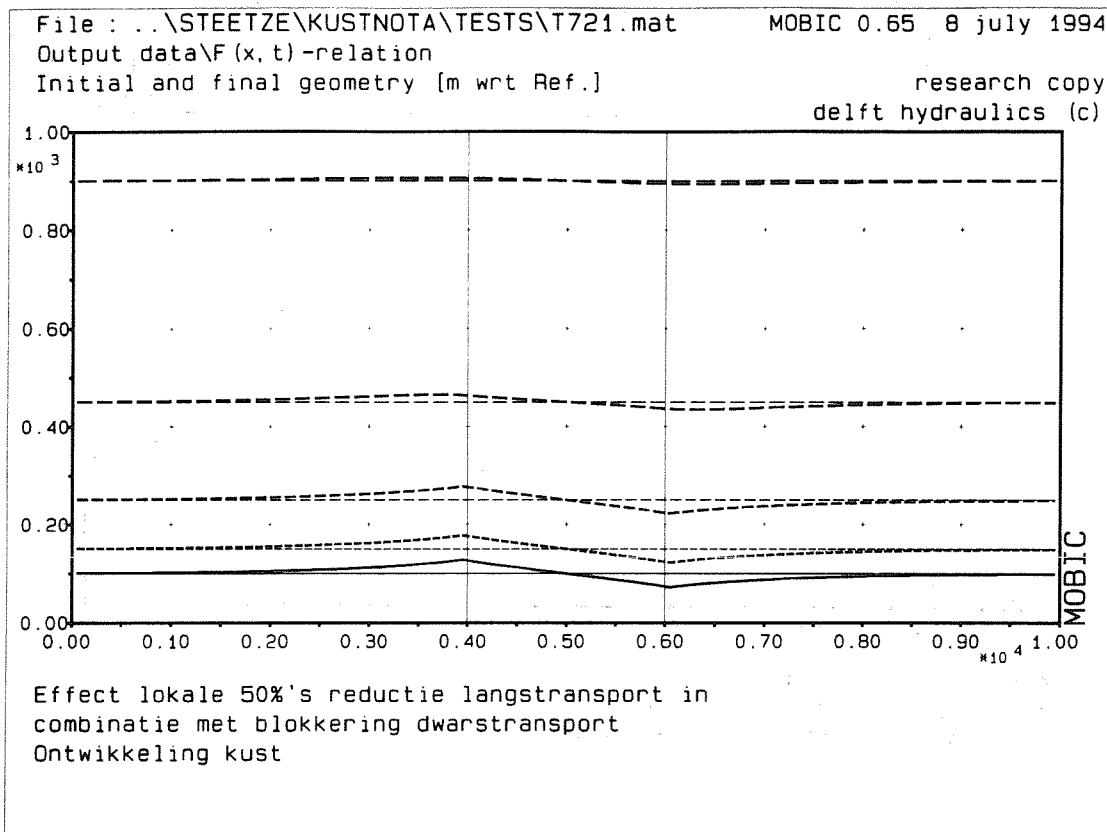
Plotfile : 0:\MOBIC\STEETZE\KUSTNOTA\TESTS\T592.PF2



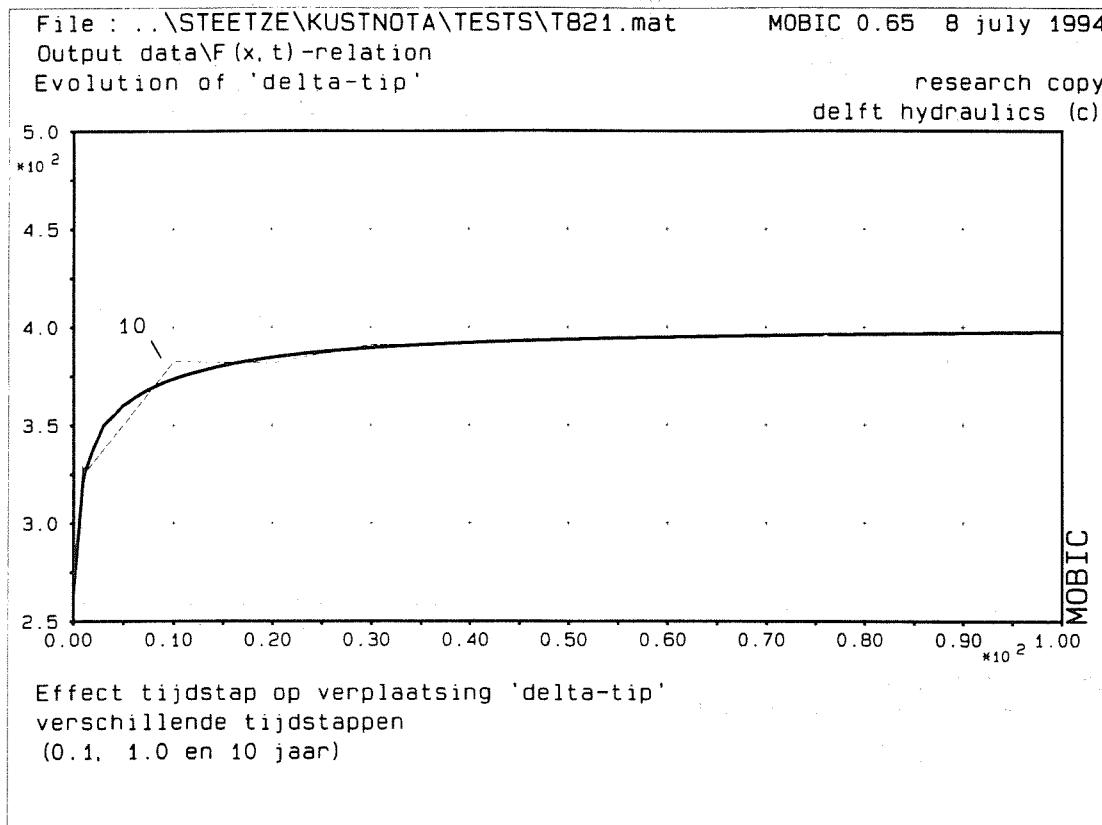
Plotfile : 0:\MOBIC\STEETZE\KUSTNOTA\TESTS\T611.PF1







Plotfile : G:\MOBIC\STEETZE\KUSTNOTA\TESTS\T721.PF1



Plotfile : G:\MOBIC\STEETZE\KUSTNOTA\TESTS\T821.PF2

