ministerie van verkeer en waterstaat

rijkswaterstaat

technisch rapport 10
zeezandwinning

kustverdediging na 1990

TECHNISCH RAPPORT 10 ZEEZANDWINNING

invloed op kustgedrag
een verkenning

"Het fraaie, schoone, grove Noordzeezand voor onze kust zou goed voor straat- en ophoogzand geschikt zijn. Ook beton- en metselzand is op niet te grooten afstand uit de kust wel te vinden. Moge de tijd komen, dat men dit zand en niet het duinzand gebruikt voor de behoeften van ons lage, moerassige land. Al mag een verarming onzer voorkust niet gunstig zijn, er ligt zooveel zand, dat het verlies van eenige millioenen m^3 door wegbaggering nauwelijks zou meetellen, vooral indien dit op eenigen afstand uit de kust geschiedde."

(Joh. van Veen, 1937)

INHOUDSOPGAVE BLADZIJDE

HET KADER VAN DIT RAPPORT 5

SAMENVATTING 7

1. INLEIDING 13

2. PROBLEEMSTELLING 15

3. BESCHRIJVING HUIDIGE SITUATIE 21

3.1 Processen in de kustzône 21
3.2 Morfologie van de Nederlandse kust 21
3.3 Zandvoorkomens 23
3.4 Kennis en modellen 23

4. AANPAK VAN HET ONDERZOEK 25

5. AUTONOME ONTWIKKELING VAN DE KUST 29

6. EFFECTEN WINNING IN VAARGEULEN -NUL PLUS ALTERNATIEF- 31

6.1 Algemeen 31
6.2 Effecten in de IJ-geul 32
6.2.1 Autonome morfologische ontwikkeling 32
6.2.2 Resultaten modelberekeningen 32
6.3 Effecten op de kust 33
6.3.1 Algemeen 33
6.3.2 Resultaten modelberekeningen 33
6.4 Samenvatting effecten winning in vaargeulen 36

7. EFFECTEN WINNING IN DE KUSTZONE 37

7.1 Algemeen 37
7.2 Resultaten uit andere bronnen 38
7.3 Directe morfologische effecten 39
7.4 Indirecte morfologische effecten 39
7.4.1 Scheveningen 39
7.4.2 Bergen 43
7.4.3 Texel en Ameland 45
7.5 Samenvatting effecten winning in de kustzône 47

8. CONCLUSIES EN AANBEVELINGEN 49

LITERATUUR 51

Bijlage 1: Begrippenlijst

Bijlage 2: Waterloopkundig Laboratorium
Zeezandwinning
Rapport H 825
Januari 1989

HET KADER VAN DIT RAPPORT

Dit rapport is een onderdeel van de studie die rond de discussienota "Kustverdediging na 1990" is uitgevoerd. Deze studie heeft in 1988 en 1989 plaatsgevonden. Hierin wordt een aantal alternatieve mogelijkheden ten aanzien van kustverdedigingsbeleid onderzocht en worden deze mogelijkheden naast elkaar gepresenteerd.

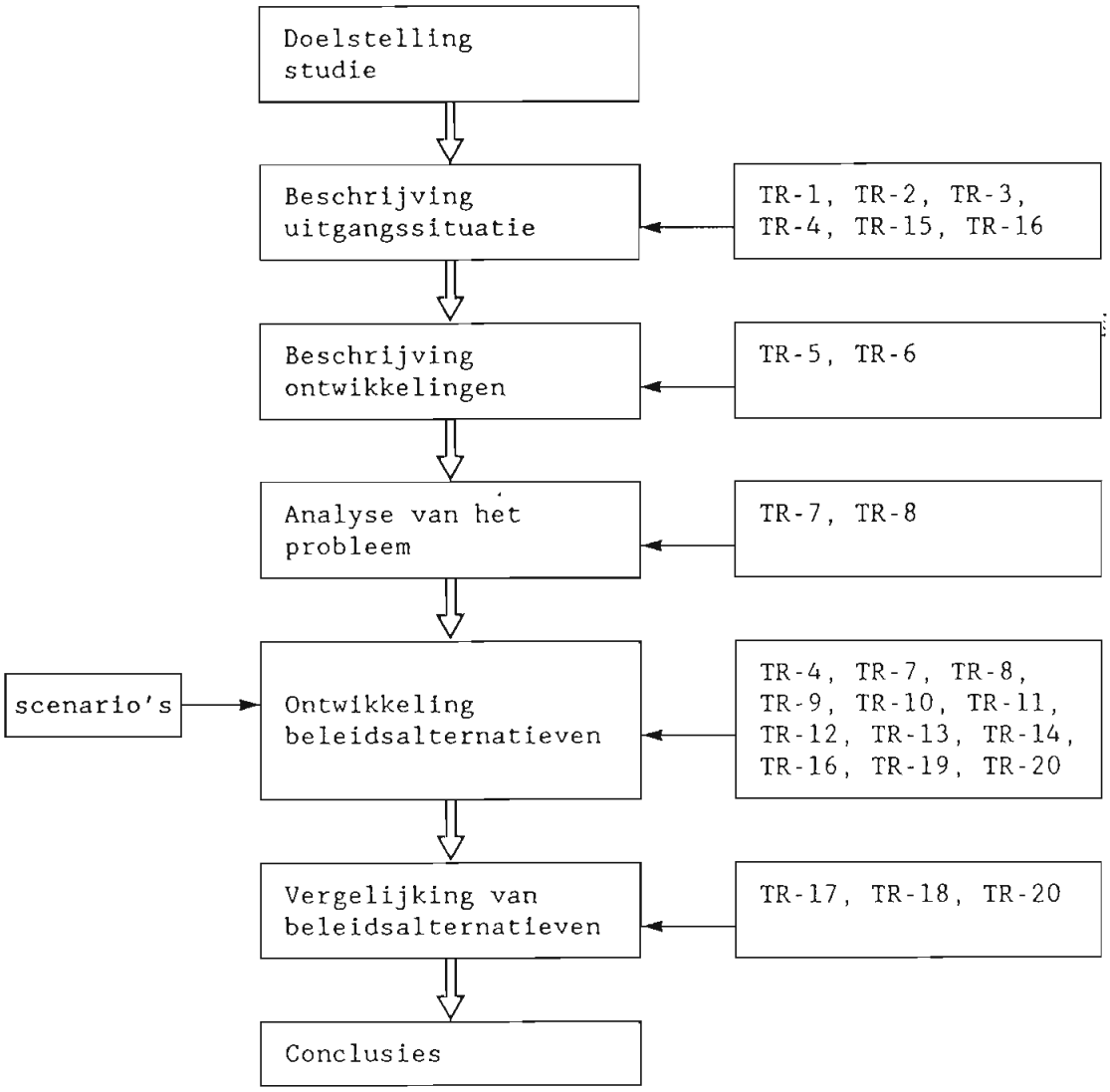
De beleidsanalytische studie vereist kennis over een groot aantal, soms nogal uiteenlopende aspecten van kustverdediging(sbeleid): kustgedrag, veiligheid van de duinenkust, voorspelling van kustgedrag, gebruiksfuncties in het duingebied en hoe deze te beoordelen, welke maatregelen zijn zinvol, etc. Al deze onderwerpen zijn in onderbouwende studies aan de orde gekomen en gerapporteerd in Technische Rapporten.
Het onderhavige rapport bevat de technische onderbouwing van een van de aspecten van de beleidsanalytische studie.

In onderstaand overzicht is een opsomming gegeven van alle Technische Rapporten die in dit kader zijn verschenen.

TR-0 Overzicht technische onderbouwing discussienota Kustverdediging;
samenvatting en conclusies van de uitgevoerde projecten.
TR-1 Zandsysteem kust
een morfologische karakterisering.
TR-2 Toestand kust 1990
kusttypering en kustligging
TR-3 Kustonderhoud
kosten van basisonderhoud.
TR-4 Inventarisatie duinfuncties.
TR-5 Kustvoorspelling
voorspelling ontwikkeling kustlijn 1990-2090.
TR-6 Zeespiegelrijzing
Hydro-meteo-scenario's.
TR-7 Duinen als waterkering
invloed van kustgedrag op veiligheid.
TR-8 Duinfuncties
invloed van kustgedrag
TR-9 Inventarisatie functies onderwateroever
interactie met kustverdediging.
TR-10 Zeezandwinning
invloed op kustgedrag; een verkenning.
TR-11 Strand- en duinsuppleties
effectiviteit en kosten.
TR-12 Strandhoofden en paalrijen
evaluatie werking.
TR-13 Grote civiele werken
invloed op kustgedrag.
TR-14 Onderwateroeversuppleties
een alternatieve kustverdedigingsmethode.
TR-15 Monitoring kustgedrag
huidige situatie en toekomstbeeld.
TR-16 Harde kustverdediging
zeedijken, havengebieden en strandmuren als waterkering

TR-17 Systeemanalytisch model
beschrijving computermodel.
TR-18 Berekeningsresultaten beleidsalternatieven
detailresultaten van computermodel.
TR-19 Innovatie van kustverdediging
inspelen op het kustsysteem.
TR-20 Zeewaartse kustverdediging
een globale uitwerking van enkele mogelijkheden.

De onderbouwende studies bestrijken het brede scala van onderwerpen dat met de beleidsanalytische studie van de kustverdediging samenhangt. De relatie met deze studie komt tot uitdrukking door bij de verschillende stappen aan te geven waar deze door een technisch rapport ondersteund worden. Dit is in onderstaand schema aangegeven.



SAMENVATTING

Zowel in het kader van de voorbereiding van de nota Kustverdediging als het Regionaal Ontgrondingenplan Noordzee wordt een grote behoefte aan Noordzeezand voorzien. Het betreft zand ten behoeve van erosiebestrijding van de kust (suppletiezand) en voor gebruik op land (vnl. ophoogzand). volgens het huidige beleid wordt dit zand zeewaarts van de 20 meter dieptelijn gewonnen. Voor winning in scheepvaartgeulen mag dichter onder de kust worden gewonnen. De vaarafstand is een belangrijke kostprijs verhogende factor van het te winnen zand. De vraag is of winning dichter onder de kust mogelijk is zonder dat het kustgedrag negatief wordt beïnvloed. In deze studie is dit voor een beperkt aantal locaties t.p.v. min of meer gesloten kustsecties nagegaan (Scheveningen, Bergen, Texel en Ameland). Tevens is het effect van zandwinning in de IJ-geul onderzocht. De effecten van het op grote schaal in tijd en ruimte onttrekken van zand uit de kustzône zijn in deze studie niet onderzocht. Aanzetten tot een dergelijk onderzoek zijn gegeven in Technisch Rapport 19 - innovatieve methoden van kustverdediging -.

De studie is in twee gedeelten gesplitst:
1. de beoordeling van de gevolgen van zandwinning op de kustlijn bij de vier locaties langs de kust;
2. onderzoek naar het effect op de kustlijn van zandwinning uit de IJ-geul.

In de studie onder 1. is sprake van een groot aantal variabelen, zoals het volume zand dat wordt gewonnen, de vorm van de winningskuil, e.d. Een model om de varianten op een vergelijkbare wijze door te rekenen is in dit geval dan ook onontbeerlijk. Daarnaast zijn resultaten uit de praktijk van min of meer vergelijkbare zandwinningen geëvalueerd.
De effecten worden vergeleken met de verwachte autonome ontwikkelingen van de kustlijn tot in het jaar 2030 (Technisch Rapport 5 - kustvoorspelling). Er is in deze studie uitgegaan van het feit dat op de betreffende locaties geschikt zand in voldoende mate aanwezig is.
Er is een set van varianten opgesteld die de totale range aan mogelijke variaties zo goed mogelijk vertegenwoordigt. Deze set is weergegeven in tabel 0.1. Hierbij kunnen grote volumes opgevat worden als de resultante van meerdere jaren een kleinere hoeveelheid onttrekken.

	Dimensies van de zandwinkuil				
Variant notatie	dieptelijn (m)	breedte (m)	lengte (m)	diepte (m)	volume (10^6 m^3)
10.1	10	100	2000	1	0,2
10.2	10	500	2000	1	1
16.1	16	100	2000	1	0,2
16.2	16	500	2000	1	1
16.3	16	1000	2000	5	10
16.4	16	1000	5000	2	10
20.1	20	1000	2000	5	10
20.2	20	1000	5000	2	10

Tabel 0.1. De mogelijke dimensies van de zandwinkuilen voor de 4 locaties, Scheveningen, Bergen, Texel en Ameland.

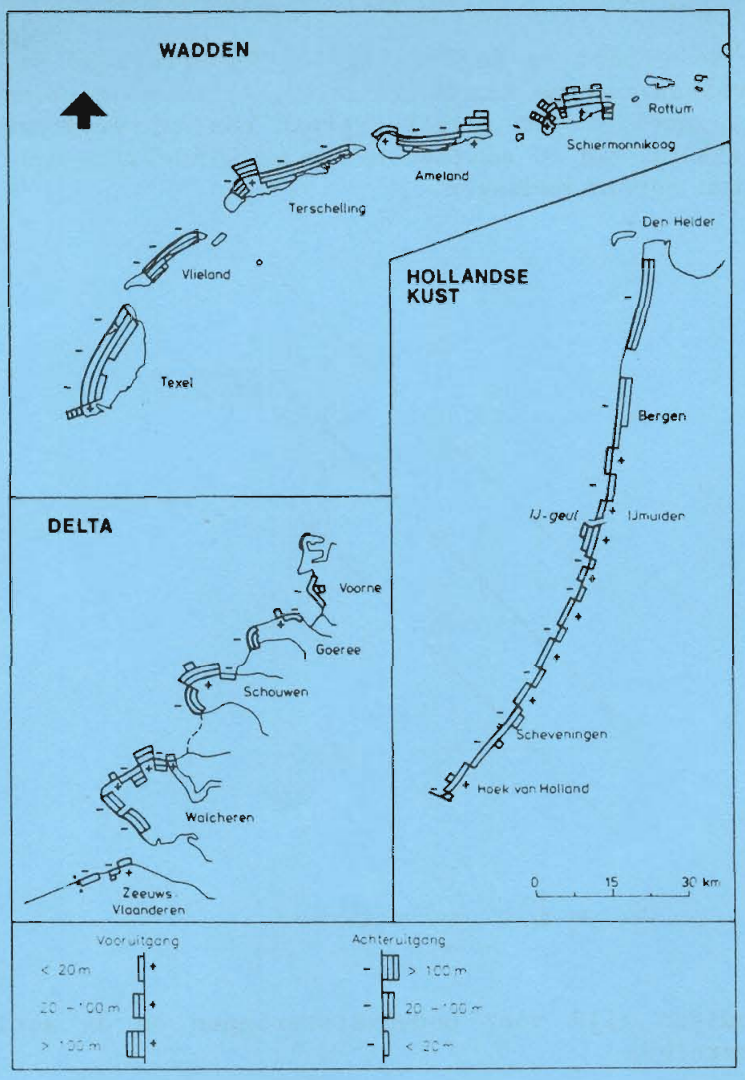
Vanwege de beperkingen van het dwarstransportmodel is gerekend tot de zeewaartse begrenzing van de zgn. actieve zône. Deze begrenzing valt min of meer samen met die van de brandingszône (vanaf de 10 tot 7 m dieptelijn). Als verstoringen deze zône bereiken is de invloed op de kustlijn binnen korte tijd merkbaar. De onderwateroever zeewaarts van de actieve zône wordt, overeenkomstig de analyses van de voorspellingen van het kustgedrag, verondersteld zich morfologisch anders te gedragen dan de actieve zône.

Voor de studie rond de IJ-geul is gebruik gemaakt van de middelen die voor het eerste deel van deze studie zijn ontwikkeld. Veldgegevens zijn gebruikt om de berekeningen te toetsen. Ook aspecten m.b.t. de mogelijke verandering in het benodigde onderhoud van de IJ-geul komen aan de orde.

In figuur 0.1 is de kustontwikkeling in het jaar 2030 (laagwaterlijn) t.o.v. 1990 weergegeven in het geval van 60 cm zeespiegelrijzing in 100 jaar. Voor alle beschouwde locaties is voor dit zgn. anticiperende scenario achteruitgang van de kust te constateren. Deze wordt van Zuid naar Noord groter: van enkele meters (Scheveningen) tot enkele honderden meters (Ameland). IJmuiden (IJ-geul) vormt daarop een uitzondering. De kustlijn verplaatst hier zeewaarts over enkele tientallen meters.

Winning zand uit de IJ-geul
Uit de modelberekeningen volgt dat het winnen van zand door het verdiepen en/of verbreden van de IJ-geul het lokale kustgedrag naar verwachting niet noemenswaardig beïnvloedt. Door verandering van het golfklimaat voor de kust ter weerszijden van de geul wijzigt het patroon van langstransport enigszins, doch dit beïnvloedt het kustgedrag slechts marginaal t.o.v. de invloed van de havendammen.
De aanzanding van de geul lijkt bij verbreding en vooral verdieping toe te nemen.

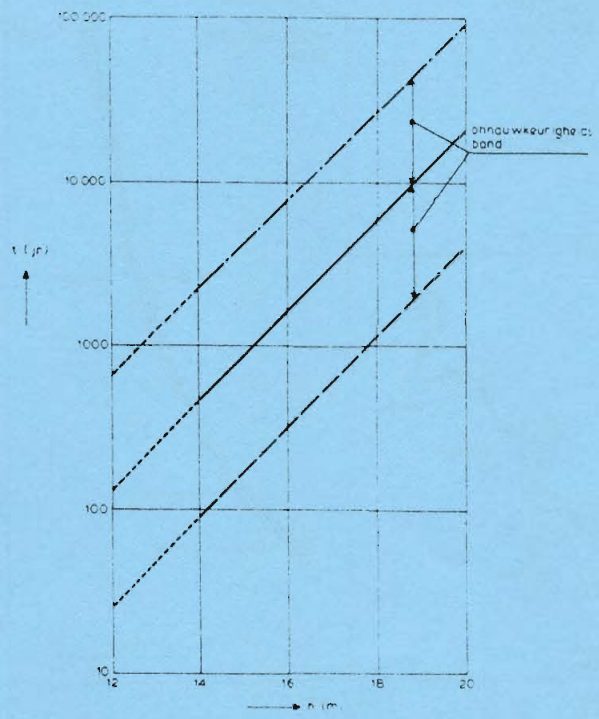
Winning zand uit de kustzône
De belangrijkste resultaten van dit onderdeel van de studie zijn, dat de directe beïnvloeding van de kustlijn door veranderingen van stroming en golven, marginaal is. Wel een belangrijk (indirect) effect is het kustwaarts verplaatsen van de zandwinkuil.
Als gevolg van het locaal veranderen van het stroomklimaat, treedt landwaarts van de kuil zowel sedimentatie als erosie op. Voor de winning op de 10 m dieptelijn is dit effect belangrijker dan op dieper water. Ook het evenwijdig aan de kust verplaatsen van de zandwinkuilen blijkt geen belangrijk effect te zijn. Deze resultaten komen hoofdzakelijk voort uit een modelstudie. De verandering van stroom- en golfklimaat bij de kustlijn zijn bepaald met 2-dimensionale modellen (WAQUA, HISWA). De morfologische veranderingen zijn benaderd met een tweetal 1-dimensionale modellen, nl. in de richtingen evenwijdig aan en loodrecht op de kust. 2-Dimensionale modellen die morfologische veranderingen kunnen berekenen over perioden van tientallen jaren bestaan (nog) niet. De morfologische veranderingen in langsrichting van de kust, berekend met langstransportmodel LOMOR, blijken, afgezien van enige afvlakking van de kuiltaluds, verwaarloosbaar te zijn.



Figuur 0.1 Kustligging 2030 bij 60 cm zeespiegelrijzing in 100 jaar.

De morfologische veranderingen loodrecht op de kust, berekend met het dwarstransportmodel CROSTRAN, zijn eveneens klein; maar vertonen, met name voor de 16 en 20 m dieptelijn varianten een systematische verplaatsing van de kuilen in kustwaartse richting, orde 1 m/jaar. De kustwaarts gerichte voortplantingssnelheden zijn gebruikt om de invloed van de zandwinkuilen op de kust te berekenen.
Het tempo van de kustwaartse verplaatsing is niet zozeer afhankelijk van grootte, diepte of vorm van de zandwinkuil, maar wel in belangrijke mate van de afstand van de zandwinkuil tot de kustlijn. Bijvoorbeeld: de verstorende invloed van een zandwinkuil op de 16 m dieptelijn bereikt in ongeveer 1000 jaar de actieve zône, zie figuur 0.2. De marge laat zien dat de onnauwkeurigheid rondom deze berekening vrij groot is. Voor de 16 m dieptelijn uit figuur 0.2 geldt dan een verplaatsingsduur van 500 - 10.000 jaar. Dergelijke voorspeltermijnen zijn uiteraard niet erg realistisch, maar geven wel een indruk van de tijdschalen die van belang zijn. De grote marges komen voornamelijk voort uit zowel de onnauwkeurigheid in de formules voor zandtransport als de formulering van de hydrodynamica bij de bodem.

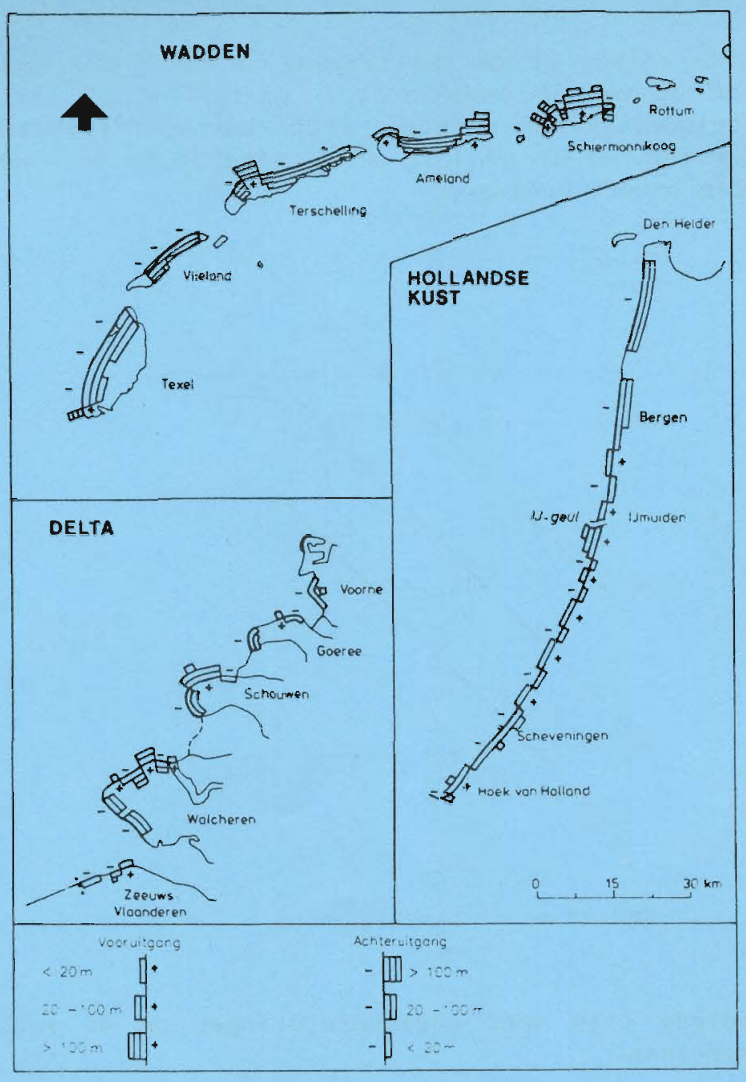
Het uiteindelijke effect op de kustligging is uiteraard wel afhankelijk van het volume van de zandwinkuil: relatief grote onttrekkingen veroorzaken uiteindelijk een relatief grote kustachteruitgang. Zo zal voor een onttrekking van 10 miljoen m^3 de uiteindelijke achteruitgang enkele tientallen meters bedragen.



Figuur 0.2 Benodigde tijd voor bodemverstoringen om de actieve zône te bereiken.

De wezenlijke effecten van zandwinkuilen op het kustgedrag zijn dus verplaatsing van de kuil met de invloedszône rond de kuil in de richting van de kust. Beide effecten zijn in tabel 0.2 voor de meest belangrijke varianten per locatie weergegeven.

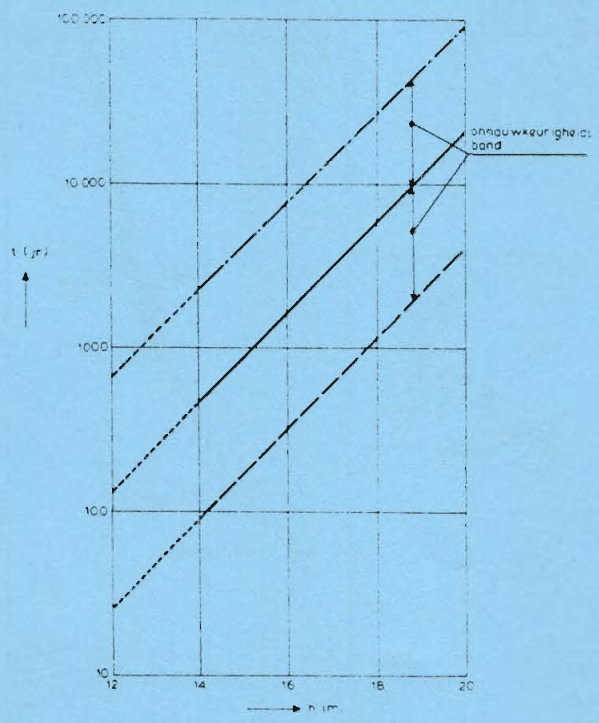
Op basis van de modelberekeningen volgt dat langs voor Scheveningen en Bergen naar verwachting binnen 200 jaar geen risico's verbonden zijn aan zandwinning zeewaarts van de 16 m dieptelijn, m.u.v. een 5 m diepe winning op de 16 m dieptelijn bij de locatie Bergen. Van winning tussen de 10 en 16 m dieptelijnen kan binnen de beschouwde periode beïnvloeding van de kustlijnontwikkeling niet worden uitgesloten.
Bij de resultaten voor de locaties Texel en Ameland moeten enige kanttekeningen worden geplaatst. Het modelconcept van CROSTRAN kan hier niet zonder meer worden toegepast. Het transport van zand in langsrichting speelt hier vermoedelijk een dusdanig grote rol, dat de ontwikkeling van het dwarsprofiel en de daaraan gekoppelde kustlijn niet enkel met een dwarstransportbenadering kan worden beschreven. De resultaten van tabel 0.2 voor Texel en Ameland moeten dan ook beschouwd worden als zeer indicatief. Wegens gebrek aan kennis omtrent het 2-dimensionale transportpatroon, onder andere onder invloed van de nabij gelegen zeegaten, kan vooralsnog geen uitspraak voor de kust van de



Figuur 0.1 Kustligging 2030 bij 60 cm zeespiegelrijzing in 100 jaar.

De morfologische veranderingen loodrecht op de kust, berekend met het dwarstransportmodel CROSTRAN, zijn eveneens klein; maar vertonen, met name voor de 16 en 20 m dieptelijn varianten een systematische verplaatsing van de kuilen in kustwaartse richting, orde 1 m/jaar. De kustwaarts gerichte voortplantingssnelheden zijn gebruikt om de invloed van de zandwinkuilen op de kust te berekenen.
Het tempo van de kustwaartse verplaatsing is niet zozeer afhankelijk van grootte, diepte of vorm van de zandwinkuil, maar wel in belangrijke mate van de afstand van de zandwinkuil tot de kustlijn. Bijvoorbeeld: de verstorende invloed van een zandwinkuil op de 16 m dieptelijn bereikt in ongeveer 1000 jaar de actieve zône, zie figuur 0.2. De marge laat zien dat de onnauwkeurigheid rondom deze berekening vrij groot is. Voor de 16 m dieptelijn uit figuur 0.2 geldt dan een verplaatsingsduur van 500 - 10.000 jaar. Dergelijke voorspeltermijnen zijn uiteraard niet erg realistisch, maar geven wel een indruk van de tijdschalen die van belang zijn. De grote marges komen voornamelijk voort uit zowel de onnauwkeurigheid in de formules voor zandtransport als de formulering van de hydrodynamica bij de bodem.

Het uiteindelijke effect op de kustligging is uiteraard wel afhankelijk van het volume van de zandwinkuil: relatief grote onttrekkingen veroorzaken uiteindelijk een relatief grote kustachteruitgang. Zo zal voor een onttrekking van 10 miljoen m^3 de uiteindelijke achteruitgang enkele tientallen meters bedragen.



Figuur 0.2 Benodigde tijd voor bodemverstoringen om de actieve zône te bereiken.

De wezenlijke effecten van zandwinkuilen op het kustgedrag zijn dus verplaatsing van de kuil met de invloedszône rond de kuil in de richting van de kust. Beide effecten zijn in tabel 0.2 voor de meest belangrijke varianten per locatie weergegeven.

Op basis van de modelberekeningen volgt dat langs voor Scheveningen en Bergen naar verwachting binnen 200 jaar geen risico's verbonden zijn aan zandwinning zeewaarts van de 16 m dieptelijn, m.u.v. een 5 m diepe winning op de 16 m dieptelijn bij de locatie Bergen. Van winning tussen de 10 en 16 m dieptelijnen kan binnen de beschouwde periode beïnvloeding van de kustlijnontwikkeling niet worden uitgesloten.
Bij de resultaten voor de locaties Texel en Ameland moeten enige kanttekeningen worden geplaatst. Het modelconcept van CROSTRAN kan hier niet zonder meer worden toegepast. Het transport van zand in langsrichting speelt hier vermoedelijk een dusdanig grote rol, dat de ontwikkeling van het dwarsprofiel en de daaraan gekoppelde kustlijn niet enkel met een dwarstransportbenadering kan worden beschreven. De resultaten van tabel 0.2 voor Texel en Ameland moeten dan ook beschouwd worden als zeer indicatief. Wegens gebrek aan kennis omtrent het 2-dimensionale transportpatroon, onder andere onder invloed van de nabij gelegen zeegaten, kan vooralsnog geen uitspraak voor de kust van de

Waddeneilanden worden gedaan omtrent de invloed van zandwinning.

Gegevens omtrent veldwaarnemingen op het gebied van beïnvloeding van de kustlijn door zandwinning zijn schaars. Uit metingen aan een zandwinkuil bij Scheveningen op de 19 m dieptelijn wordt de indruk gewekt dat deze kuil nauwelijks van plaats verandert, wat in ieder geval niet in tegenspraak is met de conclusies van de uitgevoerde modelberekeningen.

Varianten (zie tabel 0.1)	invloedszône reikt tot actieve zône	Verplaatsing tot actieve zône
Scheveningen		
10.1 en 10.2	+	+
16.1 en 16.2	-	-
16.3 en 16.4	-	-
20.1 en 20.2	-	-
Bergen		
10.1 en 10.2	+	+
16.1 en 16.2	-	-
16.3 en 16.4	+	+/-
20.1 en 20.2	-	-
Texel/Ameland		
10.1 en 10.2	+	+
16.1 en 16.2	-	-
16.3 en 16.4	+	+/-
20.1 en 20.2	-	-

Tabel 0.2 De effecten van de verschillende varianten van zandwinkuilen voor de vier kustlocaties; berekeningsperiode 200 jaar. (+ = wel effect; - = geen effect)

Een studie aan de Atlantische kust - Golf van Biskaje - komt tot de aanbeveling zandwinning te doen plaatsvinden zeewaarts van de 20 m dieptelijn. Rekening houdend met het indicatieve karakter van de uitkomsten van deze studie sluit dit redelijk aan. Het levert echter geen materiaal op om de modelresultaten te toetsen. Relevante gegevens ter verificatie van de modelresultaten worden dan ook node gemist.

Uit de studie van Technisch Rapport 14 kan geconcludeerd worden dat gesuppleerd zand vnl. in de actieve zône blijft en als zodanig de negatieve effecten van zandwinning enige tijd kan compenseren, uiteindelijk verdwijnt het zand door overwegend langstransport naar aanliggende kustvakken.

Gezien de beperkingen van de gehanteerde modellen kunnen bovengenoemde resultaten nog niet leiden tot een verandering van het beleid t.a.v. de grens zeezandwinning. Immers omdat de werkelijke processen d.m.v. deels gevalideerde modellen zijn geschematiseerd zijn de resultaten louter kwalitatief. Een practijkproef met aansluitend een intensief meetprogramma is hiertoe een essentiële voorwaarde. Overigens dient voor een definitieve beleidswijziging ook een brede belangenafweging plaats te vinden. Deze wordt uitgevoerd in het Regionaal Ontgrondingenplan Noordzee dat in 1990 gereed zal zijn voor inspraak en besluitvorming.

1. INLEIDING

Het vigerend beleid met betrekking tot zeezandwinning staat de winning van zeezand alleen toe zeewaarts van de 20 m dieptelijn. Een uitzondering wordt gemaakt bij winningen uit toegangsgeulen en bij winningen ten behoeve van strandsuppleties. De gedachte die aan dit beleid ten grondslag ligt is dat bij winning dichter onder de kust de zeewering gevaar kan lopen.

De komende jaren wordt een toename verwacht van de winning van oppervlaktedelfstoffen[1] uit de Noordzee[2], met name ten behoeve van de ophoogzandvoorziening. Dit volgt uit het regeringsbeleid met betrekking tot de oppervlaktedelfstoffen-voorziening, zoals beschreven in lit. 1, 2 en 3. Er is daarom behoefte om onderzoek uit te voeren naar de invloed van zeezandwinning uit de kustzone op het morfologisch evenwicht van de kuststrook (actiepunt 42, lit. 1).
Dit onderzoek is momenteel in tweeërlei opzicht actueel:

- in het kader van de thans in voorbereiding zijnde (nieuwe) Ontgrondingenwet wordt een Regionaal Ontgrondingenplan Noordzee (R.O.N.) opgesteld. Hierin wordt, op basis van een maatschappelijk verantwoorde belangenafweging, aangegeven waar en onder welke voorwaarden de winning van oppervlaktedelfstoffen op de Noordzee toegestaan is. Belangrijk in dit verband is de milieu-effect rapportage die op dit RON van toepassing is. De richtlijnen van deze MER schrijven voor dat er aandacht moet worden besteed aan de kustmorfologische effecten van winning in de kuststrook.
- In het kader van de thans in voorbereiding zijnde Wet op de Waterkeringen wordt de Nota Kustverdediging opgesteld. In deze nota wordt het Rijksbeleid m.b.t. de verdediging van de zandige Noordzeekust verwoord vanuit een totaalvisie op de ontwikkeling en het functioneren van de kust als zeewering in relatie tot de eisen en wensen vanuit de maatschappij. De winning van zeezand in de kuststrook is, zoals boven beschreven, één van deze wensen. Met name omdat het kustverdedigingsbeleid in de toekomst voor een belangrijk deel gebaseerd zal zijn op het suppleren van terugschrijdende kustvakken.

Geconstateerd kan worden dat bovengenoemde wetten en de bijbehorende nota's, weliswaar elk vanuit zijn eigen specifieke invalshoek, de grens zeezandwinning als een gemeenschappelijk aandachtspunt hebben. Het voorliggende Technisch Rapport "Zeezandwinning" is opgesteld met als doel een antwoord te geven op de gemeenschappelijke vraagstelling:

"hoe dicht onder de kust mag hoeveel zand gewonnen worden zonder dat er nadelige effecten op de kustlijn optreden?"

Deze vraagstelling wordt in hoofdstuk 2 nader uitgewerkt. De opbouw van de rest van het Technisch Rapport is zoveel mogelijk afgestemd op

---

[1] onder oppervlaktedelfstoffen wordt in dit verband verstaan zeezand voor de toepassing als beton- en metselzand, ophoogzand of suppletiezand

[2] onder de Noordzee wordt in dit verband verstaan het Nederlands deel van het Continentaal Plat inclusief de territoriale wateren.

de richtlijnen van de MER: de huidige situatie wat betreft kennis en modellen en de aanpak en beperkingen van het onderzoek worden behandeld in de hoofdstukken 3 en 4; de autonome ontwikkeling van de kuststrook (nul alternatief) wordt beschreven in hoofdstuk 5; de effecten van de winning uit vaargeulen (nul-plus alternatief) en uit de kustzône komen aan de orde in respectievelijk hoofdstuk 6 en 7. Hoofdstuk 8 bevat de conclusie en aanbevelingen.

Voorliggend Technisch Rapport is opgesteld door ir. C.J. Louisse en ir. F.P. Hallie van Rijkswaterstaat, Dienst Getijdewateren en drs. J. van Alphen (projectleider) van Rijkswaterstaat, Directie Noordzee. De beleidsmatige uitspraken van dit Technisch Rapport (hoofdstuk 8 en samenvatting) zijn gebaseerd op onderzoek dat in opdracht van Rijkswaterstaat is uitgevoerd door dr. ir. J.S. Ribberink en ir. J.A. Roelvink van het Waterloopkundig Laboratorium. De rapportage van dit onderzoek is bijgevoegd als bijlage 2. Hoofdstuk 6 en 7 vormen met uitzondering van §7.2 een verkorte weergave van deze rapportage.
In dit Technisch Rapport is het commentaar verwerkt van Rijkswaterstaats-medewerkers van de Hoofddirectie, de Dienst Getijdewateren en Directie Noordzee en van twee externe deskundigen (prof. dr. J.H.J. Terwindt, Rijksuniversiteit Utrecht; ir. H. Postma, Boskalis).

2. PROBLEEMSTELLING

Het beheer van de zandige kust is primair gericht op het in stand houden van de zeewerende functie. De kennis over de zandtransportprocessen in dit gebied, welke voor een maatschappelijk verantwoord beheer onontbeerlijk is, is momenteel echter nog sterk in ontwikkeling en voornamelijk kwalitatief van aard. Verondersteld wordt dat de zeewering hoofdzakelijk in stand gehouden wordt door golfgedreven landwaarts gericht zandtransport. Uit indicatieve modelberekeningen uit het verleden volgde dat dit transport vanaf de 16 m dieptelijn op jaarbasis belangrijk kan worden. De winning van zeezand in de kuststrook kan op verschillende wijzen interveniëren met dit dwarstransport:

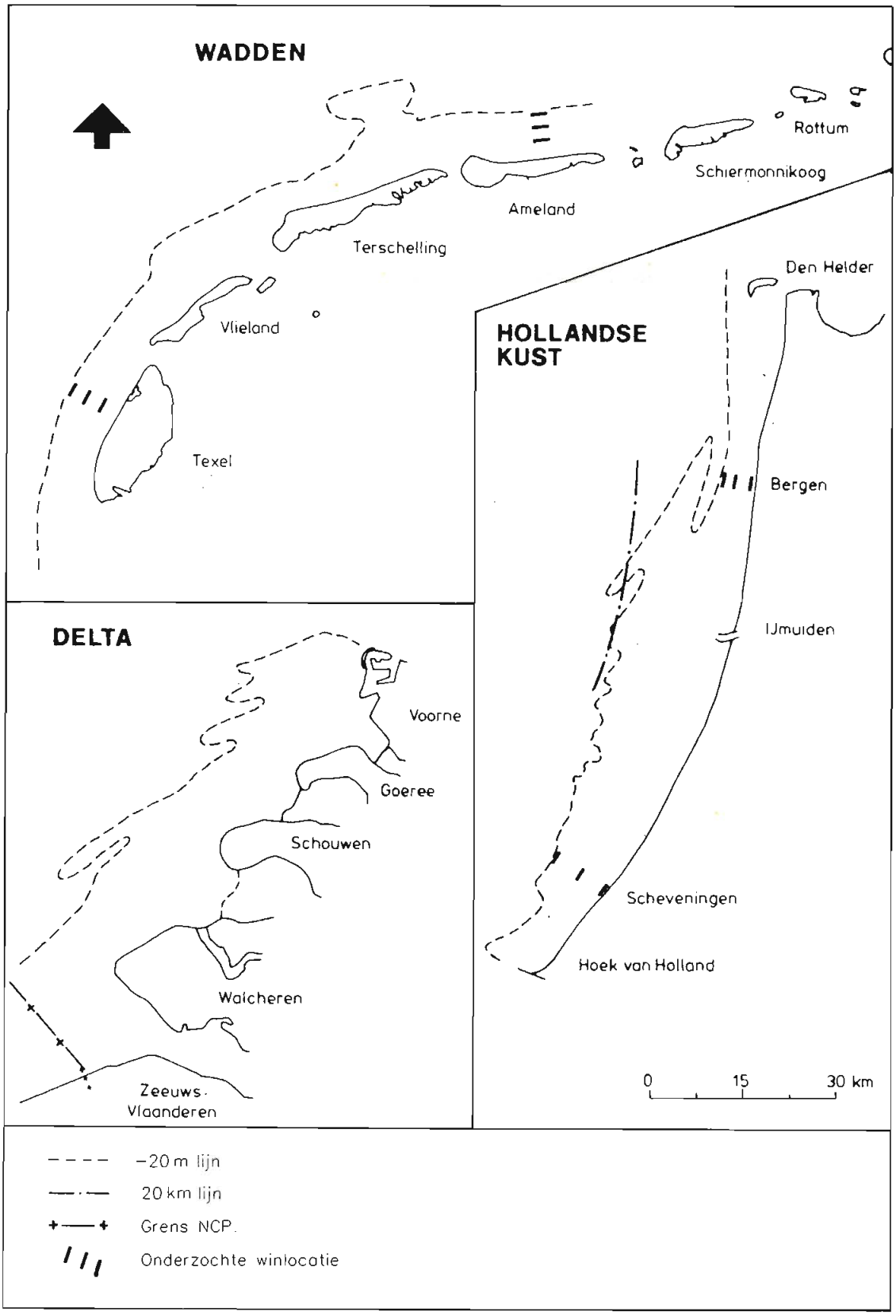
- door de aanleg van een kuil kunnen golf- en stromingscondities zich wijzigen waardoor de kustlijn negatief beïnvloed kan worden - directe beïnvloeding -;
- het onttrekken van zand uit de zeebodem leidt later tot tekorten elders en mogelijk, op termijn, tot kustachteruitgang, bijvoorbeeld als de kuil de kustlijn bereikt - indirecte beïnvloeding -.

Het is vanuit deze achtergrond dat in het vigerende kustbeleid zeezandwinning alleen toegestaan wordt als deze plaatsvindt zeewaarts van de 20 m dieptelijn, of, indien deze verder uit de kust ligt dan 20 km, zeewaarts van de 20 km lijn (zie figuur 2.1).
Uitzonderingen op dit beleid zijn mogelijk indien de winning wordt uitgevoerd in een vaargeul of ten behoeve van een suppletie. Met betrekking tot het laatste wordt verondersteld dat het gewonnen materiaal "in het systeem" blijft en dus niet tot tekorten elders leidt.
Het regeringsbeleid is erop gericht de zeezandwinning zoveel mogelijk te combineren met het onderhoud en/of verdieping van de toegangsgeulen naar Rotterdam en IJmuiden. Momenteel gaat het hierbij om hoeveelheden van ca. 2 miljoen m^3/jaar, welke voornamelijk gewonnen worden uit de IJ-geul. Tot op heden kan op deze wijze in voldoende mate voorzien worden in de behoefte aan zeezand uit de IJ-geul.
Incidenteel is er in verband met suppleties behoefte aan zandwinning buiten de geulen. Het gaat hierbij om enige miljoenen m^3 per jaar. Uit het concept Regionaal Ontgrondingenplan Noordzee volgt dat in de toekomst met name een toenemende behoefte in zeezandwinning ten behoeve van de ophoogzandvoorziening wordt verwacht (tabel 2.1).

Noord-Holland:	~ 5	(schatting tot 1998)
Zuid-Holland:	5 à 10	(tot 1990, daarna meer)
Zeeland:	0	(op lange termijn meer)
Vervanging IJssel-meergebied	max. 12	(1989-1998, afhankelijk van beleidskeuze)

Tabel 2.1 Verwachte behoefte aan ophoogzand uit zee (10^6 m^3/jaar).

De verwachte behoefte aan suppletiezand bedraagt enige miljoenen (orde 5) m^3 per jaar (exclusief landuitbreiding).



Figuur 2.1 Grenzen volgens het huidige zandwinbeleid.

Omdat het materiaal dat vrijkomt bij het geulonderhoud ontoereikend is voor het voorzien in de geraamde behoeftes dient verruiming van het bestaande geulontwerp overwogen te worden of winning buiten de geulen. Verruiming heeft de voorkeur omdat hierbij in de regel de vaarafstand naar de overslagplaats (haven) minder is dan bij winning buiten de vaargeul en voorts omdat bij verdieping van de geul de lodingsbehoefte kan verminderen.
Zandwinning ten behoeve van suppleties zal in de regel zo dicht mogelijk bij het suppletiegebied gesitueerd worden, hetgeen meestal niet tot winning in een vaargeul leidt. Met het oog op de toekomst zijn de belangrijkste vragen dus:

- hoeveel zand kan gewonnen worden uit bestaande vaargeulen zonder dat een zodanige situatie ontstaat dat de kustlijn achteruit gaat (bijvoorbeeld door veranderd golfklimaat)?
- waar kan hoeveel suppletiezand gewonnen worden zonder dat hierdoor de kustlijn achteruit gaat?

In het concept Regionaal Ontgrondingenplan Noordzee is deze vraagstelling als volgt uitgewerkt:

a. de doorwerking van winningen (snelheid, mate van verandering) in stroomgedomineerde en golfgedomineerde gebieden naar de kustlijn, met als speciale aandachtspunten:
   1. de effecten van een gespreide ondiepe winning op het golfklimaat;
   2. de effecten van een veranderd golfklimaat op het gedrag van de kustlijn bij een (grootschalige) verbreding van scheepvaartgeulen;
   3. de uit oogpunt van een veranderd golfklimaat maximaal toelaatbare hoeveelheid te winnen oppervlaktedelfstoffen uit zeegaten.
b. de mate waarin effecten afhankelijk zijn van de winningsomvang en de winlocatie langs de kust (verhouding winning -natuurlijk zandtransport, ter bepaling van het herstellend vermogen).
c. het al dan niet weer op termijn aan het hydromorfologisch systeem ten goede komen van gesuppleerd materiaal.
d. de maximaal toelaatbare verdieping en het maximaal toelaatbare oppervlak van een gespreide ondiepe winning.
e. het effect van lokaal geconcentreerde diepe winningen op de stabiliteit van de kusthelling, waarbij aandacht voor de maximaal toelaatbare hellingshoek van winputtaluds in de kuststrook.

Vanwege de beschikbare tijd en financiën zijn bij het concretiseren van deze vragen in een onderzoeksopdracht prioriteiten gesteld. Hierbij golden de volgende overwegingen:

- er kan alleen gebruik gemaakt worden van bestaande modellen met eventueel eenvoudige uitbreidingen. Het beschouwen van relatief complexe morfologische situaties (Voordelta, Maasgeul, zeegaten tussen Waddeneilanden) is daarom niet mogelijk.
- of er diepe winningen (>5 m) uitgevoerd worden hangt sterk af van het feit of het gewenste materiaal ook op grotere diepte voorkomt. Vooralsnog is de kennis over afzetting dieper dan 5 m zeer beperkt. Omdat diepe putten ongewenst zijn vanuit het oogpunt van bodemvisserij en verandering van de bodemsamenstelling door slibsedimentatie, is dit soort winningen in de onderhavige studie buiten beschouwing gelaten.

De overblijvende vragen (a1, a2, b, c en d) zijn geconcretiseerd door de invloed te laten berekenen van verschillende winalternatieven op de kustlijn. Hierbij dienen de volgende opmerkingen gemaakt te worden:

- ten aanzien van zandwinning in geulen is, gezien de complexiteit van de problematiek, gekozen voor de geul met de minst ingewikkelde geometrie en hydrodynamica: de IJ-geul. Winalternatieven zijn opgesteld in overleg met de afdeling Baggerwerken en Vaargeulen van directie Noordzee. Hierbij is ten opzichte van de oorspronkelijke vraagstelling de vraag toegevoegd hoe de aanzanding van de geul verandert onder invloed van het nieuwe ontwerp;
- voor winning uit de kustzône zijn vier locaties gekozen, waarvan de ligging is afgestemd op de op korte termijn te verwachten behoefte aan suppletiezand (Scheveningen, Bergen, Texel en Ameland). Er is hierbij uitgegaan van het feit dat op de betreffende locaties geschikt zand in voldoende mate aanwezig is;
- om bij winning in de kuststrook inzicht te krijgen in de effecten van de afstand uit de kust zijn locaties voorgesteld bij een waterdiepte van 20 m (huidige beleid) en 10 m (extreme variant). Om aan te kunnen geven of een beperkte landwaartse verplaatsing van de huidige grens zeezandwinning mogelijk is, is een tussenvariant op de 16 m dieptelijn gecreëerd;
- onmiddellijk zeewaarts van de kustlijn ligt een zeer dynamische zône met brandingsruggen, de zgn. actieve zône. Omdat deze actieve zône een snelle respons geeft op de morfologische veranderingen die er in plaatsvinden, is m.n. relevant hoe de zeewaartse grens van deze zône reageert op morfologische veranderingen buiten deze zône. De overgang van deze actieve zône naar de minder actieve zône vindt geleidelijk plaats tussen de 10 en 7 m dieptelijn.
- om bij winning in de kuststrook inzicht te krijgen in de effecten van oriëntatie en geometrie van de winning zijn, in overleg met de afdeling Baggerwerken en Vaargeulen van directie Noordzee, alternatieven opgesteld waarbij rekening gehouden wordt met realistische hoeveelheden en technische uitvoerbaarheid. Een kuil met een volume van 10 miljoen m^3 representeert hierbij de kuil die ontstaat na het winnen op dezelfde plaats van een kleine hoeveelheid gedurende meerdere jaren.

Eén en ander heeft geleid tot de volgende varianten:

Verdieping m	breedte m	volume[1] 10^6 m^3
0	500	huidig
0	1000	3,5
0	2000	9,0
5	500	25,0
5	2000	84,0

Tabel 2.2 Rekenvarianten winning uit vaargeulen.

---

[1]Volume dat vrijkomt bij verdieping en/of verbreding van de eerste 10 km van de IJ-geul, exclusief (eventueel toegenomen) onderhoud.

Locatie dieptelijn	hoeveelheid (10^6 m^3/jr)	lengte (km)	breedte (km)	diepte (m)
20 m	10	2	1	5
	10	5	1	2
16 m	0,2	2	0,1	1
	10	2	1	5
	1	2	0,5	1
	10	5	1	2
10 m	0,2	2	0,1	1
	1	2	0,5	1

Tabel 2.3 Karakterisering varianten winning in de kustzône.

Voor Scheveningen, Bergen, Texel en Ameland zijn dezelfde varianten doorgerekend.

Verder gelden de volgende beperkingen:
- de studie geeft inzicht in de lokale effecten van zandwinning, eventuele effecten op grotere schaal zijn niet onderzocht. De resultaten zijn niet zonder meer te vertalen naar effecten geldig langs de hele Nederlandse kust. Dit onderwerp komt aan de orde in Technisch Rapport 19 - Innovatie van kustverdediging -;
- er wordt in deze studie geen aandacht besteed aan de wisselwerking tussen het winnen van zeezand en het (tegelijkertijd) suppleren van zand in de actieve zône. Dit onderwerp komt aan de orde in Technisch Rapport 14 - onderwateroeversuppleties -;

3. BESCHRIJVING HUIDIGE SITUATIE

3.1 Processen in de kustzône

Het uitgevoerde onderzoek geeft inzicht in wat de gevolgen zijn voor het kustsysteem van zandwinning binnen de 20 m dieptelijn c.q. 20 km grens. Het is daarvoor van belang om de processen in ons kustsysteem goed te kennen.
In de Nederlandse situatie zijn stroming en golfwerking in het algemeen de belangrijkste processen. Buiten de actieve zône is de stroming voornamelijk getijgeïnduceerd waardoor globaal een evenwijdig aan de kust gerichte heen- en weergaande water- en sedimentverplaatsing optreedt. Aan de bodem kunnen hierbij stroomsnelheden optreden van 0,3 tot 0,5 m/sec.
Door dichtheidsverschillen heeft de stroming een kleine netto landwaarts gerichte component aan de bodem, welke door de wind versterkt of verzwakt kan worden. Met name onder stormomstandigheden kan deze dwarscomponent van belang zijn omdat door golven opgewervelde materiaal dan over grote afstanden dwars op de kust verplaatst kan worden.
In de aktieve zône is het sedimenttransport voornamelijk golfgedomineerd. Enerzijds wordt door de oscillerende golfbeweging, welke hier de bodem beroert, materiaal opwerveld. Onder rustige weersomstandigheden leidt de asymmetrie in de golfbeweging hierbij tot kustwaarts transport, tijdens stormen kan het omgekeerde optreden door sterke zeewaarts gerichte onderstromen. Anderzijds wekken de invallende golven een langs de kust gerichte stroming op welke ook tot sedimenttransport leidt, de zogenaamde littoral drift.
Op dit moment is er nog weinig bekend over de uitwisseling van sediment tussen de getijgedomineerde zône en de aktieve (golfgedomineerde) zône. De overgang tussen beide vindt globaal plaats tussen de 10 en 7 m dieptelijn.

Een eerste schatting van de zandhuishouding van het kustsysteem kan worden gegeven aan de hand van de analyse van de kustlijngegevens en de kustlodingen. Het geeft een beeld van zowel vooruitgang als achteruitgang van de kust. De totale balans is echter negatief, we verliezen per jaar 5 à 6 * 10^6 m^3 zand netto langs de hele kust (lit. 5). Plaatselijk kunnèn er grote verschillen optreden. In Technisch Rapport 2-Toestand kust 1990 - wordt een verbeterde zandbalans gepresenteerd. Op moment van druk van voorliggend rapport was deze nog niet beschikbaar.

3.2 Morfologie van de Nederlandse kust

Op basis van een morfologische typering is de Nederlandse kust te onderscheiden in drie wezenlijk verschillende regio's:
- de Delta (Belgische grens - Hoek van Holland);
- de Hollandse kust (Hoek van Holland - Den Helder);
- de Wadden (Den Helder - Duitse grens).

Delta

De Delta staat de laatste jaren sterk onder invloed van een aantal ingrepen in het kustsysteem. Door de uitvoering van de Deltawerken zijn een aantal zeegaten afgesloten. Deze verkorting van de kustlijn heeft grote morfologische consequenties. De diepe getijgeulen worden opgevuld met sediment en door sterke reductie van de in- en uitgaande getijstromingen wordt door golfwerking sediment van de diepere buitendelta naar het ondiepere kustgebied getransporteerd. De vooroever van de buitendelta erodeerde tussen de -9 m en -4 m dieptelijn. Hierdoor ontstaan de kustparallelle banken en wordt het gebied landwaarts van globaal de -4 m dieptelijn opgevuld. Hoe deze Voordelta zich in de toekomst gaat ontwikkelen is momenteel onderwerp van studie.
De complexe ontwikkelingen in de Voordelta en de relatief beperkte kennis van de veranderingsprocessen zijn aanleiding om het Deltagebied buiten de beschouwing van het onderzoek naar de grens zeezandwinning te laten. Afhankelijk van de resultaten van het onderzoek kan een terugkoppeling naar de Delta plaatsvinden.

Hollandse kust

De kust tussen Hoek van Holland en Den Helder is een relatief rechte kust. Door de afwezigheid van zeegaten over een afstand van circa 120 km is het morfologisch gedrag minder dynamisch dan dat van de overige twee regio's. Toch zijn er ontwikkelingen gaande die in de gaten moeten worden gehouden. Zo bedraagt over de afgelopen eeuw de erosie van de Kop van Noord-Holland en ten zuiden van Scheveningen respectievelijk in de orde van 1,0 en 0,5 m/jaar en is er in het centrale deel van de Hollandse kust sprake van een stabiele situatie tot een lichte aangroei van orde 0,4 m/jaar.
Bij het gedrag van de Hollandse kust in de laatste twee decennia spelen diverse ingrepen een rol. Zo is er beïnvloeding van het kustgedrag door de uitbouw van de diverse havenhoofden (Hoek van Holland, Scheveningen en IJmuiden), de invloed is echter wel locaal van aard.

Wadden

Dit kustsysteem is altijd sterk in beweging onder invloed van de natuurlijke elementen. In- en uitgaande getijstromen verplaatsen grote hoeveelheden zand. Hierdoor zijn grote buitendelta's opgebouwd. Hoe de morfologische processen werken is wel kwalitatief bekend, maar gezien de complexe wisselwerkingen is het niet eenvoudig het gedrag kwantitatief te beschrijven. Van belang is dat verondersteld wordt dat er netto zandtransport plaatsvindt vanuit de Noordzee naar de Waddenzee.
Er wordt in dit onderzoek vanuit gegaan dat de kust in het midden van de eilanden zich ongeveer gedraagt als de Hollandse kust. Dit impliceert dat de methode van onderzoek voor de Hollandse kust wordt overgenomen voor de Waddeneilanden. Het morfologisch gedrag van de koppen van de eilanden kan hiermee niet worden beschreven, aangezien dit volgens een geheel eigen morfologisch proces verloopt.

3.3 Zandvoorkomens

In het kader van dit Technisch Rapport wordt alleen de omvang van de zandvoorkomens landwaarts van de 20 km-lijn beschreven. De vraag is namelijk of het mogelijk is om binnen de grens die het huidige beleid hanteert, zand aanwezig is dat geschikt is voor winning.
Op grond van beperkte gegevens is een schatting te maken. Hierbij wordt onderscheid gemaakt tussen zand voor kustsuppletie en zand voor toepassing als beton- en metselzand en ophoging (lit. 4) (slib is gedefinieerd als kleiner dan 63 μm):

* Suppletiezand:
  D_{50} = 250 μm; slibgehalte < 10 %
  Geschatte hoeveelheid bedraagt 1,8 * 10^9 m^3.
* Beton- en metselzand:
  D_{50} = 250 - 1000 μm; slibgehalte < 2%
  Geschatte hoeveelheid bedraagt 0,5 * 10^9 m^3.
* Ophoogzand:
  D_{50} = 63 - 250 μm; slibgehalte = 15 - 50%
  Geschatte hoeveelheid bedraagt 6,0 * 10^9 m^3.

3.4 Kennis en modellen

Ten aanzien van de beschikbare kennis en modellen is op te merken dat er wel kennis beschikbaar is, die is echter opgebouwd uit een aantal detailstudies. Een integrale visie op zandwinning en de daaruit voortvloeiende consequenties voor het kustgedrag is nog niet ontwikkeld. Dit geldt zowel voor de binnenlandse als buitenlandse praktijk.
Het morfologisch gedrag van de Hollandse kust is tot op heden het beste gemodelleerd. Daarom zal dit kustgedeelte als eerste onderzocht worden. De opgedane kennis en ervaring zal worden overgezet naar de overige locaties.

4. AANPAK VAN HET ONDERZOEK

Er wordt onderscheid gemaakt tussen zeezandwinning uit de onderwateroever voornamelijk t.b.v. kustsuppleties, waarvoor een groot aantal varianten zijn gedefinieerd (zie hoofdstuk 2); en zandwinning uit vaargeulen, voornamelijk ten behoeve van gebruik op land. De aanpak voor beide toepassingen van zeezand is verschillend.

Gezien het grote aantal varianten waarvoor in dit onderzoek een analyse gewenst is en het gebrek aan veldgegevens, ligt een benadering waarbij gebruik gemaakt wordt van wiskundige modellen voor de hand. Zowel lokaties, vorm en volume van de zandonttrekking kunnen in dit geval over de gewenste ranges worden gevarieerd.
Pasklare modellen voor deze toepassing zijn (nog) niet beschikbaar. De processen die het transport van zand en de eruit voortvloeiende morfologische veranderingen veroorzaken zijn kwalitatief enigszins, maar kwantitatief onvoldoende bekend om de verschillen in ruimtelijke kondities integraal in modellen in rekening te brengen. De ontwikkelingen in de tijd kunnen evenmin afdoende worden benaderd.
Desalniettemin is er de afgelopen jaren kennis ontwikkeld op het gebied van zandtransport en morfologische veranderingen in de kustzône, die bij dit onderzoek van grote waarde is. Deze kennis is verwerkt in wiskundige modellen. Een wezenlijke beperking van deze modellen is dat de beschrijving van het transport vaak gebaseerd is op ijkingen op laboratoriumschaal en dat de modellen niet voldoende zijn afgeregeld met veldgegevens. Er blijkt enig morfologische materiaal ter verificatie beschikbaar te zijn; veranderingen in bodemligging die zich over langere perioden voltrekken kunnen worden benut voor afregeling van morfologische modellen, die over dezelfde (lange) perioden rekenen. Indien dergelijke veldgegevens voorhanden zijn kunnen de processen en fenomenen gemodelleerd worden, zij het met een beperkte betrouwbaarheid. De waarde van analyse met behulp van wiskundige modellen ligt momenteel vooral in het op een vergelijkbare wijze kunnen doorrekenen van varianten, zodat verschillen in effekten, veroorzaakt door variatie in kondities op de winlokaties in kaart gebracht kunnen worden. In deze studie zijn de condities waterdiepte, afstand uit de kust, breedte en lengte (opppervlak) en diepte (volume) van de winning in beschouwing genomen. Voorzover mogelijk zijn de indicatieve resultaten van de modelberekeningen vergeleken met verwachte autonome ontwikkelingen van de kust en de schaarse gegevens die uit de voornamelijk buitenlandse literatuur bekend zijn over de effecten van zeezandwinning op het kustgedrag.

De analyse van de mogelijke gevolgen van zandwinning uit vaargeulen is bestudeerd voor de IJ-geul en niet voor de Euro-geul. In de eerste plaats omdat momenteel de zeezandwinning uit de IJ-geul van veel grotere omvang is dan die uit de Euro-geul. Ten tweede omdat de situatie van de Euro-geul minder goed te modelleren is. Dit in verband met de aanwezige morfologie (Maasvlakte en Loswal Noord) en het gecompliceerde 3-dimensionale stromingspatroon dat veroorzaakt wordt door de uitstroming van rivierwater.
De effecten van zeezandwinning uit de IJ-geul op de kustligging is via een tweetal wegen aangepakt. Hierbij is nagegaan of de in het verleden

uitgevoerde verdiepingen van de geul tot morfologische veranderingen in de (directe) omgeving hebben geleid. Tevens zijn de modelberekeningen aan deze waargenomen morfologische ontwikkelingen getoetst. Er zijn modelberekeningen uitgevoerd, waarbij in eerste instantie de gevolgen voor de bodemtopografie in en rondom de geul worden beoordeeld.
Tevens is onderzocht of het hydraulisch klimaat (golven en stroming) in de kustzône als gevolg van zandonttrekking in de geul veranderingen ondergaat en welke gevolgen dat heeft voor de (lokale) kustontwikkeling.

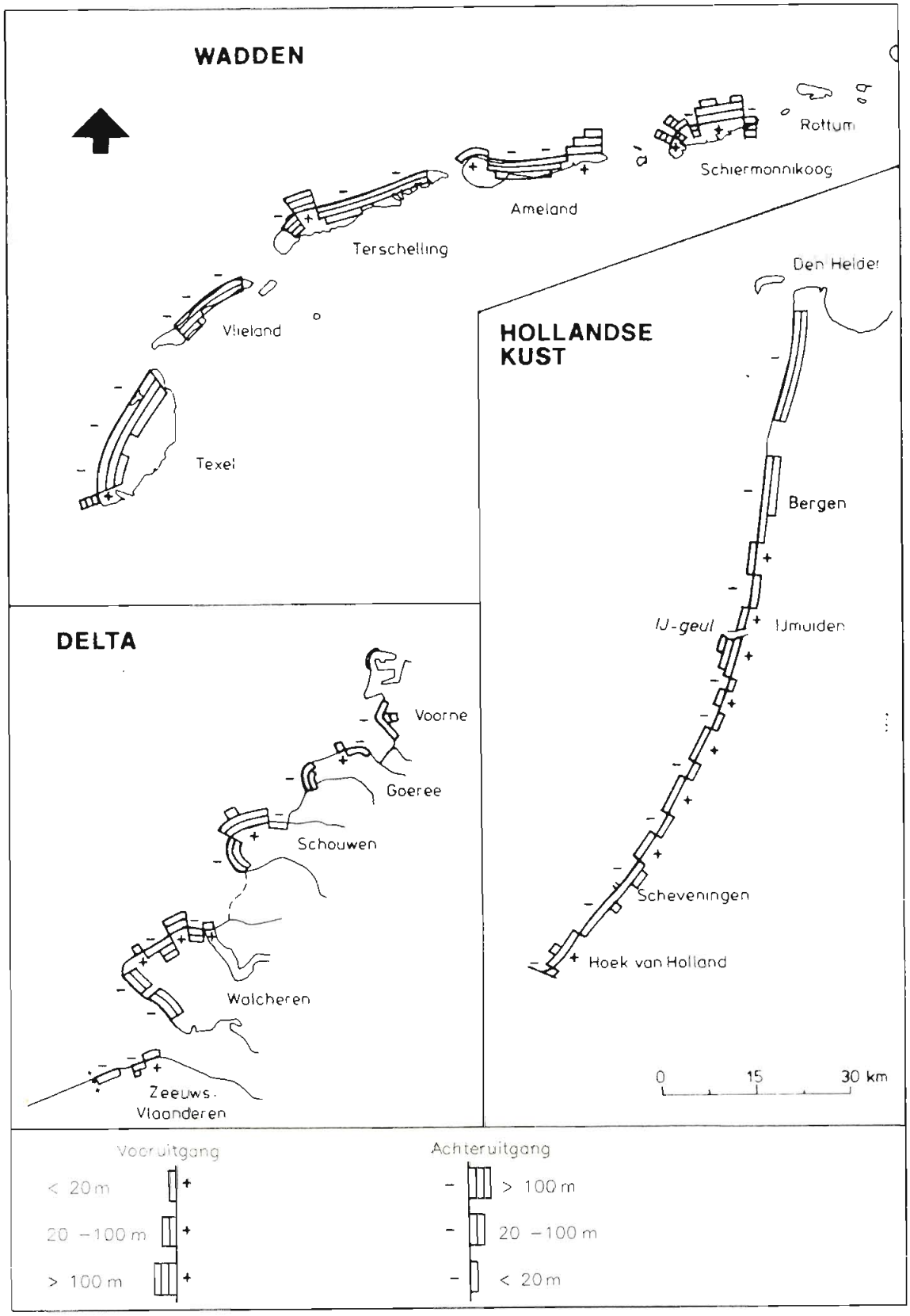
Voor wat betreft de winning uit de kustzône is zowel aandacht besteed aan mogelijke direkte beïnvloeding van de kust door verandering van golf- of stroomklimaat, als aan indirekte beïnvloeding, bijv. door het verplaatsen van de zandwinkuil naar de kust.
Voor de beoordeling van de direkte invloed zijn bestaande 2-dimensionale modellen gebruikt, WAQUA voor het stroomklimaat en HISWA voor het golfklimaat.
Voor de bestudering van de indirekte beïnvloeding is een set van 1-dimensionale modellen (ontwikkeld en) gebruikt; nl. een model voor morfologische veranderingen evenwijdig aan de kust (LOMOR) en een voor dwars op de kust (CROSTRAN). Deze modellen werken niet interaktief, maar de resultaten zijn achteraf gezamenlijk geïnterpreteerd. Ook de vertaling naar kustlijngedrag wordt uit deze resultaten afgeleid. Voor de overige kenmerken van de gehanteerde modellen wordt verwezen naar bijlage 2.
De beoordeling van de modelberekeningen voor verschillende varianten vindt plaats op basis van tijdschalen waarop kustlijnveranderingen zich voordoen.

De resultaten van de modelberekeningen dienen als louter indicatief gezien te worden. De beschikbare kennis, tijd en financiën zijn hier debet aan. Belangrijke beperkingen van de gehanteerde aanpak zijn onder meer:
- er is nog weinig bekend over de water- en sedimentbeweging in de kustzône en het hierdoor gegenereerde morfologisch gedrag;
- in de modelberekeningen is een aantal, wellicht maatgevende, processen op voorhand weg geschematiseerd, zoals bijvoorbeeld golfgedreven langstransport. Daarnaast is het golfklimaat geschematiseerd tot één jaargemiddelde golfhoogte en speelt de verdeling van de golfrichting over het jaar, eventueel gekoppeld aan de golfhoogte, geen rol meer;
- de gebruikte modellen zijn niet in het veld gevalideerd op hun aannamen, formuleringen en parameter instellingen. Dit geldt onder meer voor de Bailard-transportformulering;
- de morfologische ontwikkeling is gescheiden behandeld in langs- en dwarsrichting. Met name in de omgeving van de havendammmen van IJmuiden, waar morfologie en stroming duidelijk 2-dimensionaal zijn, geldt dit als een sterke beperking;
- er is verondersteld dat de verdieping/verbreding van de geul alleen van invloed is op de reflectie van de invallende golven.

Gebaseerd op eerdere ervaringen met deze modellen en beperkt gevoeligheidsonderzoek dient door deze beperkingen bij de einduitkomsten met een onnauwkeurigheidsmarge van een factor 3 à 5 rekening te worden gehouden. Tevens wordt op grond hiervan een voorspellingstermijn tot 200 jaar nog realistisch geacht.

5. AUTONOME ONTWIKKELING VAN DE KUST

Een relevante periode waarover het beleid t.a.v. zeezandwinning zich uitstrekt is 40 jaar. In deze periode zal de kustlijn van positie veranderen. De verwachtingen hieromtrent zijn in figuur 5.1 weergegeven. Deze zijn afgeleid uit de voorspellingen die ten behoeve van de discussienota Kustverdediging zijn opgesteld. Gepresenteerd is de situatie bij 60 cm zeespiegelrijzing per eeuw. Dit is het zogenaamde anticiperende scenario waarin een realistische bijdrage van het broeikaseffect is verdisconteerd (Technisch Rapport 6).
Langs de gehele kust doen zich veranderingen voor, waarbij zowel kustvoor- als achteruitgang wordt gekonstateerd. Verplaatsingen van enkele honderden meters zijn geen uitzondering.
Interessant voor deze studie zijn de lokaties waar de studie zich op richt: Scheveningen, IJmuiden, Bergen, Texel en Ameland.
Bij de onmiddellijke omgeving van Scheveningen ligt de verwachte kustachteruitgang in de orde van tientallen meters, ten zuiden ervan minder groot dan ten noorden.
Rond IJmuiden vindt kustvooruitgang plaats van enkele tot enkele tientallen meters.
Bij Bergen is de achteruitgang groter dan bij Scheveningen, vooral ten noorden van Bergen, orde van grootte tientallen meters.
Texel en Ameland ondervinden beiden kustachteruitgang tussen nu en 2030 van meer dan 100 meter.



Figuur 5.1 Kustligging 2030 bij 60 cm zeespiegelrijzing/eeuw.

6. EFFECTEN WINNING IN VAARGEULEN - NUL PLUS ALTERNATIEF -

6.1 Algemeen

De winning van zand uit scheepvaartgeulen bestaat voornamelijk uit onderhouds- en/of verdiepingswerkzaamheden. Bij een drastische vergroting van de te winnen hoeveelheid zand uit vaargeulen wordt tevens gedacht aan een verbreding van de betreffende vaargeul. De achterliggende gedachte bij het onderzoek naar effecten van zandwinning in vaargeulen is dat door de gewijzigde morfologie het golfklimaat kan wijzigen, hetgeen kan resulteren in een veranderende ligging van de kustlijn.
De invloed van een veranderde getijstroming op de kustlijnligging wordt in dit onderzoek verwaarloosbaar verondersteld.
Het uitgevoerde onderzoek heeft zich beperkt tot het uitwerken van diverse varianten voor zandwinning uit de IJ-geul. Het onderzoek richt zich op effecten zowel in de vaargeul zelf (paragraaf 6.2) als in de aangrenzende kustzône (paragraaf 6.3).

Resultaat van het onderzoek naar effecten van winning in de kustzone - hoofdstuk 7 - is dat een indirecte morfologische beïnvloeding van de kustlijn, via morfologische veranderingen op dieper water, slechts op zeer grote tijdschaal een rol kan gaan spelen. Daarom wordt in dit hoofdstuk alleen aan directe morfologische beïnvloeding van de kustlijn door winning uit de IJ-geul aandacht besteed.

De berekeningen in een richting evenwijdig aan de kustlijn zijn uitgevoerd met het numerieke rekenmodel LOMOR.
De berekeningen aan de veranderingen in de ligging van de kustlijn zijn uitgevoerd met behulp van het model COMO-LT.
De morfologische ontwikkelingen van de IJ-geul zijn bepaald voor een periode van 6 jaar.
De berekeningen worden voor drie locaties uitgevoerd:
- 2 km uit de havenhoofden;
- 5 km uit de havenhoofden;
- 8 km uit de havenhoofden.

De berekeningen worden voor een aantal combinaties van verbreding en verdieping uitgevoerd:
- huidige breedte (500 m);
- verbreding met 500 m tot 1000 m;
- verbreding met 1500 m tot 2000 m;
- huidige diepte (19 m);
- verdieping met 5 m tot 24 m.

6.2 Effecten in de IJ-geul

6.2.1 Autonome morfologische ontwikkeling

Ter referentie zijn berekeningen voor de huidige afmetingen van de IJ-geul gemaakt. De resultaten hiervan zijn vergeleken met sedimentatiegegevens verkregen door lodingen uit 1985 en 1988 met elkaar te vergelijken. De resultaten vertonen zowel in kwalitatief als kwantitatief opzicht een redelijke overeenkomst: de voorspelde sedimentatie en het in werkelijkheid benodigde onderhoud zijn beide zeer gering (orde enige honderdduizenden kubieke meters per jaar).

Het huidige morfologische beeld is als volgt:
- de geulsedimentatie neemt af in zeewaartse richting, 4 - 1 cm/jaar;
- de morfologische veranderingen worden gekenmerkt door aanzanding in de kuil en erosie buiten de kuil;
- de morfologische veranderingen zijn uitdempend van karakter in de ruimte;
- de geul vertoont een geringe neiging tot voortplanting in noordwaartse richting (2 - 10 m/jaar);
- in de brandingszone bestaat een netto zuidwaarts gericht transport van ca. 27 m^3/jaar;
- het effect van de bestaande geul op het golfgedreven langstransport in de brandingszône ligt in de orde van 2 à 3%.

6.2.2 Resultaten modelberekeningen

Een verdieping en/of verbreding kan resulteren in een vergrote zandvangcapaciteit van de vaargeul. Deze toeneming is afhankelijk van de relatieve verandering in de waterdiepte ten opzichte van de omliggende bodem. Een verdieping van de huidige vaargeul betekent dicht onder de kust een geringe toename van het thans al aanzienlijke diepteverschil tussen geulbodem en omliggende zeebodem. Verder uit de kust ligt de huidige vaargeulbodem circa 1 m onder de omringende zeebodem. Een extra verdieping met 5 m leidt hier tot een relatief grote verandering.
De verdieping met 5 m heeft grotere gevolgen voor de zandvangcapaciteit dan de verbredingsvarianten.
In de directe omgeving van de IJ-geul - circa 2 km aan weerszijde- vindt erosie plaats, die afneemt met toenemende afstand uit de as van de IJ-geul.
Door de geulverbreding verschuift de sedimentatie naar de randen van de geul en blijft het midden van de vaargeul langer vrij van sedimentatie.

6.3. Effecten op de kust

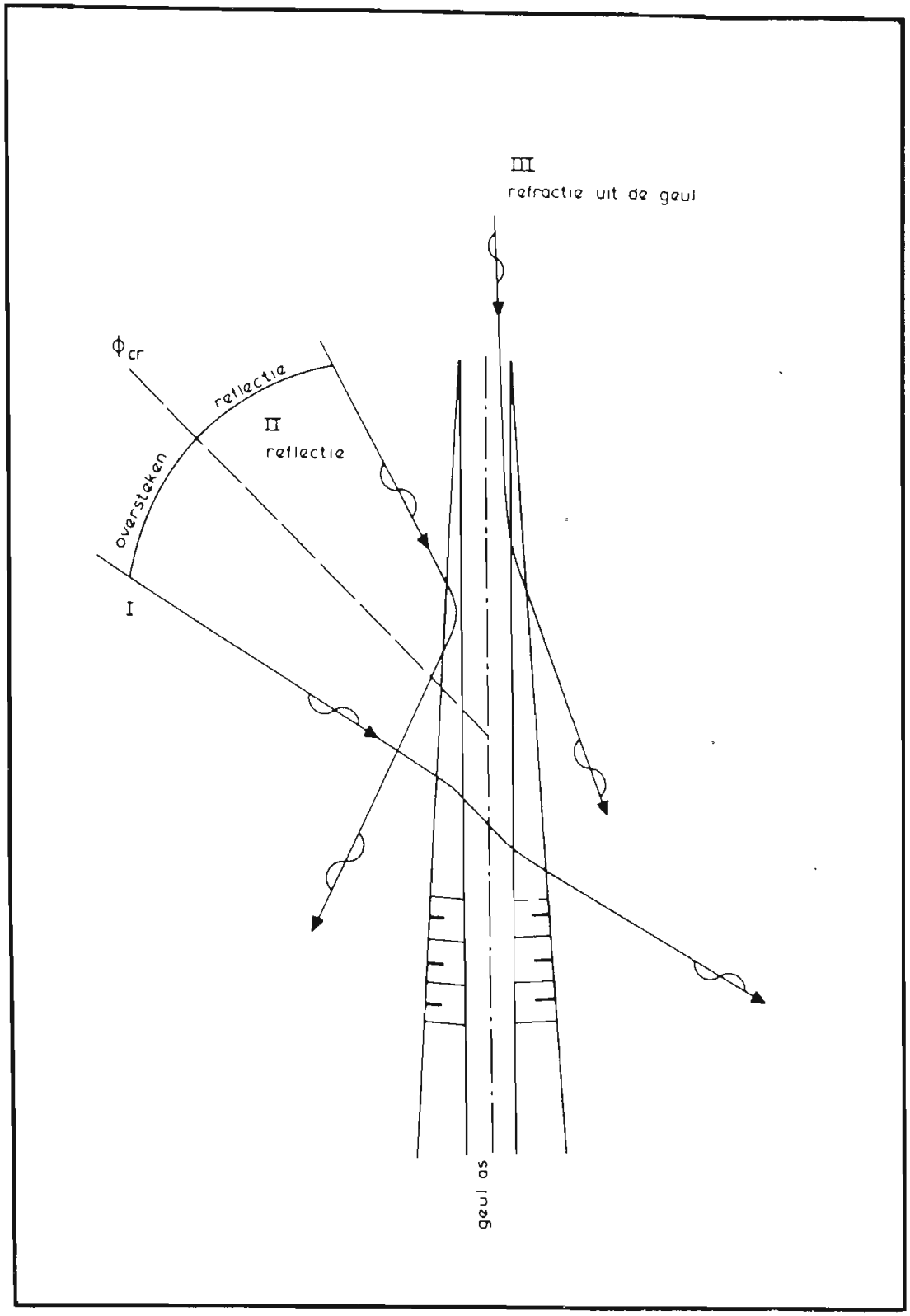
6.3.1 Algemeen

De winning van zand uit een vaargeul kan door een verandering van het golfklimaat doorwerken op de nabijgelegen kustvakken. Afhankelijk van de richting van de inkomende golven nabij de vaargeul, zie figuur 6.1, kunnen een drietal situaties van golfvoortplanting optreden:
- oversteken van de geul, nauwelijks verandering golfklimaat;
- reflectie op het geultalud, verandering golfklimaat naast de geul;
- refractie uit de geul, de golfenergie verdwijnt uit de geul.

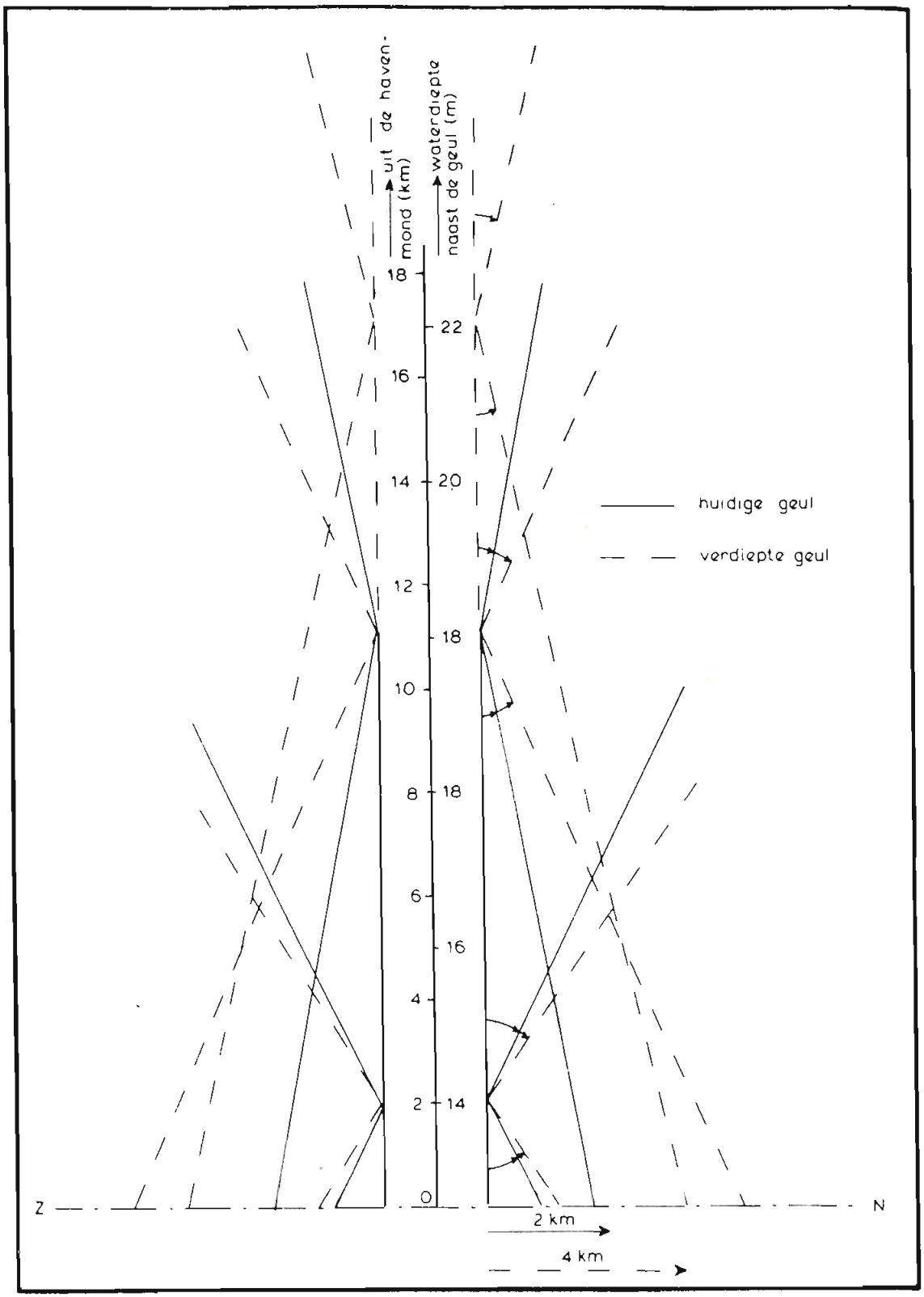
Voor een nauwkeurige beschrijving van deze processen op het golfklimaat en resulterend de kustlijnligging, is de inzet van een geavanceerd numeriek golvenmodel noodzakelijk. In het onderzoek is dit achterwege gelaten vanwege beperkte hoeveelheid beschikbare tijd en financiële middelen. Voor de modelberekeningen ter onderbouwing van dit Technisch Rapport is aangenomen dat de golfreflectie de belangrijkste verandering van het golfklimaat aan weerszijde van de geul zou kunnen bewerkstelligen. Alleen dit proces is dan ook meegenomen.
De golfreflectie neemt toe bij toenemende waterdiepte. Vandaar dat een verdieping van de vaargeul een verandering veroorzaakt van het locale golfklimaat aan weerszijde van de vaargeul, zie figuur 6.2. Een verbreding van de vaargeul zal geen verandering in het reflectieproces te weegbrengen, vanwege een gelijkblijvende hoek van inval.
Uit een indicatieve berekening volgde dat bij een verdieping van 5 m de lengte van het door reflectie beïnvloede kustvak toeneemt van 2 tot 4 km.
De veranderingen in het golfklimaat aan weerszijde van de vaargeul resulteren in een verandering van het golfgedreven langstransport. Doordat met een geschematiseerd golfklimaat wordt gewerkt, zullen kleine veranderingen in de golfreflectie slechts globaal in transportveranderingen kunnen worden omgezet.

6.3.2 Resultaten

Om de effecten van zandwinning op de ligging van de kustlijn te kunnen berekenen is het langstranport in de brandingszône geschematiseerd volgens een lijnmodel, met in eerste instantie de havenhoofden weggelaten. De invloed van de vaargeul kan dan vergeleken worden met andere invloeden nabij de haven. Het dominante proces blijkt de afschermende werking van de havenhoofden voor golven te zijn.
Uit het onderzoek blijkt dat door de aanwezigheid van de vaargeul en zonder de havenhoofden het van nature netto zuidwaarts gerichte transport in de brandingszone in de nabijheid van de havenhoofden wordt verkleind, van 35 tot $27*10^3$ m^3/jaar. Een verdieping van de vaargeul met 5 m leidt tot een extra reductie van het netto zuidwaarts gerichte transport, resulterend $25*10^3$ m^3/jaar.
Deze beïnvloeding van het golfgedreven langstransport is klein t.o.v. de invloed die door de havendammen wordt uitgeoefend. Door de verdieping van de geul wordt de zandaanwas ten noorden en zuiden van de havendammen slechts met enkele procenten gereduceerd respectievelijk vergroot. Naar verwachting leidt dit tot een nieuwe evenwichtsligging 10 m landwaarts respectievelijk zeewaarts van de huidige kustlijn.



Figuur 6.1 Geulinvloed op golfvoortplanting bij verschillende golfrichtingen.



Figuur 6.2 Reflectie geultalud: invloed geulverdieping op kritische richtingen.

6.4 Samenvatting effecten winning in vaargeulen

De zandvangcapaciteit van de IJ-geul neemt in de doorgerekende alternatieven vooral bij een verdieping van de vaargeul relatief sterk toe, orde 80 - 100 %

Een verbreding van de vaargeul heeft als resultaat dat de sedimentatie naar de randen van de nieuwe vaargeulbodem toe verschuift, het midden van de vaargeul blijft dan voor langere tijd gevrijwaard van sedimentatie. Dit betekent dat er gedurende een langere tijd geen onderhoudsbaggerwerk in de bestaande geul zou behoeven te worden uitgevoerd.

Het golfpatroon aan weerszijde van de geul wordt voornamelijk beïnvloed door reflectie van de golven op de taluds. Een verbreding van de vaargeul geeft geen extra verandering. Dit in tegenstelling tot een verdieping van de vaargeul. Een verdieping zorgt voor een toename van de lengte van het kustvak aan weerszijde van de vaargeul waar het golfklimaat beïnvloed wordt door reflectie (van 2 naar 4 km).
Dit resulteert in een beperkte reduktie van de golfgeïnduceerde zandtransportcapaciteit ten noorden en ten zuiden van de havenhoofden en een resulterende geringe verandering in de ligging van de kustlijn.

De zandtransportcapaciteit en dus de ontwikkeling van de kust bij IJmuiden wordt echter veel sterker beïnvloed door de aanwezigheid van de havenhoofden dan door de aanwezigheid van de vaargeul met eventueel een verbreding en/of verdieping.

7. EFFECTEN WINNING IN DE KUSTZONE

7.1 Algemeen

In de kuststrook vindt richting naar de kust toe een geleidelijke overgang plaats van getijgeïnduceerde langstransporten naar golfgedreven langs- en dwarstransporten. In de actieve- of brekerzône overheerst de golfgedreven brandingsstroom in langsrichting en golfgedreven dwarstransport o.i.v. golfasymmetrie.
Een aangebrachte zandwinkuil heeft invloed op de genoemde processen en resulterend op de kustligging. Onderzoek in relevante literatuur naar beschrijving van deze effecten is opgenomen in 7.2.
Het uitgevoerde modelonderzoek geeft de effecten van de aanwezigheid van een kuil aan op de actieve zône (landwaarts van de 10 à 7 m dieptelijn). Winningen in de actieve zône blijven buiten beschouwing, aangezien een dergelijke ingreep zeker te grote consequenties voor het evenwicht van de kust zou inhouden.
De invloed van een zandwinkuil op het kustgedrag kan gesplitst worden in een directe (7.3) en indirecte (7.4) beïnvloeding van het gedrag van de kustlijn. Een directe invloed houdt in dat de getij- en golfcondities veranderen o.i.v. de aanwezigheid van de kuil. Een indirecte beïnvloeding is het resultaat van de lange termijn morfologische ontwikkeling van de kuil, het "wandelen" richting kust.
De effecten van een zandwinkuil worden voor diverse afmetingen, diepteliggingen en locaties beschreven.
De locaties betreffen:
- Scheveningen, Bergen, Texel en Ameland.

De diepteliggingen zijn:
- 10, 16 en 20 m dieptelijn.

De afmetingen van de zandwinkuilen zijn:
- breedte: 100 m, 500 m en 1000 m;
- lengte: 2000 m en 5000 m;
- diepte: 1 m, 2 m en 5 m.

7.2 Resultaten uit andere bronnen

Uit beschikbare gegevens is getracht om een beeld te krijgen hoe een aangebrachte zandwinkuil zich in de "praktijk" gedraagt. Op voorhand kan gesteld worden dat de effecten van een zandwinput op het kustgedrag, in de door ons ter beschikking staande literatuur niet expliciet is onderzocht. Wel is een indicatie te krijgen uit de beschreven effecten van een zandwinput.

Aan de Amerikaanse Westkust - baai van Redondo Beach - is in 1968 een suppletie uitgevoerd met zand uit een put op geringe afstand van de kust (lit. 6). De suppletie was ongeveer $1 * 10^6$ m^3 groot. De put lag op de 9 m dieptelijn op ongeveer 350 m uit de kust. Het te suppleren zand was van grove samenstelling, namelijk 400 - 700 μm! Het strand had een gemiddelde korreldiameter van 500 μm.
Een evaluatie van deze suppletie is nooit volledig gerapporteerd. De indruk is wel dat het strand er stabiel bijligt (lit. 7). De put is wel in de loop van de tijd aangevuld, het zand moet van dieper water afkomstig zijn. Het langstransport ter plaatse is namelijk nihil vanwege de beschutte ligging in een baai (lit. 7).

Een Franse studie geeft aan dat het onttrekken van sediment op 15 - 20 m dieptelijn of dieper geen invloed op het kustgedrag zal hebben. Dit in verband met op die diepten zeer geringe sedimenttransporten (lit. 8). Deze bevindingen zijn gemaakt aan de hand van resultaten van natuurmetingen met radio-actieve tracers, schaalmodelproeven in een laboratorium en een theoretische exercitie.
De omgevingscondities van deze studie - Golf van Biskaje - zijn moeilijk vergelijkbaar met die van de Nederland. Bijvoorbeeld de bodemhelling is veel steiler - 1:68 -, de sedimenten zijn veel grover en het golfklimaat is energierijker.

In een Nederlands onderzoek werd destijds een voorstel gedaan om op een locatie op de 17 m dieptelijn een proefput aan te leggen (lit. 9). Deze locatie zou geen merkbare effecten hebben op het kustgedrag. Aangenomen is dat de processen die het kustgedrag beïnvloeden zich afspelen landwaarts van de 16 m dieptelijn. De proef is overigens nooit uitgevoerd!
Met behulp van een 2-dimensionaal getijmodel is de invloed van de zandwinput op de getijstromen nagegaan. De resultaten geven alleen benvloeding van de getijstromen in de zandwinput zelf en in de richting evenwijdig aan de kust. Op grond van een analyse van de aandrijvende krachten van het langstransport wordt het langstransport gedacht zich landwaarts van de 10 m dieptelijn af te spelen.
Het dwarstransport zou zich, door het geschematiseerde golfklimaat, voornamelijk afspelen landwaarts van de 11 m dieptelijn.
Destijds - 1975 - werd al wel geconcludeerd dat de analyses waren gebaseerd op tot op dat moment onvoldoende door natuurwaarnemingen geverifieerde theorieën. Een toetsing in het veld zou toen al zeer gewenst zijn!

Bij Scheveningen is in 1985 ten behoeve van de plaatselijke suppletie een zandwinkuil op 19 m dieptelijn aangelegd met een inhoud van 150.000 m^3. De metingen geven een stabiele ligging aan over een periode van circa 1,5 jaar (lit.10).

7.3 Directe morfologische effecten

Uit de berekeningen welke alleen voor de locatie Scheveningen zijn uitgevoerd, blijkt het volgende:
- alleen een diepe kuil (5 m) leidt tot een stroomsnelheidsreductie van enkele procenten;
- de directe invloed van de kuil op de getijstroming is landwaarts van de 10 m dieptelijn verwaarloosbaar;
- t.g.v. shoaling-effect neemt de golfhoogte t.p.v. de kuil maximaal 2% toe, in de brandingszône is hiervan niets meer terug te vinden;
- directe morfologische effecten op kustlijn worden niet verwacht;
- op basis hiervan zijn de directe morfologische effecten voor de overige drie locaties buiten beschouwing gelaten.

7.4 Indirecte morfologische effecten

De indirecte morfologische beïnvloeding is bepaald door de morfologische ontwikkeling in langs- en dwarsrichting gescheiden te beschouwen. Bij de Hollandse kust blijkt uit het onderzoek dit een geoorloofde handelswijze te zijn.
Voor de morfologie in langsrichting is gebruik gemaakt van het model LOMOR, voor de morfologie in dwarsrichting wordt het model CROSTRAN toegepast.
Afhankelijk van de locaties zijn de getij- en golfrandvoorwaarden gekozen.

7.4.1 Scheveningen

De morfologie in langsrichting geeft het volgende beeld voor een berekeningsperiode van 40 jaar:
- in het midden van de kuilen vrijwel geen veranderingen;
- afvlakking van de koptaluds van de kuil;
- alleen kuilen op de 10 m dieptelijn vertonen een geringe netto verplaatsing in zuidwestelijke richting, namelijk 7 m/jaar.

De morfologie in dwarsrichting laat voor de kuilen op de 16 m en 20 m dieptelijn het volgende zien:
- deze veranderen niet tot nauwelijks van diepte in de rekenperiode van 40 jaar;
- een geringe kustwaartse verplaatsing, welke op de 16 m dieptelijn groter is dan op de 20 m dieptelijn, 1 - 2 m/jaar, zie figuur 7.1.

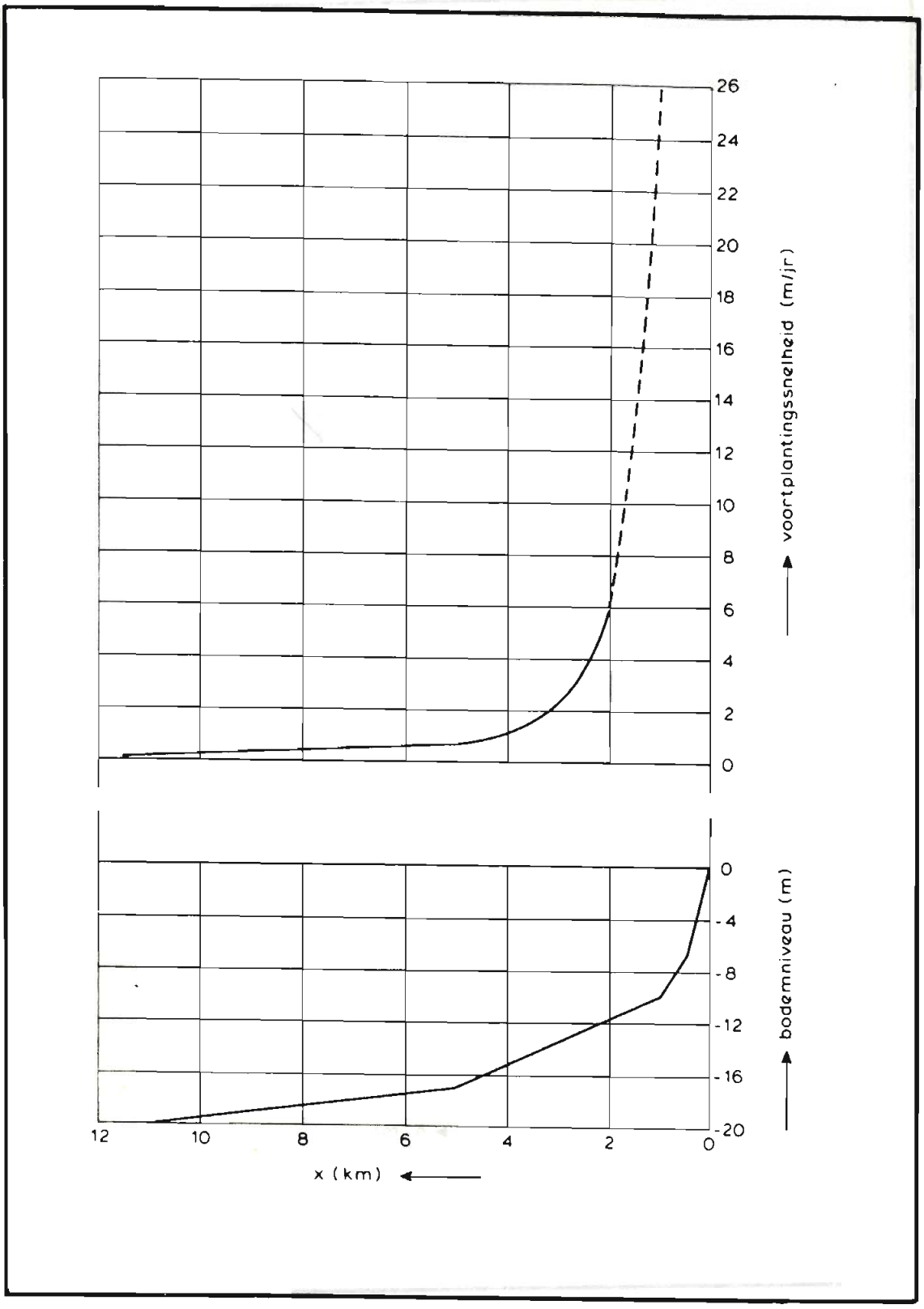
De morfologie in dwarsrichting voor de zandwinkuil op de 10 m dieptelijn geeft aan:
- de autonome ontwikkeling van de 1 m dieptelijn wordt versterkt met 1 m extra verschuiving richting kust over een periode 7 jaar;
- de zeewaartse verschuiving van de 7 m dieptelijn wordt versterkt met 7 m per jaar (bankvorming).

Het algemene beeld is een zeer langzame verplaatsing richting kust, welke zich uitsmeert over het profiel. De tijdschaal waarop een beïnvloeding van de actieve kustzone gaat spelen is groter dan 40 jaar.
Bij een verruiming van de berekeningstijd moet worden bedacht dat de toegepaste modellen dit in wezen niet toelaten. Om een indicatie te krijgen kunnen de berekende verplaatsingssnelheden, figuur 7.1, wel gebruikt worden om een uitspraak te doen op langere termijn. Voorzichtigheid is wel geboden bij de interpretatie van de tijdschalen. Voor de nauwkeurigheid van de voorspelling van het model wordt een factor 5 gehanteerd.

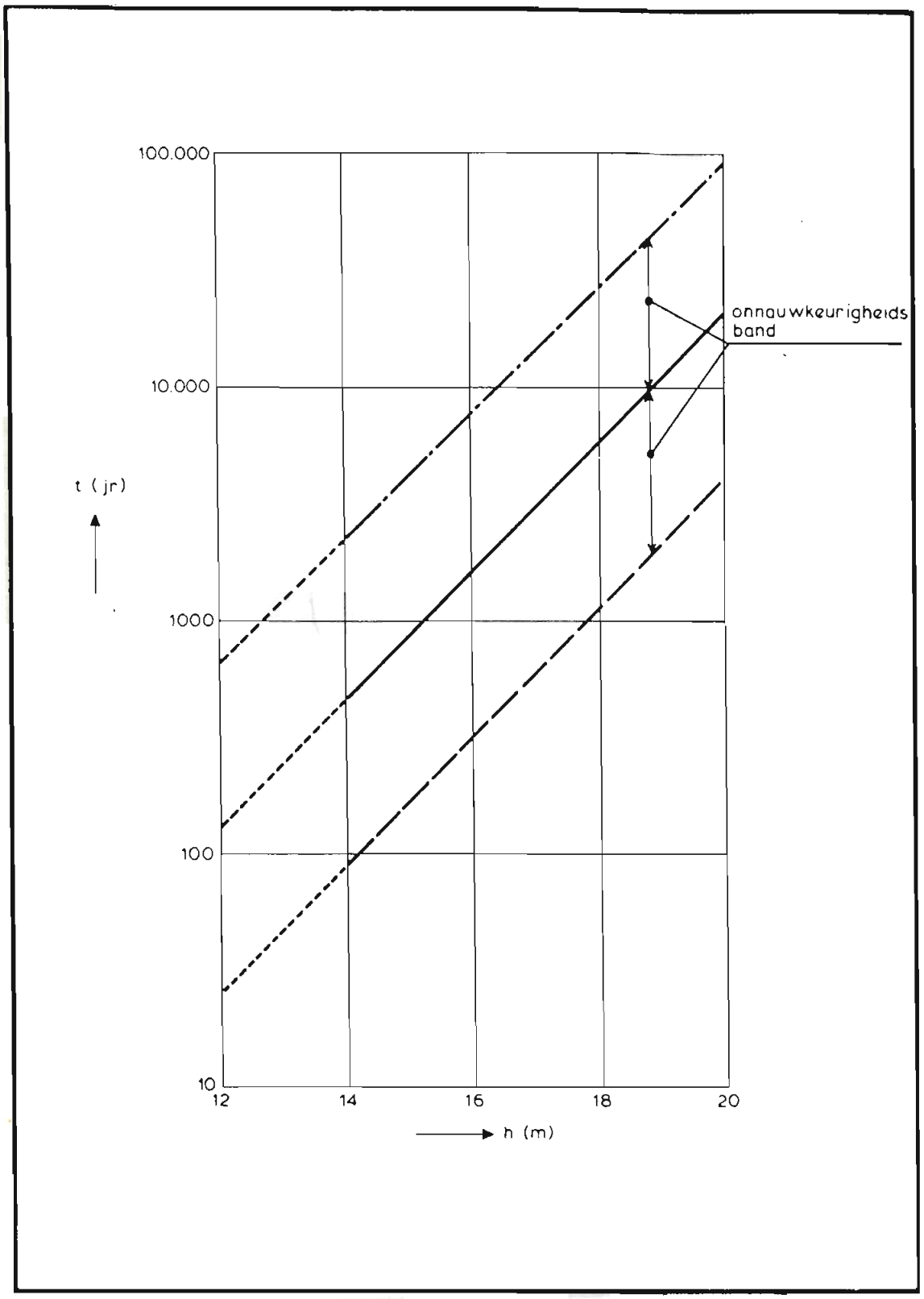
De tijd nodig om de actieve zône te bereiken is dan als volgt, zie figuur 7.2:
- kuil op 20 m dieptelijn: enkele duizenden jaren;
- kuil op 16 m dieptelijn: enkele honderden jaren;
- kuil op 10 m dieptelijn: 0 - 100 jaar.

In dit laatste geval is er sprake van een bovengrensbenadering. In werkelijkheid zal er sprake zijn van een uitsmeringseffect langs de kust, waardoor zeer waarschijnlijk een kleinere kustbeïnvloeding ontstaat. Opgemerkt zij dat de tijdsduur alleen afhankelijk is van de afstand uit de kust waarop de kuil zich bevindt en dus niet van de omvang van de kuil. Dit laatste bepaalt echter wel de omvang van het uiteindelijke effect, in de zin van kustlijnachteruitgang, als de kuil de actieve zône bereikt. Bij een kuil van $10 * 10^6$ m^3 is deze achteruitgang in de orde van enige tientallen meters.
Bij de studie van Technisch Rapport 14 is onderzocht hoe een onderwateroeversuppletie zich ontwikkeld. Het blijkt dat het gesuppleerde zand in de actieve zône aanwezig blijft. De lek naar dieper water is beperkt. Het gesuppleerde zand kan wel op langere termijn uit het kustvak verdwijnen door langstransport.

De ervaringen opgedaan bij de locatie Scheveningen worden gebruikt om de extreme varianten over te zetten naar de andere locaties. Dit resulteert dan in een beperkte set berekeningen. Bepaald worden de tijdschalen voor verplaatsingen in dwarsrichting van een zandwinkuil tussen de 10 m en 20 m dieptelijn en van een zandwinkuil op de 10 m dieptelijn.



Figuur 7.1 Voortplantingssnelheid bodemverstoring langs dwarsprofiel, locatie Scheveningen.

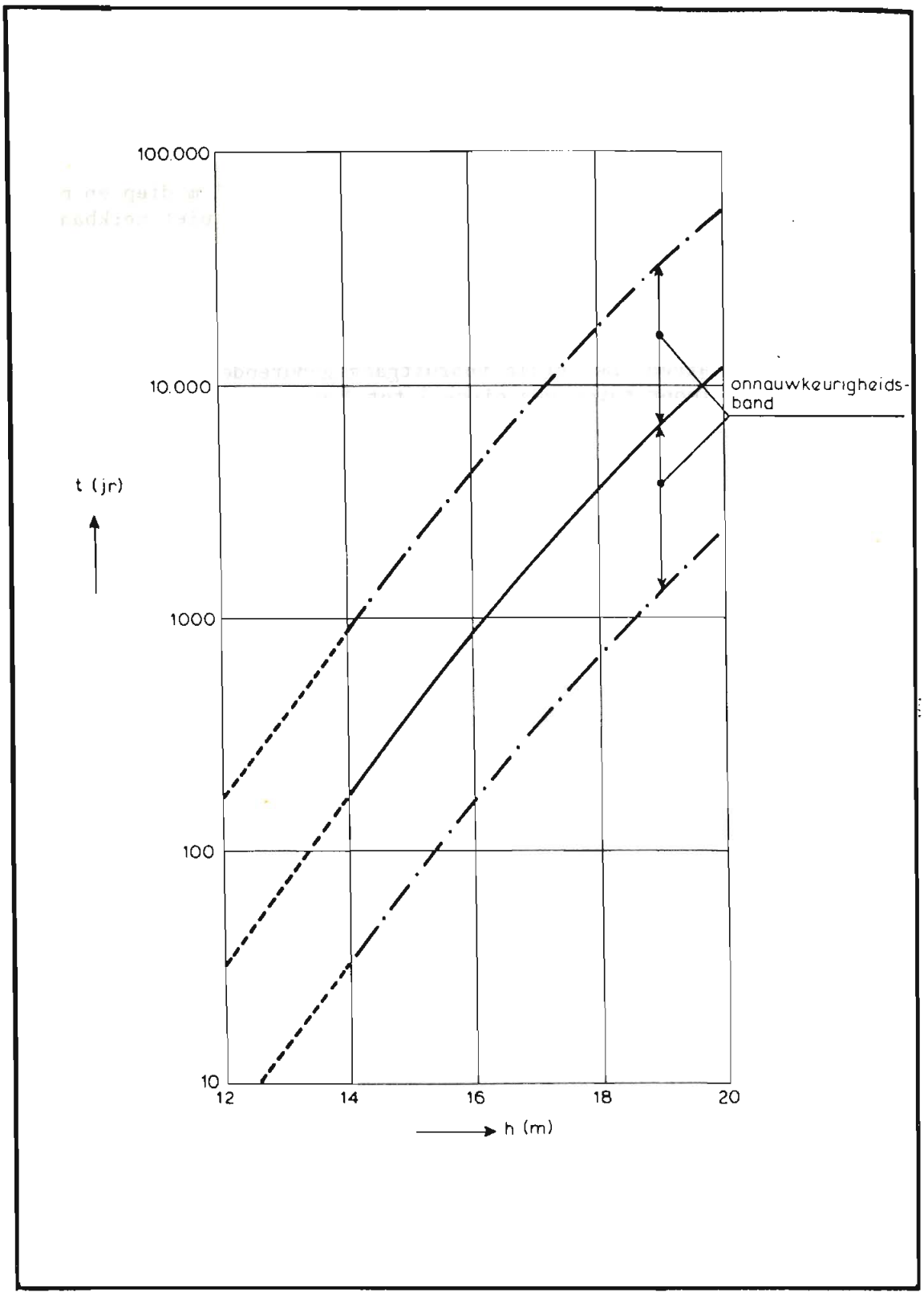


Figuur 7.2 Benodigde tijd voor bodemverstoringen om de actieve zône te bereiken, locatie Scheveningen.

7.4.2 Bergen

De tijdschalen waarop een kuil de actieve zône bereikt blijkt bij Bergen een factor 2 kleiner te zijn dan bij Scheveningen, zie figuur 7.3. Dit wordt voornamelijk veroorzaakt door een steiler kustprofiel. Uit de berekeningen volgt:

- binnen een periode van 200 jaar is een winning van 1 m diep en maximaal 1000 m breed tussen de 16 en 20 m dieptelijn, niet merkbaar in de actieve zône.
- winning binnen de 16 m dieptelijn heeft binnen een termijn van 200 jaar wel effecten op de actieve zône;
- winning op de 10 m dieptelijn heeft na 7 jaar tot gevolg dat t.o.v. de autonome ontwikkeling de 1 en 7 m dieptelijnen minder snel zeewaarts verplaatsen. De totale vooruitgang gedurende 7 jaar van de 1 m dieptelijn loopt terug van circa 7 tot 1 m.

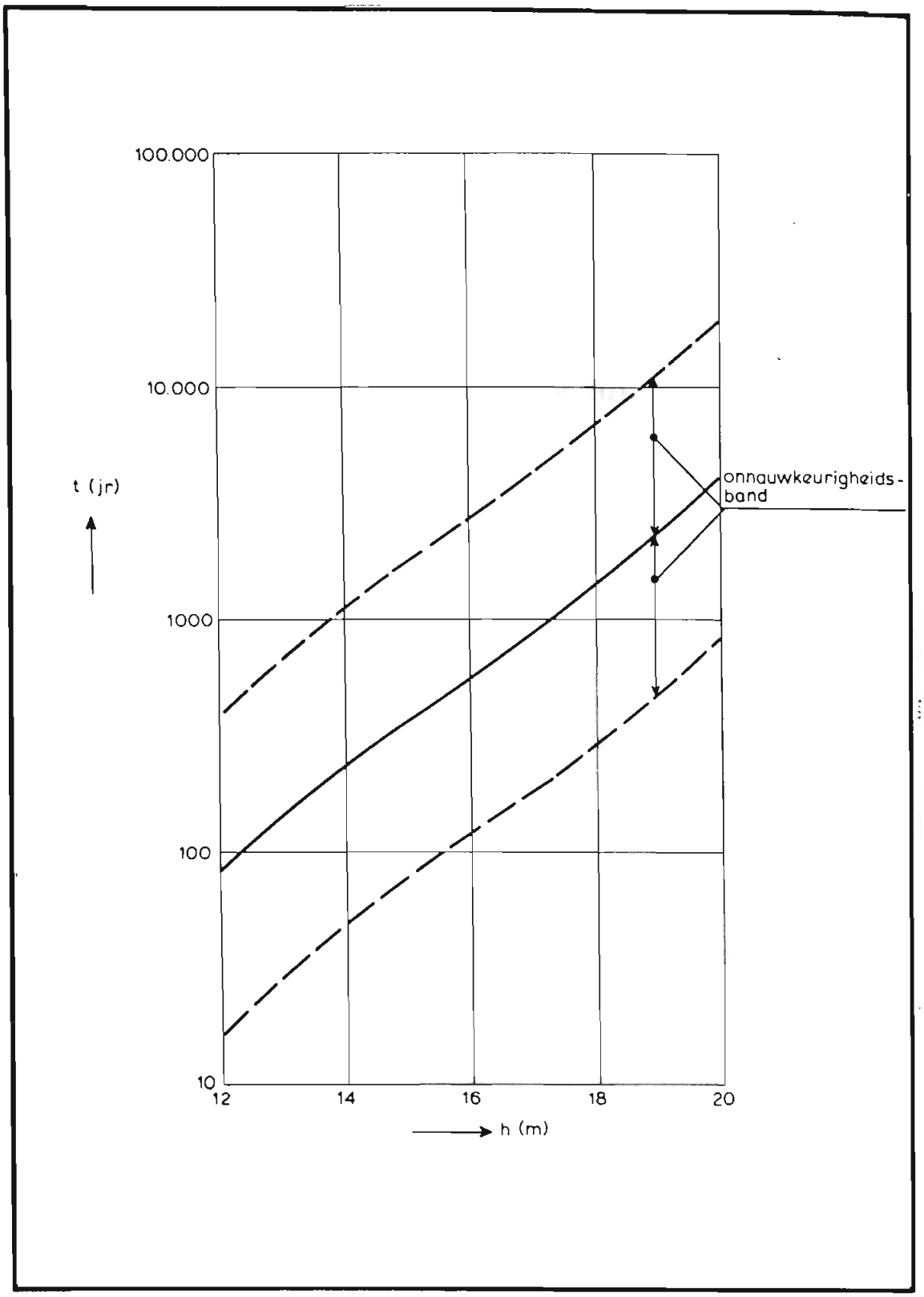


Figuur 7.3 Benodigde tijd voor bodemverstoringen om de actieve zône te bereiken, locatie Bergen.

7.4.3 Texel en Ameland

De effecten voor de locaties Texel en Ameland, figuur 7.4, zullen globaal hetzelfde beeld geven vanwege vrijwel gelijke hydrodynamische omstandigheden. Ten opzichte van de locatie Bergen zullen de tijdschalen iets kleiner zijn, omdat het golfklimaat bij Texel en Ameland energierijker is.
Voor een periode van maximaal 200 jaar geldt:
- een beperkte winning, 1 m diep en maximaal 100 m breed, tussen de 16 en 20 m dieptelijn leidt niet tot effecten op de actieve zône;
- winning binnen de 16 m dieptelijn geeft effecten op de actieve zône.

De aanwezigheid van zeegaten en vermoedelijk sterk variërende ruimtelijke autonome langstransportgradiënten spelen bij beide locaties een dusdanig grote rol, dat de gevolgde modelmatige aanpak niet zonder meer kan worden toegepast.
Daarom kan het niet worden uitgesloten dat ook een winning op de 20 m dieptelijn binnen een termijn van 200 jaar, tot effecten op de actieve zône kan leiden.



Figuur 7.4 Benodigde tijd voor bodemverstoringen om de actieve zône te bereiken, locatie Texel/Ameland.

7.5 Samenvatting effecten in de kustzône

De wezenlijke effecten van zandwinkuilen op het kustgedrag zijn een direct effect door instantane verandering van golf- en stroomklimaat en indirect effect door migratie van de kuil met invloedszône naar de kust toe. De resultaten zijn samengevat in tabel 7.1. Hierin is te zien dat directe effecten van winning van zand uit de kustzône op de kustlijn niet verwacht worden. Een uitzondering dient hierbij gemaakt te worden voor winning op de 10 m dieptelijn en mogelijk voor een 5 m diepe winning op de 16 m dieptelijn bij Bergen. In de overige gevallen is er slechts sprake van een marginale verandering in stroom- en golfcondities ter plaatse van de zandwinkuil en in de directe omgeving (maximaal 2 km) van de zandwinkuil.

Er is wel sprake van een indirecte beïnvloeding. In dwarsrichting hebben de zandwinkuilen een voortplantend morfologisch karakter, veroorzaakt door een kustwaarts gerichte transportcomponent. Hierdoor bereikt de kuil uiteindelijk de actieve zône.
De verplaatsing voltrekt zich in een traag tempo, orde 1 m/jaar, zie ook figuur 7.1. Dit tempo is niet zozeer afhankelijk van de grootte, diepte of vorm van de zandwinkuil, maar wel in belangrijke mate van de afstand uit de kustlijn.

Indirecte effecten van zandwinning in de kuststrook op het kustgedrag zijn binnen een periode van 200 jaar niet uit te sluiten voor winningen bij Scheveningen en Bergen op de 10 m dieptelijn. Bij Bergen geldt dit tevens voor winning vanaf de 16 m dieptelijn met een kuildiepte van 2 tot 5 m.

Voor de locaties Texel en Ameland kunnen vanwege de beperkingen van het modelinstrumentarium vooralsnog geen uitspraken worden gedaan met betrekking tot de afstand uit de kust en de te winnen hoeveelheid waarbij geen effecten worden verwacht.

De modelresultaten lijken niet in tegenspraak te zijn met de beperkte hoeveelheid veldgegevens.

Varianten (zie tabel 0.1)	invloedszône reikt tot actieve zône	Verplaatsing tot actieve zône
Scheveningen		
10.1 en 10.2	+	+
16.1 en 16.2	-	-
16.3 en 16.4	-	-
20.1 en 20.2	-	-
Bergen		
10.1 en 10.2	+	+
16.1 en 16.2	-	-
16.3 en 16.4	+	+/-
20.1 en 20.2	-	-
Texel/Ameland		
10.1 en 10.2	+	+
16.1 en 16.2	-	-
16.3 en 16.4	+	+/-
20.1 en 20.2	-	-

Tabel 7.1 De effecten van de verschillende varianten van zandwinkuilen voor de vier kustlocaties; berekeningsperiode 200 jaar. (+ = wel effect; - = geen effect)

8. CONCLUSIES EN AANBEVELINGEN

In de voorliggende studie is op modelmatige wijze nagegaan wat de effecten zijn van zeezandwining uit de kustzône en IJ-geul op de kustmorfologie. De waarde van deze analyse is niet zozeer het voorspellend vermogen, maar ligt in het feit dat op een vergelijkbare wijze winvarianten voor verschillende locaties doorgerekend kunnen worden. Op deze wijze kunnen de effecten van verschillen in locatie, waterdiepte, windiepte en winomvang op de kustmorfologie kwalitatief zichtbaar gemaakt worden. Op basis van de berekeningen kunnen de volgende conclusies getrokken worden:

- winning uit de IJ-geul:
  - alleen een verdieping van de vaargeul heeft effect op de kust;
  - de effecten van zandwinning uit de IJ-geul op de kust zijn verwaarloosbaar t.o.v. de effecten van de aanwezigheid van de havendammen;
  - de zandvangcapaciteit neemt vooral toe door een geulverdieping, met name ver uit de kust;
  - bij een verbreding van de geul verschuift de aanzanding naar de randen van de nieuwe geul.
- winning uit de kustzône:
  - er worden geen directe effecten op de kust verwacht van zeezandwinning buiten de 10 m dieptelijn;
  - op indirecte wijze wordt de kust beïnvloed doordat de winkuil langzaam kustwaarts verplaatst. De migratiesnelheid is afhankelijk van de waterdiepte; de termijn waarop de effecten merkbaar zijn is alleen afhankelijk van de afstand tussen de winkuil en de kust. Van winningen zeewaarts van de 16 m dieptelijn worden binnen een termijn van 200 jaar voor de locaties Bergen en Scheveningen geen effecten op de kust verwacht
  - voor de locaties Texel en Ameland kunnen vanwege de beperkingen van het modelinstrumentarium vooralsnog geen conclusies worden getrokken.
  - kustachteruitgang kan tijdelijk tegengegaan worden door een zandsuppletie. Het gesuppleerde zand blijft boven in het profiel, maar verdwijnt wel in de loop van de tijd naar aangrenzende kustvakken. Ondertussen verplaatst de winkuil zich langzaam kustwaarts.

Gezien de beperkingen van de modellen en de gehanteerde aanpak kunnen deze conclusies evenwel nog niet leiden tot een bijstelling van het zandwinbeleid. Immers omdat de werkelijke processen d.m.v. deels gevalideerde modellen zijn geschematiseerd, zijn de resultaten louter kwalitatief. Een praktijkproef met aansluitend een intensief meetprogramma, is een essentiële voorwaarde om tot een eventuele bijstelling van het zandwinbeleid te komen. Overigens dient voor een definitieve beleidswijziging ook een bredere belangenafweging plaats te vinden. Deze wordt uitgevoerd in het Regionaal Ontgrondingenplan Noordzee, dat in 1990 gereed zal zijn voor inspraak en besluitvorming.

LITERATUUR

1. Anonymous (1984): Nota Harmonisatie Noordzeebeleid, regeringsbeslissing. Tweede Kamerstuk vergaderjaar 1983 - 1984, 17408, nr 7/8.

2. Anonymous (1983): Nota Uitgangspunten, Probleemstelling en Doelstellingen m.b.t. het lange termijnbeleid voor de Oppervlaktedelfststoffen-voorziening. Ministerie van Verkeer en Waterstaat.

3. Anonymous (1987): Gegrond Ontgronden: Landelijke Beleidsnota Oppervlaktedelfstoffen-voorziening. Ministerie van Verkeer en Waterstaat.

4. Regionaal Ontgrondingenplan Noordzee
concept-rapport
Directie Noordzee
juni 1987

5. Kustafslag- en aangroei in Nederland
drs. L.H.M. Kohsiek
Rijkswaterstaat
nota GWAO - 88.007
februari 1988

6. Shore Protection Manual
Coastal Engineering Research Centre
Fourth edition, 1984
Department of the Army, US Army Corps of Engineers
Volume I & II

7. Shore and Beach
Oktober 1981
"letter-to-the-Editor", p. 10 - 11

8. Influence de l'extraction en mer des granulats sur l'equilibre du littoral
C. Migniot, J. Viguier
La Houille Blanche 3, 1980
p. 177 - 194
Proceedings International Seminar on Offshore Mineral Resources
Orleans
p. 97 - 129

9. Ir. H. Speekenbrink
Rijkswaterstaat - Deltadienst
Nota W - 74.065
Op welke afstand uit de kust kan een zandwinning in de orde van 2 * 10^6 m^3 worden uitgevoerd zonder onaanvaardbare gevolgen van het kustregiem.

10. Projectgroep Suppletie Scheveningen
Nota NZ - N - 86.13
Onderzoek zandwin- en suppletiegebeid Scheveningen,
februari - oktober 1985
juni 1986

BIJLAGE 1 BEGRIPPENLIJST

Actieve zône	- zeewaartse grens ligt tussen de 10 en 7 m dieptelijn, valt min of meer samen met de brandingszône. Een verstoring in dit gebied bereikt binnen zeer korte tijd de kustlijn
Duinvoet	- overgang van strand naar duin, meestal rond NAP + 3 m
Erosie	- het verlies van zand door natuurlijke processen
Kustachteruitgang	- het landwaarts verplaatsen van van de kustlijn
Kustlijn	- algemeen begrip waarmee de overgang van zee naar land wordt aangeduid
Kustlijnachteruitgang	- zie kustachteruitgang
Kustverdedigingsstrook	- de gehele strook van de kust die bijdraagt aan het garanderen van van veiligheid tegen overstroming van het polderland
Laagwaterlijn	- verzameling van punten die de positie van het laagwaterniveau langs de kust weergeeft
Onderwateroever	- gedeelte van de kuststrook zeewaarts van de laagwaterlijn (NAP - 1 m) tot een diepte van ca. 20 m
Regio	- geografische gebieden (Delta, Hollandse kust en Wadden) een eenheid waarin de kust in lengterichting is opgedeeld, vaak een geografische eenheid
Scenario	- geschat tijdsverloop van een niet door de mens te beinvloeden natuurlijk verschijnsel
Sedimentatie	- aanwas van zand onder invloed van natuurlijke processen
Suppletie	- aanvulling van de kustverdedigingsstrook met zand om kustachteruitgang te compenseren
(Kust)Voorspelling	- weergave van de kustligging in de periode 1990 - 2090
Voorspelperiode	- periode 1990 - 2090

BIJLAGE 2

zeezandwinning

onderbouwend rapport:
-milieu effect rapportage RON
-discussienota kustverdediging,
Technisch Rapport 10

H 825

april 1989

waterloopkundig laboratorium | WL

INHOUD

blz.

1. Inleiding 1.1

2. Zeezandwinning in de kustzône 2.1
   2.1 Probleemanalyse en aanpak 2.1
   2.2 Oriënterend onderzoek sediment transport 2.3
   2.3 Lokatie Scheveningen 2.6
      2.3.1 Direkte morfologische beïnvloeding van de kustzône 2.6
         2.3.1.1 Getijstroming en golven 2.6
         2.3.1.2 Sedimenttransport en initiele bodemveranderingen .. 2.8
      2.3.2 Dynamisch morfologisch gedrag van de zandwinningskuilen (indirekte beïnvloeding) 2.11
         2.3.2.1 In langsrichting 2.11
         2.3.2.2 In dwarsrichting 2.14
      2.3.3 Beïnvloeding van de aktieve kustzône 2.17
   2.4 Lokaties Bergen, Texel en Ameland 2.21
      2.4.1 Aanpak en schematisering van kondities 2.21
      2.4.2 Bergen 2.22
      2.4.3 Texel en Ameland 2.23

3. Zeezandwinning in en rond de Y-geul 3.1
   3.1 Vraagstelling en aanpak 3.1
   3.2 Beïnvloeding van de geulmorfologie 3.2
      3.2.1 Schematisering van kondities 3.2
      3.2.2 Geulprofielveranderingen en geulsedimentatie 3.3
   3.3 Kustlijnbeïnvloeding 3.6
      3.3.1 Beïnvloeding van het lokale golfklimaat 3.6
      3.3.2 Beïnvloeding van het sediment(langs-)transport en de kustlijn 3.8

4. Conclusies: 4.1
   4.1 Zeezandwinning in de kustzône 4.1
   4.2 Zeezandwinning in en rond de Y-geul 4.4
   4.3 Aanbevelingen voor nader onderzoek 4.6

REFERENTIES

TABELLEN

FIGUREN

Annex A Beschrijving morfologisch model LOMOR
Annex B Analyse morfologische stabiliteit van geulen in een getijdengebied

1. Inleiding

Volgens het huidige beleid met betrekking tot zeezandwinning wordt deze slechts toegestaan zeewaarts van de 20 m dieptelijn of indien deze verder van de kust ligt dan 20 km, zeewaarts van de 20 km lijn. Hierbij is de achtergrond gedachte dat winning dichter onder de kust weliswaar economisch aantrekkelijker zou zijn maar de zeewering in gevaar kan brengen. Aangezien voor de komende jaren een toename wordt verwacht van de winning van zeezand uit de Noordzee (t.b.v. beton/metselzand/ophoogzand en suppletiezand), is de behoefte vergroot onderzoek uit te voeren naar de invloed van zeezandwinning uit de kustzône op het morfologisch gedrag van de kuststrook.
Bij de bestudering van de morfologische effecten van zeezandwinning is onderscheid gemaakt tussen winning in de kustzône (vooral t.b.v. suppleties) en winning in de grote toegangsgeulen naar Rotterdam en IJmuiden (vooral t.b.v. gebruik op land).
De onderliggende studie is uitgevoerd in opdracht van Rijkswaterstaat (opdrachtbrief CZB2672 27/4/88) en is zowel toeleverend aan de milieu-effect rapportage (MER) behorend bij het Regionaal Ontgrondingenplan Noordzee (RON) als aan de Discussienota Kustverdediging die in het kader van de thans in voorbereiding zijnde Wet op de Waterkering wordt opgesteld.
Voor een meer uitgebreide beschouwing over de betreffende achtergrondproblematiek en een nadere specifikatie van de probleemstelling wordt verwezen naar de Nota Grens Zeezandwinning (Anonymus, 1989).

Met betrekking tot de winning in de kustzône (Hoofdstuk 2) is de studie gericht op een aantal lokaties langs de kust waar suppleties worden verwacht, nl. Scheveningen, Bergen, Texel en Ameland. De vraagstelling is verder geconcretiseerd tot het m.b.v. wiskundige modellen onderzoeken van de morfologische consequenties van verschillende winningsalternatieven tussen de 10 m en 20 m dieptelijn. Hierbij wordt onderscheid gemaakt tussen direkte morfologische beïnvloeding van de kuststrook ten gevolge van direkte wijzigingen in golf en stromingskondities en indirekte morfologische beïnvloeding ten gevolge van de morfologische ontwikkeling van een zandwinningskuil die op termijn de aktieve kuststrook kan bereiken.
De morfologische consequenties van (onderwateroever) suppleties zijn in een aparte studie onderzocht (Roelvink, 1988).

Met betrekking tot de winning in en rond de grote toegangsgeulen (Hoofdstuk 3) is de studie uitgemond in een reeks alternatieve wijzigingen in het dwars (bodem) profiel van de IJ-geul (verbreding/verdieping) en het m.b.v. wiskundige modellen onderzoeken van de morfologische consequenties van deze ingrepen. Hierbij is de aandacht gericht op zowel de effekten op de aanzanding in de geul (baggeronderhoudswerk) als op de effecten op de nabijgelegen kustlijn bij IJmuiden.

Bij zowel de studie naar de kustzônewinning als die naar de vaargeulwinning is gekozen voor een wiskundige modelbenadering, waarbij zo veel mogelijk bestaande wiskundige modelconcepten zijn toegepast. Ondanks het feit dat deze concepten in het algemeen niet of onvoldoende zijn gevalideerd voor toepassing in de Nederlandse kustzône, wordt een dergelijke benadering zinvol geacht om:

- toch tot enige, zij het grove, kwantitatieve uitspraken met betrekking tot de invloed van zeezandwinning op de kust te kunnen komen,
- de zwakheden van de betreffende modelconcepten voor de specifieke situatie van de Nederlandse kust te kunnen blootleggen.

Bij de studie is gebruik gemaakt van getijstromingsberekeningen en golvenberekeningen die zijn uitgevoerd door de Dienst Getijdewateren van Rijkswaterstaat. De noodzakelijke veldgegevens werden toegeleverd door de Direktie Noordzee van Rijkswaterstaat.
De studie vond plaats in nauwe samenhang met andere deelonderzoeken in het kader van de Nota Kustverdediging en is uitgevoerd door J.S. Ribberink en J.A. Roelvink met medewerking van J.H. de Vroeg, H.J. de Vriend en J.J. Veldman en onder begeleiding van J.S.L.J. van Alphen (Dir. Noordzee), C.J. Louisse (DGW) en F.P. Hallie (DGW).

2. Zeezandwinning in de kustzône

2.1 Probleemanalyse en aanpak

Tabel 2.1 geeft een overzicht van de te onderzoeken winningsvarianten in de kustzône. De winningshoeveelheid varieert tussen 200.000 m^3 (10 m, 16 m dieptelijn) en 10 miljoen m^3 (16 m, 20 m dieptelijn).
Het onderzoek is allereerst gericht op de lokatie Scheveningen aangezien voor deze lokatie een gedetailleerd getijstromings- en golvenmodel beschikbaar was (WAQUA/HISWA model ZANDWIN).
Naar aanleiding van de op deze lokatie verkregen resultaten (par. 2.3) is de studie vervolgens uitgebreid naar de lokaties Bergen, Ameland en Texel (par. 2.4).

Ter verkrijging van een indikatie van de orde-grootte van het sedimenttransport in langsrichting, het type sedimenttransport en het belang van naijlingsverschijnselen van het suspensie transport tussen de 10 m en 20 m dieptelijn, wordt in par. 2.2 enig oriënterend onderzoek uitgevoerd, waarbij gebruik wordt gemaakt van bestaande sediment transportbeschrijvingen.

Wat betreft de morfologische consequenties van zeezandwinning voor de kust kan onderscheid worden gemaakt in:

i. direkte morfologische beïnvloeding van de kust als gevolg van door de zandwinningskuil veroorzaakte wijzigingen van de hydrodynamische kondities (getijstroming/golven) in het aktieve kustgebied (= de hoogdynamische kustzône kustwaarts van globaal de 8 m dieptelijn, zie Stive, 1989)

ii. indirekte beïnvloeding van de kust t.g.v. de morfologische ontwikkeling van de zandwinningskuil zelf die op lange termijn een zandtekort in het aktieve kustgebied zou kunnen veroorzaken.

ad i. Als gevolg van refraktieverschijnselen in en rond de zandwinningskuilen zullen de golfkarakteristieken kustwaarts van de kuilen worden gewijzigd t.o.v. de ongestoorde situatie. Tevens zullen, door contractie van de getijstroming in de (langs de kust georiënteerde) kuilen, de getijstroomsnelheden in een zône kustwaarts van de kuilen worden gereduceerd. Als deze wijzigingen in hydrodynamische kondities zich uitstrekken tot

in de aktieve kustzône zouden op relatief korte termijn veranderingen in kustlijn het gevolg kunnen zijn.
In par. 2.3.1. wordt voor de lokatie Scheveningen deze direkte morfologische beïnvloeding voor meerdere kuilvarianten onderzocht. Hierbij wordt gebruik gemaakt van het bovengenoemde WAQUA/HISWA model ZANDWIN.

ad ii. Voor de bestudering van het (dynamisch) morfologisch gedrag van de zandwinningskuilen is - aangezien een 2DH dynamisch morfologische modellering niet mogelijk was - een gescheiden modellering van de kuilmorfologie in langs- en in dwarsrichting toegepast. Hiermee kan weliswaar geen gedetailleerd beeld van de complete morfologische ontwikkeling in en rond de zandwinningskuil worden verkregen, maar kan wel een indruk worden verkregen van de dynamische morfologie in langs- en dwarsraaien en de tijdschalen die hierbij een rol spelen, in relatie tot de kuilgeometrie en de dieptelijn waarop de kuil is aangebracht.
Centrale vragen hierbij zijn in eerste instantie:
- welke ontwikkeling gaat sneller, langs of dwars?
  Als bijv. de ontwikkelingen in langsrichting aanzienlijk sneller gaan dan in dwarsrichting, door bijv. sedimentatie in de kuil en erosie aan weerszijden, wordt de eventuele invloed op de kustlijn niet alleen minder hevig maar tegelijkertijd over een groter gebied gespreid.
- verplaatst een kuil zich richting kust of niet en op welke tijdschaal speelt dit proces zich af?
- hoe lang is de gescheiden aanpak van langs en dwarsmorfolgie toelaatbaar?

In de richting loodrecht op de kust (dwarsraai) wordt het sedimenttransport vooral bepaald door de golfgeïnduceerde stroming (orbitaalbeweging en netto stroming) en de nabij de bodem aanwezige kustwaarts gerichte reststromingen (zie Stive en Roelvink, 1988). De hierdoor veroorzaakte morfologische veranderingen in een dwarsraai loodrecht op de kust worden in par. 2.3.2.1 onderzocht m.b.v. het dwarsraai morfologisch model CROSTRAN (zie Stive, 1986 en Roelvink en Stive, 1988).

In langsrichting is het sedimenttransport vooral getijgedomineerd en fungeren de golven als opwoeler (zie ook par. 2.2). De morfologische

veranderingen in langsrichting worden vooral bepaald door de contractie van de getijstroming in de kuil en de naijlende werking van het suspensietransport. Voor de beschrijving van de dynamische morfolgie in langsrichting is een speciaal voor deze studie ontwikkeld morfologisch langsraai-model (LOMOR) toegepast, dat niet alleen voorzien is van een met CROSTRAN consistente sedimenttransport-formulering (Bailard), maar waarin tevens een vereenvoudigde (diepte-gemiddelde) getijstromingsformulering is aangebracht. Door deze laatste toevoeging is het telkens opnieuw, dat wil zeggen na een zekere verandering in kuilvorm, off-line uitvoeren van WAQUA berekeningen overbodig geworden. Zie Annex A voor een gedetailleerde beschrijving van LOMOR, en par. 2.3.2.1 voor de toepassing ervan.

In par. 2.3.3 worden de hierboven omschreven (deel)onderzoeksresultaten gebundeld en vertaald naar conclusies t.a.v. de invloed van zeezandwinning op de aktieve kustzône (lokatie Scheveningen).

In par. 2.4 wordt het vervolgens uitgebreid naar de lokaties Bergen, Texel en Ameland.

2.2 Oriënterend onderzoek sediment transport

Omdat de grootte van het sedimenttransport in het algemeen direkt bepalend is voor de tijdschaal van morfologische ontwikkelingen is, uitgaande van de bestaande sedimenttransportformuleringen van Bailard (1980) en Van Rijn (1985), gevoeligheidsonderzoek utgevoerd gericht op de beschrijving van het langstransport en hierbij van belang zijnde fysische processen. Voor de gevoeligheden aanwezig in de dwarstransport beschrijving kan worden verwezen naar Roelvink en Stive (1988).

Als input voor de transportmodellen is gebruik gemaakt van geschatte hydrodynamische kondities (stroomsnelheid, waterdiepte, golfhoogte/periode) tussen de 10 m en 20 m dieptelijn tijdens maximale getijstroming; deze getijfase wordt bepalend geacht voor de morfologische ontwikkeling van een kuil in langsrichting.
De volgende set kondities is hierbij toegepast (zie voor de schematisering ook par. 2.3.2):

diepte-gemiddelde snelheid	U	= 0.6 m/s
waterdiepten	h	= 10, 16, 20 m
golfhoogte	H_{rms}	= 1.1 m
golfperiode	T_p	= 5.7 s
sedimentafmetingen	D_{50}	= 0.2 10^{-3} m
	D_{90}	= 0.3 10^{-3} m
bodemruwheidshoogten	k_c	= 0.04 m (WAQUA)
	k_w	= 0.01 m (HISWA)

De volgende gevoeligheden zijn onderzocht:
- de invloed van het type transportmodel (Bailard, van Rijn),
- de invloed van de bodemruwheid(s-modellering),
- het belang van het asymmetrie-transport voor de grootte van het langstransport (zie ook Annex A),
- het belang van niet lineariteiten in de orbitaalbeweging,
- het belang van naijlingsverschijnselen van het suspensietransport.

In Tabel 2.2 wordt een vergelijking gemaakt tussen transportgrootten berekend volgens van Rijn en Bailard. De formule van Bailard is hierbij als volgt ingesteld (zie ook Annex A):

ε_b = 0.1
ε_s = 0.02
$\tan\phi$ = 0.63
α_b = 0.5

Opvallend in de resultaten is de toename van het met Bailard berekende transport met toenemende diepte! Van Rijn levert met toenemende diepte en dus verminderde golfinvloed bij de bodem het omgekeerde en wellicht betrouwbaarder beeld. Op de 10 m dieptelijn is de grootte van het transport voor beide formules vrijwel identiek. Parameter α_b die bepalend is voor de doorwerking van de getijstroming in het transport is een onbekende maar belangrijke factor, die de orde-grootte van het transport sterk kan beïnvloeden. Nader onderzoek op dit punt is dan ook zeker gewenst.
In de modelberekeningen is de Bailard formulering toegepast in plaats van die van van Rijn in verband met de consistentie in transportformulering in langs- en dwarsrichting.

Tabel 2.3 geeft inzicht in de invloed van de bodemruwheidsformulering op de transportgrootte zoals berekend met de formule van Bailard. Hierin is te zien dat de toename van de transportgrootte met toenemende diepte wordt veroorzaakt door de formulering voor de wrijvingsfactor c_f van Jonsson (1980). Aangezien deze c_f-beschrijving is ontwikkeld voor golfgedomineerde kondities kan toepassing ervan op dieper water met een belangrijke getijstroominvloed als twijfelachtig worden beschouwd. Tabel 2.3 toont tevens de invloed van de bodemruwheidshoogte formulering op het transport. Voor de orde-grootte van het transport blijkt de bodemruwheidsformulering niet erg belangrijk te zijn. De uiteindelijke berekeningen (par. 2.3.2) zijn daarom uitgevoerd met c_f = 0.01 m.

In Tabel 2.4 wordt een indikatie gegeven van de invloed van het asymmetrie transport op het totale transport in langsrichting (Bailard-formule). De berekening is uitgevoerd voor een situatie waarin de golfvoortplantingsrichtingsvector een hoek van 45° vormt met de getijstroomsnelheidsvector. Naarmate de waterdiepte afneemt blijkt, ten gevolge van de vergrote golfinvloed, de asymmetrie transport component (in langsrichting) van groter belang te worden. Aangezien de golfvoorplantingsrichting sterk kan variëren en dus zowel een vergroting als een verlaging van het transport kan veroorzaken, kan worden geconcludeerd dat, voor de orde-grootte van het langstransport tijdens maximale vloed of ebstroming, asymmetrie effekten kunnen worden verwaarloosd. In de modelberekeningen (langsmorfologie) wordt daarom slechts de opwoelende werking van de golven in rekening gebracht (zie Annex A voor de modellering).

Toepassing van niet-lineaire golftheorie (Rienecker & Fenton, 1981) in plaats van lineaire golftheorie blijkt op deze waterdiepten voor het langstransport nauwelijks van belang te zijn (zie Tabel 2.5) en is in de uiteindelijke modelberekeningen dan ook niet toegepast.

Tabel 2.6 geeft inzicht in het belang van naijlingseffecten van het gesuspendeerde sediment (dat wil zeggen transport ≠ transport capaciteit) door middel van berekende aanpassingslengten volgens de definitie van van Rijn (1985) en Galappatti (1983).
Het verschil tussen beide uitkomsten wordt veroorzaakt door een verschil in definitie (grofweg $L_A \approx 1/3\ L_{5\%}$, zie Katapodi en Ribberink, 1988). Conclusie is dat de naijlingsverschijnselen zich voor kunnen doen over een lengte van dezelfde orde-grootte als de lengte van de zandwinningskuilen (zie Tabel 2.1) en daarmee voor de morfologische ontwikkeling van belang zijn.

In Annex A wordt de modellering van dit verschijnsel, op basis van de methode van Galappatti, nader uiteengezet.

Een direkte vergelijking van de transportmodel resultaten met metingen langs de kust kon in verband met het gebrek aan sedimenttransportgegevens op relatief grote waterdiepten niet worden uitgevoerd. In Hoofdstuk 3 leidt een vergelijking tussen gemeten en berekende aanzandingshoeveelheden in de IJ-geul tot de conclusie dat de orde-grootte redelijk goed lijkt te worden voorspeld. Geschat wordt op basis van het hierboven uitgevoerde gevoeligheidsonderzoek dat een onnauwkeurigheidsfactor 3-5 in de berekende transporten en daarmee in de tijdschaal van de morfologische processen mogelijk is.
Deze onnauwkeurigheidsfactor wordt aangehouden voor zowel het transport in langsrichting als in dwarsrichting. De dwarstransportformulering is wellicht nauwkeuriger, maar dit geldt vooral voor ondieper water (globaal kustwaarts van de 8 m dieptelijn) waar een integrale ijking van het morfologisch model CROSTRAN (inclusief de Bailard transportformulering) is uitgevoerd (zie Roelvink, 1988).

2.3 Lokatie Scheveningen

2.3.1 Direkte morfologische beïnvloeding van de kustzône

2.3.1.1 Getijstroming en golven

Ten einde een indruk te krijgen van de direkte invloed van een aangebrachte zandwinningskuil op de getijstroming en de golfkarakteristieken in de kustzône is m.b.v. een bestaand 2DH-getijstromingsmodel en het golvenveldmodel HISWA voor de lokatie Scheveningen (model "ZANDDAM", nu: model "ZANDWIN", zie van Dijk, 1986) een aantal zandwinningskuil alternatieven doorgerekend. De berekeningen zijn uitgevoerd door de Dienst Getijdewateren (DGW).

Aangezien het ZANDWIN-model zich niet verder uitstrekte dan tot de 17 m dieptelijn (20 km langs de kust, ≈ 8 km loodrecht op de kust) zijn de kuilen aangebracht op de 10 m en 14 m dieptelijn. De smalle kuilalternatieven (breedte 100 m, zie Tabel 2.1) zijn i.v.m. de toegepaste roosterafstand (100 m) niet doorgerekend. In Tabel 2.7 wordt een overzicht gegeven van de doorgerekende kuilalternatieven. Zie Fig. 2.1 voor de lokatie van de kuilen ter hoogte van

RSP106. De Figuren 2.2 en 2.3 tonen de verstoorde bodem (dwars) profielen (dwarsraai RSP106).

Opmerking: De resultaten van ZANDWIN/WAQUA berekeningen zijn tevens gebruikt voor de verifikatie van het quasi-2DH stationaire stromingsmodel (FLOW1D) zoals toegepast in het langs-morfologische model LOMOR (zie Annex A). Hiertoe zijn een aantal extra kuilalternatieven gedefinieerd.

Getijstroming

De beïnvloeding van de diepte-gemiddelde stroomsnelheid door de aangebrachte bodemverdiepingen is, voor de situatie tijdens maximale vloedstroom, zichtbaar gemaakt in Fig. 2.4 en Fig. 2.5. Figuur 2.4 is tot stand gekomen d.m.v. vectoriële aftrekking van de stroomsnelheidsvectoren van het meest extreme geval ZW03 (kuildiepte 5 m) en de ongestoorde situatie ZW00. De contractie van de stroming t.p.v. de verdieping is hierbij duidelijk te herkennen, evenals de "kopeffekten" bij de instroom en uitstroomrand van de kuil.
Figuur 2.5 toont de verstoring van het snelheidsprofiel loodrecht op de kust voor alle berekende alternatieven (dwarsraai RSP106). Voor alle ondiepe kuilen (Δh = 1 m) blijkt de snelheid langs het gehele profield nauwelijks te worden beïnvloed (<2.5 %). De diepe kuil (ZW03, Δh = 5 m) leidt tot een snelheidsreduktie van maximaal 9% in de kuil. Zeewaarts en kustwaarts van de kuil is de kuilinvloed nog zichtbaar over een afstand van globaal 1 à 2 maal de kuilbreedte.
Kustwaarts van de 10 m dieptelijn is de invloed voor alle gevallen verwaarloosbaar.

Golfkarakteristieken

Een indikatieve HISWA-berekening is uitgevoerd voor een geval met de volgende inkomende golfkondities:
golfhoogte H_{sig} = 2.0 m
golfperiode T_p = 6.5 s
golfinvalsrichting = 292.5° (richting loodrecht op de kust = 315°).
Figuur 2.6 en 2.7 tonen contourplots van het berekende golfhoogteverloop (in dm) in het gebied zonder resp. met (diepe) kuil (ZW00 resp. ZW03). Rond de aangebrachte kuil treedt een geringe toename op van de golfhoogte t.g.v. "shoaling" effekten. Dichter bij de kust is de invloed echter niet meer waarneembaar (1.90 m en 1.80 m contouren). Figuur 2.8 toont het golfhoogte verloop

langs de dwarsraai RSP106 voor alle doorgerekende alternatieven. Hierin is te zien dat het geval ZW03 opnieuw als het meest extreem kan worden gekenmerkt (maximale golfhoogte toename ≈ 2%). In de brandingszône is de invloed van de kuilen voor alle gevallen niet meer waarneembaar. Blijkbaar zijn de effecten van dit type kuilen (aangebracht op relatief grote waterdiepte) op golfrefraktie en dissipatie van golfenergie slechts van ondergeschikt belang. De berekeningsresultaten zijn in overeenstemming met een eerder uitgevoerde uitgebreide HISWA-studie naar de invloed van onderwateroeversuppleties op het near-shore golfklimaat (zie Hoekema en Knoester, 1987).

In onderzoek uitgevoerd door Hydraulics Research Station Wallingford (zie Motyka en Laffrey, 1978) wordt voor een lokatie aan de Noordzeekust van Engeland (steiler kustprofiel dan Scheveningen) geconcludeerd dat de effekten van golfrefraktie op de kustlijn nog waarneembaar zijn als de zeezandwinning wordt uitgevoerd op waterdiepten kleiner dan 14 m. Dit resultaat wordt echter als conservatief gekenmerkt, omdat gebruik werd gemaakt van een 1D golf-raai model waarbij golfenergieverlies langs de golfkammen niet mogelijk is. Dit laatste in combinatie met het verschil in kustprofielsteilheid (kuilen dichter bij de kust in de Wallingfordstudie!) is mogelijkerwijs de verklaring voor de geringere effekten zoals voorspeld met het ZANDWIN (HISWA)-model.

2.3.1.2 Sedimenttransport en initiele bodemveranderingen

Door de beïnvloeding van de getijstroming kustwaarts van een aangebrachte kuil zal tevens het sedimenttransportpatroon en daarmee de morfologie worden beïnvloed. Door stromingscontractie in de kuil treedt kustwaarts van de kuil stroombaanverbreding op en als gevolg daarvan stroomsnelheidsreduktie. Vanuit de ongestoorde situatie stroomopwaarts treedt allereerst stroombaan divergentie op (= stroomvertraging) en vervolgens in stroomafwaarste richting stroombaanconvergentie (= stroomversnelling) naar opnieuw de ongestoorde situatie. De grootste stroomsnelheidsreduktie treedt ongeveer op in de dwarsraai midden door de kuil (zie Fig. 2.4 en 2.5). In de hiernavolgende beschouwing wordt een schatting gemaakt van de door deze stroombaanverbreding veroorzaakte bodemveranderingen in de zône kustwaarts van de aangebrachte kuilen.

Omdat het totale debiet in een stroombaan constant is en de waterdiepte langs de stroombaan ook nauwelijks veranderd (kustparallele dieptelijnen) geldt:

$$\frac{U_g}{U_o} = \frac{B_o}{B_g} = \alpha \qquad (2.1)$$

waarin index 'o' en 'g' resp. de ongestoorde en de gestoorde situatie representeren, B de stroombaanbreedte weergeeft en α de reduktie factor voor de dieptegemiddelde snelheid is. Volgens de transportformulering van Bailard (zie Annex A) is het getijgeïnduceerde langstransport q_s volgens een machtswet evenredig met U:

$$q_s = \kappa |U^{n-1}| . U$$

waarin κ een evenredigheidsconstante is en de maximale waarde van macht n is n = 4.

Het totale sedimenttransport door de ongestoorde stroombaan (breedte B_o) is:

$$Q_{s_o} = q_{s_o} . B_o = \kappa |U_o^{n-1}| . U_o . B_o \qquad (2.2)$$

Het totale sedimentransport door de gestoorde stroombaan (breede B_g) is, m.b.v. (2.1):

$$Q_{s_g} = q_{s_g} . B_g = \kappa \alpha^{n-1} |U_o^{n-1}| . U_o . B_o \qquad (2.3)$$

of met (2.2):

$$Q_{s_g} = \alpha^{n-1} . Q_{s_o} \qquad (2.4)$$

Opmerking: Omdat de golfinvloed op de sedimentopwoeling in deze beschouwing niet is verdisconteerd en de golven nauwelijks door de kuilen worden beïnvloed kan deze beïnvloedingsfactor van het transport ($Q_{s_g} / Q_{s_o} = \alpha^{n-1}$) als een maximum worden beschouwd.

Onder de aanname dat het stromingscontractie gedrag niet verandert gedurende de getijperiode (α is constant) kan vergel. (2.4) worden gemiddeld over de getijperiode en geldt voor het getijgemiddelde transport:

$$\overline{Q_{s_g}} = \alpha^{n-1} . \overline{Q_{s_o}} \qquad (2.5)$$

De bodemveranderingen langs een stroombaan kunnen worden bepaald met:

$$B \frac{\partial z_b}{\partial t} = - \frac{\partial \overline{Q_s}}{\partial x} \qquad (2.6)$$

De lengte waarover de stroombaan veranderingen zich afspelen is van de ordegrootte $L = C^2h/2g$ en de breedte (in dwarsrichting) van de strook kustwaarts van de kuil die wordt beïnvloed is maximaal 2 x de kuilbreedte (zie Annex A). Door toepassing van de vergelijkingen (2.5) en (2.6) langs de stroombaan over deze lengte L kan de initiële bodem veranderingssnelheid $\partial z_b/\partial t$ worden afgeschat (met $B \approx B_o$):

$$\frac{\partial z_b}{\partial t} \approx \pm \frac{1}{B_o} \frac{\alpha^{n-1}.\bar{Q}_{so} - \bar{Q}_{so}}{C^2h/2g} \qquad (2.7)$$

dat m.b.v. vergel. (2.2) kan worden geschreven als:

$$\frac{\partial z_b}{\partial t} \approx \pm (\alpha^{n-1} - 1) \cdot \frac{\bar{q}_{so}}{C^2h/2g} \qquad (2.8)$$

Hierbij geldt dat:

- volgens de uitgevoerde WAQUA berekeningen α varieert tussen de 90% (5 m diepe kuil) en 99% (1 m diepe kuil)
- $L = C^2h/2g \approx 2000$ m
- de vermoedelijk beste schatting voor het getijgemiddelde langstransport wordt verkregen uit het initiele sedimenttransport model voor de Hollandse Kust (Roelvink en Stive, 1988).

Voor de lokatie Scheveningen bedraagt dit transport $q_{so} \approx 10$ m²/jaar (op waterdiepten tussen 10 en 20 m) in noordelijke richting zodat:

$$\frac{\partial z_b}{\partial t} \approx \pm 0.02 \text{ cm/jaar (1 m diepe kuil)}$$

$$\frac{\partial z_b}{\partial t} \approx \pm 0.2 \text{ cm/jaar (5 m diepe kuil)}$$

waarbij, in deze situatie met een netto resulterend transport naar het Noorden, sedimentatie optreedt in het kustwaartse gebied ten Zuiden van de aangebrachte kuil en de erosie ten Noorden hiervan.
De berekende bodemveranderingssnelheden zijn, ook als een onnauwkeurigheidsfactor 5 wordt gehanteerd, zeer klein (maximaal 10 - 50 cm in 100 jaar) en over een periode van tientallen jaren niet te onderscheiden van natuurlijke bodemniveauvariaties.

Aangezien de veranderingen bovendien beperkt blijven tot de strook maximaal 2 km (voor kuilbreedten 1000 m) kustwaarts van de kuilen, wordt voor alle te bestuderen winningsvarianten de aktieve kustzône (kustwaarts van ongeveer -8 m) en daarmee de kustlijn niet direkt beïnvloed.

2.3.2 Dynamisch morfologisch gedrag van de zandwinningskuilen

2.3.2.1 In langsrichting

Uitgangspunten

Voor het morfologisch kuilgedrag in langsrichting wordt gebruik gemaakt van het dynamisch morfologische model LOMOR (zie Annex A voor de modelbeschrijving). Hierbij worden de volgende uitgangspunten gehanteerd (zie ook par. 2.2):

- het toepassingsgebied van het model ligt op diep water (10 m - 20 m dieptelijn) waar het sediment (langs)transport (formulering van Bailard, 1981) vooral door de getijstroming wordt bepaald en de golven vooral als opwoelers fungeren,
- de getijstroming is langs de (quasi-uniforme) kust gericht (geen belangrijke rondstroming) en wordt al een quasi-stationaire quasi-2DH stroming gemodelleerd; de stromingscontractie in de kuil wordt hiermee op een vereenvoudigde manier in rekening gebracht,
- het naijlende gedrag van het suspensietransport wordt in rekening gebracht m.b.v. de methode van Galapatti (1983).

Voor een gedetailleerde modelbeschrijving en de modelinstelling zie Annex A.

Schematisering van kondities

Voor de ongestoorde getijstromingskondities (stroomsnelheid, waterdiepte) is gebruik gemaakt van de uitkomsten van het WAQUA-model "ZANDWIN" (zie par. 2.3.1). Figuur 2.9 toont het berekende tijdsafhankelijke gedrag van de diepte-gemiddelde snelheid op de 10 m en de 14 m dieptelijn tijdens de getijcyclus (time histories). Aangezien het berekende snelheidsverloop zeewaarts van de 14 m dieptelijn nauwelijks meer verandert is de laatste ook toegepast voor de kuilalternatieven op de 16 m en 20 m dieptelijn. De time-histories zijn geschematiseerd tot 10 quasi-stationaire situaties (tijstap Δt = 1 u. 15 min.). Gemeten golfklimaten van Lichteiland Goeree en Meetpost Noordwijk (Roskam en Hokke, 1988) zijn afzonderlijk geschematiseerd tot een zodanige karakteris-

tieke golfhoogte en bijbehorende periode dat het konvektieve (langs) transport correct wordt weergegeven (gebaseerd op transport $q_s \sim H^{5/2}$). Vervolgens is voor de lokatie Scheveningen een gemiddelde bepaald, hetgeen resulteerde in: H_{rms} = 1.0 m en T_p = 5.7 s.
Voor de sedimentkarakteristieken is gebruik gemaakt van toegeleverde gegevens door direktie Noordzee (zie Tabel 2.8).

Oriënterend onderzoek met het model LOMOR

Gevoeligheidsonderzoek uitgevoerd met het model LOMOR toonde aan dat niet zozeer het karakter als wel de tijdschaal van de morfologische veranderingen aanzienlijk kan variëren afhankelijk van de instelling van een aantal parameters. Een onnauwkeurigheidsfactor 3-5 in de berekende tijdschaal lijkt op grond van de modeluitkomsten niet onwaarschijnlijk (zie hiervoor ook par. 2.2). Het karakter van de morfologische veranderingen was voor alle berekeningen vergelijkbaar, d.w.z.:

- een relatieve snelle afvlakking van de koptaluds van de kuil (diffusie-achtig proces),
- een zeer geringe of geen netto verplaatsing van de kuil in langsrichting,
- een zeer geringe verdieping (smalle kuilen) of verondieping (brede kuilen) in het midden van de kuil.

Zie hiervoor ook de uitkomsten van de definitieve berekeningen (Fig. 2.11 ... 2.14).
De ingestelde golfhoogte bleek een belangrijke parameter die niet alleen de tijdschaal van de morfologische processen beïnvloed maar ook van invloed bleek op de ver(on)dieping van de kuil (grotere H_{rms}, sterkere neiging tot verondieping).
Het hierboven beschreven morfologische karakter van de zandwinningskuilen wordt bevestigd door de resultaten van een stabiliteitsanalyse uitgevoerd met de set gelineariseerde vergelijkingen van het LOMOR model voor de situatie zonder golven (zie Annex B.2). Het naijlende suspensietransport blijkt verantwoordelijk te zijn voor de snelle afvlakking (demping van korte bodemgolven (afvlakking Koptaluds), diffusie-achtig proces. Daarentegen blijkt de stromingscontractie in de kuil een opslingerende werking te hebben (opslingering van langere bodemgolven); dit komt tot uiting in de (zeer geringe) erosie in het midden van de kuil. De orde-grootte van de lengte van de bodemverstoringen waarbij het dempend gedrag overgaat in het opslingerende gedrag is gelijk aan de lengte van de te onderzoeken kuilalternatieven (een paar kilometer).

In de definitieve numerieke berekeningen zijn de kopeffekten in de stroming, d.w.z. de zeer snelle stroomsnelheidsovergangen nabij de beneden- en bovenstroomse koppen van de kuil (zie Annex A), uiteindelijk niet in het stromingsmodel meegenomen.

Door de relatief snelle afvlakking van de kop-taluds blijken tegelijkertijd de kopeffekten in de stroming snel uit te dempen. De uiteindelijke morfologische ontwikkeling van de kuil blijkt niet of nauwelijks door deze initiële verschijnselen te worden beïnvloed. In Fig. 2.10 wordt deze uitdemping van de kopeffekten gedemonstreerd voor een kuil aangebracht op de 16 m dieptelijn met een lengte L = 2000 m, breedte B = 300 m en diepte Δh = 1m. De bovenste figuur toont de bodemniveau veranderingen langs de (langs) as van de kuil. De onderste figuur toont de gelijktijdige veranderingen van het getijstroomsnelheidsverloop (voor steeds dezelfde getijfase!)
De uiteindelijk LOMOR simulaties zijn uitgevoerd met een plaatsstap Δx = 50 m.

Resultaten LOMOR-berekeningen

De definitieve berekeningen voor de acht zandwinningskuil alternatieven (zie Tabel 2.1) zijn uitgevoerd voor een periode van 40 jaar. Zie Fig. 2.11 ..... 2.14 voor de berekende langs (bodem) profielontwikkeling van de verschillende kuilen. De volgende kanttekeningen kunnen hierbij worden gemaakt:

- Voor alle berekende gevallen treden in het midden van de kuil vrijwel geen veranderingen op; hiermee wordt een onafhankelijke berekening van de morfologische veranderingen in dwarsrichting langs een dwarsraai door het midden van de kuil voor dezelfde tijdsperiode (40 jaar) toelaatbaar. Zie par. 2.3.2.2.
- Alle berekeningen tonen een afvlakking van de koptaluds van de kuil, hetgeen een bevestiging is van de stabiliteitsanalyse zoals uitgevoerd in Annex B (demping korte bodemgolven).
- Alleen de kuilen aangebracht op de 10 m dieptelijn vertonen een geringe netto verplaatsing in ZW richting (voortplantingssnelheid ≈ 7 m/jaar). Dit effekt wordt veroorzaakt door de geringere waterdiepte tijdens de ZW gerichte ebstroming (waterstand en stroomsnelheid zijn vrijwel in fase) en de daarmee gepaard gaande relatief hoge orbitaalsnelheid (bij de bodem) en grotere sedimentopwoeling.
  Opmerking: De netto verplaatsing en daarmee het netto sedimenttransport in ZW richting is niet in overeenstemming met resultaten gevonden door

Roelvink en Stive (1988). Dit wordt waarschijnlijk veroorzaakt door een reduktie in golfhoogte tijdens de ebfase die in LOMOR niet is gemodelleerd. De kuilvervormingsprocessen die voor de onderhavige studie van het meeste belang zijn, worden hierdoor echter niet beïnvloed.

- De smalle kuilen (B = 100 m) vertonen in tegenstelling tot de brede kuilen een geringe verdieping; dit wordt veroorzaakt door grotere stroomversnelling t.g.v. de stromingscontractie die bij de smalle kuilen optreedt. De uiteindelijke invloed van de kuilbreedte is echter zeer gering, hetgeen nog wordt versterkt door de grote tijdschaal waarop de veranderingen zich afspelen.
- Ook de invloed van de kuillengte, kuildiepte en dieptelijn is klein. De afvlakking van de zijtaluds neemt toe voor toenemende kuildiepte en afnemende waterdiepte.

Een uitgebreide toetsing/ijking van het model aan veldgegevens is, mede gezien de onzekerheid m.b.t. de tijdschaal van de morfologische veranderingen, zeer gewenst. Een recentelijk gebaggerde zandwinput op de 20 m dieptelijn in het kustgebied bij Scheveningen (zie Anonymus, 1986) is, gezien de geringe aangebrachte verdieping (≈ 0.7 m), hiervoor niet geschikt.

2.3.2.2 In dwarsrichting

Bij de bestudering van het morfologische gedrag in dwarsrichting wordt gebruik gemaakt van het model CROSTRAN (zie Stive, 1986 en Roelvink en Stive, 1988). Hierbij moet worden opgemerkt dat dit model is ontwikkeld voor de morfologische dwarsprofielontwikkeling op relatief ondiep water en daarom bijv. uitgaat van een quasi-uniforme kust, loodrecht op de kust invallende golven en een verwaarloosbare getijstroming. Op dieper water zijn deze aannamen veel minder vanzelfsprekend en zijn bovendien de door wind en Coriolis veroorzaakte 3D stromingen van belang. Op grond van onderzoek uitgevoerd met het initieel transportmodel voor de Hollandse Kust (zie Roelvink en Stive, 1988), waarin deze fysische verschijnselen wel zijn gemodelleerd, kan worden geconcludeerd dat, voor de lokatie Scheveningen, de genoemde verschijnselen niet dominant zijn, elkaar gedeeltelijk compenseren en de orde-grootte van het sedimenttransport niet wezenlijk beïnvloeden.

Bij het bestuderen van de verschillende kuilalternatieven is onderscheid gemaakt tussen de kuilen op 16 m/20 m dieptelijn en die op de 10 m dieptelijn omdat:

- de laatstgenoemde kuilen tot een relatief snelle beïnvloeding van de hoogdynamische aktieve kustzône bleken te kunnen leiden, en
- het dwarstransport op de 10 m dieptelijn, in tegenstelling tot de situatie op de 16 m/20 m dieptelijn, niet langer alleen wordt bepaald door de lokale waterdiepte (zie Roelvink en Stive, 1988).

Op grond hiervan is t.b.v. de berekeningen op de 16 m/20 m dieptelijn, m.b.v. dwarsprofiel informatie afgeleid van het ZANDWIN (WAQUA)-model en van gemeten diep-water profielen (zie van Alphen en Damoiseaux, 1987), een sterk geschematiseerd dwarsprofiel samengesteld. T.b.v. de berekeningen op een 10 m dieptelijn is een veel nauwkeuriger gemeten dwarsprofiel van de vooroever toegepast (JARKUS-bestand).
Op de 16 m/20 m dieptelijn is het golfklimaat, gemeten op lichteiland Goeree (geschematiseerd tot 5 golfklassen met bijbehorende periode) toegepast. Op de 10 m dieptelijn zijn tevens seizoensfluktuaties (dagelijks gemeten golf-karakteristieken uit het jaar 1983) in rekening gebracht, waarbij nog onderscheid is gemaakt tussen deining en korte golven.

In de Figuren 2.15...2.20 wordt de berekende morfologische dwarsprofielontwikkeling van de kuilalternatieven op de 16 m en 20 m dieptelijn getoond gedurende een periode van 40 jaar. De volgende kanttekeningen kunnen hierbij worden gemaakt:

- Ook door dwarsmorfologische processen veranderden de kuilen niet tot nauwelijks (T16.1) van diepte in de doorgerekende 40 jaar. Dit ondersteunt opnieuw de gekozen onafhankelijke aanpak van de langs en dwarsmorfologie.
- In alle gevallen treedt een zeer geringe kustwaartse verplaatsing op (maximaal 1 à 2 m per jaar!) van de aangebrachte kuil. Hierbij moet worden vermeld dat de parallele bodemerosie kustwaarts van de kuilen (bijv. T16.1 en T16.2) niet door de kuil wordt veroorzaakt maar ook zonder kuil zou zijn gevonden (autonome ontwikkeling).
- In tegenstelling tot de resultaten van LOMOR is de morfologische aktiviteit in dwarsrichting op 20 m dieptelijn aanzienlijk minder dan op de 16 m dieptelijn. Hieruit blijkt dat de verminderde golfinvloed op grotere diepte vooral het dwarstransport verzwakt, maar niet zozeer het langstransport. De kustwaartse verplaatsing van de kuilen wordt veroorzaakt door een netto

kustwaarts gerichte transportcomponent. Ook het meer geavanceerde initieel transport model voor de Hollandse Kust voorspelt een dergelijk kustwaarts gericht transport, waarvan de grootte afneemt met toenemende waterdiepte. Deze transport component blijkt te kunnen worden verklaard door een langdurige reststroomcomponent nabij de zeebodem in combinatie met de in de bodemgrenslaag door golven geïnduceerde netto stroming en asymmetrie van de orbitaalbeweging (zie Roelvink en Stive, 1988).
Een andere aanwijzing voor het bestaan van dit type kustwaarts gerichte transporten op dieper water wordt o.a. gegeven door Saville (1981), die het bestaan ervan baseert op waarnemingen bij Redondo Beach in California.

- Na enige afvlakking van de kuiltaluds (hellingsinvloed) heeft de kuilvoortplanting morfologisch gezien vooral een konvektief karakter. Dit is vooral zichtbaar aan de ontwikkeling van een relatief steil zeewaarts kuiltalud en verder afvlakkend kustwaarts kuiltalud.

In Fig. 2.21 en Fig. 2.22 wordt de berekende dwarsprofielontwikkeling getoond voor de 10 m dieptelijn alternatieven (met en zonder kuil) gedurende een periode van 9 jaar. Hierbij is de kuil aangebracht na een inspeelperiode van 2 jaar. Beide kuilalternatieven beïnvloeden het dwarsprofiel direkt, maar in zeer geringe mate. Deze beïnvloeding wordt in Fig. 2.23 en 2.24 meer in detail zichtbaar gemaakt voor het geval T10.2 (B = 500 m) d.m.v. het tijdsafhankelijk verloop van de 1 m en 7 m dieptelijn in dwarsrichting.
Zowel de seizoensfluktuaties (1) als een gefilterd verloop (2) van de autonome ontwikkeling zijn hierin zichtbaar gemaakt. Het gefilterde verloop "met zandwinningskuil (3)" laat zien dat:

- de 1 m dieptelijn als gevolg van de winningskuil ongeveer 1 m richting kust is verschoven t.o.v. de autonome ontwikkeling,
- de zeewaartse verschuiving van de 7 m dieptelijn (bankontwikkeling) wordt door de kuil enigszins versterkt (20 m).

De dwarsprofielontwikkeling laat zien dat de kuil zich zeer langzaam richting kustlijn voortplant en zich vermoedelijk langzaam over dit profiel zal verspreiden (tijdschaal orde grootte: tientallen jaren).
Voor meer informatie over het gedrag van bodemveranderingen (bijv. suppleties) in deze aktieve kustzône, de gevoeligheden en tijdschalen die hierbij een rol spelen wordt verwezen naar de studie "Onderwateroeversuppleties" (Roelvink, 1988).

2.3.3. Beïnvloeding van de aktieve kustzône

De modelberekeningen zoals uitgevoerd in voorgaande paragrafen laten zien dat, in tegenstelling tot de zeezandwinningsalternatieven op de 10 m dieptelijn, de morfologische gevolgen van kuilen aangebracht op de 16/20 m dieptelijn over de beschouwde tijdsperiode (40 jaar) beperkt blijven tot de omgeving van de kuilen en de aktieve kustzône (landwaarts van de 8 m dieptelijn) niet bereiken. Aangezien de zandwinningskuilen zich wel richting kust blijken voort te planten en daarmee op lange termijn tot een zandverlies in de aktieve kustzône kunnen leiden is het noodzakelijk de modelresultaten naar grotere tijdschalen te vertalen. Hierbij is het niet mogelijk de uitgevoerde modelberekeningen verder in de tijd door te zetten omdat:

- niet één van de dynamische morfologische processen (langs of dwars) duidelijk domineert,
- door kuilvervorming de morfologische processen een 3D karakter zullen krijgen, en
- de hydrodynamica aan weerszijden van de kuilen, door kuilvervorming, anders zal worden beïnvloed.

Desondanks kunnen de uitgevoerde modelberekeningen worden gebruikt om op basis van het initiële morfologische gedrag globale uitspraken te doen over mogelijke invloeden op langere termijn. Hierbij wordt gebruik gemaakt van:

i. Het intiële morfologische gedrag van de zône kustwaarts van de zandwinningskuilen (berekende bodemveranderingssnelheden, zie par. 2.3.1.2).

ii. Het konvektieve (voortplantende) karakter van de zandwinningskuilen in dwarsrichting. Dit is m.b.v. CROSTRAN voor het kustprofiel bij Scheveningen vertaald naar voortplantingssnelheden waarmee bodemverstoringen zich richting kust voortplanten (zie Fig. 2.25) en benodigde tijden voor bodemverstoringen om de 10 m dieptelijn te bereiken (Fig. 2.26).

iii. Het diffusieve (uitsmerende) karakter van de kuilen in langsrichting dat is vertaald naar een diffusiecoëfficiënt K,
   - waarvan de grootte niet sterk blijkt te variëren met de kuilalternatieven ($K = 700-1400\ m^2/jr$), en
   - waarmee de uitsmeringslengte σ als funktie van de tijd ($\sigma \sim \sqrt{Kt}$, t = tijd) en de kuildiepteverandering kan worden afgeschat.

In het volgende zullen de morfologische consequenties (voor de aktieve kustzône) van zeezandwinning op de 20 m, 16 m, 14 m en 10 m dieptelijn achtereenvolgens worden behandeld. Ondanks de zeer grote bepalende tijdschalen voor de kuilvoortplanting in dwarsrichting (tot duizenden jaren, zie Fig. 2.26) wordt hierbij een voorspellingstermijn van slechts 200 jaar realistisch geacht, gezien het extrapolerende karakter van deze analyse en het feit dat, op veel grotere tijdschalen, andere - niet gemodelleerde - processen zoals zeespiegelstijging, geologische en klimaatveranderingen een rol kunnen gaan spelen.

Winning op de 20 m dieptelijn

Figuur 2.26 laat zien dat kuilen aangebracht op deze dieptelijn in de ordegrootte van enkele duizenden jaren nodig zouden hebben om de 10 m dieptelijn te bereiken.

In een periode van 200 jaar kunnen deze kuilen zich maximaal slechts een paar honderd meter richting kust verplaatsen. In dezelfde periode wordt geschat dat, door uitsmering in langsrichting, ongeveer 2 km zeebodem aan weerszijden (langsrichting) zal worden beïnvloed en de kuilen enigszins zullen verondiepen, waarbij de ondiepe, lange kuilvariant (T20.2) langzamer sedimenteert dan de diepe korte variant (T20.1). Als gevolg van zowel de geringe dwarsverplaatsing als de geringe kuilverondieping zal de getijstromingsbeïnvloeding, gedurende de beschouwde 200 jaar, geconcentreerd blijven in een strook kustwaarts van de 20 m dieptelijn met een maximale breedte gelijk aan 2x de kuilbreedte = 2000 m. De morfologische effecten spelen zich dus af in een gebied dat zeer ver van de aktieve kustzône is verwijderd (≈ 6 km) en zijn bovendien gering (maximale sedimentatie/erosie t.g.v. de 5 m diepe variant: ± 40 cm in 200 jaar). Er wordt daarom geconcludeerd dat de zeezandwinningsalternatieven op de 20 m dieptelijn, over de beschouwde periode van 200 jaar, geen kustlijnbeïnvloeding zal veroorzaken.

Winning op de 16 m dieptelijn

Figuur 2.26 laat zien dat kuilen aangebracht op deze dieptelijn minimaal drie honderd tot duizend jaar nodig zouden hebben om de 10 m dieptelijn te bereiken. In 200 jaar zou maximaal 200-1000 m kuilverplaatsing richting kust kunnen optreden waarmee deze zou plaatsvinden in het gebied tussen de 16 m en 14 m dieptelijn, resp. 4.5 km en 3.5 km uit de kust.

Door uitsmeringseffekten (voor variant T16.1, B = 100 m, Δh = 1 m, L = 2000 m ook in dwarsrichting!) wordt verwacht dat in deze periode opnieuw ongeveer 2 km aan weerszijden (in langsrichting) wordt beïnvloed (voor alle varianten) en vooral de kortere, smalle varianten (T16.1, 16.2, 16.3 met L = 2000 m) enigszins in diepte zullen afnemen. Deze afname is het grootst voor de zeer smalle variant (T16.1, B = 100 m) en wordt vermoedelijk nog versterkt door het feit dat de kuil zich over een afstand groter of gelijk aan zijn eigen breedte verplaatst in dwarsrichting.

In het meest ongunstige geval dat:
- een diepte reduktie in het geheel niet zou plaatsvinden, en
- de kuil zich over de maximale afstand van 1000 m richting kust zou verplaatsen (van -16 m naar -14 m),
- dan zou, door getijstromingsbeïnvloeding, alleen de 5 m diepe variant (T16.3) enige bodemsedimentatie/erosie in de kuststrook 2 km kustwaarts van de 14 m dieptelijn kunnen veroorzaken.

Omdat door de kuilverplaatsing richting kust ook dit kustwaartse beïnvloedingsgebied mee verplaatst, is de verwachting dat de bodemveranderingen zich niet alleen nog steeds buiten de aktieve kustzône afspelen (zie par. 2.3.1.2) maar bovendien aanzienlijk minder zullen zijn dan op grond van een stationaire 5 m diepe kuil op de 14 m dieptelijn kan worden verwacht (zie par. 2.3.1.2). Er wordt daarom geconcludeerd dat ook winning op de 16 m dieptelijn over een periode van 200 jaar niet tot enige kustlijnbeïnvloeding zal leiden.

Winning op de 14 m dieptelijn

Figuur 2.26 laat zien dat kuilen aangebracht op de 14 m dieptelijn globaal binnen de beschouwde periode van 200 jaar (minimaal 100-500 jaar) de 10 m dieptelijn kunnen bereiken en daarmee de aktieve kustzône en kustlijn kunnen gaan beïnvloeden.
Door de relatief grote verplaatsing in dwarsrichting (maximaal ≈ 2.5 km) zullen de kuilen t.g.v. uitsmering in langsrichting, vermoedelijk snel in diepte afnemen.
Deze uitsmering is echter, gezien het sterke 3D karakter van de kuilvervorming, met de in deze studie toegepaste modellen niet af te schatten.
Naarmate de kuildiepte en breedte toeneemt zal de getijstromingsbeïnvloeding kustwaarts van de kuil ook toenemen en de aktieve kustzône sterker kunnen beïnvloeden.

Op grond van de huidige modelresultaten kan vooralsnog slechts worden geconcludeerd dat zeezandwinning binnen de 14 m dieptelijn in de beschouwde periode van 200 jaar tot beïnvloeding van de aktieve kustzône en daarmee van de kustlijn kan leiden.

Winning op de 10 m dieptelijn

Als de zeezandwinning binnen de 14 m dieptelijn beperkt blijft tot maximaal 500 m brede en 1 m diepe kuilen kan een kuil met deze afmetingen op de 10 m dieptelijn (T10.2) als een 'worst-case' worden beschouwd.
Ondanks het feit dat de WAQUA en HISWA resultaten voor dit alternatief geen beïnvloeding van de aktieve kustzône aangeven (zie Fig. 2.5, 2.8), laten de CROSTRAN resultaten (par. 2.3.2.2) over een voorspellingsperiode van 10 jaar toch enige beïnvloeding zien (Fig. 2.23, 2.24). De verwachting is dat het effect van de kuil zich langzaam kustwaarts over het profiel zal verspreiden en over een periode van enkele tientallen jaren tot enige achteruitgang van de 0 m dieptelijn kan leiden. Deze achteruitgang is maximaal voor een oneindig lange onttrekking (langs de kust), waarbij geen uitsmering in langsrichting kan optreden (Hollandse Kust), en kan grofweg worden afgeschat met de regel van Bruun (1954). Uitgaande van een onttrekking van 500 m^3 per m kustlengte (Δh = 1 m, B = 500 m) en een aktief vormvast kustprofiel tussen de +8 m en -8 m dieptelijn resulteert een maximale profielachteruitgang van ongeveer 30 m. Naarmate de winning over een kortere (kust) lengte plaatsvindt zal deze door de getijstroming en de golfgeïnduceerde langsstroming sterker langs de kust worden uitgesmeerd waardoor een aanzienlijk kleinere kustbeïnvloeding kan worden verwacht. Deze mechanismen, die zich vooral in de aktieve kustzône afspelen, zijn in onderliggende studie niet onderzocht en verdienen nadere bestudering. In de studie "Onderwateroeversuppleties" (Roelvink, 1988) is, ook alleen op basis van dwarstransportgradiënten (CROSTRAN), de combinatie: zeezandwinning op de 10 m dieptelijn en suppletie op de vooroever onderzocht. In deze variant, waarin het zand niet uit het dwarsprofiel kan verdwijnen, blijkt:

- de suppletie snel over het dwarsprofiel te worden uitgesmeerd (van -8 tot 0 m), en
- de zandwinningskuil op de 10 m dieptelijn slechts zeer langzaam wordt opgevuld door zandtoevoer vanuit het hoger gelegen kustprofiel.

2.4 Lokaties Bergen, Texel en Ameland

2.4.1 Aanpak en schematisering van kondities

De "quasi-uniforme kust" aanpak zoals gevolgd voor de lokatie Scheveningen wordt ook voor de lokaties Bergen, Texel en Ameland toegepast. Hierbij wordt voor Texel en Ameland verondersteld dat de winnigslokaties zich midden voor de eilanden bevinden, waar, op grond van WAQUA-berekeningen (zie Ridderinkhof, 1988 en Elorche, 1988) wordt verwacht dat, een door de zeegaten aan weerszijden van de eilanden geïnduceerde rondstroming niet meer van betekenis is. Ook het redelijk parallele dieptelijnenverloop voor de eilanden vormt een aanwijzing dat deze aanpak toelaatbaar is.
Er wordt op grond van de ervaringen op de lokatie Scheveningen onderscheid gemaakt tussen de aanpak op relatief diep water (16 m/20 m kuilen) en de aanpak voor de zich dichtbij de aktieve kustzône bevindende 10 m kuilen:

- Voor het kustprofiel tussen de 20 m en de 10 m dieptelijn wordt opnieuw een schatting gemaakt (m.b.v. CROSTRAN) van de benodigde tijd voor bodemverstoringen om de 10 m dieptelijn te bereiken. Hiermee kan de invloed van de lokale golfklimaten en de kustprofielvorm tot uitdrukking worden gebracht.
- Voor de kuilalternatieven op de 10 m dieptelijn wordt het geval T10.2 (kuilbreedte B = 500 m, kuildiepte Δh = 1 m en kuillengte L = 2000 m) als "worst-case" beschouwd waarvoor een schatting wordt gemaakt van het morfologisch gedrag in langsrichting (LOMOR) en in dwarsrichting (CROSTRAN).

Verder wordt verondersteld dat de morfologische effecten van de getijstromingsbeïnvloeding kustwaarts van de aangebrachte kuilen vergelijkbaar zijn aan die voor de lokatie Scheveningen (beïnvloedingsgebied 1 à 2 maal de kuilbreedte kustwaarts van de kuilen).
Opmerking: In par. 2.3.1.2 werd afgeleid dat de mate van bodemerosie/sedimentatie t.g.v. getijstromingsbeïnvloeding kustwaarts van de kuilen recht evenredig is met het lokale langstransport (ongestoorde kondities). Volgens het initiële transportmodel voor de Hollandse Kust is de orde-grootte van het langstransport tussen -10 m en -20 m dieptelijn voor de lokatie Bergen en Scheveningen gelijk (≈ 10 m^2/jaar, zie Roelvink en Stive, 1988). Een eerder uitgevoerde morfologische studie voor Texel (SIBAS studie, zie Stive, Boer en v. Banning, 1984) beperkte zich tot het gebied kustwaarts van ongeveer de -8 m tot -10 m en geeft daarom geen aanwijzingen m.b.t. het transport op dieper water. Er wordt daarom (vooralsnog) aangenomen dat deze transporten bij Texel en Ameland van dezelfde orde-grootte zijn als voor Scheveningen en Bergen.

De CROSTRAN berekeningen zijn uitgevoerd met lokale golfklimaten (Bergen/ Egmond: Lichteiland Goeree, Texel: Eierland, Ameland: Schiermonnikoog Noord) die op dezelfde manier zijn geschematiseerd als voor Scheveningen (zie par. 2.3.2.2). De LOMOR berekeningen zijn uitgevoerd met een uit deze klimaten afgeleide geschematiseerde golf (zie Tabel 2.9). Voor de benodigde kust (dwars)profielen is gebruik gemaakt van het JARKUS bestand en gemeten diepwater profielen ("de 77 profielen", zie Wiersma (1985) en van Alphen en Damoiseaux (1987)).
De benodigde getijstromingsinformatie is uit bestaande WAQUA-modellen afgeleid:
Bergen : Hollandse Kust model (zie Hartsuiker, 1988)
Texel : ZEEWAD model (zie Ridderinkhof, 1988)
Ameland: Oostwad model (zie Elorche, 1988).
De sedimentgegevens zijn toegeleverd door Direktie Noordzee (zie Tabel 2.10).

2.4.2 Bergen

De tijdschaal voor bodemverstoringen, aangebracht tussen de 10 m en 20 m dieptelijn, om via dwarsvoortplanting de 10 m dieptelijn te bereiken blijkt voor de lokatie Bergen ongeveer een factor 2 kleiner te zijn als voor Scheveningen (zie Fig. 2.27 en vergelijk met Fig. 2.26). Dit wordt veroorzaakt door de kleinere afstand tussen de winplaats en de aktieve kustzône op deze lokatie (afstand tussen 20 m en 10 m dieptelijn: voor Scheveningen ≈ 8 km, voor Bergen ≈ 5 km).
M.b.t. winning op de 20 m dieptelijn wordt echter ook voor deze lokatie verwacht dat, in een periode van 200 jaar, de aktieve kustzône en daarmee de kustlijn niet wordt beïnvloed, omdat het morfologische beïnvloedingsgebied (t.g.v. kuilvoortplanting richting kust en getijstromingsbeïnvloeding kustwaarts van de kuil) in de meest extreme situatie nog steeds enkele kilometers van de 8 m dietelijn is verwijderd.
Bij winning op de 16 m dieptlijn zou in de meest extreme situatie een aangebrachte verstoring in 200-1000 jaar de 10 m dieptelijn kunnen bereiken (zie Fig. 2.27). Omdat de 16 m dieptelijn zich vrij dicht bij de aktieve kustzône bevindt (≈ 2-2.5 km) kan bovendien worden verwacht dat de brede, diepe kuilen (T16.3: B = 1000 m, Δh = 5 m) direkt na aanleg de getijstroming in de aktieve kustzône zullen gaan beïnvloeden.

Uitgaande van het meest ongunstige geval zonder uitsmering in langsrichting wordt daarom voor lokatie Bergen geconcludeerd dat in een periode van 200 jaar:

- winning binnen de 16 m dieptlijn tot beïnvloeding van de aktieve kustzône kan leiden, en dat
- winning tussen de 16 m en 20 m dieptelijn, mits beperkt tot 1 m diepe en maximaal 1000 m brede kuilen, geen beïnvloeding van de aktieve kustzône zal veroorzaken.

De berekeningsresultaten voor de "worst-case" (T10.2) worden getoond in Fig. 2.28 (langsprofiel ontwikkeling) en Fig. 2.29...2.31 (dwarsprofiel ontwikkeling). De langsprofielontwikkeling toont, in vergelijking met Scheveningen, een enigszins toegenomen uitsmering in langsrichting (≈ factor 1.5 groter), die voornamelijk wordt veroorzaakt door de enigszins toegenomen getijstroomsnelheden. Ook het dwarsprofiel ondergaat in vergelijking met Scheveningen een snellere en grotere beïnvloeding door de winningskuil. De maximale kustlijn achteruitgang - zonder uitsmering in langsrichting of voor een zeer lange winningskuil (bijv. langer dan 15 km) - is gelijk aan die voor Scheveningen en zou in een periode van orde-grootte tientallen jaren kunnen worden gerealiseerd.

2.4.3 Texel en Ameland

De benodigde tijdschalen voor dwarsvoortplanting tussen 10 m en 20 m dieptelijn zijn voor Texel en Ameland ongeveer gelijk als gevolg van een vergelijkbaar golfklimaat (Eierland en Schiermonnikoog-Noord) en, een vrijwel gelijk kustprofiel tussen genoemde dieptelijnen (zie Fig. 2.32). De tijdschalen zijn vooral op diep water (-20 m) kleiner dan voor de lokatie Bergen, hetgeen wordt veroorzaakt door het gewijzigde golfklimaat (grotere bijdrage grotere golfhoogteklassen).

Ondanks deze reduktie in tijdschaal zou echter op grond hiervan opnieuw kunnen worden geconcludeerd dat, ook voor deze lokaties, in een periode van 200 jaar, winning op de 20 m dieptelijn niet tot morfologische beïnvloeding van de aktieve kustzône zal leiden. Voor winning op de 16 m dieptlijn geldt volgens deze tijdschaalbeschouwing dat deze in het meest extreme geval in 150-600 jaar de 10 m dieptlijn kan bereiken. De te verwachten getijstromingsbeïnvloeding

kustwaarts van de aangebrachte kuilen is minder ernstig dan voor Bergen als gevolg van de grotere afstand tussen de 16 m en 10 m dieptelijn voor Texel en Ameland (≈ 2.5 km i.p.v ≈ 1.5 km).

Deze laatste invloed is echter met de toegepaste modellen morfologisch niet kwantificeerbaar i.v.m. het onbekende netto langstransport tussen de -10 m en -20 m dieptelijn voor beide eilanden. Desondanks kan ook voor deze lokaties worden geconcludeerd dat in de meest ongunstige situatie, zonder uitsmering in langsrichting, in een periode van 200 jaar:

- winning binnen de 16 m tot beïnvloeding van de aktieve kustzône kan leiden, en dat
- winning buiten 16 m dieptelijn, mits beperkt tot maximaal 1 m diepe en 1000 m brede kuilen, geen beïnvloeding van de aktieve kustzône zal veroorzaken.

De berekeningsresultaten voor de "worst-case" (T10.2) worden getoond in Fig. 2.33 (langsprofielontwikkeling) en Fig. 2.34 (autonome dwarsprofielontwikkeling). De langsprofiel uitsmering is voor Texel groter dan voor Ameland t.g.v. de hogere stroomsnelheden voor de kust van Texel.

Opmerking: Vermoedelijk wordt, door het gebruik van verschillende WAQUA modellen, de getijstroming voor beide eilanden enigszins onderschat t.o.v. de Hollandse Kust lokaties. Op grond daarvan wordt verwacht dat de langsprofieluitsmering voor beide eilanden groter zal zijn dan voor de lokatie Bergen. Echter de orde-grootte van de uitsmeringlengte is voor alle lokaties gelijk (een paar kilometer aan weerszijden in langsrichting).
De CROSTRAN berekeningen leiden voor zowel Texel als Ameland tot een onrealistisch grote versteiling van het kustprofiel (≈ 200 m zeewaarste verschuiving van de dieptelijnen tussen de 0 en 5 m in een periode van 4 jaar, zie Fig. 2.34). Dit gedrag wordt veroorzaakt door een relatief hoog kustwaarts gericht transport als gevolg van een relatief grote bijdrage van deining (t.o.v. de Hollandse Kust). Vooralsnog kunnen slechts indikaties worden gegeven omtrent mogelijke oorzaken van dit gedrag:

- de aanwezigheid van door de getijstroming veroorzaakte langstransportgradiënten (2DH karakter). De gradiënten zoals aangegeven in de eerder genoemde SIBAS studie voor Texel kunnen, kwalitatief beschouwd de met CROSTRAN gevonden kustprofielversteiling gedeeltelijk compenseren, maar zijn echter niet groot genoeg.

- de aanwezigheid van de zeegaten aan weerszijden van de eilanden waarvan het invloedsgebied wellicht groter is dan op grond van de WAQUA resultaten werd verondersteld (3 D stromingen).

Door deze onrealistische resultaten dient de waarde van de hierboven behandelde tijdsschaalbeschouwing ("quasi-uniforme kust" aanpak) sterk te worden betwijfeld.
Er wordt daarom geconcludeerd dat voor de kustlokaties Texel en Ameland alleen een geintegreerde 2DH aanpak uitsluitsel kan geven over de invloed van zeezandwinning op de kust. Nadere studie wordt aanbevolen naar:

i. de grootte en het patroon van het sedimentransport voor de kust van beide eilanden (zowel op dieper water als in de aktieve kustzône)
ii. de sedimentuitwisseling tussen het kustgebied, beide zeegaten (delta, geulen) en de Waddenzee.

3. Zeezandwinning in en rond de Y-geul

3.1 Vraagstelling en aanpak

De morfologische consequenties van zeezandwinning in en rond de Y-geul worden onderzocht op basis van een reeks alternatieve ingrepen in de dwarsprofiel-geometrie van de Y-geul, d.w.z. een verbreding (van 500 m naar 1000 m en 2000 m) en/of een verdieping (van 19 m naar 24 m). Het onderzoek is hierbij gericht op:

- de consequenties van deze ingrepen voor het onderhoudsbaggerwerk in de geul (beïnvloeding geulmorfologie en geulsedimentatie, zie par. 3.2), en
- de consequenties van de ingrepen voor de kustlijn aan weerszijden van de havendammen (par. 3.3).

De morfologie rondom de havendammen wordt in sterke mate door de havendammen zelf bepaald. Figuur 3.1 toont de sterke contractie van de getijstroming in dit gebied (Hollandse Kust, WAQUA model tijdens vloedstroming, zie Hartsuiker, 1988). Het golfklimaat in het gebied aan weerszijden van de havendammen wordt in sterke mate beïnvloed door de afschermende werking van de havendammen (zie Bakker en de Vroeg, 1988). Een nadere detailstudie zou meer inzicht kunnen verschaffen in het complexe 2DH morfologische karakter van dit gebied.

Op grotere afstand zeewaarts van de koppen van de havendammen wordt de invloed van de havendammen geringer en worden de morfologische veranderingen vooral bepaald door de Y-geul zelf en eventuele wijzigingen in het geuldwarsprofiel. Het onderzoek naar de invloed van geulprofielveranderingen op het onderhouds-baggerwerk is dan ook in dit gebied uitgevoerd en wel op 2 km, 5 km en 8 km vanuit de havendammen (zie Fig. 3.1 en Tabel 3.1 voor de onderzochte alternatieven). Er is hierbij gebruik gemaakt van het morfologische model LOMOR dat voor deze toepassing is voorzien van een 1D stromingsmodel (zie Annex A). De benodigde getijrandvoorwaarden zijn verkregen uit het bovengenoemde Hollandse Kust model (diepte-gemiddelde stroming).

Het onderzoek naar de invloed van geulprofielveranderingen op de kustlijn aan weerszijden van de havendammen heeft, gezien de omvang van de studie en de complexiteit van de lokale morfologie een beperkt karakter.

De indirekte morfologische beïnvloeding van de kustlijn via morfologische veranderingen op dieper water (bijv. t.g.v. vergrote zandvangcapaciteit van de geul) wordt in de huidige studie buiten beschouwing gelaten. Er wordt, op basis van de onderzoeksresultaten t.a.v. winning in de kustzône (Hfst. 2), vooralsnog aangenomen dat deze invloed pas op zeer grote tijdschaal een rol kan gaan spelen (tientallen jaren).
Het huidige onderzoek richt zich op de direkte invloed van de Y-geul (huidig en gewijzigd dwarsprofiel) op het golfklimaat aan weerszijden van de havenmond en de gevolgen hiervan voor de kustlijn. Hierbij wordt aangenomen dat zowel de getijstroming (aan weerszijden van de havendammen) als de golfafschermende werking van de havendammen niet door de wijzigingen in het geuldwarsprofiel worden beïnvloed. Aansluitend bij het kustlijnonderzoek zoals uitgevoerd door Bakker en de Vroeg (1988) wordt de kustlijnbeïnvloeding onderzocht op basis van (golfgeïnduceerde) langstransport gradiënten. Hierbij is gebruik gemaakt van het wiskundige model COMO-LT. Een dwarsraai morfologie studie wordt, gezien de complexiteit van het gebied en de huidige modelkennis (CROSTRAN), niet zinvol geacht.

3.2 Beïnvloeding van de geulmorfologie

3.2.1 Schematisering van kondities

Met behulp van detail geullodingen, globale informatie afgeleid uit de dieptelijnenkaart, zoals toegeleverd door Direktie Noordzee, en de bodemtopografie zoals ingebracht in het Hollandse Kust (WAQUA) model zijn geschematiseerde dwarsprofielen van de huidige Y-geul op de drie gekozen lokaties samengesteld. Op de 5 km en 8 km lokatie bleek het gemeten profiel nogal beïnvloed door "shore-face connected ridges" en zandgolven.
Aangezien deze 2DH verschijnselen in de gekozen 1D aanpak toch niet goed worden gepresenteerd en teneinde het principiële effekt van geulprofielveranderingen goed te kunnen bestuderen zijn de dwarsprofielen verder geschematiseerd tot symmetrische profielen (zie Fig. 3.2). De verdieping en verbreding is aangebracht op het huidige profiel, waarbij zijtaluds met een helling 1:50 zijn aangehouden (Fig. 3.2).

Horizontale en verticale getijinformatie (tijdsverloop tijdens de getijcyclus) is verkregen uit het Hollandse Kust (WAQUA) model op punten 2 km ten Zuiden van de Y-geul (ongestoorde situatie) in de gekozen langsraaien (2, 5, 8 km uit

de havendammen). De getijcyclus is vervolgens geschematiseerd tot 10 quasi-stationaire kondities (Δt = 1u, 15 min.).
Een gemeten golfklimaat (station IJmuiden) is geschematiseerd op de manier zoals aangegeven in par 2.3.2, resulterend in H_{rms} = 1.2 m en T_p = 5.9 s
De door Direktie Noordzee geleverde sedimentkarakteristieken voor de 3 lokaties zijn weergegeven in Tabel 3.2.

3.2.2 Geulprofielveranderingen en geulsedimentatie

Volgens de resultaten van een stabiliteitsanalyse, die is uitgevoerd m.b.v. de set vergelijkingen van het model LOMOR (zie Annex B.1), heeft dit type geulen, loodrecht georiënteerd op de getijstroming, een gemengd voortplantend en dempend morfologisch karakter. Dit komt tot uitdrukking in een voortplanting van de geul in de richting van het netto (getijgemiddelde) langstransport en tegelijkertijd afvlakking van de geultaluds (demping). Dit laatste proces wordt veroorzaakt door het naijlende gedrag van het gesuspendeerde sediment. Beide processen leiden tot geulsedimentatie.

De numerieke berekeningen met het rekenmodel LOMOR zijn uitgevoerd met dezelfde instelling van de diverse modelparameters als gebruikt tijdens de kustzône toepassing (par. 2.3.2) en betreffen de morfologische geulontwikkeling gedurende een periode van 6 jaar. De resultaten worden gepresenteerd in:
- Fig. 3.3...3.7 in de vorm van berekende bodemprofielontwikkelingen,
- Tabel 3.3 en 3.4 in de vorm van gesedimenteerde volumes per jaar en aanzandingssnelheden. Hierbij heeft Tabel 3.4 betrekking op de oorspronkelijke geulbreedte en geeft Tabel 3.3 de totale sedimentatie, inclusief de sedimentatie op de taluds van de geul.

Morfologische ontwikkeling huidige Y-geul

De modelberekeningen voor de huidige Y-geul geometrie (berekeningen Y20, Y50, Y80, Fig. 3.3) laten zien dat:
- de geulsedimentatie afneemt in zeewaartse richting,
- de morfologische veranderingen een dempend karakter bezitten (zie ook stabiliteitsanalyse Annex B.1),
- de Y-geul een geringe neiging heeft tot voortplanting in Noordelijke richting waarbij de sedimentatie van het Zuidelijke talud van de geul groter is dan die aan de Noordkant.

De berekende geulsedimentatie (zie Tabel 3.3: 7-21 m^3/jaar per meter geullengte) lijkt qua orde-grootte overeen te komen met gegevens uit 1986 (1.6-22 m^3/jaar per meter geullengte). De laatste hebben echter betrekking op de situatie 12-23 km vanaf de havendammen, waar geen modelberekeningen zijn uitgevoerd en bovendien een onbekende hoeveelheid zeezand is gewonnen.
In het gebied 0-5 km uit de havendammen heeft, sinds de Y-geul in 1985 op huidige diepte werd gebracht, noch zeezandwinning noch onderhoudsbaggerwerk plaatsgevonden, maar zijn wel gedetailleerde lodingen verricht over een breedte van 800 m (400 m aan weerszijde van de geulas). De Figuren 3.8 en 3.9 zijn uit deze lodingen afgeleid en geven een indikatie van de dwarsprofielontwikkeling van de geul op 2.5 km en 4.5 km vanaf het Zuiderhavenhoofd van IJmuiden. Omdat de lodingsgegevens zowel fouten in horizontale positie (≈ ± 5 m) als in gemeten bodemniveau (≈ ± 15 cm) bevatten, zijn de dwarsprofielen gemiddeld met 2 naastgelegen profielen (50 m aan weerszijden) en met 2 in de tijd nabijgelegen profielen.
De twee bovenste deelfiguren van Fig. 3.8 en Fig. 3.9 geven de ligging van het dwarsprofiel voor de situatie rond eind 1985 en rond begin 1988. De onderste figuur toont de morfologische ontwikkeling van het gemiddelde profiel over deze periode (gemiddeld tijdsverschil ≈ 2.3 jaar).
Ondanks de in deze korte periode relatief kleine morfologische veranderingen (t.o.v. de meetonnauwkeurigheden), bestaat de indruk dat de Y-geul op deze posities een netto verplaatsing in Noordelijke richting ondergaat (≈ 2-10 m/jaar). Dit komt zowel in kwalitatieve als in kwantitatieve zin redelijk overeen met de modelberekeningen (LOMOR). Bovendien is het een bevestiging van de resulaten van het initiële sedimenttransportmodel voor de Hollandse Kust (zie Roelvink en Stive, 1988) dat, voor deze lokatie op dieper water, een resulterend transport in Noordelijke richting aangeeft (≈ 10 m^3/jaar per m lengte loodrecht op de kust).
De gemeten sedimentatie in de geul varieert tussen 0 m^2/jr (4.5 km) en 25 m^2/jr (2.5 km) per meter geullengte, en komt gemiddeld gezien qua orde-grootte overeen met de berekende hoeveelheden (≈ 20 m^2/jaar, zie Tabel 3.4).
Een geringe wijziging in de parameterinstelling en invoer van LOMOR bleek voldoende om de gemeten geulprofielverandering (2.5 km) zeer goed weer te kunnen geven (zie Fig. 3.10). Hierbij is een extra reststroming van 3 cm/s in Noordelijke richting gesuperponeerd op het getijsnelheidsverloop en is een kleinere suspensienaylingsparameter ($\tilde{L}$ = 0.1 i.p.v. 0.3) toegepast.

De beperktheid van de hierboven uitgevoerde verifikatie van het rekenmodel (slechts 2 dwarsraaien over een morfologisch gezien en in het licht van de meetonnauwkeurigheden te korte periode) laten harde uitspraken over de geldigheid van het model en de gekozen parameterinstelling evenwel niet toe. De redelijke overeenkomst tussen de gemeten en berekende sedimentatie/erosie (patronen) geeft echter ook geen aanleiding om het model en de gekozen parameterinstelling te verwerpen. Er wordt vooralsnog aangenomen dat de onnauwkeurigheidsfactor 3-5 zoals toegepast voor het berekende langstransport in Hoofdstuk 2, ook kan worden gebruikt voor de berekende geulsedimentatiesnelheid.

Morfologische ontwikkeling Y-geul na verbreding en/of verdieping

De morfologische effekten van een verdieping en/of verbreding zijn weergegeven in Fig. 3.4...3.7 en Tabel 3.3 en 3.4.
Door verbreding en verdieping van de geul neemt in het algemeen de zandvangcapaciteit van de geul toe (zie Tabel 3.3, totale aanzanding). Hierbij heeft vooral de verdieping het grootste effekt (toename gevangen volume met 80-600%). Het effekt neemt toe met toenemende afstand uit de havendammen omdat de wijziging in de door de geul veroorzaakte bodemverdieping op grote afstand relatief het grootst is.
Bij alleen verbreding tot 1000 m is de toename in zandvangcapaciteit 40-80% en bij verbreding tot 2000 m 80-160%.
Verdieping gecombineerd met verbreding veroorzaakt nog een geringe extra toename (≈ 30%) t.o.v. verdieping alleen.
Ook de dwarsprofielvorm van de geul en met name de ontwikkeling van het profiel in de tijd, wordt beïnvloed door de verdieping en verbreding van de geul. In de Figuren 3.4...3.7 is te zien dat, vooral door geulverbreding, de sedimentatie wordt verschoven naar de randen van de geul (taluds). Hierbij blijft het midden van de geul langer onaangetast (zie ook Tabel 3.4).
Door het uitsmerende karakter van de geulmorfologie neemt de erosie van de zeebodem in het gebied ca. 2 km aan weerszijden van de geul geleidelijk af. De verwachting op basis van de rekenmodelresultaten is dat de geulsedimentatie hierdoor tegelijkertijd langzaam zal afnemen (tijdschaal enkele decennia).

3.3 Kustlijnbeïnvloeding

3.3.1 Beïnvloeding van het lokale golfklimaat

De golfvoortplanting over een geul wordt door diverse processen beïnvloed (zie modelonderzoek beschreven in Huitenga en Van Driel, 1974 en Waterloopkundig Laboratorium, 1975). Afhankelijk van de hoek ϕ tussen de voortplantingsrichting en de as van de geul kunnen drie situaties worden onderscheiden, waarbij de kritische hoek ϕ_{kr} voor reflektie op het geultalud een belangrijke rol speelt. Deze is als volgt gedefinieerd (zie Waterloopkundig Laboratorium, 1975):

$$\phi_{kr} = \arccos\,(k_{geul}/k_{zeebodem}) \qquad (3.1)$$

met:

k_{geul} = golfgetal in de geul

$k_{zeebodem}$ = golfgetal op de zeebodem naast de geul.

De drie te onderscheiden mogelijkheden zijn nu (zie Fig. 3.11):

- $\phi > \phi_{kr}$, oversteken van de geul
  Als de hoek van golfinval ten opzichte van de geulas groter is dan de kritische waarde, dan steekt de golf de geul over en komt er onveranderd uit. Weliswaar verschilt in de geul, door refraktie op het geultalud, de golfrichting van die naast de geul, maar door refraktie op het tegenoverliggende talud is de richting na het oversteken van de geul weer gelijk aan de oorspronkelijke.
- $\phi < \phi_{kr}$, reflektie op het geultalud
  Als de hoek van golfinval ten opzichte van de geulas kleiner is dan de kritische waarde, dan kan de golf de geul niet oversteken. Als gevolg van het refraktie-effekt op het geultalud reflekteert de golf en vormt samen met de inkomende golven een kruispatroon naast de geul.
  Op het geultalud is een concentratie van golfenergie met, afhankelijk van de golfcondities, energiedissipatie door breken. Door diffraktie zal bovendien nog enige hoeveelheid golfenergie over de geul worden getransporteerd.
- $\phi \approx 0$, refraktie uit de geul
  Als de golfrichting en de as van de geul nagenoeg samenvallen, dan zal de golf door refraktie op kleine oneffenheden, door diffraktie en door rich-

tingsspreiding naar de geultaluds worden afgebogen, alwaar zij door refraktie verder van de geul-as zal worden afgebogen. De golfenergie verdwijnt dus voor een belangrijk deel uit de geul.

Voor een nauwkeurige beschrijving van de invloed van deze processen op het golfklimaat is de inzet van een geavanceerd numeriek golvenmodel noodzakelijk. Gezien het oriënterend karakter van deze studie wordt, op basis van het eerder genoemde modelonderzoek, vooralsnog aangenomen dat het reflekterende karakter van de geul, voor golven die onder een kleine hoek met de geul-as invallen, kan worden beschouwd als de belangrijkste invloed van de geul op het golfklimaat dicht langs de kust. Hierbij worden dissipatie en diffraktie in de geul verwaarloosd, de reflektie wordt 100% gesteld. De golfhoogte van de gereflekteerde golf blijft onder deze aanname gelijk aan die van de inkomende golf, alhoewel deze in werkelijkheid meestal iets kleiner zal zijn.

Opmerking: Door de relatief grote lengte en diepte van de Y-geul en de oriëntatie vrijwel loodrecht op de kust, wordt dit proces voor de Y-geul van groter belang geacht dan voor de relatief korte, ondiepe en evenwijdig aan de kust georiënteerde geulen ten behoeve van zeezandwinning in de kustzône.

Een verbreding van de bestaande geul heeft, gezien de definitie van ϕ_{kr}, geen verandering van ϕ_{kr} tot gevolg. Hetzelfde deel van de golven dat op de niet verbrede geul reflekteerde, zal op het talud van de verbrede geul reflekteren. Geconcludeerd wordt dat als gevolg van een verbreding van de bestaande geul het golfklimaat bij de kust nauwelijks verandert.

Bij een verdieping van de geul wordt de geul tevens langer, waardoor de golven reeds op veel grotere afstand uit de kust worden gereflekteerd en een groter kustgebied kunnen gaan beïnvloeden. Bovendien neemt door verdieping de waarde van ϕ_{kr} toe, waardoor golven uit een grotere richtingssektor zullen worden gereflekteerd.

Op basis van de golf- en geuleigenschappen ter plaatse van IJmuiden is voor een aantal plaatsen langs de bestaande en de verdiepte geul ϕ_{kr} berekend. Hierbij blijkt dat de waarde van ϕ_{kr} niet veel verschil vertoont voor het hogere en het lagere deel van het golfklimaat (enkele graden) en toeneemt naarmate de verhouding tussen de lokale diepte in de geul ten opzichte van de naastliggende zeebodem toeneemt, d.w.z. in landwaartse richting. Voor enkele punten langs de geul is het resultaat weergegeven in Figuur 3.12. Ten einde de

maximale invloed van de geulreflektie op de kustlijn af te kunnen schatten wordt in het hiernavolgende de maximale waarde van ϕ_{kr}, optredend nabij de havenmond, toegepast.

Wordt de verandering van het golfklimaat beschouwd op een raai loodrecht op de geul-as, ter plaatse van de havenmond, dan blijkt de invloed van de bestaande geul te reiken tot ca. 2 km buiten de geul. Met name door de grotere lengte van de geul reikt de invloedssfeer na verdieping aanzienlijk verder, nl. tot ca. 4 km buiten de geul.

Samengevat kan het golfbeeld aan weerszijden van de geul als volgt worden omschreven (de waarden voor ϕ_{kr} gelden voor de eerder genoemde raai ter plaatse van de havenmond, en nemen af gaande langs de geul in zeewaartse richting):

Zuidzijde havenmond:

a) Invallende golven uit Z-W richting.
   Direkt invallende golven uit deze richtingssector komen simultaan in (kruispatroon) met door de geul gereflecteerde golven, d.w.z. golven met een invalshoek
   $|\phi| < |\phi_{kr}| = 25°$ voor de bestaande geul
   $|\phi| < |\phi_{kr}| = 32°$ voor de verdiepte geul

b) Invallende golven uit N-W richting.
   Slechts een deel van de golven uit deze richtingsector steekt de geul over en bereikt de Zuidzijde van de havenmond, namelijk de golven met een invalshoek:
   $|\phi| > |\phi_{kr}| = 25°$ voor de bestaande geul
   $|\phi| > |\phi_{kr}| = 32°$ voor de verdiepte geul

Noordzijde van de haven:
De situatie is hier gespiegeld t.o.v. de geulas, hetgeen betekent dat de hierboven gegeven omschrijving voor de Zuidzijde van de havenmond ook hier geldig is echter met omwisseling van N-W en Z-W.

3.3.2 Beïnvloeding van het sediment (langs-)transport en de kustlijn

Als gevolg van de reflekterende werking van de vaargeul en de daardoor optredende verandering in het golfklimaat bij de kust, zal het golfgedreven langs-

transport (brandingsstroomtransport) binnen de invloedsfeer van de geul veranderen (indirecte beïnvloeding via golfvoortplanting). Naast de invloed van een verandering van het geulprofiel zal ook het verschil tussen de situatie zonder geul en die met de bestaande geul worden beschouwd.

Verbreding van de geul heeft geen noemenswaardig effekt op het golfklimaat bij de kust, en dientengevolge ook niet direkt op het brandingsstroomtransport. Verdieping van de geul heeft een aantoonbare invloed op het golfklimaat. Bij een verdiepte geul zullen golven uit een grotere richtingssektor en over een grotere geullengte reflekteren. Om het effekt op het transport enigszins te kwantificeren, is gebruik gemaakt van een golfklimaat voor IJmuiden (meetstation Ym6, zie Hokke en Roskam, 1988). Dit klimaat bevat per richtingssektor van 30° de kansverdeling voor verschillende golfhoogten en -perioden. De indeling in sektoren van 30° betekent dat de relatief kleine veranderingen in de kritische reflektiehoek ϕ_{kr} bij verdieping van de geul slechts globaal in transportveranderingen kunnen worden omgezet.
Per golfrichtingssektor worden de golven gekarakteriseerd door één gemiddelde richting ϕ, uitgedrukt ten opzichte van de geul-as. In dit geval zijn deze richtingen, uit Z-W: -75, -45, -15 en uit N-W: +15, +45, +75. Beschouw nu één zijde van de geul, bijvoorbeeld de noordzijde.
In de situatie zonder geul wordt de noordwaarts gerichte component van het brandingsstroomtransport veroorzaakt door golven uit de sektoren -75°, -45° en -15°, en de zuidwaarts gerichte component door golven uit de richtingen +75, +45 en +15°.
In de situatie met de bestaande geul treedt reflektie op voor golven met een hoek van inval kleiner dan $\phi_{kr} = \pm 25°$ (t.p.v. de havenmond).
Aan de noordzijde van de geul verandert hierdoor niets aan de zuidwaarts gerichte component van het brandingstransport. Een gedeelte van de golven uit de richting -15° (representatief gesteld voor alle golven met $-30° < \phi < 0°$) zal nu echter niet meer de geul oversteken, en dus niet meer bijdragen aan het transport. Grofweg kan worden gesteld dat slechts $\frac{5}{30}$ deel van het noordwaarts gericht transport uit de golfsektor -15° nog merkbaar zal zijn aan de noordzijde van de geul. Daar staat tegenover dat globaal $\frac{25}{30}$ deel van de golven uit de richting +15° (representatief gesteld voor alle golven met $0 < \phi < 30°$) nu reflekteert en na reflektie bijdraagt aan de noordwaarts gerichte transportcomponent. Of het saldo van de verdwijnende en bijkomende transporten noord- of zuidwaarts is gericht hangt af van de asymmetrie van de kansverdeling van de golven over de richtingen -15° en +15°.

Een soortgelijke beschouwing als hiervoor gemaakt voor de noordzijde van de geul gaat ook op voor de zuidzijde, en voor een eventuele verdiepte geul.
Opmerking: De gereflekteerde golven vormen een kruispatroon met de invallende golven. De gereflekteerde golven komen dus gelijktijdig voor met de invallende (reflekterende) golven, en niet zoals in de berekening is geschematiseerd, onafhankelijk van de invallende golven, op een ander tijdstip. Dit effekt wordt gelijk gesteld aan dat wat van richtingsspreiding mag worden verwacht: de gereflekteerde golven geven samen met de invallende golven tussen 0 en 25° geen resulterend transport.

Uitgaande van de kansverdeling per golrichting is voor de diep-water golfhoogteklassen HmO = 1, 2, 3, 4 m en periodeklassen TmO1 = 4, 6, 8 sec per richtingssektor α het golfgedreven langstransport S_α bepaald met behulp van het model COMO-LT (Golfvoortplantingsberekening naar de kust met ENDEC, en transportberekening met Bijker formule). Het resultaat is in Tabel 3.5 weergegeven voor de situatie zonder geul, met de bestaande geul en met de verdiepte geul. Uit de tabel blijkt in de ongestoorde situatie (bij een globale kustoriëntatie van 15° ten opzichte van het Noorden) een zuidwaarts gericht golfgedreven transport van 35.10^3 m^3/jaar te worden gevonden. Dit komt redelijk overeen met recente resultaten van Stive en Roelvink (1988).
De aanwezigheid van de bestaande geul heeft een verkleining van het resulterend netto zuidwaarts transport tot gevolg, van 35.10^3 m^3/jaar naar 27.10^3 m^3/jaar. Het effekt van een verdieping van de geul van 19 m naar 24 m heeft tot gevolg dat de netto zuidwaarts gerichte transportcapaciteit verder afneemt, van 27.10^3 m^3/jaar naar 25.10^3 m^3/jaar.
Opmerking: Enig gevoeligheidsonderzoek naar de invloed van het type langstransportformulering (Bijker, v.Rijn, Bailard, Engelund-Hansen) op het berekende langstransport leerde dat een onnauwkeurigheidsfactor 3-5 voor de absolute grootte van berekende transporten als realistich kan worden beschouwd. Het relatieve effect van geulverdieping op deze transporten is echter een orde nauwkeuriger.

De berekende transporten zijn geldig vlak bij de geul, en veranderen naar de rand van de invloedsfeer geleidelijk in de richting van de ongestoorde waarde (S = 35.10^3 m^3/jaar, zuidwaarts).

Tevens geldt dat de transporten zijn bepaald ten opzichte van een rechte kust onder een hoek van 15° met het noorden (de globale oriëntatie van de kust bij IJmuiden). In werkelijkheid is de kust in de buurt van de haven echter sterk gekromd. In de lijnmodellering wordt het golfgedreven transport in zo'n geval geschematiseerd als:

$$S = S_o - s \frac{\partial y}{\partial x} \qquad (3.2)$$

met:

S = werkelijk transport

S_o = transport t.o.v. de referentielijn (globale kustligging)

$\frac{\partial y}{\partial x}$ = kustoriëntatie t.o.v. referentielijn (x evenwijdig aan ref.lijn, y loodrecht op ref.lijn).

s = kustconstante, maat voor verandering transport bij verandering kustoriëntatie.

De berekende langstransporten dienen te worden geïnterpreteerd als S_o-waarden. Op basis hiervan is een indruk te verkrijgen van de evenwichtsligging van de kust, dit is de oriëntatie/vorm van de kustlijn waarbij S overal langs de kust gelijk is, en dus geen aanzanding of erosie optreedt. Uitgaande van de randvoorwaarde bij de haven wordt S overal nul gesteld, waarna (3.2) kan worden herschreven als:

$$\frac{\partial y}{\partial x} = \frac{S_o}{s} \qquad (3.3)$$

Onder de aanname dat de kustconstante s als gevolg van de verdieping van de geul niet noemenswaardig verandert, kan het effekt van de geul op de kust globaal worden vergeleken met andere invloeden bij de haven. Het meest dominante proces is de afscherming van golfrichtingen door de aanwezige havendammen. Ten noorden van de dammen kan dit effekt worden afgeschat door aan te nemen dat met achter de dam alle golven uit Z-W-richtingen zijn afgeschermd, en het bruto zuidgaand transport als resulterende S_o overblijft. De waarde van S_o die dan bij de dam resulteert is van de orde 300.10^3 m^3/jaar.

Uitgaande van de situatie zonder geul (maar mét dammen) zou het graven van de bestaande geul deze waarde veranderen met orde 8.10^3 m^3/jaar, dus 2 à 3%. Uitgaande van de situatie met de bestaande geul heeft een verdieping met 5 m

een verandering van de S_0-waarde van orde 2.10^3 m^3/jaar tot gevolg, dus 1%. Uitgaande van (3.3) blijkt dat de oriëntatie van de kustlijn rond de haven dus slechts voor enkele procenten bepaald wordt door de aanwezigheid van de geul. Door integratie (3.3) langs de kust kan de aanzanding/erosie tegen de dam worden geschat. Hierbij is aangenomen dat de verplaatsing van de kustlijn als gevolg van de aanwezigheid van de geul buiten de direkte invloedssfeer verwaarloosbaar is, en dat de kustkonstante $s \approx O(10^6$ m^3/jaar/rad).
Het graven van de bestaande geul heeft in dat geval tot gevolg dat in de evenwichtssituatie de kust bij de dam aan de noordzijde in de orde van 10 m meer landwaarts komt te liggen, en aan de zuidzijde een orde 10 m meer zeewaarts. Uitgaande van de bestaande geul heeft een verdieping met 5 m een versterking van dit effekt tot gevolg met nog eens een orde van 10 m (de oriëntatie van de kust verandert weliswaar weinig t.g.v. een verdieping, de veranderde oriëntatie strekt zich echter uit over een groter gebied).
De invloed van de geul op de kustlijn bij de haven is dat de zandophoping tegen de dam aan de noordzijde wordt gereduceerd en aan de zuidzijde wordt vergroot. De zandophoping t.g.v. de afschermende werking van de dammen is in de orde van 1 km. Het effekt van de geul op de kustlijnontwikkeling is dus slechts enkele procenten.
Samenvattend wordt gesteld dat de ontwikkeling van de kust bij IJmuiden veel sterker wordt beïnvloed door de aanwezigheid van de havendammen dan door de aanwezigheid van de vaargeul. Hieruit volgt tevens dat een verandering van de geul van weinig invloed is.

4. Conclusies

4.1 Zeezandwinning in de kustzône

1. De invloed van zeezandwinning uitgevoerd in de kustzône tussen de 10 m en 20 m dieptelijn (zie Tabel 2.1 voor de onderzochte winningsvarianten) op de morfologische ontwikkeling van de kust (lees: de aktieve zône kustwaarts van de 8 m dieptelijn) is tweeledig:
   - een direkte morfologische beïnvloeding als gevolg van wijzigingen in de hydrodynamische kondities (getijstroming, golven) kustwaarts van de aangebrachte zandwinningskuilen, en
   - een indirekte morfologische beïnvloeding als gevolg van het dynamische morfologische gedrag van de kuilen zelf.

   Beide beïnvloedingsprocessen zijn uitgebreid onderzocht voor de kustlokatie Scheveningen; de hierna volgende conclusies zijn dan ook vooral voor deze lokatie van toepassing.

2. T.a.v. de direkte morfologische beïnvloeding via de hydrodynamische kondities kunnen op grond van uitgevoerde WAQUA, HISWA en CROSTRAN berekeningen de volgende conclusies worden getrokken:
   - Mits de zandwinning beperkt blijft tot kuilen van 1 à 2 m diep en plaatsvindt buiten de 14 m dieptelijn, blijft de direkte morfologische beïnvloedig beperkt tot de kuil en zijn direkte omgeving.
   - Alleen de 5 m diepe kuilvariant (op de 14 m dieptelijn) leidt tot een waarneembare beïnvloeding kustwaarts van de aangebrachte kuil:
     - een toename van maximaal 1% in golfhoogte, t.g.v. shoaling effecten in de kuil, waarvan de morfologische gevolgen als verwaarloosbaar worden beschouwd,
     - een reduktie van maximaal 9% in de getijstroomsnelheid, t.g.v. stromingscontractie in de kuil. De morfologische invloed hiervan strekt zich over maximaal 2 maal de kuilbreedte kustwaarts uit (max. 2000 m) en leidt daar tot sedimentatie- en erosiesnelheden met een ordegrootte van maximaal enkele centimeters per jaar.
   - De kuilen aangebracht op de 10 m dieptelijn leiden tot een direkte beïnvloeding van de aktieve kustzône. De maximale beïnvloeding is onderzocht m.b.v. het dynamische morfologisch model CROSTRAN, waarin langstransportgradiënten niet in rekening worden gebracht (oneindig lange kuil!).

De dieptelijnontwikkeling tussen de 0 m en -10 m vertoont binnen een tijdsbestek van een aantal jaren een waarneembare afwijking (orde-grootte enkele meters) t.o.v. die t.g.v. de autonome dwarsprofielontwikkleling (zonder kuil).

3. T.a.v. het dynamische morfologische gedrag van de zandwinningskuilen kan op grond van LOMOR en CROSTRAN berekeningen (quasi-uniforme kust aanpak) het volgende worden geconcludeerd:
   - Het morfologische gedrag van de kuilen vindt in langs- en in dwarsrichting op vergelijkbare tijdschalen plaats. Desondanks wordt, gezien de zeer geringe kuildiepteveranderingen in de doorgerekende periode van maximaal 40 jaar, de onafhankelijke aanpak van de langs- en dwarsmorfologie voor deze periode toelaatbaar geacht.
   - Zeewaarts van de 10-12 m dieptelijn hebben de kuilen in dwarsrichting vooral een voortplantend morfologisch karakter, waarbij kustwaarts gerichte voorplantingssnelheden optreden die worden bepaald door de lokale waterdiepte en toenemen voor afnemende waterdiepte (orde-grootte enkele decimeters tot enkele meters per jaar). Dit wordt veroorzaakt door een kustwaarts gerichte transportcomponent (zie ook Roelvink en Stive, 1988).
   - In langsrichting hebben de kuilen vooral een morfologisch uitsmerend karakter. Voor alle onderzochte varianten vindt in een periode van 40 jaar, een langzame uitsmering plaats van de koptaluds over een lengte van ongeveer 1 à 2 km, waarbij de kuildiepte vrijwel ongewijzigd blijft. Dit morfologische gedrag wordt veroorzaakt door de stromingscontractie en de naijlende werking van het suspensietransport.

4. Voor de lokatie Scheveningen zijn op basis van het hierboven omschreven morfologische procesonderzoek (tijdschaal 0-40 jaar) schattingen gemaakt van de beïnvloeding van de aktieve kustzône voor een maximaal toelaatbaar geachte periode van 200 jaar. Gezien het karakter van de onderliggende wiskundige modelstudie (nauwelijks enige verificatiemogelijkheid m.b.v. veldgegevens), hebben deze schattingen een conservatief karakter (d.w.z. gebaseerd op de grootst mogelijk geachte beïnvloeding). De volgende conclusies zijn hierbij getrokken:
   - Zeezandwinning uitgevoerd op de 16 m en 20 m dieptelijn heeft geen morfologische invloed op de aktieve kustzône over de beschouwde periode. De morfologische effekten van de onderzochte alternatieven blijven 2.5 km of meer zeewaarts van de 8 m dieptelijn.

- Zeezandwinning uitgevoerd op de 14 m dieptelijn zou de aktieve kustzône kunnen gaan beïnvloeden. Dit geldt vooral voor de 5 m diepe, 2000 m brede variant.
- De tijdschaal waarop de indirekte effekten van zandwinning merkbaar worden in de aktieve kustzône wordt vooral bepaald door de afstand tussen de winplaats en de aktieve zône. Het uiteindelijke effekt op de kustlijn is vermoedelijk vooral afhankelijk van de omvang van de winning.
- T.a.v. de als "worst-case" beschouwde winningsvariant op de 10 m dieptelijn (1 m diep, 500 m breed en 2000 m lang), d.w.z. de grootst mogelijk geachte resterende kuil van een winning op dieper water, wordt verwacht dat:
  - de aktieve kustzône direkt wordt beïnvloed (zie punt 2),
  - het zandtekort zich in een tijdsbestek van enkele decennia over het profiel zal verspreiden en daarbij, in de extreme situatie van een oneindig lange kuil en zonder menselijk ingrijpen, een kustlijnachteruitgang van enkele tientallen meters kan veroorzaken.
- Nader onderzoek, uitgevoerd in het kader van de studie Onderwateroeversuppleties (Roelvink, 1988), naar een combinatie van een winning op de 10 m dieptelijn en een suppletie op de hoger gelegen vooroever laat zien dat de suppletie in relatief korte tijd (enkele jaren) over het bovenste deel van het profiel wordt verspreid, en dat de hiermee bereikte kustvooruitgang op een veel grotere tijdschaal (orde-grootte tientallen jaren) en geheel onafhankelijk weer teniet wordt gedaan door verspreiding van de winningskuil over het profiel.

5. Voor de kustlokatie Bergen kunnen de volgende conclusies worden getrokken:
   - T.g.v. het steilere kustprofiel tussen de 10 m en 20 m dieptelijn bij Bergen (t.o.v. Scheveningen), is de tijdschaal waarop de aktieve kustzône kan worden beïnvloed globaal een factor 2 kleiner.
   - Het maximaal mogelijk geachte beïnvloedingsgebied van een winning op de 20 m dieptelijn blijft echter, in de beschouwde periode van 200 jaar, enkele kilometers van de 8 m dieptelijn verwijderd, zodat geen beïnvloeding van de aktieve kustzône wordt verwacht.
   - Voor een winning op de 16 m dieptelijn zou in de beschouwde periode beïnvloeding van de aktieve kustzône kunnen plaatsvinden (vooral de 5 m diepe, 1000 m brede variant).

- Voor de "worst-case" winning op de 10 m dieptelijn wordt verwacht dat het kustprofiel (boven de 10 m dieptelijn) sneller wordt beïnvloed dan bij Scheveningen. De orde-grootte van de tijdschaal van deze beïnvloeding en de grootte van de maximale beïnvloeding blijven echter ongewijzigd.

6. Voor de kustlokaties Texel en Ameland (winningslokaties midden voor de eilanden) wordt geconcludeerd:
   - De tijdschalen voor dwarsvoortplanting zijn gemiddeld kleiner dan voor Bergen, hetgeen wordt veroorzaakt door de grotere bijdrage van de hogere golfklassen in het lokale golfklimaat (Eierland, Schiermonnikoog-Noord).
   - Er bestaan aanwijzigingen dat, anders dan werd verwacht op grond van WAQUA berekeningen en een eerder voor Texel uitgevoerde kustbeleidsstudie (SIBAS-studie, zie Stive e.a. , 1982), er een 2DH sedimenttransportpatroon aanwezig is voor de kust van beide Waddeneilanden. Hierbij wordt een toenemend dwarstransport richting kust in zekere mate gecompenseerd door positieve en negatieve langstransportgradiënten op resp. diep water en in de brandingszône.
   - Wegens gebrek aan kennis omtrent bovengenoemd transportpatroon als ook omtrent de invloed van de nabij gelegen zeegaten kan vooralsnog geen uitspraak worden gedaan over de invloed van zeezandwinning voor de kust van deze Waddeneilanden.

4.2 Zeezandwinning in en rond de Y-geul

1. Het onderzoek naar de morfologische invloed van zeezandwinning in en rond de Y-geul (zie Tabel 3.1 voor de onderzochte varianten) is gericht op twee aspecten:
   - de consequenties voor de sedimentatie in de geul: door wijzigingen in het dwars(bodem)profiel van de geul verandert de zandvangcapaciteit en daarmee de sedimentatie snelheid van de geul.
   - de consequenties voor de kustlijn aan weerszijden van de havendammen van IJmuiden als gevolg van een direkte beïnvloeding van de hydrodynamische kondities in de aktieve kustzône.

2. T.a.v. de morfologische ontwikkeling van de huidige Y-geul (2-5 km uit de havendammen van IJmuiden) kunnen de volgende conclusies worden getrokken:

- Zowel berekeningen uitgevoerd met het model LOMOR als lodingen van de Y-geul (periode 1985-1988) geven aan dat:
  - de geulsedimentatie zich langzaam voltrekt (1-4 cm per jaar)
  - de Y-geul een lichte verplaatsing in Noordelijke richting ondergaat (≈ 2-10 m/jaar, t.g.v. getijasymmetrie en een Noordwaarste reststroming)
  - de zeebodem ongeveer 2 km aan weerszijden van de geul-as als (vermoedelijk zeer langzaam eroderend) invloedsgebied van de geul kan worden aangemerkt.
- Als gevolg van de grote morfologische tijdschaal en de relatief korte duur van de beschikbare lodingsgegevens (≈ 2.5 jaar) was een goede verifikatie van het model LOMOR niet mogelijk. Desondanks is gezien de gevonden overeenkomsten (in orde-grootte) tussen de berekende en de gemeten geulsedimentatie en een voorspelling van het resulterende langstransport op deze lokatie (ca. 10 m^2/jaar), geen aanleiding geworden het model en de gekozen parameterinstelling te verwerpen.

3. Door verbreding en/of verdieping van de Y-geul (2-8 km uit de havendammen van IJmuiden) worden, op basis van de uitgevoerde LOMOR simulaties, de volgende wijzigingen verwacht in het morfologisch gedrag van de geul:
   - de zandvangcapacitiet van de Y-geul neemt vooral door geulverdieping (19 → 24 m) en op grote afstand van de havenmond van IJmuiden, sterk toe (80-600%).
   - door geulverbreding neemt de zandvangcapaciteit minder sterk toe (40-160%) en wordt het morfologisch systeem relatief minder sterk verstoord.
   - door de geulverdieping te combineren met een geulverbreding wordt, t.o.v. geulverdieping alleen, een geringe extra toename in geulsedimentatie gevonden (≈ 30%).
   - door geulverbreding verschuift de sedimentatie naar de zijtaluds van de geul waardoor het midden van de geul, ondanks de toegenomen sedimentatie, gedurende langere tijd niet sedimenteert.

4. Gezien het complexe 2DH karakter van de morfologie rond de havenmond van IJmuiden is een beperkt onderzoek uitgevoerd naar de direkte invloed van wijzigingen van het dwarsprofiel van de Y-geul op het lokale golfklimaat (reflekterende werking van de geultaluds), het golfgedreven langstransport

en de lokale kustlijn. De volgende conclusies kunnen hieruit worden getrokken:

- Voor de huidige Y-geul wordt verwacht dat golven die onder hoeken kleiner dan ca. 25° (t.o.v. de geulas) invallen door refraktie op het geultalud worden gereflecteerd en daarmee het golfklimaat over een afstand van ca. 2 km aan weerszijden van de geul (t.p.v. de havenmond) beïnvloeden.
- Door geulverbreding wordt dit reflekterend gedrag niet gewijzigd. Echter door geulverdieping (van 19 m naar 24 m):
  - neemt de kritische hoek voor reflektie toe (van ca. 25° naar ca. 32°), en
  - wordt i.v.m. de toegenomen geullengte (t.g.v. de verdieping), het invloedsgebied van een reflektie aan weerszijden van de geul (t.p.v. de havenmond) globaal een factor 2 groter (ca. 4 km i.p.v. 2 km).
- Als gevolg van de reflekterende werking van de geul alleen (zonder invloed van de havendammen) zou, uitgaande van een rechte kust, het resulterende Zuidwaarts gerichte golfgedreven langstransport aan beide zijden van de geul met ongeveer 25% worden gereduceerd (van 35.10^3 m^3/jaar naar 27.10^3 m^3/jaar). Door een verdieping van de geul met 5 m zou nog een kleine extra reduktie plaatsvinden (van 27.10^3 m^3/jaar naar 25 m^3/jaar).
- De beïnvloeding van het golfgedreven langstransport is klein t.o.v. de beïnvloeding door de havendammen. T.g.v. de afschermende werking van deze dammen wordt uitgaande van een recht kust, het golfgedreven langstransport globaal een factor 10 vergroot (altijd naar de havenhoofden gericht).
- De invloed van de geul en een verdieping ervan op de (evenwichts) kustlijn is dan ook zeer gering t.o.v. de invloed van havendammen: door de aanwezigheid van de (verdiepte) geul wordt de zandhoping aan de noordzijde en de zuidzijde van de haven slechts 1 tot enkele procenten gereduceerd resp. vergroot.

4.3 Aanbevelingen voor nader onderzoek

Nader onderzoek wordt aanbevolen t.a.v. de volgende aspekten:

- Nadere onderbouwing en verifikatie van de in deze studie, op basis van wiskundige morfologische modelresultaten, getrokken conclusies d.m.v.

analyse van bestaande veldgegevens/metingen of met een nog uit te voeren veldexperiment.

- Nader onderzoek naar de gevolgen van zeezandwinning op de kustontwikkeling van Texel en Ameland in relatie tot het transportpatroon en de transportgrootten voor de kust van beide eilanden en de invloed van de nabij gelegen zeegaten.
- Onderzoek naar de 2DH dynamische morfologie in de kustzône als gevolg van zeezandwinning op de 10-12 m dieptelijn al of niet in combinatie met een vooroeversuppletie (zie Roelvink, 1988), waarbij naast het dwarstransport ook het langstransport in beschouwing wordt genomen.
- Nader onderzoek naar de gevolgen van zeezandwinning in en rond de Y-geul op de kustontwikkeling aan weerszijden van de havenhoofden van IJmuiden in relatie tot het complexe 2DH morfologische karakter van dit gebied waarbij zowel het initiële ruimtelijk sedimenttransportpatroon als de lange-termijn gevolgen dienen te worden bestudeerd.
- Fundamenteel gericht procesonderzoek naar door golven en stroming geïnduceerd sedimenttransport.
- Onderzoek naar de waterbeweging en het door golven en stroming geïnduceerde sedimenttransport in de kustzône.

REFERENTIES

1. Alphen, van J.S.L.J. en Damoiseaux, M.A. (1987),
A morphological map of the Dutch shoreface and adjacent part of the continental shelf (1:250000),
Nota NZ-N-87.21/MDLK-R-87.17, Direktie Noordzee, Rijkswaterstaat

2. Anonymus (1986),
Onderzoek zandwin en suppletiegebied Scheveningen, februari-oktober 1985,
Rijkswaterstaat, Direktie Noordzee, Nota NZ-N-86.13

3. Anonymus (1989),
Zeezandwinning, Invloed op kustgedrag, een verkenning,
Rijkswaterstaat, Technisch Rapport 10 van de Discussienota Kustverdediging

4. Bailard, J.A. (1981),
An energetics total load sediment transport model for a plane sloping beach, J. of Geoph. Res., Vol. 86, No. C11, November

5. Bakker, W.T.N.P. en de Vroeg J.H. (1988),
Project kustvoorspelling fase 3, kontrôle en aanpassing voorspelling deelrapport 2: kustlijnvoorspelling voor de Hollandse Kust tot 2020,
TU Delft (in voorbereiding)

6. Bruun, P. (1954),
Coasts erosion and the development of beach profiles,
U.S. Army Corps of Engineers, Beach Erosion Board, Techn. Memo No. 44

7. Dijk, van R. (1986),
Opzet WAQUA model t.b.v. ontwerp zanddammen, Notitie GWAO-86.314,
Dienst Getijdewateren, Rijkswaterstaat.

8. Elorche, M. (1988),
OOSTWAD, een waterbewegings- en waterkwaliteitsmodel van de Oostelijke Waddenzee, Rijkswaterstaat, Nota GWAO-88.004

REFERENTIES (vervolg)

9. Galappatti, R. (1983),
A depth-integrated model for suspended transport, Commun. on Hydraulics, Dept. of Civ. Eng., Delft University of Technology

10. Hartsuiker, G. (1988),
Project kustvoorspelling fase 3, kontrôle en aanpassing voorspelling, Deelrapport 3: stromingsmodel van de Hollandse Kust, Waterloopkundig Laboratorium, H825, september (concept)

11. Hoekema, J. en Knoester, D. (1986),
Invloed van de onderwateroeversuppletie op het "near-shore" golfklimaat, Notitie GWAO-87.208, Dienst Getijdewateren, Rijkswaterstaat

12. HRS Wallingford (1973),
Laboratory studies on flow across dredged channels, Report nr. EX 618

13. Huitenga, I.J. en Van Driel, G.B. (1974)
Zijdelingse energieverliezen van golven in een geul, Afstudeerwerk TH Delft, Speurwerk Waterloopk. Lab., S244.

14. Jonsson, I.G. (1980),
A new approach to oscillatory, rough, turbulent boundary layers, Ocean Engineering, Vol. 7, p.p. 109-152

15. Katopodi, I. en Ribberink, J.S.
Quasi-3D modelling of suspended sediment transport by currents and waves, Delft Hydraulics, Report H460, October

16. Nedeco (1983),
Study of the dredging of the acces channel to the Port of Bahia Blanca, Consortium Nedeco/Arconsult, final report, Volume I

REFERENTIES (vervolg)

17. Olesen, K.W. (1981),
A numerical model for morphological computations in rivers with non-uniform sediment, Report R/1981/6H,
Dept. of Civ. Eng., Delft University of Techn.

18. Ridderinkhof, H. (1988),
Tidal and residual flows in the Western Dutch Wadden Sea 1: numerical model results,
Netherlands Journal of Sea Research, 22 (1)

19. Rienecker, M.M. en Fenton, J.D. (1981),
A Fourier approximation method for steady water waves,
J. Fluid Mech., Vol. 104, p.p. 119-137

20. Roelvink, J.A. (1988),
Mogelijkheden van onderwateroever suppleties,
Waterloopkundig Laboratorium, H825,
Technisch Rapport 14 van de Discussienota Kustverdediging

21. Roelvink, J.A. en Stive, M.J.F. (1988),
Lager scale tets of cross-shore sediment transport on the upper shoreface,
Symp. on 'Math. modelling of Sed. Trsp. in the Coastal Zone', Copenhagen

22. Rijn, L.C. van (1985),
Two-dimensional vertical mathematical model for suspended sediment transport by currents and waves - SUTRENCH model,
Delft Hydraulics, Report S488 part IV, december

23. Saville, T. (1981),
Letters to the Editor Note on "onshore sediment transort at Redondo Beach, California", Shore and Beach, Oktober

24. Stive, M.J.F., Boer, S. en G.K.F.M. van Banning (1984)
Beleidsanalyse kustverdediging Texel, Kustonwikkeling en Kustverdediging,
SIBAS, Waterloopkundig Laboratorium

REFERENTIES (vervolg)

25. Stive, M.J.F. (1986),
A model for cross-shore sediment transport,
20th Int. Conf. on Coast Eng., Taipeh

26. Stive, M.J.F. en Roelvink, J.A. (1988),
Project kustvoorspelling fase 3, kontrôle en aanpassing voorspelling,
deelrapport 4:initieel sedimenttransportmodel Hollandse Kust,
Waterloopkundig Laboratorium, H825, november (concept)

27. Stive, M.J.F. (1989),
Project Kustvoorspelling fase 2, kontrôle en aanpassing voorspelling,
deelrapport 1: dynamische sedimentbalans van het Nederlandse kustsysteem,
Waterloopkundig Laboratorium, H825 (in voorbereiding)

28. Vriend, de H.J. (1988),
Eenvoudig stromingsmodel t.b.v. onderzoek grens zeezandwinning,
persoonlijke notitie

29. Waterloopkundig Laboratorium (1975),
Golfvervorming door een geul, vervolg modelonderzoek M1232

30. Wiersma, J. (1985),
Een nieuwe kijk op de kust, notitie WWKZ 85.G.212,
Rijkswaterstaat

	dieptelijn (m)	breedte B (m)	lengte L (m)	kuildiepte dh (m)
T10.1	10	100	2000	1
T10.2	10	500	2000	1
T16.1	16	100	2000	1
T16.2	16	500	2000	1
T16.3	16	1000	2000	5
T16.4	16	1000	5000	2
T20.1	20	1000	2000	5
T20.2	20	1000	5000	2

Tabel 2.1 Overzicht zandwinkuil alternatieven - kustzônewinning

dieptelijn m	v.Rijn $m^2/s.10^{-5}$	Bailard $m^2/s.10^{-5}$
10	2.24	2.41
16	0.82	3.34
20	0.44	4.13

Tabel 2.2 Invloed langstransportformulering op transportgrootte

dieptelijn	Bailard c_f (Jonsson) k_w = 0.01 m	Bailard c_f (Jonsson) k_w = 2.5 D_{50}	Bailard c_f = 0.01
(m)	($m^2/s.10^{-5}$)	($m^2/s.10^{-5}$)	($m^2/s.10^{-5}$)
10	2.41	0.72	1.2
16	3.34	0.84	1.1
20	4.13	0.92	1.0

Tabel 2.3 Invloed bodemruwheidsformulering op transportgrootte

dieptelijn (m)	Bailard konvektief transport	Bailard konvektief + asymmetrie transport
	$(m^2/s.10^{-5})$	$(m^2/s.10^{-5})$
10	2.82	4.05
16	3.49	3.96
20	4.22	4.46

Tabel 2.4 Inlvoed asymmetrie transport op transportgrootte

dieptelijn (m)	Bailard lineaire golftheorie	Bailard Rienecker & Fenton (1981)
	$m^2/s.10^{-5}$	$m^2/s.10^{-5}$
10	2.41	2.82
16	3.34	3.49
20	4.13	4.22

Tabel 2.5 Invloed niet-lineair golf gedrag op transportgrootte

dieptelijn (m)	$L_{5\%}$ v. Rijn (m)	L_A (m)
10	250-1000	200
16	400-1600	320
20	500-2000	400

Tabel 2.6 Aanpassingslengte van de sediment concentratie vertikaal volgens v. Rijn ($L_{5\%}$) en volgens Galappatti

	dieptelijn (m)	breedte (m)	lengte (m)	diepte (m)
ZW00		ongestoord		
ZW02	10	500	2000	1
ZW03	14	1000	2000	5
ZW04	14	1000	2000	1
ZW05	14	500	2000	1
ZW06	14	1000	5000	1

Tabel 2.7 Overzicht zandwinkuil berekeningen WAQUA/HISWA - model ZANDWIN

dieptelijn (m)	D_{50} $m.10^{-3}$	W_s m/s
10	0.16	0.013
15	0.17	0.014
20	0.20	0.02

Tabel 2.8 D_{50} en valsnelheid bodemsediment lokatie Scheveningen

lokatie	H_{rms} (m)	T_p (r)
Scheveningen	1.04	5.7
Bergen	1.12	6.0
Texel	1.23	6.4
Ameland	1.10	6.3

Tabel 2.9 Geschematiseerde golfhoogte en periode t.b.v. de LOMOR-berekening

lokatie	D_{50} $m.10^{-3}$	W_s m/s
Bergen	170	0.014
Texel	220	0.024
Ameland	150	0.012

Tabel 2.10 D_{50} en valsnelheid bodemsediment lokaties Bergen, Texel en Ameland

diepte in m (t.o.v. NAP)	Afstand uit de havendammen breedte (m)	km		
		2	5	8
19	500	Y20	Y50	Y80
19	1000	Y21	Y51	Y81
19	2000	Y22	Y52	Y82
24	500	Y23	Y53	Y83
24	2000	Y24	Y54	Y84

Tabel 3.1 Varianten dwarsprofiel Y-geul

afstand uit de havendammen (km)	D_{50} $(m.10^{-3})$	W_s (m/s)
2	0.20	0.020
5	0.20	0.020
8	0.18	0.017

Tabel 3.2 D_{50} en valsnelheid bodemsediment lokatie IJmuiden

alternatief	jaarlijks sedimentatie volume	gemiddelde sedimentatie snelheid	geul breedte	geul diepte
	($m^3/m/jr$)	(cm/jr)	(m)	(m t.o.v. NAP)
Y20	34.6	4.7		
Y50	25.5	2.4	500	19
Y80	9.1	1.2		
Y21	50.0	4.4		
Y51	28.5	2.6	1000	19
Y81	16.6	1.6		
Y22	64.7	2.9		
Y52	49.0	2.3	2000	19
Y82	23.9	1.2		
Y23	62.7	5.6		
Y53	64.7	6.5	500	24
Y83	66.1	7.3		
Y24	78.6	2.8		
Y54	84.6	3.3	2000	24
Y84	83.2	3.5		

Tabel 3.3 Gesedimenteerd volume per jaar per meter geullengte en gemiddelde sedimentatie snelheid in het totale sedimentatiegebied (≈ nieuwe geulbreedte)

alternatief	jaarlijks sedimentatie volume	gemiddelde sedimentatie snelheid	geul breedte	geul diepte
	(m^3/m/jr)	cm/jr	(m)	(m t.o.v. NAP)
Y20	21.5	5.4		
Y50	18.4	3.8	500	19
Y80	7.0	1.4		
Y21	6.2	1.5		
Y51	5.9	1.2	1000	19
Y81	5.1	1.0		
Y22	0.3	0.08		
Y52	1.0	0.2	2000	19
Y82	1.0	0.2		
Y23	17.9	4.5		
Y53	29.3	6.1	500	24
Y83	39.4	7.9		
Y24	0.1	0.03		
Y54	0.7	0.1	2000	24
Y84	1.2	0.2		

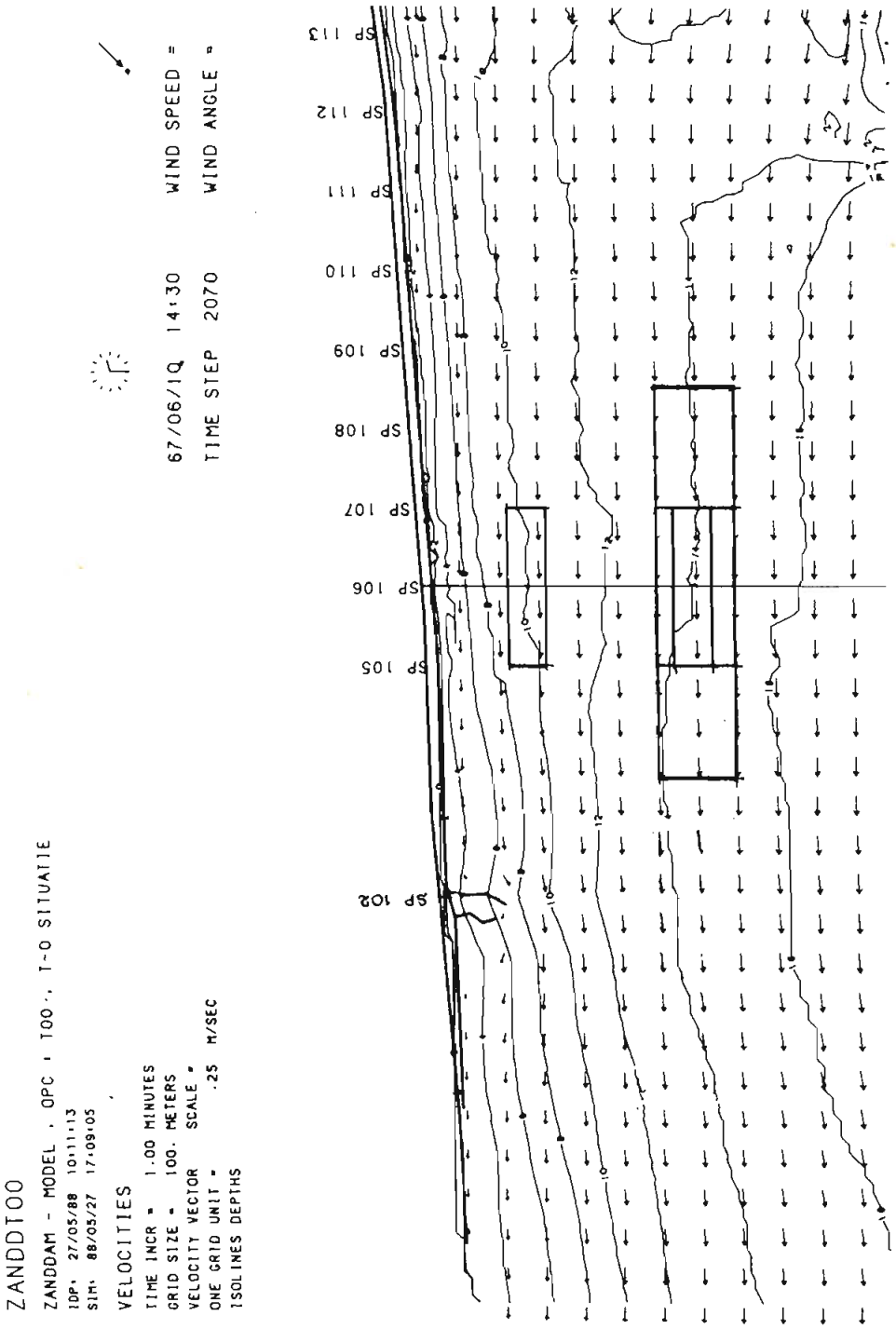
Tabel 3.4 Gesedimenteerd volume per jaar per meter geullengte en gemiddelde sedimentatie snelheid over de oorspronkelijke geulbreedte (400-500 m)

Situatie	Richting α	Transport per sektor S_α	Bruto Transport	Netto Transport
	(°)	(m^3/jaar)	(m^3/jaar)	(m^3/jaar)
	-75	- 15.10^3		
	-45	-160.10^3	-288.10^3	
Geen geul	-15	-113.10^3		+35.10^3
	+15	+122.10^3		
	+45	+180.10^3	+323.10^3	
	+75	+ 21.10^3		
	-75	- 15.10^3		
	-45	-160.10^3	-296.10^3	
Bestaande geul*	-15	-121.10^3		+27.10^3
	+15	+122.10^3		
	+45	+180.10^3	+323.10^3	
	+75	+ 21.10^3		
	-75	- 15.10^3		
	-45	-161.10^3	-298.10^3	
Verdiepte geul*	-15	-122.10^3		+25.10^3
	+15	+122.10^3		
	+45	+180.10^3	+323.10^3	
	+75	+ 21.10^3		

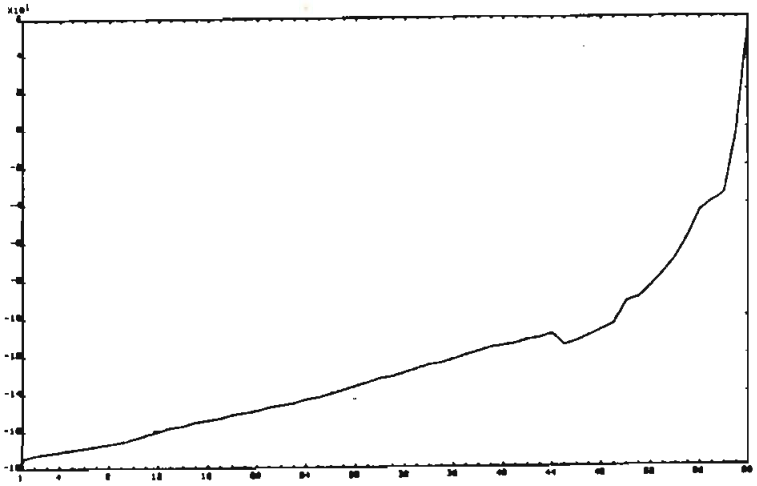
\+ = zuidwaarts transport.

* De transporten zijn weergegeven voor de noordzijde van de geul. Aan de zuidzijde is het netto transport gelijk, de bruto transporten echter niet.

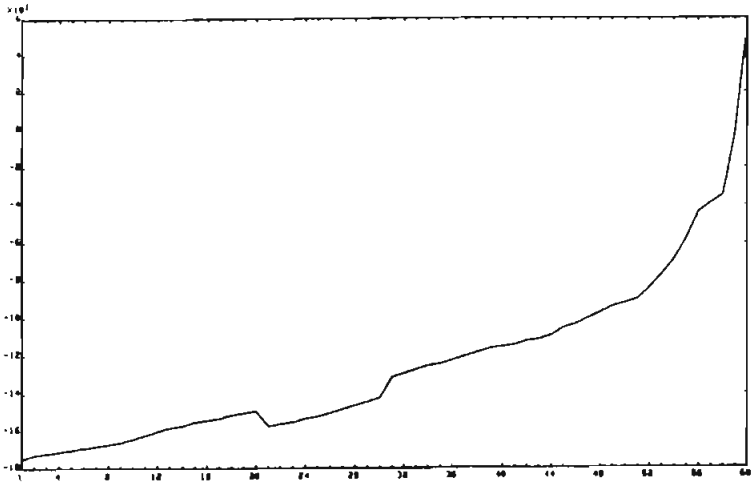
Tabel 3.5 Bijdrage van de verschillende golfsektoren aan het jaarlijks golfgedreven langstransport bij IJmuiden, in de situaties: geen geul, bestaande geul, verdiepte geul.



LOKATIE ZANDWINKUILEN in het model " ZANDWIN "		
	ZW00 - ZW06	
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM	H 825.20	FIG. 2.1

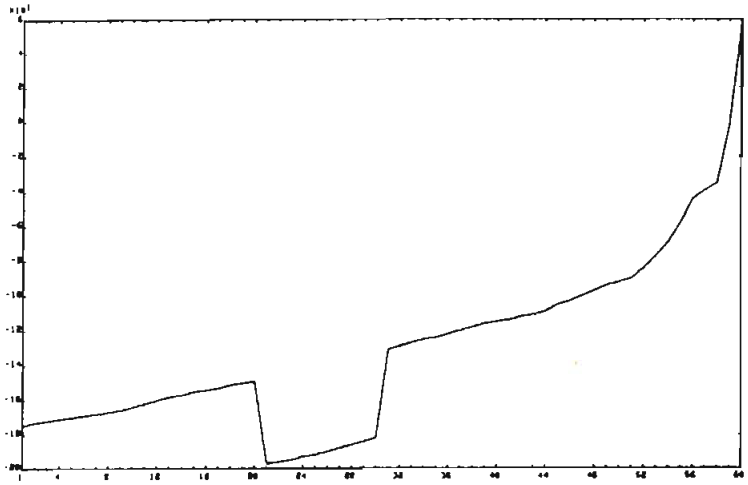


ZW02

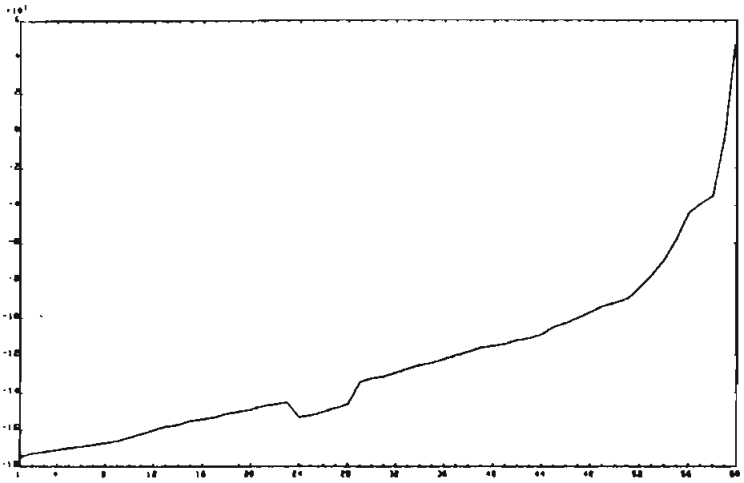


ZW04/06

BODEM (DWARS) PROFIELEN WAQUA/HISWA		
model " ZANDWIN " met zandwinkuilen	ZW02/ZW04/ZW06	
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM	H 825.20	FIG. 2.2

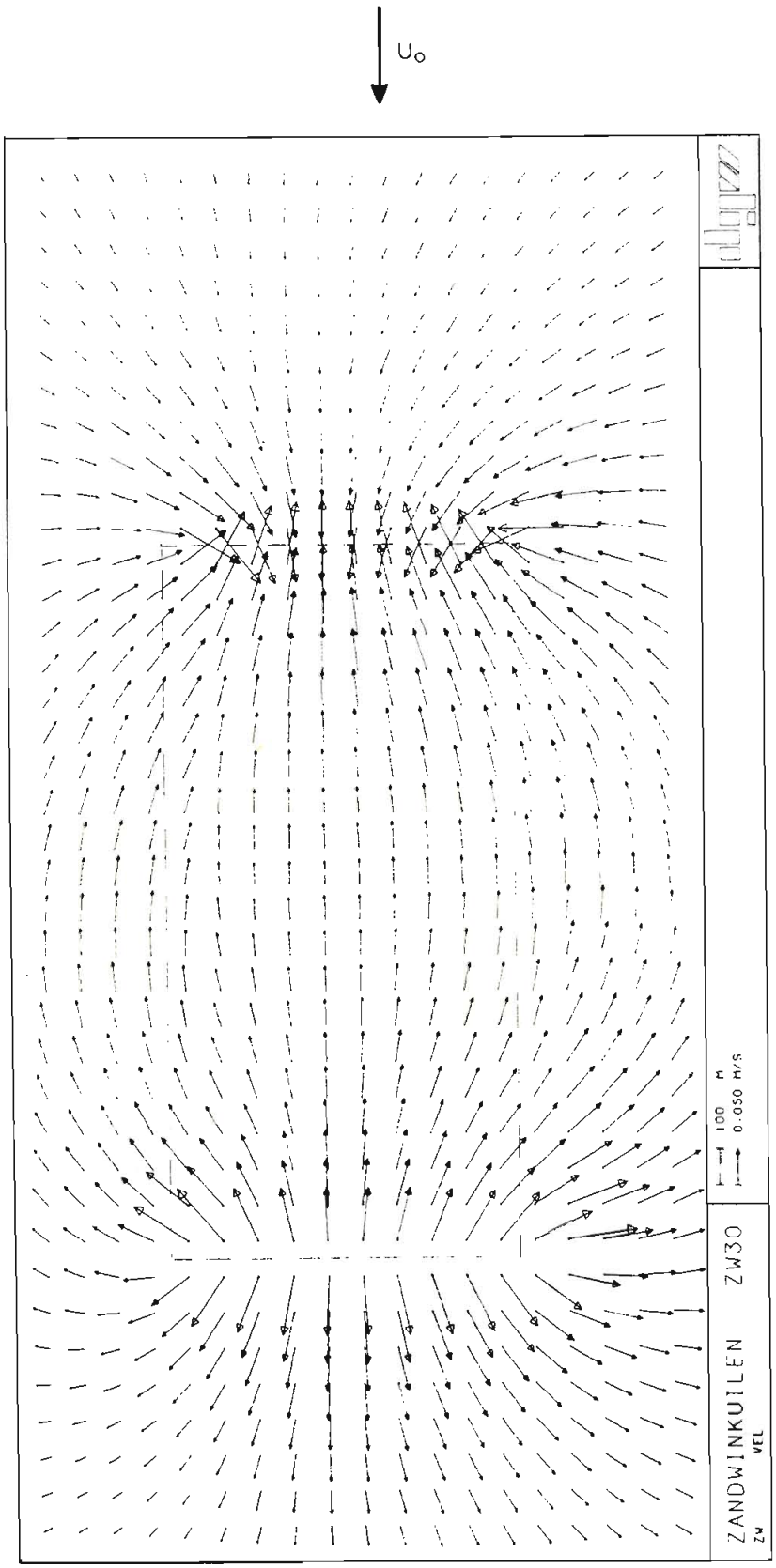


ZW03



ZW05

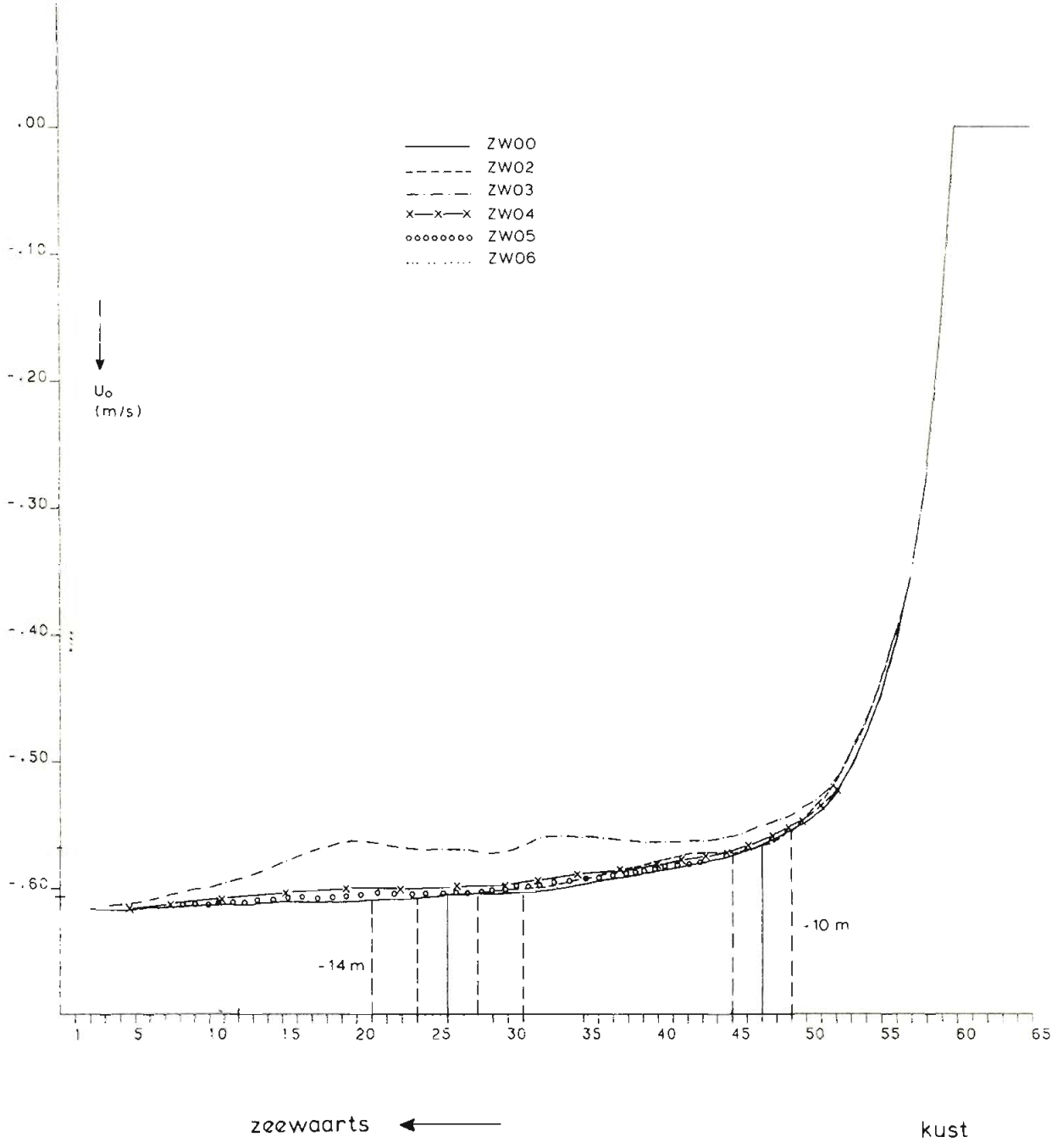
BODEM (DWARS) PROFIELEN WAQUA/HISWA		
model " ZANDWIN " met zandwinkuilen	ZW03/ZW05	
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM	H 825.20	FIG. 2.3



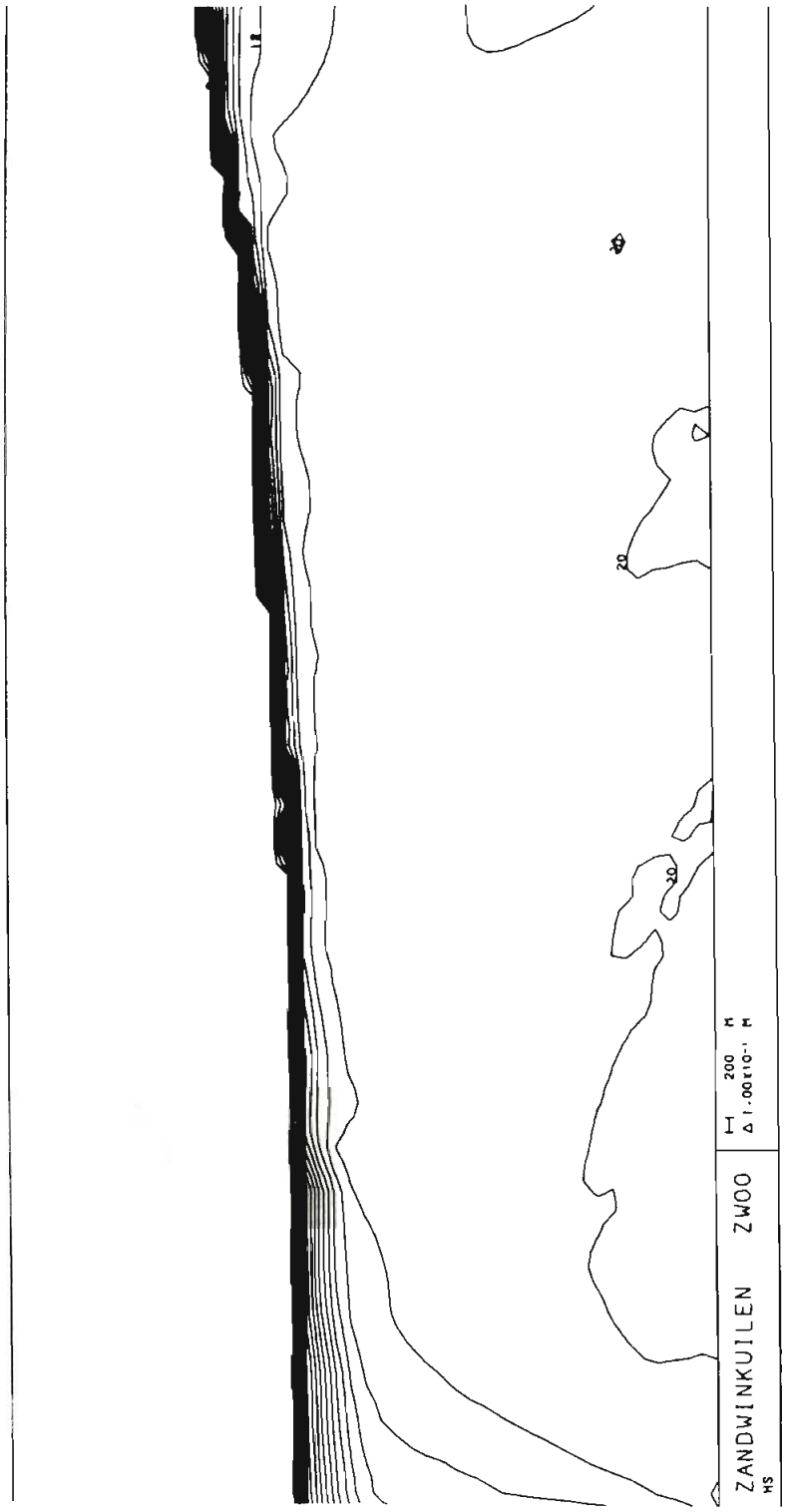
L = 2000 m
B = 1000 m
dh = 5 m

$\vec{U}_{met\ kuil} - \vec{U}_{zonder\ kuil}$ = VERSCHIL SNELHEID

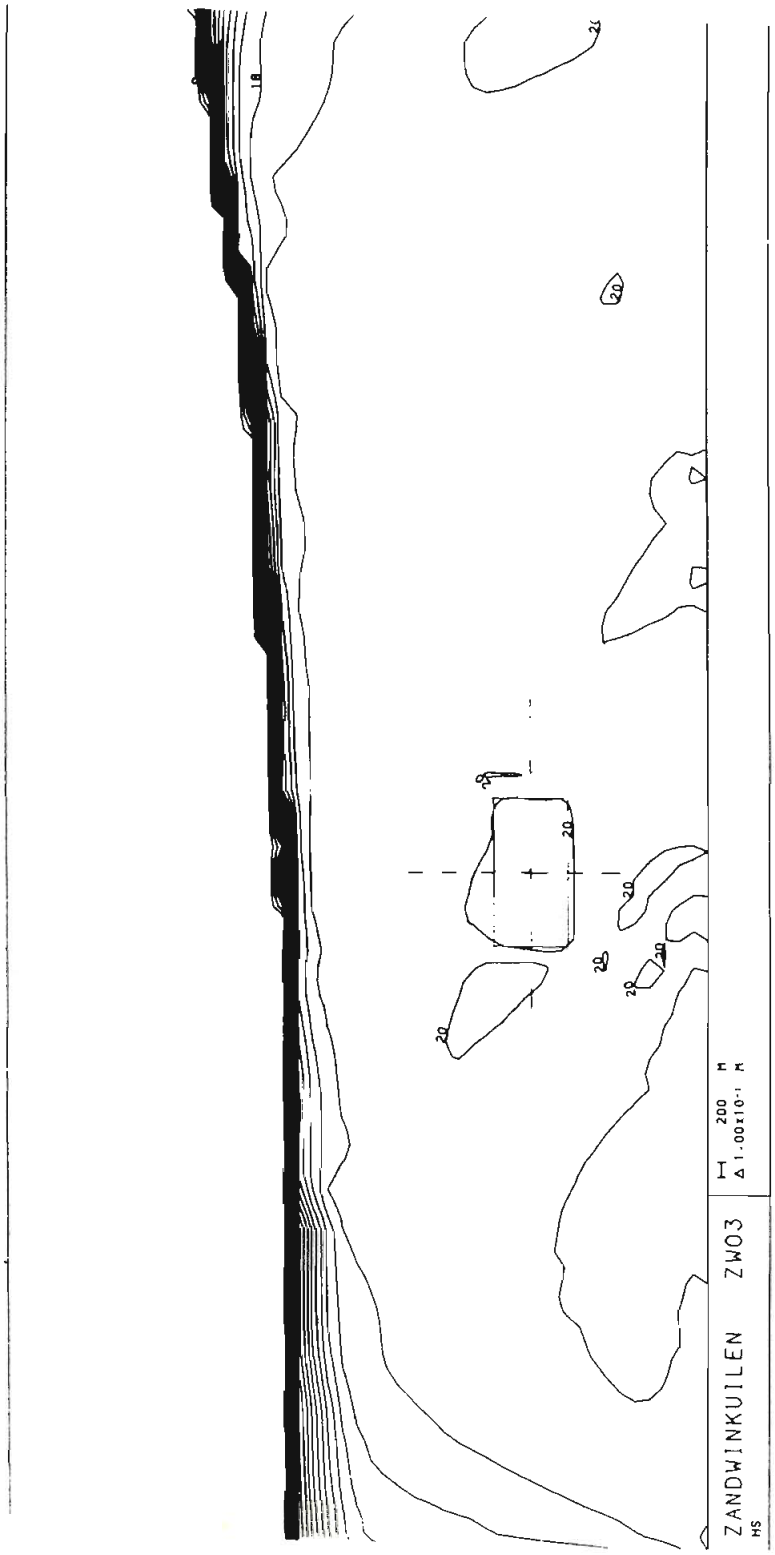
BEINVLOEDING STROOMSNELHEID DOOR ZANDWINNINGSKUIL (WAQUA)	ZW03 - ZW00	
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM	H 825	FIG. 24



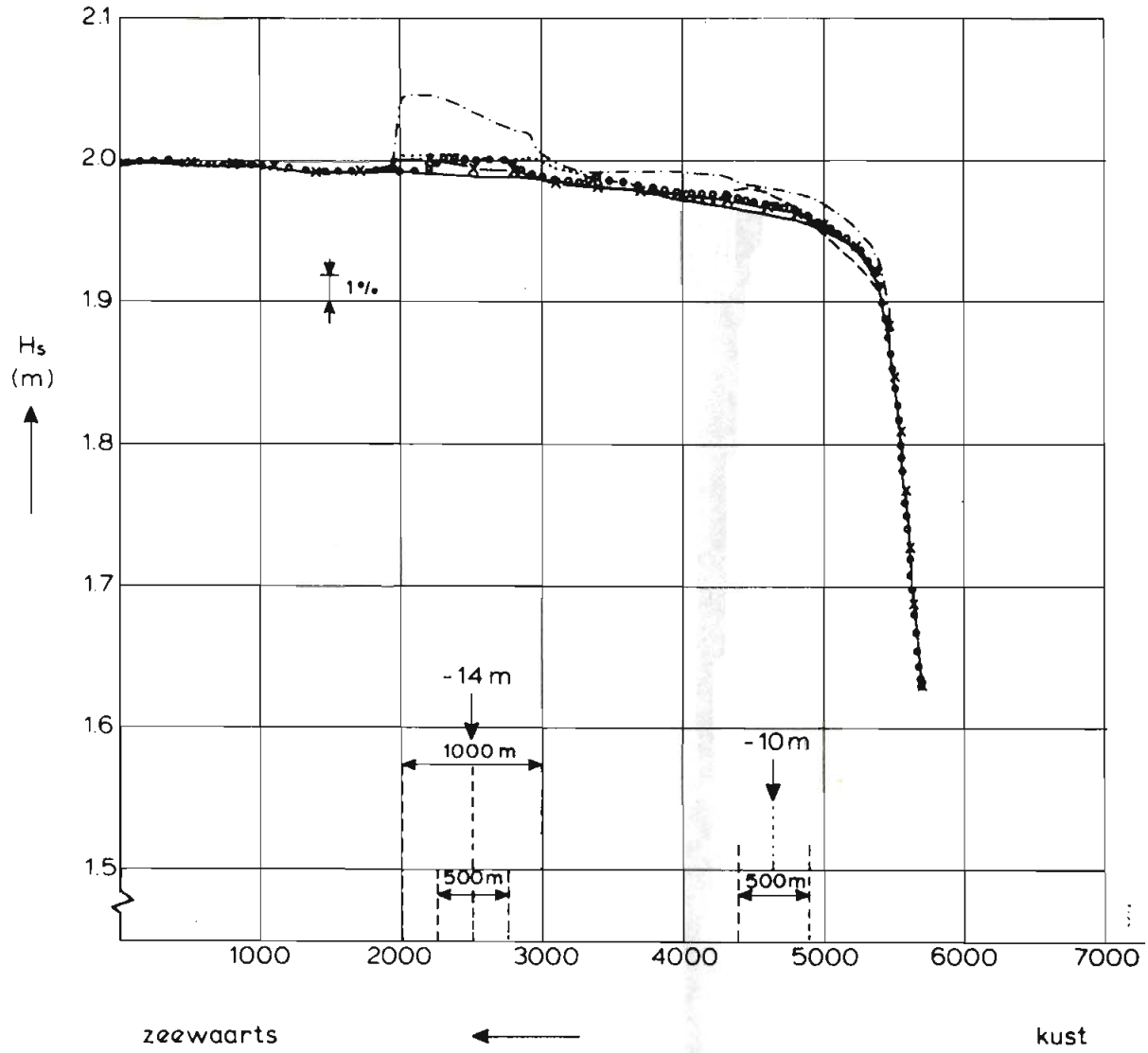
BEINVLOEDING MAXIMALE VLOEDSTROOMSNELHEID DOOR ZANDWINNINGSKUILEN (DWARSRAAI SP106)	ZW00 - ZW06	
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM	H 825	FIG. 2.5



GOLFHOOGTE (H_s) CONTOURLIJNEN		
ONGESTOORDE BODEM	ZW00	
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM	H 825.20	FIG. 2.6

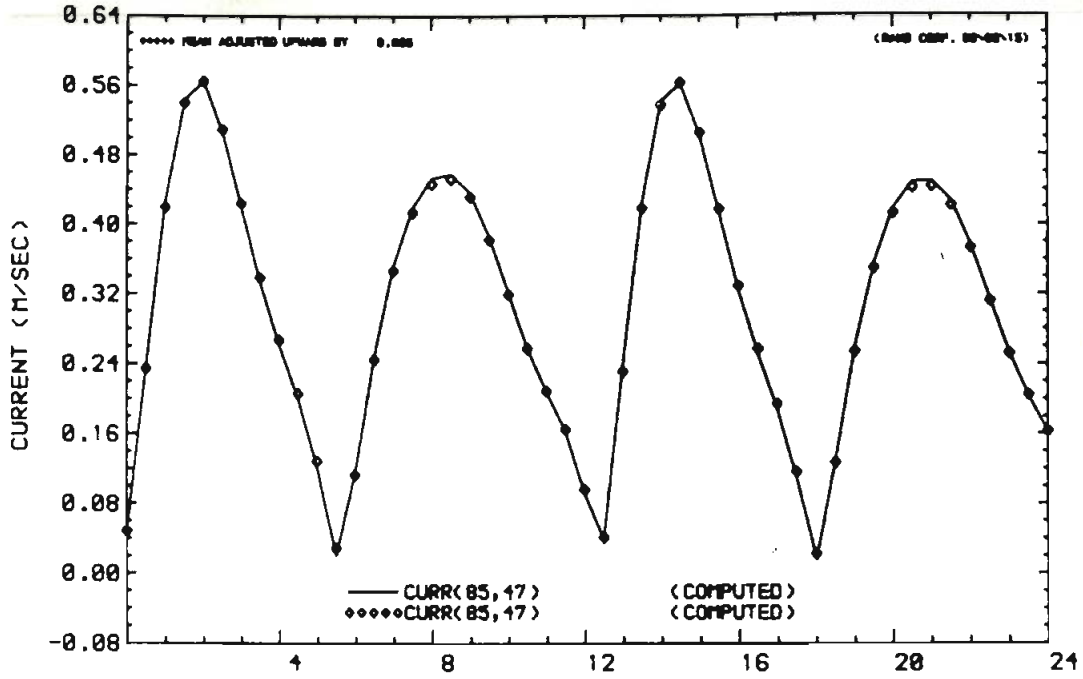


GOLFHOOGTE (H_s) CONTOURLIJNEN		
ZANDWINKUIL L=2000m., B=1000m., dh=5m.	ZW03	
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM	H 825.20	FIG. 2.7

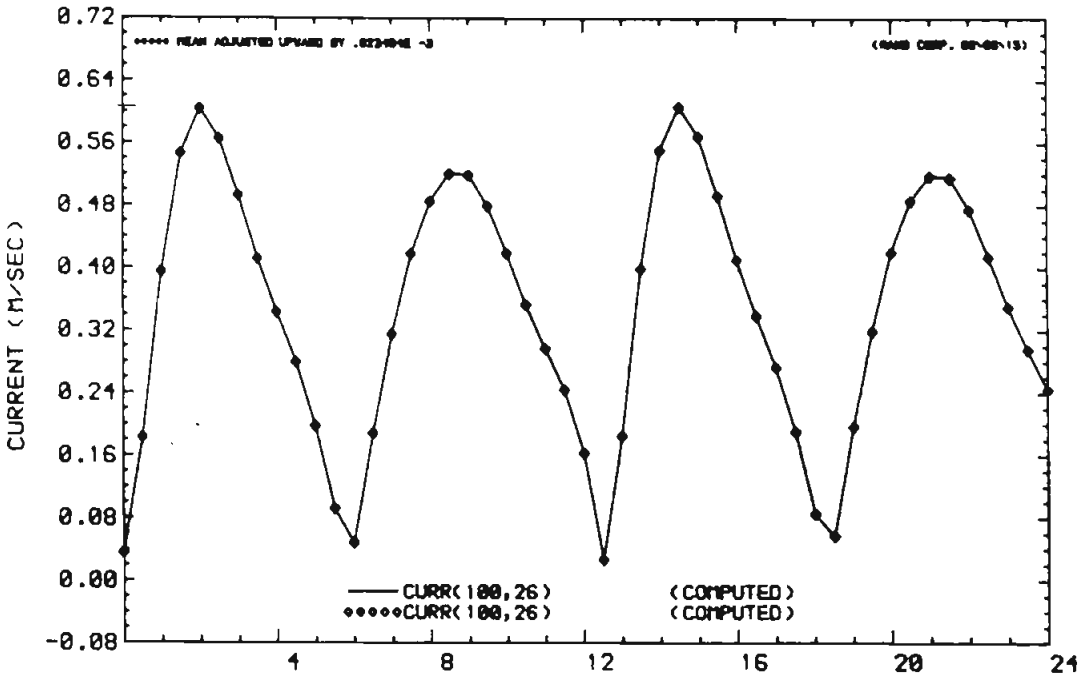


ZW00
ZW02
ZW03
ZW04
ZW05
ZW06

BEINVLOEDING GOLFHOOGTE (H_s) DOOR ZANDWINNINGSKUILEN (SP106)	ZW00 - ZW06	
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM	H 825	FIG. 28

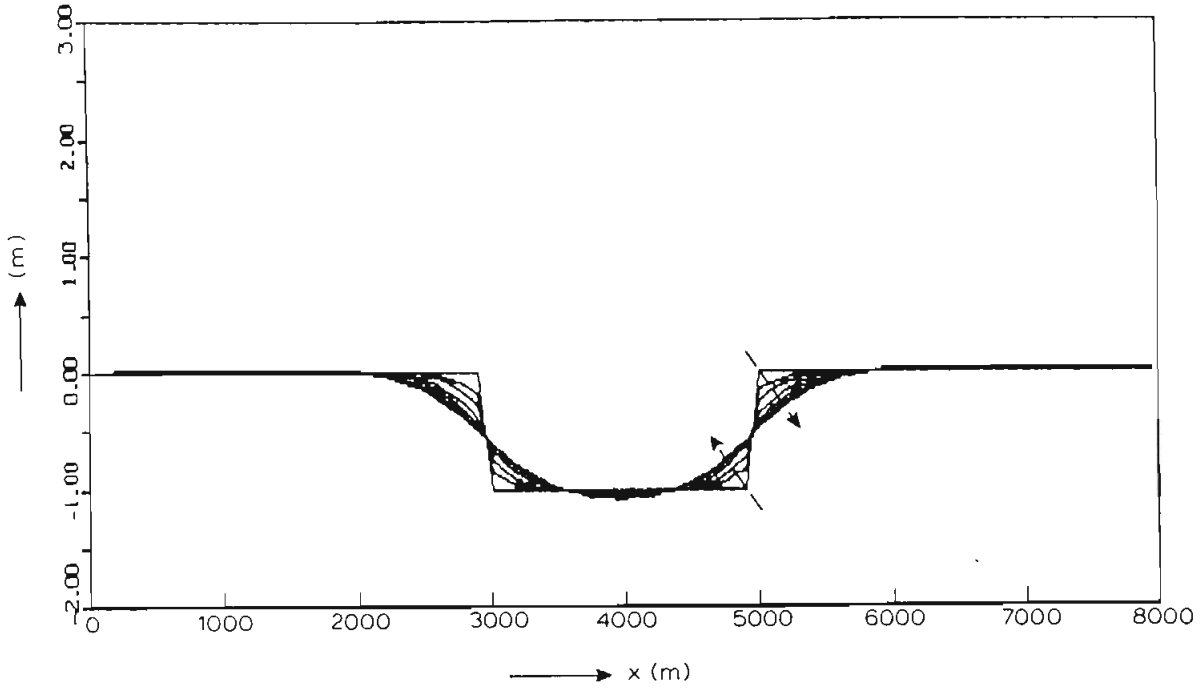


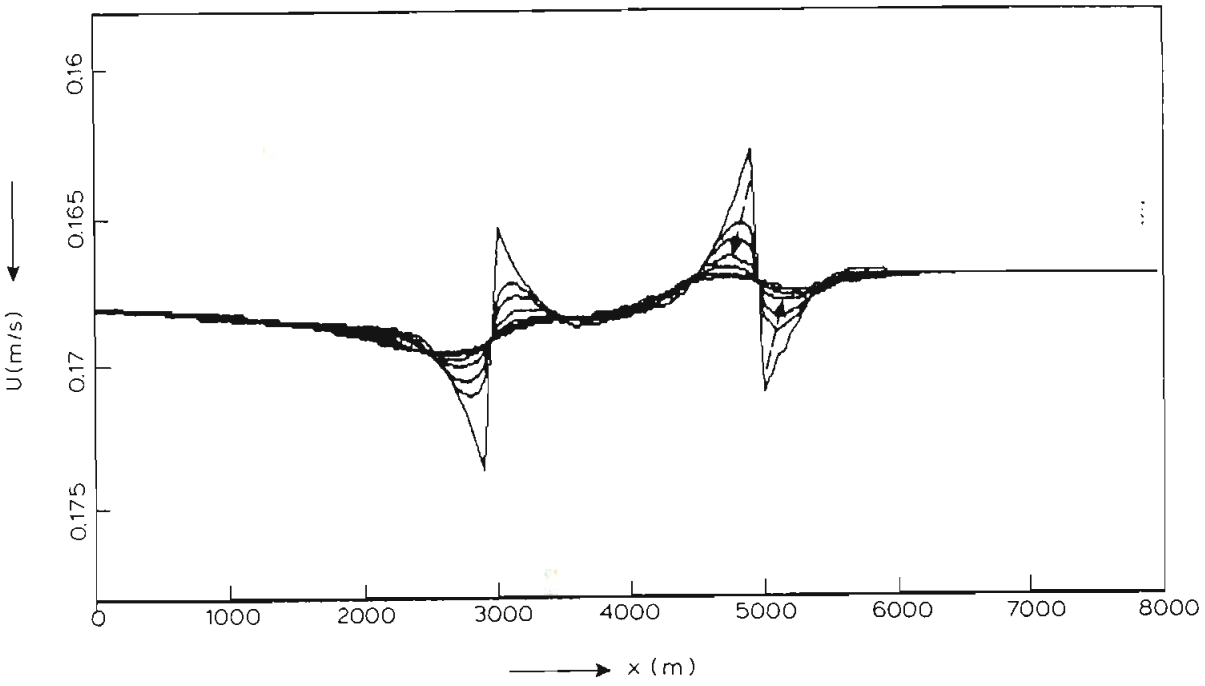
-10 m.



-14 m.

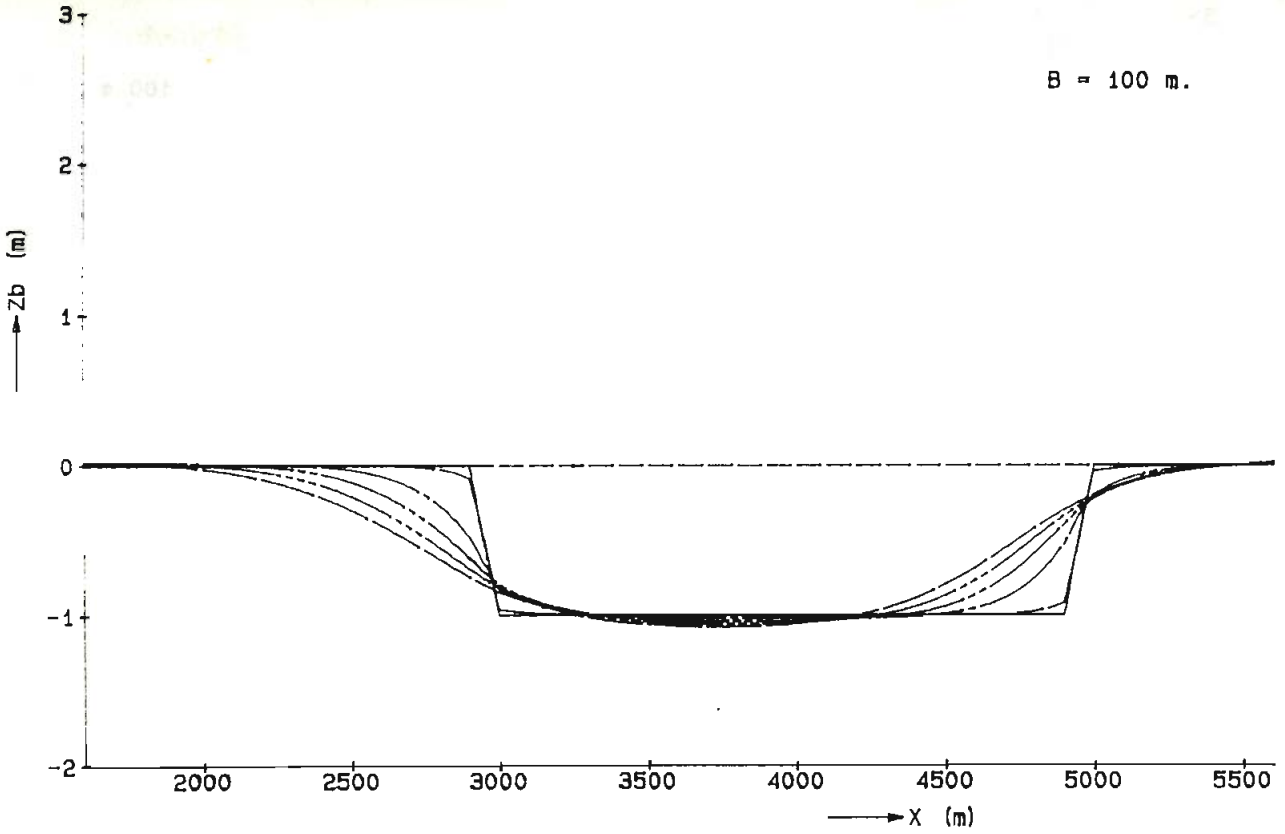
"TIME HISTORIES " STROOMSNELHEID		
VOLGENS WAQUA (" ZANDWIN ")	ZW00	
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM	H 825.20	FIG. 2.9

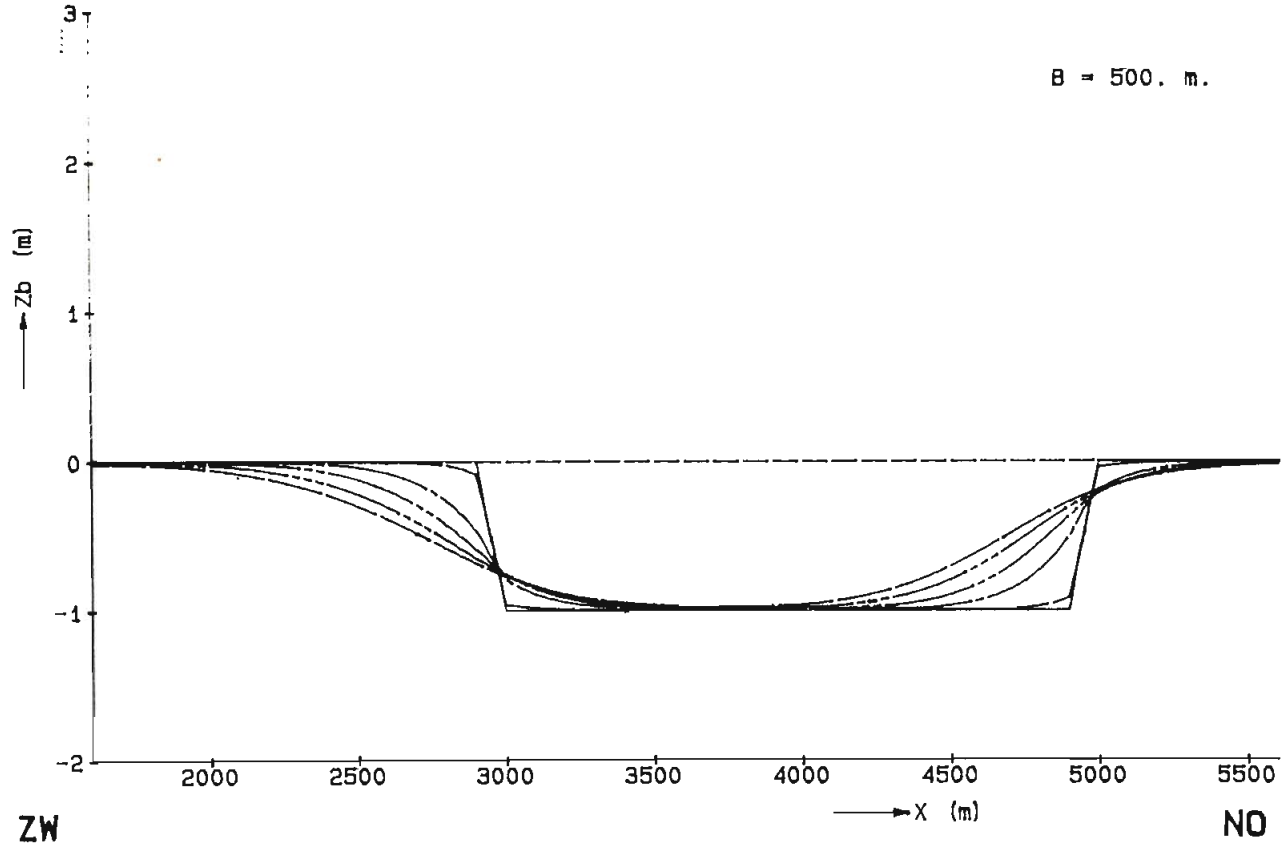




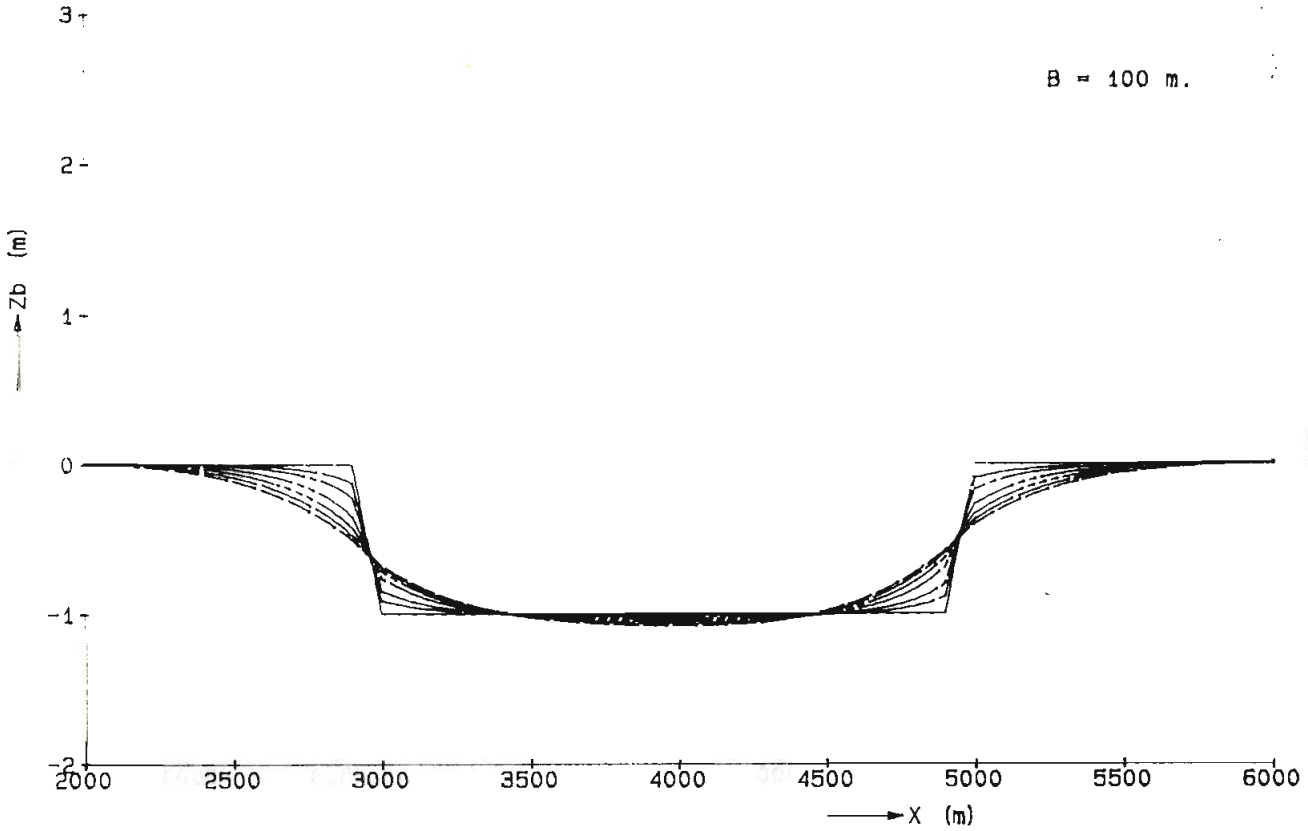
t = 0-15 jaar , - 16 m lijn
L = 2000 m
B = 300 m
dh = 1 m

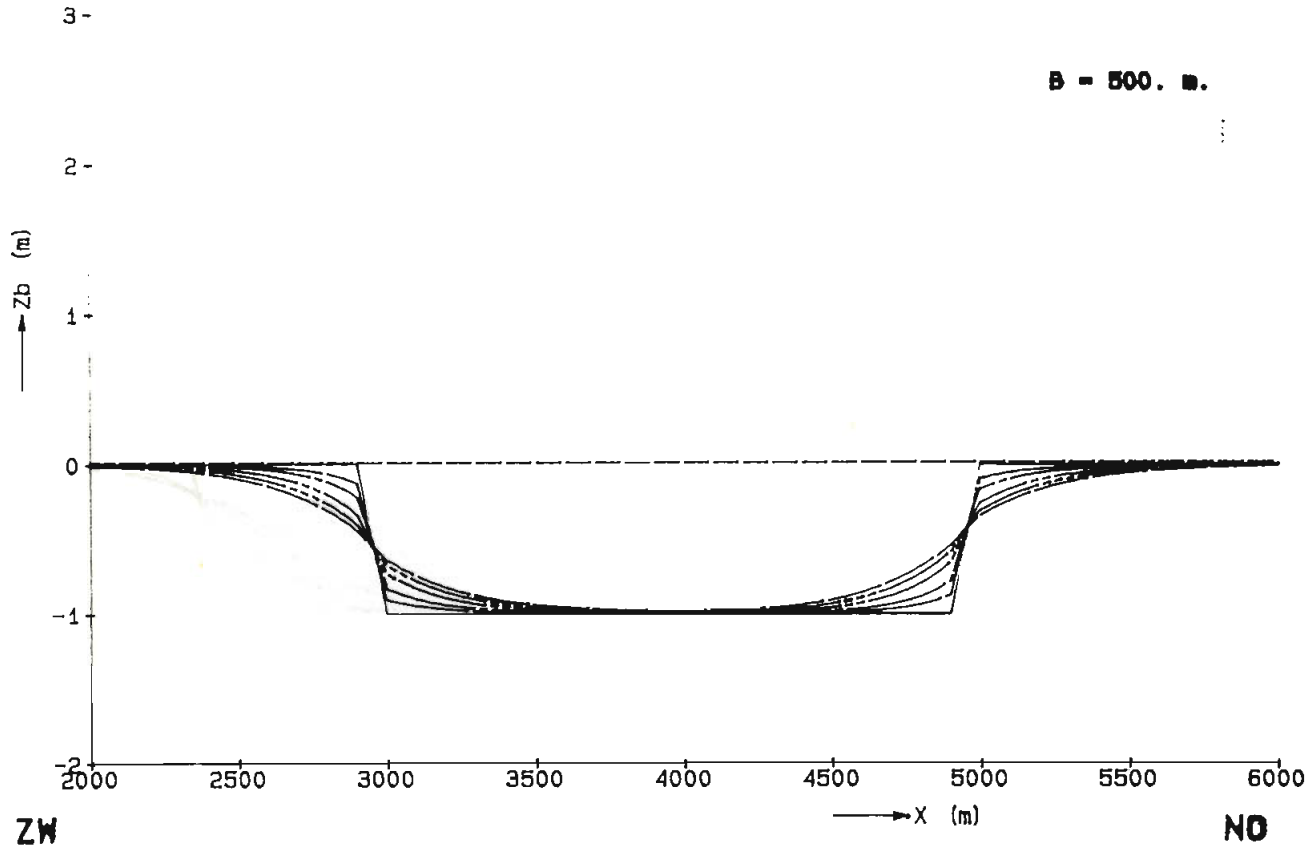
DEMPING "KOPEFFEKTEN" STROOMSNELHEID TIJDENS LANGSPROFIELONTWIKKELING	T16.1A	
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM	H 825	FIG. 2.10



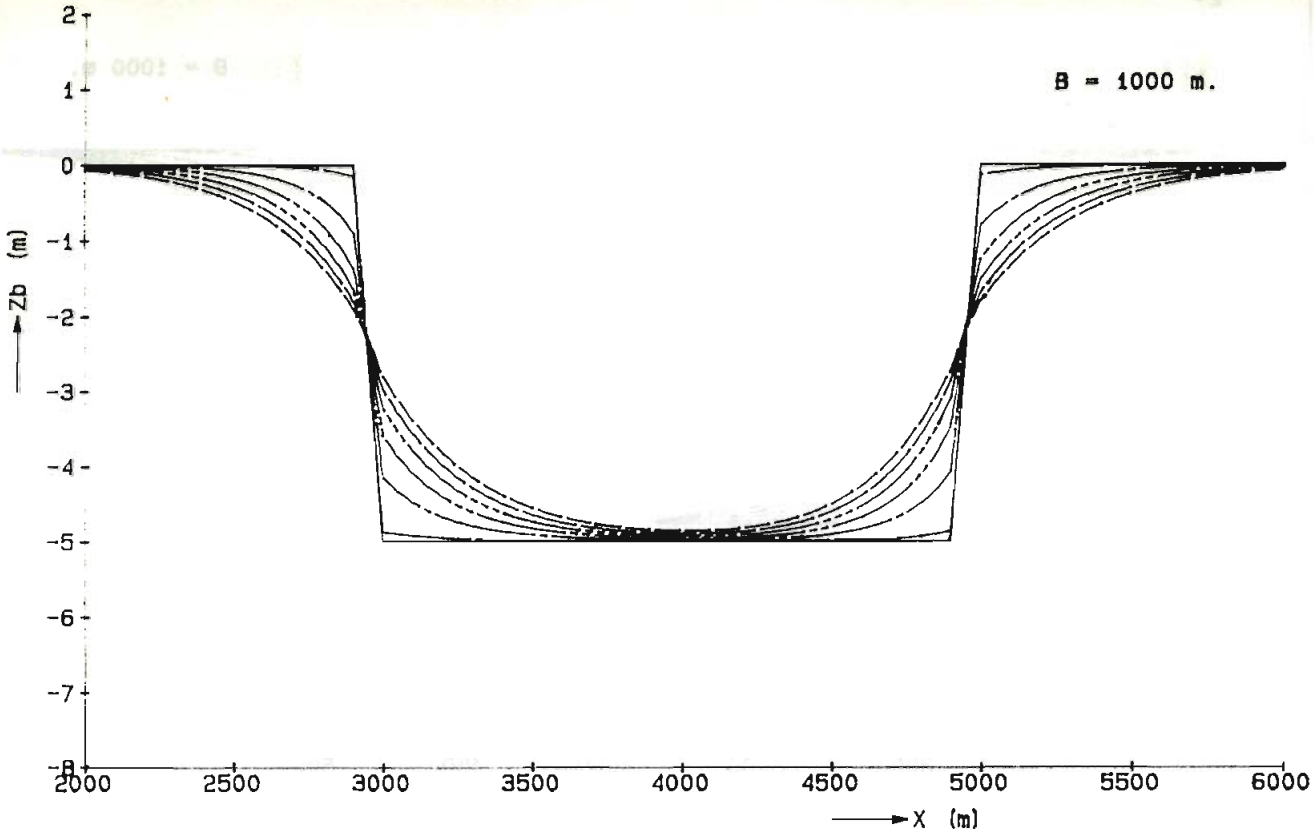


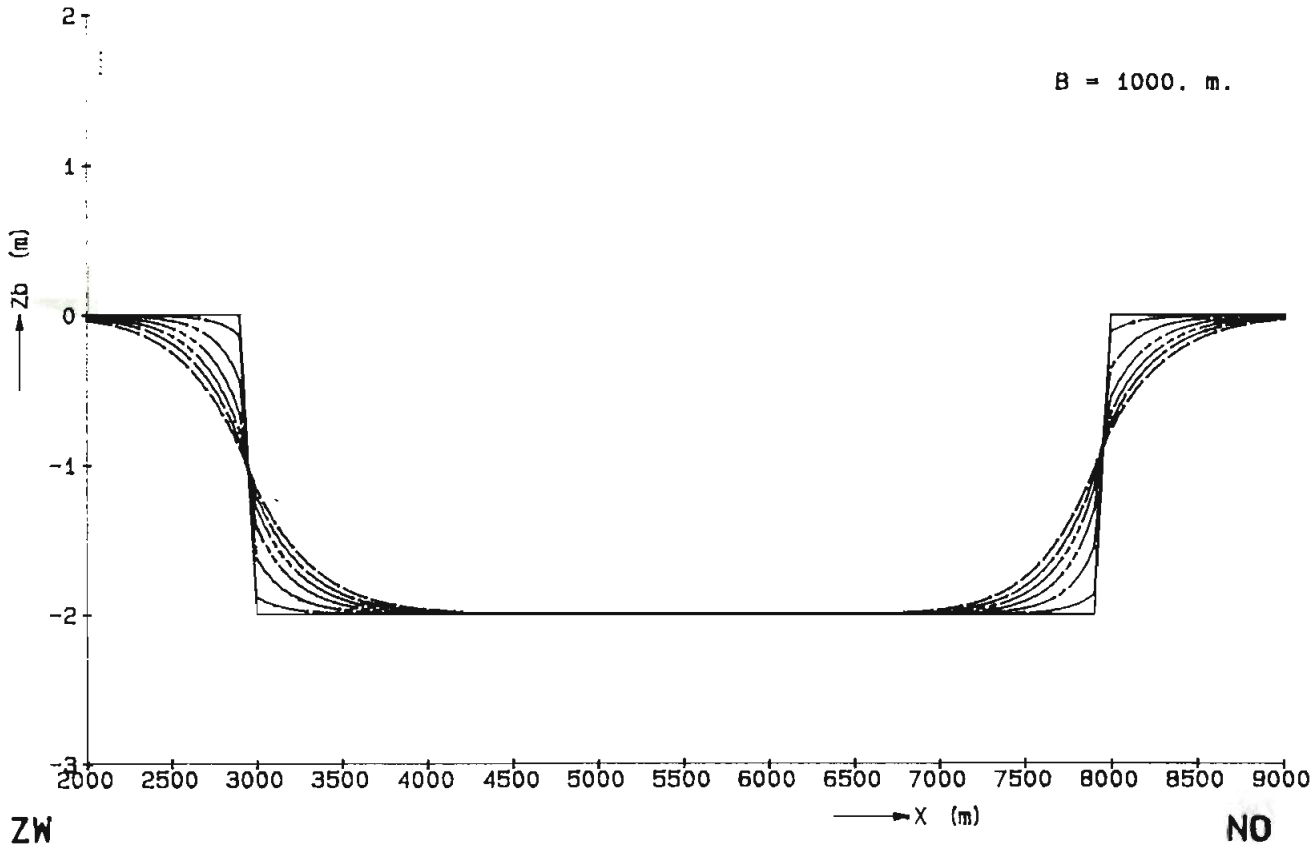
SCHEVENINGEN: LANGSPROFIELONTWIKKELING t = 0 - 40 jr., -10 m. lijn L=2000m. dh=1m. B=100m. en 500m.	T 10.1 / T 10.2	
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM	H 825.20	FIG. 2.11



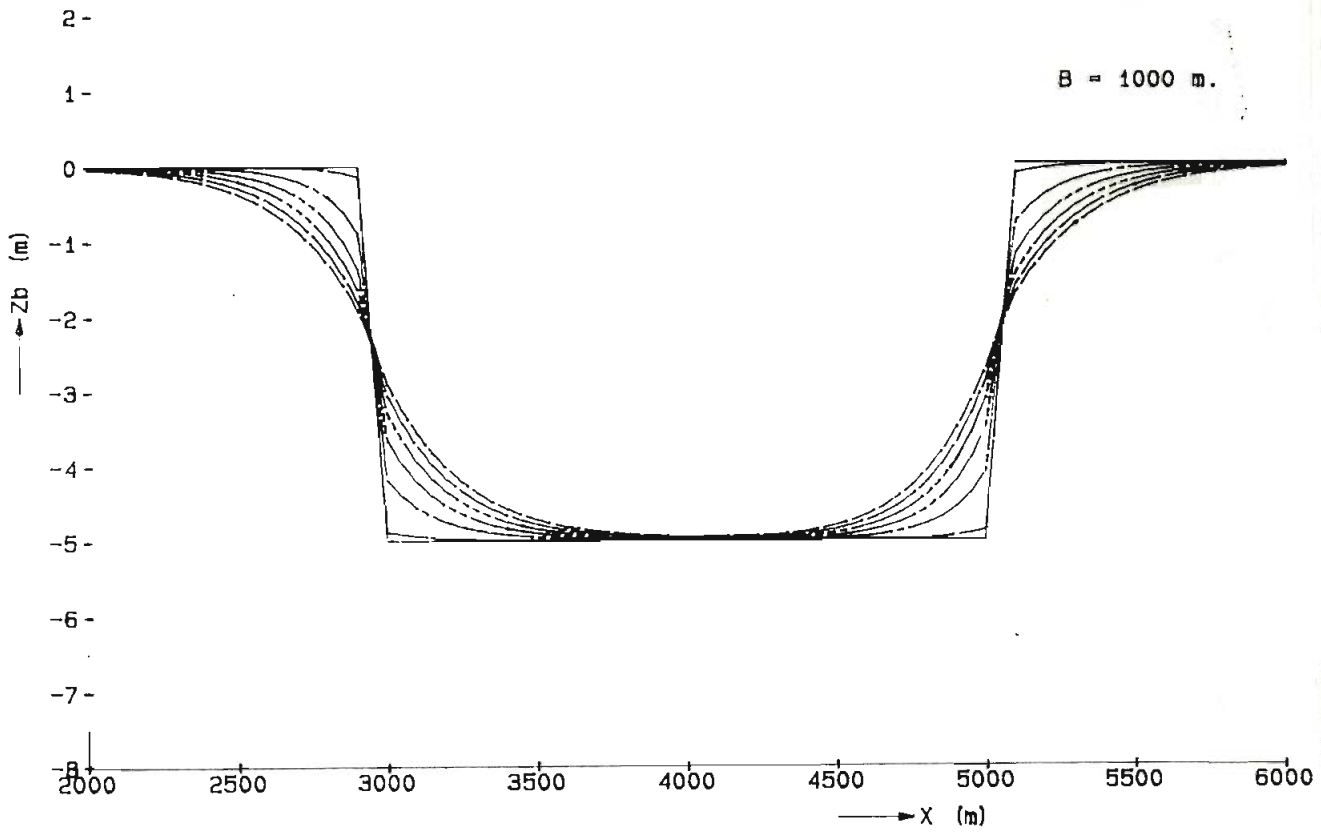


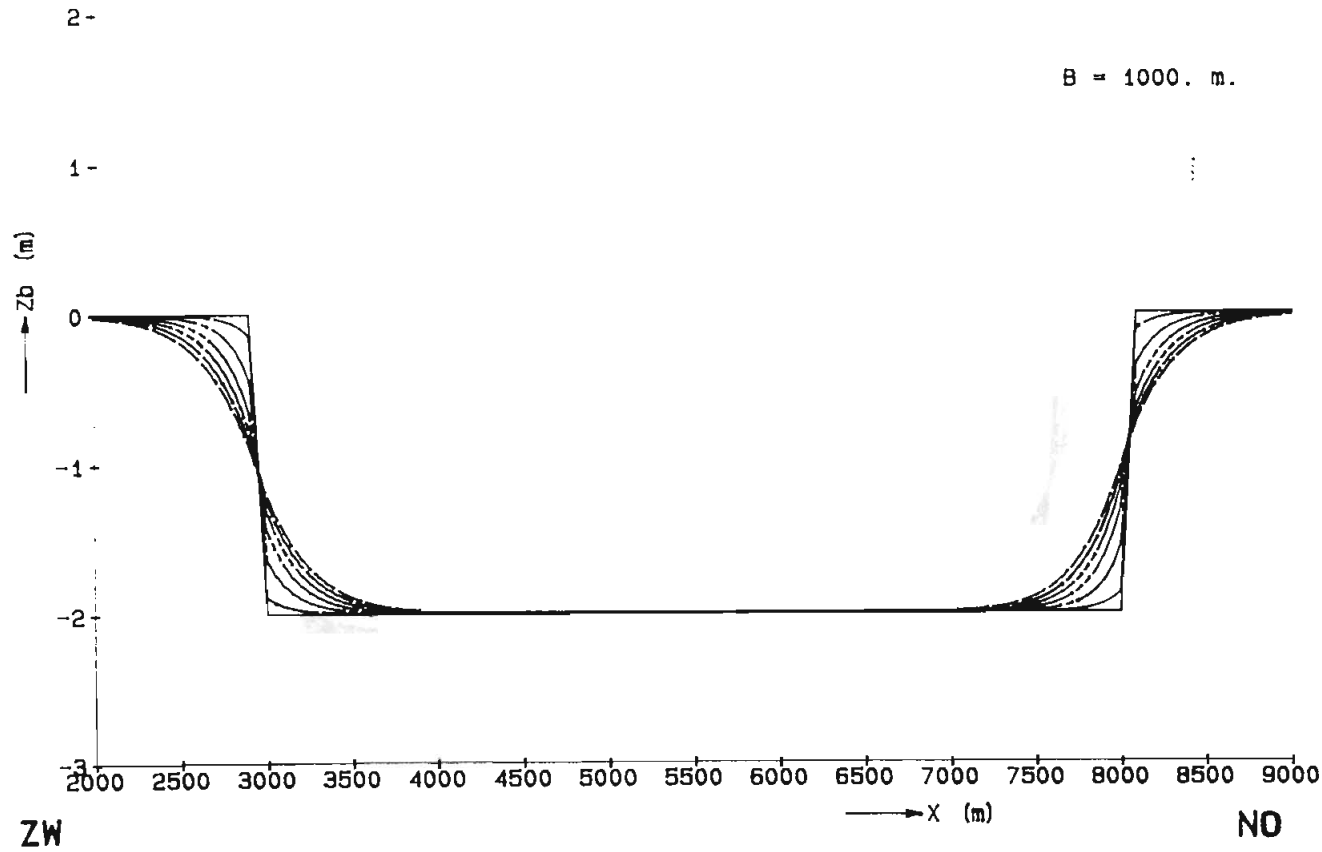
SCHEVENINGEN: LANGSPROFIELONTWIKKELING t = 0 - 40 jr., -16 m. lijn L=2000m. dh=1m. B=100m. en 500m.	T 16.1 / T 16.2	
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM	H 825.20	FIG. 2.12



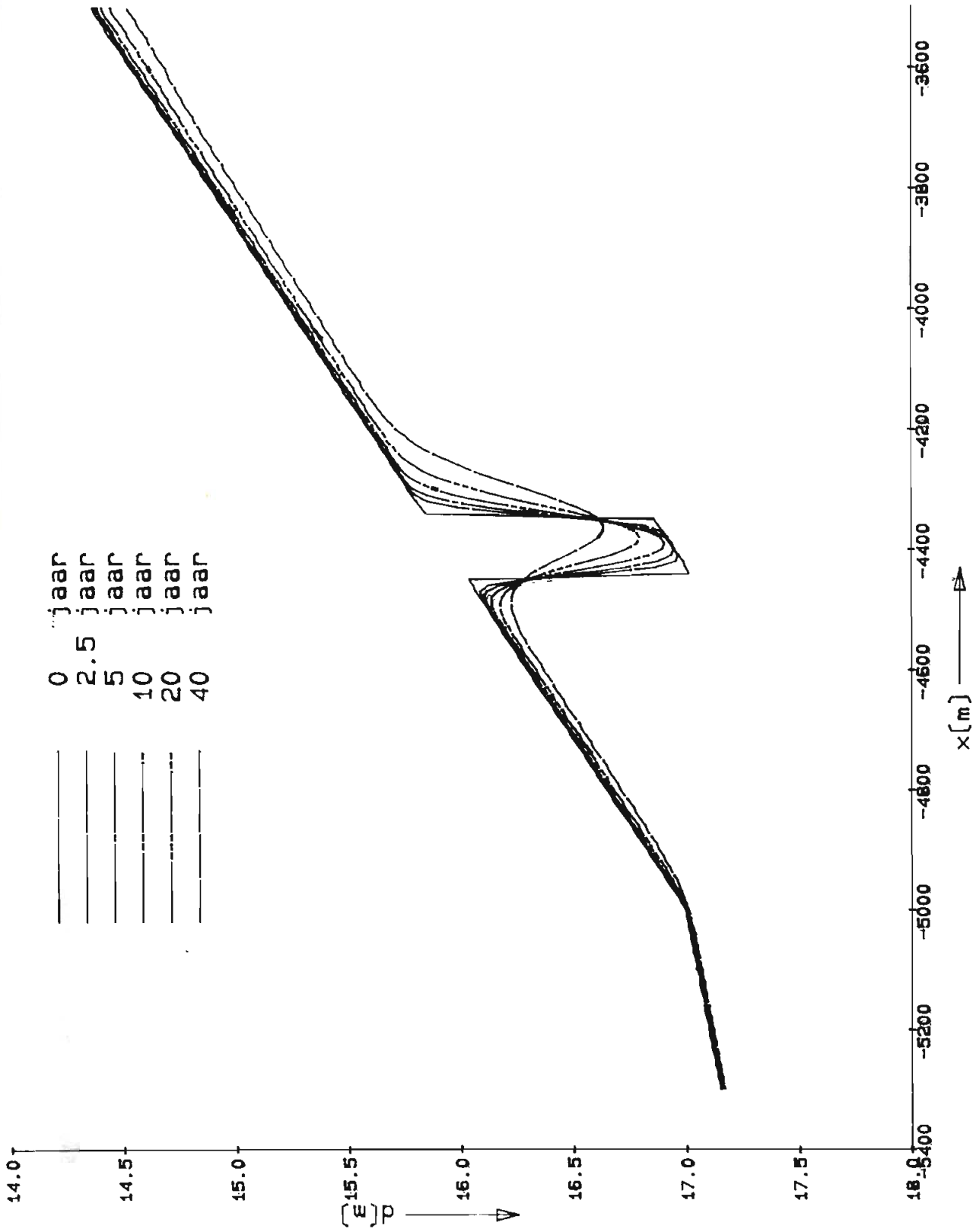


SCHEVENINGEN: LANGSPROFIELONTWIKKELING t = 0 - 40 jr., -16 m. lijn L=2000m/5000m dh=5m/2m B=1000 m.	T 16.3 / T 16.4	
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM	H 825.20	FIG. 2.13





SCHEVENINGEN: LANGSPROFIELONTWIKKELING t = 0 - 40 jr., -20 m. lijn L=2000m/5000m dh=5m/2m B=1000m.	T 20.1 / T 20.2	
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM	H 825.20	FIG. 2.14



DWARSPROFIELONTWIKKELING -16 m

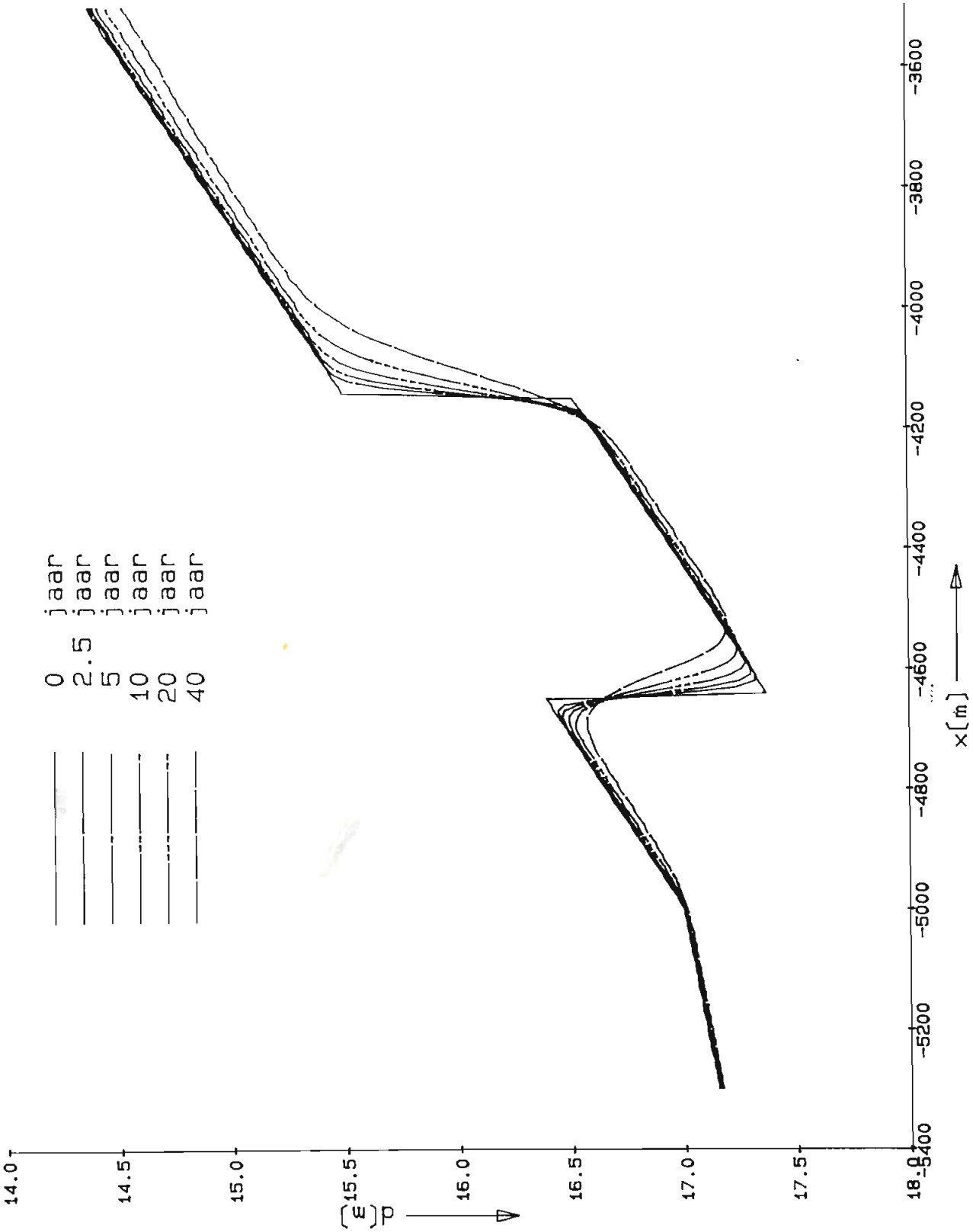
B = 100 m dh = 1 m

T 16.1

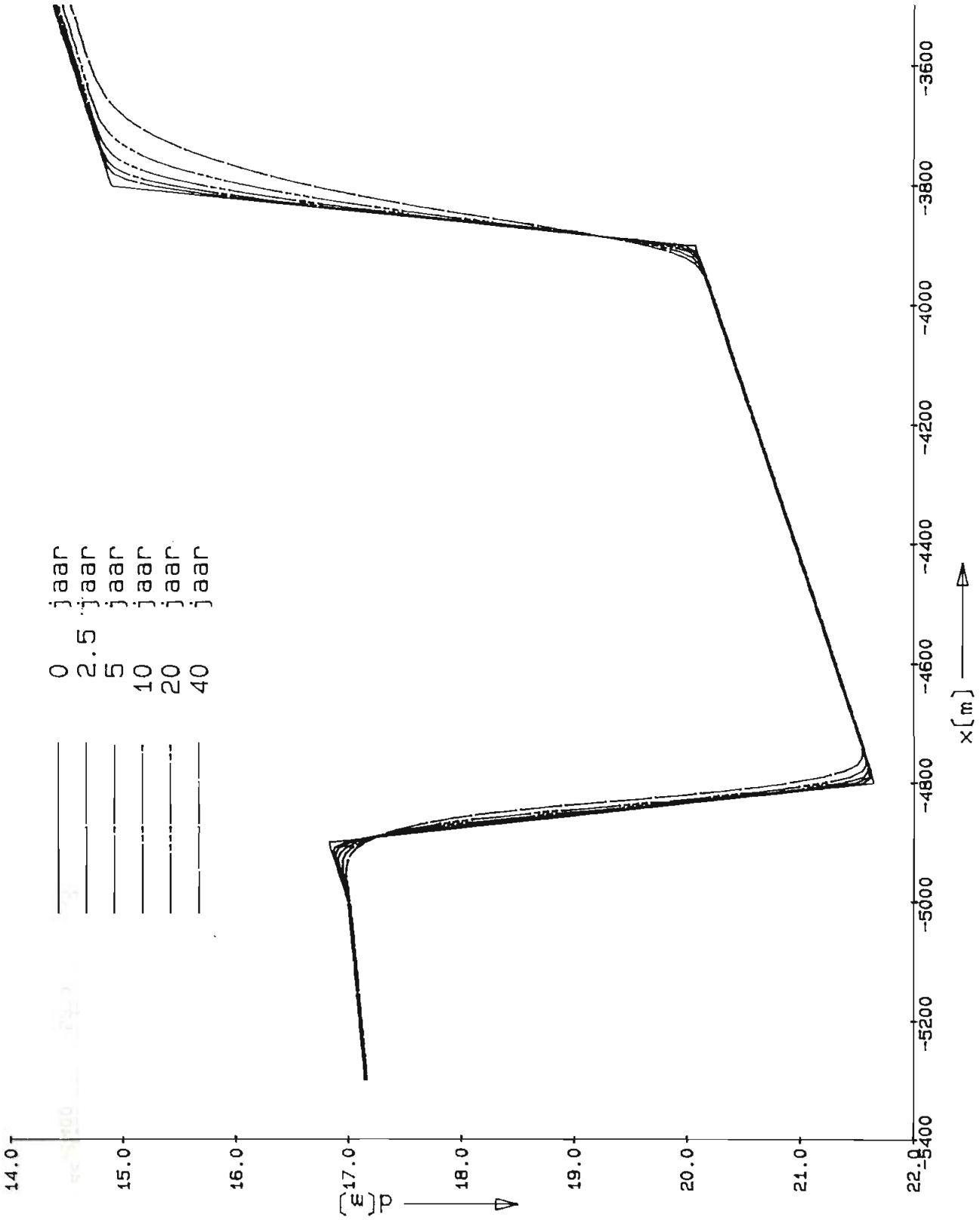
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

H 825.20

FIG. 2.15



DWARSPROFIELONTWIKKELING -16 m B - 500 m dh - 1 m		
	T 16.2	
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM	H 825.20	FIG. 2.16



DWARSPROFIELONTWIKKELING -16 m

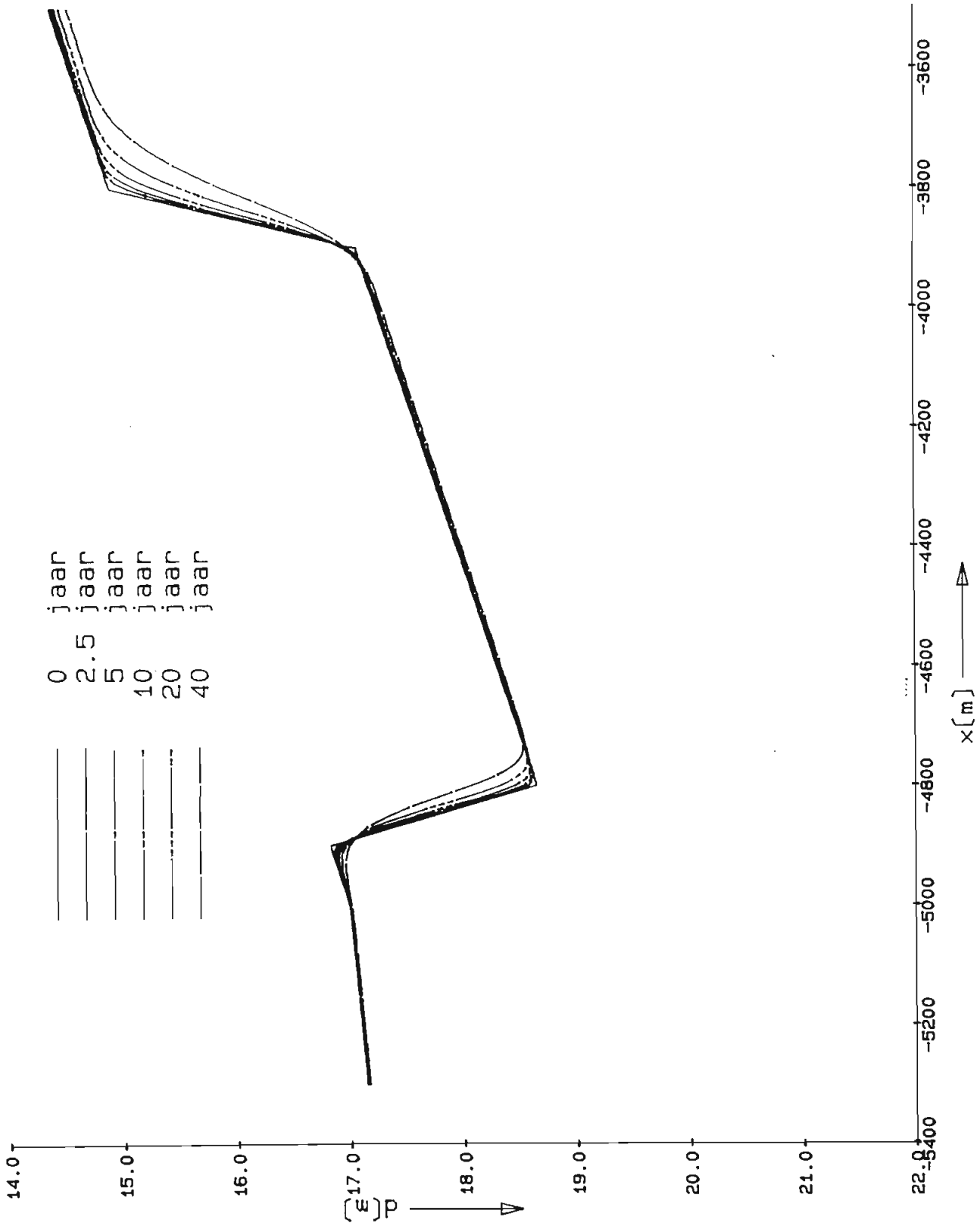
B = 1000 m dh = 5 m

T 16.3

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

H 825.20

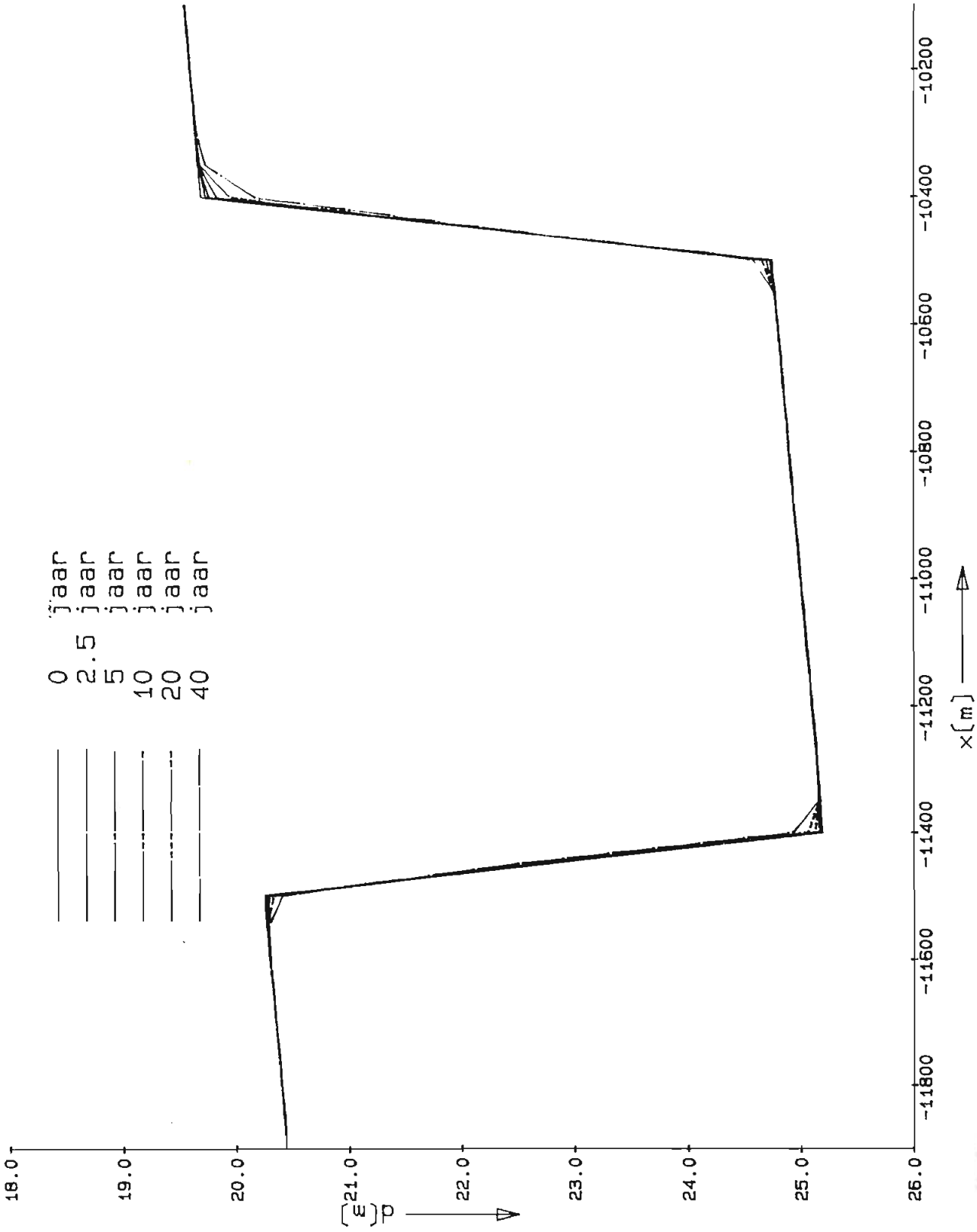
FIG. 2.17



DWARSPROFIELONTWIKKELING -16 m
B = 1000 m dh = 2 m

T 16.4

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM | H 825.20 | FIG.2.18



DWARSPROFIELONTWIKKELING -20 m

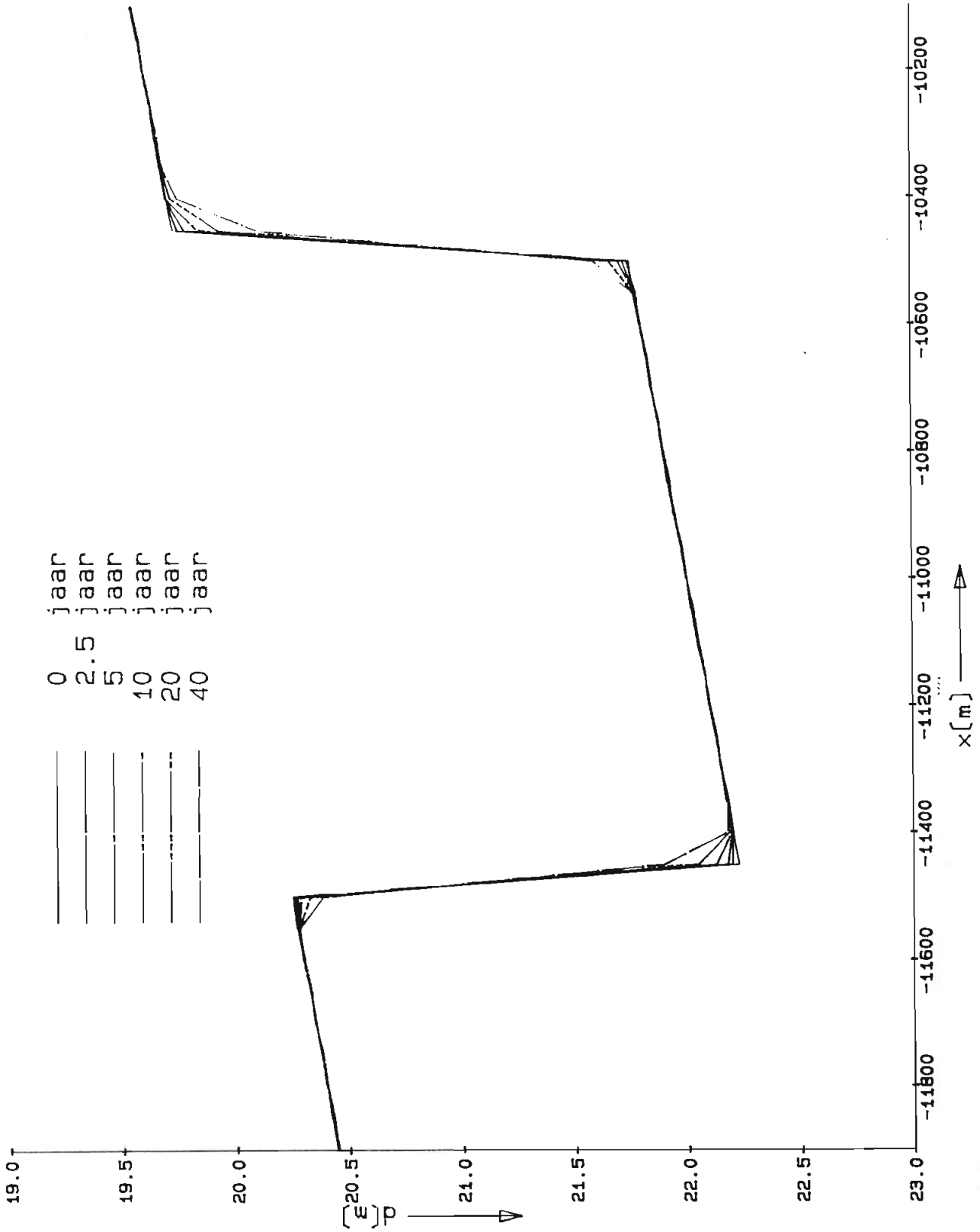
B = 1000 m dh = 5 m

T 20.1

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

H 825.20

FIG. 2.19



DWARSPROFIELONTWIKKELING -20 m

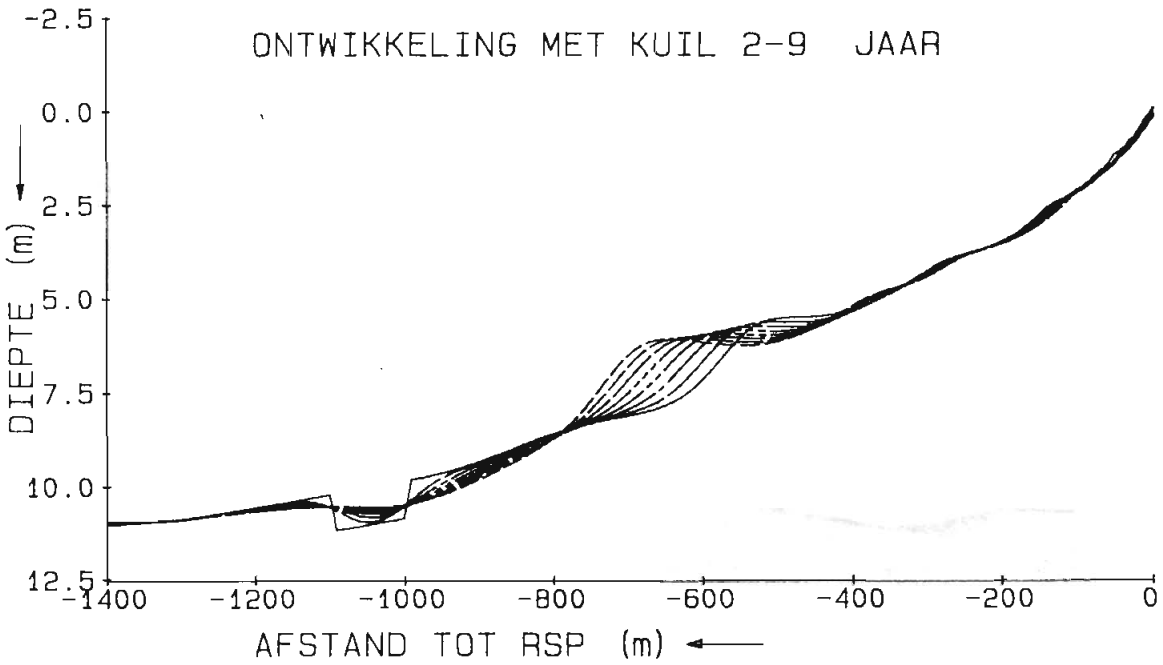
B = 1000 m dh = 2 m

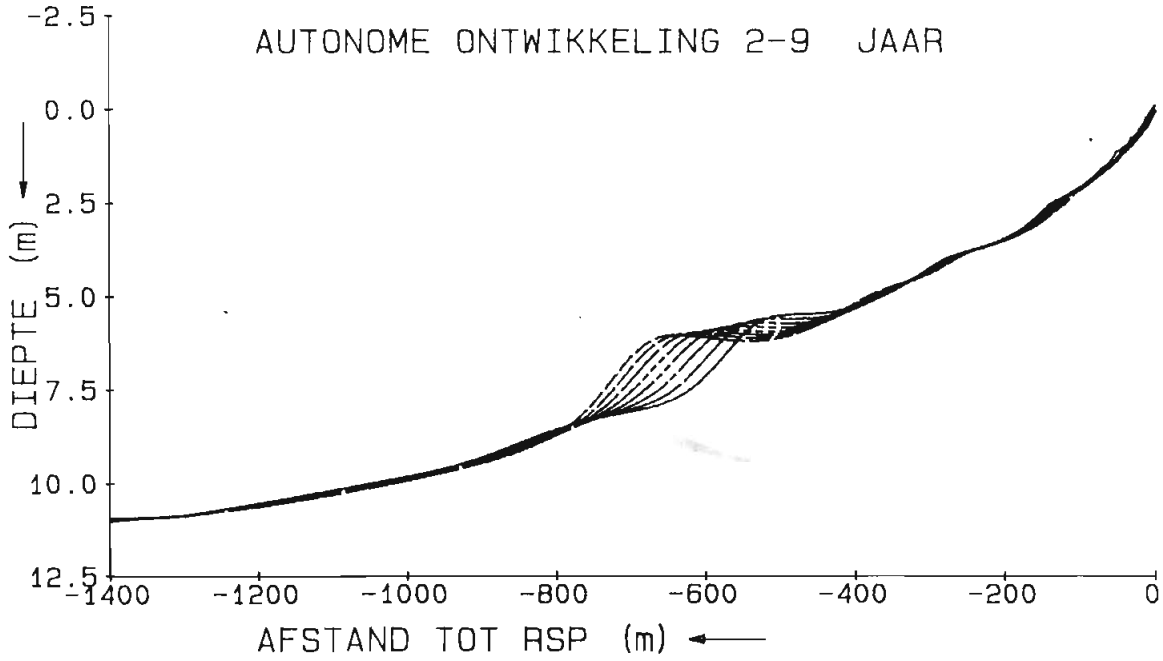
T 20.2

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

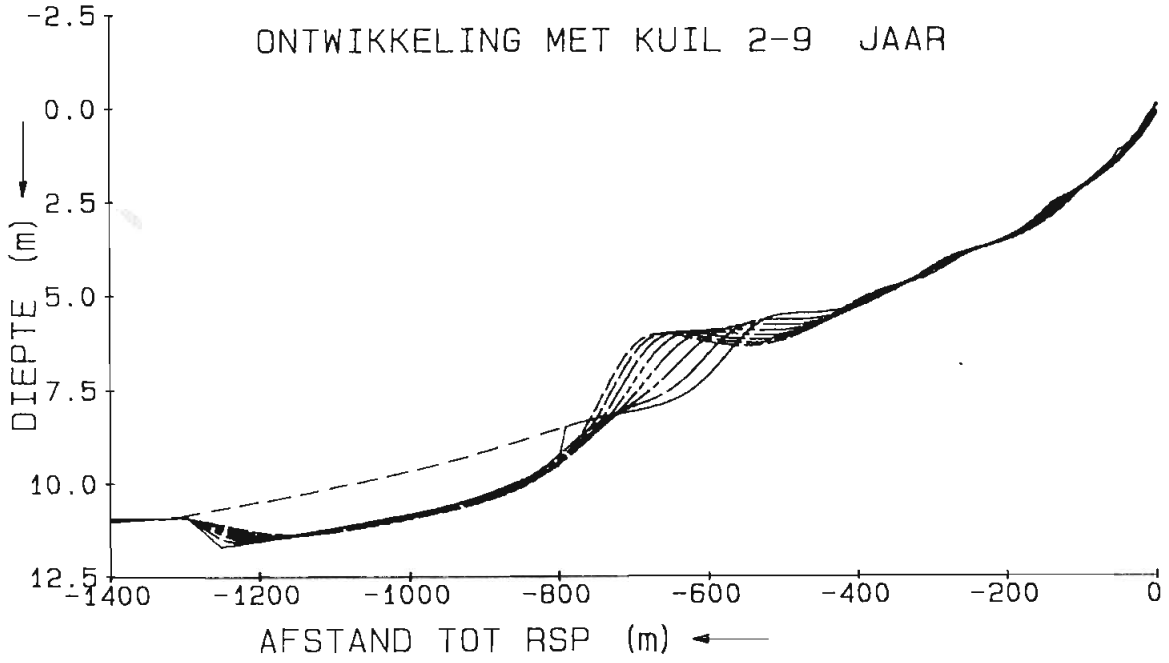
H 825.20

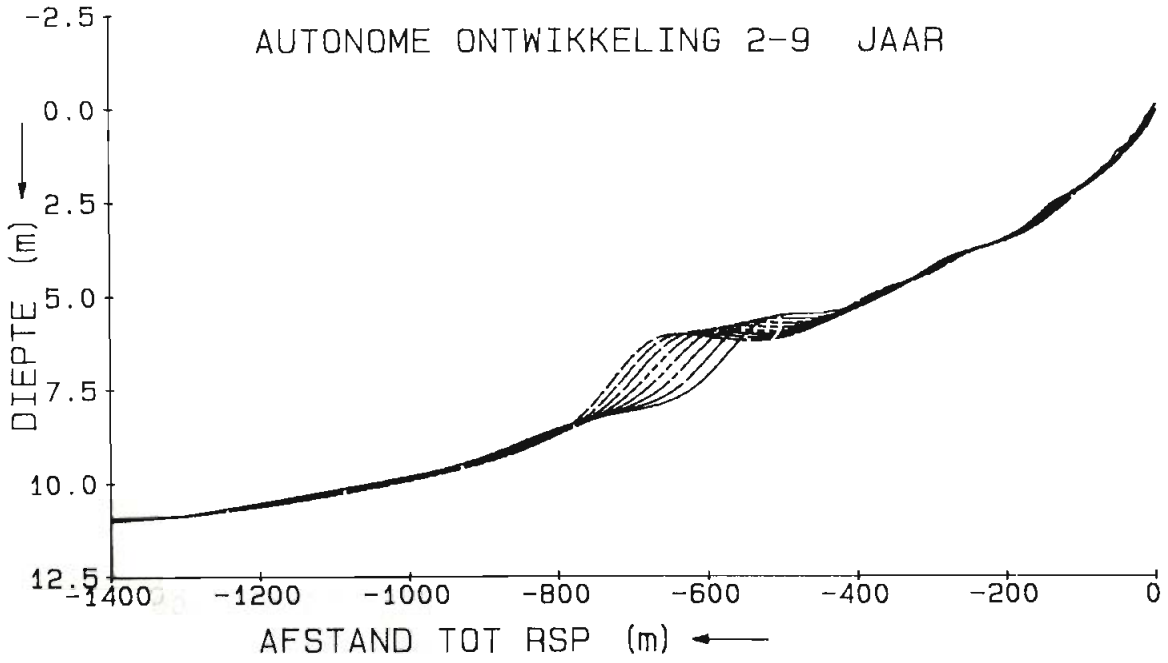
FIG. 2.20



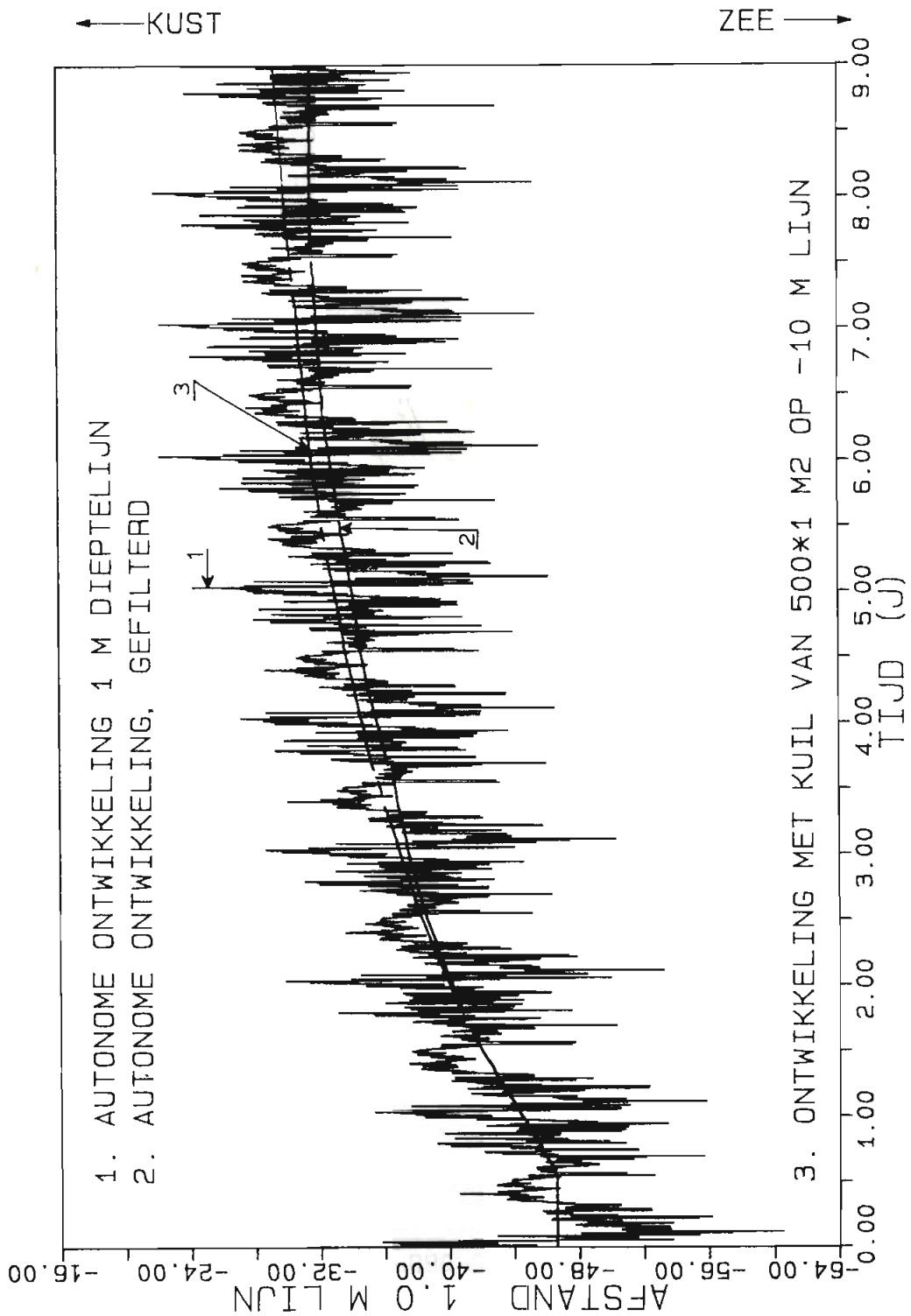


SCHEVENINGEN: DWARSPROFIELONTWIKKELING MET EN ZONDER KUIL OP -10 M LIJN	T 10.1	
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM	H 825.20	Fig. 2.21

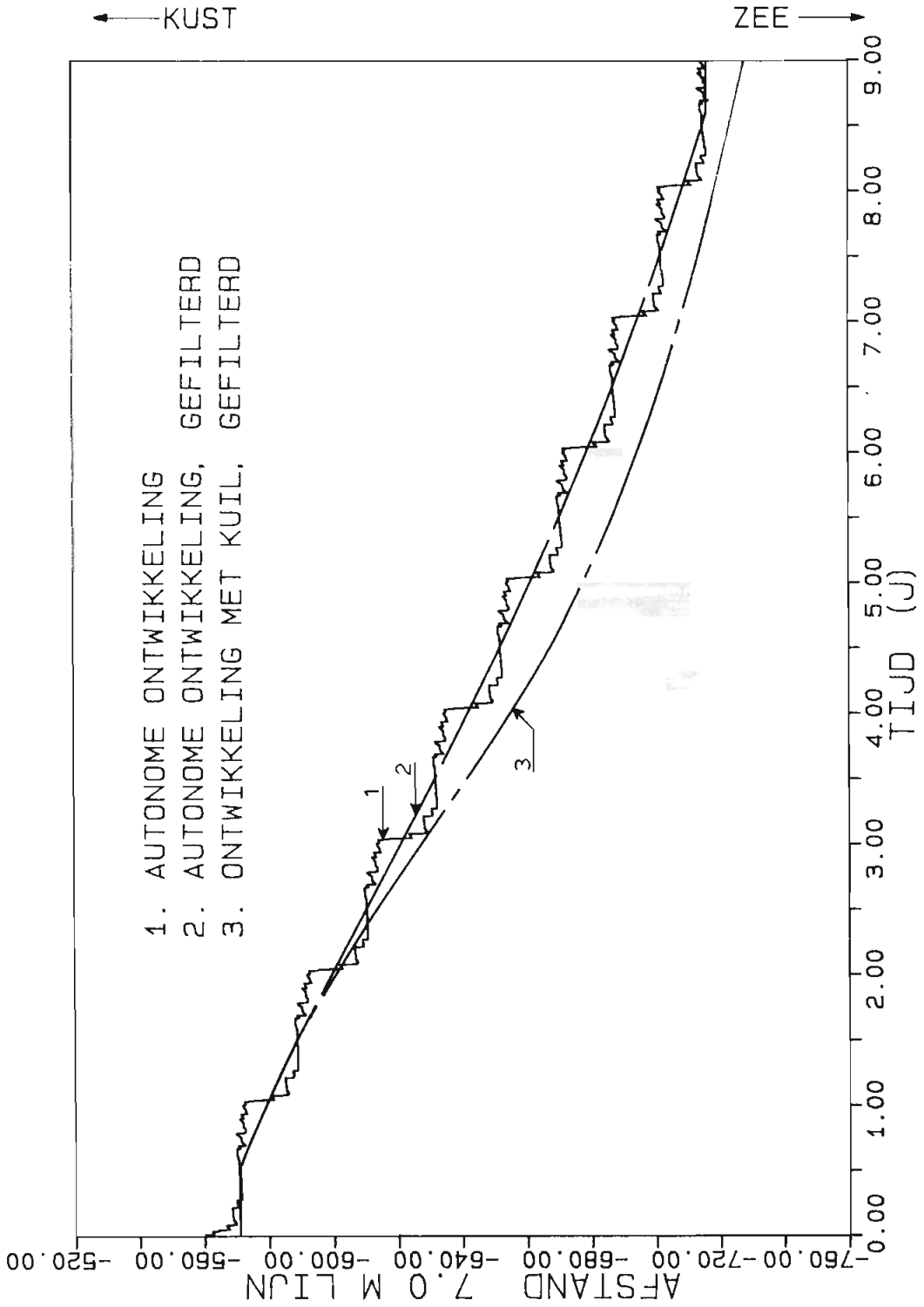




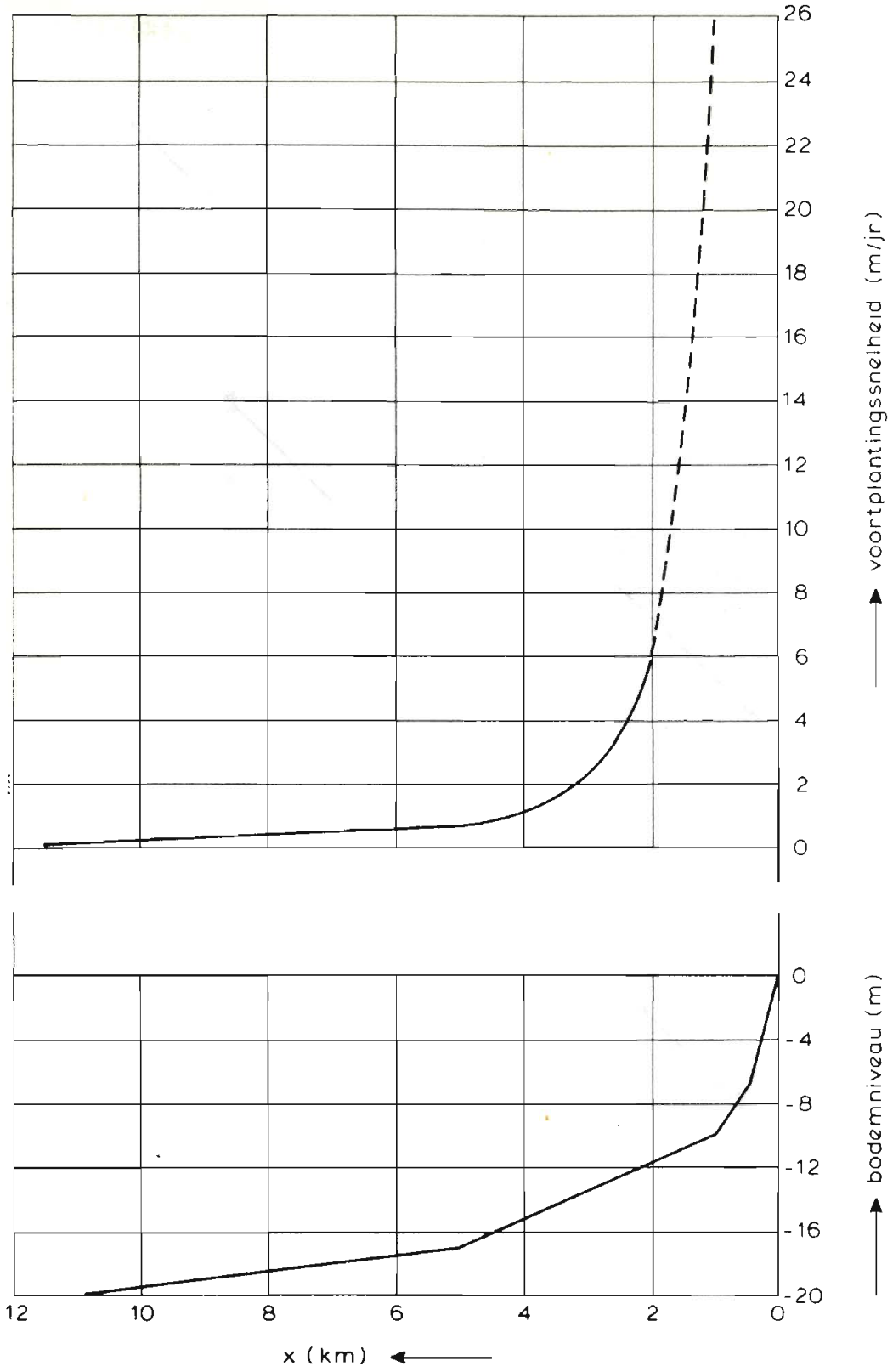
SCHEVENINGEN: DWARSPROFIELONTWIKKELING MET EN ZONDER KUIL OP -10 M LIJN	T 10.2	
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM	H 825.20	Fig.222



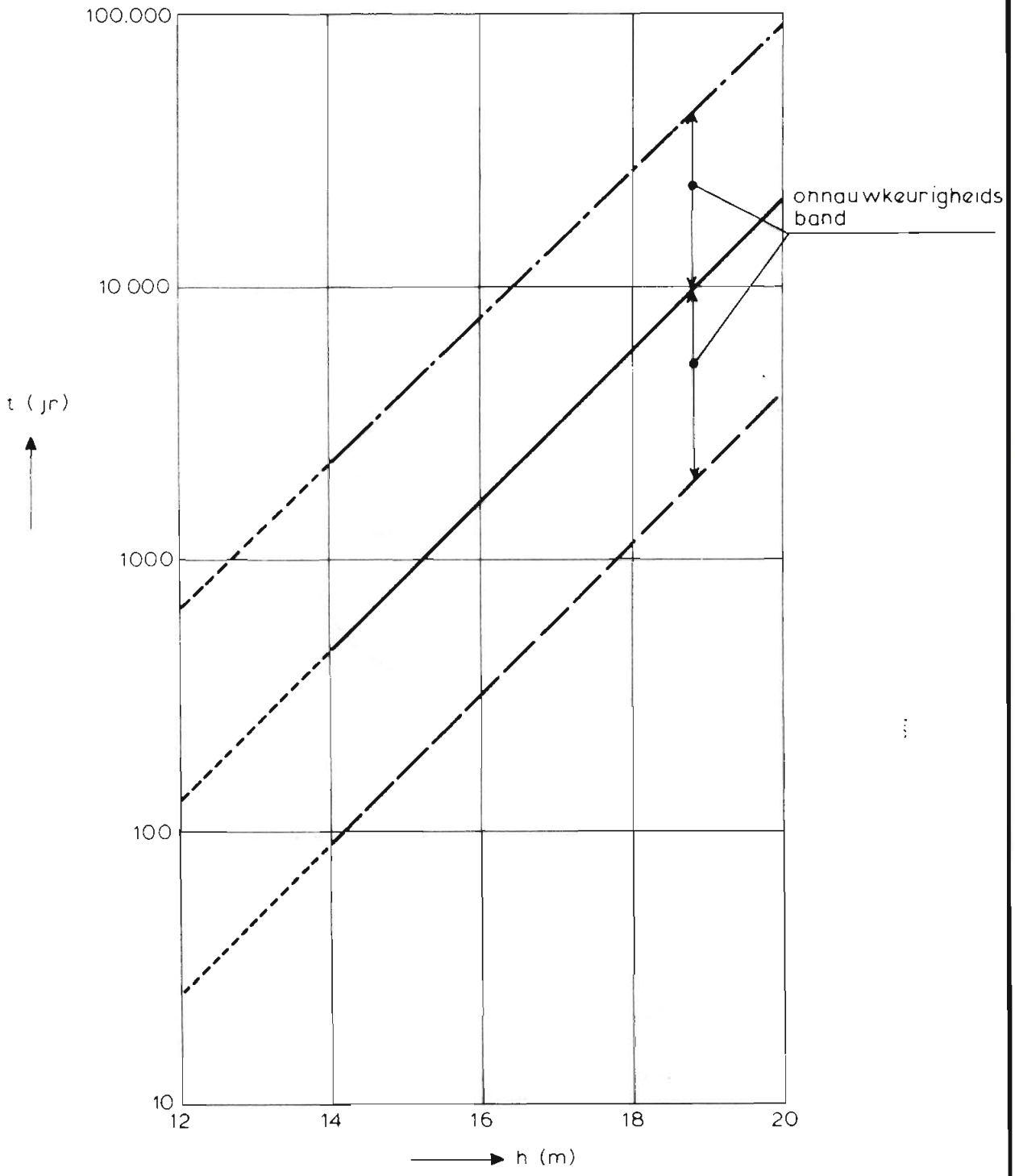
Verloop 1 m dieptelijn t.g.v. kuil op -10 m lijn, B = 500 m dh = 1 m		
	T 10.2	
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM	H 825.20	Fig.2.23



Verloop 7 m dieptelijn t.g.v. kuil op -10 m lijn, B = 500 m dh = 1 m	T 10.2	
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM	H 825.20	Fig. 2.24

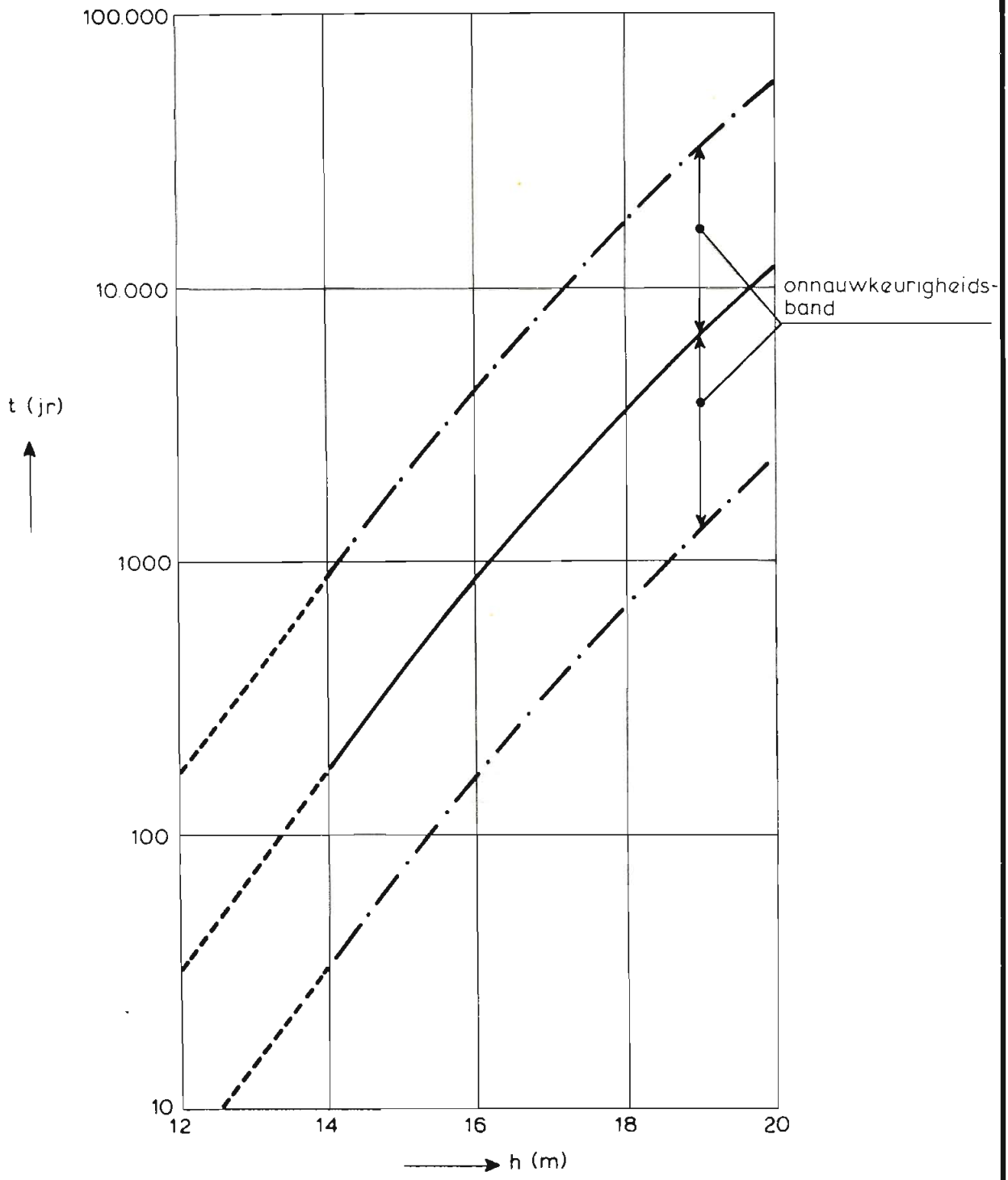


VOORTPLANTINGSSNELHEID BODEMVERSTORING LANGS DWARSPROFIEL SCHEVENINGEN		
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM	H 825	FIG. 2.25



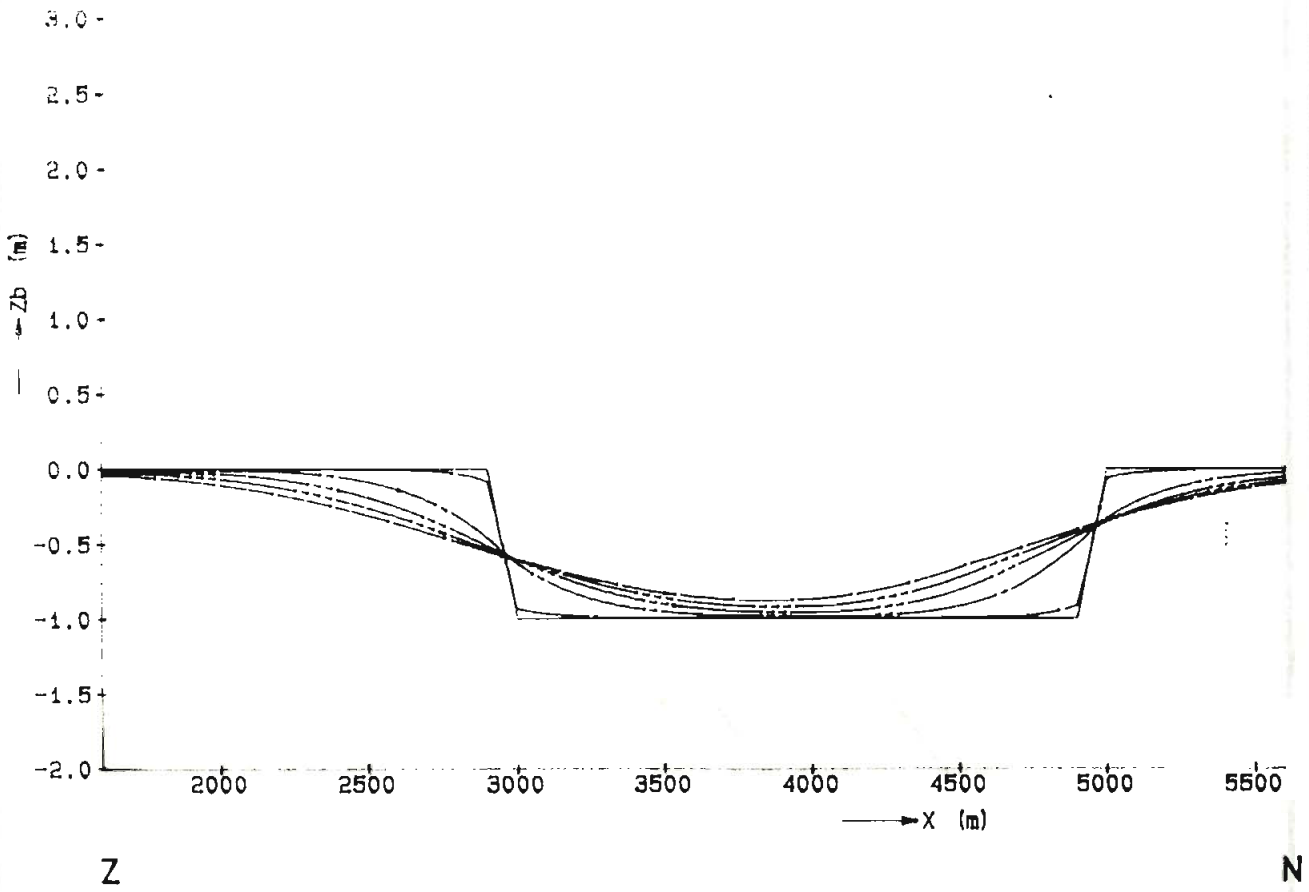
BENODIGDE TIJD VOOR BODEMVERSTORINGEN OM 10 m DIEPTELIJN TE BEREIKEN (DWARSPROFIEL SCHEVENINGEN)

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM | H 825 | FIG. 2.26



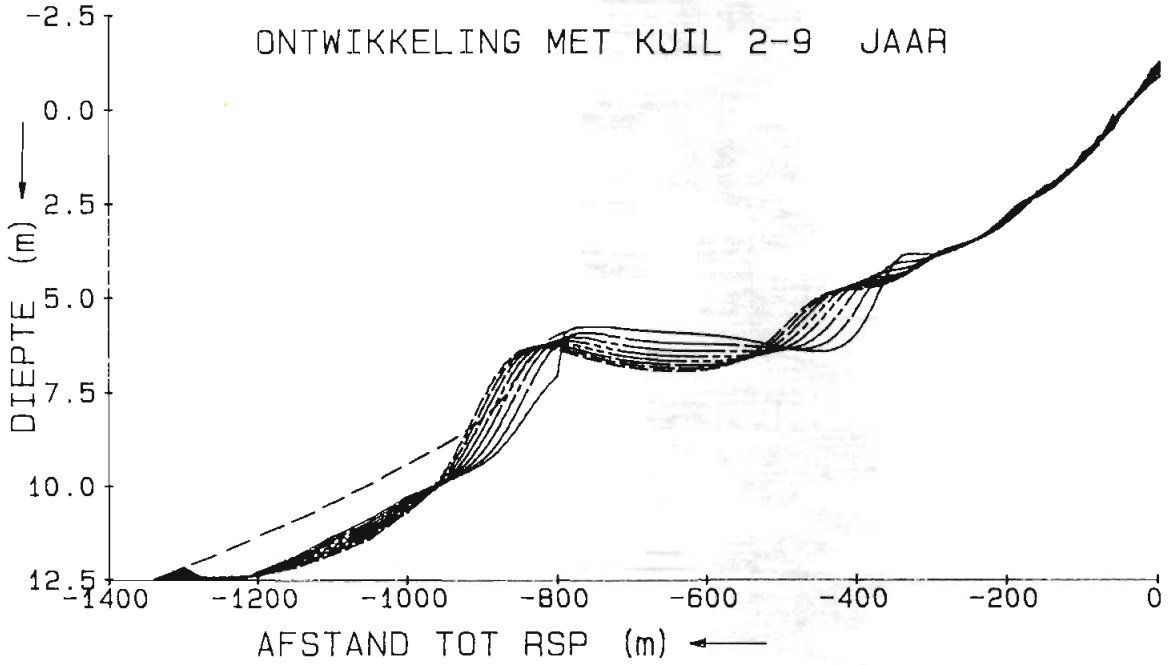
BENODIGDE TIJD VOOR BODEMVERSTORINGEN OM 10 m DIEPTELIJN TE BEREIKEN (DWARSPROFIEL BERGEN)

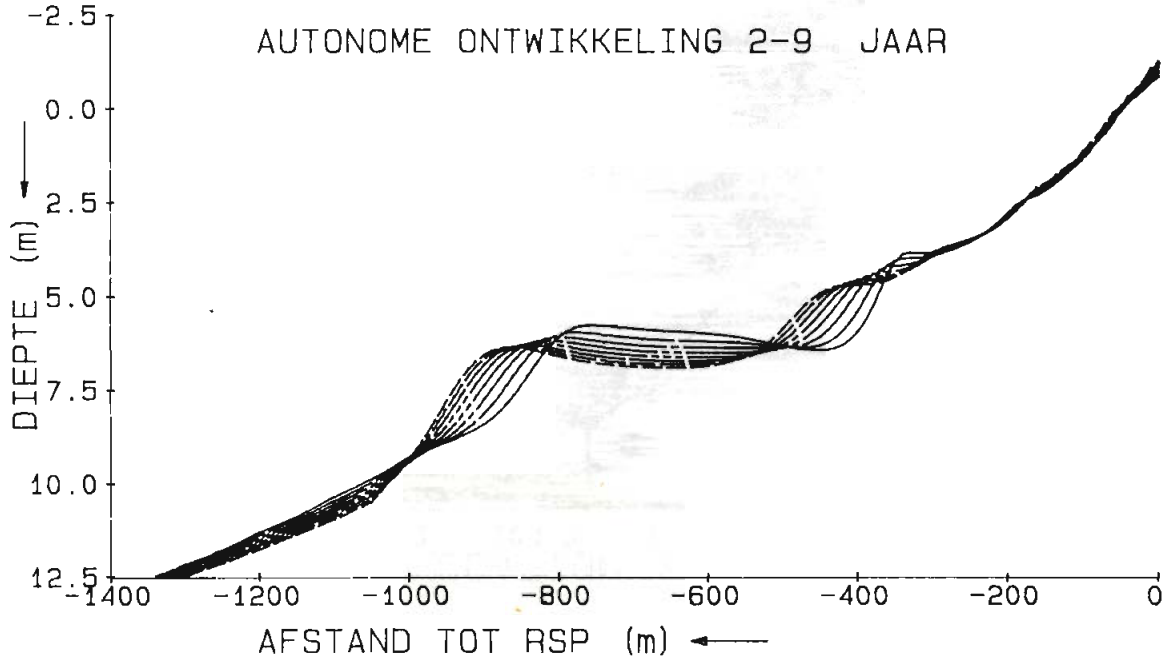
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM	H 825	FIG. 2.27



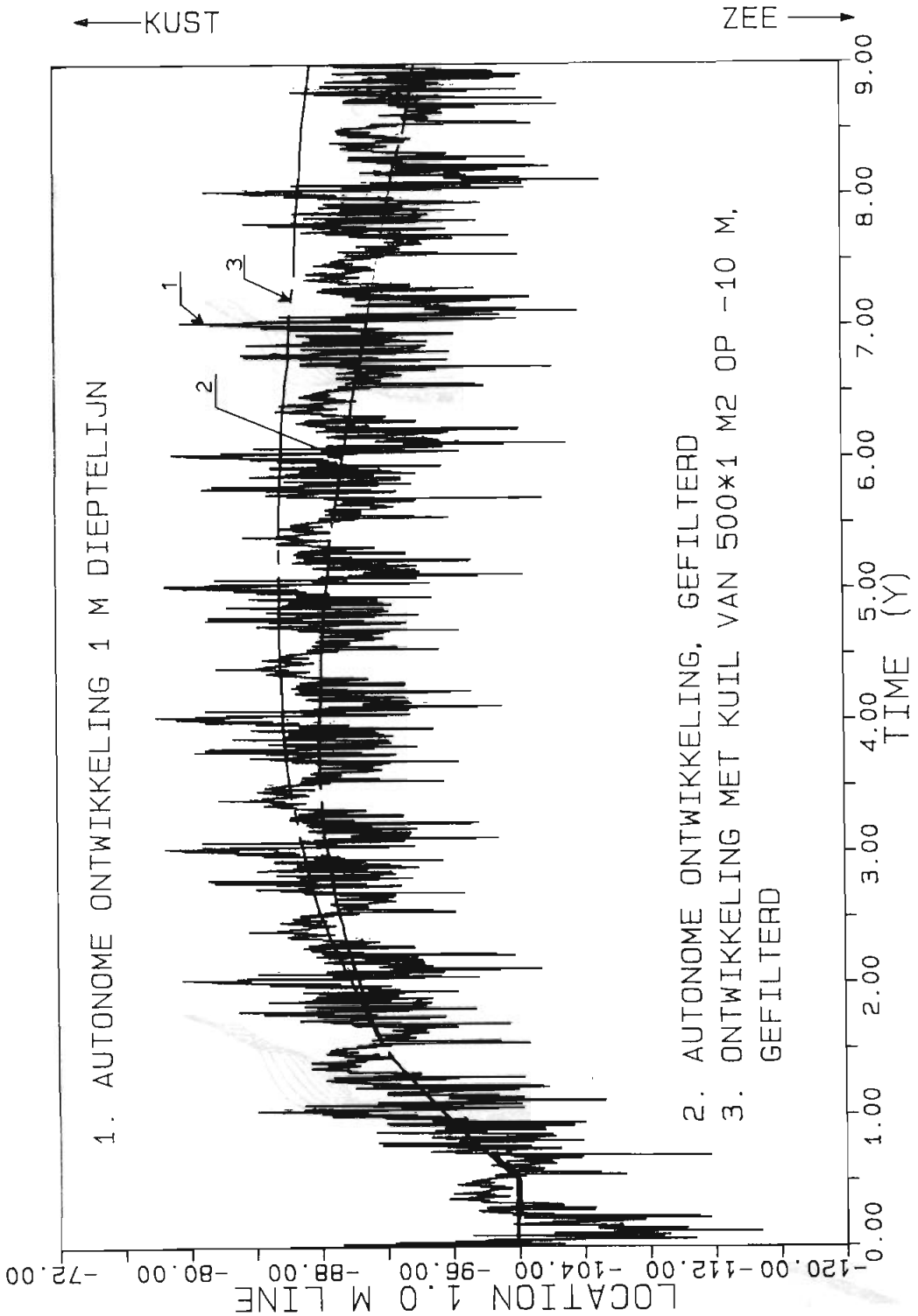
BERGEN: LANGSPROFIELONTWIKKELING
t = 0 - 40 jr., - 10 m lijn
L=2000m., dh=1m., B=500m.

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM	H 825.20	FIG.2.28

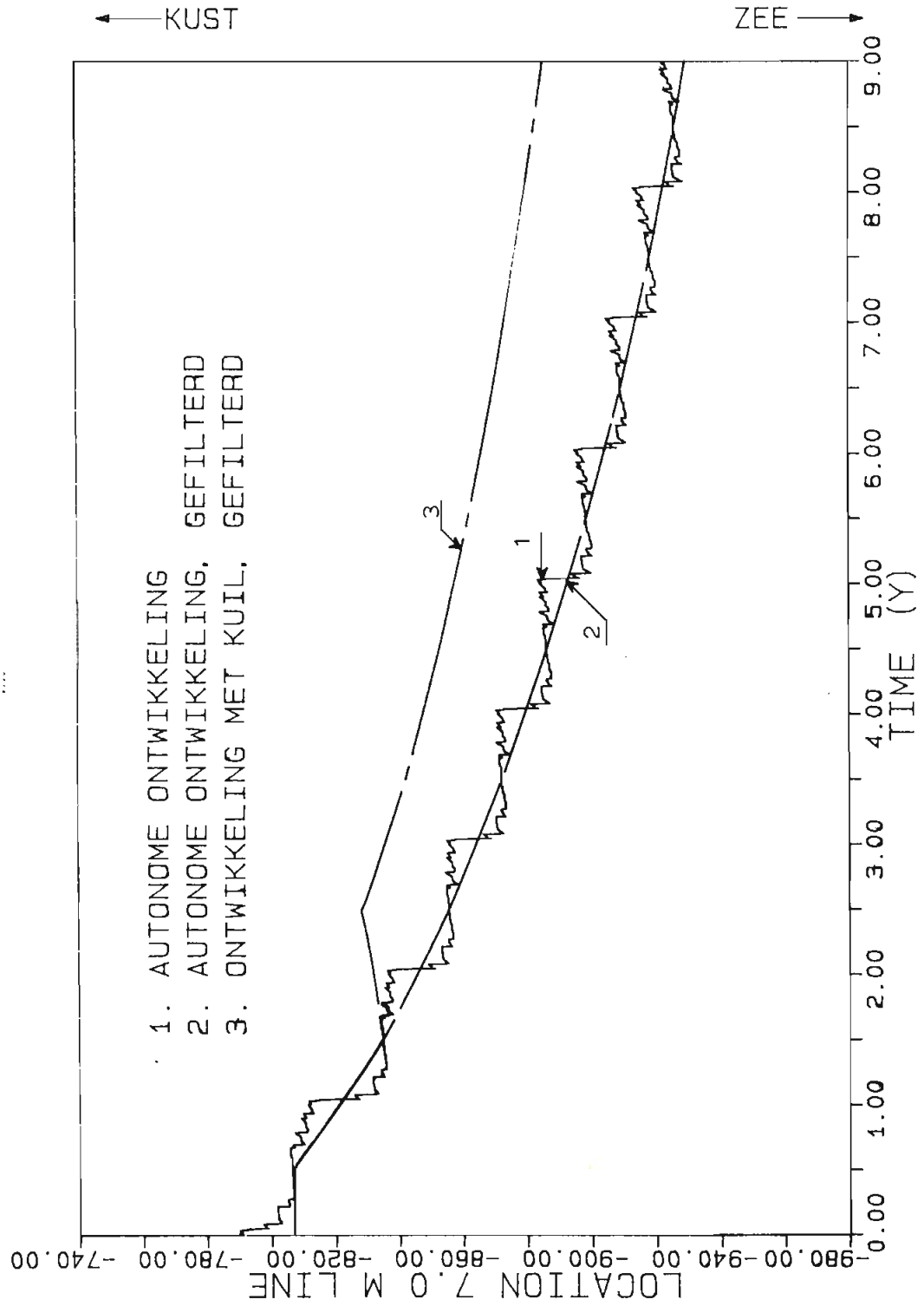




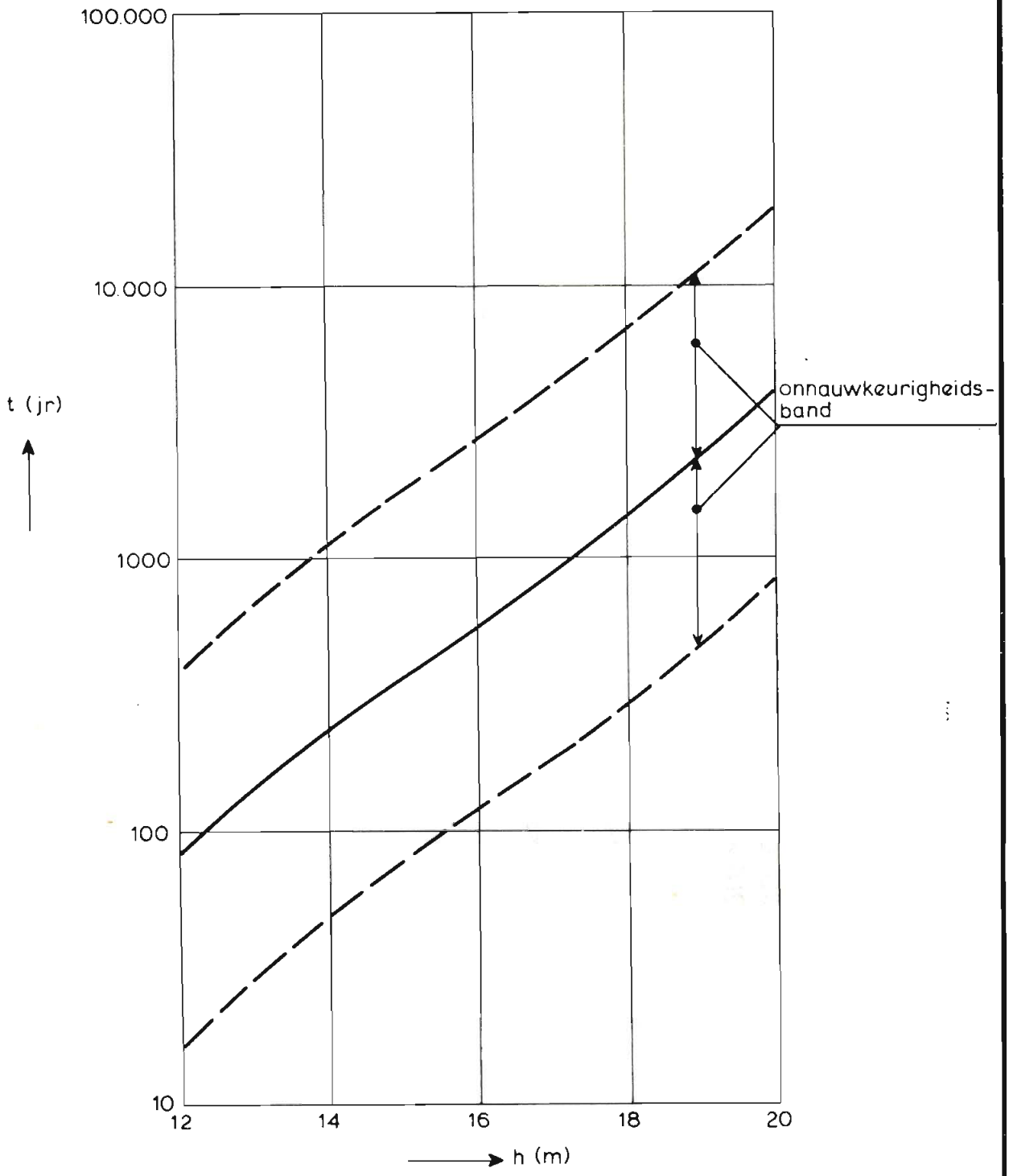
BERGEN: DWARSPROFIELONTWIKKELING		
MET EN ZONDER KUIL OP -10 M LIJN	T 10.2	
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM	H 825.20	Fig. 2.29



Verloop 1 m dieptelijn t.g.v. kuil op -10 m lijn, B = 500 m dh = 1 m	T 10.2	
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM	H 825.20	Fig.2.30

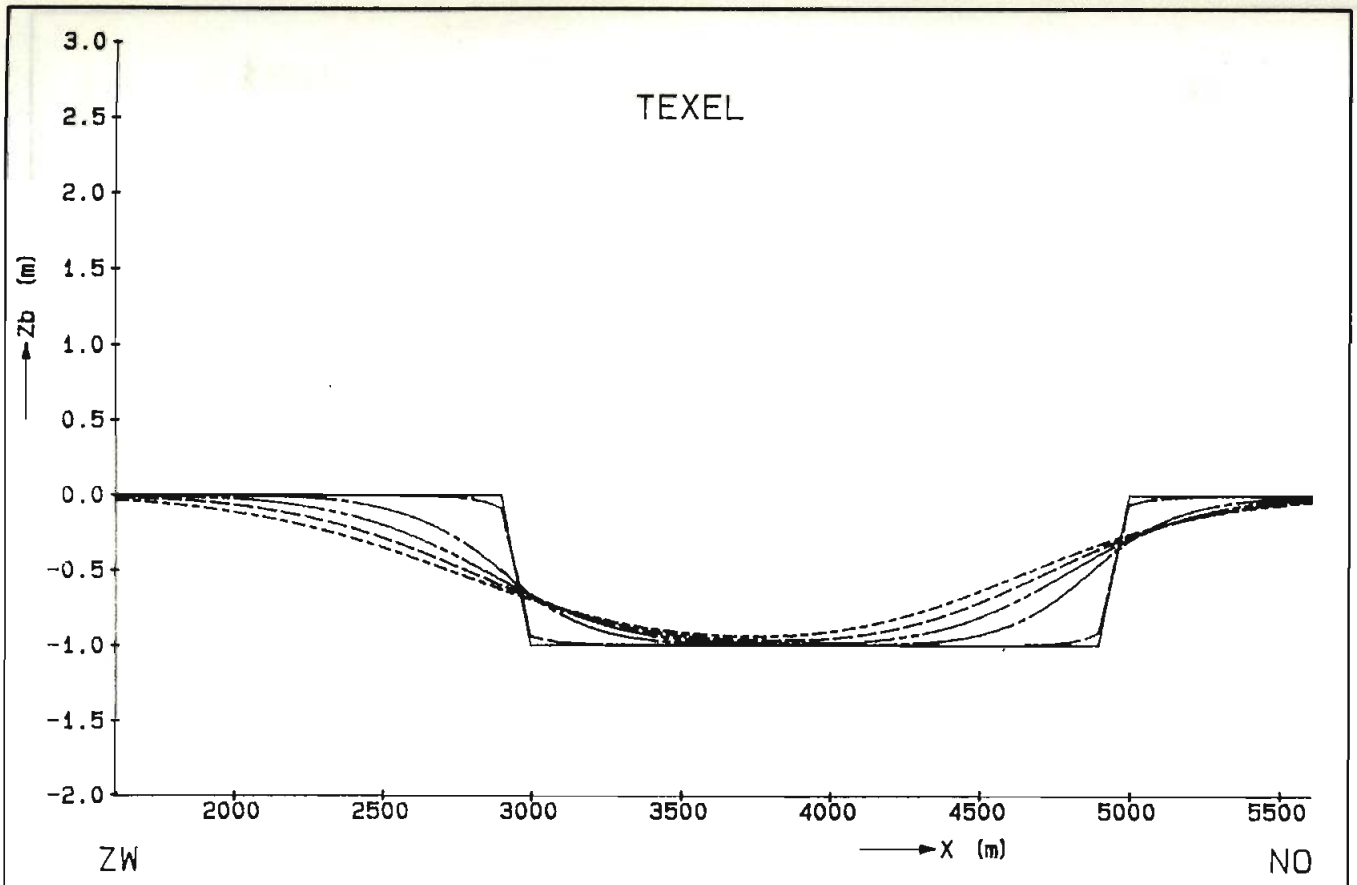


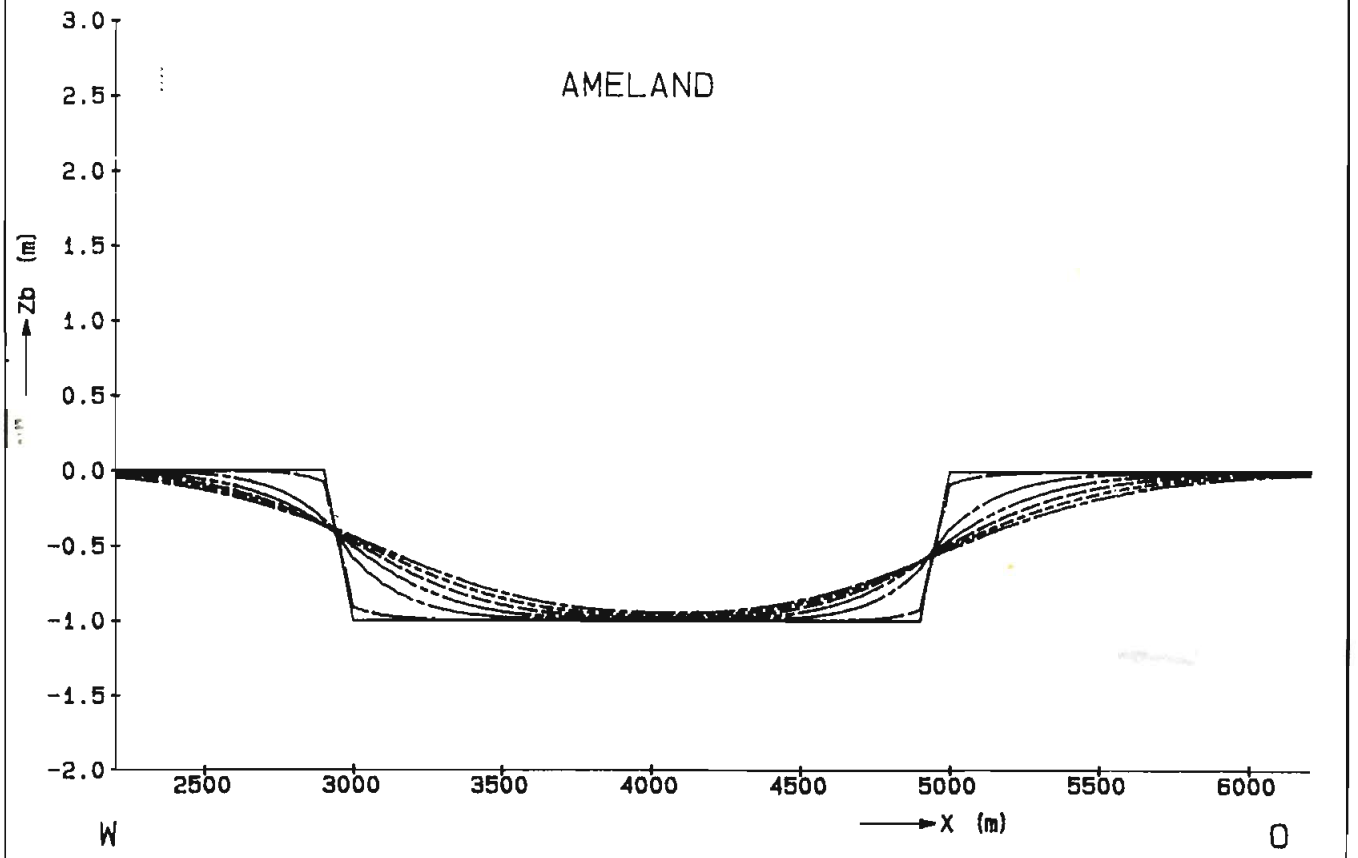
Verloop 7 m dieptelijn t.g.v. kuil op -10 m lijn, B = 500 m dh = 1 m		
	T 10.2	
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM	H 825.20	Fig.2.31



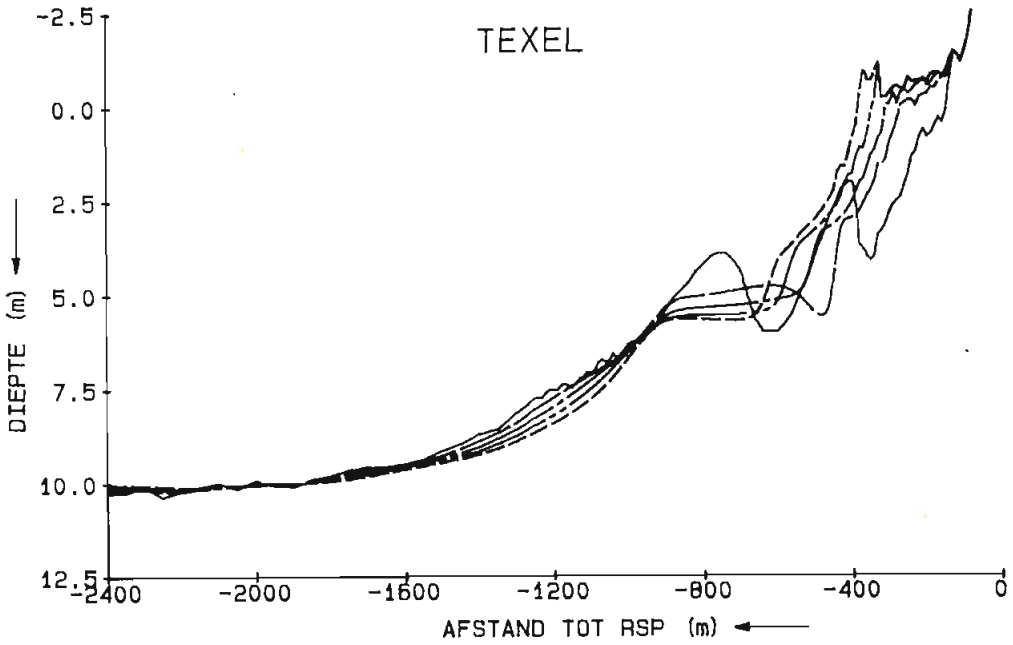
BENODIGDE TIJD VOOR BODEMVERSTORINGEN OM 10 m DIEPTELIJN TE BEREIKEN (DWARSPROFIEL TEXEL / AMELAND)

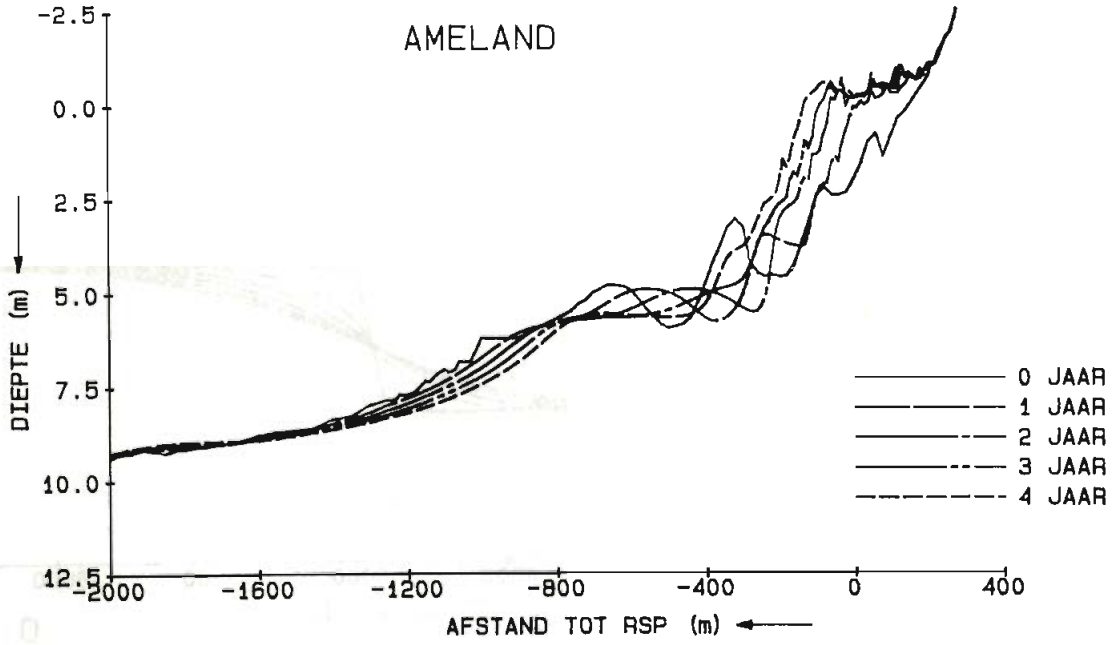
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM	H 825	FIG. 2.32



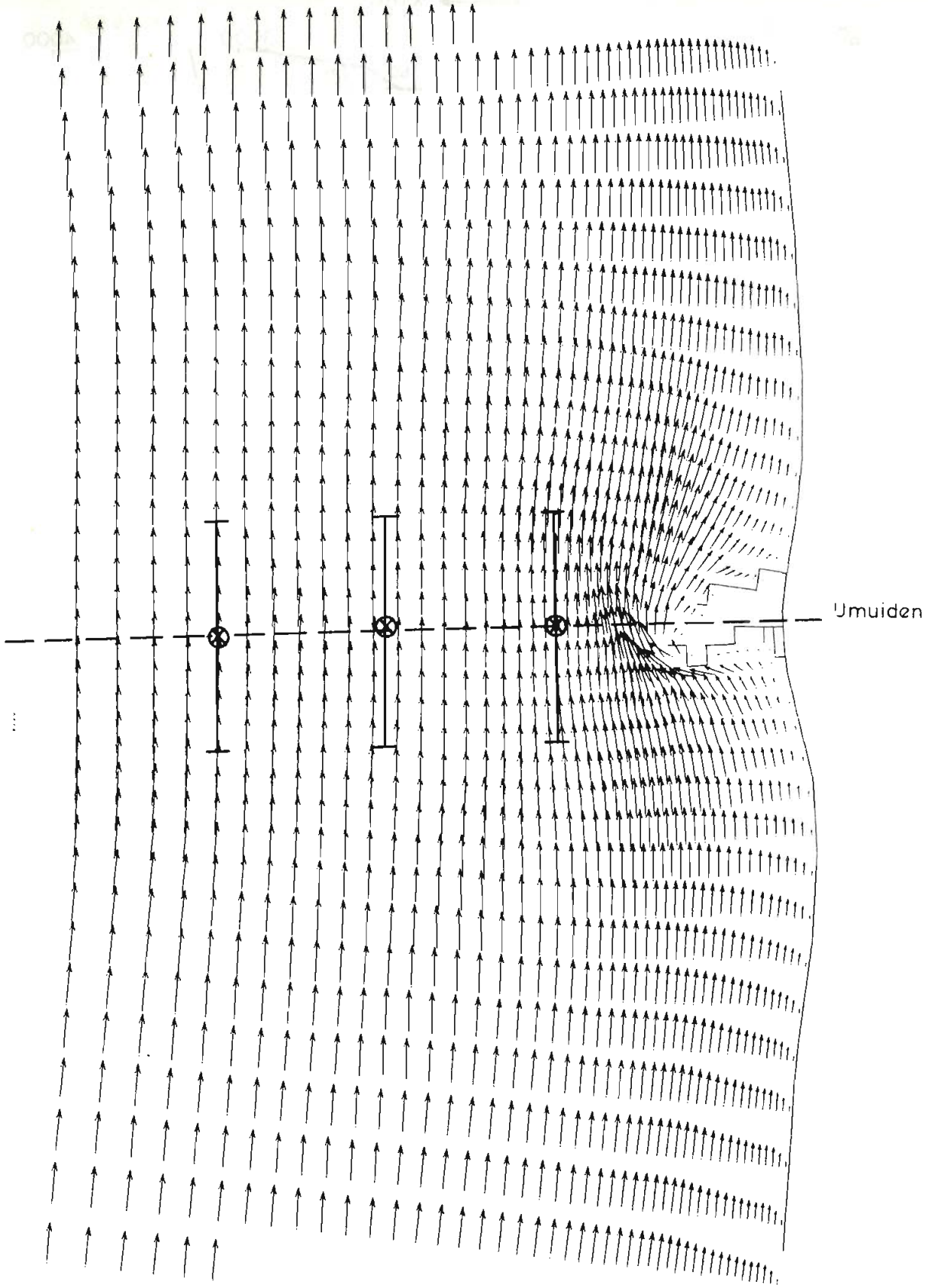


LANGSPROFIEL ONTWIKKELING		
TEXEL EN AMELAND (0 - 40 jaar)	T 10.2	
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM	H825.20	FIG.2.33



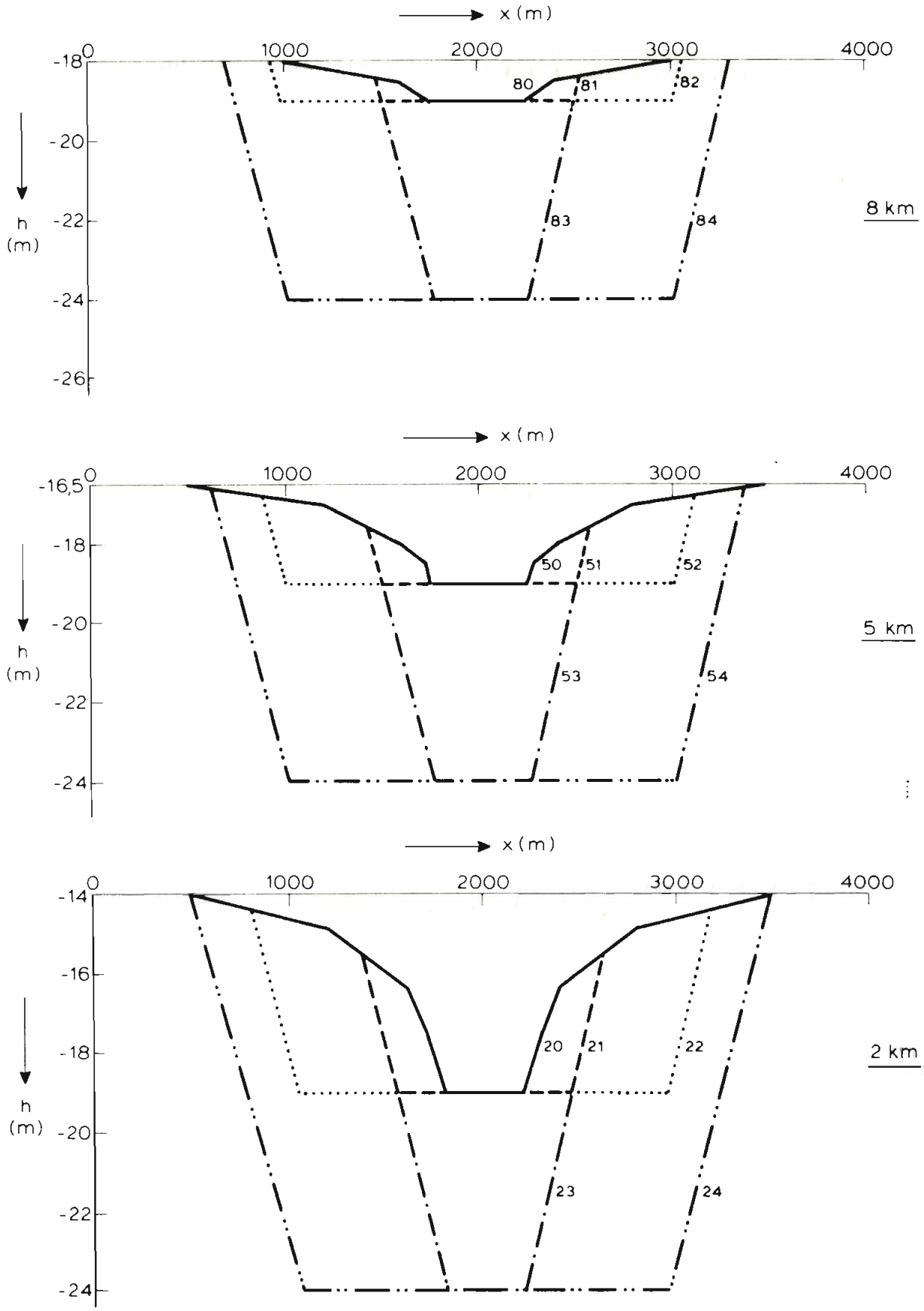


DWARSPROFIEL ONTWIKKELING TEXEL EN AMELAND (0 - 4 jaar)		
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM	H825.20	FIG.2.34

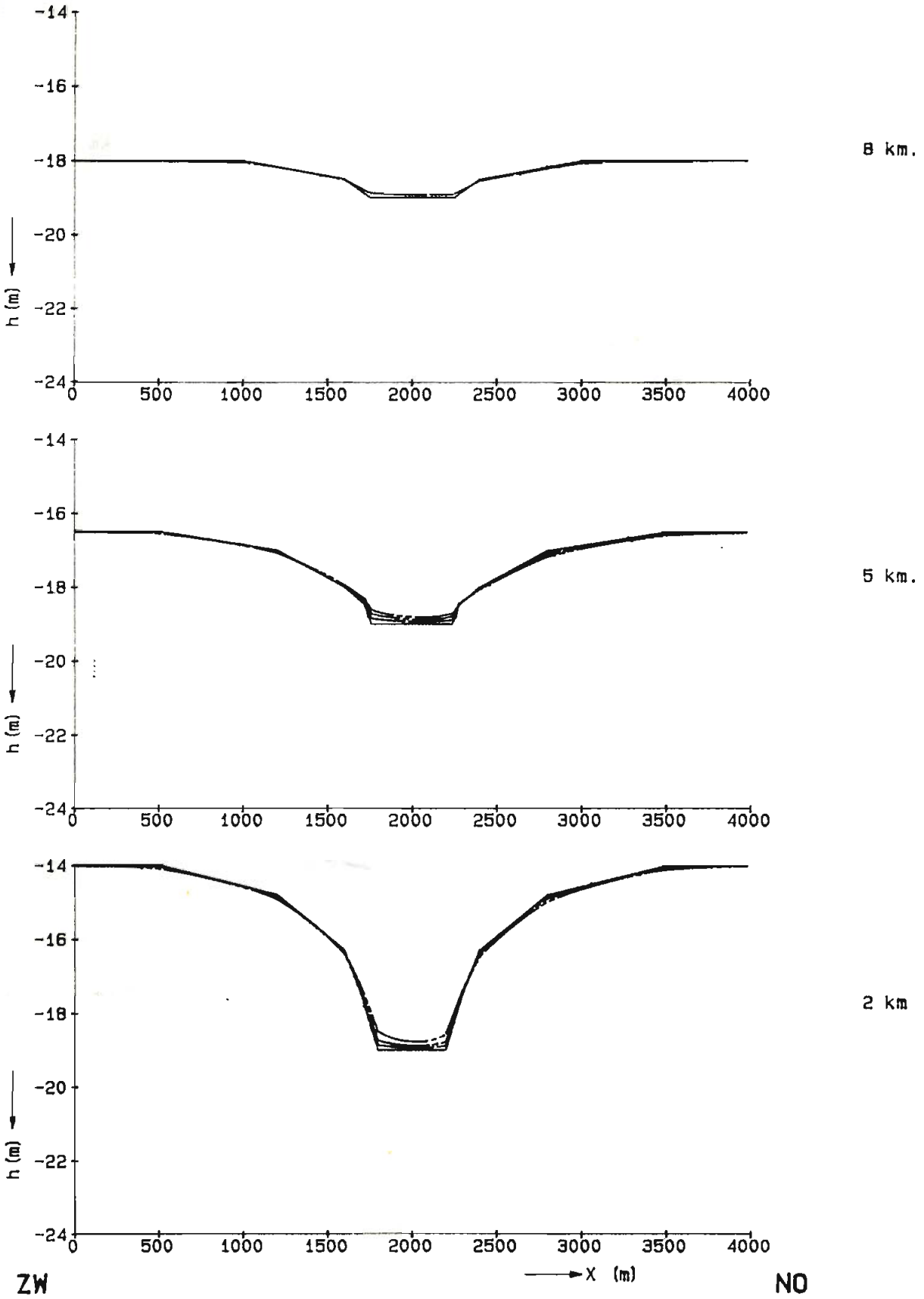


SCALE 1 CM := 1.0 M/S

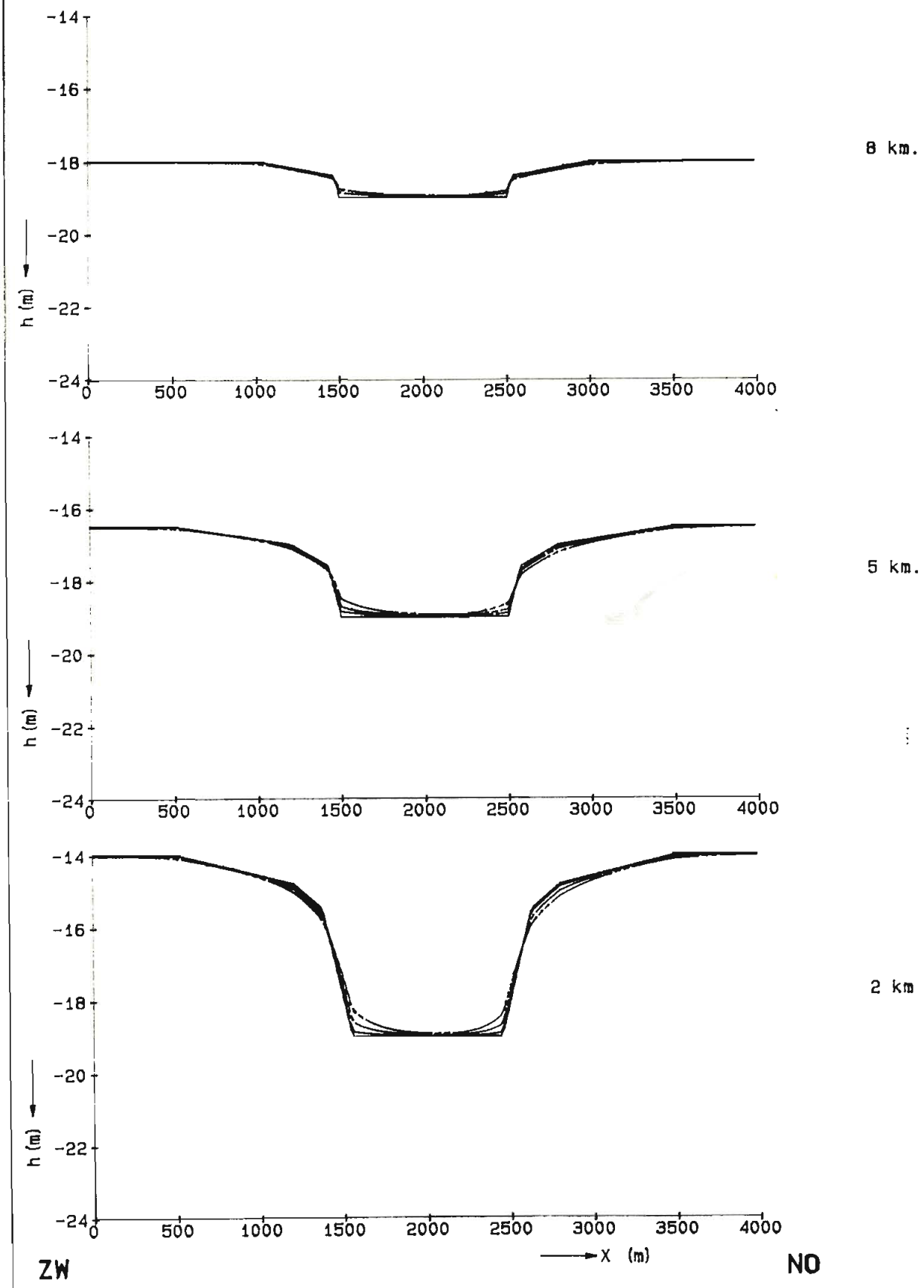
HOLLANDSE KUST MODEL	K07	01-07-88
SNELHEIDSVELD IJMUIDEN	21-03-1976 06.00 UUR	
DELFT HYDRAULICS	H 825	FIG. 3.1



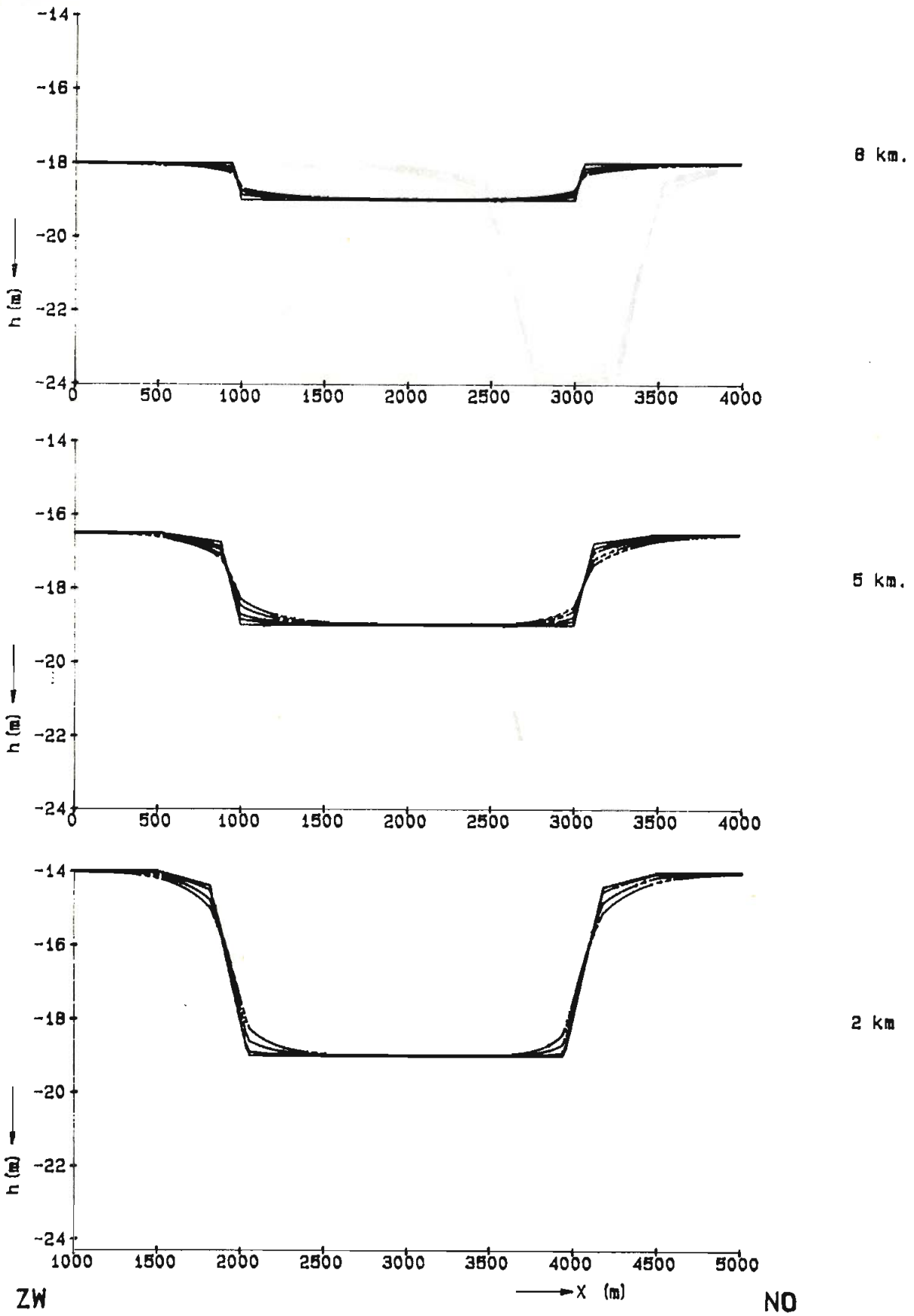
GESCHEMATISEERDE DWARSPROFIELEN	Y - GEUL	
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM	H 825	FIG. 3.2



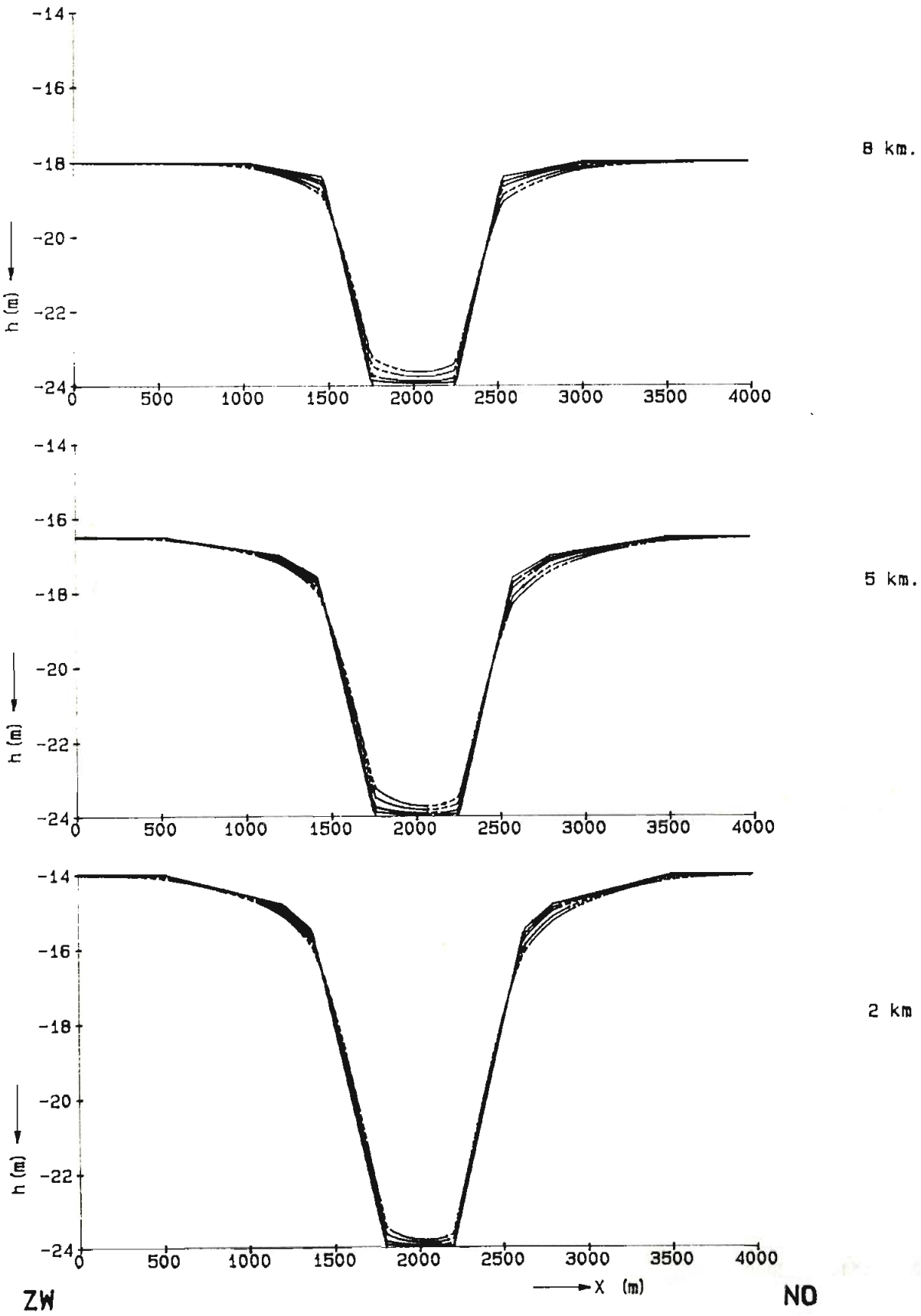
DWARSPROFIEL ONTWIKKELING Y-geul t = 0 - 6 jr. OORSPRONKELIJKE SITUATIE	Y20 / Y50 / Y80	
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM	H 825.20	FIG. 3.3



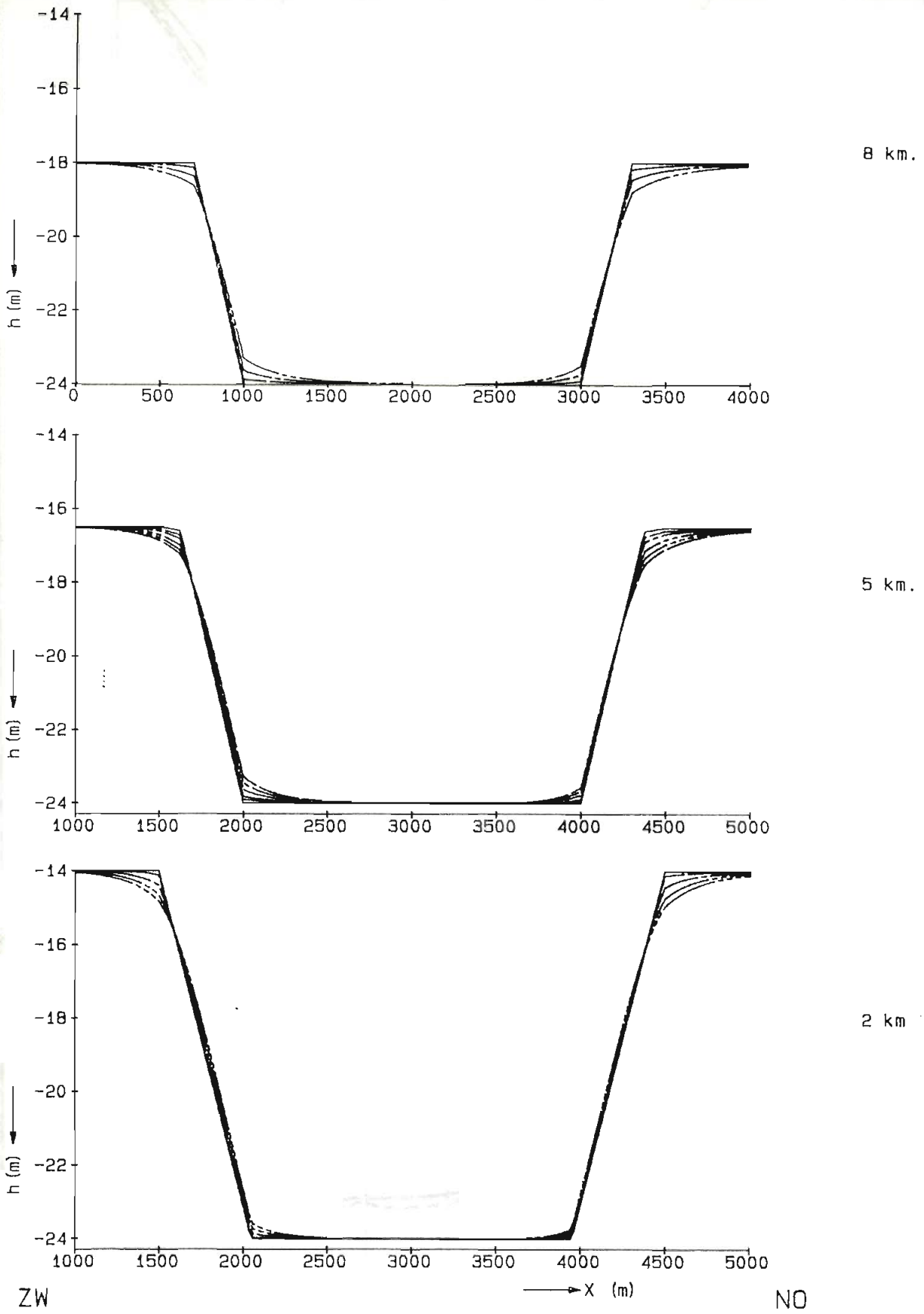
DWARSPROFIEL ONTWIKKELING Y-geul t = 0 - 6 jr. NA VERBREDING TOT 1000 m.	Y21 / Y51 / Y81	
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM	H 825.20	FIG. 3.4



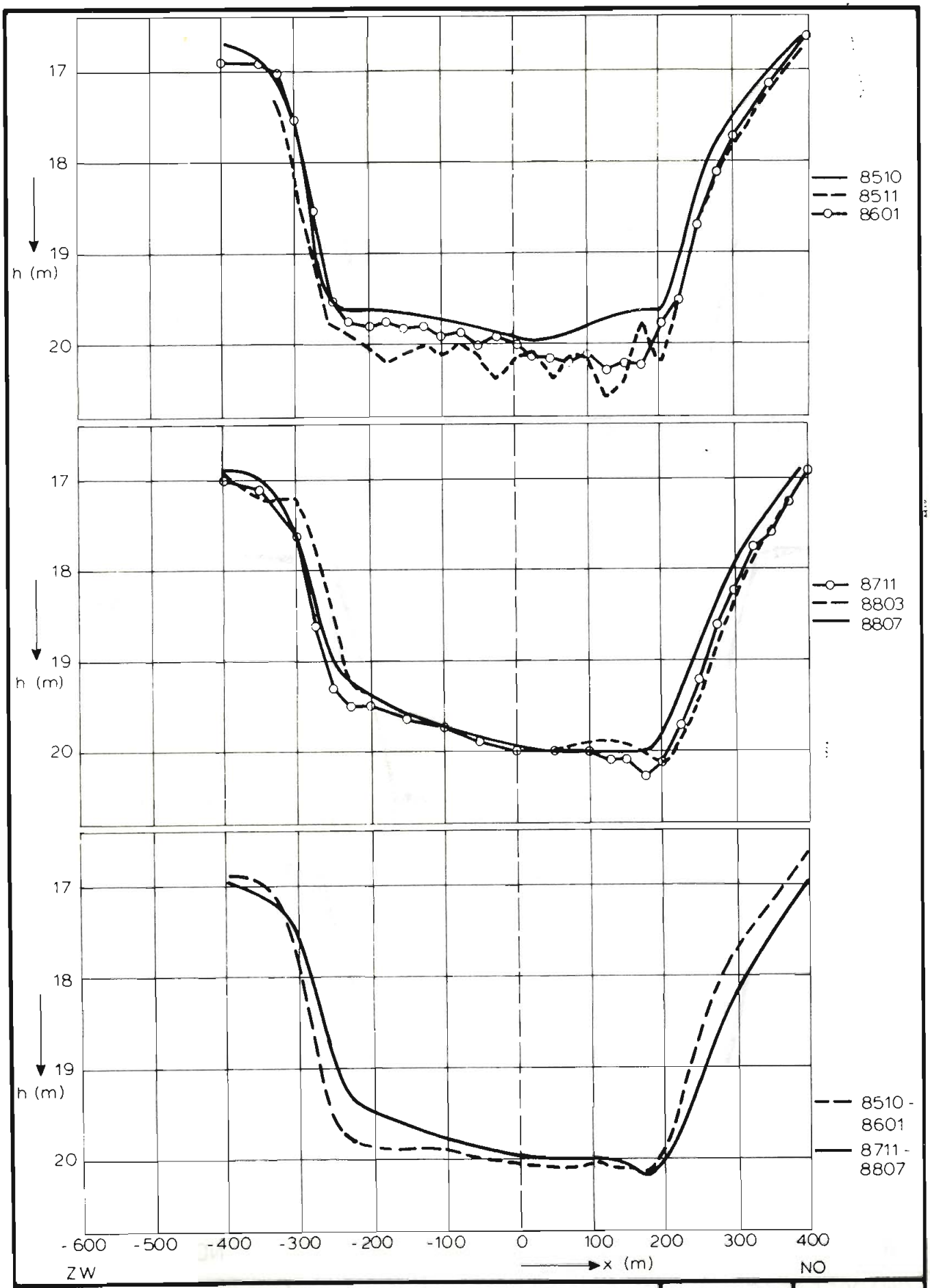
DWARSPROFIEL ONTWIKKELING Y-geul t = 0 - 6 jr. NA VERBREDING TOT 2000 m.		
	Y22 / Y52 / YB2	
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM	H 825.20	FIG. 3.5



DWARSPROFIEL ONTWIKKELING Y-geul t = 0 - 6 jr. NA VERDIEPING TOT -24 m.	Y23 / Y53 / Y83	
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM	H 825.20	FIG. 3.6



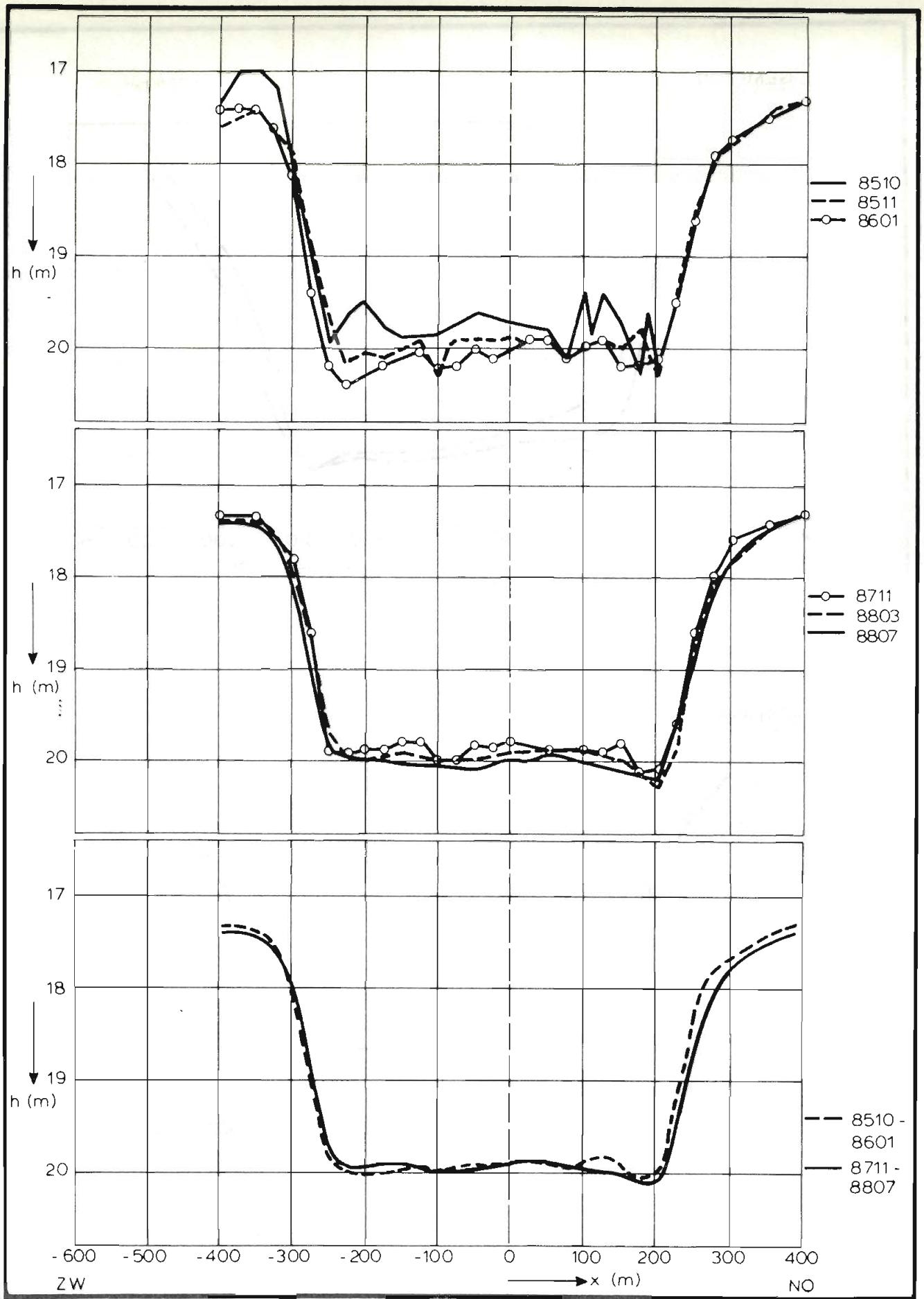
DWARSPROFIEL ONTWIKKELING Y-geul t = 0 - 6 jr. NA VERBREDING TOT 2000 m. EN VERDIEPING TOT -24 m.		
	Y24 / Y54 / Y84	
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM	H 825.20	FIG. 3.7



DWARSPROFIEL 'J-GEUL 1985 - 1988

2.5 km VANAF ZUIDERHAVENHOOFD

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM | H 825 | FIG 3.8

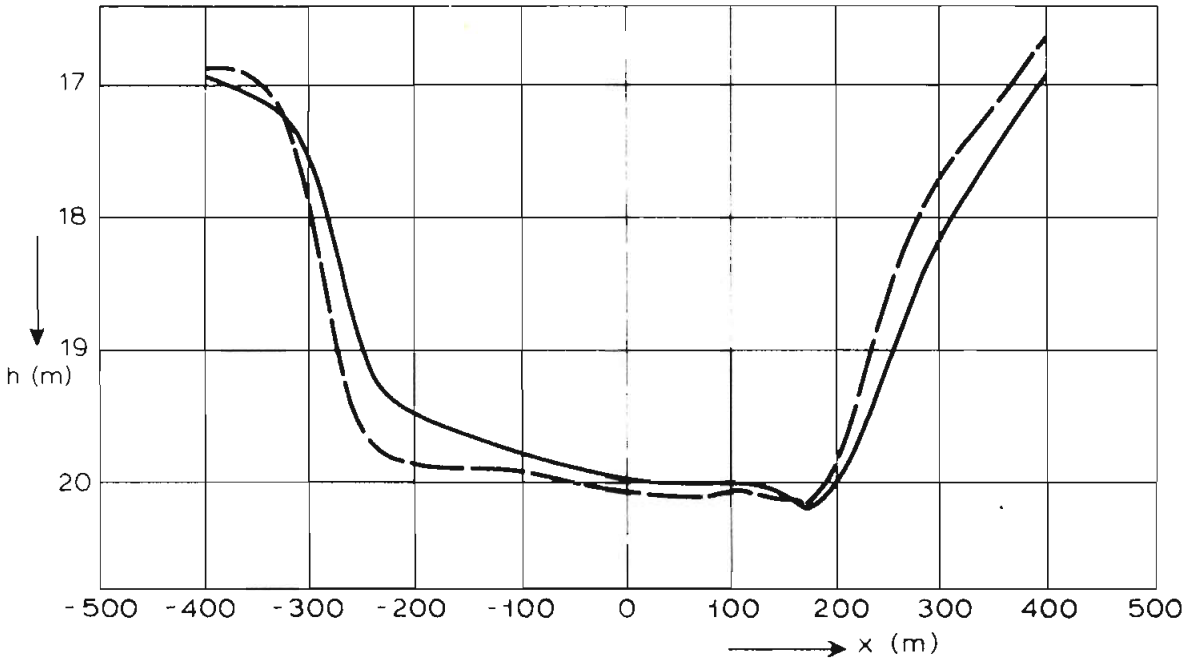


DWARSPROFIEL 'J-GEUL 1985 - 1988

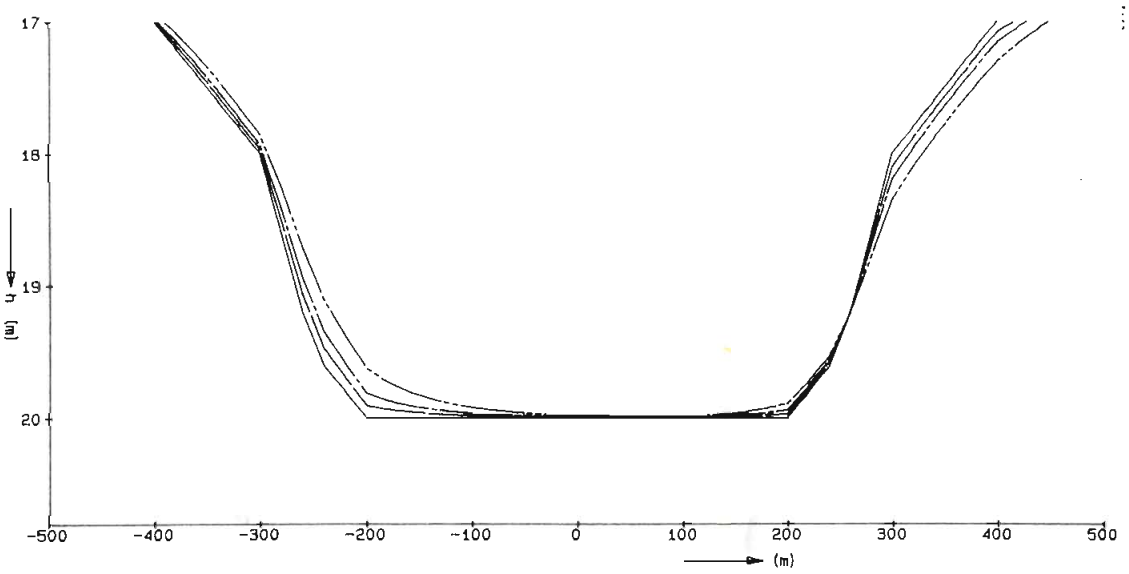
4.5 km VANAF ZUIDERHAVENHOOFD

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM | H 825 | FIG 3.9

GEMETEN

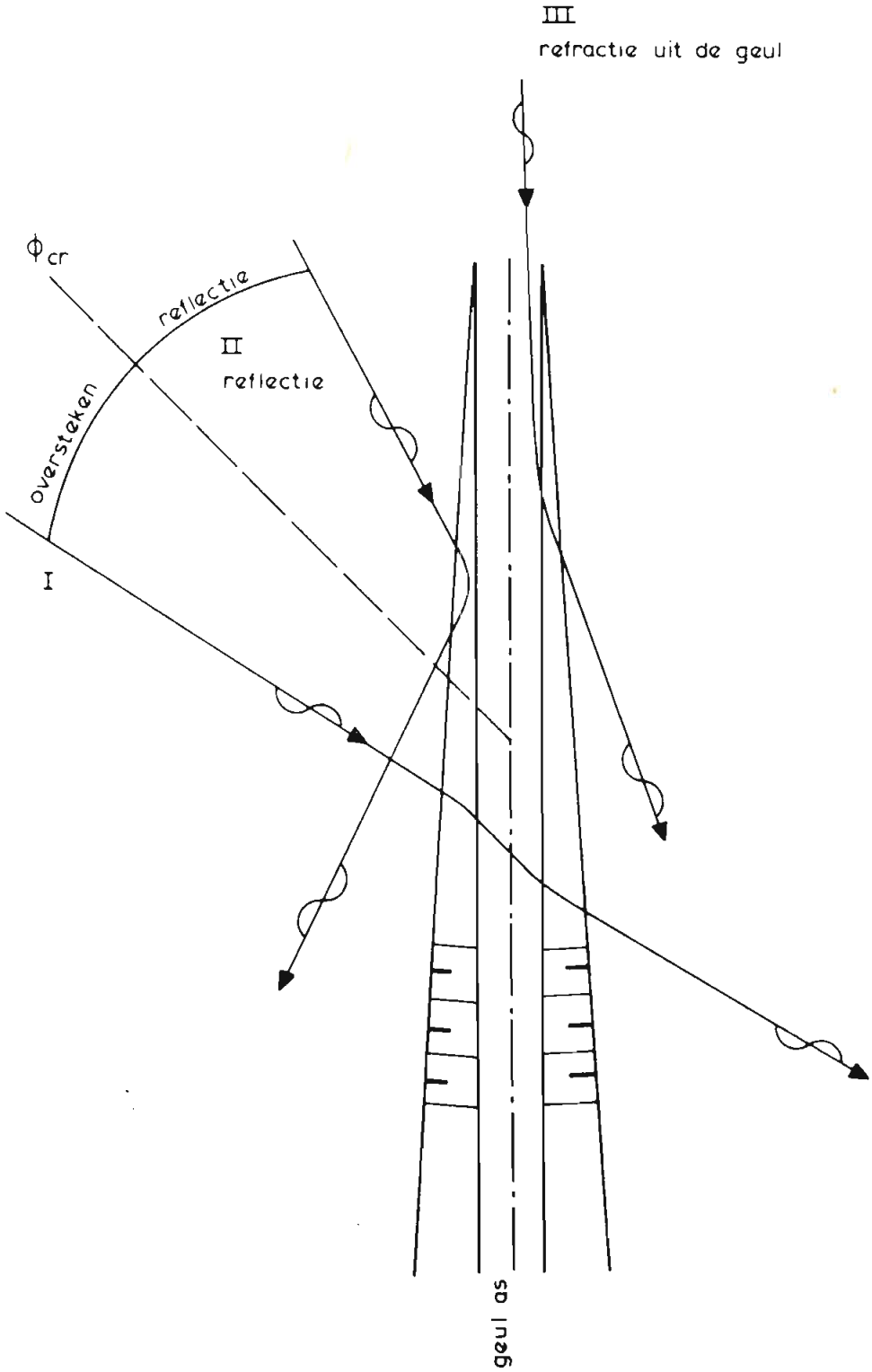


BEREKEND

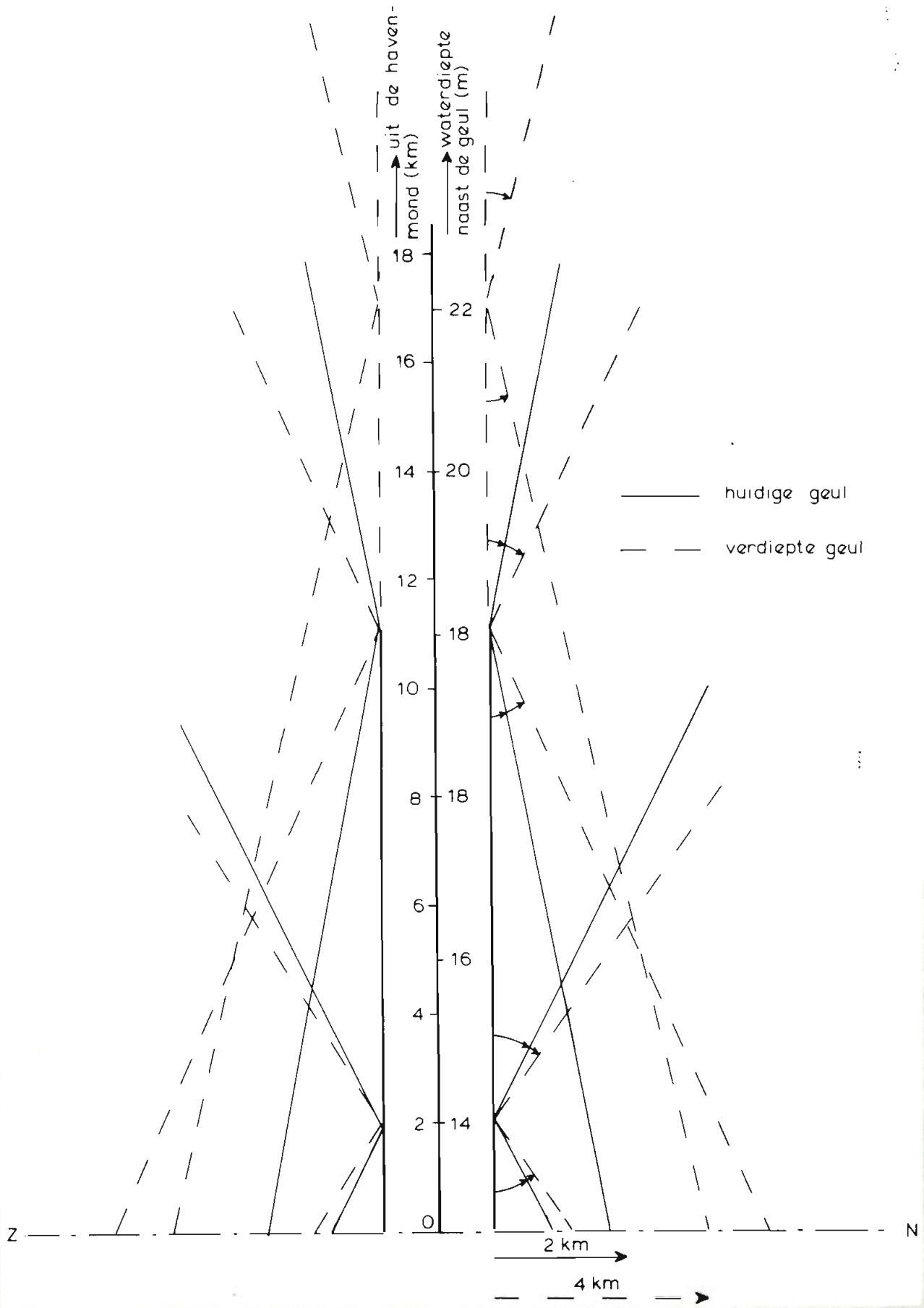


GEMETEN EN BEREKENDE DWARSPROFIELONTWIKKELING U-GEUL 1985-1988
2.5 km VANUIT ZUIDERHAVENHOOFD

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM | H 825 | FIG. 3.10



GEULINVLOED OP GOLFVOORTPLANTING BIJ VERSCHILLENDE GOLFRICHTINGEN		
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM	H 825	FIG. 3.11



REFLEKTIE GEULTALUD: INVLOED GEULVERDIEPING OP KRITISCHE RICHTINGEN

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM | H 825 | FIG. 3.12

ANNEX A

Beschrijving LOMOR

A.1 Uitgangspunten
A.2 Getijstroming
A.2.1 Algemeen
A.2.2 Geulen met een lengteas loodrecht op de getijstroomrichting
A.2.3 Geulen met een lengteas in de richting van de getijstroming
A.2.4 Vergelijking FLOW1D met WAQUA
A.3 Golven
A.4 Transportmodellering en bodemveranderingen
A.4.1 Bodemtransport
A.4.2 Suspensietransport
A.4.3 Veranderingen in bodemniveau

A.1 Uitgangspunten

LOMOR (Longshore Morphology) is een quasi-2DH wiskundig model voor de beschrijving van het onder invloed van golven en stroom tijdsafhankelijke morfologische gedrag van lokale bodemverstoringen langs een quasi-uniforme kust.
Voor de modellering van de deelprocessen in het morfologisch model (golven, stroming, sediment transport) zijn de volgende uitgangspunten gehanteerd:

- het toepassingsgebied van het model ligt op diep water (buiten de aktieve kustzône) waar het sedimenttransport vooral door de getijstroming wordt bepaald,
- de bodemverstoringen kunnen worden gekarakteriseerd met een bepaalde breedte B in dwarsrichting en bezitten een symmetrie-as in de richting van de getijstroming of loodrecht daarop (b.v. gebaggerde geulen loodrecht op of langs de kust),
- de stroming kan worden beschreven met de quasi-stationaire 2DH ondiep water vergelijkingen,
- in geval van getijstroming treedt geen belangrijke rondstroming op (heen en weer gaand getij langs de kust),
- de golfkondities (golfhoogte/periode) zijn constant en worden door de morfologische veranderingen niet wezenlijk beinvloed,
- lineaire golftheorie kan worden gebruikt voor de bepaling van de orbitaalbeweging bij de bodem,
- het bodemtransport en de suspensietransportcapaciteit o.i.v. golven en stroom kan worden beschreven met de formulering van Bailard (1981) onder verwaarlozing van asymmetrie-invloeden,
- het naijlende gedrag van het suspensietransport kan m.b.v. de methode van Galappatti (1983) in rekening worden gebracht.

A.2 Getijstroming

A.2.1 Algemeen

Uitgangspunt voor de getijstroming zijn de lange-golf vergelijkingen voor de diepte-gemiddelde stroming, waarin de horizontale diffusietermen zijn verwaarloosd:

A.1 Uitgangspunten

LOMOR (Longshore Morphology) is een quasi-2DH wiskundig model voor de beschrijving van het onder invloed van golven en stroom tijdsafhankelijke morfologische gedrag van lokale bodemverstoringen langs een quasi-uniforme kust.
Voor de modellering van de deelprocessen in het morfologisch model (golven, stroming, sediment transport) zijn de volgende uitgangspunten gehanteerd:

- het toepassingsgebied van het model ligt op diep water (buiten de aktieve kustzône) waar het sedimenttransport vooral door de getijstroming wordt bepaald,
- de bodemverstoringen kunnen worden gekarakteriseerd met een bepaalde breedte B in dwarsrichting en bezitten een symmetrie-as in de richting van de getijstroming of loodrecht daarop (b.v. gebaggerde geulen loodrecht op of langs de kust),
- de stroming kan worden beschreven met de quasi-stationaire 2DH ondiep water vergelijkingen,
- in geval van getijstroming treedt geen belangrijke rondstroming op (heen en weer gaand getij langs de kust),
- de golfkondities (golfhoogte/periode) zijn constant en worden door de morfologische veranderingen niet wezenlijk beinvloed,
- lineaire golftheorie kan worden gebruikt voor de bepaling van de orbitaalbeweging bij de bodem,
- het bodemtransport en de suspensietransportcapaciteit o.i.v. golven en stroom kan worden beschreven met de formulering van Bailard (1981) onder verwaarlozing van asymmetrie-invloeden,
- het naijlende gedrag van het suspensietransport kan m.b.v. de methode van Galappatti (1983) in rekening worden gebracht.

A.2 Getijstroming

A.2.1 Algemeen

Uitgangspunt voor de getijstroming zijn de lange-golf vergelijkingen voor de diepte-gemiddelde stroming, waarin de horizontale diffusietermen zijn verwaarloosd:

$$u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + g \frac{\partial z_s}{\partial x} = - \frac{g}{C^2} \frac{U_{tot.u}}{h} \qquad (A.1)$$

$$u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + g \frac{\partial z_s}{\partial y} = - \frac{g}{C^2} \frac{U_{tot.v}}{h} \qquad (A.2)$$

$$\frac{\partial uh}{\partial x} + \frac{\partial vh}{\partial y} = 0 \qquad (A.3)$$

met:

$U_{tot} = (u^2 + v^2)^{\frac{1}{2}}$

De stroming wordt quasi-stationair verondersteld, hetgeen toelaatbaar is voor relatief korte gebieden (kuillengte << golflengte van de getijgolf). Twee verschillende vereenvoudigde modellen kunnen met dit stelsel worden afgeleid:

- voor geulen met een lengteas die loodrecht op de getijstroming is georiënteerd,
- voor geulen met een lengteas die dezelfde richting heeft als de getijstroming.

Er wordt hierbij impliciet verondersteld dat de ongestoorde getijstroming altijd langs de kust (is x-richting) is gericht (geen belangrijke rondstroming).

A.2.2 Geulen met een lengteas loodrecht op de getijstroomrichting

Onder de aanname v = 0 (geen stromingscontractie) reduceert het stelsel vergelijkingen tot (met $z_s = z_b + h$):

$$u \frac{\partial u}{\partial x} + g \frac{\partial h}{\partial x} + g \frac{\partial z_b}{\partial x} = - \frac{g|u|u}{C^2 h} \qquad (A.4)$$

$$\frac{\partial uh}{\partial x} = 0 \qquad (A.5)$$

Voor geulen met een breedte B (in x-richting) en B van de orde grootte $C^2h/2g$ ($= \lambda_w$) leert een orde-grootte schatting van de termen in vergel. A.4 dat deze zich ongeveer verhouden als:

$$\frac{u^2}{gh} : 1 : 1 : \frac{u^2}{gh} \frac{B}{2\lambda_w}$$

Omdat $u^2/gh = Fr << 1$ kunnen de vergel. (A.4) en (A.5) worden geschreven als:

$$g \frac{\partial h}{\partial x} + g \frac{\partial z_b}{\partial x} = 0 \qquad (A.6)$$

$$\frac{\partial uh}{\partial x} = 0 \qquad (A.7)$$

Dit stelsel vergelijkingen is als stromingsmodule verwerkt in het programma LOMOR1.
Per tijdstap binnen de getijcyclus wordt het "ongestoorde" getij (= zonder geul), $u_o(t)$ en $h_o(t)$ als randvoorwaarde opgelegd.
Met deze modellering van de getijstroming wordt iedere verdieping omgezet in een reduktie van de stroomsnelheid en hiermee van de sedimenttransportcapaciteit.

A.2.3 Geulen met een lengteas in de richting van de getijstroming

In tegenstelling tot het voorgaande geval leidt dit type geulen niet automatisch tot stroomsnelheidsreduktie omdat een verdieping nu zijwaartse toestroming van water veroorzaakt (stromingscontractie). Hierbij zal sprake zijn van "kopeffekten", die zich over een lengte van de orde-grootte van de geulbreedte B stroomop- en afwaarts van de koppen van de geul uitstrekken. Als de geulbreedte $B \ll L$ (= geullengte in x-richting) en L is van de orde grootte $C^2h/2g$ (hetgeen het geval is voor de geulen zoals behandeld in deze studie) zal er stroomafwaarts van deze snelle overgangsgebieden een gebied volgen waar de stroming zich geleidelijk (lengteschaal $\lambda_w = C^2h/2g$) aanpast aan de grotere/kleinere diepte (resp. stroomversnelling/vertraging, zie de Vriend, 1988). Dit "far field" verschijnsel zal eerst worden gemodelleerd; daarna zal uitgaande hiervan een model worden afgeleid om de "kopeffekten" te beschrijven.

Far-field model

Voor smalle geulen met een lengte van de orde-grootte $C^2h/2g$ ($B \ll L$) is $\lambda_w = C^2h/2g$ de lengteschaal voor de x-afgeleiden en B de lengteschaal voor de y-afgeleiden. Uit de continuïteitsvergelijking is dan te zien dat v/u van de orde-grootte B/λ_w is.
Een orde-grootte schatting van de termen in vergel. A.2 leert dan dat deze zich ongeveer verhouden als:

$$\frac{B^2}{\lambda_w^2} : \frac{B^2}{\lambda_w^2} : \frac{gh}{u^2} : \frac{B^2}{\lambda_w^2} \qquad (A.8)$$

dat $B \ll \lambda_w$ kan vergel. A.2 worden gereduceerd tot:

$$\frac{\partial z_s}{\partial y} = 0 \qquad (A.9)$$

Dit houdt in dat de waterspiegel boven de kuil gelijk is aan die op grote afstand ($y \to \infty$) waar de situatie ongestoord is. Dit betekent dat ook het verhang in x-richting niet door de kuil wordt beïnvloed, ofwel:

$$\frac{\partial z_s}{\partial x} = \frac{\partial z_{s_o}}{\partial x} \qquad (A.10)$$

(index o refereert naar ongestoorde kondities).

Toepassing van vergel. A.1 langs de lengte(symmetrie)-as van de geul (waar $v = 0$) en combinatie met A.10 levert op:

$$u \frac{\partial u}{\partial x} + g \frac{\partial z_{s_o}}{\partial x} = - \frac{g}{C^2} \frac{|u|u}{h} \qquad (A.11)$$

Aannemend dat het ongestoorde verhang voldoende met de formulering van "Chezy" kan worden beschreven volgt tenslotte het far-field model:

$$u \frac{\partial u}{\partial x} = - \frac{g}{C^2} \left\{ \frac{|u|u}{h} - \frac{|u_o|u_o}{h_o} \right\} \qquad (A.12)$$

waarin:

$h = z_{s_o} - z_b$

M.b.v. een bovenstroomse randvoorwaarde voor u (bijv. ongestoorde konditie $u = u_o$) en een bekende waterstand en bodemligging kan u(x) hieruit worden opgelost.

Met deze modellering van de getijstroming veroorzaakt iedere verdieping een geleidelijke versnelling van de stroming (lengteschaal λ_w) en hiermee een toename van de transportcapaciteit in de geul.

Opmerking: Formeel gezien is de koppeling van de far-field randvoorwaarde ($u=u_o$) aan het far-field in de kuil niet juist omdat het near-field (kopeffekten) hierbij wordt overgeslagen. In par. 2.3.2.1 wordt echter aangetoond dat, uit oogpunt van morfologie, deze onjuistheid toelaatbaar is.

Kopeffekten

Nabij de koppen van de geul is de far-field benadering niet geldig en zal het lokale verhang in x-richting afwijken van de ongestoorde kondities. Deze stroming kan m.b.v. een gelijkvormigheidsaanname voor de snelheidsprofielen u(y) en v(y) en integratie in dwarsrichting van de vergelijkingen A.2 en A.3 worden benaderd.
Opmerking: Het is niet bij voorbaat duidelijk bij welke kuilafmetingen deze gelijkvormigheidsoplossing geldig is. Kwalitatief geldt dat naarmate de kuilbreedte toeneemt en zeker als B ≈ L deze oplossing slechter wordt.

Gezien de onbekendheid met de aan te nemen snelheidsprofielvormen zijn de volgende eenvoudige profielvormen gekozen (y = 0 is de symmetrie (langs)as van de geul en u is de snelheid in x-richting langs deze as):

$$u(y) = u(1 - \frac{2|y|}{B}) + u_o \cdot \frac{2|y|}{B} \qquad (A.13)$$

$$v(y) = v_o \frac{2y}{B} \qquad (A.14)$$

⋮

voor $0 \leq |y| \leq B/2$, en:

$$u(y) = u_o \qquad (A.15)$$

$$v(y) = v_o \exp\left[-|y| + B/2)/B\right] \qquad (A.16)$$

voor $|y| > B/2$

Voor de eenvoud van de afleiding is voor h(y) dezelfde vorm als voor u(y) gekozen (driehoekig bodemprofiel).
Integratie in dwarsrichting (y = 0 tot ± ∞) van de vergelijkingen A.2 en A.3 met toepassing van de vergel. A.12...A.16 levert vervolgens op:

$$u \frac{\partial u}{\partial x} = - \frac{g}{C^2} \{\frac{|u|u}{h} - \frac{|u_o|u_o}{h_o}\} - B \cdot \{\frac{5}{4} u_o (\frac{\partial^2 v_o}{\partial x^2} + \frac{g}{C^2 h_o} \frac{\partial v_o}{\partial x}) + \frac{1}{12} \frac{\partial u}{\partial x} (\frac{\partial v_o}{\partial x} + \frac{g}{C^2 h_o} v_o)\} \qquad (A.17)$$

$$v_o = - \frac{B}{12 h_o} \{2 \frac{\partial uh}{\partial x} + h_o \frac{\partial u}{\partial x} + u_o \frac{\partial h}{\partial x}\} \qquad (A.18)$$

Het eerste deel van vergel. A.17 is opnieuw het far-field model (zie vergel. A.12).
Het stelsel wordt (numeriek) iteratief opgelost met als eerste predictor voor u(x) het "far-field" resultaat.
Als randvoorwaarde wordt bovenstrooms de ongestoorde getijstroming $u_o(t)$ opgelegd. Voor het verloop van h(x) wordt een rigid-lid benadering (vaste waterstand) toegepast in combinatie met de bodemligging $z_b(x)$.
Dit stromingsmodel (FLOW1D), met naar keuze met/zonder kopeffekten, is onderdeel van het morfologische model LOMOR.

A.2.4 Vergelijking FLOW1D met WAQUA

De WAQUA berekeningen zoals aangegeven in par. 2.3.1, zijn tevens gebruikt als toetsing voor het model FLOW1D. In Fig. A.1, A.2 en A.3 worden drie vergelijkingsgevallen getoond voor een 1 m diepe kuil, waarbij, tijdens maximale vloedstroming, het snelheidsverloop langs de as van de geul (in stroomrichting) wordt vergeleken. Tevens is voor beide stromingsmodellen het snelheidsverloop voor de situatie zonder bodemverstoring (= geul) aangegeven (streepjeslijn).
Dit laatse verloop is voor de WAQUA berekeningen enigszins onregelmatig t.g.v. de onregelmatige bodemgeometrie in het WAQUA (ZANDWIN) model.
De versnellende stroming stroomopwaarts van de kuil, de grootte van de kopeffekten ter plaatse van bodemver(on)dieping en de vertragende stroming stroomafwaarts van de kuil worden door beide modellen op vergelijkbare wijze gerepresenteerd. Het far-field gedrag van beide modellen vertoont minder goede overeenkomst. In tegenstelling tot FLOW1D geeft WAQUA niet altijd een overall-versnelling van de stroming t.g.v. de verdieping; dit is vooral goed zichtbaar in Fig. A.3 (ZW 06) bij de lange geul (L = 5000 m) en wordt wellicht veroorzaakt door een onjuiste modellering van de lokale waterspiegelgradienten (FLOWID) bij deze relatief brede geulen ($B/\lambda_w \simeq 0.3$-0.1).
Bovendien bleek de numerieke oplossing van FLOW1D in deze kondities moeilijk te convergeren in tegenstelling tot situaties met $B/\lambda_w \leq 0.3$.
Bekend is voor dit laatste type (relatief smalle) geulen dat de stroming wel versnelt t.g.v. de verdieping in de kuil (zie bijv. Wallingford, 1973 en/of Nedeco, 1983). Op grond hiervan wordt het model FLOW1D alleen toegepast voor de situaties met $B/\lambda_w < 0.3$.

Voor de geulen met $B/\lambda_w > 0.3$ is een op de WAQUA uitkomsten gebaseerde methode gebruikt waarbij de snelheid in de kuil constant en gelijk aan de ongestoorde getijstroomsnelheid wordt gehouden. De consekwenties van het hierbij niet in rekening brengen van de kopeffekten worden besproken in par. 2.3.2.1.

A.3 Golven

Met behulp van een lokale golfhoogte (H_{rms}) en golfperiode (T_p), wordt m.b.v. lineaire golftheorie een orbitaalsnelheidsamplitude $\hat{U}_{orb}$ berekend:

$$\hat{U}_{orb} = \pi \frac{H_{rms}}{T_p} \frac{1}{\sinh(kh)} \tag{A.19}$$

met:

$$k = 2\pi/L$$

$$L = \frac{g\,T_p^2}{2\pi} \tanh(kh) \tag{A.20}$$

Omdat de golven in het langstransportmodel slechts als opwoeler worden gebruikt (geen asymmetrietransport), is de golfvoortplantingsrichting hierbij niet van belang.

A.4 Transportmodellering en bodemveranderingen

A.4.1 Bodemtransport

De formule van Bailard (1981), zonder bodemhellingsinvloed, kan als volgt worden geschreven:

$$\vec{q}_b = \langle L_b \cdot \vec{U}_t \rangle \tag{A.21}$$

met bodemtransport load:

$$L_b = m_b \cdot |\vec{U}_t|^2 \tag{A.22}$$

$$\vec{U}_t = \vec{U}_b + \vec{\tilde{U}}_{orb}(t) \tag{A.23}$$

$\langle .. \rangle$ = middeling over de golfperiode

Hierin is $\vec{U}_b$ de netto stroomvector dichtbij de bodem, die gekoppeld is aan de diepte-gemiddelde getijstroomsnelheid (verwaarlozing 3D stroming!):

$$\vec{U}_b = \alpha_b \vec{u} \tag{A.24}$$

Aangezien Bailard geen uitsluitsel geeft omtrent het niveau van de netto bodemsnelheid is α_b voorlopig een onbekende constante.
Combinatie van A.21, A.22, A.23 en A.24 geeft:

$$\vec{q}_b = m_b \cdot \langle |\vec{U}_t|^2 \rangle \alpha_b \vec{u} + m_b \cdot \langle |\vec{U}_t|^2 \cdot \vec{\tilde{U}}_{orb} \rangle \tag{A.25}$$

waarin het eerste deel kan worden aangemerkt als konvektief transport ("opwoeltransport" in de richting van de netto stroming) en het tweede deel als asymmetrietransport (transport in de richting van de golfvoortplanting). De laatste transportcomponent wordt voor het transport in langsrichting (evenwijdig aan de kust, in de richting van de getijstroming) verwaarloosd omdat op grotere waterdiepten (10-20 m), waar de onderliggende studie op is gericht, $|\vec{\tilde{U}}_{orb}| \ll |\vec{U}|$ (zie ook par. 2.2.1).

De bodemtransportcomponent in langsrichting kan nu worden geschreven als:

$$q_{b_x} = \frac{\langle L_b \rangle}{h} \cdot \alpha_b . q_x \tag{A.26}$$

met:

$q_x = u.h$

$\langle L_b \rangle = m_b \langle |\vec{U}_t|^2 \rangle = m_b (\alpha_b^2 u^2 + \langle \tilde{U}^2_{orb} \rangle)$

M.b.v. lineaire golftheorie kan $\langle L_b \rangle$ worden geschreven als:

$$\langle L_b \rangle = m_b \cdot (\alpha_b^2 u^2 + \frac{1}{2} \hat{U}^2_{orb}) \tag{A.27}$$

Verder geldt (Bailard, 1981):

$$m_b = \frac{c_f \, \varepsilon_b}{\Delta g \, \tan\phi}$$

met:

ε_b = efficiency factor (= 0.1)

en

c_f = bodemwrijvingscoëfficiënt

Opmerking: Voor de bodemwrijvingscoëfficiënt c_f wordt een constante waarde (c_f = 0.01) toegepast. In par. 2.2.1 wordt nader op deze c_f-formulering en invloed ervan op het sedimenttransport ingegaan.
De bodemtransportcomponent in y-richting (loodrecht op de kust) kan worden geschreven als:

$$q_{b_y} = \frac{\langle L_b \rangle}{h} \cdot \alpha_b \cdot q_y \qquad (A.28)$$

met:

$q_y = v.h$

Ook hierin is slechts sprake van konvektief transport. Het asymmetrietransport in deze richting wordt in het model CROSTRAN verdisconteerd.

A.4.2 Suspensietransport

Voor het suspensietransport wordt eveneens het konvektieve deel als dominerend beschouwd, zodat de volgende formulering voor het evenwichtstransport (= transportcapaciteit) kan worden toegepast:

$$q_{s_{e_x}} = C_e \cdot \alpha_b \cdot q_x \qquad (A.29)$$

$$q_{s_{e_y}} = C_e \cdot \alpha_b \cdot q_y \qquad (A.30)$$

Hierin is C_e de diepte-gemiddelde sedimentconcentratie in evenwichtsomstandigheden (transport = transportcapaciteit).

Volgens Bailard (1981) geldt:

$$\langle L_s \rangle = C_e.h = m_s \langle |\vec{U}_t|^3 \rangle \qquad (A.31)$$

met:

$$m_s = \frac{c_f \cdot \varepsilon_s}{\Delta g \quad w_s} \qquad (A.32)$$

$\langle|\vec{U}_t|^3\rangle$ kan als volgt worden benaderd (lineaire golftheorie):

$$\langle|\vec{U}_t|^3\rangle = |\alpha_b\, u|^3 + \frac{3}{4}\,|\alpha_b\, u| \,.\, \hat{U}^2_{orb}$$

$$\text{voor} \quad |\alpha_b\, u| \geq \frac{1}{2}\sqrt{2}\,.\,\hat{U}_{orb}$$

$$= \frac{4}{3\pi}\,\hat{U}^3_{orb} + \frac{3}{\pi}\,\hat{U}_{orb}\,.\,\alpha_b^2\, u^2 \qquad \text{(A.33)}$$

$$\text{voor} \quad |\alpha_b\, u| < \frac{1}{2}\sqrt{2}\,\hat{U}_{orb}$$

Door de vertraagde opvulling en lediging van de concentratievertikaal is vooral bij snelle overgangen in bodemgeometrie het werkelijke suspensietransport kleiner of groter dan het evenwichtstransport ($C \neq C_e$, met C = dieptegemiddelde concentratie).
Een eenvoudige benadering van dit naijlingsproces wordt gegeven door Galappatti (1983):

$$L_{A_x}\frac{\partial C}{\partial x} + L_{A_g}\frac{\partial C}{\partial y} = C_e - C \qquad \text{(A.34)}$$

waarin:

$$L_{A_x} = \tilde{L}\,\frac{q_x}{w_s} \qquad \text{(A.35)}$$

$$L_{A_y} = \tilde{L}\,\frac{q_y}{w_s}$$

$\tilde{L}$ = profielparameter

Deze laatste parameter is afhankelijk van de getijstroom en golfkondities (zie Katapodi en Ribberink, 1988) en wordt in LOMOR als een constante beschouwd die per geval dient te worden bepaald.
Langs de symmetrie-as van de geul is $q_y = 0$ (in langsrichting) en volgt:

$$L_{A_x}\frac{\partial C}{\partial x} = C_e - C \qquad \text{(A.36)}$$

Met een bovenstroomse randvoorwaarde voor C (bv. $C = C_e$ in ongestoorde kondities) kan C(x) uit vergel. A.36 worden opgelost, waarna het suspensietransport wordt berekend met

$$q_{s_x} = \alpha_b \, q_x \, . \, C \tag{A.37}$$

$$q_{s_y} = \alpha_b \, q_y \, . \, C \tag{A.38}$$

Opmerking: Langs de symmetrie-as van de geul is weliswaar $q_{s_y} = q_y = 0$, maar is $\frac{\partial q_{sy}}{\partial y} \neq 0$ omdat $\frac{\partial q_y}{\partial y} \neq 0$. Juist deze dwarsgradient is van belang voor de bodemveranderingen.

A.4.3 Veranderingen in bodemniveau

De veranderingen in bodemniveau worden berekend m.b.v. de sedimentcontinuïteitsvergelijking:

$$(1-\varepsilon_o) \frac{\partial z_b}{\partial t} + \frac{\partial q_{bx}}{\partial x} + \frac{\partial q_{sx}}{\partial x} + \frac{\partial q_{by}}{\partial y} + \frac{\partial q_{sy}}{\partial y} = 0 \tag{A.39}$$

Substitutie van de uitdrukkingen voor bodemtransport (verg. A.26, A.28) en voor suspensietransport (verg. A.37, A.38) levert op:

$$(1-\varepsilon_o) \frac{\partial z_b}{\partial t} + \frac{\partial \frac{L_b}{h} \alpha_b \, q_x}{\partial x} + \frac{\partial \, \alpha_b \, q_x \, C}{\partial x} + \frac{\partial \frac{L_b}{h} \alpha_b \, q_y}{\partial y} + \frac{\partial \, \alpha_b \, q_y \, C}{\partial y} = 0 \tag{A.40}$$

Gebruikmakend van de continuïteitsvergelijking voor water ($\partial q_x/\partial x + \partial q_y/\partial y = 0$), constant veronderstelling van α_b en toepassing van A.40 langs de symmetrie-as van de geul (in langsrichting $q_y = 0$) resulteert in:

$$(1-\varepsilon_o) \frac{\partial z_b}{\partial t} + \alpha_b \, q_x \frac{\partial \, L_b/h}{\partial x} + \alpha_b \, q_x \frac{\partial C}{\partial x} = 0 \tag{A.41}$$

Eliminatie van $\partial C/\partial x$ m.b.v. verg. (A.36) geeft tenslotte voor de bodemveranderingssnelheid E:

$$E = \frac{\partial z_b}{\partial t} = \frac{\alpha_b \, w_s}{(1-\varepsilon_o) \, \tilde{L}} \left(C - C_e\right) - \frac{\alpha_b \, q_x}{(1-\varepsilon_o)} \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\langle L_b \rangle}{h}\right) \tag{A.42}$$

Door de getijperiode T_g te verdelen in N tijdstappen Δt (= T_g/N) kan, na het per tijdstap doorlopen van de hiervoor beschreven hydrodynamische en transportmodellen, een gemiddelde bodemveranderingssnelheid worden bepaald:

$$E_g = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^{N} E_i \qquad (A.43)$$

Een morfologische tijdstap wordt vervolgens gelijk gesteld aan een zodanig aantal getijperioden (= M) dat in het gehele rekengebied de bodemverandering een bepaald deel (gekozen percentage β) van de ongestoorde waterdiepte h_o net niet overschrijdt:

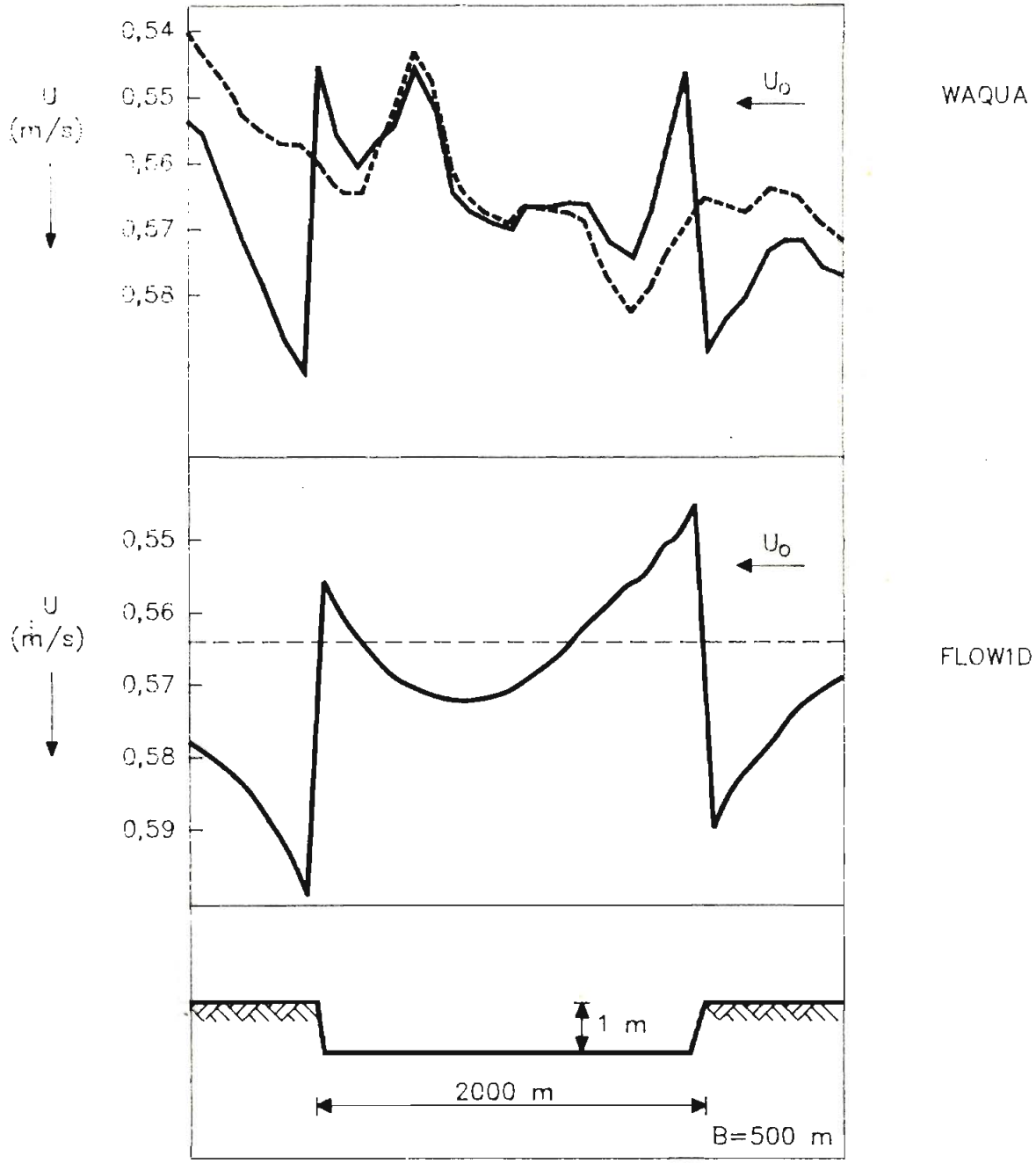
$$M = \min \left\{ \frac{\beta\, h_o}{E_g \cdot T_g} \right\} \qquad (A.44)$$

$$\Delta t_{mor} = M \cdot T_g \qquad (A.45)$$

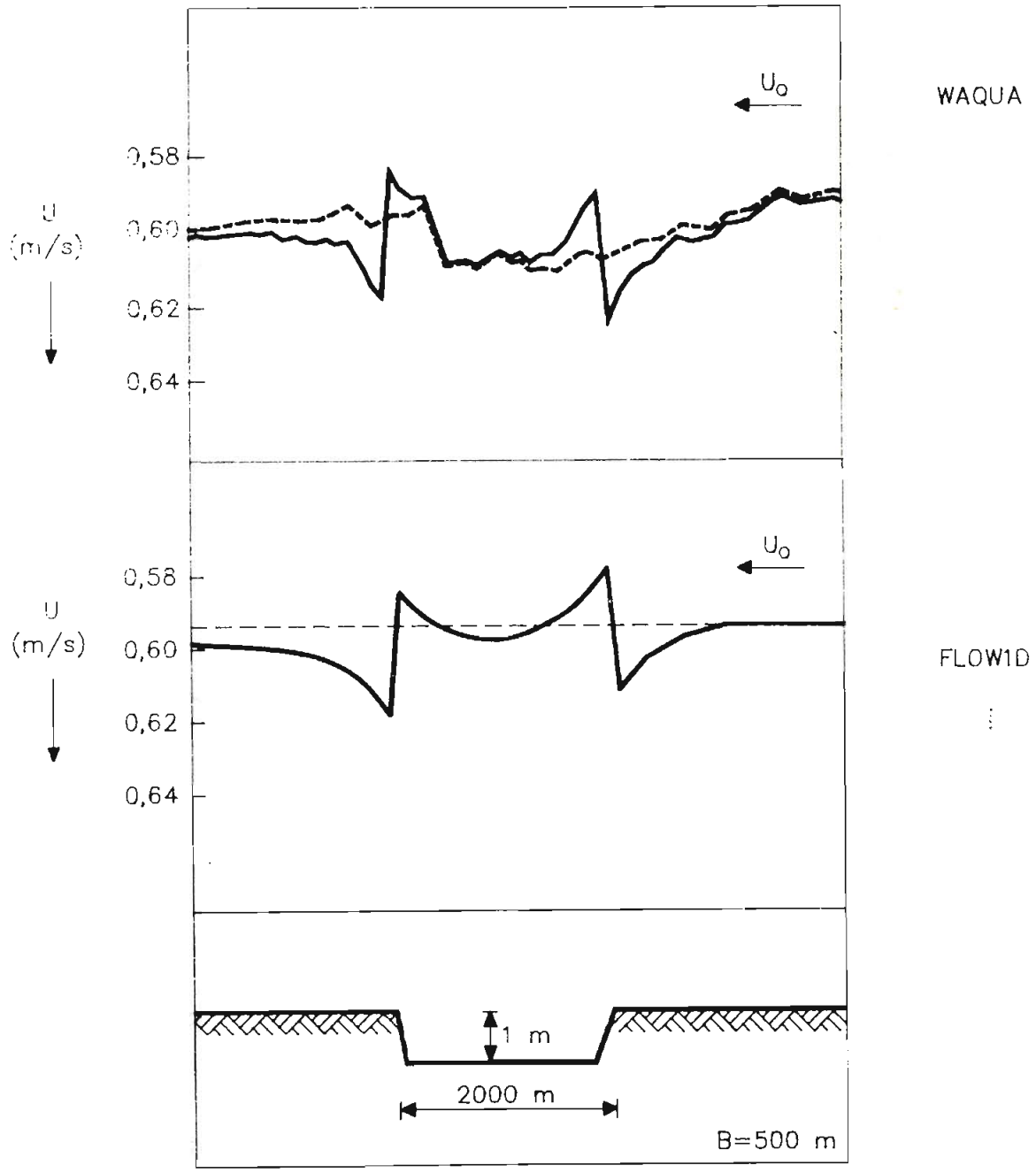
Met een predictor-corrector methode wordt de bodemligging op het nieuwe tijdsniveau bepaald ($t = t + \Delta t_{mor}$). Hierbij wordt voor de oplossing van vergel. (A.42) gebruik gemaakt van:

- een FTCS-schema voor de predictor
- een Crank-Nicholson schema voor de corrector

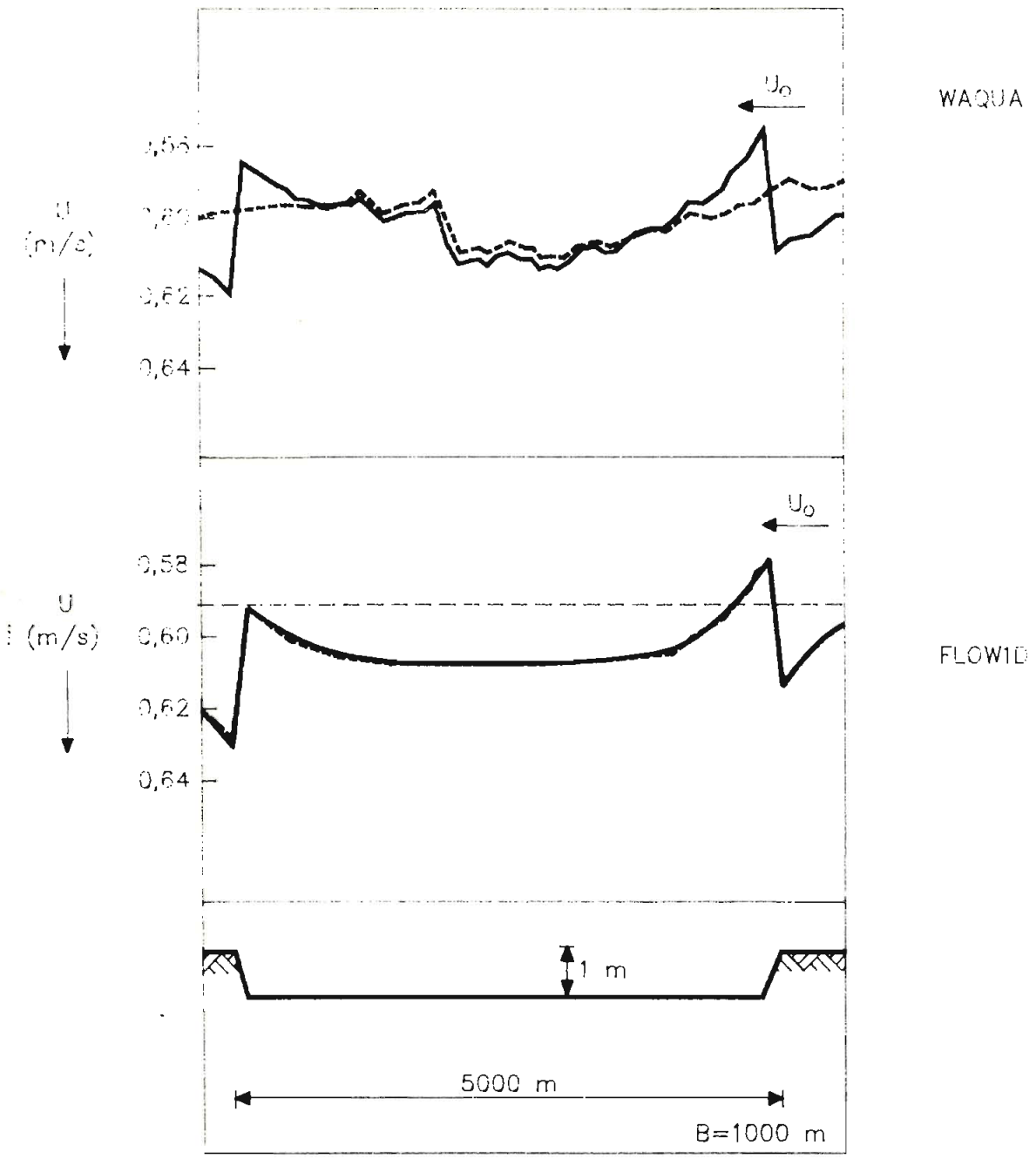
Dit laatste numerieke schema wordt op een expliciete manier gebruikt omdat tussen de predictor en de correctorstap de hydrodynamische en transportmodellen nog eens worden doorlopen op het nieuwe tijdsniveau (zie Olesen, 1981).



SNELHEIDSVERLOOP LANGS DE AS VAN DE GEUL (−10 m DIEPTELIJN) − VERGELIJKING WAQUA EN FLOW1D		
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM	H 825	FIG. A1



SNELHEIDSVERLOOP LANGS DE AS VAN DE GEUL (−14 m DIEPTELIJN) − VERGELIJKING WAQUA EN FLOW1D		
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM	H 825	FIG. A2



SNELHEIDSVERLOOP LANGS DE AS VAN DE GEUL (-14 m DIEPTELIJN) – VERGELIJKING WAQUA EN FLOW1D	ZW06	
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM	H 825	FIG. A3

ANNEX B

Analyse morfologische stabiliteit van geulen in een getijdengebied

B.1. Geulen met een lengteas loodrecht op de getijstroomrichting

B.2. Geulen met een lengteas in de richting van de getijstroming

B.1 Geulen met een lengteas loodrecht op de getijstroming

De stabiliteitsanalyse wordt uitgevoerd voor een situatie zonder golven en is dus ook alleen van betekenis op dieper water waar het door golven veroorzaakt transport van minder groot belang is.
Uitgangspunt is de set vergelijkingen zoals gepresenteerd in Annex A:

getijstroming:

$$\frac{\partial uh}{\partial x} = 0 \qquad (B.1)$$

$$\frac{\partial z_w}{\partial x} = 0 \qquad (B.2)$$

bodemveranderingen:

$$(1-\varepsilon_o)\frac{\partial z_b}{\partial t} + \frac{\partial q_b}{\partial x} + \frac{\partial q_s}{\partial x} = 0 \qquad (B.3)$$

transport:

$$q_b = m_b\,(\alpha_b u)^3 \qquad (B.4)$$

$$q_s = \alpha_b . q . C \qquad (B.5)$$

sediment concentratie (diepte-gemiddeld):

$$L_A \frac{\partial C}{dx} = C_e - C \qquad (B.6)$$

$$L_A = \tilde{L}\,\frac{q}{w_s} \qquad (B.7)$$

$$C_e = m_s \frac{|\alpha_b u|^3}{h} = \frac{f(u)}{h} \qquad (B.8)$$

Linearisering om de ongestoorde situatie (zonder geul, index o) en enige verdere uitwerking resulteert in de volgende set vergelijkingen:

$$U_o \frac{\partial h}{\partial x} + h_o \frac{\partial u}{\partial x} = 0 \qquad (B.9)$$

$$\frac{\partial z_b}{\partial x} = - \frac{\partial h}{\partial x} \qquad (B.10)$$

$$(1-\varepsilon_o)\frac{\partial z_b}{\partial t} + \left(\frac{\partial q_b}{\partial U}\right)_o \cdot \frac{\partial u}{\partial x} + \alpha_b\, q\, \frac{\partial C}{\partial x} = 0 \qquad (B.11)$$

$$L_{A_o}\frac{dC}{dx} = \frac{1}{h_o}\left(\frac{df}{du}\right)_o (u-U_o) - \frac{C_o}{h_o}(h-h_o) - (C-C_o) \qquad (B.12)$$

M.b.v. B.9 en B.12 kunnen $\partial u/\partial x$ en $\partial C/\partial x$ uit B.11 worden geëlimineerd, zodat resulteert:

$$(1-\varepsilon_o)\frac{\partial z_b}{\partial t} - \frac{U_o}{h_o}\left(\frac{\partial q_b}{\partial u}\right)_o \frac{\partial h}{\partial x} + \frac{\alpha_b q}{L_{A_o} h_o}\left(\frac{\partial f}{\partial u}\right)_o \left(\frac{q}{h} - \frac{q_o}{h_o}\right) +$$

$$- \frac{\alpha_b q C_o}{L_{A_o} h_o}(h - h_o) - \frac{\alpha_b q}{L_{A_o}}(C - C_o) = 0$$

Differentiatie naar x en toepassing van B.10 geeft:

$$(1-\varepsilon_o)\frac{\partial^2 z_b}{\partial x \partial t} + \frac{U_o}{h_o}\cdot\left(\frac{\partial q_b}{\partial U}\right)_o \frac{\partial^2 z_b}{\partial x^2} + \frac{\alpha_b q}{L_{A_o} h_o}\cdot\left(\frac{\partial f}{\partial u}\right)_o \cdot \frac{q}{h_o^2}\frac{\partial z_b}{\partial x} +$$

$$+ \frac{\alpha_b q C_o}{L_{A_o} h_o}\cdot\frac{\partial z_b}{\partial x} - \frac{\alpha_b q}{L_{A_o}}\frac{\partial C}{\partial x} = 0 \qquad (B.13)$$

Vergelijking B.11 kan m.b.v. B.9 en B.10 ook worden geschreven als:

$$(1-\varepsilon_o)\frac{\partial z_b}{\partial t} + \left(\frac{\partial q_b}{\partial u}\right)_o \frac{U_o}{h_o}\frac{\partial z_b}{\partial x} + \alpha_b q\frac{\partial C}{\partial x} = 0 \qquad (B.14)$$

Uit B.13 en B.14 kan tenslotte $\partial C/\partial x$ worden geelimineerd waarna 1 vergelijking resulteert voor de beschrijving van de bodemniveau veranderingen:

$$\frac{\partial z_b}{\partial t} + C_b\frac{\partial z_b}{\partial x} + D\frac{\partial^2 z_b}{\partial x^2} + L_{A_o}\frac{\partial^2 z_b}{\partial x \partial t} = 0 \qquad (B.15)$$

met:

$$C_b = \frac{1}{1-\varepsilon_o}\left[\frac{\alpha_b q}{h_o}\left\{C_o + \left(\frac{\partial f}{\partial u}\right)_o \frac{q_o}{h_o^2}\right\} + \frac{U_o}{h_o}\left(\frac{\partial q_b}{\partial u}\right)_o\right] \qquad (B.16)$$

$$D = \frac{1}{1-\varepsilon_o}\cdot\left(\frac{\partial q_b}{\partial u}\right)_o \cdot \frac{U_o}{h_o}\cdot L_{A_o} \qquad (B.17)$$

Een harmonische analyse van vergelijking B.15 m.b.v. initiële verstoringen van de vorm:

$$z_b(x,t) = \Delta h.\exp\{i\ (kx-\omega t)\} \tag{B.18}$$

levert op:

$$\omega = \frac{D.L_{A_o} k^3 + C_b.k}{L_{A_o}^2 k^2 + 1} + i\ .\ \frac{Dk^2 - C_b L_A k^2}{L_{A_o}^2 k^2 + 1} \tag{B.19}$$

waarvan het reële deel Re(ω) een effektieve voortplantingssnelheid $C_{b_{eff}}$ bevat

$$C_{b_{eff}} = \frac{Re(\omega)}{k} = \frac{D.L_{A_o} k^2 + C_b}{L_{A_o}^2 k^2 + 1} \tag{B.20}$$

Voor lange bodem golven ($L_{bed} >> L_{A_o}$ ofwel $L_{A_o}.k = L_{A_o}.\frac{2\pi}{L_{bed}} \to 0$) geldt hiervoor:

$$C_{b_{eff}} \to C_b \tag{B.21}$$

Voor korte bodemgolven ($L_{A_o} k \to \infty$) geldt:

$$C_{b_{eff}} \to \frac{D}{L_{A_o}} = \frac{1}{1-\varepsilon_o}\frac{U_o}{h_o}\left(\frac{\partial q_b}{\partial u}\right) \tag{B.22}$$

hetgeen t.o.v. B.21 een aanzienlijke reduktie in voortplantingssnelheid inhoudt (vergelijk met B.16). Dit wordt veroorzaakt door het feit dat het suspensietransport voor de voortplanting van deze korte golven niet van belang is!

Het imaginaire deel van B.19 Im(ω) representeert een dempingsfactor ($e^{+\ Im(\omega).t}$) waarvan de negatieve inverse kan worden gezien als een karakteristieke tijdschaal T_{bed} van deze dempingsterm:

$$T_{bed} = -\frac{1}{Im(\omega)} = -\frac{L_{A_o}^2 + 1/k^2}{D - C_b.L_{A_o}}$$

$$= +\frac{L_{A_o}^2 + 1/k^2}{L_{A_o}\frac{\alpha_b U_o}{1-\varepsilon_o}\left(C_o + \left(\frac{\partial f}{\partial u}\right)_o \frac{q}{h^2_o}\right)} \tag{B.23}$$

Deze uitdrukking laat zien dat:

1. Bodemgolven <u>altijd uitdempen</u> omdat T_{bed} altijd >o ($e^{-t/T_{bed}}$ = dempingsterm)
2. Deze demping volledig wordt veroorzaakt door het naijlingsgedrag van gesuspendeerde materiaal en i.g.v. alleen bodemtransport niet zou bestaan (voor $L_{A_o} \rightarrow o$, $T_{bed} \rightarrow \infty$)
3. Deze demping maximaal is voor de korte bodemgolven (voor $k \rightarrow \infty$ is T_{bed} minimaal).

B.2 Geulen met een lengteas evenwijdig aan de getijstroming

Uitgangspunt voor de stabiliteitsanalyse is de set vergelijkingen zoals afgeleid in Annex A voor de situatie zonder golven. Hierbij wordt voor de getijstroming de "far-field" benadering toegepast omdat de kopeffekten voor de onderliggende morfologische studie niet van belang zijn (zie par.2.3.2).

getijstroming:

$$u \frac{\partial u}{\partial x} = - \frac{g}{C^2} \left\{ \frac{|u|.u}{h} - \frac{|u_o|u_o}{h_o} \right\} \tag{B.24}$$

$$\frac{\partial uh}{\partial x} + \frac{\partial vh}{\partial y} = 0 \tag{B.25}$$

bodemveranderingen:

$$(1-\varepsilon.) \frac{\partial z_b}{\partial t} + \frac{\partial q_{b_x}}{\partial x} + \frac{\partial q_{b_y}}{\partial y} + \frac{\partial q_{s_x}}{\partial x} + \frac{\partial q_{s_y}}{\partial y} = 0 \tag{B.26}$$

transport:

$$q_{b_x} = m_b \, (u^2 + v^2).u \tag{B.27}$$

$$q_{b_y} = m_b \, (u^2 + v^2) \, v \tag{B.28}$$

$$q_{s_x} = \alpha_b \, q_x.C \tag{B.29}$$

$$q_{s_y} = \alpha_b \, q_y.C \tag{B.30}$$

sedimentconcentratie:

$$L_{A_x} \frac{dC}{dx} = C_e - C \tag{B.31}$$

$$L_{A_x} = \tilde{L} \frac{q_x}{w_s} \tag{B.32}$$

$$C_e = m_s \frac{|\alpha_b u|^3}{h} = \frac{f(u)}{h} \tag{B.33}$$

Linearisering om de ongestoorde kondities (zonder geul, index o) van B.24 en B.25 resulteert in (voor u > 0 in de positieve x-richting):

$$L_o \frac{\partial u}{\partial x} = \frac{U_o}{2} \left(\frac{h}{h_o} + 1\right) - u \qquad (B.34)$$

$$U_o \frac{\partial h}{\partial x} + h_o \frac{\partial u}{\partial x} + h_o \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \qquad (B.35)$$

Voor de gradiënten in bodemtransport geldt langs de langs symmetrie as van de kuil:

$$\frac{\partial q_{b_x}}{\partial x} = \frac{\partial q_{b_x}}{\partial u} \cdot \frac{\partial u}{\partial x} \qquad (B.36)$$

$$\frac{\partial q_{b_y}}{\partial y} = \frac{\partial q_{b_y}}{\partial v} \cdot \frac{\partial v}{\partial y} \qquad (B.37)$$

voor de som van beide gradiënten geldt na linearisering een eliminatie van $\partial v/\partial y$ m.b.v. B.35:

$$\frac{\partial q_{b_x}}{\partial x} + \frac{\partial q_{b_y}}{\partial y} = \left[\frac{\partial q_{b_x}}{\partial u} - \frac{\partial q_{b_y}}{\partial v}\right]_o \cdot \frac{\partial u}{\partial x} - \left[\frac{\partial q_{b_y}}{\partial v}\right]_o \frac{U_o}{h_o} \cdot \frac{\partial h}{\partial x} \qquad (B.38)$$

Voor de som van beide suspensietransport gradiënten geldt:

$$\frac{\partial q_{s_x}}{\partial x} + \frac{\partial q_{s_y}}{\partial y} = \alpha_b u h \frac{\partial C}{\partial x} \qquad (B.39)$$

hetgeen na linearisering overgaat in:

$$\frac{\partial q_{s_x}}{\partial x} + \frac{\partial q_{s_y}}{\partial y} = \alpha_s U_o h_o \frac{\partial C}{\partial x} \qquad (B.40)$$

Substitutie van B.38 en B.40 in B.26 levert tenslotte:

$$(1-\varepsilon_o) \frac{\partial z_b}{\partial t} + \left\{\left(\frac{\partial q_{b_x}}{\partial u}\right)_o - \left(\frac{\partial q_{b_y}}{\partial v}\right)_o\right\} \frac{\partial u}{\partial x} - \left(\frac{\partial q_{b_y}}{\partial v}\right)_o \frac{U_o}{h_o} \frac{\partial h}{\partial x} + \alpha_b U_o h_o \frac{\partial C}{\partial x} = 0 \qquad (B.41)$$

Voor de gelineariseerde concentratie vergelijking geldt (zie Annex B.1):

$$L_{A_o} \frac{\partial C}{\partial x} = \frac{1}{h_o} \left(\frac{\partial f}{\partial u}\right)_o (u-U_o) - \frac{C_o}{h_o} (h-h_o) - (C-C_o) \qquad (B.42)$$

Op een vergelijkbare wijze als is uitgevoerd in Annex B.1 kan het stelsel B.34, B.41 en B.42 met daarbij toepassing van $\partial z_b/\partial x = -\partial h/\partial x$ worden omgezet in 1 vergelijking voor de beschrijving van bodemniveau variaties:

$$\frac{\partial z_b}{\partial t} + C_b \frac{\partial z_b}{\partial x} + D \frac{\partial^2 z_b}{\partial x^2} + \lambda_1 \frac{\partial^2 z_b}{\partial x \partial t} + \lambda_2 \frac{\partial^3 z_b}{\partial x^3} + \lambda_3 \frac{\partial^3 z_b}{\partial x^2 \partial t} = 0 \qquad \text{(B.43)}$$

met, na toepassing van B.27, B.28 en B.33:

$$C_b = -\tfrac{1}{2} \frac{\alpha_b m_s}{1-\varepsilon_o} \frac{|U_o{}^3|}{h_o} \cdot U_o \qquad \text{(B.44)}$$

$$D = \frac{C^2}{2g} \frac{(q_{b_{x_o}} + q_{s_{x_o}})}{1-\varepsilon_o} \qquad \text{(B.45)}$$

$$\lambda_1 = L_o + L_{A_o} = \frac{C^2 h_o}{2g} + \tilde{L} \frac{U_o h_o}{w_s} \qquad \text{(B.46)}$$

$$\lambda_2 = \frac{q_{b_{x_o}}}{1-\varepsilon_o} \cdot \frac{L_o . L_{A_o}}{h_o} = \frac{q_{b_{x_o}}}{1-\varepsilon_o} \cdot \frac{C^2}{2g} \cdot \tilde{L} . \frac{U_o h_o}{w_s} \qquad \text{(B.47)}$$

$$\lambda_3 = L_o . L_{A_o} = \frac{C^2 h_o}{2g} \cdot \tilde{L} \frac{U_o h_o}{w_s} \qquad \text{(B.48)}$$

Na omkering van de x-as (x' = -x) zou vergelijking B.43 met dezelfde coefficiënten (afgeleid voor de situatie met U_o in de richting van de positieve x-as) ook voor de tegenovergestelde getijfase moeten gelden. Dit betekent dat de coefficiënten C_b, λ_1 en λ_2 (behorend bij de oneven afgeleiden naar x) voor de originele x-as en de tegenovergestelde getijfase (U_o in de richting van de negatieve x-as) van teken moeten omkeren.
Dit in tegenstelling tot D en λ_3.

Uitgaande van een symmetrisch getij (identieke eb en vloedfase) geldt dan gemiddeld over de gehele getijperiode:

$$\bar{C}_b = \bar{\lambda}_1 = \bar{\lambda}_2 = 0 \qquad \text{(B.49)}$$

zodat getijgemiddeld resulteert:

$$\frac{\partial z_b}{\partial t} + D \frac{\partial^2 z_b}{\partial x^2} + \lambda_3 \frac{\partial^2 z_b}{\partial x^2 \, \partial t} = 0 \qquad (B.50)$$

Een harmonische analyse uitgevoerd op een identieke manier als in Annex B.1 levert op:

$$\omega = - \frac{Dk^2}{\lambda_3 \; k^2 - 1} \cdot i \qquad (B.51)$$

hetgeen geen reëel deel bevat en daarmee aangeeft dat voor deze symmetrische getijkondities bodemverstoringen zich niet kunnen voortplanten.
Het imaginaire deel van ω representeert de dempingsfactor ($e^{+(Im(\omega).t}$) die negatief moet zijn voor dempende processen, d.w.z.:
demping als $\lambda_3 k^2 > 1$ ($D > 0$), hetgeen kan worden vertaald in:

$$L_{bed} \left(= \frac{2\pi}{\kappa}\right) < 2\pi \sqrt{L_o . L_{A_o}} \qquad (B.52)$$

of

$$L_{bed} < 2\pi \left(\frac{\tilde{L} \; C^2}{2g} \; \frac{U_o \; h^2_o}{w_s}\right)^{\frac{1}{2}} \qquad (B.53)$$

hetgeen inhoudt dat:

- alleen korte golven een dempend karakter hebben (bijv. voor $C = 60 \; m^{\frac{1}{2}}/s$, $h_o = 15$ m, $U_o = 0.5$ m/s, $\tilde{L} = 0.3$ en $w_s = 1.5$ cm/s geldt $L_{bed} < 3600$ m voor demping,
- lange bodemgolven een opslingerend karakter zullen vertonen,
- deze demping voor de situatie zonder suspensie naijling niet zou bestaan.