

waterloopkundig laboratorium  
delft hydraulics laboratory

2e EXEMPLAAR

kustmorfologie

numeriek model voor het berekenen van  
kustlijnveranderingen onder invloed van  
getij- en golfgedreven stroming (n-lijn model)

verslag onderzoek

AFGEHANDELD

R 1605 deel IV

december 1983

D 56

**tow**

toegepast onderzoek  
waterstaat

R1605-4

28 AUG. 1984

2e EXEMPLAAR

BIBLIOTHEEK

---

kustmorfologie

numeriek model voor het berekenen van  
kustlijnveranderingen onder invloed van  
getij- en golfgedreven stroming (n-lijn model)

verslag onderzoek

---

R 1605 deel IV

december 1983

D 56  
**tow**  
toegepast onderzoek  
waterstaat

## INHOUD

### Lijst van figuren

	blz.
1. <u>Inleiding</u> .....	1
1.1 Opdracht.....	1
1.2 Voorgeschiedenis.....	1
1.3 Opzet van het onderzoek.....	2
2. <u>Samenvatting, konklusies en aanbevelingen</u> .....	3
2.1 Samenvatting.....	3
2.2 Konklusies en aanbevelingen.....	5
3. <u>Mathematisch model</u> .....	7
3.1 Aannamen en vereenvoudigingen.....	7
3.2 Beschrijving van de waterbeweging.....	7
3.2.1 Impulsvergelijking.....	7
3.2.2 Aandrijvende kracht door golven.....	8
3.2.3 Aandrijvende kracht door getijstroom.....	10
3.2.4 Continuïteitsvergelijking.....	11
3.3 Beschrijving van het sedimenttransport.....	11
3.3.1 Transport in langsrichting.....	11
3.3.2 Transport in dwarsrichting.....	13
3.3.3 Continuïteitsvergelijking.....	16
4. <u>Numerieke berekeningsmethode</u> .....	17
4.1 Schematisatie van het kustgebied.....	17
4.2 Langsroom snelheidsverdeling.....	18
4.3 Dwarsdebiet.....	21
4.4 Het sedimenttransport.....	22
4.4.1 Transport in langsrichting.....	22
4.4.2 Transport in dwarsrichting.....	23
4.5 Bodemveranderingen.....	24
4.6 Begin- en randvoorwaarden.....	27

INHOUD (vervolg)

	blz.
5. <u>Uitgevoerde kustlijnberekeningen</u> .....	28
5.1 Inleiding .....	28
5.2 Aanzanding aan de loefzijde van een konstruktie (Proef 1).....	28
5.3 Erosie aan de lijzijde van een konstruktie (Proef 2).....	31
5.4 Vervorming van kustgebied met zandsuppletie (Proef 3).....	32
6. <u>Toetsing van de berekende verdeling van de langsstromsnelheid</u> .	34
6.1 Inleiding .....	34
6.2 Rechte kust met evenwijdige dieptelijnen .....	35
6.3 Kust met zandsuppletie .....	36

LITERATUUR

## LIJST VAN FIGUREN

- 1 Aanzanding aan loefzijde van konstruktie
- 2 Invloed keuze  $\Delta d$  op kustontwikkeling; dieptelijnen
- 3 Invloed keuze  $\Delta d$  op kustontwikkeling; dwarsprofielen
- 4 Verloop van sedimentatie en sedimenttransport in langsrichting
- 5 Invloed  $S_{\text{dwars}}$  op kustontwikkeling
- 6 Verloop van sedimentatie en sedimenttransport in langsrichting
- 7 Kustlijnveranderingen Pelnard-Considère
- 8 Verloop van sedimentatie in langsrichting
- 9 Erosie aan lijzijde van konstruktie; geen diffractie
- 10 Erosie aan lijzijde van konstruktie; diffractie
- 11 Verloop van erosie en sedimenttransport in langsrichting
- 12 Vervorming van kust met zandsuppletie
- 13 Invloed keuze  $\Delta d$  op kustontwikkeling; dieptelijnen
- 14 Invloed keuze  $\Delta d$  op kustontwikkeling; dwarsprofielen
- 15 Verloop van sedimentatie/erosie en sedimenttransport in langsrichting
- 16 Invloed  $S_{\text{dwars}}$  op kustontwikkeling
- 17 Eindige elementen rooster FRIMO; rechte kust
- 18 Stroomlijnen golfgedreven stroming; rechte kust
- 19 Snelheidsverdeling golfgedreven stroming; rechte kust
- 20 Eindige elementen rooster FRIMO; kust met suppletie
- 21 Stroomlijnen golfgedreven stroming; kust met suppletie
- 22 Snelheidsverdeling golfgedreven stroming; kust met suppletie
- 23 Stroomlijnen getijgedreven stroming; kust met suppletie
- 24 Snelheidsverdeling getijgedreven stroming; kust met suppletie
- 25 Stroomlijnen getij- en golfgedreven stroming; kust met suppletie
- 26 Snelheidsverdeling getij- en golfgedreven stroming; kust met suppletie

## KUSTMORFOLOGIE

### NUMERIEK MODEL VOOR HET BEREKENEN VAN KUSTLIJNVERANDERINGEN ONDER INVLOED VAN GETIJ- EN GOLFGEDREVEN STROMING (n-lijn model)

#### 1. Inleiding

##### 1.1 Opdracht

In het kader van het Toegepast Onderzoek Waterstaat-Kustonderzoek houdt de werkgroep Kustmorfologie zich bezig met het operationaliseren van bestaande en nog te ontwikkelen kennis over kustmorfologische processen. Het uiteindelijke doel is het maken van wiskundige modellen waarmee de morfologische ontwikkelingen in een kustgebied berekend kunnen worden. Tot voor kort betrof dit alleen de zogenaamde lijnmodellen ([1]). In 1982 heeft de Stuurgroep van het TOW-Kustonderzoek aan de werkgroep Kustmorfologie het fiat gegeven om met de ontwikkeling van een morfologisch veldmodel te beginnen. Als voorwaarde werd gesteld dat de ontwikkeling van de lijnmodellen eerst zo goed mogelijk moet worden afgerond.

Eén van deze lijnmodellen is het n-lijn model. Hiermee kunnen morfologische veranderingen worden berekend in een kustgebied ten gevolge van door golven en getij aangedreven langsstromen. In dit verslag worden de resultaten van het onderzoek naar de ontwikkeling van het n-lijn model beschreven. Het onderzoek werd uitgevoerd in 1982 door ir. S. Boer van het Waterloopkundig Laboratorium, die tevens de auteur is van dit verslag. De berekeningen met het waterbewegingsmodel FRIMO werden uitgevoerd door dr. ir. H.J. de Vriend.

##### 1.2 Voorgeschiedenis

Al in 1975 werden door de Technische Hogeschool Delft een tweetal programmapakketten ontwikkeld ([2]) waarmee morfologische veranderingen in een kustgebied berekend kunnen worden. Het eerste deel (KC) berekent de grootte van de sedimenttransporten en de gevoeligheid voor kustlijnverdraaiingen uitgaande van een gemiddeld golfklimaat. Het tweede deel (KL) berekent de kustlijnveranderingen volgens de één-lijn theorie.

Met dit programmapakket is het echter niet mogelijk om het getij in rekening te brengen, omdat voor de berekening van het sedimenttransport de formule van het CERC wordt toegepast. In deze formule wordt aangenomen, dat het sedimenttransport

in langsrichting recht evenredig is met een gedeelte van het energietransport door golven. De door de brekende golven opgewekte brandingsstroom wordt bij deze berekeningsmethode niet expliciet in beschouwing genomen.

Daarom werd in 1978 een aanzet gegeven voor de ontwikkeling van een numeriek model, het n-lijn model, waarmee morfologische veranderingen door zowel golven als stroming in rekening kunnen worden gebracht ([3]). In de afgelopen jaren vond bij Rijkswaterstaat, Adviesdienst Hoorn een verdere ontwikkeling van het model plaats ([4]). Bij deze ontwikkeling heeft vooral de interactie tussen de brandingsstroom en de getijstroom als functie van de getijfase de aandacht gekregen. Bij het onderhavige onderzoek naar de ontwikkeling van het n-lijn model, waarvoor de Rijkswaterstaat-versie van het model als uitgangspunt is genomen, heeft het gebruik van het n-lijn model voor het voorspellen van bodemveranderingen centraal gestaan.

### 1.3 Opzet van het onderzoek

Het verslag van het onderzoek omvat de volgende onderdelen:

- samenvatting, konklusies en aanbevelingen. (hoofdstuk 2)
- beschrijving van het mathematisch model (hoofdstuk 3)
- beschrijving van het numeriek model (hoofdstuk 4)
- uitgevoerde kustlijnberekeningen (hoofdstuk 5)
- toetsing van de berekende verdeling van de langsstroomsnelheid (hoofdstuk 6).

## 2. Samenvatting, konklusies en aanbevelingen

### 2.1 Samenvatting

In dit verslag wordt het onderzoek beschreven dat in het kader van het Toegepast Onderzoek Waterstaat - Kustonderzoek onder verantwoordelijkheid van de werkgroep Kustmorfologie bij het Waterloopkundig Laboratorium plaatsvond naar de ontwikkeling van het n-lijn programma. Met dit programma kunnen de morfologische veranderingen worden berekend in een kustgebied onder invloed van getij- en golfgedreven stromingen.

De door golven veroorzaakte morfologische processen spelen zich voornamelijk af in de brandingszone, het gebied tussen de kustlijn en de brekerlijn, waar scheef invallende golven een langsstroom aandrijven. De invloed van het getij is vooral buiten de brandingszone merkbaar. In dit gebied beïnvloeden de golven de getijstroom via de verandering in de bodemwrijving. De door de golven en het getij opgewekte stroming transporteert het zand, dat voornamelijk door de orbitaalbeweging van de golven van de bodem wordt opgewoeld. Voor het berekenen van de grootte van de stroomsnelheid en het sedimenttransport is kennis over de lokale golfomstandigheden (golfhoogte, golfperiode en golfrichting) noodzakelijk. De lokale golfomstandigheden worden beïnvloed door refractie, shoaling, diffractie en reflectie van golven. In het n-lijn programma wordt alleen rekening gehouden met refractie en shoaling van golven. Toegepast wordt een benadering, waarbij de lokale golfeigenschappen gerelateerd worden aan de golven op diep water, onafhankelijk van wat er in de omgeving van het beschouwde punt gebeurt. Diffractie-effecten kunnen in rekening worden gebracht door middel van het variëren van de golfrandvoorwaarden langs de zeerland van het beschouwde gebied.

De waterbeweging wordt berekend door de impulsvergelijking in langsrichting te beschouwen. Daarbij wordt alleen rekening gehouden met de door golven en stroming veroorzaakte bodemschuifspanning volgens Bijker [5], de aandrijvende kracht door golven en het getijverhang. Aangenomen wordt dat de variatie van de golfomstandigheden in langsrichting gering is, zodat voor de berekening van de aandrijvende kracht alleen met de schuifspanningscomponent van de stralingsdruk rekening gehouden hoeft te worden. Hierbij wordt voor de verdeling van de onregelmatige golven binnen de brekerzone uitgegaan van de theorie van Battjes ([6]).



Het getijverhang wordt bepaald door er vanuit te gaan dat het getijdebiet in langsricting niet varieert. Bij de berekening wordt aangenomen dat er geen dwarsverhangen optreden, zodat in een doorsnede loodrecht op de kust de waterspiegel horizontaal is.

De sedimenttransporten in langsricting worden berekend met de transportformule van Bijker ([7]). In dwarsricting kunnen transporten optreden doordat de lokale helling van het kustprofiel afwijkt van de evenwichtsprofielhelling ([8]). De grootte van dit dwarstransport kan worden berekend met de theorie van Swart ([9]).

Bovendien zal als gevolg van een niet-uniforme situatie in langsricting de grootte van het langsdebiet variëren. Op basis van de continuïteit van water kunnen dwarsdebieten worden bepaald. Aangenomen wordt dat dit dwarsdebiet sediment in dwarsricting transporteert. De sedimentconcentratie wordt bepaald uit de grootte van het langsdebiet en het langstransport. Uitgaande van de continuïteitsvergelijking voor het sediment kunnen de bodemveranderingen worden berekend.

Voor de berekening wordt het kustgebied geschematiseerd door middel van een aantal dwarsdoorsneden op onderling gelijke afstand. In deze dwarsdoorsneden is de ligging van de dieptelijnen t.o.v. een referentie-as bekend. Bij de schematisatie wordt van een beperkt aantal dieptelijnen uitgegaan. Enerzijds moet de bodem van het beschouwde gebied continue aflopend geschematiseerd worden, zodat het daardoor niet mogelijk is om geulen en banken weer te geven. Anderzijds maakt de sterke schematisatie van de fysische processen in het n-lijn model, het niet mogelijk om de optredende verschijnselen in detail weer te geven. De grootte van de onderlinge afstand tussen de dieptelijnen ligt in de orde van enkele meters.

In de transportdoorsneden, gelegen tussen de bovengenoemde profieldoorsneden, worden het langsdebiet en de grootte van het sedimenttransport berekend. Met behulp van de optredende sedimenttransporten en langsdebieten in twee opéénvolgende transportdoorsneden wordt de grootte van het dwarsdebiet en het dwarstransport in de tussenliggende profieldoorsnede bepaald.

Per profieldoorsnede worden de bodemveranderingen bepaald voor het gebied tussen twee opéénvolgende dieptelijnen. Op deze manier ontstaat een discontinu dwarsprofiel. Voor het voortzetten van de berekening op het volgende tijdstip vindt

er een vereffening plaats. De bij deze vereffening geïntroduceerde fout wordt gekorrigeerd per profieldoorsnede, uitgaande van de sedimentbalans.

Met het n-lijn programma zijn berekeningen uitgevoerd voor verschillende situaties. Nagegaan werd de invloed van de gehanteerde schematisaties op de bodemontwikkeling. Bovendien werden vergelijkende berekeningen gemaakt met het waterbewegingsmodel FRIMO om een indruk te krijgen van de nauwkeurigheid van de berekende stroomsnelheden.

## 2.2 Konklusies en aanbevelingen

Naar aanleiding van het uitgevoerde onderzoek kunnen de volgende konklusies worden getrokken met betrekking tot het n-lijn model:

- . kustlijnveranderingen worden sterk beïnvloed door de toegepaste schematisatie. De snelheid waarmee verstoringen zich langs de kust voortplanten is afhankelijk van het aantal dieptelijnen dat bij de schematisatie van het dwarsprofiel wordt toegepast.
- . bodemveranderingen worden beïnvloed door dwarsstromen als gevolg van niet-uniforme situaties in langsrichting (b.v. gebogen kust, gesloten zijranden).
- . in het n-lijn model blijft de invloed van een diskontinue randvoorwaarde op het stroombeeld beperkt tot de direkte omgeving van de rand. De FRIMO berekeningen geven echter aan, dat de versturende invloed van een diskontinue randvoorwaarde zich verder dan de direkte omgeving van de rand uitstrekt.
- . voor de situatie met een gebogen kust onderschat het n-lijn model de grootte van de optredende stroomsnelheden binnen de brandingszone. Dit wordt veroorzaakt doordat bij de berekening van de aandrijvende kracht door golven de variatie in de golfomstandigheden langs de kust niet in rekening wordt gebracht; dit betekent dat de invloeden van de gradiënten in de normale stralingsdrukcomponenten en van de verschillen in golfopzet op de langsstroom worden verwaarloosd.
- . diffraktie-effekten kunnen in het n-lijn model niet rechtstreeks in rekening worden gebracht. Wel bestaat de mogelijkheid diffraktie-effekten door variatie van de golfrandvoorwaarden langs de kust mee te nemen. Echter, zolang bij de berekening van de aandrijvende kracht geen rekening gehouden wordt met

de variatie van de golfomstandigheden in langsrichting, wordt het stroombeeld onjuist weergegeven (zie ook vorige opmerking).

- de berekening voor de situatie van een kust met een in zee vooruitgeschoven zandsuppletie toont aan, dat de kontraktie van een langstreckende getijstroom onjuist wordt weergegeven. In het n-lijn model wordt bij een veranderend doorstroomoppervlak de snelheidsverdeling evenredig over het doorstroomoppervlak aangepast (verhang in langrichting is in elk punt van de dwarsdoorsnede gelijk). De FRIMO berekening geeft aan dat rond de kop van de zandsuppletie op ondiep water de verstoring van het stroombeeld groter is dan op dieper water.

Resumerend kan worden gesteld dat het principe van horizontaal twee-dimensionale sedimenttransportberekeningen op basis van de lokale golf- en stromingsomstandigheden een gezonde basis lijkt, met mogelijkheden voor een ruimere toepasbaarheid dan de CERC-formule in het KC/KL programma. De berekening van het twee-dimensionale stroombeeld onder invloed van golven en getij, zoals die in het huidige n-lijn model is opgenomen, heeft echter een dermate zwakke theoretische basis, dat de toepasbaarheid van het model op andere dan vrijwel uniforme en vrijwel rechte kusten twijfelachtig is. Overwogen moet worden of er behoefte is aan een model, dat de sterke punten van het KC/KL model (eenvoud bij het berekenen van kustlijnveranderingen) en het n-lijn model (lokale transportberekening) eventueel in combinatie met een uitgebreider stromingsmodel, in zich verenigt.

### 3. Mathematisch model

#### 3.1 Aannamen en vereenvoudigingen

De volgende aannamen en vereenvoudigingen zijn toegepast voor de mathematische beschrijving van de waterbeweging en het sedimenttransport:

- stromingstoestand is (kwasi-)stationair en twee-dimensionaal horizontaal
- convectieve en laterale uitwisseling worden verwaarloosd
- verdeling van de langsstroomsnelheid wordt berekend met de impulsvergelijking van het water in langsrichting
- de optredende dwarsstroom wordt berekend uit de continuïteitsvergelijking van het water
- golfopzet wordt verwaarloosd
- de aandrijvende kracht door golven wordt berekend uit de gradiënt, loodrecht op de kust, van de schuifspanningscomponent van de stralingsdruk
- bij het in rekening brengen van de getij-invloed wordt aangenomen dat in een doorsnede loodrecht op de kust het getijverhang in langsrichting constant is
- het sedimenttransport past zich momentaan aan de lokale omstandigheden aan.

#### 3.2 Beschrijving van de waterbeweging

##### 3.2.1 Impulsvergelijking

Bij het berekenen van de waterbeweging wordt alleen de impulsvergelijking in langsrichting beschouwd (figuur 3.1):

$$ru_{x'} - g \frac{\partial \zeta}{\partial x'} = - F_{x'} \quad (3.1)$$

waarin:

$u_{x'}$  = diepte gemiddelde snelheidscomponent in  $x'$ -richting

$g$  = versnelling van de zwaartekracht

$\zeta$  = waterspiegelniveau ten opzichte van de gemiddelde waterstand

$F_{x'}$  = aandrijvende term door golven

$x'$  = lokale kustrichting (figuur 3.1)

De bodemschuifspanningsfactor  $r$  is op de volgende wijze gedefinieerd ([5]):

$$r = \frac{g u_{x'}'}{h C^2} \left\{ 0.75 + 0.45 \left( \xi \frac{\hat{u}_o}{u_{x'}'} \right)^{1.13} \right\} \quad (3.2)$$

waarin:

$h$  = lokale waterdiepte

$C$  = Chézy wrijvingscoëfficiënt ( $= 18 \log \frac{12 h}{r_k}$ )

$r_k$  = bodemruwheid

$\xi = (f_w / 2g)^{\frac{1}{2}} C$

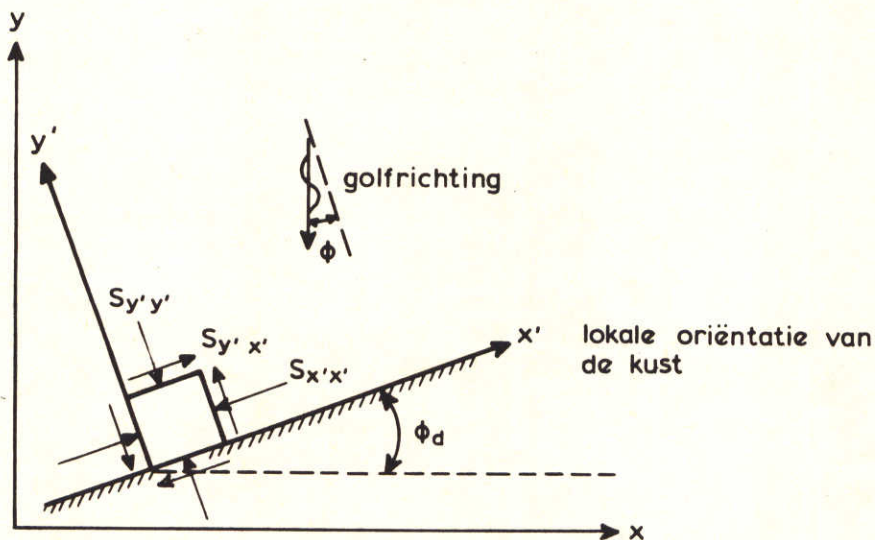
$f_w$  = wrijvingscoëfficiënt ten gevolge van golven  
 ( $= \exp [-5.977 + 5.213 (a/r_k)^{-0.194}]$ )

$a$  = amplitude van de orbitaalbeweging bij de bodem

$\hat{u}_o$  = amplitude van de orbitaalsnelheid bij de bodem

### 3.2.2 Aandrijvende kracht door golven

De door de golven veroorzaakte aandrijvende kracht kan worden berekend uit de stralingsdrukcomponenten (figuur 3.1):



Figuur 3.1

In het n-lijn model wordt alleen rekening gehouden met de stralingsdrukcomponenten evenwijdig aan de kustrichting. Daarbij wordt stilzwijgend aangenomen dat de variatie van de golfomstandigheden klein is, zodat de invloed van de component  $S_{x'x'}$ , verwaarloosd kan worden. Bovendien wordt de invloed van golfopzet op de lokale waterdiepte buiten beschouwing gelaten, zodat geen rekening gehouden wordt met het verhang in langsrichting als gevolg van verschillen in golfopzet langs de kust. De aandrijvende term door golven is dan:

$$F_{x'} = \frac{1}{\rho h} \frac{\partial}{\partial y'} (S_{y'x'}) = \frac{1}{\rho h} \frac{\partial}{\partial y} (S_{y'x'}) (\cos\phi_d)^{-1} \quad (3.3)$$

waarin:

$S_{y'x'}$  = schuifspanningscomponent van de stralingsdruk (=  $\frac{1}{2} E \sin(2\phi)$ )

E = energiedichtheid van golven

n = verhouding tussen groeps- en voortplantingssnelheid van golven  
(=  $\frac{1}{2} [1 + 2kh / \sinh(2kh)]$ )

k = golfgetal (=  $2\pi/\lambda$ )

$\lambda$  = golflengte

$\phi$  = golfinvalshoek t.o.v. kustoriëntatie

De aandrijvende kracht door golven heeft voornamelijk invloed op het stroombeeld in en net buiten de brekerzone. De grootte is een functie van de lokale golfparameters. Bij het berekenen van de lokale golfparameters wordt uitgegaan van onregelmatige golven. In [6] wordt een beschrijving gegeven over het gedrag van onregelmatige golven. Er wordt gebruik gemaakt van een fictieve golfhoogte  $H_f$ , die kan worden berekend met shoaling en refractie:

$$H_f^{-2} = \frac{1}{2n} \frac{c_0}{c} \frac{\cos\phi_0}{\cos\phi} H_0^{-2} \quad (3.4)$$

waarin:

$H_f^{-2}$  = "mean-square"-waarde van de fictieve golfhoogte

$H_0^{-2}$  = "mean-square"-waarde van de diep water golfhoogte.

c = golfvoortplantingssnelheid.

Aangenomen wordt dat de fictieve golfhoogte  $H_f$  Rayleigh-verdeeld is en dat de lokale golfhoogte kleiner dan of gelijk is aan  $H_{br}$ , waarvoor geldt:

$$H_{br} = \gamma h_{br} \quad (3.5)$$

waarin:

$\gamma$  = brekerindex

$h_{br}$  = brekerdiepte

Afgeleid kan worden dat voor de tijdsgemiddelde waarde van de hoogte van onregelmatige golven geldt:

$$\bar{H}^2 = [1 - \exp(-\gamma^2 h^2 / \bar{H}_f^2)] \bar{H}_f^2 \quad (3.6)$$

en

$$\bar{H} = \left(\frac{\pi}{2}\right)^{\frac{1}{2}} (\bar{H}_f^2)^{\frac{1}{2}} \text{erf}[\gamma h / (\bar{H}_f^2)^{\frac{1}{2}}] \quad (3.7)$$

Voor het berekenen van de lokale golfvalshoek wordt ervan uitgegaan dat geldt:

$$\frac{\sin\phi}{c} = \text{constant} \quad (3.8)$$

waarin:

$\phi$  = golfvalshoek t.o.v. de kustoriëntatie

$c$  = voortplantingssnelheid golven (=  $\lambda/T$ )

$\lambda$  = golflengte

$T$  = golfperiode.

Dit betekent in feite dat wordt uitgegaan van rechte, evenwijdige dieptelijnen. In het algemeen zal dit niet het geval zijn en worden de fouten, die met bovengenoemde benadering worden geïntroduceerd, verwaarloosd.

### 3.2.3 Aandrijvende kracht door getijstroom

Bij het berekenen van de aandrijvende kracht door het getij wordt verondersteld dat in een doorsnede loodrecht op de kust het verhang van de waterspiegel in langsrichting door het getij overal gelijk is:

$$\frac{\partial p}{\partial y} = 0 \quad (3.9)$$

In het n-lijn model wordt bij het berekenen van het getijverhang aangenomen dat het totale getijdebiet  $Q_{\text{getij}}$  in het beschouwde gebied, in langsrichting niet verandert:

$$\frac{\partial p}{\partial x} = f(x) \quad (3.10)$$

zodanig dat geldt:

$$\frac{\partial Q_{\text{getij}}}{\partial x} = 0 \quad (3.11)$$

De aandrijvende kracht door het getij is dan:

$$g \frac{\partial \zeta}{\partial x'} = - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x'} = - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} \left( \frac{dx}{dx'} \right) \quad (3.12)$$

### 3.2.4 Continuïteitsvergelijking

Tengevolge van een niet-uniforme brandingsstroom in langsrichting treedt er een stroming in dwarsrichting op. Deze kan worden berekend uitgaande van de continuïteitsvergelijking van water:

$$\frac{\partial}{\partial x} (hu_x) + \frac{\partial}{\partial y} (q_{\text{dwars}}) = 0 \quad (3.13)$$

waarin:

$h$  = lokale waterdiepte

$u_x$  = component van  $u_x$ , in x-richting ( $= u_x \frac{dx}{dx'}$ )

$q_{\text{dwars}}$  = dwarsdebiet in y-richting

## 3.3 Beschrijving van het sedimenttransport

### 3.3.1 Transport in langsrichting

Het sedimenttransport in langsrichting wordt berekend met de transportformule van Bijker ([7]). De bodemtransportformule voor golven en stroom luidt:

$$S_b = b D_{50} \frac{u_{x'}}{C} g^{\frac{1}{2}} \exp \left[ \frac{-0,27 D_{50} C^2}{\mu u_{x'}^2 \left\{ 1 + \frac{1}{2} \left( \xi \frac{u_{x'}}{u_{x'}} \right)^2 \right\}} \right] \quad (3.14)$$

waarin:

$S_b$  = bodemtransport

$b$  = dimensieloze coëfficiënt

$D_{50}$  = 50% korreldiameter

$u_{x'}$  = diepte gemiddelde snelheidscomponent in x'-richting

$C$  = Chézy coëfficiënt

$r_k$  = bodemruwheid

$h$  = waterdiepte

$g$  = versnelling van de zwaartekracht



$\Delta$  = relatieve dichtheid van het bodemmateriaal

$\mu$  = ribbelfactor

$$= \left[ \frac{C}{C_{D90}} \right]^{3/2} \quad (3.15)$$

$$C_{D90} = 18 \log \left( \frac{12 h}{D_{90}} \right) \quad (3.16)$$

$D_{90}$  = 90% korreldiameter

$$\xi = C(f_w/2g)^{1/2}$$

$$f_w = \exp [-5,977 + 5,213 \left( \frac{a_o}{r_k} \right)^{-0,194}] \quad (3.17)$$

$a_o$  = amplitude van de orbitaalbeweging bij de bodem

$\hat{u}_o$  = amplitude van de orbitaalsnelheid bij de bodem

De berekening van het suspensietransport is analoog aan die volgens Einstein.

Voor het totale suspensietransport kan worden berekend:

$$S_{sus} = 1,83 S_b \left[ I_1 \ln \left( \frac{33h}{r_k} \right) + I_2 \right] \quad (3.18)$$

waarin:

$$I_1 = R \int_A^1 \left( \frac{1-y}{y} \right)^{z_*} \cdot dy \quad (3.19)$$

$$I_2 = R \int_A^1 \left( \frac{1-y}{y} \right)^{z_*} \ln y \cdot dy \quad (3.20)$$

$$y = z/h \quad (3.21)$$

$$A = \frac{r_k}{h} \quad (3.22)$$

$$R = \frac{0,216 A^{(z_*-1)}}{(1-A)^{z_*}} \quad (3.23)$$

$$z_* = \frac{w}{\kappa u_*} \quad (3.24)$$

$$u_* = g^{1/2} \cdot \frac{u_{x'}}{C} \left[ 1 + \frac{1}{2} \left( \xi \frac{\hat{u}_o}{u_{x'}} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (3.25)$$

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

$w$  = valsnelheid van een korrel

waarvoor geldt ([9]):

$$\log \frac{1}{w} = 0.447 (\log D_{50})^2 + 1.961 (\log D_{50}) + 2.731 \quad (3.26)$$

bij een watertemperatuur van 20° C.

Het totale sedimenttransport is gelijk aan de som van bodem- en suspensietransport:

$$S_{\text{totaal}} = S_b + S_{\text{sus}} \quad (3.27)$$

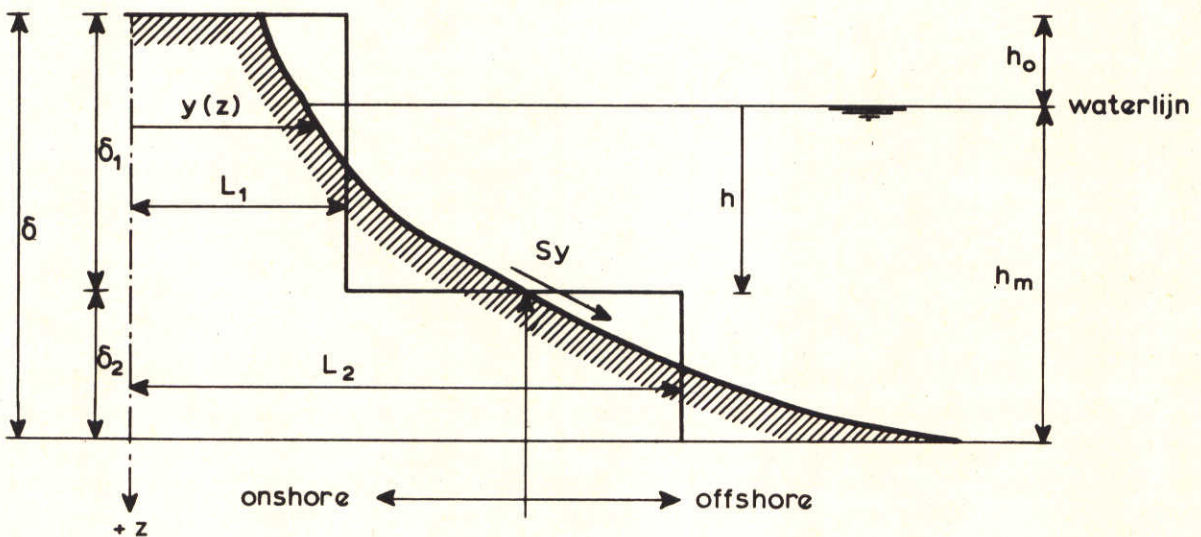
De gemiddelde sedimentconcentratie in suspensie wordt berekend uit:

$$c = \frac{S_{\text{sus}}}{hu_x} \quad (3.28)$$

### 3.3.2 Transport in dwarsrichting

#### . afwijkende dwarsprofielhellingen

Voor de berekening van het dwarstransport op een zekere diepte  $h$  is door Bakker [8] voorgesteld het kustprofiel te schematiseren in twee delen: het "onshore" profiel en het "offshore" profiel (figuur 3.2).



Figuur 3.2

Er wordt aangenomen dat het transport tussen het on- en offshoreprofiel beschreven kan worden door:

$$S_y = s_y (W - (L_2 - L_1)) \quad (3.29)$$

waarin:

$S_y$  = dwarstransport, positief in zeewaartse richting

$s_y$  = evenredigheidsconstante

$W$  = geschematiseerde evenwichtsafstand tussen het on- en offshore profiel

$(L_2 - L_1)$  = de momentane afstand tussen het on- en offshore profiel

Door Swart [9] zijn op grond van gegevens van eroderende kustprofielen formules afgeleid voor de berekening van  $W$  en  $s_y$  en daarmee van het dwarstransport in zeewaartse richting. In het n-lijn model wordt het dwarstransport, zowel in zeewaartse als in landwaartse richting, tengevolge van afwijkingen van het dwarsprofiel ten opzichte van het evenwichtsdwarsprofiel, berekend met de door Swart opgestelde formules. Het dwarsprofiel wordt door Swart in de volgende drie gebieden verdeeld:

(1) de "backshore", het gebied waar erosie plaatsvindt boven het punt van maximale golfoploop, (2) het D-profiel, het gebied waar zowel bodem- als suspensietransport optreedt en (3) een overgangsgebied waar alleen bodemtransport plaatsvindt in het gebied van begin van beweging.

De grenzen van het D-profiel worden als volgt gedefinieerd:

$h_0$  : de bovengrens van het D-profiel ten opzichte van stilwaterniveau, waarvoor wordt aangenomen dat dit een functie is van de maximale golfoploop.

Met behulp van proeven is gevonden:

$$\frac{h_0}{D_{50}} = 7644 - 7706 \exp(-0.143 \cdot 10^{-3} \frac{H_0^{0.488} T^{0.93}}{D_{50}^{0.786}}) \quad (3.30)$$

met  $H_0$  = golfhoogte op diep water

$T$  = golfperiode

$h_m$  : ondergrens van het D-profiel ten opzichte van stilwaterniveau, waarvoor wordt aangenomen dat dit punt de overgang is van het gebied van suspensie- en bodemtransport naar het gebied van alleen bodemtransport. Met behulp van proeven is gevonden:

$$\frac{h_m}{\lambda_0} = 0.0063 \exp\left(4.347 \frac{H_0^{0.473}}{T^{0.894} D_{50}^{0.093}}\right) \quad (3.31)$$

met:  $\lambda_0$  = golflengte op diep water

Voor de evenwichtsafstand  $W$  in vergelijking (3.29) geldt:

$$\frac{W}{W_r} = 0.7 \Delta_r + 1 + 3.97 \cdot 10^7 b D_{50}^2 \Delta_r^{1.36 \cdot 10^4 D_{50}} \quad (3.32)$$

waarin (zie figuur 3.2):

$$\Delta_r = (h_m - \delta_2) / \delta \quad (3.33)$$

$$\delta_2 = h_m - h \quad (3.34)$$

$$\delta = h_0 + h_m \quad (3.35)$$

$$b = \begin{cases} 1 & \text{voor } \Delta_r > 0 \\ 0 & \text{voor } \Delta_r \leq 0 \end{cases} \quad (3.36)$$

$$W_r = \delta / (2m_r) \quad (3.37)$$

$m_r$  = geschematiseerde evenwichtshelling van het D-profiel op de waterlijn, te berekenen uit:

$$m \frac{H_0}{r\lambda_0} = 1.51 \cdot 10^3 \left[ H_0^{0.132} D_{50}^{-0.447} \left( \frac{H_0}{\lambda_0} \right)^{-0.717} \right]^{-2.38} + 0.11 \cdot 10^{-3} \quad (3.38)$$

Voor de twee-dimensionale kustconstante  $s_y$  wordt van de volgende vergelijking uitgegaan:

$$s_y / s_{ym} = \begin{cases} \frac{0.93}{1 + 1.01X^{2.11}} + 0.07 & \text{voor } \delta_m > 0 \\ \frac{0.99}{1 + 1.14X^{2.11}} + 0.01 & \text{voor } \delta_m < 0 \end{cases} \quad (3.39)$$

waarin:

$$\delta_m = \delta_2 - \delta_{2m} \quad (3.40)$$

$$\frac{\delta_{2m}}{\delta} = 0.8 - 1.1 H_0^{-0.55} \left( \frac{H_0}{h_m} \right)^{2.69} \quad (3.41)$$

$$X = \Delta_m \left( \frac{H_0}{\lambda_0} \right)^{-1} \left( \frac{H_0}{h_m} \right)^2 \quad (3.42)$$

$$\Delta_m = |\delta_m / \delta| \quad (3.43)$$

$s_{ym}$  = de maximale waarde van  $s_y$ , te berekenen uit:

$$\ln \left( \frac{s_{ym}^T}{D_{50}} \right) = 10.7 - 28.9 \left[ H_0^{1.68} \left( \frac{H_0}{\lambda_0} \right)^{-0.9} D_{50}^{-1.29} \left( \frac{H_0}{h_m} \right)^{2.66} \right]^{-0.079} \quad (3.44)$$

. niet-uniforme brandingsstroom

Ten gevolge van een niet-uniforme brandingsstroom in langsrichting treden er stromingen in dwarsrichting op. Aangenomen wordt dat deze dwarsstromingen sediment in suspensie transporteren. Hiervoor geldt:

$$S_{dwars} = c q_{dwars} \quad (3.45)$$

waarin:

$c$  = gemiddelde sedimentconcentratie in suspensie volgens vergelijking (3.28)

$q_{dwars}$  = dwarsdebiet.

3.3.3 Continuïteitsvergelijking

Voor de continuïteitsvergelijking van het sediment geldt de volgende uitdrukking:

$$\frac{\partial}{\partial x} (S_x) + \frac{\partial}{\partial y} (S_y + S_{dwars}) - \frac{\partial z}{\partial t} = 0 \quad (3.46)$$

waarin:

$S_x$  = component in x-richting van het sedimenttransport in langsrichting,  
 $(S_x = S_{tot} \cdot \frac{dx}{dx'})$

$S_y$  = sedimenttransport in y-richting door afwijkende dwarsprofielhellingen

$S_{dwars}$  = sedimenttransport door dwarsdebiet

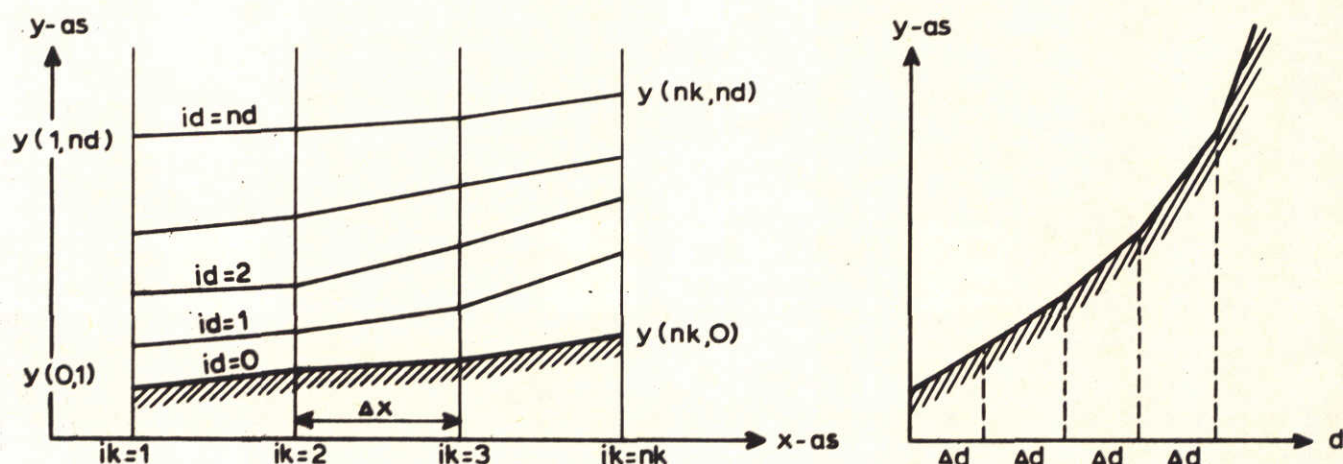
$z$  = lokale bodemligging.

In principe kunnen hiermee de lokale bodemveranderingen worden berekend.

#### 4. Numerieke berekeningsmethode

##### 4.1 Schematisatie van het kustgebied

Voor toepassing van het N-lijn model wordt het beschouwde kustgebied geschematiseerd door middel van een aantal profieldoorsneden op onderlinge afstand  $\Delta x$ , waarin de ligging van een aantal dieptelijnen ten opzichte van een referentielijn (x-as) als bekend wordt verondersteld (figuur 4.1).

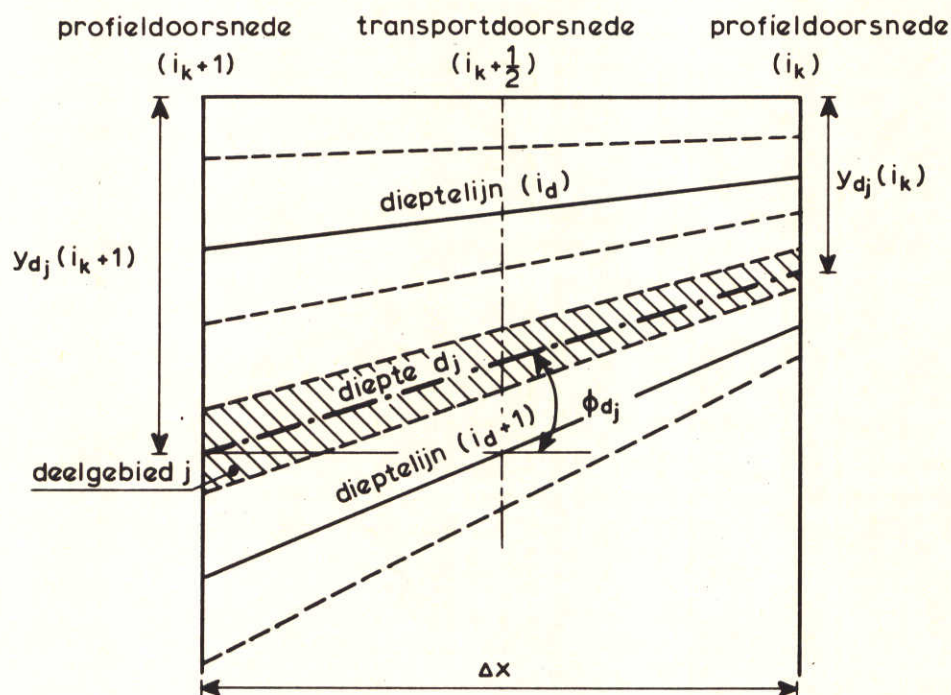


Figuur 4.1

De waterdiepten moeten als continu toenemend in zeewaartse richting worden geschematiseerd. Voor deze schematisatie met vaste diepteafstand  $\Delta d$  is gekozen omdat dit aansluit bij de opzet van de zogenaamde één-lijn theorie waarvan het n-lijn model min of meer een uitbreiding is. Op de praktische voor- en nadelen van deze schematisatie werd in [3] en [4] reeds ingegaan. Het weergeven van geulen en banken is niet mogelijk, terwijl bij het berekenen van de morfologische ontwikkeling overhangende profielen kunnen optreden. Vanwege het overheersende één-dimensionale karakter van het n-lijn model (hetgeen o.a. tot uitdrukking komt in de gebruikte vergelijkingen) is het wenselijk het aantal dieptelijnen beperkt te houden. De grootte van  $\Delta d$  ligt in de orde van enkele meters.

#### 4.2 Langsstroom snelheidsverdeling

Met behulp van vergelijking (3.1) wordt de snelheidsverdeling van de langsstroom berekend in de zogenaamde transportdoorsneden. Deze bevinden zich tussen twee opeenvolgende profieldoorsneden (figuur 4.2). Om het debiet en het sedimenttransport in langsrichting voldoende nauwkeurig te berekenen wordt het gebied tussen twee opéénvolgende, oorspronkelijke dieptelijnen onderverdeeld in een aantal deelgebieden.



Figuur 4.2

Per deelgebied kan de gemiddelde diepte  $d_j$  en de gemiddelde richting van de dieptelijnen  $\phi_{d_j}$  eenvoudig worden bepaald:

$$d_j = d_{i_d} + \frac{1}{2}j \Delta d' \quad (4.1)$$

waarin:

$d_j$  = gemiddelde diepte in deelgebied  $j$  ( $j = 1, 2, \dots, p$ )

$p$  = aantal deelgebieden

$\Delta d'$  = diepteverschil tussen twee opéénvolgende dieptelijnen ( $= \Delta d/p$ )

$d_{i_d}$  = diepte van oorspronkelijke dieptelijijn  $i_d$

en

$$\phi_{d_j} = \text{arctg} \left[ \frac{y_{d_j}(i_{k+1}) - y_{d_j}(i_k)}{\Delta x} \right] \quad (4.2)$$

waarin:

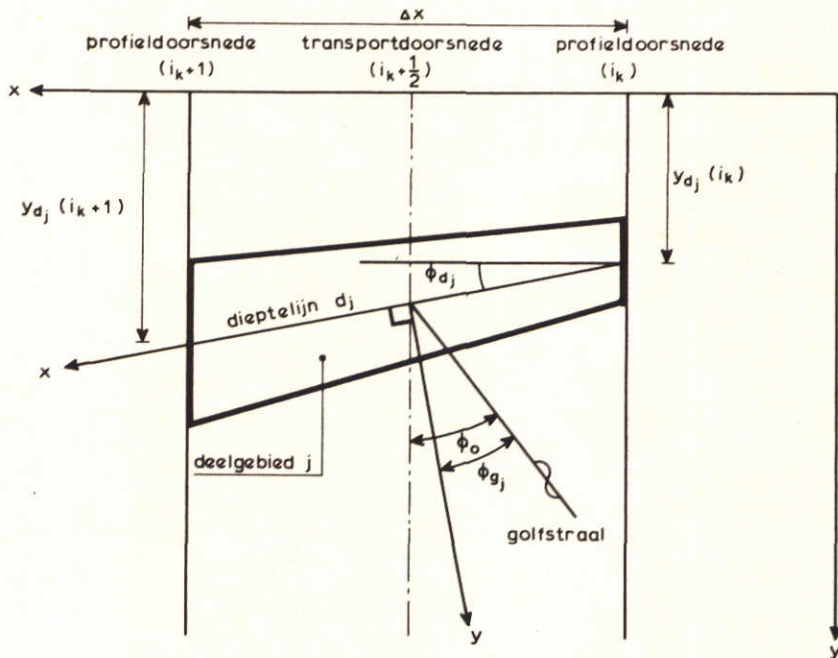
- $y_{d_j}(i_k)$  = afstand dieptelijn  $d_j$  t.o.v. x-as in profieldoorsnede  $i_k$
- $y_{d_j}(i_{k+1})$  = afstand dieptelijn  $d_j$  t.o.v. x-as in profieldoorsnede  $i_{k+1}$
- $\Delta x$  = afstand tussen twee opëenvolgende profieldoorsneden.

Per deelgebied wordt voor het berekenen van de aandrijvende kracht door golven  $\partial S_{y'x'} / \partial y'$  (vergel. 3.3) benaderd door het differentiaalquotiënt (figuur 4.3):

$$\frac{\Delta S_{y'x'}}{\Delta y'} = \frac{S_{yx'}(d_j + \Delta) - S_{y'x'}(d_j - \Delta)}{2\Delta} \cdot \frac{\Delta d'}{br_j} \cdot \cos \phi_{d_j} \quad (4.3)$$

waarin:

- $\Delta$  = infinitesimale toename van de diepte ( $\approx 0.05$  m)
- $\frac{\Delta d'}{br_j}$  = helling van deelgebied  $j$  in transportdoorsnede ( $i_k + \frac{1}{2}$ )
- $br_j$  = breedte van deelgebied  $j$  in transportdoorsnede ( $i_k + \frac{1}{2}$ )



Figuur 4.3



Voor het berekenen van de stralingsdrukcomponenten  $S_{y,x}(d_j \pm \Delta)$  wordt gebruik gemaakt van de lokale golfhoogte en -invalshoek, welke respectievelijk met de vergelijkingen (3.4) t/m (3.8) berekend kunnen worden. Als randvoorwaarde voor de golfinvalshoek per deelgebied geldt (figuur 4.3):

$$\phi_{gj} = \phi_o - \phi_{dj} \quad (4.4)$$

waarin:

$\phi_o$  = richting van de invallende golfstraal ten opzichte van de y-as, te bepalen uit de gerefracteerde golfrichting van het deelgebied (j+1) of uit de golfinvalshoek op diep water.

Voor het geval dat ook de getijstroom van invloed is, moet alvorens de langsstroomsnelheid onder invloed van golven en getij berekend kan worden, het getijverhang per transportdoorsnede bekend zijn. Aangenomen wordt dat de grootte van het totale getijdebiet  $Q_{\text{getij}}$  in langsrichting niet verandert (vergelijking (3.11)) en dat de waterspiegel in de transportdoorsnede horizontaal is (vergelijking (3.9)).

Daartoe wordt per deelgebied j de langsstroomsnelheid onder invloed van alleen het getij opgelost uit het volgende krachtenevenwicht:

$$\frac{g u_{xj}}{d_j C_j^2} \left\{ 0.75 + 0.45 \left( \xi \frac{\hat{u}_o}{u_{xj}} \right)^{1.13} \right\} u_{xj} - \frac{1}{\rho} \left[ \frac{dp}{dx} \right]_{i_k + \frac{1}{2}} = 0 \quad (4.5)$$

Omdat de grootte van de optredende bodemwrijving door golven en stroom mede bepaald wordt door de langsstroomsnelheid kan het getijverhang, waarbij geldt dat  $Q_{\text{getij}}$  konstant is, alleen iteratief worden benaderd. Als beginschatting van het getijverhang wordt geen rekening gehouden met golfinvloeden zodat geldt:

$$\frac{1}{\rho} \left[ \frac{dp}{dx} \right]_{i_k + \frac{1}{2}} = \frac{g Q_{\text{getij}}^2}{\left( \sum_{j=1}^n C_j h_j^{3/2} br_j \right)^2}$$

waarin:

n = totale aantal deelgebieden

Nadat op de bovenstaande manier het getijverhang (binnen een nauwkeurigheid van 1 ‰) is bepaald, kan de aandrijvende kracht van het getij per deelgebied met behulp van vergelijking (3.12) worden berekend. Hierbij geldt dat:

$$\frac{dx}{dx'} = \cos \phi_{d_j} \quad (4.7)$$

De grootte van de langsstroomsnelheid  $u_{x_j}$  onder invloed van zowel golven als getij kan uit het volgende krachtenevenwicht worden berekend (vergelijking (3.1)):

$$\frac{g u_{x_j}^i}{d_j C_j^2} \left\{ 0.75 + 0.45 \left( \xi \frac{\hat{u}_o}{u_{x_j}'} \right)^{1.13} \right\} - \frac{1}{\rho} \left[ \frac{dp}{dx} \right]_{i_k + \frac{1}{2}} \cos \phi_{d_j} + \frac{1}{\rho d_j} \left[ \frac{\Delta S_{y'x'}}{\Delta y'} \right]_j = 0 \quad (4.8)$$

Voor het oplossen van de snelheden  $u_{x_j}$  en  $u_{x_j}'$ , respectievelijk uit vergelijking (4.5) en (4.8), wordt in het n-lijn programma de methode van Newton Raphson toegepast.

### 4.3 Dwarsdebiet

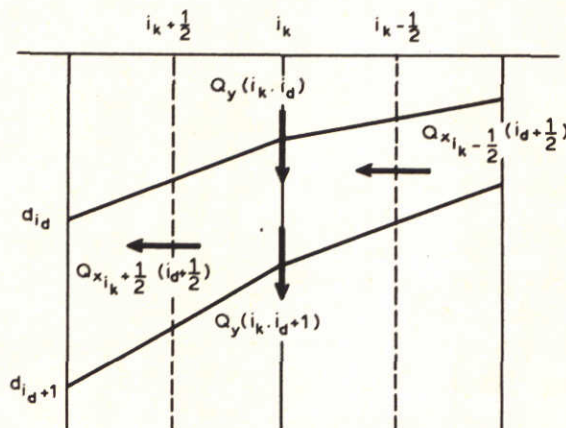
Voor het debiet per deelgebied  $j$  geldt

$$Q_j = b r_j u_{x_j}' d_j \quad (b r_j \cos \phi_{d_j}) \quad (\text{m}^3/\text{s}) \quad (4.9)$$

Voor het debiet tussen twee opéénvolgende dieptelijnen geldt

$$Q_{x_{i_k + \frac{1}{2}}} (i_{d + \frac{1}{2}}) = \sum_{j=1}^P Q_j \quad (\text{m}^3/\text{s}) \quad (4.10)$$

De grootte van het optredende dwarsdebiet kan worden berekend door het beschouwen van de continuïteit van het water in het gebied dat begrensd wordt door twee opéénvolgende transportdoorsneden en twee opéénvolgende dieptelijnen (figuur 4.4):



Figuur 4.4

Voor het dwarsdebiet over dieptelijn ( $i_d+1$ ) geldt:

$$Q_y(i_k, i_d+1) = Q_{x_{i_k-\frac{1}{2}}}(i_d+\frac{1}{2}) - Q_{x_{i_k+\frac{1}{2}}}(i_d+\frac{1}{2}) + Q_{y_{i_k}}(i_d) \quad (4.11)$$

Daarbij geldt als randvoorwaarde dat:

$$Q_y(i_k, i_d=0) = 0 \quad (4.12)$$

#### 4.4 Het sedimenttransport

##### 4.4.1 Transport in langsricting

Het sedimenttransport in langsricting wordt per deelgebied  $j$  berekend met de transportformule van Bijker (paragraaf 3.3.1):

$$S_{totj} = S_{bj} + S_{susj} \quad (4.13)$$

Hierbij wordt gebruik gemaakt van de per deelgebied  $j$  berekende stroomsnelheid in langsricting,  $u_{xj}$  (paragraaf 4.2). De uitwijking van de orbitaalbeweging  $a$  en de horizontale amplitude van de orbitaalsnelheid  $\hat{u}_o$  kunnen per deelgebied als functie van de golfhoogte  $\bar{H}$  (vergelijking(3.7)) en de golfperiode worden berekend:

$$a_j = \frac{\hat{u}_{oj} T}{2\pi} \quad (4.14)$$

en

$$\hat{u}_{oj} = \frac{\pi \bar{H}_j}{T \sinh\left(\frac{2\pi d_j}{c_j T}\right)} \quad (4.15)$$

Voor het langstransport per deelgebied  $j$  geldt:

$$S_{xj} = S_{totj} (br_j \cos \phi_{dj}) \quad (m^3/s) \quad (4.16)$$

Voor het langstransport tussen twee opëenvolgende dieptelijnen geldt:

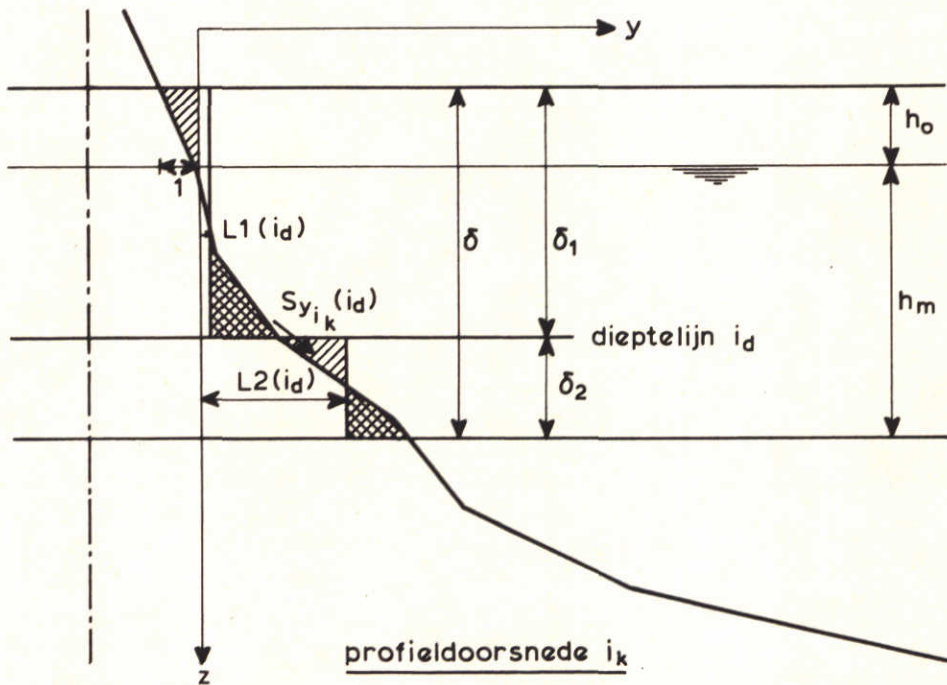
$$S_{x_{i_k+\frac{1}{2}}} = \sum_{j=1}^p S_{xj} \quad (m^3/s) \quad (4.17)$$

4.4.2 Transport in dwarsrichting

- dwarstransport door van de evenwichtshelling afwijkende dwarsprofielhellingen.

Voor de berekening van het dwarstransport veroorzaakt door van de evenwichtshelling afwijkende dwarsprofielhellingen wordt de theorie van Swart (paragraaf 3.3.2) toegepast. Hierbij wordt uitgegaan van een representatieve golfhoogte  $H_0$  op diep water met periode  $T$ . In de profieldoorsneden wordt per dieptelijn  $i_d$  de waarde van de evenwichtsafstand  $W$  (vergelijking (3.32)) en de grootte van de kustconstante  $s_y$  (vergelijking (3.39)) berekend. Het werkelijk optredende dwarstransport kan worden berekend met behulp van vergelijking (3.29), (zie figuur 4.4).

$$S_y(i_k, i_d) = s_y(i_d) [W(i_d) - \{L2(i_d) - L1(i_d)\}] \Delta x \quad (\text{m}^3/\text{s}) \quad (4.18)$$



Figuur 4.5

- dwarstransport door niet-uniforme brandingsstroom in langsrichting

In paragraaf 4.3 is een vergelijking afgeleid waarmee de grootte van het optredende dwarsdebiet berekend kan worden (vergelijking (4.11)). Aangenomen wordt dat dit debiet een zekere concentratie aan sediment in suspensie bevat, waarvoor geldt (figuur 4.6):

$$c(i_k, i_d) = \frac{1}{2} [c_{i_k + \frac{1}{2}}(i_d) + c_{i_k - \frac{1}{2}}(i_d)] \quad (4.19)$$

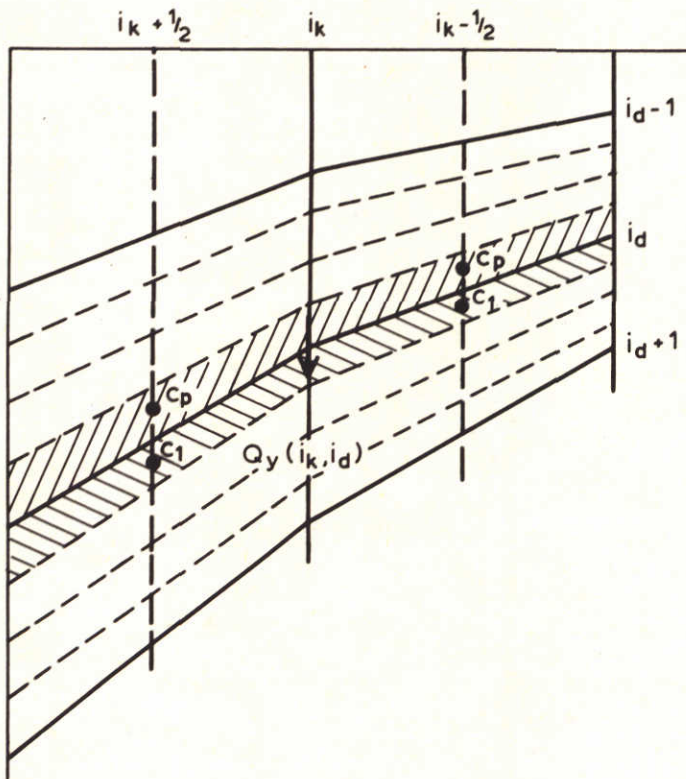
waarin:

$$c_{i_k + \frac{1}{2}}(i_d) = \frac{1}{2} [c_1 + c_p]$$

$c_1$  = concentratie 1<sup>e</sup> deelgebied tussen de dieptelijnen  $i_d$  en  $i_{d+1}$

$c_p$  = concentratie p<sup>e</sup> deelgebied tussen de dieptelijnen  $i_{d-1}$  en  $i_d$

De concentraties worden berekend met vergelijking (3.28).



Figuur 4.6

Voor het dwarstransport geldt:

$$S_{\text{dwaars}}(i_k, i_d) = Q_y(i_k, i_d) c(i_k, i_d) \quad (4.20)$$

#### 4.5 Bodemveranderingen

De bodemveranderingen kunnen worden berekend door het beschouwen van de continuïteit van het sediment. Vanwege het lijnenkarakter van het n-lijn model komen

bodemveranderingen tot uitdrukking door een voor- of achteruitgang van de verschillende dieptelijnen. In de profieldoorsnede  $i_k$  geldt voor de bodemveranderingen van het gebied tussen de dieptelijnen  $i_d$  en  $i_{d+1}$  op het tijdstip  $t$ :

$$\Delta y_{i_k} (i_{d+\frac{1}{2}}) = \sum_{t=0}^{t=t} [\Delta S_x (i_{d+\frac{1}{2}}) + \Delta S_{\text{dwars}} (i_k, i_d) + \Delta S_y (i_k, i_d)] \Delta t / \Delta x \Delta d \quad (4.21)$$

waarin:

$\Delta y_{i_k} (i_{d+\frac{1}{2}})$  = voor- of achteruitgang van het gebied tussen de dieptelijnen  $i_d$  en  $i_{d+1}$

$$\Delta S_x (i_{d+\frac{1}{2}}) = S_{x_{i_k-\frac{1}{2}}} (i_{d+\frac{1}{2}}) - S_{x_{i_k+\frac{1}{2}}} (i_{d+\frac{1}{2}})$$

$$\Delta S_{\text{dwars}} (i_k, i_d) = S_{\text{dwars}} (i_k, i_d) - S_{\text{dwars}} (i_k, i_{d+1})$$

$$\Delta S_y (i_k, i_d) = S_y (i_k, i_d) - S_y (i_k, i_{d+1})$$

$\Delta t$  = tijdstap van de berekening (s)

$\Delta x$  = horizontale afstand tussen twee opéénvolgende profieldoorsneden (m)

$\Delta d$  = verticale afstand tussen twee opéénvolgende dieptelijnen (m)

De profieldoorsnede op het tijdstip  $t+\Delta t$  wordt op de volgende wijze berekend uit de bodemveranderingen (figuur 4.7):

$$y'_{t+\Delta t} (i_d) = y_0 (i_d) + \text{DELY}$$

waarin:

$y'_{t+\Delta t} (i_d)$  = afstand van dieptelijn  $i_d$  ten opzichte van x-as op het tijdstip  $t = t+\Delta t$

$y_0 (i_d)$  = idem op tijdstip  $t = 0$

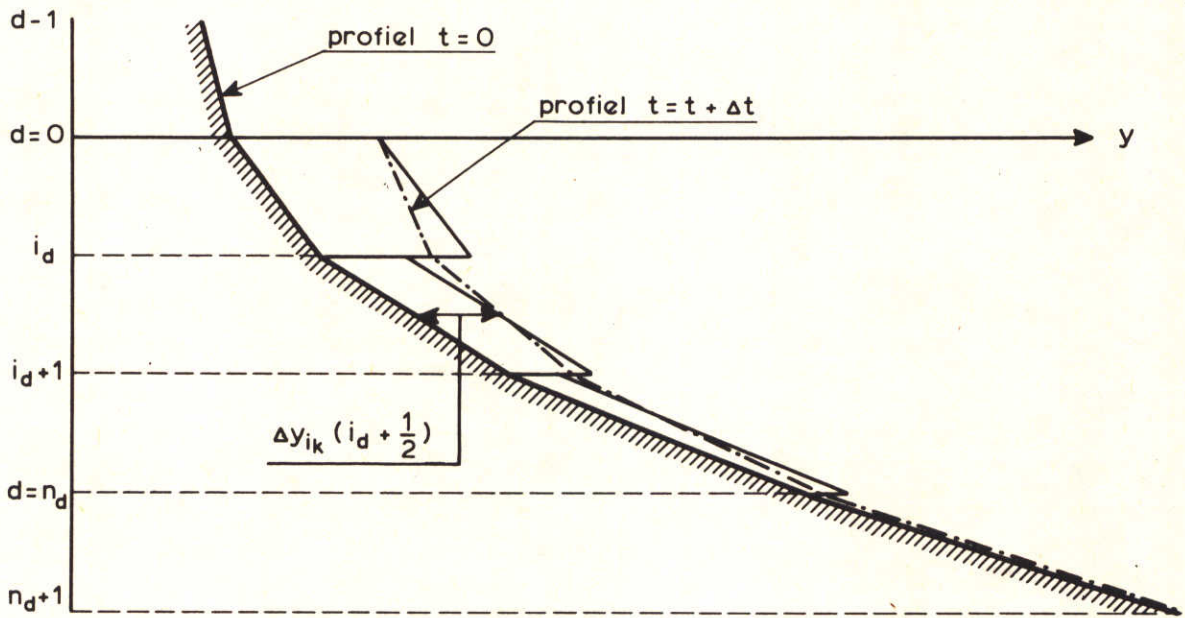
DELY =  $(\Delta y_{i_k} (i_{d+\frac{1}{2}}) + \Delta y_{i_k} (i_{d-\frac{1}{2}})) / 2$

Als randvoorwaarden gelden:

$$y_{t+\Delta t} (n_d+1) = y_o (n_d+1) \quad (4.22)$$

en

$$y'_{t+\Delta t} (0) = \Delta y_{i_k} (\frac{1}{2}) \quad (4.23)$$



Figuur 4.7

Bij deze vereffeningsprocedure wordt een fout in de zandbalans geïntroduceerd die per tijdstap op de volgende manier gecorrigeerd wordt:

$$\text{voor } i_d = 0, 1, \dots, n_d : y_{t+\Delta t} (i_d) = y'_{t+\Delta t} (i_d) + \text{CORR} \quad (4.24)$$

waarin:

$$\text{CORR} = \frac{\sum_{i_d=0}^{n_d-1} [\Delta y_{i_k} (i_d + \frac{1}{2}) - \{ \Delta y_{t+\Delta t} (i_d) - y_o (i_d) + y_{t+\Delta t} (i_d+1) - y_o (i_d+1) \} 2]}{(n_d - 1,5)}$$

#### 4.6 Begin- en randvoorwaarden

##### bodemligging:

- per profieldoorsnede het dwarsprofiel op het tijdstip  $t=0$

##### golven:

- golfperiode
- golfrichting per transportdoorsnede
- golfhoogte per transportdoorsnede
- golfbrekerindex

##### getij:

- debietverdeling langs de in- en uitstroomrand
- grootte van het getijdebiet per transportdoorsnede
- waterstandsverhoging veroorzaakt door het getij

##### sediment:

- 50% korreldiameter ( $D_{50}$ )
- 90% korreldiameter ( $D_{90}$ )
- bodemruwheid ( $r_k$ )



## 5. Uitgevoerde kustlijnberekeningen

### 5.1 Inleiding

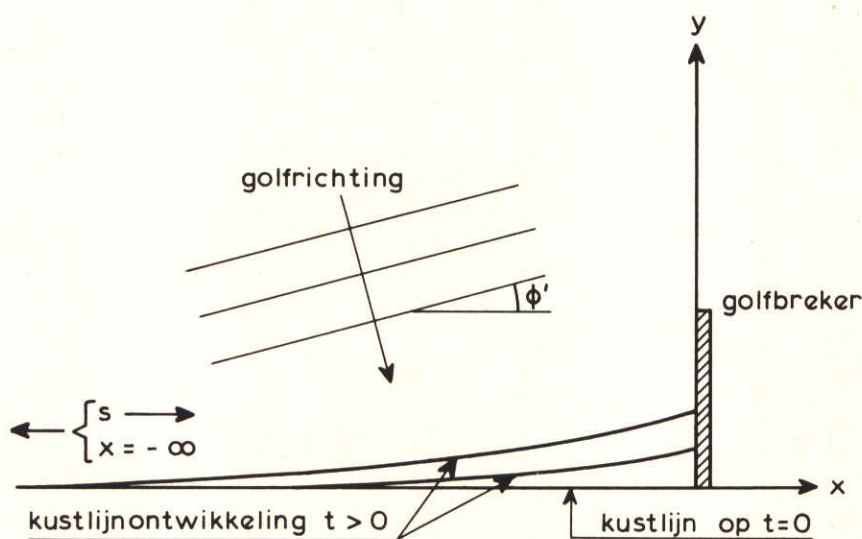
In deze paragraaf wordt een aantal toepassingen van het n-lijn model getoond, waarbij in alle gevallen het dwarstransport als gevolg van kustprofielen die afwijken van het evenwichtsprofiel niet in de berekening is meegenomen. In het eerste voorbeeld wordt de aanzanding van een kustgebied aan de loefzijde van een konstruktie berekend, waarvan de resultaten worden vergeleken met de oplossing volgens de theorie van Pelnard-Considère.

In het tweede voorbeeld wordt de erosie aan de lijzijde van een konstruktie berekend. De resultaten zonder en met het weergeven van diffractie-invloeden zijn met elkaar vergeleken.

Het derde voorbeeld betreft de vervorming van een kust met zandsuppletie.

### 5.2 Aanzanding aan de loefzijde van een konstruktie (Proef 1)

De konstruktie van bijvoorbeeld een golfbreker verstoort het evenwicht van een lange, rechte kust. Aan de loefzijde wordt het sedimenttransport in langsrichting geblokkeerd waardoor aanzanding optreedt (figuur 6.1).



.Figuur 5.1

In 1956 werd door Pelnard-Considère ([10]) reeds een analytische methode ontwikkeld, waarmee het verloop van de aanzanding als functie van de plaats en de tijd berekend kan worden. De toepassingsmogelijkheden van de methode zijn echter beperkt vanwege de sterke schematisatie die moet worden gebruikt om het probleem analytisch te beschrijven.

In figuur 1 wordt voor een dergelijke situatie het resultaat van een berekening met het n-lijn model getoond. Bij de berekening is van de volgende begin- en randvoorwaarden uitgegaan:

beginvoorwaarden : rechte kust, evenwijdige dieptelijnen, taludhelling 1:100

randvoorwaarden :  $(H_o)_{rms} = 1,0$  m

$\phi_o = 30^\circ$

$T = 8$  s

$\gamma = 0,6$

$S(x = 0 \text{ m}) = 0,054 \text{ m}^3/\text{s}$

$S(x = 2000 \text{ m}) = 0,0 \text{ m}^3/\text{s}$

Toegepast is een diepteschematisatie  $\Delta d = 5$  m. In figuur 1 zijn de dieptelijnen  $d = 0$  m,  $d = 5$  m en  $d = 10$  m weergegeven voor  $t = 0-1$  jaar. Bij de berekening van de bodemveranderingen is een tijdstap van 0,5 dag gebruikt.

Om de invloed na te gaan van de waarde van  $\Delta d$  op de optredende kustlijnveranderingen zijn berekeningen uitgevoerd met andere  $\Delta d$ -waarden. In figuur 2 is het resultaat van deze berekeningen weergegeven. De volgende diepte-schematisaties zijn weergegeven:  $\Delta d = 10$  m,  $\Delta d = 5$  m en  $\Delta d = 2$  m. De volgende dieptelijnen zijn voor  $t = 0$  en  $t = 0,5$  jaar weergegeven in figuur 2:

$\Delta d = 10$  m :  $d = 0$  m en  $d = 10$  m

$\Delta d = 5$  m :  $d = 0$  m,  $d = 5$  m en  $d = 10$  m

$\Delta d = 2$  m :  $d = 0$  m,  $d = 2$  m,  $d = 4$  m,  $d = 6$  m,  $d = 8$  m en  $d = 10$  m

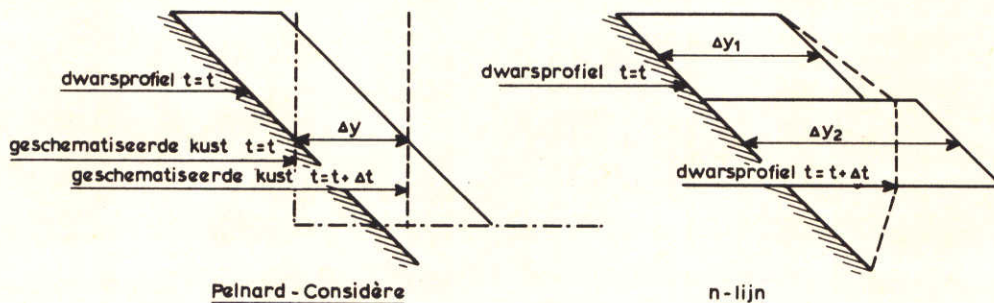
Figuur 3 geeft voor de doorsnede op een afstand  $x = 2000$  m de dwarsprofielen op het tijdstip  $t = 0,5$  jr. voor de verschillende toegepaste  $\Delta d$ -waarden.

Het blijkt dat de kustlijnveranderingen en de vorm van het dwarsprofiel worden beïnvloed door de keuze van de waarde van  $\Delta d$ . De toegepaste diepteschematisatie is bepalend voor de optredende verandering van de kustrichting en het verloop van het sedimenttransport in langsrichting in de tijd. De snelheid waarmee verstoringen, in dit geval aanzanding, zich langs de kust voortplanten wordt in

grote mate bepaald door de waarde van  $\Delta d$ . Dit wordt duidelijk wanneer de verdeling van de sedimentatie langs de kust voor de berekening met de verschillende  $\Delta d$ -waarden op het tijdstip  $t = 0,5$  jaar wordt uitgezet (figuur 4). In deze figuur is tevens het verloop van het sedimenttransport in langsrichting langs het beschouwde kustvak weergegeven op het tijdstip  $t = 0,5$  jaar. Om de invloed na te gaan van het dwarstransport, dat wordt veroorzaakt doordat het dwarsdebiet sediment in suspensie in dwarsrichting transporteert, is een berekening uitgevoerd voor een diepteschematisatie  $\Delta d = 2$  m waarin geen rekening gehouden is met dit dwarstransport (figuur 5). In dit geval treden de bodemveranderingen hoofdzakelijk in de brandingszone op. De oriëntatie van de kustzone waarin het sedimenttransport in langsrichting optreedt wijzigt hierdoor snel. De aanzanding breidt zich snel in bovenstroomse richting uit. In figuur 6 wordt voor het tijdstip  $t = 0,5$  jr het verloop van de sedimentatie en het sedimenttransport in langsrichting weergegeven. Geconcludeerd kan worden dat het dwarstransport een grote invloed heeft op de kustontwikkeling.

In figuur 7 zijn voor een overeenkomstige situatie de kustlijnveranderingen weergegeven volgens de theorie van Pelnard-Considère. Bij deze berekeningsmethode wordt aangenomen dat de bodemveranderingen optreden in een kustzone met diepte  $d$ . In deze kustzone schuift het dwarsprofiel bij bodemveranderingen evenwijdig aan het uitgangsprofiel op (één-lijn benadering). Toegepast is een diepte  $d = 10$  m en  $d = 5$  m.

In figuur 8 wordt de verdeling van de sedimentatie langs het beschouwde kustvak vergeleken met die van het n-lijn model. De resultaten van het n-lijn model komen slecht overeen met die volgens de theorie van Pelnard-Considère. De optredende verschillen moeten worden toegeschreven aan de wijze waarop in beide modellen het zandtransport alsmede de bodemveranderingen worden berekend. Wat dit laatste punt betreft wordt verwezen naar figuur 5.2.



Figuur 5.2

### 5.3 Erosie aan de lijzijde van een konstruktie (Proef 2)

Niet alleen aan de loefzijde van een konstruktie maar ook aan de lijzijde is het evenwicht van de kust verstoord. Doordat de aanvoer van sediment geheel of gedeeltelijk geblokkeerd wordt door de konstruktie zal er in deze zone erosie optreden. In figuur 9 wordt voor deze situatie het resultaat van een berekening met het n-lijn model getoond. Bij de berekening is van de volgende begin- en randvoorwaarden uitgegaan:

beginvoorwaarden : rechte kust, evenwijdige dieptelijnen, taludhelling 1:100

randvoorwaarden :  $(H_o)_{rms} = 1,0 \text{ m}$

$\phi_o = 30^\circ$

$T = 8 \text{ s}$

$\gamma = 0.6$

$S(x=0 \text{ m}) = 0.0 \text{ m}^3/\text{s}$

$S(x=2000 \text{ m}) = 0.054 \text{ m}^3/\text{s}$

Verder wordt de invloed van de diffractie van de golven niet meegenomen in de berekening: dit betekent dat voor de golven de konstruktie volledig open is, maar voor het zandtransport volledig dicht.

Toegepast is een diepteschematisatie  $\Delta d = 5 \text{ m}$ . In figuur 9 zijn de dieptelijnen  $d = 0 \text{ m}$ ,  $d = 5 \text{ m}$  en  $d = 10 \text{ m}$  weergegeven voor verschillende tijdstippen tussen  $t = 0$  en 1 jaar. Bij de berekening van de bodemveranderingen is een tijdstap van 0,5 dag gebruikt. In principe levert deze berekening het gespiegelde resultaat van de uitgevoerde berekening voor de aanzanding volgens figuur 1. Ook met een berekening volgens de theorie van Pelnard-Considère zou een dergelijke vorm van de kust gevonden zijn. Wanneer men speciaal geïnteresseerd is in de maximale achteruitgang van de kust direkt achter de konstruktie voldoet de toegepaste schematisatie niet meer. Voor het juist weergeven van de erosie direkt achter de konstruktie zal de diffractie van golven rond de kop van de konstruktie in rekening moeten worden gebracht.

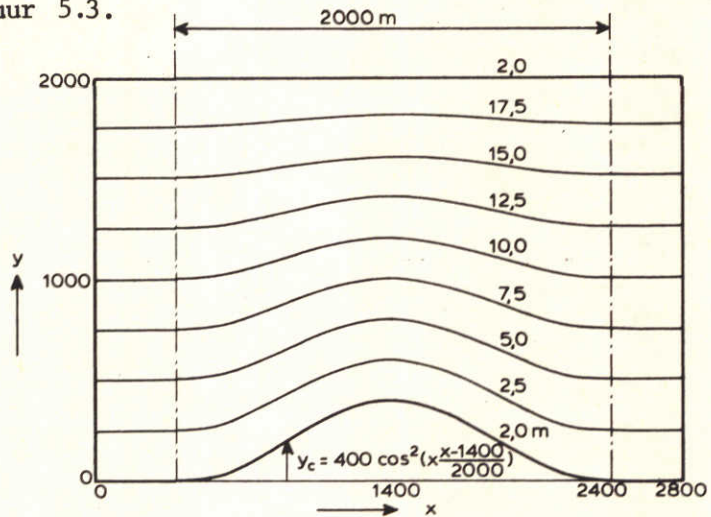
In het n-lijn model bestaat de mogelijkheid om indirekt het diffractie-effekt in rekening te brengen door variatie van de golfrandvoorwaarden langs de kust. In figuur 10 wordt de uitkomst van een berekening gegeven voor een situatie waarbij diffractie-effecten het golfbeeld over een afstand van 500 m beïnvloeden.

Door het in rekening brengen van de diffractie neemt de erosie direkt achter de konstruktie af. In figuur 11 is voor beide berekeningen de verdeling van de erosie en het sedimenttransport in langsrichting op het tijdstip  $t = 0,5$  jaar weergegeven.

Opgemerkt moet worden dat bij een dergelijke schematisatie geen rekening wordt gehouden met aandrijvende krachten door verschillen in golfopzet. Eventueel bestaat de mogelijkheid om dit extra verhang als externe grootheid per transportdoorsnede te schatten en in rekening te brengen. Een dergelijke berekening is echter niet uitgevoerd.

#### 5.4 Vervorming van kustgebied met zandsuppletie (Test 3)

Met het n-lijn model is een berekening uitgevoerd om na te gaan hoe de vervorming van een zandsuppletie in de tijd verloopt. Uitgegaan is van een situatie zoals is aangegeven in figuur 5.3.



Figuur 5.3

De optredende kustlijnveranderingen zijn voor een dergelijke situatie niet meer eenvoudig analytisch te bepalen. Figuur 12 geeft voor deze situatie het resultaat van de berekening, waarbij moet worden opgemerkt dat in dit geval de kustlengte 2000 m is in plaats van 2800 m in figuur 5.3. Uitgegaan werd van de volgende randvoorwaarden:

$$(H_o)_{rms} = 1,0 \text{ m}$$

$$\phi_o = 0^o$$

$$T = 8 \text{ s}$$

$$\gamma = 0,6$$

$$S(x = 0 \text{ m}) = 0,0 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$S(x = 2000 \text{ m}) = 0,0 \text{ m}^3/\text{s}$$

Toegepast is een diepteschematisatie  $\Delta d = 5$  m. In figuur 12 zijn de dieptelijnen  $d = 0$  m,  $d = 5$  m en  $d = 10$  m weergegeven voor verschillende tijdstippen tussen  $t = 0$  en 1 jaar. Op dieper water treden geen bodemveranderingen meer op. Bij de berekening is een tijdstap van 0,5 dag gebruikt voor het berekenen van bodemveranderingen.

Om de invloed na te gaan van de waarde van  $\Delta d$  op de optredende kustlijnveranderingen zijn berekeningen uitgevoerd met andere  $\Delta d$ -waarden. In figuur 13 is het resultaat van deze berekening weergegeven. Daarbij is ook een gedeelte van de oorspronkelijke, rechte kustlijn (aan weerszijden 400 m) gemodelleerd. Toegepast is een diepteschematisatie  $\Delta d = 10$  m,  $\Delta d = 5$  m en  $\Delta d = 2$  m. De volgende dieptelijnen zijn in figuur 13 weergegeven voor  $t = 0$  en  $t = 1$  jaar:

$\Delta d = 10$  m :  $d = 0$  m,  $d = 10$  m en  $d = 20$  m

$\Delta d = 5$  m :  $d = 0$  m,  $d = 5$  m,  $d = 10$  m,  $d = 15$  m en  $d = 20$  m

$\Delta d = 2$  m :  $d = 0$  m,  $d = 2$  m,  $d = 4$  m,  $d = 6$  m,  $d = 8$  m,  $d = 10$  m en  $d = 20$  m.

Figuur 14 geeft voor de doorsneden, gelegen op een afstand  $x = 0$  m en  $x = 1400$  m, de dwarsprofielen op het tijdstip  $t = 1$  jaar voor verschillende waarden van  $\Delta d$ . De invloed op de kustlijnveranderingen van de bij de diepteschematisatie toegepaste  $\Delta d$ -waarde blijkt groot te zijn. De invloed van het dwarstransport veroorzaakt door het dwarsdebiet blijkt uit de grote vooruitgang van de dieptelijnen  $d = 2$  m,  $4$  m en  $6$  m aan de zijranden van het beschouwde gebied voor de berekening met  $\Delta d = 2$  m (zie figuur 13).

Bij toepassing van een grote  $\Delta d$ -waarde planten verstoringen zich langzamer in langsrichting voort doordat de bodemveranderingen over een groter gebied worden verdeeld, waardoor de kustoriëntatie slechts langzaam verandert. In figuur 15 is het verloop van de sedimentatie en erosie en het sedimenttransport in langsrichting weergegeven op het tijdstip  $t = 1,0$  jaar.

In figuur 16 is de invloed van het dwarstransport (veroorzaakt door dwarsdebieten) weergegeven voor een berekening met  $\Delta d = 2$  m. De bodemveranderingen treden in het geval met  $S_{\text{dwaars}} = 0$  hoofdzakelijk binnen de brandingszone op.

## 6. Toetsing van de berekende verdeling van de langsstroomsnelheid

### 6.1 Inleiding

In het n-lijn model wordt de verdeling van de langsstroom berekend uit de continuïteitsvergelijking en de impulsvergelijking in langsrichting (paragraaf 3.2). De impulsvergelijking in dwarsrichting wordt verwaarloosd.

Bij het berekenen van de aandrijvende kracht door golven wordt alleen rekening gehouden met de schuifspanningskomponent van de stralingsdruk (paragraaf 3.2.2). In geval van een extra stroom door b.v. getij wordt voor de berekening van het verhang aangenomen dat in een doorsnede in dwarsrichting de waterspiegel horizontaal is.

Dergelijke vereenvoudigingen zijn alleen geoorloofd in een in langsrichting uniforme situatie (rechte kust met evenwijdige dieptelijnen en uniforme randvoorwaarden). Om te kunnen nagaan wat de gevolgen zijn van bovenstaande vereenvoudigingen bij de berekening van het stroombeeld zijn enkele vergelijkende berekeningen gemaakt met het waterbewegingsmodel FRIMO ([11]).

In dit model wordt de waterbeweging op een min of meer identieke wijze beschreven als in het n-lijn model, namelijk evenwicht tussen bodemschuifspanning, verhang van de waterspiegel en de aandrijvende kracht door golven. De impulsvergelijking in dwarsrichting wordt echter wel in rekening gebracht en voor het berekenen van de aandrijvende kracht door golven wordt met alle componenten van de stralingsdruk, die een bijdrage leveren, rekening gehouden. De voorwaarde dat bij extra stroom door b.v. het getij de waterspiegel in een dwarsdoorsnede horizontaal is, vervalt. Voor de numerieke oplossing van het stroombeeld wordt in FRIMO een eindige elemententechniek toegepast.

Het is aannemelijk dat de berekening van het stroombeeld met het waterbewegingsmodel FRIMO een nauwkeuriger beeld geeft van de verdeling van de langsstroom en de invloed van de opgelegde randvoorwaarde(n) dan een berekening volgens de methode van het n-lijn model. Paragraaf 6.2 behandelt een golfgedreven stroming voor een situatie met een rechte kust en evenwijdige dieptelijnen. Om de invloed van de opgelegde randvoorwaarde na te gaan zijn gesloten zijranden en een open zeerand toegepast. Paragraaf 6.3 behandelt de stroming voor een

situatie met een gebogen kustvorm. Zowel golfgedreven stroming, getijgedreven stroming en een combinatie van golf- en getijgedreven stroming komen hierbij aan de orde.

## 6.2 Rechte kust met evenwijdige dieptelijnen

Voor het berekenen van de verdeling van de golfgedreven langsstroom in een situatie van een rechte kust met evenwijdige dieptelijnen is een kustgebied beschouwd met een lengte van 2800 m en een breedte van 2000 m met een bodemhelling 1:100. De berekening is uitgevoerd voor gesloten zijranden en een open zeerand.

In figuur 17 is het eindige elementenrooster weergegeven dat bij de berekening met het FRIMO-model is toegepast. Nabij de kustlijn is een verfijning van het rooster toegepast. Bij de berekening van het stroombeeld met het  $n$ -lijn model is een schematisatie toegepast met  $\Delta x = 100$  m en  $\Delta d = 0,5$  m.

De volgende golfrandvoorwaarden zijn bij de berekeningen toegepast:

$$\begin{aligned}\phi_0 &= 30^\circ \\ (H_0)_{\text{rms}} &= 2,0 \text{ m} \\ T &= 7 \text{ s} \\ \gamma &= 0,8\end{aligned}$$

In figuur 18 is het stroomlijnenpatroon weergegeven berekend volgens het FRIMO-model en het  $n$ -lijn model. Het blijkt dat het debiet van de golfgedreven langsstroom door de open zeerand wordt aan- en afgevoerd. Bij de berekening met het FRIMO-model is een kleine circulatiecel aanwezig in het middengebied. De bijbehorende snelheidsverdelingen voor de dwarsdoorsneden gelegen op een afstand  $x = 100$  m,  $x = 500$  m,  $x = 900$  m en  $x = 1400$  m worden in figuur 19a t/m 19d weergegeven. Tevens zijn hierin de snelheidsverdelingen weergegeven berekend volgens het  $n$ -lijn model.

Het blijkt dat de met beide modellen berekende snelheidsverdelingen in het middengebied ( $x = 1400$  m) goed met elkaar overeenkomen. De afwijking op de diepte groter dan  $d = 3$  m kan worden toegeschreven aan de circulatiecel die volgens het FRIMO-model in dit gebied optreedt.



De wijze waarop in het n-lijn model de invloed van de randvoorwaarden in rekening wordt gebracht lijkt niet te voldoen. Volgens de FRIMO berekening wordt de brandingsstroom over een breedte van circa 500 m afgevoerd c.q. aangevoerd, dit in tegenstelling tot het n-lijn model waar voor deze breedte een afstand van 100 m geldt. Deze afstand is gekoppeld aan de gebruikte waarde van  $\Delta x$ . Overigens moet worden opgemerkt dat ook de resultaten van FRIMO hoogstwaarschijnlijk geen juist beeld geven van het werkelijke stromingspatroon.

### 6.3 Kust met zandsuppletie

Voor het berekenen van de langsstroomsnelheidsverdeling in een situatie met een gebogen kustvorm is een gebied beschouwd met een lengte van 2800 m en een breedte van 2000 m waar een zandsuppletie is uitgevoerd. Ter hoogte van het midden van de zandsuppletie is de breedte van het zeegebied 1600 m. De bodemhelling varieert van 1:80 tot 1:100. De vorm van het beschouwde gebied komt overeen met de situatie waarvoor in paragraaf 5.4 de optredende bodemveranderingen zijn gerekend.

In figuur 20 is het eindige elementenrooster weergegeven dat bij de berekening met het FRIMO-model is toegepast. Naar de kustlijn toe is een verfijning van het elementenrooster toegepast. In het n-lijn model is een schematisatie toegepast met  $\Delta x = 100$  m en  $\Delta d = 0,5$  m.

Hierna worden de resultaten met alleen golfgedreven stroming, stroming door alleen getij en een combinatie van golf- en getijgedreven stroming behandeld.

#### golfgedreven stroming:

Bij de berekeningen zijn de volgende golfrandvoorwaarden toegepast:

$$\begin{aligned}\phi_0 &= 0^\circ \\ (H_0)_{\text{rms}} &= 1,0 \text{ m} \\ T &= 8 \text{ s} \\ \gamma &= 0,6\end{aligned}$$

Bij de berekening zijn dichte zijranden en een open zeerand toegepast. In figuur 21 is het stroomlijnenpatroon weergegeven volgens beide modellen. In het FRIMO-model ontstaat aan beide zijden van de kop van de suppletie een circulatiecel, terwijl door de zeerand weinig water wordt af- en aangevoerd.

In het n-lijn model wordt het volledige debiet van de brandingsstroom door de zeerland aan- en afgevoerd.

De bijbehorende snelheidsverdelingen voor de doorsneden gelegen op een afstand  $x = 500$  m,  $900$  m en  $1300$  m worden in figuur 22a t/m 22c weergegeven. Het blijkt dat de door het n-lijn model berekende stroomsnelheden in de brandingszone een factor 2 à 3 kleiner zijn dan de snelheden berekend met FRIMO. De afwijking op een diepte groter dan 3 m wordt veroorzaakt door de aanwezigheid van een circulatiecel op die diepte bij FRIMO. De onderschatting van de stroomsnelheden in de brandingszone door het n-lijn model wordt veroorzaakt doordat bij de berekening van de aandrijvende kracht de variatie van de stralingsdruktermen in langsricting wordt verwaarloosd (paragraaf 3.2.2):

$$F_x = \frac{1}{\rho h} \frac{\partial S_{x'y'}}{\partial y} (\cos \phi_d)^{-1} \quad (6.1)$$

uitgewerkt levert dit

$$F_{x'} = \frac{E_f n}{\rho h} \sin(\phi - \phi_d) \cos(\phi - \phi_d) (\cos \phi_d)^{-1} \frac{\partial \epsilon_b}{\partial y} \quad (6.2)$$

waarin:

$E_f$  = fictieve golfenergie (=  $\frac{1}{8} \rho g H_f^2$ )

$\epsilon_b$  = energiedissipatiefactor ( $E = (1 - \epsilon_b) \cdot E_f$ ), vergelijking (3.5)

Bij het FRIMO-model kan voor de uitdrukking  $F_{x'}$ , worden afgeleid ([12]):

$$F_{x'} = \frac{E_f n}{\rho h} \sin(\phi - \phi_d) \cdot \cos(\phi - \phi_d) \left\{ \frac{1}{\cos \phi_d} \cdot \frac{\partial \epsilon_b}{\partial y} - \operatorname{tg} \phi_d \cdot \frac{\partial \epsilon_b}{\partial x'} - \operatorname{tg}(\phi - \phi_d) \frac{\partial \epsilon_b}{\partial x'} \right\} \quad (6.3)$$

Deze uitdrukking is op de termen met  $\partial \epsilon_b / \partial x'$  na consistent met de gebruikte uitdrukking in het n-lijn model. De invloed van de in het n-lijn model verwaarloosde termen blijkt aanzienlijk te zijn.

#### getijgedreven stroming

De berekening is toegepast op een gebied met open zijranden en een dichte zeerland. De volgende randvoorwaarden werden aan de in- en uitstroomrand opgelegd:

$$Q_{\text{instroming}} = 20.000 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$Q_{\text{uitstroming}} = 20.000 \text{ m}^3/\text{s}$$

De berekening is uitgevoerd zonder invloed van golven in rekening te brengen zodat voor de bodemschuifspanningsfaktor  $r$  (vergelijking (3.2)) geldt:

$$r = \frac{g u_x^2}{h C^2} \quad (6.4)$$

In figuur 23 zijn de berekende stromingspatronen volgens beide modellen weergegeven en in figuur 24a t/m 24c de bijbehorende snelheidsverdelingen in de dwarsdoorsneden gelegen op een afstand  $x = 500 \text{ m}$ ,  $x = 900 \text{ m}$  en  $x = 1300 \text{ m}$ . Doordat het doorstroomoppervlak zeewaarts van de kop van de suppletie afneemt nemen de stroomsnelheden ter plaatse toe. In het n-lijn model wordt aangenomen dat de waterspiegel in een dwarsdoorsnede horizontaal is. De stroomsnelheden nemen daardoor bij de vernauwing evenredig over de gehele dwarsdoorsnede toe. Uit de resultaten van het FRIMO-model blijkt dat de versturende invloed zich beperkt tot een kleiner gebied. De stroomsnelheden rond de kop, op ondiep water nemen meer toe dan die op dieper water. Hierdoor buigen de stroomlijnen, berekend met de resultaten van het n-lijn model, rond de kop meer af.

#### golf- en getijgedreven stroming

Bij de berekening zijn de volgende golfrandvoorwaarden toegepast:

$$\begin{aligned} \phi_0 &= 0^\circ \\ (H_0)_{\text{rms}} &= 1,0 \text{ m} \\ T &= 8,0 \text{ s} \\ \gamma &= 0,6 \end{aligned}$$

Uitgegaan is van een gesloten zeerand en open zijranden. De volgende randvoorwaarden werden aan de in- en uitstroomrand opgelegd:

$$\begin{aligned} Q_{\text{instroming}} &= 20.000 \text{ m}^3/\text{s} \\ Q_{\text{uitstroming}} &= 20.000 \text{ m}^3/\text{s}. \end{aligned}$$

Bij de berekening is rekening gehouden met de door golven veroorzaakte extra bodemwrijving (vergelijking (3.2)). In figuur 25 zijn de door beide modellen berekende stroomlijnenpatroon weergegeven. Voor het n-lijn model is alleen de

getijstroom weergegeven. In figuur 26a t/m 26f zijn de bijbehorende snelheidsverdelingen voor de dwarsdoorsneden gelegen op een afstand  $x = 500$  m, 900 m, 1300 m, 1500 m, 1900 m en 2300 m weergegeven.

De berekening combineert de verschijnselen welke werden geconstateerd bij de berekening met alleen golven en alleen door getij aangedreven stromingen. Het n-lijn model onderschat de optredende snelheden in de brandingszone en de kontraktie die optreedt rond de kop van de suppletie. Op de oorzaken hiervan werd reeds bij de vorige berekeningen ingegaan.

## LITERATUUR

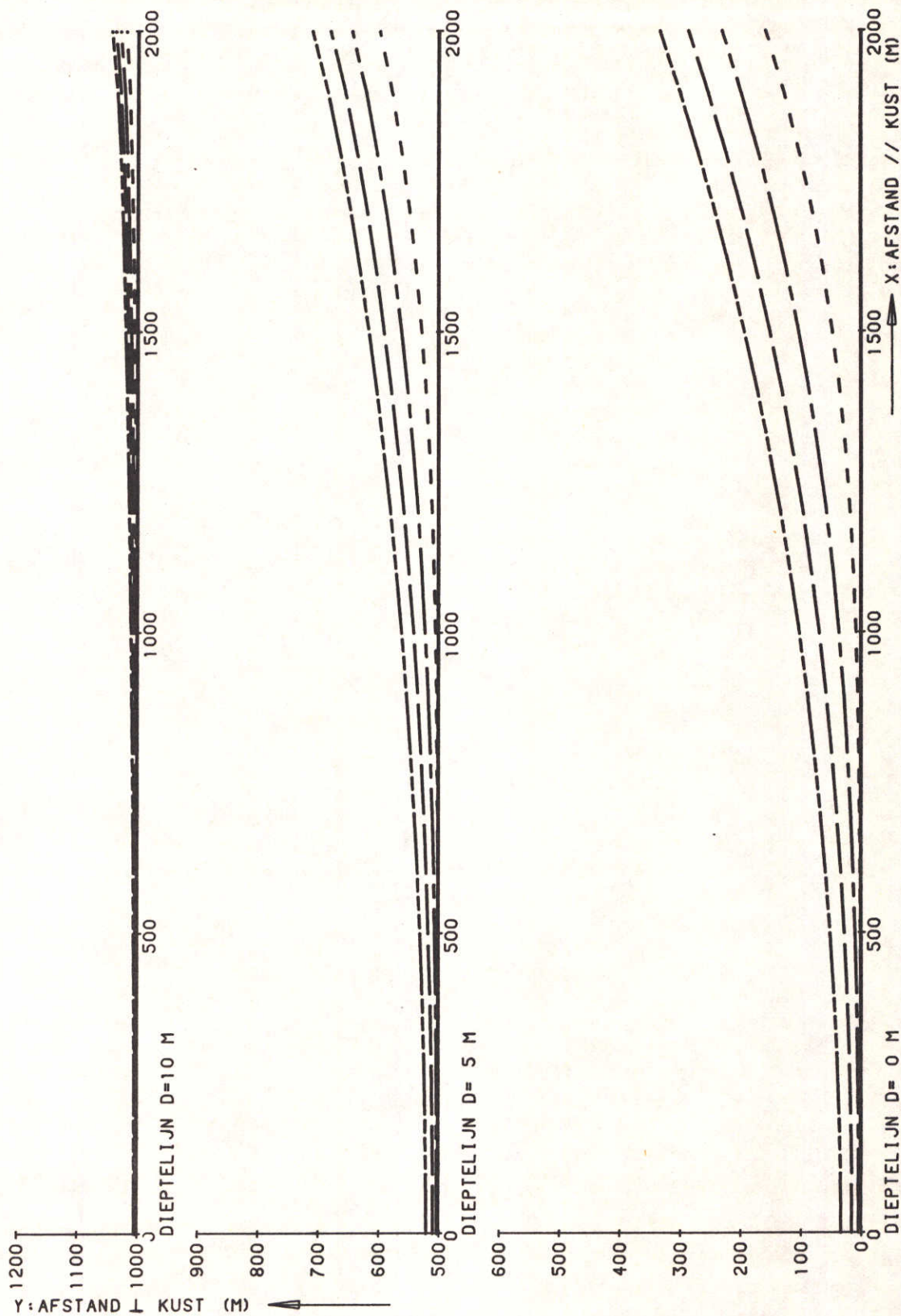
- 1 Waterloopkundig Laboratorium (1980)  
Inventarisatie van numerieke modellen voor de berekening van kustontwikkeling  
Verslag onderzoek, R 1605, deel I, september 1980
  
- 2 CASTELEYN, J.A. (1975)  
Numerieke berekeningen van de verandering van kustvormen onder invloed van  
golfaanval,  
Deel I - De berekening van kustkonstanten bij kusten onder invloed van een  
golfklimaat met refracterende en diffracterende golven  
Deel II - De berekening van kustvormen uit kustkonstanten volgens de één-  
lijn-theorie  
Deel III - Toetsing van de programmatuur op de kustontwikkeling van het ei-  
land Texel,  
Technische Hogeschool Delft, afd. Civ. Techn., Vakgroep Kustwaterbouwkunde  
Techn. rapporten 75-1, 75-2 en 75-3, 1975
  
3. OVEREEM, J. v. (1978)  
Numeriek model voor de berekening van kustlijnveranderingen tengevolge van  
golven en getij  
Technische Hogeschool Delft, afd. Civ. Techn., Vakgroep Kustwaterbouwkunde,  
juni 1978
  
4. POSTMA, H. (1981)  
Ontwikkeling kustlijnprogrammatuur,  
Deel 1 - Heroverweging van de dieptelijnschematisatie van het NL-programma  
Deel 2 - De aanpassing van het getij in het NLINES10-programma  
Deel 2a - Figuren  
Deel 3 - Enkele "lokale" veranderingen in het NL-programma en het verschil  
tussen tussen source-tekst en een gebruikersvriendelijk reken-  
systeem  
Deel 4 - Handleiding NLINES10-programma  
Nota's WWKZ - 81.H022 t/m 81.H024 en 81.H026  
Direktie Waterhuishouding en Waterbeweging, District Kust en Zee,  
Adviesdienst Hoorn

LITERATUUR (vervolg)

5. BLJKER, E.W., (1971)  
Longshore transport computations  
Proc. ASCE Journal of the Waterways, Harbours and Coastal Engineering Division, WW4, November 1971
6. BATTJES, J.A. (1974)  
Computation of set-up, longshore currents, run-up and overtopping due to wind-generated waves  
Communications on Hydraulics, Delft University of Technology, Dept. of Civil Eng., Fluid Mechanics Group, Report no. 74-2, 1974
7. BLJKER, E.W. (1967)  
Some considerations about scales for coastal models with movable bed  
Delft Hydraulics Laboratory, Publication no. 50, November 1967
8. BAKKER, W.T. (1968)  
The dynamics of a coast with a groyne system  
Proceedings 11th Coastal Engineering Conference, London, 1968
9. SWART, D.H. (1974)  
Offshore sediment transport and equilibrium beach profiles  
Delft Hydraulics Laboratory, Report M 918 part II, 1974
10. PELNARD-CONSIDERE, R. (1956)  
Essai de théorie de l'évolution des formes de rivage en plages de sable et de galets  
Quatrième Journées de l'Hydraulique (Paris, 1956) 74-1; 74-10
11. DE VRIEND, H.J. (1982)  
FRIMO, a mathematical model of friction dominated two-dimensional horizontal flow; model tests and verification  
Delft Hydraulics Laboratory, Report W 439-2
12. DE VRIEND, H.J. (1982)  
Coastal currents; on the applicability of a highly simplified wave propagation model in the computation of wave-driven coastal currents  
Delft Hydraulics Laboratory, Report W 439-2

HO RMS. = 1.00 M  
 PH10 = 30.00 GRADEN  
 T = 8.00 S  
 S (X=0 M) = 0.054 M3/S  
 S (X=2000 M) = 0.000 M3/S

T = 0.00 JR  
 T = 0.25 JR  
 T = 0.50 JR  
 T = 0.75 JR  
 T = 1.00 JR



AANZANDING AAN LOEFZIJDE VAN KONSTRUKTIE

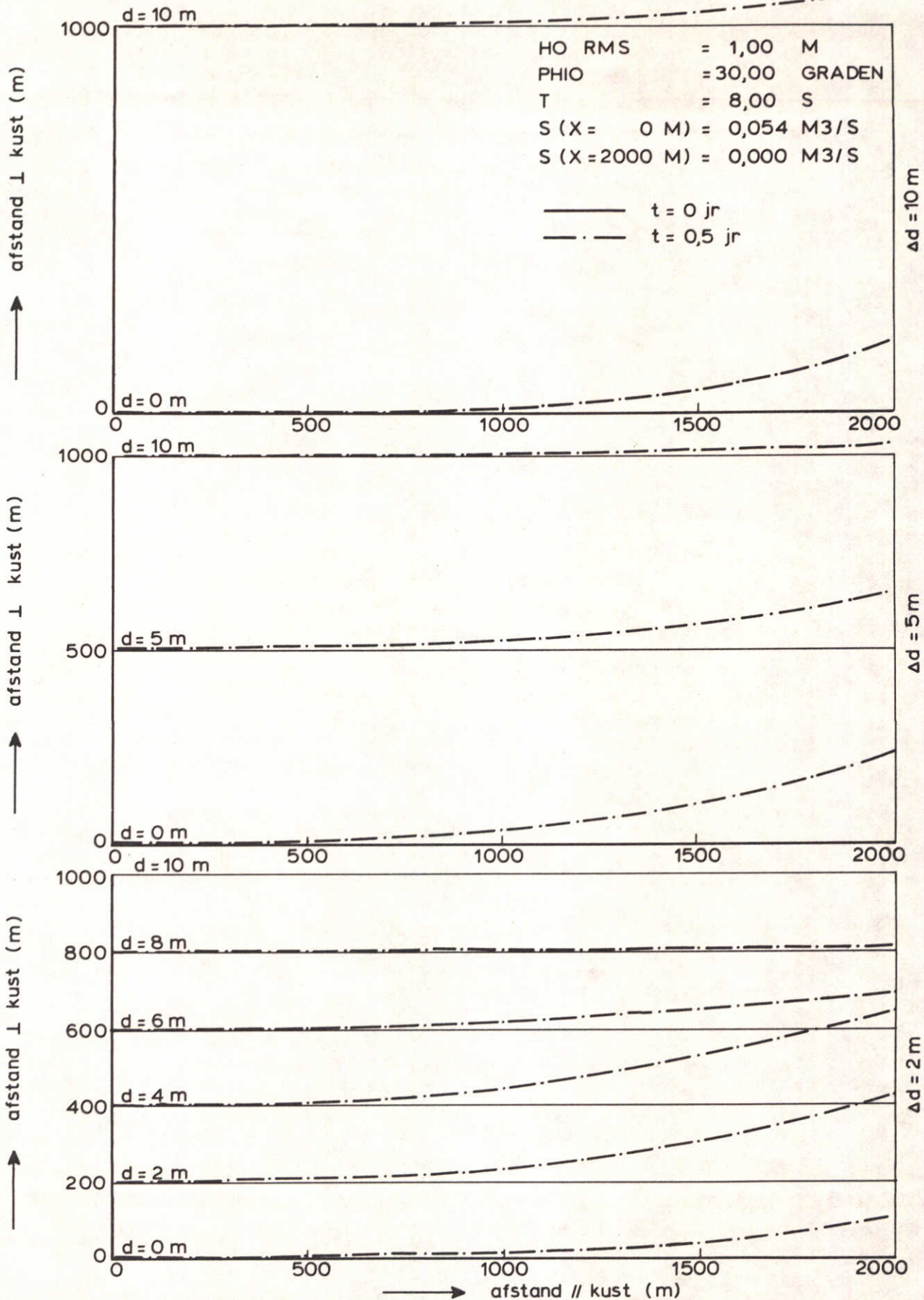
PROEF 1

DIEPTELIJNEN

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

R1605

FIG. 1



INVLOED KEUZE  $\Delta d$  OP KUSTONTWIKKELING

PROEF 1

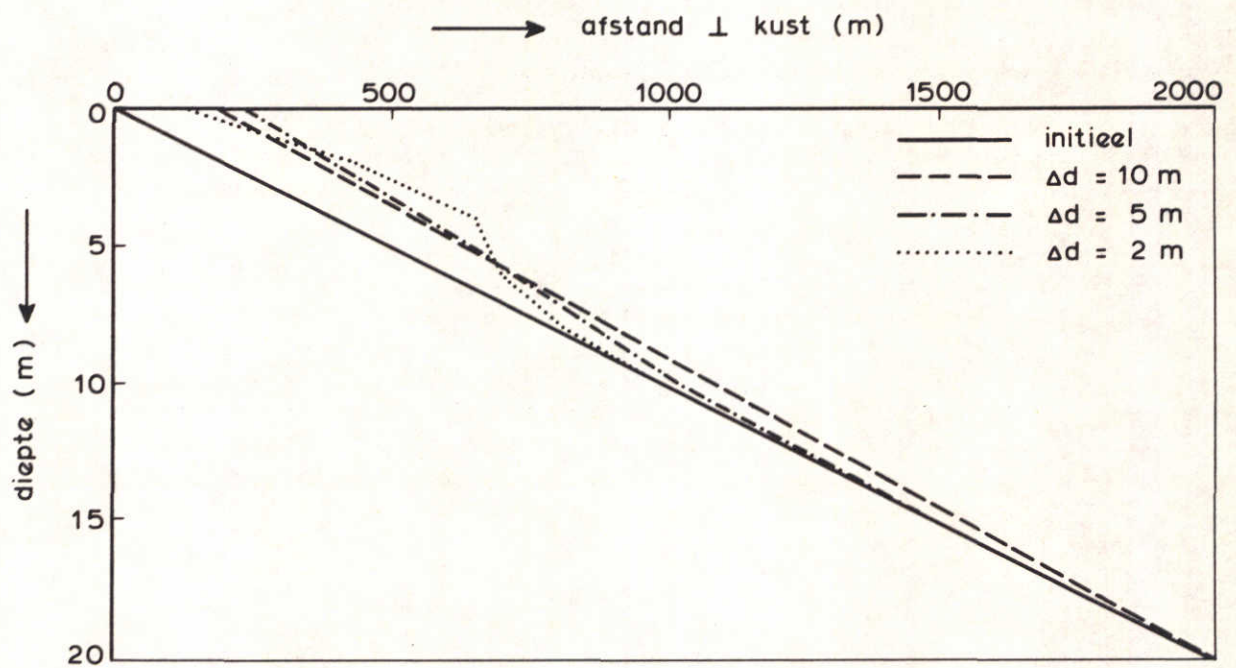
DIEPTELIJNEN

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

R 1605

FIG. 2





DWARSDOORSNEDE  $x = 2000$  m

INVLOED KEUZE  $\Delta d$  OP KUSTONTWIKKELING

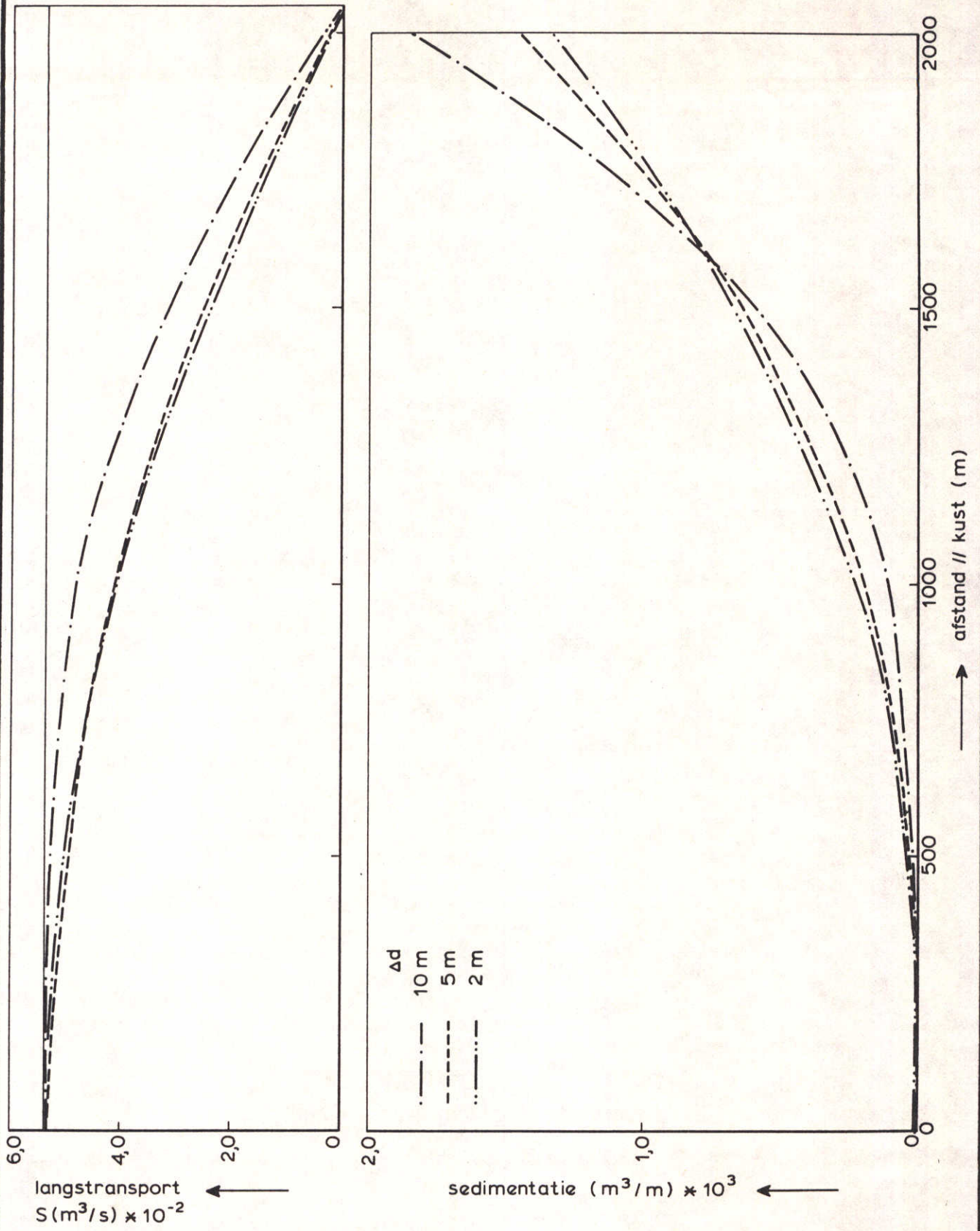
PROEF 1

DWARSPROFIELEN

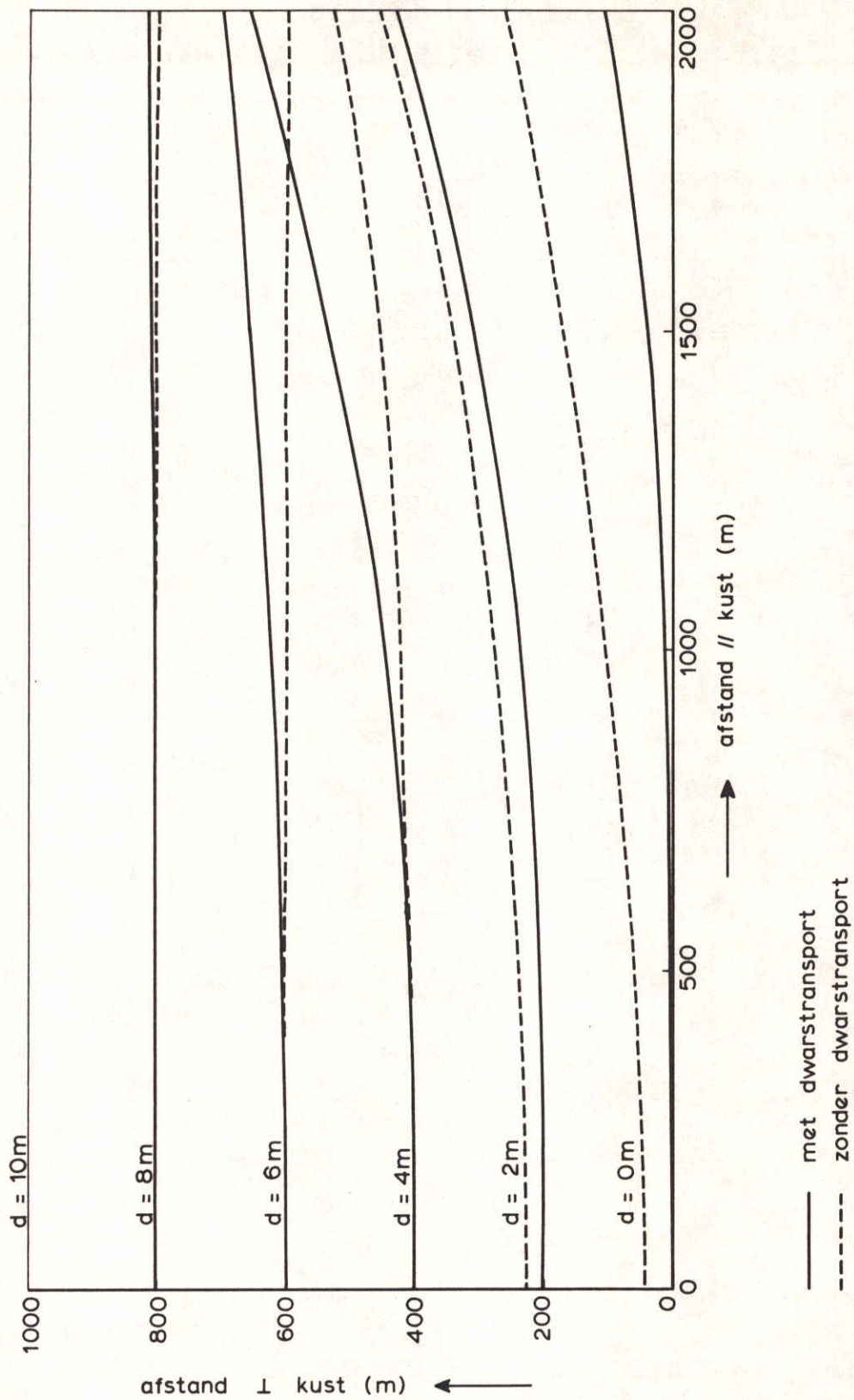
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

R 1605

FIG. 3



VERLOOP VAN SEDIMENTATIE EN SEDIMENT -  
TRANSPORT IN LANGSRICHTING



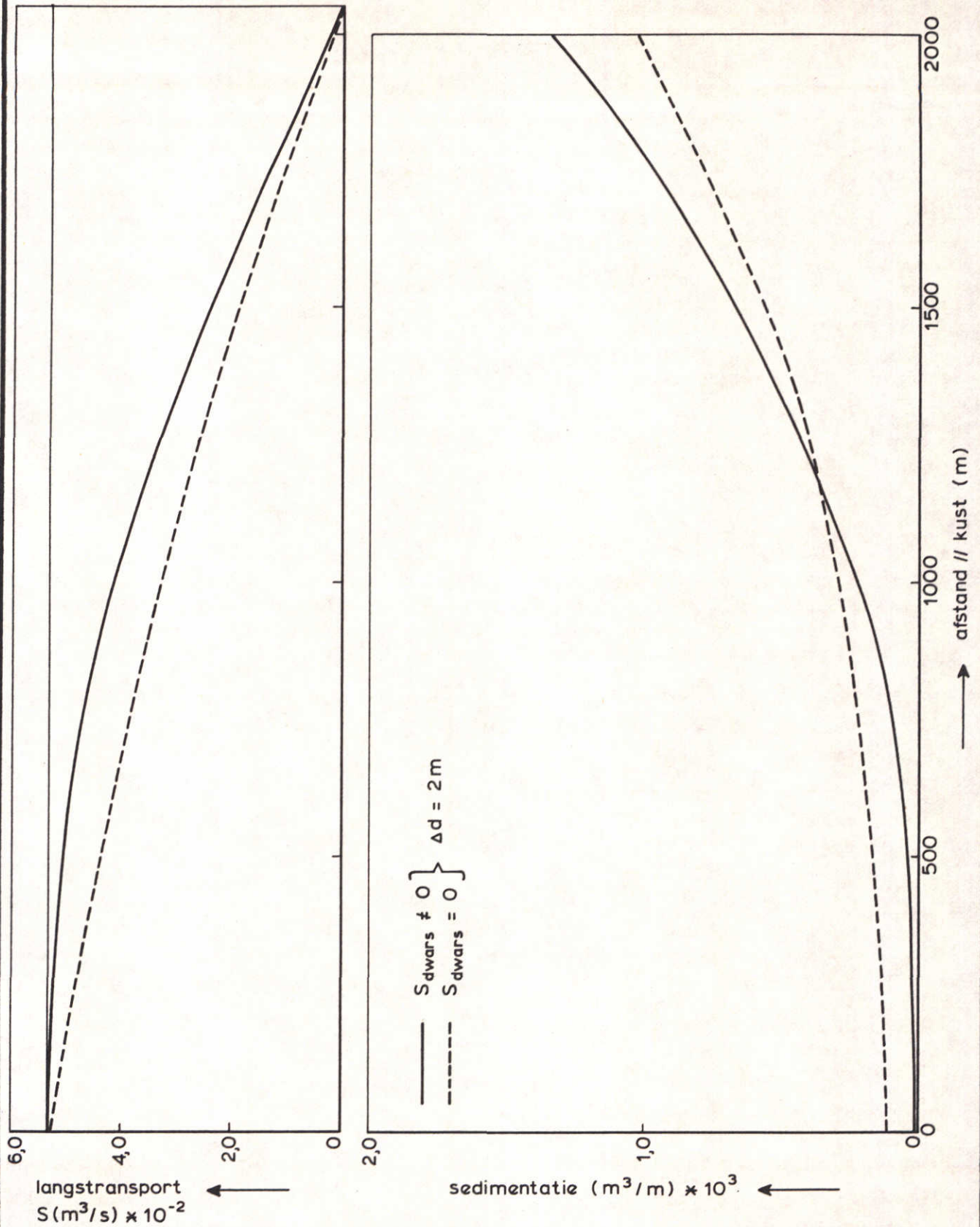
INVLOED  $S_{dwars}$  OP KUSTONTWIKKELING

DIPTELIJNEN

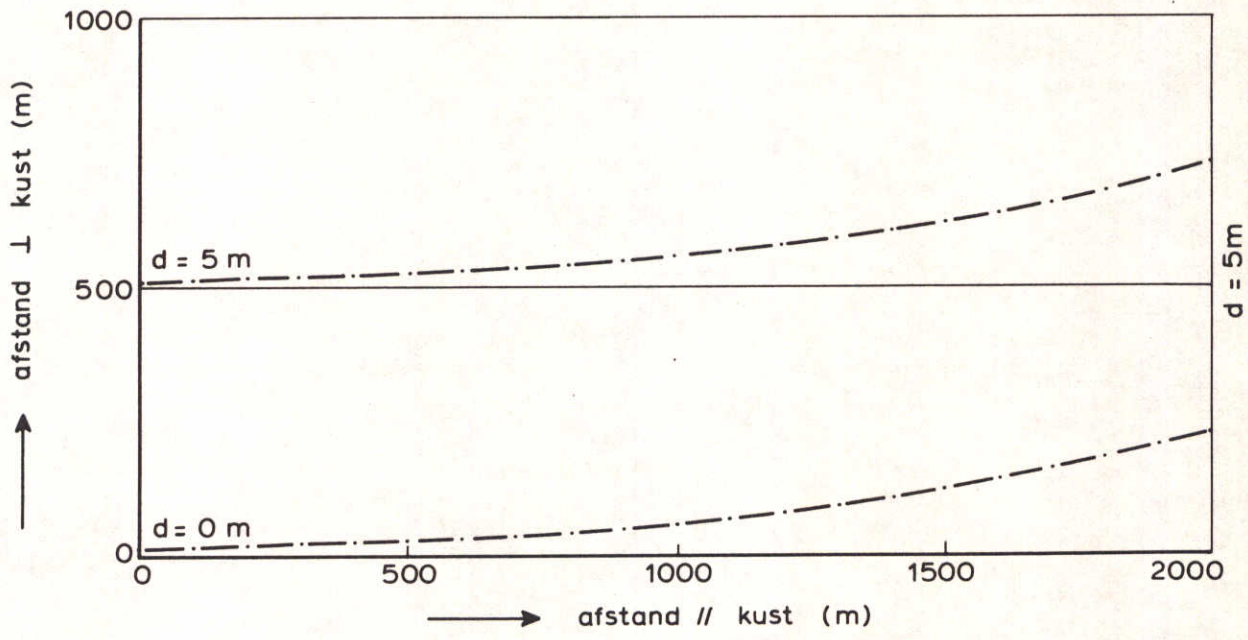
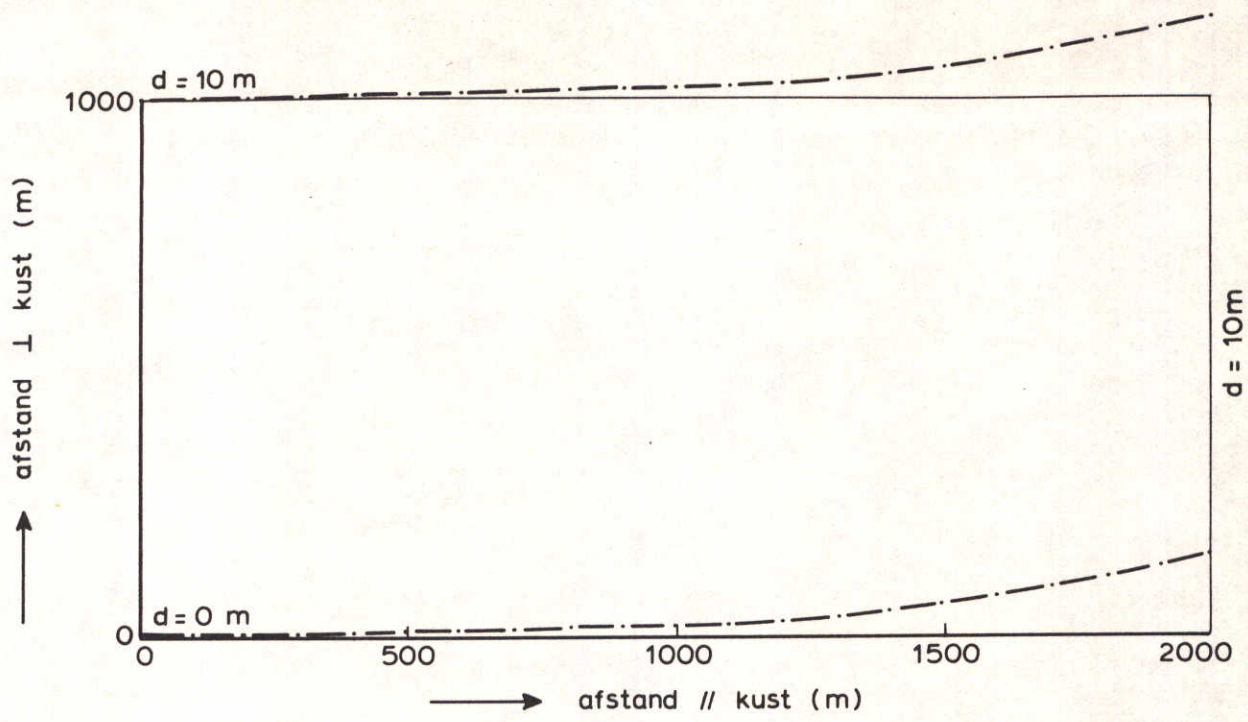
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

R 1605

FIG. 5



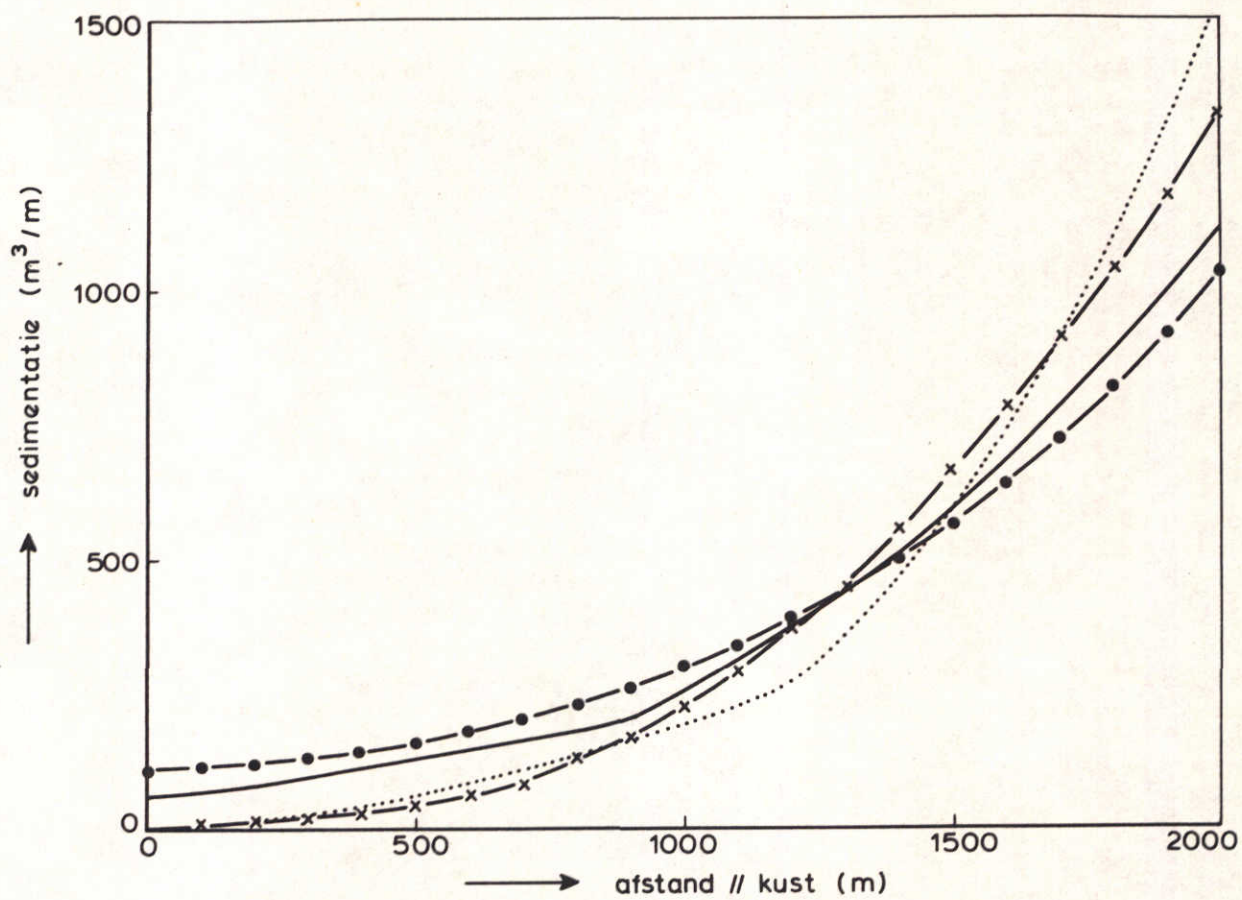
VERLOOP VAN SEDIMENTATIE EN SEDIMENT -  
 TRANSPORT IN LANGSRICHTING



$S(X = 0 \text{ M}) = 0,054 \text{ M}^3/\text{S}$   
 $S(X = 2000 \text{ M}) = 0,000 \text{ M}^3/\text{S}$   
 $\phi' = 15^\circ$

————— kustligging  $t = 0$   
 - · - · - · kustligging  $t = \frac{1}{2} \text{ jr}$

KUSTLIJNVERANDERINGEN PELNARD - CONSIDERE	PROEF 1	
	DIEPTELIJNEN	
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM	R 1605	FIG. 7



- Pelnard Considère;  $\Delta d = 5\text{ m}$
- ..... Pelnard Considère;  $\Delta d = 10\text{ m}$
- x — N.L.;  $\Delta d = 2\text{ m}$ ,  $S_{\text{dwars}} \neq 0$
- • — N.L.;  $\Delta d = 2\text{ m}$ ,  $S_{\text{dwars}} = 0$

VERLOOP VAN SEDIMENTATIE IN LANGSRICHTING

PROEF 1

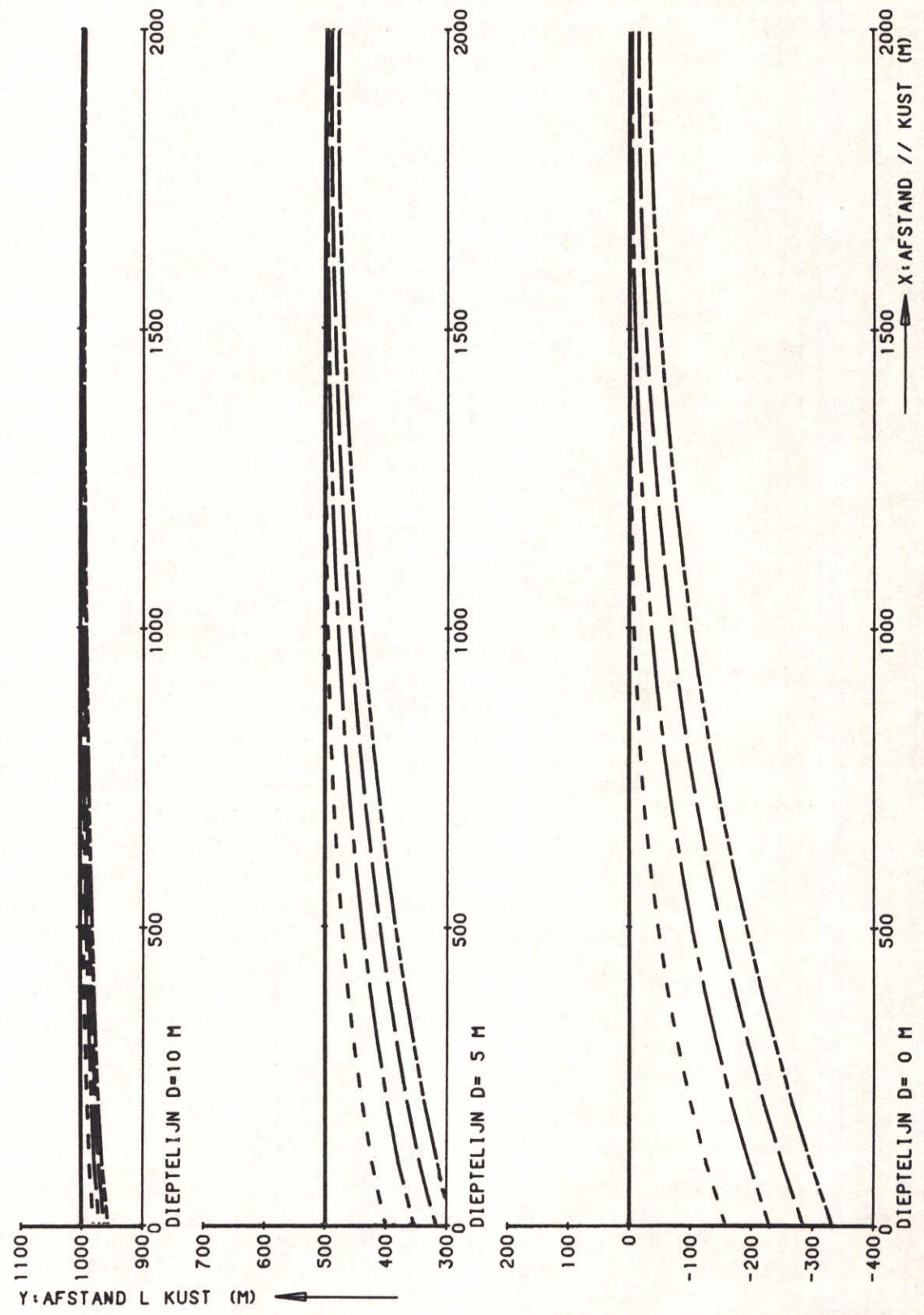
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

R 1605

FIG. 8

HO RMS. = 1.00 M  
 PH10 = 30.00 GRADEN  
 T = 8.00 S  
 S (X= 0 M) = 0.000 M3/S  
 S (X=2000 M) = 0.054 M3/S

T = 0.00 JR  
 T = 0.25 JR  
 T = 0.50 JR  
 T = 0.75 JR  
 T = 1.00 JR



EROSIE AAN LUZJDE VAN KONSTRUKTIE

PROEF 2

DIEPTELIJNEN

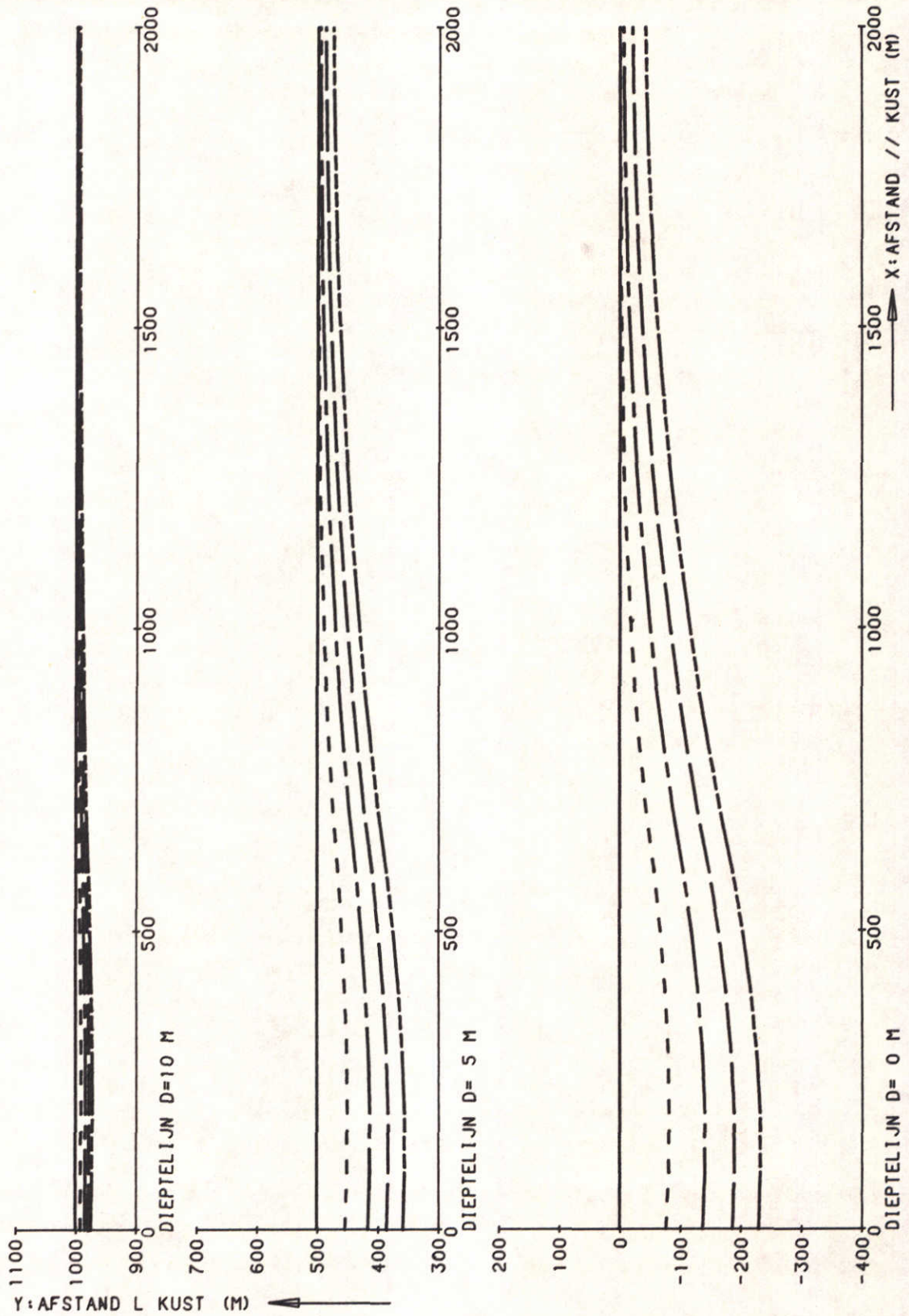
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

R1605

FIG. 9

HO RMS. = 1.00 M  
 PHIO = 30.00 GRADEN  
 T = 8.00 S  
 S (X= 0 M) = 0.000 M<sup>3</sup>/S  
 S (X=2000 M) = 0.054 M<sup>3</sup>/S

— T = 0.00 JR  
 - - - T = 0.25 JR  
 - - - T = 0.50 JR  
 - - - T = 0.75 JR  
 - - - T = 1.00 JR



EROSIE AAN LIJZUDE VAN KONSTRUKTIE

PROEF 2

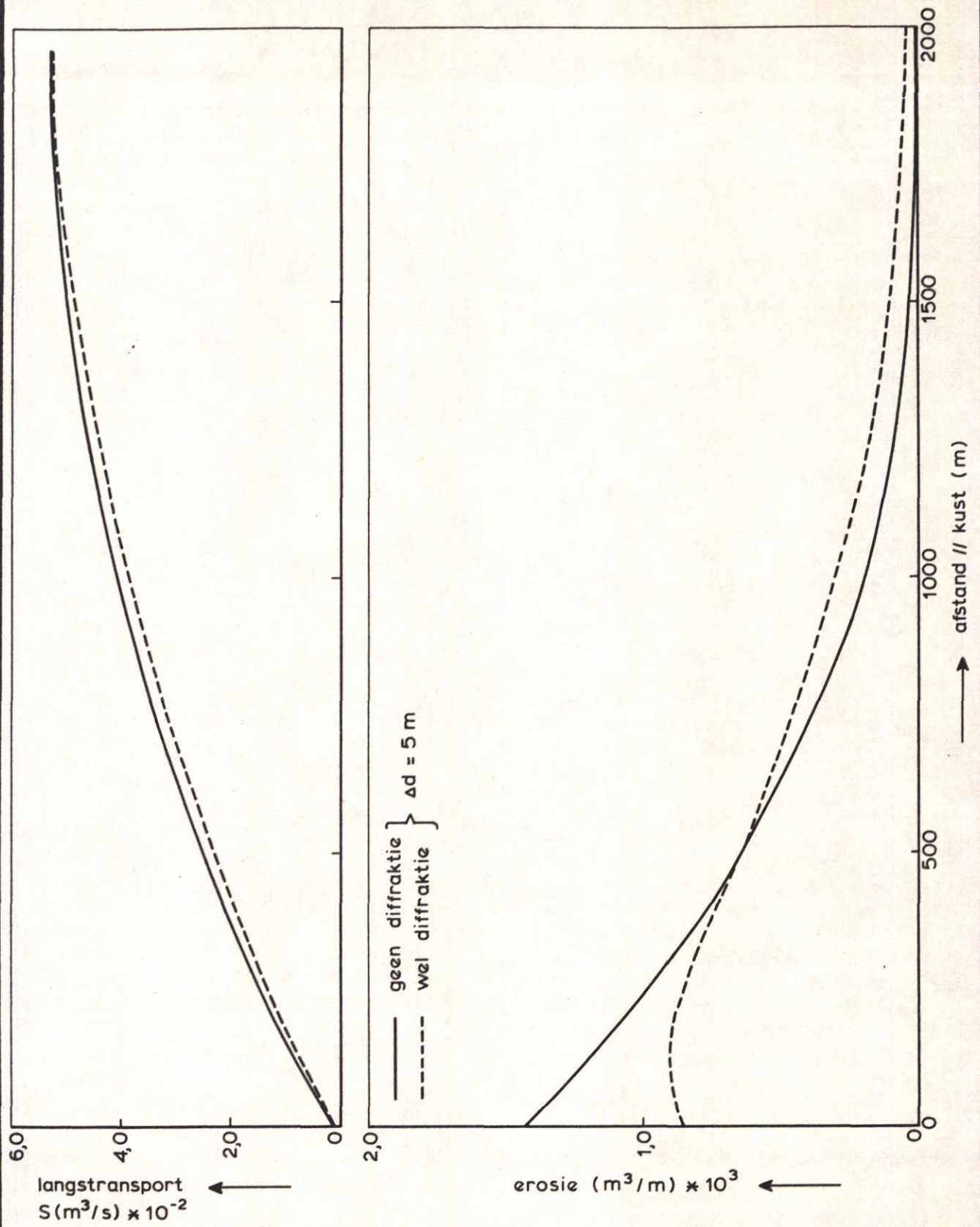
DIEPTELIJNEN

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

R1605

FIG. 10





VERLOOP VAN SEDIMENTATIE EN SEDIMENT -  
TRANSPORT IN LANGSRICHTING

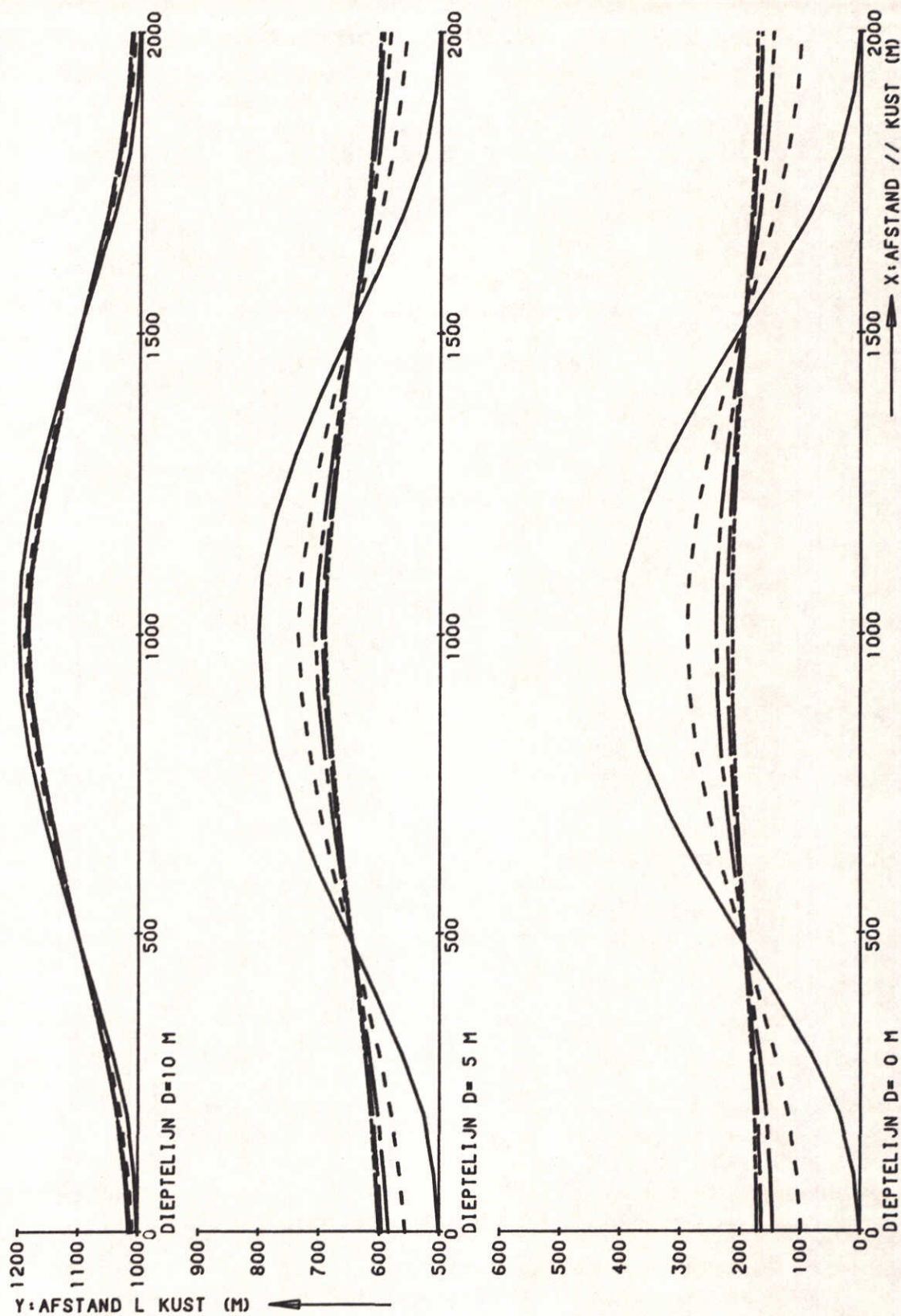
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

R 1605

FIG. 11

HO SIGN. = 1.00 M  
 PHIO = 0.00 GRADEN  
 T = 8.00 S  
 S (X= 0 M) = 0.000 M3/S  
 S (X=2000 M) = 0.000 M3/S

T = 0.00 JR  
 T = 0.25 JR  
 T = 0.50 JR  
 T = 0.75 JR  
 T = 1.00 JR



VERVORMING VAN KUST MET ZANDSUPPLETIE

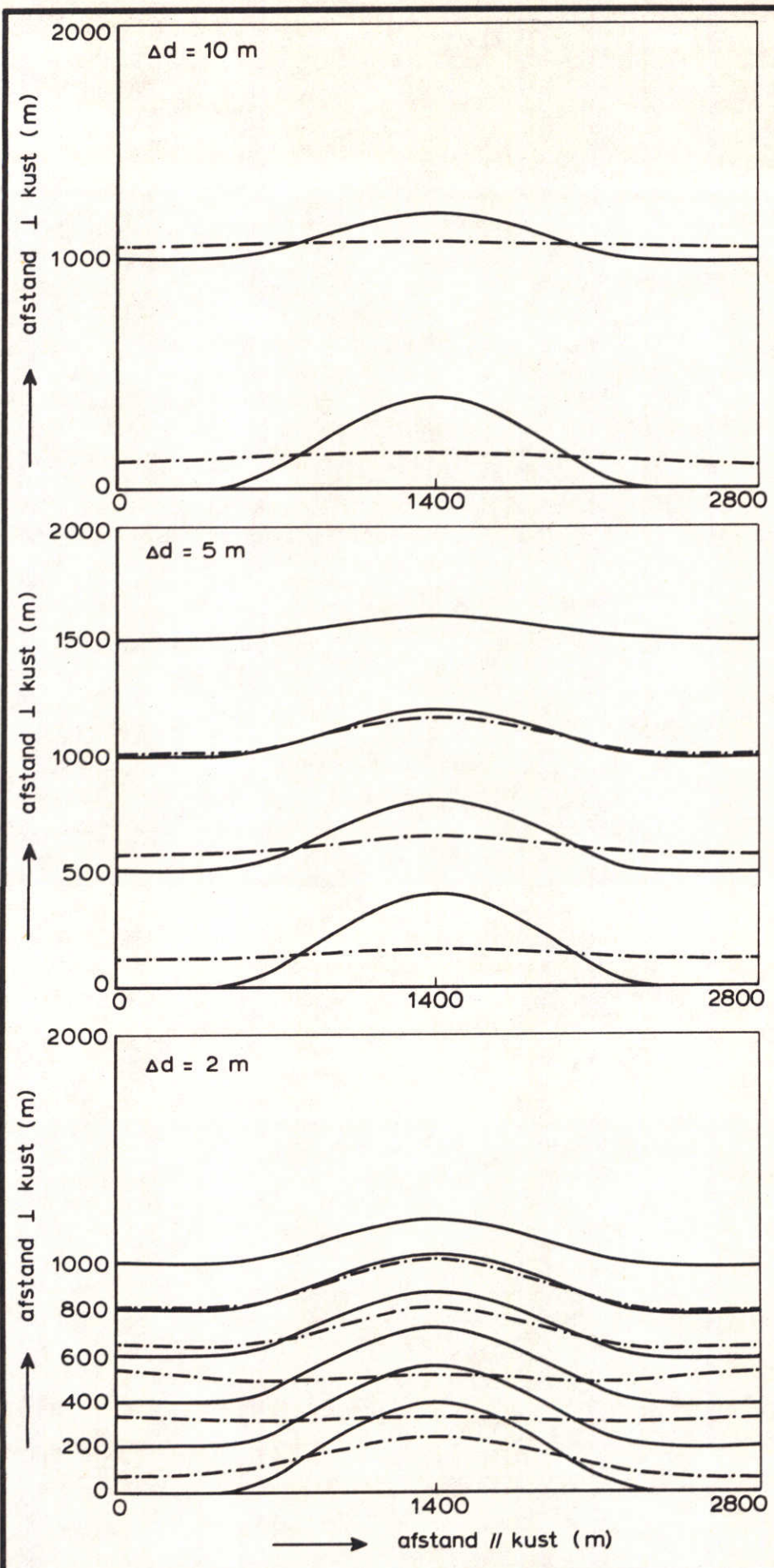
PROEF 3

DIEPTELIJNEN

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

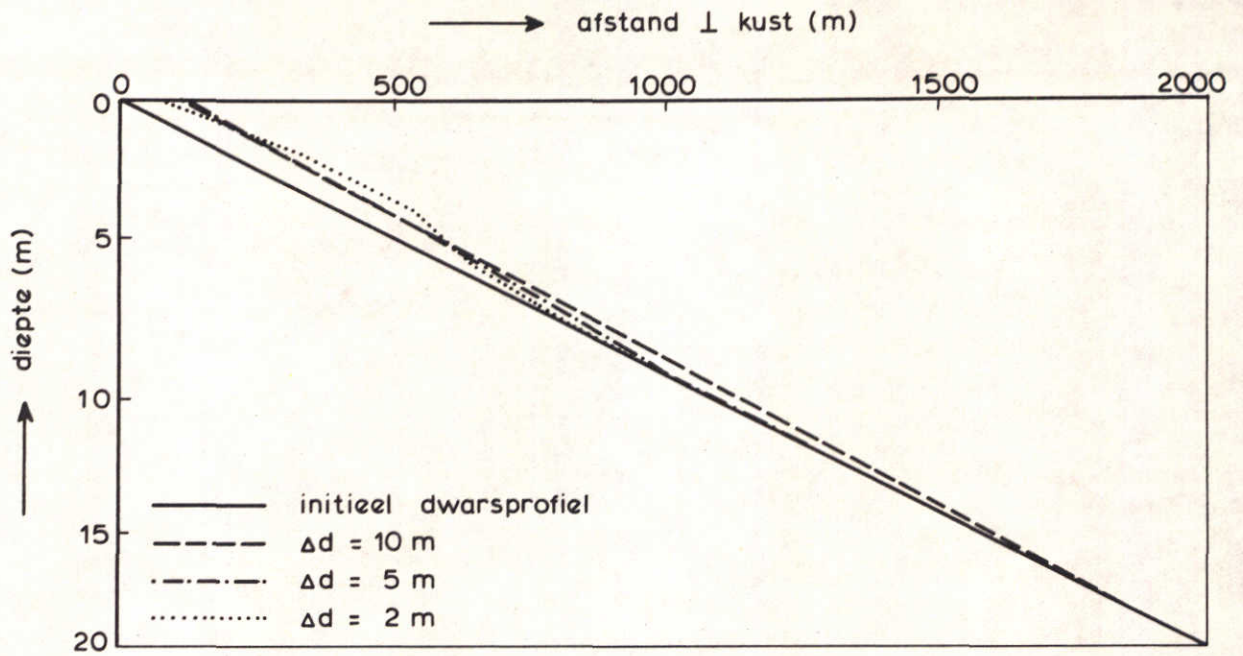
R1605

FIG. 12

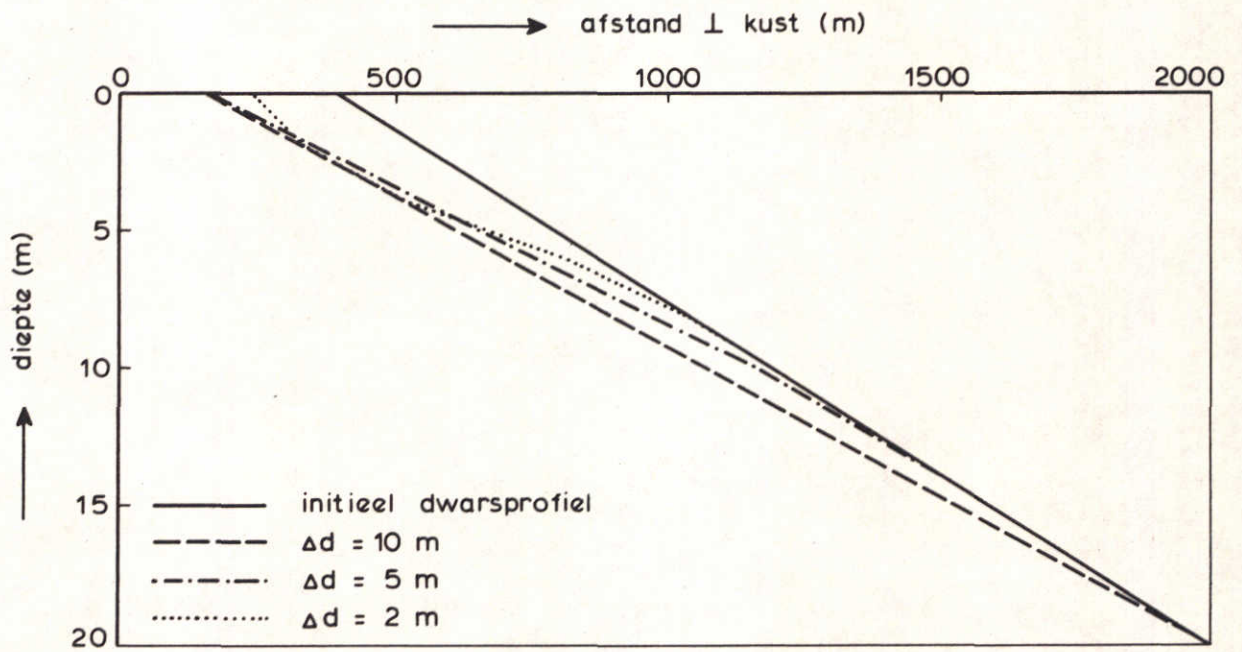


HO = 1.00 M  
 PHIO = 0.00 GRADEN  
 T = 8.00 S  
 S (X= 0M) = 0.000 M3/S  
 S (X= 2800M) = 0.000 M3/S  
 — t = 0 jr  
 - · - · t = 1 jr

INVLOED KEUZE $\Delta d$ OP KUSTONTWIKKELING	PROEF 3	
	DIEPTELIJNEN	
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM	R 1605	FIG. 13



DWARSDOORSNEDE  $x = 0$  m



DWARSDOORSNEDE  $x = 1400$  m

INVLOED KEUZE  $\Delta d$  OP KUSTONTWIKKELING

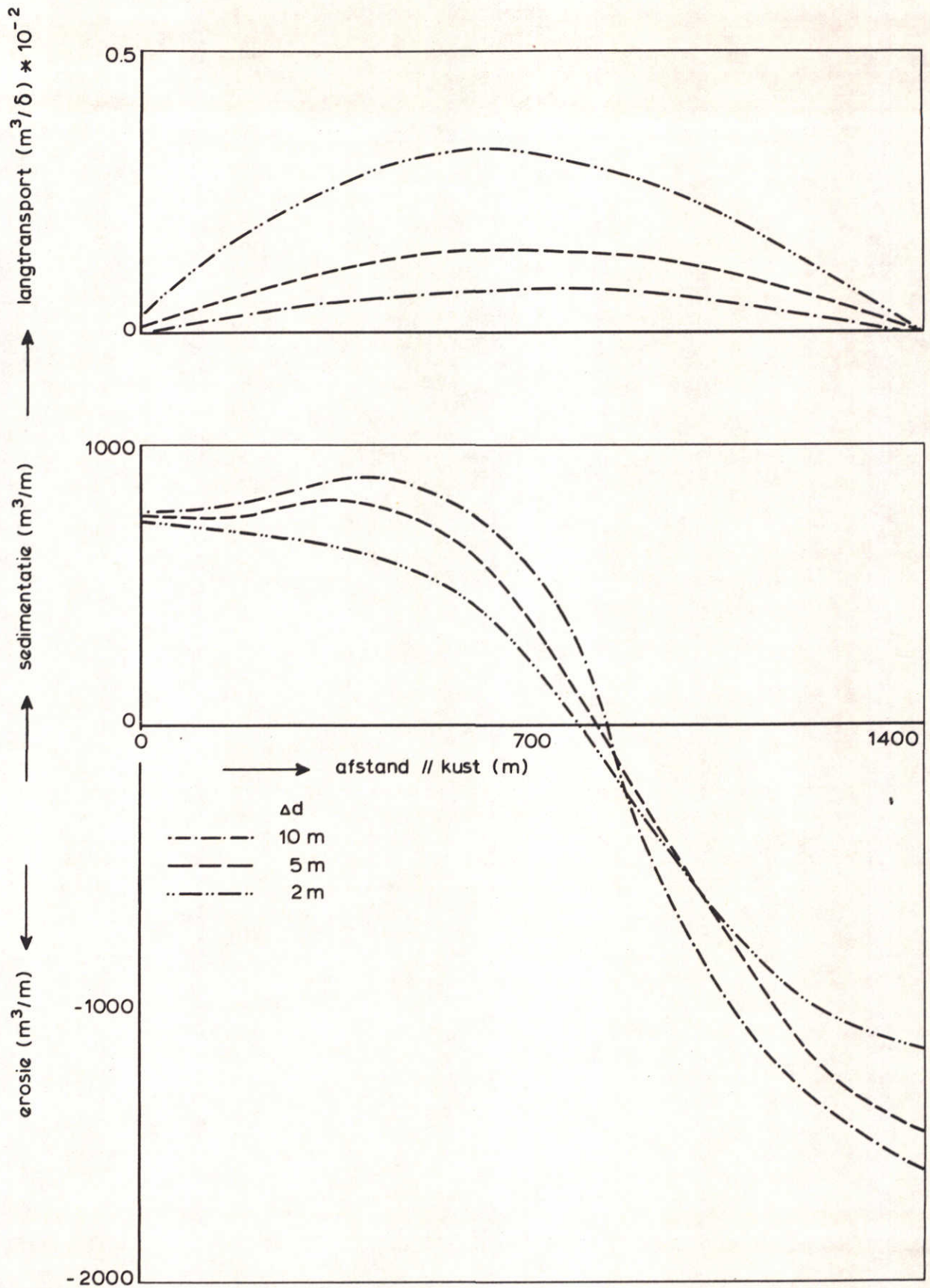
PROEF 3

DWARSPROFIELEN

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

R 1605

FIG. 14



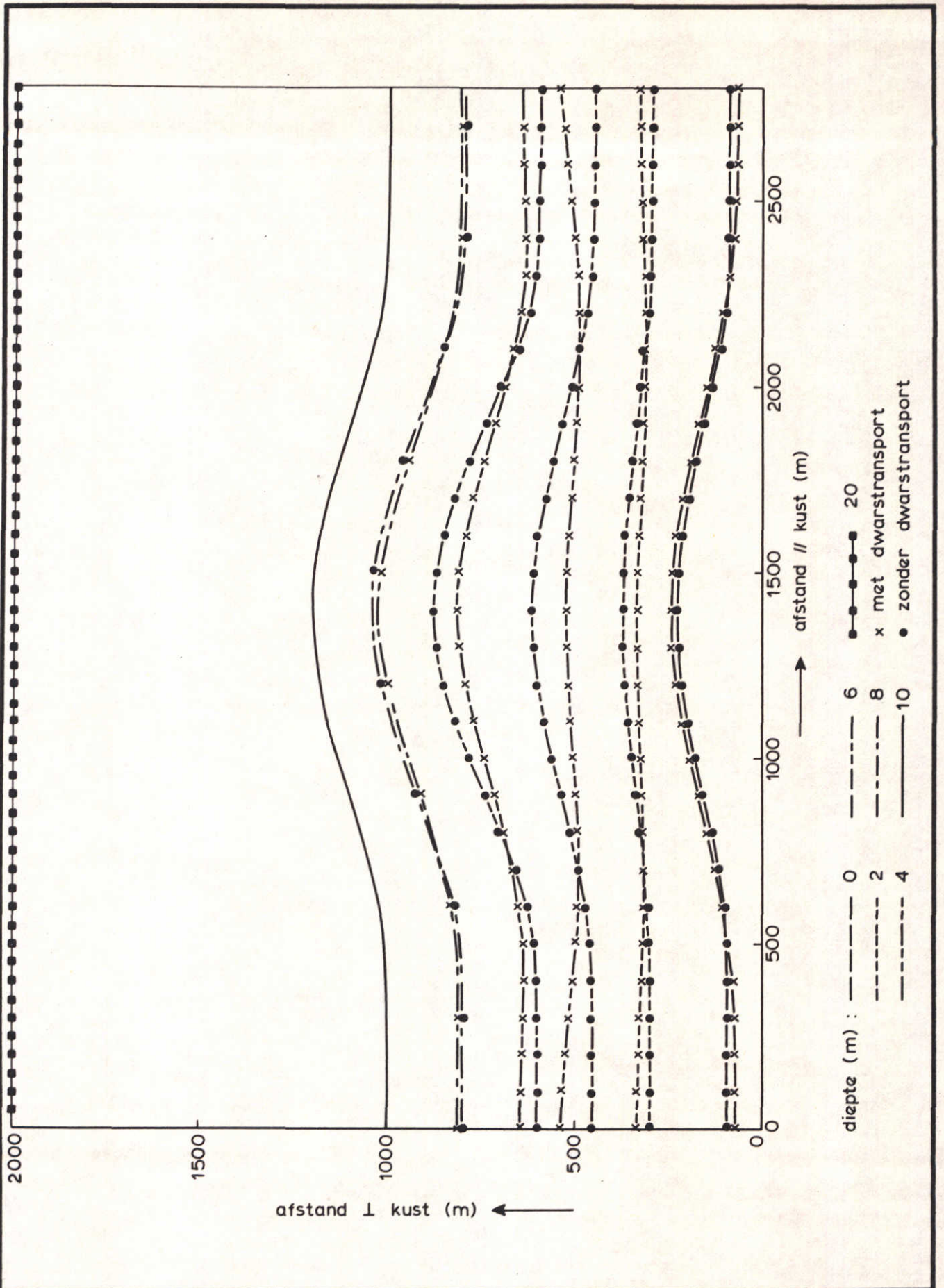
VERLOOP VAN SEDIMENTATIE / EROSIE EN  
SEDIMENTTRANSPORT IN LANGSRICHTING

PROEF 3

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

R 1605

FIG. 15



INVLOED  $S_{dwards}$  OP KUSTONTWIKKELING

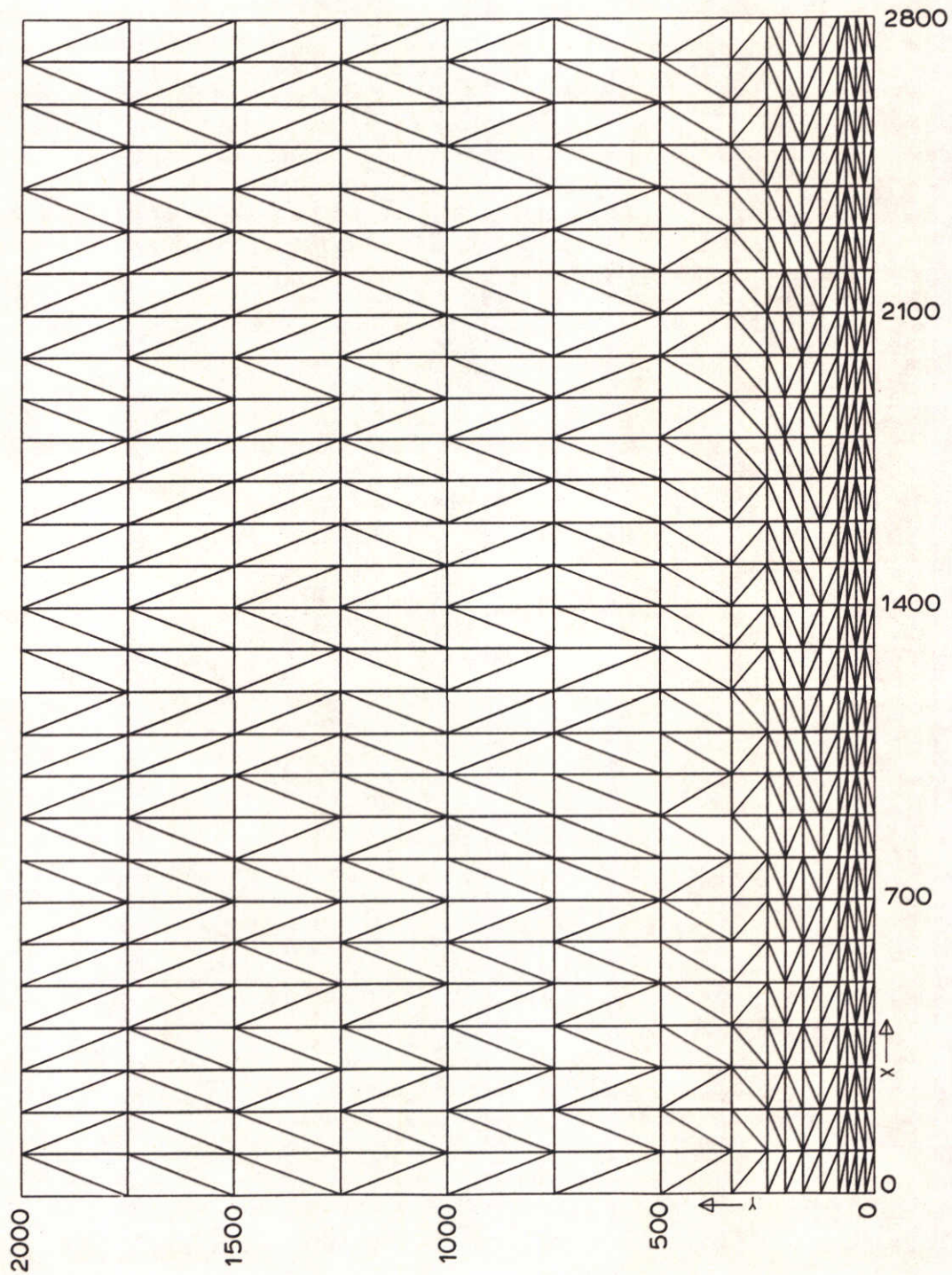
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

PROEF 3

DIEPTELIJNEN

R 1605

FIG. 16



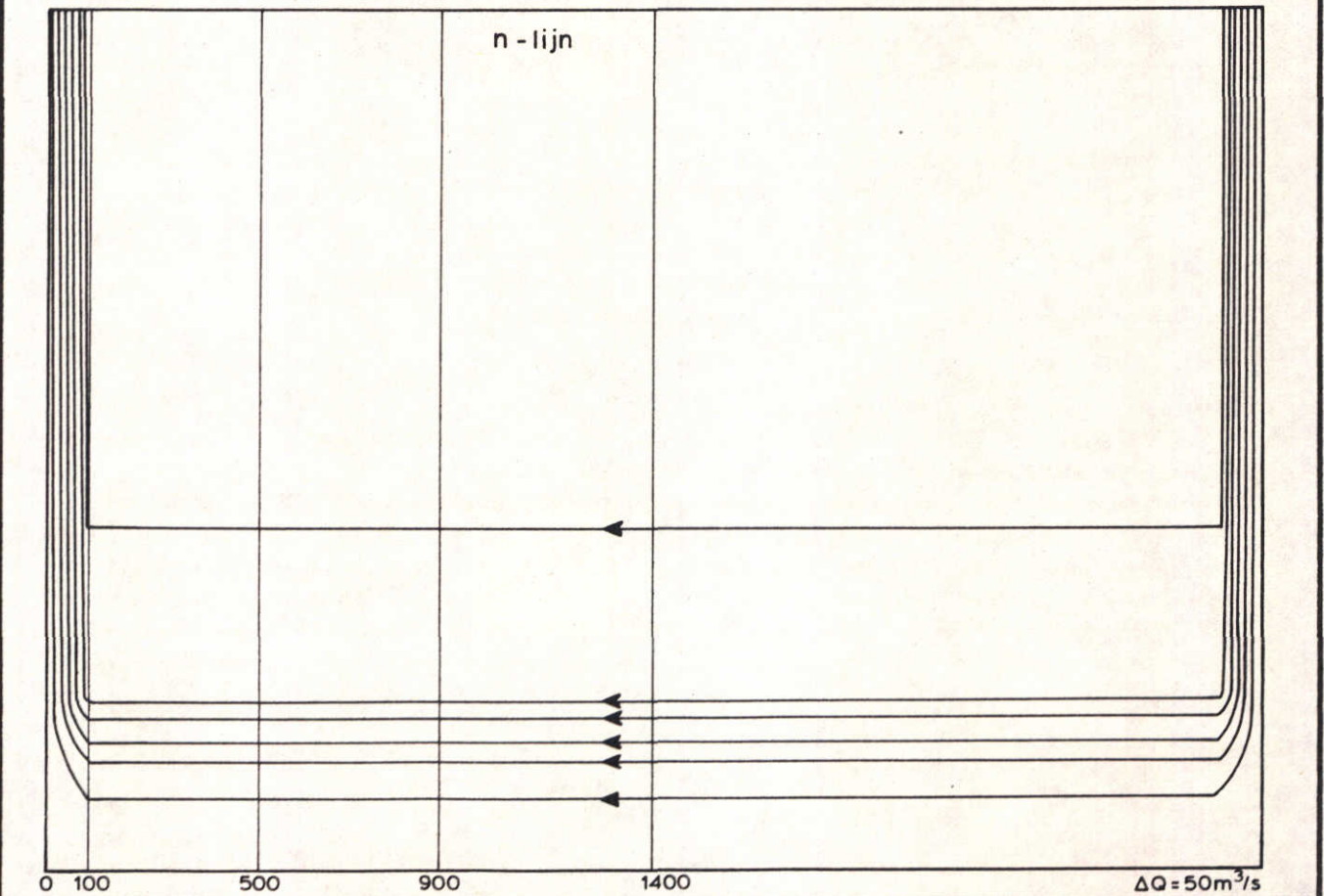
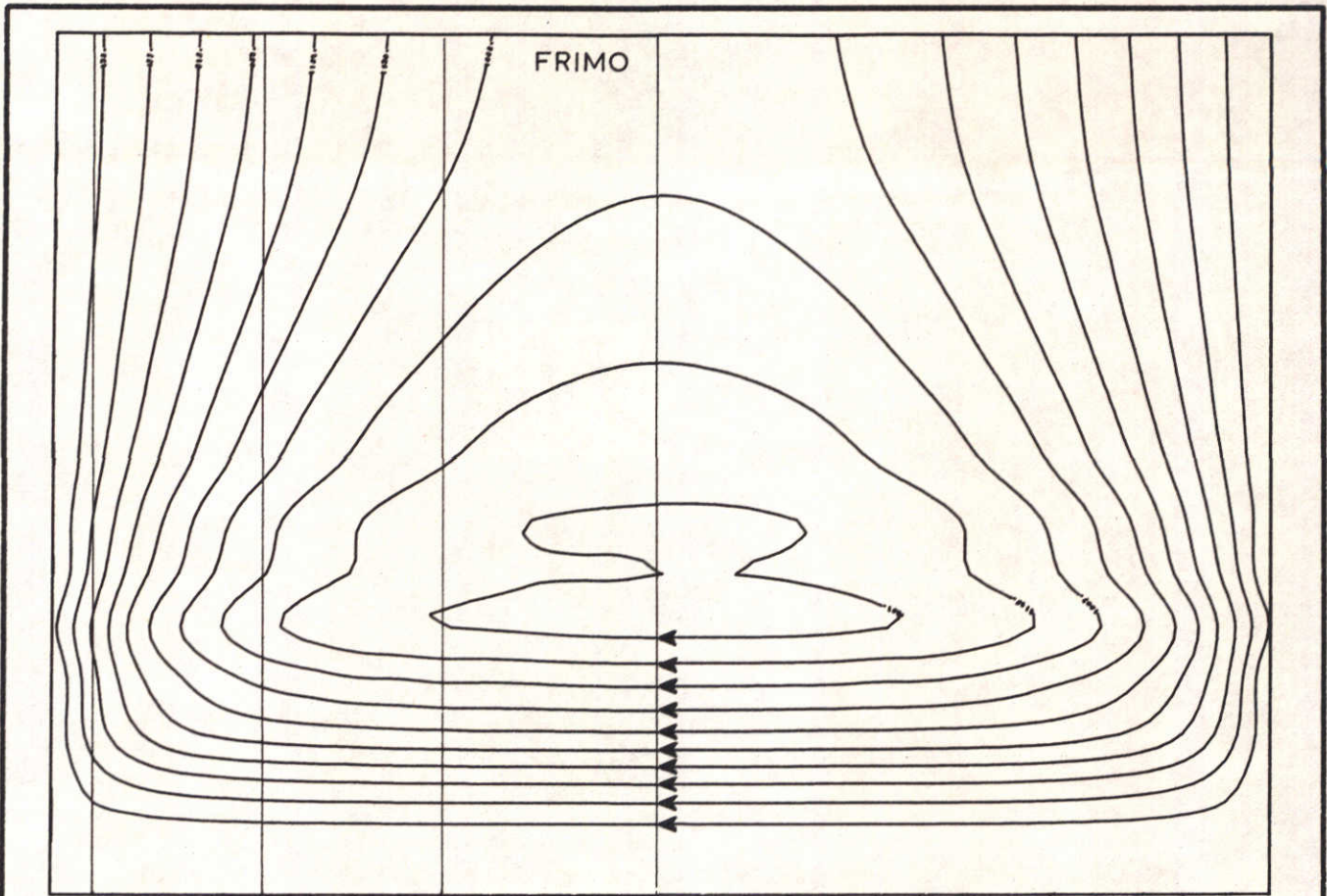
EINDIGE ELEMENTEN ROOSTER FRIMO

RECHTE KUST

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

R1605

FIG. 17



0 100 500 900 1400  $\Delta Q = 50 \text{ m}^3/\text{s}$

STROOMLIJNEN GOLFGEDREVEN STROMING

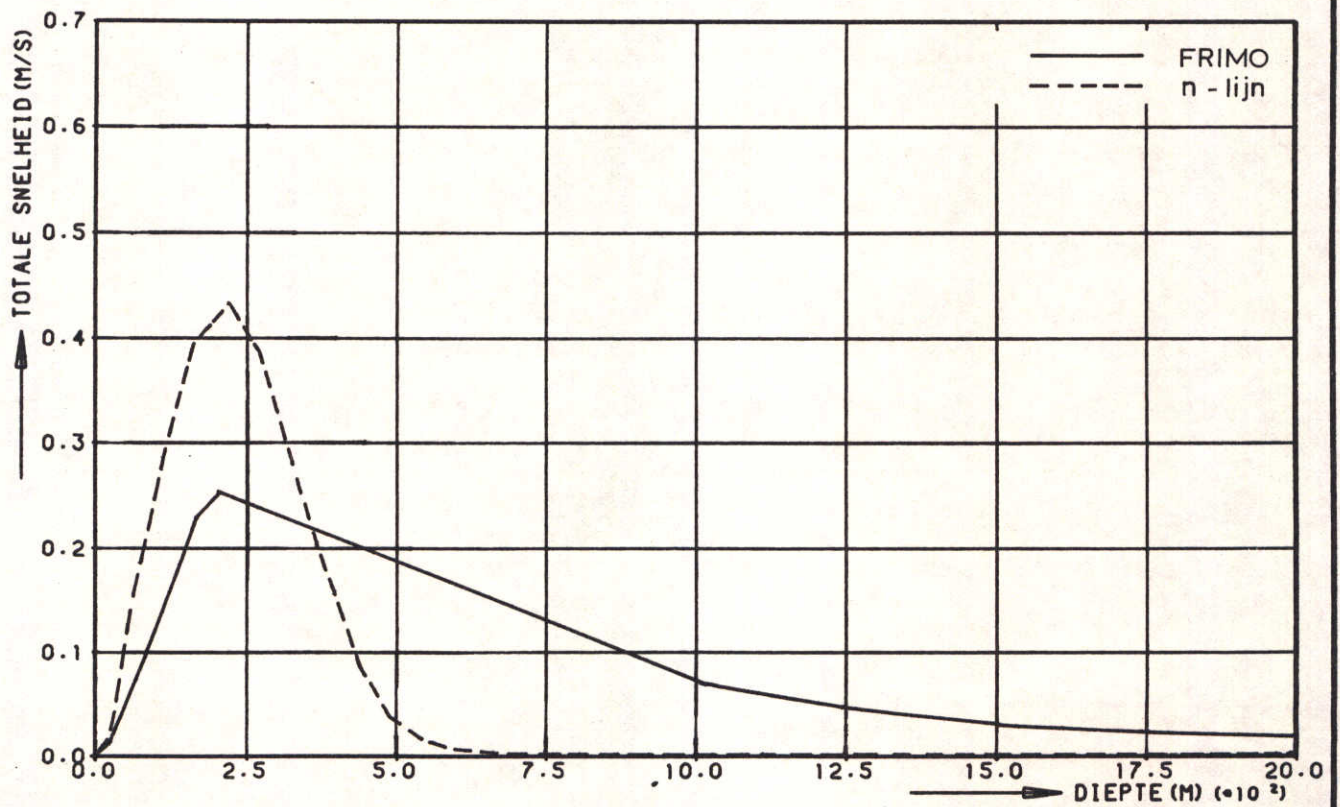
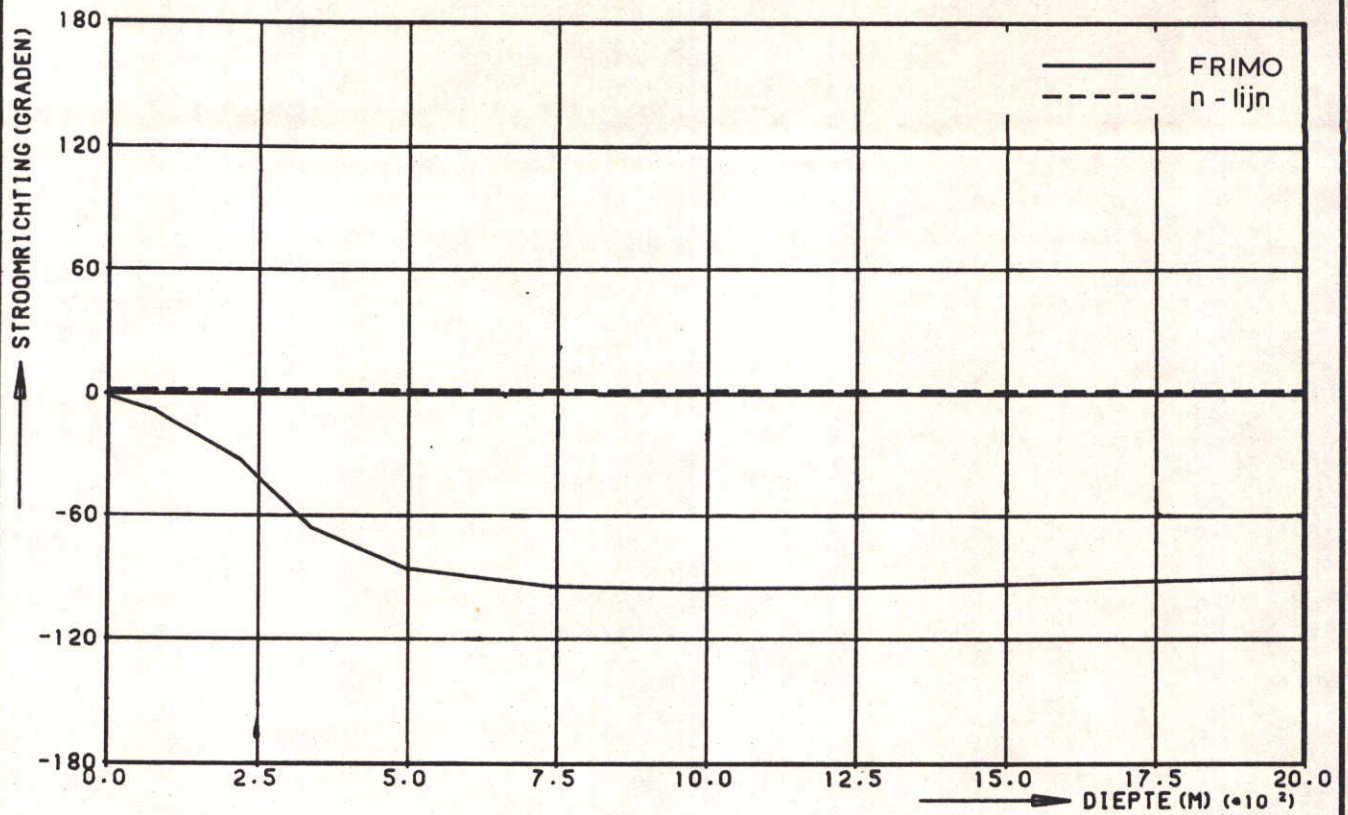
RECHTE KUST

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

R1605

FIG.18





SNELHEIDSVERDELING GOLFGEDREVEN STROMING

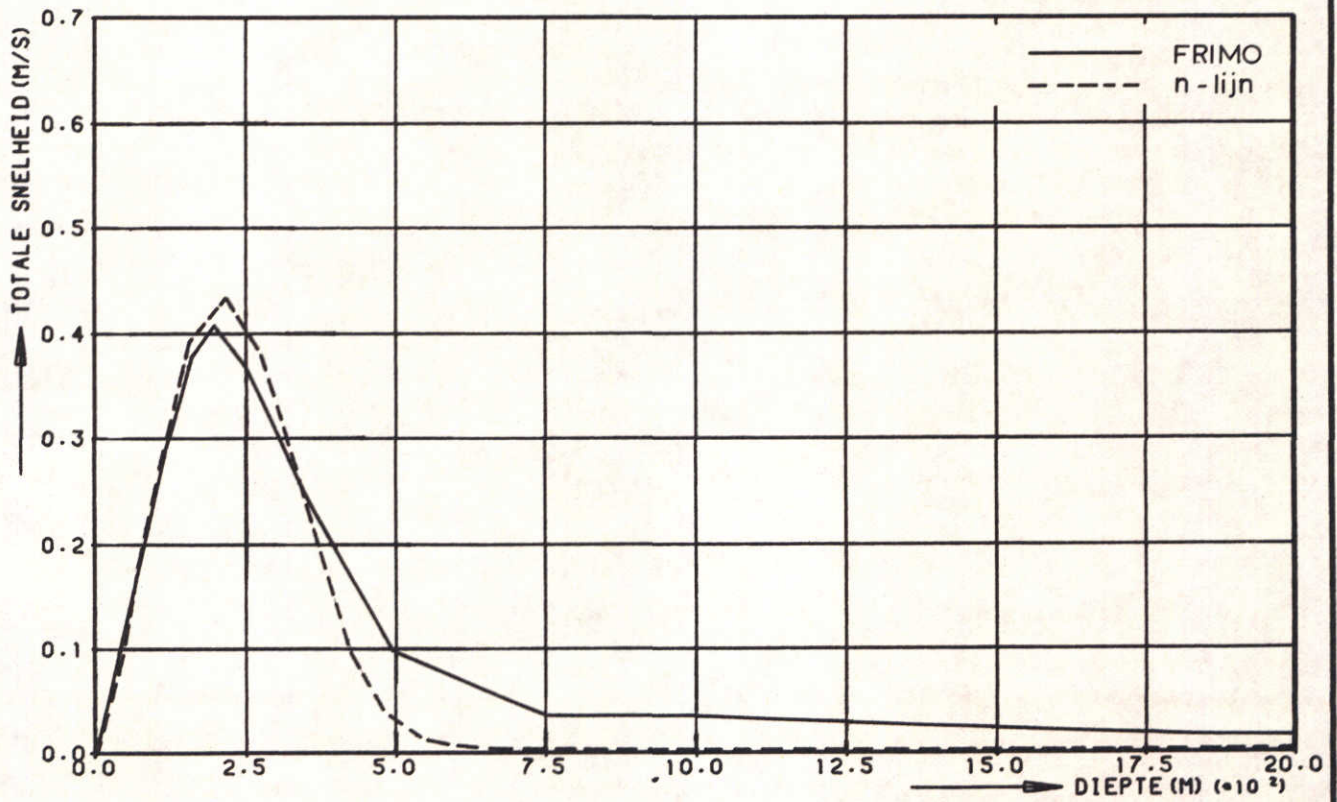
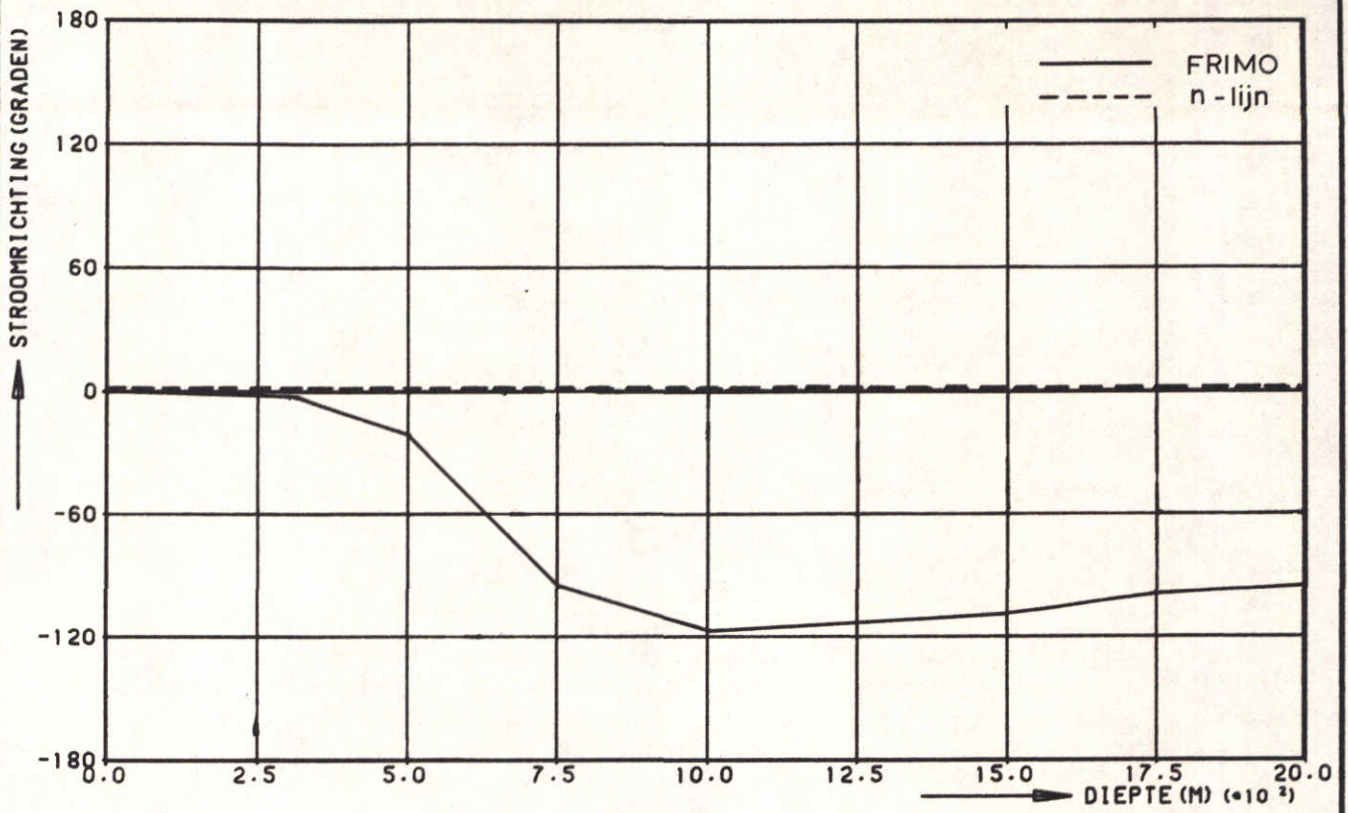
x = 100 m

RECHTE KUST

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

R 1605

FIG. 19a



SNELHEIDSVERDELING GOLFGEDREVEN STROMING

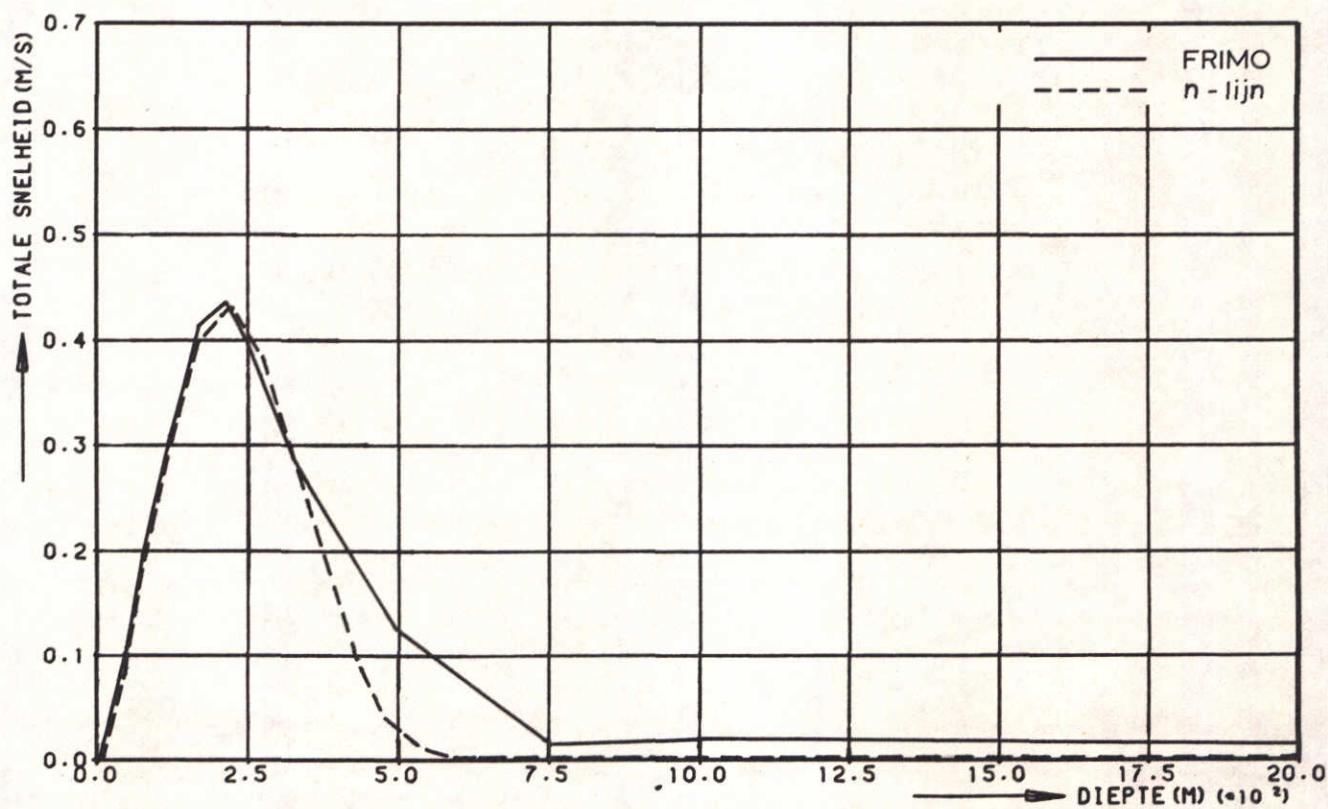
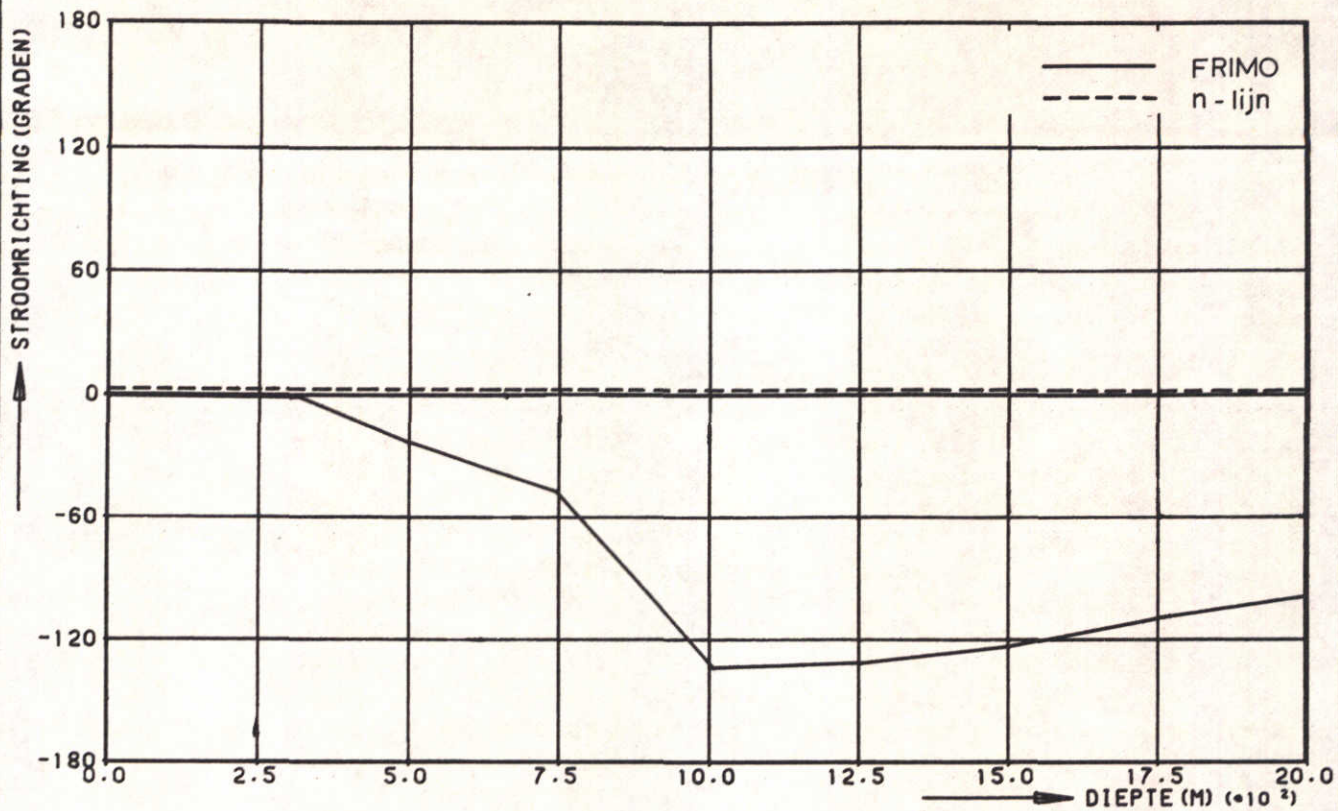
x = 500m

RECHTE KUST

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

R 1605

FIG. 19b



SNELHEIDSVERDELING GOLFGEDREVEN STROMING

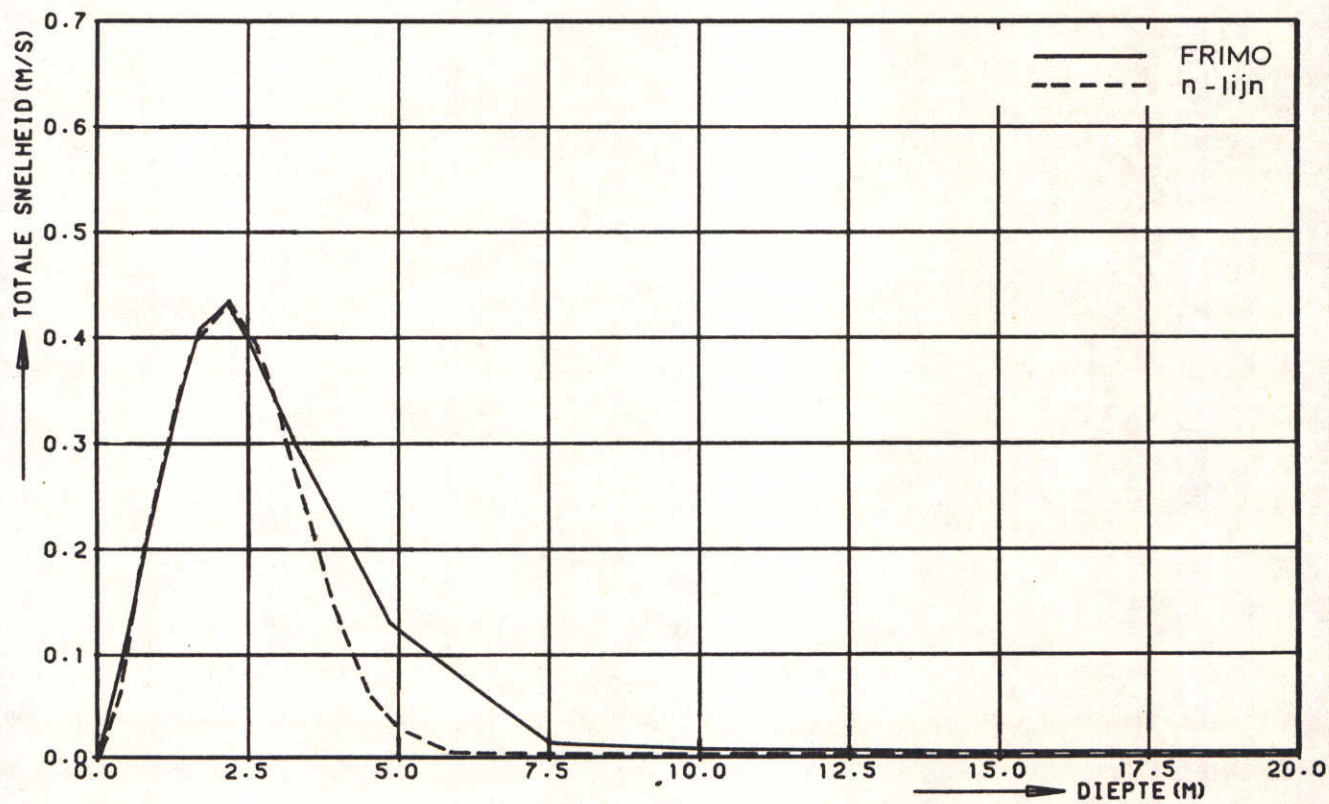
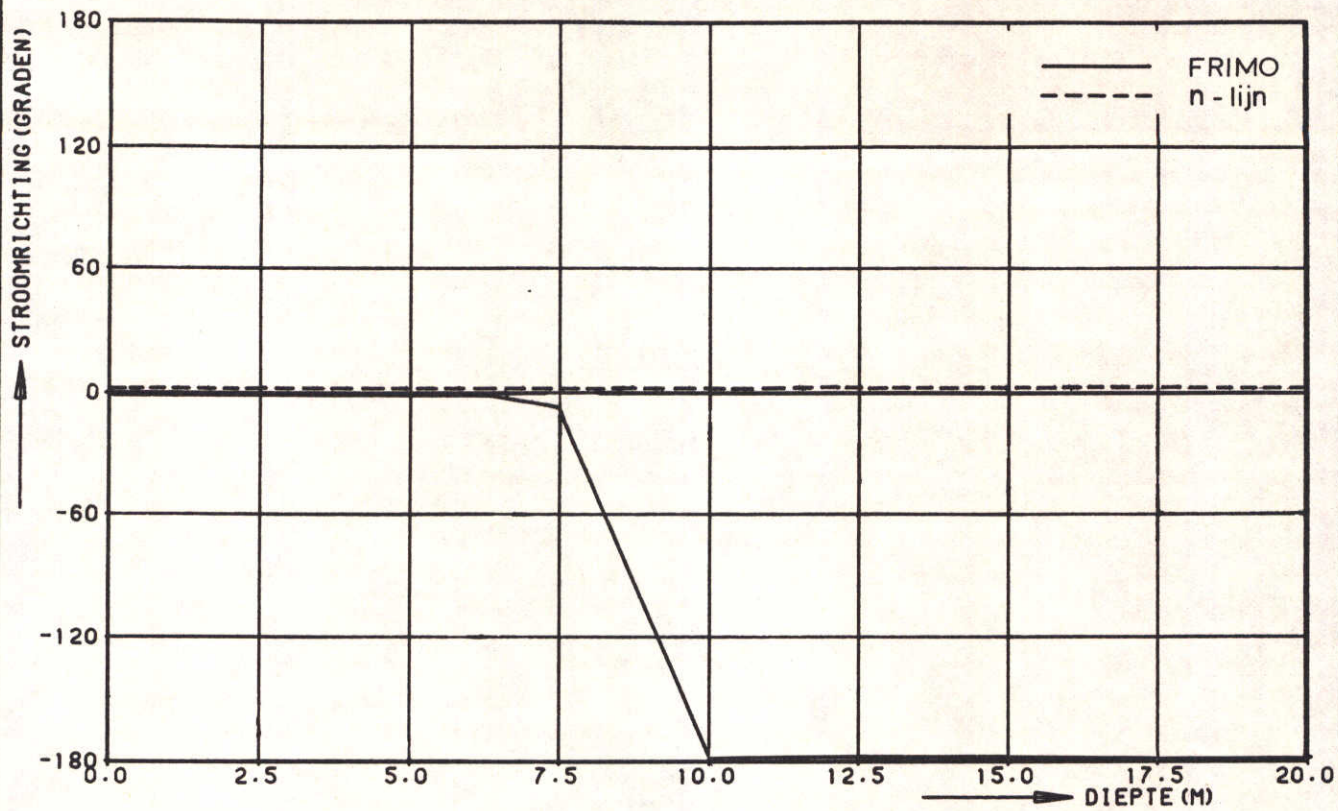
x = 900 m

RECHTE KUST

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

R 1605

FIG. 19 c



SNELHEIDSVERDELING GOLFGEDREVEN STROMING

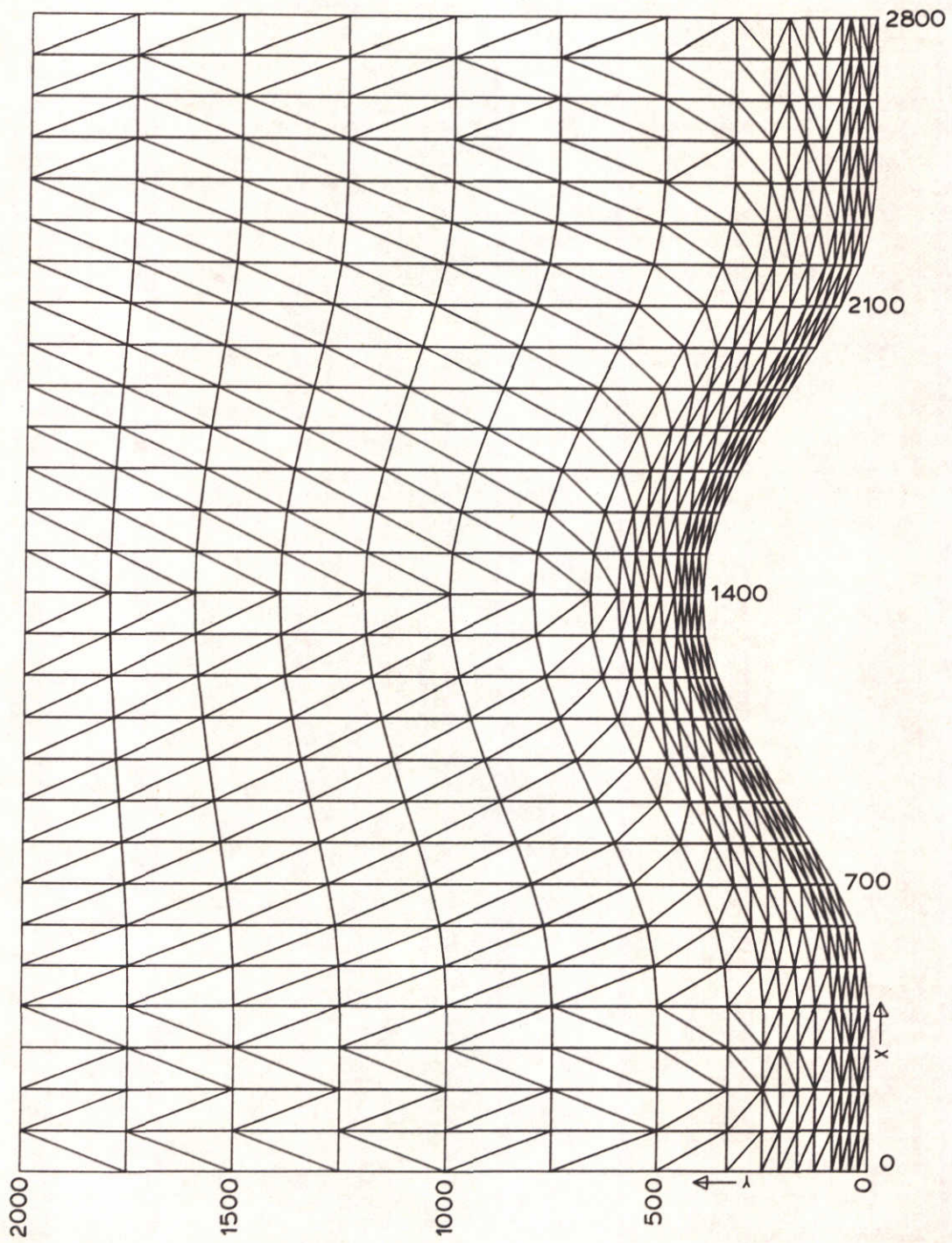
x = 1400m

RECHTE KUST

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

R 1605

FIG. 19d



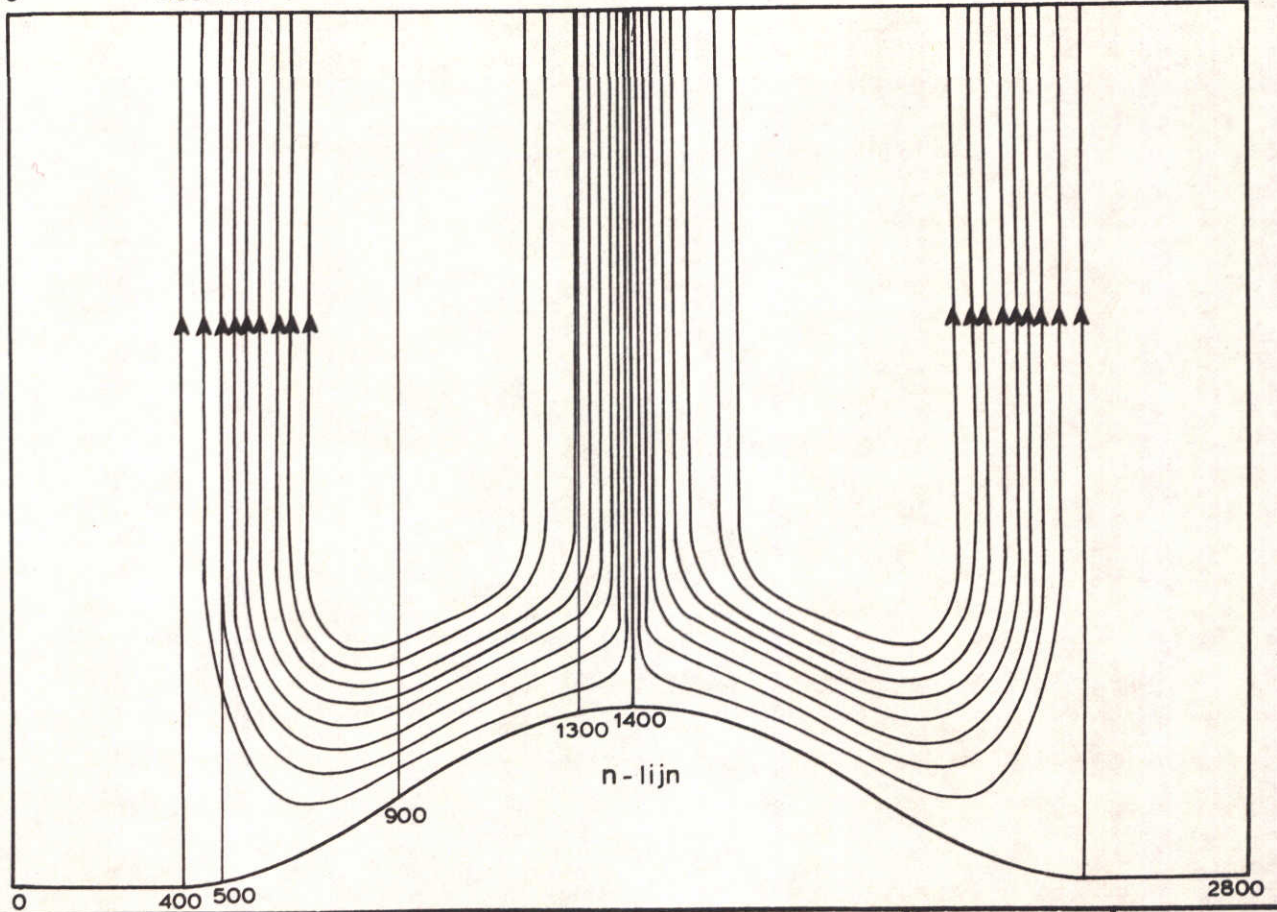
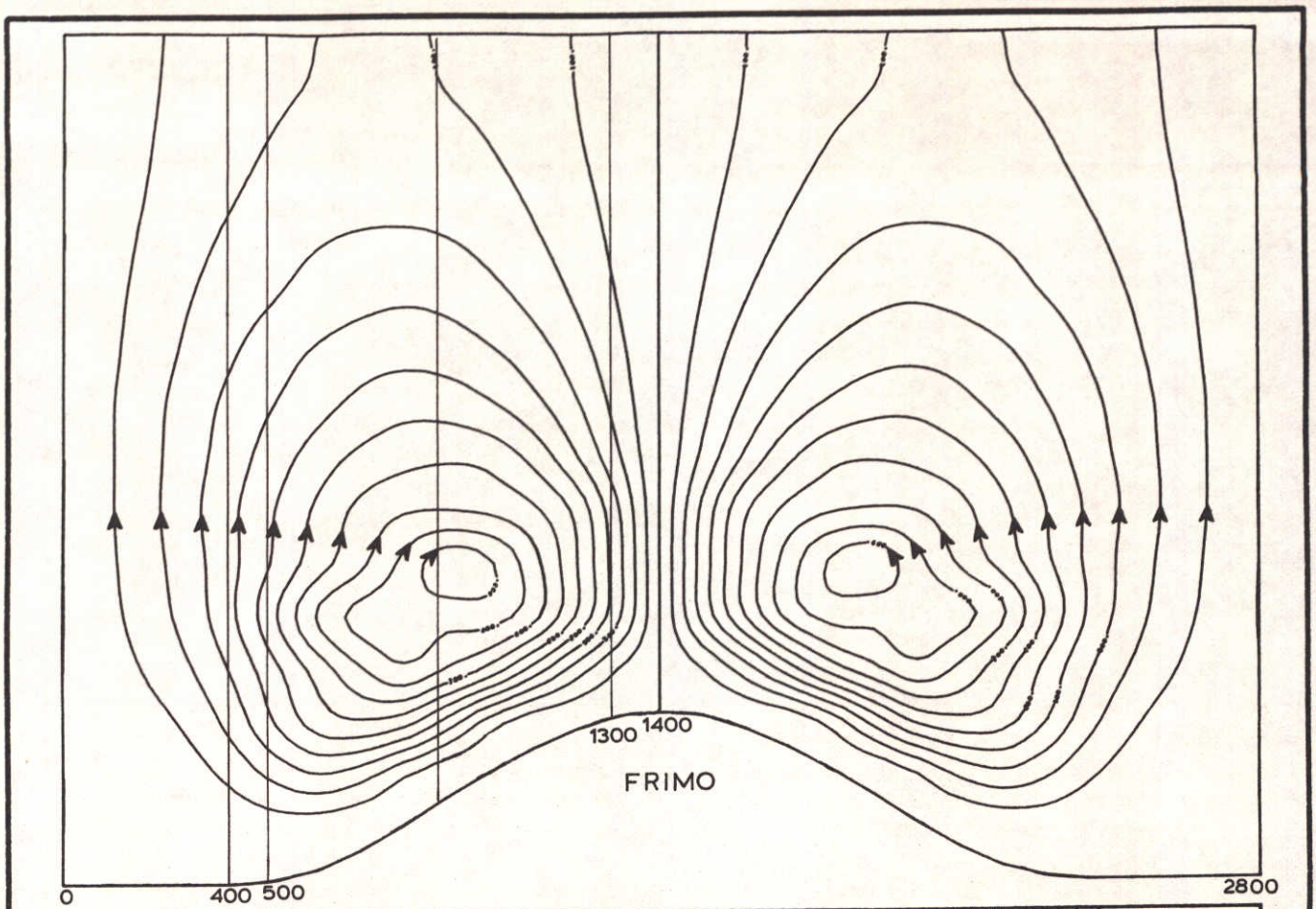
EINDIGE ELEMENTEN ROOSTER FRIMO

kust met suppletie

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

R1605

FIG.20



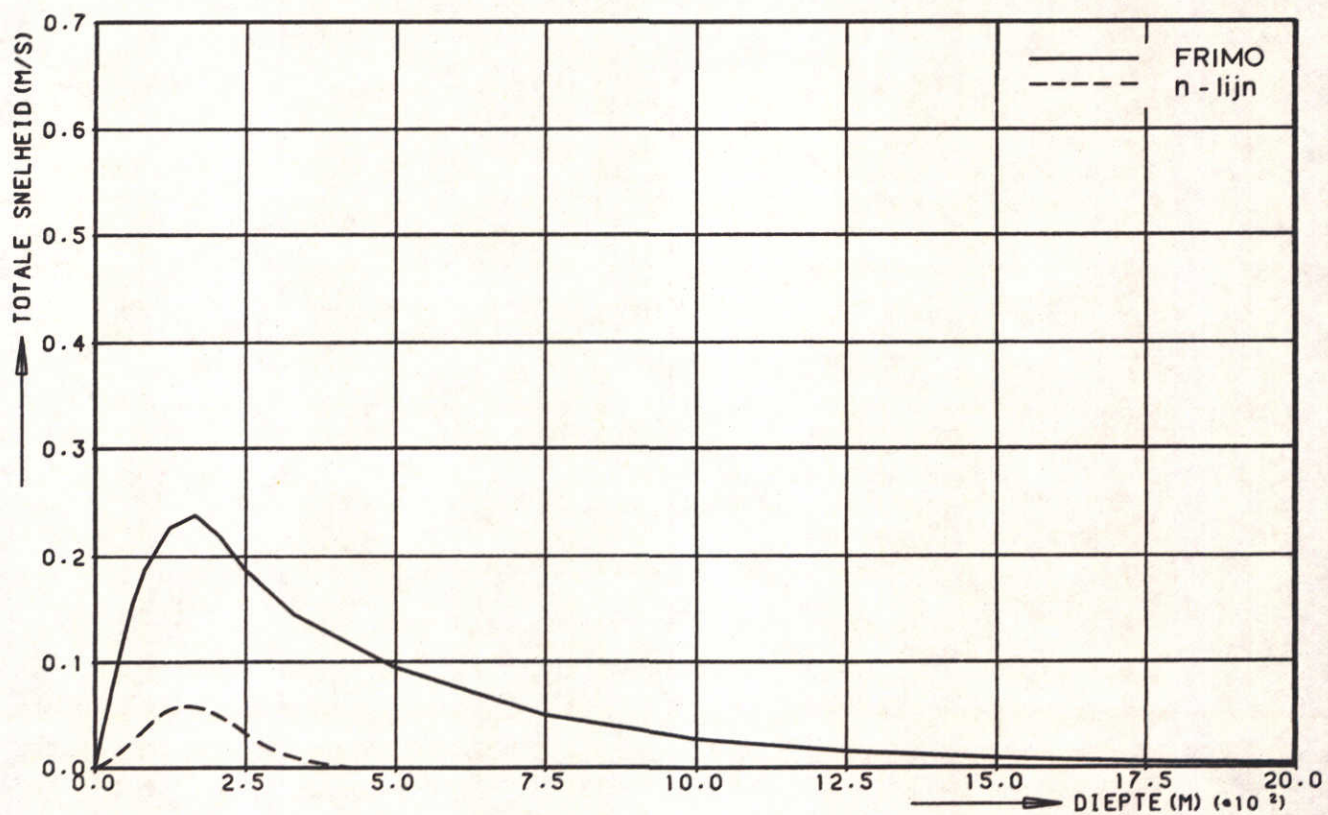
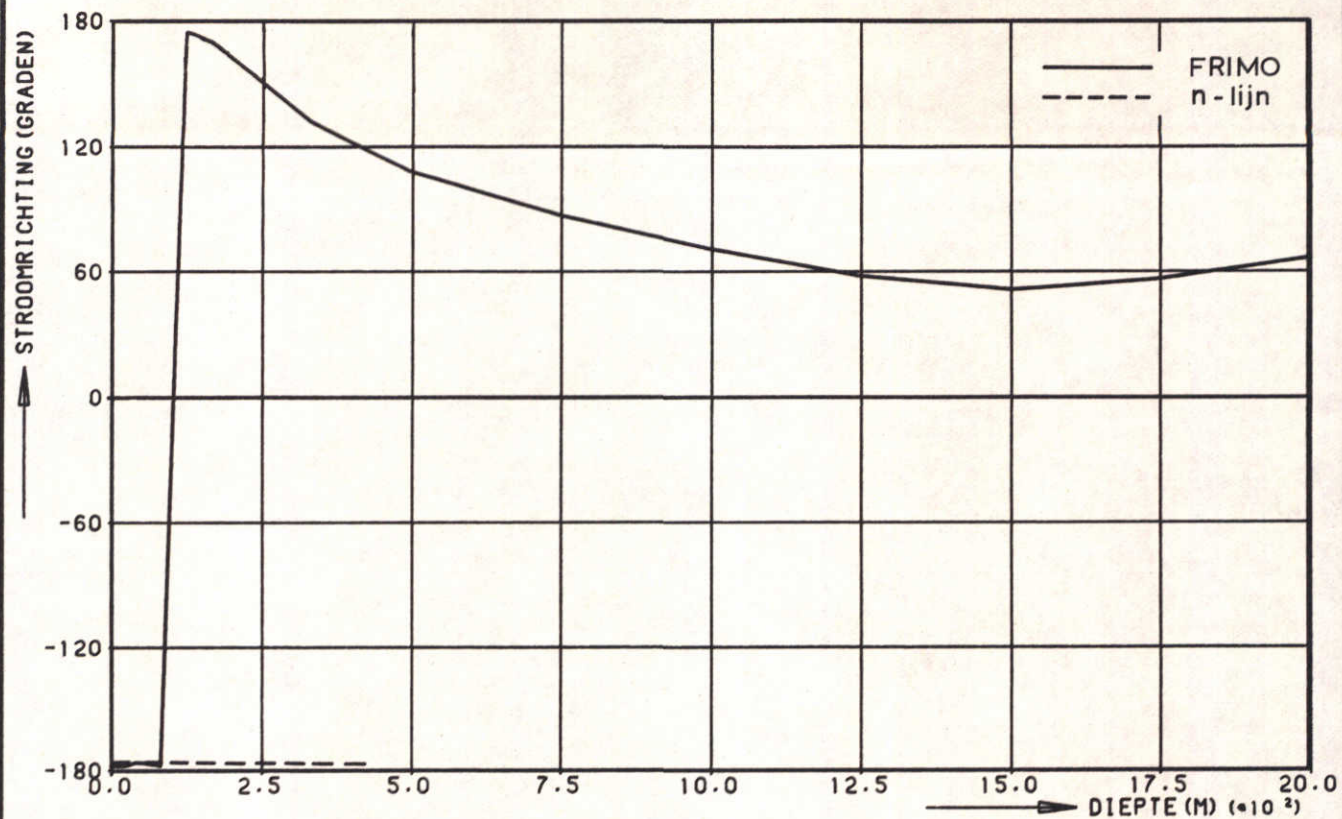
STROOMLIJNEN GOLFGEDREVEN STROMING

kust met suppletie

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

R1605

FIG. 21



SNELHEIDSVERDELING GOLFGEDREVEN STROMING

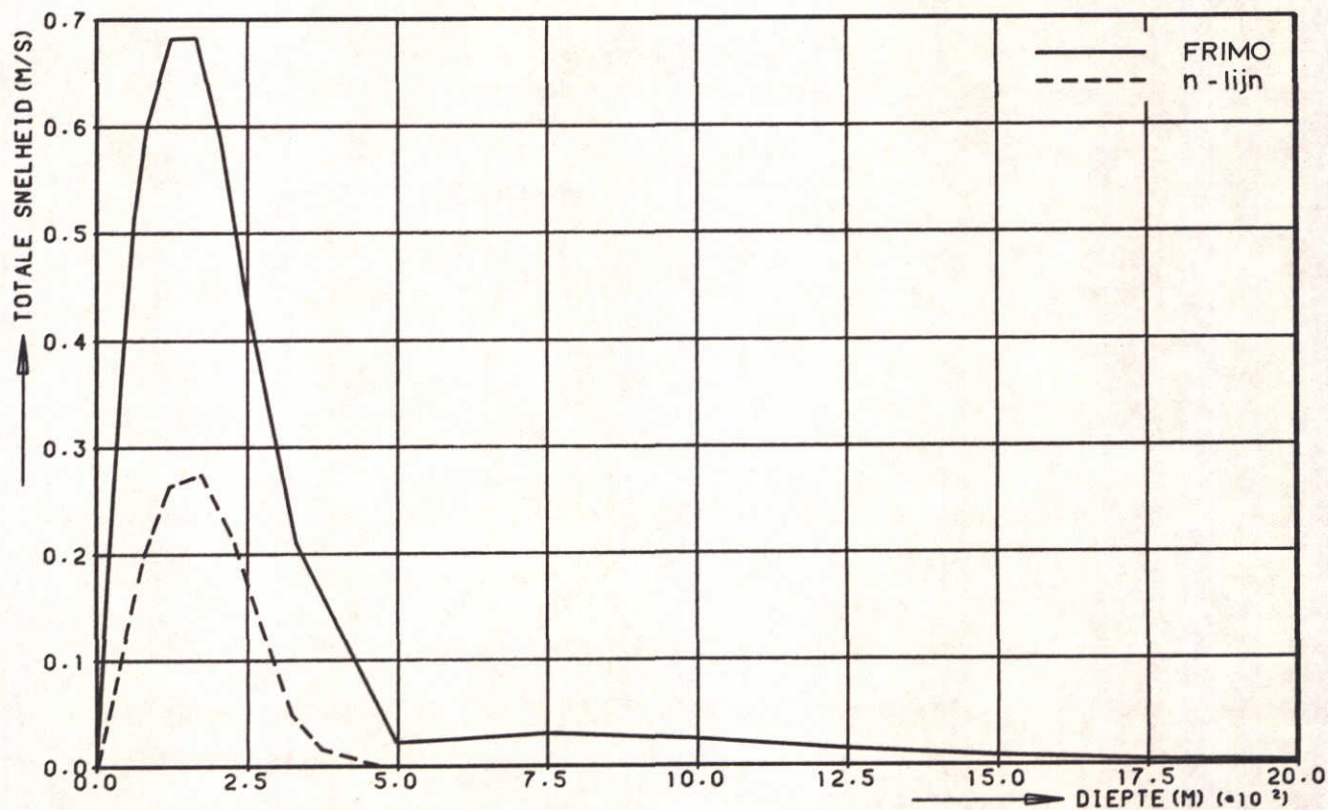
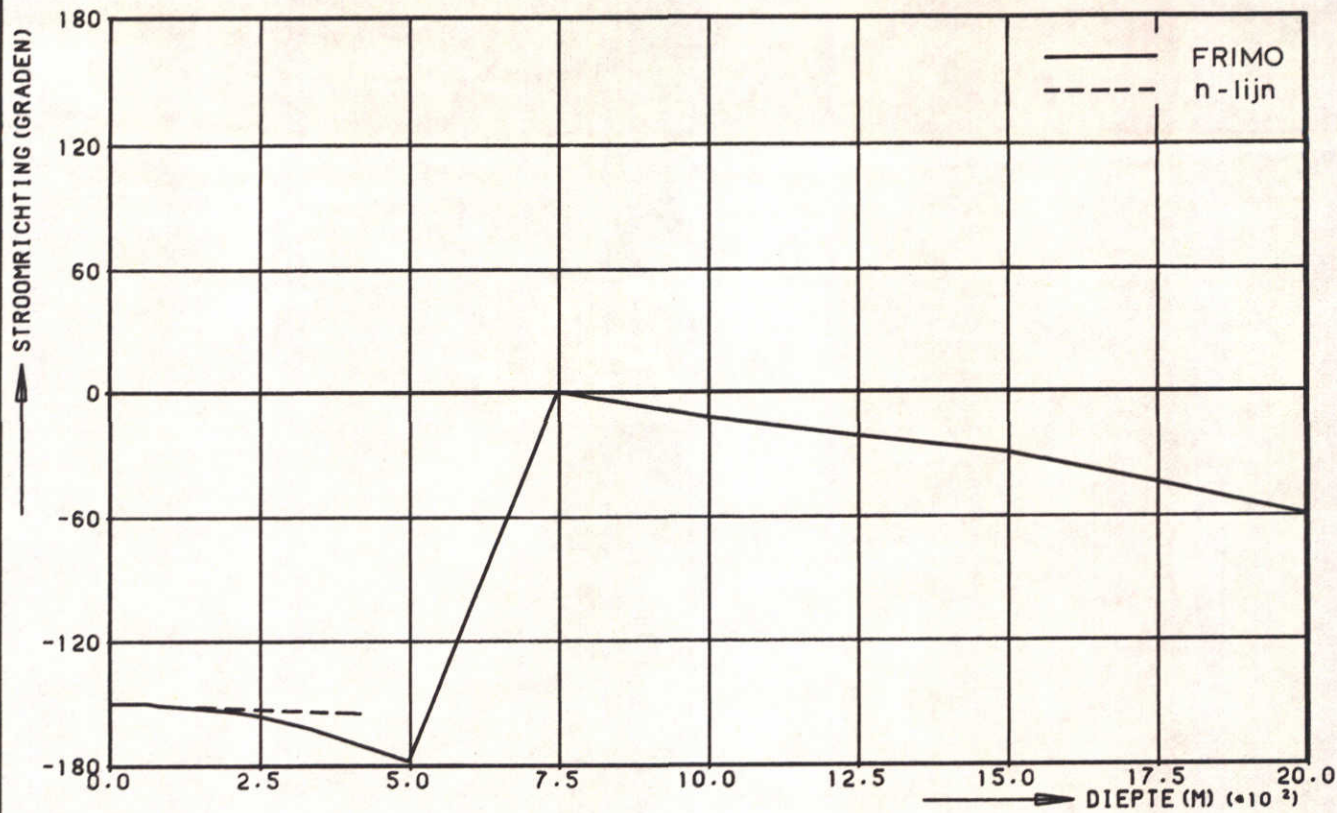
X= 500 M

kust met suppletie

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

R 1605

FIG. 22a



SNELHEIDSVERDELING GOLFGEDREVEN STROMING

X= 900 M

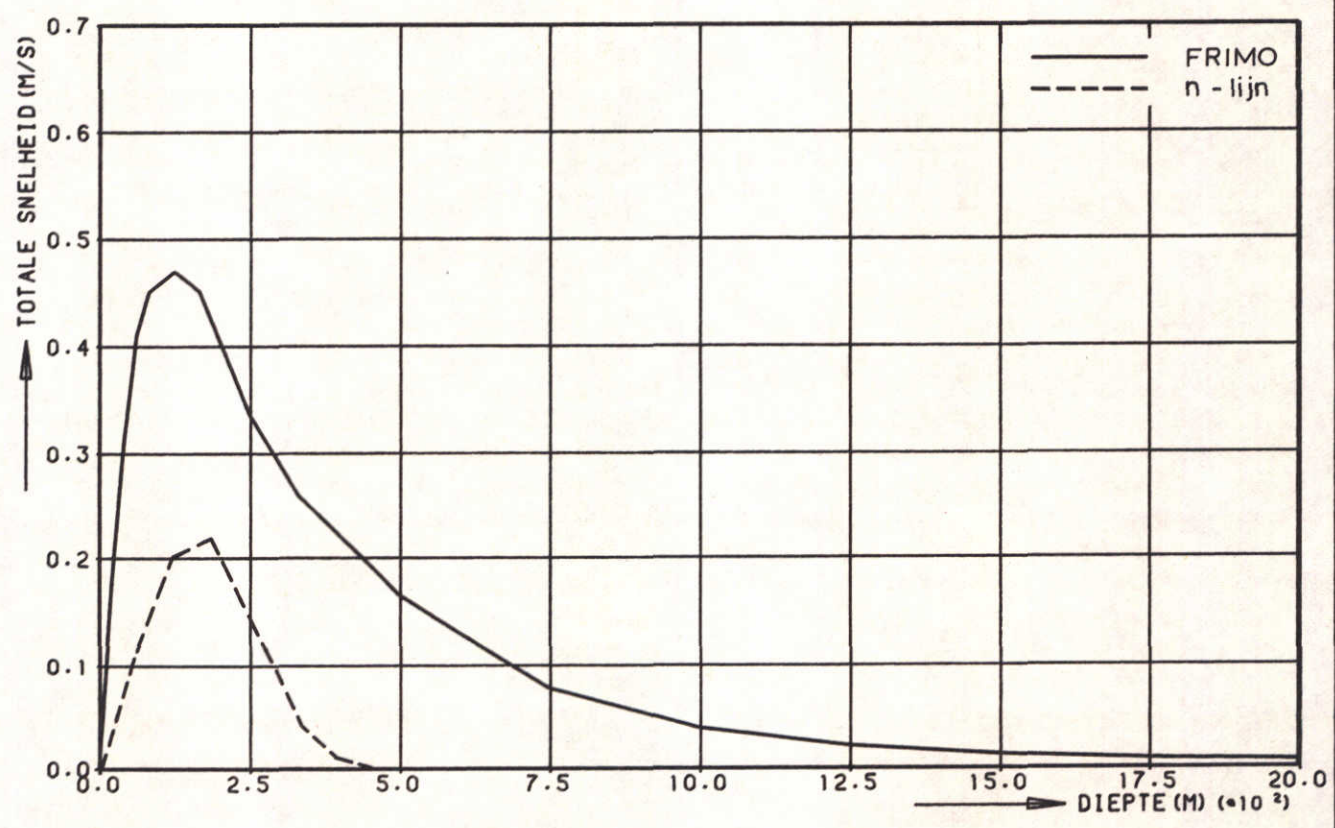
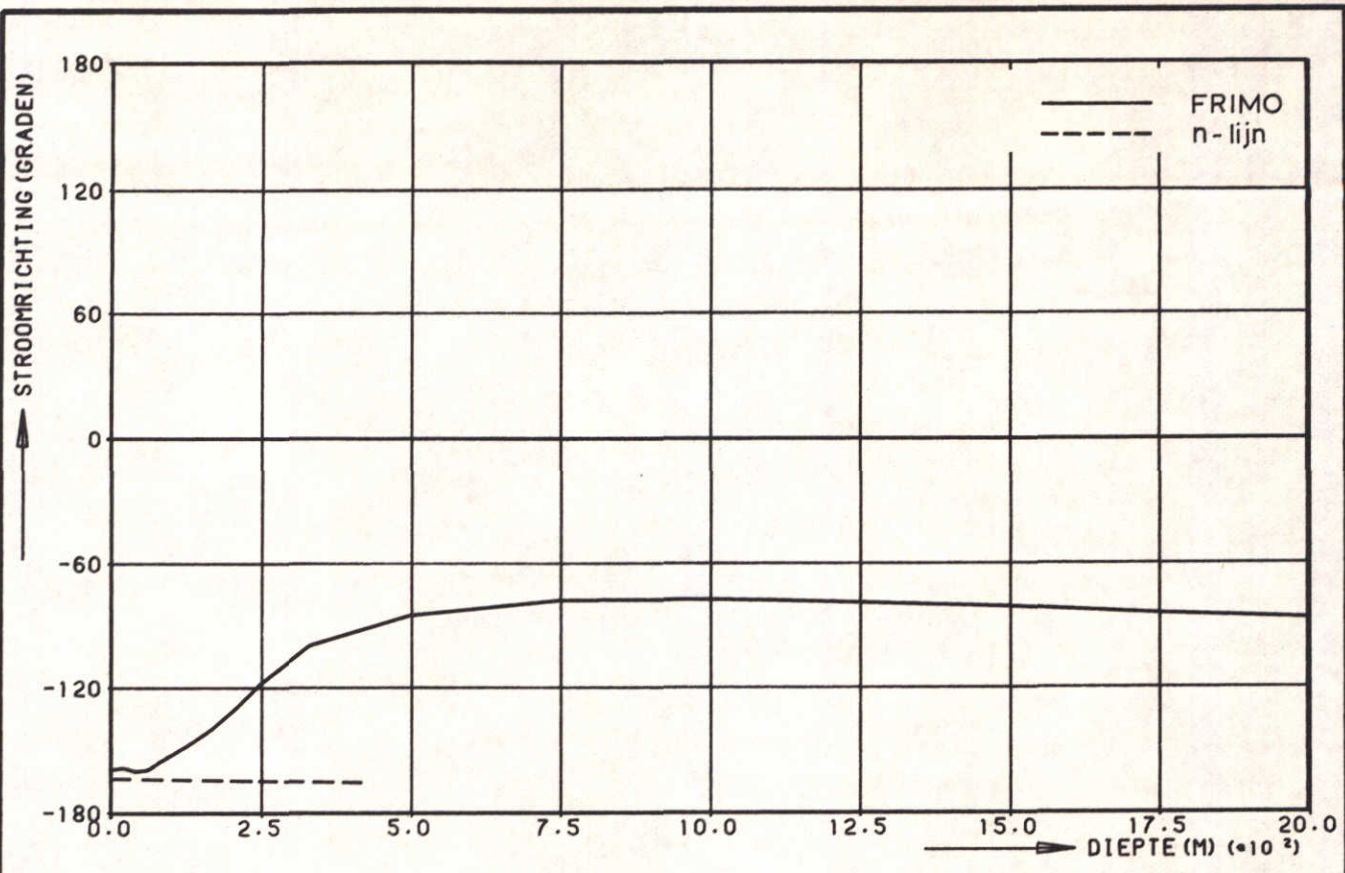
kust met suppletie

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

R 1605

FIG. 22b





SNELHEIDSVERDELING GOLFGEDREVEN STROMING

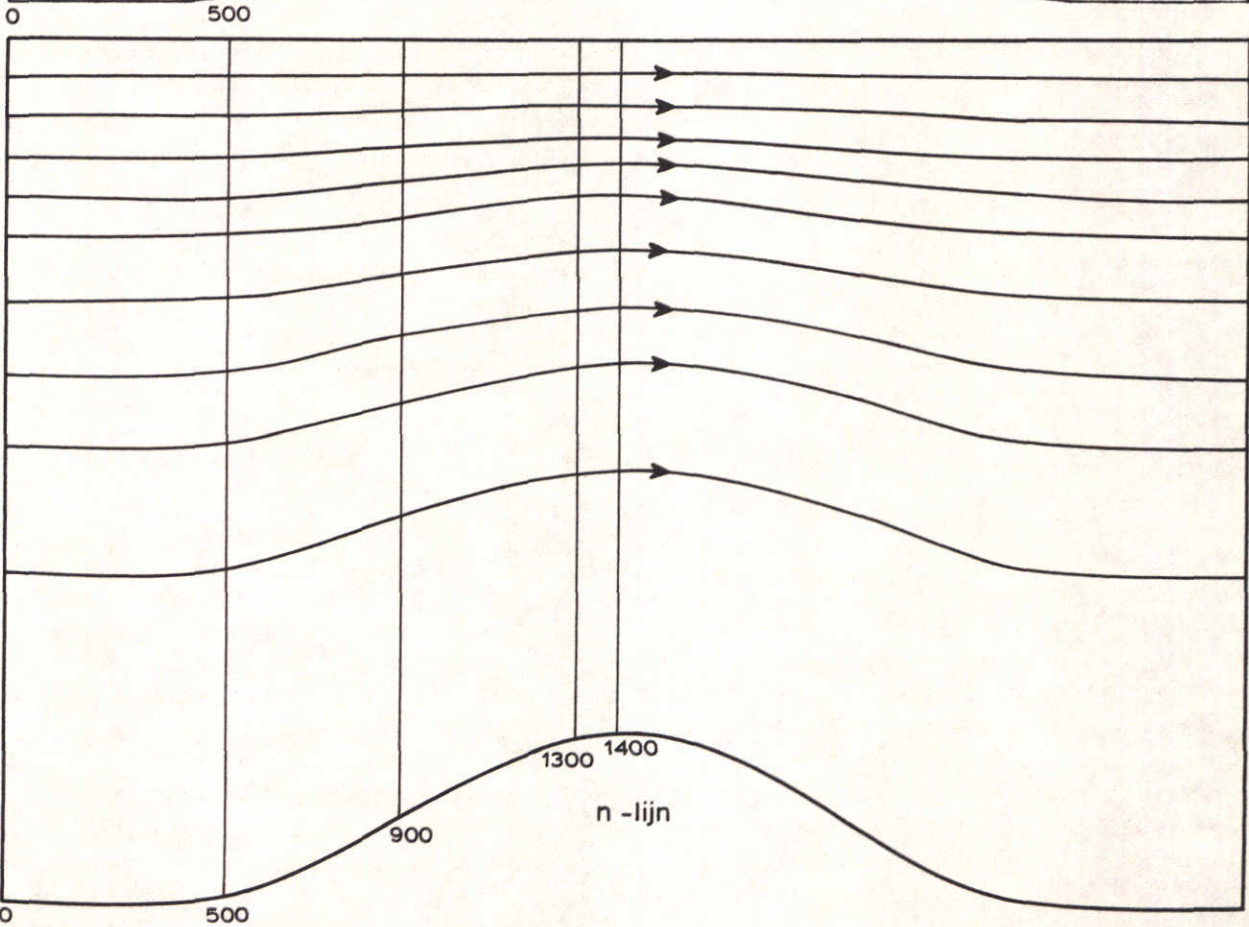
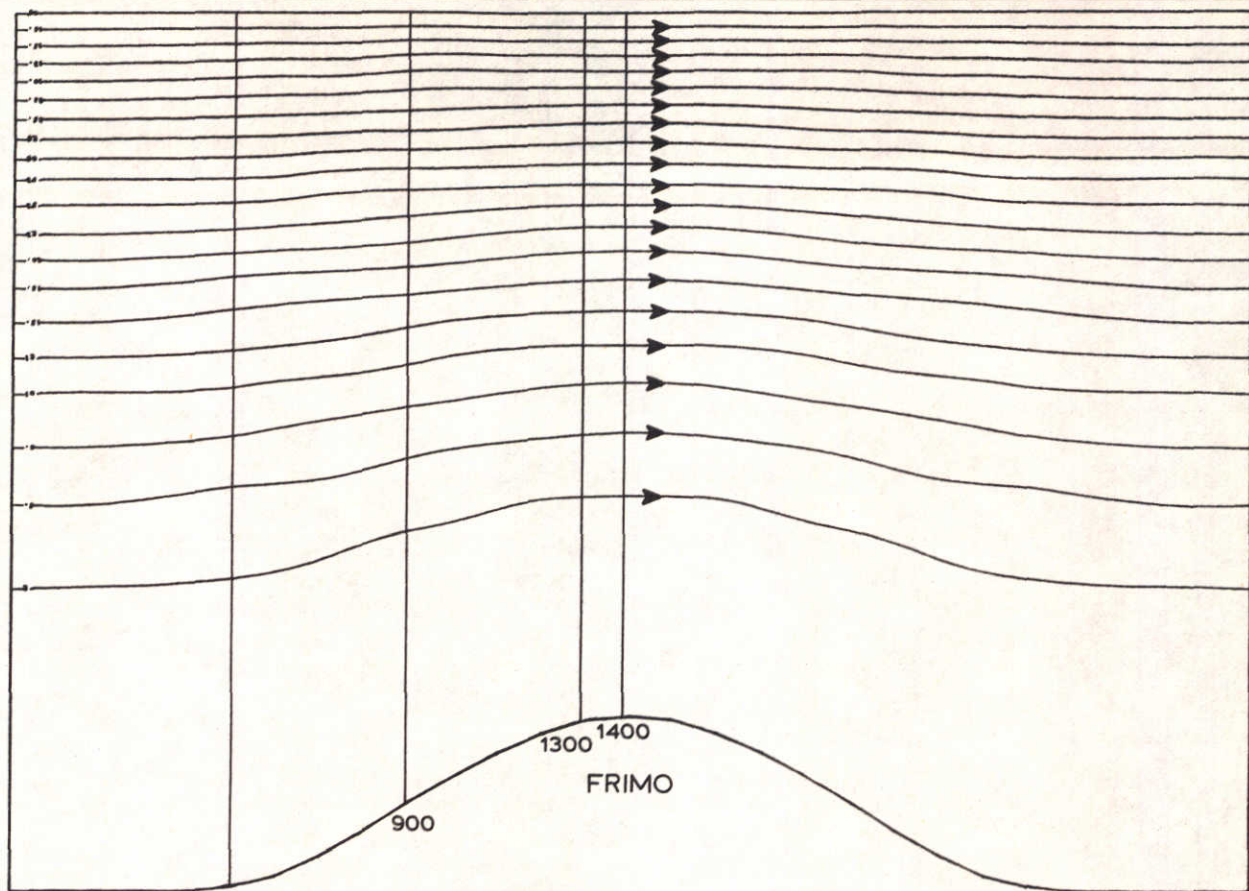
X=1300 M

kust met suppletie

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

R 1605

FIG. 22c



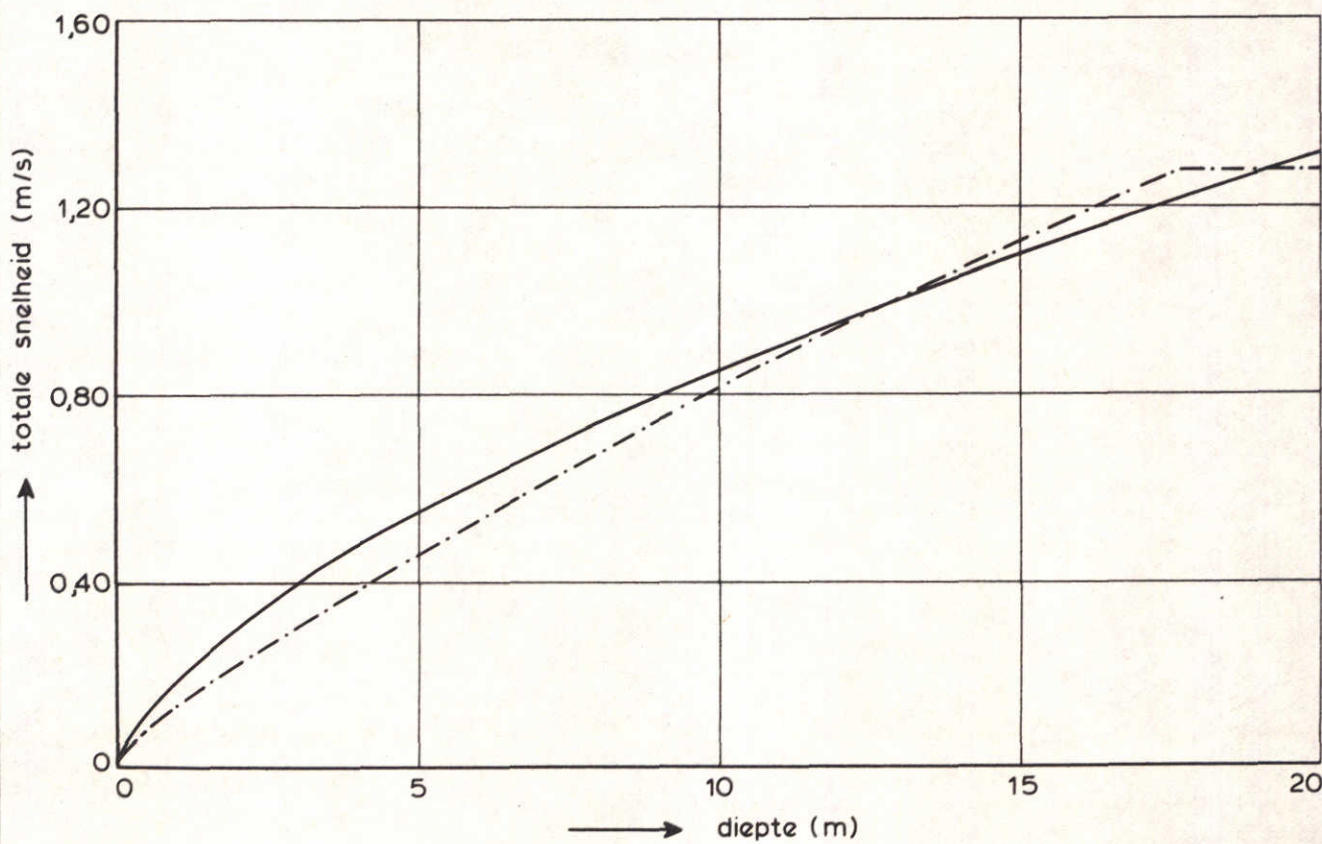
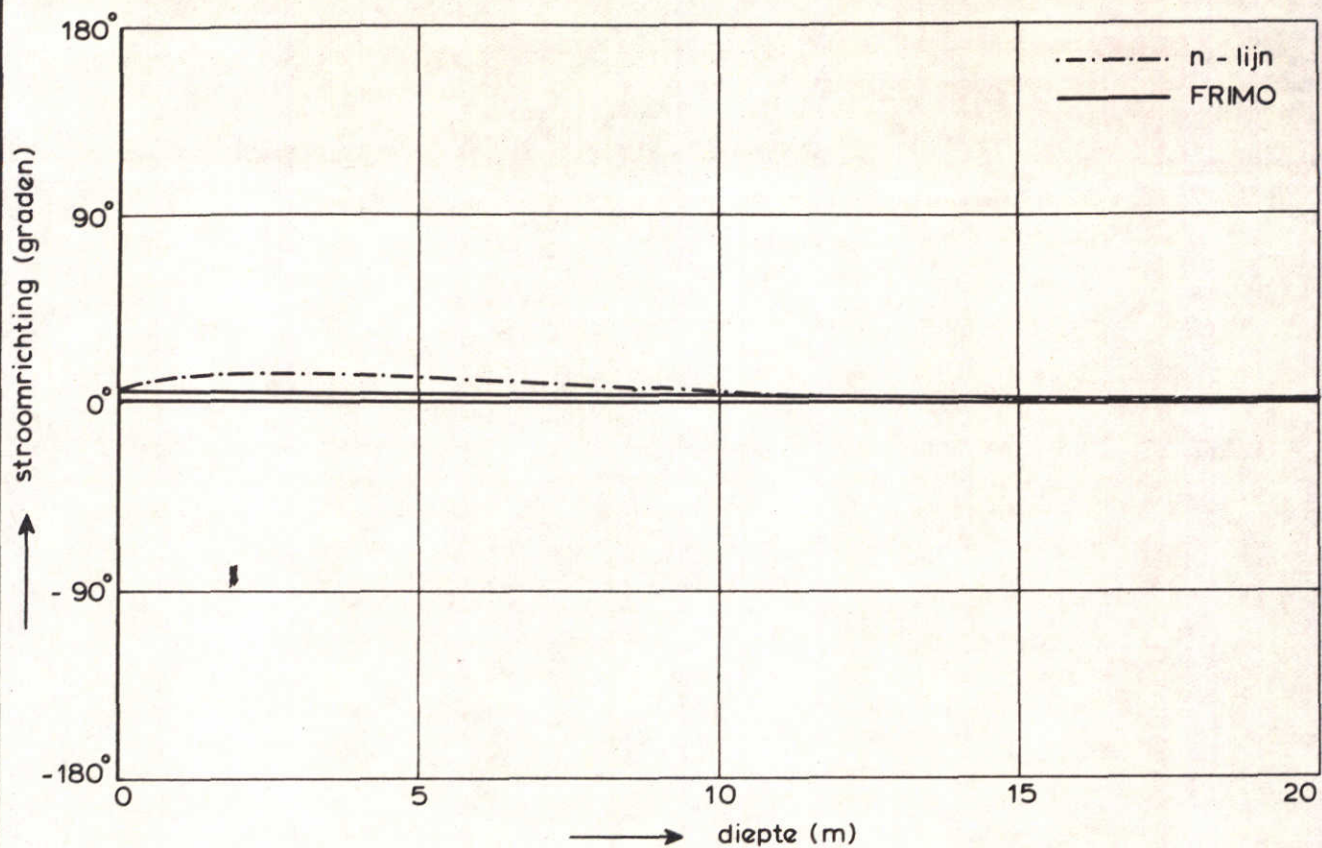
STROOMLIJNEN GETIJGEDREVEN STROMING

kust met suppletie

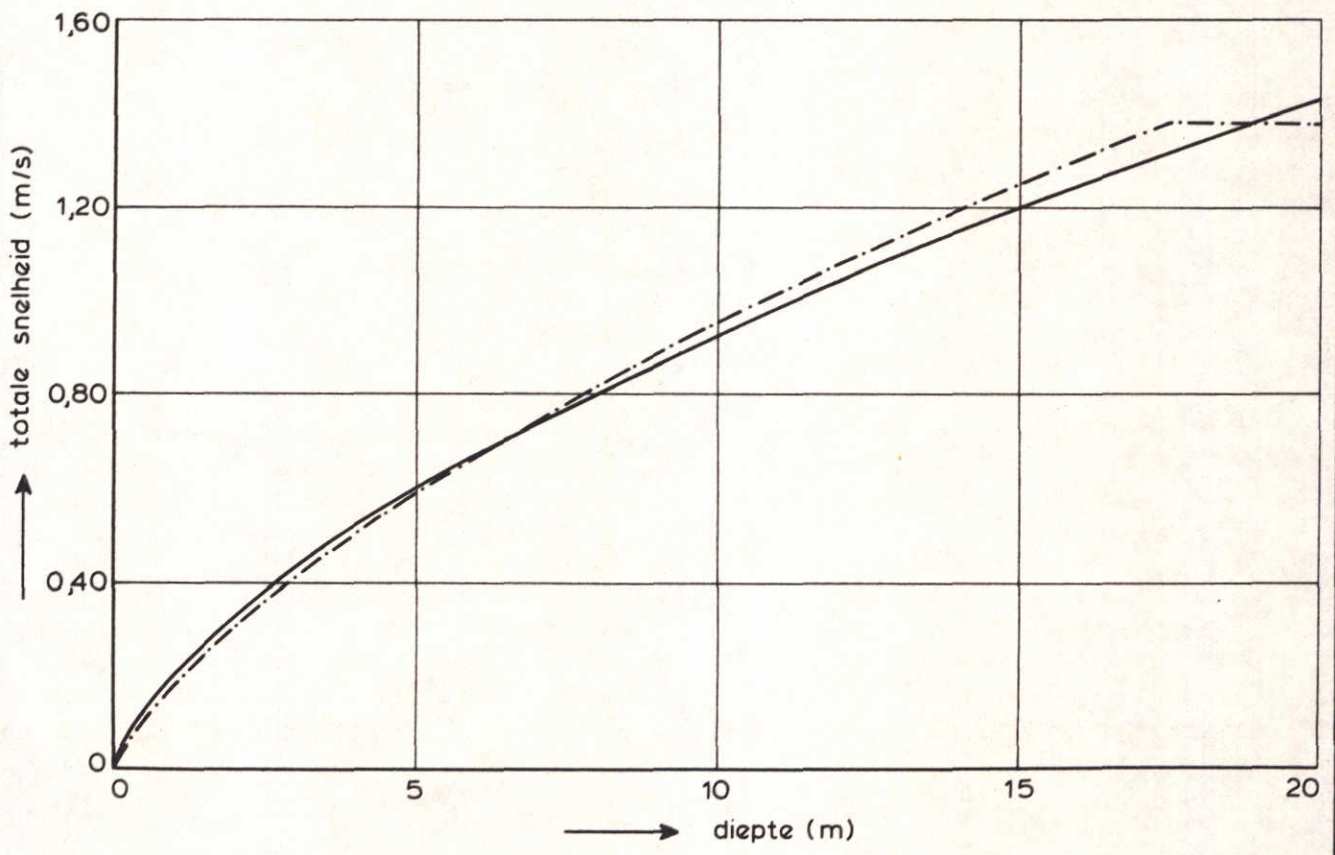
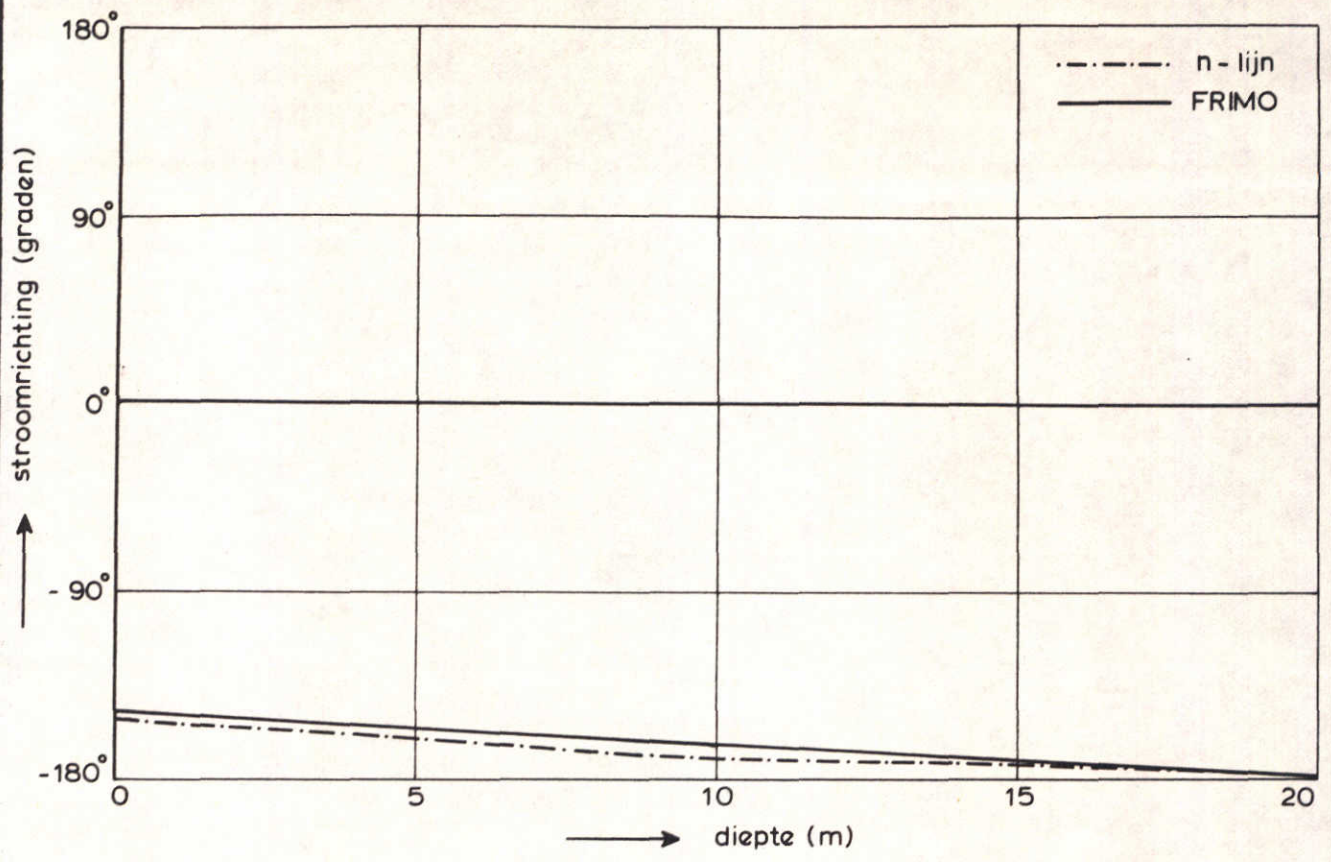
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

R1605

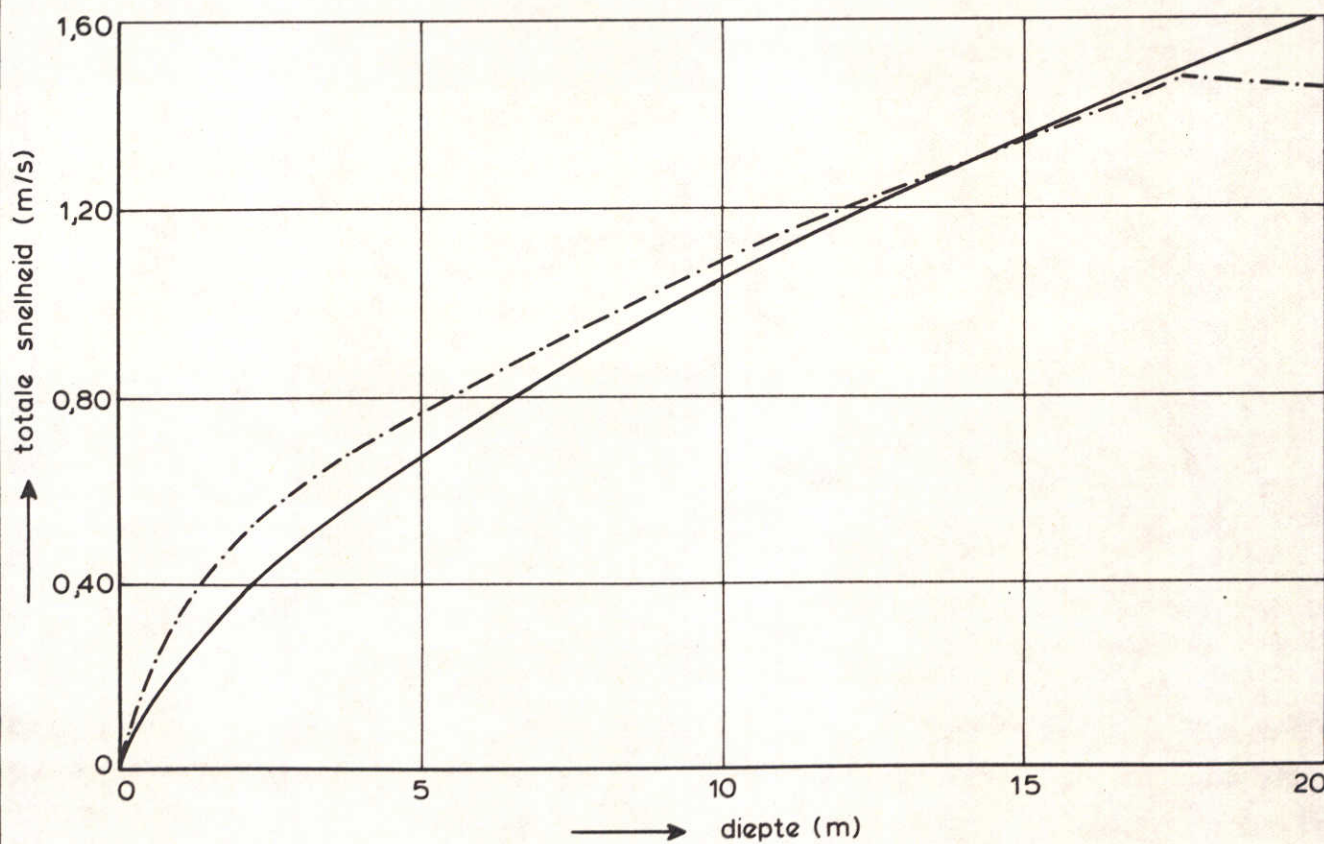
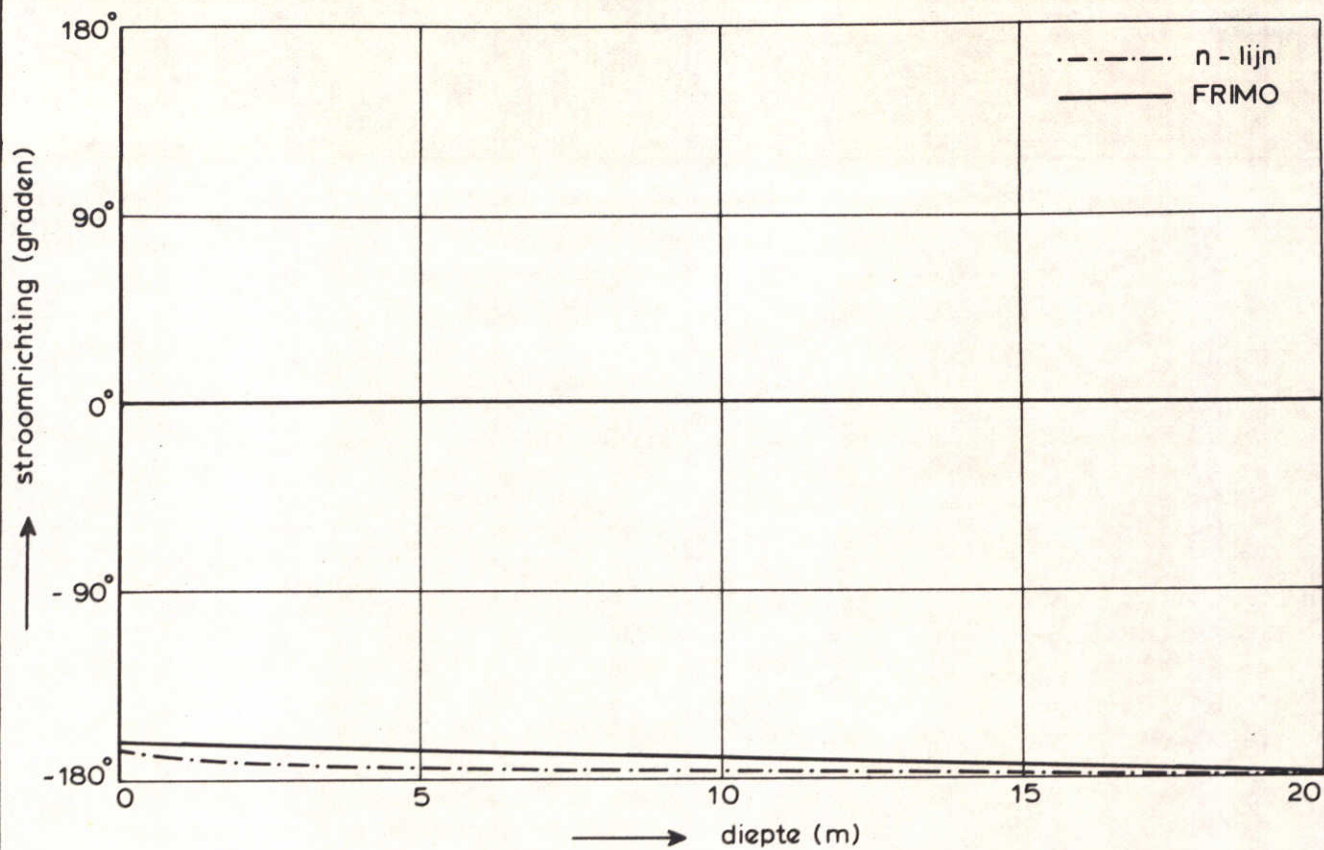
FIG. 23



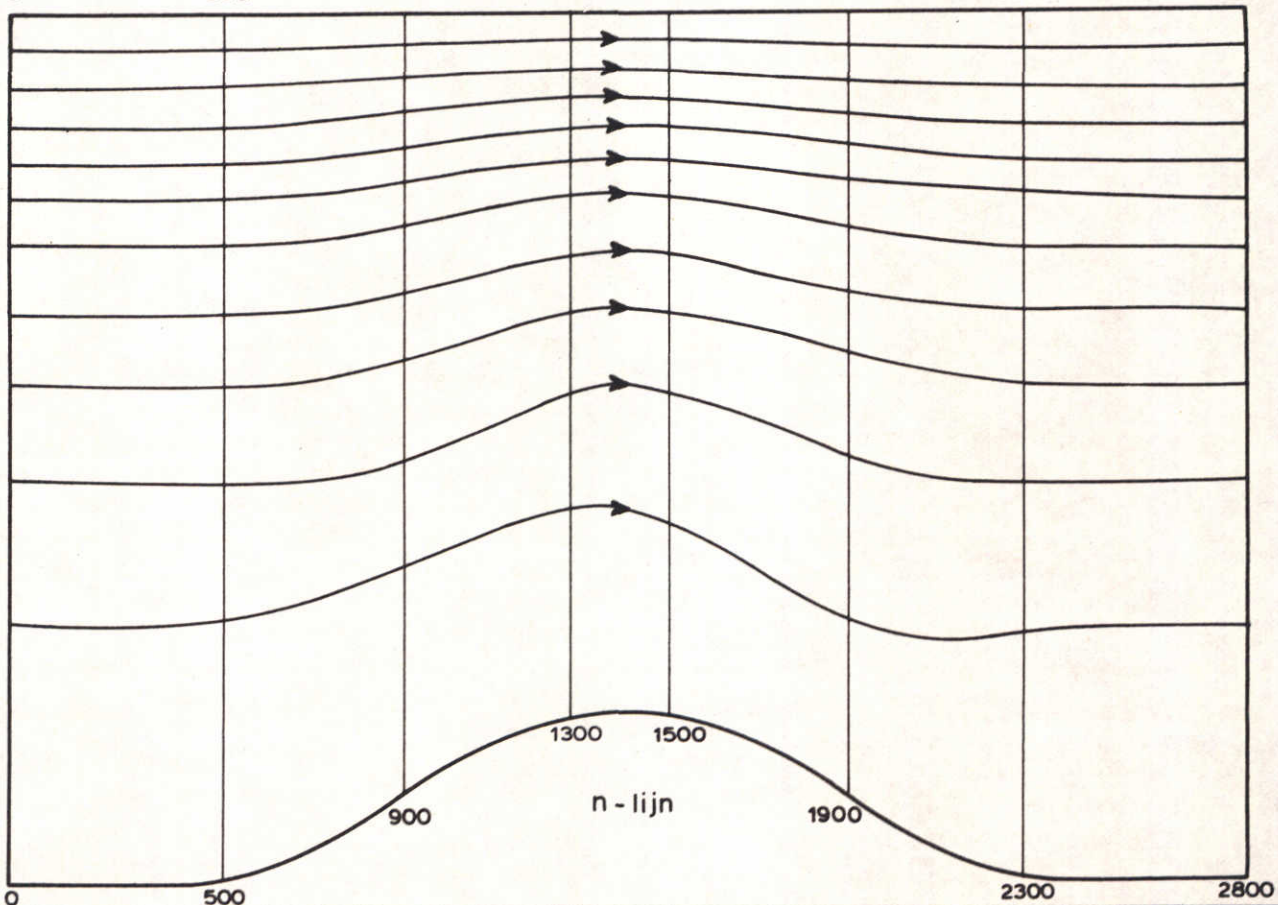
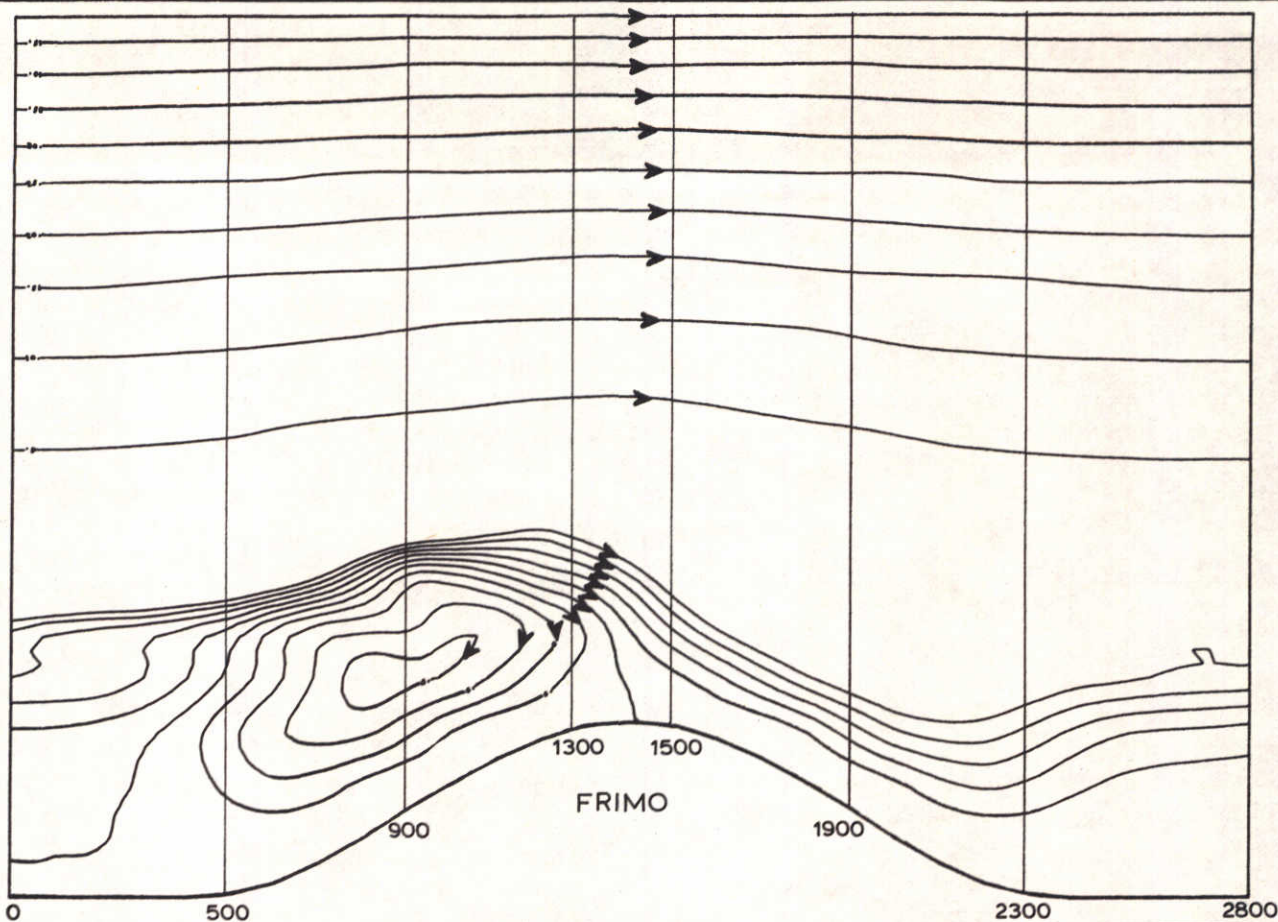
SNELHEIDSVERDELING GETIJGEDREVEN STROMING	x = 500 m	
	kust met suppletie	
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM	R 1605	FIG. 24 a



SNELHEIDSVERDELING GETIJGEDREVEN STROMING	x = 900 m	
	kust met suppletie	
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM	R 1605	FIG. 24 b



SNELHEIDSVERDELING GETIJGEDREVEN STROMING	x = 1300 m	
	kust met suppletie	
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM	R 1605	FIG. 24 c



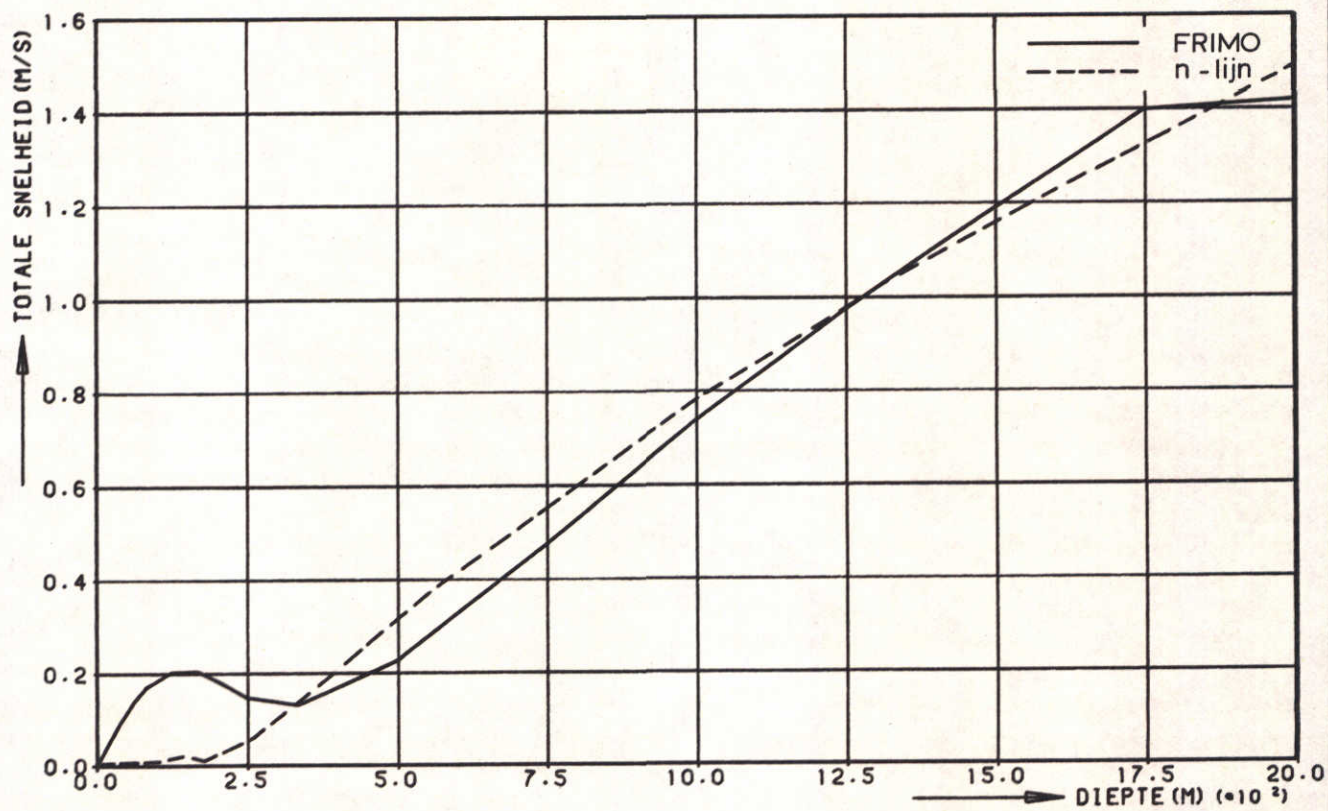
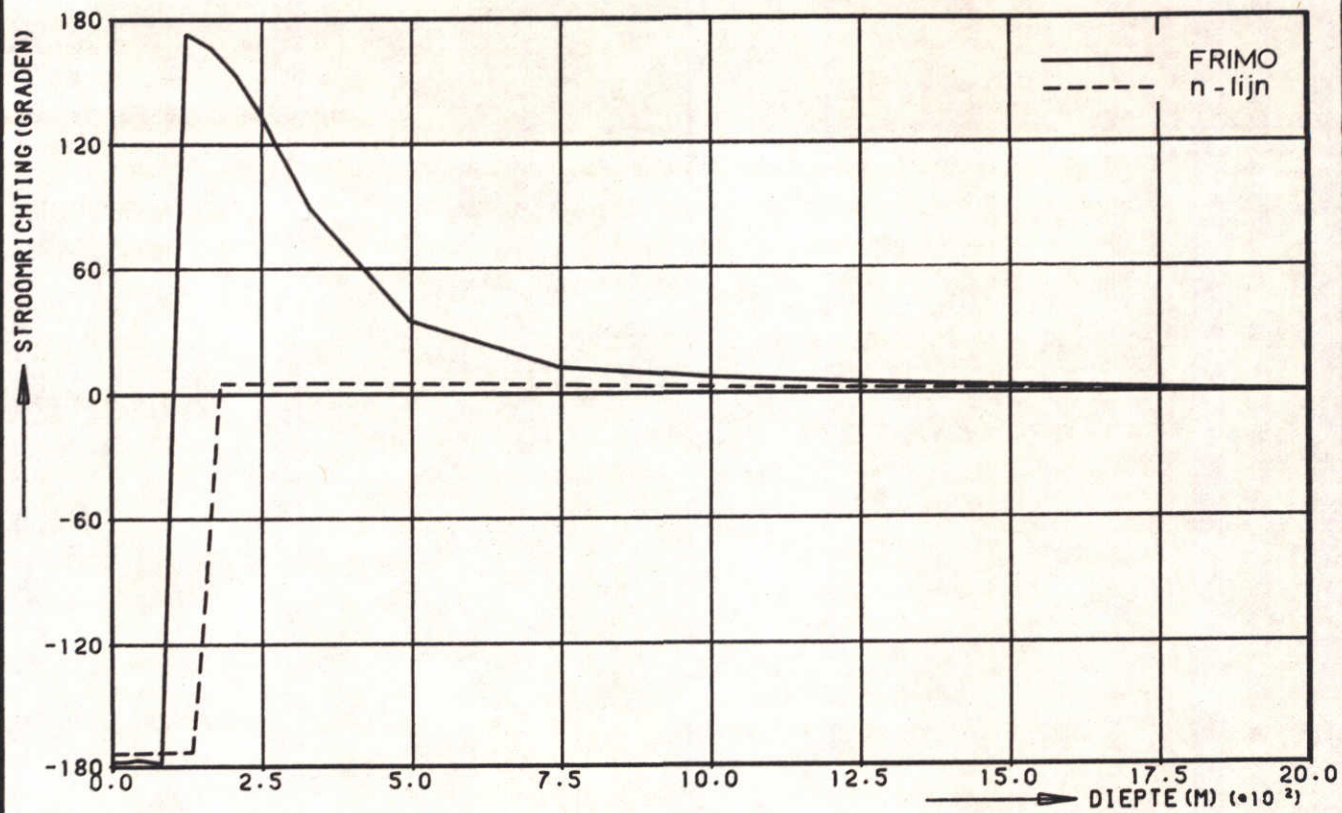
STROOMLIJNEN GETJ- EN GOLFGEDREVEN  
STROMING

kust met suppletie

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

R1605

FIG. 25



SNELHEIDSVERDELINGEN GETJ - EN  
GOLFGEDREVEN STROMING

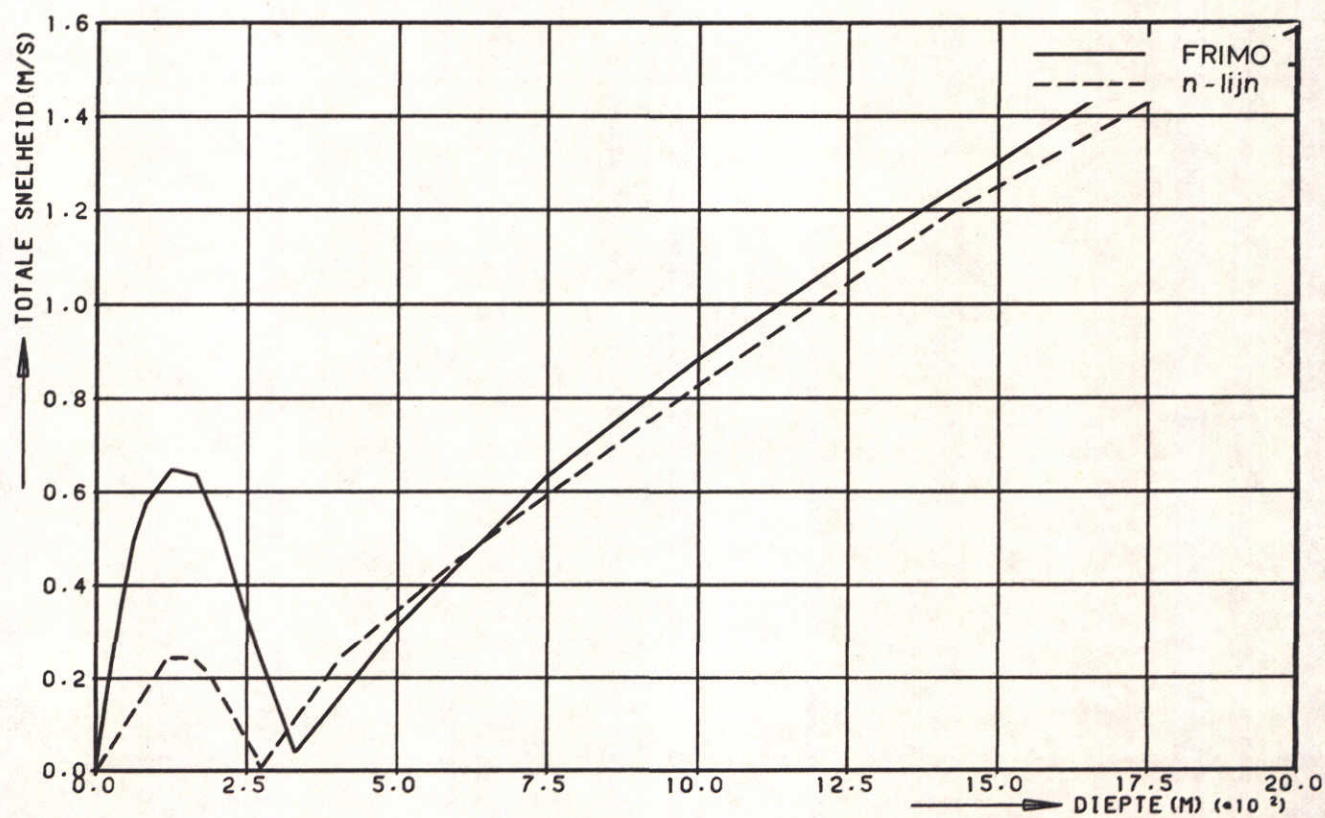
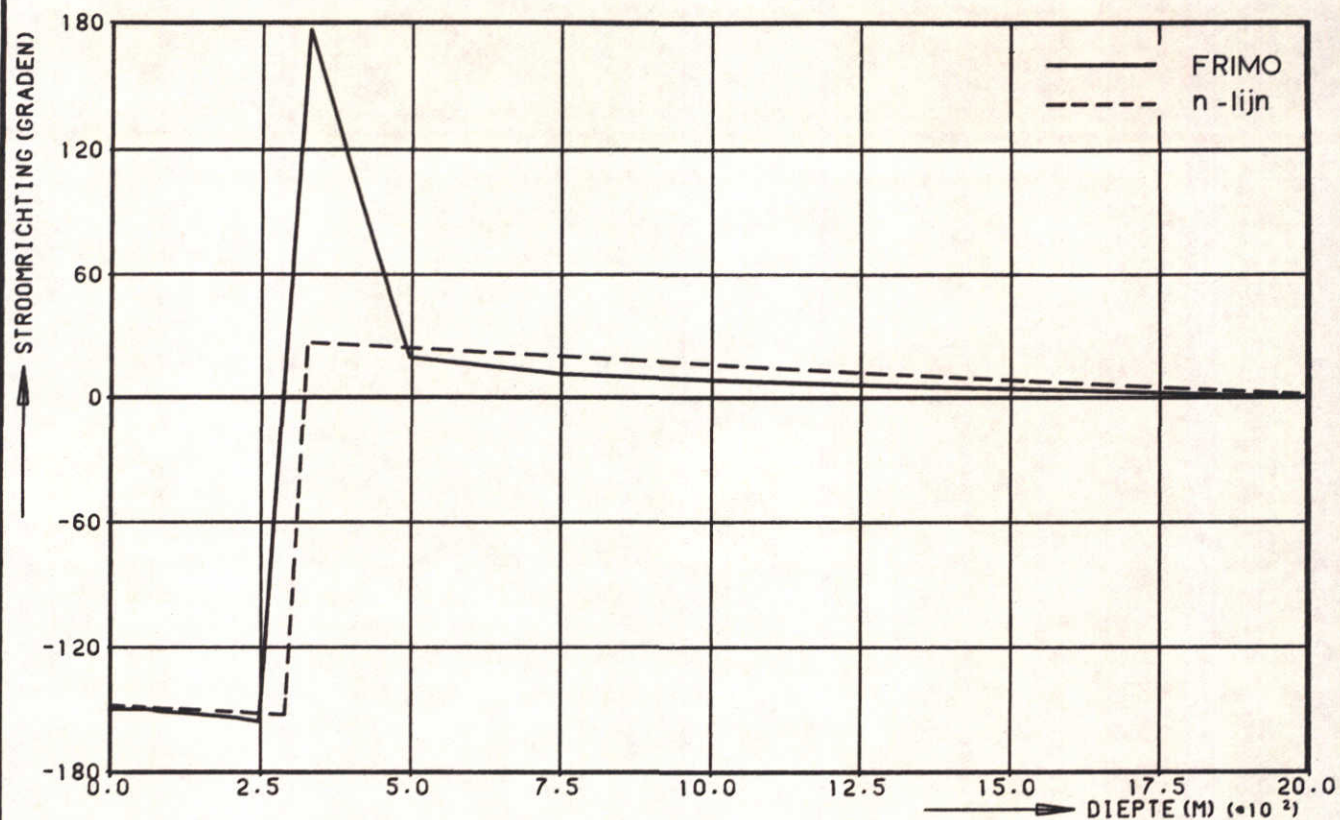
X= 500 M

kust met suppletie

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

R 1605

FIG. 26a



SNELHEIDSVERDELINGEN GETJ- EN  
GOLFGEDREVEN STROMING

X= 900 M

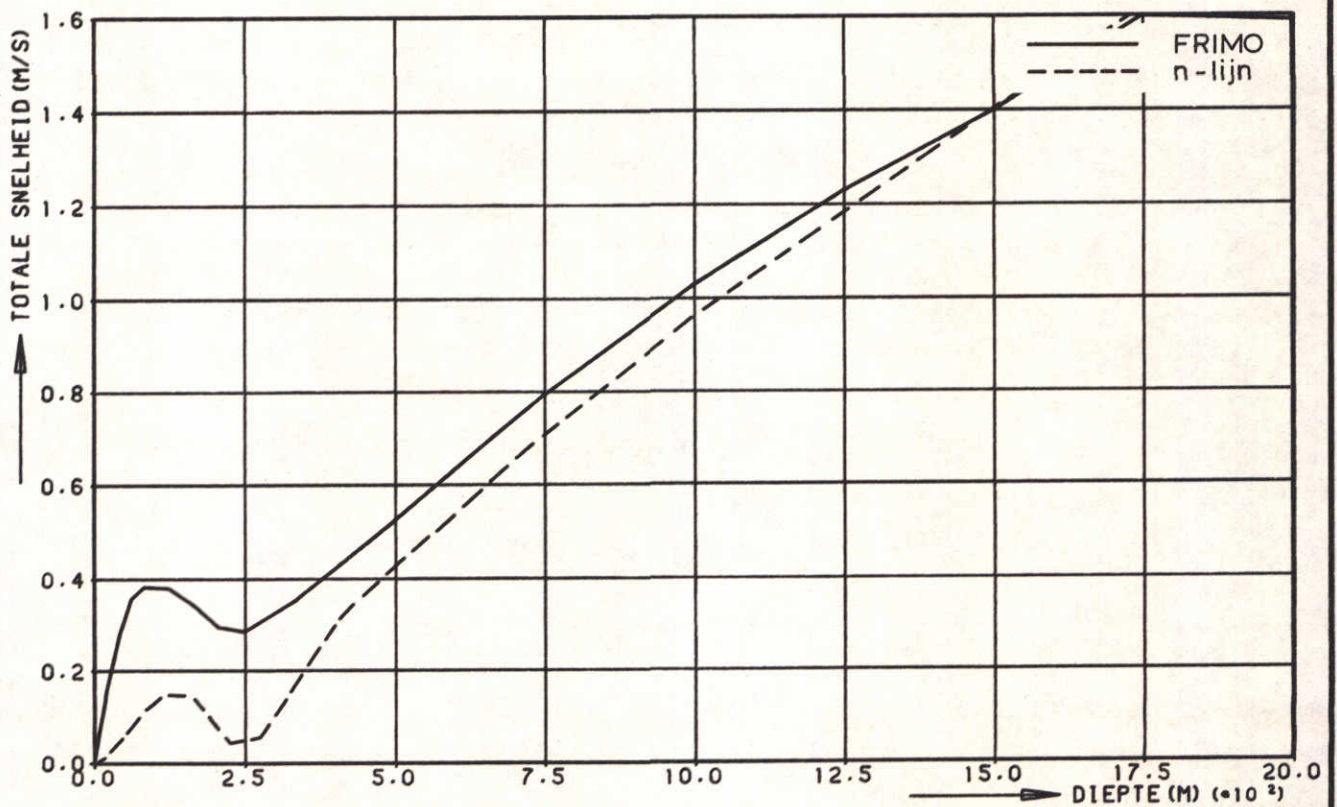
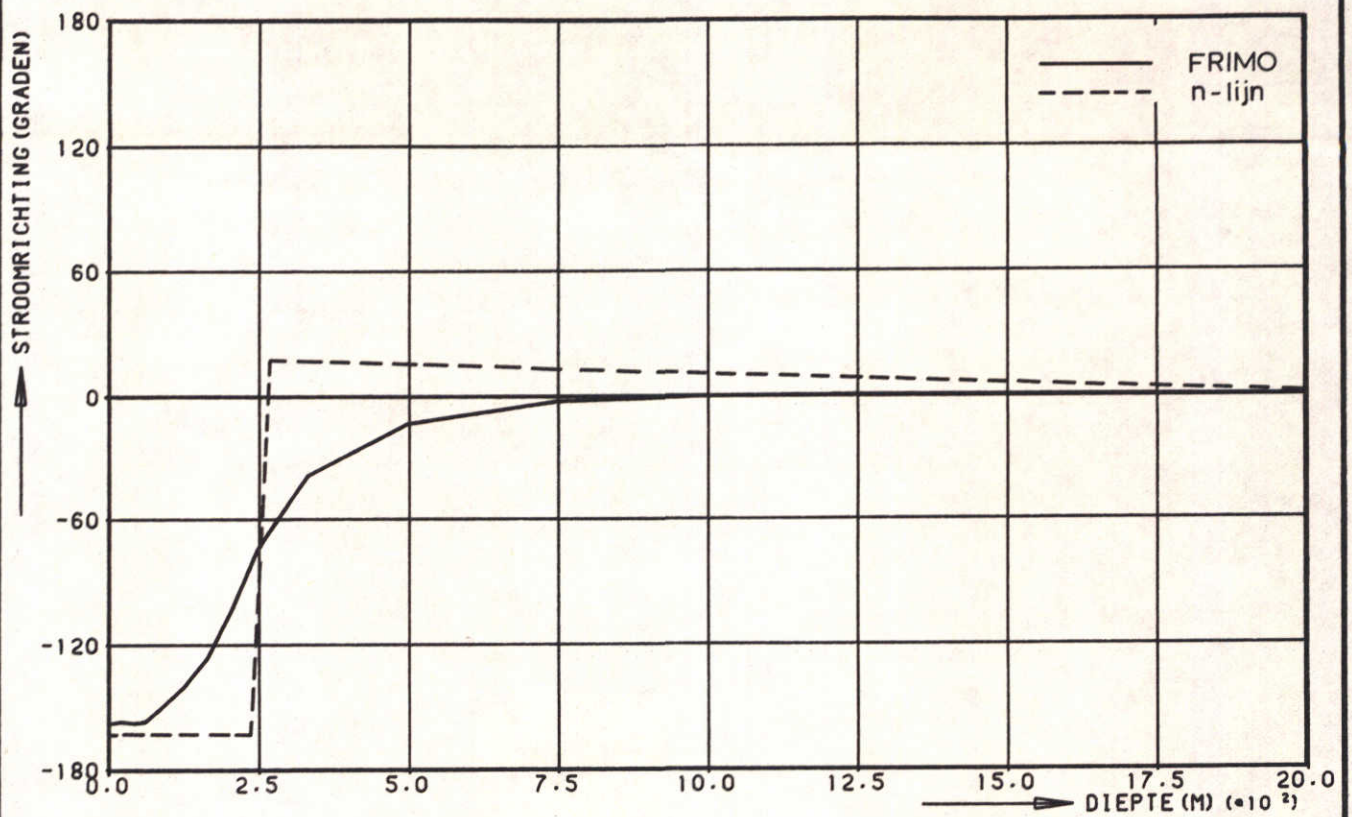
kust met suppletie

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

R 1605

FIG. 26 b





SNELHEIDSVERDELINGEN GETJ-EN  
GOLFGEDREVEN STROMING

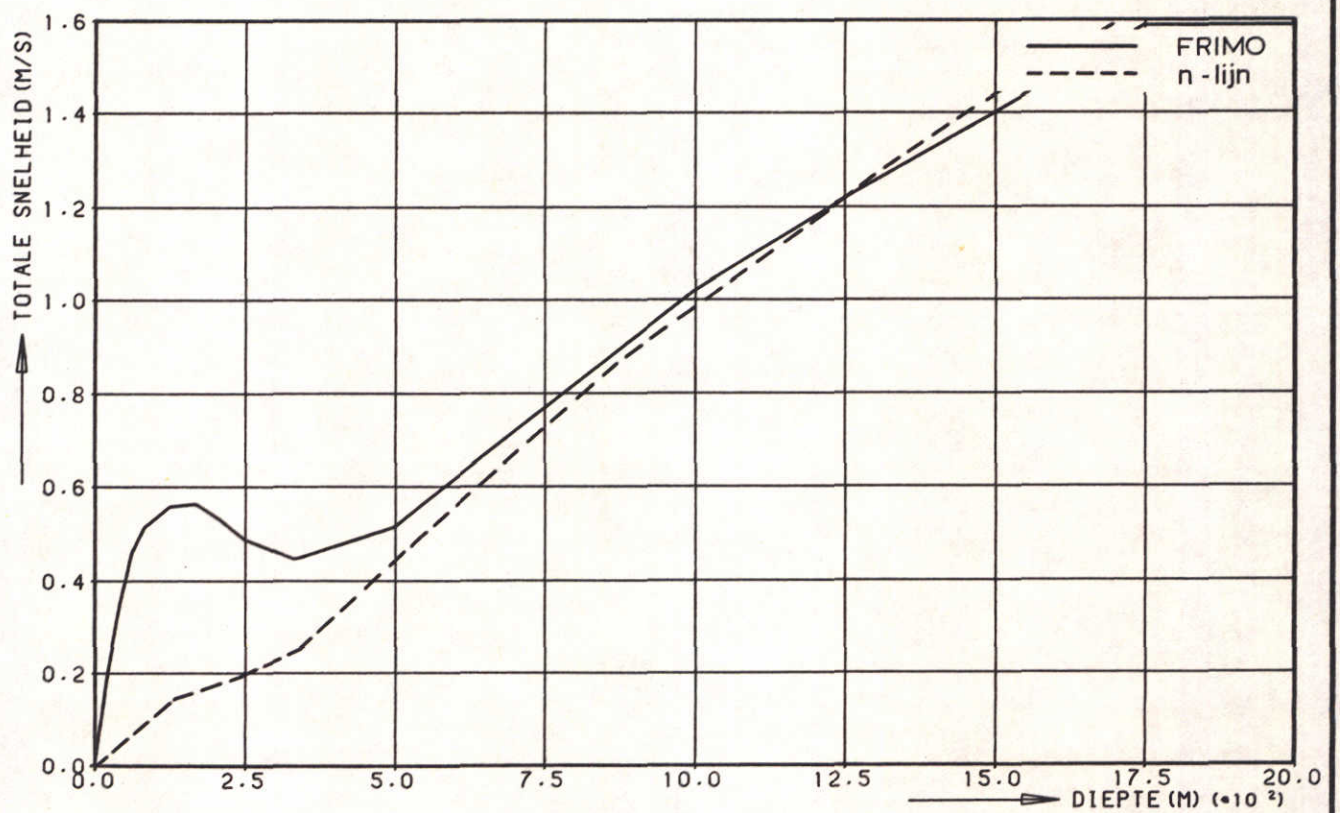
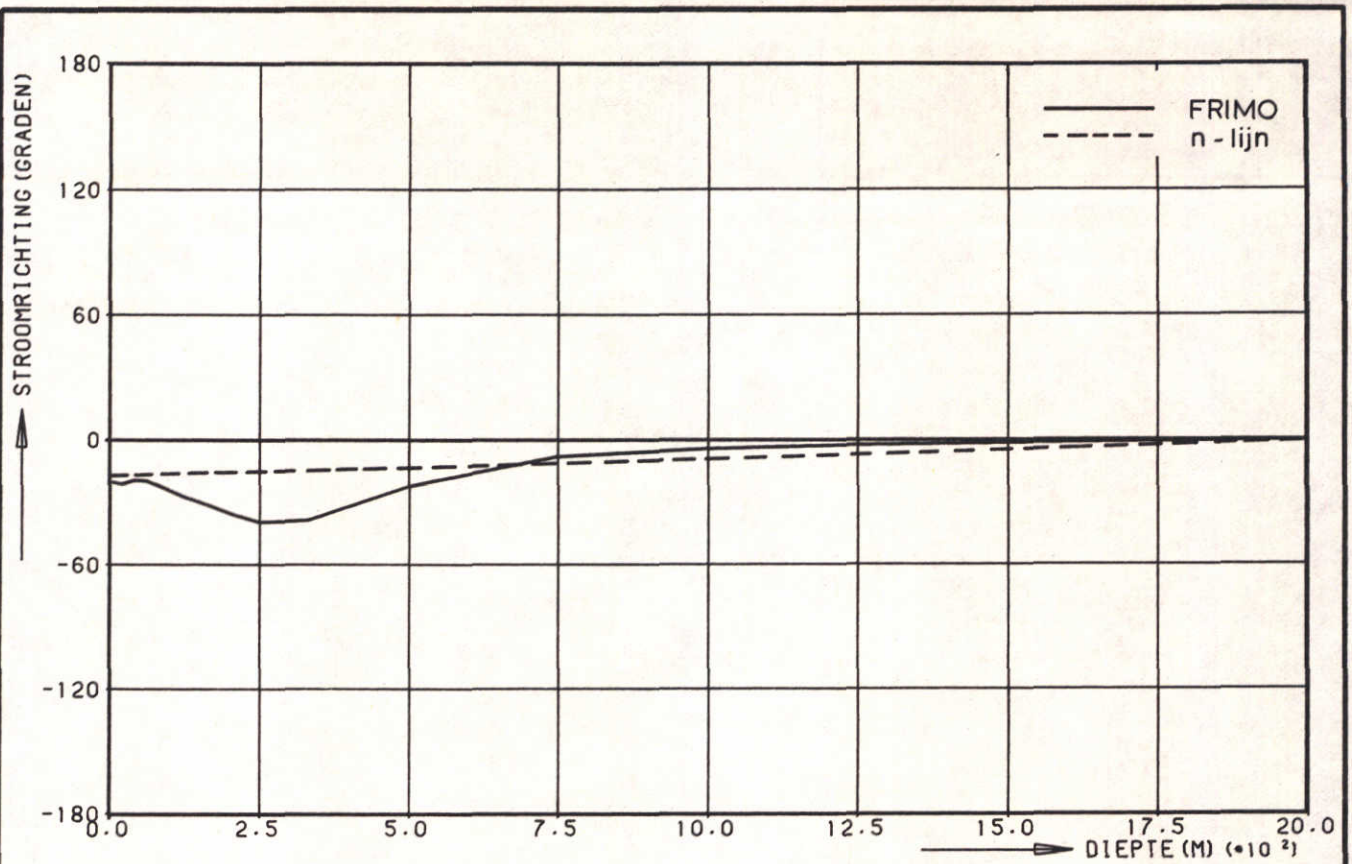
X=1300 M

kust met suppletie

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

R 1605

FIG. 26c



SNELHEIDSVERDELINGEN GETJ-EN  
GOLFGEDREVEN STROMING

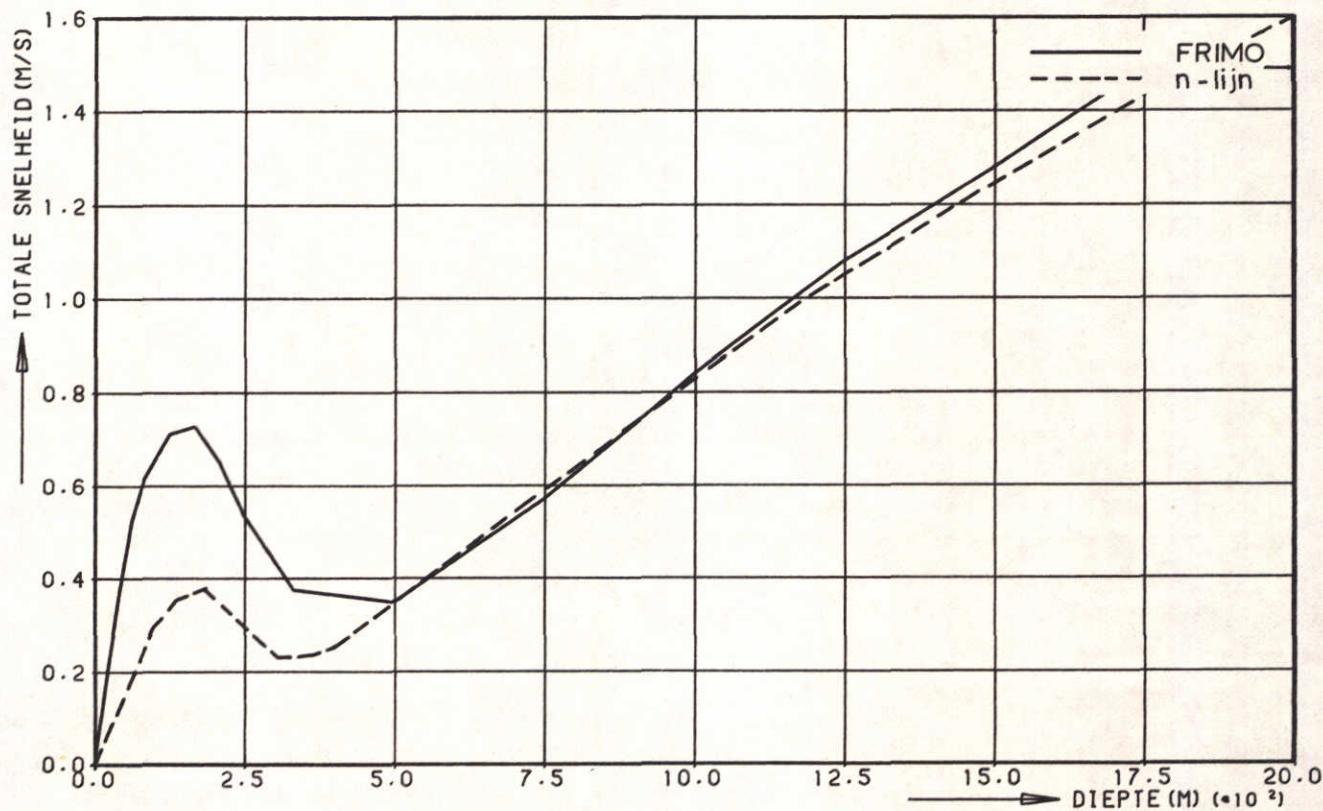
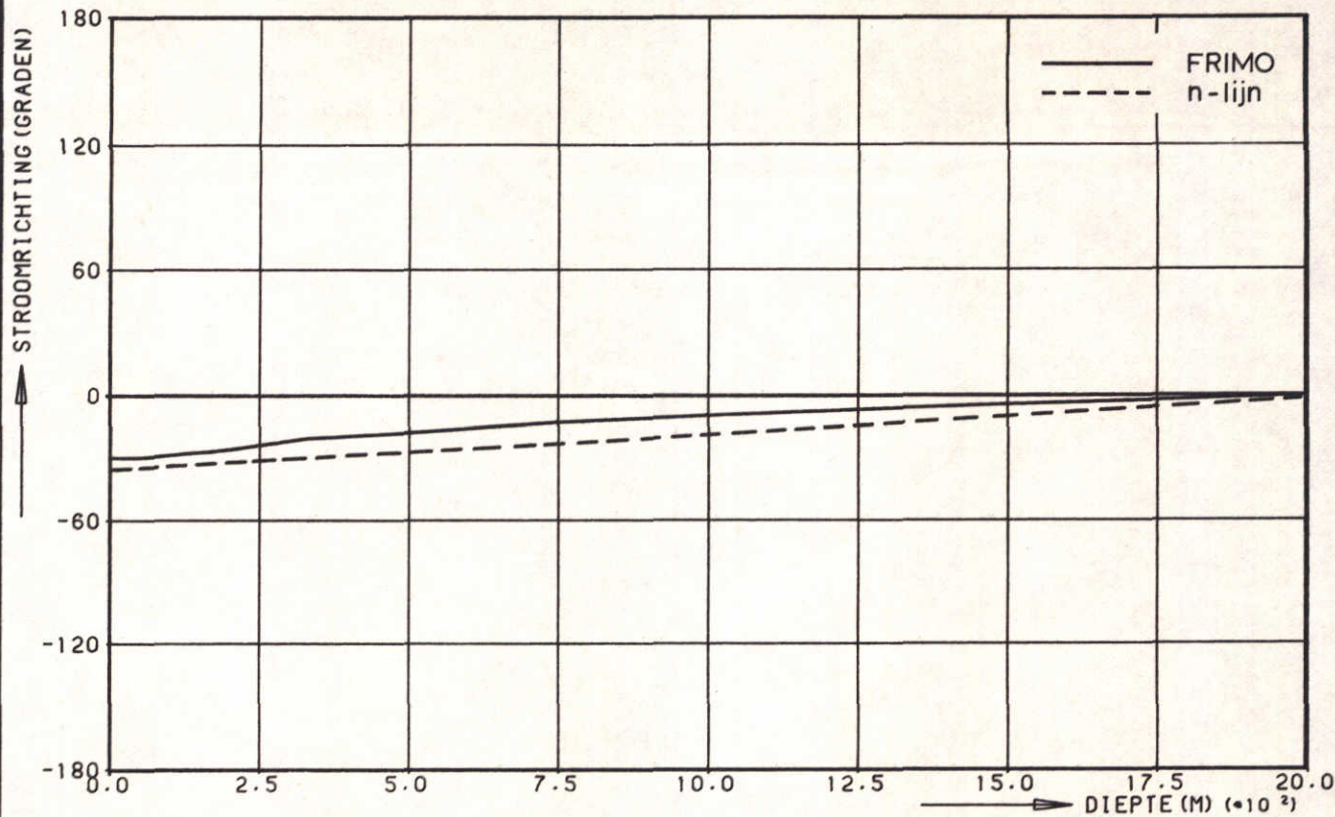
X=1500 M

kust met suppletie

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

R 1605

FIG.26d



SNELHEIDSVERDELINGEN GETJ- EN  
GOLFGEDREVEN STROMING

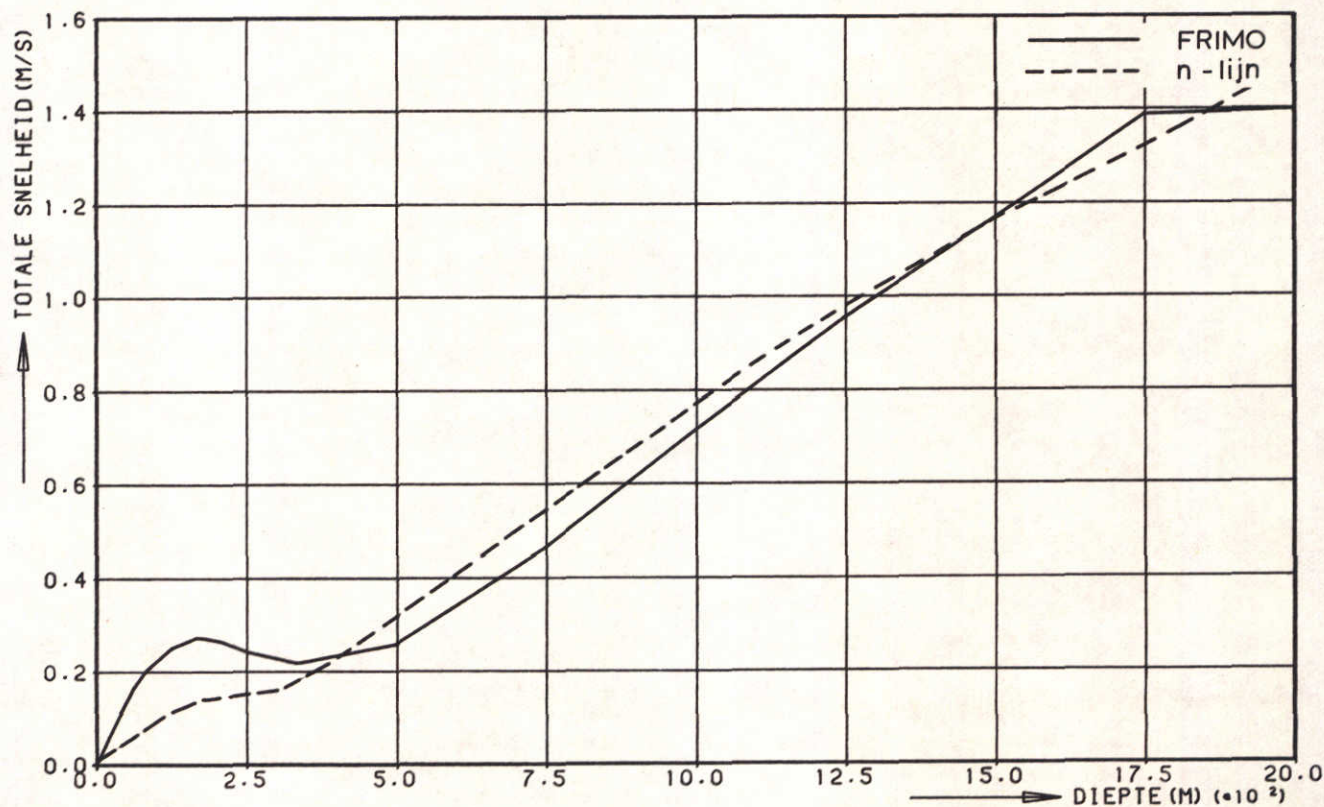
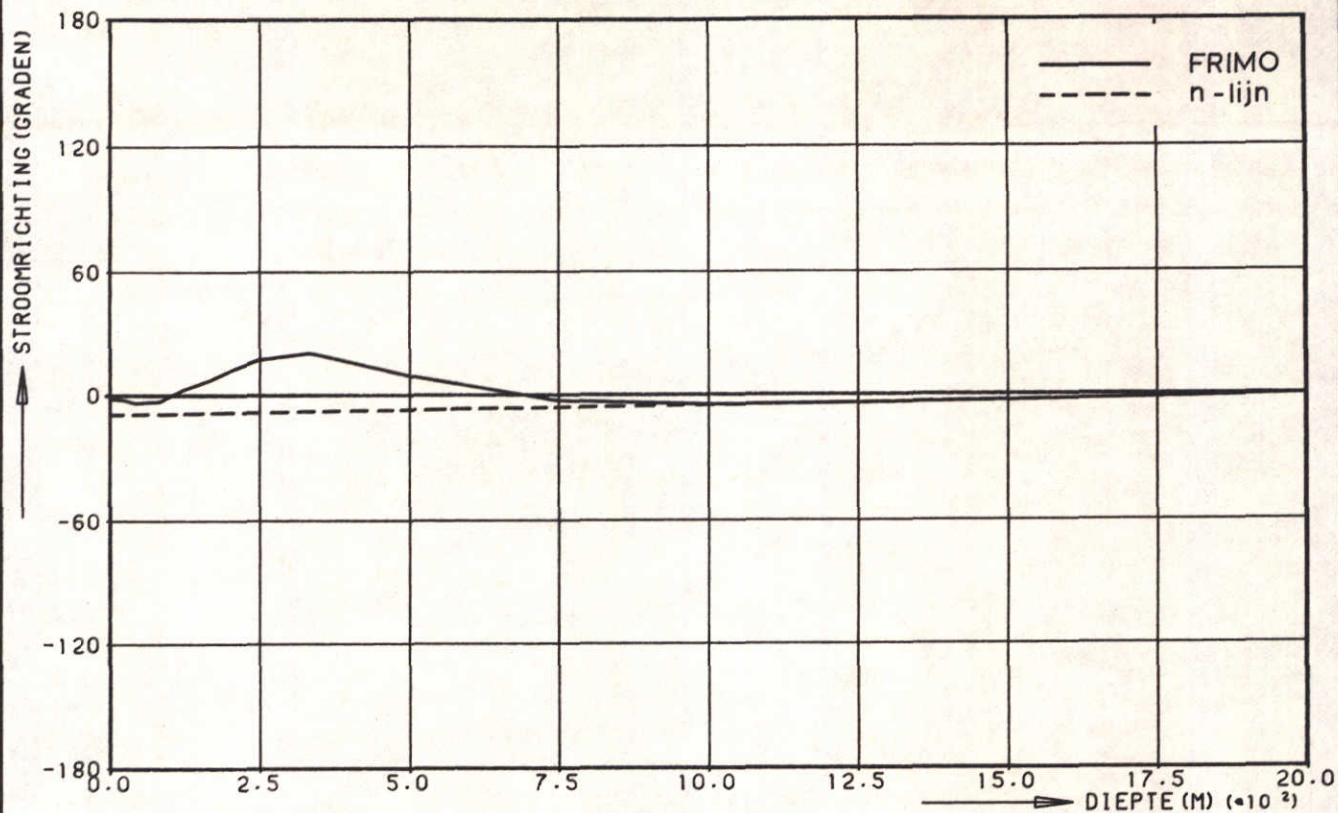
X=1900 M

kust met suppletie

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

R 1605

FIG. 26e



SNELHEIDSVERDELINGEN GETJ-EN  
GOLFGEDREVEN STROMING

X=2300 M

kust met suppletie

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

R 1605

FIG. 26 f

p.o. box 177

2600 mh delft

the netherlands