

C1 83.02

waterloopkundig laboratorium
delft hydraulics laboratory

oriënterend onderzoek naar de werking van
een duinverdediging tijdens superstormvloed

verslag modelonderzoek

M 1819 deel II

maart 1983

**oriënterend onderzoek naar de werking van
een duinverdediging tijdens superstormvloed**

verslag modelonderzoek

M 1819 deel III

maart 1983

INHOUD

	blz.
1. <u>Inleiding</u>	1
1.1 Achtergrond van het onderzoek.....	1
1.2 Opdracht.....	2
2. <u>Modelonderzoek en resultaten</u>	4
3. <u>Toetsing kleinschalig onderzoek</u>	7
4. <u>Werking van een duinverdediging</u>	10
4.1 Duin zonder verdediging (proef T01).....	10
4.2 Duin met een lage verdediging (proef T02).....	10
4.3 Duin met een hoge verdediging (proef T03).....	11
4.4 Duin met een zeer hoge verdediging (proef T04).....	12
4.5 Samenvatting.....	12
5. <u>Conclusies</u>	13

LITERATUUR

TABELLEN

- 1 T01 Dwarstransport in de situatie zonder duinverdediging
- 2 T02 Dwarstransport in de situatie met een lage duinverdediging
- 3 T03 Dwarstransport in de situatie met een hoge duinverdediging
- 4 T04 Dwarstransport in de situatie met een zeer hoge duinverdediging

FIGUREN

- 1 Prototype beginprofiel
- 2 Stormvloedcondities
- 3 T01 Dwarsprofielen
- 4 T02 Dwarsprofielen
- 5 T03 Dwarsprofielen
- 6 T04 Dwarsprofielen
- 7 T01 Prototype afslagprofiel
- 8 T02 Prototype afslagprofiel
- 9 T03 Prototype afslagprofiel
- 10 T04 Prototype afslagprofiel
- 11 T01 Prototype afslagprofiel, invloed schaalfactor
- 12 T02 Prototype afslagprofiel, invloed schaalfactor
- 13 T01 Prototype dwarstransport
- 14 T02 Prototype dwarstransport
- 15 T03 Prototype dwarstransport
- 16 T04 Prototype dwarstransport
- 17 T01...T04 Prototype erosie/aanzanding beneden maximaal stormvloedpeil,
na afloop van de storm

ORIENTEREND ONDERZOEK NAAR DE WERKING VAN EEN DUINVERDEDIGING TIJDENS SUPERSTORMVLOED

1. Inleiding

1.1 Achtergrond van het onderzoek

Nederland ligt voor een belangrijk deel beneden zeeniveau en wordt tegen overstroming beschermd door duinen en dijken. Op meerdere plaatsen langs de kust wordt de duinenrij erg smal door een langzame maar voortdurende erosie, met als gevolg dat gevreesd moet worden voor een doorbraak tijdens een zeer zware stormvloed. Ingevolge de Deltawet wordt gestreefd naar een dusdanige veiligheid van de waterkeringen dat stormvloeden met een maximale waterstand gelijk aan het ontwerppeil zonder calamiteiten kunnen worden weerstaan. Voor de duinen houdt dit in dat de afslag, die zal optreden tijdens de ontwerp-stormvloed niet mag leiden tot een doorbraak.

Reeds vele jaren wordt onderzoek uitgevoerd naar de mate van duinafslag die verwacht moet worden tijdens de ontwerp-stormvloed. Sinds 1965 wordt dit onderzoek geïnitieerd en begeleid door Werkgroep 5, Duinen als Waterkering, van de Technische Adviescommissie voor de Waterkeringen. Door deze commissie werd in 1972 de "Richtlijn voor de berekening van duinafslag tengevolge van een stormvloed" gepresenteerd [1].

Deze berekeningsmethode berust op waarnemingen van duinafslag in de natuur, aangevuld met een aantal enigszins speculatieve aannamen. Gezien de onzekerheden in de berekeningswijze werd besloten nader onderzoek uit te voeren ter toetsing dan wel verbetering van deze richtlijn. Naast natuurwaarnemingen werd hiertoe uitvoerig experimenteel onderzoek verricht in twee-dimensionale en drie-dimensionale modelopstellingen. Het hierdoor verkregen inzicht in het duinafslagproces is van dien aard dat de richtlijn uit 1972 aanzienlijk kon worden verbeterd. Een nieuwe berekeningsmethode voor duinafslag tijdens een stormvloed is inmiddels door Werkgroep 5 opgesteld [2].

Deze nieuwe berekeningsmethode vormt de basis voor de nog op te stellen "Leidraad voor de beoordeling van de veiligheid van duinen als primaire waterkering". Op plaatsen waar de duinregel de toetsing aan deze leidraad niet kan doorstaan

zijn verschillende mogelijkheden voorhanden om de vereiste duinversterking te bewerkstelligen.

- a) verhogen van de duinregel
- b) verbreden van de duinregel
- c) zandsuppletie van strand en vooroever
- d) aanbrengen van een (verborgen) duinverdediging.

Met betrekking tot de mogelijkheden a) tot en met c) kan de nieuwe berekeningsmethode inzicht verschaffen in de dimensionering van de vereiste zandaanvulling. Harde constructies in het duin worden bij toepassing van de berekeningsmethode echter niet in beschouwing genomen. Bij stormvloeden heeft een duinverdediging vermoedelijk een reducerende werking op de hoeveelheid duinafslag, reden waarom door de jaren heen aanzienlijke gedeelten van de duinkust zijn voorzien van harde constructies in uiteenlopende vormen [3]. In het algemeen blijken de huidige duinverdedigingen goed te voldoen, in die zin dat het duinfront hiermee behoorlijk wordt beschermd tegen afslag tijdens optredende stormvloeden. Het is echter zeer de vraag of dergelijke constructies ook tijdens superstormvloed, met een veel hogere maximale waterstand dan tot nu toe opgetreden, een reducerende werking op de duinafslag zullen hebben. Daarom is het van belang inzicht te verkrijgen in het effect van duinverdedigingen op duinafslag tijdens superstormvloed en omgekeerd. Voor de dimensionering van de verdediging is daarbij een belangrijk vraagpunt tot welke hoogte de kruin van de verdediging moet reiken om tijdens superstormvloed een reducerende invloed op de hoeveelheid duinafslag te hebben. Daarnaast is van belang te weten tot welke diepte de bodem vlak voor de verdediging kan uitschuren.

In dit kader is reeds in 1974 door het Waterloopkundig Laboratorium onderzoek verricht naar de werking van een verborgen kering in het duin nabij Callants-oog [4]. Toendertijd waren echter de relevante schaalrelaties met betrekking tot het mechanisme van dwarstransport nog niet bekend, waardoor geen directe relatie tussen de modelresultaten en het prototype kon worden gelegd.

1.2 Opdracht

Ten behoeve van Werkgroep 5 van de Technische Adviescommissie voor de Waterkeringen heeft het Waterloopkundig Laboratorium in de periode augustus 1981 tot januari 1982 een gevoeligheidsonderzoek duinafslag uitgevoerd (M 1819 deel I, [5]).

Dit onderzoek omvatte zowel proeven met vaste waterstand, teneinde de invloed van de stormvloedstand, de golfcondities en de duinhoogte op de hoeveelheid duinafslag te bepalen, alsook proeven met variërende waterstand voor het onderzoek naar duinafslag bij meer gecompliceerde beginprofielen dan het zogenaamde referentieprofiel (gemiddeld profiel langs de Nederlandse kust). In de proevenserie met variërende waterstand is onder andere een profiel met een daarvoor gelegen diepe geul onderzocht bij superstormvloedomstandigheden welke gelden langs de "open" kust. In het proevenprogramma was tevens voorzien in een soortgelijke proef met lagere golven; deze situatie wordt verwacht in Zeeland waar het platengebied voor de kust de golven tijdens superstorm aanzienlijk zal reduceren. In overleg met het Centrum voor Onderzoek Waterkeringen werd besloten voor deze proef de situatie nabij het Noorderstrand op Schouwen te onderzoeken. Deze situatie was ten behoeve van Rijkswaterstaat, Directie Waterhuishouding en Waterbeweging, ook reeds onderzocht in de Deltagoot [6], zodat tevens een toetsing van het kleinschalige onderzoek zou kunnen plaatsvinden.

Het onderzoek in de Deltagoot richtte zich op de werking van een duinvoetverdediging tijdens superstormvloed, zoals deze in de duinregel van het Noorderstrand is aangebracht. Het onderzoek omvatte 2 proeven, één proef zonder en één proef met een duinvoetverdediging, teneinde de invloed van de verdediging op de hoeveelheid duinafslag te kunnen bepalen.

Nadat de kleinschalige proef zonder duinvoetverdediging een bevredigende overeenkomst met de grootschalige proef opleverde, werd besloten een aanvullende proef met een duinvoetverdediging, zoals onderzocht in de Deltagoot, uit te voeren. Toen ook deze reproductie succesvol bleek, is het proevenprogramma met nog 2 proeven uitgebreid om meer inzicht te verkrijgen in het effect van een duinverdediging op de duinafslag en de resulterende profielveranderingen tijdens superstormvloed, met name wat betreft de hoogteligging van de teen en de kruin van de verdediging.

Het modelonderzoek is uitgevoerd in november 1981 in de Scheldegoot van het Laboratorium De Voorst en stond onder leiding van ir. W.M.K. Tilmans, die tevens dit verslag heeft samengesteld.

2. Modelonderzoek en resultaten

Als aanvulling op het gevoeligheidsonderzoek duinafslag (M 1819 deel I, [5]), zijn een aantal proeven uitgevoerd teneinde inzicht te verkrijgen in de werking van een duinverdediging tijdens superstormvloedomstandigheden. Uitgangspunt voor de proeven was het kustprofiel ter plaatse van kmr. 1,17 van het Noorderstrand op Schouwen (peiling 1980) en de bijbehorende condities: tijdens superstormvloed, zoals deze ook zijn toegepast in het Deltagootonderzoek [6] (zie figuren 1 en 2).

De proeven zijn uitgevoerd op de grootst mogelijke schaal in de gebruikte modelfaciliteit, te weten 1:15; dat wil zeggen, de diepteschaalfactor $n_d = 15$. De overige schaalfactoren zijn afgeleid van deze schaalfactor en van de korreldiameter van het gebruikte zand in het model, waarbij is aangenomen dat de korreldiameter van het zand in de natuur wordt gekenmerkt door $D_{50} = 225 \mu\text{m}$. Bij een aangenomen watertemperatuur van 10°C heeft dit zand een valsnelheid $w = 0,0267 \text{ m/s}$.

In het model is Asserzand met een gemeten diameter $D_{50} = 105 \mu\text{m}$ toegepast; bij een gemiddelde watertemperatuur van 12°C in het model heeft dit zand een valsnelheid $w = 0,0090 \text{ m/s}$ in het model. Toepassing van de schaalrelaties [7] leidt tot een lengteschaalfactor n_l :

$$n_l = n_d \left(\frac{n_d}{n_w^2} \right)^{0,28} = 15 \left[\frac{15}{\left(\frac{0,0267}{0,0090} \right)^2} \right]^{0,28} = 17,4 \quad (1)$$

zodat de vereiste profielsamentrekking in het model S_o bedraagt:

$$S_o = n_l / n_d = 1,16 \quad (2)$$

De tijdschaalfactor n_t bedraagt:

$$n_t = n_d^{0,5} = 3,87 \quad (3)$$

Bij het modelonderzoek zijn bovenstaande schalen aangehouden.

Het navolgende proevenprogramma is uitgevoerd.

proefnummer	type duin- verdediging	hoogte verdediging t.o.v. N.A.P. (m)		opmerkingen
		teen	kruin	
T01	geen	-	-	reproductie proef T1 [6]
T02	laag	+1,00	+ 4,35	reproductie proef T2 [6]
T03	hoog	+1,00	+ 7,70	-
T04	zeer hoog	-1,50	+ 12,40	-

De reproductie van de superstormvloedcondities tijdens de proeven is weergegeven in figuur 2. De beginprofielen, zoals toegepast in het model, en de veranderingen daarin ten gevolge van de stormvloed zijn weergegeven in de figuren 3 tot en met 6. De naar prototype herleide profielveranderingen zijn weergegeven in de figuren 7 tot en met 10. Hierbij dient het volgende te worden opgemerkt.

Na afloop van het gevoeligheidsonderzoek is gebleken dat de zeefanalyses van de genomen monsters van het modelzand als onbetrouwbaar moeten worden aangemerkt [5]. Aanvullende zeefanalyses en valsnelheidsproeven in het Laboratorium voor Vloeistofmechanica van de Technische Hogeschool Delft hebben aangetoond dat het modelzand een korreldiameter $D_{90} = 90 \mu\text{m}$ moet hebben gehad. Bij de herleiding van de modelresultaten naar het prototype is daarom uitgegaan van deze korreldiameter. De bijbehorende valsnelheid bij een heersende watertemperatuur in het model van 12°C is $w = 0,0072 \text{ m/s}$ [5]. Tevens is de valsnelheid van het prototype zand gecorrigeerd, daar uit recente metingen van de korrelgrootte van het duinzand in de natuur ter plaatse van kmr. 1,17 is gebleken dat het zand aldaar iets fijner is dan eerst was verondersteld: $D_{50} = 206 \mu\text{m}$ in plaats van $D_{50} = 225 \mu\text{m}$. De gecorrigeerde valsnelheid bij een watertemperatuur van 10°C in de natuur is $w = 0,0239 \text{ m/s}$. Met deze gegevens kan via de schaalrelaties de feitelijke samentrekking S_1 van het profiel in het model worden bepaald, waarbij de duinafslag van het prototype beginprofiel wordt nagebootst.

$$S_1 = n_1/n_d = \left(\frac{n_d}{n^2 w}\right)^{0,28} = \left[\frac{15}{(0,0239)^2}\right]^{0,28} = 1,09 \quad (4)$$

Achteraf is dus gebleken dat het prototype beginprofiel in feite met een samentrekking $S_1 = 1,09$ in het model had moeten worden gebouwd. De beginprofielen

in het model zijn echter alle met een samentrekking $S_0 = 1,16$ ingebouwd. Derhalve hebben de naar prototype herleide beginprofielen een samentrekking ten opzichte van het werkelijke beginprofiel in het prototype ter grootte van:

$$S = \frac{S_0}{S_1} = \frac{1,16}{1,09} = 1,06 \quad (5)$$

De bij deze steilere beginprofielen behorende oppervlakteschaalfactor waarmee de gevonden volumeveranderingen in het profiel moeten worden vermenigvuldigd om de prototype volumeveranderingen (m^3/m') te verkrijgen, kan als volgt worden bepaald.

$$n_A = n_1 \times n_d = n_d \left(\frac{\bar{n}_d}{n_w} \right)^{0,28} = 245 \quad (6)$$

De aldus herleide prototype volumeveranderingen (m^3/m') horen bij een prototype beginprofiel dat een factor $S = 1,06$ steiler is dan het werkelijke prototype beginprofiel. Dit is voor een onderlinge vergelijking van de verschillende proefresultaten geen enkel bezwaar. Voor de toetsing aan de proeven in de Deltagoot dient hier echter rekening mee te worden gehouden.

3. Toetsing kleinschalig onderzoek

In het huidige onderzoek zijn een tweetal proeven (T01 en T02) uitgevoerd welke, afgezien van de toegepaste schaalfactor, identiek zijn geweest aan eerder uitgevoerde proeven in de Deltagoot (M 1797, proeven T1 en T2, [6]). Deze proeven hebben betrekking op een profiel met zeer diepe geul, zonder en met een duinverdediging. Door een vergelijking van de overeenkomstige proeven is het nu mogelijk de resultaten van het kleinschalige onderzoek, met schaalfactor $n_d = 15$, te toetsen aan overeenkomstig grootschalig onderzoek, met schaalfactor $n_d = 2$.

Twee belangrijke parameters van het duinafslagproces zijn de profielveranderingen tijdens de stormvloed en de resulterende hoeveelheid duinafslag boven het maximale stormvloedpeil. In de figuren 11 en 12 zijn de naar prototype herleide profielveranderingen van de overeenkomstige proeven uit beide onderzoeken weergegeven; in figuur 11 de situatie zonder duinverdediging en in figuur 12 de situatie met een duinverdediging.

Zoals reeds gememoreerd, hebben de kleinschalige proeven betrekking op een prototype beginprofiel dat een factor $S = 1,06$ steiler is dan het werkelijke profiel in prototype. Daarnaast is bij het Deltagootonderzoek gebleken dat de grootschalige proeven betrekking hebben op een flauwer prototype beginprofiel, met $S = 0,94$, dan het beginprofiel in de natuur. Derhalve zijn de naar het prototype herleide profielen uit het huidige onderzoek een factor $1,06/0,94 = 1,13$ steiler dan de prototype profielen, afgeleid uit het Deltagootonderzoek.

Desalniettemin kan uit de figuren 11 en 12 worden geconcludeerd dat de profielveranderingen tijdens de stormvloed nagenoeg niet beïnvloed worden door de schaalfactor en de zandsoort waarmee het duinafslagproces wordt nagebootst. Een schaaleffekt kan wèl geconstateerd worden in de ontwikkeling van de duinvoetligging; bij de profielen uit het kleinschalige onderzoek ligt de duinvoet na afloop van de storm aanmerkelijk hoger dan bij de profielen in het grootschalige onderzoek. Dit schaaleffekt is ook reeds in eerder onderzoek geconstateerd [7].

De afslagresultaten voor de verschillende proeven zijn samengevat in de navolgende tabel.

		Scheldegoot ($n_d = 15$)		Deltagoot ($n_d = 2$)	
		prototype afslaghoeveelheid boven max. w.s. (m^3/m')		prototype afslaghoeveelheid boven max. w.s. (m^3/m')	
		S = 1,06	S = 1	S = 0,94 S = 1	
zonder duin- verdediging	T01	121	113	T1	130 à 145 139 à 155
met duin- verdediging	T02	125	116	T2	136 à 151 146 à 162

In de tabel zijn, naast de prototype afslaghoeveelheden die horen bij de oorspronkelijk herleide samentrekking van het prototype beginprofiel, tevens de gekorrigeerde afslaghoeveelheden gegeven. De korrektie is uitgevoerd op basis van de relatie tussen profielsamentrekking en afslaghoeveelheid, zoals deze uit eerder onderzoek (M 1263 deel IIA, blz. 56, [7]) is bepaald. Toepassing van deze korrektie leidt voor de afslagresultaten uit het huidige onderzoek tot een afslagreductie van 7%. De afslagresultaten uit het Deltagootonderzoek dienen met eenzelfde percentage verhoogd te worden.

De spreiding in de afslagresultaten van het Deltagootonderzoek resulteert uit een volumeverlies aan zand tijdens het onderzoek ten gevolge van een te geringe mechanische verdichting. Dit heeft tot gevolg dat in het model vermoedelijk een iets te grote hoeveelheid duinafslag is gevonden, reden waarom een afslagreductie van 0% tot 10% aanvaardbaar wordt geacht [6].

Uit de tabel blijkt dat de uit het kleinschalige onderzoek herleide prototype afslaghoeveelheid ongeveer 25% à 40% kleiner is dan de prototype hoeveelheid duinafslag welke volgt uit het Deltagootonderzoek. In [6] wordt gesteld dat bij deze afslaghoeveelheden een standaardafwijking van 10% à 20% reëel moet worden geacht. Desondanks moet worden gekonkludeerd dat voor de onderzochte situatie van een profiel met een diepe geul, de te verwachten hoeveelheid duinafslag tijdens superstormvloed in het kleinschalige onderzoek wordt onderschat.

De oorzaak van de verschillen tussen de afslaghoeveelheden is niet bekend, maar deze kan mogelijk liggen in de geconstateerde verschillen in het duinafslagproces in de Deltagoot en in de Scheldegoot. Bij de proeven in de Deltagoot, met $n_d = 2$ en toepassing van duinzand, werd het duinprofiel aan de teen enigszins

ondergraven door de golven, waarna het tamelijk droge en rulle zand langs het gehele duinfront in betrekkelijk dunne schijven naar beneden gleed. Bij de proeven in de Scheldegoot, met $n_d = 15$ en toepassing van Asserzand, werd het ondergraven van het duin ook geconstateerd, maar hier was het duinmassief door zijn geringe hoogte volledig vochtig en cohesief, waardoor hier geen afschuiven optrad. In plaats daarvan ontstonden er scheuren in het duin waarop na enige tijd grote brokken zand naar voren kantelden. Dit zand werd geleidelijk door de golven in zeevaartse richting getransporteerd, waarna het verschijnsel van ondergraven van het duin weer kon optreden.

4. Werking van een duinverdediging

Zoals reeds is aangegeven in hoofdstuk 2 zijn in het huidige onderzoek een viertal proeven uitgevoerd, teneinde meer inzicht te verkrijgen in de werking van een duinverdediging. Naast één "referentie"-proef zonder verdediging zijn 3 proeven uitgevoerd met respectievelijk een lage, hoge en zeer hoge duinverdediging.

4.1 Duin zonder verdediging (proef T01)

De naar het prototype herleide profielveranderingen tijdens de stormvloed zijn weergegeven in figuur 7. Het blijkt dat het grootste deel van de duinafslag plaatsvindt tijdens het oplopen van de waterstand tot het maximale peil. Tijdens het dalen van de waterstand neemt de afslag snel af. Het afgeslagen zand van het duin wordt voor een deel op het strand en de vooroever afgezet, maar een aanzienlijk deel komt in de geul terecht, welk deel als verloren moet worden beschouwd voor de kustdynamica.

Om het erosie- en aanzandingspatroon over het profiel door dwarstransport te kwantificeren zijn berekeningen uitgevoerd voor verschillende niveau's op eenheden van 1 m beneden het maximale stormvloedpeil. Het resultaat is samengevat in tabel 1 en weergegeven in figuur 13. Hieruit blijkt dat het profiel erodeert tot ongeveer 1 m onder het maximale stormvloedpeil, met aanzanding op grotere diepten. De totale erosie in het profiel na afloop van de storm bedraagt $128 \text{ m}^3/\text{m}'$. Het aanzandingspatroon over het profiel is weergegeven in figuur 17. Hieruit kan worden afgeleid dat ongeveer $55 \text{ m}^3/\text{m}'$ in de geul wordt afgezet; dat is 43% van het totale erosievolume.

4.2 Duin met een lage verdediging (proef T02)

Bij deze proef is een duinverdediging met een kruinhoogte van N.A.P. +4,35 m in het profiel opgenomen; de kruin van de verdediging ligt dus 1 m beneden de maximale stormvloedstand van N.A.P. +5,35 m; de helling van deze verdediging is 1:3.

De naar het prototype herleide profielveranderingen tijdens de stormvloed zijn weergegeven in figuur 8. In het profiel ontwikkelt zich, nadat de verdediging door de golven wordt aangevallen, de tendens een erosiekuil vóór de verdediging te vormen. Deze komt echter niet tot uiting in de profielveranderingen door de

ruime mate van zandtoevoer door duinafslag. Met betrekking tot deze profielveranderingen en de hoeveelheid duinafslag kan gesteld worden dat de invloed van de lage verdediging nihil is, omdat de kruin van de verdediging beneden het afslagprofiel van het onverdedigde duin ligt. Tijdens de stormvloed spoelt het duinzand over de lage kruin van de verdediging heen, waardoor de werking van de verdediging teniet wordt gedaan. Eenzelfde mechanisme is ook uit het grootschalige onderzoek gebleken.

De resultaten van de kuberingen over het profiel zijn samengevat in tabel 2 en weergegeven in figuur 14. De totale erosie van het profiel, welke zich tot 1 m onder het maximale stormvloedpeil uitstrekt, bedraagt $133 \text{ m}^3/\text{m}'$. Het aanzandingspatroon over het diepere gedeelte van het profiel is vrijwel identiek aan de situatie zonder duinverdediging, zoals blijkt uit figuur 17. In de geul wordt ongeveer $60 \text{ m}^3/\text{m}'$, oftewel 45% van het totale erosievolume, afgezet.

4.3 Duin met een hoge verdediging (proef T03)

Bij deze proef is een duinverdediging met een kruinhoogte op 2,35 m boven het maximale stormvloedpeil, dat is N.A.P. +7,70 m, onderzocht. De kruinhoogte ligt dus ruim boven het afslagprofiel van het onverdedigde duin. De verdediging, met een taludhelling van 1:3, is enigszins als verborgen verdediging in het duinprofiel opgenomen.

De naar het prototype herleide profielveranderingen zijn weergegeven in figuur 9. Door de hoogte van de kruin van de verdediging spoelt er tijdens de stormvloed vrijwel geen duinzand over de kruin van de verdediging heen; de duinafslag blijft beperkt tot de "schijf" duinzand vóór en boven de verdediging. Ook bij deze verdediging wordt de tendens tot kuilvorming vóór de verdediging teniet gedaan door de zandtoevoer door afslag van het duinpakket.

Tabel 3 en figuur 15 geven de kuberingsresultaten van de profielveranderingen. De diepte tot waar erosie van het profiel plaatsvindt is nu 2 m beneden het maximale stormvloedpeil. De totale erosie bedraagt $62 \text{ m}^3/\text{m}'$, dat is ongeveer 50% van de erosie bij de profielen zonder verdediging en met de lage verdediging. Door de verhoogde turbulentie door golfreflectie tegen de verdediging wordt een groot deel van het afgeslagen zandvolume niet op het strand en op de vooroever, maar pas op grotere afstand van de verdediging afgezet, zoals kan worden gezien in figuur 17. Het zandvolume dat in de geul verdwijnt is daarom in relatieve zin aanmerkelijk groter dan bij de eerdere situaties: $45 \text{ m}^3/\text{m}'$ oftewel 73% van het totale erosievolume. In absolute zin is deze hoeveelheid echter iets geringer dan in de situaties met een lage of geen verdediging.

4.4 Duin met een zeer hoge verdediging (proef T04)

Bij deze proef is een duinverdediging tot de maximale duinhoogte doorgezet, dat is N.A.P. +12,40 m, d.w.z. 7,50 m boven de maximale stormvloedstand. De verdediging is identiek aan de lage verdediging met helling 1:3 tot N.A.P. +4,35 m, en daarboven opgezet onder een helling 1:1,75.

De naar het prototype herleide profielveranderingen tijdens de stormvloed zijn weergegeven in figuur 10. Omdat nu géén zandtoevoer door duinafslag plaatsvindt, ontwikkelt zich tengevolge van hoge turbulentie door golfreflectie tegen de verdediging reeds spoedig een erosiekuil met een nagenoeg driehoekige vorm vóór de kering, waarbij na verloop van tijd de grootste diepte tegen de kering wordt gevonden. Mogelijk is de watermassa, die periodiek terugstroomt vanaf de hellende kering als gevolg van golfoploop, de oorzaak van de grote diepte vlak voor de kering. Deze bereikt een maximale waarde van ongeveer 2 m.

De kuberingsresultaten zijn weergegeven in tabel 4 en figuur 16. Tot ongeveer 5 m beneden het maximale stormvloedpeil vindt erosie van het profiel plaats, met een totaal erosievolume van $51 \text{ m}^3/\text{m}'$. De aanzanding vindt voornamelijk in de geul plaats: ongeveer $40 \text{ m}^3/\text{m}'$, d.w.z. 78% van het erosievolume wordt in de geul afgezet (zie figuur 17). In absolute zin is deze hoeveelheid nagenoeg gelijk aan of iets minder dan die in de situatie met een hoge verdediging, en zeker minder dan de hoeveelheid welke bij de proeven met een lage of geen duinverdediging in de geul wordt afgezet.

4.5 Samenvatting

In onderstaande tabel zijn de belangrijkste resultaten met betrekking tot de werking van een duinverdediging samengevat.

type duinverdediging	hoeveelheid duinafslag boven max. s.v.p.		totale erosie in het profiel		aanzanding in de geul	
	volume	vgl. duinafslag bij geen verdediging	volume	vgl. erosievolume bij geen verdediging	volume	vgl. totale erosievolume
geen	$121 \text{ m}^3/\text{m}'$	100%	$128 \text{ m}^3/\text{m}'$	100%	$55 \text{ m}^3/\text{m}'$	43%
laag	$125 \text{ m}^3/\text{m}'$	103%	$133 \text{ m}^3/\text{m}'$	104%	$60 \text{ m}^3/\text{m}'$	45%
hoog	$61 \text{ m}^3/\text{m}'$	49%	$62 \text{ m}^3/\text{m}'$	48%	$45 \text{ m}^3/\text{m}'$	73%
zeer hoog	$0 \text{ m}^3/\text{m}'$	0%	$51 \text{ m}^3/\text{m}'$	40%	$40 \text{ m}^3/\text{m}'$	78%

5. Conclusies

Met betrekking tot het uitgevoerde modelonderzoek naar de werking van een duinverdediging tijdens superstormvloed, kunnen de navolgende conclusies worden geformuleerd. Hierbij dient te worden benadrukt dat uitsluitend de situatie van een kustprofiel met een diepe geul dicht onder de kust is onderzocht.

- 1 Een lage duinverdediging, waarbij de kruin onder het afslagprofiel van het onverdedigde duin ligt, heeft geen significante invloed op de hoeveelheid duinafslag en de profielveranderingen tijdens de stormvloed. Het afgeslagen zand spoelt over de verdediging heen en wordt voor een deel afgezet op het strand en de vooroever, voor een ander deel verder zeewaarts in de geul. Dit laatste deel moet als verloren worden beschouwd voor de kustdynamica.
- 2 Een hoge duinverdediging, waarbij het zeevaartse duinbeloop tot boven het afslagprofiel van het onverdedigde duin is vastgelegd, resulteert in een aanzienlijke reductie van de hoeveelheid duinafslag tijdens stormvloed. Ten gevolge van de verhoogde golfreflectie tegen de duinverdediging wordt slechts een klein deel van het afgeslagen zand op het strand en de vooroever afgezet; het grootste deel verdwijnt in de geul. Voor het onderzochte profiel resulteert dit in een zandverlies dat iets kleiner is dan bij een duin met een lage of geen verdediging.
- 3 Bij een zeer hoge duinverdediging, waarbij niet of nauwelijks duinafslag plaatsvindt, ontwikkelt zich tijdens de stormvloed een erosiekuil vóór de kering met een maximale diepte van ongeveer 2 m, welke tegen de kering wordt gevonden. In dit geval wordt het grootste deel van het geërodeerde zand in de diepe geul afgezet, maar het zandverlies is minder dan in de situaties met een lage of geen duinverdediging.
- 4 Toetsing van de huidige onderzoekresultaten aan overeenkomstig grootschalig onderzoek in de Deltagoot leert, dat de naar het prototype herleide profielveranderingen nagenoeg niet beïnvloed worden door de schaalfactor waarop het modelonderzoek wordt uitgevoerd. Dit geldt niet voor de hoogteligging van de duinvoet.

Overigens is geconstateerd dat het duinafslagproces in de Deltagoot (met schaalfactor $n_d = 2$ en toepassing van duinzand) anders verloopt dan bij

proeven met schaalfactor $n_d = 15$ (Scheldegoot) en toepassing van Asserzand, als gevolg van verschillen in cohesie tussen de zandkorrels. Mogelijk is dit de oorzaak dat in het kleinschalige onderzoek de hoeveelheid duinafslag boven het maximale stormvloedpeil enigszins wordt onderschat.

- 5 Gezien voornoemde schaafeffekten is nader onderzoek naar de werking van een duinverdediging in een grootschalig model gewenst teneinde de bevindingen uit het kleinschalige onderzoek, vooral met betrekking tot hogere duinverdedigingen, te verifiëren.

LITERATUUR

- 1 Technische Adviescommissie voor de Waterkeringen
Richtlijn voor de berekening van duinafslag ten gevolge van een stormvloed
juli 1972
- 2 Waterloopkundig Laboratorium
Rekenmodel voor de verwachting van duinafslag tijdens stormvloed
Verslag onderzoek M 1263, deel IV, november 1982
- 3 Centrum voor Onderzoek Waterkeringen
Inventarisatie duinvoetverdedigingen
Verslag S-78.019, september 1981
- 4 Waterloopkundig Laboratorium
Verborgene kering in een duin te Callantsoog
Verslag modelonderzoek M 1205, mei 1974
- 5 Waterloopkundig Laboratorium
Systematisch onderzoek naar kenmerkende factoren voor duinafslag
Verslag modelonderzoek M 1819, deel I, december 1982
- 6 Waterloopkundig Laboratorium
Duinafslag tijdens superstormvloed, Noorderstrand Schouwen
Onderzoek naar de werking van een duinvoetverdediging tijdens superstormvloed
Verslag modelonderzoek M 1797, augustus 1982
- 7 Waterloopkundig Laboratorium
Schaalserie duinafslag
Verslag modelonderzoek M 1263, deel II, april 1981

niveau \ T01	zeewaarts transport (m ³ /m')			
	t = 9,7 uur	t = 13,6 uur	t = 16,5 uur	t = 19,4 uur
max. w.s. = 0 m	8	99	120	121
-1 m	11	108	128	128
-2 m	13	102	126	124
-3 m	10	80	108	106
-4 m	11	62	88	92
-5 m	14	50	71	78
-6 m	16	41	56	70
-7 m	14	34	44	57
-8 m	14	29	37	46
-9 m	10	20	25	29
-10 m	0	0	0	0

--- maximaal zeewaarts transport

Tabel 1 Dwarstransport in de situatie zonder duinverdediging (T01)

niveau \ T02	zeewaarts transport (m ³ /m')			
	t = 9,7 uur	t = 13,6 uur	t = 16,5 uur	t = 19,4 uur
max. w.s. = 0 m	10	119	125	125
-1 m	13	127	134	133
-2 m	14	119	132	128
-3 m	14	95	115	111
-4 m	16	75	95	96
-5 m	22	63	78	82
-6 m	23	48	61	72
-7 m	21	41	50	60
-8 m	21	37	44	49
-9 m	15	27	30	31
-10 m	0	0	0	0

-----maximaal zeewaarts transport

Tabel 2 Dwarstransport in de situatie met een lage duinverdediging (T02)

niveau \ T03	zeewaarts transport (m ³ /m')			
	t = 9,7 uur	t = 13,6 uur	t = 16,5 uur	t = 19,4 uur
max. w.s. = 0 m	2	57	61	61
-1 m	4	59	63	62
-2 m	6	59	63	62
-3 m	7	50	64	60
-4 m	11	41	57	59
-5 m	17	39	53	56
-6 m	19	34	44	53
-7 m	17	29	37	46
-8 m	16	26	32	38
-9 m	11	18	21	23
-10 m	0	0	0	0

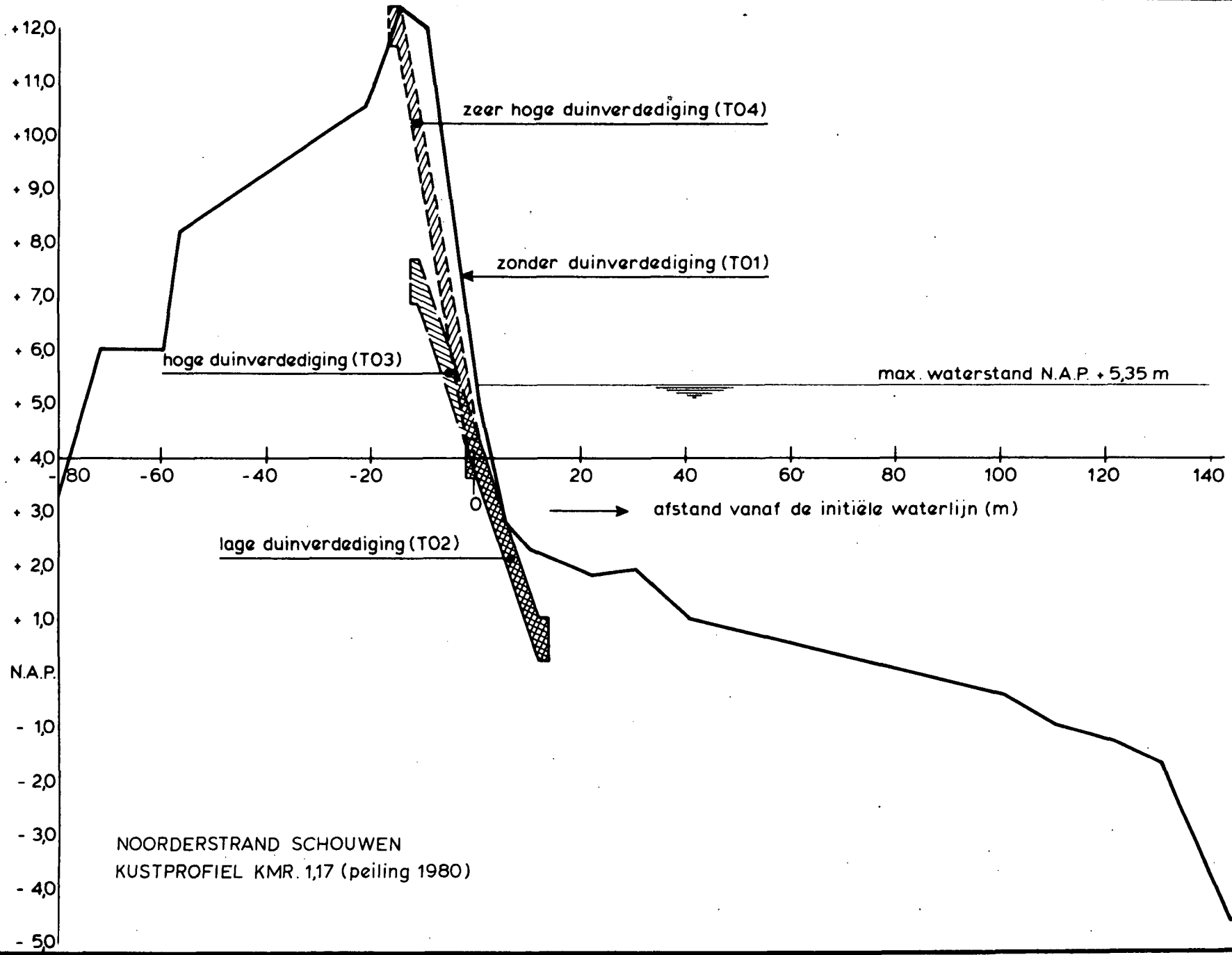
---maximaal zeewaarts transport

Tabel 3 Dwarstransport in de situatie met een hoge duinverdediging (T03)

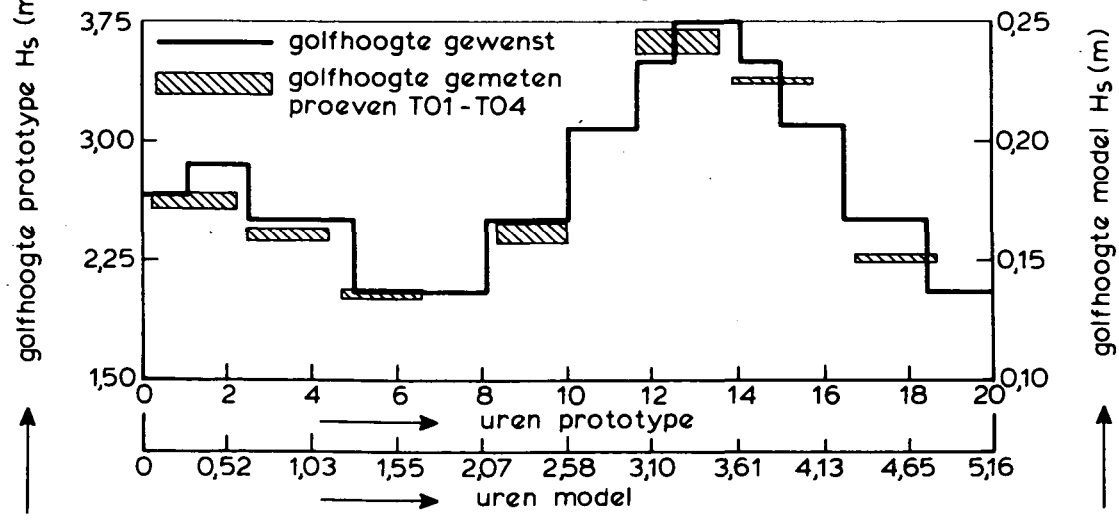
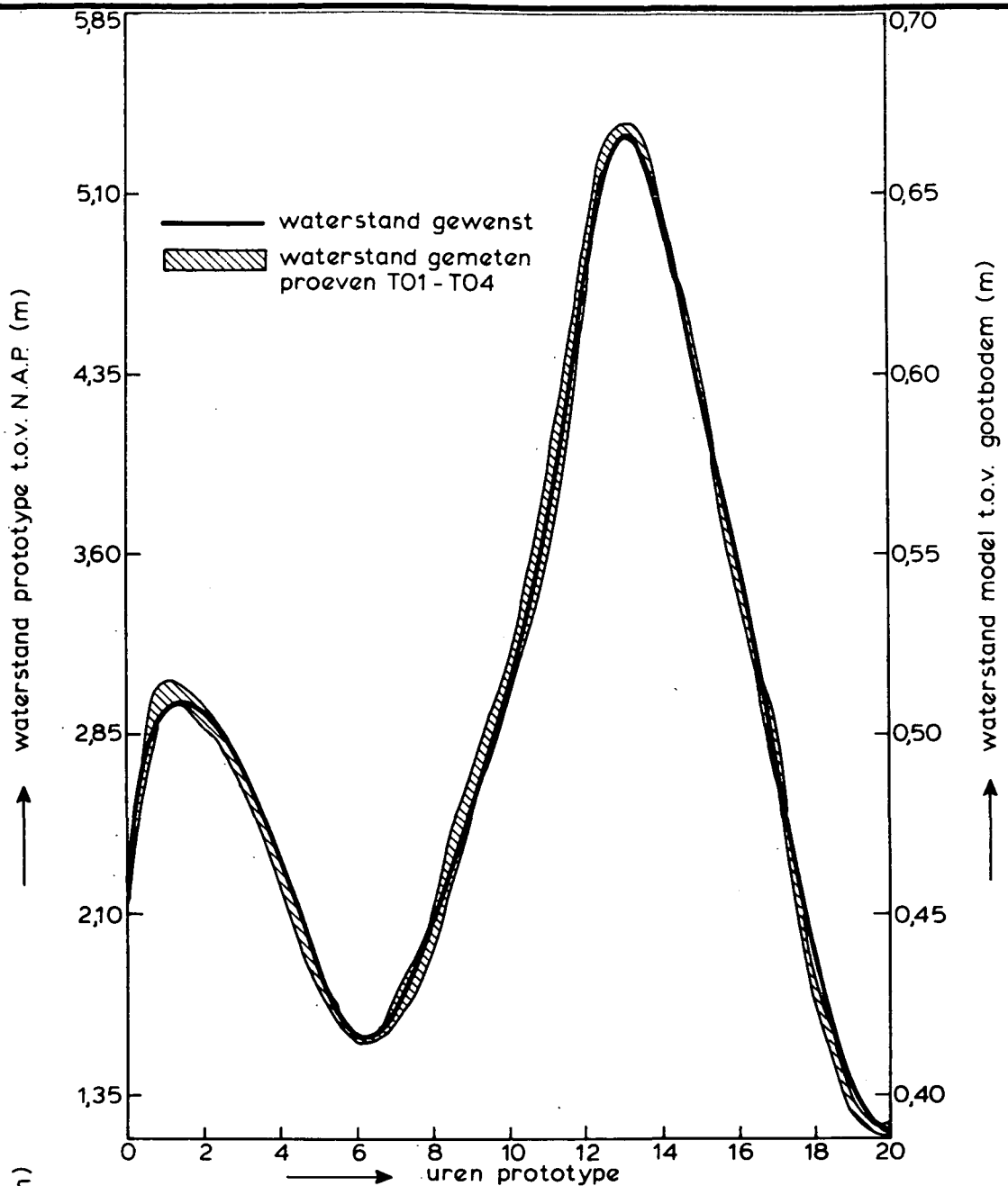
niveau \ T04	zeewaarts transport (m ³ /m')			
	t = 9,7 uur	t = 13,6 uur	t = 16,5 uur	t = 19,4 uur
max. w.s. = 0 m	0	0	0	0
-1 m	0	0	0	0
-2 m	0	0	0	0
-3 m	1	0	0	0
-4 m	15	14	14	15
-5 m	18	29	50	51
-6 m	20	24	31	42
-7 m	19	24	28	38
-8 m	18	23	26	32
-9 m	12	15	16	21
-10 m	0	0	0	0

---maximaal zeewaarts transport

Tabel 4 Dwarstransport in de situatie met een zeer hoge duinverdediging (T04)



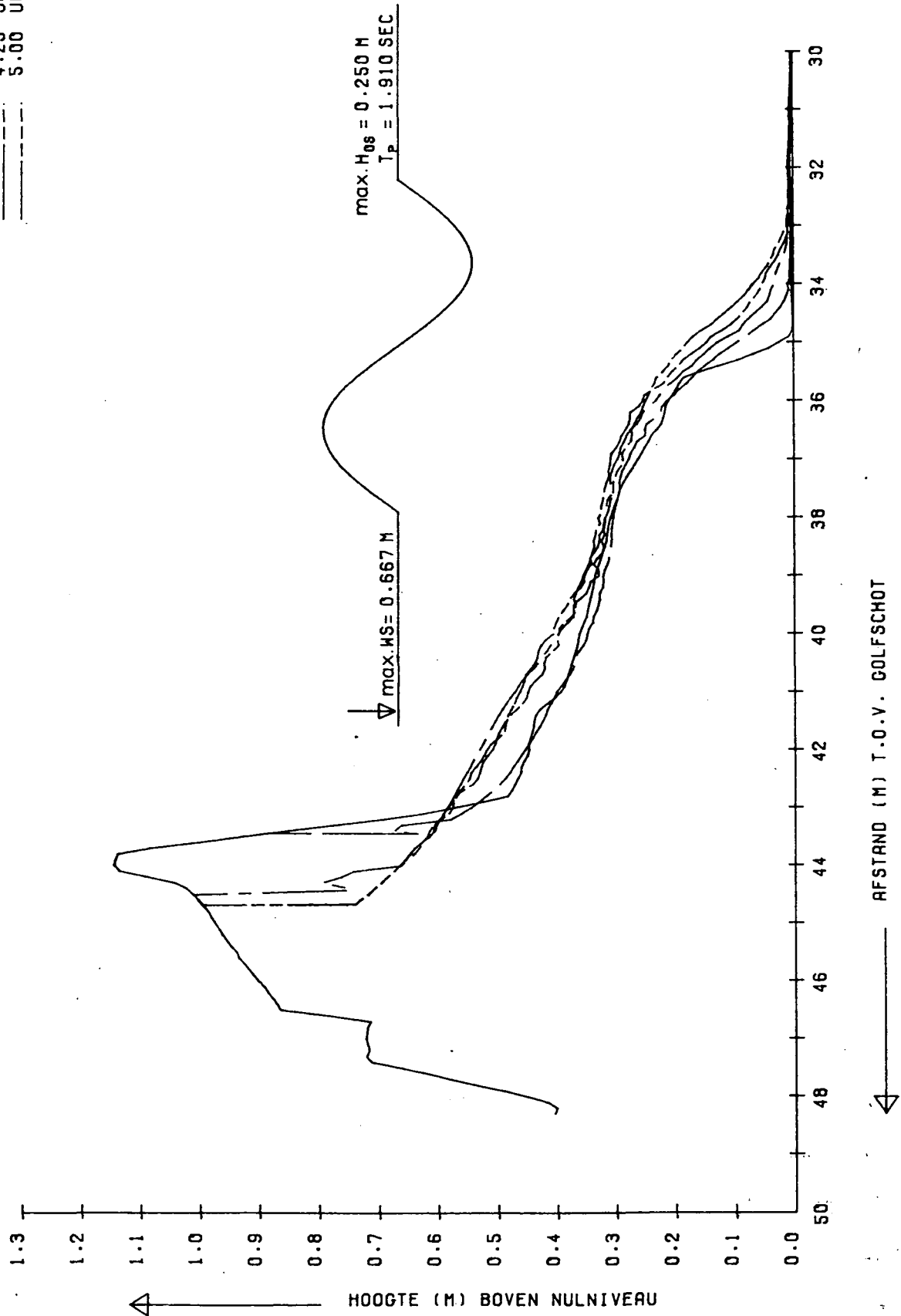
NOORDERSTRAND SCHOUWEN
KUSTPROFIEL KMR. 1,17 (peiling 1980)



STORMVLOEDCONDITIES

TIJD IN UREN NA START:

- 0.00 UUR
- 2.50 UUR
- 3.50 UUR
- 4.25 UUR
- 5.00 UUR



DWARSPROFIELEN

TO1

SCHAAL HOR . 1:100
VERT. 1:10

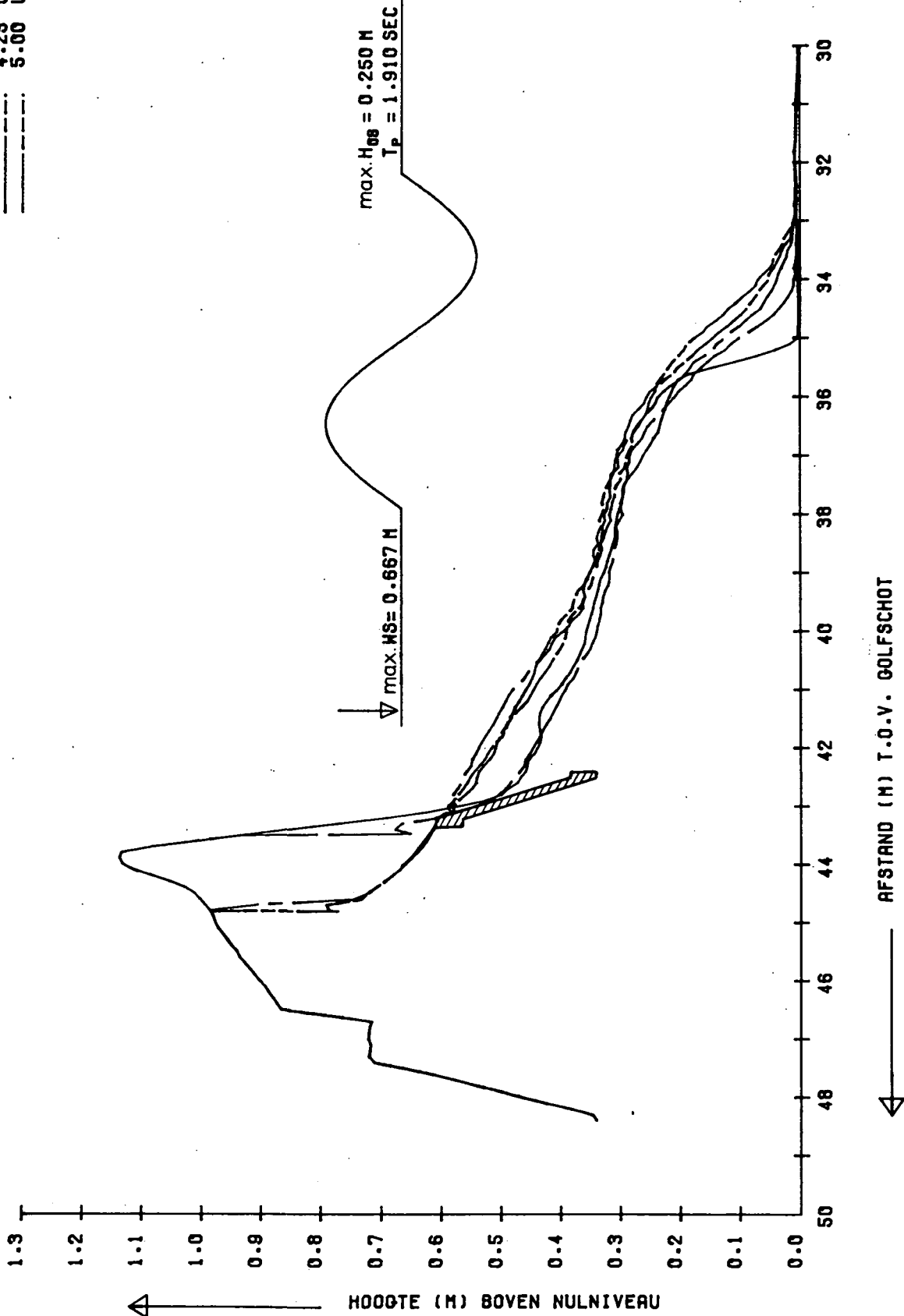
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

M 1819

FIG. 3

TIJD IN UREN NA START:

- 0.00 UUR
- 2.50 UUR
- 3.50 UUR
- 4.25 UUR
- 5.00 UUR



DWARSPROFIELEN

T02

SCHAAL

HOR . 1:100

VERT. 1:10

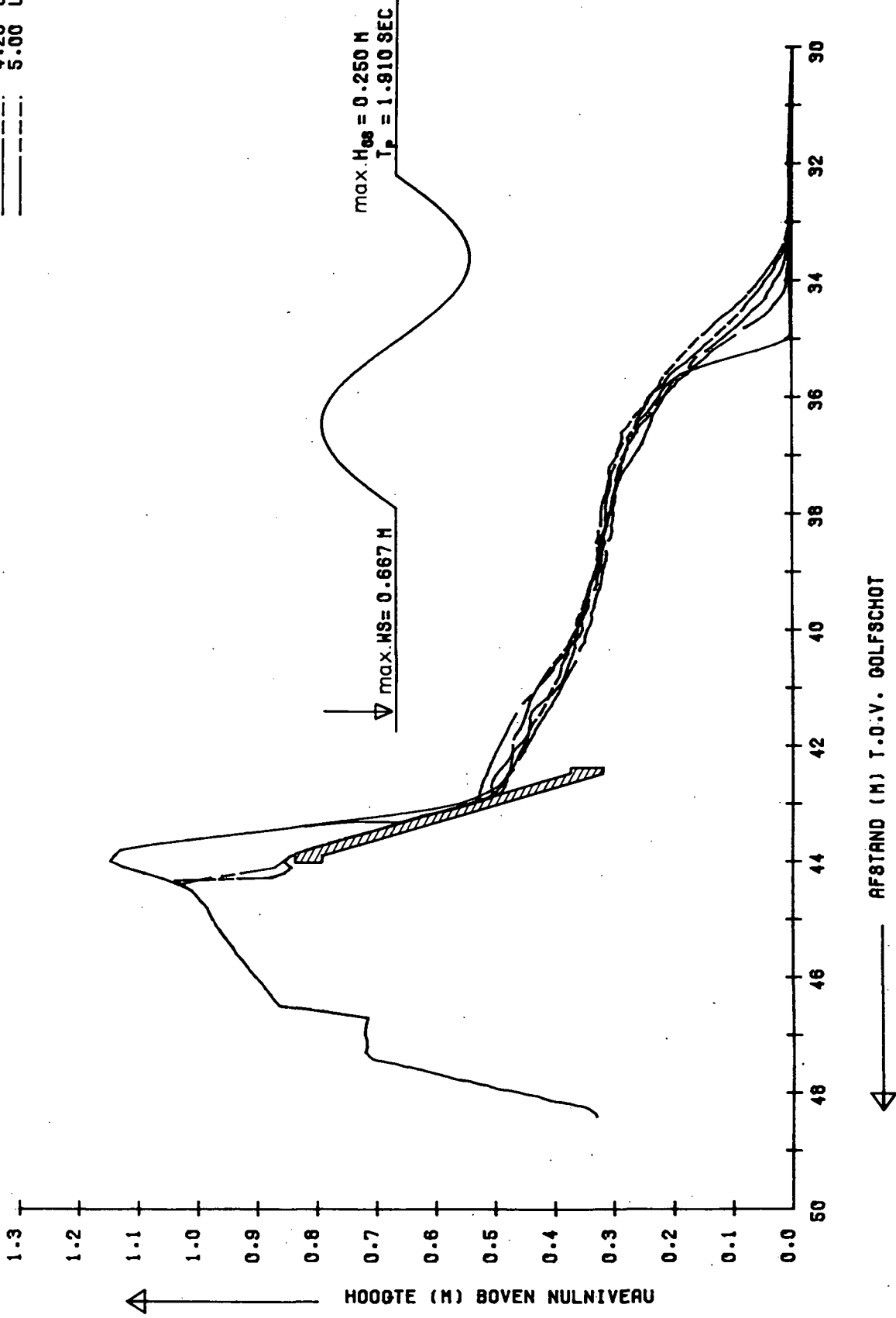
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

M 1819

FIG. 4

TIJD IN UREN NA START:

- 0.00 UUR
- 2.50 UUR
- 3.50 UUR
- 4.25 UUR
- 5.00 UUR



DWARSPROFIELEN

T03

SCHAAL HOR . 1:100
VERT. 1:10

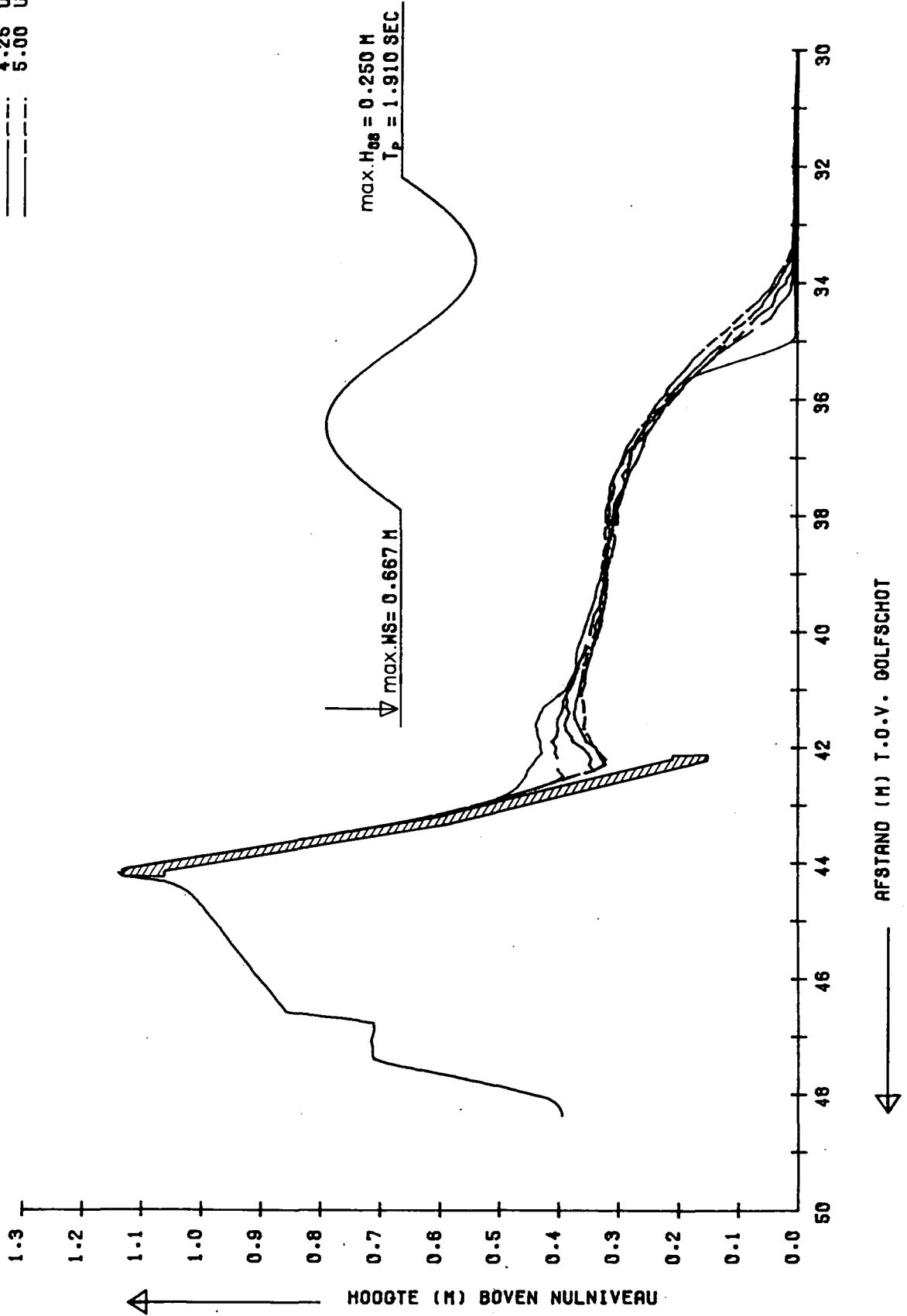
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

M 1819

FIG. 5

TIJD IN UREN NA START:

- 0.00 UUR
- 2.50 UUR
- 3.50 UUR
- 4.26 UUR
- 5.00 UUR



DWARSPROFIELEN

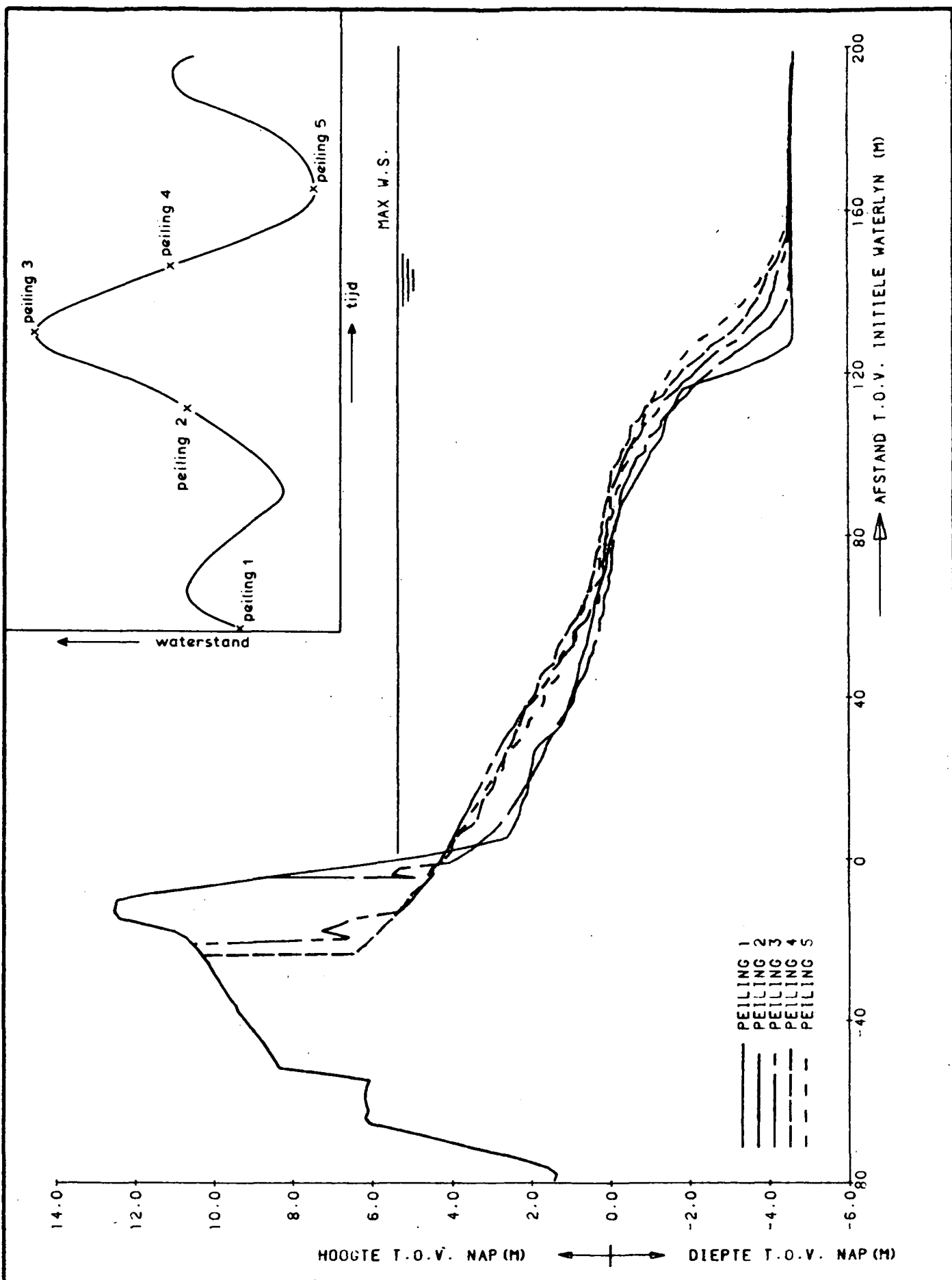
T04

SCHAAL HOR . 1:100
VERT. 1:10

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

M 1819

FIG. 6



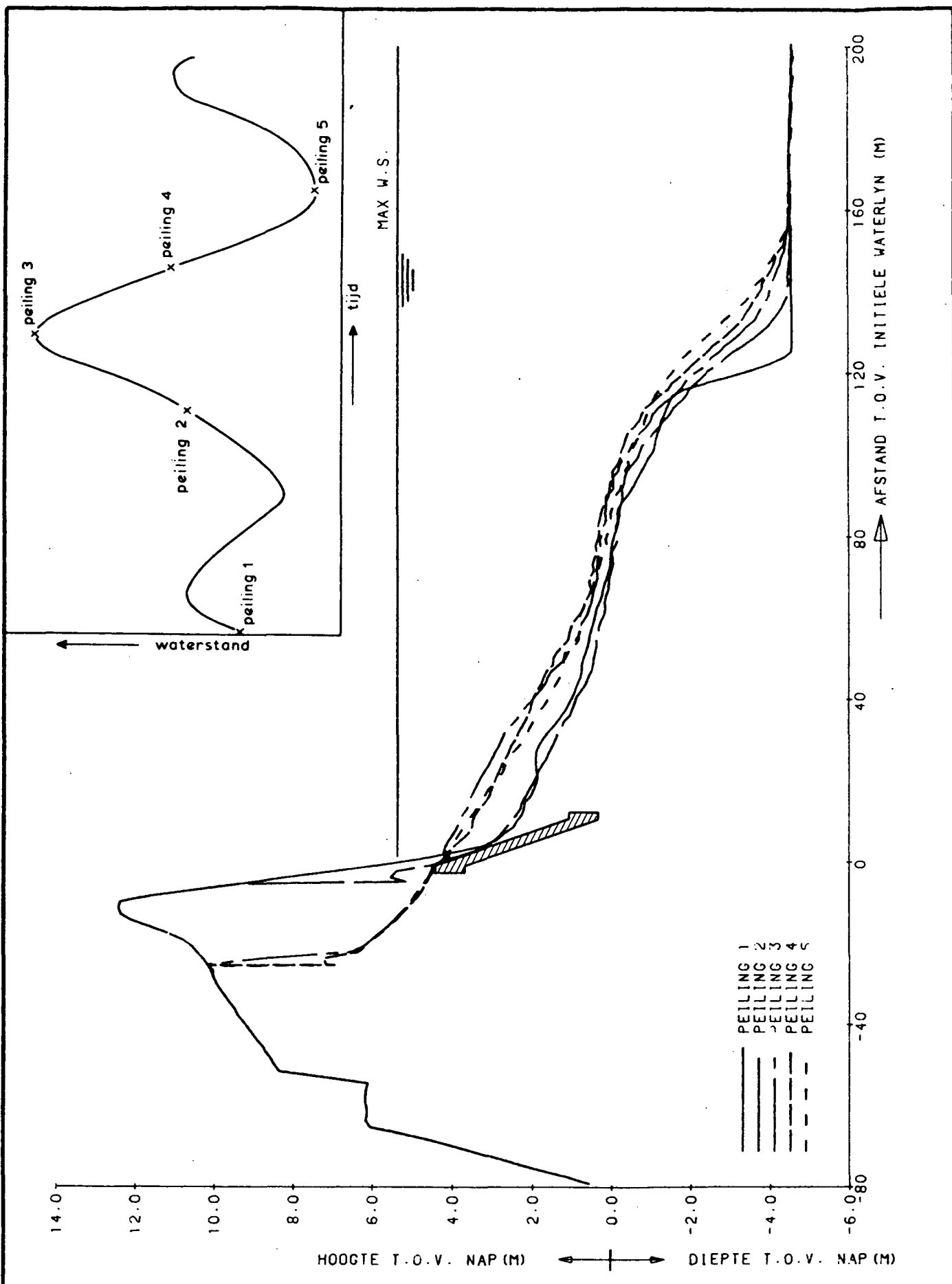
PROTOTYPE AFSLAGPROFIEL

T01

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

M 1819

FIG. 7



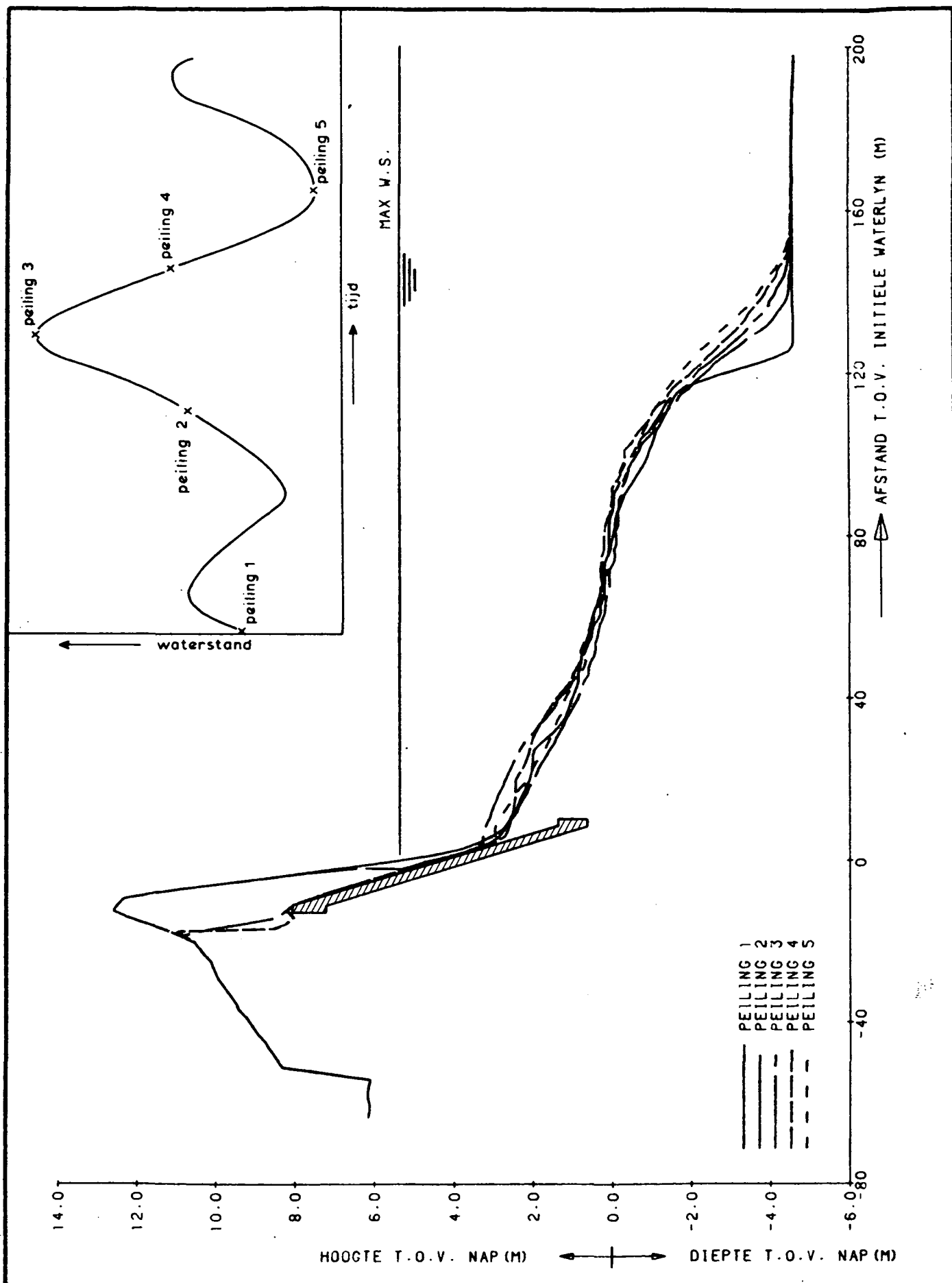
PROTOTYPE AFSLAGPROFIEL

T02

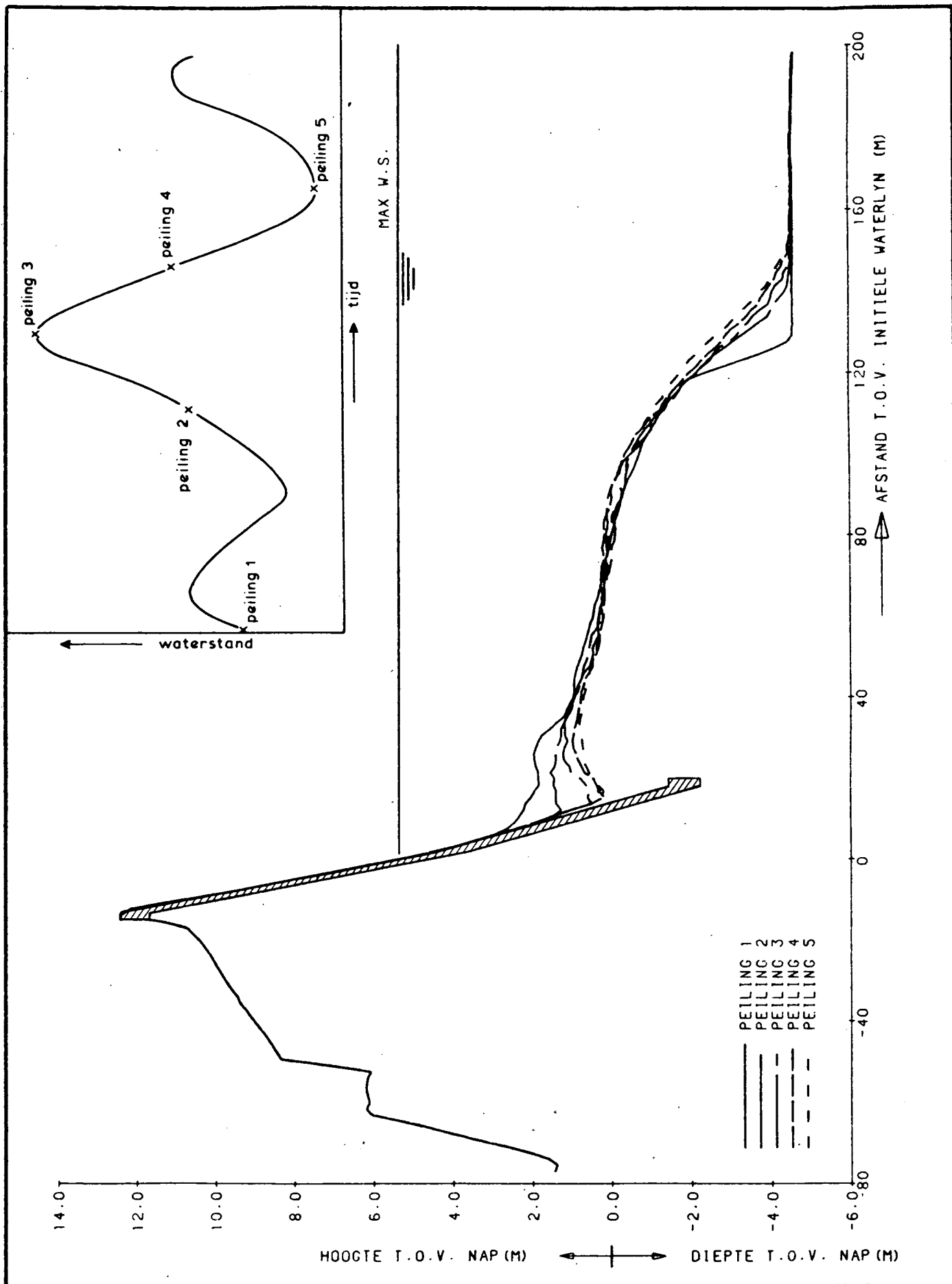
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

M 1819

FIG. 8



PROTOTYPE AFSLAGPROFIEL	T03	
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM	M 1819	FIG. 9



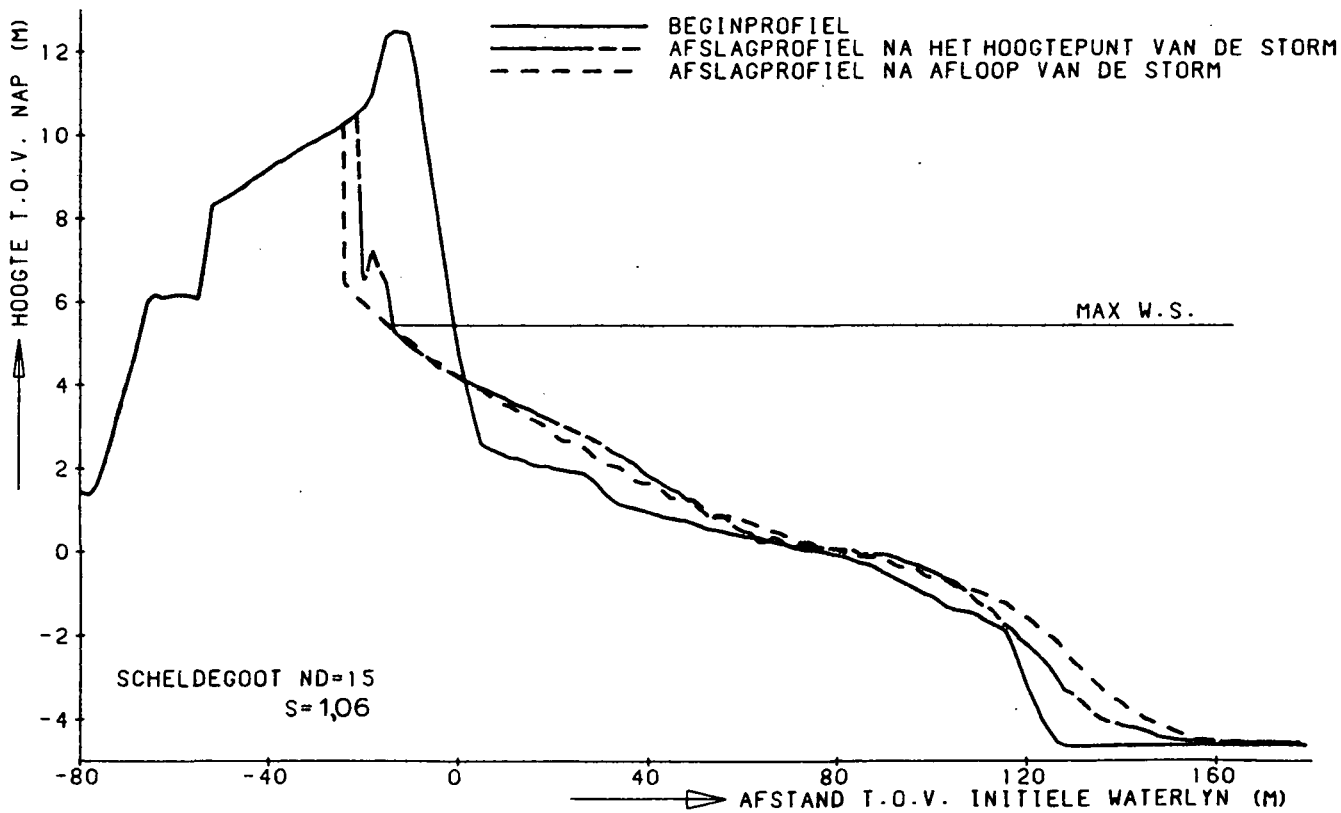
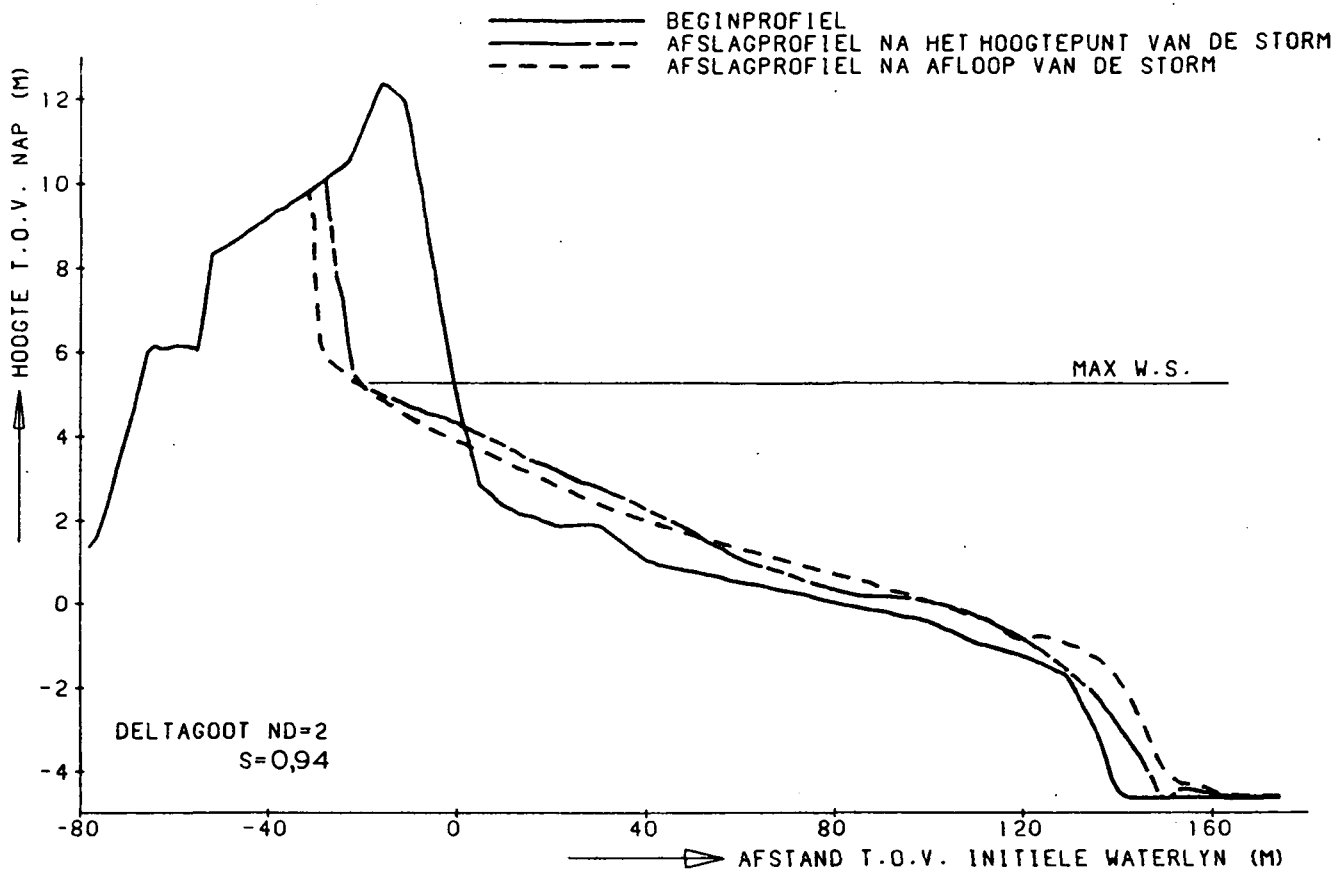
PROTOTYPE AFSLAGPROFIEL

TO4

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

M 1819

FIG. 10



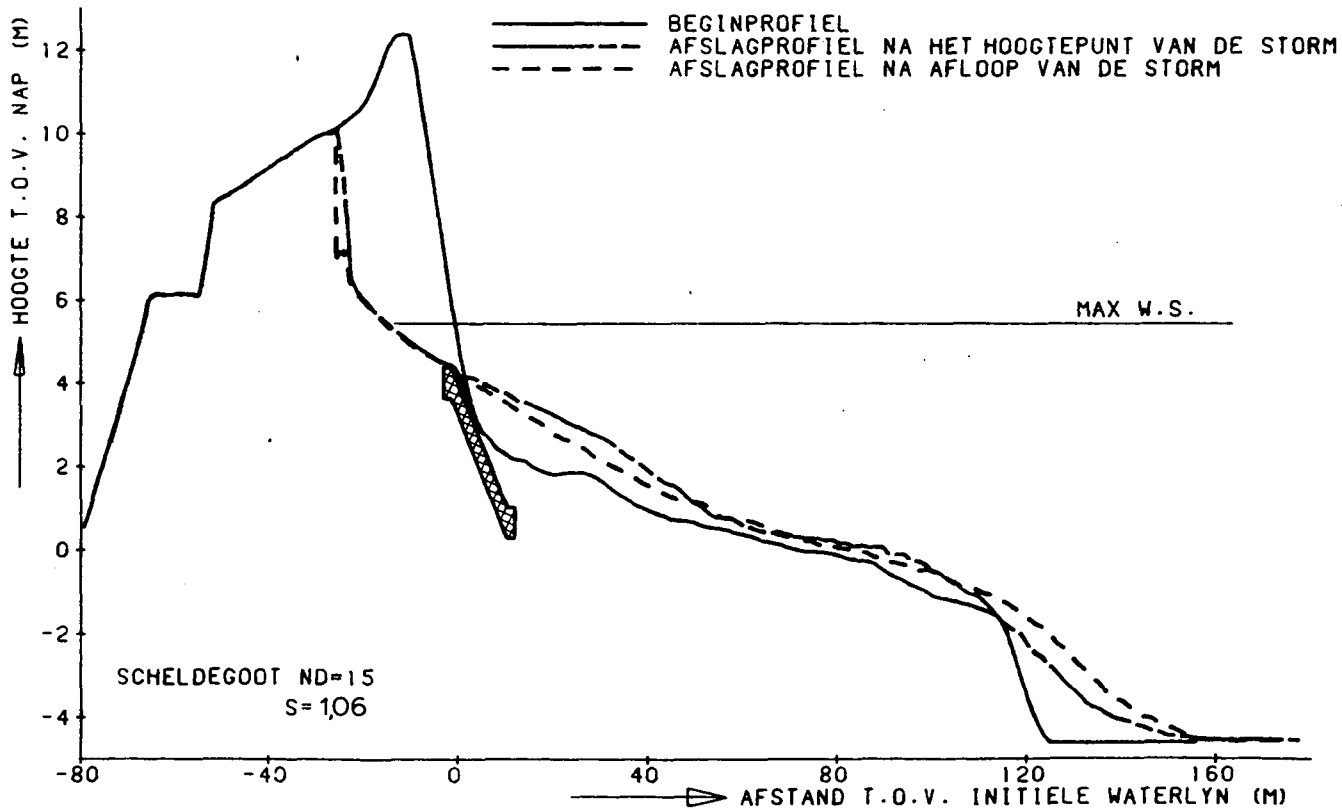
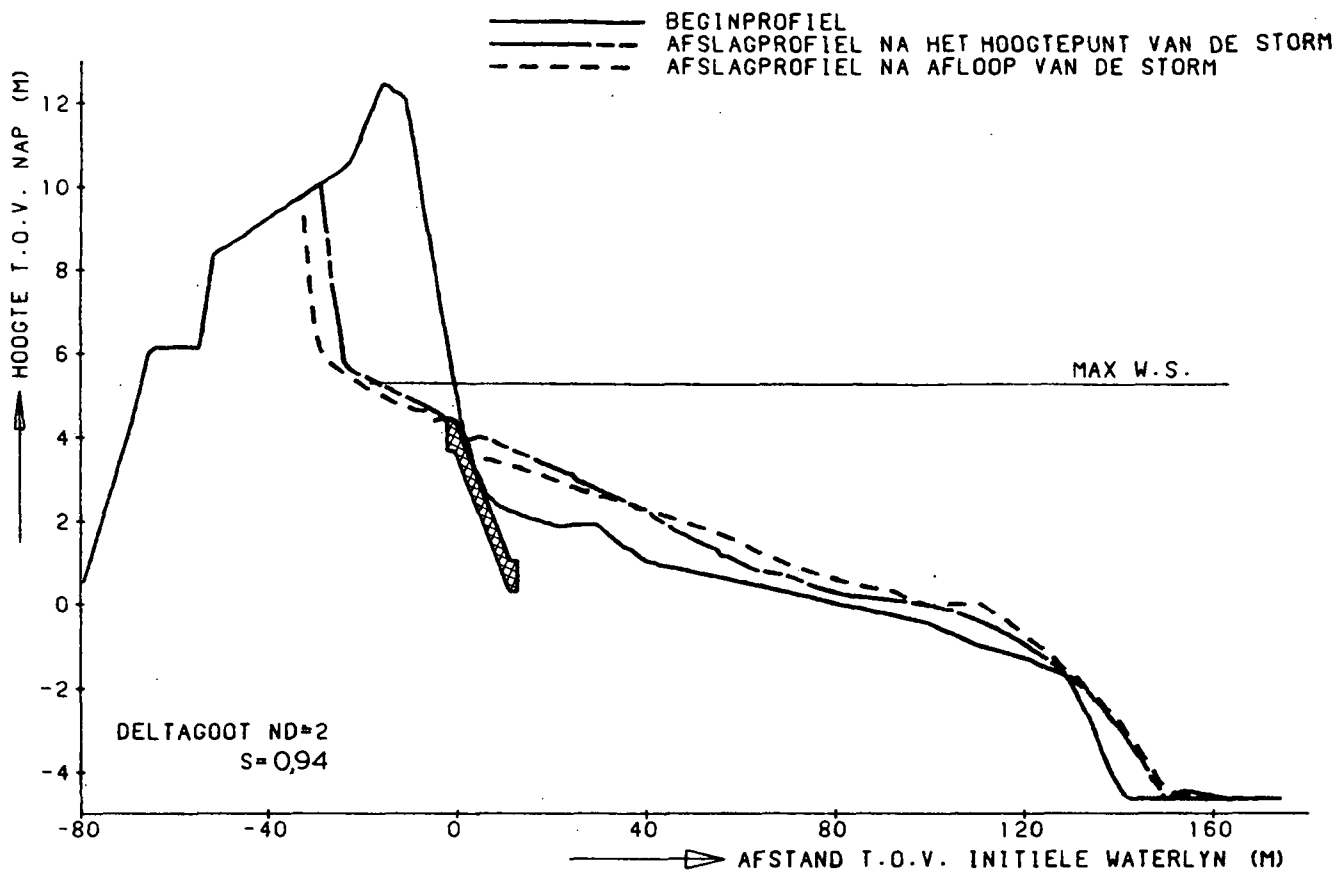
PROTOTYPE AFSLAGPROFIEL
 INVLOED SCHAALFACTOR

T01

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

M 1819

FIG. 11



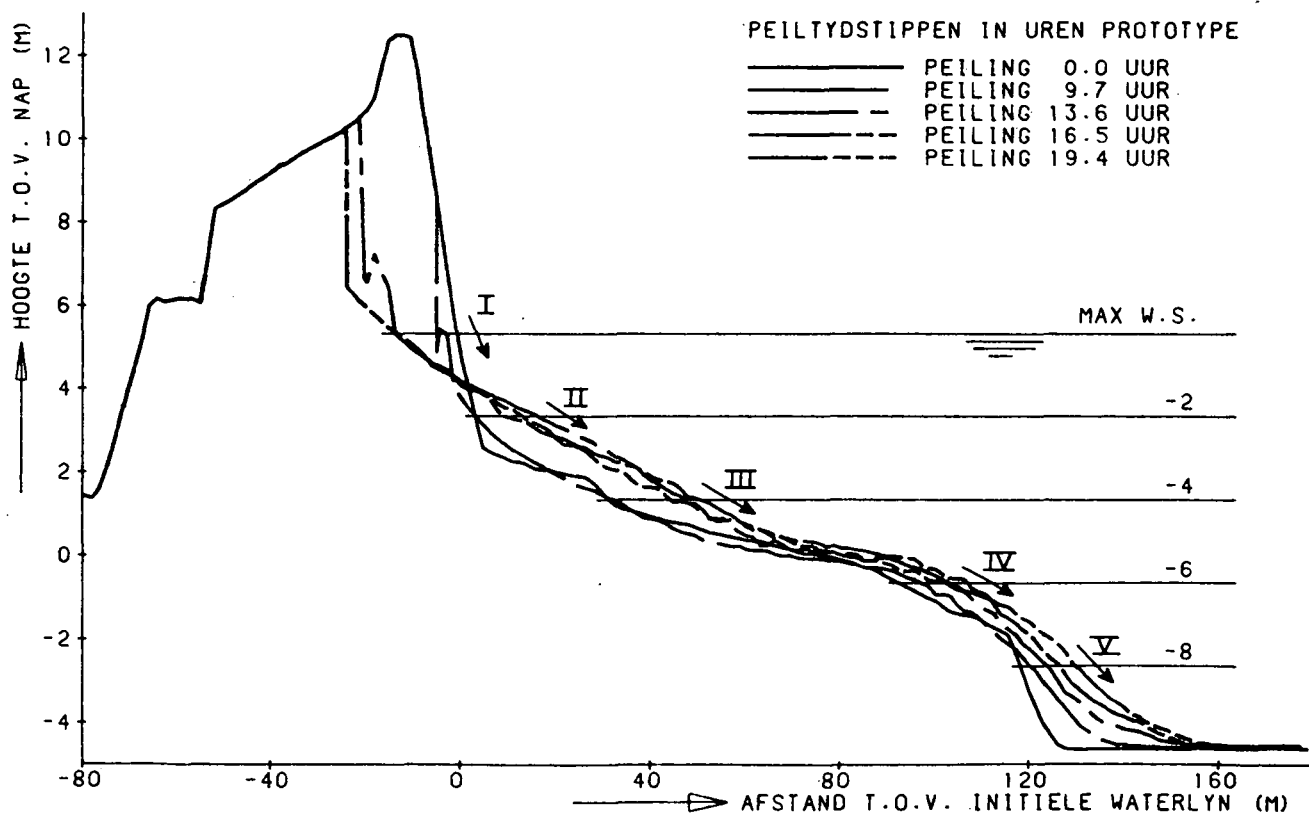
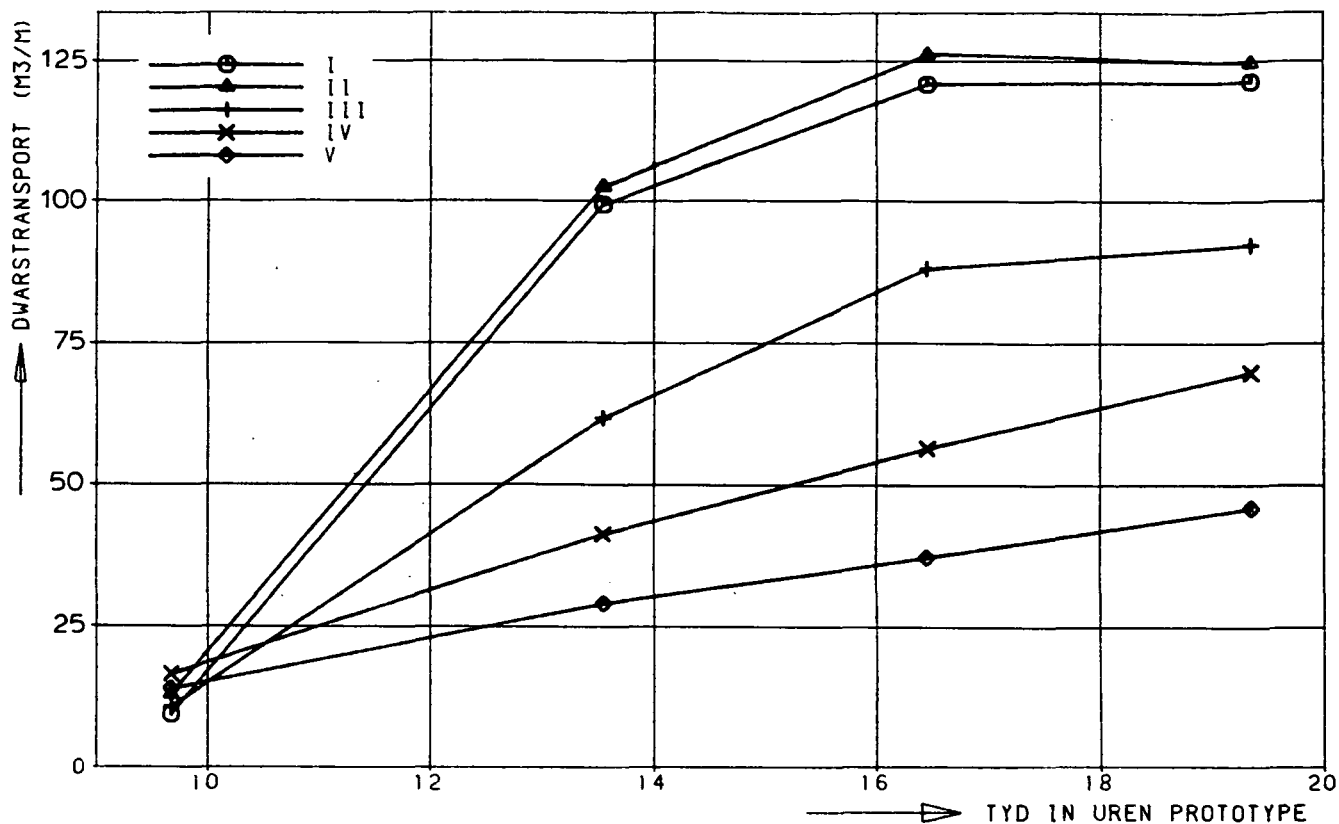
PROTOTYPE AFSLAGPROFIEL
 INVLOED SCHAALFACTOR

T02

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

M 1819

FIG. 12



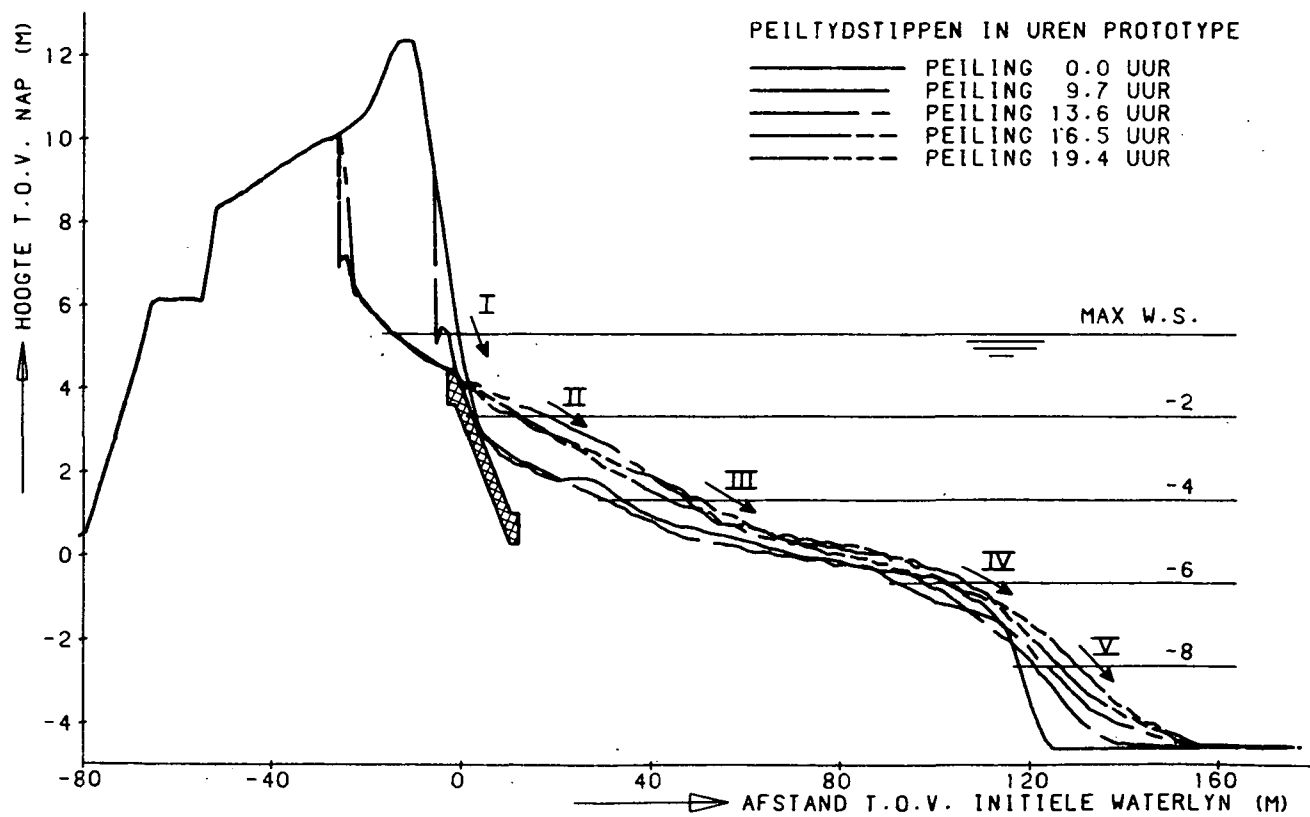
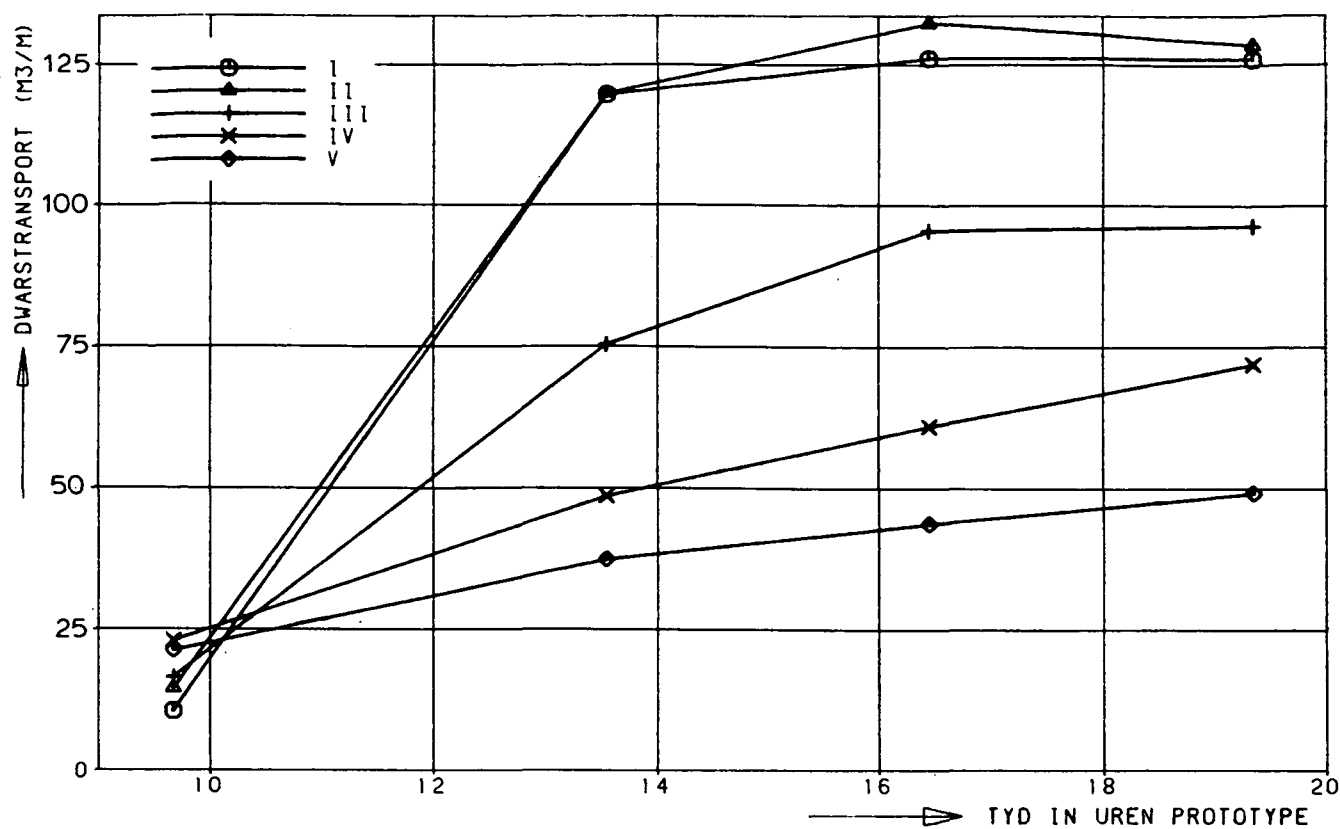
PROTOTYPE DWARSTRANSPORT

T01

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

M 1819

FIG. 13



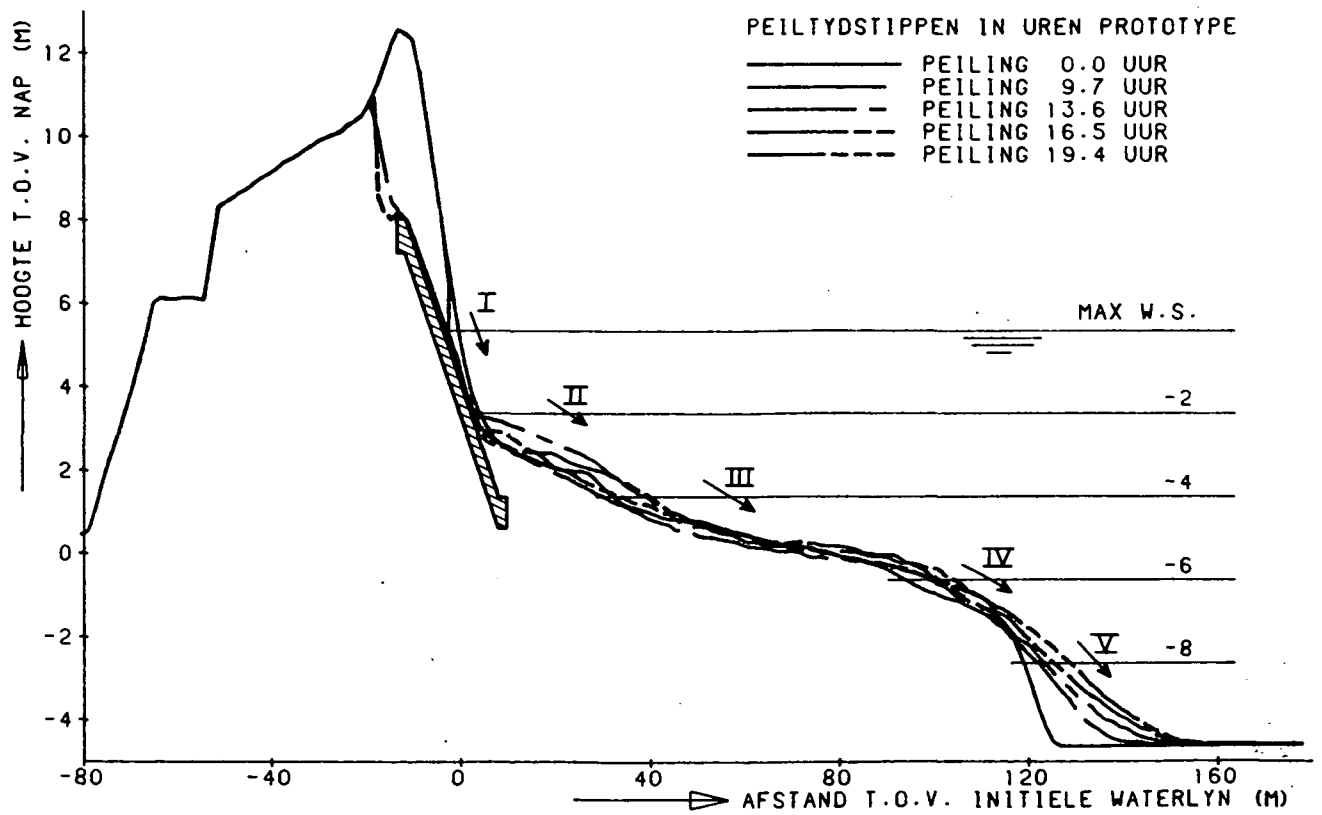
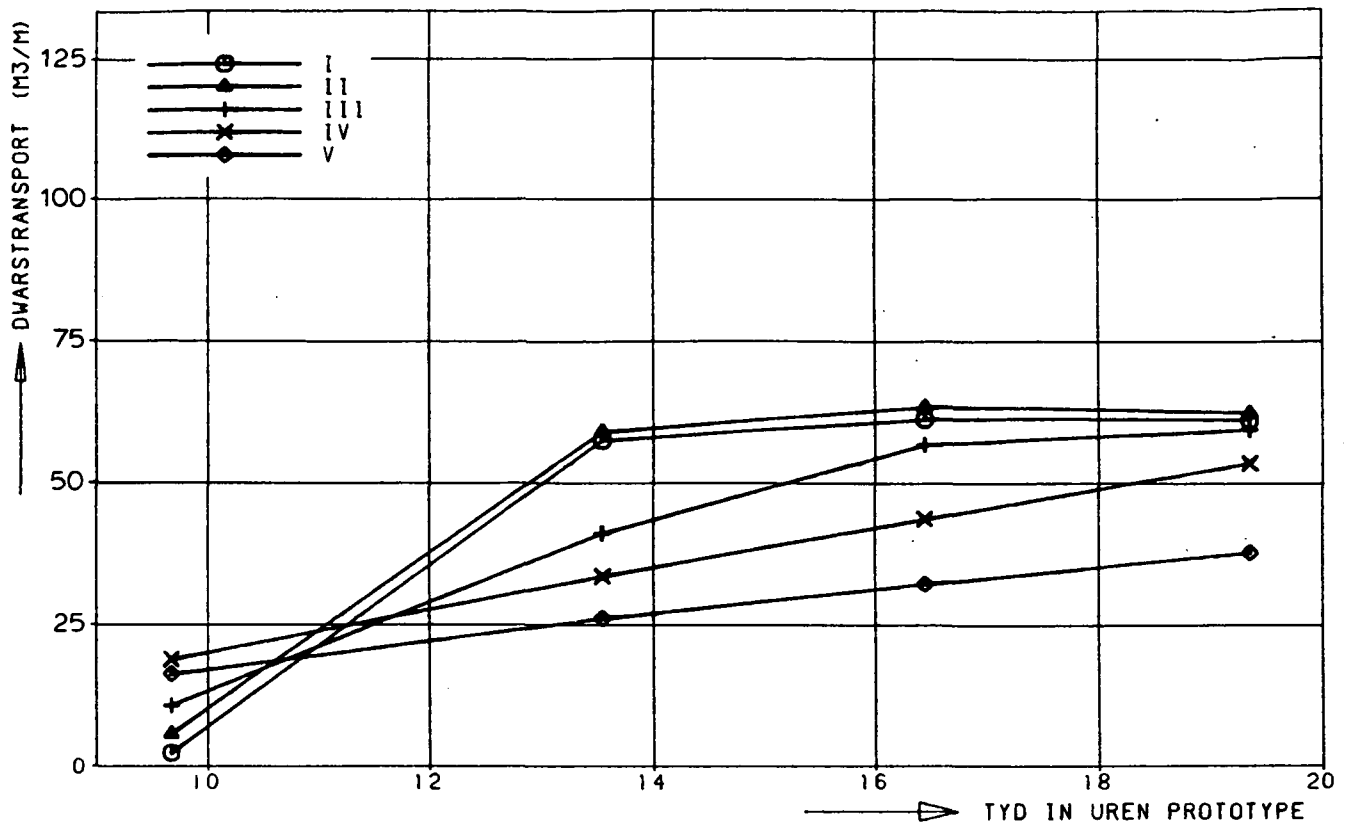
PROTOTYPE DWARSTRANSPORT

T02

WATERLOOPKUNDIG LABORORIUM

M 1819

FIG.14



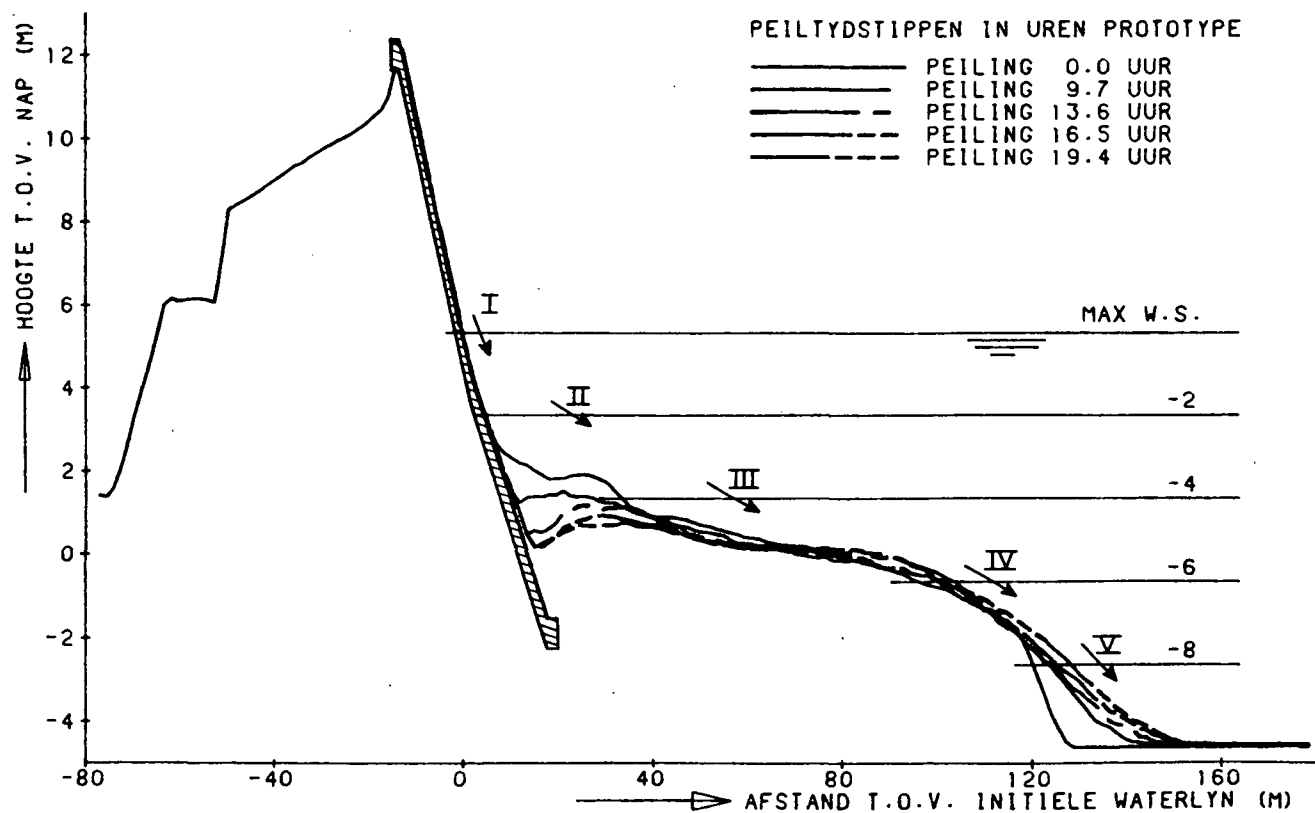
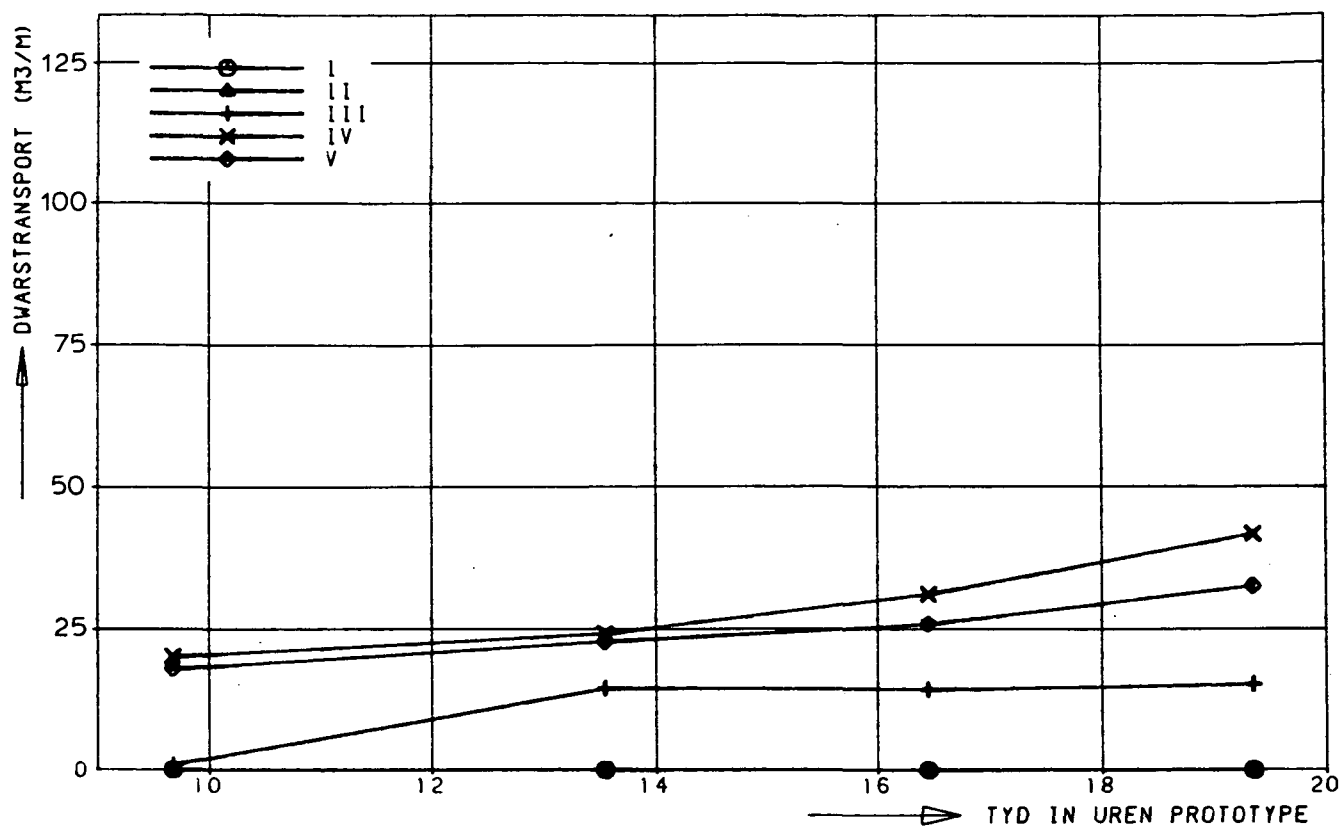
PROTOTYPE DWARSTRANSPORT

T03

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

M 1819

FIG. 15



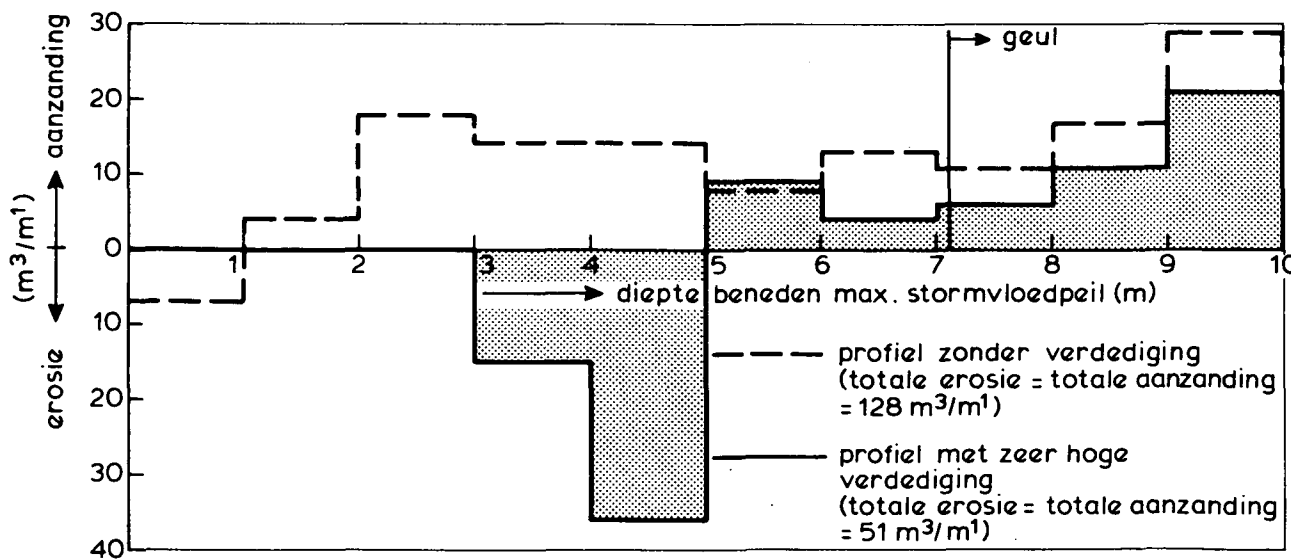
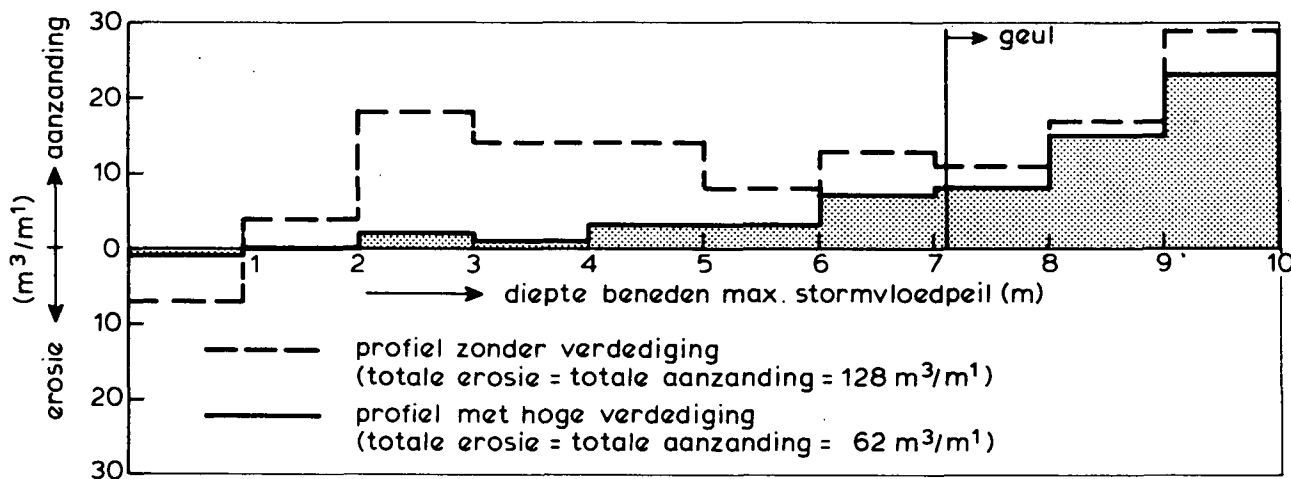
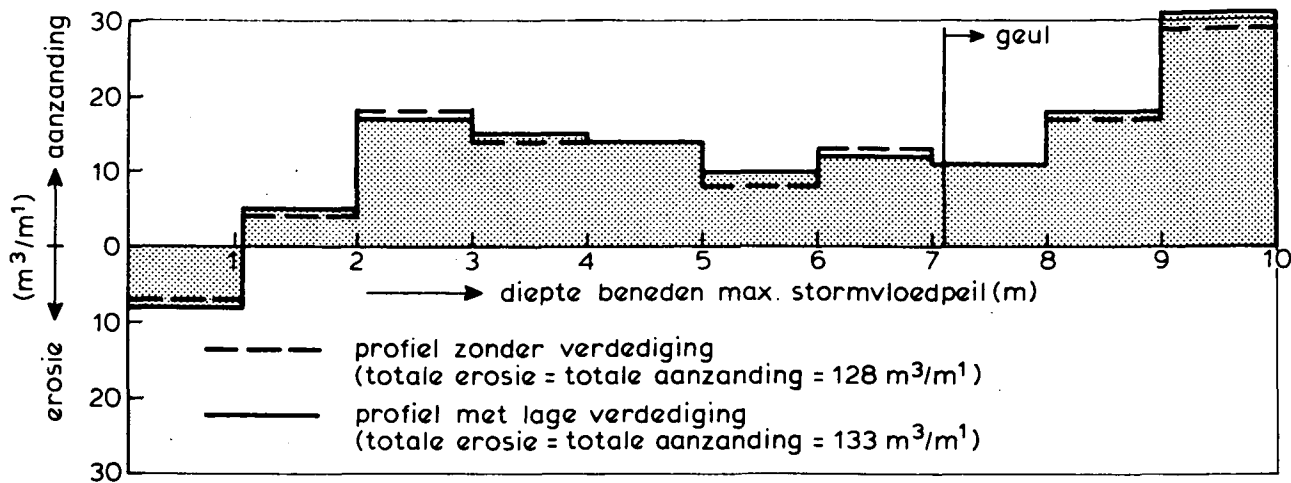
PROTOTYPE DWARSTRANSPORT

T04

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

M 1819

FIG. 16



PROTOTYPE EROSIE/AANZANDING BENEDEN MAXIMAAL
 STORMVLOEDPEIL, NA AFLOOP VAN DE STORM

TO1... TO4

p.o. box 177

2600 mh delft

the netherlands