

Oprachtgever:

Technische Adviescommissie voor de Waterkeringen;
Werkgroep C

Bresgroei

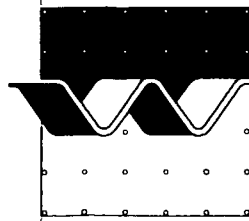
Deel II: 2DV-ontwikkeling initiële bres

Band A: Verslag onderzoek Scheldegoot

Augustus 1992

TU Delft

Technische Universiteit Delft



Bresgroei

Deel II: 2DV-ontwikkeling initële bres

H.J. Steetzel en P.J. Visser



1. Rapport nr. Deel II-A	2. Serie nr. TAW-C	3. Ontvanger catalogus nummer	
4. Titel en sub-titel Bresgroei 2 DV-ontwikkeling initiële bres Verslag onderzoek Scheldegoot		5. Datum rapport augustus 1992	
		6. Kode uitvoerende organisatie H 1242	
7. Schrijvers H.J. Steetzel en P.J. Visser		8. Nr. rapport uitvoerende organisatie H 1242, deel II, band A	
9. Naam en adres opdrachtnemer Waterloopkundig Laboratorium Voorsterweg 28, Marknesse Postbus 152, 8300 AD Emmeloord		10. Projektnaam TAWC-DIMCRIT	
		11. Kontaktnummer 3.1.0252	
12. Naam en adres opdrachtgever Rijkewaterstaat Dienst Weg- en Waterbouwkunde Postbus 5044, 2600 GA Delft		13. Type rapport Deelrapport uit serie	
		14. Kode andere opdrachtgever	
15. Opmerkingen WL-projectleider : H.J. Steetzel DWW-projectleider: A.W. Kraak			
16. Referaat In het kader van het meerjarig onderzoek naar bresgroei is in dit verslag de verticale ontwikkeling van een initiële bres herschreven aan de hand van de resultaten van een modelonderzoek. The vertical development of an initial breach in a dune or dyke is described in this report based on a model investigation.			
17. Trefwoorden Bresgroei, doorbraak, inundatie		18. Distributie systeem	
19. Classificatie Vrij toegankelijk	20. Classificatie deze pagina	21. Aantal blz:	22. Prijs

Inhoud

Lijst van figuren

Lijst van symbolen

1	Inleiding	1-1
	1.1 Achtergrond en doel	1-1
	1.2 Aanpak	1-1
	1.3 Opdracht	1-1
	1.4 Overzicht rapportage/onderzoek	1-2
	1.5 Opzet rapport	1-2
2	Proevenprogramma	2-1
	2.1 Inleiding	2-1
	2.2 Achtergronden onderzochte aspecten	2-1
	2.3 Overzicht proeven	2-2
3	Opzet van de proeven	3-1
	3.1 Inrichting van de goot	3-1
	3.2 Te beproeven profielen	3-2
	3.3 Te verrichten metingen	3-3
	3.3.1 Overzicht	3-3
	3.3.2 Profielontwikkeling	3-4
	3.3.3 Lokale (raai)-metingen	3-4
	3.3.4 Ondersteunende metingen	3-4
	3.4 Meetlokaties en instrumentatie	3-5
	3.5 Werkwijze per proef	3-7
4	Vorbereidende berekeningen	4-1
	4.1 Inleiding	4-1
	4.2 Schematisatie	4-1
	4.3 Fase I: Versteiling van het binnentalud	4-2
	4.4 Fase II: Versmalling van de kruin	4-3
	4.5 Fase III: Verlaging van de kruin	4-4
	4.6 Conclusies	4-7
5	Beschrijving resultaten	5-1
	5.1 Inleiding	5-1
	5.2 Korte toelichting per proef	5-1
	5.3 Profielontwikkeling	5-3
	5.4 Waterstanden	5-5
	5.5 Snelheden	5-5
	5.6 Pakkingsdichtheid	5-6
	5.7 Zeefanalyse	5-8
	5.8 Watertemperatuur	5-8
	5.9 Valsnelheid	5-8

Inhoud (vervolg)

6	Analyse resultaten	6-1
6.1	Inleiding	6-1
6.2	Waterstanden	6-1
6.3	Snelheden	6-2
6.4	Debieten	6-4
6.5	Fase I: Versteiling van het binnentalud	6-5
6.6	Fase (I en) II: Versmalling van de kruin	6-7
6.7	Fase III: Verlaging van de kruin	6-8
6.8	Optredend transportverloop	6-9
7	Conclusies m.b.t. onderzochte aspecten	7-1
7.1	Inleiding	7-1
7.2	Reproduceerbaarheid	7-1
7.3	Invloed voorlandhelling	7-2
7.4	Invloed golfaanval	7-3
7.5	Invloed korreldiameter	7-4
7.6	Invloed pakkingsdichtheid	7-5
8	Conclusies en aanbevelingen	8-1
8.1	Samenvatting conclusies onderzoek	8-1
8.2	Aanbevelingen m.b.t. mathematisch model	8-1

Literatuur

Lijst van figuren

- 3.1 Inrichting Scheldegoot; bovenaanzicht en langsdoorsnede.
- 3.2 Overzicht dwarsprofielen; posities meetraaien.

- 4.1 Schematische weergave erosieproces; overzicht erosiefasen.
- 4.2 Voorspelling ontwikkeling kruinniveau, waterstand en debiet; P1/T1, anal. opl.
- 4.3 Voorspelling ontwikkeling kruinniveau, waterstand en debiet; P1/T1, math. opl.
- 4.4 Voorspelling ontwikkeling kruinniveau, waterstand en debiet; P2/T2, math. opl.
- 4.5 Voorspelling ontwikkeling kruinniveau, waterstand en debiet; P3/T3, math. opl.

- 5.3.01 Ontwikkeling dwarsprofiel; overzicht momentane profielen, proef T0
- 5.3.02 Ontwikkeling dwarsprofiel; overzicht momentane profielen, proef T1
- 5.3.03 Ontwikkeling dwarsprofiel; overzicht momentane profielen, proef T2
- 5.3.04 Ontwikkeling dwarsprofiel; overzicht momentane profielen, proef T3
- 5.3.05 Ontwikkeling dwarsprofiel; overzicht momentane profielen, proef T4
- 5.3.06 Ontwikkeling dwarsprofiel; overzicht momentane profielen, proef T5
- 5.3.07 Ontwikkeling dwarsprofiel; overzicht momentane profielen, proef T5A
- 5.3.08 Ontwikkeling dwarsprofiel; overzicht momentane profielen, proef T6
- 5.3.09 Ontwikkeling dwarsprofiel; overzicht momentane profielen, proef T7
- 5.4.01 Gemeten waterstandsverloop; aanstroomraaien A t/m D, proef T0
- 5.4.02 Gemeten waterstandsverloop; afstroomraaien F en G, proef T0
- 5.4.03 Gemeten waterstandsverloop; aanstroomraaien A t/m D, proef T1
- 5.4.04 Gemeten waterstandsverloop; afstroomraaien F en G, proef T1
- 5.4.05 Gemeten waterstandsverloop; aanstroomraaien A t/m D, proef T2
- 5.4.06 Gemeten waterstandsverloop; afstroomraaien F en G, proef T2
- 5.4.07 Gemeten waterstandsverloop; aanstroomraaien A t/m D, proef T3
- 5.4.08 Gemeten waterstandsverloop; afstroomraaien F en G, proef T3
- 5.4.09 Gemeten waterstandsverloop; aanstroomraaien A t/m D, proef T4
- 5.4.10 Gemeten waterstandsverloop; afstroomraaien F en G, proef T4
- 5.4.11 Gemeten waterstandsverloop; aanstroomraaien A t/m D, proef T5
- 5.4.12 Gemeten waterstandsverloop; afstroomraaien F en G, proef T5
- 5.4.13 Gemeten waterstandsverloop; aanstroomraaien A t/m D, proef T5A
- 5.4.14 Gemeten waterstandsverloop; afstroomraaien F en G, proef T5A
- 5.4.15 Gemeten waterstandsverloop; aanstroomraaien A t/m D, proef T6
- 5.4.16 Gemeten waterstandsverloop; afstroomraaien F en G, proef T6
- 5.4.17 Gemeten waterstandsverloop; aanstroomraaien A t/m D, proef T7
- 5.4.18 Gemeten waterstandsverloop; afstroomraaien F en G, proef T7
- 5.4.19 Detail gemeten waterstandsverloop; na 1 minuut ($60 < t < 135$ s), proef T4
- 5.4.20 Detail gemeten waterstandsverloop; na 10 minuten ($600 < t < 675$ s), proef T4
- 5.5.01 Gemeten snelheidsverloop; aanstroomraaien A en B, proef T1
- 5.5.02 Gemeten snelheidsverloop; aanstroomraaien C en D, proef T1
- 5.5.03 Gemeten snelheidsverloop; aanstroomraaien A en B, proef T2
- 5.5.04 Gemeten snelheidsverloop; aanstroomraaien C en D, proef T2
- 5.5.05 Gemeten snelheidsverloop; aanstroomraaien A en B, proef T3
- 5.5.06 Gemeten snelheidsverloop; aanstroomraaien C en D, proef T3
- 5.5.07 Gemeten snelheidsverloop; aanstroomraaien A en B, proef T4

Lijst van figuren (vervolg)

- 5.5.08 Gemeten snelheidsverloop; aanstroomraaien C en D, proef T4
- 5.5.09 Gemeten snelheidsverloop; aanstroomraaien A en B, proef T5
- 5.5.10 Gemeten snelheidsverloop; aanstroomraaien C en D, proef T5
- 5.5.11 Gemeten snelheidsverloop; aanstroomraaien A en B, proef T5A
- 5.5.12 Gemeten snelheidsverloop; aanstroomraaien C en D, proef T5A
- 5.5.13 Gemeten snelheidsverloop; aanstroomraaien A en B, proef T6
- 5.5.14 Gemeten snelheidsverloop; aanstroomraaien C en D, proef T6
- 5.5.15 Gemeten snelheidsverloop; aanstroomraaien A en B, proef T7
- 5.5.16 Gemeten snelheidsverloop; aanstroomraaien C en D, proef T7

- 6.2.01 Ontwikkeling waterstand; aanstroomraaien A t/m D, proef T0
- 6.2.02 Ontwikkeling waterstand; aanstroomraaien A t/m D, proef T1
- 6.2.03 Ontwikkeling waterstand; aanstroomraaien A t/m D, proef T2
- 6.2.04 Ontwikkeling waterstand; aanstroomraaien A t/m D, proef T3
- 6.2.05 Ontwikkeling waterstand; aanstroomraaien A t/m D, proef T4
- 6.2.06 Ontwikkeling waterstand; aanstroomraaien A t/m D, proef T5
- 6.2.07 Ontwikkeling waterstand; aanstroomraaien A t/m D, proef T5A
- 6.2.08 Ontwikkeling waterstand; aanstroomraaien A t/m D, proef T6
- 6.2.09 Ontwikkeling waterstand; aanstroomraaien A t/m D, proef T7
- 6.2.10 Significante golfhoogte; vergelijking metingen en (eerste) berekeningen, proef T4
- 6.3.01 Analyse dieptegemiddelde snelheid; diverse gemeten en berekende signalen, proef T5A, raai A
- 6.3.02 Relaties dieptegemiddelde snelheid; gemeten en diverse berekende waarden, proef T5A, raai A
- 6.3.03 Ontwikkeling dieptegemiddelde snelheid; momentane en gefilterde waarden, proef T5A, raai A
- 6.4.01 Voorbeeld berekend debiet aanstroomraai; momentane en gefilterde waarden, proef T5A, raai A
- 6.4.02 Overzicht ontwikkeling aanstroomdebiet; aanstroomraaien A t/m D, proef T1
- 6.4.03 Overzicht ontwikkeling aanstroomdebiet; aanstroomraaien A t/m D, proef T2
- 6.4.04 Overzicht ontwikkeling aanstroomdebiet; aanstroomraaien A t/m D, proef T3
- 6.4.05 Overzicht ontwikkeling aanstroomdebiet; aanstroomraaien A t/m D, proef T4
- 6.4.06 Overzicht ontwikkeling aanstroomdebiet; aanstroomraaien A t/m D, proef T5
- 6.4.07 Overzicht ontwikkeling aanstroomdebiet; aanstroomraaien A t/m D, proef T5A
- 6.4.08 Overzicht ontwikkeling aanstroomdebiet; aanstroomraaien A t/m D, proef T6
- 6.4.09 Overzicht ontwikkeling aanstroomdebiet; aanstroomraaien A t/m D, proef T7
- 6.6.01 Ontwikkeling kruinlengte; overzicht voor alle proeven
- 6.7.01 Ontwikkeling kruinniveau ($t < 400$ s); overzicht voor alle proeven
- 6.7.02 Ontwikkeling kruinniveau ($t < 800$ s); overzicht voor alle proeven
- 6.8.01 Ontwikkeling aanwezig kruinvolume; tijdsfuncties voor vijf niveaus, proef T5A
- 6.8.02 Ontwikkeling sedimenttransport; tijdsfuncties voor vijf niveaus, proef T5A
- 6.8.03 Transportverloop over binnentalud; evenwichtstalud, $t-t_0 = 100$ s, proef T5A

Lijst van figuren (vervolg)

- 7.2.01 Reproduceerbaarheid erosieproces; vergelijking dwarsprofielen, proef T5 en T5A
- 7.2.02 Reproduceerbaarheid erosieproces; vergelijking ontw. kruinniveau, proef T5 en T5A
- 7.2.03 Reproduceerbaarheid erosieproces; vergelijking ontw. kruinvolume, proef T5 en T5A
- 7.3.01 Invloed voorlandhelling; vergelijking ontw. kruinlengte, proef T1/2/3/5/6
- 7.3.02 Invloed voorlandhelling; vergelijking ontw. kruinniveau, proef T1/2/3/5/6
- 7.3.03 Invloed voorlandhelling; vergelijking snelheid kruindaling, proef T1/2/3/5/6
- 7.3.04 Invloed voorlandhelling; vergelijking ontw. kruinvolume, proef T1/2/3/5/6
- 7.3.05 Invloed voorlandhelling; vergelijking ontw. transport, proef T1/2/3/5/6
- 7.3.06 Invloed voorlandhelling; vergelijking snelheid kruindaling, proef T1/2/3/5/6
- 7.4.01 Invloed golfaanval; vergelijking dwarsprofielen, proef T3 en T4
- 7.4.02 Invloed golfaanval; vergelijking ontw. kruinniveau, proef T3 en T4
- 7.4.03 Invloed golfaanval; vergelijking ontw. kruinvolume, proef T3 en T4
- 7.5.01 Invloed korreldiameter; vergelijking dijk-dwarsprofielen, proef T1 en T5
- 7.5.02 Invloed korreldiameter; vergelijking duin-dwarsprofielen, proef T3 en T6
- 7.5.03 Invloed korreldiameter; vergelijking ontw. kruinlengte, proef T1/3 en T5/6
- 7.5.04 Invloed korreldiameter; vergelijking ontw. kruinniveau, proef T1/3 en T5/6
- 7.5.05 Invloed korreldiameter; vergelijking ontw. kruinvolume, proef T1/3 en T5/6
- 7.5.06 Invloed korreldiameter; vergelijking ontw. transport, proef T1/3 en T5/6
- 7.6.01 Invloed pakkingsdichtheid; vergelijking dwarsprofielen, proef T5 en T7
- 7.6.02 Invloed pakkingsdichtheid; vergelijking ontw. kruinlengte, proef T5 en T7
- 7.6.03 Invloed pakkingsdichtheid; vergelijking ontw. kruinniveau, proef T5 en T7
- 7.6.04 Invloed pakkingsdichtheid; vergelijking ontw. kruinvolume, proef T5 en T7

Lijst van symbolen

A_0	Buitenoppervlakte	m^2
A_1	Binnenoppervlakte	m^2
B_c	Kruinbreedte (= gootbreedte evenwijdig aan kruin-as)	m
C	Chézy-coëfficiënt	$m^{1/2}/s$
d	Waterdiepte	m
d_c	Waterdiepte t.p.v. kruin	m
g	Gravatieversnelling	m/s^2
h	Waterstand	m t.o.v. Ref.
h_{gp}	Hoogte grensprofiel (t.o.v. stormvloedpeil)	m
H_c	Overhoogte (= $H_0 - Z_c$)	m
H_{sig}	Significante golfhoogte	m
H_0	Buitenwaterstand	m t.o.v. Ref.
H_1	Binnenwaterstand	m t.o.v. Ref.
k_0	Erosiecoëfficiënt binnentalud	-
k_1	Erosiecoëfficiënt kruin	-
k_2	Erosiecoëfficiënt buitentalud	-
L_c	Lengte van de kruin	m
L_t	Lengte aan de teen t.b.v. versteiling binnentalud	m
m_0	Afvoercoëfficiënt ($0,8 < m < 1,35$)	-
p	Porositeit	%
t	Tijd	s
t_c	Einde kruinverlaging tijdens proef; einde volkomen overlaat	s
t_0	Tijdstip aanvang overstroming	s
t_1	Tijdstip einde versteiling binnentalud (fase I); start versmalling kruin (fase II)	s
t_2	Tijdstip einde versmalling kruin (fase II); start verlaging kruin (fase III)	s
t_3	Einde verlaging kruin (fase III);	
t	Tijdstip waarop $Z_c = +0,45$ m	s
T_p	Piekperiode inkomende golf	s
q_c	Debiet over de kruin per eenheid van breedte	$m^3/m^1/s$
Q_c	Debiet over de kruin	m^3/s
Q_r	Retourdebiet	m^3/s
$Q_{r,max}$	Maximaal retourdebiet (= pompcapaciteit)	m^3/s
z	Bodemniveau	m t.o.v. Ref.
Z_c	Kruinniveau (maximaal)	m t.o.v. Ref.
α	Taludhelling buitentalud	°
β	Taludhelling binnentalud	°
β_0	Taludhelling binnentalud op $t = t_0$	°
β_1	Kritieke helling binnentalud	°
δ	Relatieve dichtheid (= 1,65)	-
ρ	Soortelijke dichtheid zandmonster	kg/m^3
ρ_k	Idem, korrelmateriaal	kg/m^3

1 Inleiding

1.1 Achtergrond en doel

Op termijn zal de veiligheid van waterkeringen moeten worden getoetst aan een maatschappelijk aanvaardbare risiconorm met betrekking tot de (gedeeltelijke) inundatie van het gebied binnen een dijkkring. Hiervoor dient een relatie te worden gelegd tussen het dwarsprofiel van de waterkering en de schadeverwachting. De mate van inundatie wordt hierbij o.a. bepaald door de groei van het stroomgat.

Het voorliggende onderzoek dient om de kennis omtrent deze stroomgatontwikkeling te vergroten om uiteindelijk te komen tot een methode voor de berekening van dit inundatie-debiet voor een gegeven bedreiging en waterkering.

1.2 Aanpak

De methode zal bestaan uit een theoretisch model voor bresgroei en inundatie. Bresgroei (en inundatie) is een uitermate complex 3-dimensionaal proces. In eerste instantie is dan ook de situatie met een volledige overstroming van een zandlichaam nader bekeken. Dit is gebeurd aan de hand van de ontwikkeling van een *mathematisch model*, ondersteund door een flankerend *fysisch modelonderzoek*.

Het modelonderzoek heeft hierbij tot doel het inzicht in het erosieproces, het sedimenttransport en het bresdebiet dat optreedt tijdens de overstroming van een waterkering te vergroten. Analyse van de modelresultaten vormt de basis voor de ontwikkeling en verbetering van het genoemde mathematische model.

1.3 Opdracht

Op verzoek van Werkgroep C (Zandige Kusten) van de Technische Adviescommissie voor de Waterkeringen (TAW-C) heeft het Waterloopkundig Laboratorium een offerte uitgebracht met kenmerk HK5682/H1242/HJS/ma, dd. 5 juli 1991, welke zowel de ontwikkeling van het mathematisch model (project H1242, deel II), als het ondersteunende fysische onderzoek (project H1242, deel I) omvatte. Middels brief WB/BXF-913609, d.d. 16 augustus 1991, werd (onder verplichtingennummer 3.1.0252) opdracht verleend voor de uitvoering van dit onderzoek.

Het voorliggende rapport beschrijft de opzet en resultaten van laatstgenoemde modelonderzoek. Dit modelonderzoek is uitgevoerd in de Scheldegoot van het Waterloopkundig Laboratorium "de Voorst", in de periode 9 september t/m 8 oktober 1991.

Vanuit werkgroep C werd het onderzoek begeleid door de BegeleidingsGroep BresGroei (BG)², waarin zitting hadden: Ir. W.Th.J.N.P. Bakker (DGW), dr.ir. J. van de Graaff (TUD), ir. A. Kraak (DWW) en ir. P.J. Visser (TUD). Laatstgenoemde was bovendien intensief betrokken bij de opzet en uitvoering van de proeven, alsmede bij de analyse van de proef-

resultaten. Het onderzoek werd uitgevoerd door E.J. Ehrlich en H. Westhuis en stond onder leiding van ir. H.J. Steetzel, die tevens verantwoordelijk is voor deze verslaggeving.

1.4 Overzicht rapportage/onderzoek

Omwille van de overzichtelijkheid is hier een overzicht gegeven van het uitgevoerde en geplande bresgroei-onderzoek, alsmede van de daarmee samenhangende rapportage.

Alle bresgroei-onderzoek is samengebracht in (WL-)project H1242. Onder dit projectnummer zijn een aantal deelprojecten te onderscheiden (vooralsnog I t/m III). Verder is de rapportage per deelproject soms ondergebracht in twee banden. Band A vormt daarbij het hoofdrapport, terwijl in band B een nadere uitwerking is gegeven van een bepaald aspect van het onderzoek.

- Deel I Mathematisch model
 - band A Opzet en eerste resultaten
 - band B Overzicht transportformuleringen

- Deel II 2DV-ontwikkeling initiële bres
 - band A Verslag onderzoek Scheldegoot
 - band B Analytisch model

- Deel III 2DH/3D-ontwikkeling initiële bres
 - band A Verslag onderzoek Scheldebak
 - band B Aanpassing/uitbreiding mathematisch model

- Deel IV ...

In deel I-B als II-B zijn de bijdragen van de Technische Universiteit Delft gebundeld en is ir. P.J. Visser (TUD) de (eerste) auteur.

Het hier reeds genoemde 2DH/3D-onderzoek in de Scheldebak (Deel III) staat gepland voor het najaar van 1992.

Een nadere invulling van deel IV zal mede plaatsvinden op basis van de resultaten van het 2DH/3D-onderzoek.

1.5 Opzet rapport

In Hoofdstuk 2 is de motivering van de verschillende proeven gegeven, waarna in Hoofdstuk 3 de opzet van de proeven, voor wat betreft gootinrichting, meetlokaties, etc. aan de orde komt.

In Hoofdstuk 4 is getracht aan de hand van voorbereidende berekeningen met het zogenaamde PAC-model [Visser, 1986,1990 en Visser en Steetzel 1992] de dwarsprofielontwikkelingen te voorspellen. Een beschrijving van dit model is gegeven in band B van dit deel. Het doel hiervan is tweeledig, te weten het optimaliseren van de meetopstelling, alsmede natuurlijk de toetsing van dit model aan de meetresultaten.

In Hoofdstuk 5 is een beschrijving gegeven van de meetresultaten, waarvan vervolgens in Hoofdstuk 6 een nadere analyse is gegeven.

In Hoofdstuk 7 zijn de conclusies m.b.t. de onderzochte aspecten samengevat.

Hoofdstuk 8 vat de voornaamste conclusies met betrekking tot de modelvorming samen en vormt daarmee een 'opstap' naar deel I van dit rapport: het mathematisch model.

Voor de beschrijving van het in Hoofdstuk 1.2 en 8 genoemde mathematische model moet worden verwezen naar deel I van dit rapport.

2 Proevenprogramma

2.1 Inleiding

Zelfs bij een twee-dimensionale (2DV) overstroming van een waterkering spelen talrijke aspecten een rol. In dit modelonderzoek komt slechts een beperkt aantal specifieke parameters aan de orde, te weten:

- de helling van de vooroever;
- de invloed van golfaanval;
- de invloed van de korreldiameter.

Later is nog toegevoegd:

- de invloed van de pakking.

Een nadere toelichting is gegeven in Hoofdstuk 2.2.

2.2 Achtergronden onderzochte aspecten

Helling van de vooroever

De invloed van de vooroeverhelling zal worden onderzocht door profielen met verschillende hellingen in de goot in te bouwen, variërend van een dijkprofiel tot een duinafslagprofiel. De achterliggende gedachte hierbij is dat de kruinverlaging minder snel gaat naarmate deze helling minder steil is.

Er zijn een aantal redenen:

- Eenzelfde transportvolume (in m^3/m^1) zal bij een flauwer talud resulteren in een relatief kleinere kruinverlaging;
- Bij eenzelfde verval (energieniveau op diep water - kruinniveau) zal als gevolg van bodemwrijving het debiet, en dus het transport, minder zijn;
- De transportgradiënt over de kruin (van kruin tot teen aan de achterzijde) is minder omdat er al mogelijk initieel transport (t.p.v. de kruin) aanwezig zal zijn.

Een proef met een relatief flauwer talud duurt dus langer en zal waarschijnlijk ook een ander profielveranderingspatroon te zien geven.

Invloed van golfaanval

De invloed van golfaanval op het erosieproces wordt bepaald door een vergelijking te maken van een proef zonder en met golfaanval.

Over het relatieve effect bestaan verschillende gedachten, m.a.w. het kan verschillend uitpakken, d.w.z. zowel vertragend als versnellend. Genoemd kunnen worden:

- Verhoging van de gemiddelde waterstand door golfopzet;
- Invloed van langperiodieke waterstandsfluctuaties (surfbeat, golfgroepen): t.o.v. de situatie zonder golfaanval nu een meer discontinuë erosieproces (afwisselend relatief weinig en veel (overslag)-debiet);
- Extra sedimentopwoeling door golfwerking.

Invloed van korreldiameter

Door het uitvoeren van vergelijkende proeven met twee zandsorten: Asserzand ($D_{50} \approx 100 \mu\text{m}$) en Duinzand ($D_{50} \approx 225 \mu\text{m}$) wordt de invloed van de korreldiameter op het erosieproces vastgesteld. Dit gebeurt door herhaling van (twee) proeven met verschillende voorlandhellingen.

De korreldiameter heeft hoe dan ook invloed op het transport, zowel qua grootte als qua opbouw (bodem- vs. suspensietransport) en zal dus tot uitdrukking komen in de ontwikkeling van het dwarsprofiel.

Invloed van pakking

Door het uitvoeren van een extra proef met afwijkende pakking wordt de invloed van de pakking op het erosieproces vastgesteld. Dit gebeurt door herhaling van een proef (steil talud, duinzand) met een minder vaste pakking.

2.3 Overzicht proeven

Een overzicht van de uitgevoerde proeven is gegeven in Tabel 2.1.

proef	korte toelichting
T0	Testproef
T1, T2 en T3	Onderzoek gericht op de invloed van het <i>voorland</i> door beproeving van dijkprofiel (T1), een duinafslagprofiel (T3) en een tussenprofiel (T2)
T4	Onderzoek naar invloed van <i>golfaanval</i> op het erosieproces (T4), door herhaling van T3
T5 en T6	Onderzoek naar de invloed van de <i>korreldiameter</i> op het erosieproces door een herhaling van T1 en T3 voor duinzand i.p.v. het fijnere Asserzand
T5A	Onderzoek naar de <i>reproduceerbaarheid</i> van het modelresultaat door een herhaling van proef T5
T7	Onderzoek naar de invloed van de <i>korrelpakking</i> op het erosieproces door een herhaling van T5 met een minder vaste pakking

Tabel 2.1 Overzicht van proeven en achtergronden

In het totaal zijn er dus 9 proeven te onderscheiden. Ten opzichte van het oorspronkelijke proevenprogramma zijn in overleg met de begeleidingsgroep de volgende drie aanpassingen aangebracht:

- De reproductieproef is verschoven naar T5A i.p.v. T3A;
- De proef met grensprofiel (T4A) is achterwege gelaten, vanwege de te verwachten problemen m.b.t. de gewenste uniforme afstroming;
- De proef met vaste bodem (T7) is vervangen door een pakkingsproef.

3 Opzet van de proeven

3.1 Inrichting van de goot

De Scheldegoot is 50 m lang, 1 m breed en 1,2 m diep. Ten behoeve van de uitvoering van het bresgroeionderzoek is de goot in langs- en dwarsrichting voorzien van scheidingschotten, als aangegeven in Figuur 3.1.

Langsschot

Teneinde er zeker van te zijn dat er ter plaatse van met name de kruin van het te beproeven profiel sprake is van een nette 2-D-overstroming is de 1 m brede goot plaatselijk m.b.v. 3 m lange perspex platen versmald.

Voor de afstand tussen de binnenkant van de glaswand en de perspex platen is een afstand van 0,40 m aangehouden. Er zijn 12 schotten aangebracht over een afstand van 36 m, te weten vanaf $X = 8$ m tot $X = 44$ m.

Dwarsschot

Voor de positie van het dwarsschot in de 0,6 m brede sectie is gekozen $X = 32,0$ m. Deze positie valt uit constructieve overwegingen samen met een overgang tussen de 3 m lange perspex tussenschotten. Deze keuze is gemaakt op basis van de in Hoofdstuk 4 gepresenteerde voorbereidende berekeningen.

Aan de golfschotzijde is met 2 m³ grof grind een golfdempend talud (helling 1 : 6) aangebracht teneinde ongewenste reflecties bij uitvoering van proef T4 (golfaanval op duinafslagprofiel) te voorkomen.

Circulatiepomp(en)

Voor het rondpompen van het water dat door de bres naar 'binnen' stroomt, zijn twee pompen beschikbaar met elk een capaciteit van 60 l/s. De in de praktijk maximaal haalbare capaciteit wordt voornamelijk geschat op 100 l/s. Deze pompen zijn achter in de goot geplaatst ($X = 49$ m). Omdat er in de goot sprake is van een gesloten circuit en initieel al het over de kruin naar 'binnen' stromende water door de pompen weer naar 'buiten' (d.w.z. t.p.v. het golfschot weer in de goot) wordt teruggepompt, zal in principe de 'buiten'-waterstand lange tijd constant kunnen worden gehouden. Verlaging van de buitenwaterstand treedt op vanaf het moment dat het debiet over de kruin Q_c het maximaal haalbare retourdebiet overtreft.

Om de pompen onmiddellijk te laten aanslaan is er een initiële binnenwaterstand van +0,10 m aangebracht. Ter voorkoming van zand in het retoursysteem is er op $X = 48$ m nog een laag zandkerend dwarsschotje geplaatst.

3.2 Te beproeven profielen

Zoals reeds eerder aangegeven is er sprake van een drietal verschillende profielen, te weten een dijk-, een tussen- en een duinafslagprofiel. In het navolgende zullen deze profielen worden aangeduid met respectievelijk profiel P1, P2 en P3. Deze profielen zijn gegeven in Figuur 3.2.

Gebruikte schaal

Het normale duinafslagonderzoek in de Scheldegoot vond veelal plaats op diepteschaal $n_d = 30$. Hierbij was echter sprake van een compleet waterkeringsprofiel van NAP -20 m (diepwaterrand) tot NAP +10 à NAP +15 m (duintop), dus ongeveer 30 à 35 m in de verticaal. In het geval van doorbraak gaat het om het profieldeel van zeg NAP -2 m (een laaggelegen polder) tot het stormvloed peil NAP +5 m, dus in het totaal ongeveer 7 m.

De gekozen verticale schaal is derhalve 1 : 10. Deze schaal is ook gebruikt voor de horizontale afmetingen van het profiel (niet-samengetrokken model).

Enkele karakteristieke niveaus zijn dan:

- Gootbodem : "NAP -2 m";
- Waterstand : "NAP +5 m" = +0,70 m t.o.v. de gootbodem;
- Top grensprofiel : "NAP +9 m" = +1,10 m t.o.v. de gootbodem.

Voor de nulpositie van dit profiel (kruinrand; afslagpunt) is gekozen $X = 35,50$ m.

Vormgeving voorzijde

Voor de situatie met een *dijkprofiel* is gekozen voor een talud 1 : 4, hetgeen in het model overeenkomt met een lengte van $4 \cdot 0,70 = 2,80$ m (dus vanaf $X = 32,70$ m).

Voor het zogenaamde *tussenprofiel* is gekozen voor een bodemhelling van 1 : 15, hetgeen in het model overeenkomt met een lengte van $15 \cdot 0,70 = 10,50$ m (vanaf $X = 25,00$ m).

Het *duinafslagprofiel* is gebaseerd op het naar het prototype vertaalde afslagprofiel zoals dat is gemeten in een Deltagoot-proef, direct na het hoogtepunt van een gesimuleerde superstorm [M1263-III; proef T3]. Schematisch weergegeven ziet dit profiel beneden stormvloedpeil (NAP +5 m) er als volgt uit:

- NAP +3 m tot NAP +5 m : helling 1 : 30;
- NAP +0 m tot NAP +3 m : helling 1 : 40;
- NAP -3 m tot NAP +0 m : helling 1 : 30.

De gemiddelde helling bedraagt dan ca. 1 : 34.

In het model betekent dit:

Van $X = 11,50$ m tot $X = 17,50$ m onder een helling 1:30 omhoog tot $Z = +0,20$ m ("NAP"), vervolgens onder 1:40 tot $X = 29,50$ m ($Z = +0,50$ m; "NAP+3m") en dan onder 1 : 30 tot het afslagpunt $X = 35,50$ m ($Z = +0,70$ m; "NAP +5 m").

Lengte bovenzijde

Voor de keuze van de lengte van de horizontale kruin van de waterkering is uitgegaan van een duinafslagprofiel waarvan het bovenste deel van het grensprofiel is verwijderd. De hoogte van dit grensprofiel, h_{gp} , bedraagt minimaal 2,5 m. In formule geldt:

$$h_{gp} = 0,12 T_p \sqrt{H_{sig}} \quad (3.1)$$

In het geval van de standaard golfcondities ($H_{sig} = 7,6$ m en $T_p = 12$ s) geldt:
 $h_{gp} = 4,0$ m.

Bij een (prototype-)hoogte van 4,0 m en rekening houdend met de hellingen van 1 : 1 aan de voorzijde en 1 : 2 aan de achterzijde wordt de lengte dus 13 m (bij de minimale hoogte van 2,5 m bedraagt deze waarde 10,5 m). De waarde lijkt ook redelijk aan te sluiten bij de afmeting van de kruin van een dijk.

In het model is gekozen voor een lengte van 1,30 m (horizontaal deel van $X = 35,50$ m tot $X = 36,80$ m).

Vormgeving achterzijde

Voor het profiel aan de achterzijde van de waterkering is uitgegaan van een doorgaande helling onder 1 : 3. Een helling van 1 : 2, zoals aan de achterzijde van het grensprofiel, leek wat al te steil.

Deze helling is over het volledige hoogteverschil van 0,70 m (van "NAP +5 m" tot "NAP - 2 m") doorgezet, hetgeen neerkomt op een lengte van $3 \cdot 0,7 = 2,10$ m (van $X = 36,80$ m tot $X = 38,90$ m).

Volumina

Voor het *dijkprofiel* ($X = 32,70$ m tot $X = 38,90$ m: lengtebeslag 6,20 m) gaat het om 2,625 m³/m¹ in dwarsprofiel. Voor een effectieve gootbreedte (= kruinbreedte B_c) van 0,40 m betekent dit 1,05 m³ zand.

Voor het *tussenprofiel* ($X = 25,00$ m tot $X = 38,90$ m: lengtebeslag 13,90 m) en het *duinafslagprofiel* ($X = 11,50$ m tot $X = 38,90$ m: lengtebeslag 30,6 m) betreft het respectievelijk 5,32 m³/m¹ en 10,05 m³/m¹, ofwel respectievelijk 2,13 m³ en 4,02 m³.

3.3 Te verrichten metingen

3.3.1 Overzicht

Met betrekking tot de te verrichten metingen kan onderscheid gemaakt worden tussen:

- profielontwikkeling;
- lokale (raai)-metingen;
- ondersteunende metingen.

3.3.2 Profielontwikkeling

De profielontwikkeling wordt in detail (van de zijkant door de glaswand) vastgelegd door opnamen m.b.v. een drietal video-camera's. Hiervoor is een goed zichtbaar raster op de glaswand aangebracht (10 · 10 cm). Het beeldveld van elke camera bedraagt 2 m in de breedte, hetgeen overeenkomt met twee ruiten.

3.3.3 Lokale (raai)-metingen

Voor het meten van de lokale grootheden zoals golfhoogte, waterstand en snelheden zijn een 14-tal instrumenten in gebruik, te weten 7 golfhoogtemeters, 5 snelheidsmeters en 2 golfrichtings-spreidingsmeters. Bij elkaar levert dit 16 kanalen.

Waterstandsmetingen

De waterstand (t.o.v. de gootbodem) zal worden bepaald op een aantal discrete posities zowel zeewaarts, ter plaatse van, als landwaarts van de waterkering. In het zichtveld van de video-camera('s) kunnen waterstand en waterdiepten over de gehele lengte van het beeld achteraf instantaan worden afgelezen.

Er zijn 7 GolfHoogteMeters in gebruik, ghm1 t/m ghm7, aangevuld met 2 zogenaamde GolfRichtingsSpreidingsMeters: GRSM1 t/m GRSM2. Een GRSM is in feite een combinatie van golfhoogtemeter en een snelheidsmeter, welke voor de toepassing in een goot dus te gebruiken is om instantaan lokaal, de waterdiepte en de snelheid te bepalen. In het totaal zijn er dus 9 'waterstandsmeters' (ghm1 t/m ghm7, ghm8 en ghm9).

Snelheidsmetingen

De snelheden zullen worden gemeten t.p.v. waterstandspunten. Er wordt naar gestreefd per positie een of twee punten boven elkaar te bemeten, om zo inzicht in de aanwezige snelheidsverticaal te krijgen.

Hiertoe wordt gebruik gemaakt van 5 SnelheidsMeters (type EMF, Electro Magnetische snelheid(Flow)-meter), genummerd (shm1 t/m shm5) en de al genoemde 2 GRSM's. In het totaal zijn er dus 7 'snelheidsmeters' (shm1 t/m shm5, shm6 en shm7).

Debietmeting(en)

De meest praktische manier om het debiet te meten bleek het simultaan meten van een snelheidsverticaal (een aantal punten in de verticaal) en de lokale waterdiepte. Hiervoor is gebruik gemaakt van een waterstandsmeting (ghm) in combinatie met 1 of 2 snelheidsmeters.

3.3.4 Ondersteunende metingen

Als de zogenaamde ondersteunende metingen zijn te noemen:

- een dichtheidsmeting t.b.v. pakkingscontrole (per proef twee steekmonsters);
- een zeefanalyse van het gebruikte zand (per proef een monster);
- de watertemperatuur (bij elke proef).

3.4 Meetlokaties en instrumentatie

Langs de goot zijn 7 meetlokaties (meetraaien dwars op de goot-as) gekozen, te weten A t/m G, waarbij per lokatie een of meerdere instrumenten zijn geïnstalleerd. Een uitzondering hierop vormt raai E, op $X = 35,50$ m, welke uiteindelijk niet is gebruikt voor de plaatsing van een meetinstrument. Een overzicht van de meetlokaties is gegeven in Tabel 3.1 en Figuur 3.2.

raai-code	positie [m]	GolfRichtings-SpreidingsMeter	SnelHeidsMeter	GolfHoogteMeter
A	11,50		shm1 +0,50 m shm2 +0,20 m	ghm1
B-P1 B-P2 B-P3	17,50	shm6/ghm8 +0,45 m	shm3 +0,20 m shm3 +0,20 m shm3 +0,30 m	ghm2
C-P1 C-P2 C-P3	32,50 24,50 23,50	shm7/ghm9 +0,45 m	shm4 +0,20 m shm4 +0,20 m shm4 +0,38 m	ghm3
D-P1 D-P2 D-P3	34,50 30,50 29,50		shm5 +0,50 m shm5 +0,50 m shm5 +0,55 m	ghm4
E	35,50	n.v.t.	n.v.t.	(ghm5)
F	40,50	n.v.t.	n.v.t.	ghm6
G	43,50			ghm7

Tabel 3.1 Overzicht meetlokaties en positie van instrumenten

Met name de niveaus van de meetinstrumenten zijn hierbij per proef (om diverse redenen) soms verschillend. De 'instroomlokaties' A en B zijn bij elke proef identiek. Dit geldt tevens voor de lokaties E, F en G. De C- en D-lokatie is per profiel zodanig gekozen dat lokatie C ongeveer samenvalt met de teen van het profiel en lokatie D zich halverwege deze teen en de kruin bevindt.

Rekening houdend met de positie van het dwarsschot is buiten raai A (voor $X < 11,5$ m) het 'buiten'-oppervlak nu $23,8 \text{ m}^2$, terwijl er 'binnen' raai G (vanaf $X = 43,5$ m) $13,4 \text{ m}^2$ aanwezig is.

Een overzicht van de kanalen en positionering van de meetinstrumenten is gegeven in Tabel 3.2.

Kanaalnummer	Instrument	Opmerkingen
1	ghm8 (B)	X = 17,50 m (vast); Z = +0,45 m
2	shm6 (B)	
3	ghm9 (C)	X = 32,50/24,50/23,50 m; Z = +0,45 m
4	shm7 (C)	
5	shm1 (A)	X = 11,50 m (vast); Z = +0,50 m (vast)
6	shm2 (A)	X = 11,50 m (vast); Z = +0,20 m (vast)
7	shm3 (B)	X = 17,50 m (vast); Z = +0,20/0,20/0,30 m
8	shm4 (C)	X = 32,50/24,50/23,50 m; Z = +0,50/0,50/0,60 m
9	shm5 (D)	X = 34,50/30,50/29,50 m; Z = +0,60/0,50/0,60 m
10	ghm1 (A)	X = 11,50 m (vast)
11	ghm2 (B)	X = 17,50 m (vast)
12	ghm3 (C)	X = 32,50/24,50/23,50 m
13	ghm4 (D)	X = 34,50/30,50/29,50 m
14	ghm5 (E)	(X = 35,50 m (vast)) niet gebruikt!
15	ghm6 (F)	X = 40,50 m (vast)
16	ghm7 (G)	X = 43,50 m (vast)

Tabel 3.2 Overzicht kanalen en positionering meetinstrumenten voor proef T1/T2/T3

De resultaten van de uitgevoerde ijking van de golfhoogtemeters zijn gegeven in de Tabel 3.3. Er is zowel voorafgaand aan de meting als na afloop een ijking uitgevoerd. Voor de verwerking is uitgegaan van de in de voorlaatste kolom aangegeven waarden.

De ijkingsfactoren en meetnauwkeurigheid van de snelheidsmeters zijn samengevat in Tabel 3.4.

Golfhoogtemeter	Ijking vooraf [m/V]	Ijking achteraf [m/V]	Gebruikte ijking [m/V]	Afwijking [%]
ghm1	0,0248	0,0249	0,0248	0,2
ghm2	0,0251	0,0253	0,0252	0,8
ghm3	0,0247	0,0250	0,0248	1,2
ghm4	0,0251	0,0260	0,0254	1,8
ghm5	-	0,0247	0,0247	-
ghm6	0,0510	0,0492	0,0501	1,8
ghm7	0,0490	0,0493	0,0491	0,3
ghm8	0,0249	0,0245	0,0247	0,8
ghm9	0,0236	0,0280	0,0258	8,5

Tabel 3.3 Overzicht ijkingsfactoren en meetnauwkeurigheid golfhoogtemeters

Snelheidsmeter	Ijking tot 1 m/s [m/s/V]	Ijking tot 5 m/s [m/s/V]	Afwijking ^{?)} [%]
shm1 (emf002)	0,1076	0,5380	2,7
shm2 (emf061)	0,1058	0,5290	1,4
shm3 (emf062)	0,0988	0,4940	1,3
shm4 (emf059)	0,0992	0,4960	1,3
shm5 (emf058)	0,1005	0,5025	1,2
shm6 (grsm07)	0,0958	0,4790	4,2
shm7 (grsm02)	0,0994	0,4970	1,6

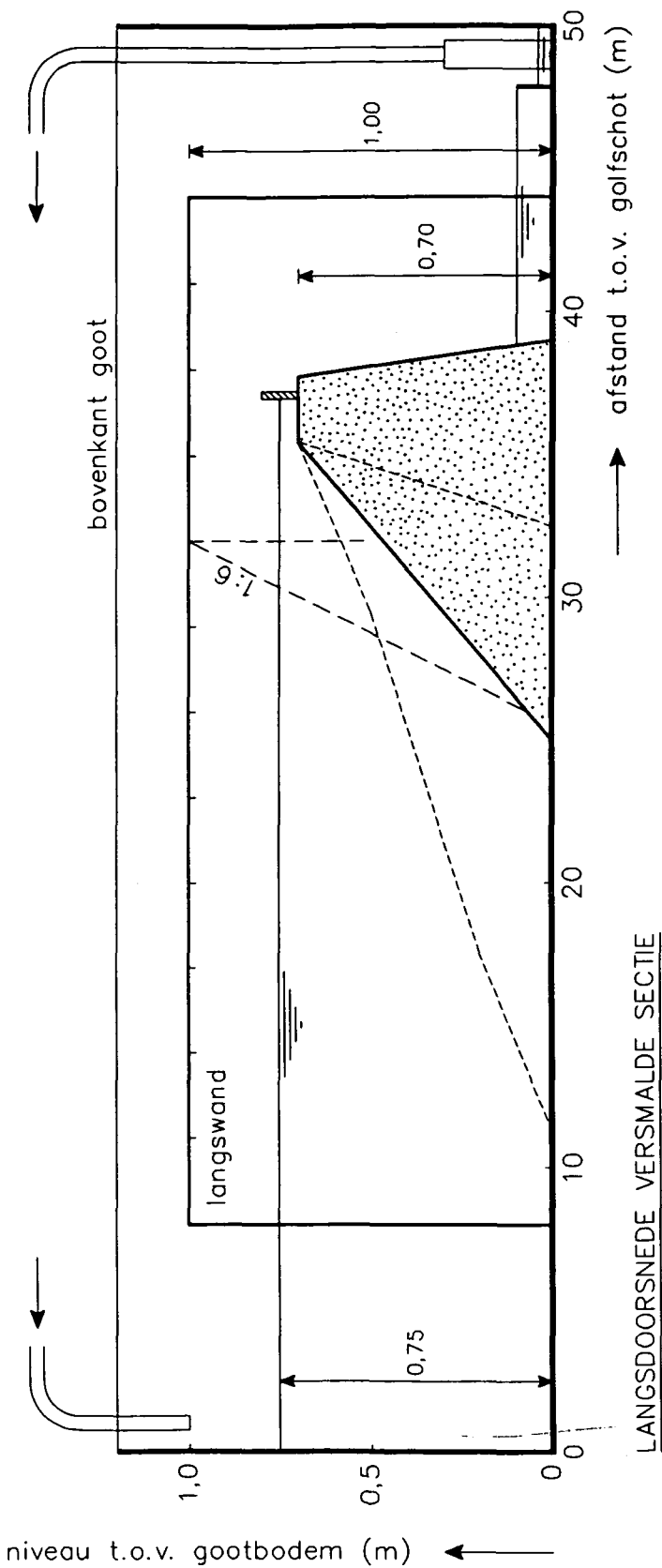
Opm: ^{?)} Verschil meting vs. berekening bij ijking instrument (bij 1,00 m/s)

Tabel 3.4 Overzicht ijkingsfactoren en meetnauwkeurigheid snelheidsmeters

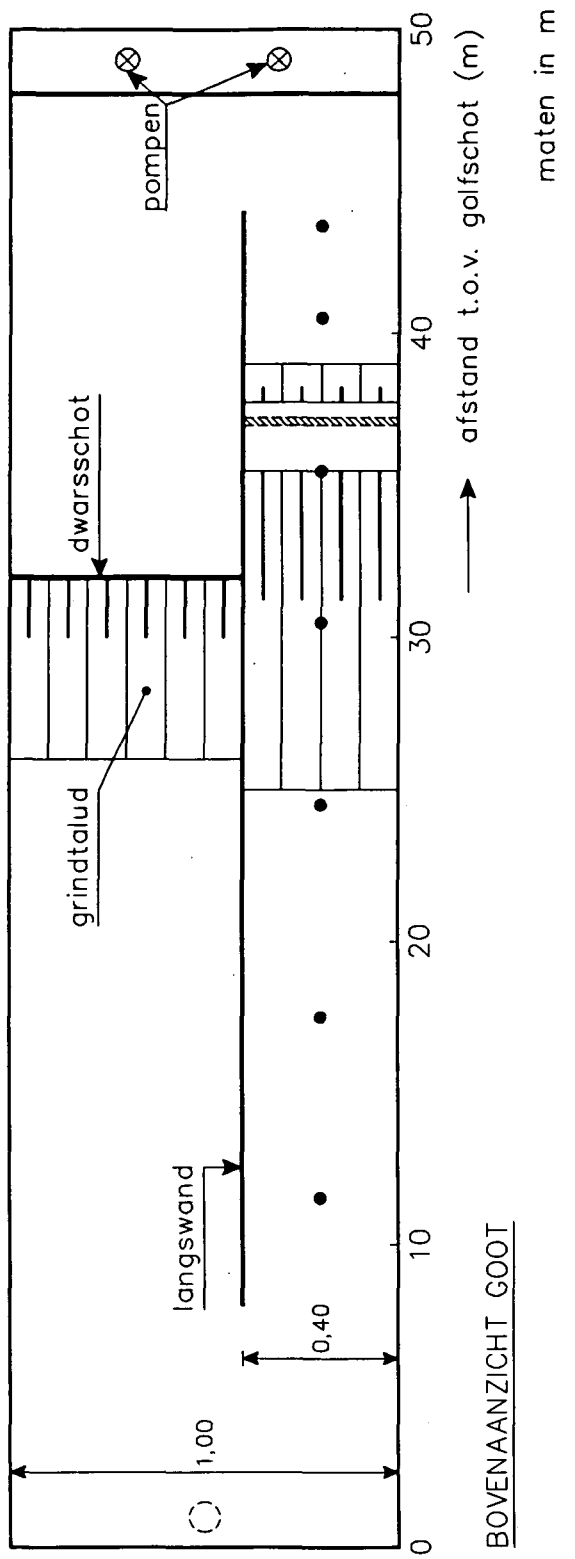
3.5 Werkwijze per proef

Het betreffende profiel wordt op basis van de op de gootwand aangegeven contouren goed verdicht aangebracht. Per profiel worden twee steekmonsters genomen, een ter plaatse van de kruin en een op het talud. Van het 'kruinmonster' wordt een zeefanalyse gemaakt. Op de kruin wordt aan de voorzijde een zandworst geplaatst, welke ervoor moet zorgen dat het water niet voortijdig over de kruin afstroomt. Na positionering van de instrumenten wordt de buitenwaterstand opgehoogd tot 0,75 m boven de gootbodem; zijnde 0,05 m boven het kruinniveau. Na gelijktijdig opstarten van zowel de bemonstering en de drie videorecorders

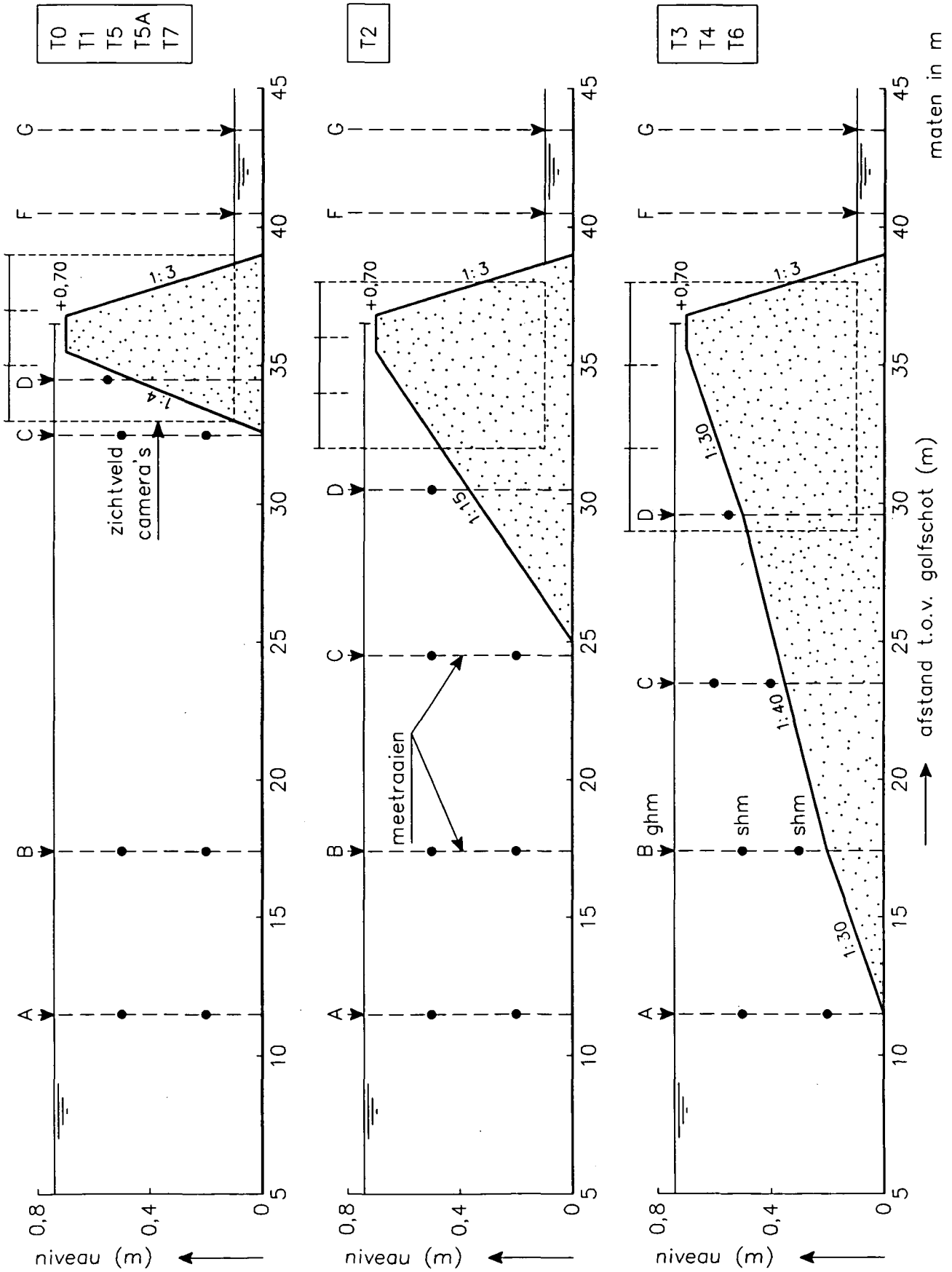
(identieke tijdcode) wordt de daadwerkelijke proef opgestart door de zandworst te verwijderen: begintijdstip $t = t_0$.



LANGSDOORSNEDE VERSMALDE SECTIE



INRICHTING SCHELDEGROOT



OVERZICHT DWARSPROFIELEN
EN POSITIES MEETRAAIEN

4 Voorbereidende berekeningen

4.1 Inleiding

Aan de hand van enkele voorbereidende berekeningen is getracht de dwarsprofielontwikkeling zo goed mogelijk te voorspellen. Deze berekeningen zijn gebaseerd op het zogenaamde PAC-model [Visser e.a. 1986 en Visser 1988], alsmede latere versies van dit model [Visser e.a. 1990 en Visser en Steetzel 1992]. Hierbij is met name gekeken naar de ontwikkeling van het (maximale) kruinniveau (Z_c , zie Figuur 4.1), de hoeveelheid overstromend water en het debiet (Q_c) en de voorspelde duur ($t_c - t_0$) van de proeven.

De resultaten zijn gebruikt om de pompcapaciteit en de posities van waterkering en tussenschot te bepalen. Een uitgebreide toelichting op dit model is gegeven in Deel IIB van dit rapport.

4.2 Schematisatie

Bij de doorbraak van een zanddijk kunnen, als deze begint op tijdstip $t = t_0$ met een kleine initiële bres in de kruin van de dijk, de volgende, opeenvolgende fasen worden onderscheiden [Visser e.a., 1990] (zie Figuur 4.1):

- Fase I Versteiling van het binnentalud voor $t_0 < t < t_1$;
De hellingshoek β van het binnentalud (met oorspronkelijke waarde β_0) neemt toe totdat hierbij een bepaalde kritische waarde β_1 bereikt wordt.
- Fase II Versmalling van de kruin voor $t_1 < t < t_2$;
Als gevolg van voortgaande erosie van het binnentalud onder (gelijkblijvende) hellingshoek β_1 neemt de kruinlengte L_c in het stroomgat af. Bij constante buitenwaterstand veranderen de hoogte van de kruin in de bres en de bresbreedte (in langsrichting langs de kruin) nog niet wezenlijk en is het debiet Q_c nog vrijwel constant.
- Fase III Verlaging van de kruin voor $t_2 < t < t_3$;
Aan deze verlaging van de bres is een groei in de breedte gekoppeld.
- Fase IV Voortgaande bresgroei voor $t > t_3$;
Als op $t = t_3$ de dijk t.p.v. de bres is verdwenen zal vervolgens de bres voornamelijk in de breedte en in de diepte (ontgrondingskuil) doorgroeien.

In de onderhavige proevenserie komen de breedtegroei van Fase III, alsmede (geheel) fase IV niet aan bod.

In het PAC-model (incl. de latere versies) wordt het bodemtransport vooralsnog verwaarloosd t.o.v. het suspensietransport. Samen met het oppikmechanisme betekent dit dat het effect van de korreldiameter op het erosieproces zich beperkt tot invloeden van de wrijvingscoëfficiënt [Visser, 1988]. Het effect van de pakkingsdichtheid van het zand komt in het model uitsluitend tot uiting via het poriëngehalte. De grotere weerstand tegen erosie bij relatief dichtere pakkingen, als gevolg van de onderlinge steun tussen de individuele korrels, wordt dus verwaarloosd.

Voor een uitgebreide beschrijving van achtergronden en aannamen kan worden verwezen naar [Visser en Steetzel, 1992].

4.3 Fase I: Versteiling van het binnentalud

Bij een zeker energieniveau boven de kruin (overhoogte H_c t.o.v. de kruin) kan het debiet over de kruin worden berekend met de formule voor de volkomen overlaat, volgens:

$$Q_c = B_c m_0 \frac{2}{3} \sqrt{\frac{2}{3} g (H_c)^2} \quad (4.1)$$

Substitutie van $H_c = 0,05$ m, $B_c = 0,40$ m en $m_0 = 1,0$ levert:

$$Q_c = 7,6 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s} \quad (4.2)$$

Het debiet, nog geen $8 \text{ dm}^3/\text{s}$, is in deze fase dus nog erg klein.

De versteiling van het binnentalud (taludhelling 1: 3, hellingshoek $\beta_0 = 18,4^\circ$), gaat door totdat dit talud de kritische steilheid, $\beta = \beta_1$, bereikt heeft; steiler dan deze hoek is wel mogelijk maar de stroming laat dan los. De stroming benedenstrooms van het loslaatpunt heeft géén effect op de superkritische stroming bovenstrooms en dus ook niet op het oppikken van zand bij het loslaatpunt.

Voor deze helling is vooralsnog de hoek van het natuurlijke talud van (kwarts)-zand aangehouden: $\beta_1 = 32^\circ$.

De voor de versteiling benodigde tijdsduur, $t_1 - t_0$, kan worden geschat m.b.v. de vergelijking:

$$t_1 - t_0 = \frac{L_t}{k_0 \sqrt{H_c}} \quad (4.3)$$

waarin:

$$k_0 = 0,0082 \frac{(m_0)^{\frac{1}{3}}}{\delta (1 - p)} g^{\frac{1}{6}} C^{\frac{2}{3}} \frac{\sin(\beta_0)^{\frac{1}{3}}}{\cos(\beta_0)} \quad (4.4)$$

De lengte L_1 is gedefinieerd in Figuur 4.1. Substitutie van $m_0 = 1,0$, $C = 13 \text{ m}^{1/2}/\text{s}$ (gebaseerd op analyse PAC-proeven [Visser e.a., 1986]), $\beta_0 = 18,4^\circ$, $\delta = 1,65$ en $p = 0,40$ levert: $k_0 = 0,048$.

Als $\beta_0 = 18,4^\circ$, $\beta_1 = 32^\circ$ en Z_c op $t = t_0$ is $Z_{c,0} = 0,70 \text{ m}$, dan volgt $L_1 = 0,98 \text{ m}$.

Met $H_c = 0,05 \text{ m}$ wordt nu verkregen:

$$t_1 - t_0 = \frac{0,98}{0,048 \sqrt{0,05}} = 91 \text{ s} \quad (4.5)$$

De versteiling van het binnentalud duurt dus ongeveer 1,5 minuut.

4.4 Fase II: Versmalling van de kruin

De versmalling van de kruin vindt plaats als gevolg van doorgaande erosie van het achtertalud en kan worden gemodelleerd op basis van het aangepaste PAC-model [Visser e.a., 1990].

Het debiet blijft in deze fase in principe nog gelijk aan de al eerder genoemde waarde. De tijdsduur, $t_2 - t_1$, welke benodigd is voor het, door terugschrijdende erosie, verwijderen van de gehele bovenkant (kruinlengte L_c) van de waterkering kan worden berekend uit:

$$t_2 - t_1 = \frac{L_c}{k_1} \sqrt{H_c} \quad (4.6)$$

De waarde van de k_1 -coëfficiënt volgt hierbij uit [Visser e.a. 1990]:

$$k_1 = 0,0082 \frac{(m_0)^{\frac{1}{3}}}{\delta (1-p)} g^{\frac{1}{6}} C^{\frac{2}{3}} \frac{\sin(\beta_1)^{\frac{1}{3}}}{\cos(\beta_1)} \quad (4.7)$$

Deze formulering toont, op basis van de modeluitgangspunten, geen afhankelijkheid met de dijkhoogte [Visser en Steetzel, 1992].

Substitutie van $m_0 = 1,0$, $C = 13 \text{ m}^{1/2}/\text{s}$, $\beta_1 = 32^\circ$, $\delta = 1,65$ en $p = 0,40$ levert:

$$k_1 = 0,064 \quad (4.8)$$

Substitutie van kruinlengte $L_c = 1,30 \text{ m}$ en overhoogte $H_c = 0,05 \text{ m}$ resulteert in een tijdsduur:

$$t_2 - t_1 = \frac{1,30}{0,064 \sqrt{0,05}} = 91 \text{ s} \quad (4.9)$$

(NB: Deze waarde komt toevallig overeen met die van de tijdsduur van fase I).

Een meer simpele schatting op basis van de tijdsduur (te weten 25 s) welke in de PAC-proef (T3) nodig was om een kruinlengte L_c van 0,20 m tot 0 m te reduceren levert:

$$t_2 - t_1 = \left[\frac{1,30}{0,20} \right] 25 \text{ s} = 130 \text{ s} \quad (4.10)$$

In verband met wrijving zal het gemiddelde debiet over de kruin misschien iets lager zijn en duurt deze erosiefase waarschijnlijk nog iets langer.

Een tijdsduur van ca. 2 minuten voor fase II lijkt echter een redelijke schatting.

De duur tot en met deze fase, $t_2 - t_0$, bedraagt nu ca. 4 minuten. In deze periode zal er in het totaal dus ongeveer $1,5 \text{ m}^3$ water over de kruin stromen.

4.5 Fase III: Verlaging van de kruin

In deze fase van het erosieproces zal het debiet over de kruin sterk in de tijd gaan toenemen. Dit debiet is gelijk aan:

$$Q_c = B_c m_0 \frac{2}{3} \sqrt{\frac{2}{3} g} (H_0 - Z_c)^{\frac{3}{2}} \quad (4.11)$$

De kruinverlaging volgt uit de volgende relatie [Visser, 1986]:

$$\frac{dZ_c}{dt} = -k_2 (H_0 - Z_c)^{\frac{1}{2}} \quad (4.12)$$

waarin k_2 een constante.

De waarde van deze erosiecoëfficiënt volgt uit:

$$k_2 = 0,0082 \frac{(m_0)^{\frac{1}{3}}}{\delta (1-p)} g^{\frac{1}{6}} C^{\frac{2}{3}} \frac{\sin(\alpha) \sin(\beta_1)^{\frac{4}{3}}}{\sin(\alpha + \beta_1) \cos(\beta_1)} \quad (4.13)$$

Voor $m_0 = 1,0$, $C = 13 \text{ m}^{1/2}/\text{s}$, $\beta_1 = 32^\circ$, $\delta = 1,65$ en $p = 0,40$ levert dit:

$$k_2 = 0,0339 \frac{\sin(\alpha)}{\sin(\alpha + \beta_1)} \quad (4.14)$$

De waarde van k_2 is voor een aantal taludhellingen gegeven in Tabel 4.1.

taludhelling	α [°]	k_2 [-]
1 : 4	14,0	0,0114
1 : 15	3,8	0,0039
1 : 30	1,9	0,0020
1 : 40	1,4	0,0015

Tabel 4.1 Overzicht k_2 -waarden voor relevante taludhellingen

Een flauwere voorlandhelling resulteert in een lagere k_2 -waarde: de kruinverlaging gaat dan relatief langzamer. Deze fase duurt voor profiel P2 dus (minimaal) een factor 2,9 langer dan voor profiel P1. Voor profiel P3 bedraagt deze verhouding (initieel) 5,7.

Analytische oplossing voor constante waterstand

Voor het geval van een constante buitenwaterstand $H_0(t) = H_0$ kan een analytische oplossing worden afgeleid. Na scheiding van de variabelen met als randvoorwaarde $(H_0 - Z_c) = H_{c,2}$ op $t = t_2$ volgt dan:

$$2 \sqrt{H_0 - Z_c} = k_2 (t - t_2) + 2 \sqrt{H_{c,2}} \quad (4.15)$$

Het (maximale) kruinniveau als functie van de tijd $Z_c(t)$, volgt dan uit:

$$Z_c(t) = H_0 - \frac{1}{4} (k_2 (t - t_2) + 2 \sqrt{H_{c,2}})^2 \quad (4.16)$$

De tijdsduur welke benodigd is voor volledige erosie van de kruin tot $Z_c(t_e) = Z_{c,e}$, volgt nu uit:

$$t_e - t_2 = \frac{2}{k_2} (\sqrt{H_0 - Z_{c,e}} - \sqrt{H_{c,2}}) \quad (4.17)$$

Substitutie van $H_{c,2} = 0,05$ m, gebruikmakend van de gegeven k_2 -waarden levert de in Tabel 4.2 (kolom 2 en 3) gegeven tijdsduur voor erosie tot de niveaus $Z_{c,e} = +0,45$ m en $Z_{c,e} = 0,00$ m.

NB: Voor $Z_c \approx +0,45$ m is het (theoretische) debiet over de kruin gelijk aan de (geschatte) pompcapaciteit! Tot het bereiken van dit niveau zal de buitenwaterstand (afgezien van verhanglijn-effecten) constant moeten blijven.

Voor de berekening van de totale tijdsduur dient hierbij nog de tijd voor het doorlopen van fase I en fase II te worden opgeteld.

Numerieke oplossing voor gootomstandigheden

In de goot zal er niet altijd sprake zijn van een constante buitenwaterstand (alhoewel dit wel wordt nagestreefd). Bovendien zal de binnenwaterstand als gevolg van het kruindebiet Q_c langzaam toenemen, waarbij er echter een zo groot mogelijk deel van dit debiet via het retoursysteem weer worden teruggepompt (tot maximaal $Q_r = Q_{r,max} \approx 0,100 \text{ m}^3/\text{s}$).

Voor de gegeven positie van het dwarsschot (op $X = 32,0 \text{ m}$) bedraagt het buitenoppervlak ('buiten' raai A op $X = 11,5 \text{ m}$) $A_0 = 23,8 \text{ m}^2$ en het binnenoppervlak ('binnen' raai G op $X = 43,5 \text{ m}$) $A_1 = 13,4 \text{ m}^2$.

De binnenwaterstand bedraagt initieel $H_{1,0} = 0,10 \text{ m}$.

Er dienen nu per tijdstap de volgende, onderling gekoppelde, vergelijkingen te worden opgelost:

- kruindebiet:
$$Q_c = B_c m_0 \frac{2}{3} \sqrt{\frac{2}{3} g} (H_c)^{\frac{3}{2}} \quad (4.18)$$

- kruinniveau:
$$\frac{dZ_c}{dt} = -k_2 (H_0 - Z_c)^{\frac{1}{2}} \quad (4.19)$$

- buitenwaterstand:
$$\frac{dH_0}{dt} = \frac{(-Q_c + Q_r)}{A_0} \quad (4.20)$$

- binnenwaterstand:
$$\frac{dH_1}{dt} = \frac{(+Q_c - Q_r)}{A_1} \quad (4.21)$$

- retourdebiet:
$$Q_r = [(H_1 - H_{1,0}) A_1] / dt \quad (0 \leq Q_r \leq Q_{r,max}) \quad (4.22)$$

Verwerking van deze relaties in een eenvoudig PC-rekenmodel laat een berekening in kleine tijdstapjes toe.

Ter illustratie van de resultaten geeft Figuur 4.2 het resultaat van een berekening voor proef T1 met $A_0 = A_1 = \infty \text{ m}^2$, $H_1 = + 0,0 \text{ m}$ en $Q_{r,max} = 0 \text{ m}^3/\text{s}$. Het resultaat, $t_2 - t_1 = 113 \text{ s}$, komt overeen met de eerder gegeven analytische oplossing. Het kruindebiet Q_c neemt toe van 8 tot 443 dm^3/s .

De resultaten van de berekeningen voor gootomstandigheden zijn gegeven in de Figuur 4.3 t/m 4.5. De berekening is gestopt op het moment dat de kruin weg is (d.w.z. $Z_c = 0 \text{ m}$) of dat er sprake is van een situatie met een onvolkomen overlaat, waarbij $H_1 > (Z_c + \frac{2}{3} H_c)$.

Voor de gootomstandigheden van *proef T1* (profiel P1; zie Figuur 4.3) is de situatie tot 54 s volledig identiek aan de analytische oplossing. Vanaf dit moment geldt echter $Q_c > Q_{r,max}$, waardoor de buitenwaterstand H_0 daalt en de binnenwaterstand H_1 stijgt. Na 108 s is de binnenwaterstand zover gestegen dat er een situatie met een onvolkomen overlaat ontstaat. Het debiet bedraagt dan ca. 237 dm^3/s en zal vervolgens gaan afnemen. Het kruinniveau bedraagt ongeveer +0,08 m.

Voor *proef T2* (profiel P2) zijn de resultaten gegeven in Figuur 4.4. De berekende tijdsfuncties zijn kwalitatief vergelijkbaar met die van proef T1. De tijdschaal is, conform de k_2 -waarden, echter anders. Vanaf 157 s verandert zowel de buiten- als de binnenwaterstand. Na 279 s wordt de situatie met de onvolkomen overlaat bereikt. Het kruindebiet bedraagt dan $153 \text{ dm}^3/\text{s}$, bij een kruinniveau van $+0,19 \text{ m}$.

Voor *proef T3* (profiel P3) zijn de resultaten gegeven in Figuur 4.5. Afgezien van de tijdschaal zijn ook hier de berekende tijdsfuncties kwalitatief identiek aan die van de andere proeven. Vanaf 314 s verandert zowel de buiten- als de binnenwaterstand, waarna na 592 s de situatie met de onvolkomen overlaat wordt bereikt. Het kruindebiet bedraagt dan $120 \text{ dm}^3/\text{s}$, bij een kruinniveau van $+0,24 \text{ m}$.

De berekende tijdsduur is samengevat in kolom 4 en 5 van Tabel 4.2.

Profiel	Analytische oplossing (constante buitenwaterstand)		Numerieke oplossing (gootomstandigheden)	
	$Z_c = +0,45 \text{ m}$	$Z_c = +0,00 \text{ m}$	$Z_c = +0,45 \text{ m}$	$Z_{c,2} \text{ ?}$
P1 (1 : 4)	57 s	113 s	57 s	108 s
P2 (1 : 15)	166 s	329 s	166 s	279 s
P3 (1 : 30/40)	370 s	734 s	340 s	592 s

Opm.: ? tot onvolkomen overlaat

Tabel 4.2 Overzicht geschatte tijdsduur fase III: $t_1 - t_2$

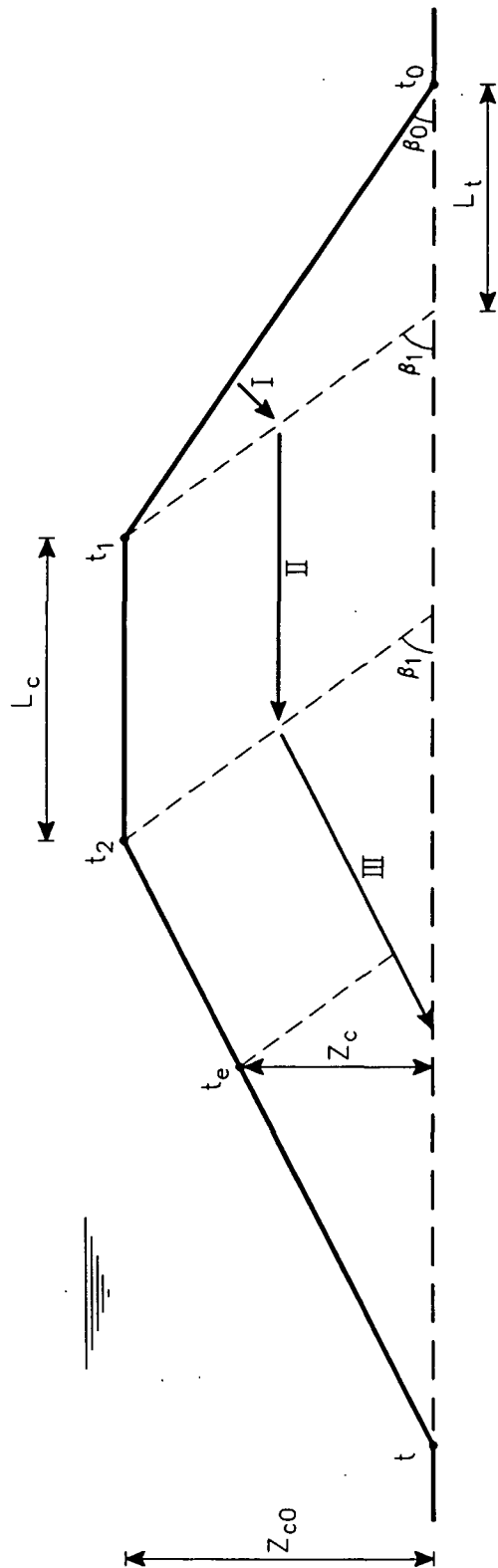
4.6 Conclusies

Proef T1 duurt dus in het totaal dus ongeveer $2 + 2 + 2 = 6$ minuten.
Voor T2 en T3 moet gerekend worden op ca. 10, respectievelijk 15 minuten.

Opgemerkt moet worden dat een en ander in de praktijk natuurlijk kan (en zal) afwijken. Als gevolg van het mogelijk onderschatten van het maximaal mogelijke retourdebiet lijkt het handhaven van de situatie met constante buitenwaterstand langer mogelijk.

Eenzelfde effect heeft het overschatten van de afvoercoëfficiënt, welke a.g.v. wrijvingsverliezen vermoedelijk kleiner dan 1,0 zal zijn. Daarnaast is er natuurlijk nog de nauwkeurigheid van de gebruikte modellering.

Voor de eerste vergelijking met de gemeten ontwikkelingen kan worden verwezen naar de hoofdstukken 6 e.v.



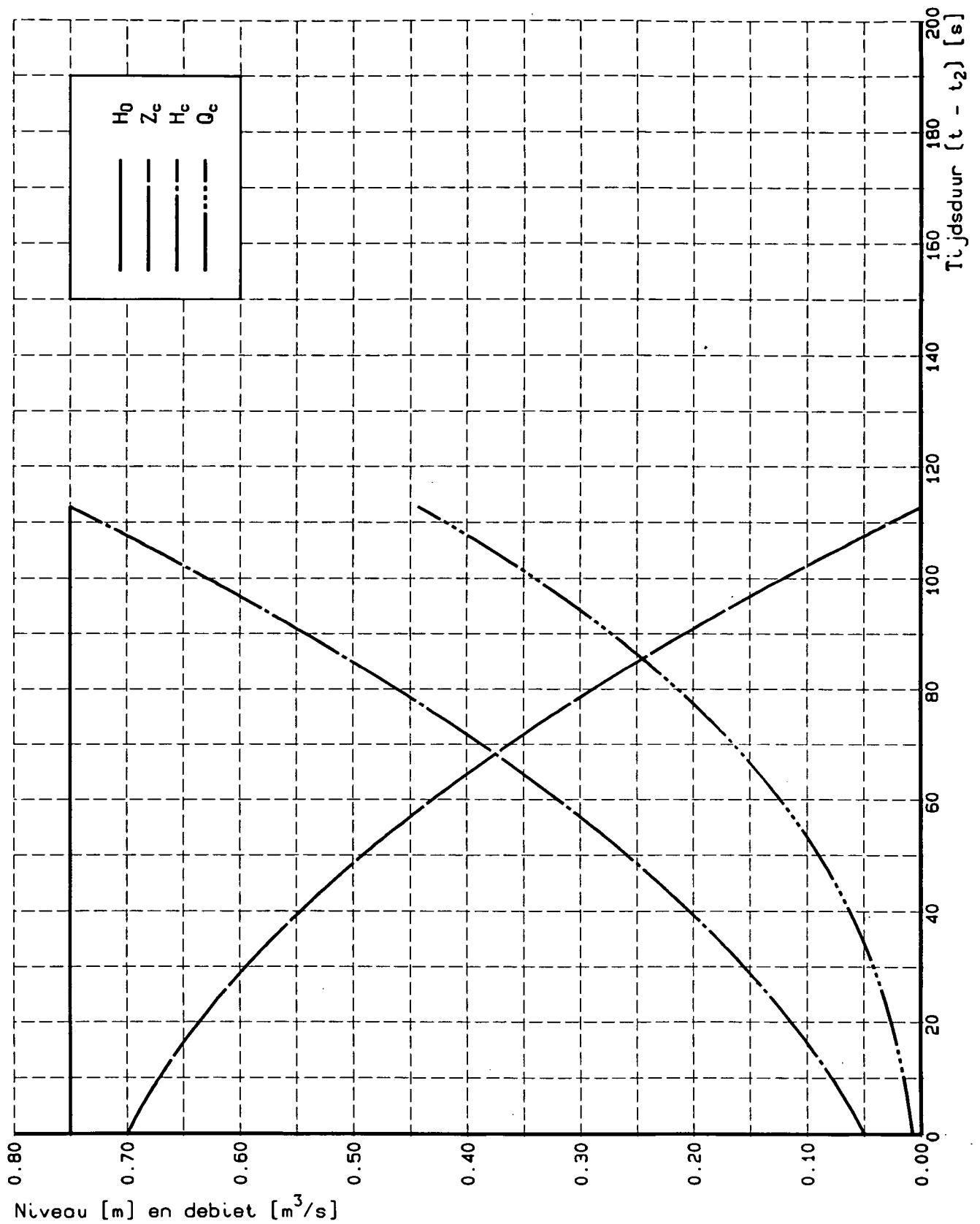
- I : versteiling binnentalud
- II : afname kruinlengte
- III : verlagng kruinniveau

SCHEMATISCHE WEERGAVE EROSIEPROCES
OVERZICHT EROSIEFASEN

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

H 1242

FIG. 4.1



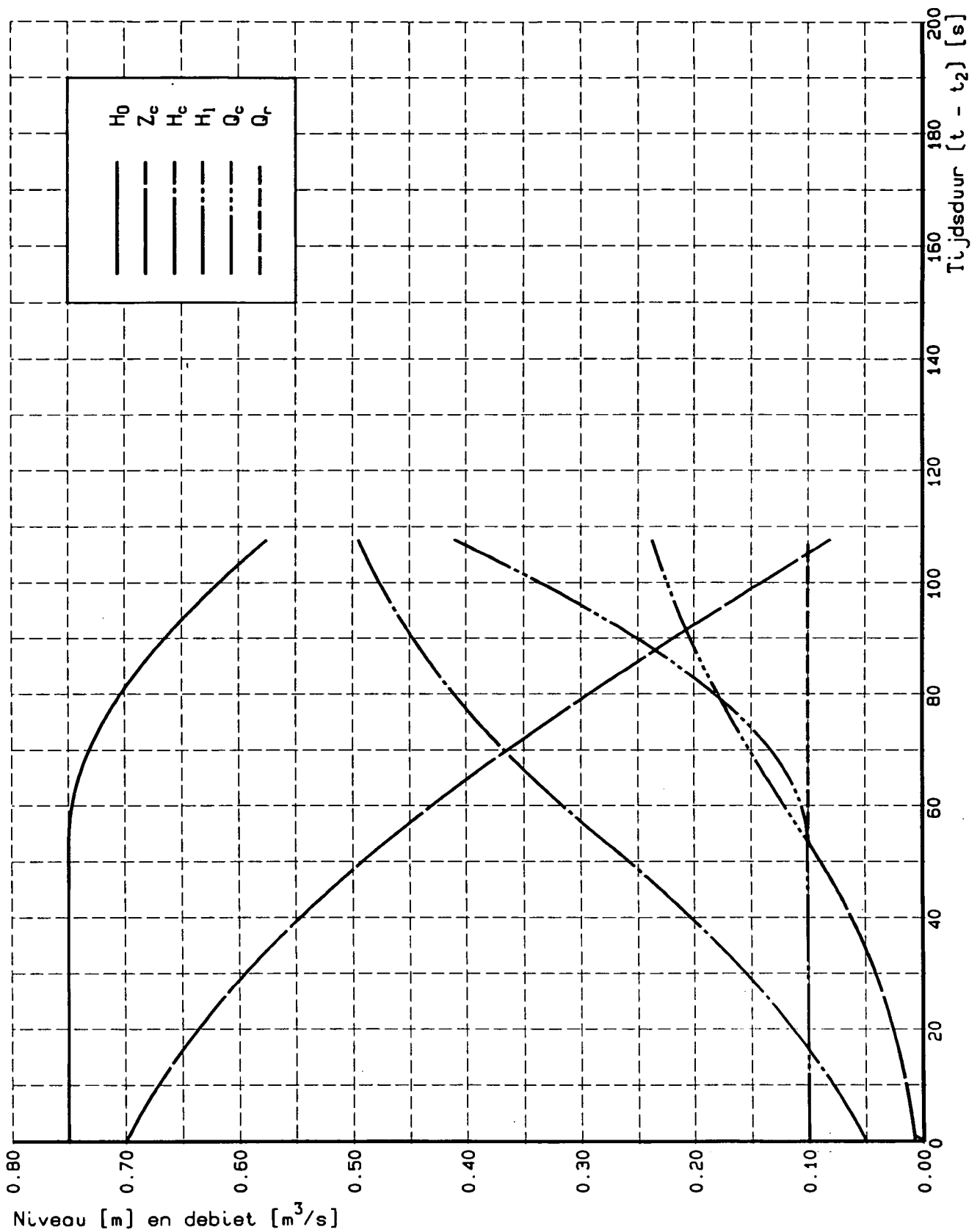
VOORSPELLING ONTWIKKELING KRUIN-
NIVEAU, WATERSTAND EN DEBIET

P1 / T1 PAC-model

Analytische opl.

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

H1242-II FIG. 4.2



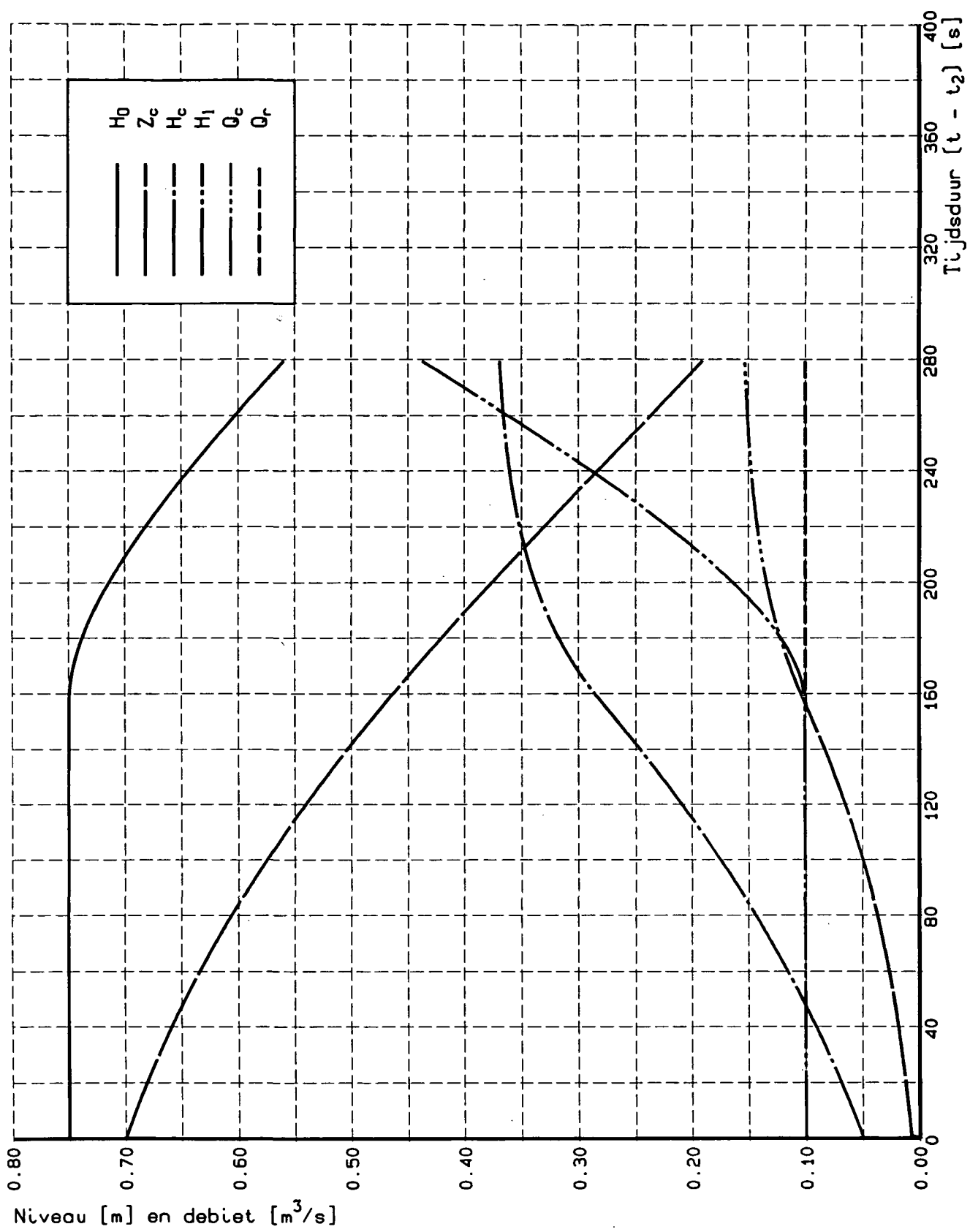
VOORSPELLING ONTWIKKELING KRUIN-
NIVEAU, WATERSTAND EN DEBIET

P1 / T1 PAC-model

Numerieke opt.

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

H1242-II FIG. 4.3



Niveau [m] en debiet [m³/s]

VOORSPELLING ONTWIKKELING KRUI-
NIVEAU, WATERSTAND EN DEBIET

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

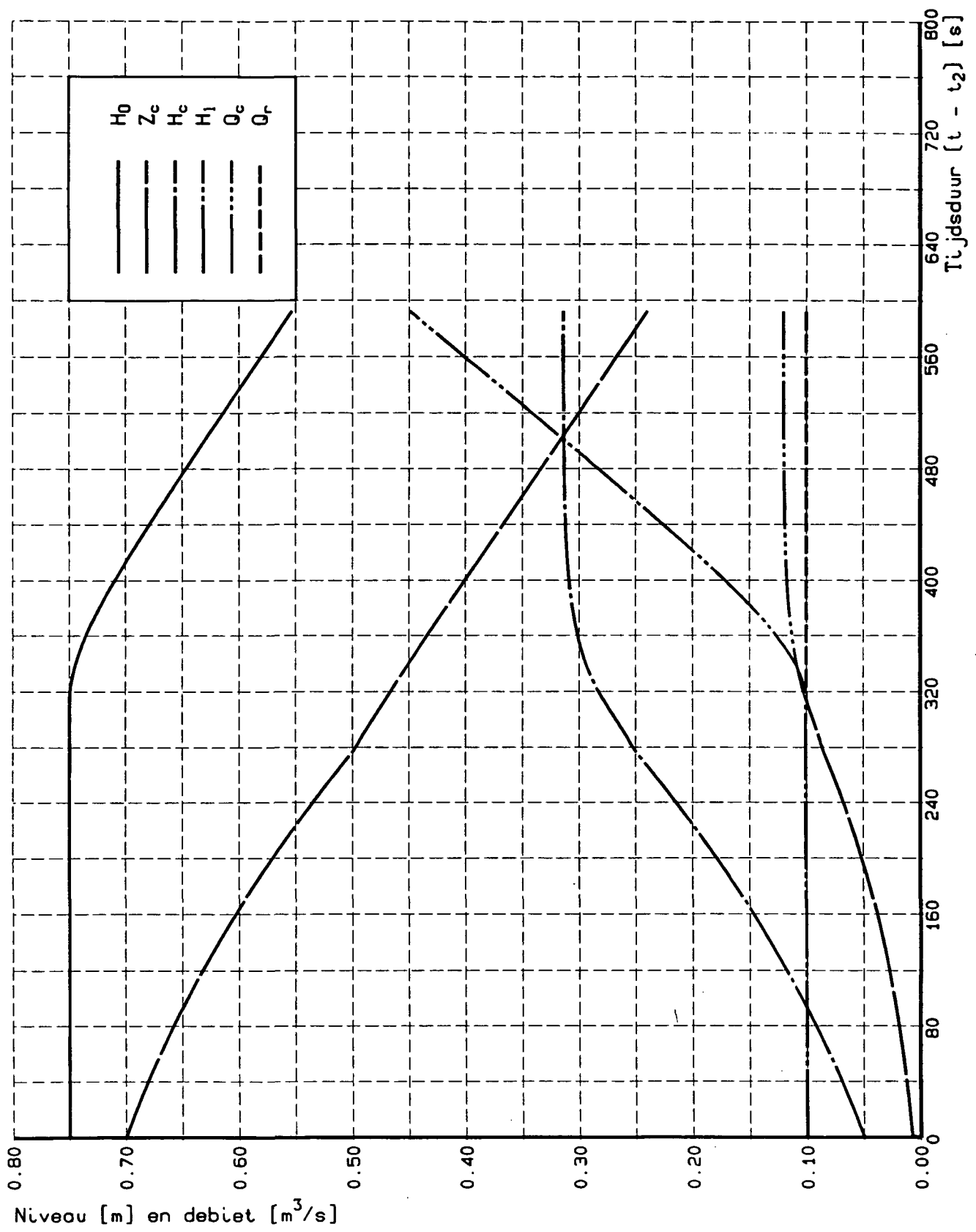
P2 / T2

PAC-model

Numerieke opl.

H1242-II

FIG. 4.4



Niveau [m] en debiet [m³/s]

VOORSPELLING ONTWIKKELING KRUI-
NIVEAU, WATERSTAND EN DEBIET

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

P3 / T3

PAC-model

Numerieke opl.

H1242-II

FIG. 4.5

5 Beschrijving resultaten

5.1 Inleiding

In de navolgende paragraaf is een korte beschrijving gegeven van de verschillende proeven. Vervolgens worden de (meestal nog) onbewerkte resultaten van de proeven gepresenteerd, voor wat betreft:

- profielontwikkeling;
- waterstanden;
- snelheden;
- pakkingsdichtheid;
- zeefanalyses.

Aansluitend is op basis van de gemeten watertemperatuur de valsnelheid van het korrelmateriaal berekend.

De nadere verwerking en analyse van deze gegevens komt in het volgende hoofdstuk aan de orde.

5.2 Korte toelichting per proef

In het navolgende is, in volgorde van uitvoering, per proef een korte beschrijving van het proefverloop gegeven.

Proef T0

Deze testproef vond plaats op dinsdag 17 september. De buitenwaterstand werd opgevoerd tot 0,03 m boven de kruin. In verband met voortijdige welvorming achter de zandworst en de steeds toenemende lek-debieten, werd de binnenwaterstand snel opgehoogd tot het peil van de buitenwaterstand. Hiermee werd een voortijdige doorbraak voorkomen.

Na het laten zakken van de binnen- en buitenwaterstand, werd de proef na snel opvoeren van de buitenwaterstand alsnog gestart. Het dijksprofiel was nu echter volledig doorweekt.

Bij het begin van de proef was er sprake van een drie-dimensionale afstroming, waardoor het dwarsprofiel zoals dit waarneembaar was tegen de glaswand, niet karakteristiek was.

Achteraf bleken de snelheden onjuist te zijn bemonsterd, zodat alleen de waterstandssignalen konden worden gecontroleerd. De testproef bleek al met al zeer nuttig.

Om een nette 2DV-afstroming te verkrijgen werd besloten om bij de volgende proeven te starten met een buitenwaterstand van +0,75 m, zijnde 0,05 m boven de kruin. De tijdsduur met kritieke overdruk (vlak voor het verwijderen van de zandworst) moet zo klein mogelijk zijn.

Proef T1

Bij aanwezigheid van de leden van TAW-C werd op donderdagmiddag 19 september de eerste echte proef uitgevoerd.

Een combinatie van onderschatting van de welvorming door overdruk en een te lange voorbereidingsduur was aanleiding tot het voortijdig bezwijken van de zandworstkering. Initieel was er dan ook geen sprake van een nette afstroming, later echter wel.

Proef T2

Bij deze proef (uitgevoerd op maandag 23 september) werd de zandworst zijdelings goed opgesloten met zand. De welvorming bleef nu achterwege, maar de gemaakte oneffenheid leek invloed te hebben op de afstroming.

Proef T3

Bij deze proef (uitgevoerd op woensdag 25 september) werd een nieuwe zandworstconstructie beproefd. Deze bestond uit een aan een dwarslat bevestigde onderdoek waarop de zandworst in los zand werd geplaatst en vervolgens werd aangestampt. Door het gelijktijdig optrekken van de zandworst en het achterwaarts wegtrekken van de onderdoek was er op tijdstip t_0 sprake van begin van afstroming over een horizontale zandbodem. Het was dan ook een perfecte proef vanaf het begin van de overstroming.

Proef T4

Op vrijdag 27 september werd de invloed van de golfaanval op het erosieproces onderzocht. Voor de golfaanval werd een stuursignaal aangemaakt volgens een Pierson-Moskowitz-spectrum met een piekperiode $T_p = 2,3$ s. De uitsturing van het golfschot werd ingesteld op 50%. Om het initiële proces van overstroming niet te verstoren werd het stuursignaal na het verwijderen van de zandworstconstructie binnen een tijdsinterval van 20 s opgevoerd van 0 tot het maximum (50%). Deze instelling bleek te resulteren in een forse golfaanval op het afslagprofiel, waarbij er sprake was van veel brekende golven op het voorland. De golfhoogte bij het golfschot bedroeg ca. 0,3 m. Dit is overigens niet op de diepteschaal (1 : 10). Hiervoor zou immers een golfhoogte van 0,7 m aanwezig moeten zijn. Ter plaatse van de kruin was er echter sprake van een 'diepteverzadigde' golfhoogte, welke derhalve wel op schaal is (onafhankelijk van golfgrootte op diep water!).

Een in de afstroomsectie genomen sediment/water-monster resulteerde na verwerking in een concentratie van 61 g/l (= 2,3 volume-%).

Vanwege het gebrekkig functioneren van ghm4 (veel ruis), werd (reserve-)ghm5 toegevoegd in de rij met instrumenten. Het signaal bleek achteraf gezien relatief beter, zodat vanaf nu ghm5 de plaats innam van ghm4.

Proef T7

Voor de eerste proef met duinzand (dinsdag 1 oktober) werd om uitvoeringstechnische redenen gestart met de proef met losse pakking. Het dijkprofiel werd aangebracht 'in den droge', waarbij er in lagen van 10 cm door aanstampen werd verdicht.

Tijdens het proces van kruinverlaging vond er een plotselinge inzakking van het dwarsprofiel plaats (ca. 1 cm op $t = 200$ s).

Proef T5

Deze proef werd uitgevoerd op woensdag 2 oktober.

De proeven verlopen steeds beter (d.w.z. zonder problemen) en volgen elkaar in hoger tempo op.

Proef T5A

Deze herhalingsproef vond plaats op donderdag 3 oktober.

De reproductie van T5 lijkt geslaagd.

Proef T6

Deze laatste proef werd uitgevoerd op maandag 7 oktober. Opmerkelijk was het tijdelijk ontstaan van een tweede, lagere versie van de kruinoverstroming t.p.v. het midden van de oorspronkelijke dwarsprofiel. Blijkbaar kon al het geërodeerde zand niet normaal worden afgevoerd en ontstaat er derhalve achter de 'verdrongen' watersprong opnieuw een gebied met versnellende stroming over deze tweede kruin. Deze had echter geen invloed op de afstroming en erosie van de linker 'hoofdkruin'.

5.3 Profielontwikkeling

De profielontwikkeling is vastgelegd door middel van video-opnamen.

Van elke proef zijn er 3 Umatic-banden, waarop op het audiokanaal een tijdcode is weggeschreven. Voor de verwerking van de resultaten werd eerst van elke proef een (werk)-VHS-band aangemaakt, waarop achter elkaar respectievelijk de opnamen van de rechter, de midden en de linker camera werden gemonteerd. Bovendien werd er onder in beeld een tekstblok opgenomen waarin achtereenvolgens: het projectnummer, de camerapositie (rechts, midden, links) en de momentane tijdcode (t.o.v. de start van de bemonstering; in minuten en seconden).

Gebruikmakend van deze band is vervolgens voor elke proef op een aantal vaste tijdstippen (minimaal elke 40 s, soms 20 s, incidenteel 10 s) de bodemligging om de 0,10 m afgelezen. Het tijdstip is hierbij gegeven ten opzichte van de start van de overstroming (tijdstip t_0). Op deze wijze zijn de verschillende profielontwikkelingen kwantitatief vergelijkbaar.

Vervolgens zijn deze profielen in een (ASCII)-databestand ingebracht; welke in eerste instantie is gebruikt voor het maken van profiel-plotjes. Later vormt dit de basis voor verschillende verdere bewerkingen.

De basisresultaten van deze bewerking zijn voor de proeven T0 t/m T7 gegeven in de figuren 5.3.1 t/m 5.3.9. De getrokken lijnen geven de resultaten om de 40 s, terwijl door middel van stippellijnen de profielen op de tussenliggende tijdstippen zijn weergegeven. De benedenstroomse beëindiging van de profielen is het gevolg van het feit dat vanaf deze positie de grens tussen zand en (inmiddels met zandsuspensie verzadigd) water niet meer duidelijk te onderkennen is. Dit betekent overigens niet dat er stroomafwaarts geen sprake meer was van een echt bodemprofiel (zie bijvoorbeeld het ontstaan van een 'tweede kruin' bij proef T6).

Bij de resultaten van proef T1 (Figuur 5.3.2) moet nog worden opgemerkt dat deze gegeven zijn t.o.v. de start van de bemonstering (zie ook paragraaf 5.2).

Tijdstip/ duur	L _c [m]	Z _c [m]	Tijdstip/tijdsduur [s]								
			T0	T1	T2	T3	T4	T5	T5A	T6	T7
t ₀	1,30	0,70	035	000'	035	039	048	016'	022	028	022'
t ₁	1,30	0,70									
t ₁ -t ₀			040	-	040	045	050	045	045	055	055
t ₂	0,00	0,70	275	140	195	231	118	166	162	193	182
t ₂ -t ₀			240	140	160	192	070	150	140	165	160
t ₂ -t ₁											
t ₃	-	0,45	451	266	563	879	644	281	278	695	287
t ₃ -t ₀			416	266	528	840	596	265	256	667	265
t ₃ -t ₂			176	126	368	648	526	115	116	504	105
t _e	-	-	604	432	723	1020	868	420	420	1040	392

- Opm.: 1) Start overstroming eigenlijk op t = 15 s, echter al eerder lekdebiet;
 2) Volgens videosignaal t₀ = 51 s (35 s verschil);
 3) Idem t₀ = 2 s (20 s verschil).

Tabel 5.3 Overzicht ontwikkeling dwarsprofiel; tijden op specifieke momenten na start bemonstering

Een overzicht van de geschematiseerde profielontwikkeling in de verschillende fasen (zie Figuur 4.1) is gegeven in Tabel 5.3. De tijdstippen zijn hierin gegeven t.o.v. de start van de bemonstering (t = 0 s), overeenkomend met (gemiddeld) een halve minuut voor de start van de overstroming (t = t₀; verwijdering zandworst). Tijdens fase II (van t₁ tot t₂) neemt de kruinlengte L_c in principe af van 1,30 m tot 0,00 m. Vervolgens (fase III vanaf t₂) neemt het kruinniveau Z_c af van 0,70 m tot maximaal 0,10 m. Het karakteristieke tijdstip t₃ is hierbij gedefinieerd als het tijdstip waarop het (maximale) kruinniveau Z_c +0,45 m bedraagt. Tijdstip t_e komt overeen met het einde van de bemonstering. De in de tabel aangegeven cursief gedrukte tijden hebben betrekking op minder goed gedefinieerde waarden (bijv. tijdstip t₂ bij proef T4).

5.4 Waterstanden

Met betrekking tot de waterstanden zijn er in principe twee data-bestanden beschikbaar, te weten:

- de momentane waterstanden, $h(x|t)$, volgend van de videobeelden;
- de continue registraties, $h(t|x)$, volgend uit de bemonstering.

In deze paragraaf komen alleen de bemonsterde waarden aan de orde.

De waterstanden zijn continu gemeten in elk van de 6 raaien (A t/m D en F t/m G), waarbij er in raai B en C sprake is van een dubbele registratie (zowel GHM- als GRSM-sigitaal).

Bij de verwerking van de waterstandssignalen is eerst nog een na-calibratie uitgevoerd op het signaal in de aanloophase van de proeven ($t < t_0$). Voor de waterstanden in de aanstroomraaien is voor deze fase het gemiddelde van alle relevante tijdsgemiddelde waarden per signaal berekend. Ter indicatie: voor proef T5A (met $t_0 = 22$ s), volgde hieruit $h_{gem} = +0,755$ m. Vervolgens de nulpuntsverschuiving van de signalen zo gecorrigeerd (orde mm's) dat de tijdsgemiddelde waarde van elk signaal gelijk was aan de genoemde waarde.

Voor beide afstroomraaien is, uitgaande van de bekende binnenwaterstand (+0,095 m) een soortgelijke na-calibratie uitgevoerd.

Het aldus bepaalde waterstandsverloop in de vier aanstroomraaien (A t/m D) en de binnenraaien F en G, is voor de proeven T0 t/m T7 gegeven in de figuren 5.4.01 t/m 5.4.18.

Het signaal in raai D (ghm4/5) toont soms in de eindfase een constante waarde (zie bijvoorbeeld Figuur 5.4.13). In dit geval valt het instrument geheel of tijdelijk droog (in dit geval op het tijdsinterval: $330 < t < 410$ s) en is het signaal dus onjuist.

Het waterstandsverloop in raai F (40,5 m) toont het moment waarop de eerste aanvoer van water over de kruin plaatsvindt en hier zorgt voor een initiële waterstandsverhoging. Dit moment valt ca. 2 s na het tijdstip t_0 .

Figuur 5.4.19 en 5.4.20 geven een beeld van het waterstandsverloop tijdens de proef met golfaanval (T4). Deze geven respectievelijk een detailontwikkeling na 1 minuut en na 10 minuten voor de aanstroomraaien A t/m D. Tevens is in de figuren het verloop van de tijdsgemiddelde waterstand gegeven (zie middelingsprocedure; paragraaf 6.1).

5.5 Snelheden

De snelheden zijn gemeten in een 7-tal punten, verdeeld over de 4 aanstroomraaien (A t/m D).

Voor raai A t/m C zijn er twee punten in de verticaal beschikbaar.

Bij de verwerking van de snelheidssignalen is eerst een na-calibratie ('nullen') van de signalen uitgevoerd. Hiervoor werd gebruikt gemaakt van de aanloophase van de proeven

($0 < t < t_0$). Elk signaal werd, waar nodig, gecorrigeerd met de gemiddelde waarde van dit signaal gedurende deze periode. Elke snelheidsmeter geeft nu dus een (tijdsgemiddelde) snelheid $u = 0,00$ m/s voor $t < t_0$.

De resultaten van shm1 t/m shm7 zijn voor de proeven T1 t/m T7 gegeven in de Figuren 5.5.01 t/m 5.5.16. In alle gevallen zijn zowel momentane waarnemingen (de puntjes) als tijdsgemiddelde waarden gegeven (de stippellijnen; zie middelingsprocedure; paragraaf 6.1).

In sommige gevallen is, met name in raai D, de snelheid (tijdelijk) ongedefinieerd als gevolg van het droogvallen van het meetinstrument (zie ook paragraaf 5.4). In deze gevallen is het verloop van de tijdsgemiddelde waarde dan ook (tijdelijk) onderbroken.

Verder is met name bij het signaal van raai D het tijdstip t_0 (begin van de overstroming) duidelijk te herkennen aan een plotselinge toename van de snelheid.

Bij proef T4 (Figuur 5.5.07 en 5.5.08) is in de beginfase de tijdsgemiddelde snelheid negatief als gevolg van de onder (brekende) golven aanwezige retourstroom.

De snelheden welke zijn gemeten met een golfrichtingsspreadingmeter (shm6 en shm7) vertonen, vermoedelijk als gevolg van een bij afnemende indompelingsdiepte verlopemde ijking, soms onwaarschijnlijke tendensen. Voor raai B en C zou de snelheid onder in de verticaal groter zijn dan bovenin. Omdat de hierdoor gemaakte fouten niet in significante mate bleken door te werken in de debietberekening (zie volgende hoofdstuk) is hiervoor niet gecorrigeerd.

De snelheden in de aanstroomraaien lopen op tot 1,5 à 2,0 m/s. De snelheden t.p.v. de kruin zijn nog groter vanwege de hier sterk afnemende waterdiepte. De hier optredende snelheden bedragen maximaal 2,5 à 3,5 m/s (proef T1 na 5 minuten).

Een nadere verwerking van deze snelheden met betrekking tot de snelheidsverticalen en de dieptegemiddelde snelheid is gegeven in Hoofdstuk 6.3. In Hoofdstuk 6.4 worden vervolgens de debieten berekend.

5.6 Pakkingsdichtheid

Voorafgaand aan elke proef werd op twee posities door middel van een steekring een zandmonster genomen. Na weging van de gedroogde monsters is de dichtheid ρ bepaald door het gewicht van het monster te delen op het steekringvolume, zijnde 100 cm^3 . Gegeven deze dichtheid is het poriënpercentage p vervolgens berekend uit:

$$p = \frac{\rho_k - \rho}{\rho_k} 100\% \quad (5.1)$$

Hierbij is voor het soortelijk gewicht van het korrelmateriaal uitgegaan van $\rho_k = 2650 \text{ kg/m}^3$.

De resultaten met betrekking tot de aldus berekende pakkingsdichtheid zijn samengevat in Tabel 5.6.

Proef	Positie [m]	Poriëngehalte [%]	Opmerkingen	
T1	36,0	42,1	Asserzand: (vaste pakking) gemiddeld (42,6 ± 1,2) %	
	37,5	43,5		
T2	34,0	41,6		
	36,0	41,4		
T3	33,5	43,3		
	36,5	41,9		
T4	31,5	42,4		
	36,2	44,8		
T5	35,0	40,2		Duinzand: (vaste pakking) gemiddeld: (38,7 ± 2,1) %
	36,0	37,9		
T5A	35,0	42,0		
	36,0	36,9		
T6	34,0	36,5		
	36,0	38,5		
T7	35,0	45,1	(met lossere pakking): gemiddeld: (44,8 ± 0,5) %	
	36,0	44,4		

Tabel 5.6 Overzicht resultaten pakkingsdichtheid

Er is een verschil in (gemiddelde) pakking tussen het fijne Asserzand en het grovere duinzand, respectievelijk 42,6 en 38,7%. Dit sluit aan bij gangbare formuleringen waarbij het poriëngehalte toeneemt met afnemende korreldiameter. Effecten van mate van uniformiteit (D_{90}/D_{10}) en/of de hoekigheid van het materiaal spelen hierbij ook een rol.

Het effect van de wijze van verdichten (onder water aanbrengen: het zgn. 'slempen') komt tot uitdrukking in het verschil tussen de pakking van het profiel van een proef met los gepakt materiaal (T7) en een met normale (vaste) pakking (T5/T5A/T6). Het poriënvolume wordt hierdoor gereduceerd met 13,6% van 44,8% tot 38,7%.

Bij vergelijking van deze percentages met die van andere metingen blijkt onder natuurlijke omstandigheden het poriënpercentage 42,6% te bedragen (gemiddelde van 257 waarnemingen bij Egmond aan Zee [WL-M1263-III^a, 1982]). Ter verdere vergelijking zijn bij duinafslagproeven in de Deltagoot voor aanvang van de proeven percentages gemeten tussen 40,3% (strand) en 44,5% (duinfront), terwijl er na afloop ter plaatse van de afzetting (afslagprofiel) $p = 38,5\%$ gemeten is [WL-H0298-I, 1987].

Ter nadere informatie: de theoretisch, maximale porositeit voor uniform, bolvormig materiaal bedraagt $p_{\max} \approx 47,64\%$ ($= 1 - \pi/6$). De kleinste, theoretisch, haalbare porositeit bedraagt $p_{\min} \approx 25,95\%$

5.7 Zeefanalyse

De gestoken zandmonsters zijn tevens aan een zeefanalyse onderworpen. De resultaten hiervan zijn samengevat in Tabel 5.7.

Proef	D ₁₀ [μm]	D ₅₀ [μm]	D ₉₀ [μm]	D ₉₀ /D ₁₀	Opmerkingen
T1	64	101	157	2,45	Asserzand
T2	73	107	148	2,03	D ₁₀ = 69 [μm] D ₅₀ = 105 [μm] D ₉₀ = 155 [μm]
T3	66	104	166	2,52	
T4	72	106	149	2,07	D ₉₀ /D ₁₀ = 2,25
T5	154	220	297	1,93	Duinzand
T5A	152	216	293	1,93	D ₁₀ = 153 [μm] D ₅₀ = 218 [μm] D ₉₀ = 294 [μm]
T6	153	218	295	1,93	
T7	153	216	292	1,91	D ₉₀ /D ₁₀ = 1,92

Tabel 5.7 Overzicht resultaten zeefanalyse

De gemiddelde D₅₀-waarde van het Asserzand (proeven T1 t/m T4) bedraagt 105 μm (categorie zeer fijn zand). Voor het duinzand geldt: D₅₀ = 218 μm (categorie fijn zand). Naast de natuurlijk afwijkende korreldiameter is er tevens sprake van een afwijkende steilheid van de korrelverdeling, waarbij het Asserzand een duidelijk minder uniforme korrelverdeling heeft.

5.8 Watertemperatuur

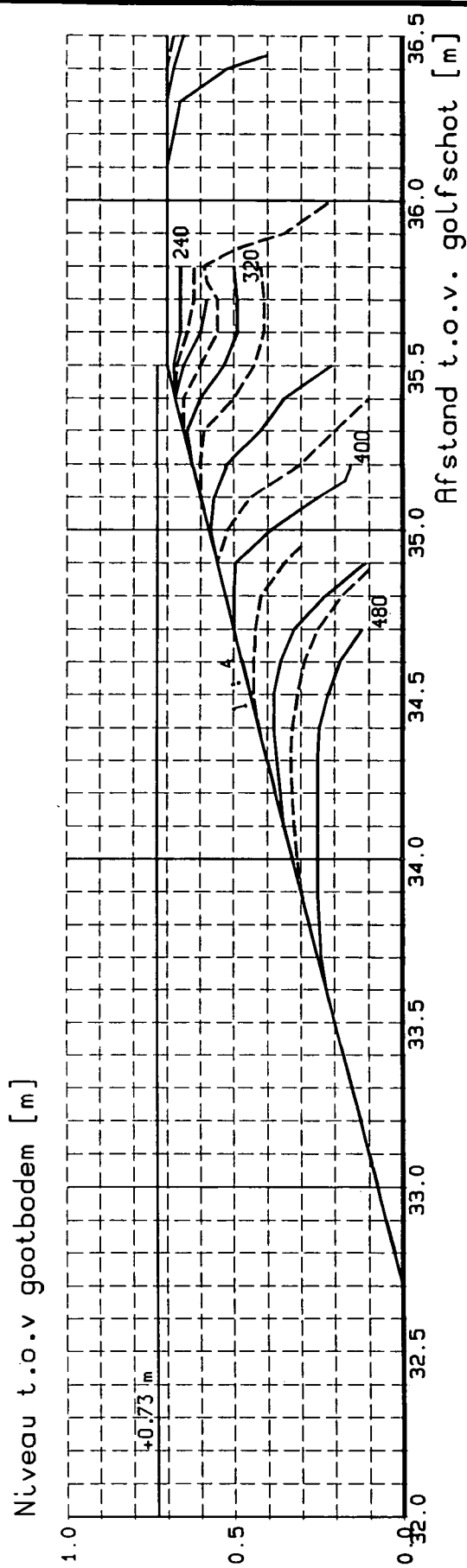
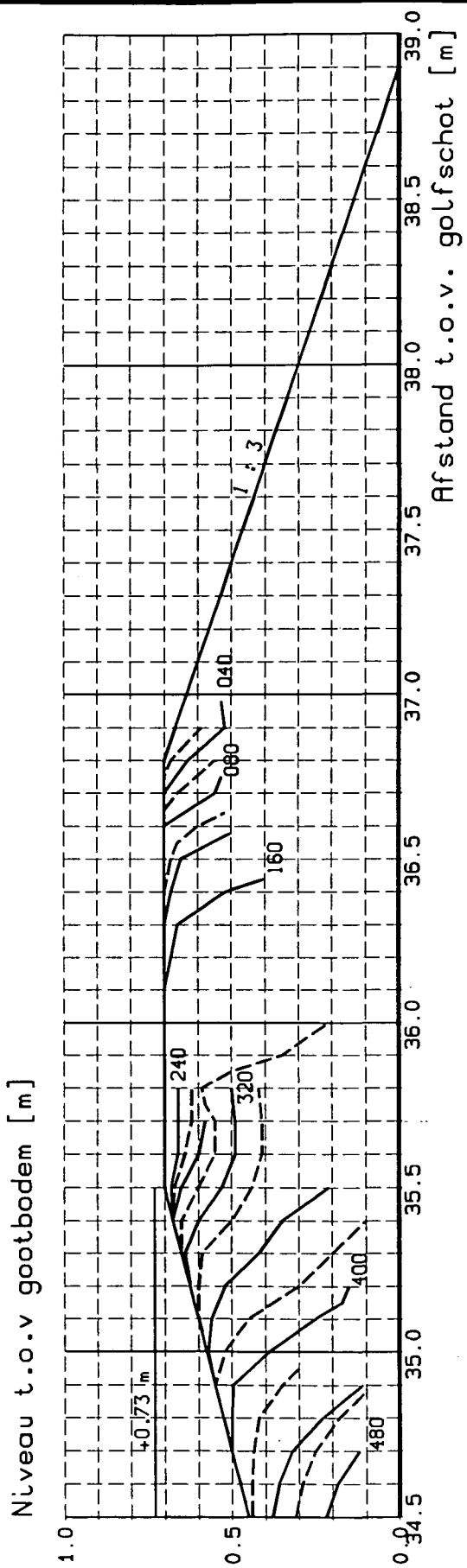
De watertemperatuur tijdens de proeven was nauwelijks aan variatie onderhevig. Deze bedroeg (18,0 ± 0,5)°C.

5.9 Valsnelheid

De valsnelheid van het zand, w_s, kan voor een watertemperatuur van 18°C worden berekend met behulp van de formule [WL-M1263-IV^b, 1983]:

$$\log(1/w_s) = 0,495 \cdot [\log(D_{50})]^2 + 2,41 \cdot \log(D_{50}) + 3,74 \quad (5.2)$$

Voor het Asserzand volgt hieruit w_s = 0,010 m/s. Voor het grovere duinzand: w_s = 0,028 m/s.



NB: Tijdstoppen (in s) t.o.v. start van overstroming.

ONTWIKKELING DWARSPROFIEEL
Overzicht momentane profielen

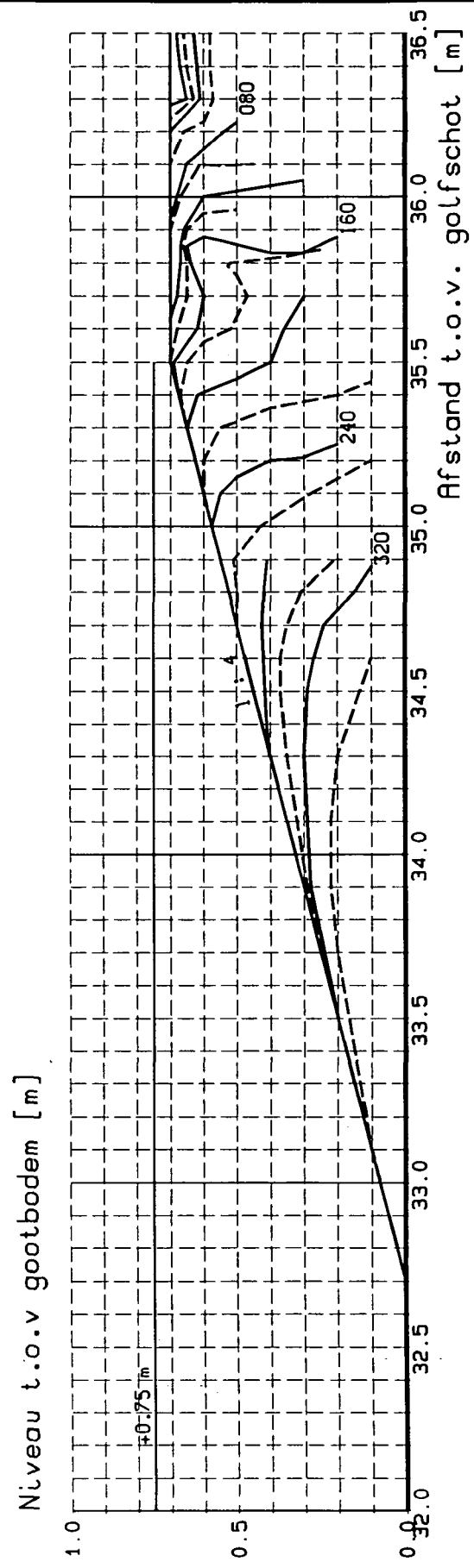
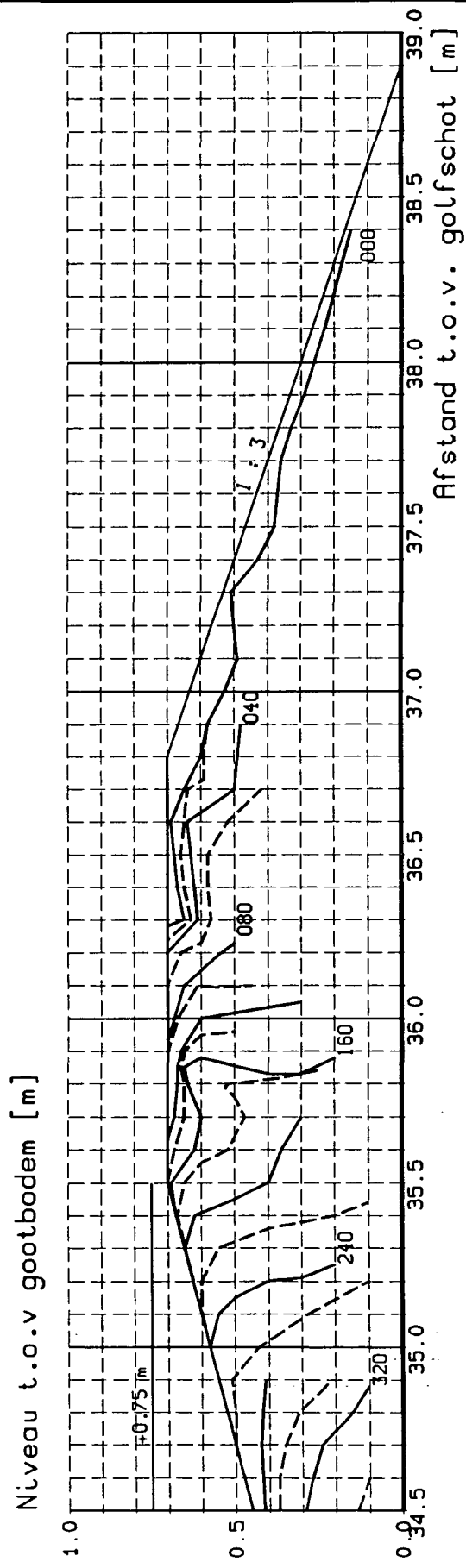
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

Proef. TO

Schaal 1 : 20

H1242-II

FIG.5.3.1

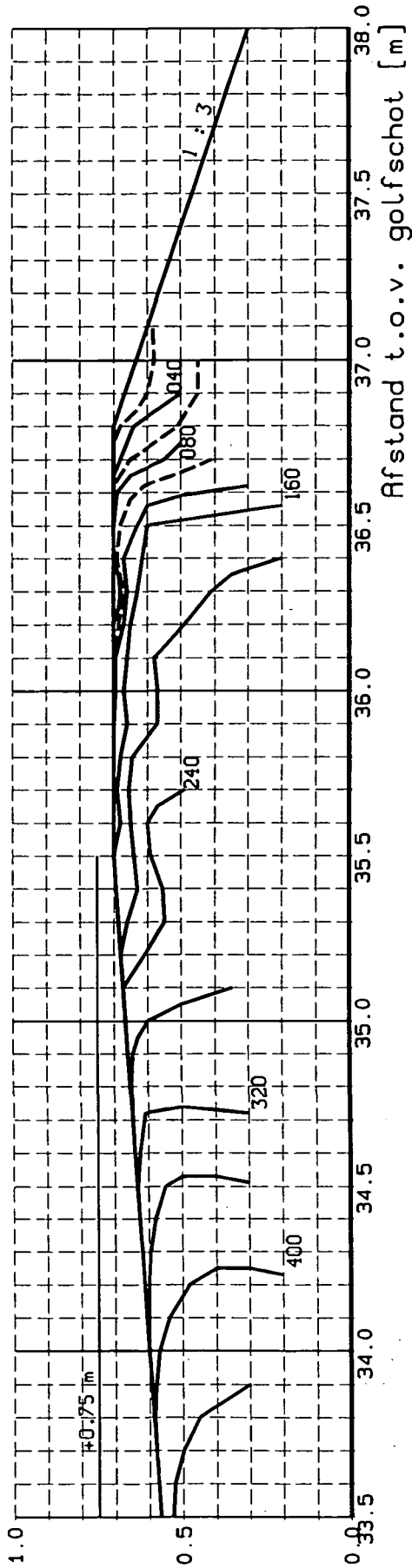


Let op: Voortijdige onderloopheid opsluitconstructie!
 Gegeven tijdstippen [in s] t.o.v. start bemonstering;
 Verwijdering opsluitconstructie op $t = 15$ s.

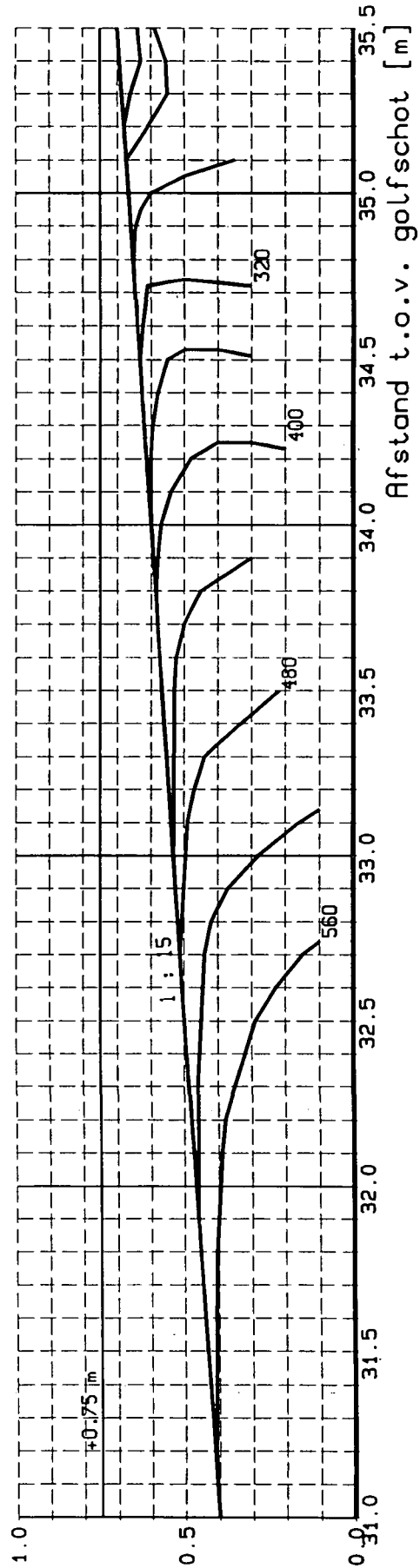
ONTWIKKELING DWARSPROFIEEL
 Overzicht momentane profielen

Proef T1	
Schaal 1 : 20	
H1242-II	FIG.5.3.2

Niveau t.o.v gootbodem [m]



Niveau t.o.v gootbodem [m]



NB: Tijdstoppen (in s) t.o.v. start van overstroming.

ONTWIKKELING DWARSPROFIEEL
Overzicht momentane profielen

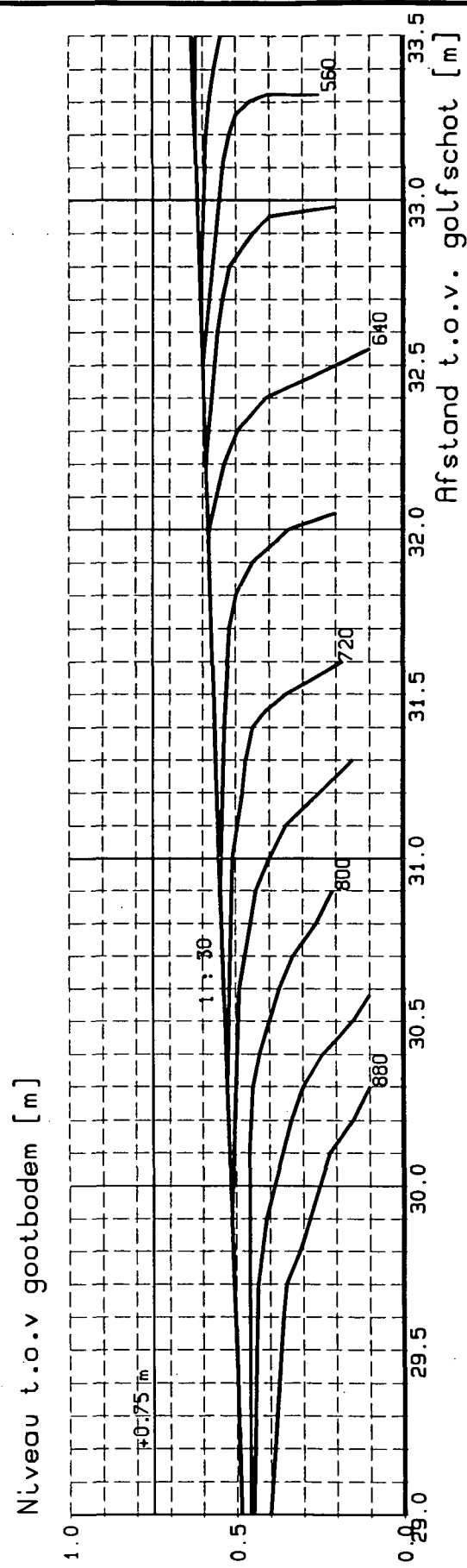
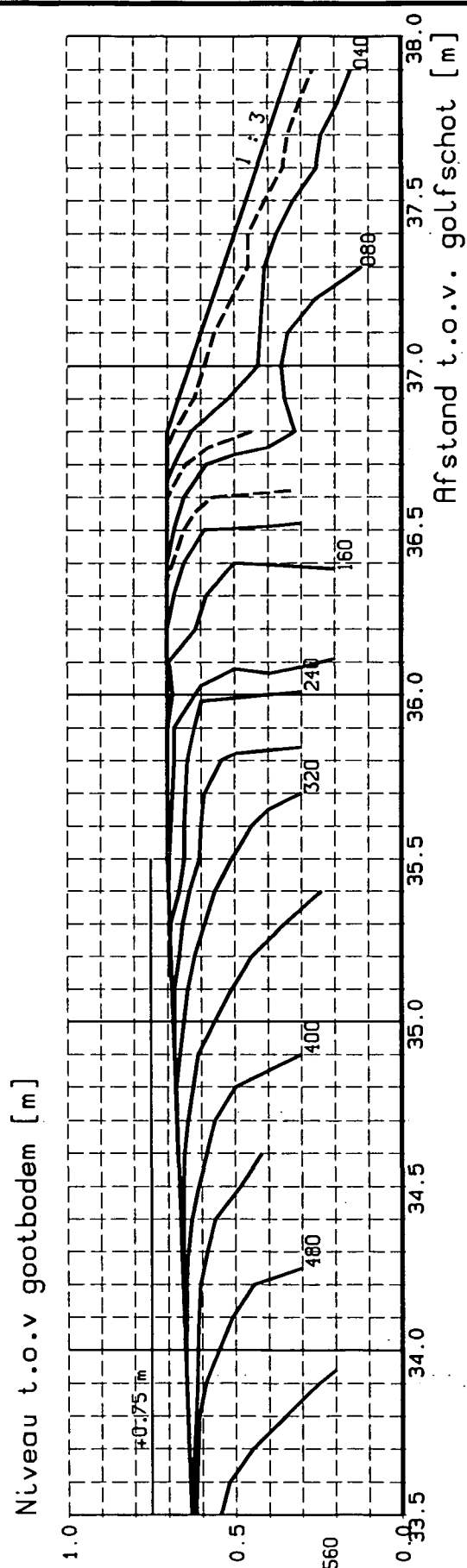
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

Proef T2

Schaal 1 : 20

H1242-II

FIG.5.3.3



NB: Tijdstoppen (in s) t.o.v. start van overstroming.

ONTWIKKELING DWARSPROFIEL
 Overzicht momentane profielen

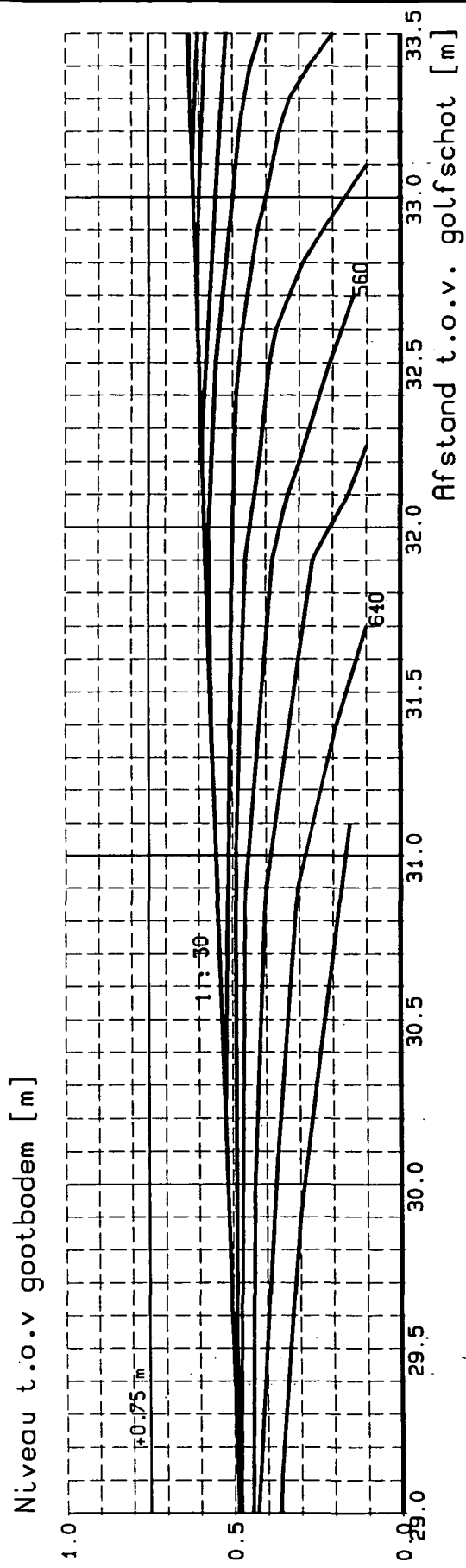
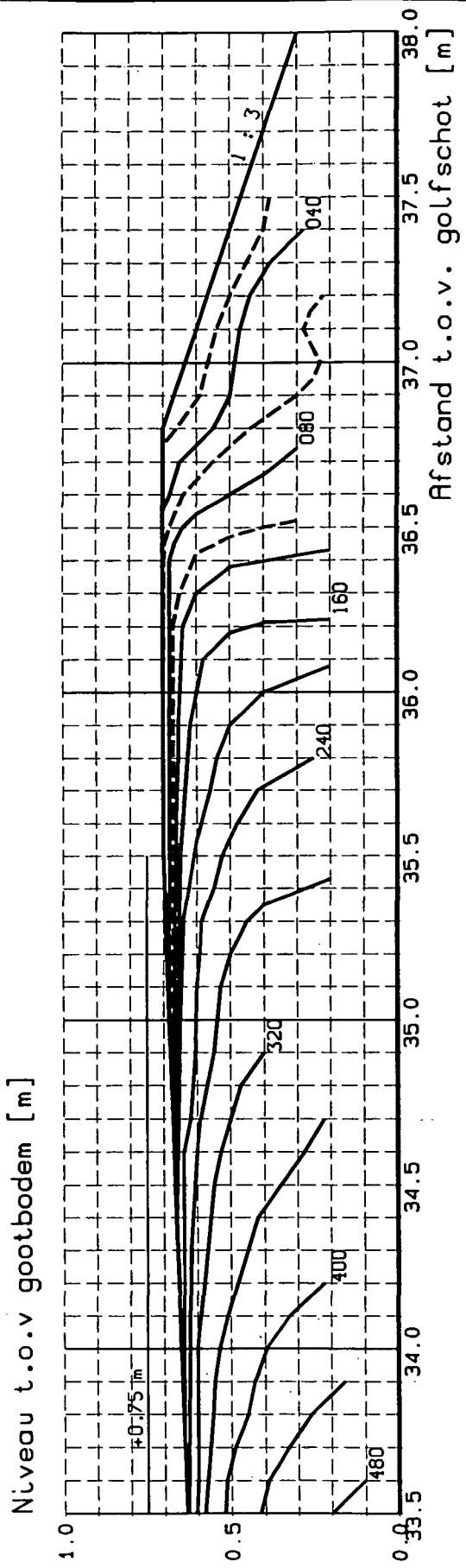
Proef T3

Schaal 1 : 20

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

H1242-II

FIG.5.3.4



NB: Tijdstoppen (in s) t.o.v. start van overstroming.

ONTWIKKELING DWARSPROFIEEL
Overzicht momentane profielen

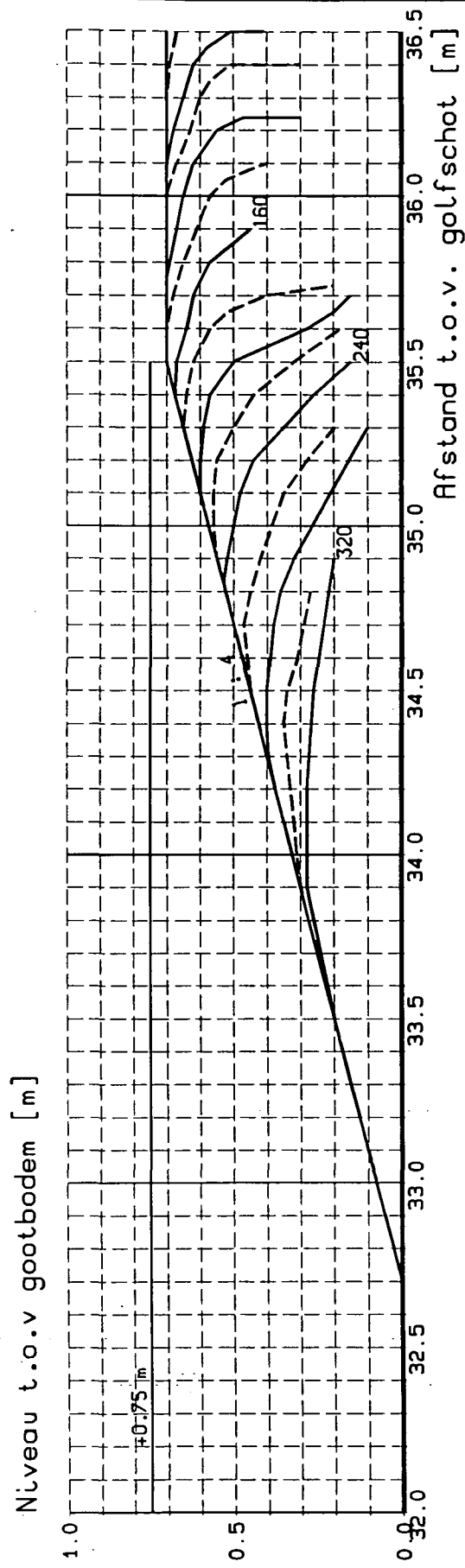
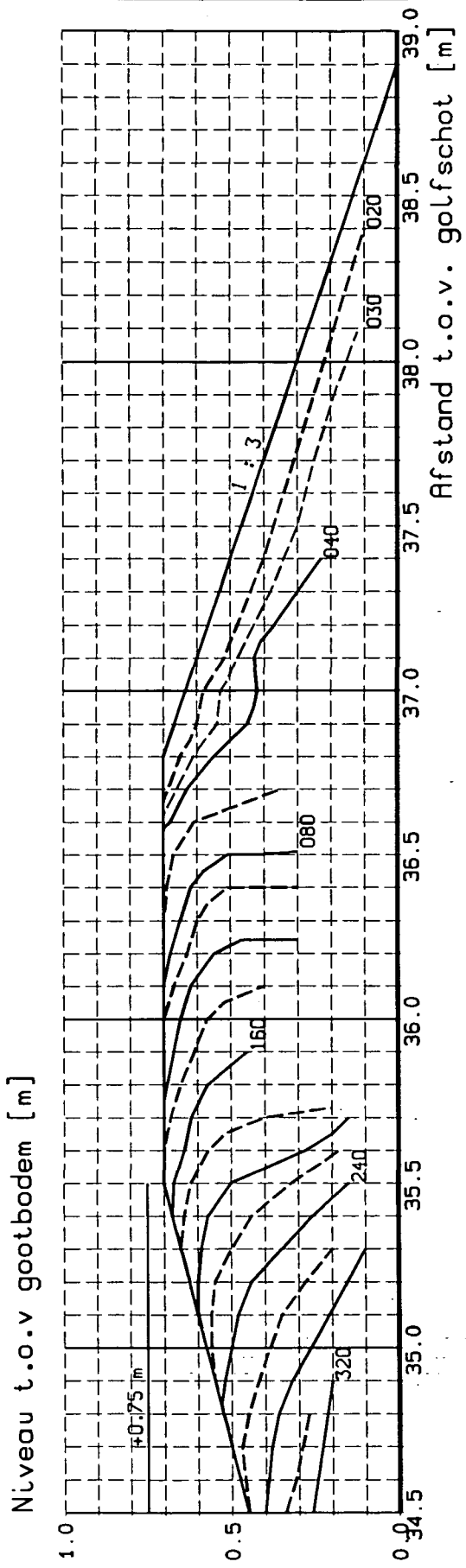
Proef T4

Schaal 1 : 20

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

H1242-II

FIG.5.3.5



NB: Tijdstippen (in s) t.o.v. start van overstroming.

ONTWIKKELING DWARSPROFIEL
Overzicht momentane profielen

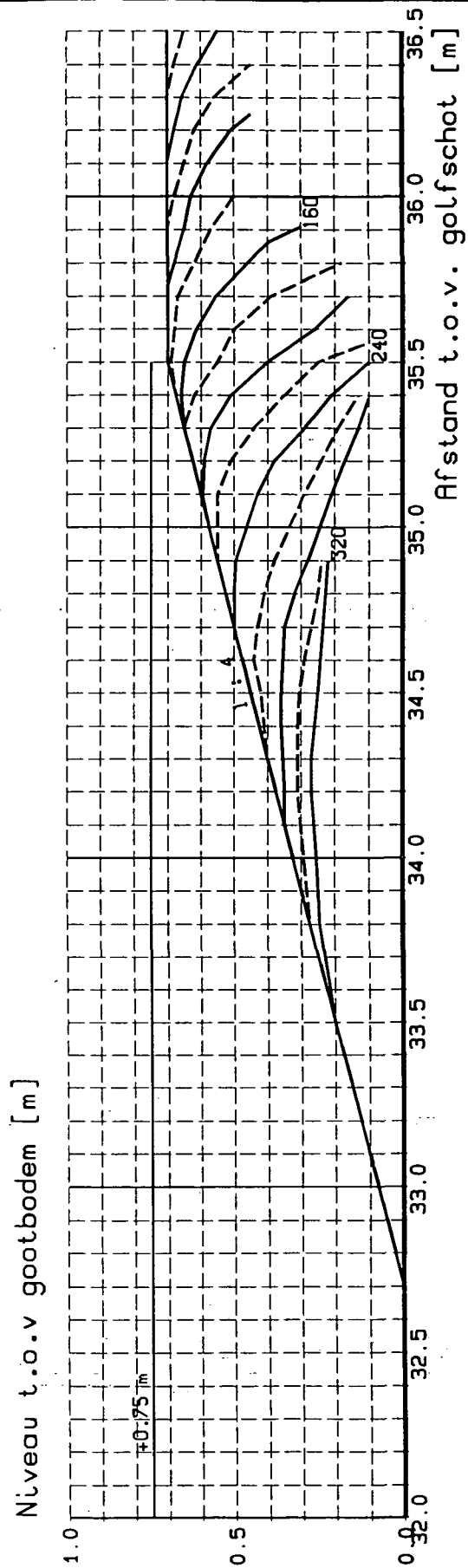
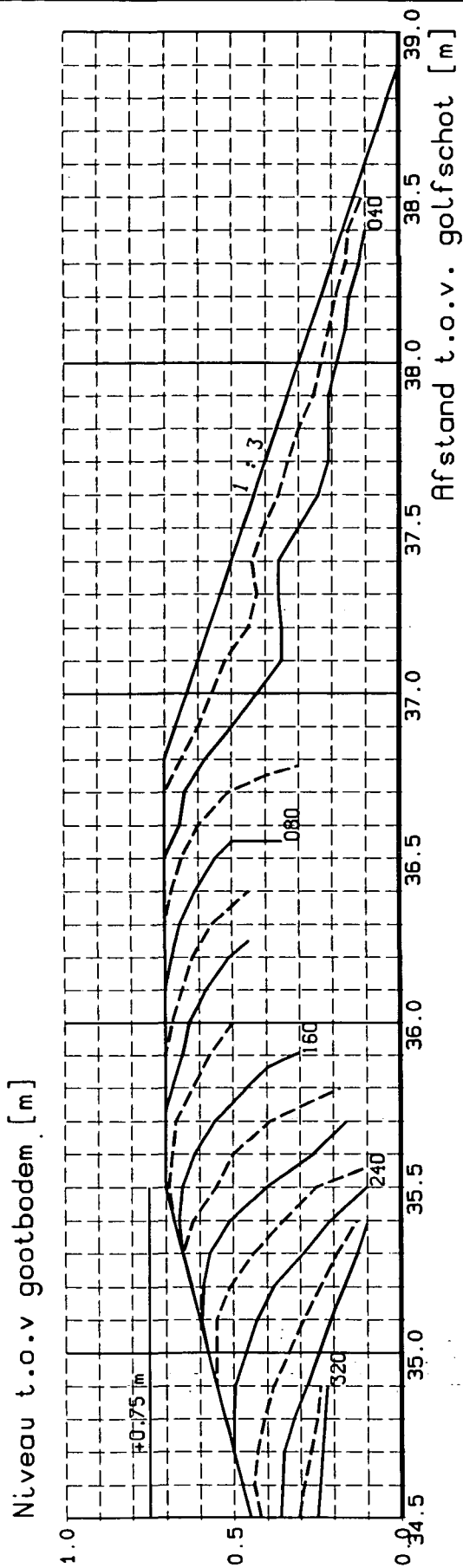
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

Proef T5

Schaal 1 : 20

H1242-II

FIG.5.3.6



NB: Tijdstoppen (in s) t.o.v. start van overstroming.

ONTWIKKELING DWARSPROFIEEL
Overzicht momentane profielen

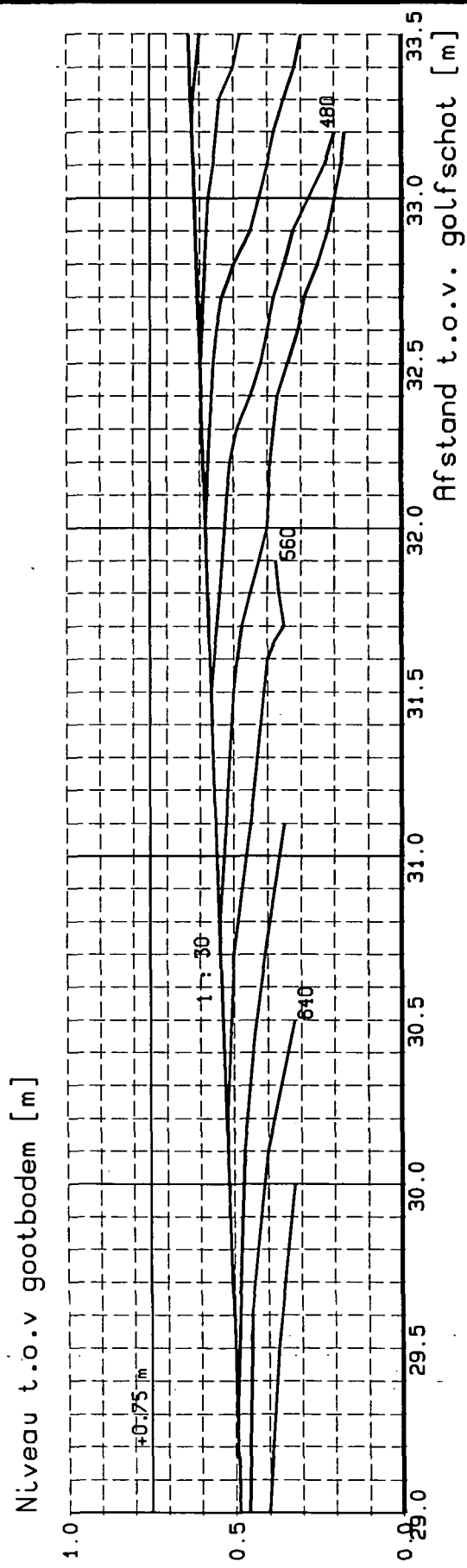
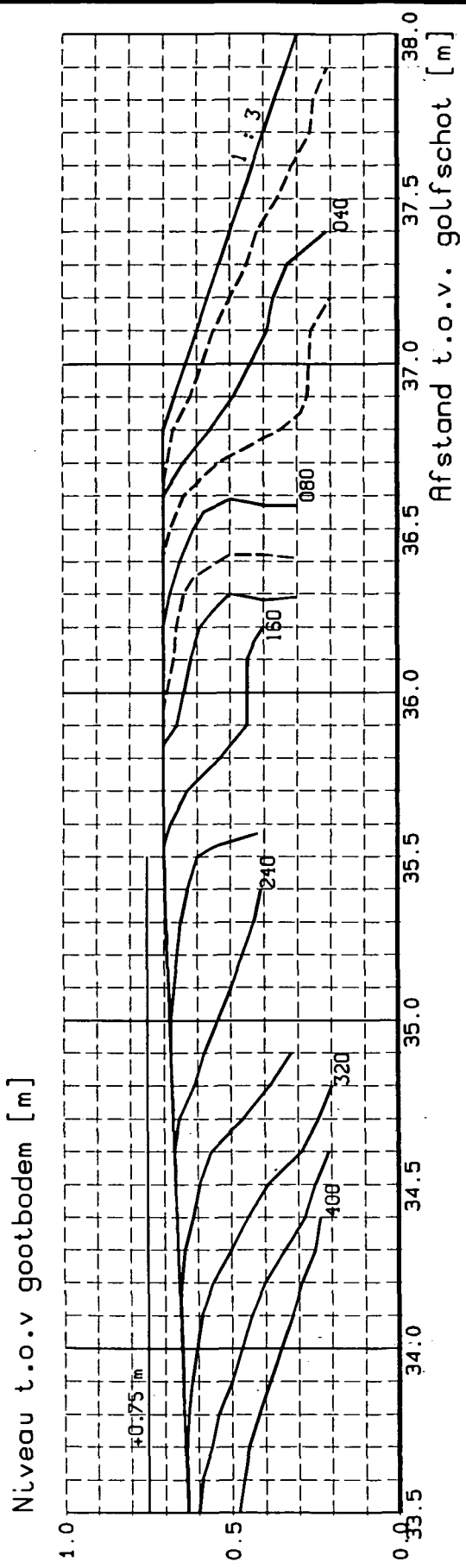
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

Proef T5A

Schaal 1 : 20

H1242-II

FIG.5.3.7



NB: Tijdstippen (in s) t.o.v. start van overstroming.

ONTWIKKELING DWARSPROFIEL
 Overzicht momentane profielen

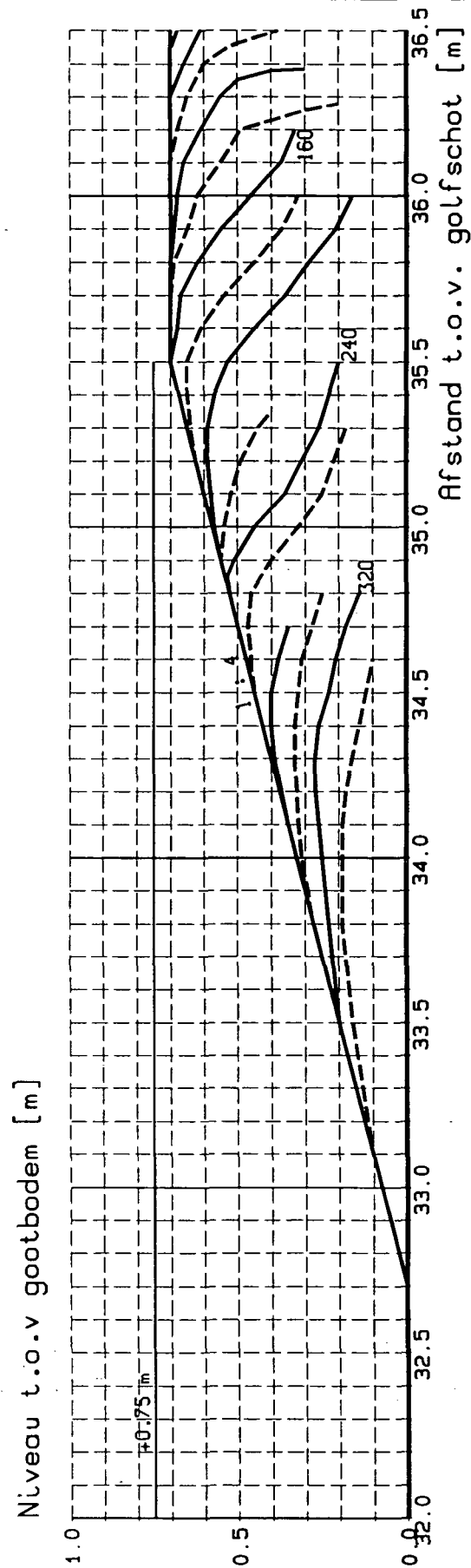
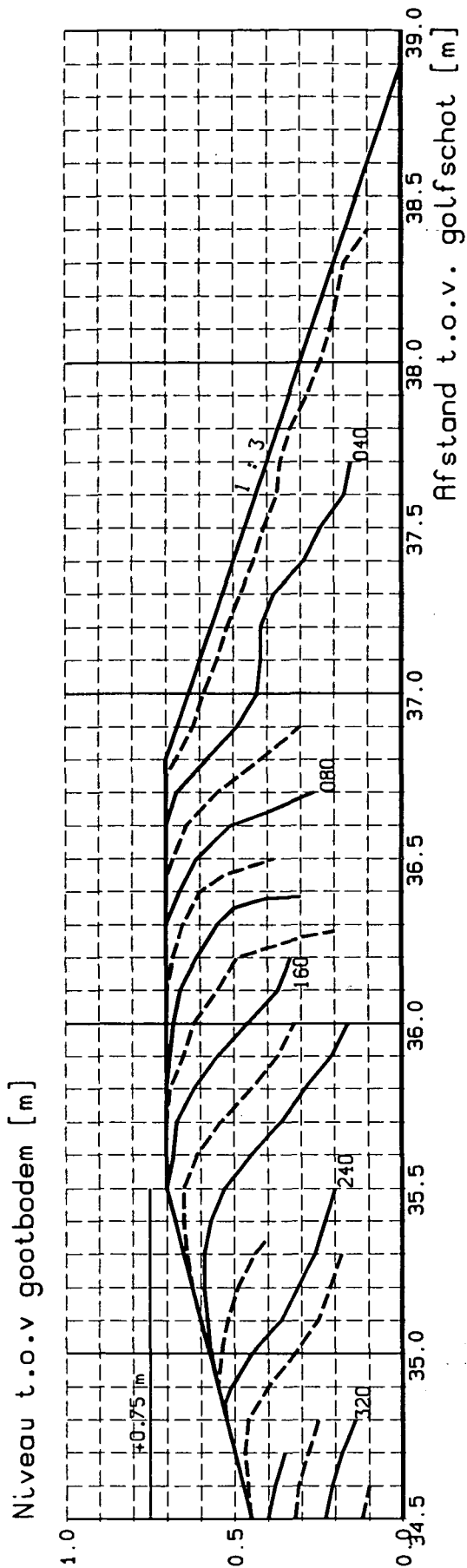
Proef: T6

Schaal 1 : 20

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

H1242-II

FIG.5.3.8



NB: Tijdstoppen [in s] t.o.v. start van overstroming.

ONTWIKKELING DWARSPROFIEEL
Overzicht momentane profielen

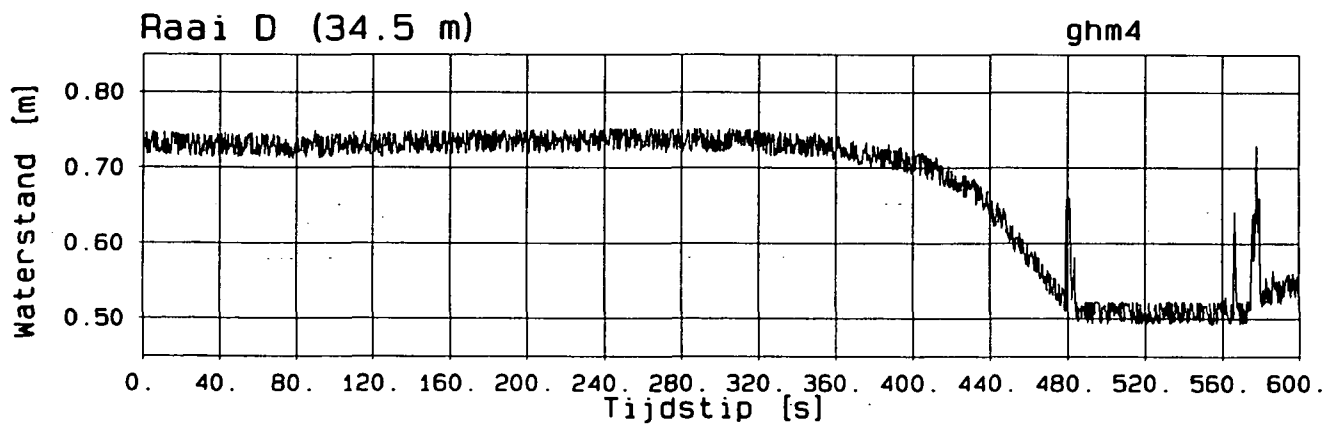
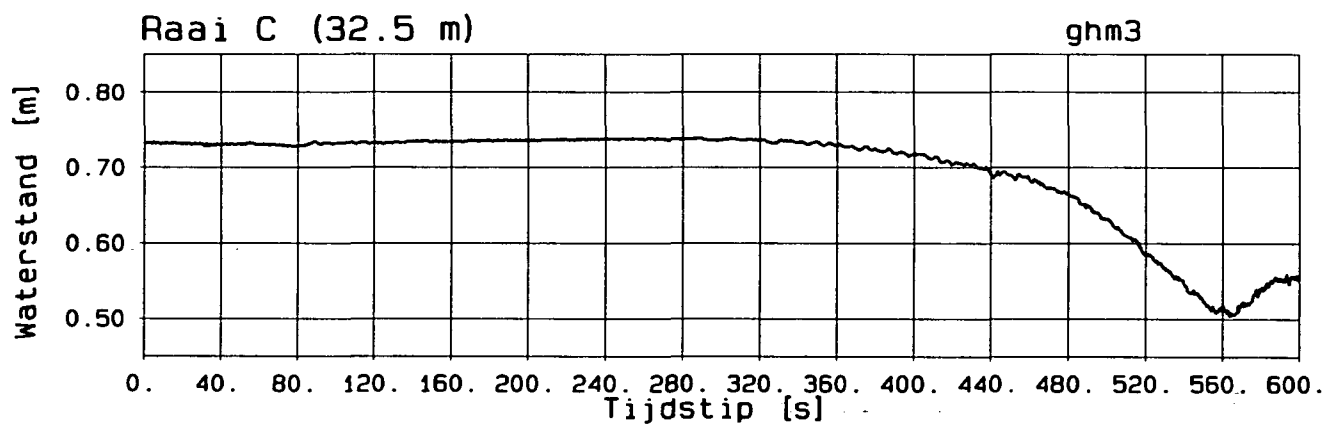
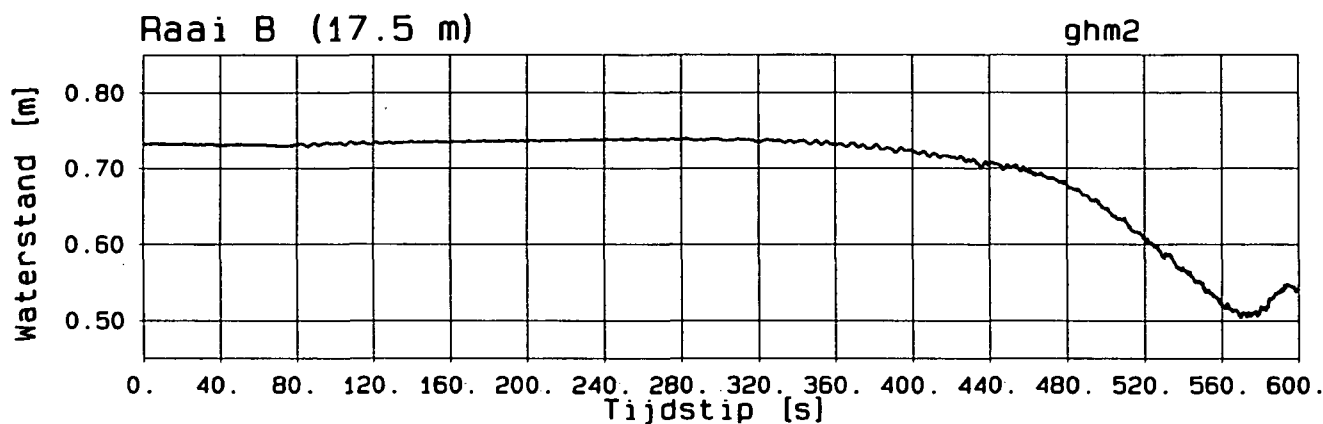
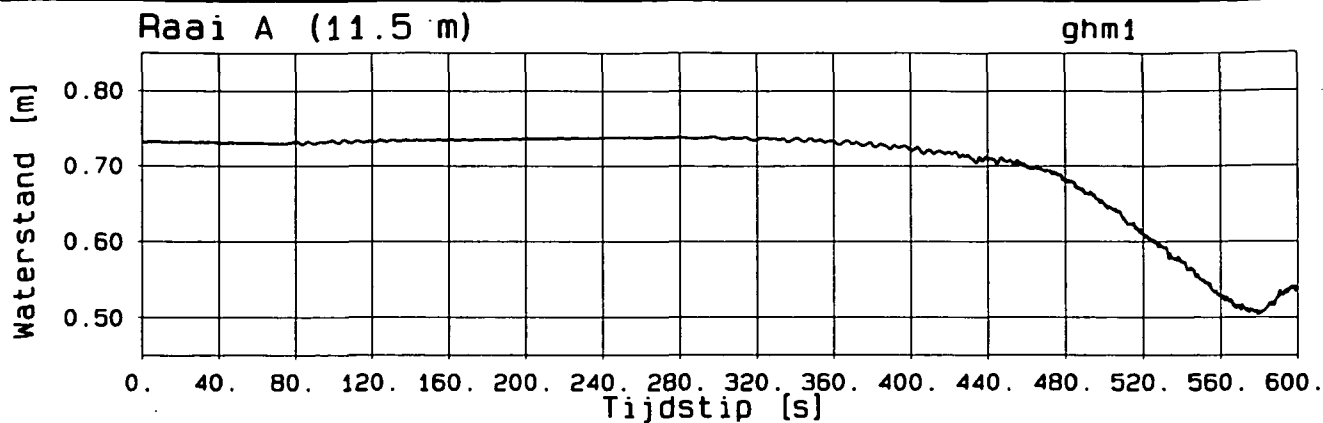
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

Proef I7

Schaal 1 : 20

H1242-II

FIG.5.3.9

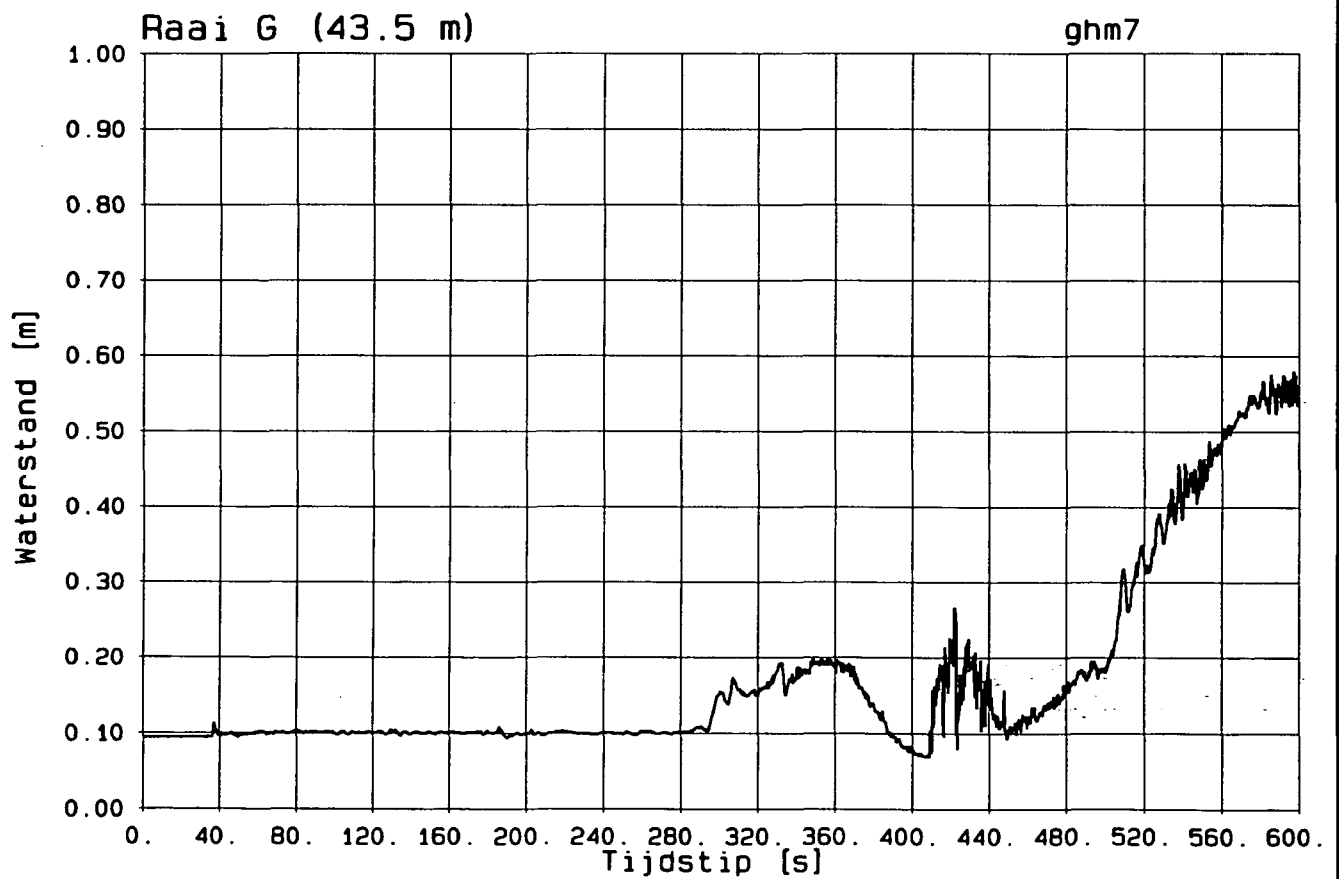
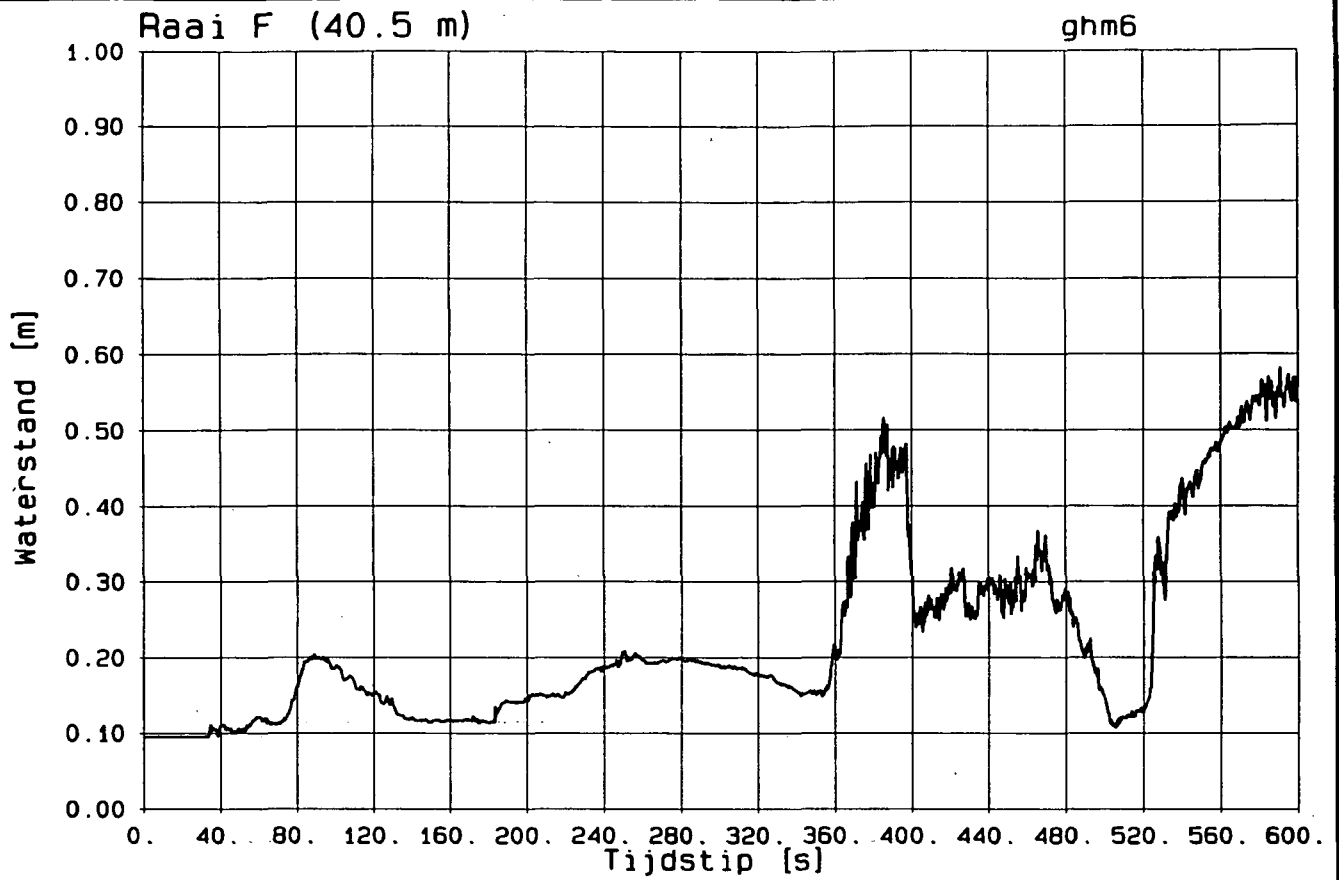


GEMETEN WATERSTANDSVERLOOP
Aanstroomraaien A t/m D

T0

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

H1242-II FIG.5401

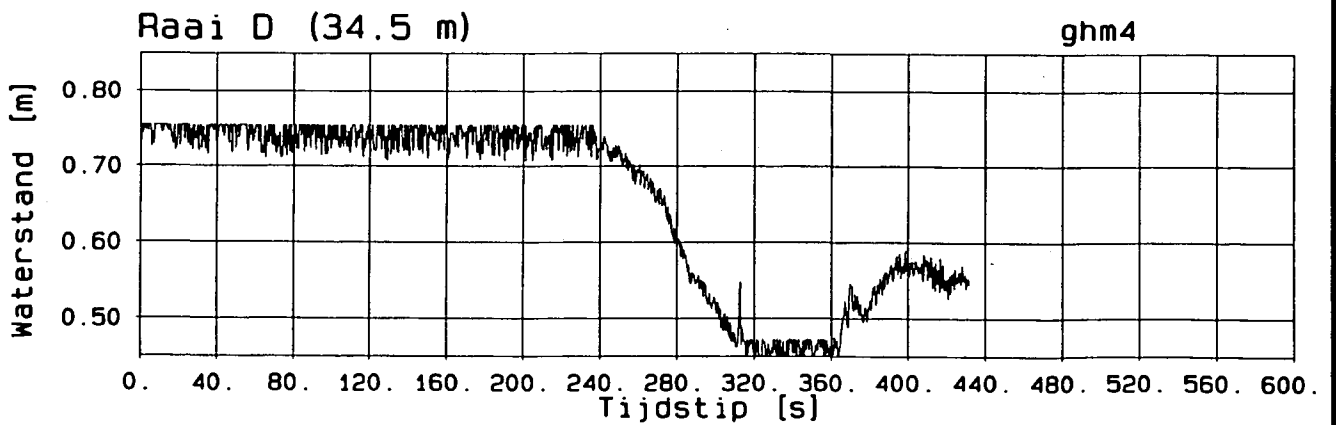
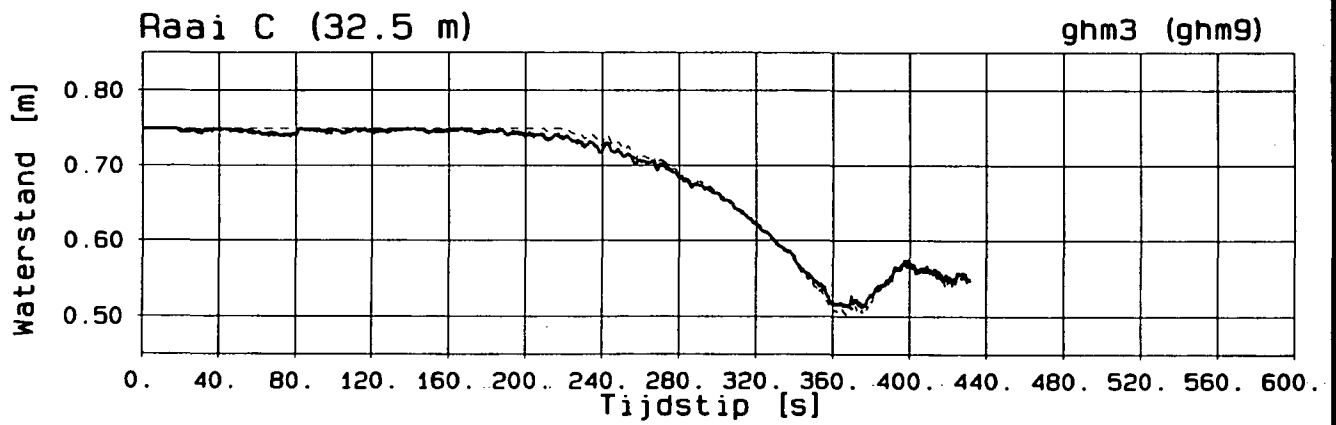
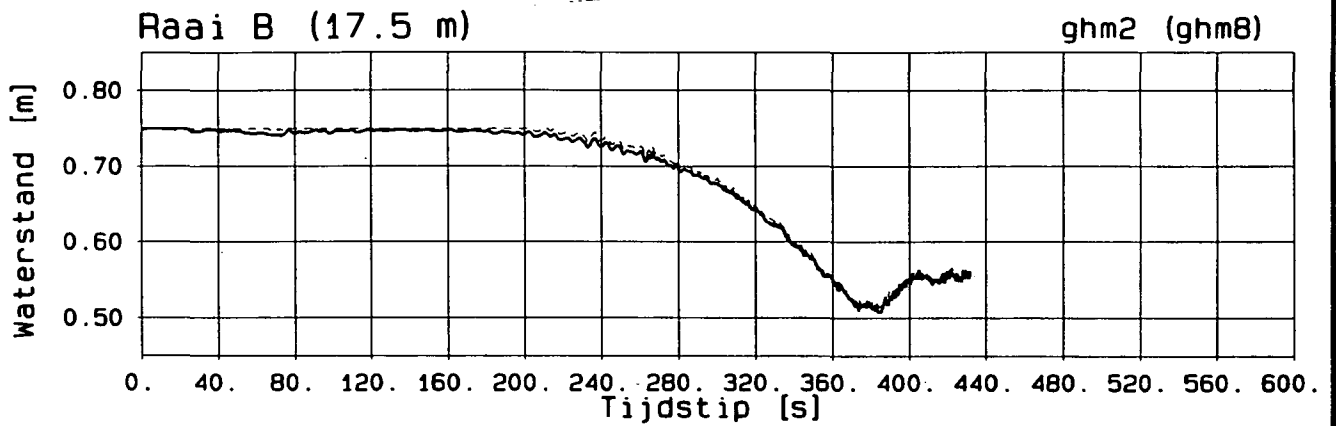
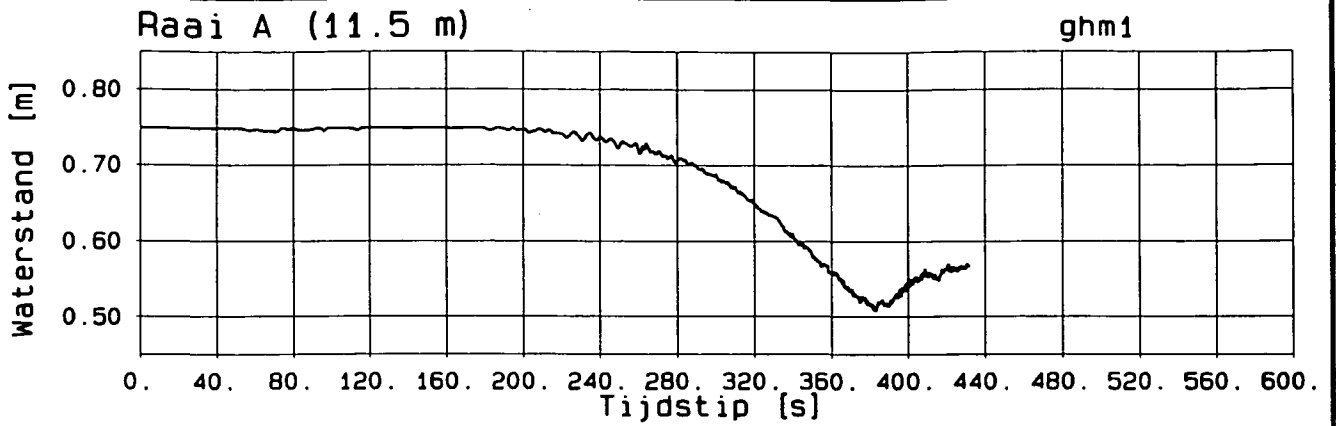


GEMETEN WATERSTANDSVERLOOP
 Afstroomraaien F en G

T0

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

H1242-II FIG. 5402

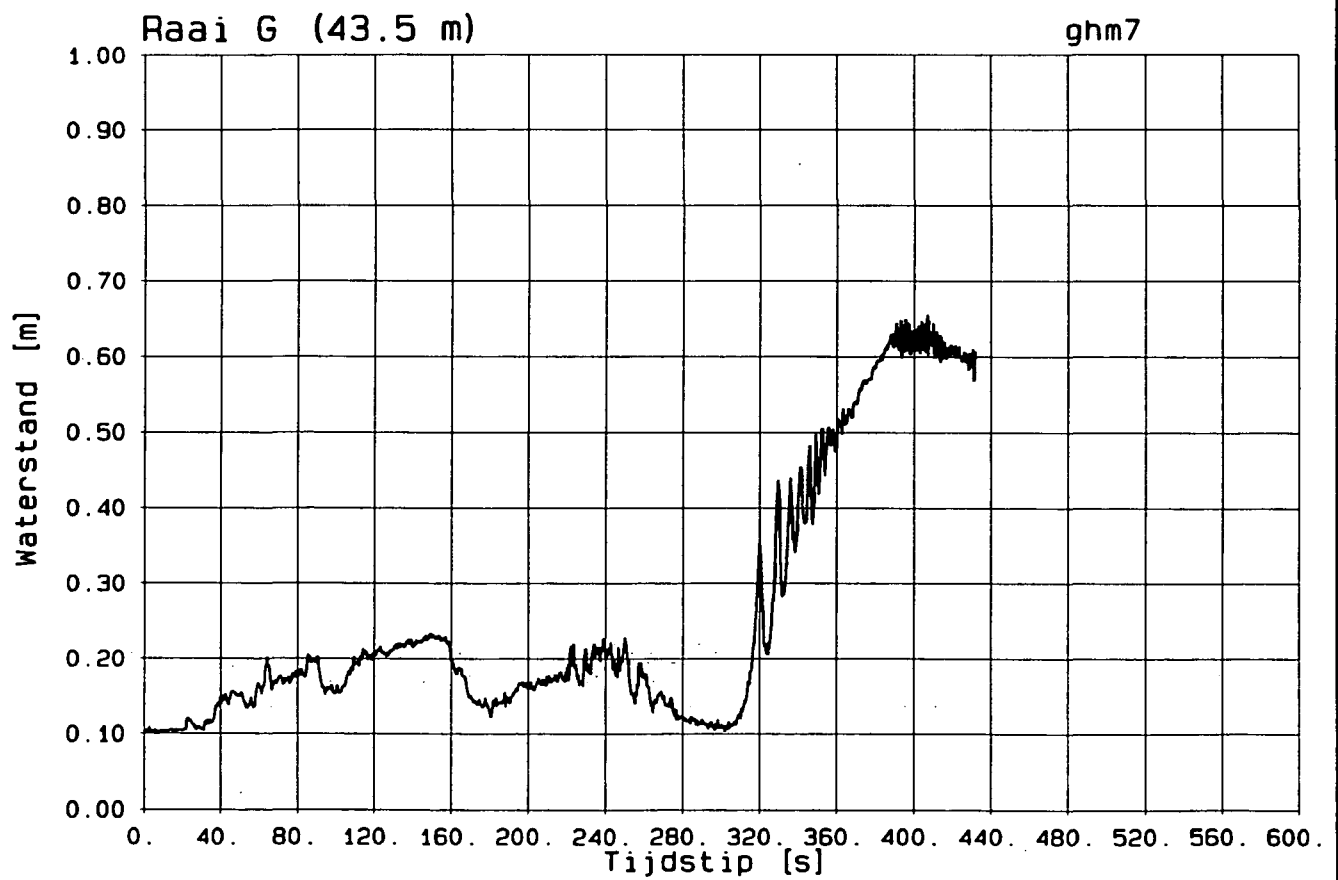
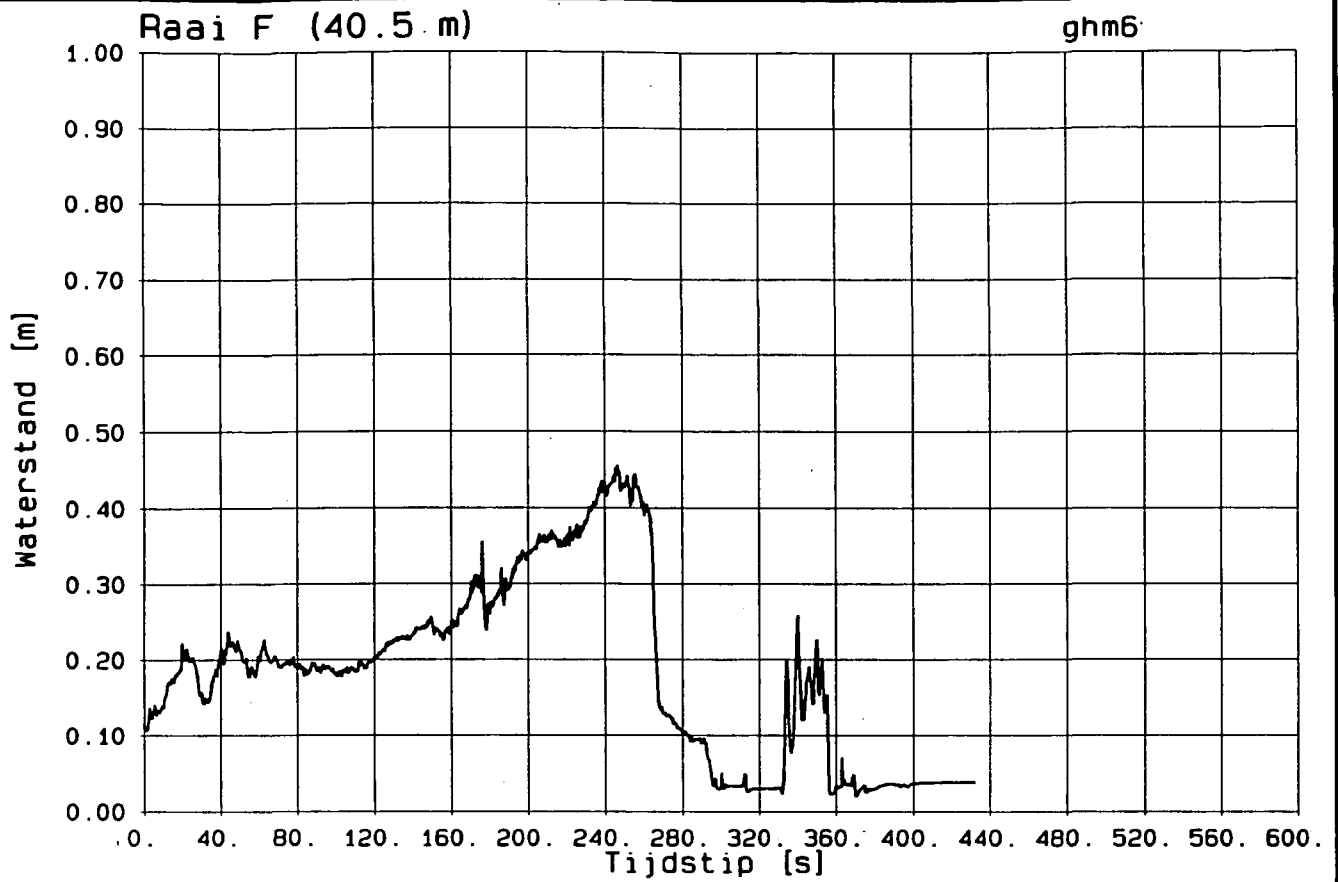


GEMETEN WATERSTANDSVERLOOP
Aanstroomraaien A t/m D

T1

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

H1242-II FIG.5403

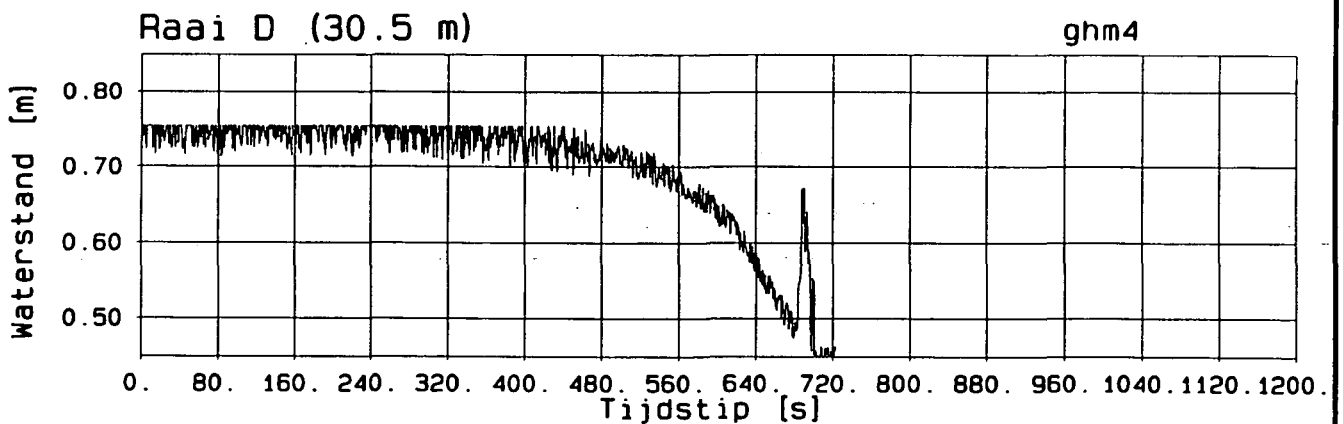
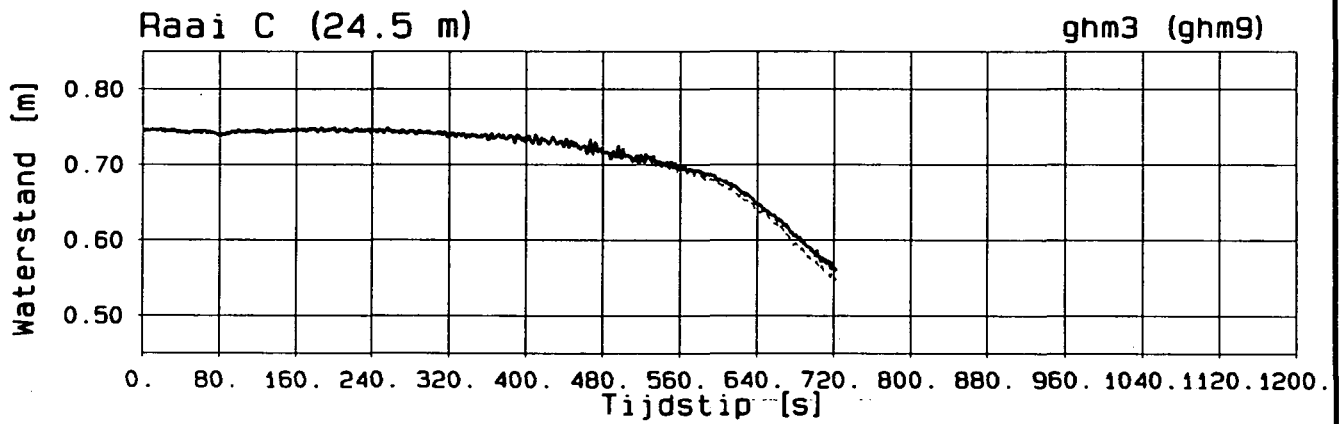
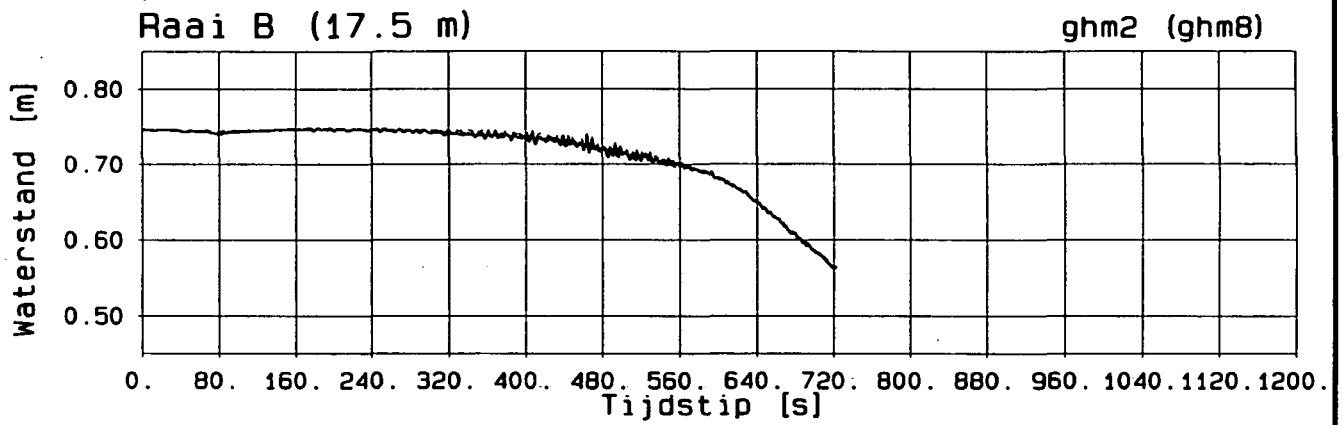
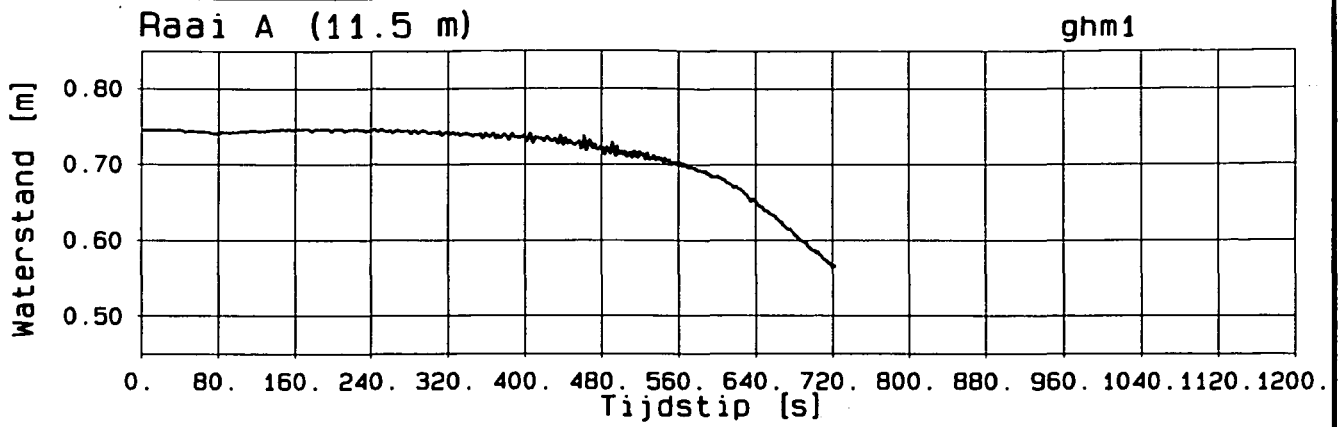


GEMETEN WATERSTANDSVERLOOP
 Afstroomraaien F en G

T1

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

H1242-II FIG.5404

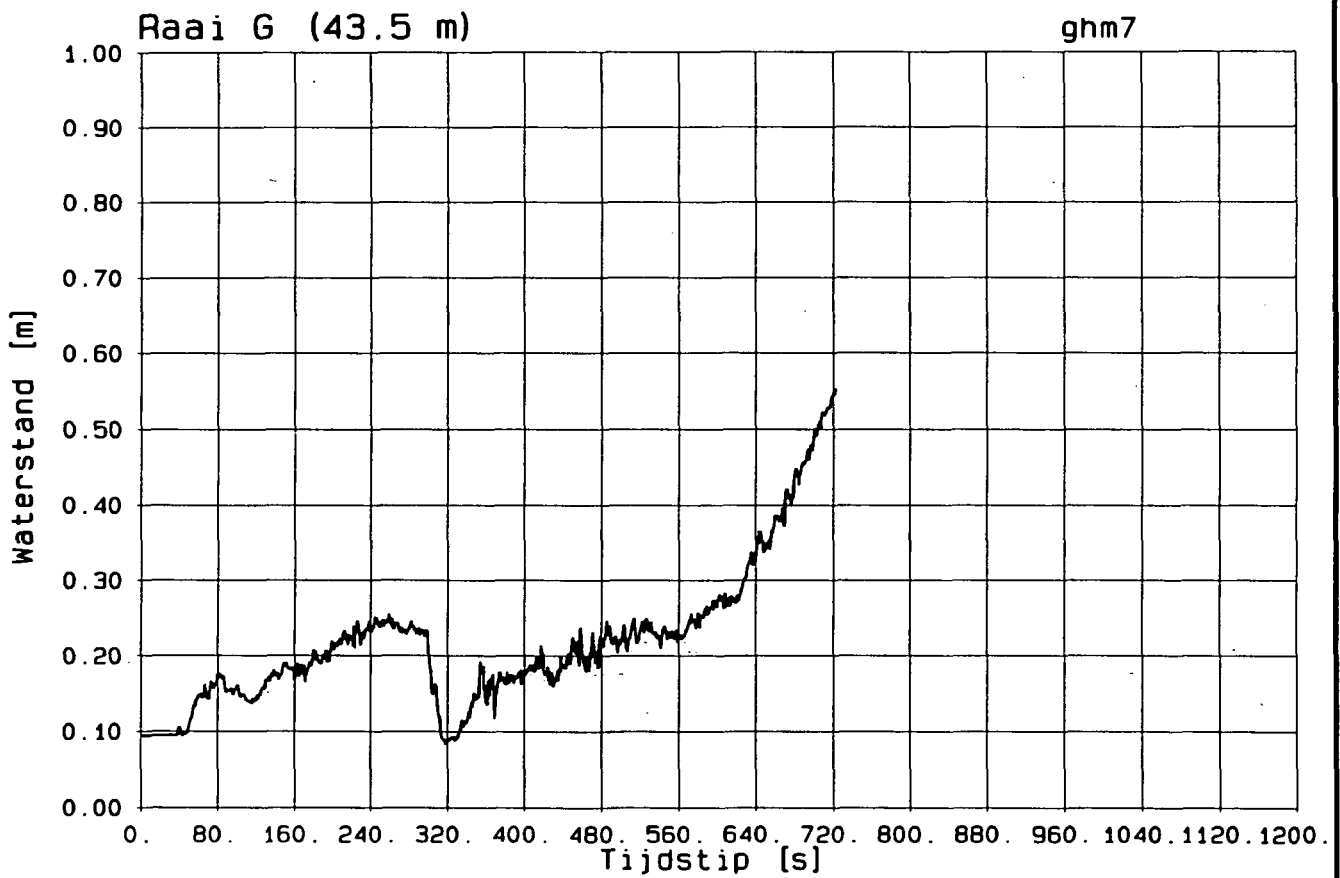
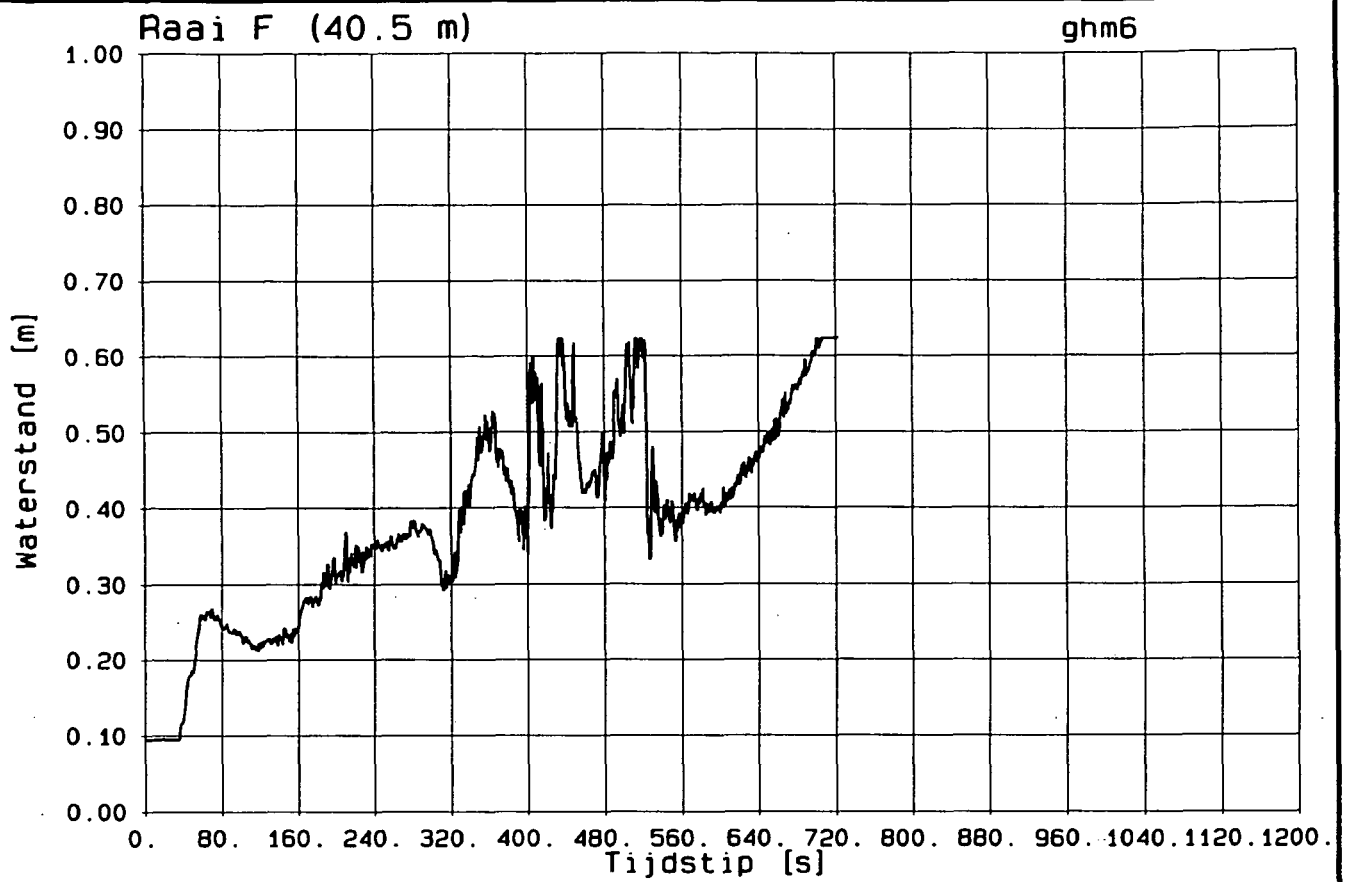


GEMETEN WATERSTANDSVERLOOP
Aanstroomraaien A t/m D

T2

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

H1242-II FIG.5405

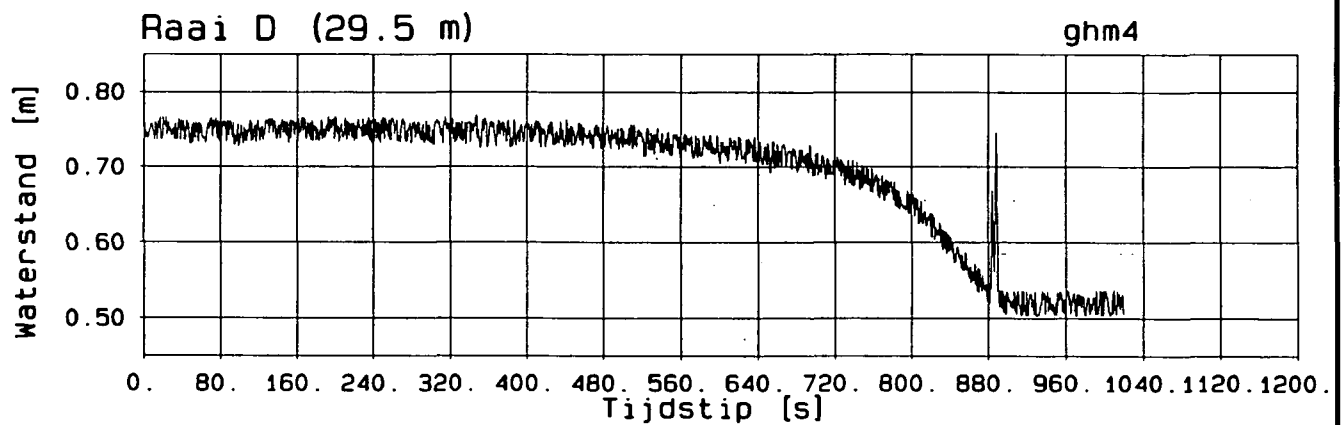
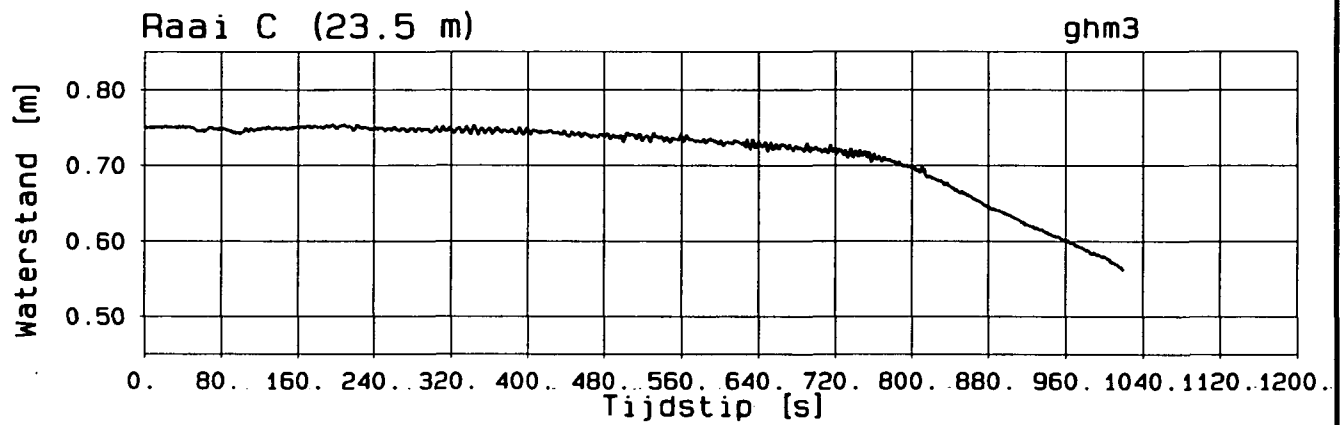
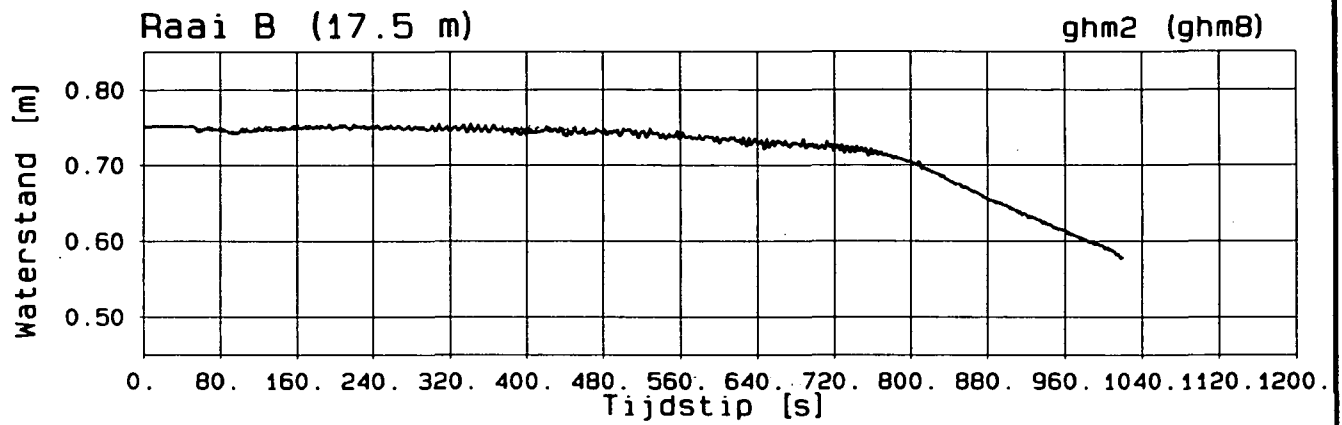
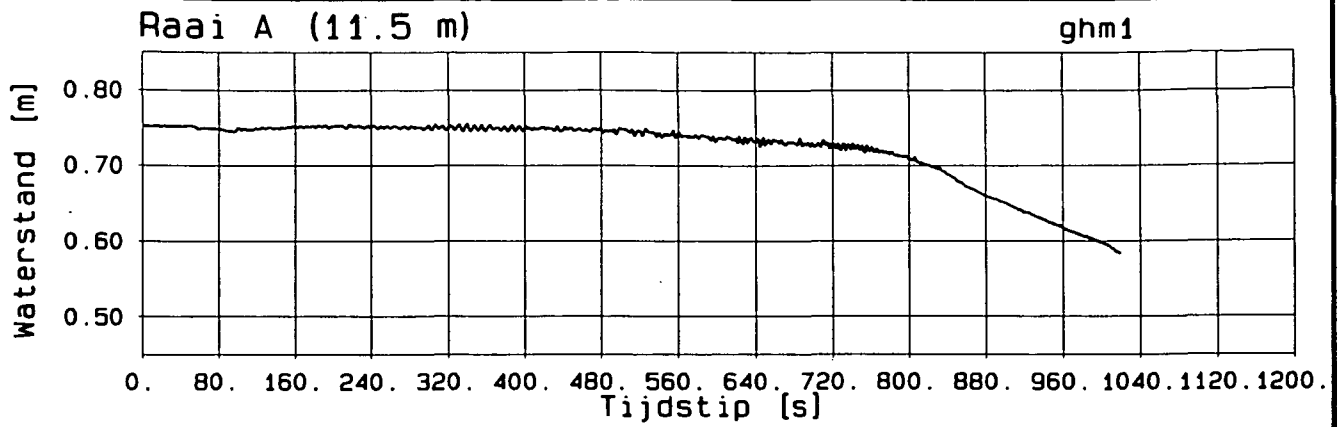


GEMETEN WATERSTANDSVERLOOP
 Afstroomraaien F en G

T2

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

H1242-II FIG.5406



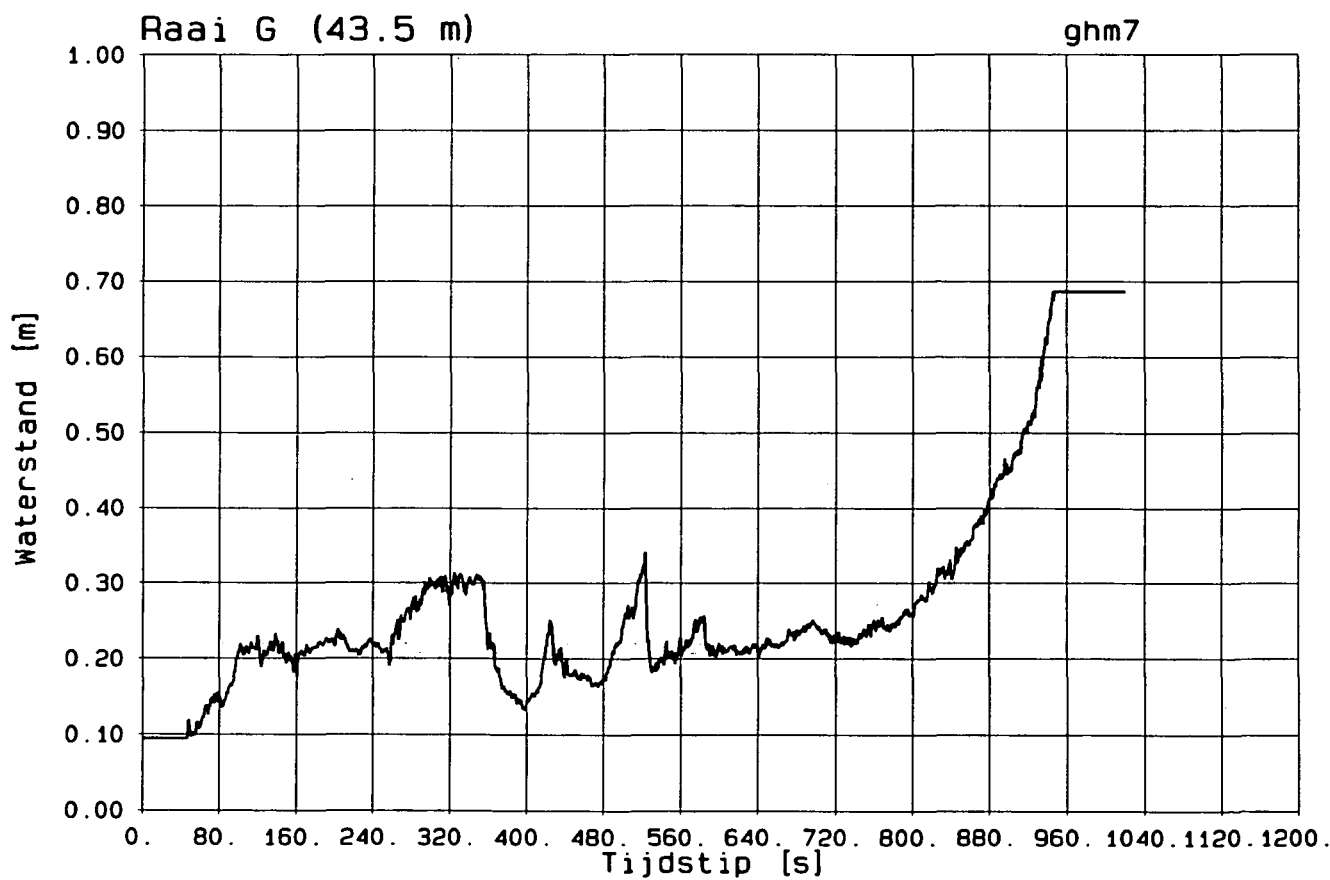
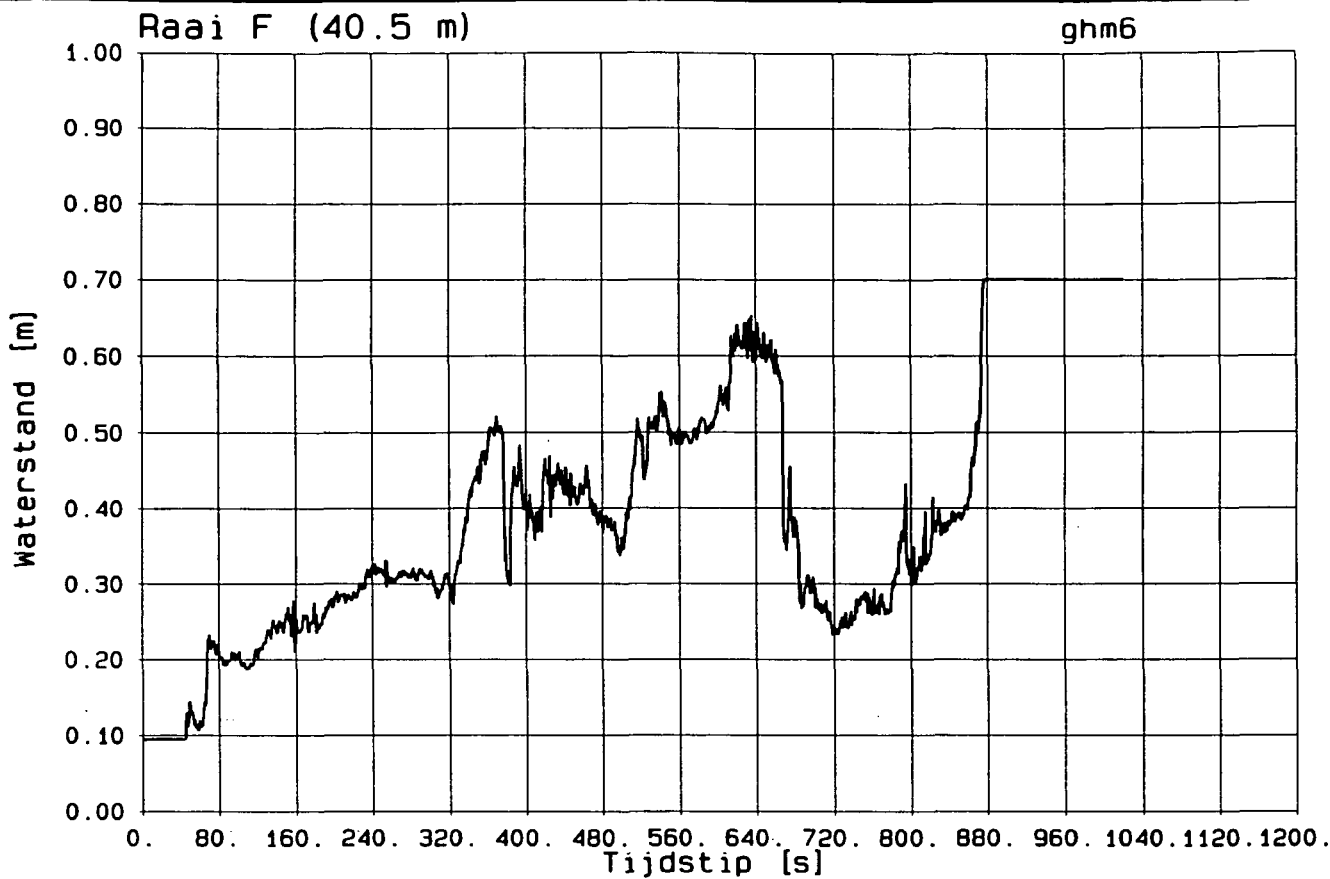
GEMETEN WATERSTANDSVERLOOP
Aanstroomraaien A t/m D

T3

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

H1242-II

FIG.5407

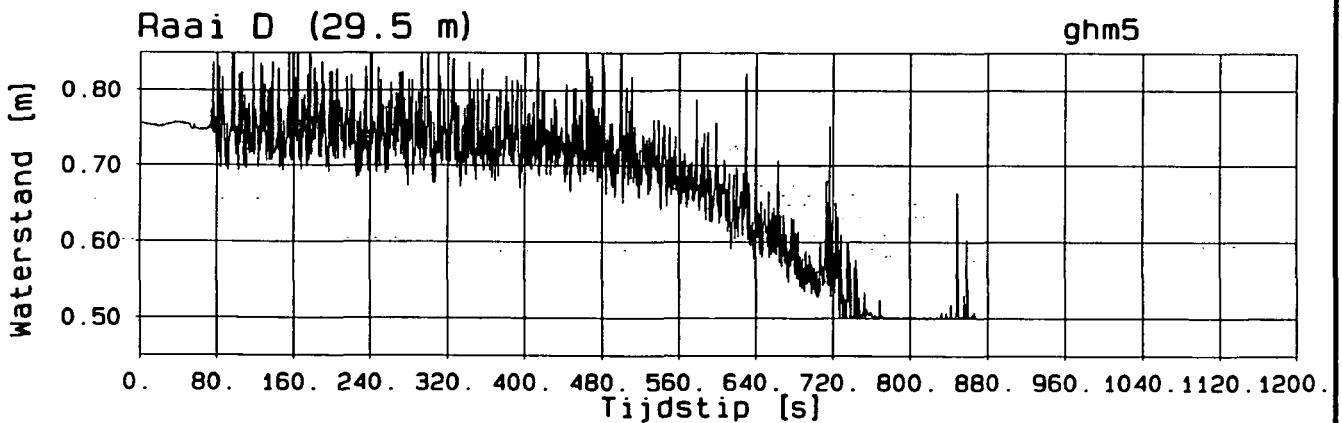
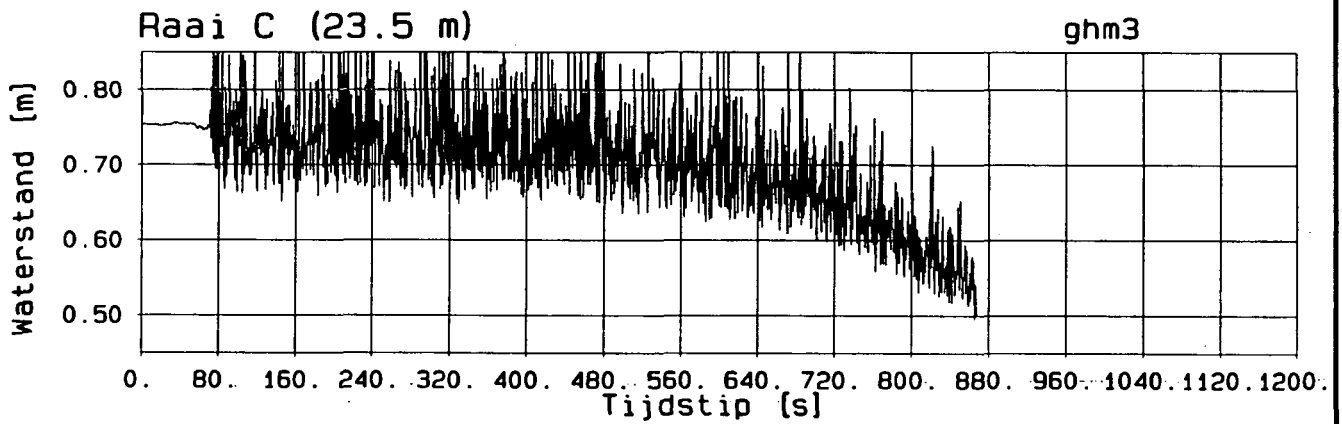
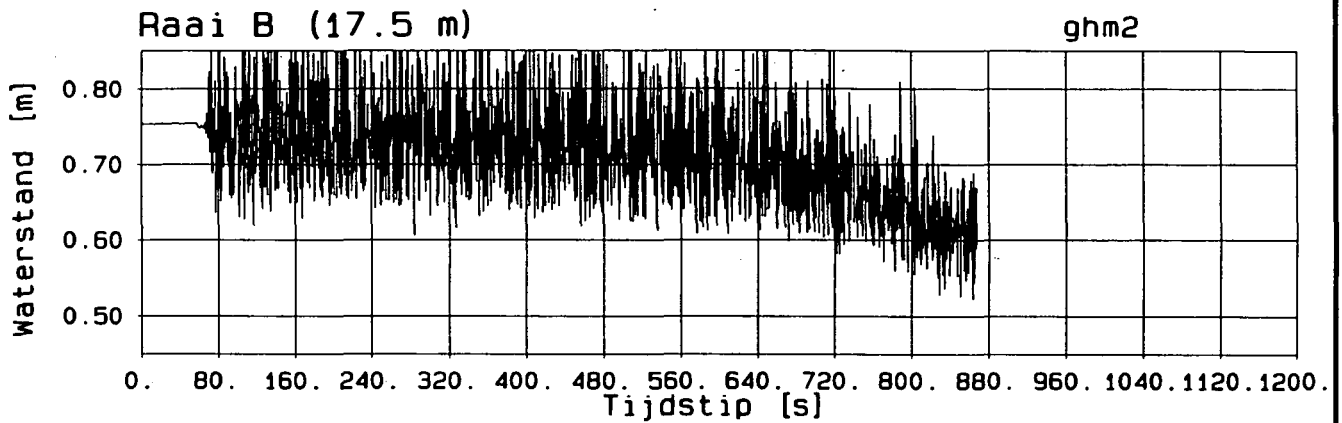
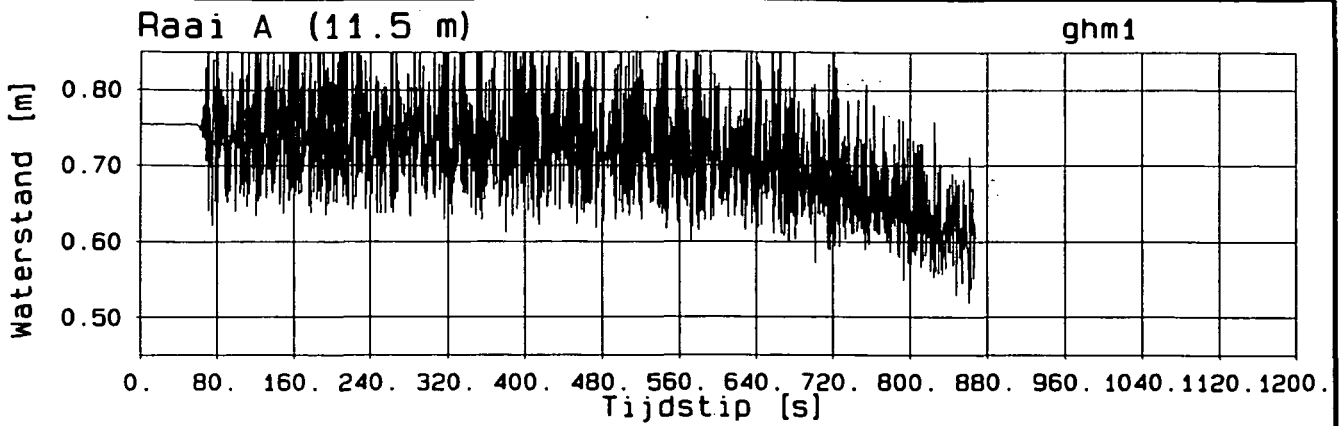


GEMETEN WATERSTANDSVERLOOP
 Afstroomraaien F en G

T3

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

H1242-II FIG. 5408

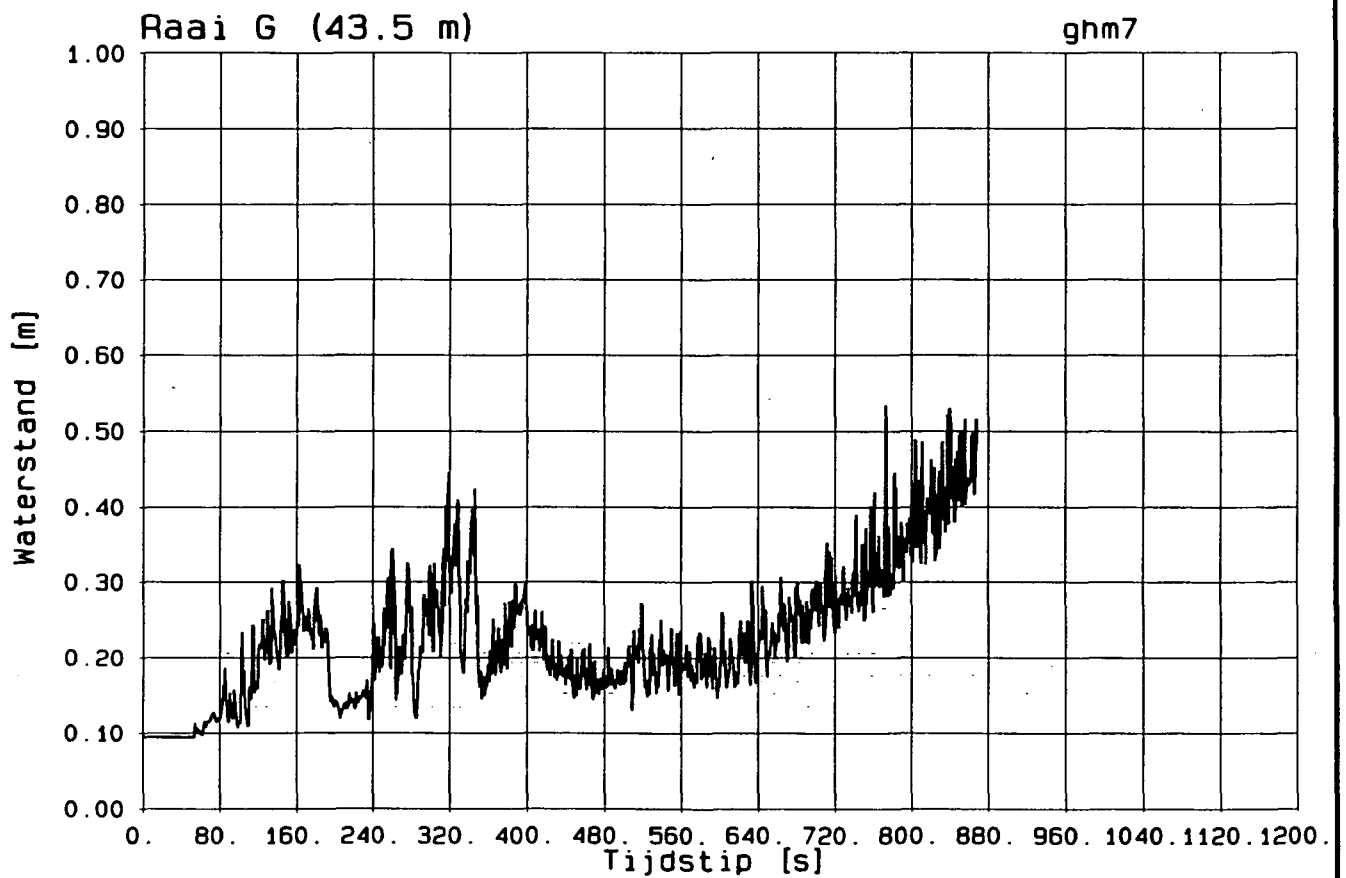
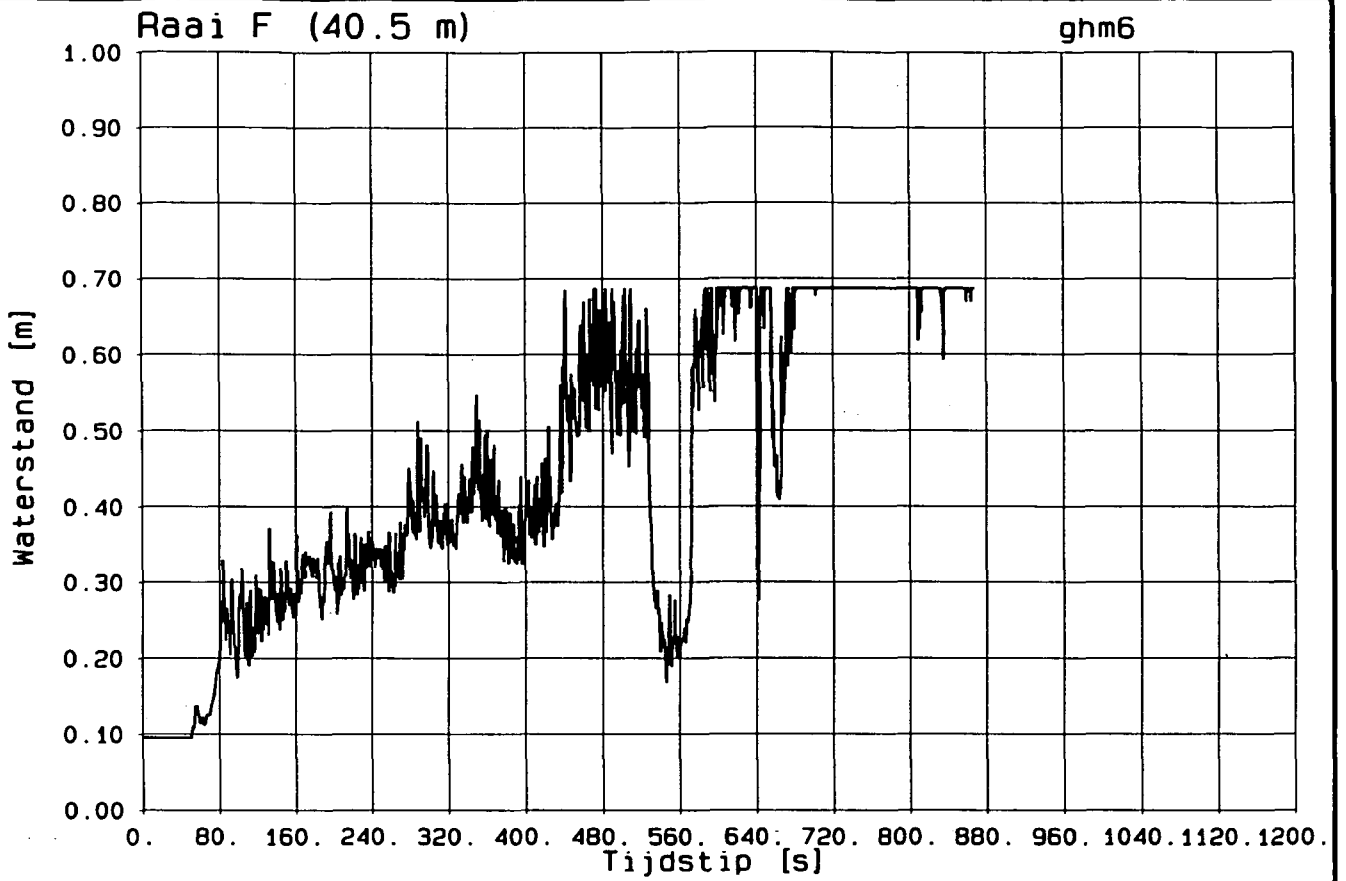


GEMETEN WATERSTANDSVERLOOP
Aanstroomraaien A t/m D

T4

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

H1242-II FIG.5409

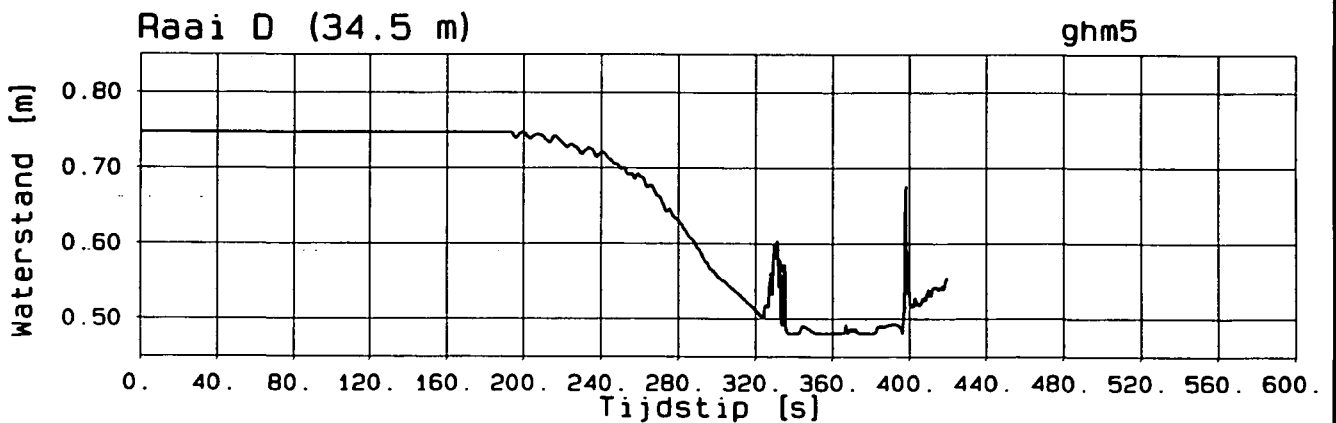
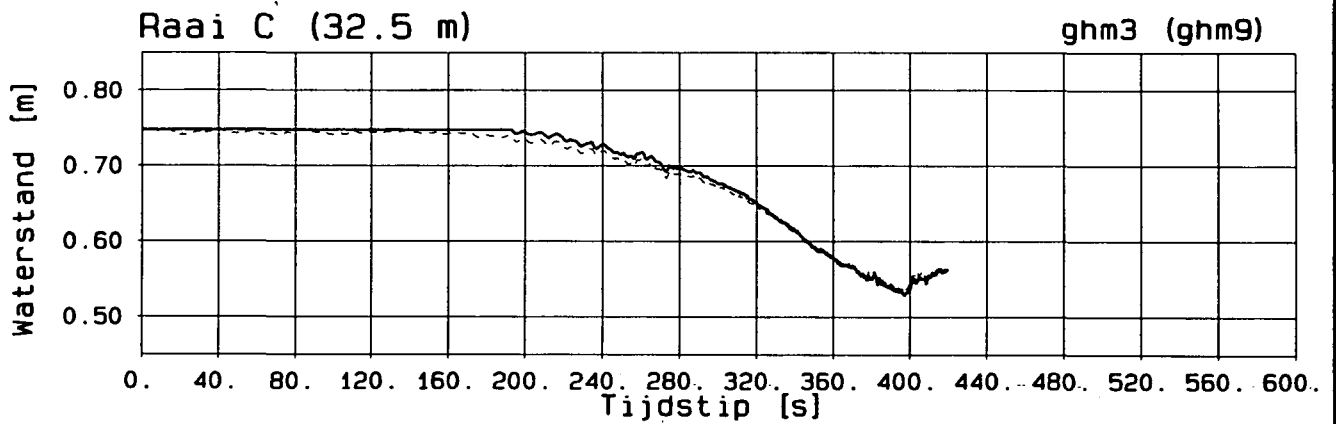
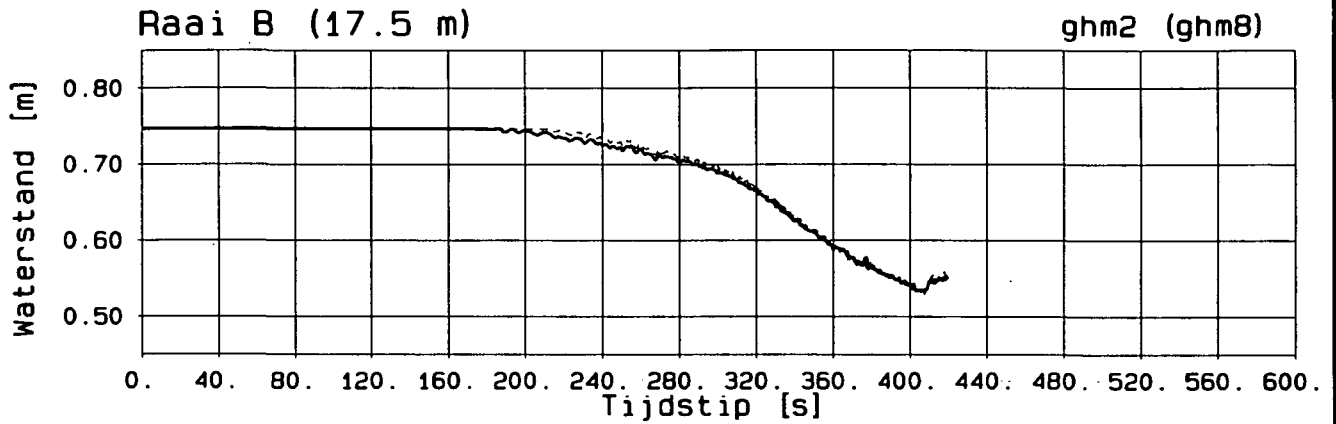
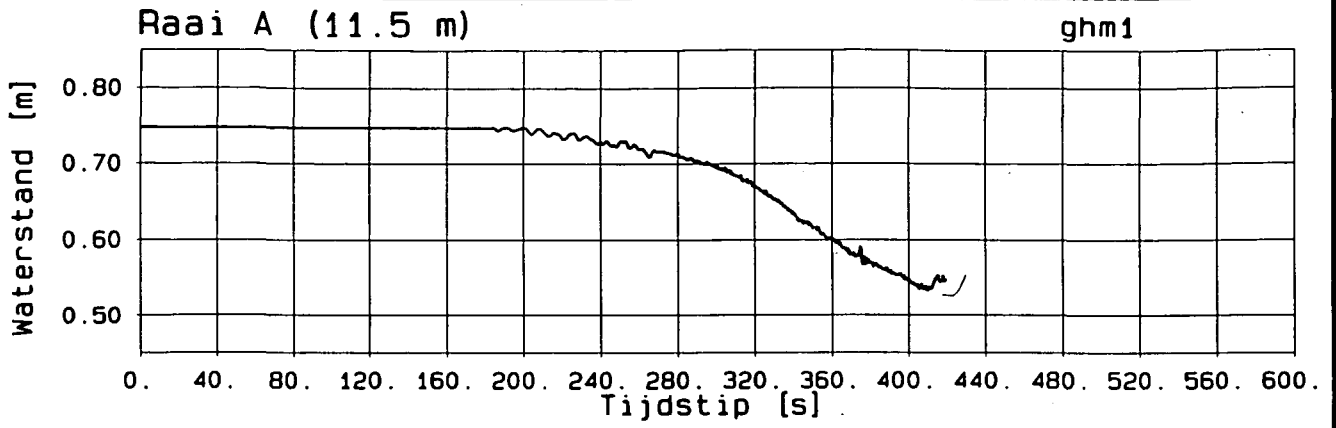


GEMETEN WATERSTANDSVERLOOP
Afstroomraaien F en G

T4

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

H1242-II FIG. 5410

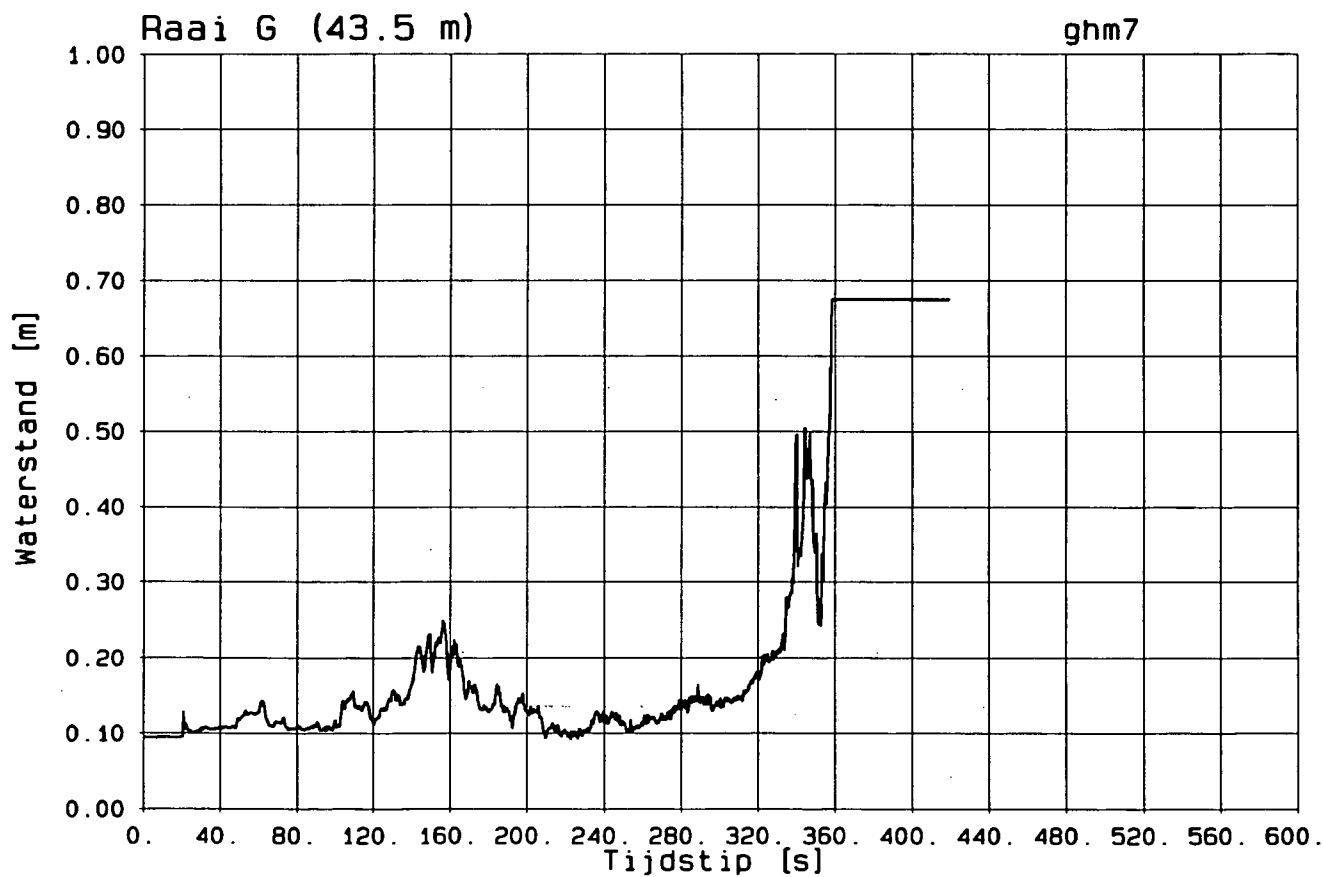
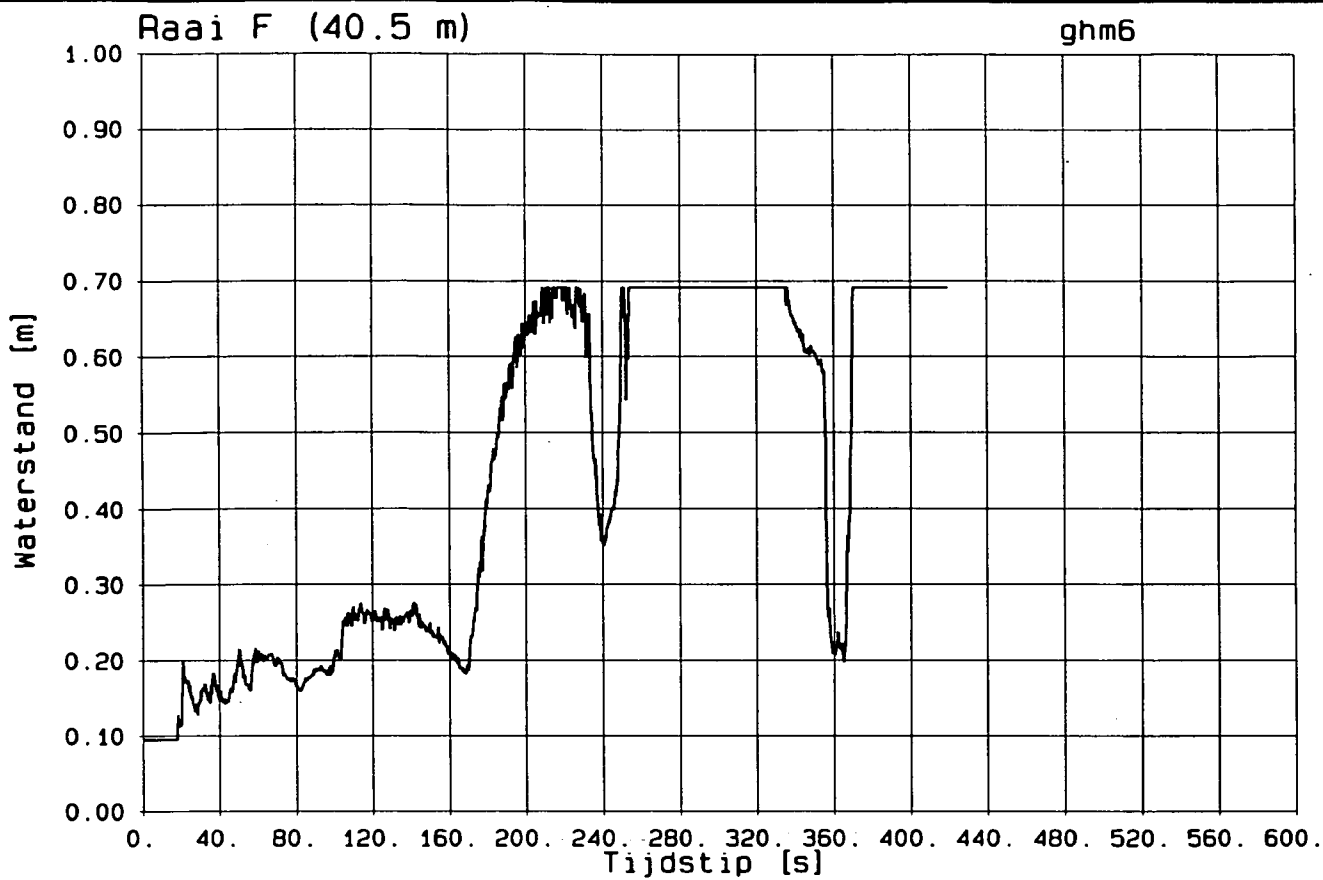


GEMETEN WATERSTANDSVERLOOP
Aanstroomraaien A t/m D

T5

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

H1242-II FIG.5411



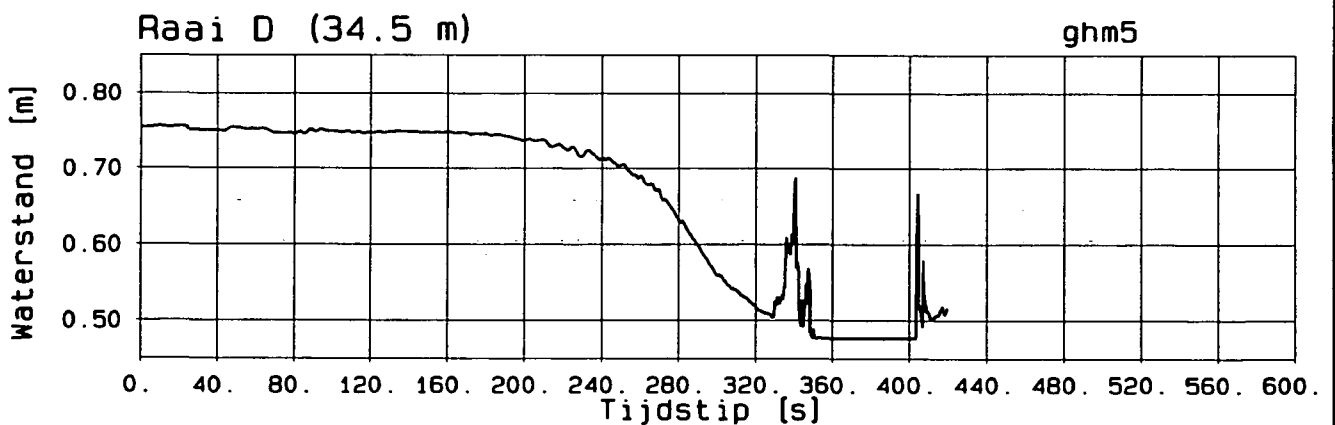
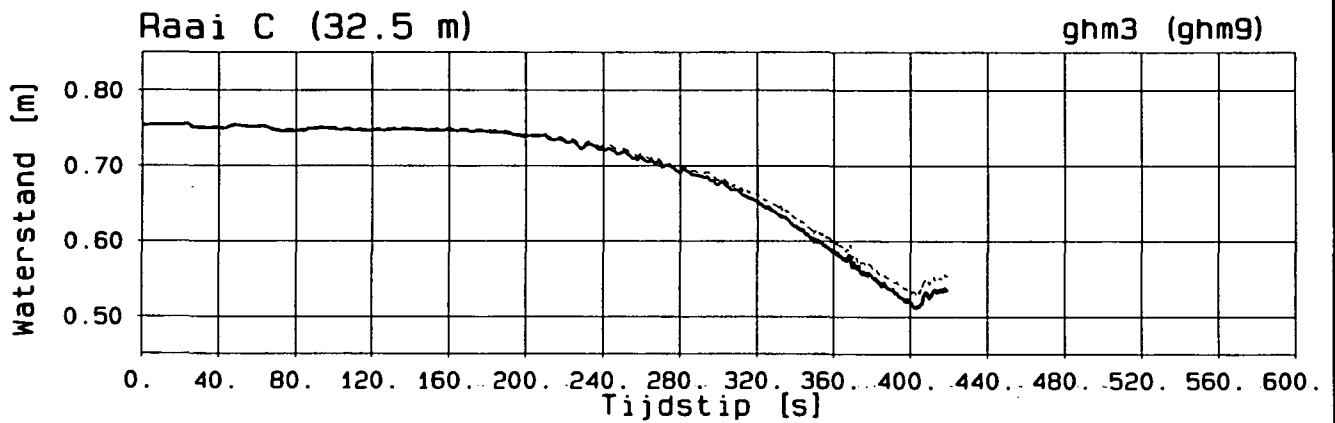
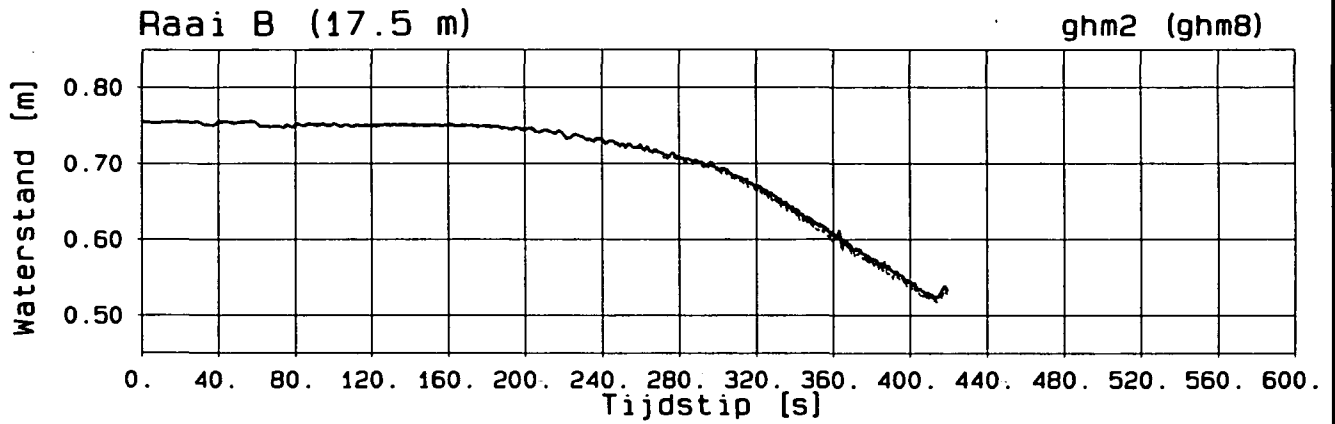
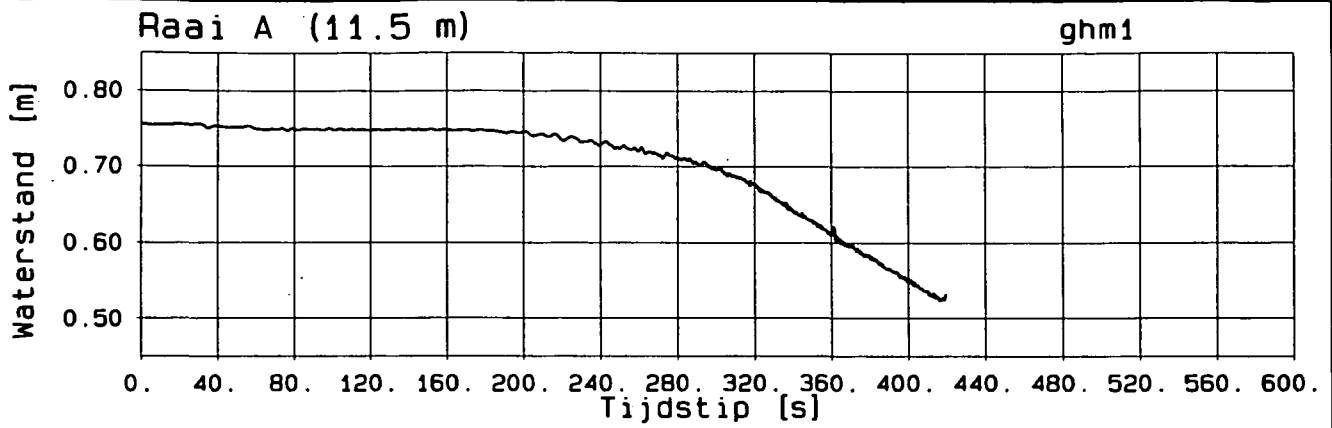
GEMETEN WATERSTANDSVERLOOP

Afstroomraaien F en G

T5

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

H1242-II FIG.5412

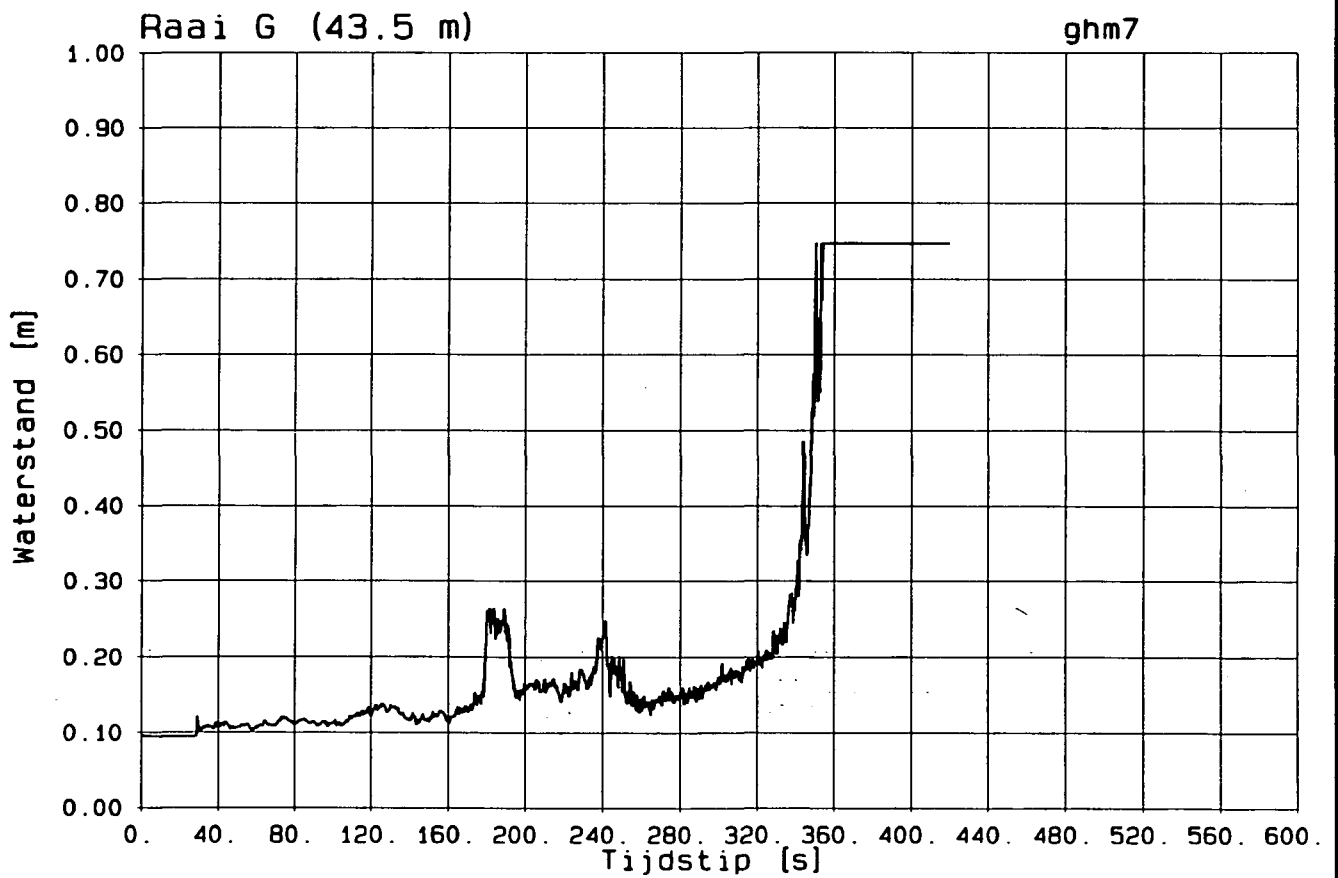
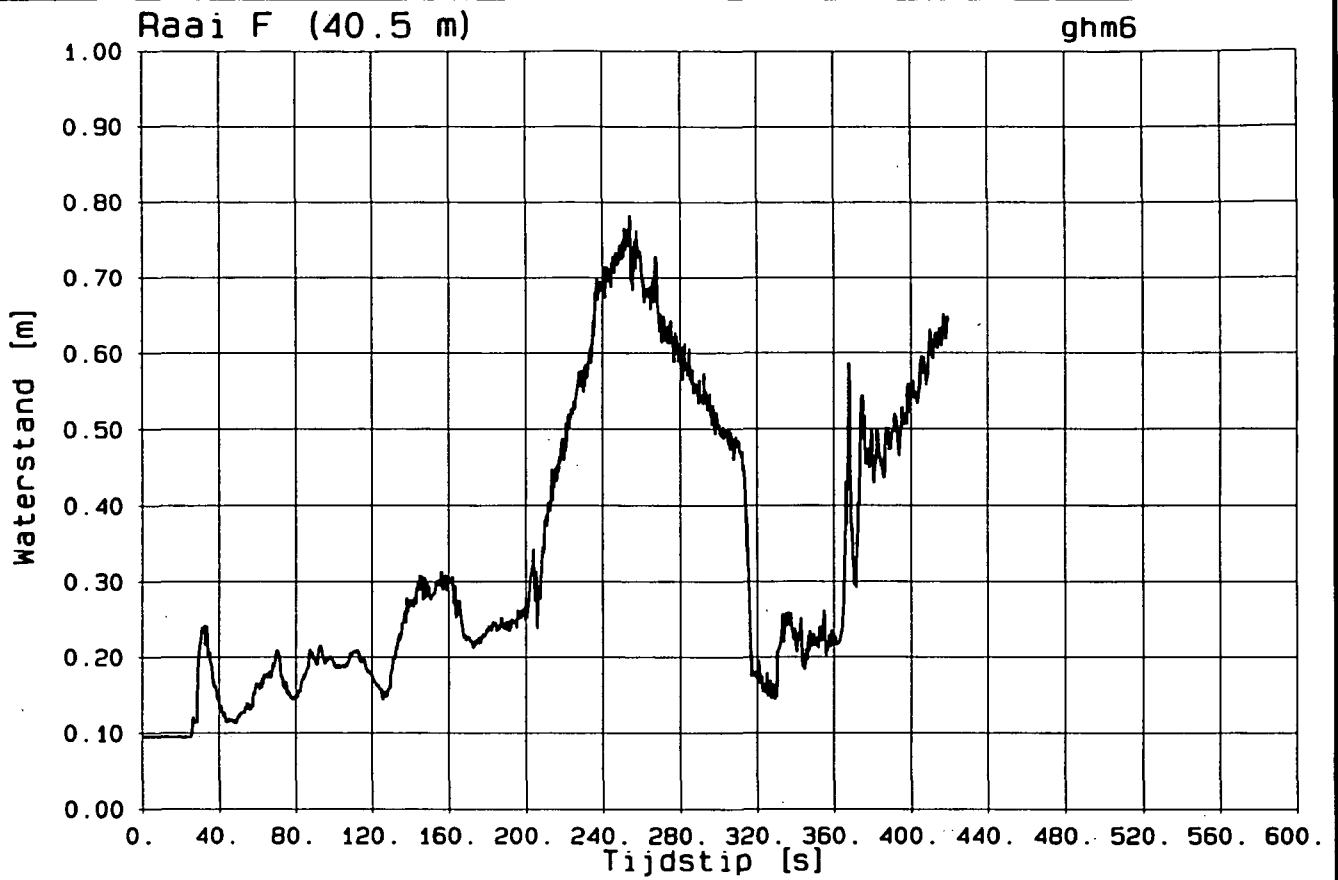


GEMETEN WATERSTANDSVERLOOP
Aanstroomraaien A t/m D

T5A

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

H1242-II FIG.5413

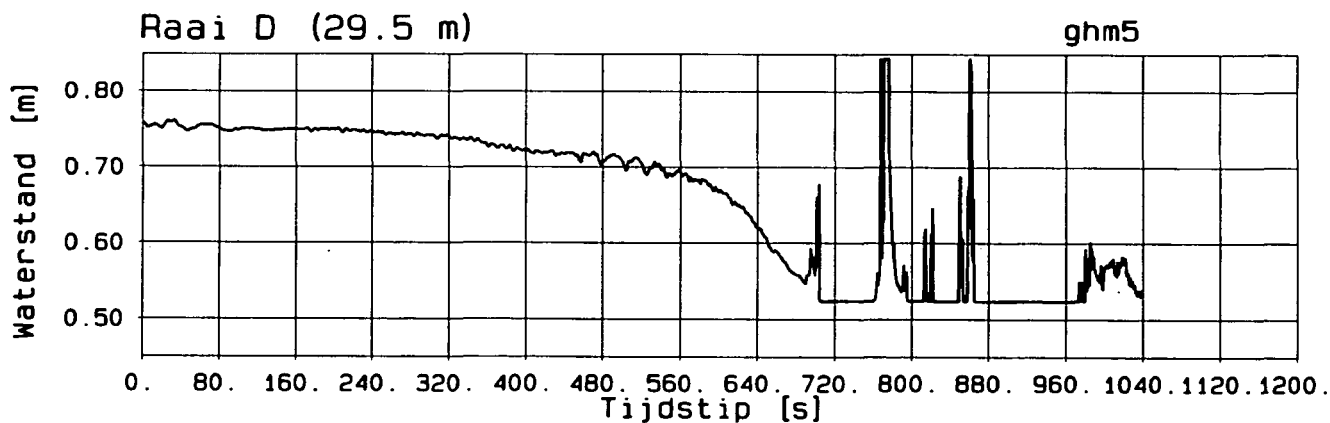
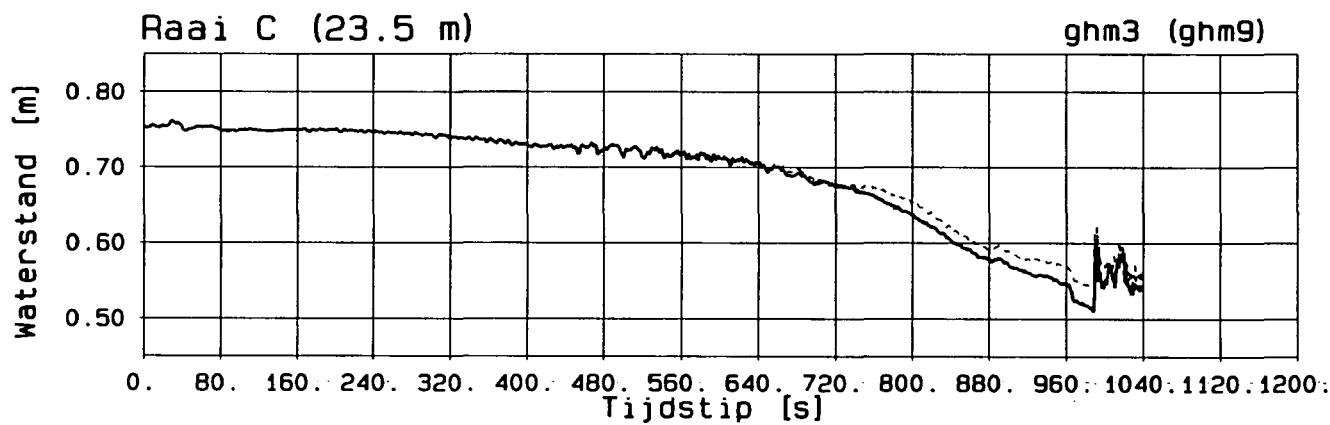
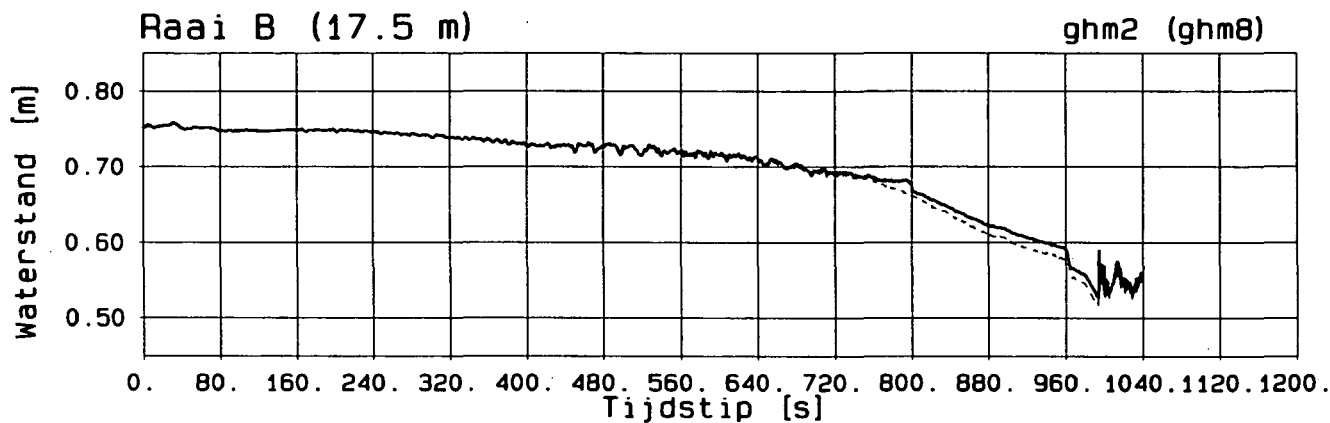
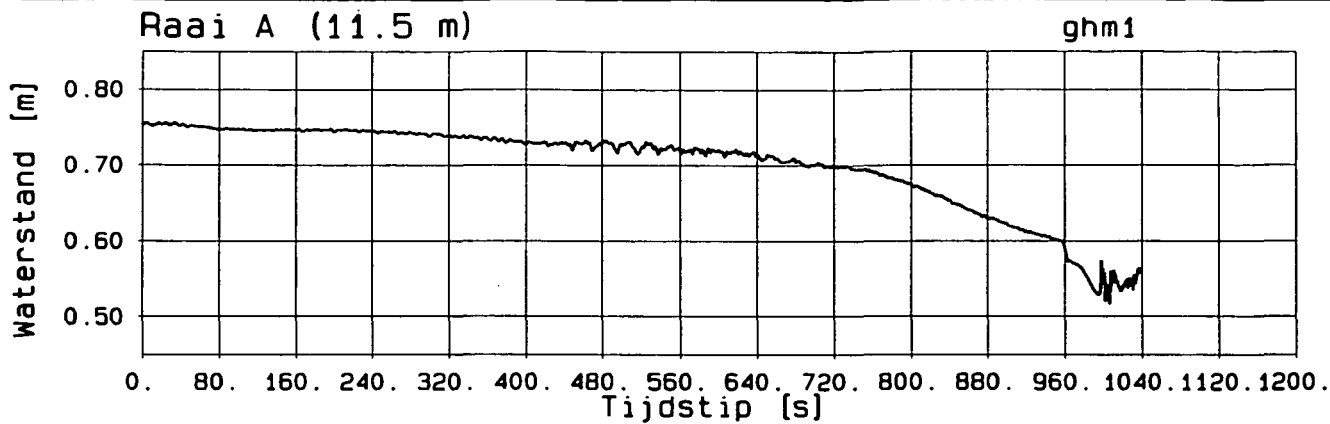


GEMETEN WATERSTANDSVERLOOP
 Afstroomraaien F en G

T5A

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

H1242-II FIG.5414

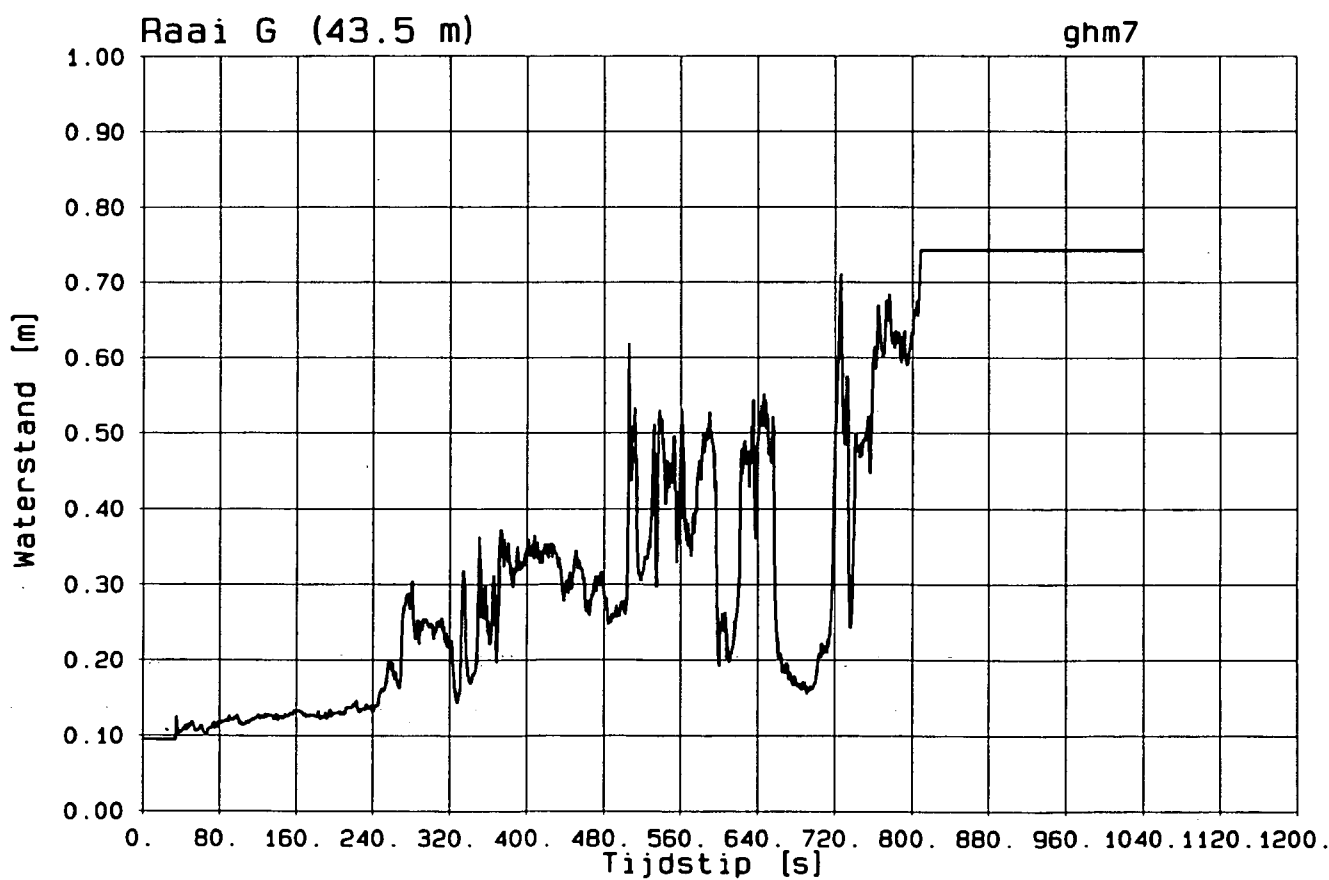
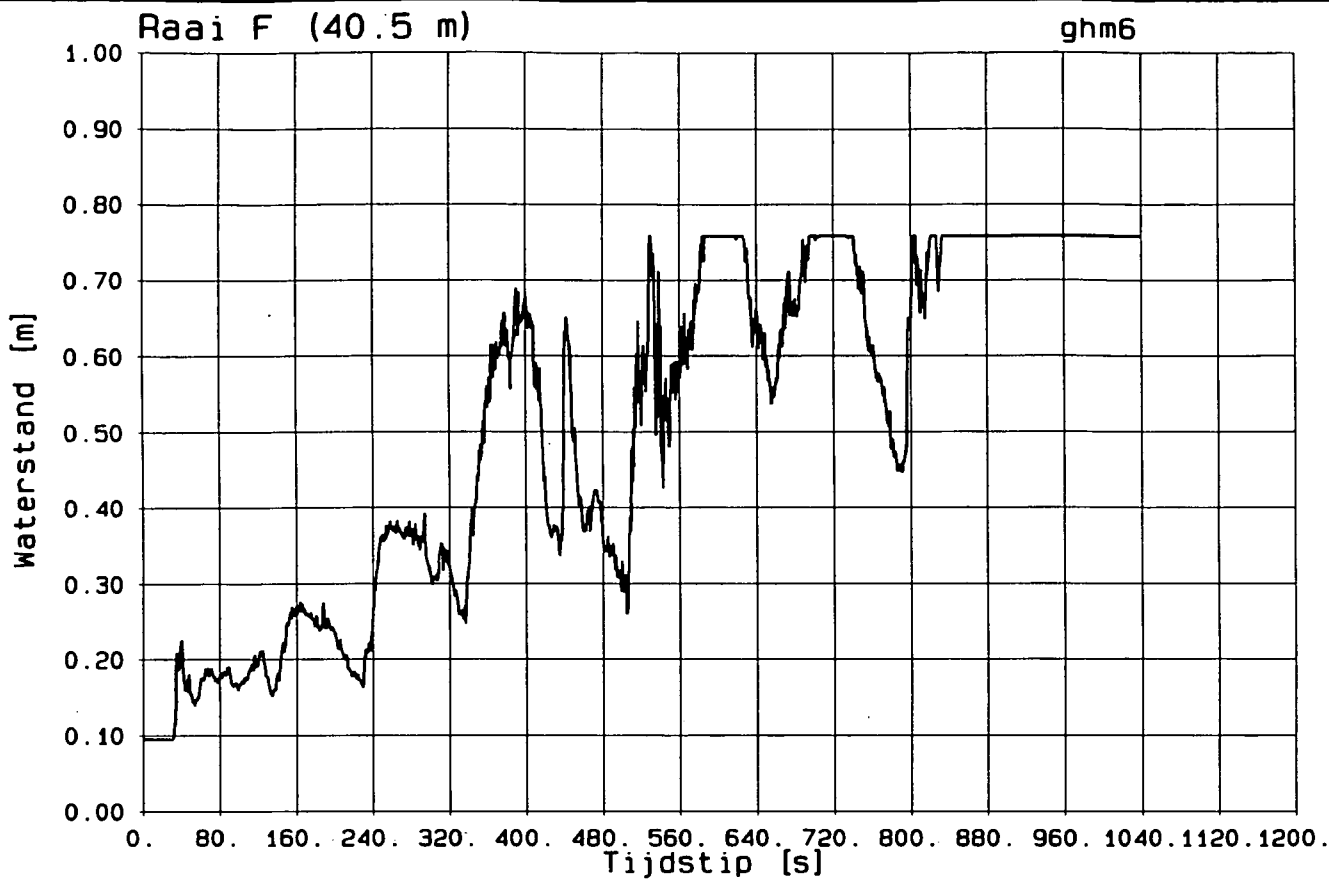


GEMETEN WATERSTANDSVERLOOP
Aanstroomraaien A t/m D

T6

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

H1242-II FIG.5415

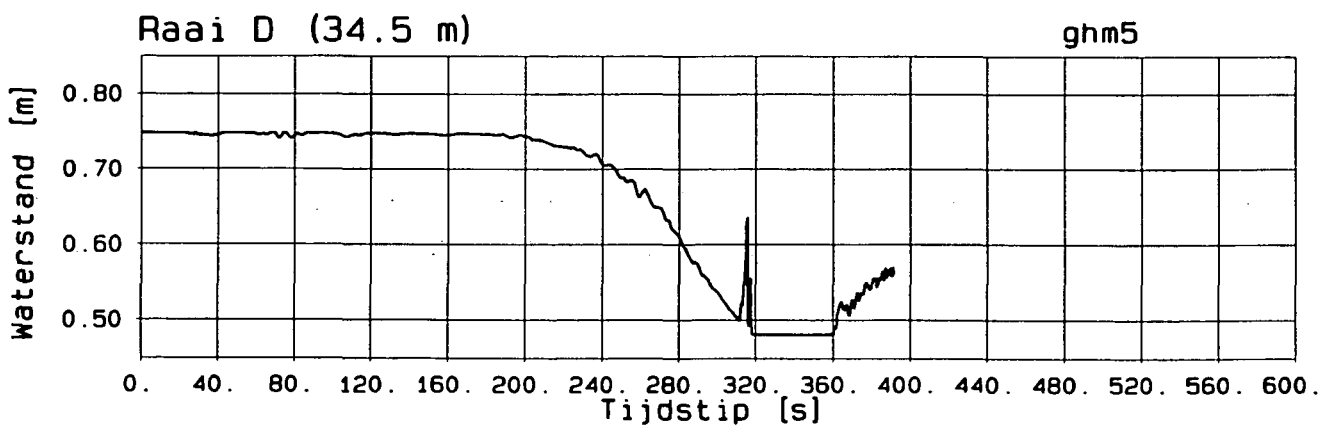
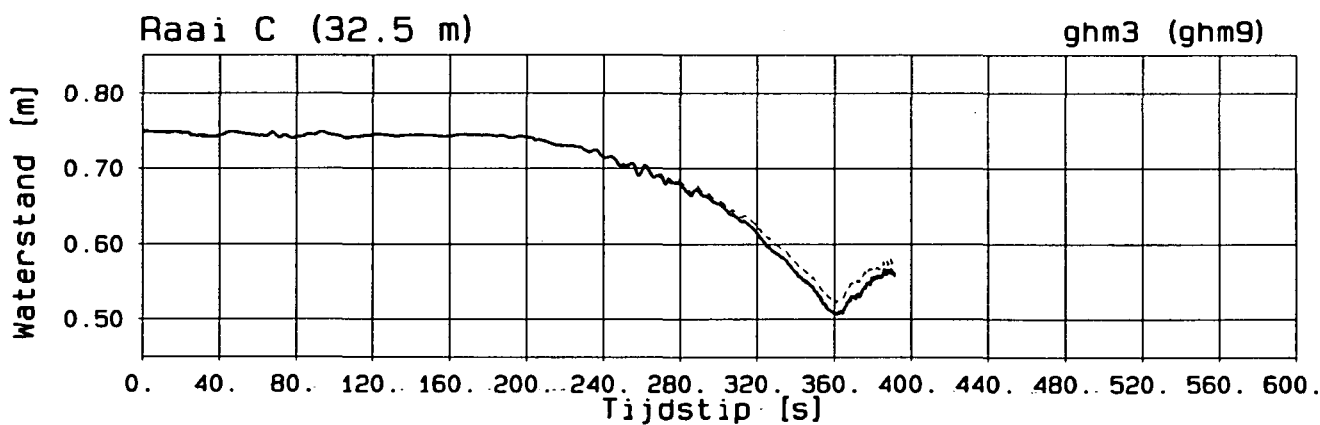
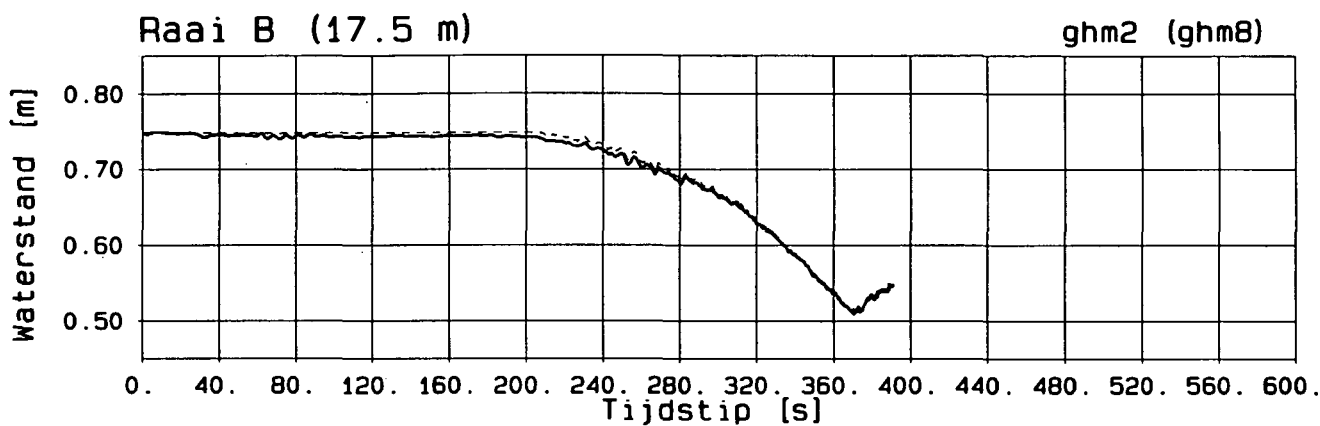
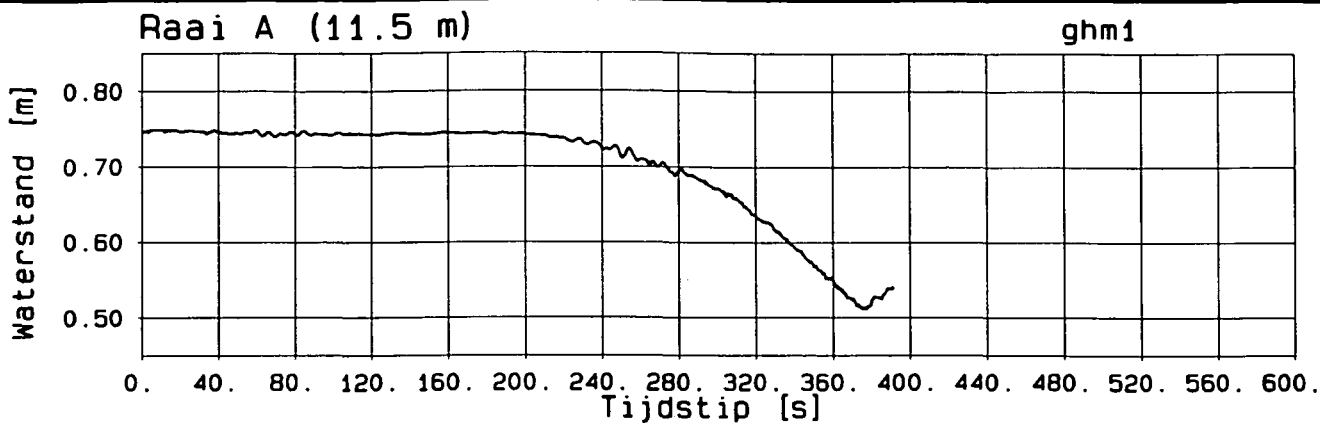


GEMETEN WATERSTANDSVERLOOP
 Afstroomraaien F en G

T6

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

H1242-II FIG.5416

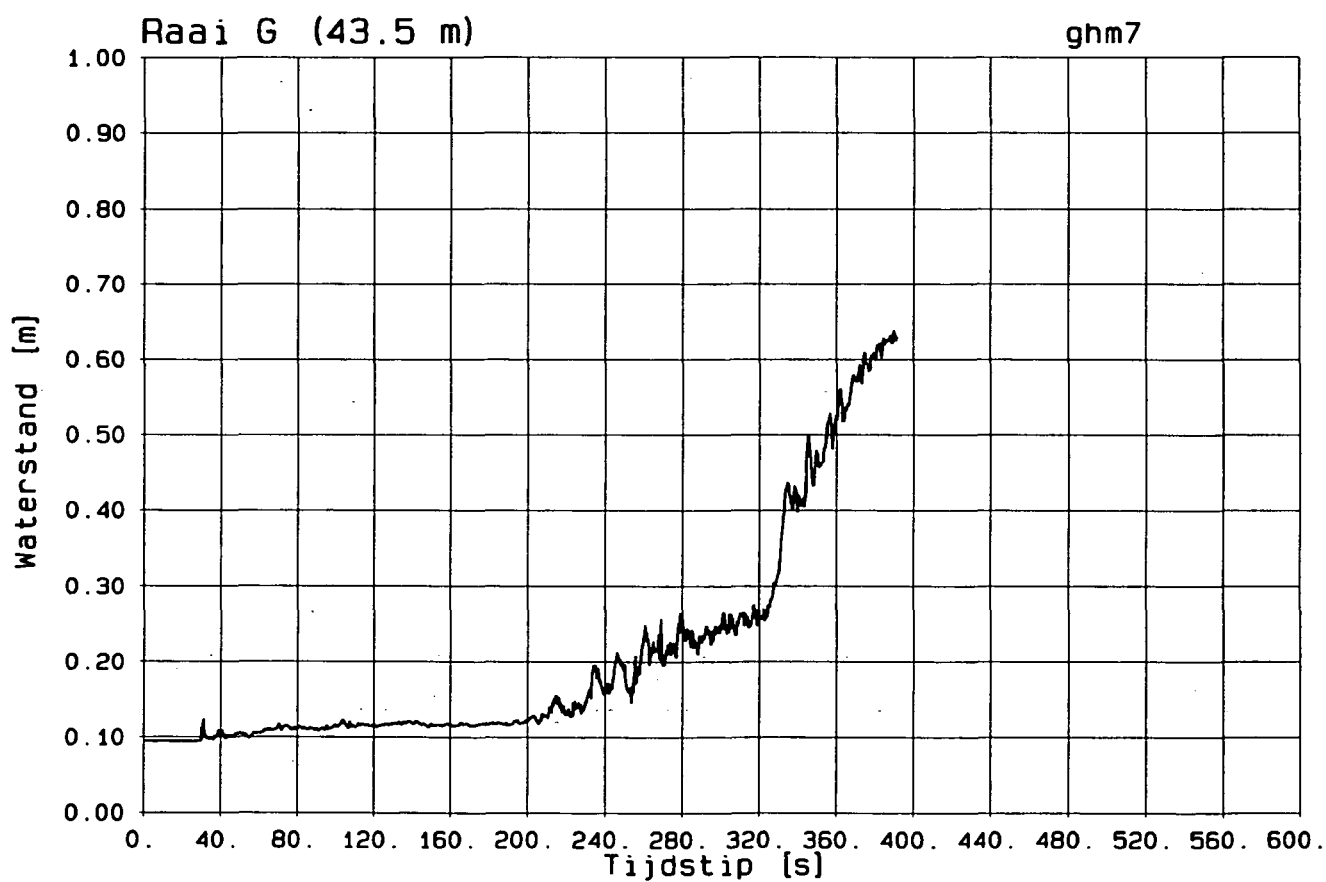
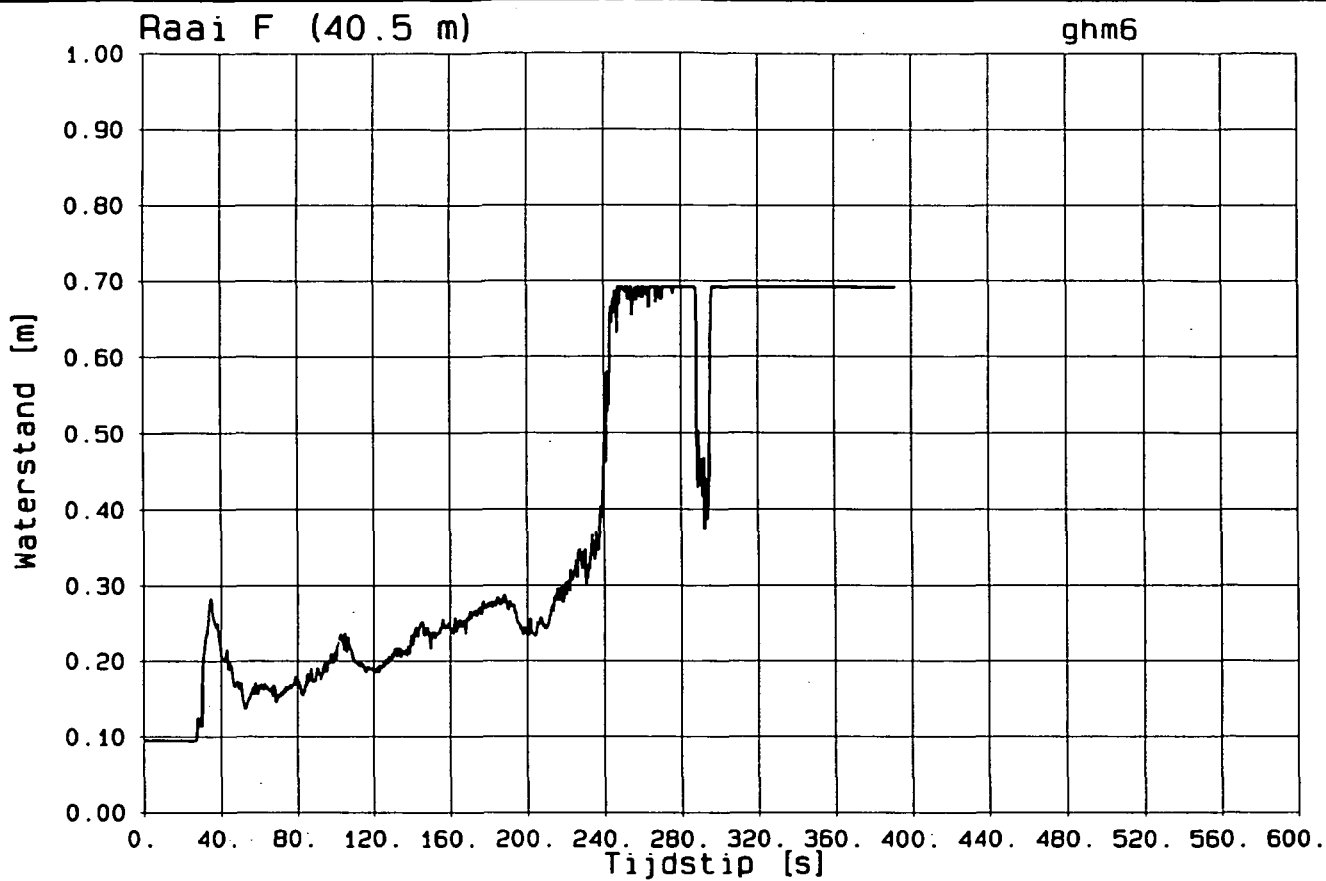


GEMETEN WATERSTANDSVERLOOP
Aanstroomraaien A t/m D

T7

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

H1242-II FIG.5417

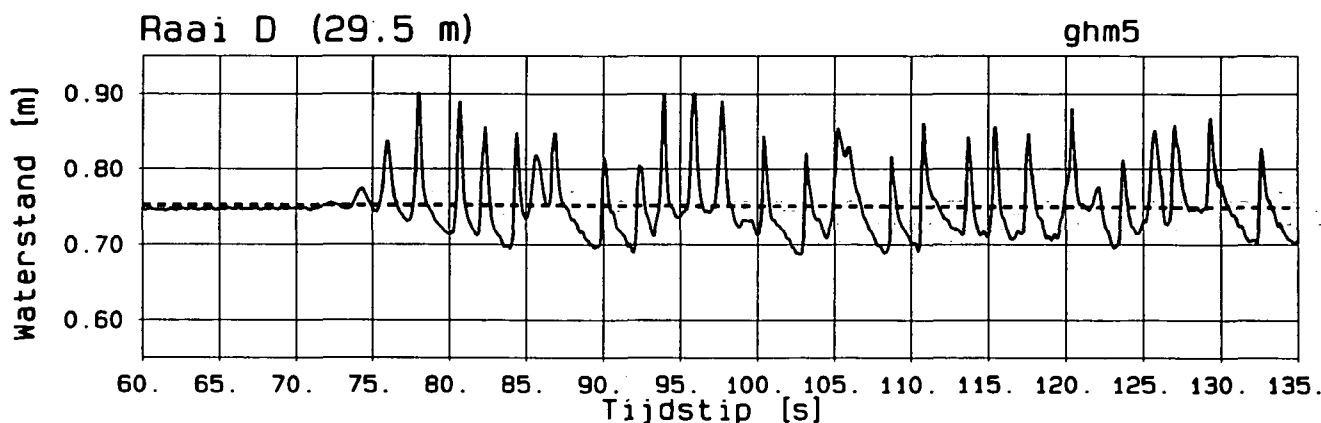
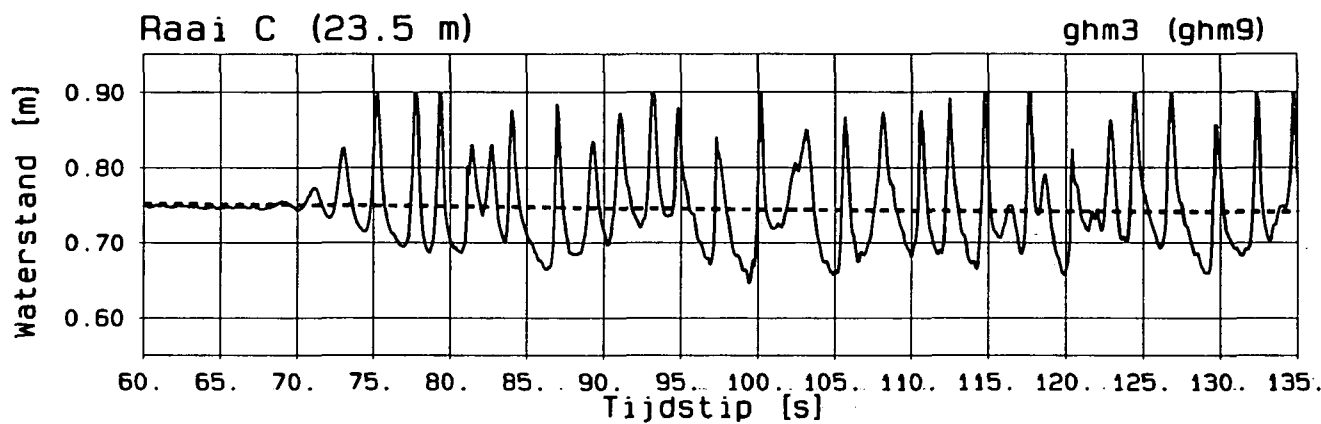
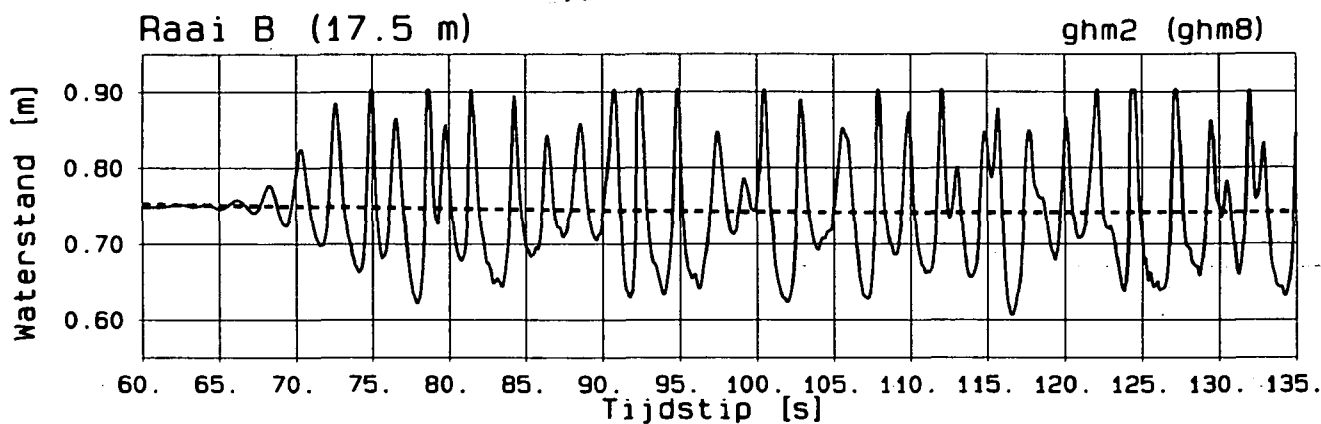
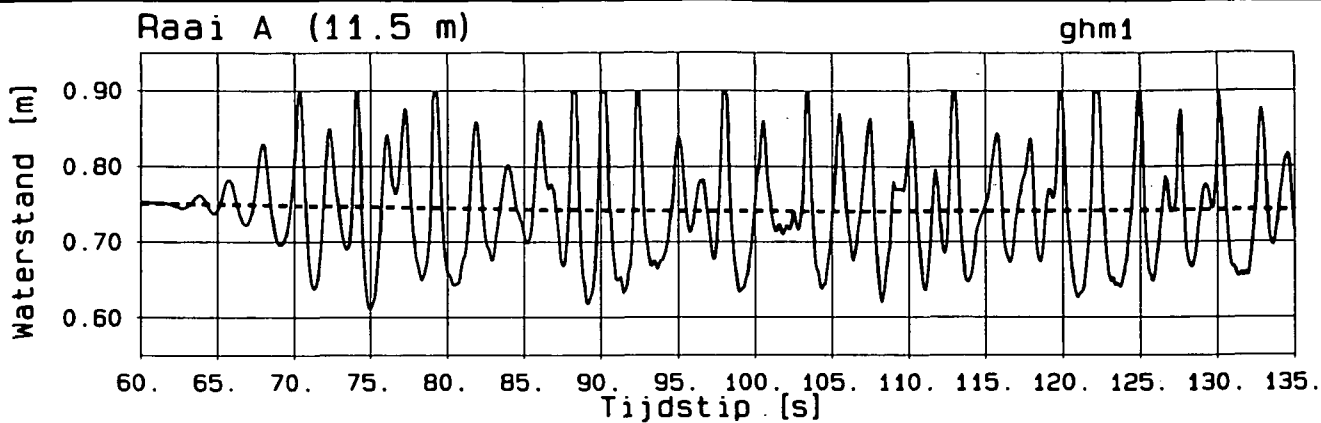


GEMETEN WATERSTANDSVERLOOP
 Afstroomraaien F en G

T7

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

H1242-II FIG. 5418

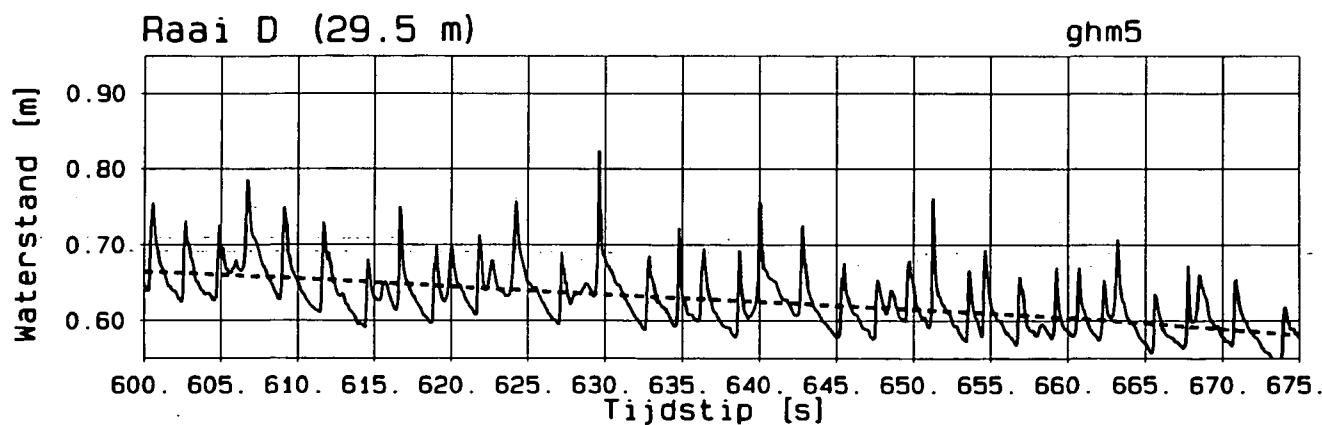
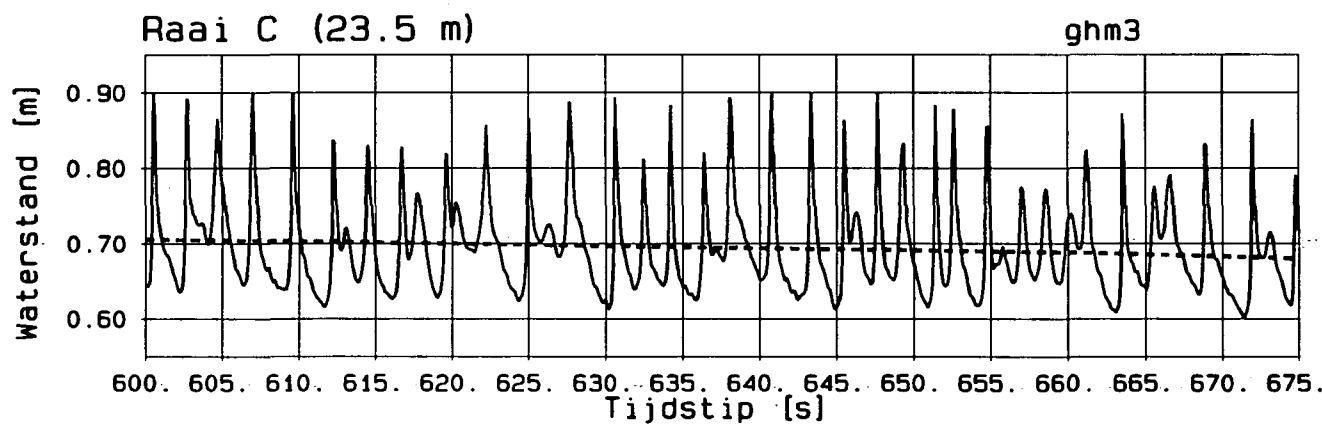
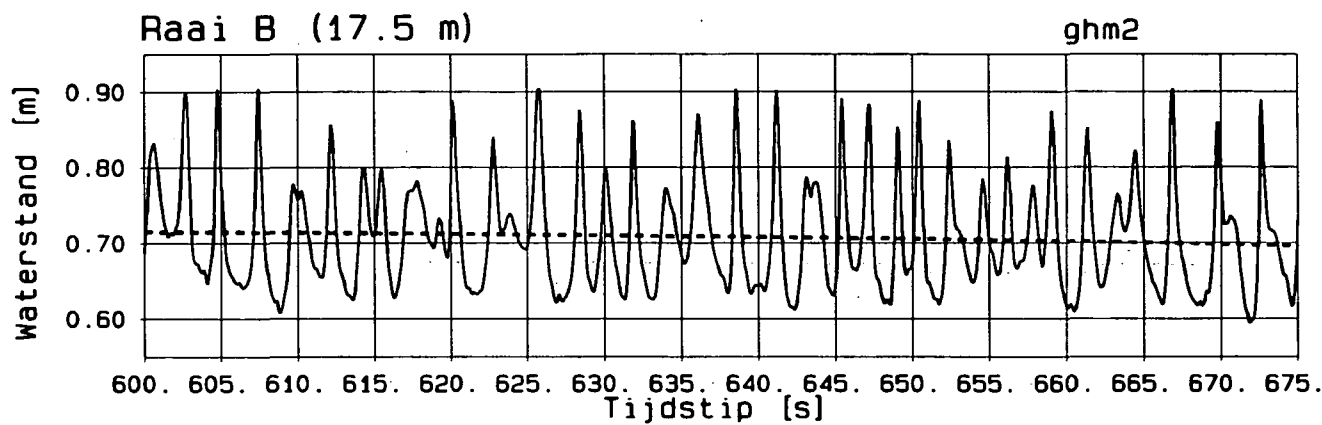
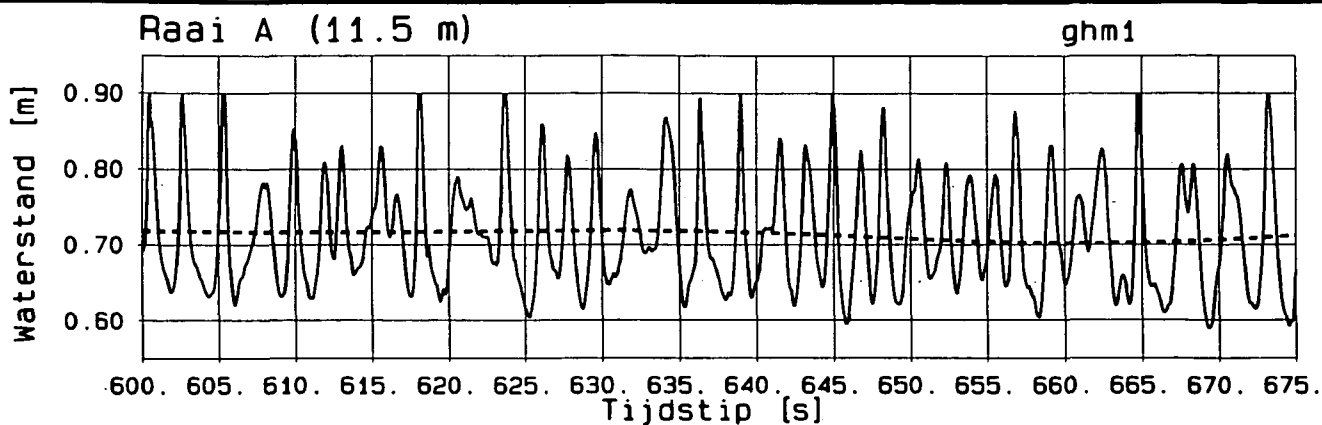


DETAIL GEMETEN WATERSTANDSVERLOOP
 Na 1 minuut ($60 < t < 135$ s)

T4

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

H1242-II FIG.5419



DETAIL GEMETEN WATERSTANDSVERLOOP

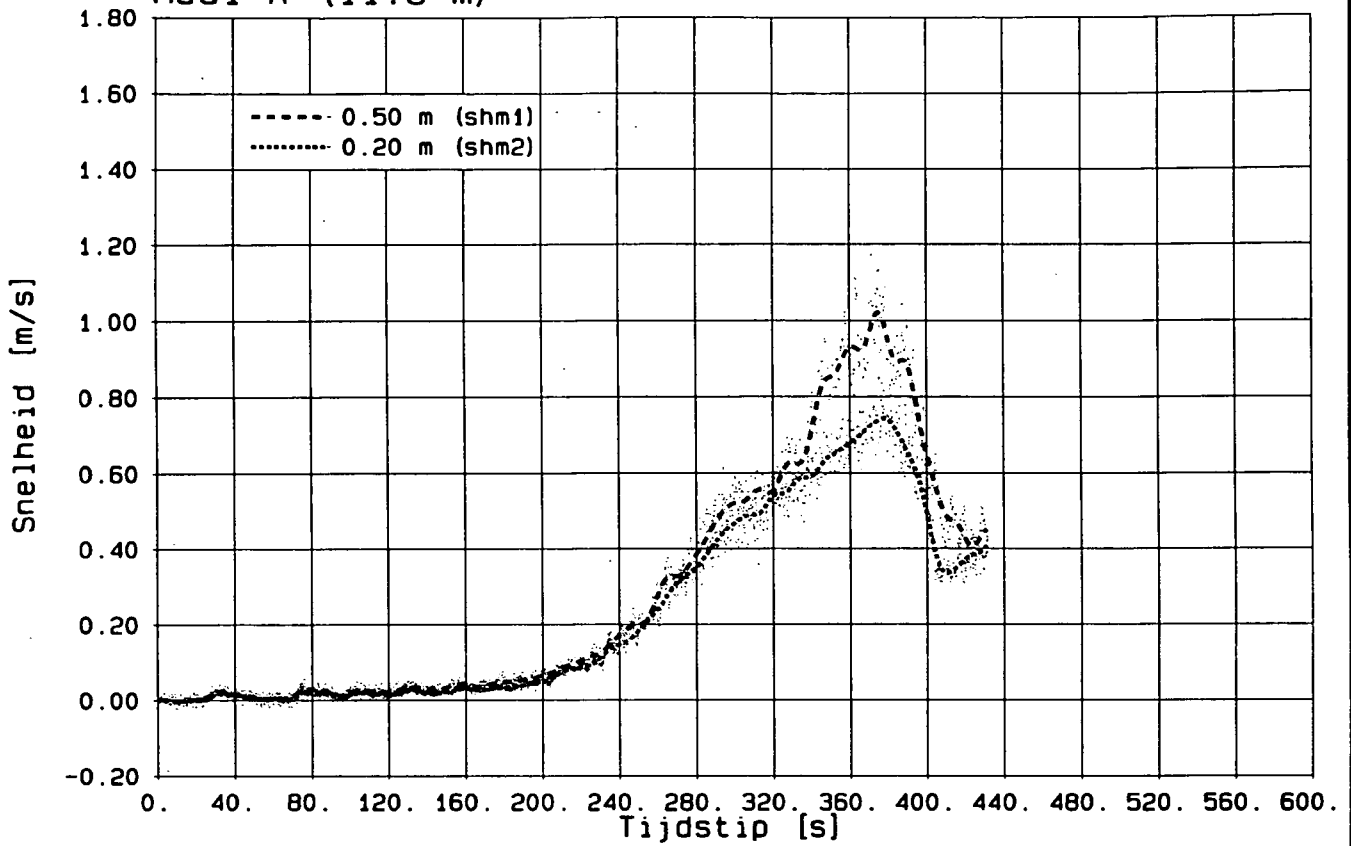
Na 10 minuten ($600 < t < 675$ s)

T4

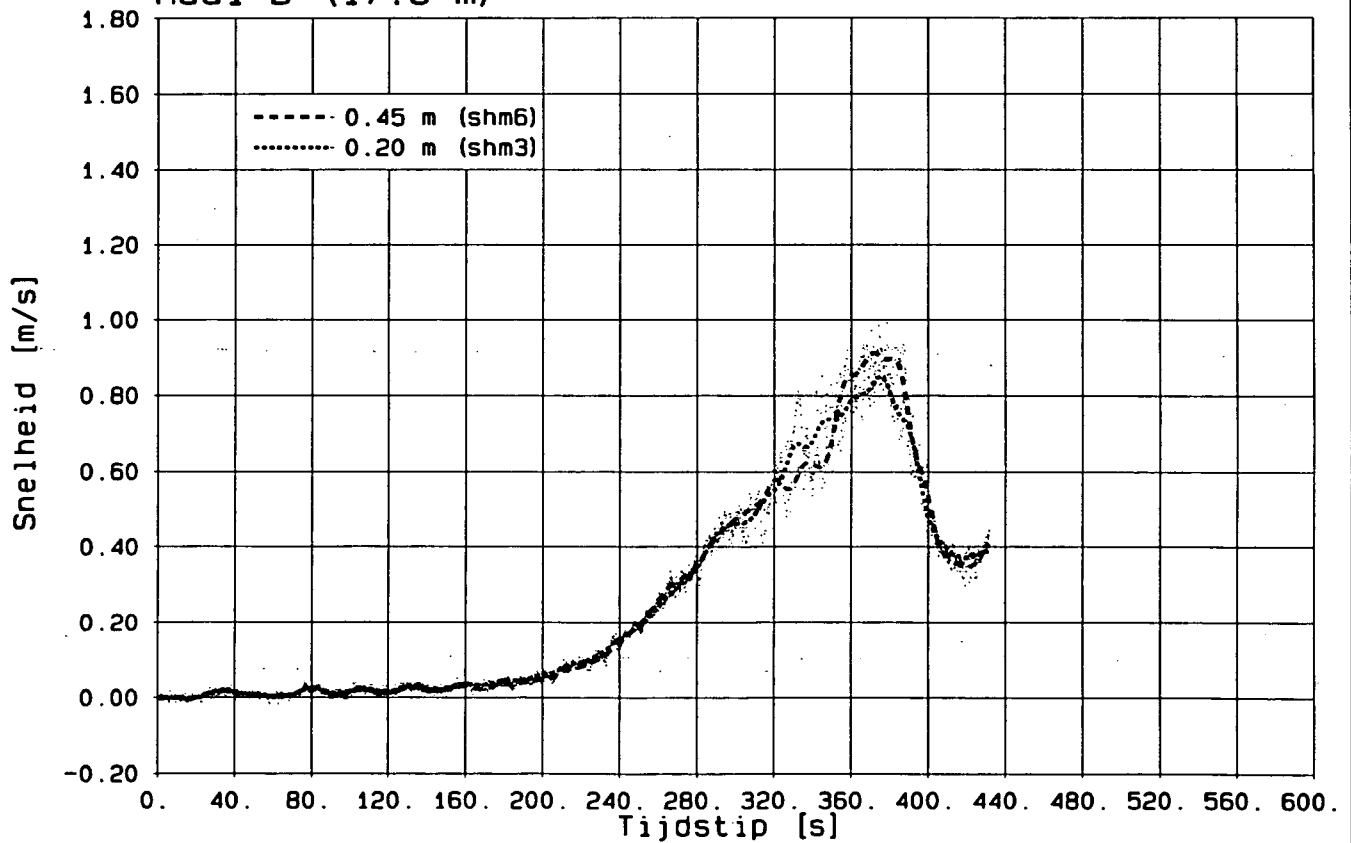
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

H1242-II FIG.5420

Raai A (11.5 m)



Raai B (17.5 m)



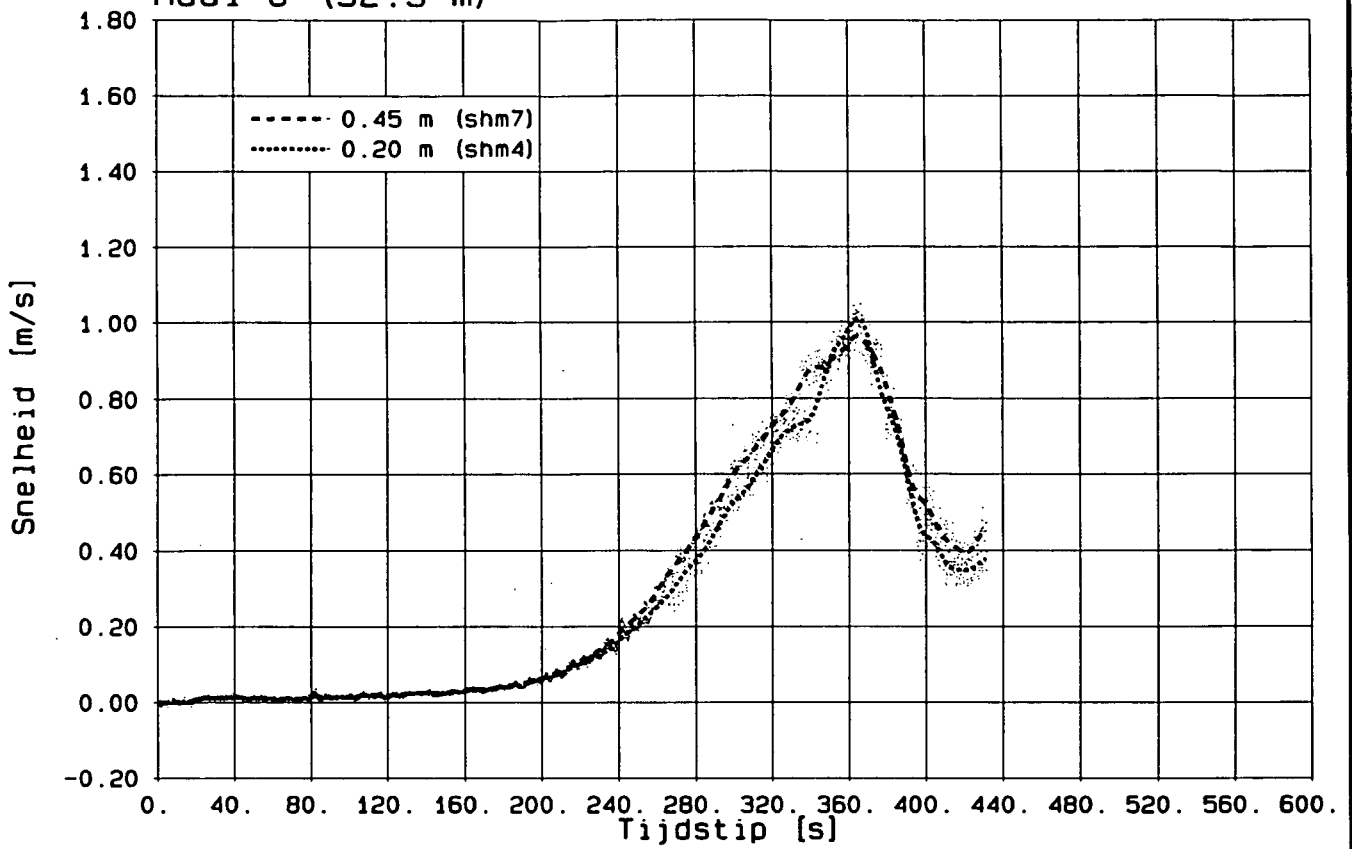
GEMETEN SNELHEIDSVERLOOP
Aanstroomraaien A en B

T1

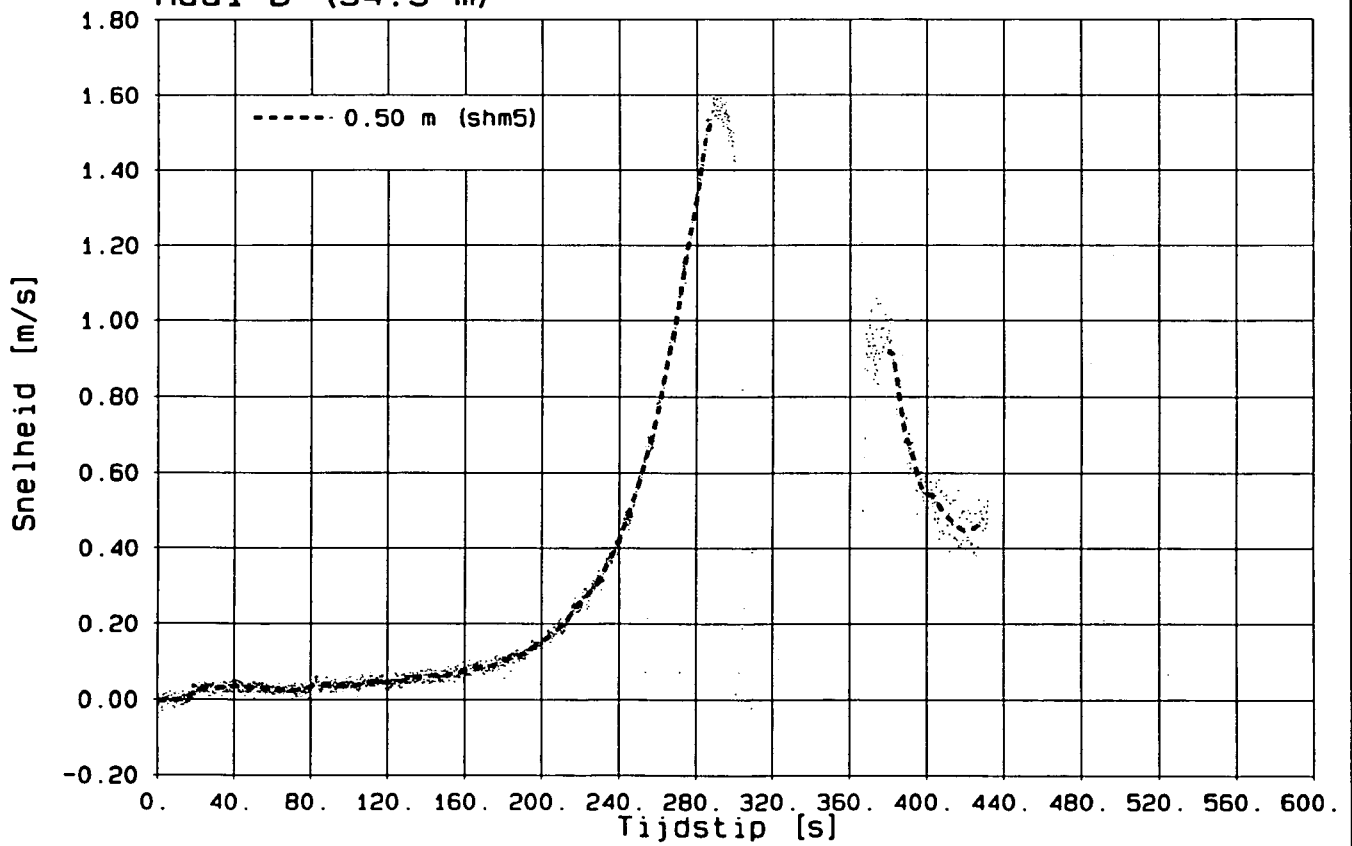
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

H1242-II FIG.5501

Raai C (32.5 m)



Raai D (34.5 m)

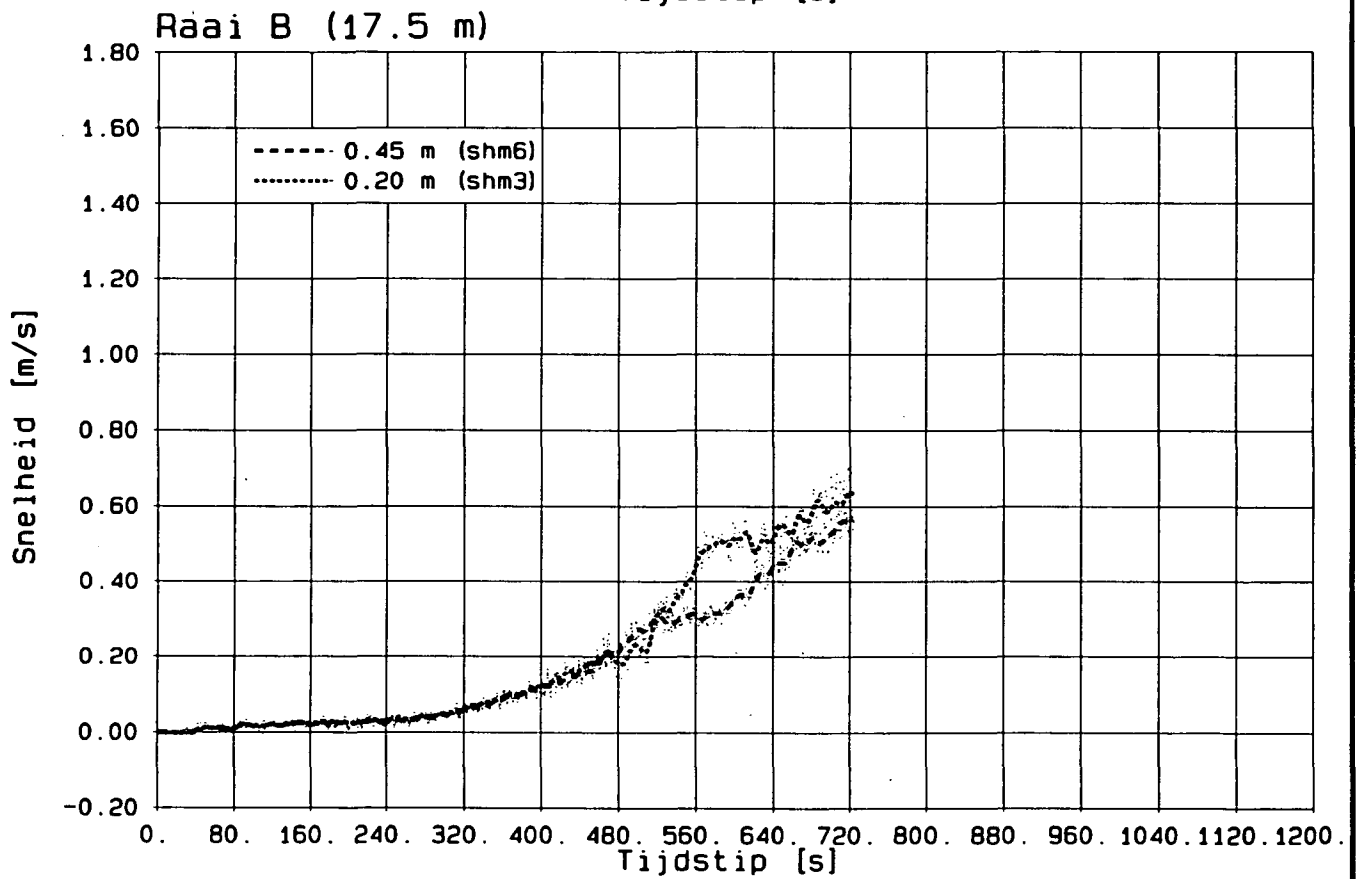
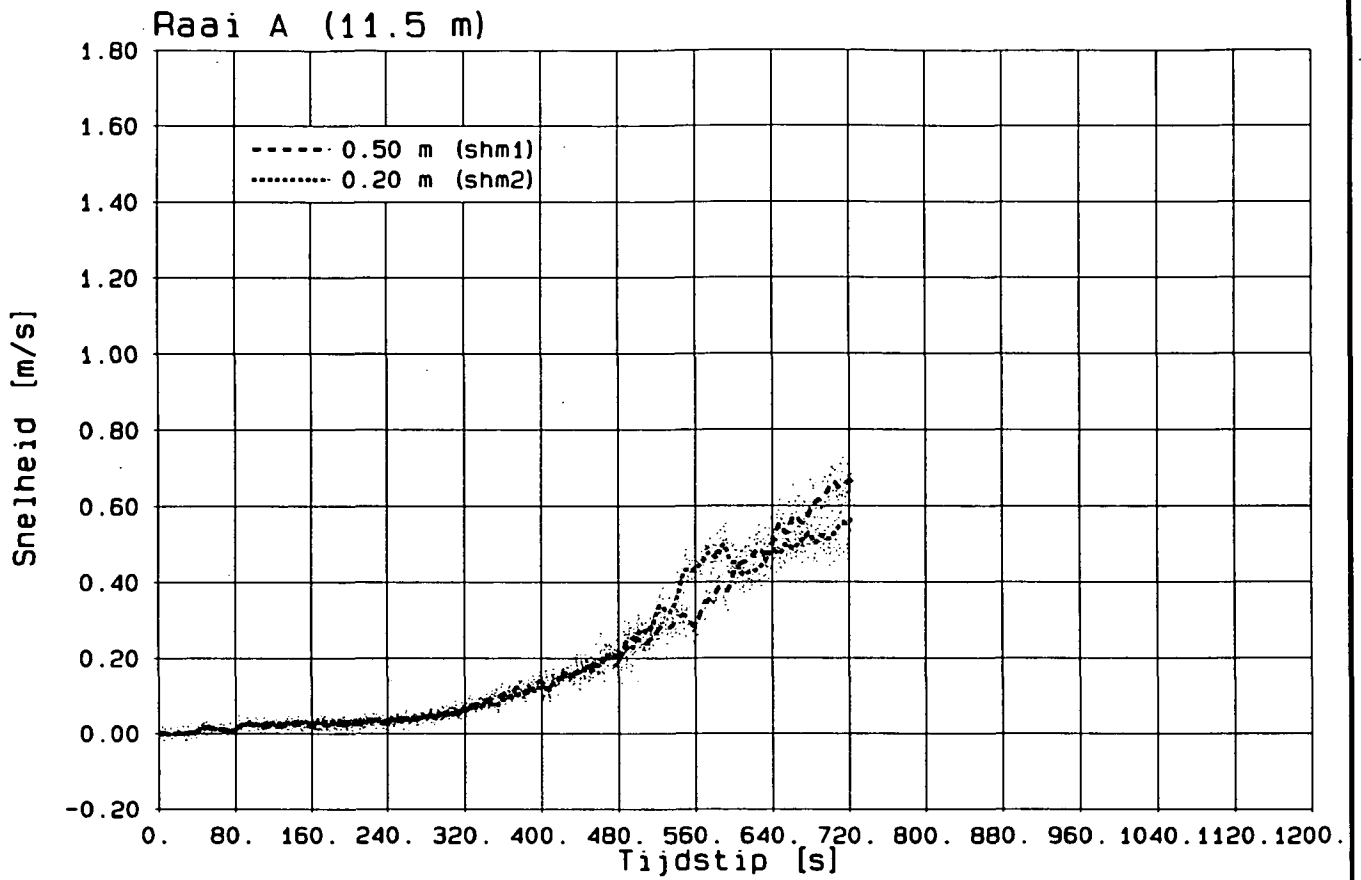


GEMETEN SNELHEIDSVERLOOP
Aanstroomraaien C en D

T1

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

H1242-II FIG.5502



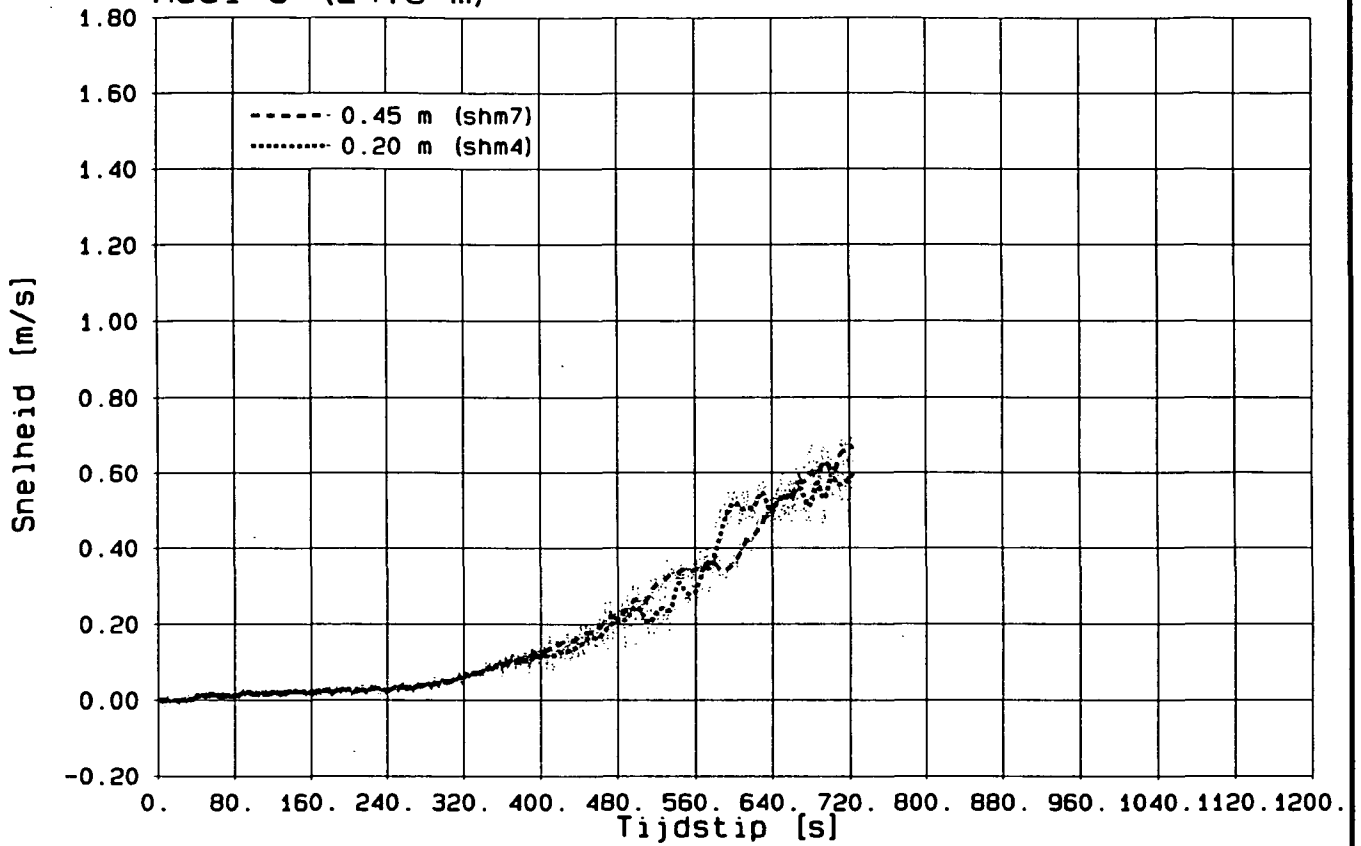
GEMETEN SNELHEIDSVERLOOP
 Aanstroomraaien A en B

T2

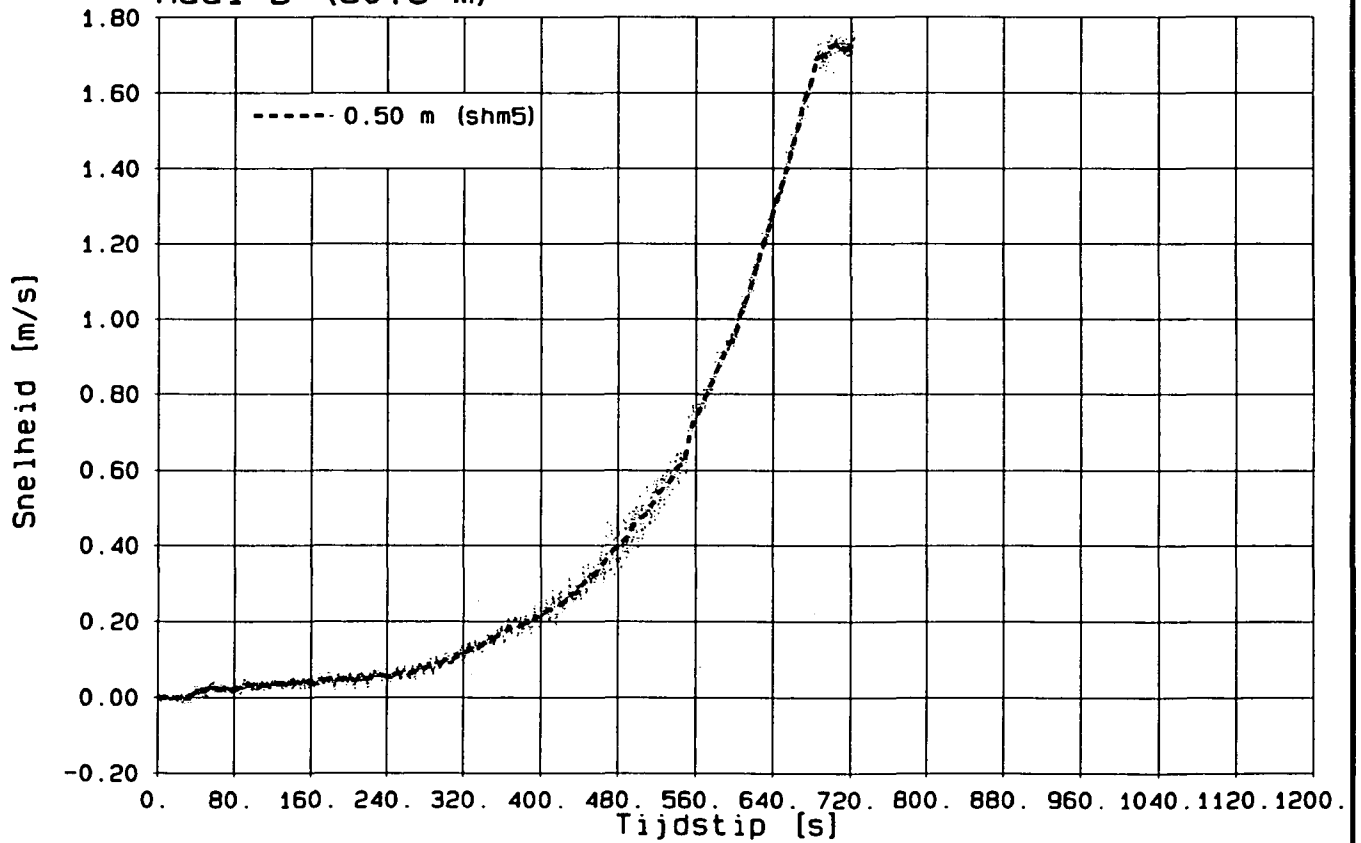
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

H1242-II FIG.5503

Raai C (24.5 m)



Raai D (30.5 m)



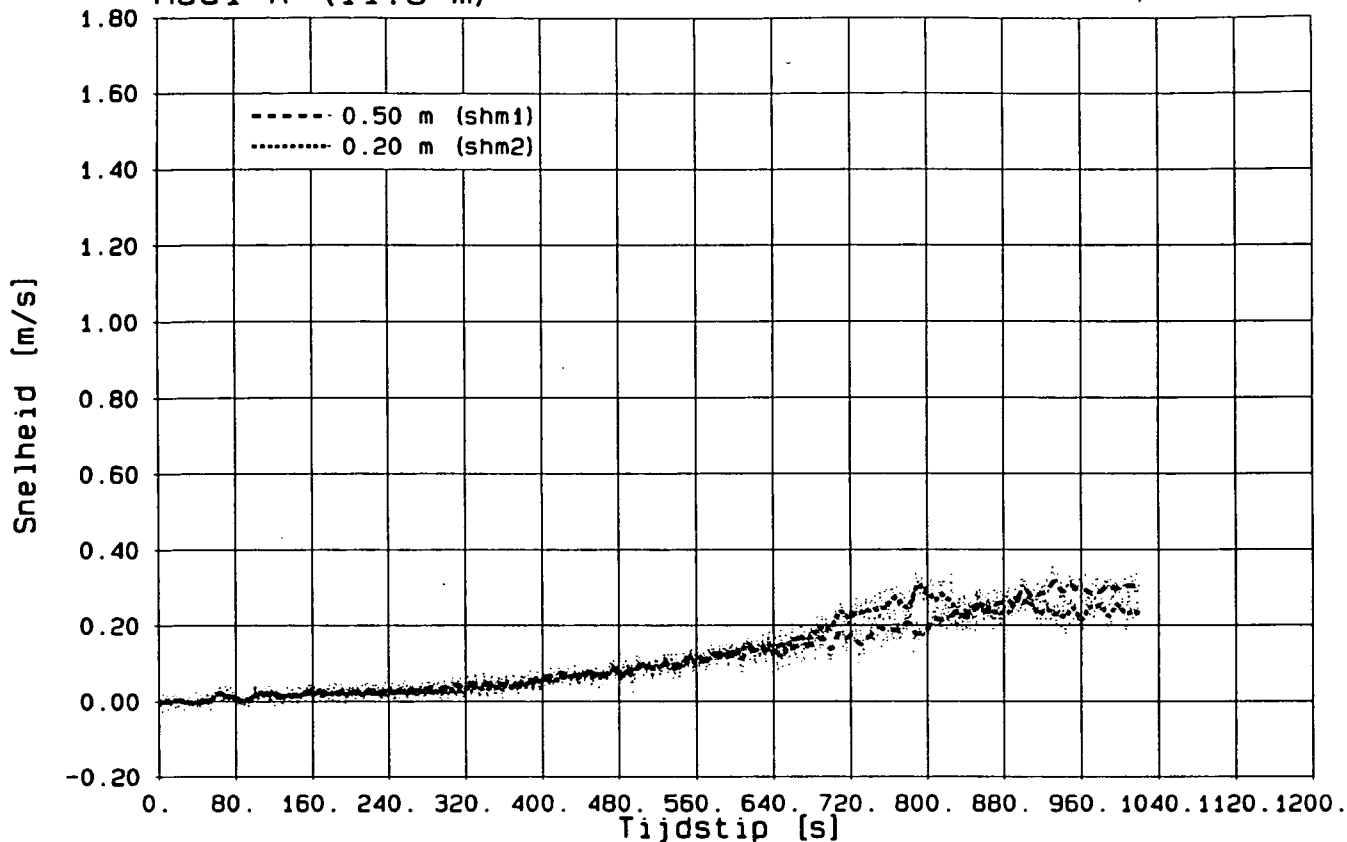
GEMETEN SNELHEIDSVERLOOP
Aanstroomraaien C en D

T2

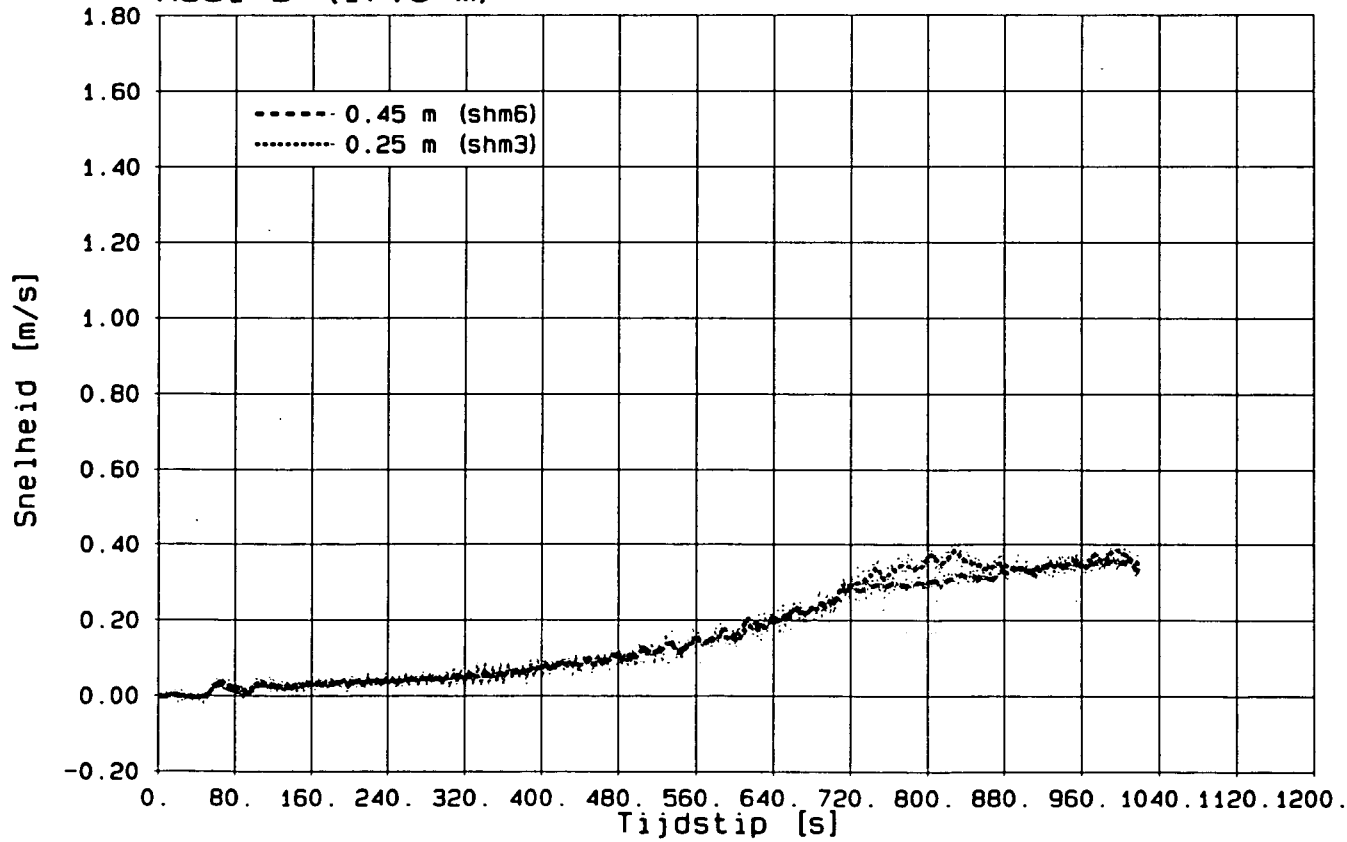
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

H1242-II FIG. 5504

Raai A (11.5 m)



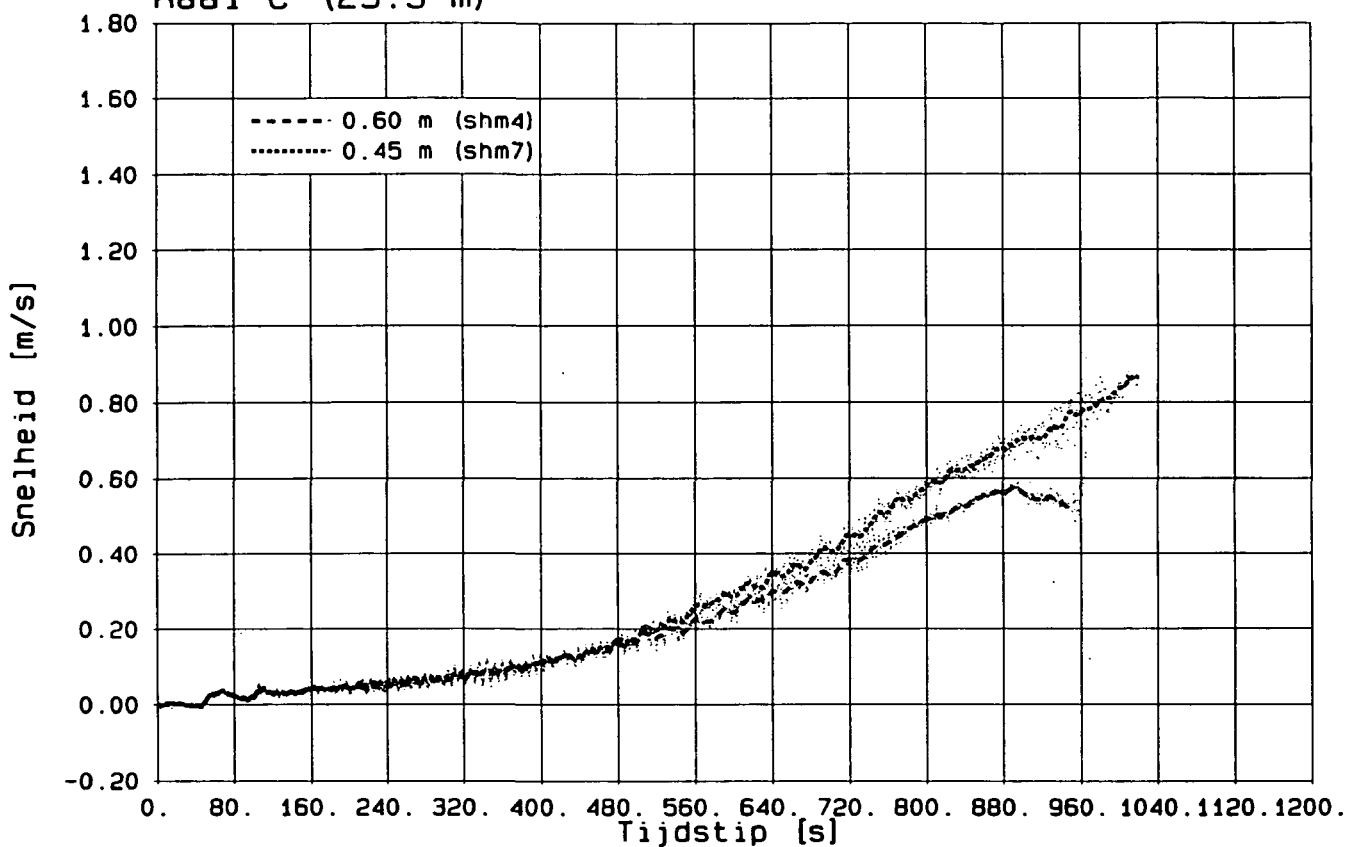
Raai B (17.5 m)



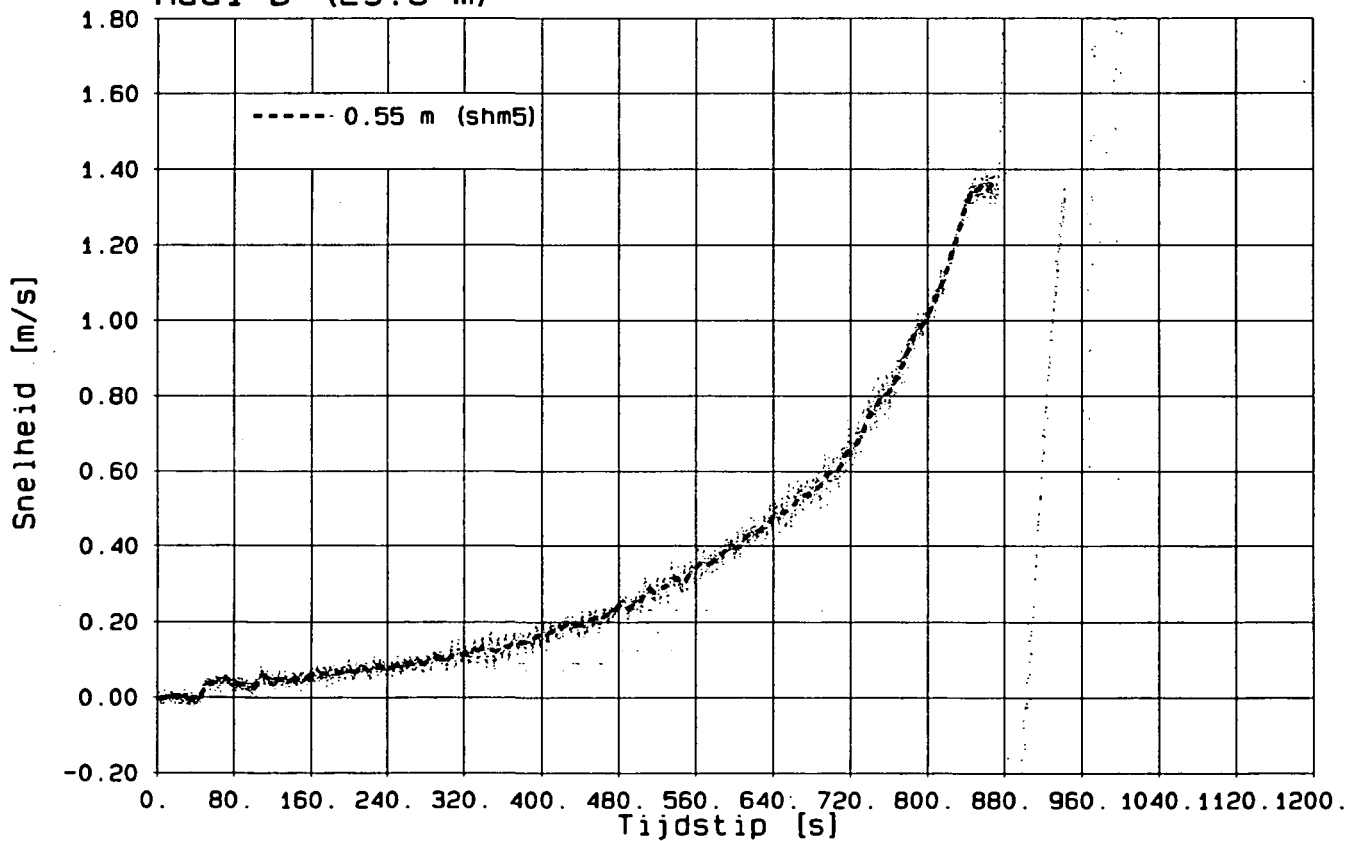
GEMETEN SNELHEIDSVERLOOP
 Aanstroomraaien A en B

T3

Raai C (23.5 m)



Raai D (29.5 m)



GEMETEN SNELHEIDSVERLOOP

Aanstroomraaien C en D

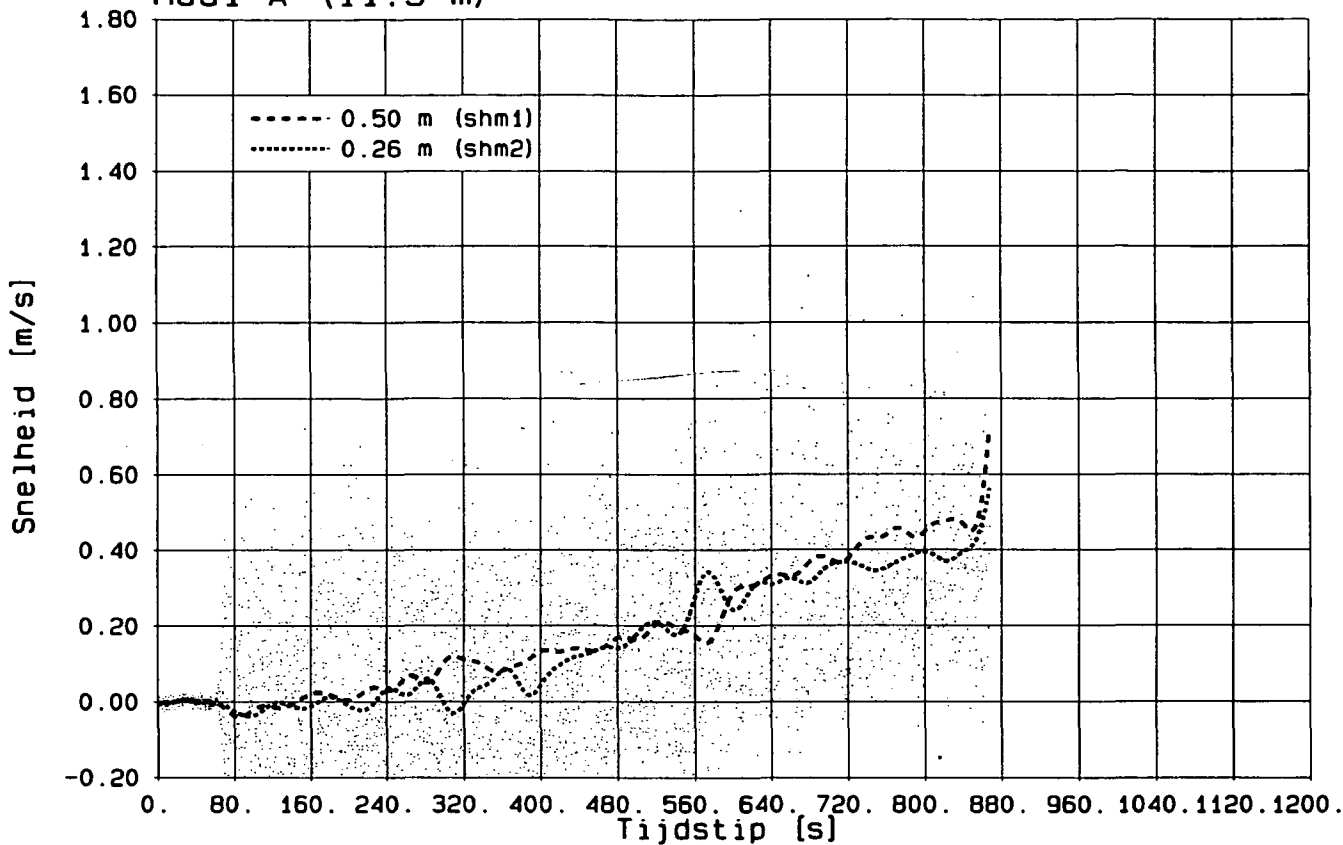
T3

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

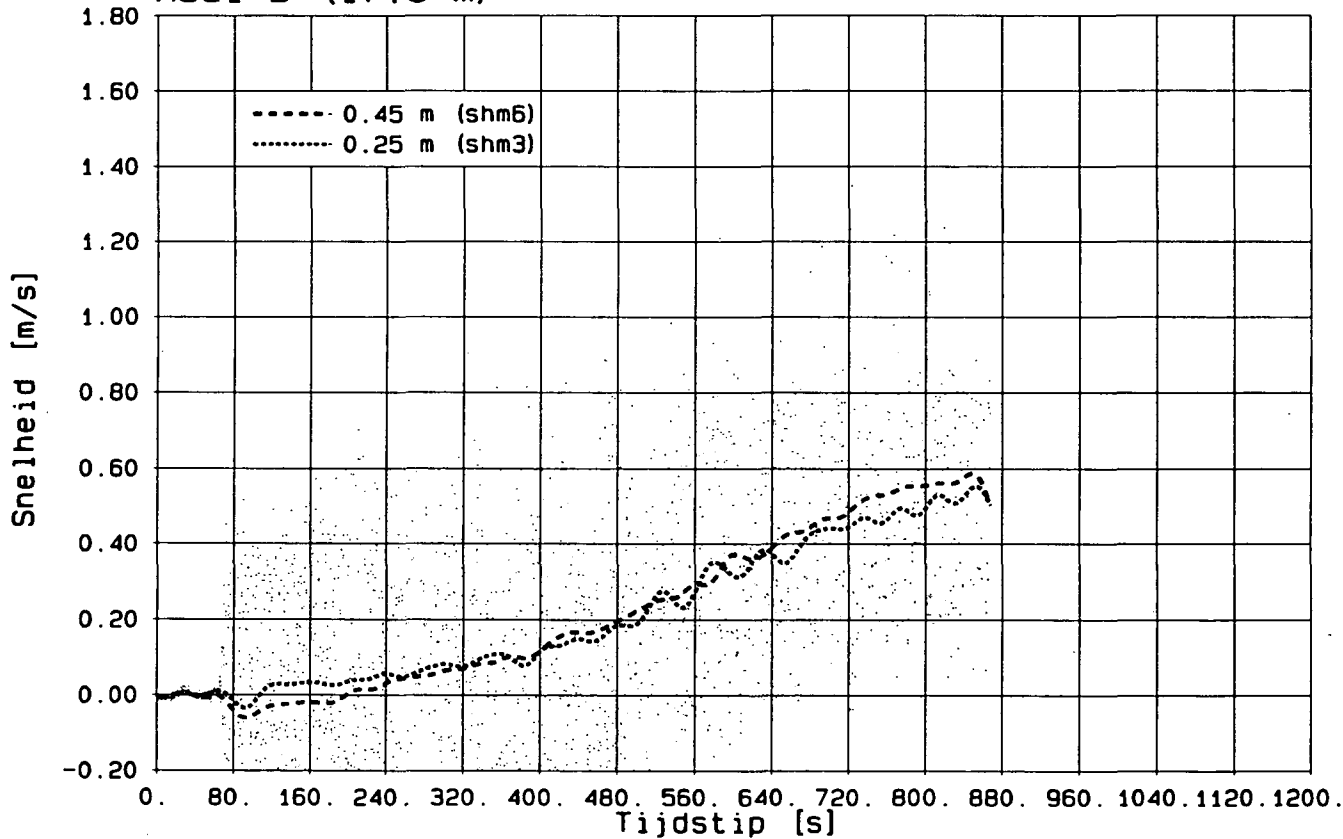
H1242-II

FIG. 5506

Raai A (11.5 m)



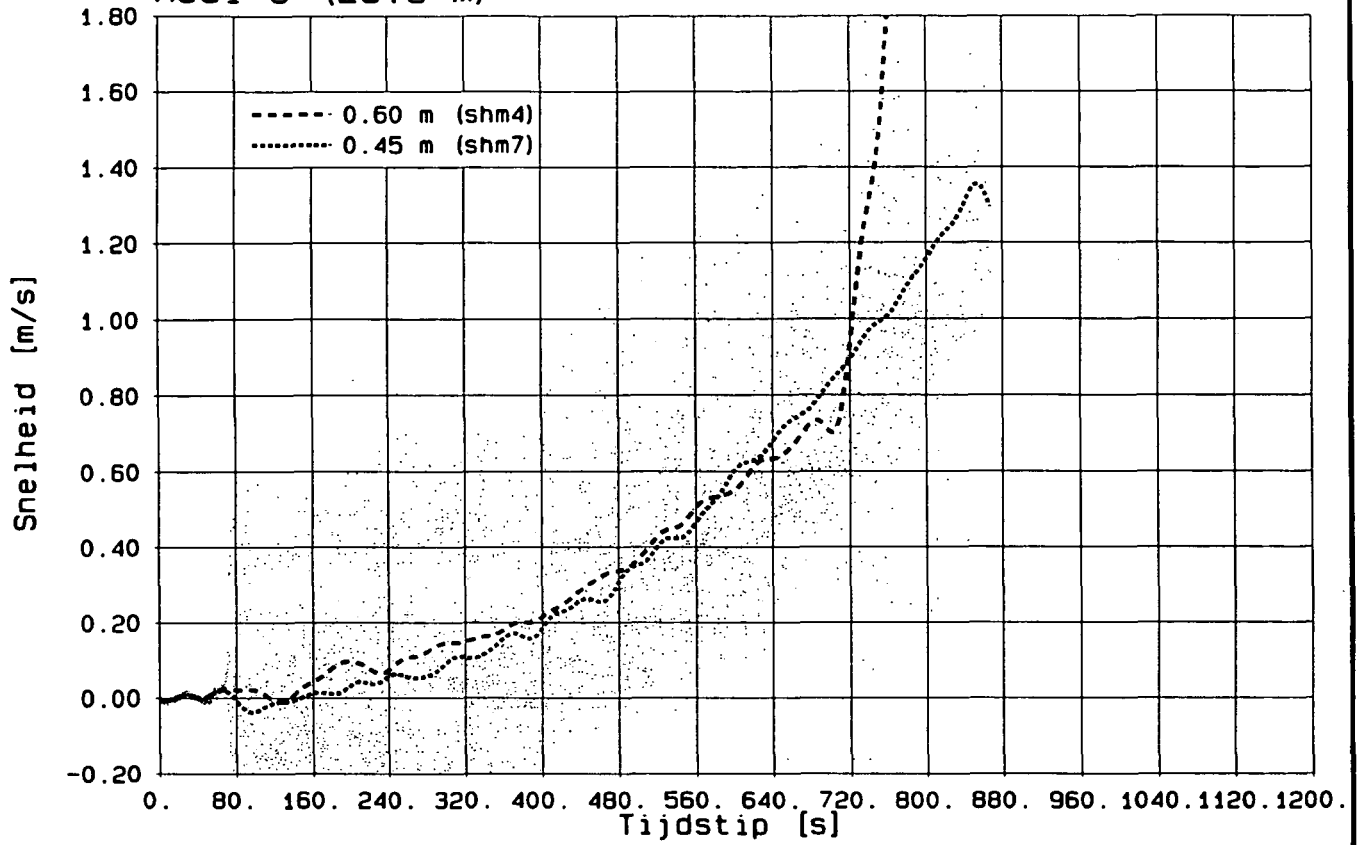
Raai B (17.5 m)



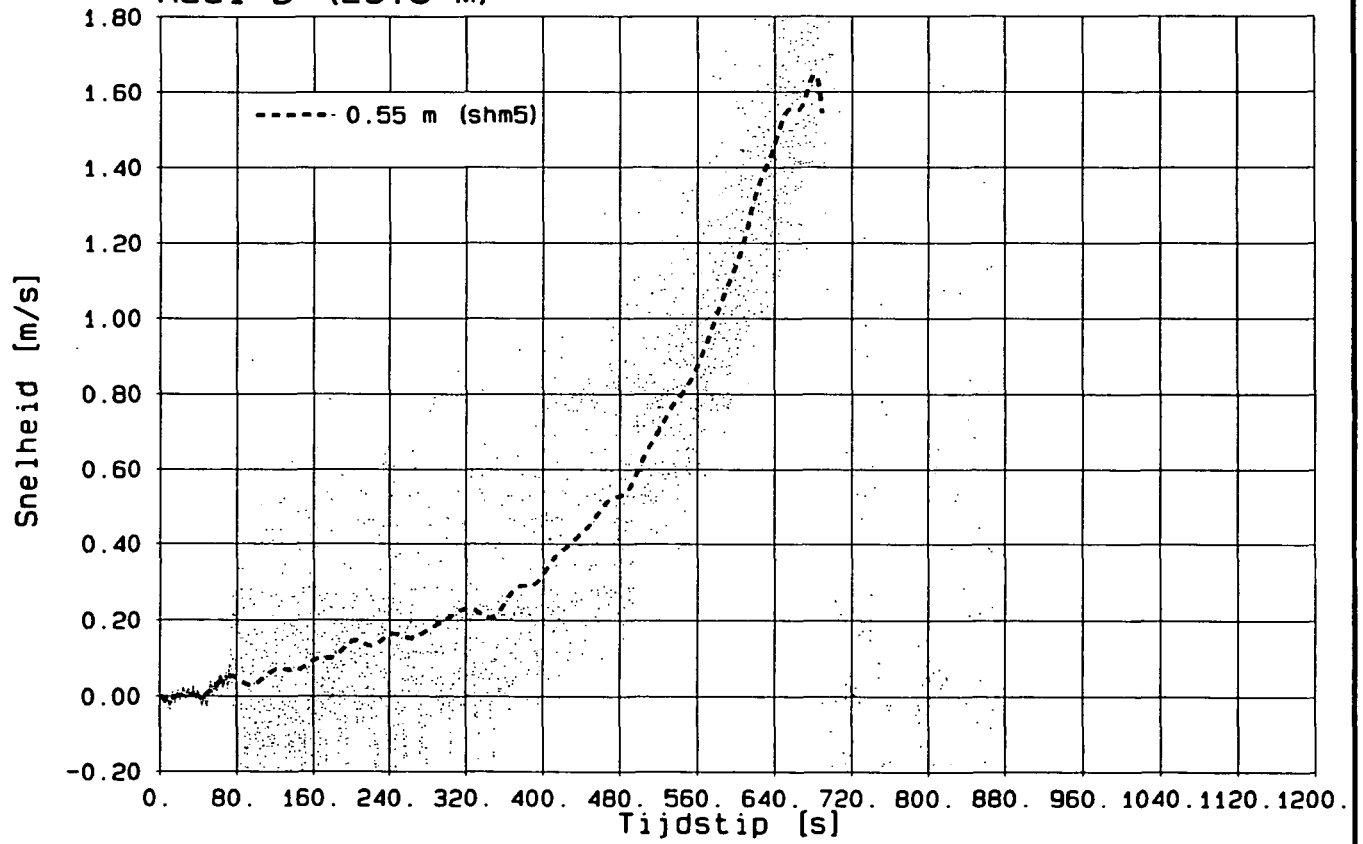
GEMETEN: SNELHEIDSVERLOOP (gemiddeld)
 Aanstroomraaien A en B

T4

Raai C (23.5 m)



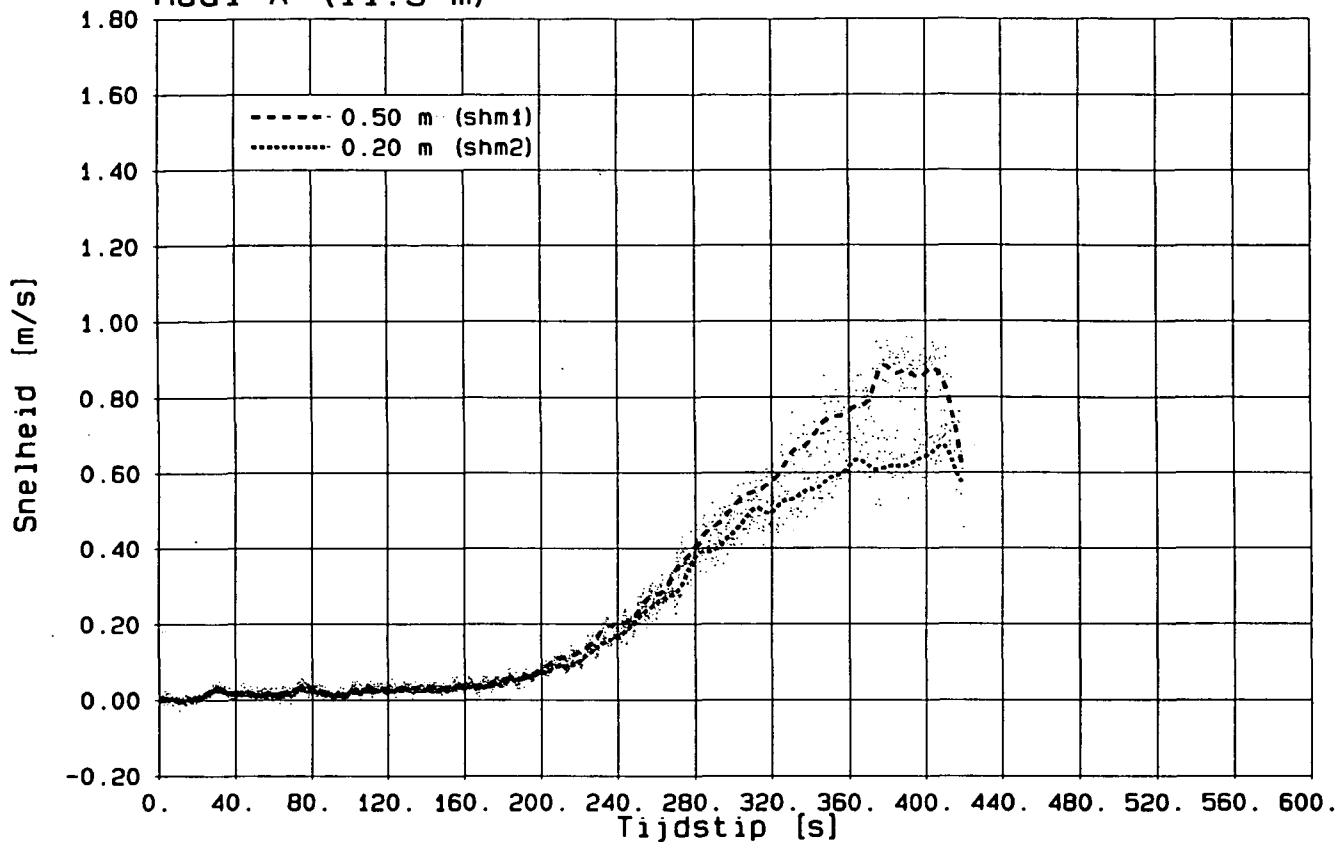
Raai D (29.5 m)



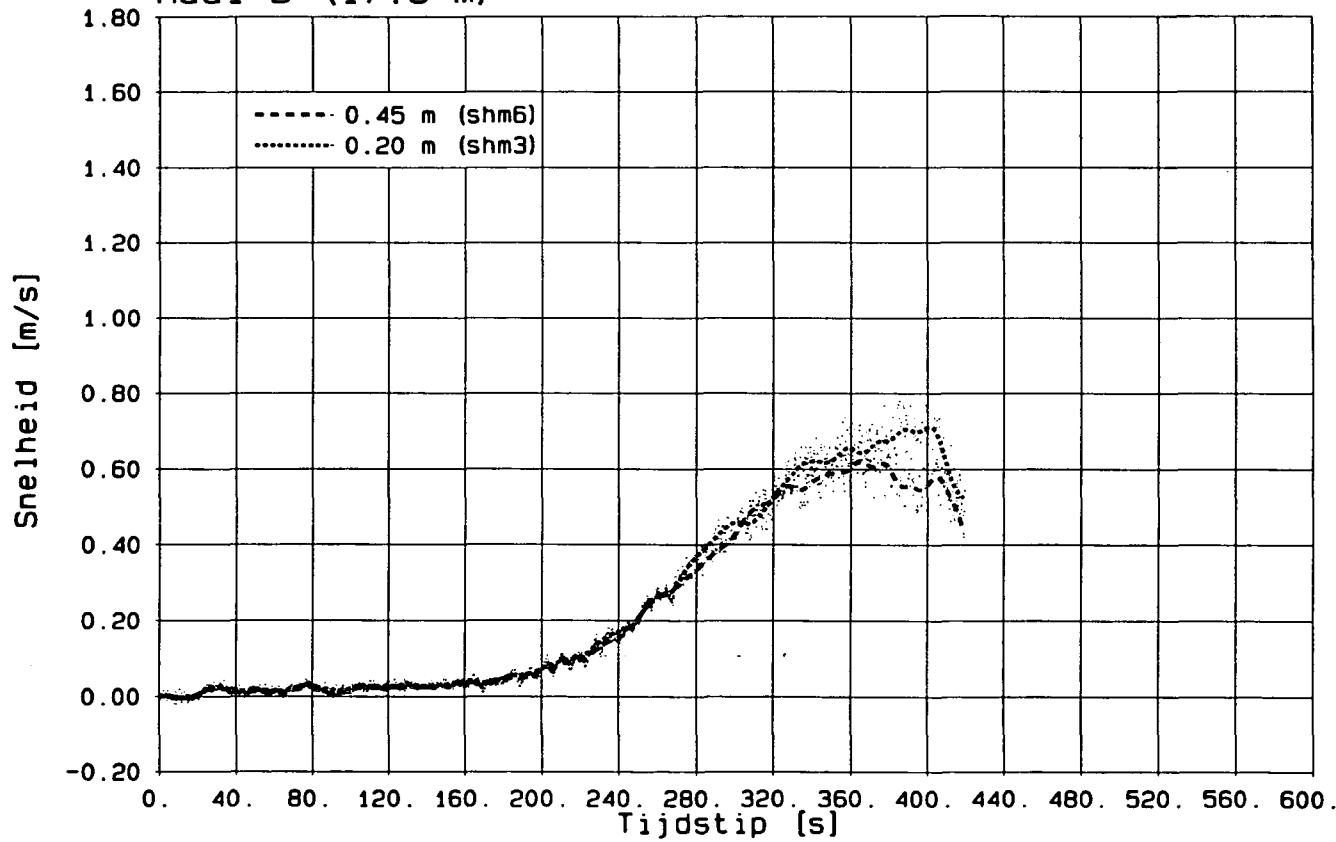
GEMETEN SNELHEIDSVEROLOOP (gemiddeld)
 Aanstroomraaien C en D

T4

Raai A (11.5 m)



Raai B (17.5 m)



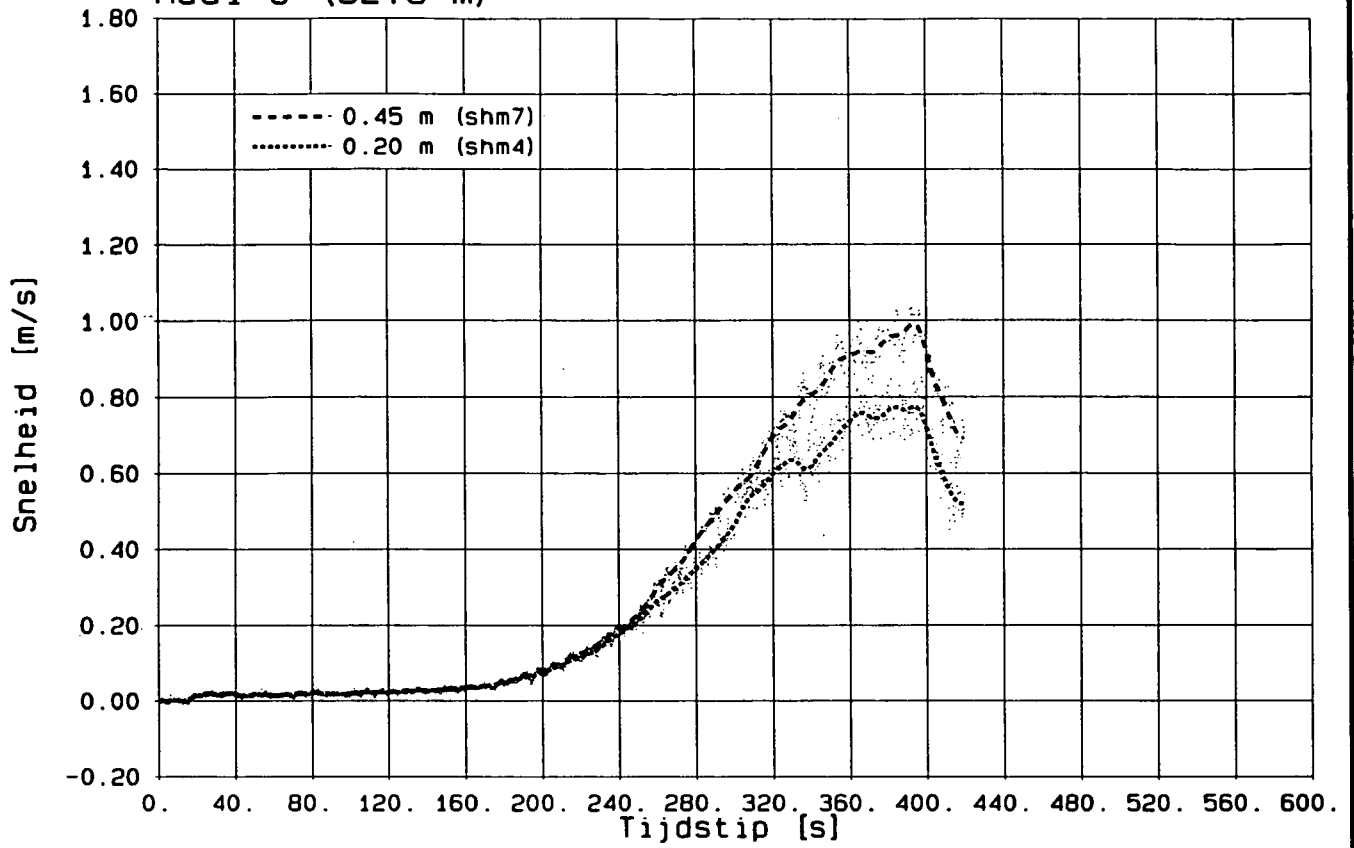
GEMETEN SNELHEIDSVERLOOP
 Aanstroomraaien A en B

T5

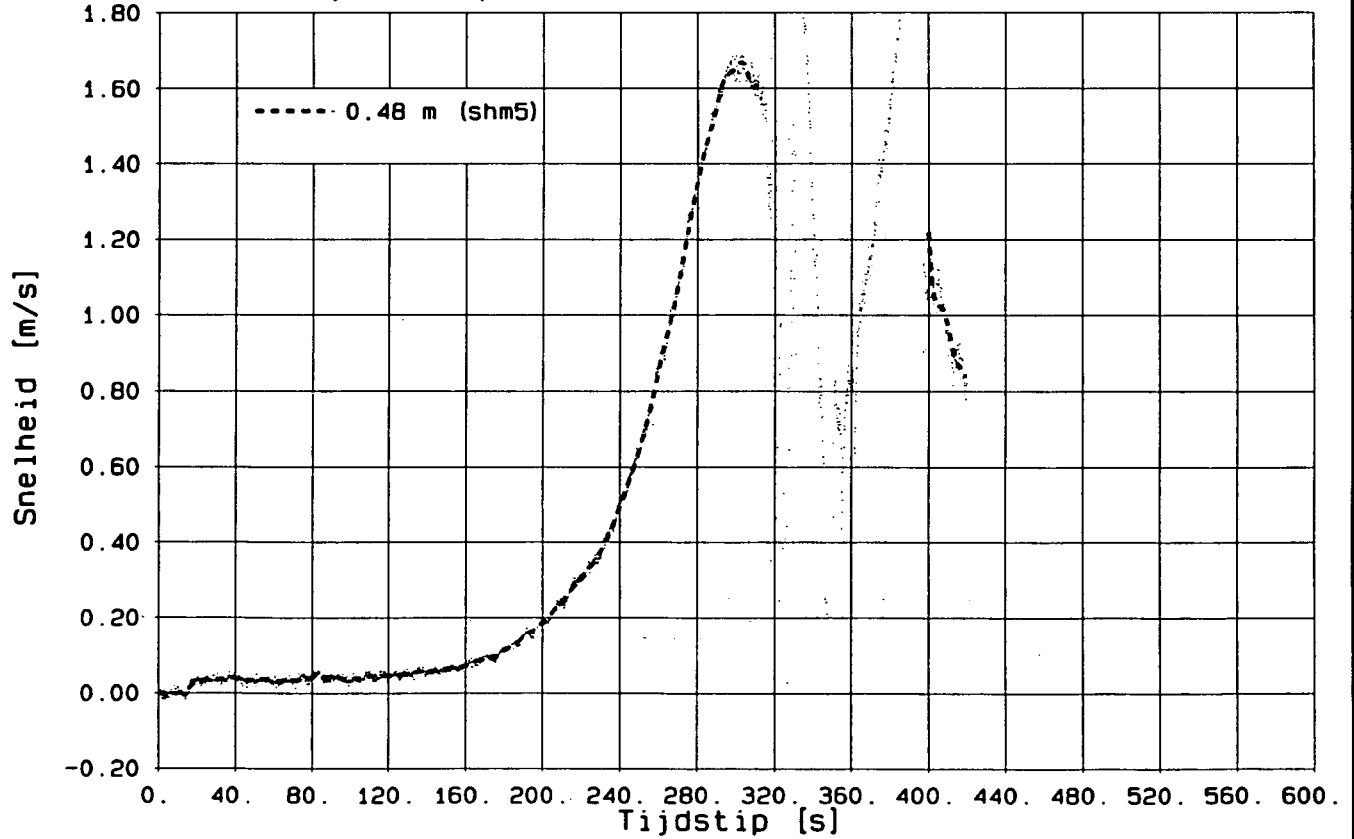
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

H1242-II FIG. 5509

Raai C (32.5 m)



Raai D (34.5 m)

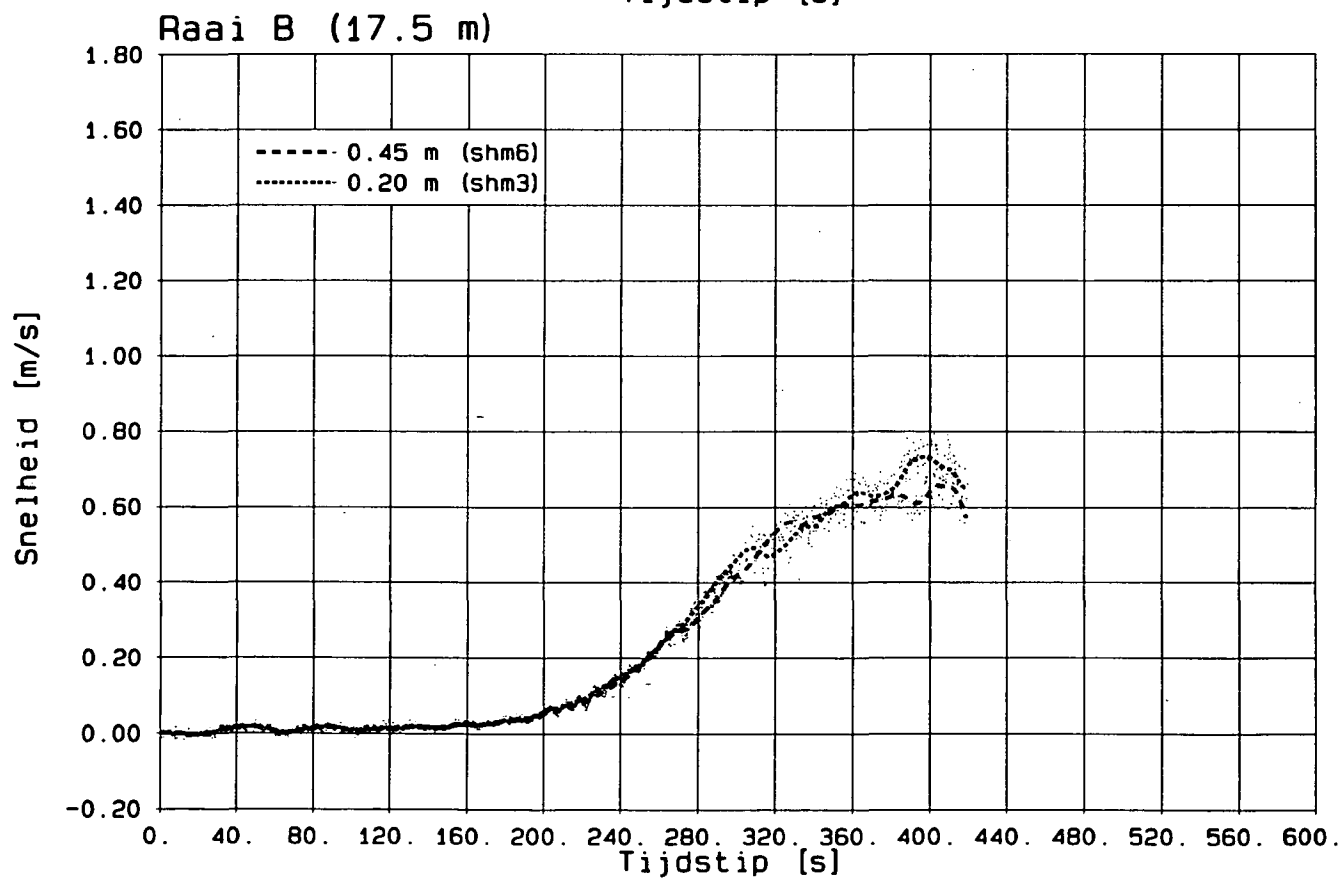
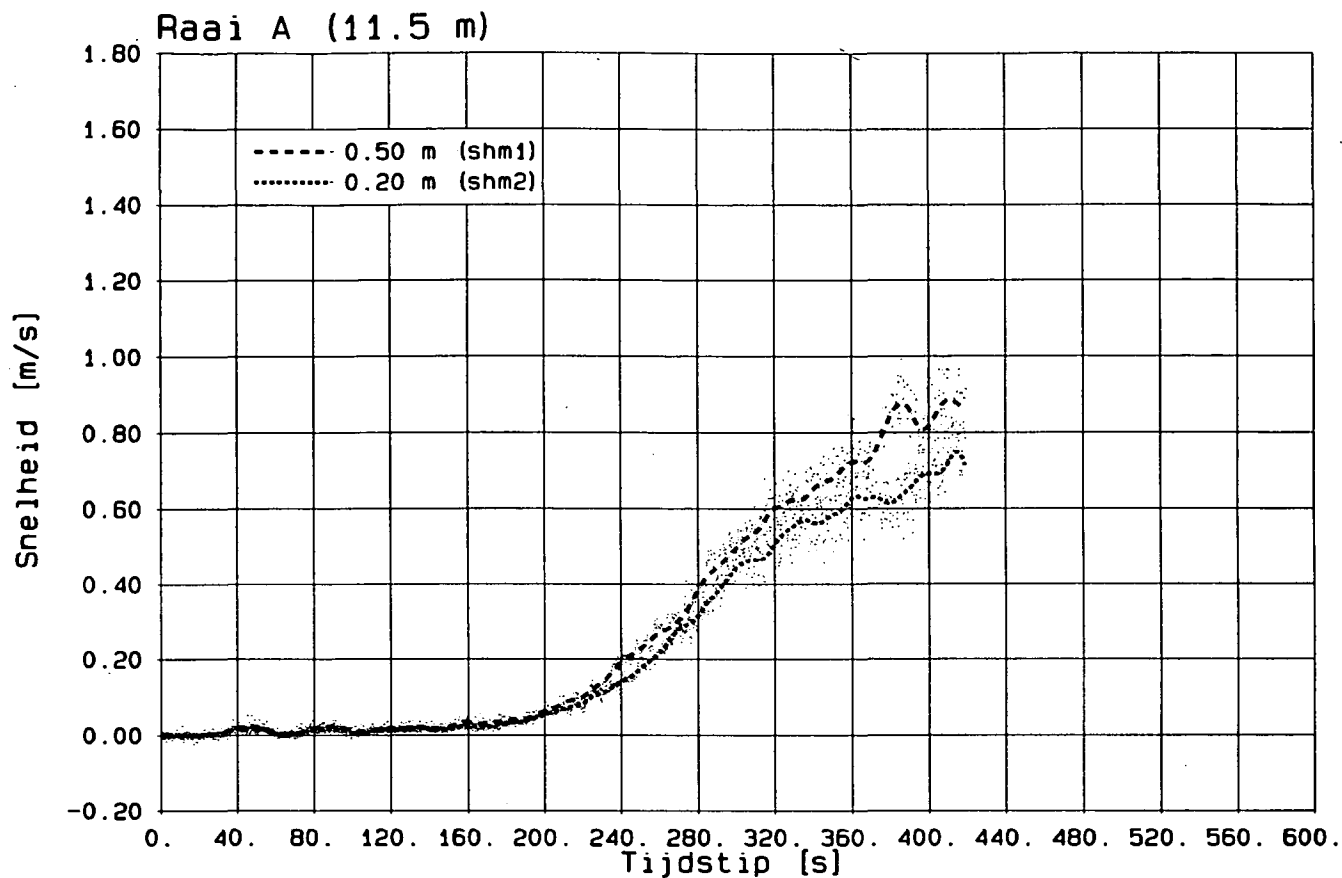


GEMETEN SNELHEIDSVERLOOP
Aanstroomraaien C en D

T5

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

H1242-II FIG. 5510



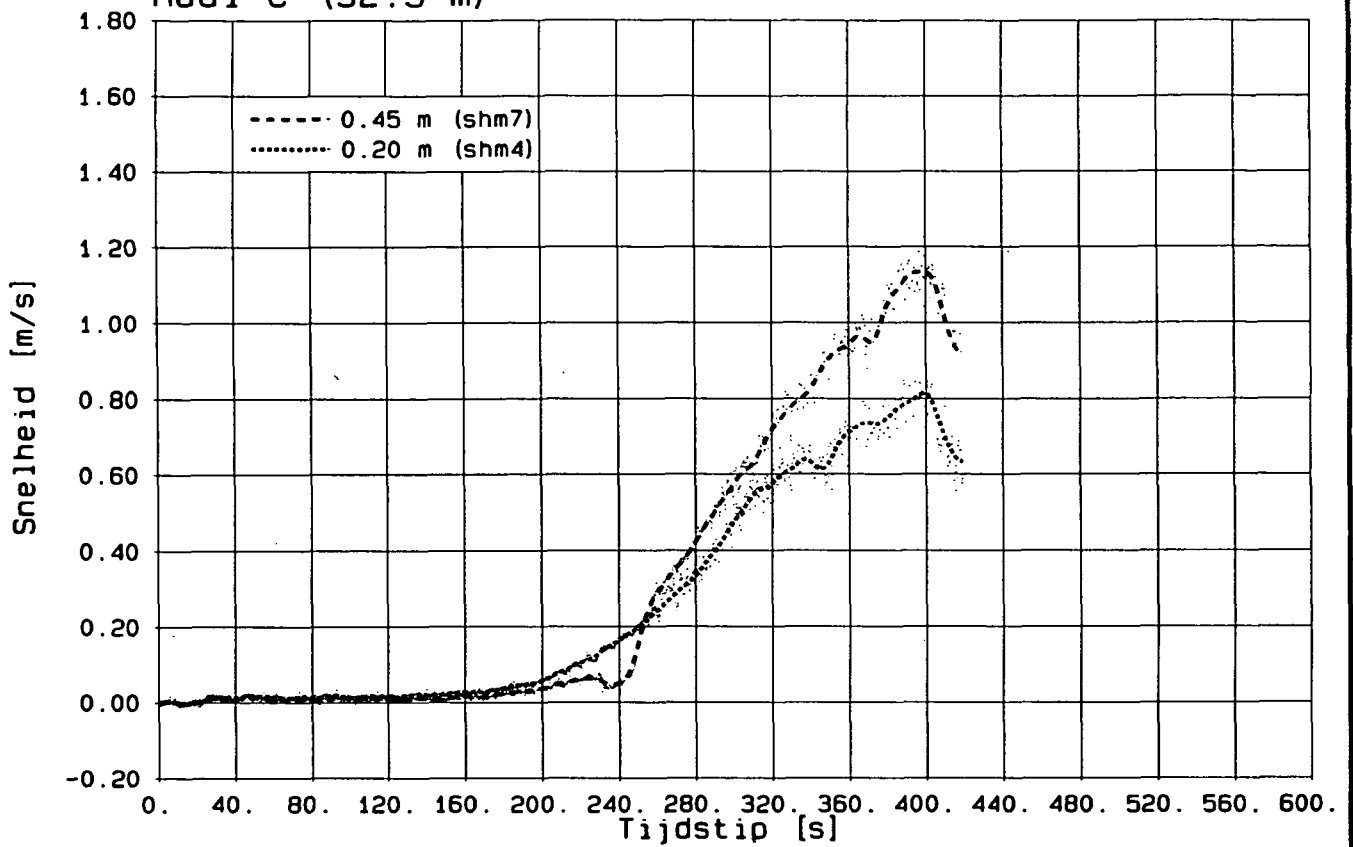
GEMETEN SNELHEIDSVERLOOP
 Aanstroomraaien A en B

T5A

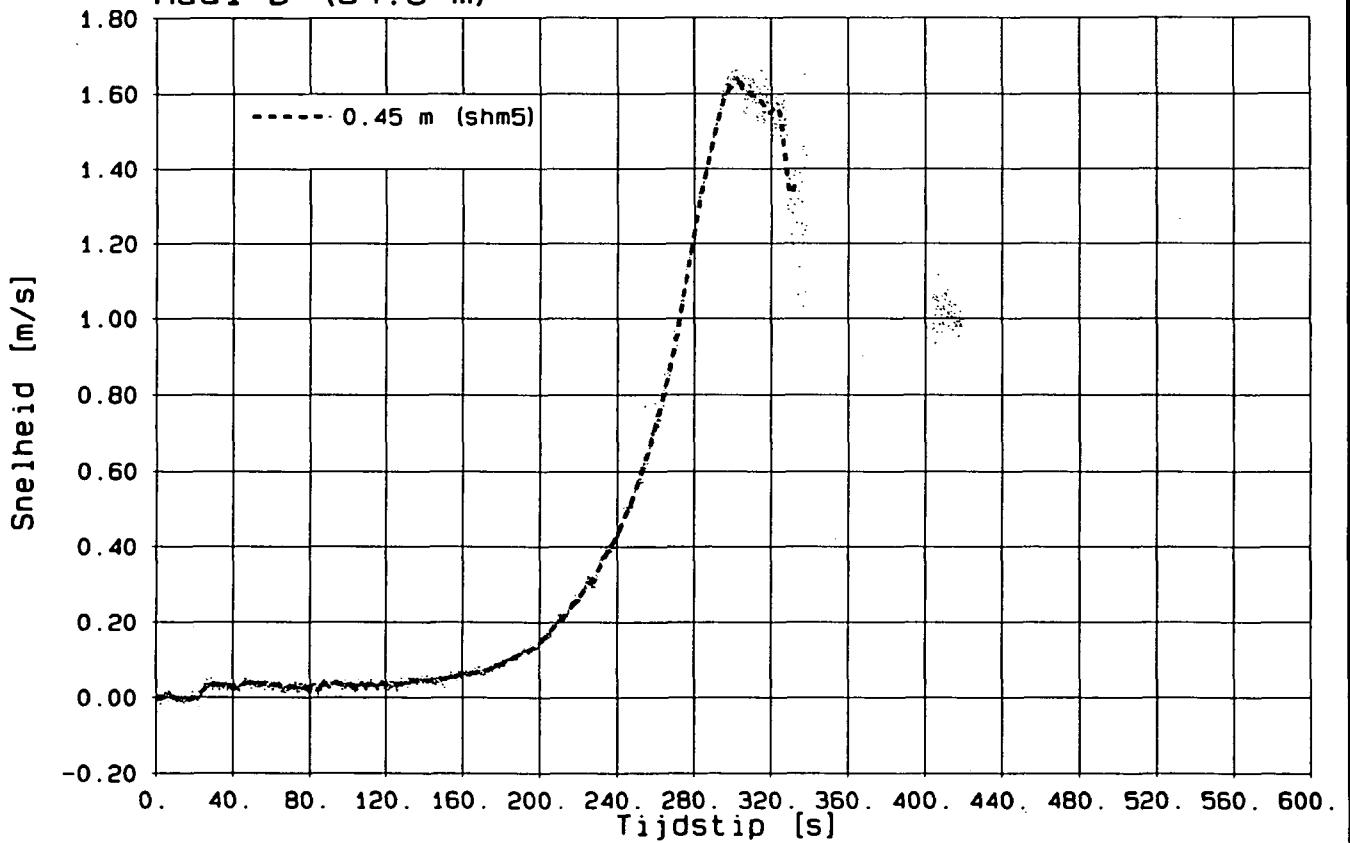
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

H1242-II FIG.5511

Raai C (32.5 m)



Raai D (34.5 m)



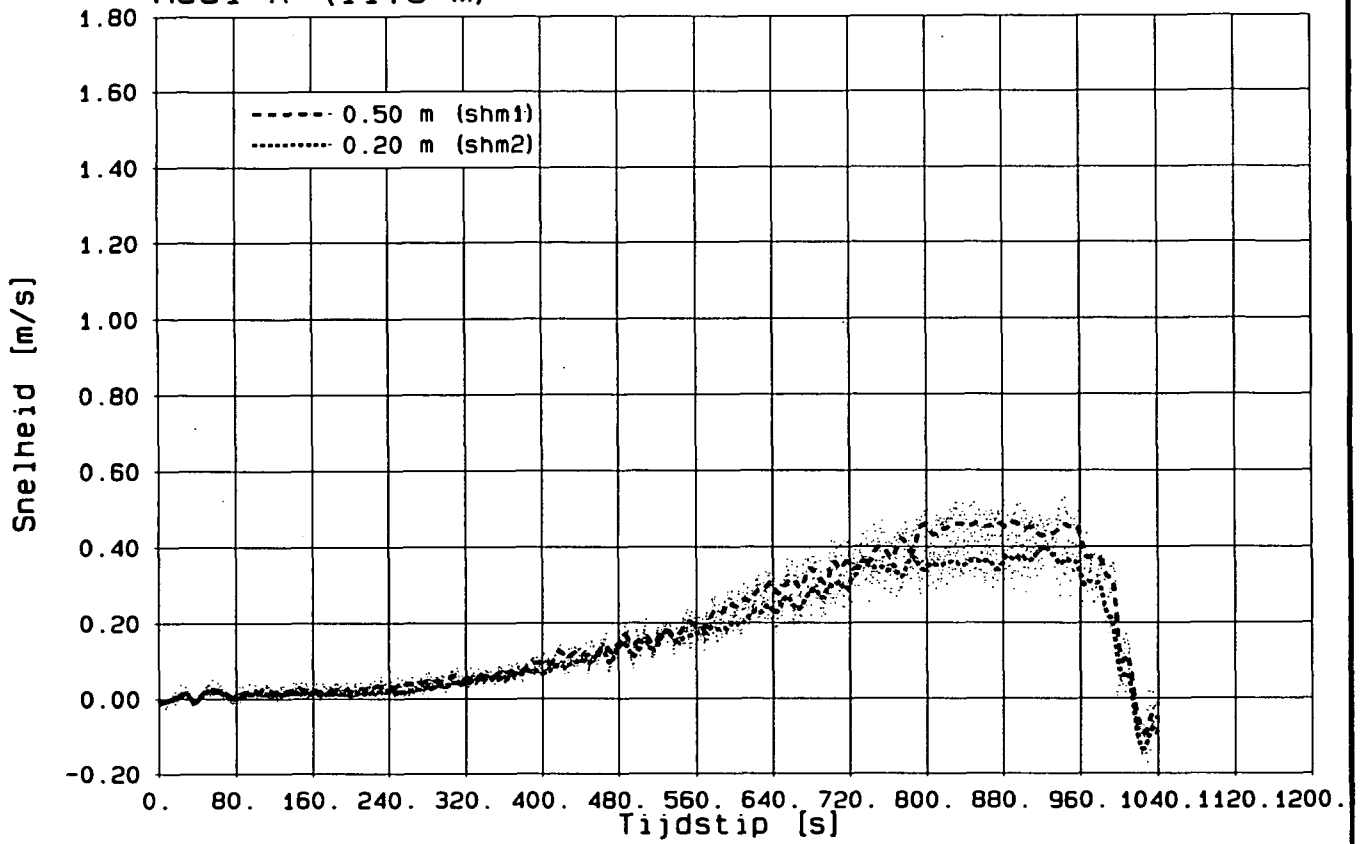
GEMETEN SNELHEIDSVIERLOOP
Aanstroomraaien C en D

T5A

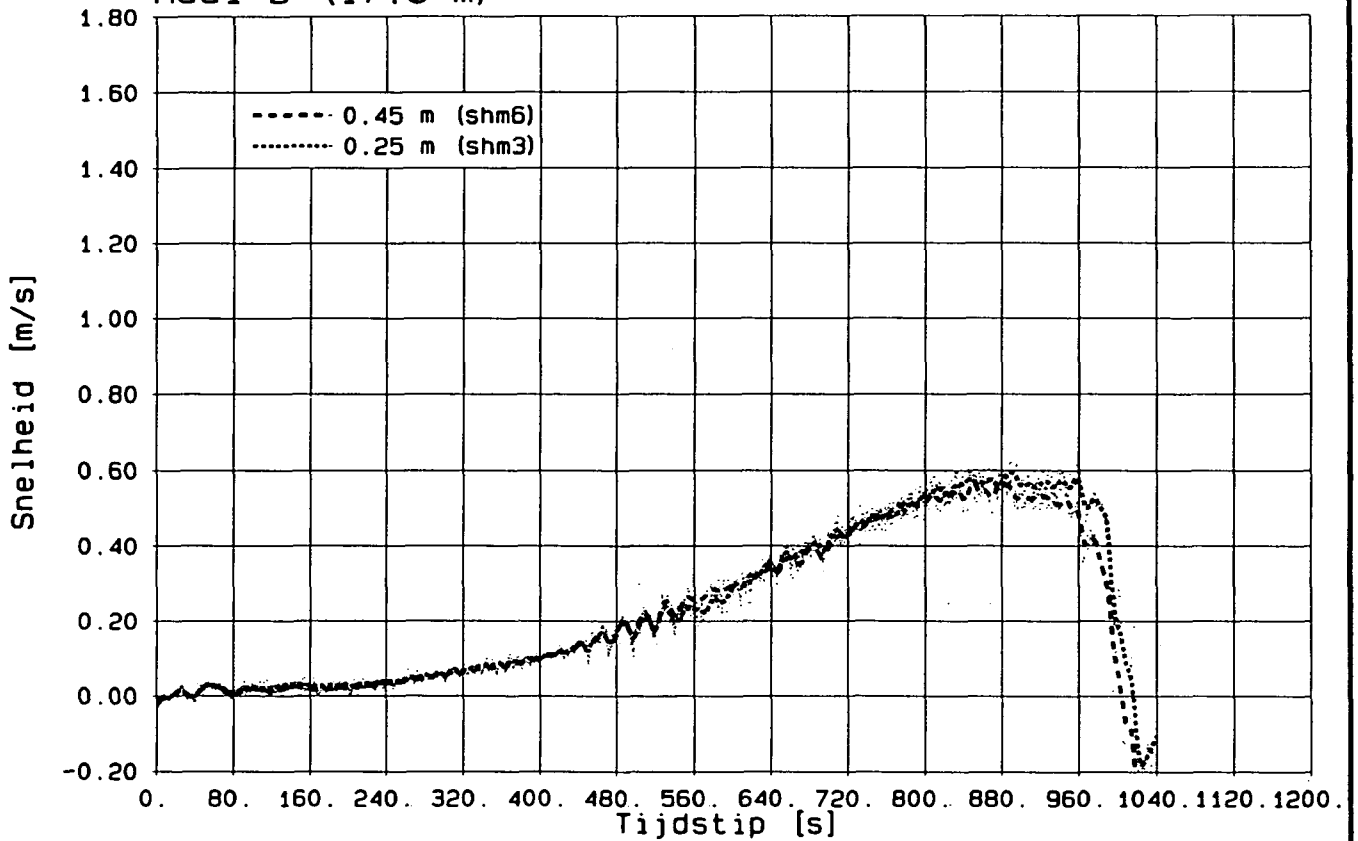
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

H1242-II FIG. 5512

Raai A (11.5 m)



Raai B (17.5 m)



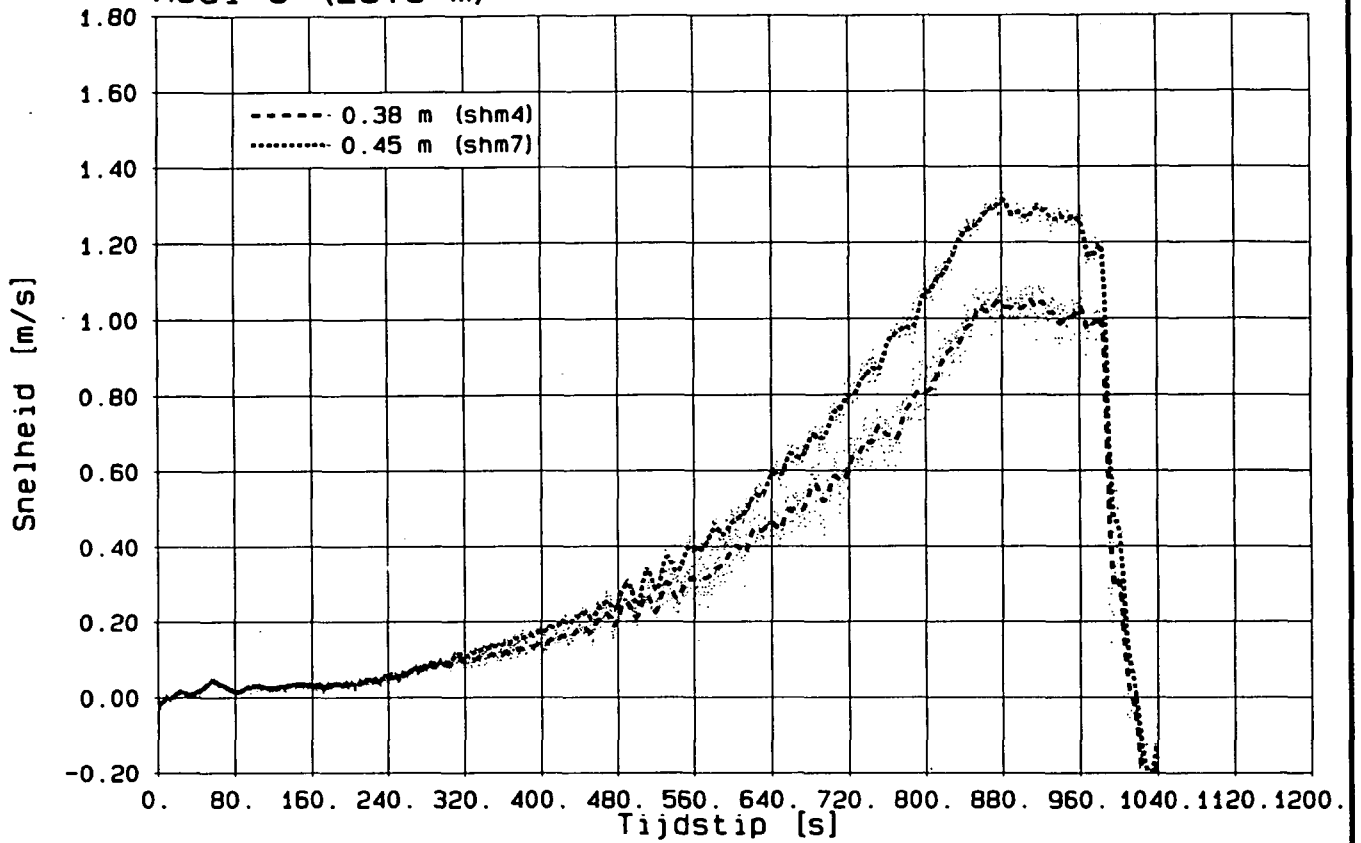
GEMETEN SNELHEIDSVERLOOP
Aanstroomraaien A en B

T6

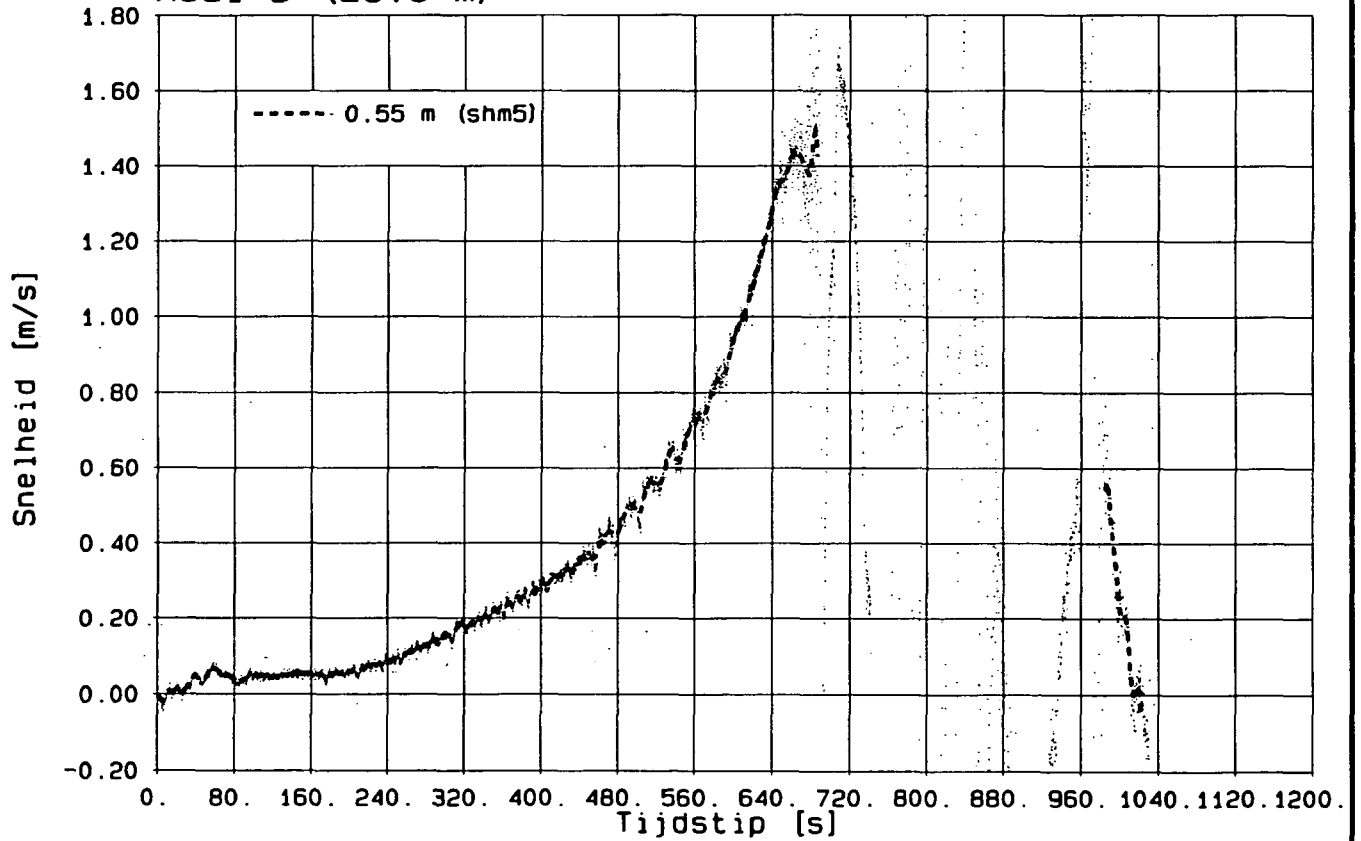
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

H1242-II FIG.5513

Raai C (23.5 m)



Raai D (29.5 m)



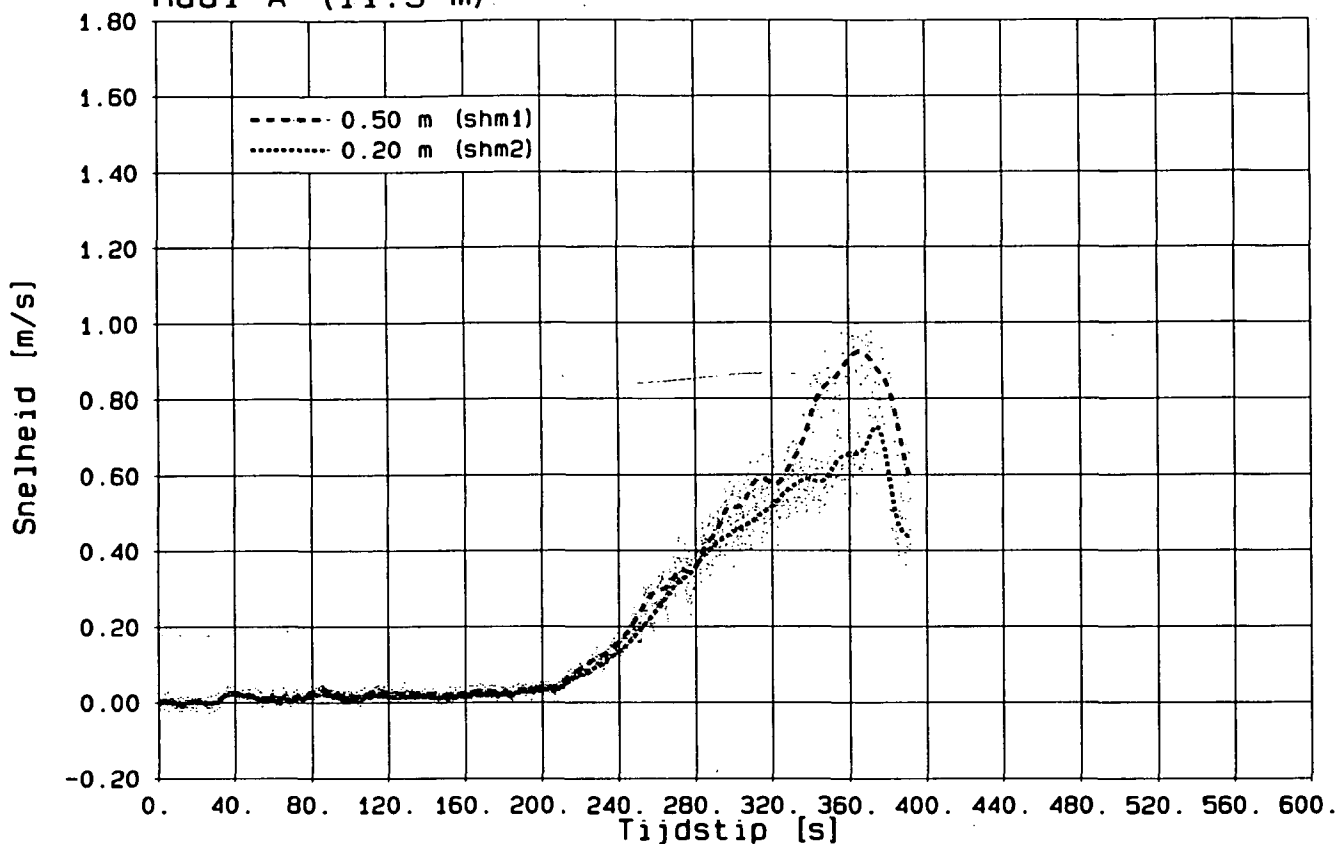
GEMETEN SNELHEIDSVERLOOP
Aanstroomraaien C en D

T6

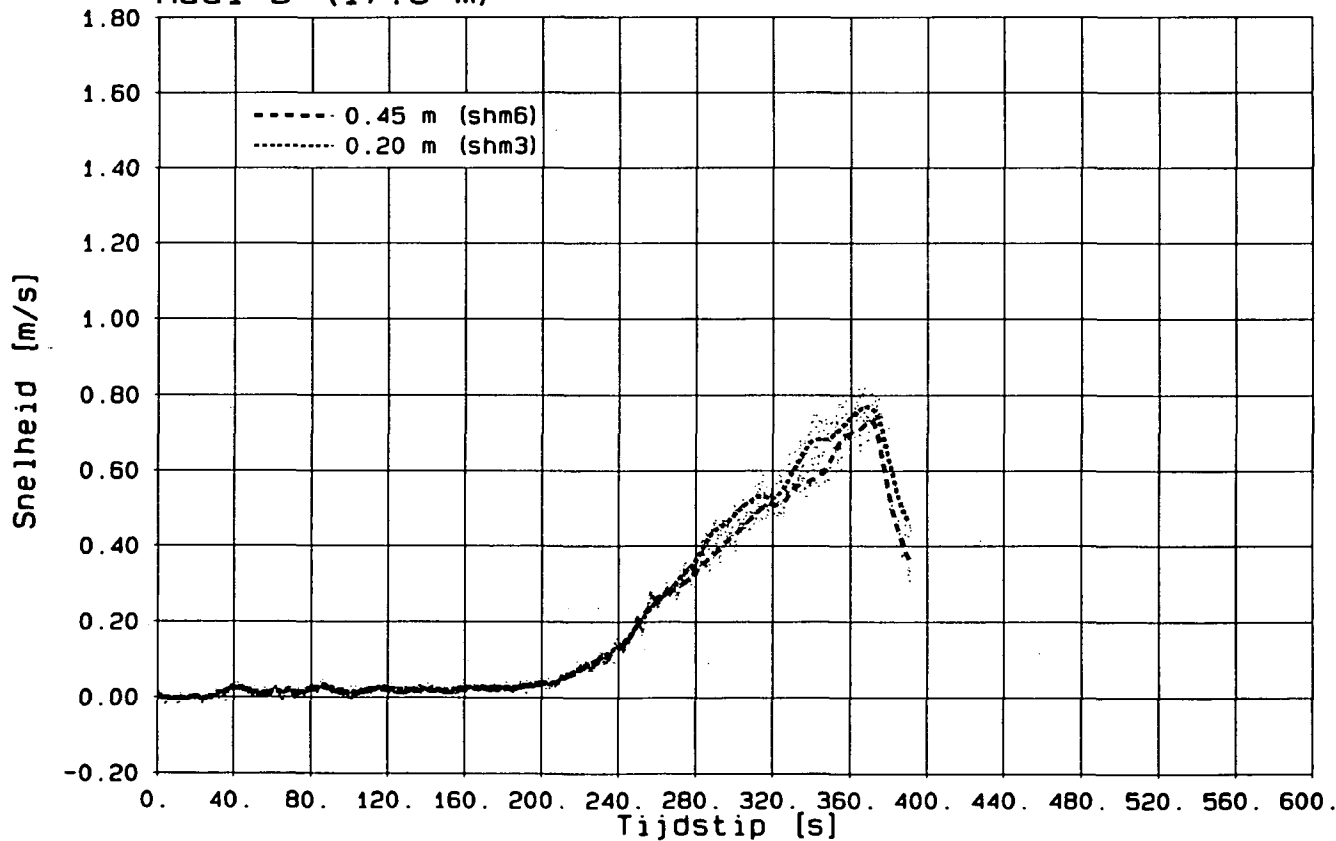
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

H1242-II FIG.5514

Raai A (11.5 m)



Raai B (17.5 m)



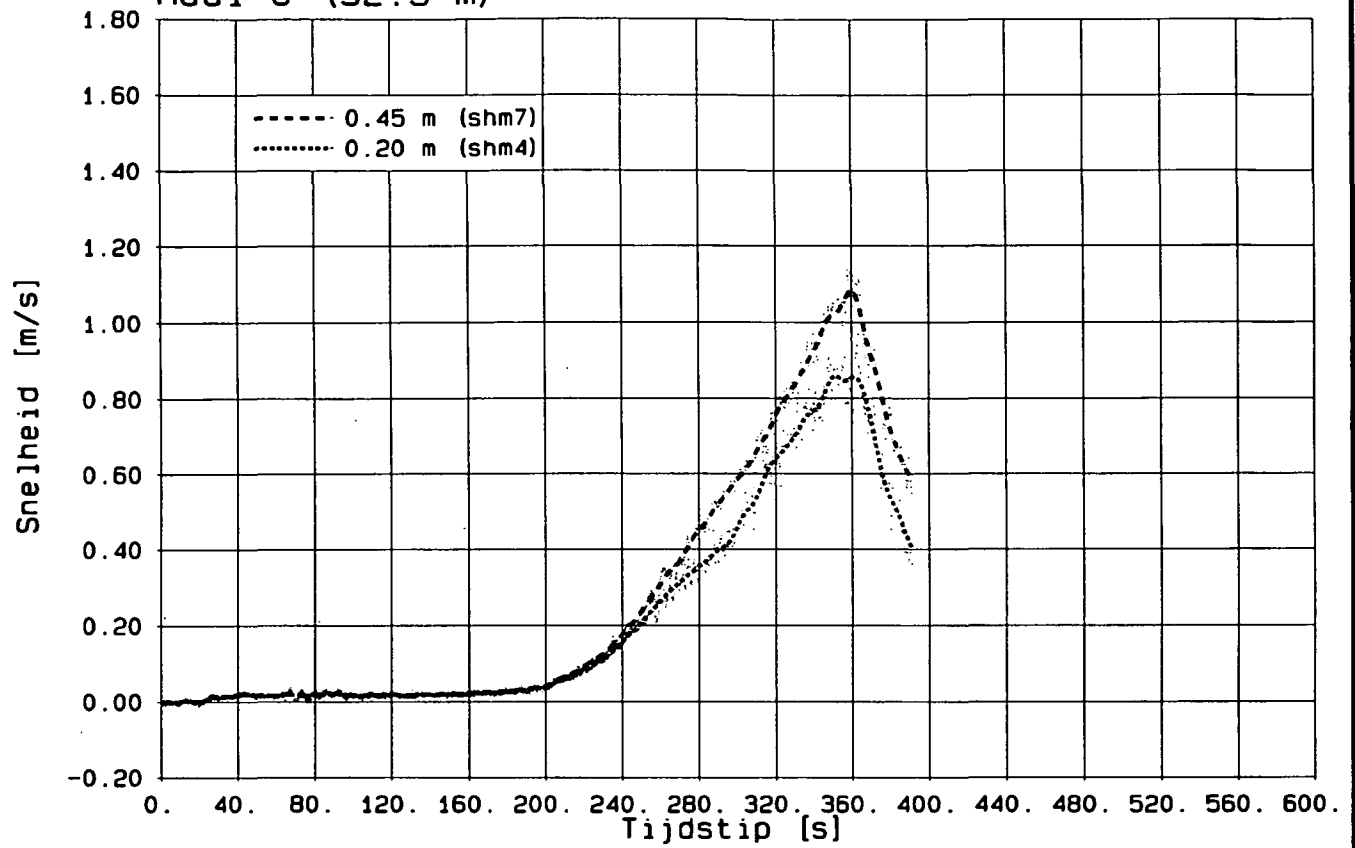
GEMETEN SNELHEIDSVERLOOP
Aanstroomraaien A en B

T7

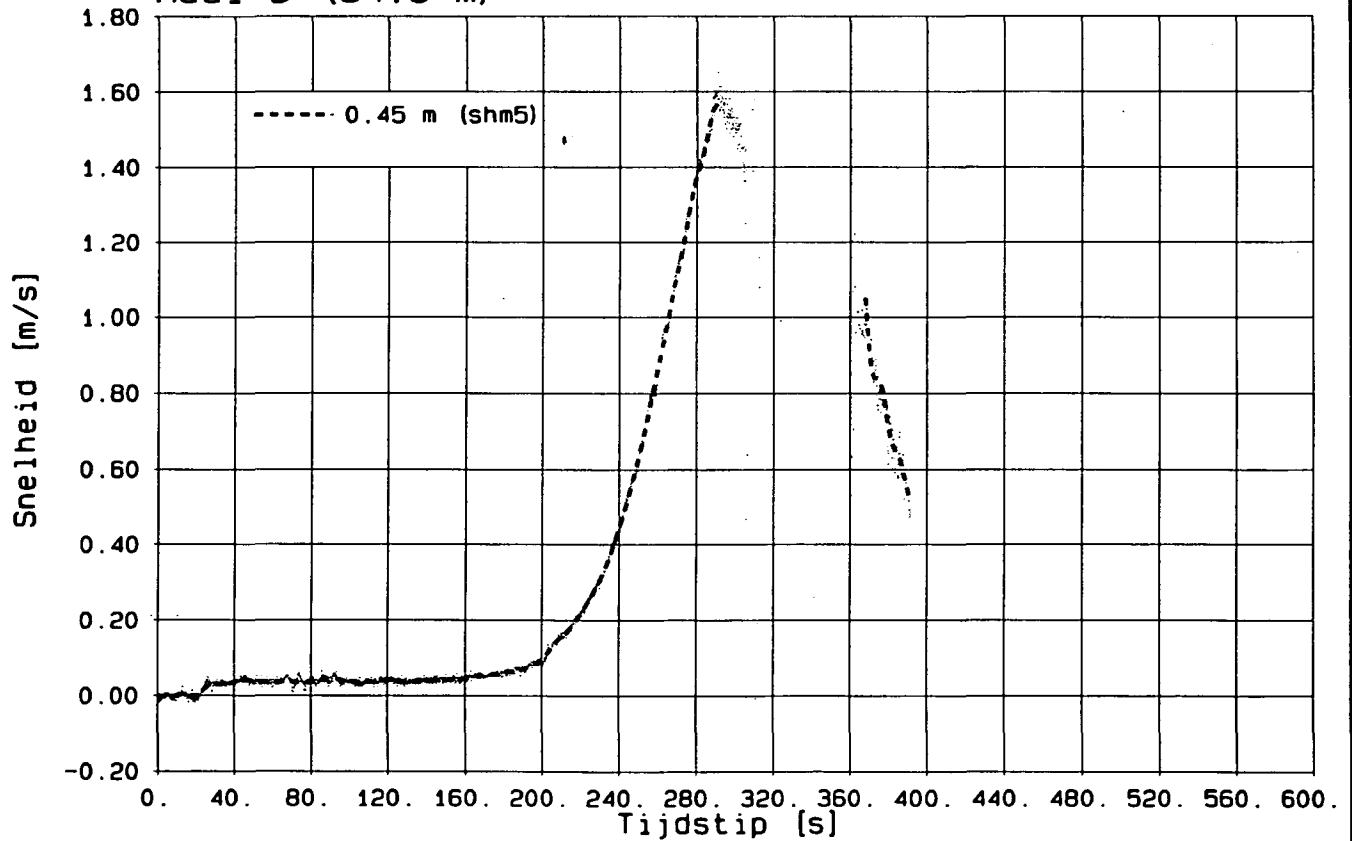
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

H1242-II FIG.5515

Raai C (32.5 m)



Raai D (34.5 m)



GEMETEN SNELHEIDSVERLOOP
 Aanstroomraaien C en D

T7

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

H1242-II

FIG. 5516

6 Analyse resultaten

6.1 Inleiding

De analyse van de meetresultaten richt zich primair op de waargenomen profielontwikkelingen. Hiertoe zijn echter eerst de waterstanden, snelheden en debieten in de aanstroomraaien berekend.

Voor de analyse van deze signalen en de benodigde onderlinge vergelijking is een geavanceerde middelingsroutine toegevoegd aan het AUKE-PC-signaalsturing/verwerking-pakket. Deze procedure, SMOOTH, resulteert in een soort van lopend gemiddelde van een niet harmonisch, random lijkend signaal. De mate van 'smoothing' is afhankelijk van het aantal punten, ofwel de middelingstijd. Bij de verwerking is 10 s (zijnde 250 punten bij een bemonsteringsfrequentie van 25 Hz) aangehouden als goede keuze.

Vervolgens zijn per karakteristieke fase van de profielontwikkeling (zie Hoofdstuk 4) de relevante processen nader omschreven.

Tenslotte is in paragraaf 6.8 een eerste poging gedaan om de optredende transportgrootte en -verdeling te berekenen. Voor een meer uitgebreide uitwerking kan worden verwezen naar deel I van deze studie.

In het volgende hoofdstuk zijn de conclusies m.b.t. de effecten van korreldiameter, voorlandhelling en dergelijke nader uitgewerkt.

6.2 Waterstanden

Het verloop van de waterstanden in de vier aanstroomraaien is voor alle proeven gegeven in de Figuren 6.2.1 t/m 6.2.9.

De beginwaterstand voor de proeven T1 t/m T7 bedroeg gemiddeld +0,7506 m. Gedurende een aantal minuten blijkt het mogelijk om een nagenoeg constante buitenwaterstand te handhaven, totdat er zoveel water over de bres afstroomt dat de pompen het niet meer kunnen bijhouden. De waterstand in alle aanstroomraaien begint nu te zakken. In de figuren is duidelijk het waterstandsverhang tussen de verschillende raaien te zien. De waterstanden in raai A, B en C vertonen een nagenoeg gelijkblijvend niveauverschil. Dit betekent overigens ook dat het debiet door deze raaien, op een zeker tijdstip, gelijkwaardig zal zijn. De waterstand in raai D daarentegen, neemt vanaf een zeker tijdstip relatief sneller af, hetgeen betekent dat het debiet door deze raai (vanwege de afnemende berging tussen raai C en D) vanaf dit moment relatief groter zal zijn.

NB.: Het gegeven verloop van de buitenwaterstand als functie van de tijd kan dienen als invoer voor het mathematisch model; zie deel I van dit rapport.

Voor proef T4 is naast het verloop van de tijdsgemiddelde waterstand (Figuur 6.2.05), tevens de ontwikkeling van de significante golfhoogte berekend. Hiervoor is voor een drietal

tijdsfasen (met duur van 2 minuten) de significante golfhoogte en de gemiddelde golfperiode (tijdsduur gedeeld door het aantal golven) berekend voor elk van de vier meetlokaties. De resultaten van deze bewerking zijn gegeven in Tabel 6.2.

positie	instr.	90 < t < 210 s		330 < t < 450 s		570 < t < 690 s	
		H _{sig} [m]	T _{gem} [s]	H _{sig} [m]	T _{gem} [s]	H _{sig} [m]	T _{gem} [s]
11,50 m	ghm1	0,260	2,066	0,264	1,865	0,281	2,017
17,50 m	ghm2	0,265	2,175	0,265	2,035	0,284	2,015
23,50 m	ghm3	0,218	1,941	0,230	2,019	0,263	2,034
29,00 m	ghm5	0,170	2,062	0,174	2,008	0,163	2,114

Tabel 6.2 Overzicht resultaten berekeningen significante golfhoogte

Deze resultaten zijn ook weergegeven in Figuur 6.2.10. In de onderste figuur zijn tevens het bodemprofiel en het niveau van de (tijdsgemiddelde) waterspiegel gegeven. De stippellijn in de bovenste figuur betreft het resultaat van een oriënterende ENDEC-berekening.

6.3 Snelheden

De analyse van de snelheidssignalen is van groot belang omdat deze in hoge mate bepalend zijn voor de berekening van de grootte van het debiet.

Hiertoe zal getracht worden om op basis van de gemeten signalen een karakteristieke snelheid te berekenen welke de werkelijke diepte-gemiddelde snelheid zo goed mogelijk benadert. De grootte van het debiet kan dan eenvoudig worden berekend uit het produkt van deze berekende snelheid en de gemeten waterdiepte.

In eerste instantie wordt het snelheidsprofiel in de aanstroomsectie verondersteld te beantwoorden aan het standaard logaritmische profiel volgens:

waarin u_* de schuifspanningssnelheid en z_0 het nul-niveau voor de snelheid.

$$u(z) = \frac{u_*}{\kappa} \ln\left(\frac{z}{z_0}\right) \quad (6.1)$$

Voor $u(z_1) = u_1$ en $u(z_2) = u_2$ kan, voor gegeven κ -waarde ($\kappa = 0,4$), de schuifspanningssnelheid en de z_0 -waarde worden opgelost. Deze volgen respectievelijk uit:

$$u_* = (u_2 - u_1) \frac{\kappa}{\ln(z_2/z_1)} \quad (6.2)$$

en:

$$z_0 = z_1 \left[\frac{z_1}{z_2} \right]^{\left(\frac{u_1}{u_2 - u_1} \right)} \quad (6.3)$$

Op deze wijze is de snelheidsverticaal in principe volledig bepaald.

De (diepte)-gemiddelde snelheid \bar{u} volgt uit:

$$\bar{u} = \frac{u_*}{\kappa} \left[\frac{z_0}{d} - 1 + \ln \left(\frac{d}{z_0} \right) \right] \quad (6.4)$$

waarin d de lokale waterdiepte ($d = h - z$).

Uitgedrukt in de (diepte)-gemiddelde snelheid geldt dan:

$$u(z) = \left[\frac{\bar{u}}{\frac{z_0}{d} - 1 + \ln \left(\frac{d}{z_0} \right)} \right] \ln \left(\frac{z}{z_0} \right) \quad (6.5)$$

Verwaarlozing van de (z_0/d) -waarde in de noemer maakt dat snelheid op het niveau $z = d/e = 0,368 d$ overeenkomt met de diepte-gemiddelde waarde.

In Figuur 6.3.1 is voor aanstroomraai A van proef T5A een nadere uitwerking van deze aanpak gegeven. Het bovenste plaatje geeft de momentane snelheden (met 5 Hz) en de gemiddelde waarde voor de snelheden op respectievelijk 0,20 m en 0,50 m boven de gootbodem. De verschilsnelheid, $u_2 - u_1$, en de schuifspanningssnelheid zijn gegeven in de volgende plots. Het onderste plaatje vertoont het berekende verloop (momentaan en gemiddeld) van de z_0 -waarde. Uit het verloop van met name de z_0 -waarde blijkt dat deze methode niet bepaald robuust te noemen is; in de meeste gevallen komen er onwaarschijnlijke waarden uit.

Voor de vaststelling van de karakteristieke snelheid zijn een viertal verschillende mogelijkheden nader bekeken, te weten:

1) Gemiddelde snelheid

Deze eenvoudige middelingsprocedure volgens:

$$\bar{u} = \frac{(u_1 + u_2)}{2} \quad (6.6)$$

levert weinig problemen op. De diepte-gemiddelde snelheid wordt aldus verondersteld aanwezig te zijn op $z = +0,35 m$.

2) Snelheid op halve waterdiepte

De snelheid op halve waterdiepte volgt bij lineaire interpolatie uit:

$$\bar{u} = u_1 + \left(\frac{d}{2} - z_1 \right) \left[\frac{u_2 - u_1}{z_2 - z_1} \right] \quad (6.7)$$

3) Snelheid op niveau $z = d/e$

Op analoge wijze (interpolatie) volgt deze uit:

$$\bar{u} = u_1 + \left(\frac{d}{2,72} - z_1 \right) \left[\frac{u_2 - u_1}{z_2 - z_1} \right] \quad (6.8)$$

In feite is dit een benadering van de uiteindelijk volgende methode.

4) Snelheid volgens gefit log-profiel

Hierbij worden eerst de u_0 - en z_0 -waarde berekend (Vgl'n 6.2 en 6.3), waarna de diepte-gemiddelde snelheid wordt berekend door gebruikmaking van (Vgl. 6.4). Zoals reeds vermeld levert deze bewerking de nodig problemen op, daar met name in de berekening van de z_0 -waarde, bij kleine (of momentaan negatieve) waarden van $(u_2 - u_1)$ de functie 'ontploft'.

In Figuur 6.3.2 zijn de volgens genoemde methoden berekende snelheden samengebracht. In de figuur zijn ook de u_1 - en u_2 -meetpunten gegeven. De resultaten van methode 4) zijn achterwege gelaten vanwege de grote spreiding in deze uitkomsten.

Op basis van deze resultaten is voor de verdere verwerking methode 3) aangehouden. Deze is fysisch verantwoord en bovendien vrij robuust.

Voor elke raai is nu eerst op basis van de gemeten signalen (2 shm's en 1 ghm) de karakteristieke snelheid berekend (met 25 Hz). Vervolgens is dit berekende signaal gefilterd. Figuur 6.3.3 geeft hiervan een voorbeeld. Ter informatie zijn in deze figuur ook de tijdstippen t_0 , t_2 en t_3 toegevoegd.

6.4 Debieten

De grootte van het debiet als functie van de tijd is bepaald uit gemeten waterdiepten en berekende karakteristieke snelheden (zie vorige paragraaf).

Dit debiet is, als functie van de tijd, in raai A t/m D te berekenen. Voor raai A t/m C kan dit gebeuren op basis van de lokaal berekende waarden van de snelheid op het niveau $z = d/e$ boven de zandbodem, terwijl voor raai D (met een snelheidspunt) is volstaan met simpelweg $q = u \cdot d$.

Figuur 6.4.1 geeft een voorbeeld van het verloop van het debiet in raai A bij proef T5A. Vanaf t_0 neemt het debiet toe tot ca. $0,02 \text{ m}^3/\text{m}^1/\text{s}$. In deze fase is het pulserende effect van de klokpompen op het debiet goed waarneembaar. Dit effect dempt langzaam uit. Vanaf $t = t_2$ verlaagt de kruin en neemt het debiet sterk toe. Op $t = t_3$ bedraagt het debiet ongeveer $0,22 \text{ m}^3/\text{m}^1/\text{s}$.

De ontwikkeling van het debiet in de verschillende raaien is voor de proeven T1 t/m T7 gegeven in de Figuren 6.4.2 t/m 6.4.9.

Uit vergelijking van de debieten in de raaien A t/m D blijkt dat raai D (zoals te verwachten) als eerste een toename in debiet vertoont. Het pulserende effect van de pompen wordt niet alleen in de tijd minder, maar neemt ook af naarmate de afstand tussen golfschot en meetlokatie toeneemt (vergelijk ontwikkeling debiet in raai A met die in raai D).

Het debiet in raai D kan worden berekend tot het moment waarop het bodemniveau in deze raai begint te zakken, dan wel tot het meetinstrument droogvalt (dunnere lijn in de figuren).

In Fase III is het berekende debiet in de raaien A t/m D onderling vergelijkbaar.

In een latere fase kunnen de onderlinge verschillen worden verklaard uit het bergingsverschil tussen twee raaien (extra afvoer a.g.v. waterstandsverlaging).

Tijdens de (eind-)fase van de bemonstering met min of meer constant debiet wordt de maximale pompcapaciteit volledig benut en zakken zowel de kruin als de buitenwaterstand met eenzelfde snelheid.

Voor proef T1 (Figuur 6.4.2) is het einddebiet gelijk aan de pompcapaciteit (blijkbaar ca. $90 \text{ dm}^3/\text{s}$).

NB.: Bij de als laatste uitgevoerde proef T6 (Figuur 6.4.8) duiden de negatieve debieten op het schoonmaken en spoelen van de goot.

6.5 Fase I: Versteiling van het binnentalud

De versteiling van het achtertalud verloopt in het algemeen zeer snel.

Volgens de proces-schematisatie als beschreven in paragraaf 4.2, is er, na start van de overstroming, eerst sprake van een versteiling van het binnentalud (van taludhelling β_0 tot β_1). Na het bereiken van deze kritische taludhelling begint fase II, de afname van de kruinlengte van $L_c = 1,30 \text{ m}$ tot $0,0 \text{ m}$. In werkelijkheid gaan deze (schematische) processen echter vloeiend in elkaar over. Het tijdstip t_1 is daarmee dus niet gelijk aan het moment waarop de kruinlengte nog net $1,30 \text{ m}$ bedraagt.

Een zorgvuldige analyse van de ontwikkeling van het binnentalud op basis van de in de Figuren 5.3.1 t/m 5.3.9 gegeven profielontwikkelingen resulteert in de in Tabel 6.5 gepresenteerde tijdsduur van deze erosiefase.

De nauwkeurigheid van deze waarden wordt geschat op ± 5 s, hetgeen betekent dat er uit de onderlinge verschillen tussen de verschillende proeven eigenlijk geen harde conclusies getrokken kunnen worden.

De belangrijkste afhankelijkheid met de beginhelling β_0 , is niet onderzocht.

De tijdsduur $t_1 - t_0$, hangt in principe sterk af van het debiet. Dit wordt echter niet bevestigd door de resultaten van proef T0 in vergelijking tot die van de andere proeven.

Proef	$t_1 - t_0$ [s]	Opmerkingen
T0	40	dijkprofiel; relatief laag debiet ($H_0 = +0,73$ m)
T1	n.v.t.	dijkprofiel; geen informatie over deze erosiefase!
T2	40	tussenprofiel
T3	45	afslagprofiel
T4	50	afslagprofiel; nog geen golfwerking
T5	45	dijkprofiel
T5A	45	dijkprofiel
T6	55	afslagprofiel
T7	55	dijkprofiel, losse pakking

Tabel 6.5 Overzicht geschatte tijdsduur erosiefase I

De grootte van het debiet is (naast de overhoogte) afhankelijk van het wrijvingsverlies tijdens de aanstroming. Als gevolg hiervan lijkt de tijdsduur voor de proeven met een flauw hellend voorland relatief iets groter. Een verschil tussen het tussen- en afslagprofiel lijkt eveneens aanwezig.

Uit genoemde analyse blijkt dat de grootte van de kritische taludhelling (als eerste indicatie) ongeveer 45° bedraagt. In de meeste gevallen is deze hoek gelijk aan de maximaal optredende helling. In andere gevallen (met name bij de Asserzand-proeven) is er sprake van loslating van de daarboven nog aanliggende afstroming. Onder dit niveau treden nog steilere hellingen (soms overhellend) op. Veelal bevindt dit kritische punt zich op een niveau van 0,40 à 0,45 m boven de gootbodem.

In vergelijking tot de resultaten van het analytische model (zie hoofdstuk 4) verloopt de versteiling een factor 2 sneller.

6.6 Fase (I en) II: Versmalling van de kruin

Volgens de proces-schematisatie is er een duidelijke overgang tussen fase I en fase II van het erosieproces. Zoals al vermeld in de vorige paragraaf gaan deze fasen echter vloeiend in elkaar over, zodat er eigenlijk al direct na de start van de overstroming sprake is van een afname van de kruinlengte. In deze paragraaf wordt dan ook de afname van de kruinlengte beschreven vanaf de start van de overstroming, zijnde tijdstip t_0 .

Hiertoe is voor elk van de in de figuren 5.3.1 t/m/ 5.3.9 gegeven profielen de (meest rechtse) positie van het maximale kruinniveau t.o.v. $x = 35,5$ m bepaald.

De ontwikkeling van de kruinlengte L_c t.o.v. tijdstip t_0 , is voor de verschillende proeven gegeven in Figuur 6.6.1. De tijdsduur $t_2 - t_0$ is nu eenvoudig vast te stellen aan de hand van het tijdstip waarop geldt $L_c = 0,0$ m. De resultaten van deze bewerking zijn gegeven in Tabel 6.6.

Proef	$t_2 - t_0$ [s]	Opmerkingen
T0	240	dijkprofiel (laag debiet)
T1	140	dijkprofiel
T2	160	tussenprofiel
T3	192	afslagprofiel
T4	070	afslagprofiel met golven
T5	150	dijkprofiel
T5A	140	dijkprofiel
T6	165	afslagprofiel
T7	160	dijkprofiel

Tabel 6.6 Overzicht tijdsduur erosiefase I-II

Conform de duur van erosiefase I, is ook hier de erosiesnelheid afhankelijk van het debiet, hetgeen duidelijk blijkt uit de vergelijking van de resultaten van proef T0 met die van de andere proeven.

Als gevolg van de afnemende kruinlengte, zal het wrijvingsverlies kleiner worden en het debiet toenemen. Hierdoor neemt de terugschrijdingssnelheid gedurende $t_0 < t < t_2$ in principe toe. Dit lijkt het geval te zijn bij proef T0 en T3.

Wrijvingseffecten spelen in deze fase een belangrijke rol.

Door aanwezigheid van golfaanval (proef T4) wordt het erosieproces duidelijk versneld. Op de effecten van korreldiameter en voorlandhelling wordt nog teruggekomen in het volgende hoofdstuk.

In vergelijking tot de resultaten van het analytische model (zie hoofdstuk 4) verloopt de versmalling van de kruin veel langzamer.

6.7 Fase III: Verlaging van de kruin

De detailontwikkeling van het maximale kruinniveau als functie van de tijd vanaf $t = t_0$, is voor de verschillende proeven gegeven in de Figuren 6.7.1 en 6.7.2.

Ter vergelijking van de erosiesnelheden is de tijdsduur gegeven welke nodig is voor erosie tot het kruinniveau $Z_c = +0,45$ m gegeven in Tabel 6.7. Deze is gegeven t.o.v. de start van de kruinverlaging ($t = t_2$).

Proef	$t_3 - t_2$ [s]	Opmerkingen
T0	176	dijkprofiel
T1	126	dijkprofiel
T2	368	tussenprofiel
T3	648	afslagprofiel
T4	526	afslagprofiel met golven
T5	115	dijkprofiel
T5A	116	dijkprofiel
T6	504	afslagprofiel
T7	105	dijkprofiel

Tabel 6.7 Overzicht tijdsduur erosiefase III tot $Z_c = +0,45$ m

Naast de grootte van het debiet ter plaatse van de kruin is nu ook de grootte van de voorlandhelling uit volumetrische overwegingen van belang. Voor eenzelfde mate van kruinverlaging moet bij een flauwer voorland nu immers relatief meer materiaal worden afgevoerd.

De tijdsduur bij de proeven T1, T5 en T5A is nagenoeg gelijk. Voor T0 (met initieel een lager debiet) is deze natuurlijk iets groter.

De erosie van het dijkprofiel met een lossere pakking (proef T7) vergt een minder lange tijdsduur.

In het geval van het tussenprofiel (proef T2) en het afslagprofiel (proeven T3 en T6) duurt deze erosiefase navenant langer.

Door aanwezigheid van golfaanval, proef T4 vs. T3, wordt het erosieproces duidelijk versneld.

Het in Hoofdstuk 4 gegeven analytische model lijkt de erosiesnelheid te overschatten.

Op de effecten van korreldiameter, voorlandhelling en pakkingsdichtheid wordt meer in detail teruggekomen in het volgende hoofdstuk.

In vergelijking tot de resultaten van het analytische model (zie hoofdstuk 4) verloopt de verlaging van de kruin veel langzamer.

6.8 Optredend transportverloop

Om enig inzicht te krijgen in zowel de grootte als de ontwikkeling van de optredende transporten, is het transportverloop over het binnentalud van proef T5A berekend.

Hiertoe is voor een aantal tijdstippen het aanwezig zandvolume berekend boven een aantal niveaus. De resultaten van deze kuberingen zijn gegeven in Figuur 6.8.1, waarin het volume boven een vijftal niveaus gegeven is als functie van de tijd.

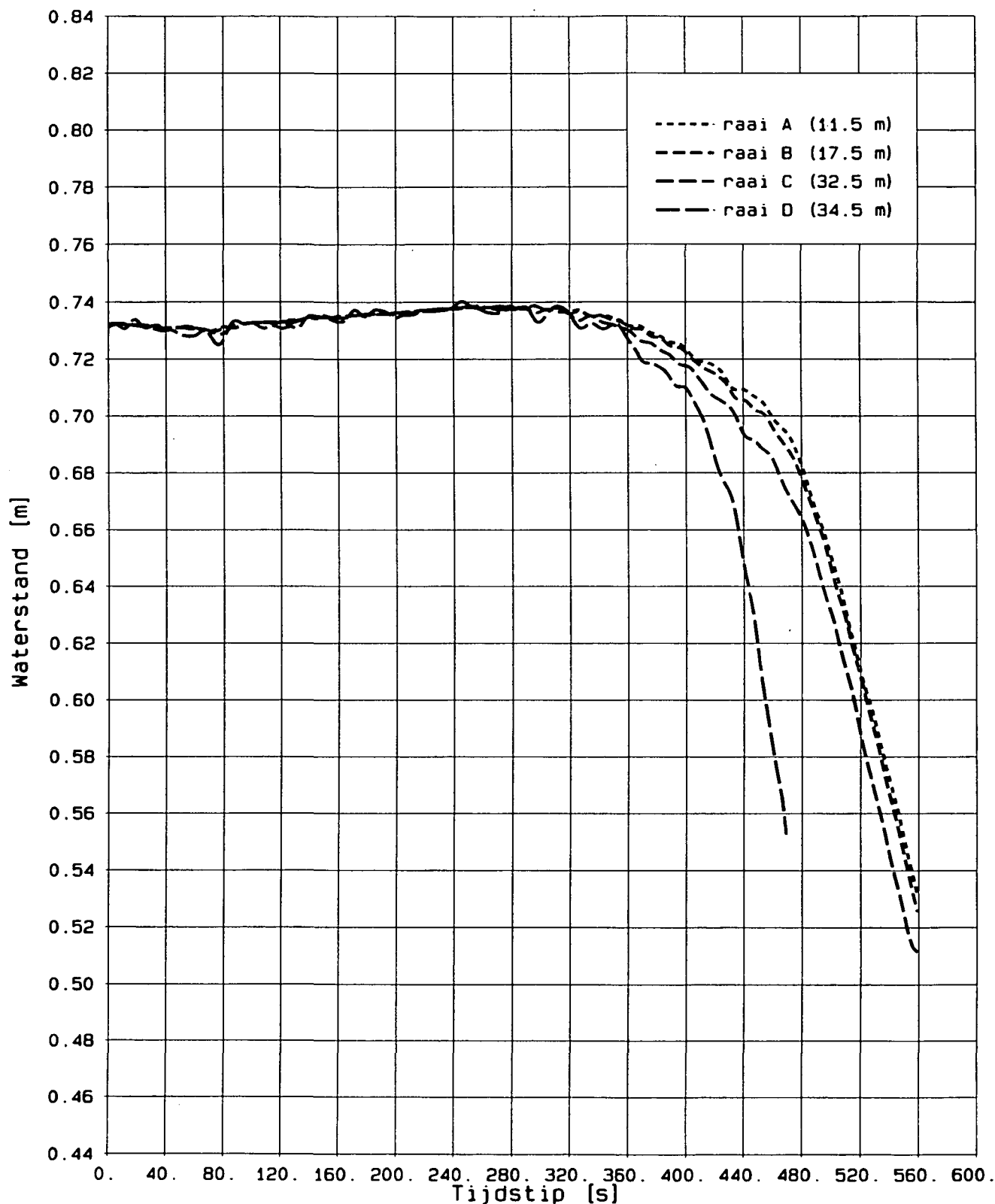
De tijdsgradiënt zegt hierbij iets over het transport dat neerwaarts plaats vindt door een horizontaal vlak ter hoogte van het bekeken niveau. Figuur 6.8.2 toont de ontwikkeling van het transport op een vijftal niveaus als functie van de tijd.

In Figuur 6.8.3 is voor een specifiek tijdstip, $t = 100$ s, en dus voor een specifiek profiel (afbeelding B) het op basis van deze kuberingen berekende transport als functie van zowel niveau (C) als positie (A) gegeven. Het mag duidelijk zijn dat het lineaire verloop van het transport als functie van het niveau t.o.v. de kruin duidt op een evenwichtsvorm van het binnentalud. Het transport in het onderste punt ($z = +0,45$ m) is rechtstreeks gerelateerd aan de afnamesnelheid van de kruinlengte.

Het transportverloop als functie van de plaats is gelijkvormig met het niveauverschil t.o.v. de kruin.

Het gegeven transportverloop vormt de basistoetsing voor het mathematische model. Voor verdere uitwerkingen kan worden verwezen naar deel I van dit rapport.

Tijdens deze fase bedragen de snelheden op het binnentalud ca. 0,5 à 0,8 m/s. Bij verlagende kruin (fase III) neemt het debiet, en daarmee ook de snelheid op het binnentalud, sterk toe. Hierbij worden snelheden bereikt tot 2,5 à 3,5 m/s (zie paragraaf 5.5). Deze snelheden gaan al uit boven de waarde waarbij de gangbare transportformules toepasbaar zijn. Als bovendien nog rekening wordt gehouden met de schaal waarop dit onderzoek is uitgevoerd (diepteschaal 10 en dus snelheidsschaal $\sqrt{10}$; zie paragraaf 3.2), dan gaat het in het prototype zelfs om snelheden van 8 à 11 m/s!

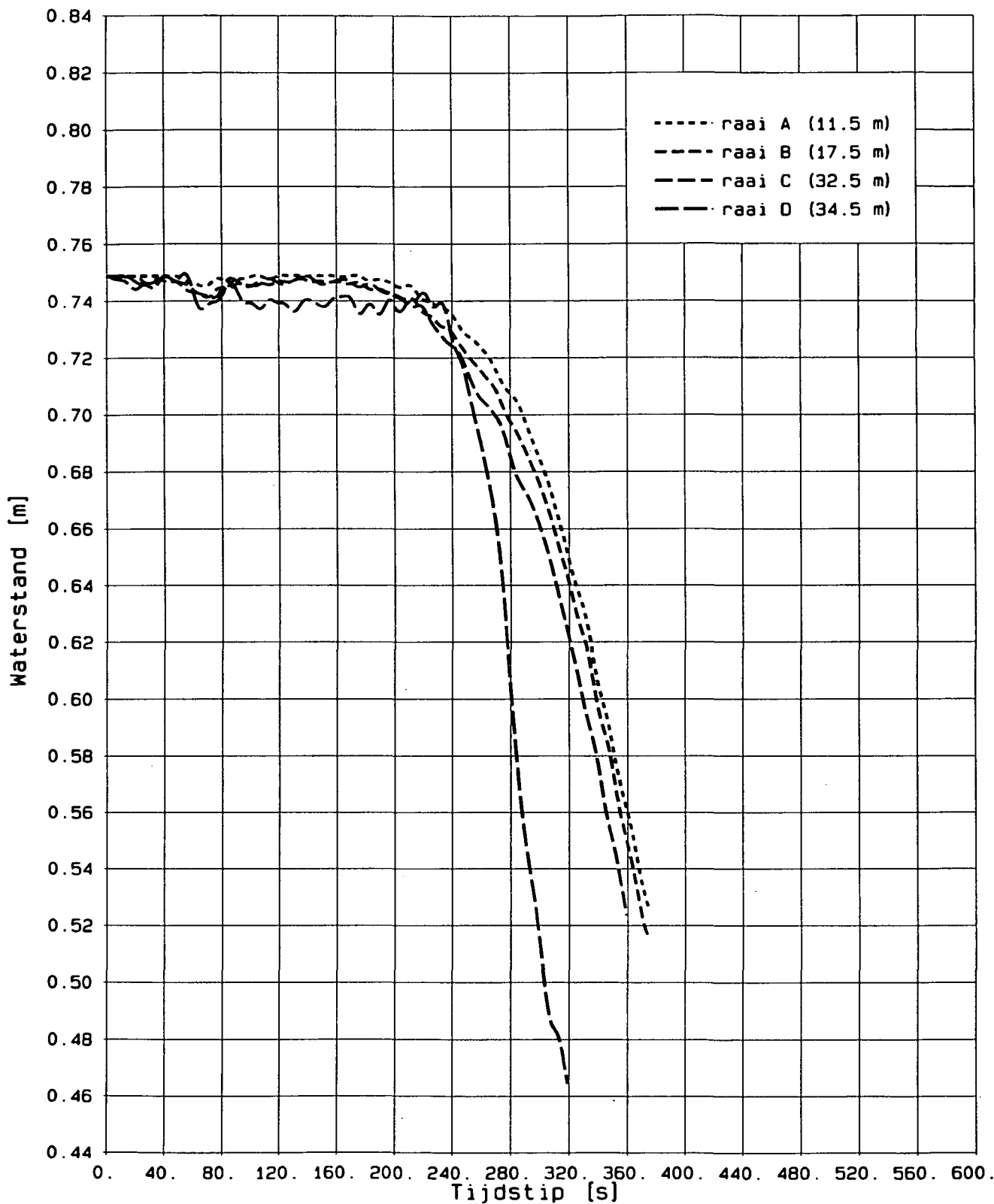


OVERZICHT ONTWIKKELING WATERSTAND
 Aanstroomraaien A t/m D

T0

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

H1242-II FIG.621

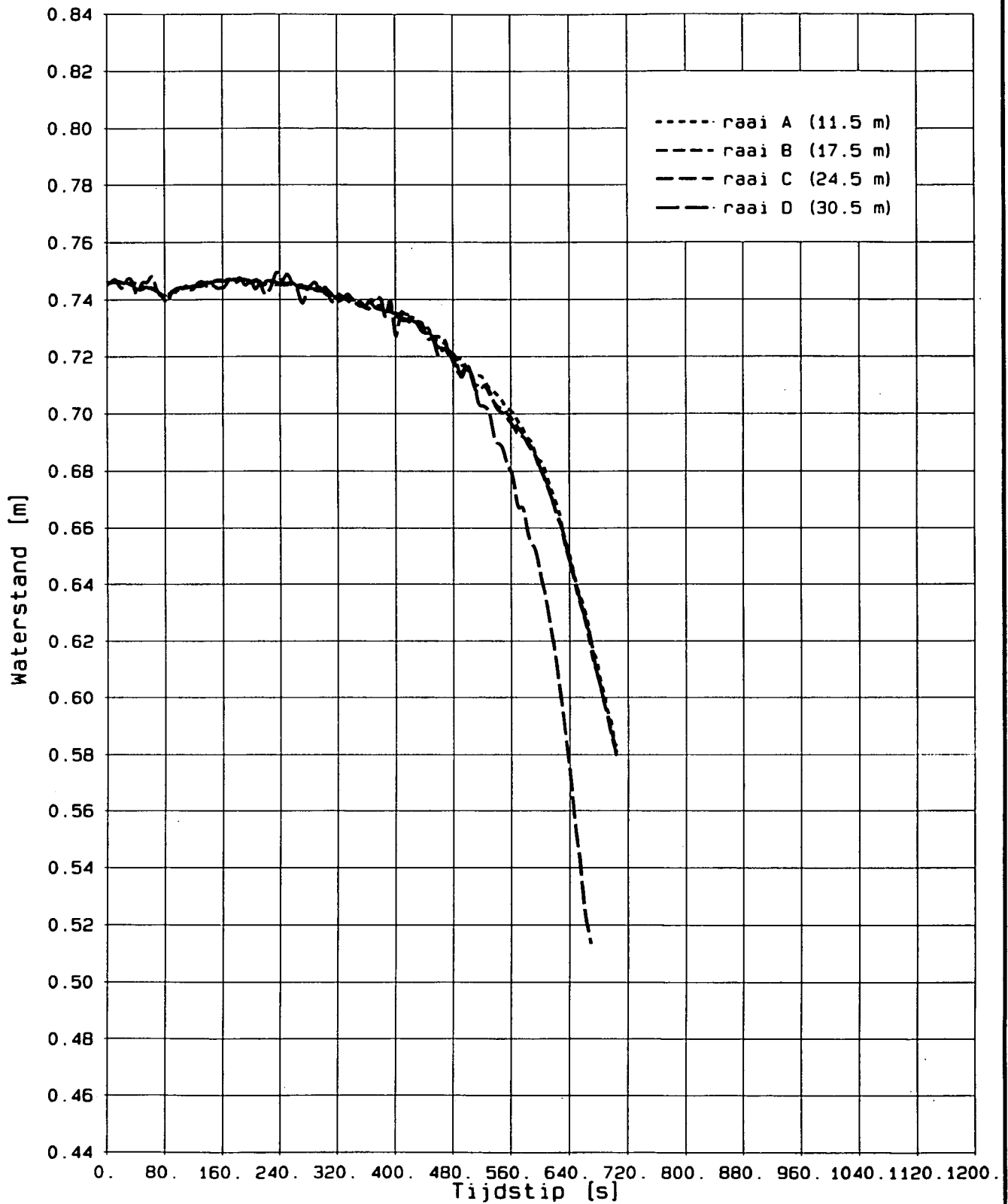


OVERZICHT ONTWIKKELING WATERSTAND
 Aanstroomraaien A t/m D

T.1

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

H1242-II FIG.622

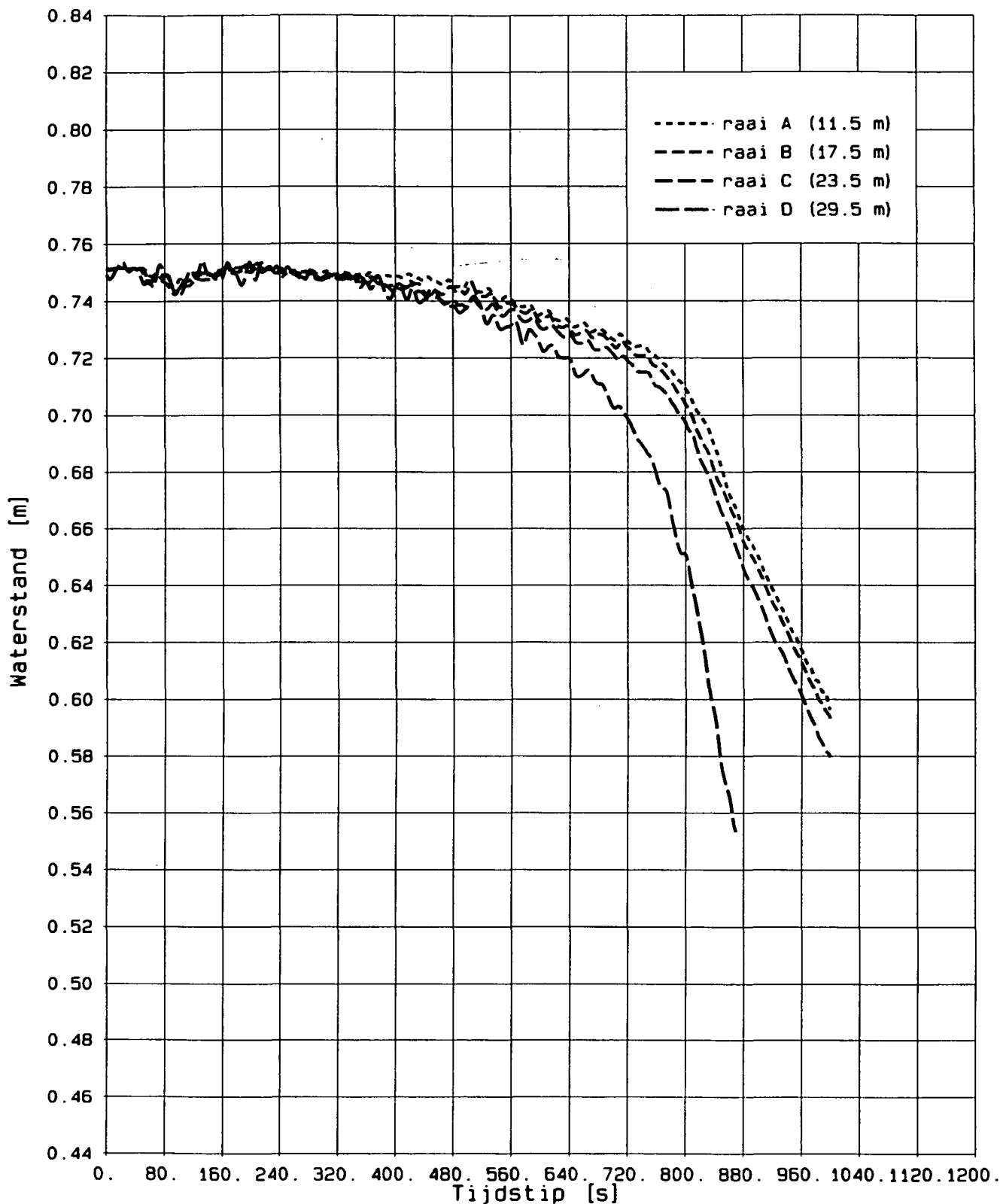


OVERZICHT ONTWIKKELING WATERSTAND
Aanstroomraaien A t/m D

T2

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

H1242-II FIG.623

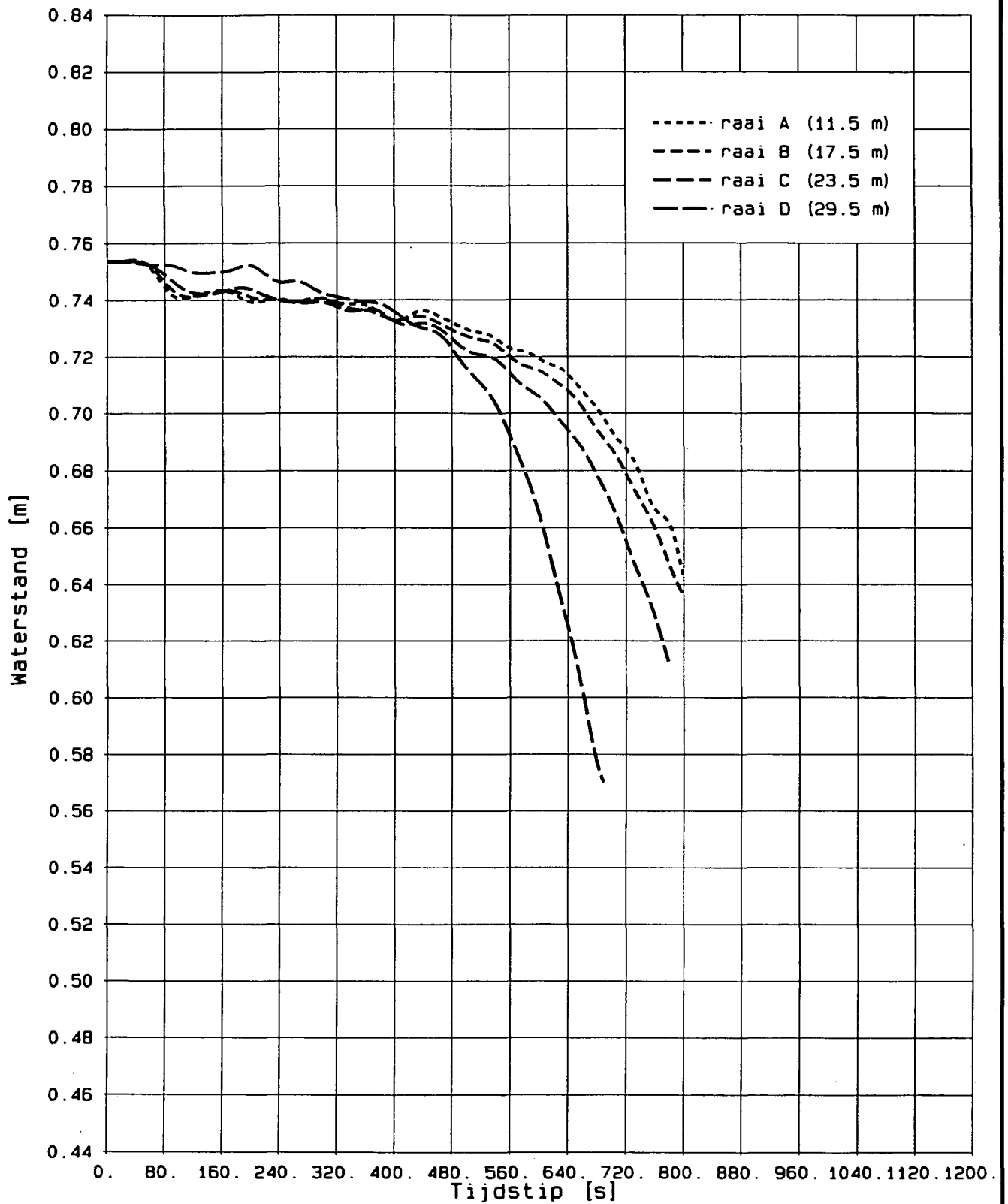


OVERZICHT ONTWIKKELING WATERSTAND
Aanstroomraaien A t/m D

T3

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

H1242-II FIG.624



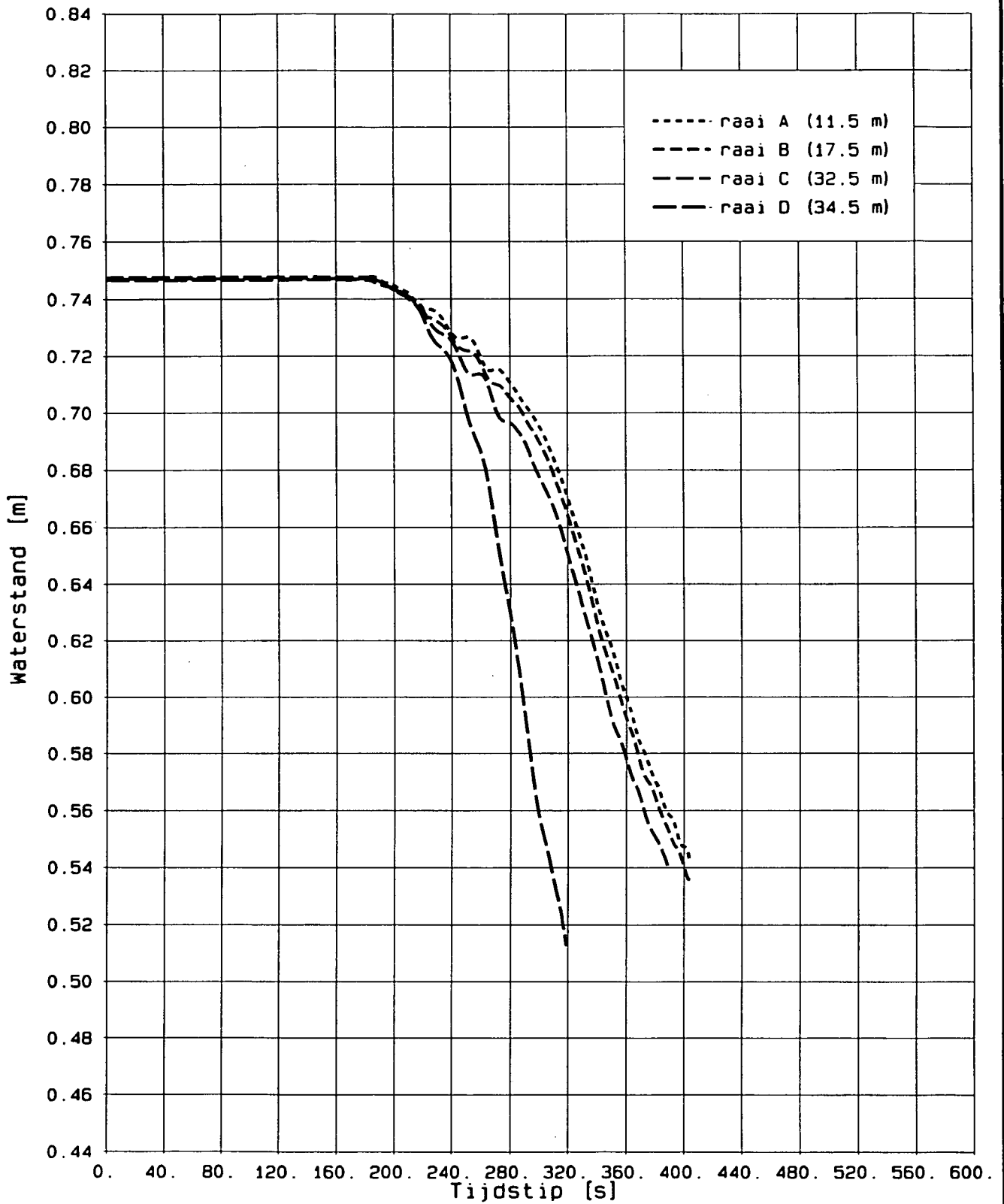
OVERZICHT ONTWIKKELING WATERSTAND
 Aanstroomraaien A t/m D

T4

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

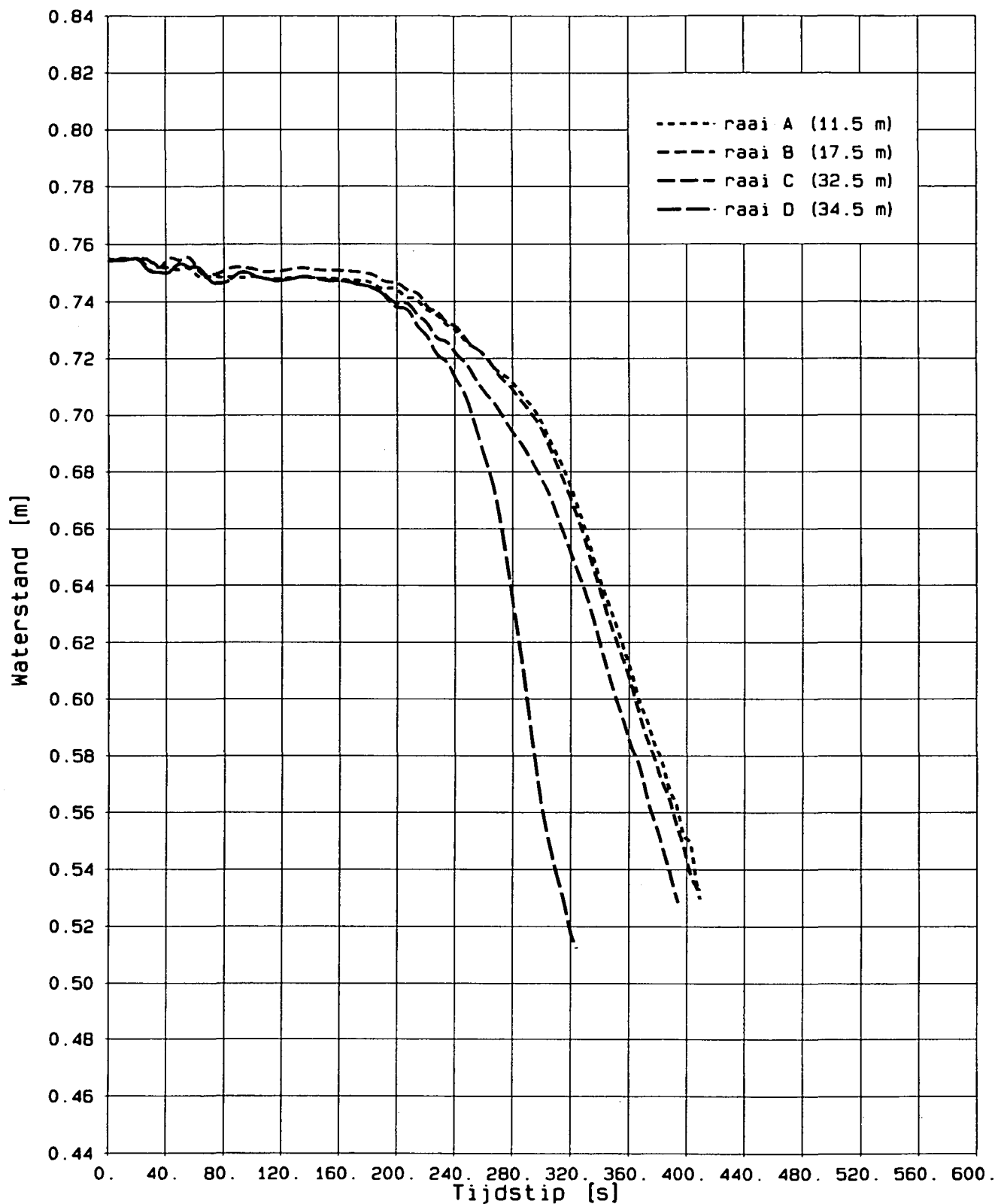
H1242-II

FIG.625



OVERZICHT ONTWIKKELING WATERSTAND
 Aanstroomraaien A t/m D

T5

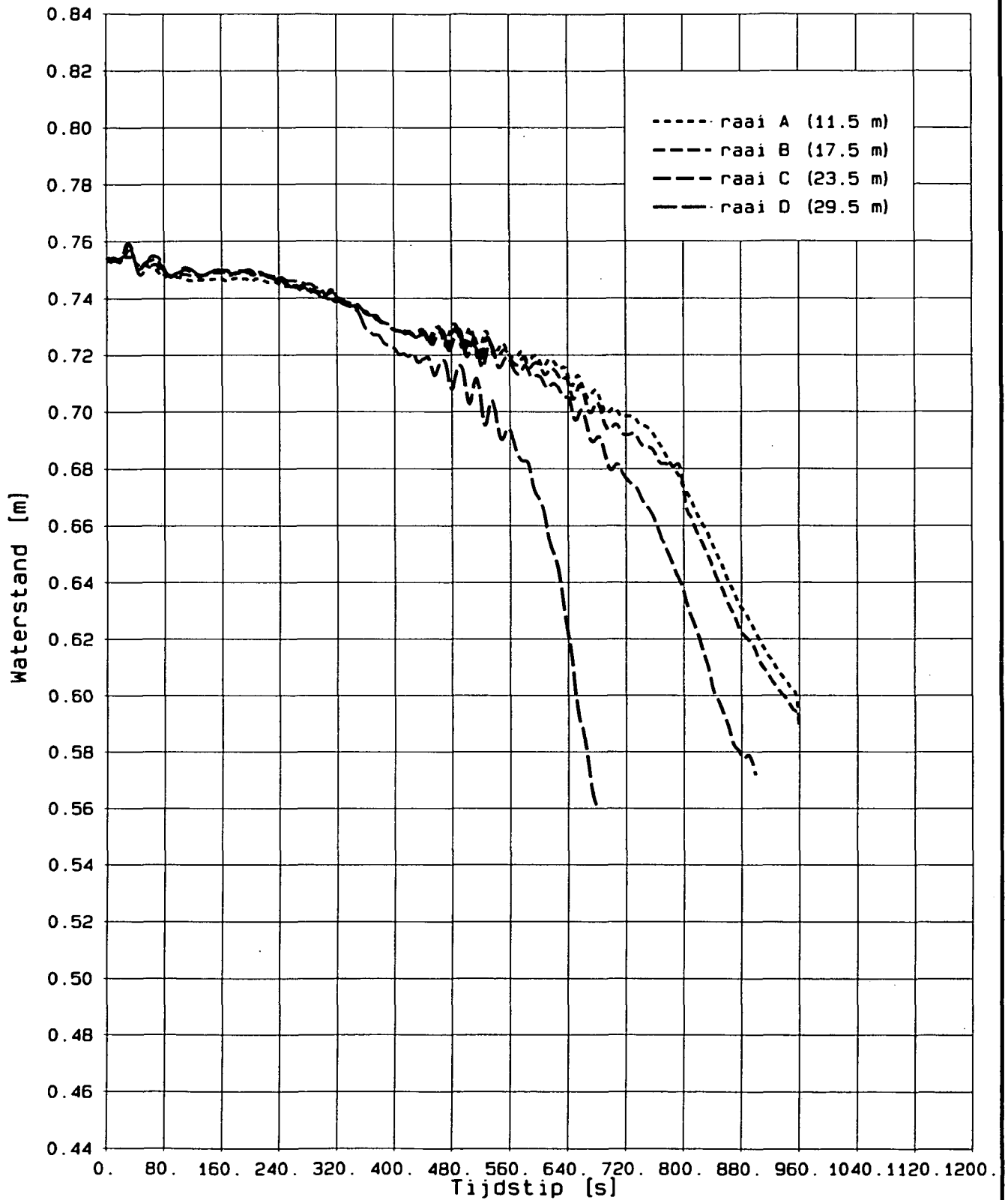


OVERZICHT ONTWIKKELING WATERSTAND
Aanstroomraaien A t/m D

T5A

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

H1242-II FIG.627

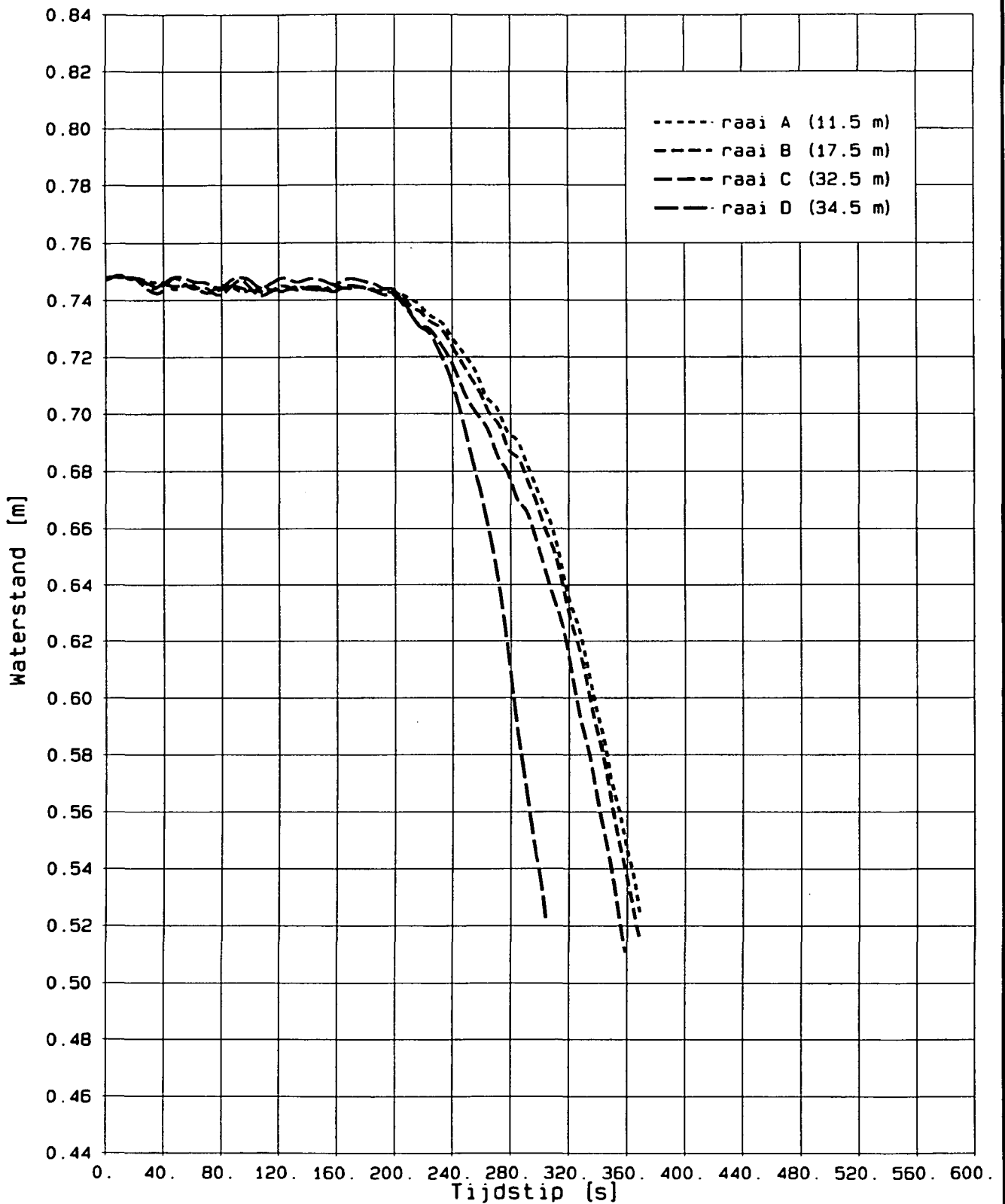


OVERZICHT-ONTWIKKELING WATERSTAND
Aanstroomraaien A t/m D

T6

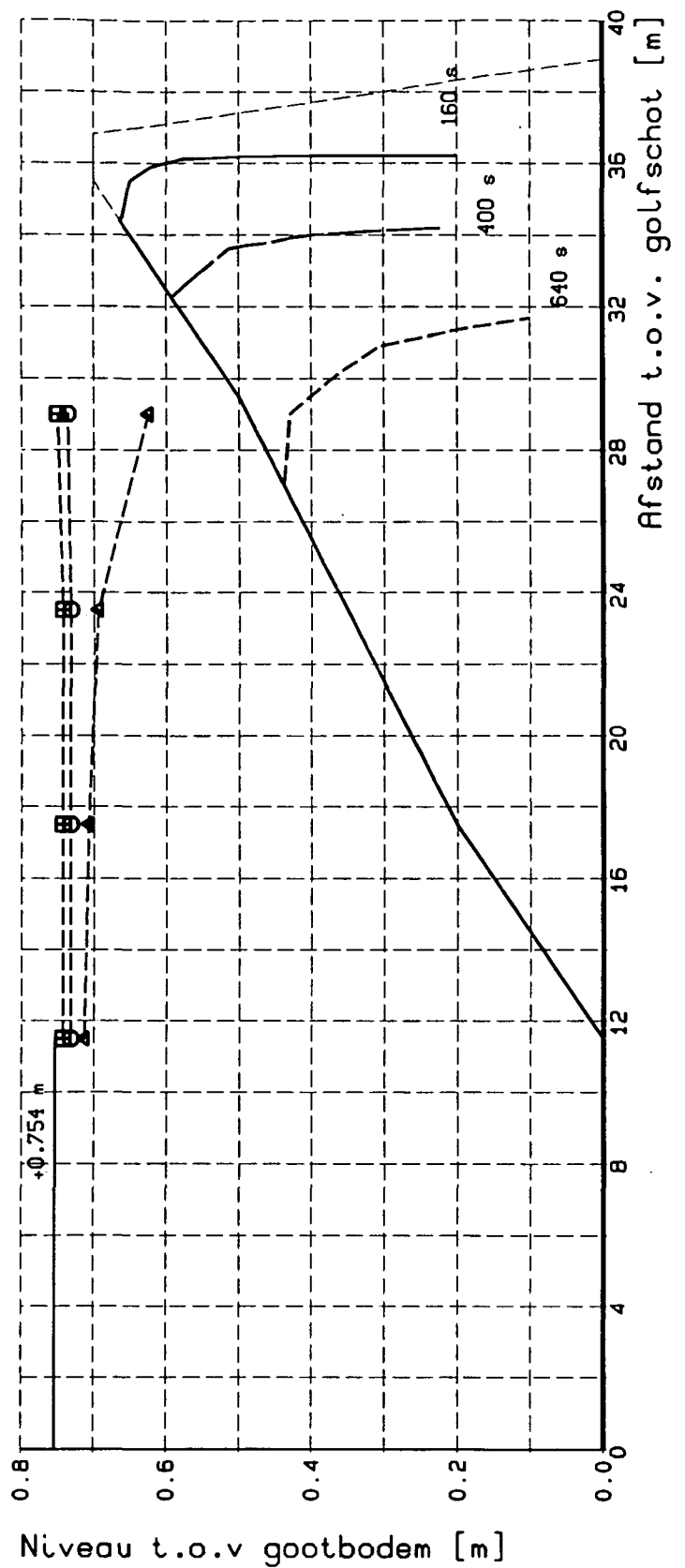
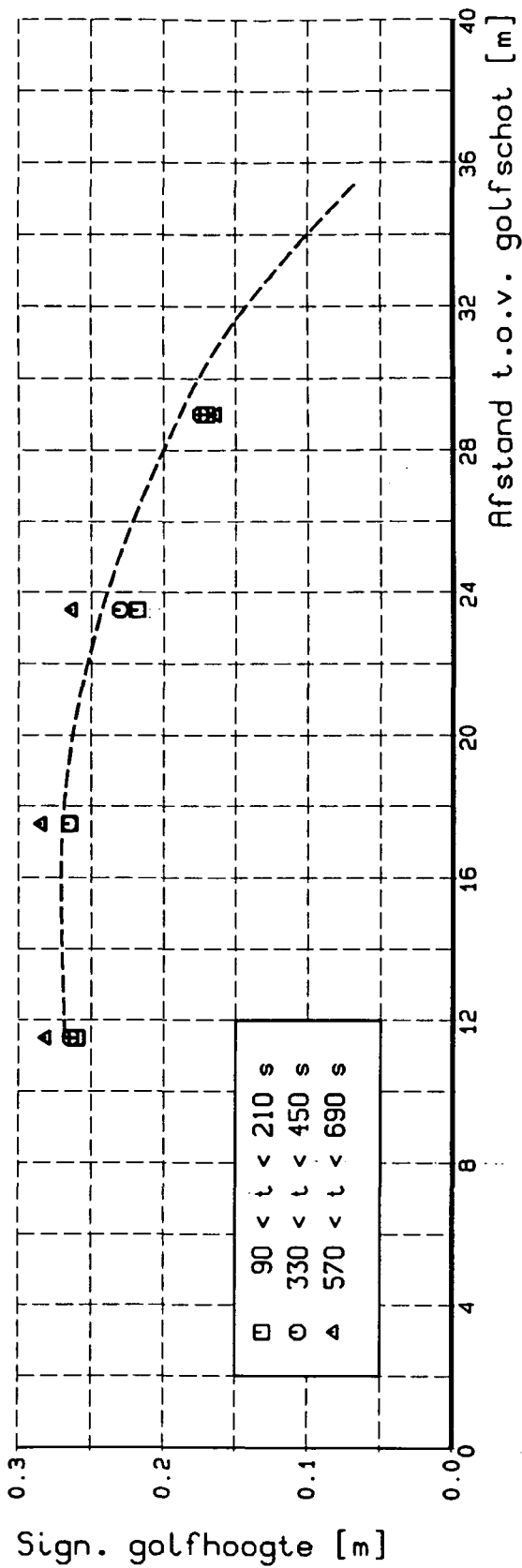
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

H1242-II FIG.628



OVERZICHT ONTWIKKELING WATERSTAND
 Aanstroomraaien A t/m D

T7



SIGNIFICANTE GOLFHOOGTE
 Vergelijking meting en berekening

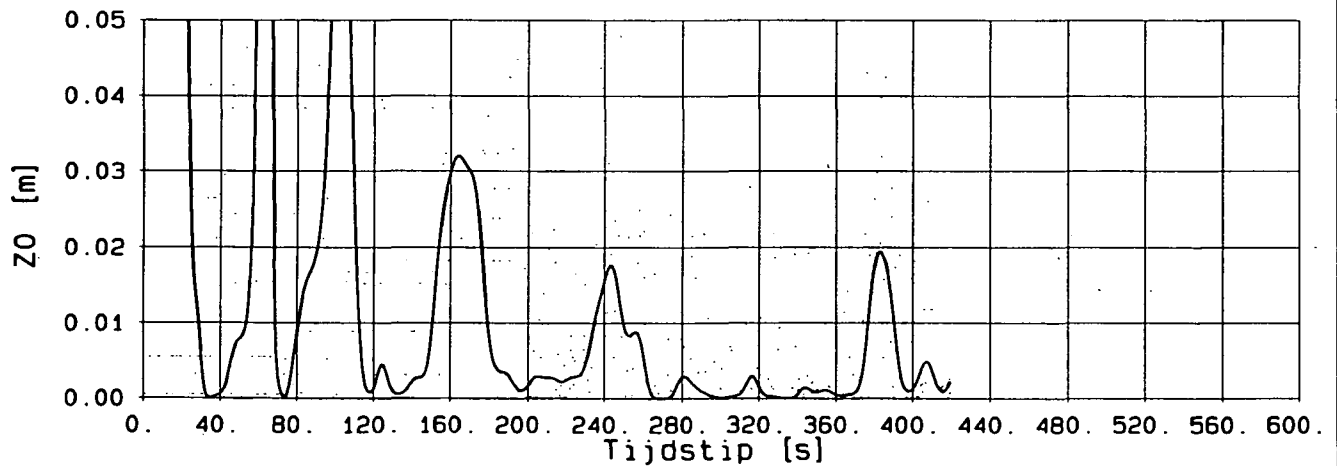
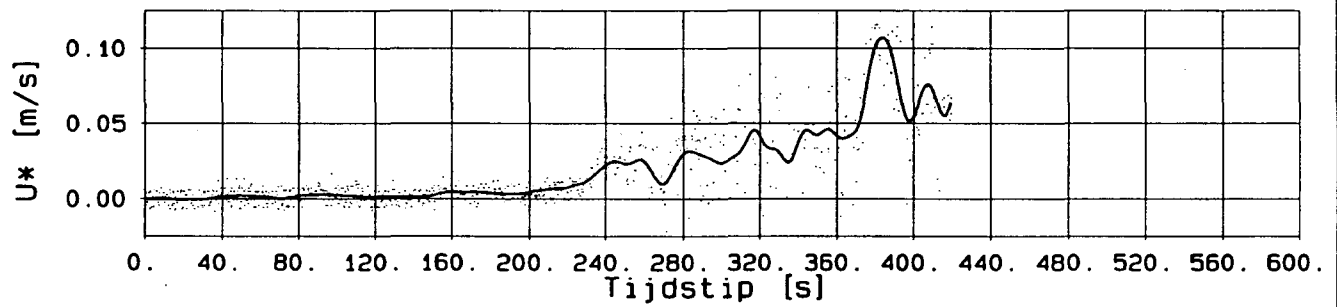
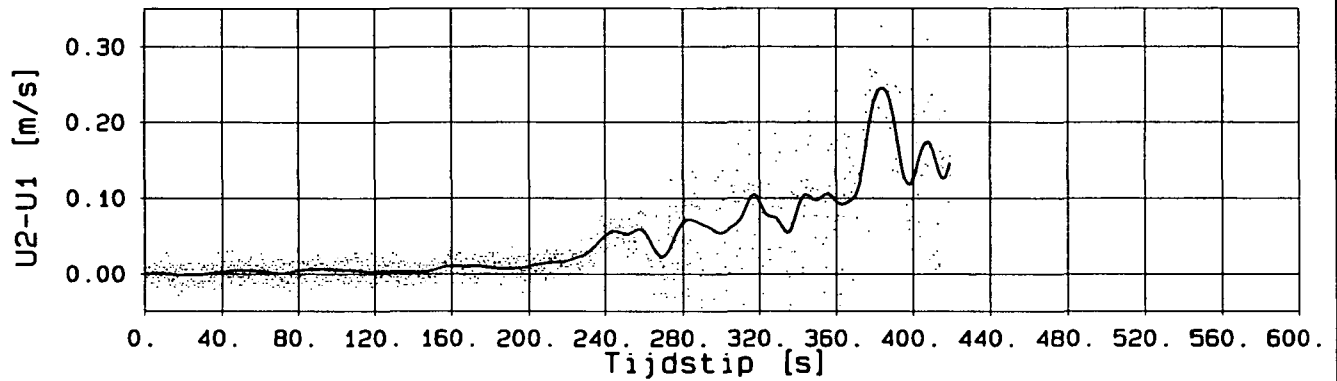
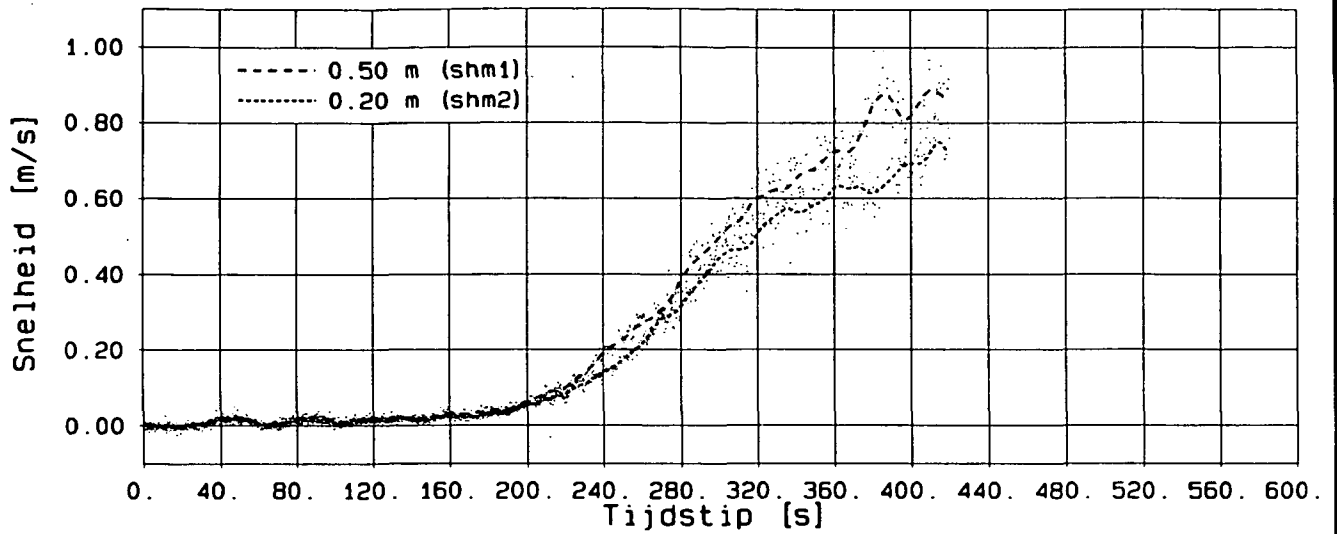
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

Proef T4

ENDEC

H1242-II

FIG.6210

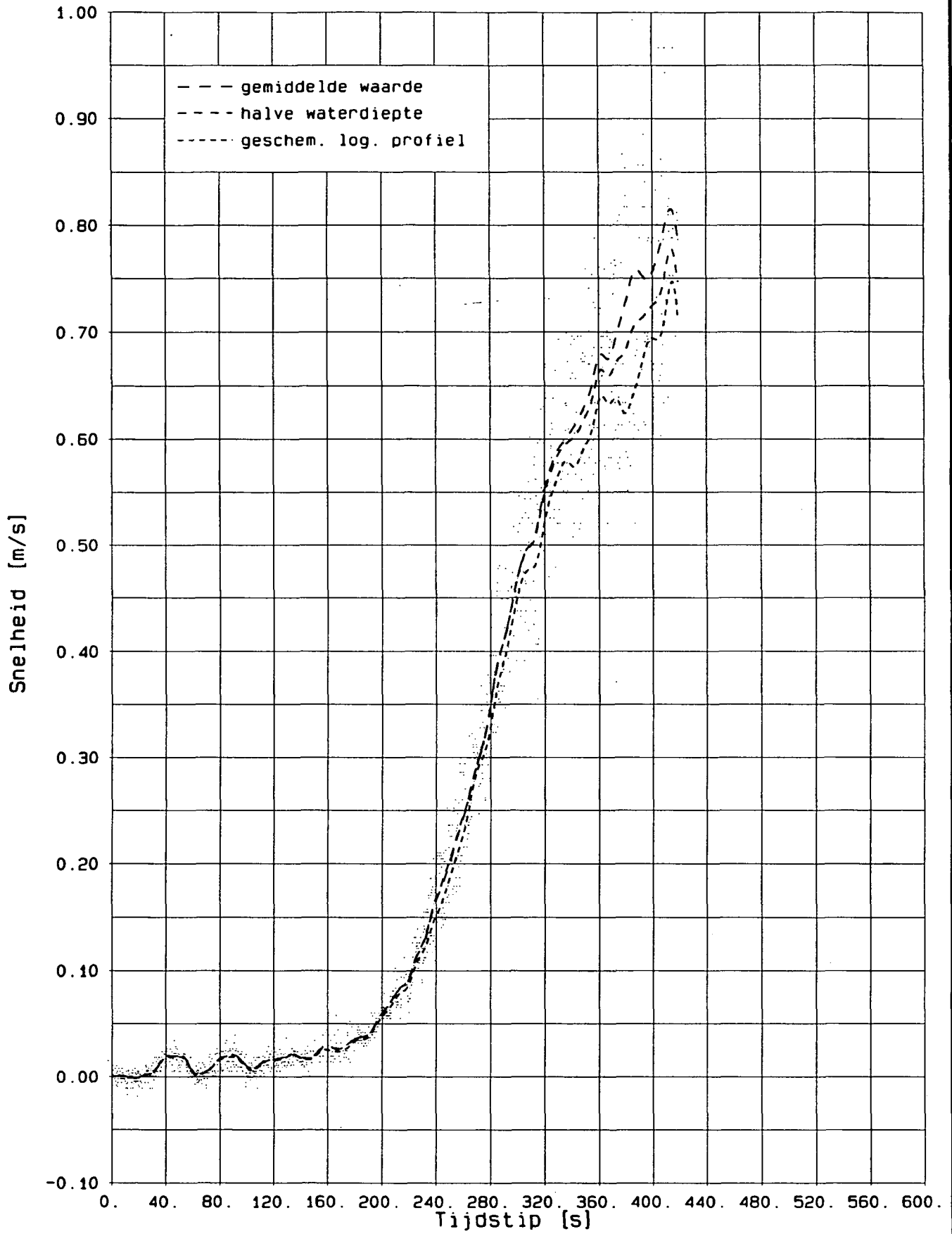


ANALYSE DIEPTEGEMIDDELTE SNELHEID
Diverse gemeten en berekende signalen

T5A-A

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

H1242-II FIG.631

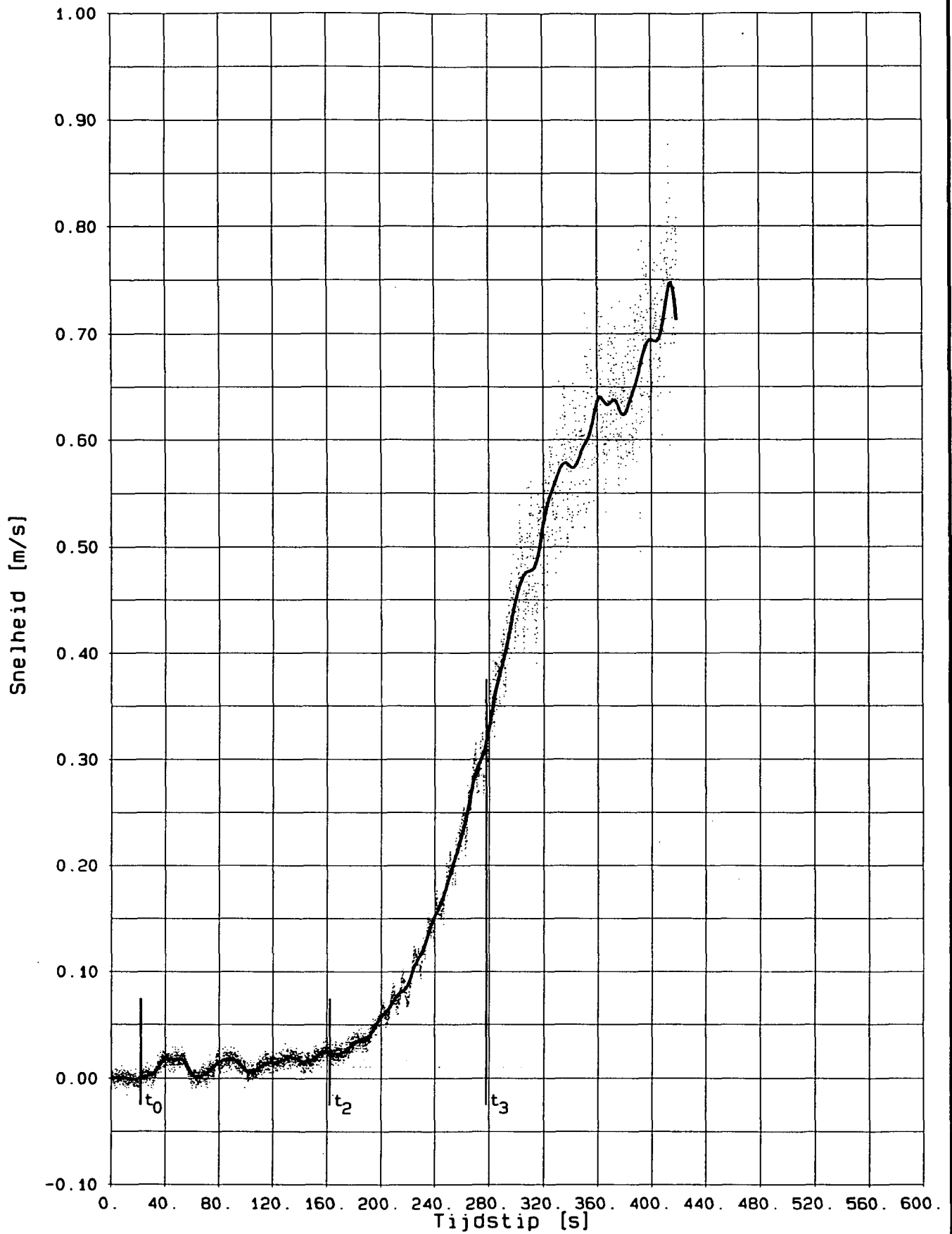


RELATIES DIEPTEGEMIDDELTE SNELHEID
 Gemeten en diverse berekende waarden

T5A-A

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

H1242-II FIG.632



ONTWIKKELING DIEPTEGEMIDDELTE SNELHEID
 Momentane en gefilterde waarden

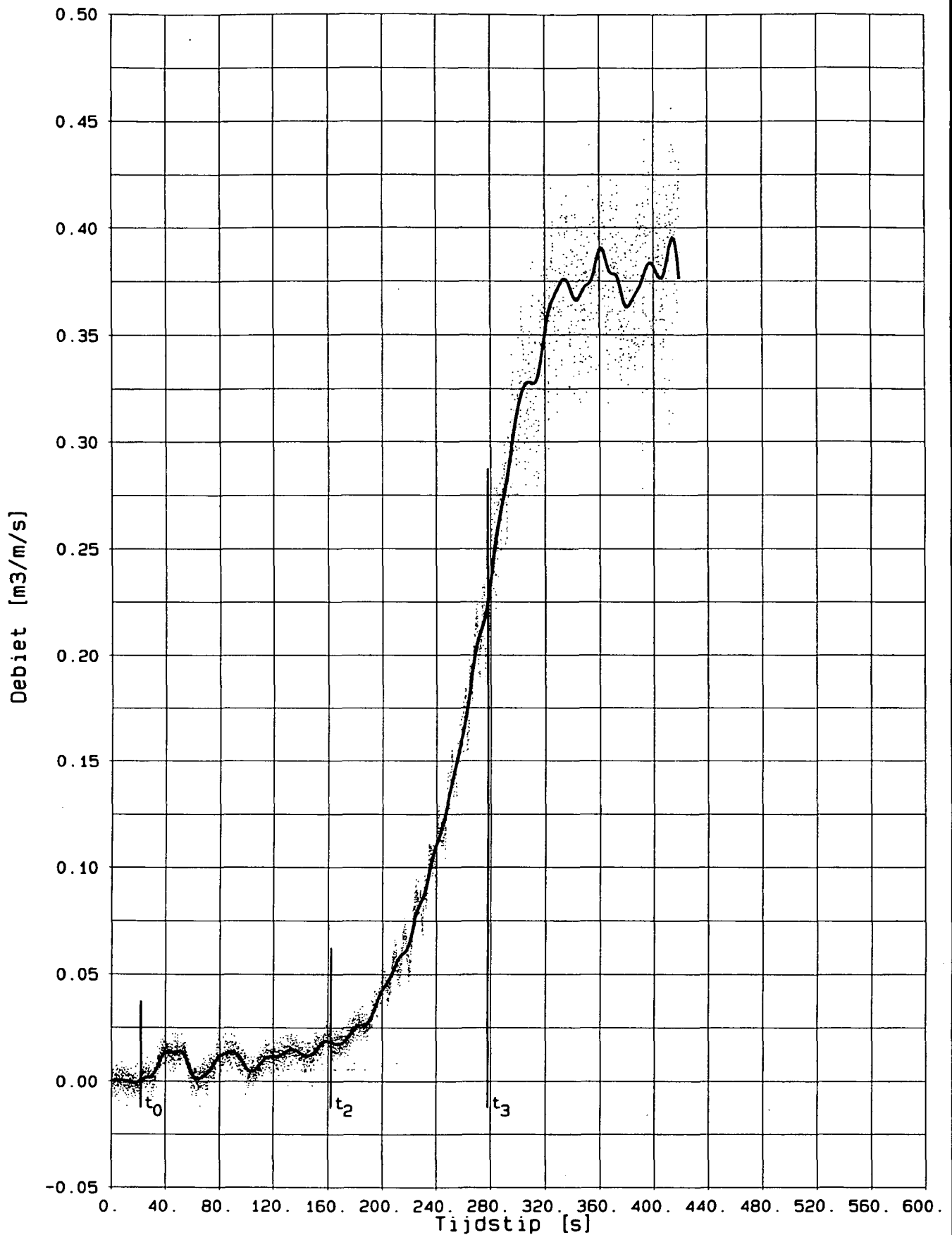
T5A-A

6

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

H1242-II

FIG.633

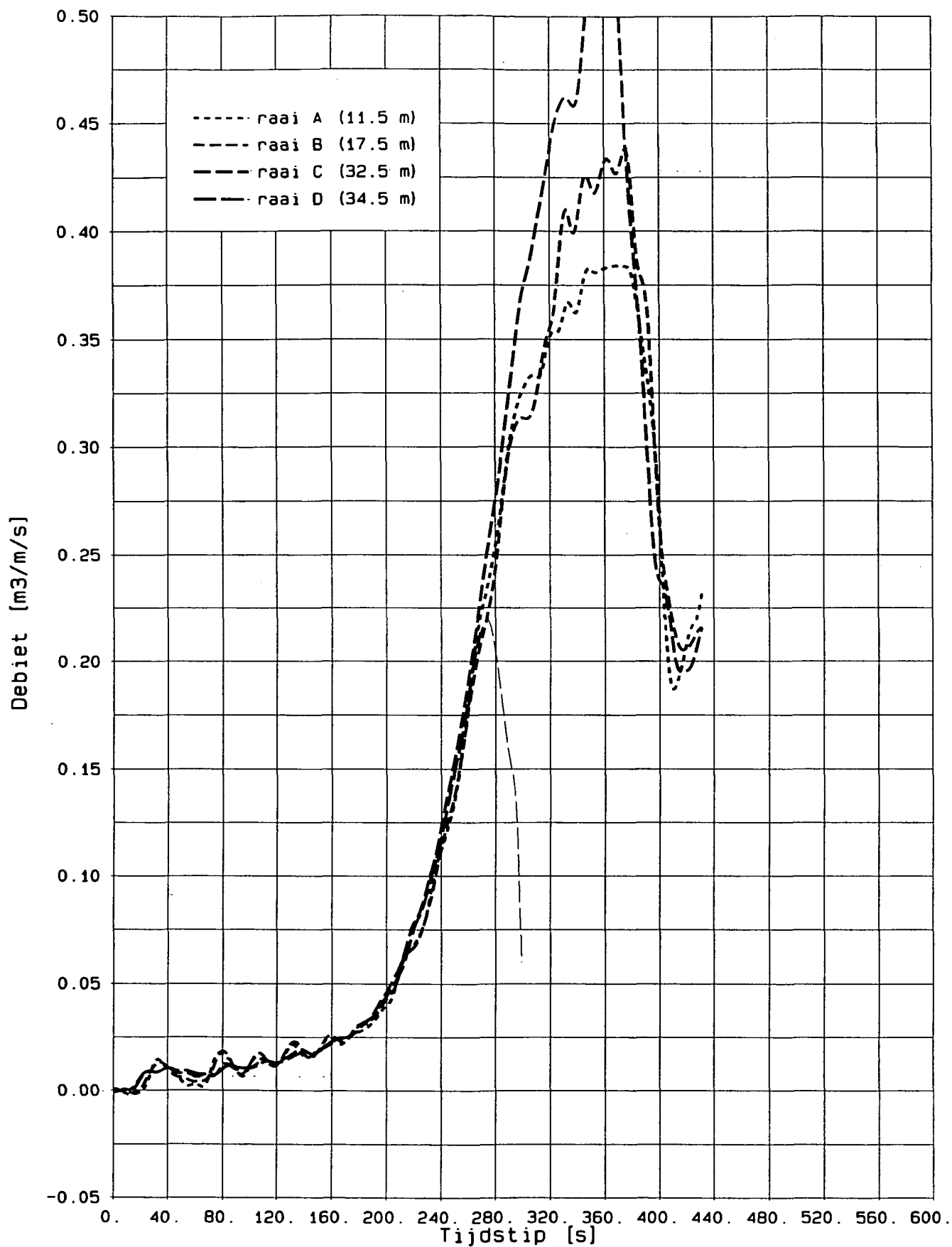


VOORBEELD BEREKEND DEBIET AANSTROOMRAAI
 Momtane en gefilterde waarden

T5A-A

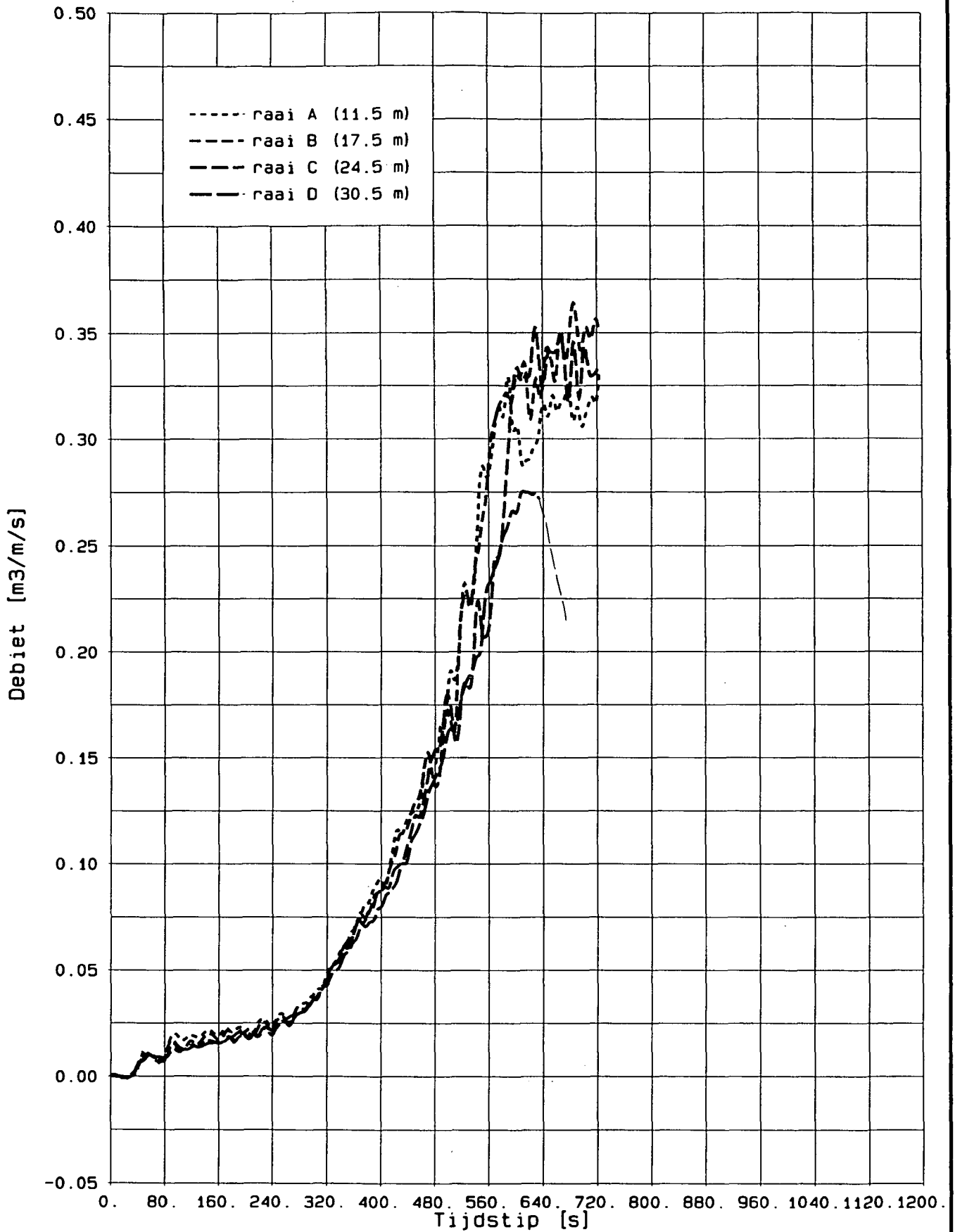
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

H1242-II FIG.641



OVERZICHT ONTWIKKELING AANSTROOMDEBIET
 Aanstroomraaien A t/m D

T1

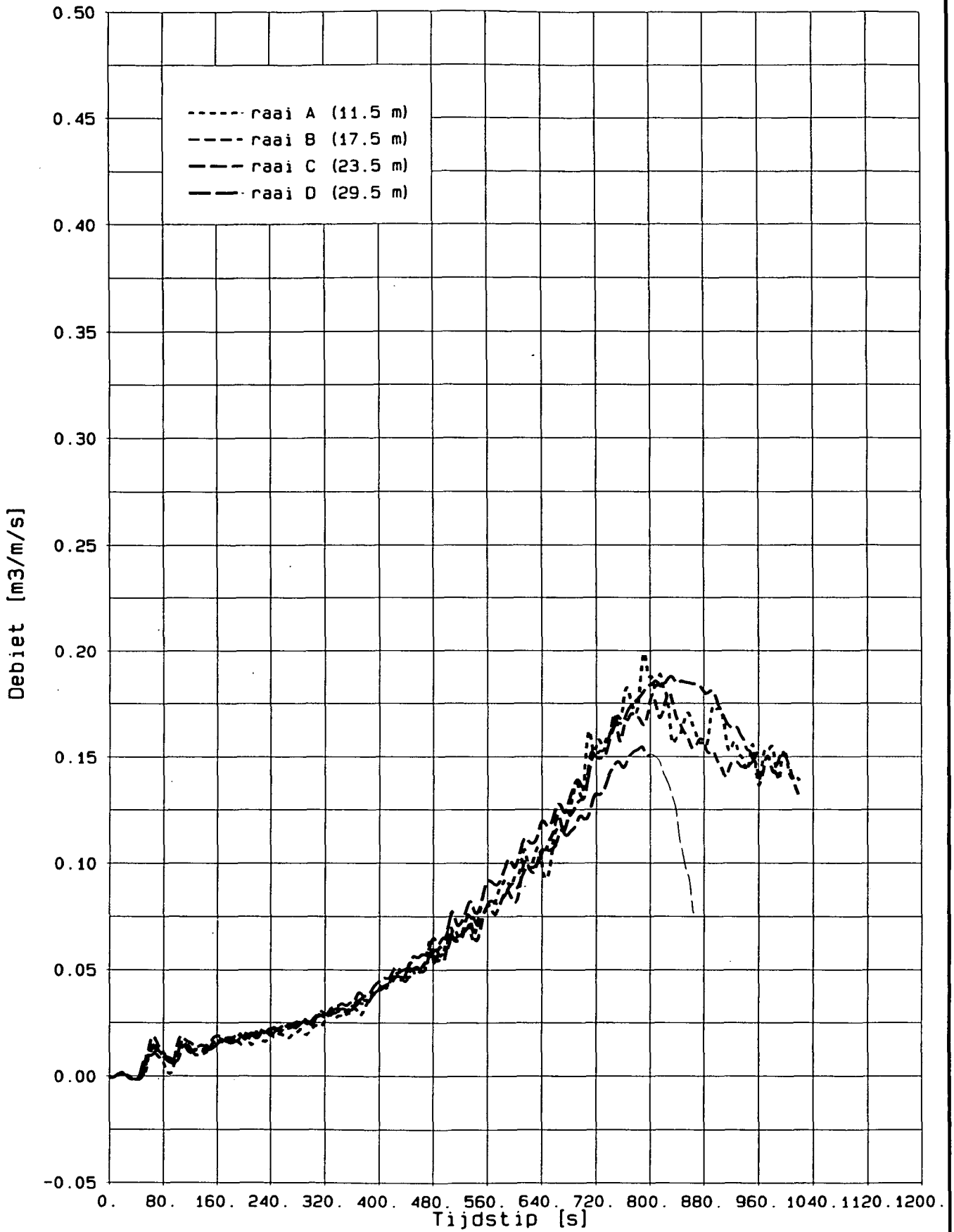


OVERZICHT ONTWIKKELING AANSTROOMDEBIET
 Aanstroomraaien A t/m D

T2

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

H1242-II FIG.643



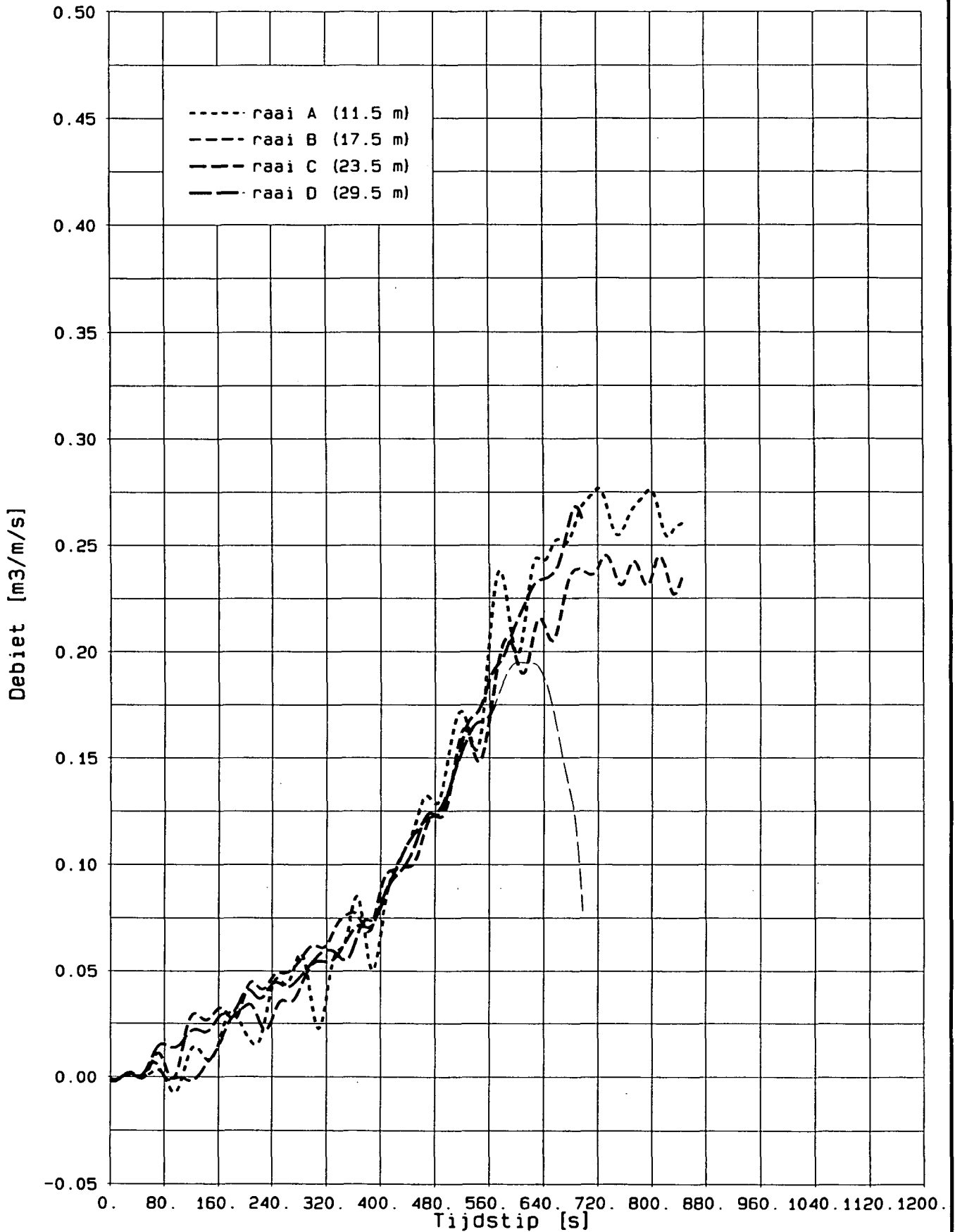
OVERZICHT ONTWIKKELING AANSTROOMDEBIET

Aanstroomraaien A t/m D

T3

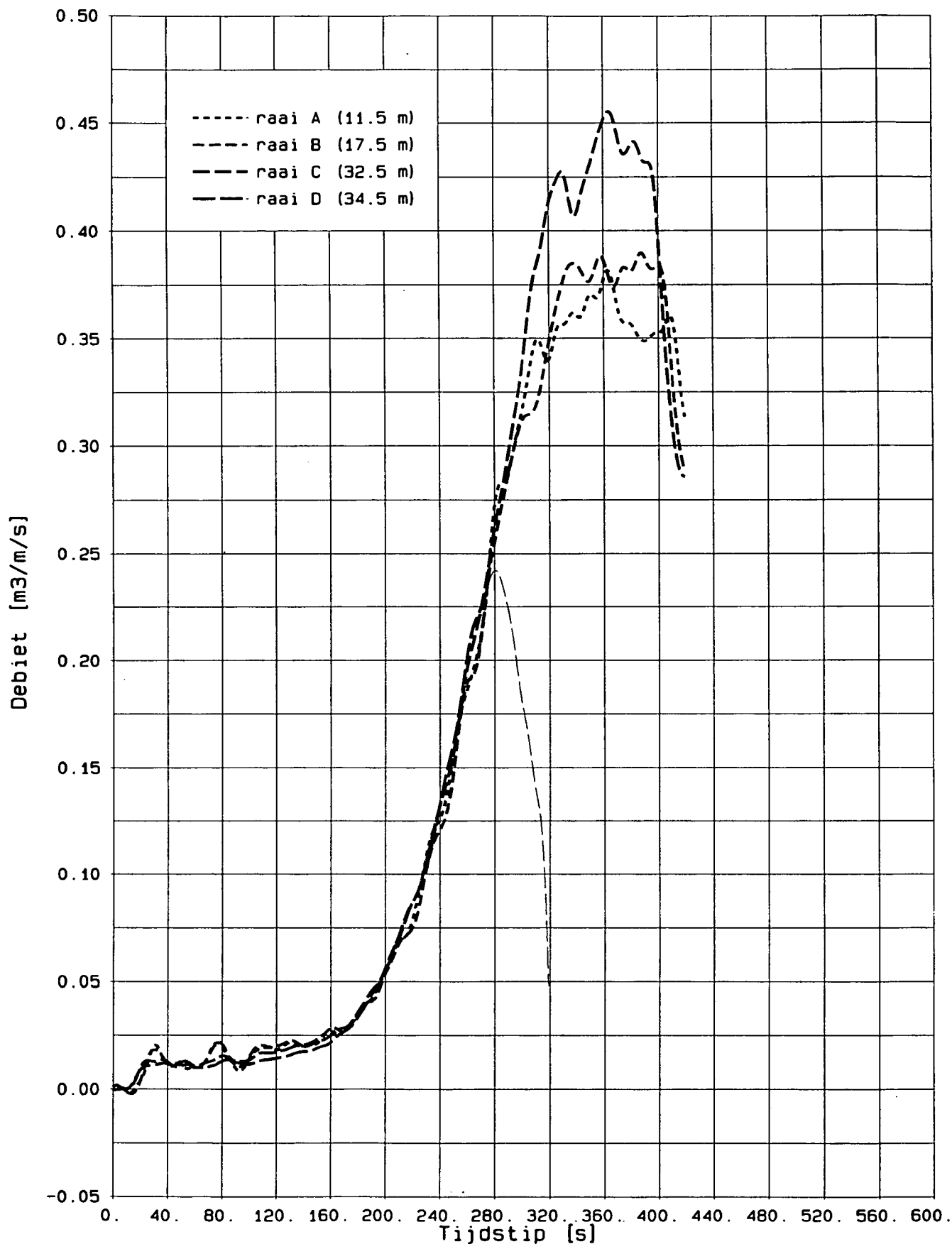
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

H1242-II FIG.644



OVERZICHT ONTWIKKELING AANSTROOMDEBIET...
 Aanstroomraaien A t/m D

T4

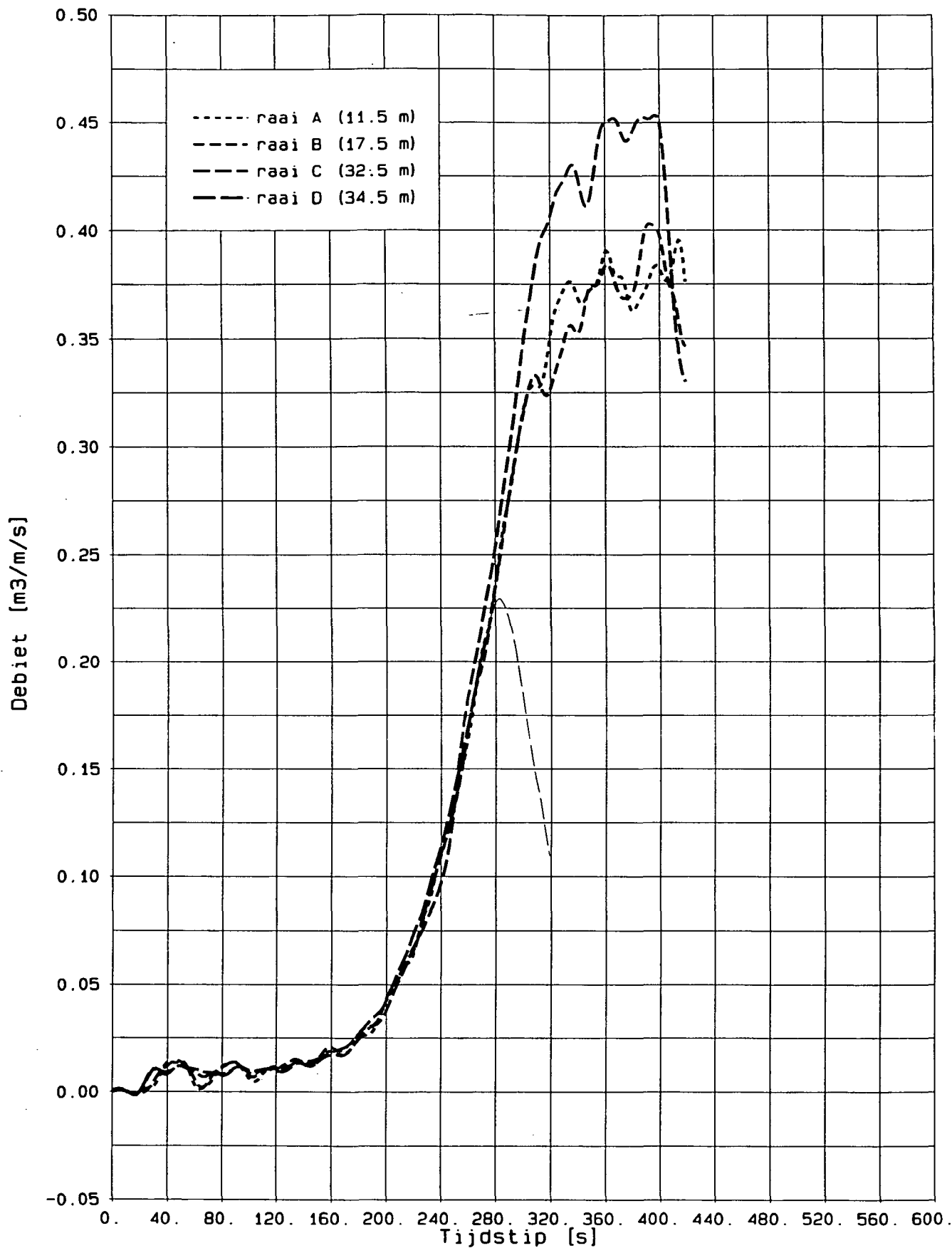


OVERZICHT-ONTWIKKELING AANSTROOMDEBIET
 Aanstroomraaien A t/m D

T5

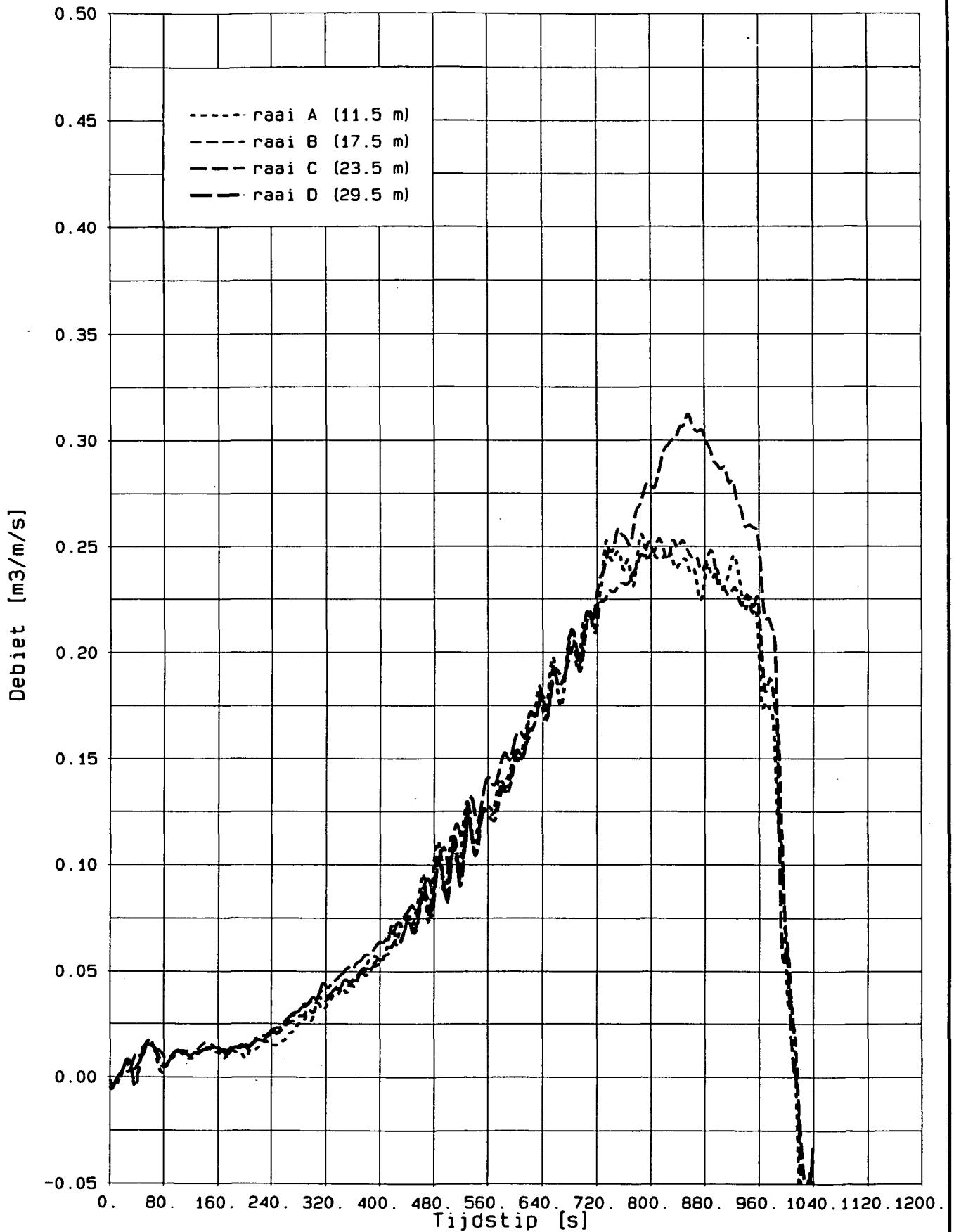
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

H1242-II FIG. 646



OVERZICHT ONTWIKKELING AANSTROOMDEBIET.
 Aanstroomraaien A t/m D

T5A

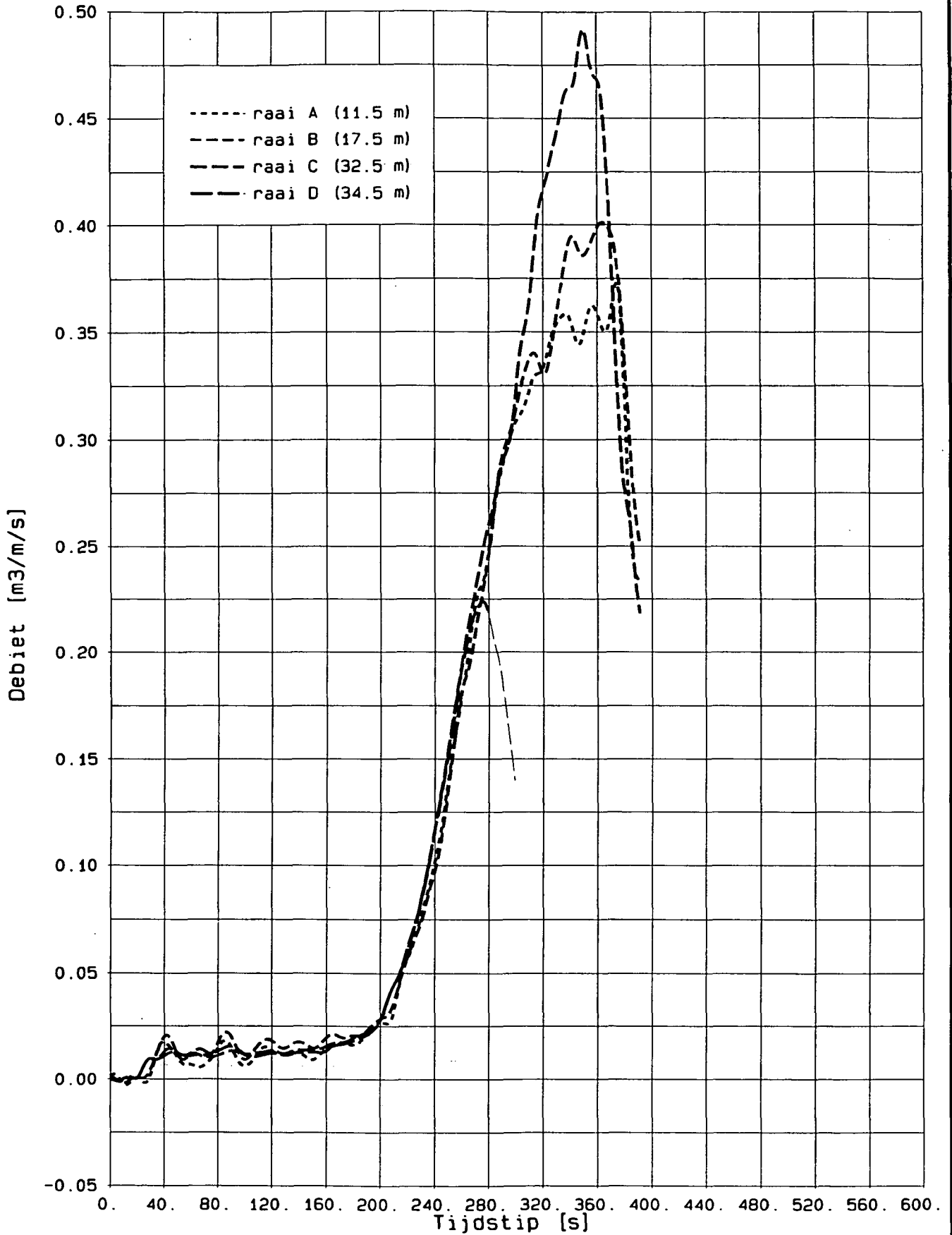


OVERZICHT ONTWIKKELING AANSTROOMDEBIET
 Aanstroomraaien A t/m D

T6

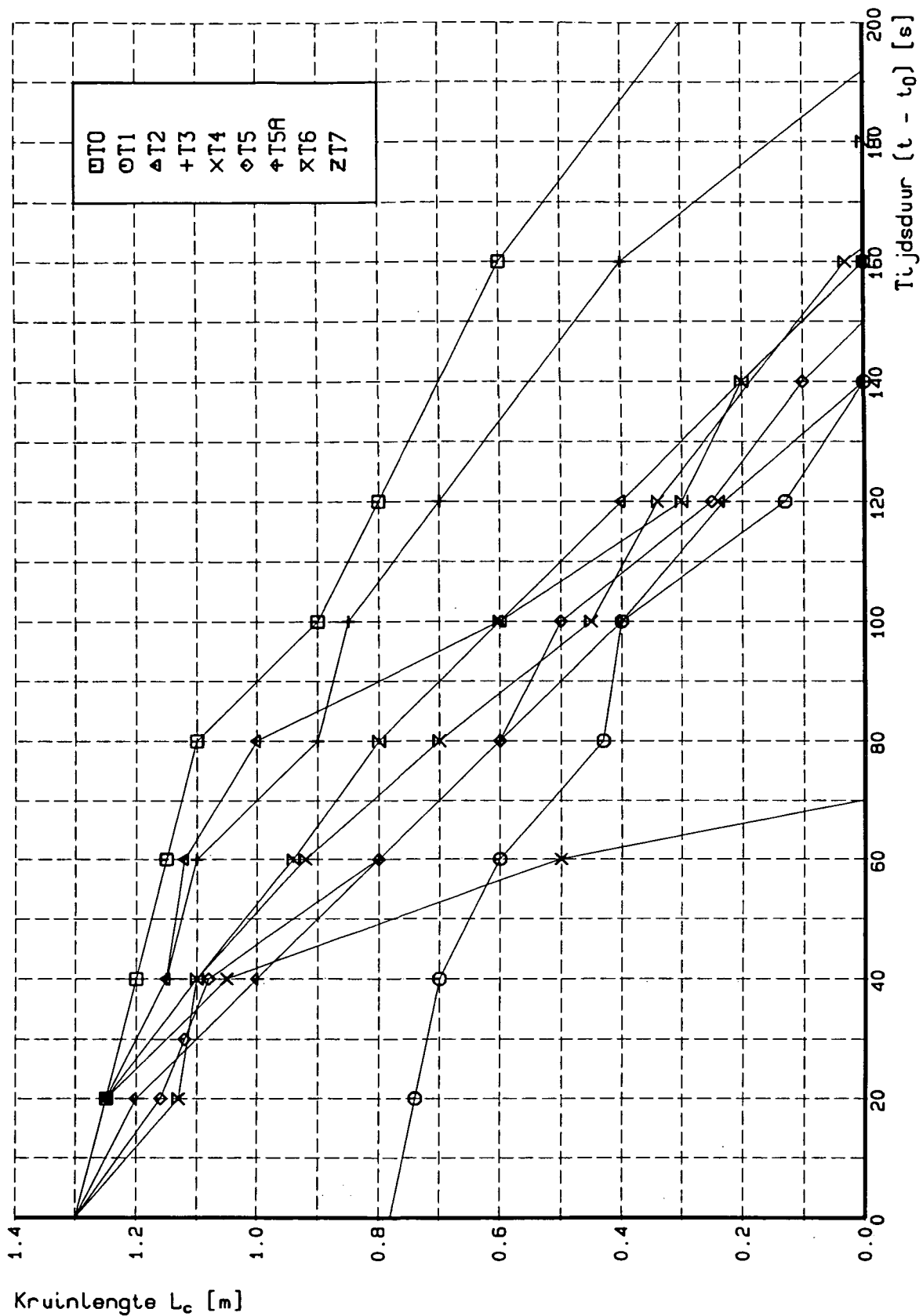
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

H1242-II FIG.648

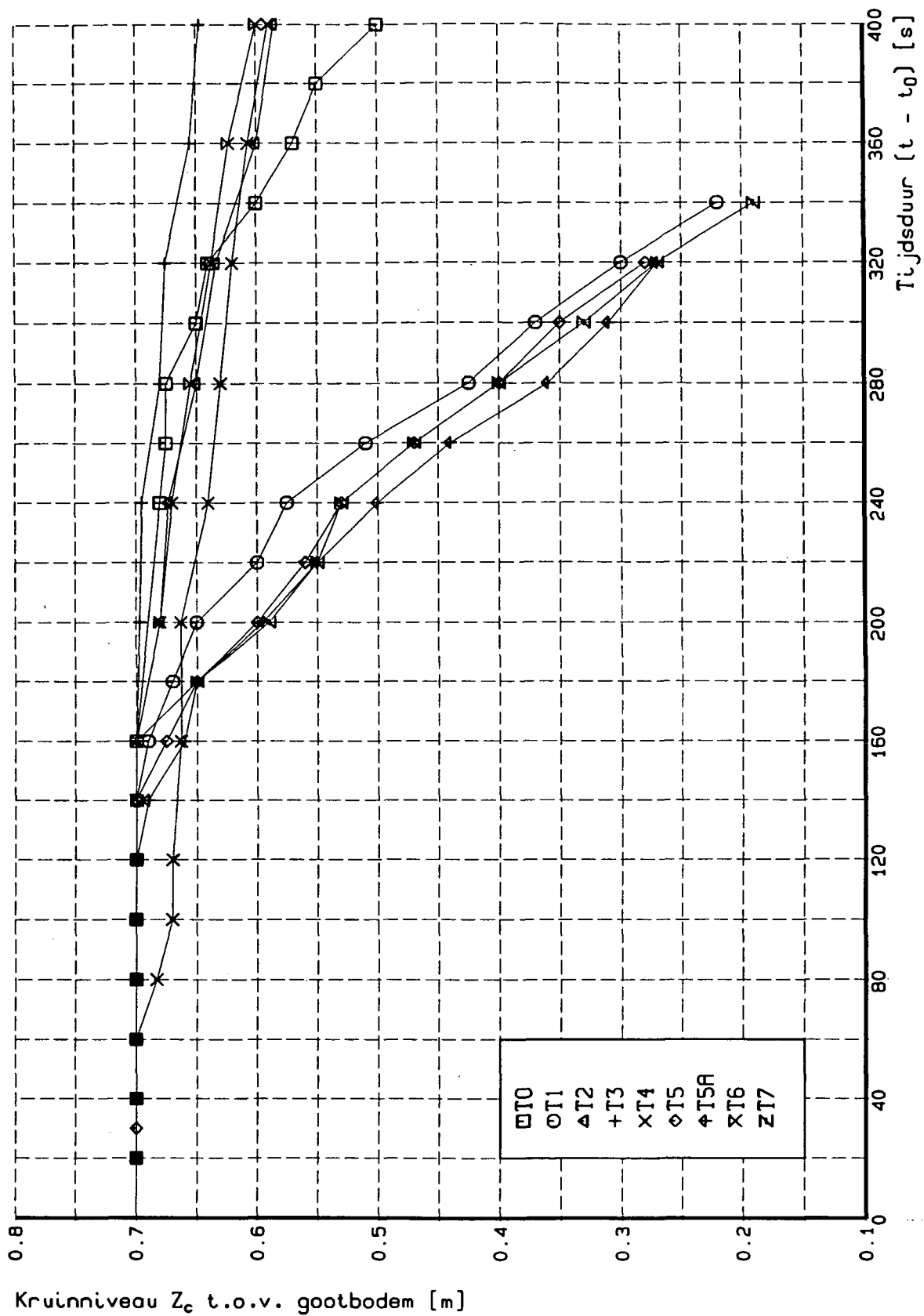


OVERZICHT ONTWIKKELING AANSTROOMDEBIET
 Aanstroomraaien A t/m D

T7



ONTWIKKELING KRUINLENGTE
 Overzicht voor alle proeven



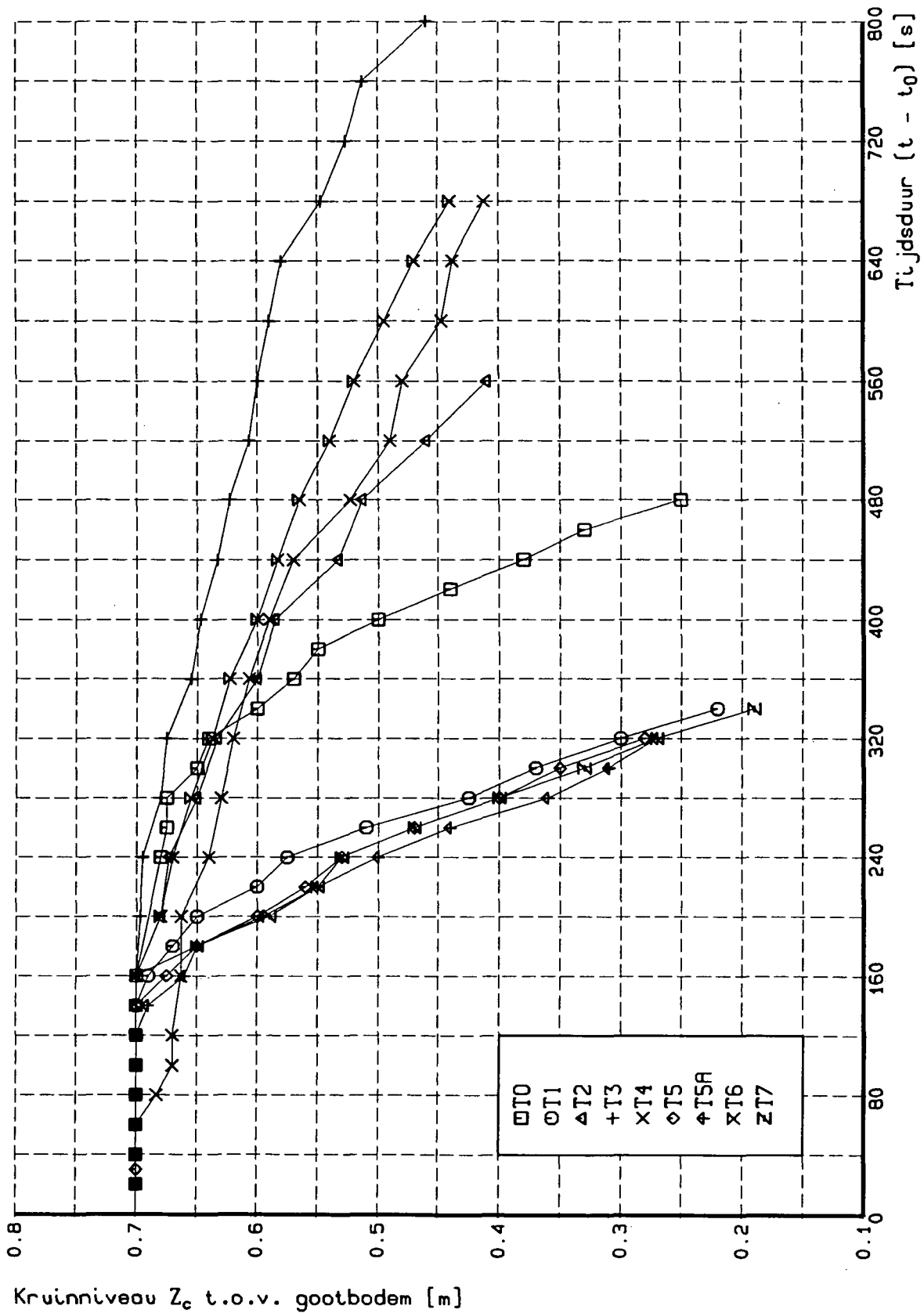
ONTWIKKELING KRUINNIVEAU
 Overzicht voor alle proeven

0 < t < 400 s

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

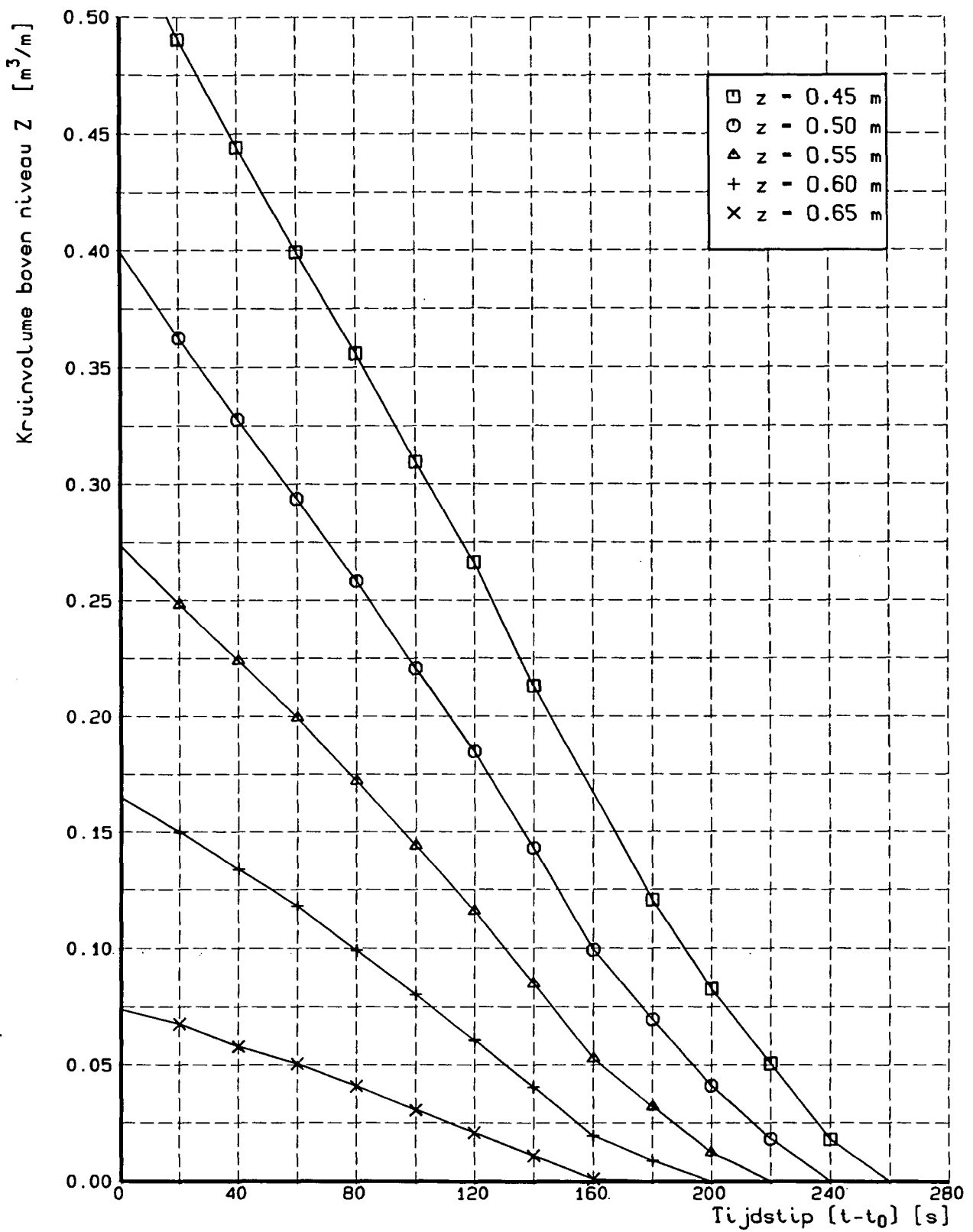
H1242-II

FIG.6.7.1



ONTWIKKELING KRUINNIVEAU
 Overzicht voor alle proeven

0 < t < 800 s



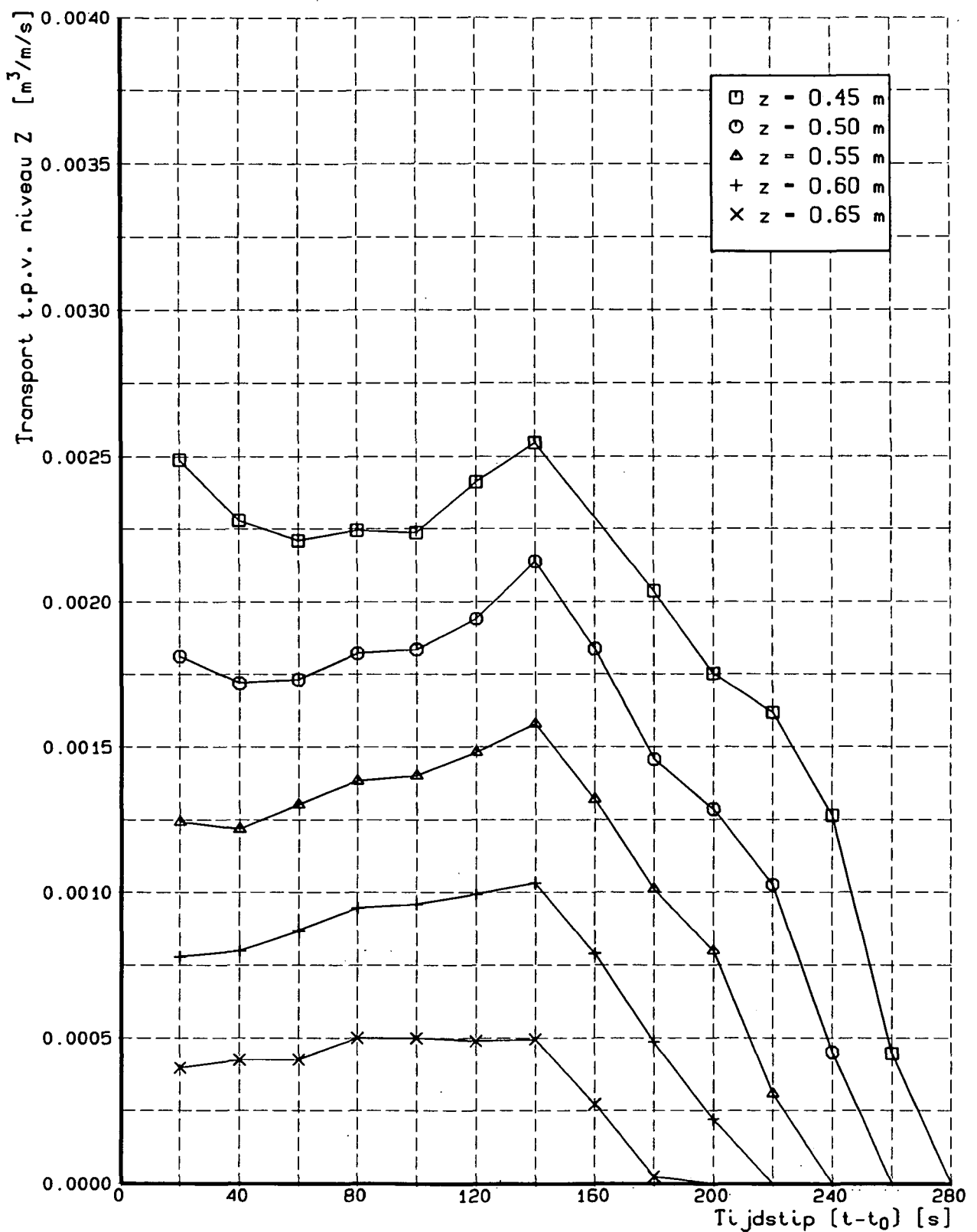
ONTWIKKELING AANWEZIG KRUIINVOLUME
Tijdsfuncties voor vijf niveaus

Proef. T5A

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

H1242-II

FIG.6.8.1



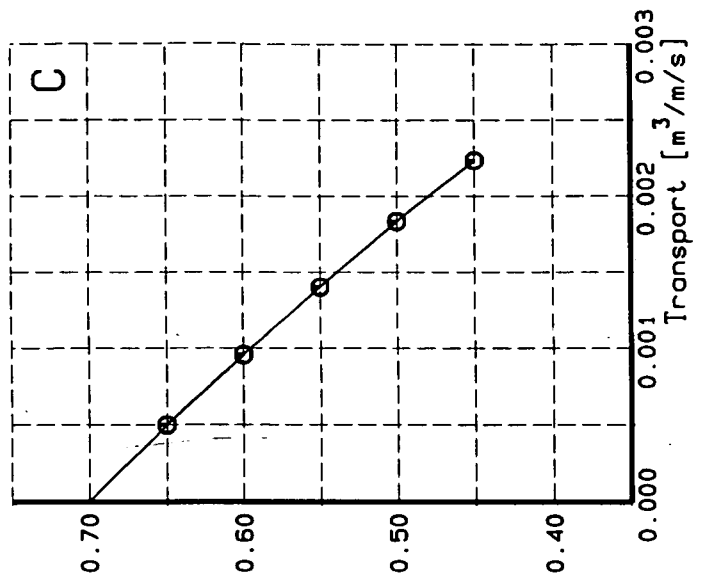
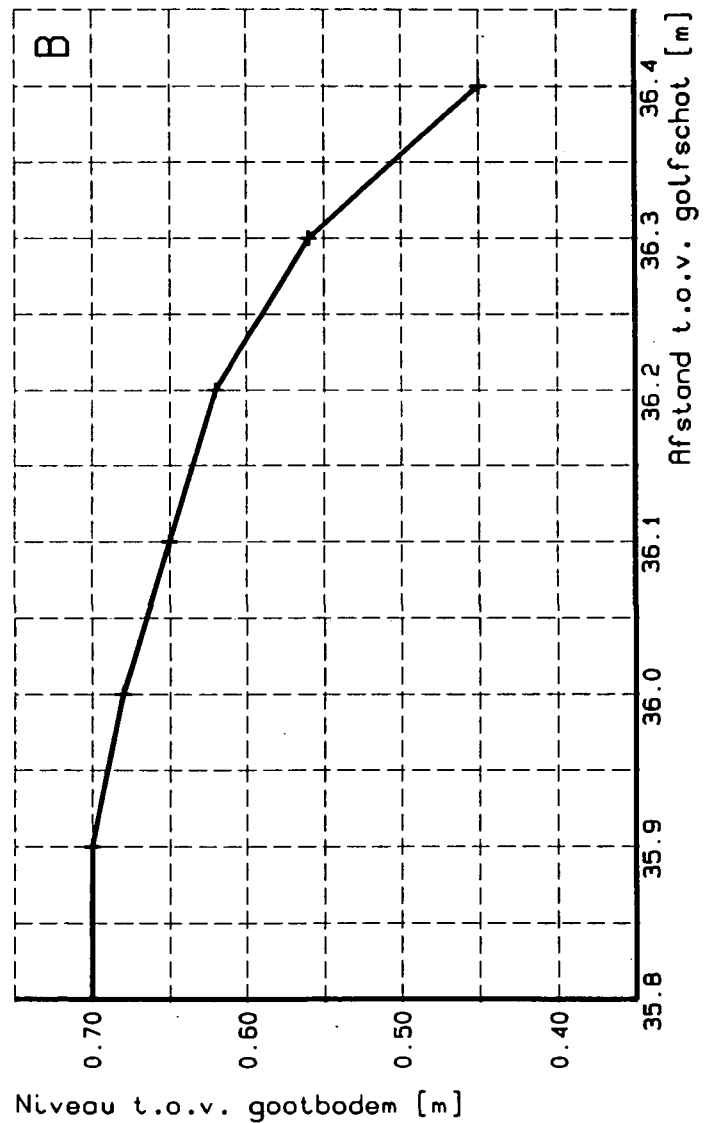
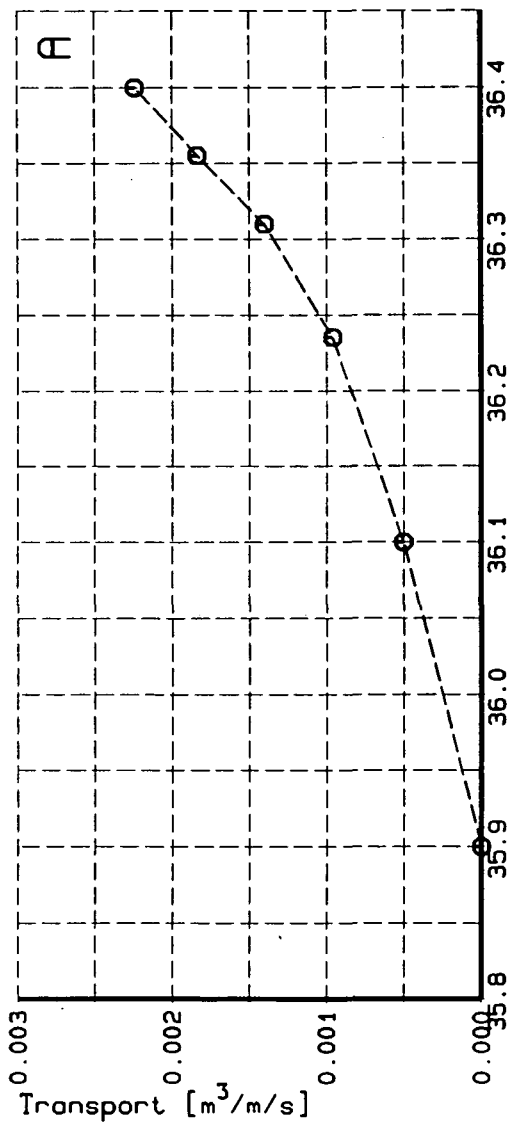
ONTWIKKELING SEDIMENTTRANSPORT
Tijdsfuncties voor vijf niveaus

Proef T5A

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

H1242-II

FIG.6.8.2



TRANSPORTVERLOOP OVER BINNENTALUD
 Evenwichtstalud; $t-t_0 = 100$ s

Proef: I5A

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

H1242-II

FIG.6.8.3

7 Conclusies m.b.t. onderzochte aspecten

7.1 Inleiding

In dit hoofdstuk zijn de conclusies m.b.t. de onderzochte aspecten nader samengevat. Achtereenvolgens komen hierbij aan de orde:

- de reproduceerbaarheid van het erosieproces;
- het effect van de voorlandhelling;
- het relatieve effect van additionele golfaanval;
- de invloed van de korreldiameter;
- de invloed van de pakkingsdichtheid.

Conclusies t.a.v. de bruikbaarheid van het in Hoofdstuk 4 beschreven analytische model worden in het volgende hoofdstuk besproken.

7.2 Reproduceerbaarheid

De mate van reproduceerbaarheid van het erosieproces is van groot belang voor de verdere analyse van de testresultaten. In hoeverre het proces van bresgroei in de gebruikte testopstelling reproduceerbaar is, blijkt uit de onderlinge vergelijking tussen de testresultaten van de proeven T5 en T5A.

Figuur 7.2.1 toont enkele van de gemeten dwarsprofielen voor de beide proeven samengebracht in een figuur. Er zijn zeer grote overeenkomsten in zowel de aanwezige tijdschaal als de optredende vormen van het dwarsprofiel (bijv. op $t-t_0 = 40$ s) aanwezig.

De tijdsduur benodigd voor de versteiling van het binnentalud, t_1-t_0 , is gegeven de aanwezige nauwkeurigheid gelijk:

De versmalling van de kruin (fase I-II) duurt voor proef T5 en T5A respectievelijk 150 en 140 s. Het iets sneller verlopen van de kruinerosie bij proef T5A kan voor een deel te wijten zijn aan een klein verschil in de initiële buitenwaterstand, welke voor proef T5 en T5A respectievelijk $H_0 = +0,747$ en $+0,755$ m bedroeg. Uitgaande van Vgl'n 4.3 en 4.6, zou de kruinerosie bij proef T5A als gevolg hiervan ca. 8 % sneller moeten verlopen. Dit verklaart nagenoeg exact het verschil in waargenomen tijdsduur ($150 / 140 = 1,07$).

Figuur 7.2.2 toont de ontwikkeling van het maximale kruinniveau als functie van de tijd. De ontwikkeling is, afgezien van de al genoemde tijdverschuiving ($150 - 140 = 10$ s) gelijkwaardig.

Figuur 7.2.3 toont het resultaat van een serie kuberingsberekeningen, waarbij het zandvolume boven het (+0,45 m)-niveau is berekend. Het verloop van dit volume als functie van de tijd is voor deze proeven overeenkomstig te noemen (absolute afwijking maximaal $0,015 \text{ m}^3/\text{m}^1$).

Samenvattend kan geconcludeerd worden dat er in de onderhavige testopstelling dus inderdaad sprake is van een goed te reproduceren proefresultaat.

7.3 Invloed voorlandhelling

De invloed van de voorlandhelling op het erosieproces is vastgesteld voor twee verschillende zandsorten en drie verschillende hellingen: respectievelijk de proeven T1 vs. T2 en T3, en de proeven T5 vs. T6.

Met betrekking tot de tijdsduur benodigd voor de versteiling van het binnentalud (Fase I; zie Tabel 6.5) lijkt een minder steil voorland te resulteren in een relatief grotere tijdsduur. Voor een dijkprofiel (met talud 1 : 4) bedraagt deze tijdsduur 40 à 45 s, terwijl voor een flauw hellend voorland (afslagprofiel met talud 1 : 30) deze 50 à 55 s bedraagt. Als gevolg van vermoedelijk wrijvingsverlies op het voorland is het kruindebiet geringer en neemt de tijdsduur iets toe (ca. 10 à 30%).

Soortgelijke effecten zijn waarneembaar bij de onderlinge vergelijking tussen de ontwikkelingen van de kruinlengte in de tijd (Fase I-II; zie ook Tabel 6.6). In Figuur 7.3.1 zijn deze relaties samengebracht.

Vergelijking van de duinzand-resultaten van proef T5 (talud 1 : 4) en proef T6 (talud 1 : 30 à 40) laat een kleine toename in de benodigde tijdsduur zien bij afnemende taludhelling. Deze toename is, zelfs in sterkere mate, eveneens aanwezig bij vergelijking van de Asserzand-resultaten van proef T2 (talud 1 : 15) en proef T3 (talud 1 : 30 à 40).

De kruinlengte-ontwikkeling van proef T1 laat vanwege de 'valse start' (zie paragraaf 5.2) geen harde conclusies toe, al lijkt de erosieduur inderdaad minder groot dan die van proef T2.

De relevante ontwikkelingen tijdens fase III zijn voor wat betreft de ontwikkeling van het kruinniveau gegeven in Figuur 7.3.2. Duidelijk is het grote verschil tussen de verschillende voorlandhellingen. Vergelijking van de Asserzand-resultaten voor de drie voorlandhellingen laat zien dat een flauwer voorland minder snel verlaagt, iets wat bevestigd wordt door de duinzand-resultaten. Opgemerkt moet worden dat het effect van de 'valse start' van proef T1 inmiddels is verdwenen.

Figuur 7.3.3 toont de op basis van de vorige figuur berekende snelheid van kruindaling voor de verschillende proeven. De gemiddelde verlagingsnelheid bij een dijktaald overtreft die van de andere taluds met globaal een factor 5. De kruindalingssnelheid bedraagt 0,0015 à 0,0035 m/s, terwijl bij een afslagprofiel deze slechts 0,0003 à 0,0012 m/s bedraagt.

In Figuur 7.3.4 is de ontwikkeling van het kruinvolume gegeven, welke hierbij gedefinieerd is als het zandvolume boven het (+0,45 m)-niveau. Bij vergelijking van de Asserzand-resultaten lijken de lijnen nagenoeg parallel te lopen, hetgeen betekent dat de erosiesnelheid blijkbaar nagenoeg gelijk is. Deze conclusie is eveneens van toepassing op de duinzand-resultaten.

De gemiddelde erosiesnelheid voor de Asserzand-proeven T1, T2 en T3 bedraagt respectievelijk 0,00174, 0,00171 en 0,00169 m³/m¹/s. De geringe afname in erosiesnelheid (transport) bij afnemende taludhelling lijkt verband te houden met het toenemende wrijvingsverlies tijdens de aanstroming over het voorland.

In Figuur 7.3.5 is deze erosiesnelheid als functie van de tijd uitgedrukt in het transport t.p.v. het (+0,45 m)-niveau. De grootte van het transport voor de Asserzand-resultaten is onderling vergelijkbaar. Voor de duinzand-proeven geldt dit ook, zij het dat het gemiddelde transport hier groter is.

Figuur 7.3.6 geeft voor alle proeven de gemiddelde snelheid van kruindaling (gebaseerd op de tijdsduur welke aanwezig is tussen de passage van het (+0,65)- en het (+0,50 m)-niveau), als functie van de taludhelling van het voorland. In het geval van proef T0 is hierbij, ter wille van een eerlijke vergelijking, een 0,02 m lager niveau aangehouden. De gemiddelde snelheid van de kruindaling voor een dijk-profiel bedraagt 0,0018 à 0,0025 m/s.

De theoretische bijdrage van het volume-effect aan de reductie in kruindalingssnelheid is weergegeven door middel van de in de figuur gegeven relatie. Deze relatie is gebaseerd op Vgl. 4.14 (zie ook Tabel 4.1 voor de relatieve k_2 -waarden), waarbij genormeerd is op de met het *-teken aangegeven waarde. Het grootse deel van de reductie in de kruindalingssnelheid blijkt derhalve te verklaren uit het volume-effect.

Samenvattend spelen met betrekking tot het erosieproces (minimaal) twee effecten een rol, te weten:

- Wrijvingseffect;
- Volume-effect.

Het wrijvingseffect zorgt ervoor dat zowel fase I (versteiling binnentalud), fase II (kruinversmalling) als fase III (kruinverlaging) relatief langzamer verlopen bij een minder steile voorlandhelling. Het volume-effect speelt alleen een rol bij de kruinverlaging en is hier veruit overheersend.

7.4 Invloed golfaanval

Het relatieve effect van de aanwezigheid van golfaanval tijdens overstroming van de kruin van een waterkering is onderzocht voor het geval van een flauw hellend voorland, door vergelijking van testresultaten zonder en met golfaanval (proeven T3 en T4).

In Figuur 7.4.1 zijn enkele van de gemeten dwarsprofielen in een enkele figuur samengebracht.

De profielontwikkelingen tijdens fase I (versteiling van het binnentalud) zijn nog goed vergelijkbaar. Dit moet ook wel omdat in deze fase de golfaanval nog moest beginnen. Tijdens de verdere ontwikkeling vallen een drietal verschillen op, te weten:

- Bij aanwezigheid van golfaanval vindt er al significant transport plaats op het niveau van de kruin, waardoor er al vrij snel sprake is van een kruinverlaging;
- Het erosieproces verloopt bij aanwezigheid van golven veel sneller;
- Bij aanwezigheid van golfaanval is er in mindere mate sprake van een relatief steil binnentalud.

In Figuur 7.4.2 is een vergelijking gegeven voor de ontwikkeling van het kruinniveau als functie van de tijd. Het (maximale) kruinniveau zakt veel eerder, terwijl bovendien de snelheid van daling (bij eenzelfde niveau) groter is.

Figuur 7.4.3 geeft de ontwikkeling van het al eerder genoemde kruinvolume als functie van de tijd. Door de aanwezigheid van golven is de gemiddelde erosiesnelheid ca. 35 % groter.

Samenvattend blijkt uit de onderlinge vergelijking dat golfaanval een duidelijk versnellende invloed heeft op het erosieproces.

Ofschoon de invloed van de golfaanval alleen is onderzocht voor het fijnere Asserzand en voor een flauw hellend voorland, kan worden aangenomen dat soortgelijke conclusies tevens van toepassing zijn voor een andere zandsoort en/of andere voorlandhellingen.

7.5 Invloed korreldiameter

De invloed van de korreldiameter op het erosieproces is onderzocht voor twee verschillende hellingen van het voorland.

In de Figuren 7.5.1 en 7.5.2 is een vergelijking gegeven tussen enkele van de gemeten dwarsprofielen voor respectievelijk het dijk- en het duinafslag-profiel.

Bij een eerste vergelijking van de profielen vallen een tweetal verschillen op, te weten:

- Bij de proeven met Asserzand is er (soms) sprake van een zeer steil (tot overhellend) binnentalud ('waterval'), iets wat bij het grovere zand niet wordt waargenomen.
- De erosie bij de duinzand-proeven lijkt iets sneller te verlopen.

Met betrekking tot de duur van fase I zijn, binnen de aanwezige nauwkeurigheid, geen conclusies te trekken.

Figuur 7.5.3 toont de invloed van de korreldiameter op de ontwikkeling van de kruinlengte. Bij beperking van de conclusies tot de duinafslagprofielen blijkt de duur van erosiefase I-II bij aanwezigheid van duinzand ca. 15 % korter te zijn.

Zoals blijkt uit de ontwikkeling van het (maximale) kruinniveau als gegeven in Figuur 7.5.4, verloopt de kruinverlaging bij aanwezigheid van duinzand eveneens veel sneller.

De ontwikkeling van het kruinvolume als gegeven in Figuur 7.5.5, en het daarop gebaseerde tijdsverloop van het transport (zie Figuur 7.5.6) laten zien dat de erosie bij de aanwezigheid van duinzand sneller verloopt. De gemiddelde erosie (bij zowel het dijk- als het duinafslag-

profiel) bedraagt voor Asserzand ca. $0,0017 \text{ m}^3/\text{m}^1/\text{s}$ en voor duinzand ca. $0,0021 \text{ m}^3/\text{m}^1/\text{s}$. Het grovere zand resulteert dus in een 20 à 25 % hogere erosiesnelheid.

Overigens moet worden opgemerkt dat naast natuurlijk de D_{50} -waarde van het sediment, tevens de porositeit en de mate van uniformiteit (D_{90}/D_{10} -verhouding) van de beide zandsoorten verschilde. Een misschien belangrijk neven-effect van een afwijkende korreldiameter zou tevens kunnen zijn dat er bij grover zand ook sprake is van een grotere ruwheid (ruwheids-waarde evenredig met D_{90}).

Volgens het analytische model (zie Hoofdstuk4) zijn er (afgezien van ruwheidsbeïnvloeding) geen effecten van het korrelmateriaal op het erosieproces aanwezig.

7.6 Invloed pakkingsdichtheid

De invloed van de pakkingsdichtheid op het erosieproces volgt uit een vergelijking van de resultaten van de proeven T5 en T7.

In Figuur 7.6.1 is een vergelijking gegeven van een aantal dwarsprofielen, waarbij de (onverwachte) vrij goede overeenkomst opvallend te noemen is.

Met betrekking tot de duur van fase I zijn ook hier, binnen de aanwezige nauwkeurigheid, geen conclusies te trekken.

Figuur 7.6.2 toont de invloed van de pakkingsdichtheid op de ontwikkeling van de kruinlengte. Ter vergelijking is in de figuren tevens het resultaat van herhalingsproef T5a met een dunne getrokken lijn aangegeven. De duur van erosiefase I-II lijkt voor de proef met losse pakking iets groter. Dit verschil wordt echter volledig veroorzaakt door de in het begin (zeg eerste 20 s) iets achterblijvende erosie. Dit lijkt veroorzaakt te worden door het feit dat ten tijde van de eerste afstroming over het los gepakte binnentalud, een gedeelte van het beschikbare overstroomvolume door inzijging in het zandmassief aan het erosieproces wordt onttrokken. Hiermee rekening houdend, blijft er geen verschil van betekenis over tussen de proeven met verschillende pakking.

Soortgelijke conclusies zijn van toepassing voor de ontwikkeling van het (maximale) kruinniveau als gegeven in Figuur 7.6.3. Het effect van een verschil in pakkingsdichtheid is minimaal.

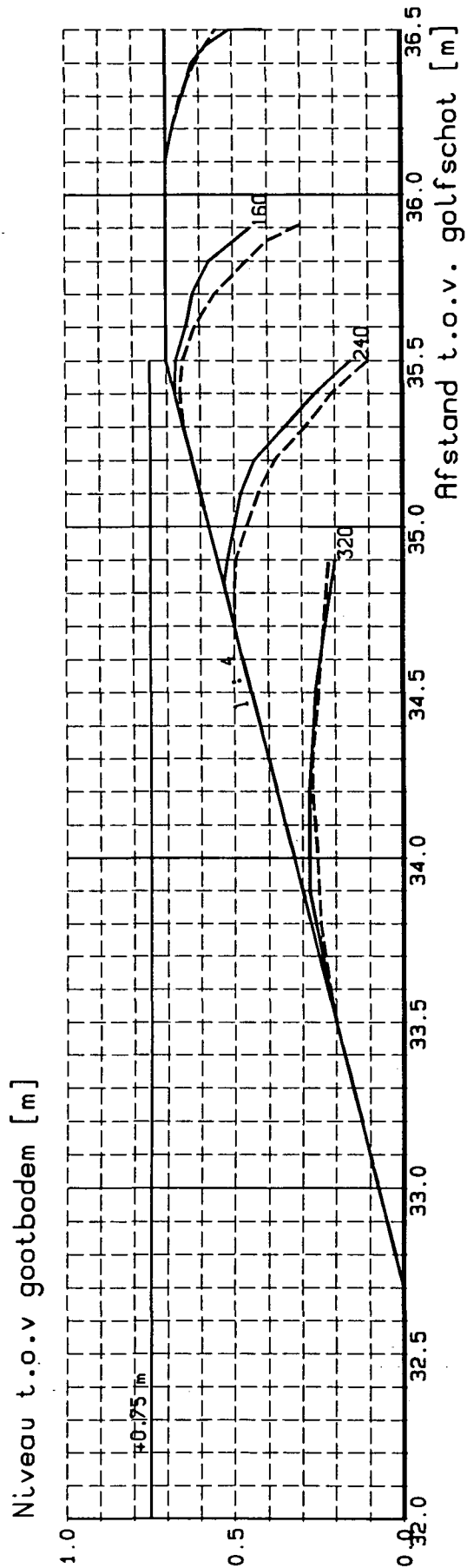
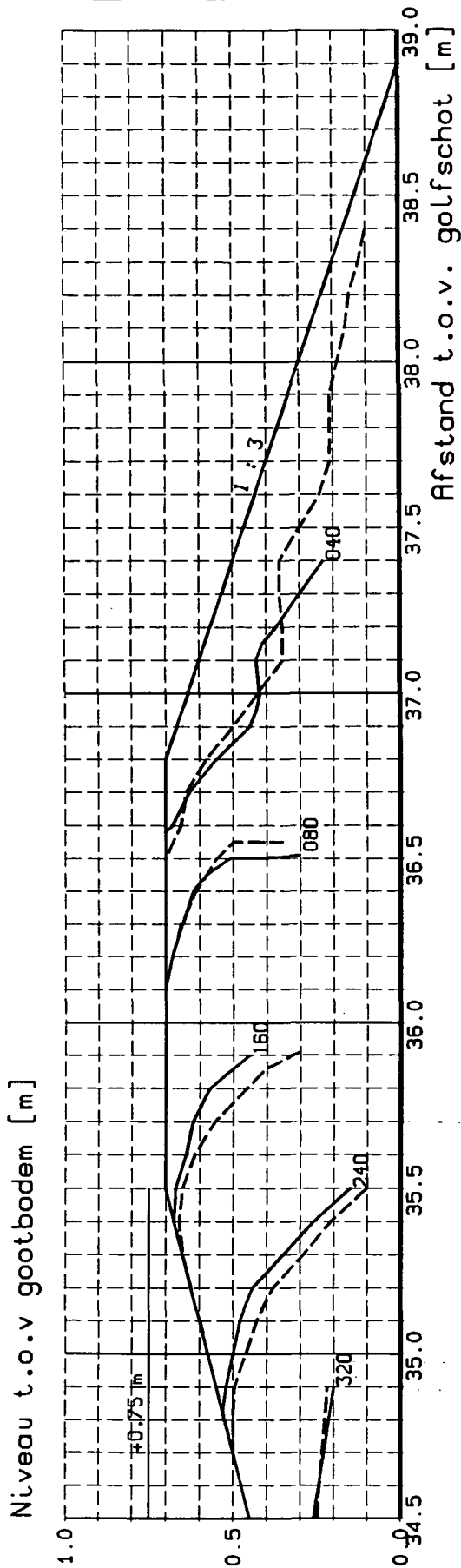
De ontwikkeling van het kruinvolume, als gegeven in Figuur 7.6.4, vertoont eveneens grote overeenkomsten. Met betrekking tot de erosiesnelheid lijkt een lossere pakking te resulteren in een (tijdelijk) iets sneller verlopend erosieproces, waardoor het netto effect van de lossere pakking licht positief is, d.w.z. een iets grotere erosiesnelheid heeft (ca. 5%).

Dit relatieve effect is echter veel kleiner dan wat er op basis van het directe (volume)-effect van de porositeit mag verwachten.

Dit laatste verklaart een mogelijk verschil van +13,6% in de erosiesnelheid, zodat er een (corrigerend) additioneel effect van de pakking dus -(5 à 10)% bedraagt.

Een lossere pakking erodeert dus, in termen van transport van vast korrelvolume (bijv. $\text{kg}/\text{m}^1/\text{s}$), minder snel, maar uitgedrukt in afzettingvolume (dus in bij $\text{m}^3/\text{m}^1/\text{s}$), is de erosiesnelheid nagenoeg gelijk.

Samenvattend is het netto effect van de pakkingsdichtheid dus gering te noemen. Volgens het analytische model (zie Hoofdstuk4) zou er alleen een volume-effect aanwezig moeten zijn.



— Proef T5
 - - - Proef T5A (herhalingsproef)

REPRODUCEERBAARHEID EROSIEPROCES
 Vergelijking dwarsprofielen

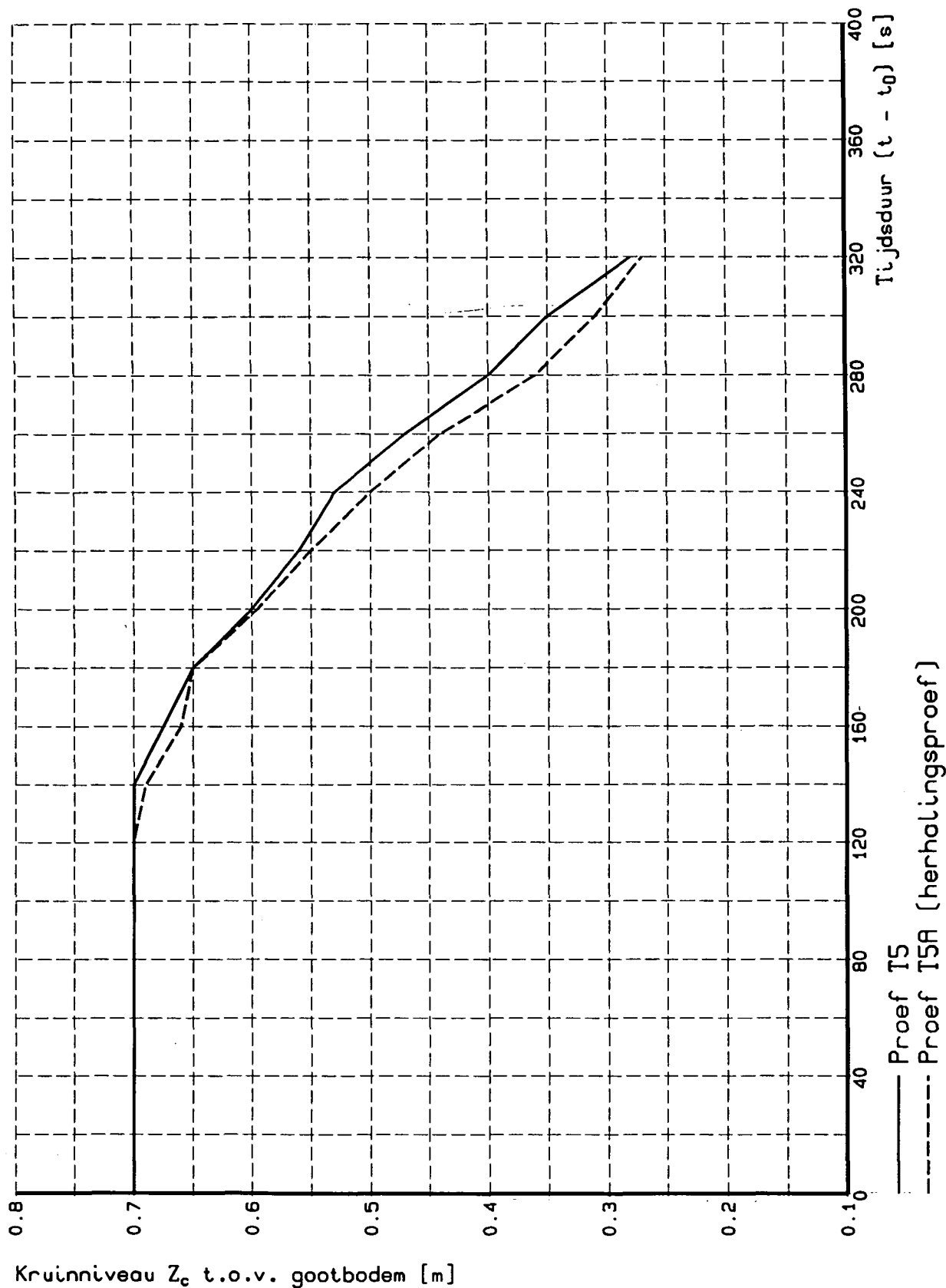
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

T5 en T5A

Schaal 1 : 20

H1242-II

FIG.7.2.1



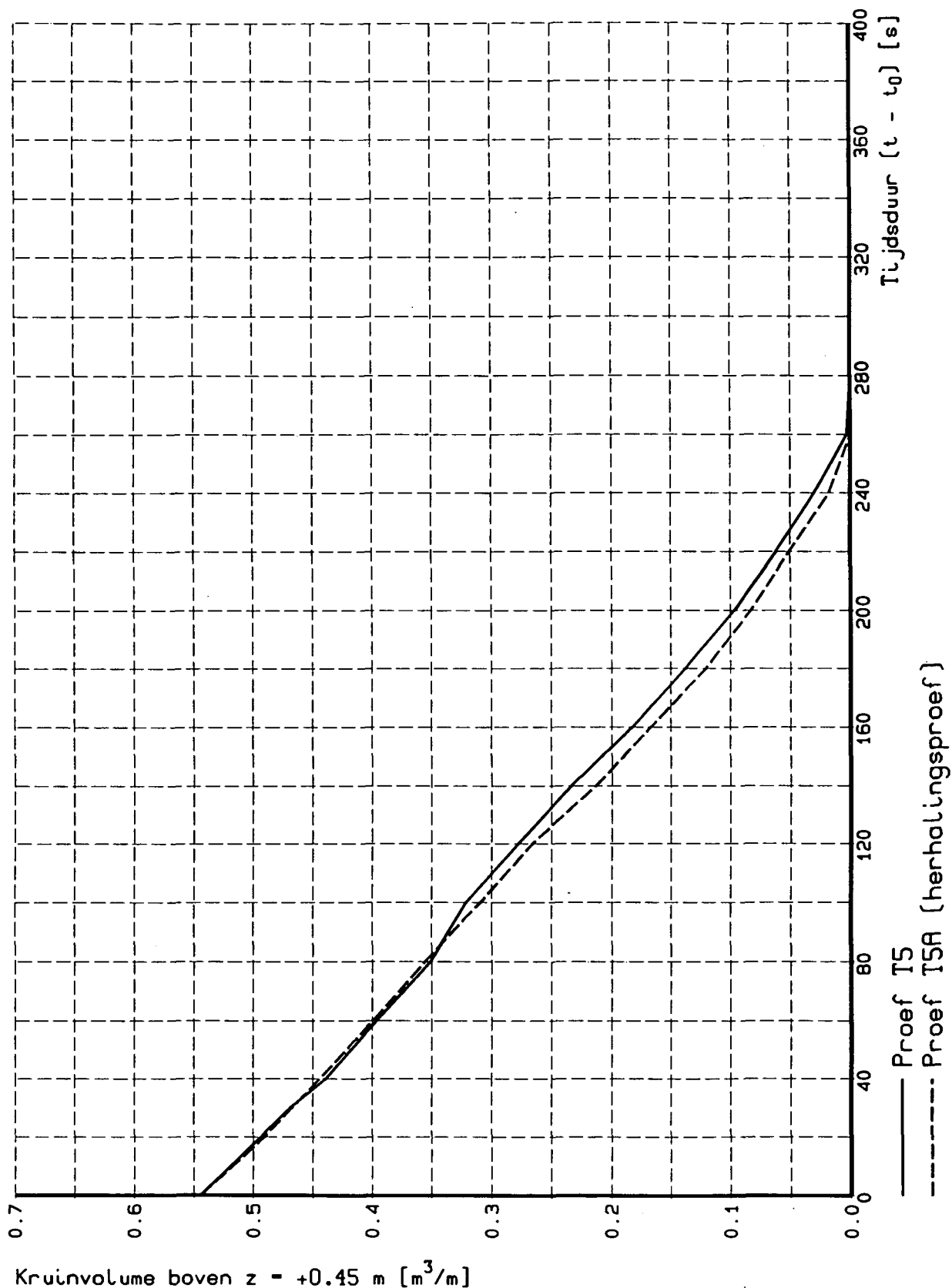
REPRODUCEERBAARHEID EROSIEPROCES
Vergelijking ontw. kruinniveau

T5 en T5A

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

H1242-II

FIG.7.2.2



REPRODUCEERBAARHEID EROSIEPROCES

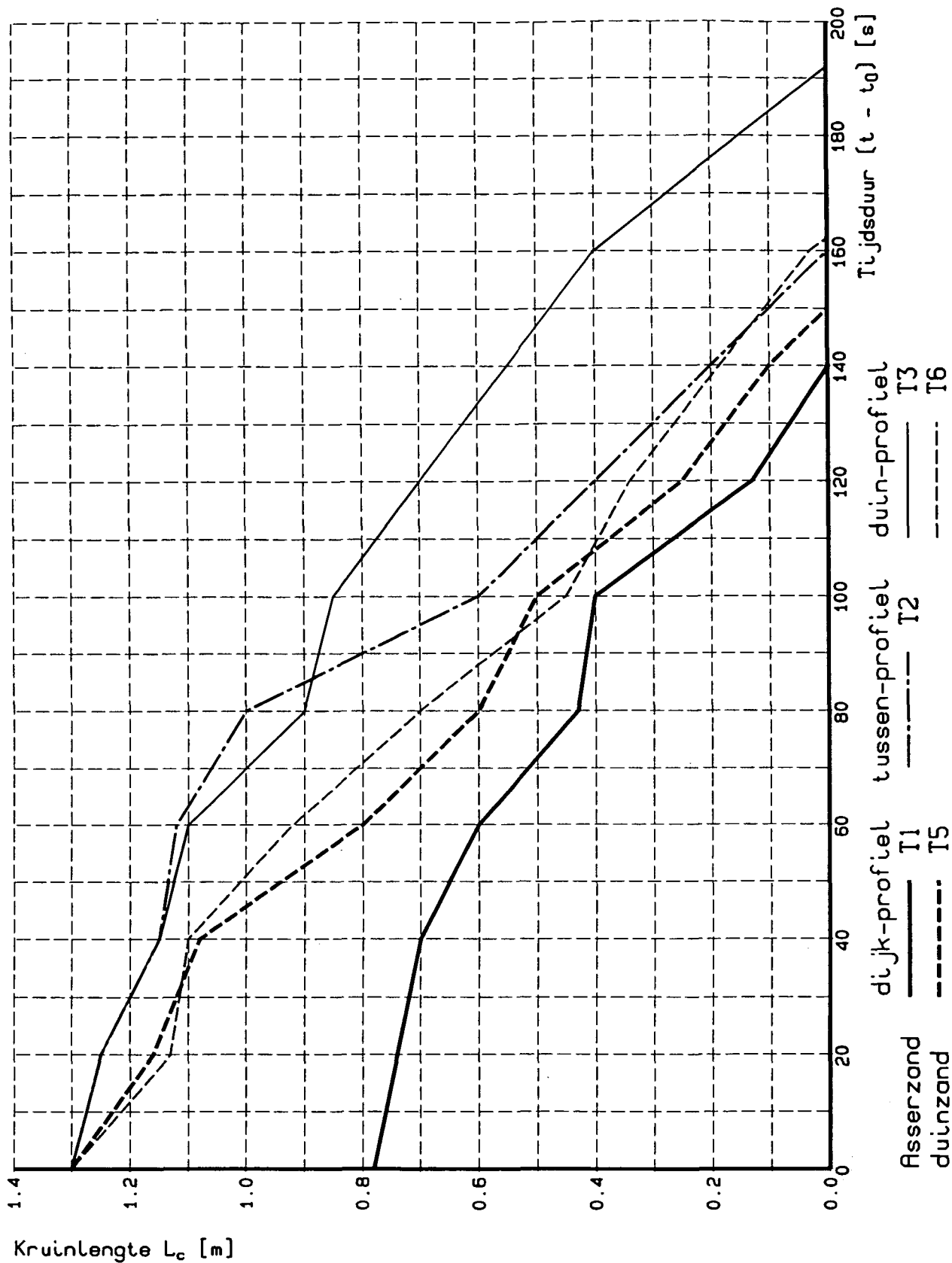
T5 en T5A

Vergelijking ontw. kruinvolume

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

H1242-II

FIG.7.2.3



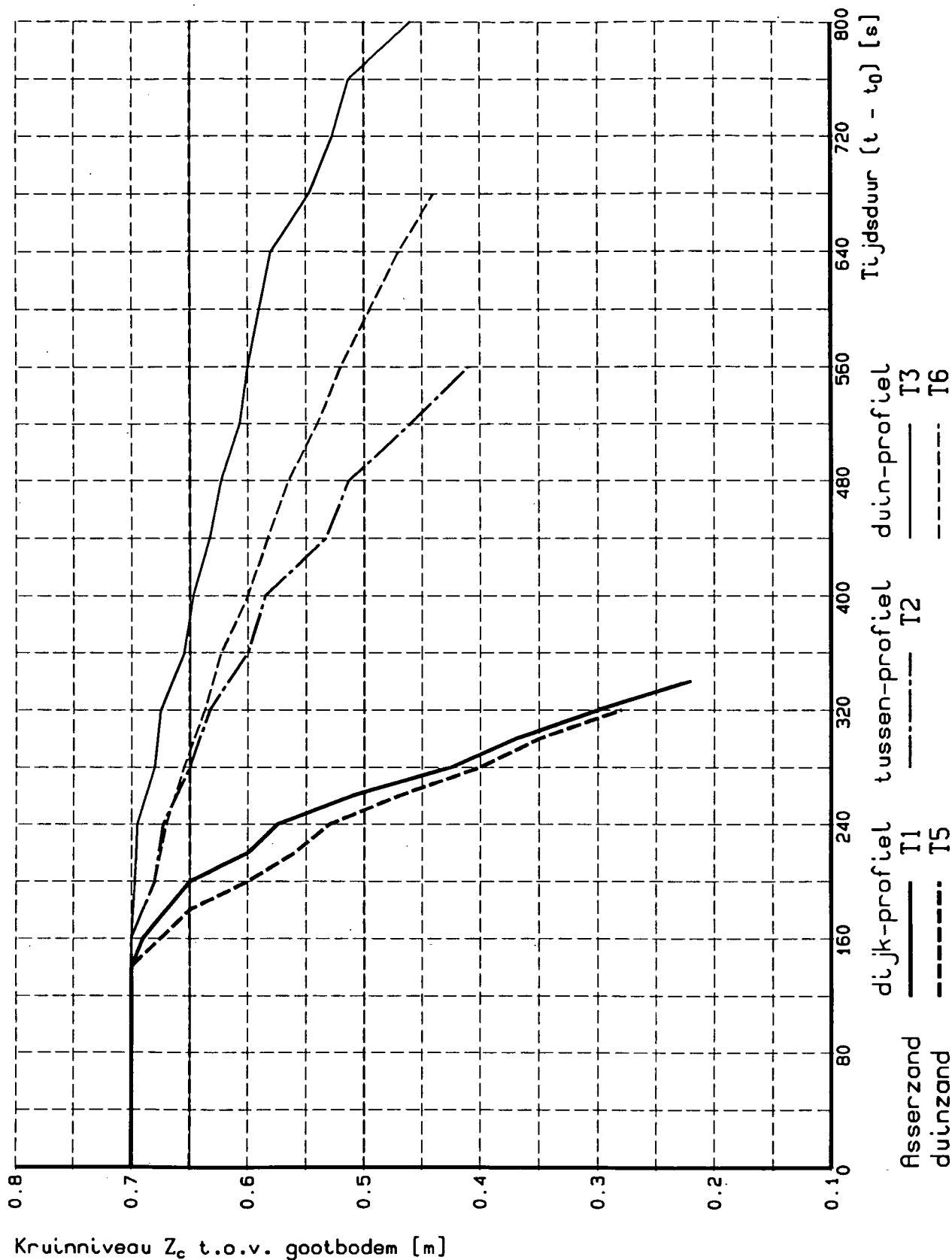
INVLOED VOORLANDHELLING
 Vergelijking ontw. kruijlengte

T1/2/3/5/6

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

H1242-II

FIG.7.3.1



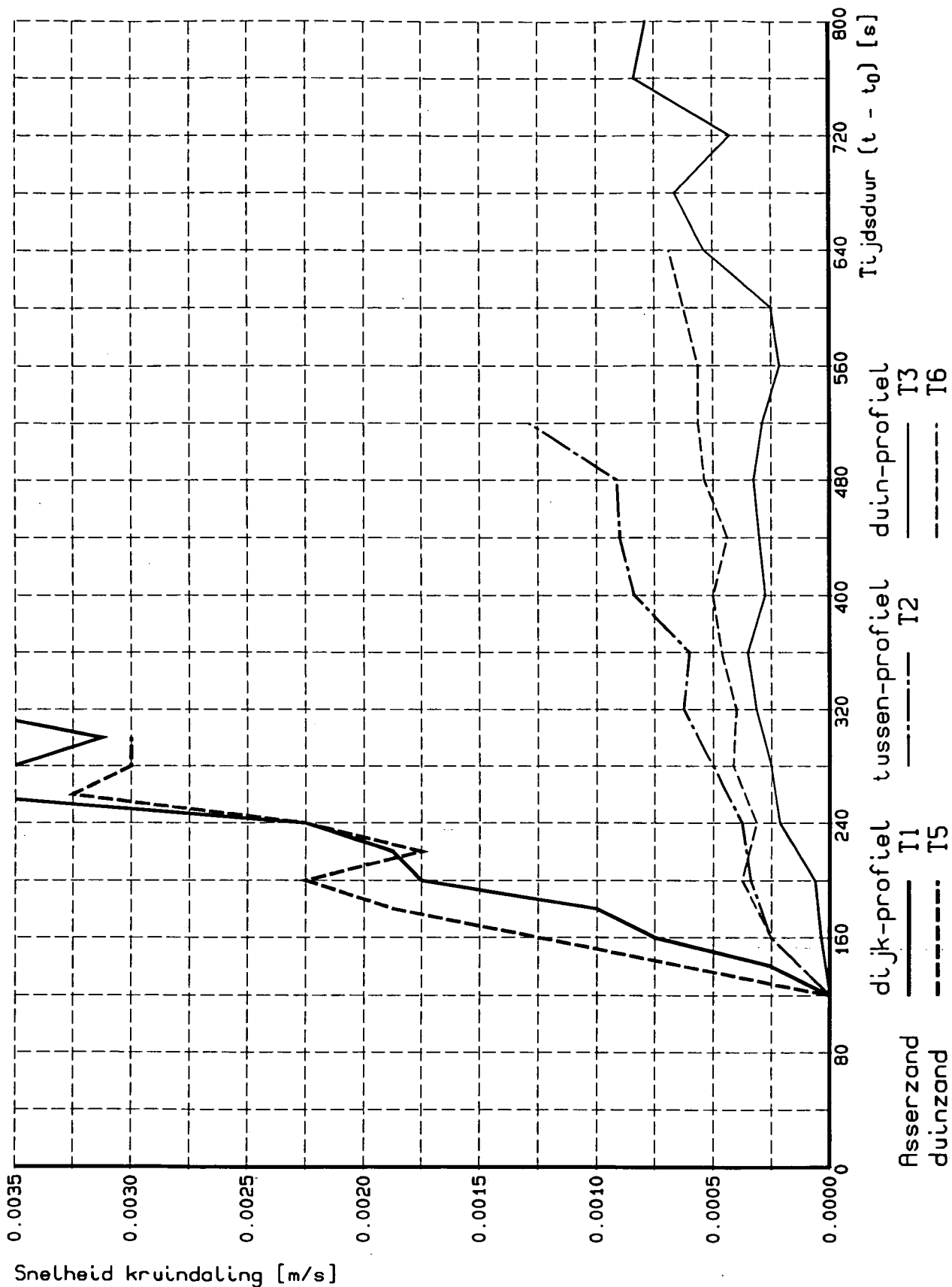
INVLOED-VOORLANDHELLING
Vergelijking ontw. kruinniveau

T1/2/3/5/6

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

H1242-II

FIG.7.3.2



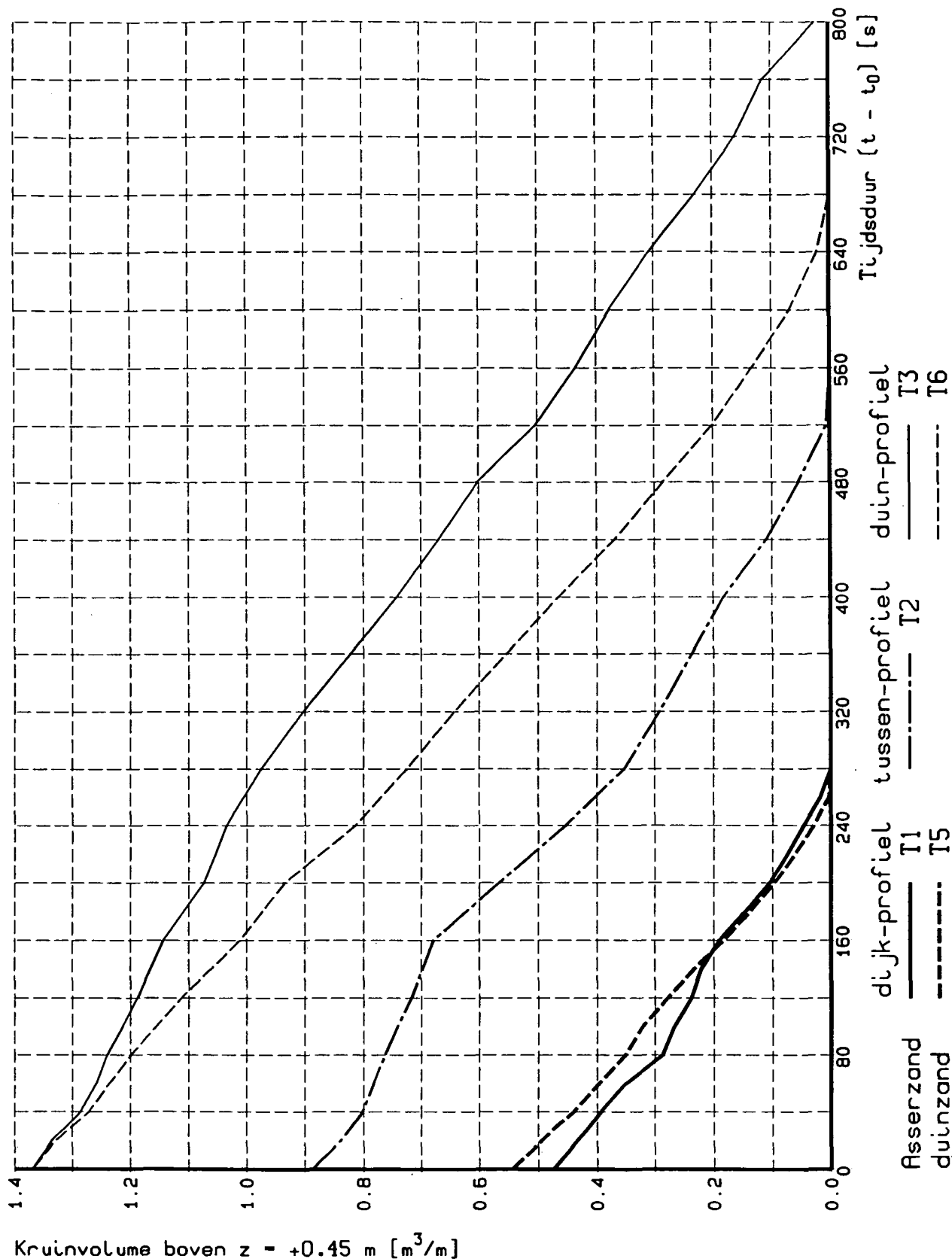
INVLOED VOORLANDHELLING
 Vergelijking snelheid kruindaling

T1/2/3/5/6

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

H1242-II

FIG.7.3.3



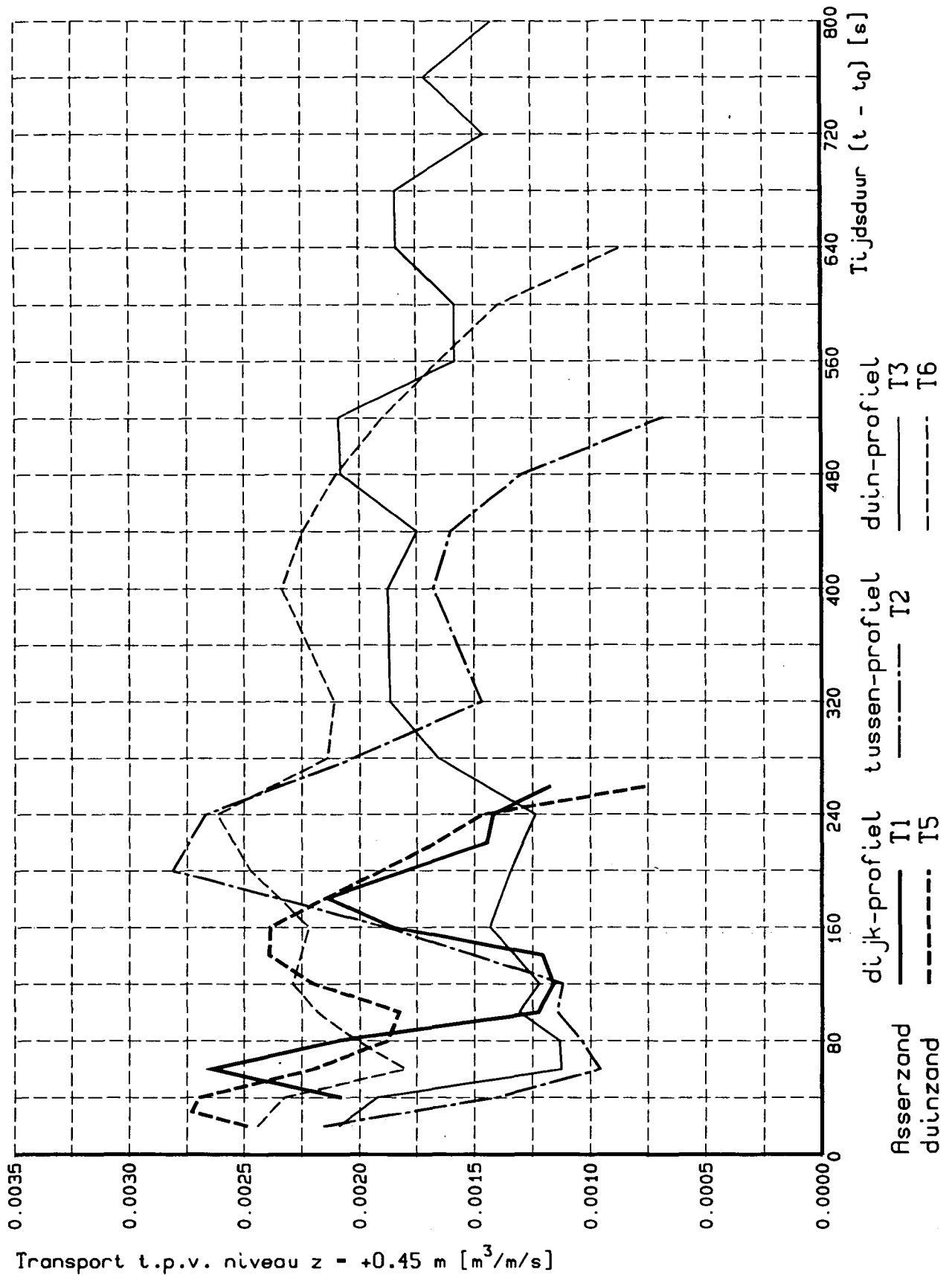
INVLOED VOORLANDHELLING
Vergelijking ontw. kruinvolume

T1/2/3/5/6

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

H1242-II

FIG.7.3.4



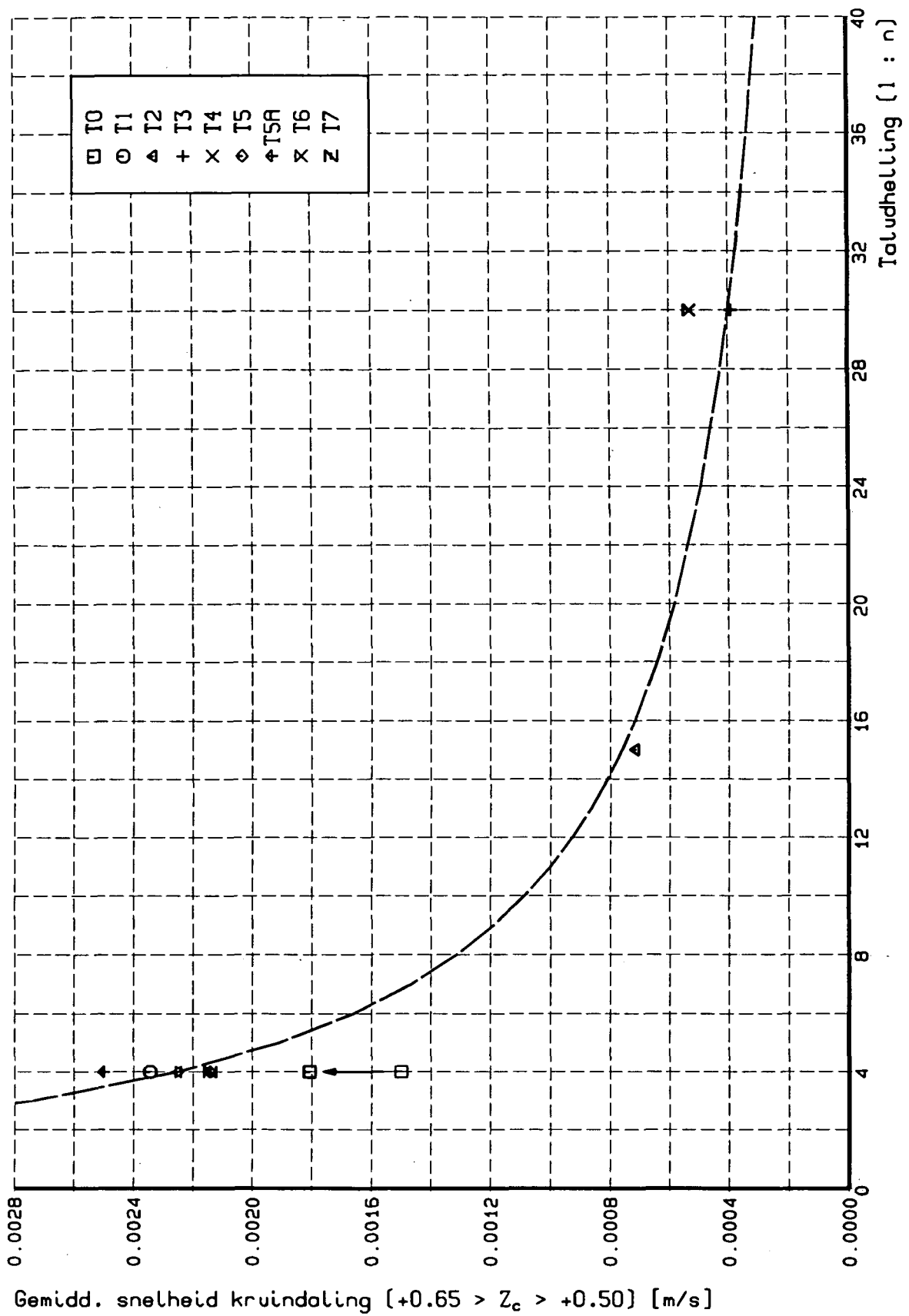
INVLOED VOORLANDHELLING
Vergelijking ontw. transport

T1/2/3/5/6

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

H1242-II

FIG.7.3.5



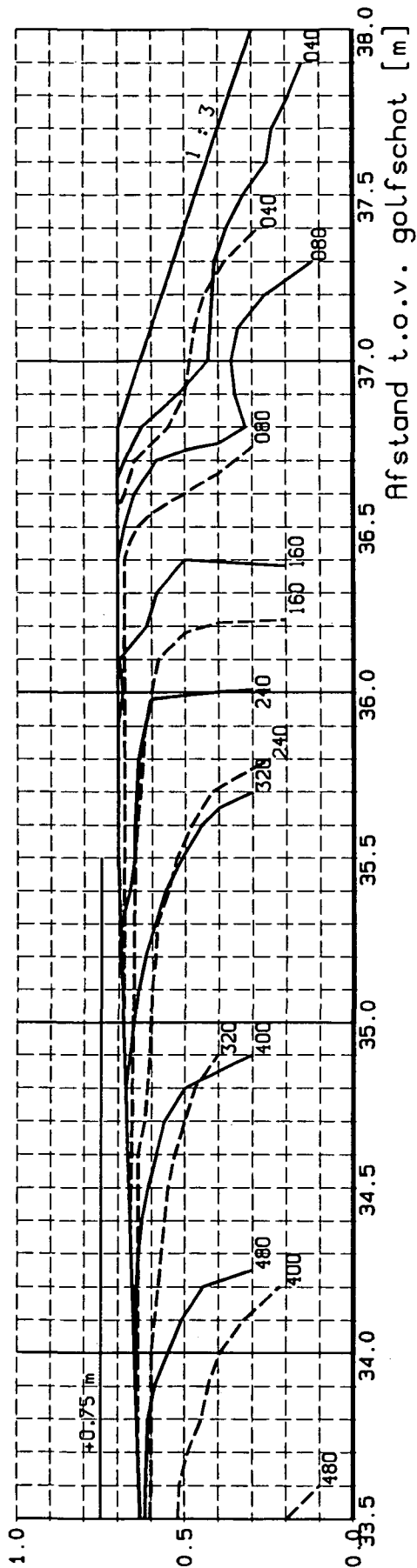
INVLOED VOORLANDHELLING
 Vergelijking snelheid kruindaling

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

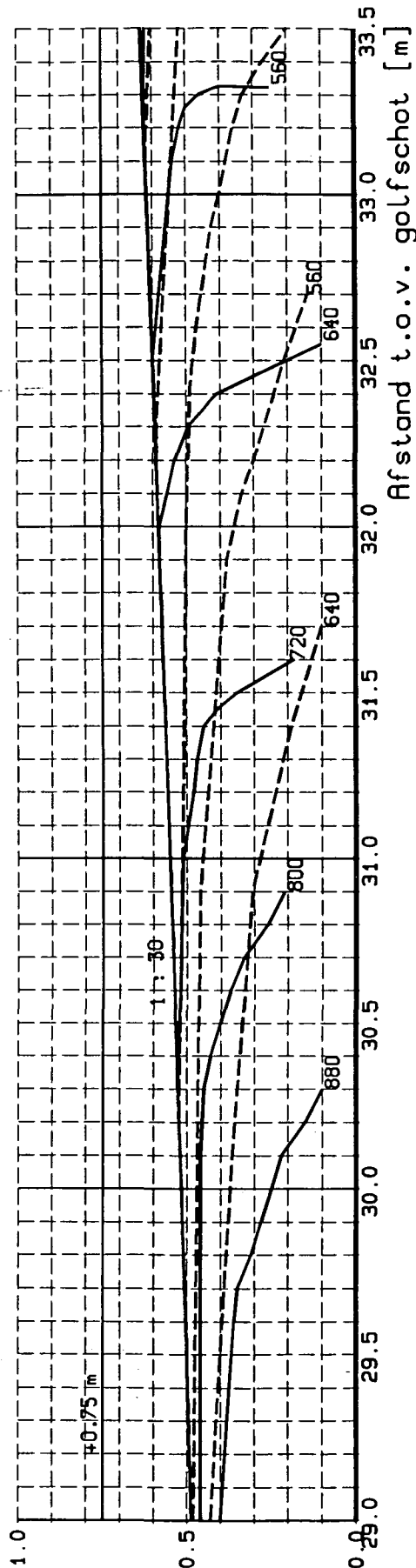
H1242-II

FIG.7.3.6

Niveau t.o.v. gootbodem [m]



Niveau t.o.v. gootbodem [m]



— Proef T3
 - - - Proef T4 (golfaanval)

INVLOED GOLFAANVAL
 Vergelijking dwarsprofielen

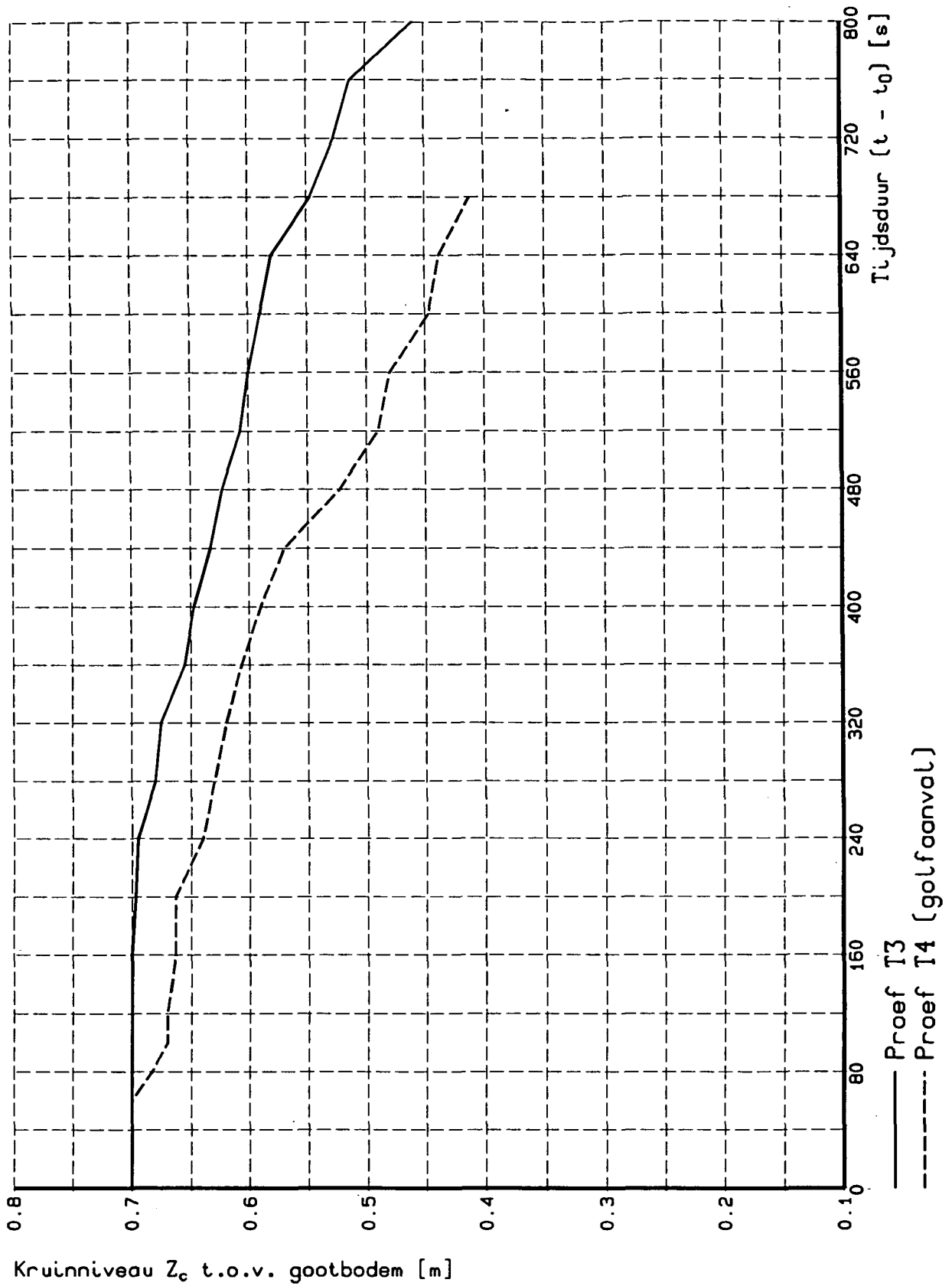
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

T3 en T4

Schaal 1 : 20

H1242-II

FIG.7.4.1



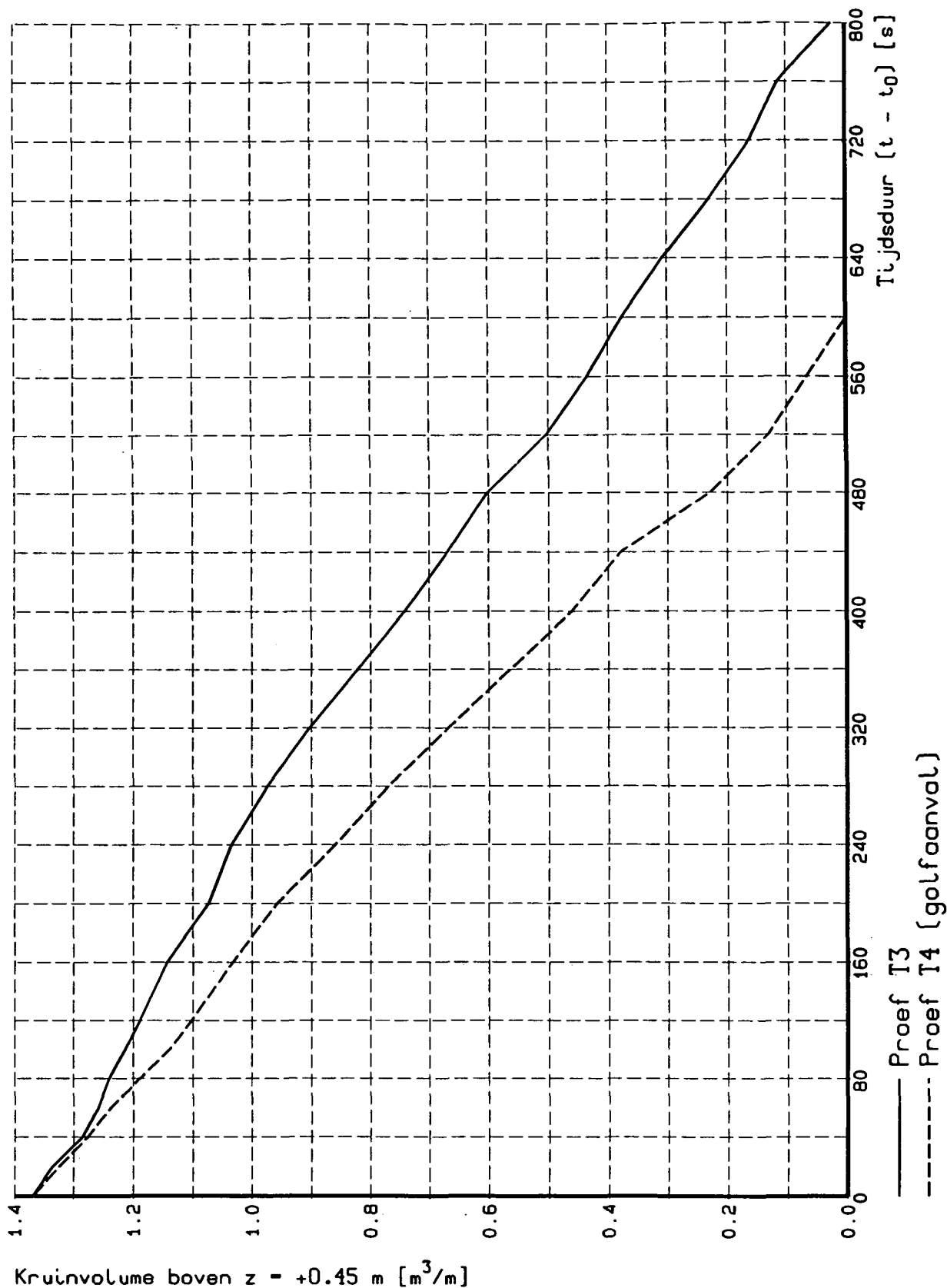
INVLOED GOLFAANVAL
Vergelijking ontw. kruinniveau

T3 en T4

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

H1242-II

FIG.7.4.2



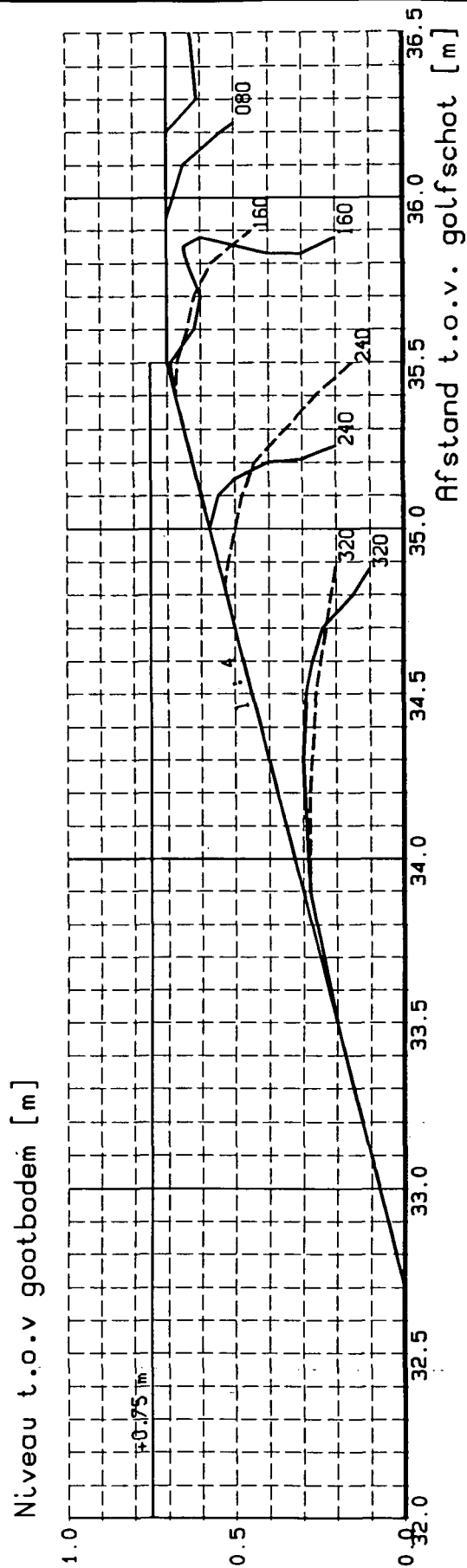
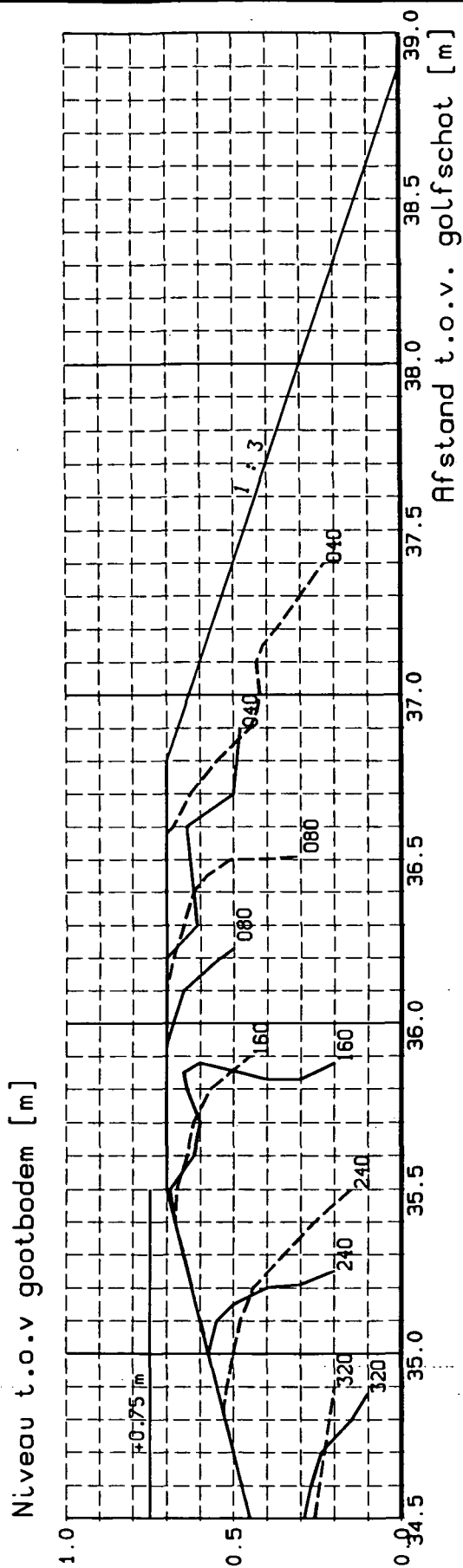
INVLOED GOLFAANVAL
 Vergelijking ontw. kruinvolume

T3 en T4

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

H1242-II

FIG.7.4.3



— Proef T1 (Asserzand)
 - - - Proef T5 (duinzand)

INVLOED KORRELDIAMETER
 Vergelijking dijk-dwarsprofielen

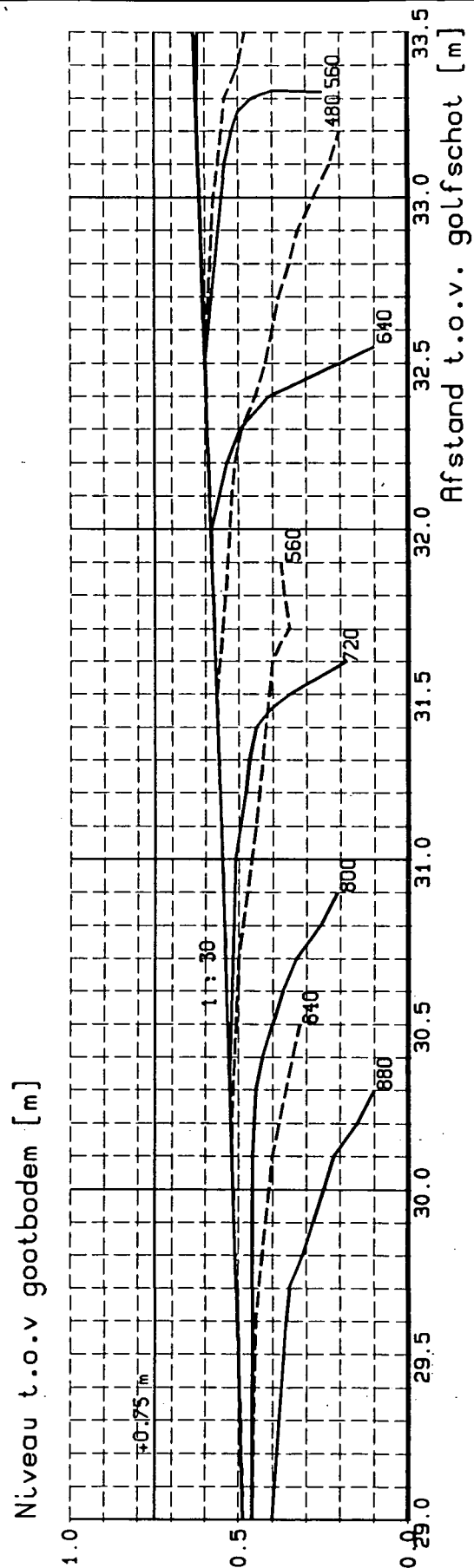
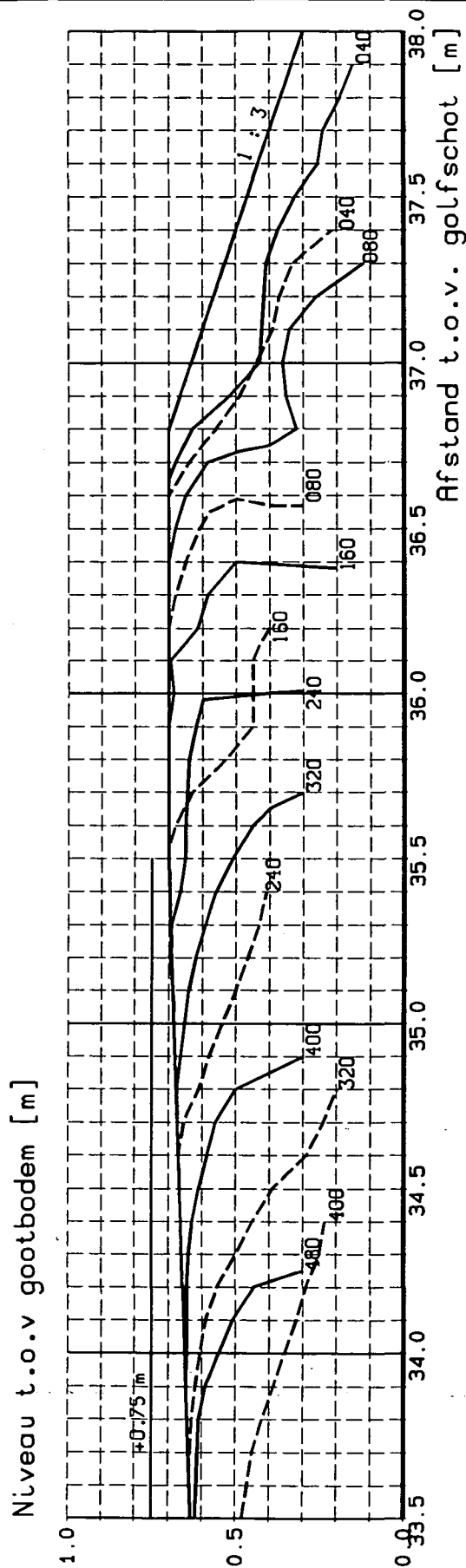
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

T1 en T5

Schaal 1 : 20

H1242-II

FIG.7.5.1



— Proef T3 (Assezand)
 - - - Proef T6 (duinzand)

INVLOED KORRELDIAMETER
 Vergelijking duin-dwarsprofielen

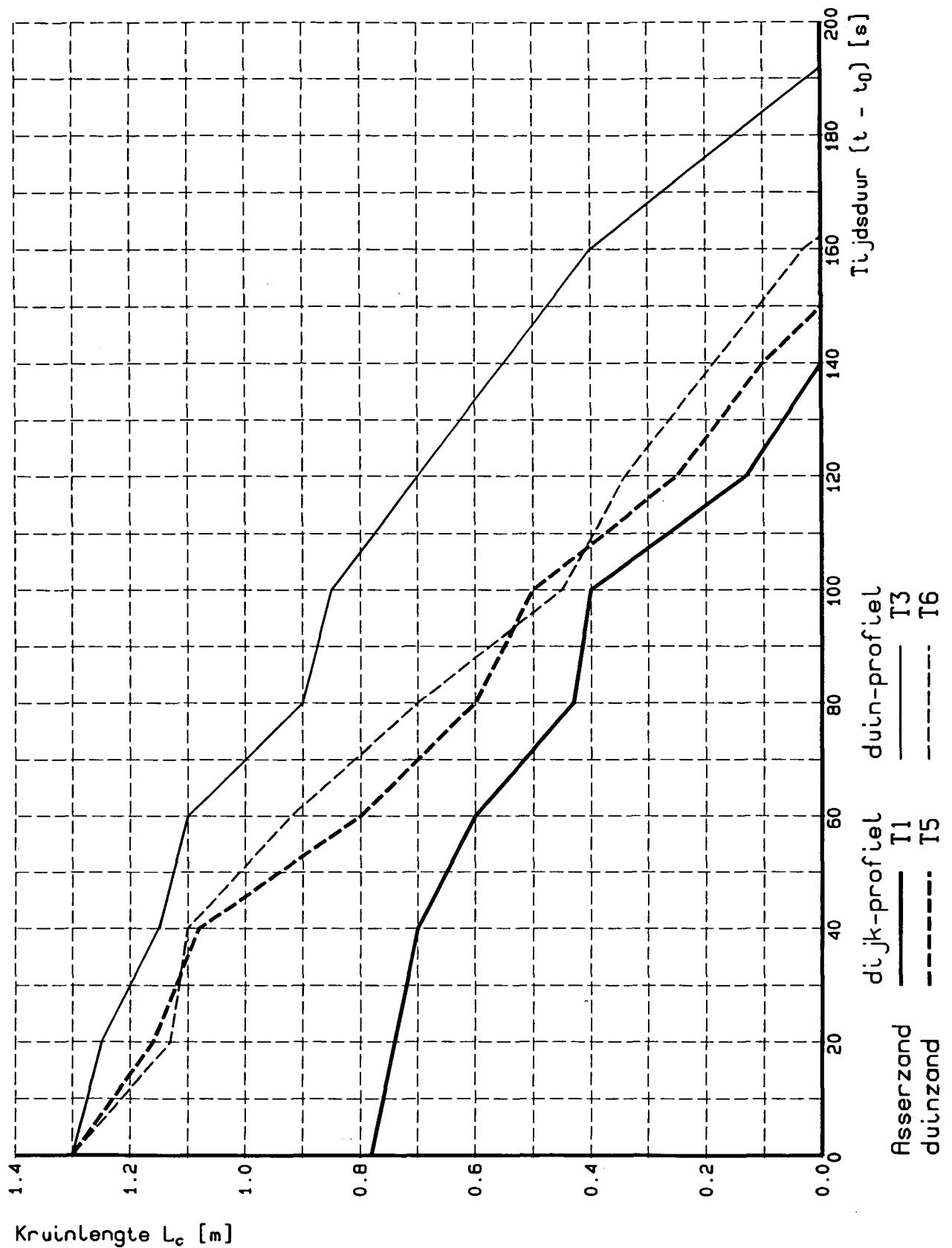
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM.

T3 en T6

Schaal 1 : 20

H1242-II

FIG.7.5.2



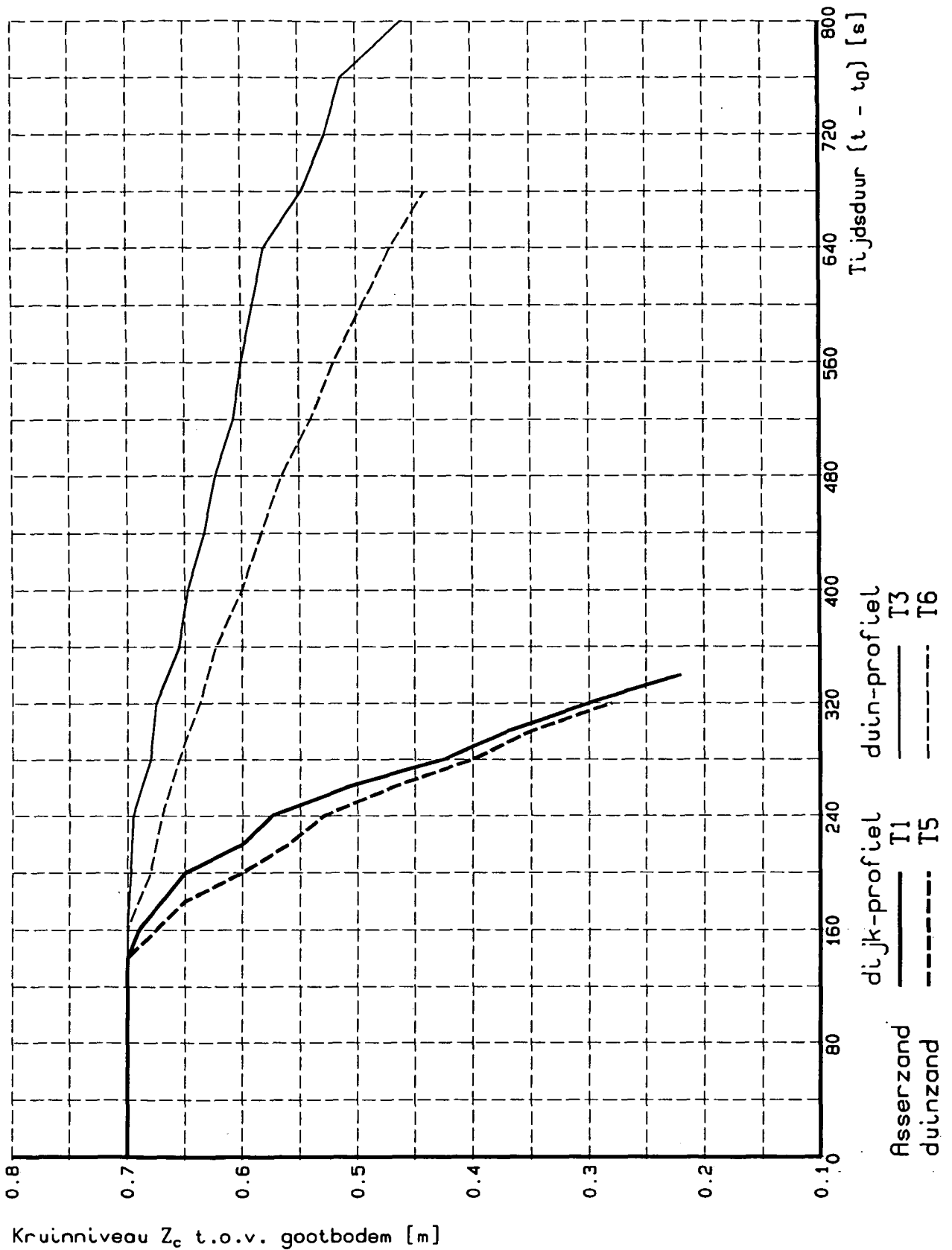
INVLOED KORRELDIAMETER
 Vergelijking ontw. kruijlengte

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

T1/3, T5/6

H1242-II

FIG.7.5.3



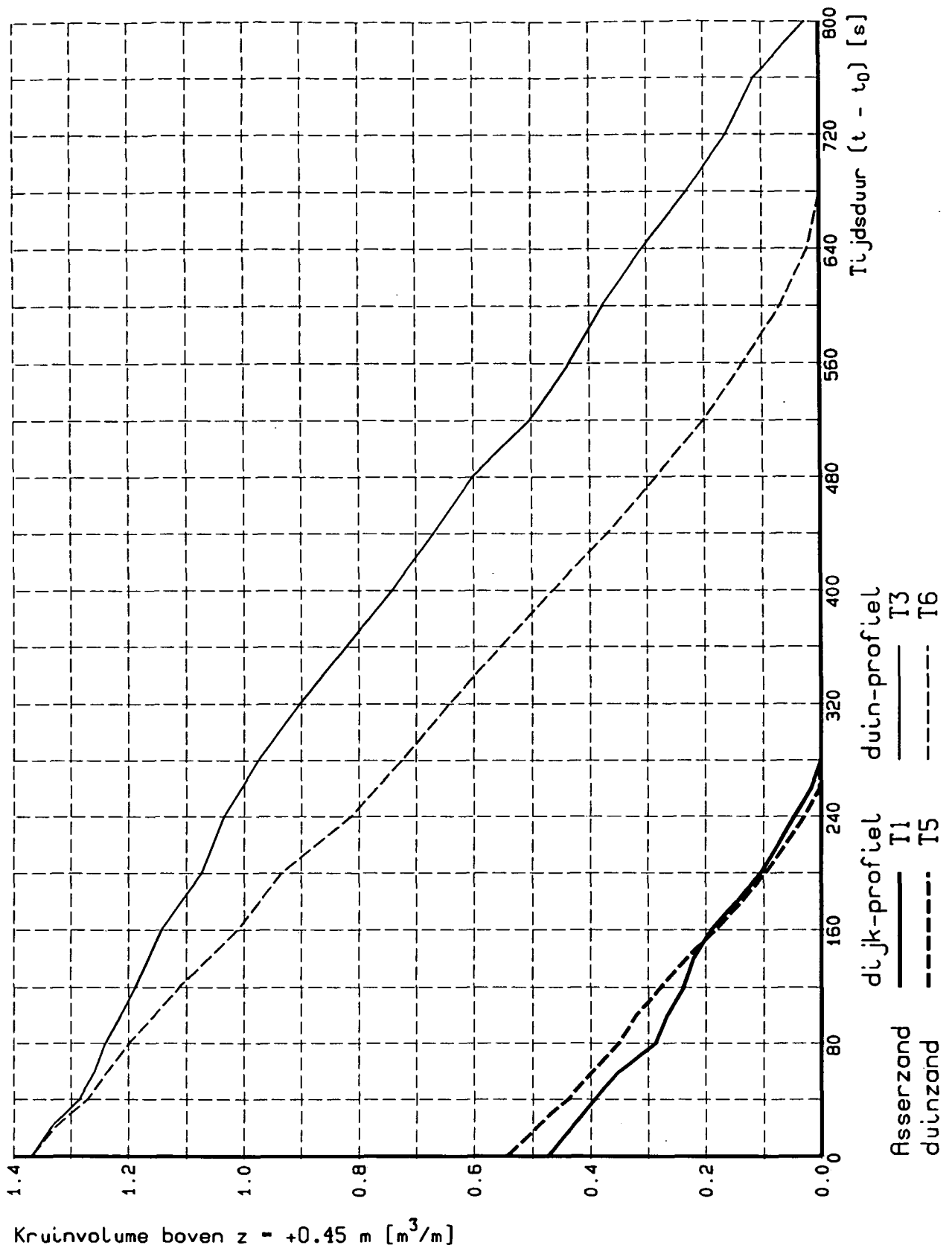
INVLOED KORRELDIAMETER
 Vergelijking ontw. kruinniveau

T1/3 T5/6

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

H1242-II

FIG.7.5.4



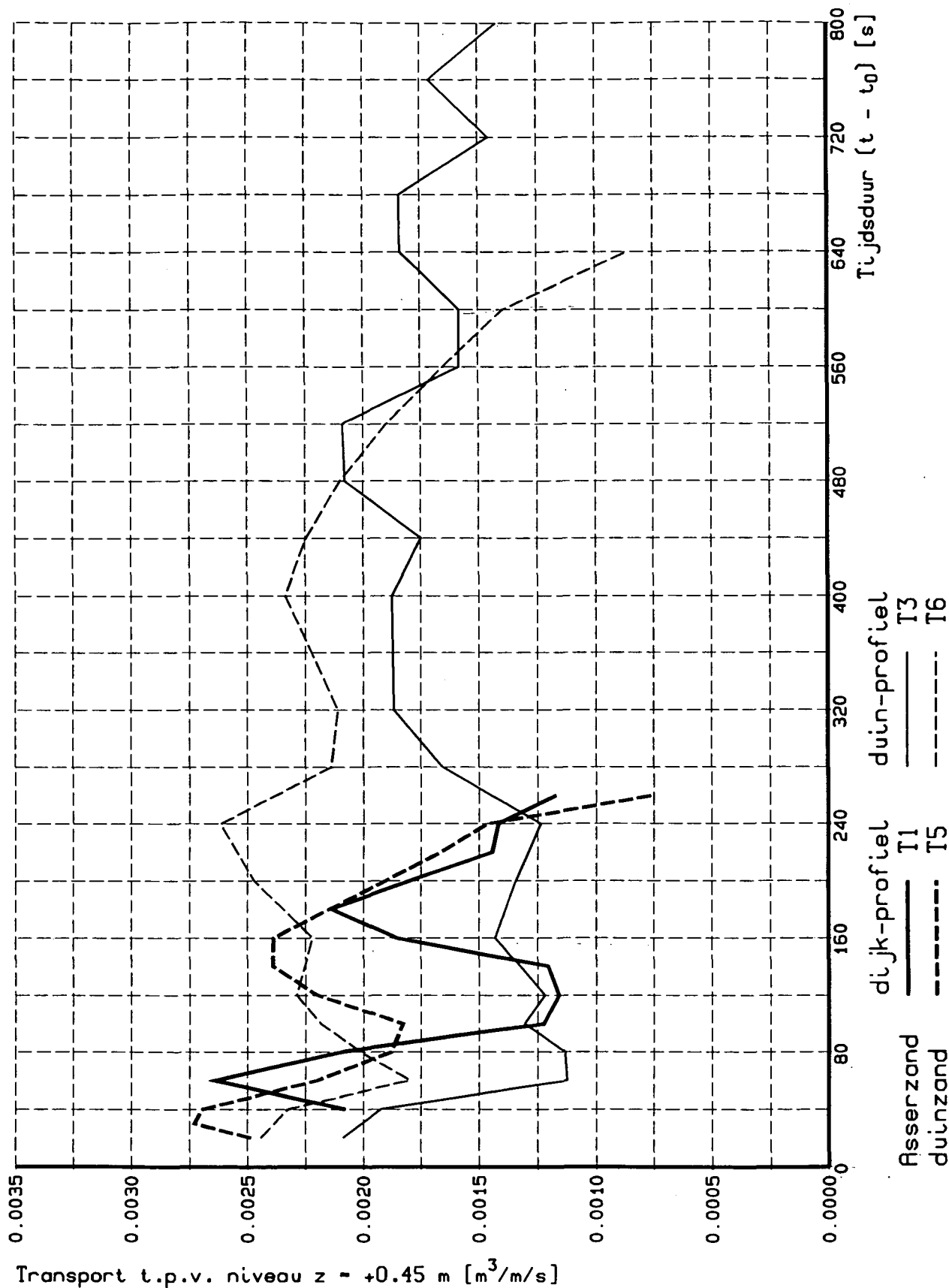
INVLOED KORRELDIAMETER
Vergelijking ontw. kruinvolume

T1/3 T5/6

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

H1242-II

FIG.7.5.5



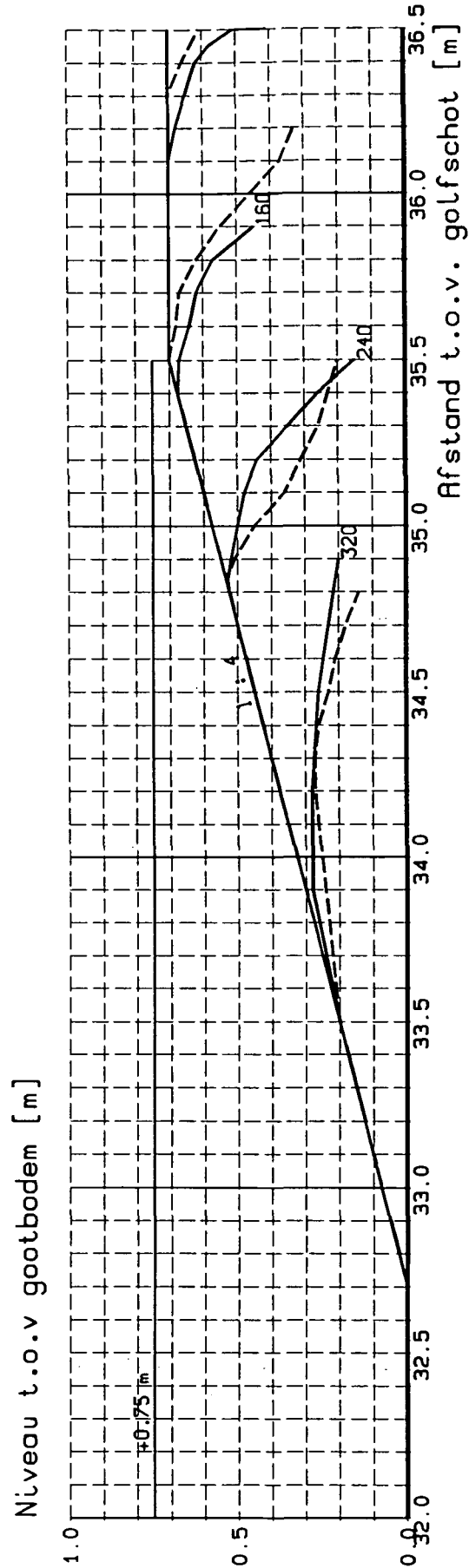
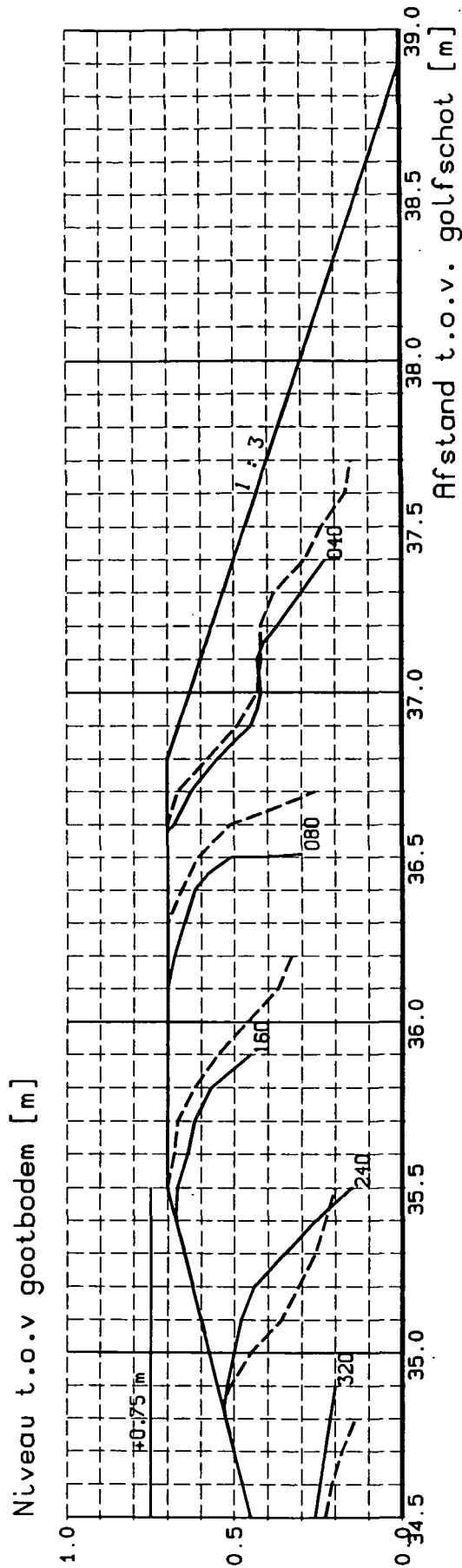
INVLOED KORRELDIAMETER
Vergelijking ontw. transport

T1/3 T5/6

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

H1242-II

FIG.7.5.6



— Proef T5
 - - - - Proef I7 (losse pakking)

INVLOED PAKKINGSDICHTHEID
 Vergelijking dwarsprofielen

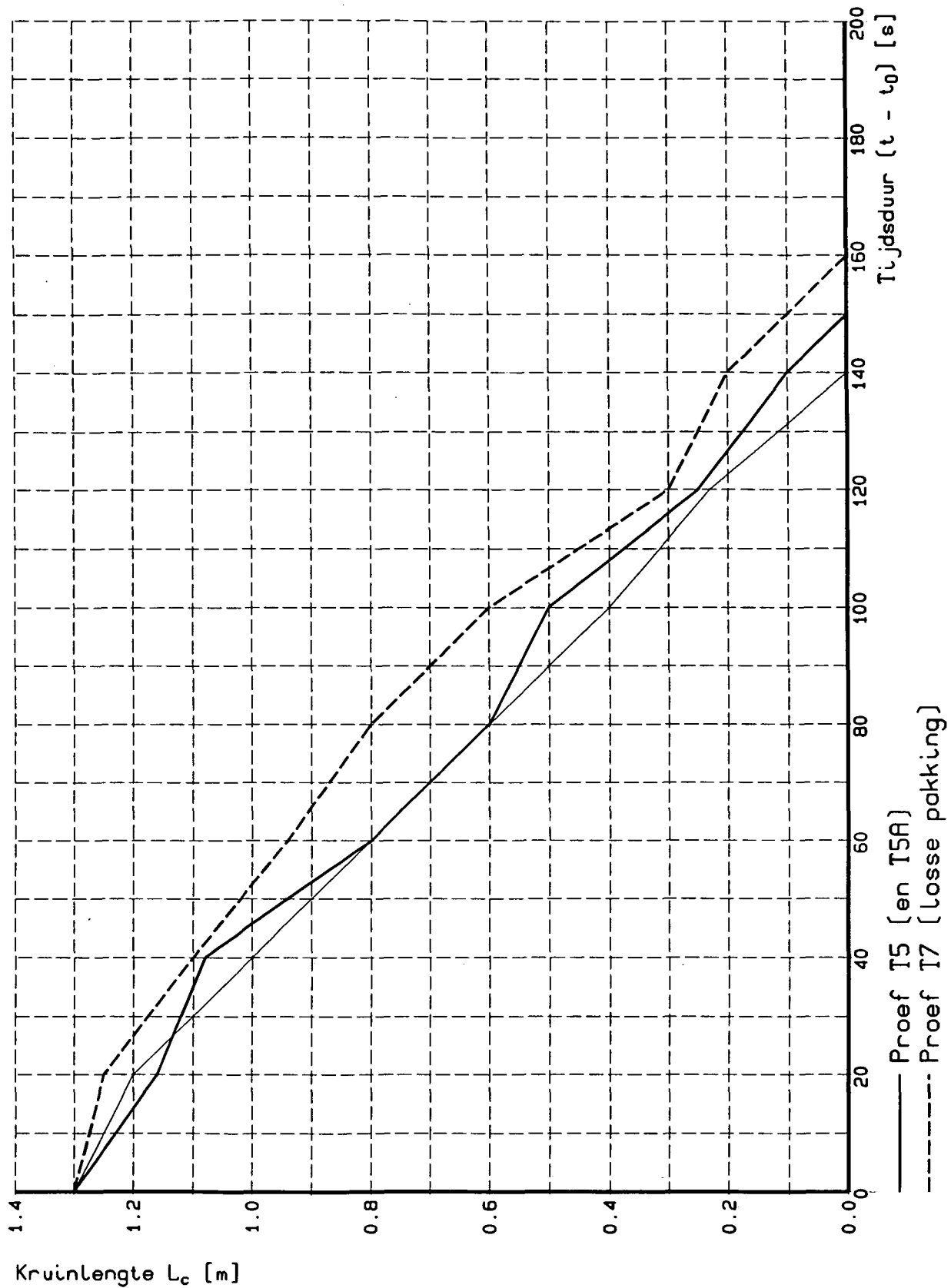
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

T5 en I7

Schaal 1 : 20

H1242-II

FIG.7.6.1



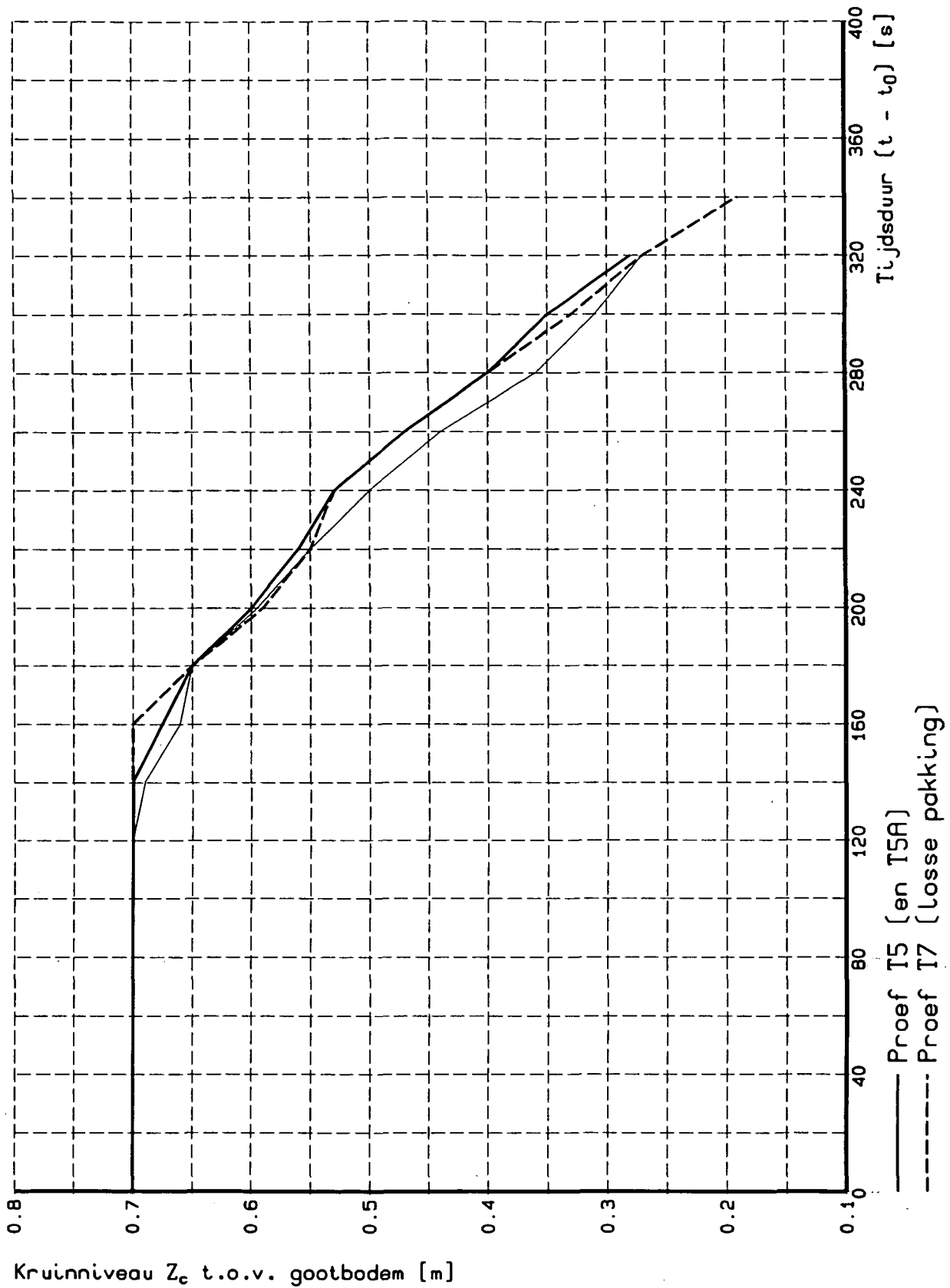
INVLOED PAKKINGSDICHTHEID
 Vergelijking ontw. kruinlengte

T5 en T7

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

H1242-II

FIG.7.6.2



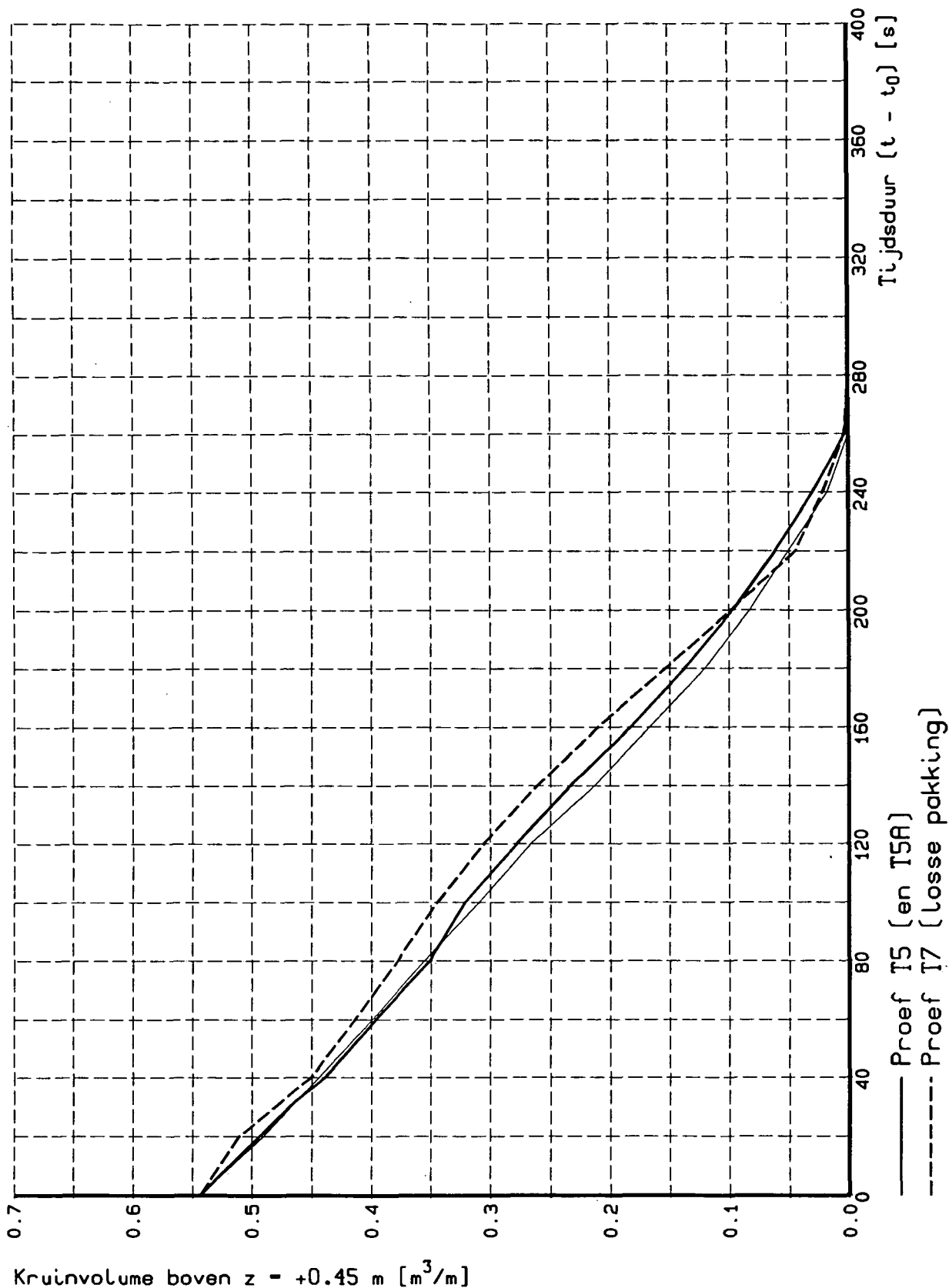
INVLOED PAKKINGSDICHTHEID
 Vergelijking ontw. kruinniveau

T5 en T7

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

H1242-II

FIG.7.6.3



INVLOED PAKKINGSDICHTHEID
 Vergelijking ontw. kruinvolume

T5 en T7

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM.

H1242-II

FIG.7.6.4

8 Conclusies en aanbevelingen

8.1 Samenvatting conclusies onderzoek

Kort samengevat kunnen de voornaamste conclusies van dit onderzoek als volgt worden weergegeven:

- Het onderzoek levert een grote hoeveelheid zeer bruikbare verificatie data op;
- De grootte van het kruindebiet kan goed worden bepaald door simultane meting van snelheden en waterstanden in de aanstroomraaien;
- De uitvoering van proeven naar bresgroei is in de gebruikte testopstelling een goed reproduceerbaar proces;
- Het wrijvingsverlies op (de kruin en) het voorland (met name bij flauwere taluds) heeft via het debiet een effect op de tijdsduur welke nodig is om het achtertalud te versteilen;
- De maximale helling van het binnentalud, bij nog aanliggende afstroming, bedraagt ongeveer 45°;
- Het wrijvingsverlies op de kruin en het voorland (met name bij flauwere taluds) speelt een belangrijke rol bij de snelheid waarmee de kruinlengte afneemt;
- De snelheid waarmee de kruinlengte afneemt, neemt in de tijd toe;
- Een flauw hellend voorland heeft een duidelijk remmend effect op de bresgroei, waarbij een dijk-profiel ca. 5 maal sneller erodeert dan een duinafslagprofiel;
- Het volumetrische effect is hierbij van overheersend belang;
- Tijdens de erosie van de kruin treden zeer hoge snelheden op (tot 2,5 à 3,5 m/s in het model en derhalve tot zelfs 8 à 11 m/s in het prototype);
- Golfaanval heeft een duidelijk versnellende invloed op het erosieproces, waarbij de erosiesnelheid ca. 35% hoger is;
- Bij fijner zand is er soms sprake van zeer steile binnentaluds;
- Grover duinzand met een relatief dichtere pakking vertoont in vergelijking het fijnere Asserzand een 20 à 25% hogere erosiesnelheid;
- De netto invloed van de pakkingsdichtheid op het transport (uitgedrukt in 'in situ' volume) is minimaal.

8.2 Aanbevelingen m.b.t. mathematisch model

Door het toevoegen van wrijvingsverlies (verhanglijnen) in het rekenmodel kan dit effect worden meegenomen in de berekening van de aanstroomdebieten.

Als eerste toets voor de waterbewegingsmodule, dient een vergelijking gemaakt te worden tussen gemeten en berekende debieten waarbij wordt uitgegaan van een momentaan aanwezig dwarsprofiel en de waterstand in raai A.

Vervolgens moet de aandacht worden gericht op de berekening van het in paragraaf 6.8 beschreven transportverloop over het (evenwichts-)binnentalud.

Hiertoe dient nader onderzoek naar de te gebruiken transportformulering te worden uitgevoerd (gedeeltelijk als onderdeel van rapport H1242, deel I). De optredende snelheden overtreffen (zeker in het prototype; tot ca. 10 m/s) de (2 à 3 m/s)-grens tot waar gangbare transportformules toepasbaar zijn!

Vervolgens kunnen de berekende profielontwikkelingen worden vergeleken met de gemeten waarden, waarbij met name gekeken moet worden naar de relatieve effecten van de in dit onderzoek gevarieerde parameters.

Voor nadere gegevens en uitwerkingen kan worden verwezen naar deel I van dit rapport.

Literatuur

- Dieteren, J.M.L. en P.H. Pottinga, 1988. Stroomgatontwikkeling tijdens een dijkdoorbraak, Afstudeerscriptie, Vakgroep Waterbouwkunde, Faculteit der Civiele Techniek, Technische Universiteit Delft, juni 1988.
- Looff, A.P. de, 1989. Bresgroei in een zanddijk, feitenverslag van een proef, Rapport WBA-R-90.041 C1 90.01, Dienst Weg- en Waterbouwkunde, Afdeling advisering waterbouw, februari 1989.
- Steetzel, H.J., 1988. Bezwijkmechanisme duinen; de ontwikkeling van het duinprofiel tijdens de grensconditie, de wijze van doorbraak en de gevolgen, Waterloopkundig Laboratorium, verslag onderzoek H298, deel 7, december 1988.
- Steetzel, H.J., 1991. Bresgroei en inundatiedebiet; Aanzet onderzoek bresgroei t.b.v. TAW-C, Waterloopkundig Laboratorium, notitie H1242, januari 1991.
- Steetzel, H.J., 1991. Profile development of dunes due to overtopping, overwash and overflow, Abstract ICCE'92, Venice, Italy, August 1991.
- Visser, P.J., J.S. Ribberink en J.P.Th. Kalkwijk, 1986. Ontwikkeling stroomgat en debiet bij dijkdoorbraak; deelstudie voor een Pomp Accumulatie Centrale, Rapport nr. 8-86, Vakgroep Waterbouwkunde, Faculteit der Civiele Techniek, Technische Universiteit Delft, november 1986.
- Visser, P.J., 1988. A model for breach growth in a dike-burst. Proc. 21st Int. Conf. on Coastal Eng. Malaga, Spain, pp. 1897-1910.
- Visser, P.J., J.K. Vrijling and H.J. Verhagen, 1990. A field experiment on breach growth in sand-dikes. Proc. 22nd Int. Conf. on Coastal Eng. Delft, the Netherlands, pp. 2087-2100.
- Visser, P.J. en H.J. Steetzel, 1992. Bresgroei; 2DV-ontwikkeling initiële bres; Analytisch model, Waterloopkundig Laboratorium, onderzoek H1242, deel II, band B.
- Voogt, L., L.C. van Rijn and J.H. van den Berg, 1991. Sediment transport of fine sands at high velocities. Journal of Hydraulic Engineering, Vol. 117, No. 7, pp. 869-890.
- Waterloopkundig Laboratorium. Valsnelheid van zand in zeewater van 5° C, notitie t.b.v. de toepassing van het rekenmodel voor duinafslag, verslag onderzoek H1263, deel IV^b, september 1983.
- Waterloopkundig Laboratorium. Modelonderzoek duinvoetverdedigingen, systematisch onderzoek naar de werking van duinvoetverdedigingen; modelonderzoek op grote schaal. verslag modelonderzoek H298, deel I, december 1987.
- Waterloopkundig Laboratorium. Processing of time series on IBM-PC and compatibles. User's manual, oktober 1991.

• locatie 'De Voorst'

• hoofdkantoor

hoofdkantoor
Rotterdamseweg 185
postbus 177
2600 MH Delft
telefoon (015) 56 93 53
telefax (015) 61 96 74
telex 38176 hydel-nl

locatie 'De Voorst'
Voorsterweg 28, Marknesse
postbus 152
8300 AD Emmeloord
telefoon (05274) 29 22
telefax (05274) 35 73
telex 42290 hylvo-nl

Noordzee

• Amsterdam

• Londen

Brussel •