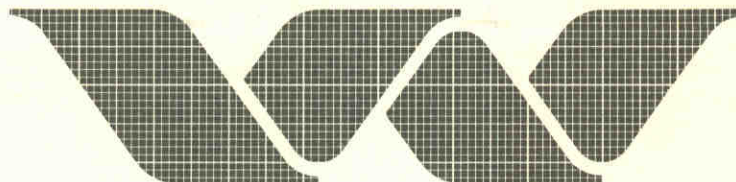


Q 520



02.DEC.1987

BIBLIOTHEEK
Waterloopkundig Laboratorium
Postbus 177 - DELFT

waterloopkundig laboratorium
delft hydraulics laboratory

ARCHIEF

AFGEHANDELD

stormvloedkering Oosterschelde

gevoeligheidsonderzoek naar de stabiliteit
van de toplaag van de overgangskonstructie
aan de zeezijde

verslag modelonderzoek

Q 520

augustus 1987

Q0520

stormvloedkering Oosterschelde

gevoeligheidsonderzoek naar de stabiliteit
van de toplaag van de overgangskonstructie
aan de zeezijde

verslag modelonderzoek

Q 520

augustus 1987

INHOUD

	blz.
1. <u>Inleiding</u>	1
2. <u>Samenvatting en konklusies</u>	2
3. <u>Opzet van het modelonderzoek</u>	6
4. <u>Meetresultaten</u>	8
5. <u>Analyse</u>	15
5.1 Inleiding.....	15
5.2 Schade-vervalrelatie bij een open kering.....	15
5.3 Stabiliteit bij gedeeltelijk gesloten schuiven.....	26
5.4 Vergelijking met het onderzoek Q 520.10 in het detailmodel Oosterschelde.....	28
6. <u>Aanbevelingen voor verder onderzoek</u>	31

LITERATUUR

TABELLEN

FIGUREN

FOTO'S

BIJLAGE

Afleiding van de formule voor het kritieke debiet

TABELLEN

- 1 Programma van de schadeproeven
- 2 Programma van de proeven waarin stroomsnelheden zijn gemeten
- 3 Karakteristieken van de steensorteringen
- 4 Vervallen en benedenwaterstanden
- 5 Schade, totaal aantal verplaatste stenen van de overgangskonstruktie
- 6 Het verval bij begin van bewegen en bij het bezwijken van de toplaag
- 7 Stroomsnelheden T43.3
- 8 Stroomsnelheden T43.4
- 9 Stroomsnelheden T43.4
- 10 Stroomsnelheden T43.5
- 11 Stroomsnelheden T43.5
- 12 Stroomsnelheden T43.5
- 13 Het verval, waarbij de bovenbalk geraakt wordt, bij één bepaalde benedenwaterstand
- 14 Korrektie schade T1, T4
- 15 Korrektie schade T2
- 16 Korrektie schade T6
- 17 Korrektie schade T7
- 18 Korrektie schade T8
- 19 Korrektie schade T9
- 20 Korrektie schade T10
- 21 Korrektie schade T11
- 22 Korrektie schade T13
- 23 Korrektie schade T15
- 24 Korrektie schade T16
- 25 Korrektie schade T18
- 26 Korrektie schade T20
- 27 Korrektie schade T21
- 28 Korrektie schade T35
- 29 Korrektie schade T36
- 30 Korrektie schade T37
- 31 Korrektie schade T38

FIGUREN

- 1 Zijaanzicht modelopstelling
- 2 Stroomsnelheidsprofielen T43
- 3 Stroomsnelheidsprofielen T43
- 4 Stroomsnelheidsprofielen T43
- 5 Stroomsnelheidsprofielen T44, T45
- 6 Stroomsnelheidsprofielen T46, T47
- 7 Schade-duurlijn T3, T4 en T28
- 8 Het bezwijkverval als functie van de tijdsduur
- 9 Schadetoename-verval, variatie benedenwaterstand, T10 - T11
- 10 Schadetoename-verval, variatie benedenwaterstand, T8 - T9
- 11 Schadetoename-verval, variatie benedenwaterstand, T6 - T7
- 12 Reproductie schadetoename-verval, open kering
- 13 Reproductie schadetoename-verval, bij 33% en 50% gesloten schuif
- 14 Schadetoename-verval, variatie bodemligging overgangskonstruktie
- 15 Schadetoename-verval, bij bodemligging R25, R26
- 16 Schadetoename-verval, invloed onderlaag
- 17 Schadetoename-verval, variatie steensortering
- 18 Schadetoename-verval, variatie steensortering
- 19 Schadetoename-verval, invloed dorpelafstap, T35 - T36
- 20 Schadetoename-verval, invloed dorpelafstap, T37 - T38
- 21 Schadetoename-verval, invloed vellingkant van dorpelbalk
- 22 De plaats van schade op de overgangskonstruktie
- 23 Afvoercoëfficiënt als functie van het verval bij open poortje
- 24 Afvoercoëfficiënt als functie van sluitingspercentage van de schuif
- 25 Δh_{cr} als functie van d/h bij open poortje
- 26 Toelaatbaar verval als functie van sluitingspercentage van de schuif
- 27 Omslaan van het stroombeeld

Foto's

- 1 Schade T4, open poortje, dorpelbalk op NAP-8,5 m
- 2 Schade T11, open poortje, dorpelbalk op NAP-5,5 m
- 3 Schade T35, open poortje, dorpelafstap
- 4 Schade T39, gedeeltelijk gesloten poortje, dorpelbalk op NAP-8,5 m

SYMBOLLEN

A	doorstroomoppervlak	m ²
c	constante	-
D ₁₀ , D ₅₀ , D ₉₀	steendiameter waarbij 10, respektievelijk 50 en 90% van de stenen een kleinere diameter heeft	m
D _n	nominale steendiameter gebaseerd op een kubus	m
d	hoogte van de drempel ten opzichte van de benedenstroomse bodem	m
G	steengewicht waarbij 50% van de stenen lichter is	kg
g	versnelling zwaartekracht	ms ⁻²
h	waterdiepte benedenstrooms	m
h _{ben}	benedenwaterstand	m
Δh	verval	m
Δh _{cr}	kritiek verval waarbij het begin van schade optreedt	m
L	afstand die gemiddeld door een steen wordt afgelegd	m
m	aantal verplaatste stenen per eenheid van lengte (loodrecht op de stroomrichting) en per eenheid van tijd	m ⁻¹ s ⁻¹
M ₅₀	massa die door 50% van de stenen wordt overschreden	kg
n	aantal verplaatste stenen per eenheid van oppervlakte en per eenheid van tijd, schaalfactor	m ⁻² s ⁻¹ -
N	bewegingsgraad	-
q _{cr}	kritiek debiet per eenheid van breedte	m ² s ⁻¹
q _s	het getransporteerde volume materiaal per eenheid van tijd en door een denkbeeldige doorsnede die loodrecht op de stroomrichting 1 m lang is	m ² s ⁻¹
r	relatieve turbulentie intensiteit	-
u _*	schuifspanningssnelheid	ms ⁻¹
Q	debiet	m ³ s ⁻¹
u	stroomsnelheid	ms ⁻¹
u'	standaardafwijking van het stroomsnelheidssignaal	ms ⁻¹
Δ	relatieve dichtheid ($\rho_s - \rho_w$)/ ρ_w	-
ρ _w	dichtheid water	kg m ⁻³
ρ _s	dichtheid steen	kg m ⁻³
μ	afvoercoëfficiënt	-
ψ	schuifspanningsparameter	-
τ	schuifspanning	Nm ⁻²
φ	transportparameter	-

1. Inleiding

Na een eerste analyse van de meetresultaten van het modelonderzoek Q 455 [3] in de stroomgeul Roompot van het detailmodel Oosterschelde naar de invloed van een beperkt aantal gesloten schuiven in de laatste bouwfases en de eindfase op de stabiliteit van de toplaag van de overgangskonstructie aan de zeezijde zijn enkele onzekerheden over deze stabiliteit blijven bestaan. Ter vergroting van het inzicht in deze stabiliteit is een gevoeligheidsonderzoek naar de omstandigheden, die de stabiliteit van de toplaag van de overgangskonstructie en van de drempel beïnvloeden, in de Tussenpadgoot van het laboratorium uitgevoerd. Ten behoeve van een spoedige start van het onderzoek is mondeling opdracht verleend het onderzoek uit te voeren. De schriftelijke opdracht is per brief met kenmerk WT 397 d.d. 27 november 1986 van Rijkswaterstaat, Directie Zeeland, Afwikkelingsbureau Oosterscheldewerken ontvangen. Voor de uitbreiding van het proevenprogramma is per brief met kenmerk WT 427 d.d. 10 december 1986 opdracht verleend.

De analyse van de meetresultaten is op de volgende aspecten gericht:

- de invloed van verschillende omstandigheden op de schade-vervalrelatie,
- een vergelijking van de resultaten van het modelonderzoek in het detailmodel Oosterschelde (Q 455) met de resultaten van het onderzoek in de Tussenpadgoot,
- het kritieke verval bij gedeeltelijk gesloten schuiven in diepe en ondiepe poortjes.

Het gevoeligheidsonderzoek is in de periode augustus en september 1986 onder leiding van ir. M. van der Wal uitgevoerd.

Namens de opdrachtgever hebben ir. J.A. Hernandez van Rijkswaterstaat, Dienst Weg- en Waterbouwkunde en ir. J.L.M. Konter van Rijkswaterstaat, Directie Bruggen, sectie Waterbouwspeurwerk het onderzoek begeleid. Het verslag van het onderzoek is door ir. M. van der Wal samengesteld.

2. Samenvatting en konklusies

Van de stormvloedkering Oosterschelde is een model van een pijler met aan weerskanten een half poortje in de Tussenpadgoot gebouwd, zodanig dat de gootwand samenvalt met een symmetrieas van de stroming door een poortje. Van een poortje zijn de drempel, de dorpelbalk en de bovenbalk, de schuif en de overgangskonstruktie aan de zeezijde op lengteschaal 60 weergegeven.

De schadeproeven zijn uitgevoerd door het eb-verval over de stormvloedkering in stapjes op te voeren. Bij sommige proeven is alleen het kritieke verval bij begin van bewegen bepaald, en bij andere proeven is het verval tot het bezwijken van de toplaag opgevoerd of tot dat de bovenwaterstand gelijk staat met de bovenkant van de bovenbalk. De schade is gemeten door het aantal verplaatste geverfde stenen na 1 à 1,5 uur prototype stromen te tellen.

Van de steensorteringen van de toplaag zijn de dichtheid, de nominale diameter en het stortgewicht per m² op schaal weergegeven. In enkele proeven zijn ter plaatse van de overgangskonstruktie stroomsnelheidsprofielen gemeten.

Waterbeweging

- Bij een open poortje is ter plaatse van de overgangskonstruktie een aan de zeezijde bodemneer aanwezig. Bij een bodemligging van de overgangskonstruktie op NAP-25 m gaat de hoofdstroom voorbij de benedenstroomse rand van de overgangskonstruktie weer aanliggen. Dat betekent dat op de overgangskonstruktie het begin van schade vrijwel overal gelijktijdig optreedt en dat de stenen door de grote turbulentie in de bodemneer zowel naar de as van de stormvloedkering als van deze as af worden verplaatst. Bij een ondiepere bodemligging verschuift het punt van aanliggen van de hoofdstroom naar de as van de stormvloedkering, zodat de hoofdstroom voor de benedenstroomse rand van de overgangskonstruktie weer aanligt.
- De afvoercoëfficiënt verandert weinig bij een verlaging van de benedenwaterstand en neemt weinig af bij een toename van het verval, indien de stroom de bovenbalk niet raakt. Nadat de stroom de bovenbalk heeft geraakt, neemt bij een toenemend verval de afvoercoëfficiënt langzaam af.
- Bij een poortje dat voor 25 à 33% gesloten is, treedt bij een benedenwaterstand van NAP + 0 m een stroombeeldomslag op: de bodemneer verdwijnt, de hoofdstroom duikt na de dorpelbalk en er ontstaat een dekneer. Bij een poortje dat voor 25 à 33% gesloten is, moet derhalve rekening worden gehou-

den met een aanzienlijke verlaging van het toelaatbare verval met betrekking tot de stabiliteit van de overgangskonstructie ten opzichte van het toelaatbare verval bij een geheel geopend poortje. Indien het poortje voor meer dan 60% gesloten is, treedt deze verlaging van het toelaatbare verval niet op omdat het debiet door het poortje dan sterk verminderd is.

- Tijdens een schadeproef met een open poortje wordt het verval in stapjes verhoogd. Bij een bepaald verval raakt de stroming de bovenbalk. Uit de meetresultaten blijkt dat de waterbeweging benedenstrooms van de kering en de schade aan de overgangskonstructie door het raken van de bovenbalk wordt beïnvloed. Bij extrapolatie en interpolatie van schade-vervalrelaties moet met deze invloed rekening worden gehouden.

Schade

In een schade-vervalrelatie kunnen twee kenmerkende situaties worden onderscheiden: het begin van bewegen en het bezwijken van de toplaa. Voor het vergelijken van de schade zijn bij het begin van bewegen ofwel het begin van schade de volgende kenmerken beschikbaar:

- bij proeven met dezelfde constructie (meetopstelling), dezelfde steensortering en dezelfde serie ingestelde vervallen: de totale schade, dat wil zeggen het totaal aantal getelde verplaatste stenen;
- bij proeven met dezelfde constructie (meetopstelling), dezelfde steensortering en verschillende series ingestelde vervallen: de schadetoename, dat wil zeggen de toename van het totaal aantal getelde verplaatste stenen per verval;
- bij proeven met verschillende constructies (meetopstellingen), verschillende steensorteringen en verschillende series ingestelde vervallen: de bewegingsgraad bij een overwegend tweedimensionale stroming en de schadeconcentratie bij een driedimensionale stroming.

In de toelichting op het begrip bewegingsgraad is ook het verband met een transportformule vermeld. Met een keuze van de waarde van de bewegingsgraad is het begin van bewegen scherp gedefinieerd. Bij het vergelijken van de resultaten van de proeven met verschillende steensorteringen is de bewegingsgraad toegepast.

De analyse van de schadeproeven is voornamelijk gebaseerd op de schadetoename die voor de tijdsduur en de initiële schade is gecorrigeerd.

- De proeven naar de gevoeligheid van de schade-vervalrelatie voor verschillende parameters hebben tot de volgende resultaten geleid:
 - Door een verlaging van de benedenwaterstand van NAP + 0 m tot NAP - 1 m treedt eenzelfde schadetoename op als bij een 0 tot 0,5 m hoger verval.
 - Door een verlaging van de bodemligging van de overgangskonstructie van NAP - 23,2 m tot NAP - 26,2 m neemt het bezwijkverval met 0,5 à 1,0 m toe.
 - Een vaste of losse onderlaag onder de top laag heeft in de onderzochte situatie geen invloed op het begin van schade. Uit de analyse is echter gebleken dat bij een vaste onderlaag het bezwijken van de top laag wel eerder optreedt dan bij een losse onderlaag, indien $\frac{D_{n \text{ top laag}}}{D_{n \text{ onderlaag}}} < 3 \text{ à } 5$. Is deze verhouding groter dan 3 à 5 dan heeft een vaste of losse onderlaag geen invloed op het bezwijkverval.
 - Een verandering in de sterkteparameter ΔD_n van een steensortering leidt tot een even grote procentuele verandering in het verval bij gelijke bewegingsgraad, waarbij echter afwijkingen van ongeveer 10% kunnen optreden. Opgemerkt wordt dat in een eerdere analyse een andere tendens is bepaald mede door geen correcties voor initiële schade en tijdsduur en een ander schadekenmerk toe te passen.
 - Een dorpelafstap, dat wil zeggen aan weerskanten van de pijler liggen de dorpelbalken op een verschillende diepte, heeft de volgende invloed op de gecorrigeerde schadetoename:
 - indien de stroom de bovenbalk niet raakt wordt door een dorpelafstap geen extra schade in het poortje met de diepst liggende dorpelbalk veroorzaakt,
 - indien de stroom de bovenbalk wel raakt treedt door een dorpelafstap 20 à 30% extra schade op in het poortje met de diepst liggende dorpelbalk.Uit de analyse is gebleken dat de beperkte breedte van de goot een ondergeschikte invloed heeft op deze resultaten betreffende een dorpelafstap.
 - Het begin van schade wordt vrijwel niet beïnvloed door wel of geen vel-
lingkant aan een dorpelbalk.
- Het kritieke verval voor de stabiliteit van de overgangskonstructie bij een open poortje kan met 10 à 20% nauwkeurigheid worden berekend met uitdrukkingen die vrijwel overeenkomstig zijn met de formules voor het

kritieke debiet bij een onvolkomen overlaat uit het onderzoek M711 deel IV. Dit resultaat is een aanwijzing dat het geldigheidsgebied van deze formules voor het kritieke debiet naar een grote relatieve vernauwing verruimd kan worden.

- Door incidentele grootschalige turbulentie is in de Tussenpadgoot door invloed van de gootwanden waarschijnlijk wat meer schade aan de overgangskonstruktie gemeten dan de schade die in het prototype door dat verschijnsel wordt veroorzaakt.

Vergelijking met het onderzoek Q 520.10 in het detailmodel

De resultaten van het gevoeligheidsonderzoek zijn met enkele resultaten van het onderzoek Q 520.10 in het detailmodel van de stroomgeul Roompot vergeleken.

Het kritieke verval in R25 en R26 is aanzienlijk lager dan het kritieke verval in het gevoeligheidsonderzoek. Het grootste deel van het verschil in het kritieke verval kan verklaard worden door de invloed van de tijdsduur van de proef, de definitie van het verval, de dorpelliging, de schematisatie van de dorpel, en overige effecten. Voor de invloed van deze overige effecten is een faktor 1,1 à 1,3 bepaald, waarmee het verval moet worden vermenigvuldigd.

3. Opzet van het modelonderzoek

In de Tussenpadgoot is een model van een pijler van de stormvloedkering Oosterschelde met aan weerskanten een half poortje ingebouwd, zodat de gootwand samenvalt met een symmetrieas van de stroming door een poortje. Van een poortje zijn de drempel, de dorpelbalk, de bovenbalk, de schuif en de overgangskonstructie aan de zeezijde weergegeven, zie het zijaanzicht in figuur 1. De helften van twee schuiven zijn in het model geschematiseerd weergegeven. Daarbij is de positie van de schuiven ten opzichte van de dorpelbalk nauwkeurig ingebouwd. De horizontale bodemligging van de overgangskonstructie aan de zeezijde is ook geschematiseerd omdat in het gevoeligheidsonderzoek niet de bodemligging van één bepaald poortje is onderzocht. Het geometrisch gelijkvormige model heeft een lengteschaal 60. De diameter van de steensorteringen is ook volgens de lengteschaal bepaald en de schaalfactor van de dichtheid van de steensorteringen is één. Opgemerkt wordt dat de diameter van de steensorteringen in het model zo groot is dat geen rekening hoeft te worden gehouden met viskeuze schaafeffekten. De stroomsnelheden zijn volgens Froude geschaald, dat betekent dat de schaalfactor van de stroomsnelheden, $n_u = \sqrt{60} = 7,74$ en de tijdschaal $n_t = 7,74$.

De Tussenpadgoot heeft de volgende kenmerken (in modelmaten):

de inwendige breedte van de goot	0,78 m
de maximum waterdiepte	~ 1,00 m
het maximum debiet	~ 0,35 m ³ s ⁻¹
de "nuttige" lengte van de goot	~ 35 m

De kenmerken van de uitgevoerde schadeproeven staan in tabel 1. Alle proeven zijn met eb gestroomd. In enkele situaties zijn ook stroomsnelheidsvertikalen gemeten, zie tabel 2. Opgemerkt wordt dat de proeven in chronologische volgorde zijn genummerd. In het proevenprogramma zijn het dorpelniveau, de bodemligging van de overgangskonstructie, de steensortering en het percentage waarmee de schuif gedeeltelijk gesloten is, gevarieerd. In verband met de variatie van het dorpelniveau is het niveau van de overgangsconstructie ten opzichte van de gootbodem instelbaar gemaakt.

Tevens zijn drie benedenwaterstanden, verschillende varianten van de geometrisch gelijkvormige dorpelbalk (met en zonder vellingkanten) en een overgangskonstructie met een vaste en losse onderlaag beproefd. In de proeven met een open stormvloedkering ligt de nadruk op een poortje met de dorpelbalk op

NAP -8,5 m, omdat uit voorgaand onderzoek is gebleken dat zo'n poortje één van de meest ongunstige poortjes is met betrekking tot de stabiliteit van de overgangskonstruktie aan de zeezijde. De proefopstelling in de Tussenpadgoot is geschikt om de stabiliteitsparameters bij een overwegend tweedimensionaal stroombeeld te onderzoeken. De resultaten van enkele proeven met een dorpelafstap en/of beide schuiven met een verschillend percentage gesloten, waardoor een min of meer driedimensionaal stroombeeld ontstaat, hebben door de beperkte breedte van de goot voornamelijk een indicatieve waarde.

De karakteristieken van de in het model toegepaste steensorteringen staan in tabel 3. De sterkte parameter van een steensortering is ΔD_n waarin Δ de relatieve dichtheid $(\rho_s - \rho_w)/\rho_w$ en D_n de nominale diameter zijn. De waarde van ΔD_n van de verschillende monsters blijkt ongeveer 5% af te wijken van de in het prototype aangenomen waarden. Deze verschillen zijn acceptabel omdat de waarde van ΔD_n van verschillende monsters van dezelfde steensortering ook vaak 5% verschilt, doordat tijdens het transport en de verwerking van de steensortering gemakkelijk enige ontmenging optreedt.

De dikte van de toplaag van de overgangskonstruktie is na proef T4 niet op de theoretische laagdikte gebaseerd maar op het stortgewicht per m^2 . Voor de steensortering 300-1000 kg is het stortgewicht op 1585 à 1750 kg/m^2 bepaald, dit komt goed overeen met het theoretisch stortgewicht van 1600 kg/m^2 . Voor de steensortering 1-3 ton is het theoretisch stortgewicht 2300 kg/m^2 .

Ter vergroting van het inzicht in de schade-vervalrelaties zijn ook enkele proeven met de steensortering 300-1000 kg uit het onderzoek Q 455 [3] uitgevoerd. Deze steensortering is verhoudingsgewijs iets te licht.

4. Meetresultaten

Tijdens een proef zijn de waterstanden op 300 m bovenstrooms en 300 m benedenstrooms van de as van de stormvloedkering geregistreerd. Daaruit is het verval en de benedenwaterstand met een nauwkeurigheid van ongeveer 0,03 m prototype bepaald, zie tabel 4. In elke situatie is gestreefd om na 10 minuten (1 uur en 15 minuten prototype) de schade te bepalen. Door de tijd, die nodig is voor het tellen van de schade en het instellen van het verval, is deze tijdsduur in het onderzoek wat toegenomen tot gemiddeld 11 à 12 minuten (1 uur en 25 à 30 minuten prototype). In de eerste proeven is een enkele keer 2 uur prototype per verval gestroomd. In een schadeproef is het verval in stapjes opgevoerd en in een zogenaamde duurproef is het verval gedurende een aantal uren (prototype) konstant gehouden. De schade is gedefiniëerd als het aantal geverfde stenen dat uit de vijf geverfde stroken is verplaatst. De gemeten schade is in tabel 5 verzameld. Hierbij wordt opgemerkt dat bij sommige proeven alleen het kritieke verval bij het begin van bewegen is bepaald en dat bij andere proeven het verval in stapjes tot het bezwijken van de top laag is opgevoerd.

Op basis van de tabellen 4 en 5 zijn het kritieke verval bij het begin van bewegen en het kritieke verval waarbij de top laag van de overgangskonstructie en het talud van de drempel bezwijkt, bepaald, zie tabel 6.

Het begin van bewegen is gedefiniëerd als het transport van 10 geverfde stenen, die de grens tussen stroken gekleurde stenen, in 75 minuten passeren. In het verslag wordt met het begin van schade hetzelfde bedoeld als met het begin van bewegen. Door deze definitie is het begin van bewegen afhankelijk van de strookbreedte. Bij het begin van bewegen is deze strookbreedte (12 m en 15 m) veel groter dan de gemiddeld afgelegde afstand van de getransporteerde stenen. Daardoor zullen op de overgangskonstructie in totaal veel meer stenen zijn verplaatst dan de 10 gemeten getransporteerde stenen. Het totaal aantal verplaatste stenen volgt uit de bewegingsgraad N van de top laag:

$$N = n D_n^3 / u_* \quad (1)$$

$$= n D_n^3 (g \Delta D_n \psi)^{-0,5} \quad (2)$$

waarin

$$u_* = \sqrt{\tau / \rho_w} \quad (3)$$

$$\psi = u_*^2 / (g \Delta D_n) \quad (4)$$

$$m = nL \quad (5)$$

m	aantal verplaatste stenen per eenheid van tijd door een denkbeeldige doorsnede, die loodrecht op de stroomrichting 1 m breed is	(m ⁻¹ s ⁻¹)
n	aantal verplaatste stenen per eenheid van tijd per eenheid van oppervlakte	(m ⁻² s ⁻¹)
L	de gemiddelde afgelegde afstand van een verplaatste steen	(m)
D _n	nominale steendiameter	(m)
g	versnelling zwaartekracht	(ms ⁻²)
N	bewegingsgraad	(-)
u _*	schuifspanningssnelheid	(ms ⁻¹)
Δ	relatieve dichtheid, (ρ _s - ρ _w) / ρ _w	(-)
τ	schuifspanning	(N m ⁻²)
ψ	schuifspanningsparameter	(-)
ρ _s	dichtheid steen	(kg m ⁻³)
ρ _w	dichtheid water	(kg m ⁻³)

Volgens een suggestie van Yalin [7] (zie paragraaf 4.6 van [7]) kan het begin van schade bij een bepaalde bewegingsgraad N worden gedefinieerd, dus een bepaalde n bij een bepaalde ψ.

Opgemerkt wordt dat (1) ... (5) voor een eenparige stroming zijn afgeleid, en dat bij de overgangskonstruktie de turbulentie voor de stabiliteit van de top-laag een grotere rol speelt dan bij een eenparige stroming. Dat betekent dat (1) ... (5) wellicht aangepast moeten worden, of dat een voor de turbulentie aangepaste waarde van ψ aangenomen moet worden bijvoorbeeld $\psi (1+3r)^2$ waarin r de relatieve turbulentie intensiteit is. Door Yalin en Neill [12] is het begrip bewegingsgraad afgeleid door twee stortebedden te beschouwen met verschillende steendiameters D₁ en D₂. Beide stortebedden hebben een gelijke bewegingsgraad indien op geometrisch overeenkomstige oppervlakken in kinematisch overeenkomstige tijden hetzelfde aantal stenen wordt verplaatst. De bewegingsgraad N bedraagt bij de gegeven definitie van begin van bewegen, namelijk 10 stenen per 75 minuten voor de steensortering 300-1000 kg, D_n =

0,59 m en vijf stroken met een breedte van 0,78 m:

$$n = 10L / (75 \cdot 60 \cdot 5 \cdot 0,78 \cdot 60) = 9,5 \cdot 10^{-6} L$$

Stel $\psi = 0,03$ en $L \approx 1$ m

$$N \approx 9,5 \cdot 10^{-6} \cdot 0,59^3 (9,81 \cdot 1,93 \cdot 0,59 \cdot 0,03)^{-0,5} \approx 3,3 \cdot 10^{-6}$$

De gemiddeld afgelegde afstand L is geschat op basis van in de Tussenpadgoot gemeten schade.

De definitie van het begin van bewegen van de lichte steensortering 300-1000 kg kan worden aangepast tot 22 stenen per 75 minuten, indien aangenomen wordt dat de bewegingsgraad N bij de lichte steensortering 300-1000 kg gelijk is aan de bewegingsgraad bij de goede steensortering 300-1000 kg.

Hierbij is verondersteld dat de gemiddeld afgelegde afstand van de stenen bij de goede en de te lichte steensortering gelijk zijn. Dit is een voorbeeld van een toepassing van de bewegingsgraad. Opgemerkt wordt dat het begrip bewegingsgraad een verfijning is van het begrip schadeconcentratie, dat vooral bij een sterk driedimensionale stroming wordt toegepast. De schadeconcentratie is gedefinieerd als het quotiënt van het aantal stenen dat uit het gebied met de zwaarste aantasting werd verplaatst en het aantal dat voor de proef in datzelfde gebied aanwezig was [1].

De bewegingsgraad kan bij een uniforme stroming ook met een transportformule worden vergeleken. In het algemeen geeft een transportformule het verband tussen de schuifspanningsparameter en de transportparameter ϕ weer:

$$\phi = \text{functie}(\psi) \quad (6)$$

waarin

$$\phi = q_s (g \Delta D_{50}^3)^{-0,5} \quad (7)$$

q_s = het getransporteerde volume materiaal per eenheid van tijd en door een denkbeeldige doorsnede, die loodrecht op de stroomrichting 1 m lang is

$$(\text{m}^3 \text{ m}^{-1} \text{ s}^{-1})$$

Het volume van 1 steen bedraagt gemiddeld D_n^3 waarbij D_n = nominale diameter, gedefinieerd als de ribbe van de kubus met hetzelfde volume als de steen met gewicht G_{50} . Met de definitie van m kan voor q_s geschreven worden:

$$q_s = m D_n^3 \quad (8)$$

met substitutie van (5) in (8):

$$q_s = nL D_n^3 \quad (9)$$

na substitutie van (9) in (7) en de aanname $D_{50} \approx D_n$ volgt uit (2) en (6):

$$N = \frac{D_n}{L} \frac{\phi}{\sqrt{\psi}} \quad (10)$$

Het is onjuist (10) op te vatten als een transportformule; met (10) wordt alleen het verband tussen N , ϕ en ψ vastgelegd. Indien bij een gegeven ψ met een transportformule ϕ wordt berekend, kan met (10) de bewegingsgraad worden bepaald.

De gemiddelde afstand, waarover de stenen worden verplaatst, blijkt een functie van D_n te zijn. Een indicatie van de grootte van deze gemiddelde afstand kan met de volgende gegevens worden verkregen:

begin van bewegen in een uniforme stroming:

af en toe, hier en daar beweegt een steen: $L = (2 \text{ à } 5) D_n$

overall, en regelmatig bewegen er stenen: $L = 20 D_n$

In bijzondere stromingsomstandigheden worden nog veel grotere afstanden door de stenen afgelegd.

Door substitutie van deze gegevens in (10) wordt een vereenvoudigde uitdrukking verkregen. Voor het begin van bewegen (af en toe, hier en daar):

$$N \approx (0,2 \text{ à } 0,5) \phi / \sqrt{\psi} \quad (10a)$$

Voor het begin van bewegen in een uniforme stroming geldt de gemodificeerde transportformule van Paintal:

$$\phi = 1,64 \cdot 10^{10} \psi^{11} \quad (11)$$

Volgens de Shields-kromme wordt het begin van bewegen gekarakteriseerd door $\psi = 0,03$. Substitueer deze waarde van ψ in (11) en vervolgens kan N met (10a) worden berekend:

$$N = 5 \cdot 10^{-7} \text{ à } 1,4 \cdot 10^{-6}$$

Deze waarde van N komt goed overeen met $N \approx 1 \cdot 10^{-6}$ die door Breusers [11] als mogelijke kritieke waarde is vermeld. Een bovengrens van de Shields kromme is $\psi = 0,06$. Met $L = 20 D_n$ en (11) volgt uit (10): $N \approx 2 \cdot 10^{-4}$. Deze waarde is wat groter dan die door Neill [13] is vermeld $N \approx 1,5 \text{ à } 3 \cdot 10^{-5}$ en voor $\psi = 0,03$ vermeldt hij $N \approx 3 \cdot 10^{-6}$. Deze verschillen worden veroorzaakt door de beperkingen van de meetopstelling waarmee Neill zijn proeven heeft uitgevoerd. Het criterium voor het begin van schade in het onderhavige onderzoek, namelijk 10 stenen per 75 minuten voor de steensortering 300 - 1000 kg komt overeen met $N \approx 3,3 \cdot 10^{-6}$. Deze waarde sluit goed aan bij de voorgestelde kritieke waarde $N = 1,0 \cdot 10^{-6}$ voor het begin van bewegen of het begin van schade. Opgemerkt wordt dat deze kritieke waarde van de bewegingsgraad in allerlei stromingen kan worden toegepast, dus niet alleen in een uniforme stroming.

In tabel 6 is het kritieke verval bij het begin van bewegen uit de gemeten schade en uit de gekorrigeerde schadetoename bepaald. Het verschil tussen deze vervallen geeft de invloed van de korrekties voor initiële schade en tijdsduur van de proef weer.

Het bezwijken van de toplaag betekent dat de toplaag de onderlaag plaatselijk niet meer beschermd tegen stroomaanval en dat in veel gevallen de schade aan de onderlaag zich in de tijd over een groter gebied uitbreidt. In de analyse van de meetresultaten is het bezwijken van de toplaag bepaald als de onderlaag plaatselijk zichtbaar is geworden. Dit komt overeen met een schadeconcentratie van 0,6 ... 0,9 omdat de laagdikte ongeveer $1,5 D_n$ bedraagt. Bij een losliggende onderlaag treedt bij bezwijken een sterke menging van de onderlaag met de toplaag op, waardoor dit criterium niet in alle proeven eenduidig is. In die gevallen is op basis van voorgaand onderzoek het bezwijken van de toplaag gedefiniëerd als een totale schade van 200 stenen per poortje op de overgangskonstructie is opgetreden.

In enkele proeven (T5, T11, T17, T26 en T31) met een open en een gedeeltelijk gesloten kering is waargenomen dat het bezwijken van de toplaag van de overgangskonstructie bij open kering en het talud van de drempel bij een gedeeltelijk gesloten kering vrij plotseling na een incidentele grootschalige uitbarsting van turbulente stroomsnelheden (een zogenaamde burst) optreedt. Het stochastische karakter van deze uitbarstingen kan bij herhalingsproeven enige spreiding in het bezwijkverval veroorzaken. Ter vergroting van het inzicht in de stabiliteit van de toplaag van de overgangskonstructie wordt aanbevolen het optreden van "bursts" nader te bestuderen. Op basis van een visueel waargeno-

men "burst" wordt de volgende beschrijving gegeven. Deze "burst" begon vanaf de dorpelbalk in de grenslaag tussen hoofdstroom en bodemneer te groeien en raakte de overgangskonstruktie 50 à 60 m uit de as van de stormvloedkering. De maximale afmetingen van deze burst zijn ongeveer de halve gootbreedte en de benedenstroomse waterdiepte. Door de burst zijn 20 à 30 stenen uit drie gekleurde vakken "weggeveegd", dat wil zeggen over 10 à 20 m verplaatst. Aan het einde van de overgangskonstruktie, 100 à 150 m benedenstrooms van de as van de stormvloedkering, zijn de grootte en de kracht van deze burst sterk afgenomen. Het is onzeker of dit verschijnsel in het prototype in dezelfde hevigheid kan optreden, doordat in het fysische model schaalearkten het verschijnsel kunnen beïnvloeden (door de op schaal te grote viscositeit in het model worden wellicht te sterke wervels opgewerkt). Uit de in het onderzoek M 1451 [1] geraadspleegde literatuur blijkt dat deze invloed waarschijnlijk klein is. Hierbij wordt opgemerkt dat in het detailmodel van de stroomgeul Roompot op 300 m benedenstrooms van de as van de stormvloedkering enkele metingen naar de turbulentieverdeling zijn verricht. Uit een eerste analyse van deze metingen blijkt dat op die plaats geen rekening hoeft te worden gehouden met een excessieve turbulentie-intensiteit. Voor een goede vergelijking met de turbulentie verschijnselen in het onderzoek in de Tussenpadgoot zijn echter turbulentiemetingen op 50 à 100 m benedenstrooms van de as van de stormvloedkering gewenst.

Uit de schademetingen in het detailmodel is het "wegvegen" van maximaal 10 stenen door een "burst" enkele keren waargenomen. In het drie-dimensionale detailmodel spreidt een "burst" zich sterker in de breedterichting dan in de Tussenpadgoot, omdat de wand van deze goot een groei in de breedterichting beperkt. Uit deze opmerkingen volgt dat de invloed van "bursts" op de stabiliteit van de toplaag van de overgangskonstruktie in het prototype waarschijnlijk aanzienlijk minder is dan in het modelonderzoek in de Tussenpadgoot.

In de analyse is nagegaan of in soortgelijke modelonderzoeken vergelijkbare verschijnselen zijn waargenomen. In het verslag M711 deel IV [5]

"Stroombestendigheid sluitgatrempel" wordt het volgende opgemerkt. "Na afloop van een proef bleek de verplaatsing vaak groter dan op grond van waarneming door de ruiten van de observatieruimte was verwacht. De oorzaak moet naast de verplaatsing van de in labiel evenwicht verkerende steentjes ook worden geweten aan de zeldzaam optredende zeer hoge snelheidspieken".

Het instellen van het stroombeeld vereist enige voorzichtigheid om door een kortstondig te groot verval geen initiële schade te veroorzaken. In proef T25

is desondanks toch enige initiële schade opgetreden. In verschillende proeven, onder andere de duurproef T4, is op de overgangskonstruktie achter de pijler in verhouding tot het deel achter de dorpelbalken minder schade opgetreden. Bij een aanzienlijke schade vormt zich achter de pijler een ruggetje van "verplaatste" stenen. Aan het eind van het onderzoek hebben de betonkubussen van de aanstorting aan de zeezijde zich voor een belangrijk deel netjes gerangschikt, dat wil zeggen de willekeurige stapeling is spontaan in een regelmatige stapeling veranderd.

Van de gemeten stroomsnelheden zijn enkele stroomsnelheidsvertikalen in de figuren 2...6 opgenomen. De overige metingen zijn de in tabellen 7...12 gepresenteerd. In deze tabellen is ook de standaardafwijking van het stroomsnelheidssignaal vermeld. De gemiddelde stroomsnelheid, $\bar{u}$, en de standaardafwijking, u' , van dat signaal zijn bepaald uit dat deel van het signaal dat dezelfde stroomrichting heeft. Indien een deel van het signaal een tegengestelde stroomrichting heeft, zijn van dat deel afzonderlijk $\bar{u}$ en u' bepaald, en die waarden zijn ook in tabellen 7...12 opgenomen.

Bij de proeven met een bodemneer op de overgangskonstruktie is getracht visueel het aanligpunt (reattachment point) van de hoofdstroming te bepalen. Door de grote turbulentieintensiteit is de ligging van dat punt niet exact bepaald. Globaal kan worden gesteld dat bij een bodemligging van NAP -25 m en een dorpelbalk op NAP -8,5 m dat punt voorbij de benedenstroomse rand van de overgangskonstruktie ligt, en dat bij een bodemligging van NAP -20 m dat punt boven de overgangskonstruktie ligt.

5. Analyse

5.1 Inleiding

De analyse van de meetresultaten bestaat uit de volgende onderdelen:

- a de invloed van verschillende omstandigheden op de schade-vervalrelatie bij een open kering (paragraaf 5.2),
- b de invloed van verschillende omstandigheden op de schade-vervalrelatie bij een gedeeltelijk gesloten kering (paragraaf 5.3),
- c een vergelijking met enkele resultaten van het onderzoek Q 520.10 in het detailmodel Oosterschelde betreffende proef T55 met een open stormvloedkering (paragraaf 5.4).

5.2 Schade-vervalrelatie bij een open kering

In de analyse van de schade-vervalrelatie bij een open kering zijn de volgende omstandigheden onderscheiden:

- de tijdsduur van een schademeting,
- een variatie van de benedenwaterstand,
- de reproductie van de schade-vervalrelatie,
- een variatie van de bodemligging van de overgangskonstructie,
- een vaste of losse onderlaag onder de topklaag van de overgangskonstructie,
- verschillende steensorteringen.

Deze omstandigheden worden in het navolgende behandeld, waarbij ook enkele model-effecten aan de orde komen. In enkele proeven is aandacht besteed aan de plaats op de overgangskonstructie, waar de schade optreedt. Tenslotte is de berekening van het kritieke verval voor het begin van schade aan de overgangskonstructie behandeld.

Tijdsduur van een schademeting

Uit de duurproeven T3, T4 en T28 in figuur 7 blijkt dat:

- in de eerste minuten 20 à 30 stenen per poortje worden verplaatst (bijna onafhankelijk van de transportintensiteit),
- daarna neemt het transport lineair met de tijd toe (tot het begin van bezwijken).

De gemiddelde tijdsduur van een meting bedraagt in

Q455 25 à 40 minuten (prototype 3 uur en 40 minuten à 6 uur)

Q520 11 à 12 minuten (prototype 1 uur en 25 à 30 minuten)

De gemeten transporten worden als volgt naar een transport per 75 minuten omgerekend:

- a van de schadetoename na het overschrijden van het begin van beweging is aangenomen dat de helft initiële schade is, met een maximum initiële schade van 20 stenen,
- b de initiële schade in opeenvolgende vervallen is gesommeerd tot een totaal van 20 stenen is bereikt, daarna is van alle schadetoenames geen initiële schade afgetrokken,
- c na aftrek van de initiële schade is de schadetoename evenredig met de tijdsduur.

Het genoemde lineaire gedrag van de schadeontwikkeling in de proeven T3, T4 en T28 impliceert dat na verloop van tijd ook bij kleine transportintensiteiten het bezwijken van de toplaag optreedt. Uit voorgaand onderzoek is gebleken dat bezwijken van de toplaag van de overgangskonstructie optreedt nadat een totaal transport van ongeveer 200 stenen per poortje is gemeten. Door deze definitie op de meetresultaten van proeven T3, T4, T28 en T6 toe te passen is in figuur 8 het bezwijkverval als functie van de meettijd weergegeven.

Na het voorgaande kan worden gesteld dat de invloed van de tijdsduur van de metingen in de beide onderzoeken redelijk nauwkeurig kan worden gekwantificeerd. De schadetoename is voor de initiële schade en de tijdsduur gekorrigeerd, zie tabellen 14...31. In deze tabellen is in de kolom "korrektie initiële schade" de schade gelijk aan de schadetoename inclusief de correctie voor de initiële schade. Evenzo is in de kolom "korrektie tijdsduur" de schade gelijk aan de schadetoename inclusief de correctie voor de initiële schade en de correctie voor de tijdsduur. In de verdere analyse is dus de schadetoename uit de laatste kolom gebruikt.

Variatie van de benedenwaterstand

In de proeven T6...T11 is de invloed van een variatie van de benedenwaterstand van NAP + 0 m tot NAP - 1,0 m op de stabiliteit van de overgangskonstructie onderzocht. De ligging van de dorpelbalk varieerde in deze proeven van NAP - 8,5 m tot NAP - 5,5 m.

Uit de figuren 9...11 blijkt dat een verlaging van de benedenwaterstand met 1 m tot NAP - 1,0 m leidt tot een verhoging van het verval met 0 tot 0,5 m om dezelfde schadetoename te verkrijgen. Ter verklaring van dat resultaat wordt opgemerkt dat deze verlaging van de benedenwaterstand en de vermindering van de doorstroomoppervlakte leidt tot een vermindering van het debiet volgens (11) en daardoor een geringere schadetoename bij een gelijk verval. De afvoercoëfficiënt verandert weinig bij een verlaging van de benedenwaterstand, in T7 is $\mu \approx 1,1$ indien de stroom de bovenbalk niet raakt.

Afvoerrelatie bij een onvolkomen overlaat:

$$Q = \mu A \sqrt{2g \Delta h} \quad (11)$$

Q	= debiet	$m^3 s^{-1}$
μ	= afvoercoëfficiënt	-
g	= versnelling zwaartekracht	$m s^{-2}$
Δh	= verval	m
A	= doorstroomoppervlak	m^2

Hierin is A gedefinieerd als het doorstroomoppervlak tussen de bovenkant van de dorpelbalk en de benedenstroomse waterstand verminderd met het aanstroomoppervlak van de pijler tussen deze niveau's.

Reproductie schade-vervalrelatie

In het onderzoek is geen volledige reproductieproef opgenomen, wel is proef T1 in proef T6 met wat grotere vervallen herhaald. De gekorrigeerde schadetoename als functie van het verval blijkt in proef T1 en in proef T6 goed op elkaar aan te sluiten, zie figuur 12, indien rekening wordt gehouden met het geringe verschil in de benedenwaterstand (T1 $h_{ben} = NAP - 0,2$ m en T6 $h_{ben} = NAP + 0$ m).

Bij de proeven met een gedeeltelijk gesloten kering zijn de proeven T15 en T16 herhaald in de proeven T18 respektievelijk T20. Uit figuur 13 met de meetresultaten blijkt dat T18 een goede en T20 een redelijke reproductie is van T16, respektievelijk T15. Hierbij wordt opgemerkt dat het stroombeeld met een duidende straal bij een 33% gesloten schuif waarschijnlijk enigszins instabiel is, waardoor de schadetoename bij een verval van ongeveer 2 m varieert van 20 tot 50 stenen per 1 uur en 1 kwartier.

variatie bodemligging van de overgangskonstructie

De invloed van een variatie van de bodemligging van de overgangskonstructie van NAP - 20,2 m tot NAP - 26,2 m is in de proeven T6, T13 en T21 onderzocht. In deze proeven met een open stormvloedkering ligt de dorpelbalk op NAP - 8,5 m en is de benedenwaterstand konstant gehouden op NAP + 0 m.

Uit de gekorrigeerde schade-vervalrelatie in figuur 14 blijkt dat het verval bij het begin van bewegen vrijwel ongevoelig is voor een variatie in de bodemligging, en dat het bezwijkverval wel gevoelig is voor zo'n variatie: bij een verlaging van de bodemligging van NAP - 23,2 m tot NAP - 26,2 m neemt het bezwijkverval met een 0,5 à 1,0 m toe. Bij een verlaging van NAP - 20,2 m tot NAP - 23,2 m is deze toename van het bezwijkverval wellicht wat geringer: ~ 0,5 m.

Hierbij wordt opgemerkt dat het begin van bewegen optreedt bij een verval van 2,70 à 2,80 m en bij dat verval begint de stroom de bovenbalk te raken, zie tabel 13.

Door het raken van de bovenbalk treedt een kleine verandering in het stroombeeld op, daardoor is de genoemde ongevoeligheid van het verval bij het begin van bewegen wellicht beïnvloed.

De variatie in de bodemligging van de overgangskonstructie aan de zeezijde is voor de poortjes met de dorpelbalk op NAP -8,5 m aan de hand van peilkaarten van de Roompot bepaald [7]:

R25 NAP - 22 à - 23 m	in het detailmodel: NAP - 22,5 à - 25,0 m
R26 NAP - 20 à - 22 m	NAP - 21,0 à - 24,0 m

Het verschil in bodemligging tussen R 25 en R 26 bedraagt globaal 1 à 2 m. De diepere bodemligging en de zwaardere steensortering van R6 en R7 zijn waarschijnlijk de oorzaak waardoor in deze poortjes minder schade is gemeten dan in R25 en R26 (in het onderzoek Q455).

De bodemligging in het detailmodel van de stroomgeul Roompot in M 1001 stemt goed overeen met de onderzochte variatie in bodemligging in de Tussenpadgoot, namelijk NAP - 26,2, - 23,2 en - 20,2 m.

Uit figuur 15 blijkt dat het verschil in bodemligging tussen R25 en R26 waarschijnlijk een geringe invloed heeft op de schadetoename-verval relatie; in het detailmodel zal in R26 ongeveer 20 à 30% meer schade optreden dan in R25 bij een gelijk verval of het verval is 0,2 à 0,5 m lager bij een gelijke schadetoename.

variatie van de onderlaag

De onderlaag onder de top laag van de overgangskonstructie is uitgevoerd als een losse onderlaag op een bodemplaat of als een vast geplakte onderlaag. Bij het begin van bewegen is vrijwel geen invloed van een variatie in de uitvoering van de onderlaag waarneembaar: vergelijk proef T34 losse onderlaag met proef T36 vaste onderlaag, zie figuur 16. Bij het toenemen van de schade treedt bij een vaste onderlaag een kleinere schade op dan bij een losse onderlaag. Hierbij wordt opgemerkt dat in T34 de meetpunten bij een verval van 2,43 m en 3,16 m niet zo nauwkeurig zijn.

Bij een losse onderlaag kan bij vervallen groter dan 1,8 m 10 tot 30 stenen meer schade optreden dan bij een vaste onderlaag. Voor de vergelijking met het onderzoek Q 455 in het detailmodel van de Oosterschelde betekent dit resultaat dat het begin van bewegen niet door de vaste onderlaag is beïnvloed maar dat bij het bezwijken van de top laag, dat is als door een gat in de top laag de vaste onderlaag zichtbaar is, enerzijds te weinig schade is gemeten, anderzijds dat het bezwijkcriterium te conservatief is. Dit laatste blijkt uit een vergelijking van proef T37 met proef T13: in proef T37 bezwijkt de top laag bij het grootste ingestelde verval van 5,0 m, dat wil zeggen de vaste onderlaag is door een gat in de top laag zichtbaar; in proef T13 is de top laag bij een verval van 5,6 m nog niet bezweken, wel zijn er enkele dunne plekken van de top laag zichtbaar. Hierbij wordt opgemerkt dat het verschil in de opbouw van de vervallen in T13 en in T37 waarschijnlijk een verwaarloosbare invloed op deze vergelijking heeft.

In het verslag "Aanvullend onderzoek drempel en overgangskonstructie" [6] is gekonkludeerd dat de aanwezigheid van een onderlaag, die uit de steensortering 10 tot 60 kg bestaat, onder een top laag van de steensortering 3 tot 6 ton in het geheel geen invloed heeft op de stabiliteit van de top laag van de overgangskonstructie. Voor het begin van schade is deze konklusie in overeenstemming met de resultaten van het onderhavige gevoeligheidsonderzoek. Voor het bezwijken van de top laag is deze konklusie niet in overeenstemming met deze resultaten. Ter verklaring van dit verschil wordt het volgende opgemerkt. In het aanvullend onderzoek is bij het maximum ingestelde verval (6,3 m) geen bezwijken van de top laag met de steensortering 3 tot 6 ton opgetreden. Het verschil in de verhouding tussen D_n top laag en p_n onderlaag heeft waarschijnlijk ook invloed op het verschil in de schade-vervalrelaties:

	$D_n \text{ top laag} / D_n \text{ onder laag}$
gevoeligheidsonderzoek	2,5 à 3
aanvullend onderzoek	5 à 7

Indien $D_n \text{ top laag} / D_n \text{ onder laag} < 3 \text{ à } 5$ mag ten aanzien van de voorspellingen uit het dimensioneringsonderzoek [1] op enige reserve in het bezwijkverval worden gerekend. Dit is een nuancering van de konklusie uit het aanvullend onderzoek M 2169 [6], namelijk dat er niet op een extra reserve mag worden gerekend.

Variatie van de steensortering

Het inzicht in de invloed van de steensortering van de top laag van de overgangskonstruktie op de schade-vervalrelatie is vergroot door een lichte en een zware sortering 300-1000 kg en de sortering 1 tot 3 ton te beproeven.

Uit een vergelijking van de meetresultaten van T1 en T2, zie figuur 17 volgt:

- bij het begin van bewegen, dat wil zeggen een gekorrigeerde schadetoename van 10 à 15 stenen per 75 minuten:

$$\Delta h (T2) / \Delta h (T1) = 5,50/3,60 \text{ à } 5,75/4,20 = 1,37 \text{ à } 1,53$$

$$\Delta D_n (T2) / \Delta D_n (T1) = 1,56/1,20 = 1,3$$

Dit betekent dat een toename van ΔD met 30% resulteert in een 40 à 50% groter verval bij begin van bewegen. Hierbij wordt opgemerkt dat bij deze vervallen de bovenbalk steeds geraakt wordt. Door het raken van de bovenbalk verandert het stroombeeld en is het verval alleen niet voldoende ter karakterisering van de stroming.

Uit een vergelijking van de meetresultaten van T13 en T34, zie tabel 21 en figuur 18 volgt:

- bij het begin van bewegen dat wil zeggen een gekorrigeerde schadetoename van 5 stenen per 75 minuten:

$$\Delta h (T13) / \Delta h (T34) = 2,80/1,45 = 1,93$$

$$\Delta D_n (T13) / \Delta D_n (T34) = 1,20/0,66 = 1,82$$

De bovenbalk wordt hierbij net niet geraakt.

- bij het bezwijken van de top laag, dat wil zeggen een gekorrigeerde schade-toename van 200 stenen per 75 minuten:

$$\Delta h (T13) / \Delta h (T34) = 5,20/(2,85 \text{ à } 3,00) = 1,73 \text{ à } 1,82$$

De bovenbalk wordt nu wel geraakt.

Uit het onderzoek in de Pentagoot [1] naar een weigerende schuifsituatie volgt dat een verandering in ΔD_n van de steensortering leidt tot een procentueel even grote verandering van het verval. De resultaten van het gevoeligheidsonderzoek bevestigen deze relatie globaal. Bij het begin van bewegen kan een geringe afwijking optreden: bij een toename van ΔD_n neemt het verval procentueel wat sterker toe dan uit de genoemde evenredigheid zou volgen.

Bij de voorgaande vergelijkingen is voor verschillende steensorteringen het criterium toegepast van een bepaald aantal verplaatste stenen per gegeven tijdsduur. In het onderstaande zijn dezelfde vergelijkingen gemaakt met het criterium van een gelijke bewegingsgraad N (zie hoofdstuk 4). Uitgangspunt is het criterium van 10 stenen per 75 minuten voor de steensortering 300-1000 kg: $N = 3,2 \cdot 10^{-6}$. Voor de andere steensorteringen volgt uit $N = 3,2 \cdot 10^{-6}$ de volgende criteria:

te lichte 300 à 1000 kg: 22 stenen per 75 minuten

1 à 3 ton: 5 stenen per 75 minuten.

Met deze criteria volgt uit figuur 17:

$$\Delta h(T2)/\Delta h(T1) = 5,20/3,60 = 1,44$$

Bij begin van bewegen volgt uit figuur 18:

$$\Delta h(T13)/\Delta h(T34) = 2,97/1,76 = 1,69$$

Uit deze vergelijkingen volgt dat met het criterium van een gelijke bewegingsgraad een verandering in ΔD_n van de steensortering tot een procentueel even grote verandering van het verval leidt, waarbij extra afwijkingen van ongeveer 10% van het verval kunnen optreden.

Invloed dorpelafstap op de schade-vervalrelatie

In een stroomgeul varieert de ligging van de dorpelbalk ten opzichte van NAP: in het midden van de geul liggen de dorpelbalken het diepst. In de situatie dat de dorpelbalken ter weerszijden van een pijler op verschillende diepten liggen, wordt van een dorpelafstap gesproken.

In de Tussenpadgoot zijn enkele proeven met een dorpelafstap van NAP - 7,5 m naar NAP - 8,5 m uitgevoerd. De resultaten van deze proeven (T35 en T38) zijn met de resultaten van proeven met de dorpelbalk op NAP - 8,5 m vergeleken (respectievelijk T36 en T37). De proeven met een dorpelafstap zijn in het proevenprogramma opgenomen omdat op basis van de resultaten in R25 en R26 in het onderzoek Q455 verondersteld is dat het poortje met de diepst liggende dorpelbalk naast een dorpelafstap wat meer debiet zou kunnen trekken doordat

de weerstand in het poortje wat geringer is dan de weerstand in het poortje met de hoger liggende dorpelbalk. Door het grotere debiet zou meer schade kunnen ontstaan.

In de proeven T35 ... T38 is de schade ter weerszijden van de langsas van de pijler (= langsas van de Tussenpadgoot) afzonderlijk gemeten.

De schadetoename is gecorrigeerd voor de initiële schade en de tijdsduur van de proef. De gecorrigeerde schadetoename is in figuren 19 en 20 als functie van het verval uitgezet.

Uit deze figuren blijkt het volgende:

- indien de stroom de bovenbalk niet raakt, T35, wordt door een dorpelafstap geen extra schade in het poortje met de diepst liggende dorpelbalk veroorzaakt,
- indien de stroom de bovenbalk raakt, T38, het eerst in het poortje met de dorpelbalk op NAP - 7,5 m, dan treedt in het poortje met de diepst liggende dorpelbalk een extra 20 à 30% schade op.
- bij de grootste ingestelde vervallen blijkt de schadetoename ter weerszijden van de pijler met de dorpelbalk op NAP - 8,5 m (dus geen dorpelafstap) niet gelijk te zijn. Voor dit verschil is geen verklaring voorhanden. Een kleine geometrieafwijking of een geringe ontmenging van de steensortering van de toplaag van de overgangskonstructie kunnen dit verschil hebben veroorzaakt.

Tijdens de uitvoering van proef T38 is visueel waargenomen dat nadat de stroming de bovenbalk geraakt heeft, een sterk asymmetrisch stroombeeld ontstond tussen het poortje met de dorpelbalk op NAP - 7,5 m en het poortje met de dorpelbalk op NAP - 8,5 m. Nadat het verval met twee stapjes was verhoogd, is het stroombeeld weer symmetrisch geworden.

Bij het raken van de bovenbalk kleeft de stroming in het model verhoudingsgewijs sterker aan de bovenbalk dan in het prototype. Hierdoor treedt een klein schaaleffekt op dat bij een verdere toename van het verval weer verdwijnt.

Uit de resultaten van deze proeven blijkt dat na het raken van de bovenbalk het stroombeeld verandert en daaruit volgt dat bij extrapolatie en interpolatie van schade-vervalrelaties met deze verandering rekening moet worden gehouden.

Invloed vellingkant aan dorpelbalk

In het detailmodel van de stroomgeul Roompot zijn de dorpelbalken geschematiseerd weergegeven om een schaaleffekt in de afvoercoëfficiënt te compenseren. Om een indruk te krijgen van de invloed van een vellingkant op de stabiliteit van de overgangskonstructie zijn in de Tussenpadgoot enkele proeven uitgevoerd waarbij de dorpelbalk een vellingkant heeft. In figuur 21 is T21 zonder vellingkant met T37 met vellingkant vergeleken waarbij ervan uit is gegaan dat het verschil in onderlaag bij het begin van bewegen geen invloed heeft op de schade-vervalrelatie. Uit deze vergelijking blijkt dat een vellingkant op het begin van bewegen weinig invloed heeft; wellicht is er een tendens dat met een vellingkant verhoudingsgewijs wat meer schade wordt gemeten.

De verdeling van de schade over de overgangskonstructie

Uit het onderzoek Stroombestendigheid sluitgatrempel, M711 deel IV [5] is gebleken dat de grootste aantasting van een stortbed plaats vindt in het gebied aan het einde van de bodemneer benedenstrooms van een dam.

Uit de meetresultaten van de proeven T6, T13 en T21 is de verdeling van de schade over de overgangskonstructie bepaald, zie figuur 22. Deze procentuele verdeling is op de ongekorrigeerde cumulatieve schade gebaseerd. Hierbij is aangenomen dat de correcties voor tijdsduur en initiële schade geen invloed hebben op de procentuele verdeling van de schade over de overgangskonstructie. Uit figuur 22 blijkt dat een afname van de waterdiepte leidt tot een verschuiving van het gebied met maximale schade naar de as van de stormvloedkering toe. Dit resultaat komt kwalitatief overeen met het genoemde resultaat van het onderzoek M711 deel IV omdat een afname van de waterdiepte ook leidt tot een afname van de lengte van de bodemneer.

Deze tendens is vergeleken met de meetresultaten van de proeven T12.3 en T55.5 van het onderzoek Q455/Q520.10 [3] in het detailmodel Oosterschelde. Voor de poortjes R25 en R26 zijn de resultaten in figuur 22 weergegeven. Uit deze resultaten blijkt dat een variatie van de positie van de dorpels een aanzienlijke invloed heeft op de verdeling van de schade op de overgangskonstructie. Deze gevoeligheid van de positie van de dorpels sluit aan op de resultaten van voorgaande onderzoeken.

De geringere gemiddelde waterdiepte in R26 ten opzichte van R25 leidt inderdaad tot een geringe verschuiving van het gebied met de grootste schade naar de as van de stormvloedkering toe. De kwalitatieve tendens met betrekking tot de invloed van de bodemligging treedt ook in het detailmodel van de Ooster-

schelde op. Opgemerkt wordt dat de bodemligging van de overgangskonstruktie in R25 en R26 in het detailmodel wat dieper ligt (tot 2m verschil) dan in het prototype, zie [8].

De afvoercoëfficiënt

Uit de meetresultaten is het verloop van de afvoercoëfficiënt bij een toenemend verval en bij een toenemend percentage, waarmee de schuif gesloten is, berekend. Hierbij is uitgegaan van een poortje met de dorpelblad op NAP - 8,5 m.

De afvoercoëfficiënt wordt berekend met:

$$Q = \mu A \sqrt{2g \Delta h} \quad (12)$$

Het debiet Q is op ongeveer 2 l/s nauwkeurig bepaald bij debieten van 75 tot 100 l/s, en op ongeveer 1 l/s nauwkeurig bij 25-50 l/s. Hieruit volgt dat Q met een nauwkeurigheid van 2% is gemeten.

Het doorstroomprofiel A is met een nauwkeurigheid bepaald die afhangt van de nauwkeurigheid van de benedenwaterstand en van de invloed van de wanden van de tussenpadgoot op het doorstroomprofiel. De nauwkeurigheid van de benedenwaterstand is $\pm 0,02$ m. Het verval Δh is met een nauwkeurigheid van 3% bepaald. Op grond van het voorgaande is de nauwkeurigheid waarmee de afvoercoëfficiënt is berekend, op 5% geschat. Met een foutenanalyse kan deze schatting worden verbeterd.

De uit de meetresultaten bepaalde μ - A relaties zijn in de figuren 23 en 24 weergegeven. Bij een open poortje komt de variatie van de afvoercoëfficiënt van 0,95 tot 1,20 goed overeen met de variatie van de afvoercoëfficiënt van 0,85 tot 1,19 bij een onvolkomen overlaat uit het onderzoek Stroombestendigheid sluitgatrempel, M711, deel IV [5].

Het verval bij begin van schade

Uit een systematisch onderzoek naar de stabiliteit van los materiaal achter een dam met een brede kruin, verslag M711 deel IV [5] is met behulp van dimensie-analyse een formule voor het kritieke debiet afgeleid, waarbij het begin van schade aan de benedenstroomse bodemverdediging optreedt:

$$q_{cr} = 0,78 h \sqrt{g \Delta D_n} \log \{c \cdot h/D_n\} \quad (13)$$

waarin:

$$c = \text{constante} \quad (-)$$

$$q_{cr} = \text{kritiek debiet per eenheid van breedte} \quad (m^2/s)$$

Uit de resultaten van dat onderzoek blijkt dat c van d/h en $\text{tg } \alpha$ (waarin α = taludhelling) afhankelijk is. Op basis van deze resultaten is in literatuurstudie [4] voor $\text{tg } \alpha = 0,5$ het volgende verband voorgesteld:

$$c = 0,19 (d/h)^{-2,77} \quad (14)$$

waarin $0,2 < d/h < 0,6$

In de bijlage is een soortgelijke formule als (13) afgeleid voor een uniforme stroming en met behulp van het stabiliteitskriterium volgens Shields

$$\psi = 0,03.$$

Met de afvoerformule voor een onvolkomen overlaat (12) volgt uit (13):

$$\Delta h_{cr} = \left[0,55 \frac{1}{\mu} \frac{h}{h-d} \sqrt{\Delta D_n} \log \{c h/D_n\} \right]^2 \quad (15)$$

waarin

$$\Delta h_{cr} = \text{kritiek verval} \quad (m)$$

In vergelijking met uitdrukking (13) voor q_{cr} heeft uitdrukking (15) voor Δh_{cr} het nadeel dat de waarde van de afvoercoëfficiënt voor willekeurige konstruktie slechts heel globaal kan worden geschat.

Uit de gekorrigeerde schade-vervalrelaties is het kritieke verval bepaald en in figuur 25 als functie van d/h uitgezet. In deze figuur is ook het met (14) en (15) berekende kritieke verval uitgezet, waarbij 0,55 door 0,50 is vervangen. Dat betekent dat in het onderzoek M711 vrijwel dezelfde bewegingsgraad $N \sim 3 \cdot 10^{-6}$ voor het begin van schade is toegepast als in het onderhavige onderzoek. Uit deze figuur blijkt dat het gemeten en het berekende kritieke verval redelijk goed met elkaar overeen stemmen. Bij deze vergelijking moet het volgende worden opgemerkt:

- De nauwkeurigheid waarmee het kritieke debiet met (13) wordt berekend, bedraagt ongeveer 10%. Dat betekent dat de nauwkeurigheid van het kritieke verval (15) op 20% gesteld kan worden. Daarbij is ook rekening gehouden met

een nauwkeurigheid van 5% van de uit de metingen berekende afvoercoëfficiënt. Het verschil tussen het verval volgens (15) en de meetpunten is voor vrijwel alle meetpunten kleiner dan deze marge van 20%.

- In het onderzoek M711 zijn verschillende grootheden anders gedefinieerd dan in het onderhavige onderzoek. Het belangrijkste verschil is de definitie van het kritieke debiet in het onderzoek M711 en het kritieke verval in het onderhavige onderzoek. Bij de bepaling van het kritieke debiet is uitgegaan van de cumulatieve schade zonder voor de initiële schade te corrigeren.
- De waarde van c is met (14) berekend, waarbij d/h buiten het in M711 onderzochte gebied $0,2 < d/h < 0,6$ lag: namelijk $0,6 < d/h < 0,8$.
- Indien met deze beperkingen rekening wordt gehouden dan kan worden gekonkludeerd dat met (14) en (15) het kritieke verval bij een grote relatieve vernauwing redelijk nauwkeurig kan worden berekend ($0,6 < d/h < 0,8$).

Voorts wordt opgemerkt dat uitdrukking (15) de resultaten van de analyse van een variatie van de steensortering grotendeels bevestigt. Uit (15) volgt namelijk dat Δh_{cr} evenredig is met ΔD_n indien de invloed van de factor $\log \{c h/D_n\}$ mag worden verwaarloosd. Uit de meetresultaten is gebleken dat Δh_{cr} evenredig is met ΔD_n indien van een gelijke bewegingsgraad wordt uitgegaan.

De resultaten van een voorlopige analyse van het gevoeligheidsonderzoek is in de nota "Ontwerp drempel en overgangskonstructie" [8] opgenomen. In deze analyse bleek Δh_{cr} evenredig met $B/C = d/h$. Uit (15) volgt echter dat Δh_{cr} evenredig is met $\{h/(h-d)\}^2$, indien de invloed van de factor $\log \{c h/D_n\}$ verwaarloosd wordt. Tussen beide factoren bestaat het volgende verband:

$$\{h/(h-d)\}^2 = \{1 - d/h\}^{-2} \quad (16)$$

Hieruit volgt dat beide factoren min of meer gelijkwaardig zijn in het onderzochte gebied.

5.3 Stabiliteit bij gedeeltelijk gesloten schuiven

De stabiliteit van de overgangskonstructie en het talud van de drempel is bij een gedeeltelijk gesloten schuif onderzocht in de volgende proeven:

T13 ... T20 dorpelniveau NAP - 8,5 m
 T23 ... T27 dorpelniveau NAP - 4,5 m
 T29 ... T33 dorpelniveau NAP - 10,5 m.

In een deel van deze proeven is het verval opgevoerd tot het bezwijken van de toplaag, namelijk in de proeven T13 ... T17, in de proeven daarna is het verval niet verder opgevoerd dan het begin van schade. In deze proevenseries is het percentage van de gedeeltelijk gesloten schuif gevarieerd en zijn de bodemligging per dorpelniveau en de benedenwaterstand konstant gehouden.

Het verval bij begin van schade is uit de schade als functie van het verval bepaald waarbij geen correcties voor initiële schade en tijdsduur zijn uitgevoerd. In figuur 21 is het verval bij het begin van schade met een veiligheidscoëfficiënt 1,5 als functie van het percentage gesloten schuif uitgezet. De afname van dat verval bij een toename van het sluitingspercentage tot 25 à 33% van het doorstroomoppervlak wordt door een omslag van het stroombeeld veroorzaakt. Het stroombeeld slaat om van een stroming met een bodemneer naar een duikende straal met een dekneer, onafhankelijk van de ligging van de dorpel (NAP - 4,5 m, - 8,5 m en - 10,5 m). Als de schuif voor meer dan 33% gesloten is, treedt steeds een duikende straal op met een dekneer. Bij dat stroombeeld is het verval bij begin van schade beduidend lager dan verval bij een stroming met een bodemneer. Bij een duikende straal is de schade op het talud van de drempel en het aansluitende deel van de overgangskonstructie geconcentreerd. Over het omslaan van het stroombeeld is uit andere onderzoeken het volgende bekend. In de situatie van een horizontale straal, zie schets in figuur 22, buigt de straal statistisch gezien vaker naar de bodem af als de afstand van de as van de straal tot de bodem, b , kleiner is dan de afstand van deze as tot de waterspiegel, a , dus $b < a$, zie het verslag van het onderzoek naar de stabiliteit van stortsteen onmiddellijk na constructies, M1834/S543 [10]. Het omslaan van het stroombeeld zou volgens deze regel door het variëren van de benedenstroomse waterstand kunnen worden veroorzaakt. In T20 is met het variëren van de benedenwaterstand geëxperimenteerd. Nadat het stroombeeld is omgeslagen door de benedenwaterstand 0,10 m (prot) te verlagen, is getracht door het verhogen van de benedenwaterstand met 0,30 à 0,50 m het stroombeeld opnieuw te laten omslaan. Dit is niet gelukt en dat duidt op een zogenaamd hystereseverschijnsel. Dit verschijnsel is ook in andere onderzoeken waargenomen. In het overgangsgebied bij een verval van 1,25 m in T20 zijn een dekneer en een bodemneer tegelijkertijd opgetreden. Uit de meetresultaten volgt dat het omslagpunt niet bij $a/b = 1$ ligt maar bij $a/b = 0,15$ à $0,32$. Deze afwijking wordt kwalitatief verklaard doordat de as van de straal tussen dorpelbalk en schuif schuin naar beneden gericht is en door de aanwezigheid van het drempeltalud, zie figuur 22. De schuin naar beneden gerichte straal

buigt minder gemakkelijk naar het wateroppervlak af dan een horizontaal gerichte straal. Uit een deelonderzoek van de aspecten bij een geleidelijke sluiting, M731 deel I [9] blijkt dat bij een dam met een brede kruin en taluds van 1:2 zowel de ruwheid als de doorlatendheid van de dam grote invloed hebben op de overgang van een stroombeeld met een bodemneer naar een toestand met een duikende straal. Toename van beide grootheden heeft een vergroting van het verval tot gevolg, waarbij de overgang plaatsvindt.

5.4 Vergelijking met het onderzoek Q 520.10 in het detailmodel Oosterschelde

De resultaten van het gevoeligheidsonderzoek zijn met enkele resultaten van het onderzoek Q 520.10 [3] in het detailmodel van de stroomgeul Roompot vergeleken. Van dat onderzoek zijn de resultaten van proef T55 betreffende de schade-vervalmetingen in de poortjes R25 en R26 gebruikt. In deze proef is een open stormvloedkering met de goede steensortering 300-1000 kg als top laag van de overgangskonstruktie onderzocht.

Uit de gemeten schade-vervalrelatie is het kritieke verval voor het begin van schade bepaald en dat verval is vergeleken met het kritieke verval dat met (15) is berekend:

poortje	Δh_{cr} gemeten in M1001 m	Δh_{cr} berekend met (15) m
-		
R25	2,50	4,30
R26	1,60	4,10

Tabel I Δh_{cr} berekend en gemeten.

Voor de verschillen tussen Δh_{cr} berekend en gemeten wordt in het volgende een mogelijke verklaring gegeven. Hierbij is het uitgangspunt dat het kritieke verval in de proeven in de Tussenpasgoot met (15) redelijk nauwkeurig kan worden berekend.

Deze verschillen kunnen door de volgende invloeden en effecten worden verklaard:

verschil in Δh m

tijdsduur van de proef

In T55 is elk verval 4,5 uur gestroomd en in de proeven in de Tussenpadgoot gemiddeld 1,25 uur. In figuur 8 is de invloed van de tijdsduur op het kritieke verval weergegeven, nadat de schade voor de initiële schade is gecorrigeerd:

+ 0,80 à 0,90

definitie van het verval

Het verval in de Tussenpadgoot komt overeen met het lokale verval in de stroomgeul Roompot. Uit het onderzoek Q 455 blijkt dat het verval in de werkhavens gelijk of groter is dan het verval in de stroomgeul: $1,49/1,41 \times 2,50 = 0,15$ m

0 à - 0,15

dorpelliging

De positie van de dorpels is in het detailmodel minder nauwkeurig dan in de Tussenpadgoot

~ + 0,20 à 0,30

schematisatie van de dorpel

Door de vellingkant aan de dorpelbalk is wellicht wat meer schade in het detailmodel ontstaan

~ + 0 à 0,30

kontraktie van de stroming

In het detailmodel treedt benedenstrooms van de kering een kontraktie van de stroom op. Stel dat boven de overgangskonstruktie een kontraktie van 3 à 5% optreedt dan leidt tot een verschil van 5 à 10% in Δh :

+ 0,10 à 0,25

overige effecten en invloeden

Dat wil zeggen een 3-D-faktor van 1,1 à 1,3 Δh in het detailmodel.

	<u>+ 0,70 à 0,20</u>
totaal	+ 1,80 à 1,80

Bij de overige effecten en invloeden kan gedacht worden aan het volgende: de schuine aanstroming van het poortje in het detailmodel, een eventueel verschil in afvoercoëfficiënt, kleine variaties in de benedenwaterstand (van NAP-0,20 m tot NAP-0,25 m), een eventueel temperatuursverschil van het water, waardoor de viscositeit van het water verandert, de doorlatendheid van de drempel is in het detailmodel tijdens de uitvoering van het onderzoek afgenomen, kleine spreiding in ΔD_n (5 à 10%) en de bodemligging van de overgangskonstruktie in het detailmodel is niet horizontaal zoals in de Tussenpadgoot. Al deze effecten en invloeden hebben afzonderlijk een geringe invloed op Δh_{cr} en zijn mede daardoor moeilijk te kwantificeren.

Naast de reeds genoemde effecten en invloeden hebben in R26 de dorpelafstap en de afwijkende positie van de dorpel een invloed van ongeveer 0,70 m op Δh_{cr} . Uit deze verklaring van het verschil in het kritieke verval volgt dat indien alle genoemde extra invloeden en effecten voldoende nauwkeurig berekend kunnen worden, dat dan het kritieke verval in het detailmodel met een aanvaardbare nauwkeurigheid met formule (15) berekend kan worden. Uit het bovenstaande blijkt dat het verschil in proefduur een zeer grote invloed heeft op het kritieke verval.

6. Aanbevelingen voor verder onderzoek

Naar aanleiding van de resultaten het gevoeligheidsonderzoek worden de volgende aanbevelingen voor een voortgezet onderzoek gedaan, met het doel het inzicht in de stabiliteit van bodemverdedigingen van stortsteen benedenstrooms van konstrukties te vergroten:

- In de huidige ontwerpmethode van een toplaag wordt een deel van de veiligheid in de sterkte en een deel in de belasting verwerkt. Met betrekking tot de sterkte van de toplaag zijn in een fysisch modelonderzoek proeven met verschillende steensorteringen gewenst. Voor het vergelijken van de resultaten van deze proeven is de bewegingsgraad zeer geschikt.
Ten behoeve van een vergroting van het inzicht in de bewegingsgraad van de toplaag wordt een nadere analyse van de meetresultaten met betrekking tot de volgende aspecten aanbevolen:
 - de gemiddeld afgelegde afstand van een verplaatste steen,
 - de verdeling van de schade over de overgangskonstruktie als funktie van de afstand tot de as van de stormvloedkering en de afstand tot het reattachementpoint van de hoofdstroming,
 - de invloed van de turbulentie op de bewegingsgraad.
- Bij de beoordeling van de stabiliteit van een toplaag is behoefte aan een eenduidige en scherpe definitie van het begin van schade en het bezwijken van de toplaag. Aanbevolen wordt te onderzoeken of de definitie van de schadeconcentratie op een bepaalde waarde van de bewegingsgraad kan worden gebaseerd. De probabilistische ontwerpmethode van de toplagen kan met de resultaten van het onderhavige onderzoek verder worden ontwikkeld. De te verwachten schade volgt uit de combinatie van de frequentie-overschrijdingslijn van het verval met de complete schade-vervallijn, waarbij speciale aandacht aan de duur van de belasting en het type stroombeeld kan worden besteed.
- Het al dan niet duiken van de straal heeft een grote invloed op de stabiliteit van de toplaag. Aanbevolen wordt door nader onderzoek het inzicht in dit verschijnsel te vergroten.
- De formule voor de berekening van het kritieke verval is op de min of meer klassieke formules voor een uniforme stroming gebaseerd. In een complexe stroming achter een konstruktie treden ten opzichte van een uniforme stroming afwijkingen op in het kritieke verval. Deze afwijkingen zijn in

de verschillende coëfficiënten van deze formule verdisconteerd. De resultaten van het gevoeligheidsonderzoek bevestigen het inzicht dat de turbulentie in de bodemmeer grote invloed heeft op de waarde van de coëfficiënten in die formule. Het verdient aanbeveling deze invloed te kwantificeren door het toepassen van rekenmodellen van de waterbeweging, waarmee de karakteristieke grootheden van de turbulentie berekend kunnen worden. Met het toepassen van rekenmodellen wordt ook het inzicht in andere aspecten vergroot, bijvoorbeeld de plaats van maximale schade en de plaats van het reattachementpoint. Tevens wordt aanbevolen het inzicht in grootschalige turbulente-verschijnselen (bursts) benedenstrooms van konstrukties te vergroten.

- Het inzicht in de resultaten van het gevoeligheidsonderzoek kunnen met een prototypeonderzoek worden vergroot. Het verdient aanbeveling zo'n prototypeonderzoek zorgvuldig voor te bereiden.

LITERATUUR

- 1 Waterloopkundig Laboratorium
Stormvloedkering Oosterschelde; dimensionering van de toplaag van de drempel en de overgangskonstructie
M 1451/M 1702/M 1750 verslag modelonderzoek
Delft, 1981.
- 2 Waterloopkundig Laboratorium
Stormvloedkering Oosterschelde; overwegingen ten aanzien van de stabiliteit van de overgangskonstructie zeezijde bij open kering
Q 520/Q 254, nota literatuuronderzoek
Delft, 1986.
- 3 Waterloopkundig Laboratorium
Stormvloedkering Oosterschelde; aanvullend stabiliteitsonderzoek voor verschillende bouwfases in de stroomgeul Roompot van het detailmodel Oosterschelde
Q 455/Q 520.10, concept verslag modelonderzoek
Delft, 1987.
- 4 Waterloopkundig Laboratorium
Compartimenteringswerken Oesterdam; steenstabiliteit van afsluitdammen bij stroomaanval, methode van verticale opbouw
M 1741 deel I verslag literatuuronderzoek
Delft 1981.
5. Waterloopkundig Laboratorium
Stroombestendigheid sluitgatrempel,
M711 deel IV Stabiliteit los materiaal achter een dam met een brede kruin
Verslag modelonderzoek
Delft, 1966.
6. Waterloopkundig Laboratorium
Stormvloedkering Oosterschelde, aanvullend onderzoek drempel en overgangskonstructie
M2169, verslag modelonderzoek
Delft, 1985

LITERATUUR (vervolg)

7. Yalin, M.S.,
Mechanics of sediment transport
Pergamon Press, Oxford, 1977
8. Rijkswaterstaat
Direktie Sluizen en Stuwen, Bouwbureau Stormvloedkering Oosterschelde
Nota: Ontwerp drempel en overgangskonstruktie
31 DREM-N-86033, december 1986.
9. Waterloopkundig Laboratorium
Geleidelijk sluiting,
M731 deel I Invloed van de ruwheid en doorlatendheid van een dam op het
voorkomen van een duikende straal
Delft, 1963
10. Waterloopkundig Laboratorium
Stabiliteits stortsteen onmiddellijk na konstrukties
M1834/S543 deel I en II
Delft, 1982
11. International course in hydraulic engineering, H.N.C. Breusers
Lecture notes on sediment transport 1
Delft, 1986
12. Neill, C.R. en M.S. Yalin
Quantitative definition of beginning of bed movement
Journal of the Hydraulics Division,
Proc ASCE Vol. 95, No HY1, January 1969, pp 585-588
13. Neill, C.R.
A re-examination of the beginning of movement for coarse granular bed
materials
Hydraulics Research Station, Wallingford, June 1968

proef	dorpel niveau	percentage schuif dicht	beneden- waterstand	toplaag niveau	overgangskon- struktie
-	m t.o.v. NAP	%	m t.o.v. NAP	m t.o.v. NAP	materiaal kg
1	- 8,5	0	-0,20	-26,2	300-1000
2	- 8,5	0	-0,20	-26,2	1000-3000
3	- 8,5	0	-0,20	-26,2	300-1000 ¹⁾
4	- 8,5	0	-0,20	-26,2	300-1000 ¹⁾
5	- 9,5	0	0	-27,2	300-1000
6	- 8,5	0	0	-26,2	300-1000
7	- 8,5	0	-1,00	-26,2	300-1000
8	- 7,5	0	0	-25,2	300-1000
9	- 7,5	0	-1,00	-25,2	300-1000
10	- 5,5	0	0	-23,2	300-1000
11	- 5,5	0	-1,00	-23,2	300-1000
12	- 8,5	50	0	-26,2	300-1000
13	- 8,5	0	0	-23,2	300-1000
14	- 8,5	25	0	-23,2	300-1000
15	- 8,5	33	0	-23,2	300-1000
16	- 8,5	50	0	-23,2	300-1000
17	- 8,5	62	0	-23,2	300-1000
18	- 8,5	50	0	-23,2	300-1000
19	- 8,5	80	0	-23,2	300-1000
20	- 8,5	33	0	-23,2	300-1000
21	- 8,5	0	0	-20,2	300-1000
22	- 8,5	50	0	-20,2	300-1000
23	- 4,5	0	0	-20,2	300-1000
24	- 4,5	25	0	-20,2	300-1000
25	- 4,5	33	0	-20,2	300-1000
26	- 4,5	50	0	-20,2	300-1000
27	- 4,5	63	0	-20,2	300-1000
28	- 8,5	0	-0,20	-26,2	300-1000 ¹⁾
29	-10,5	0	0	-28,2	300-1000
30	-10,5	25	0	-28,2	1000-3000
31	-10,5	33	0	-28,2	1000-3000
32	-10,5	50	0	-28,2	1000-3000
33	-10,5	70	0	-28,2	1000-3000
34	- 8,5	0	-0,20	-23,4	300-1000*
35	- 8,5/-7,5	0	-0,20	-23,4	300-1000*
36	- 8,5	0	-0,20	-23,4	300-1000*
37	- 8,5	0	-0,15 à -0,20	-20,2	300-1000
38	- 8,5/-7,5	0	-0,15 à -0,20	-20,2	300-1000
39	- 8,5	75/25	0 à +0,10	-20,2	300-1000
40	- 8,5	85/15	0 à -0,05	-20,2	300-1000
41	- 8,5/-7,5	75/25	0	-20,2	300-1000
42	- 8,5/-7,5	0	-20,2	300-1000	

* steensortering uit Q 455

1) duurproef

Tabel 1 Programma van de schadeproeven

proef	dorpel niveau m t.o.v. NAP	percentage schuif dicht	beneden waterstand m t.o.v. NAP	verval m	bodemligging overgangskonstructie m t.o.v. NAP
T43.1	-8,5/-7,5	0	0	1,30	-20,2
T43.2	-8,5/-7,5	0	0	1,50	-20,2
T43.3	-8,5/-7,5	0	0	1,70	-20,2
T43.4	-8,5/-7,5	0	0	1,90	-20,2
T43.5	-8,5/-7,5	0	0	2,20	-20,2
T43.6	-8,5/-7,5	0	0	2,70	-20,2
T44.1	-8,5	0	0	1,18	-20,2
T44.2	-8,5	0	0	1,63	-20,2
T45.1	-8,5	25	0	1,20	-20,2
T45.2	-8,5	25	0	1,60	-20,2
T46.1	-8,5	50	0	1,20	-20,2
T46.2	-8,5	50	0	1,61	-20,2
T47.1	-8,5	75	0	1,20	-20,2
T47.2	-8,5	75	0	1,60	-20,2

Tabel 2 Programma van de proeven, waarin stroomsnelheden zijn gemeten

stortsteen prototype stortsteen model

sortering kg (ton)	ΔD_n m	D_{10} 10^{-3} m	D_{50} 10^{-3} m	D_{90} 10^{-3} m	M_{50} 10^{-3} kg	ρ_s kg m ⁻³	ΔD_n m	$\frac{\Delta D_n \text{ (model)}}{\Delta D_n \text{ (prot)}}$ -
5-40	0,285-0,31	2,75	3,45	3,75	-	-	-	-
10-60	0,38	3,65	4,6	5,4	-	-	-	-
300-1000	1,14	10,8	12,0	13,2	2,9	3040	0,020	1,05
		7,2	8,8	10,2	0,8 à 1,1	2620	0,011	0,60 *
1-3 ton	1,62	13,2	15,2	17,5	5,8 à 6,6	2997	0,026	0,96
3-6 ton	2,18	19,0	21,0	21,7	15,3	3034	0,035	0,96
6-10 ton	2,62	21,5	25,0	27,5	25,0	3030	0,041	0,94

* materiaal uit onderzoek Q 455

Tabel 3 Karakteristieken van de steensorteringen

deelnummer proef	T1		T2		T3		T4		T5		T6		T7		T8	
	Δh m	h_{ben} m	Δh m	h_{ben} m	Δh m	h_{ben} m	Δh m	h_{ben} m	Δh m	h_{ben} m	Δh m	h_{ben} m	Δh m	h_{ben} m	Δh m	h_{ben} m
.1	1,20	-0,20	2,98	-0,14	2,21	-0,19	5,22	-0,18	2,59	-0,18	2,78	-0,01	2,33	-1,03	2,17	+0,02
.2	1,50	-0,20	4,09	-0,20	4,20	-0,23	-	-	2,97	+0,01	4,30	-0,02	2,98	-1,01	3,15	+0,01
.3	1,86	-0,24	4,32	-0,23	4,20	-0,23	-	-	3,68	+0,03	4,65	+0,15	3,54	-1,01	4,33	-0,04
.4	2,22	-0,18	4,45	-0,15	-	-	5,21	-0,14	4,52	-0,07	5,15	0,00	4,13	-0,99	5,90	+0,06
.5	2,43	-0,27	5,17	-0,22	4,16	-0,20	-	-	4,86	-0,05	5,81	-0,02	5,44	-0,98		
.6	2,67	-0,24	5,74	-0,25	-	-	5,20	-0,14	7,06	+0,03			6,10	-1,00		
.7	2,97	-0,24			-	-	-	-								
.8	3,24	-0,27			4,17	-0,20										
.9	4,14	-0,27														

Tabel 4a Vervallen en benedenwaterstanden

deelnummer proef	T9		T10		T11		T12		T13		T14		T15		T16	
	Δh m	h_{ben} m	Δh m	h_{ben} m	Δh m	h_{ben} m	Δh m	h_{ben} m	Δh m	h_{ben} m	Δh m	h_{ben} m	Δh m	h_{ben} m	Δh m	h_{ben} m
.1	2,44	-1,05	2,32	-0,02	2,48	-1,00	1,10	-0,12	0,98	-0,01	2,39	-0,08	1,92	0,00	1,21	-0,07
.2	2,88	-1,02	3,01	+0,02	3,00	-1,03	1,69	-0,04	1,15	+0,02	3,10	+0,01	1,22	+0,07	1,89	-0,03
.3	3,60	-1,02	4,19	+0,08	3,40	-1,01	2,21	+0,06	1,43	+0,04	3,60	+0,09	1,49	-0,02	2,59	-0,01
.4	3,90	-0,98	4,91	+0,03	3,70	-1,03	2,77	+0,02	1,93	+0,02	4,27	-0,07	1,78	-0,01		
.5	4,13	-1,02	5,91	-0,01	3,89	-1,01	3,41	+0,05	2,31	-0,02	4,63	-0,01	2,24	-0,01		
.6	6,36	-1,04			5,24	-0,92			2,79	+0,02	5,30	+0,02	2,63	+0,11		
.7					6,28	-0,89			4,32	+0,05	6,01	+0,03	3,40	-0,03		
.8					6,96	-0,94			5,57	0,00						
.9																

Tabel 4b Vervallen en benedenwaterstanden

deelnummer proef	T17		T18		T19		T20		T21		T22		T23		T24	
	Δh m	h_{ben} m	Δh m	h_{ben} m	Δh m	h_{ben} m	Δh m	h_{ben} m	Δh m	h_{ben} m	Δh m	h_{ben} m	Δh m	h_{ben} m	Δh m	h_{ben} m
. 1	1,34	+0,02	1,12	-0,03	2,83	-0,01	1,36	-0,02	1,12	+0,05	0,83	+0,04	2,04	-0,01	1,52	+0,01
. 2	1,98	-0,01	1,82	+0,03	4,40	+0,12	2,10	-0,04	1,41	-0,08	1,31	0,00	2,35	-0,01	2,97	+0,02
. 3	2,63	-0,01					2,59	+0,02	1,73	-0,08	1,61	+0,01	4,27	-0,05	4,61	+0,02
. 4	3,22	-0,03					1,78	+0,07	1,85	+0,01	1,99	0,00	5,10	-0,04	5,68	-0,05
. 5	3,98	-0,01					1,94	+0,01	2,23	+0,02	2,61	0,00				
. 6							2,29	+0,03	2,40	+0,09						
. 7							3,01	+0,04	2,66	+0,01						
. 8							3,40	+0,02	2,86	+0,03						
. 9							4,08	-0,03								
.10							1,19	-0,08								
.11							1,90●	+0,02								
.12							1,25●	-0,07								

● experimenten naar het omslaan van het stroombeeld

Tabel 4c Vervallen en benedenwaterstanden

deelnummer proef	T25		T26		T27		T28		T29		T30		T31		T32	
	Δh m	h_{ben} m	Δh m	h_{ben} m	Δh m	h_{ben} m	Δh m	h_{ben} m	Δh m	h_{ben} m	Δh m	h_{ben} m	Δh m	h_{ben} m	Δh m	h_{ben} m
.1	2,09	-0,03	0,77	-0,77	1,76	-0,01	2,72	-0,20	1,58	0,00	2,08	+0,02	1,13	-0,07	1,97	+0,01
.2	1,51	+0,02	1,83	+0,02	3,49	-0,03	2,70	-0,18	1,88	+0,04	2,15	+0,06	1,49	-0,01	0,86	+0,01
.3	2,20	+0,01	3,23	+0,06			3,10	-0,23	2,51	+0,01	3,21	+0,04	1,75	0,00	1,32	-0,02
.4	3,46	-0,01	4,20	-0,02			3,05	-0,16	2,63	+0,04	3,91	-0,02	2,58	+0,01	1,65	+0,02
.5							3,04	-0,186	2,72	+0,10	5,12	+0,04				
.6							3,40	-0,20	5,00	+0,08						
.7							3,10	-0,25								
.8							3,07	-0,29								
.9							3,07	-0,22								

Tabel 4d Vervallen en benedenwaterstand

deelnummer proef	T33		T34		T35		T36		T37		T38		T39		T40		T41	
	Δh m	h_{ben} m	Δh m	h_{ben} m	Δh m	h_{ben} m	Δh m	h_{ben} m	Δh m	h_{ben} m	Δh m	h_{ben} m	Δh m	h_{ben} m	Δh m	h_{ben} m	Δh m	h_{ben} m
.1	1,77	+0,02	0,58	-0,01	-	-	1,23	-0,25	1,51	-0,28	1,11	-0,20	1,57	+0,02	1,67	+0,03	1,50	-0,01
.2	2,67	+0,01	0,81	-0,23	0,91	-0,20	1,63	-0,12	1,96	-0,18	1,34	-0,18	2,20	-0,06	2,42	+0,01	2,00	+0,03
.3	3,54	0,00	0,99	-0,17	1,31	-0,17	2,09	-0,29	2,60	-0,10	1,60	-0,19	3,06	+0,02	3,09	-0,08	2,22	+0,01
.4			1,23	-0,20	1,75	-0,14	2,67	-0,26	2,81	-0,15	2,02	-0,14	4,22	+0,11	3,62	+0,01	3,38	-0,01
.5			1,46	-0,22	2,23	-0,17	3,18	-0,20	3,68	-0,14	3,00	-0,14			4,30	+0,01	4,43	+0,,1
.6			1,84	-0,14	2,78	-0,20	3,41	-0,13	4,35	-0,18	3,58	-0,14						
.7			2,06	-0,16	3,31	-0,02	3,79	-0,14	5,00	-0,13	4,42	-0,20						
.8			2,43	-0,16														
.9			3,16	+0,05														

Tabel 4e Vervallen en benedenwaterstand

nr.	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8	T9	T10	T11	T12	T13
.1	0	6	0	61	10	6	0	6	0	0	0	1	0
.2	0	14	10	95	28	46	9	20	0	5	1	14	2
.3	0	13	34	123	47	86	22	38	8	18	3	45	1
.4	0	21	47	150	90	152	42	121	12	33	4	84	4
.5	4	32	57	161	168	275	99		28	79	19	212	12
.6	8	54	76	166	386		263		176		71		24
.7	13		82	204							87		95
.8	28		94								199		440
.9	54												

Tabel 5a Schade totaal aantal verplaatste stenen, van de overgangskonstruktie

nr.	T14	T15	T16	T17	T18	T19	T20	T21	T22	T23	T24	T25
.1	0	24	4	0	2	4	0	0	4	0	0	6
.2	17	24	17	4	14	26	55	3	4	5	2	6
.3	25	29	63	10			100	10	6	14	2	6
.4	36	36		34				13	11	44	6	25
.5	47	66		128				13	62			
.6	58	145						15				
.7	111	187						19				
.8								41				
.9												

Tabel 5b Schade totaal aantal verplaatste stenen van de overgangskonstruktie

nr.	T26	T27	T28	T29	T30	T31	T32	T33	T34	T35	T36	T37
.1	0	0	0	3	0	0	24	0	0	3	5	0
.2	0	4	0	3	4	9	-	7	2	4	35	5
.3	3		15	6	4	21	-	47	5	9	59	24
.4	10		29	15	10	45	26		11	24	196	45
.5			31	26					23	62	417	85
.6			37	109					60	155	n.g.	198
.7			43						94	220	n.g.	539
.8			46						171			
.9			51						407			

n.g. = niet geteld

Tabel 5c Schade totaal aantal verplaatste stenen op overgangskonstructie

nr.	T38	T39	T40	T41	T42
.1	0	11	0	5	26
.2	4	13	0	19	59
.3	8	20	2	23	153
.4	11	38	27	30	267
.5	36		34	-	365
.6	75				
.7	249				
.8					
.9					

Tabel 5d Schade totaal aantal verplaatste
stenen van de overgangskonstructie

proef	begin van bewegen 1) Δh_{cr} (m)	begin van bewegen 2) Δh_{cr} (m)	bezwijken toplaag Δh (m)
1	3,20	3,60	-
2	4,90	5,50	-
3	-	-	-
4	-	-	-
5	2,60	3,45	6,0 à 7,0
6	3,00	3,40	-
7	3,10	4,25	6,1
8	2,70	4,25	-
9	4,00	4,40	-
10	3,80	5,00	-
11	4,60	4,60	7,00
12	1,70		~3,50
13	2,60	3,00	5,20
14	3,90		>>6,00
15	1,90	1,85	3,40
16	1,60	1,60	>>3,00
17	3,00		4,00
18	1,65	1,65	-
19	3,65		-
20	~1,60		> 2,60
21	2,70	2,85	-
22	2,05		~2,60
23	3,50		> 5,10
24	±6,00		-
25	2,85		-
26	3,40		4,20
27	~3,10		-
28	-		-
29	2,60	2,90	~5,00
30	>5,10		-
31	1,60		2,60
32	1,40		-
33	2,70		3,60
34	1,40	1,65	> 3,20
35	1,60	1,90	-
36	1,30	1,85	> 3,20
37	2,20	3,25	~5,00
38	2,30	3,00	4,40
39	3,30		~4,30
40	~4,50		-
41	~3,60		-
42	~2,00		~4,40

begin van bewegen is per definitie het gemeten transport van 10 stenen per 75 minuten, 1) uit cumulatieve schade 2) uit gekorrigeerde schadetoename

Tabel 6 Het verval bij begin van bewegen en bij bezwijken van de toplaag

Verval: 2,81 m Ben. ws.: ,01 m t.o.v. NAP x 14,40 (m t.o.v. as SVK0)				
z (m t.o.v. bodem)	R		L	
	ugem m/s	u' m/s	ugem m/s	u' m/s
,90	-,81	,33	-,70	,37
1,80	-,96	,40	-,82	,38
2,70	-,94	,36	-,81	,30
5,70	-,57	,46	-,45	,67
	,25	,46	,46	,67
8,70	2,00	1,26	3,56	1,34
11,70	6,27	1,14	7,04	,58
14,10	6,88	,56	7,11	,56

Tabel 7a Stroomsnelheden T43.3

Verval: 2,81 m Ben. ws.: ,02 m t.o.v. NAP x 26.40 (m t.o.v. as SVKO)				
z (m t.o.v. bodem)	R		L	
	ugem m/s	u' m/s	ugem m/s	u' m/s
,90	-,77	,43	-,74	,36
1,80	-1,06	,46	-,87	,50
2,70	-1,28	,57	-,88	,47
6,30	-1,09	,63	-,65	,67
9,90	-,29	1,02	1,49	1,15
13,50	3,84	1,39	5,13	1,24
17,10	7,00	,57	7,16	,34

Tabel 7b Stroomsnelheden T43.3

Verval: 2,81 m				
Ben. ws.: ,02 m t.o.v. NAP				
x 49,80 (m t.o.v. as SVKO)				
z (m t.o.v. bodem)	R		L	
	ugem m/s	u' m/s	ugem m/s	u' m/s
,90	-,88	,57	,21	,62
			-,78	
1,80	-,84	,60	-,70	,63
2,70	-,81	,71	,39	,63
6,30	-,29	,95	-,30	1,48
	,94	,95	1,07	
9,90	2,56	1,38	3,22	1,65
13,50	5,40	1,33	6,10	1,06
15,30	6,23	,95	6,37	,64

Tabel 7c Stoomsnelheden T43.3

Verval: 3,20 m				
Ben. ws.: ,01 m t.o.v. NAP				
x 14,40 (m t.o.v. as SVK0)				
z (m t.o.v. bodem)	R		L	
	ugem m/s	u' m/s	ugem m/s	u' m/s
.90	-.82	.33	-.63	.33
1.80	-.99	.40	-.77	.28
2.70	-1.00	.36	-.75	.34
5.70	-.65	.70	-.27	.78
	.29	.63	.60	.86
8.70	2.75	1.43	5.09	1.33
11.70	7.17	.87	7.61	.39
13.50	7.86	.37		

Tabel 8 Stroomsnelheden T43.4

Verval: 3,20 m				
Ben. ws.: ,01 m t.o.v. NAP				
x 25.80 (m t.o.v. as SVK0)				
z (m t.o.v. bodem)	R		L	
	ugem m/s	u' m/s	ugem m/s	u' m/s
,90	-,74	,46	-,81	,37
1,80	-1,06	,43	-1,01	,49
2,70	-1,34	,55	-1,23	,56
6,30	,20	,68	-,67	,77
	-,99	,67	,32	,73
9,90	-,27	1,03	2,38	1,28
	1,12	1,07		
13,50	4,02	1,46	5,97	1,17
17,10	7,33	,58	7,50	,30

Tabel 9 Stroomsnelheden T43.4

Verval: 3,65 m Ben. ws.: ,02 m t.o.v. NAP x 14,40 (m t.o.v. as SVKO)				
z (m t.o.v. bodem)	R		L	
	ugem m/s	u' m/s	ugem m/s	u' m/s
,90	-,77	,02	-,61	,37
1,80	-,87	,24	-,88	,38
2,70	-,87	,19	-,89	,39
5,70	-,44	,37	-,28	1,03
	,44	,42	,86	1,02
8,70	4,07	,81	5,68	1,52
11,70	6,88	,61	7,21	,54

Tabel 10 Stroomsnelheden T43.5

Verval: 3,65 m				
Ben. ws.: ,02 m t.o.v. NAP				
x 25,80 (m t.o.v. as SVK0)				
z (m t.o.v. bodem)	R		L	
	ugem m/s	u' m/s	ugem m/s	u' m/s
,90	-,75	-,20	-,84	-,17
1,80	-1,22	-,23	-,97	-,20
2,70	-1,10	-,36	-,99	-,25
6,30	-,75	-,43	-,76	-,38
	,32	,40	,34	,43
9,90	1,54	,62	-,19	-,75
			2,42	,67
13,50	4,58	,69	5,90	,64
15,30	6,71	,55	6,98	,33

Tabel 11 Stroomsnelheden T43.5

Verval: 3,65 m				
Ben. ws.: ,02 m t.o.v. NAP				
x 49,80 (m t.o.v. as SVK0)				
z (m t.o.v. bodem)	R		L	
	ugem m/s	u' m/s	ugem m/s	u' m/s
,90	-,80	-,37	-,79	-,33
	,35	,41	,24	,34
1,80	-,49	-,43	-,64	-,36
	,33	,42	,27	,41
2,70	-,62	-,41	-,58	-,43
	,43	,36	,40	,36
6,30	-,25	-,67	-,27	-,76
	1,14	,49	1,43	,65
9,90	3,85	,90	-,21	-,91
			4,32	,87
13,50	6,19	,70	6,48	,50
14,10	6,35	,58	6,85	,35

Tabel 12 Stroomsnelheden T43.5

positie dorpelbalk	proef nummer	verval waarbij de bovenbalk geraakt wordt
NAP - m	-	m
- 5,5	T10	2,30
- 8,5	T2,T6,T13, T21, T28	2,70 - 2,80
- 9,5	T5	3,70
-10,5	T29	5,00

benedenwaterstand NAP - 0 à 0,20 m

Tabel 13 Het verval waarbij de bovenbalk geraakt
wordt, bij één bepaalde benedenwaterstand

proef T1, T4				
verval	schade	schade toename	korrektie initiële schade	korrektie tijdsduur
Δh m	-	-	-	-
1,20	0	0	0	0
1,50	0	0	0	0
1,86	0	0	0	0
2,22	0	0	0	0
2,43	4	4	2	1,5
2,67	8	4	2	1,5
2,97	13	5	3	2,3
3,24	28	15	8	6,1
4,14	54	26	19	14,6
5,21	-	22	22	22

Tabel 14 Korrektie schade T1, T4

proef T2				
verval	schade	schade toename	korrektie initiële schade	korrektie tijdsduur
Δh m	-	-	-	-
2,98	6	6	3	2,1
4,09	14	8	4	2,8
4,32	13	-1	0	0
4,45	21	8	4	2,8
5,17	32	11	6	4,3
5,74	54	22	19	13,6

Tabel 15 Korrektie schade T2

proef T6				
verval	schade	schade toename	korrektie initiële schade	korrektie tijdsduur
Δh m	-	-	-	-
2,78	6	6	3	2,6
4,30	46	40	23	20,2
4,65	86	40	40	35
5,15	152	66	66	58
5,81	275	123	123	108

Tabel 16 Korrektie schade T6

proef T7				
verval	schade	schade toename	korrektie initiële schade	korrektie tijdsduur
Δh m	-	-	-	-
2,33	0	0	0	0
2,98	9	9	5	3,5
3,54	22	13	7	4,9
4,13	42	20	10	7,0
5,44	99	57	57	40,1
6,10	263	164	164	115,5

Tabel 17 Korrektie schade T7

proef T8				
verval Δh m	schade	schade toename	korrektie initiële schade	korrektie tijdsduur
	-	-	-	-
2,17	6	6	3	2,5
3,15	20	14	7	5,8
4,33	38	18	9	7,5
5,90	121	83	82	68,3

Tabel 18 Korrektie schade T8

proef T9				
verval Δh m	schade	schade toename	korrektie initiële schade	korrektie tijdsduur
	-	-	-	, -
2,44	0	0	0	0
2,88	0	0	0	0
3,60	8	8	4	3,2
3,90	12	4	2	1,6
4,13	28	16	8	6,4
6,36	176	148	142	114,5

Tabel 19 Korrektie schade T9

proef T10				
verval	schade	schade toename	korrektie initiële schade	korrektie tijdsduur
Δh m	-	-	-	-
2,32	0	0	0	0
3,01 2)	5	5	3	2,4
4,19	18	13	7	5,5
4,91	33	15	8	6,4
5,91	79	46	41	32,5

Tabel 20 Korrektie schade T10

proef T11				
verval	schade	schade toename	korrektie initiële schade	korrektie tijdsduur
Δh m	-	-	-	-
2,48	0	0	0	0
3,00	1	1	0	0
3,40	3	2	1	0,8
3,70 ●2)	4	1	0	0
3,89	19	15	8	6,7
5,24	71*1)	52	42	35
6,28	87	16	16	13,3
6,96	199	112	112	93,3

*1) burst

●2) stroom ligt aan bovenbalk

Tabel 21 Korrektie schade T11

proef T13				
verval	schade	schade toename	korrektie initiële schade	korrektie tijdsduur
Δh m	-	-	-	-
0,98	0	0	0	0
1,15	2	2	1	0,8
1,43	1	-1	0	0
1,93	4	3	2	1,5
2,31	12	8	4	3,1
2,79	24	12	6	4,6
4,32	95	71	63	48,5
5,57	440	345	345	265,4

Tabel 22 Korrektie schade T13

proef T15				
verval	schade	schade toename	korrektie initiële schade	korrektie tijdsduur
Δh m	-	-	-	-
1,92	24	2	-	-
1,22	24	0	0	0
1,49	29	5	3	3
1,78	36	7	4	3
2,24	66	30	15	15
2,63	145	79	79	87
3,40	187	42*	42	42

* groot gat

Tabel 23 Korrektie schade T15

proef T16				
verval	schade	schade toename	korrektie initiële schade	korrektie tijdsduur
Δh m	-	-	-	-
1,21	4	4	2	2
1,82	17	13	7	7
2,59	63	46	34	34

Tabel 24 Korrektie schade T16

proef T18				
verval	schade	schade toename	korrektie initiële schade	korrektie tijdsduur
Δh m	-	-	-	-
1,12	2	2	1	1
1,82	14	12	6	6

Tabel 25 Korrektie schade T18

proef T20				
verval	schade	schade toename	korrektie initiële schade	korrektie tijdsduur
Δh m	-	-	-	-
1,36	-	-	-	-
2,10	55	55	35	27
2,59	100	45	45	32

Tabel 26 Korrektie schade T20

proef T21				
verval	schade	schade toename	korrektie initiële schade	korrektie tijdsduur
Δh m	-	-	-	-
1,12	0	0	0	0
1,41	3	3	2	1,8
1,73	10	7	4	3,6
1,85	13	3	2	1,8
2,23	13	0	0	0
2,40	15	2	1	0,9
2,66	19	4	2	1,8
2,86	41	22	11	10,0

Tabel 27 Korrektie schade T21

proef T35												
verval	schade			schade toename			korrektie initiële schade			korrektie tijdsduur		
m	-			-			-			-		
-	L	R	tot	L	R	tot	L	R	tot	L	R	tot
-	2	1	3	2	1	3	1	0	1	1	0	1
0,91	3	1	4	1	0	1	0	0	0	0	0	0
1,31	5	4	9	2	3	5	1	2	3	1	2	3
1,75	9	15	24	4	11	15	2	6	8	2	6	8
2,23	23	39	62	14	24	38	9	21	30	7,5	17,5	25
2,78			155			93			93			93
3,31			220			65			65			65

L = dorpelniveau NAP - 7,5 m

R = dorpelniveau NAP - 8,5 m

Tabel 28 Korrektie schade T35

proef T36												
verval	schade			schade toename			korrektie initiële schade			korrektie tijdsduur		
m	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	L	R	tot	L	R	tot	L	R	tot	L	R	tot
1,23	1	4	5	1	4	5	0	2	2	0	1,8	1,8
1,63	15	20	35	14	16	30	7	8	15	6	7	13
2,09	30	29	59	15	9	24	13	9	22	13	9	22
2,67	76	120	196	46	91	137	46	91	137	42	83	125
3,18			417			221			221			221

L = dorpelniveau NAP - 7,5 m

R = dorpelniveau NAP - 8,5 m

Tab 1 29 Korrektie schade T36

proef T37												
verval	schade			schade toename			korrektie initiële schade			korrektie tijdsduur		
m	L	R	tot	L	R	tot	L	R	tot	L	R	tot
1,51	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1,96	2	3	5	2	3	5	1	2	3	0,7	1,4	2,1
2,60	9	15	24	7	12	19	4	6	10	3,3	5	8,3
2,81	21	24	45	12	9	21	6	6	12	5	5	10
3,68	34	51	85	13	27	40	13	27	40	10	21	31
4,35			198			113			113			81
5,00			539			341			341			41

L = dorpelniveau NAP - 8,5 m

R = dorpelniveau NAP - 8,5 m

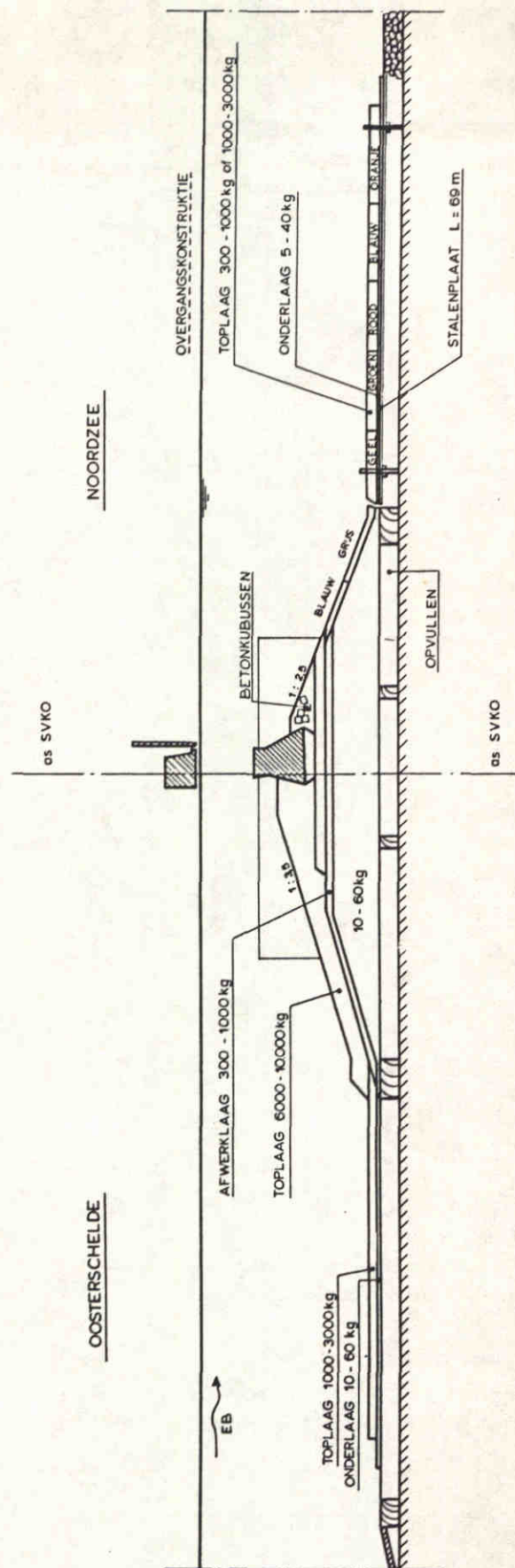
Tabel 30 Korrektie schade T37

proef T38												
verval	schade			schade toename			korrektie initiële schade			korrektie tijdsduur		
m	L	R	tot	L	R	tot	L	R	tot	L	R	tot
1,11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1,34	1	1	2	1	1	2	0	0	0	0	0	0
1,60	3	5	8	2	4	6	1	2	3	1	2	3
2,02	4	7	11	1	2	3	0	1	1	0	0,8	0,8
3,00	13	23	36	9	16	25	5	10	15	5	10	15
3,58	26	49	75	13	26	39	10	26	36	10	26	36
4,42	101	148	249	75	99	174	75	99	174	62,5	82,5	145

L = dorpelniveau NAP - 7,5 m

R = dorpelniveau NAP - 8,5 m

Tabel 31 Korrektie schade T38



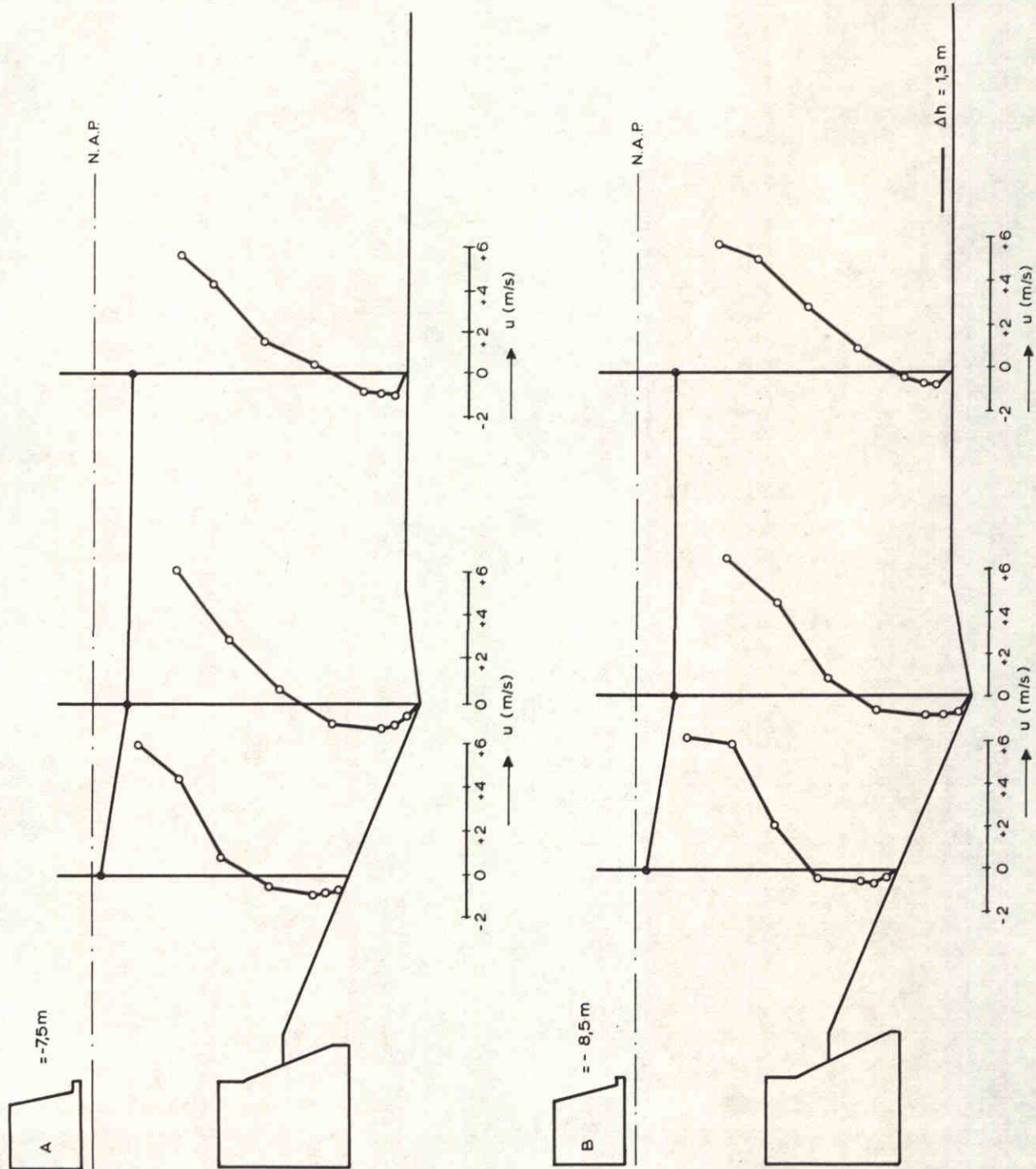
Z'JAANZICHT MODELOPSTELLING

SCHAAL 1:1200

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

Q 520

FIG. 1



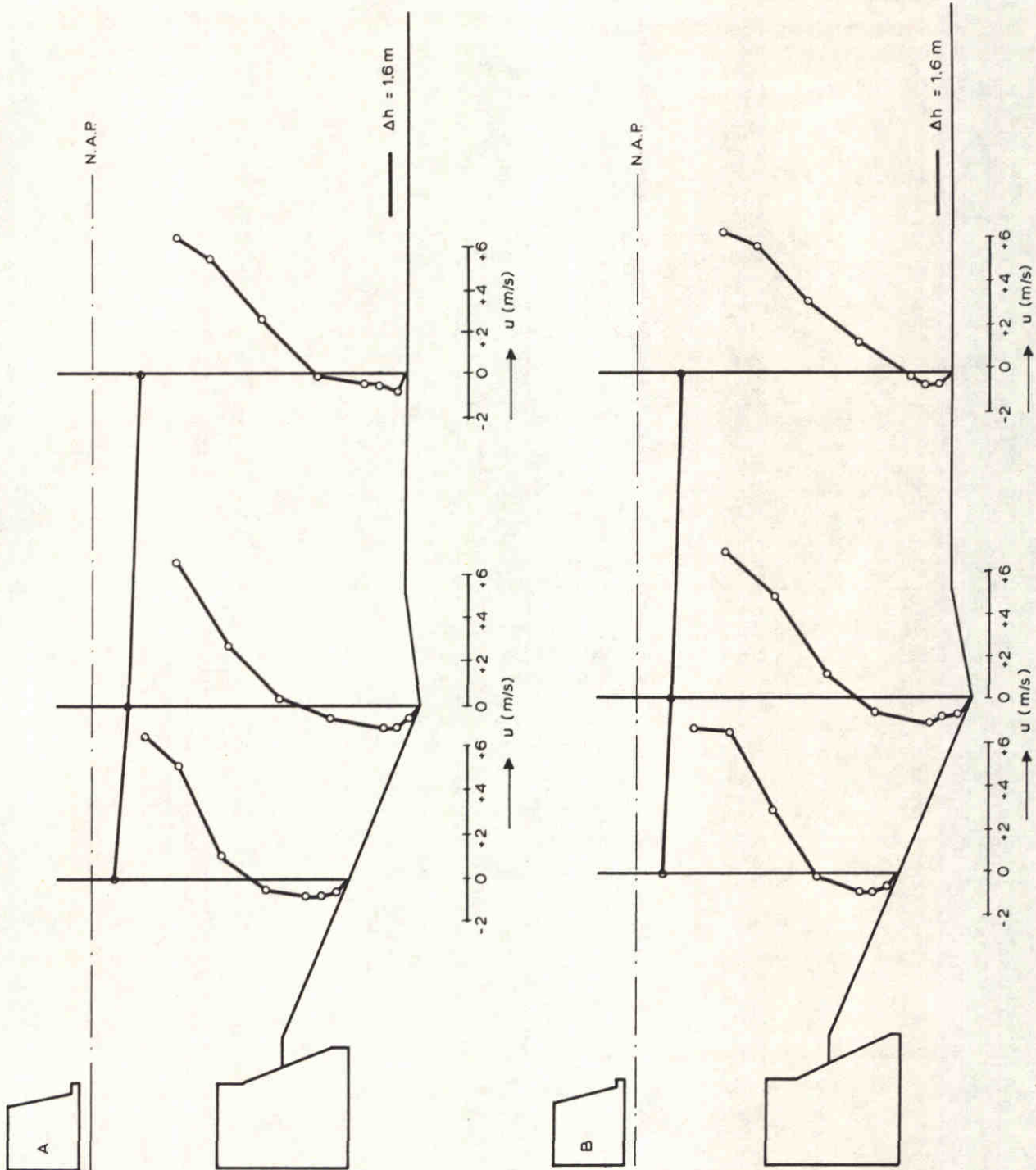
STROOMSNELHEIDSPROFIELEN T43

T43-1

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

Q 520

FIG. 2



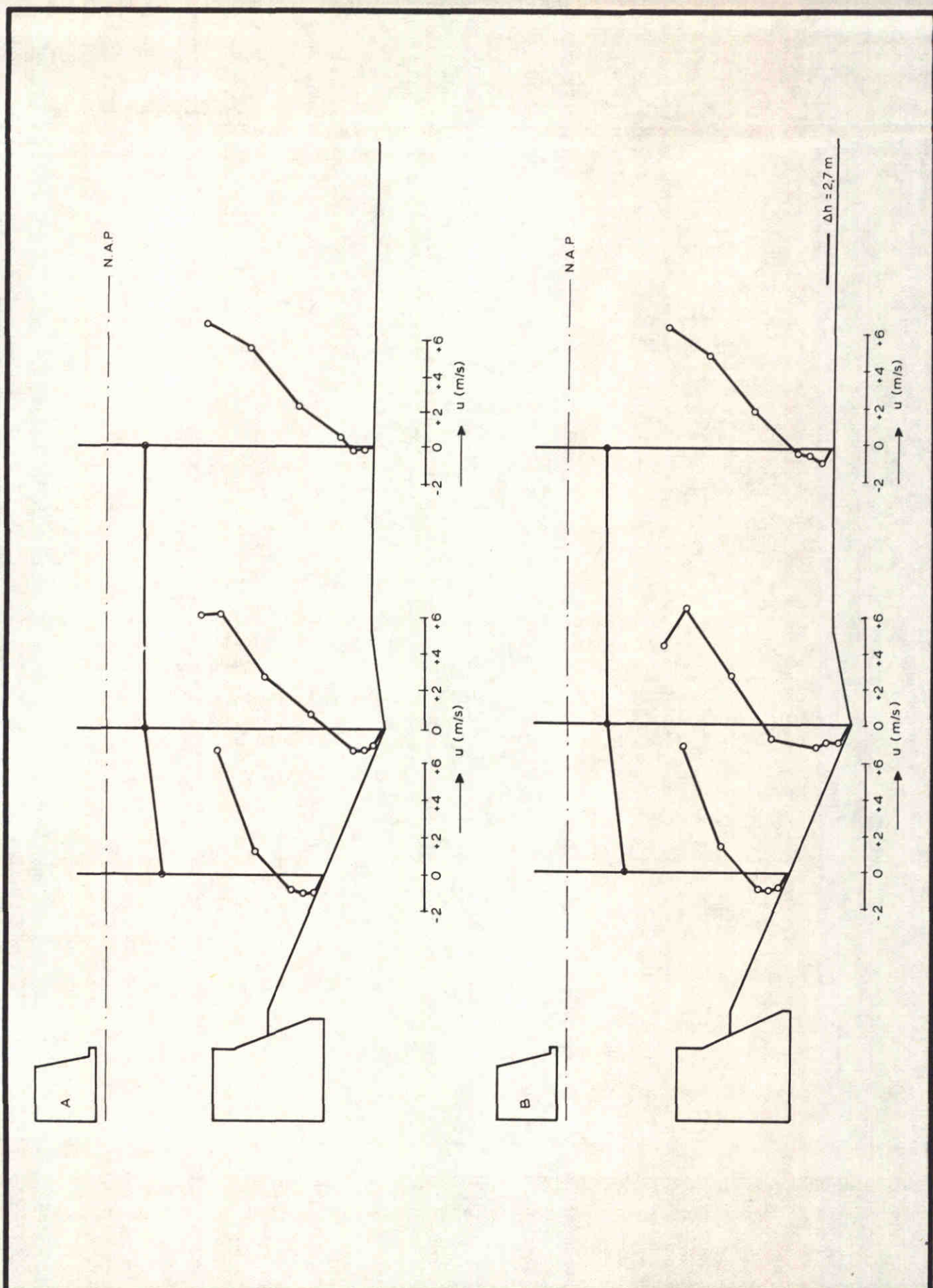
STROOMSNELHEIDSPROFIELEN T43

T43-2

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

Q. 520

FIG. 3



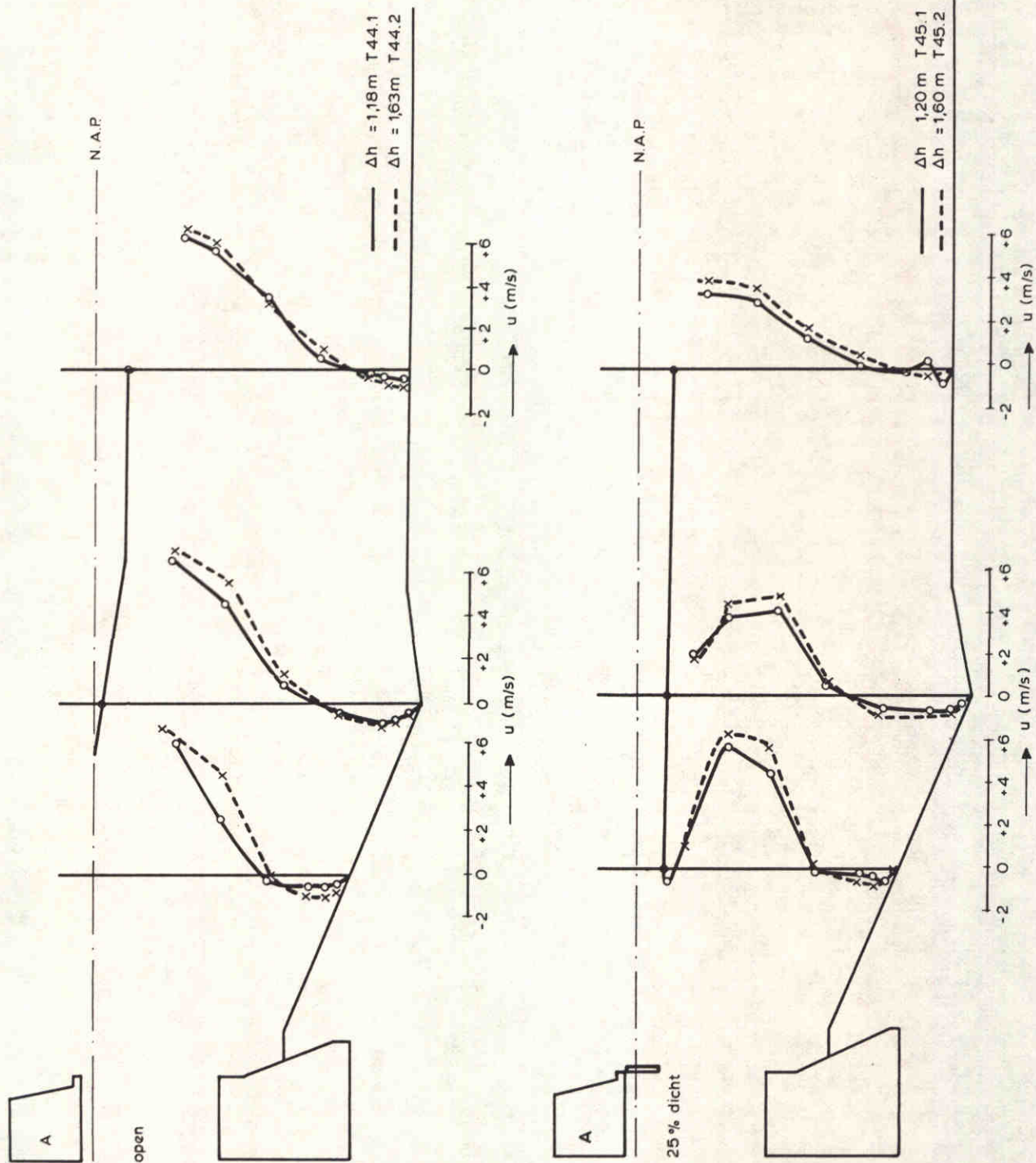
STROOMSNELHEIDSPROFIELEN

T43.6

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

Q 520

FIG. 4



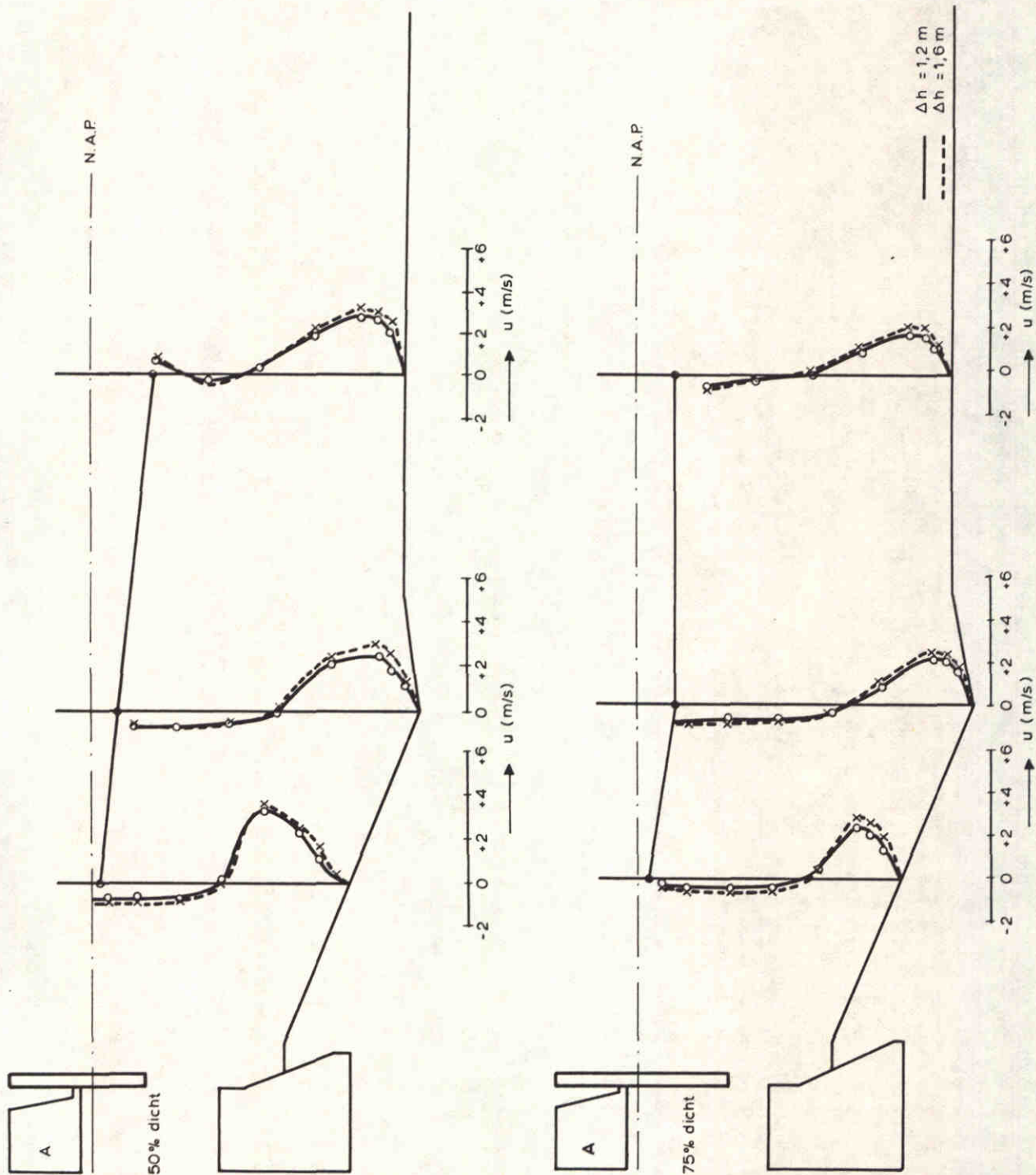
STROOMSNELHEIDSPROFIELEN T44, T45

T44-1-2
T45-1-2

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

Q 520

FIG. 5



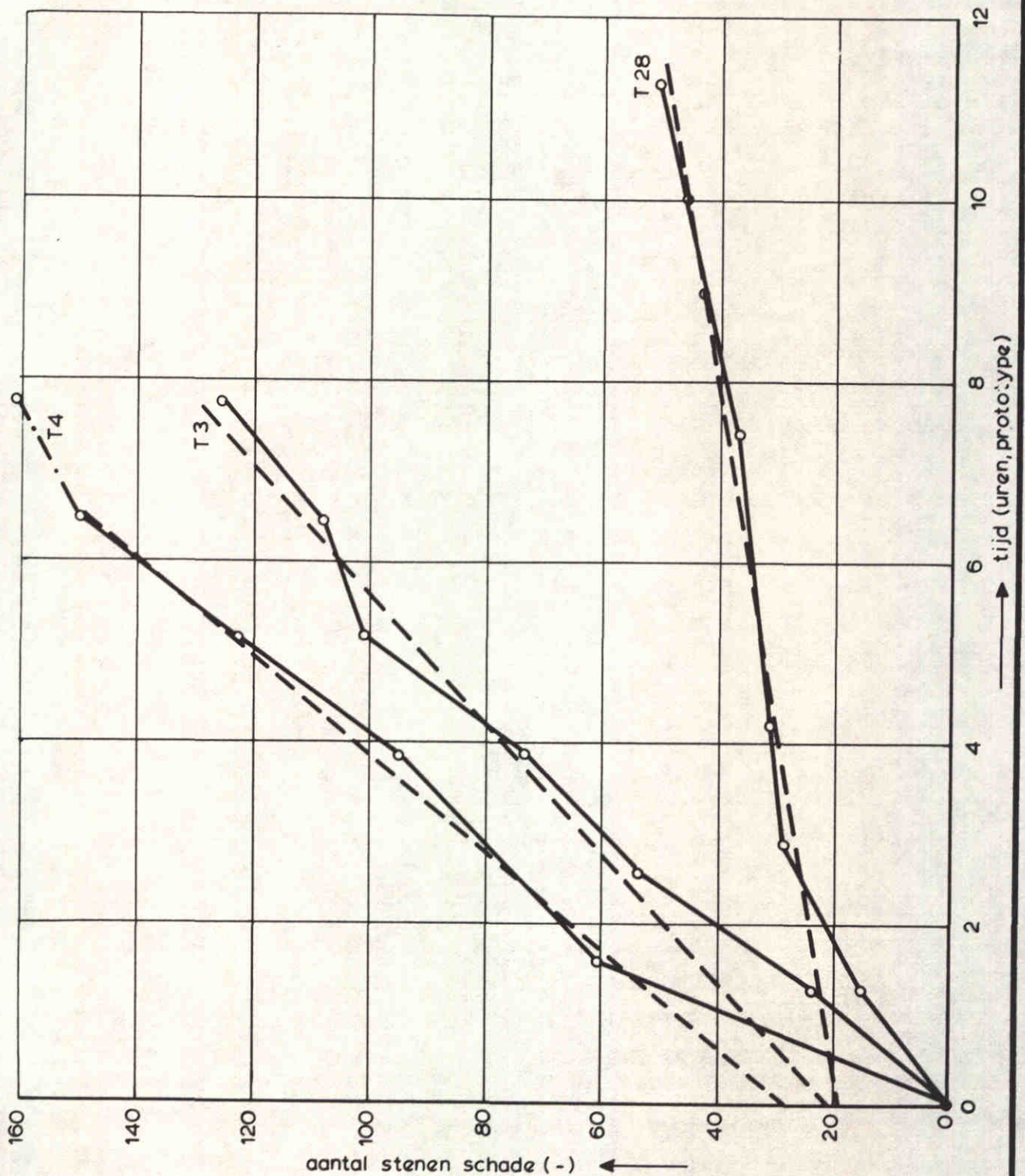
STROOMSNELHEIDSPROFIELEN T46, T47

T46-1-2
T47-1-2

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

Q 520

FIG. 6



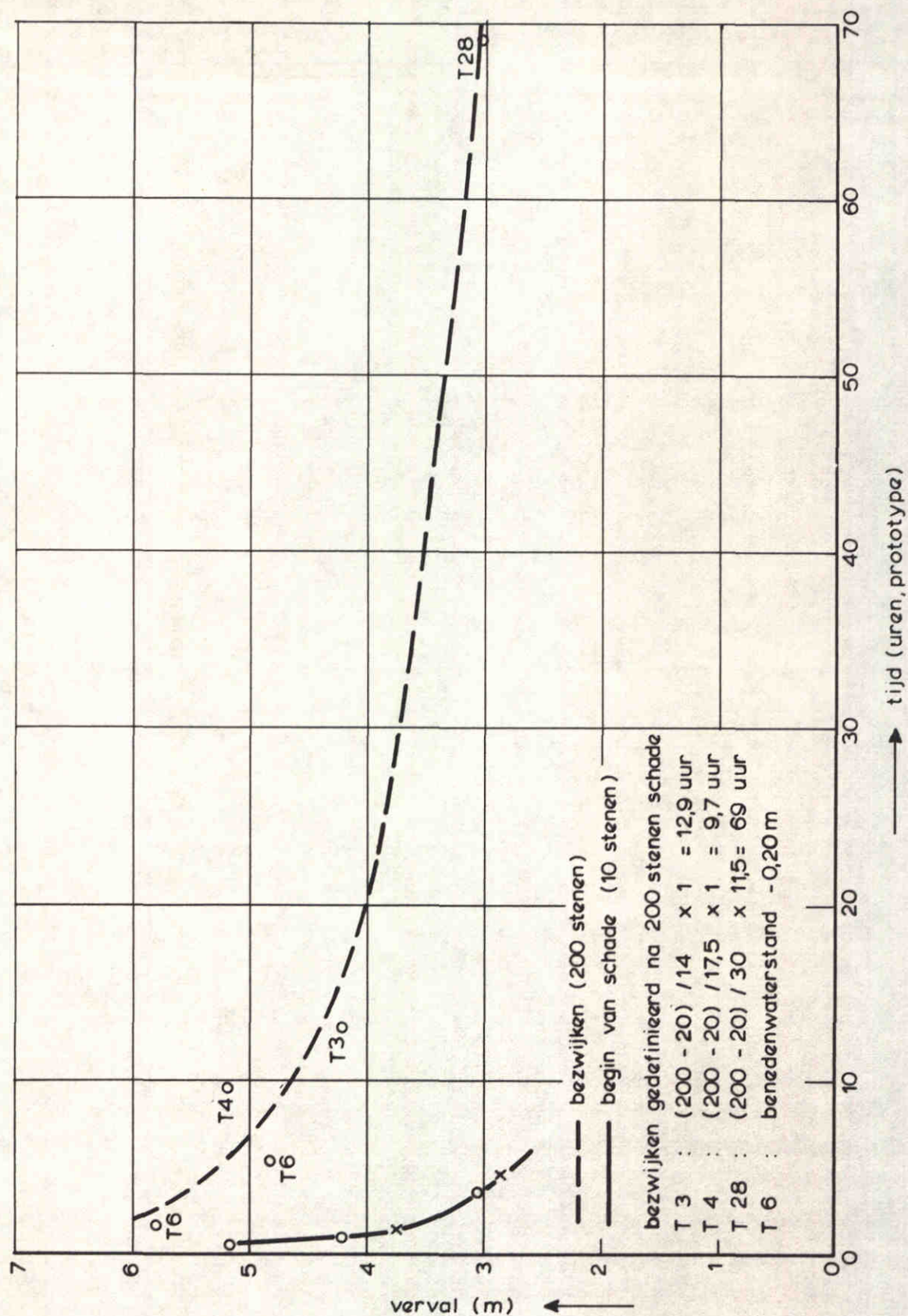
--- gemiddelde lijn
 - - - - - getransporteerde stenen zijn niet meer nauwkeurig te tellen

SCHADE - DUURLIJN T3, T4 en T28

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

Q 520

FIG. 7

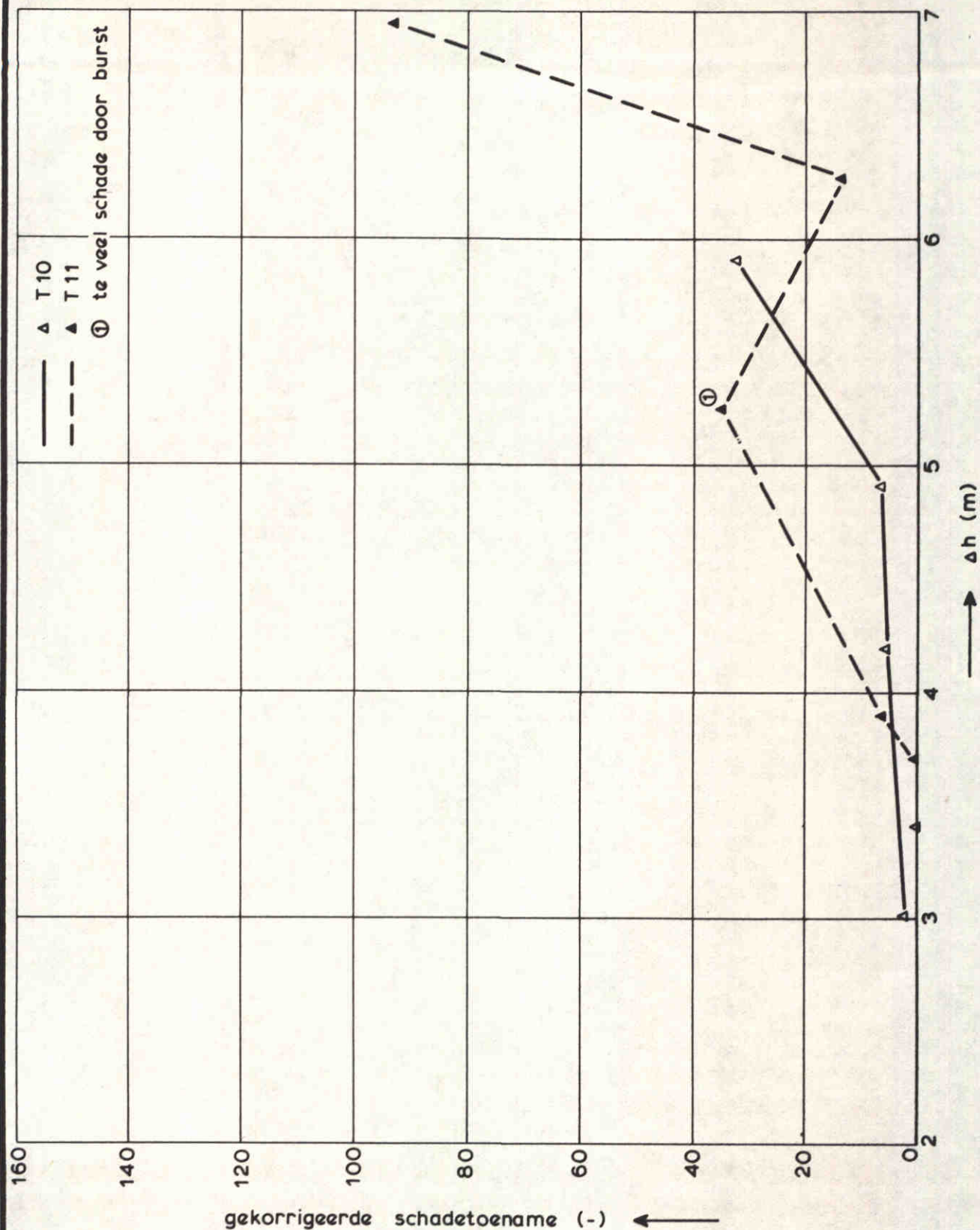


HET BEZWIKKVERVAL ALS FUNKTIE VAN DE
TIJDSDUUR

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

Q 520

FIG. 8



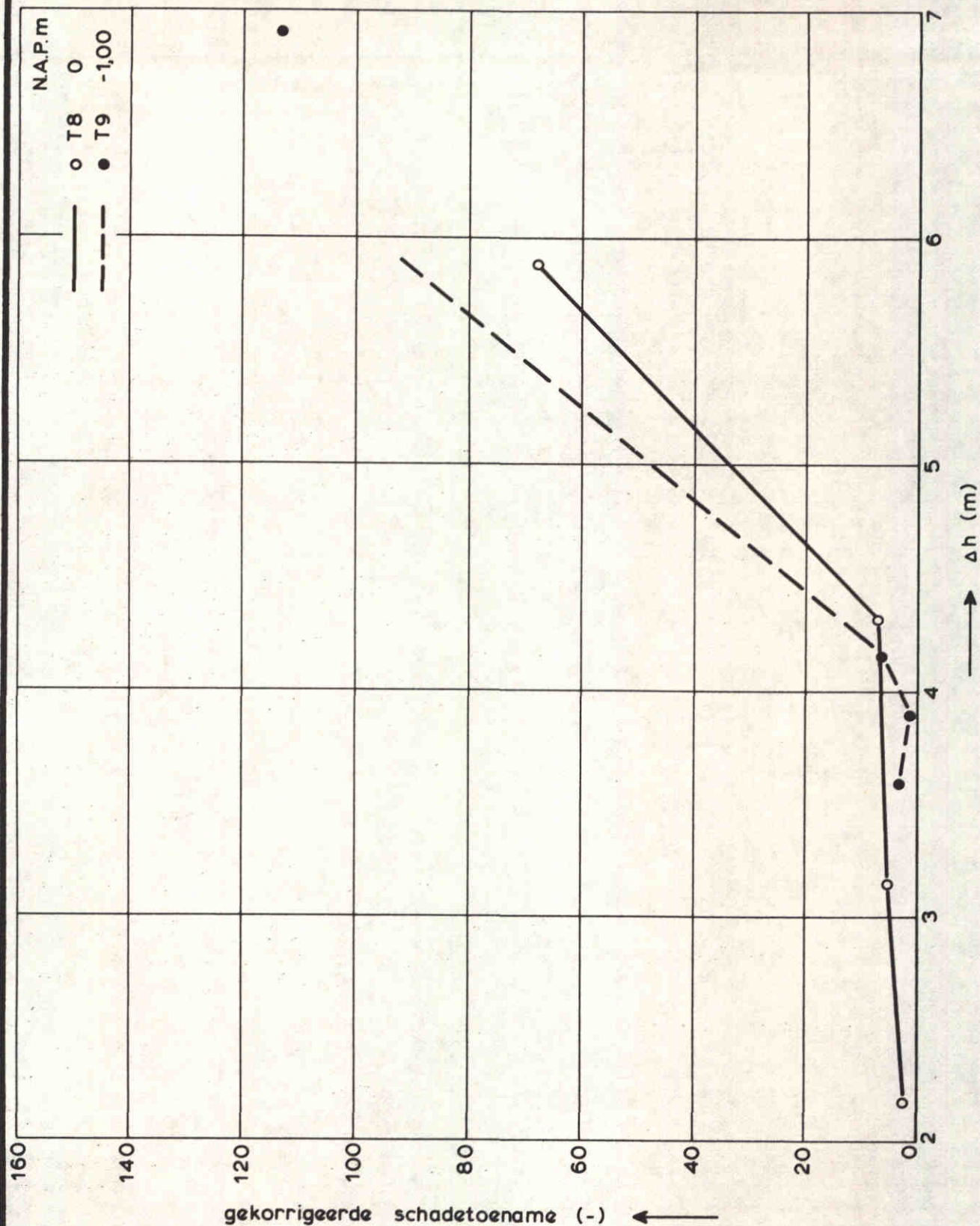
SCHADETOENAME - VERVAL

VARIATIE BENEDENWATERSTAND, T10-T11

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

Q 520

FIG. 9



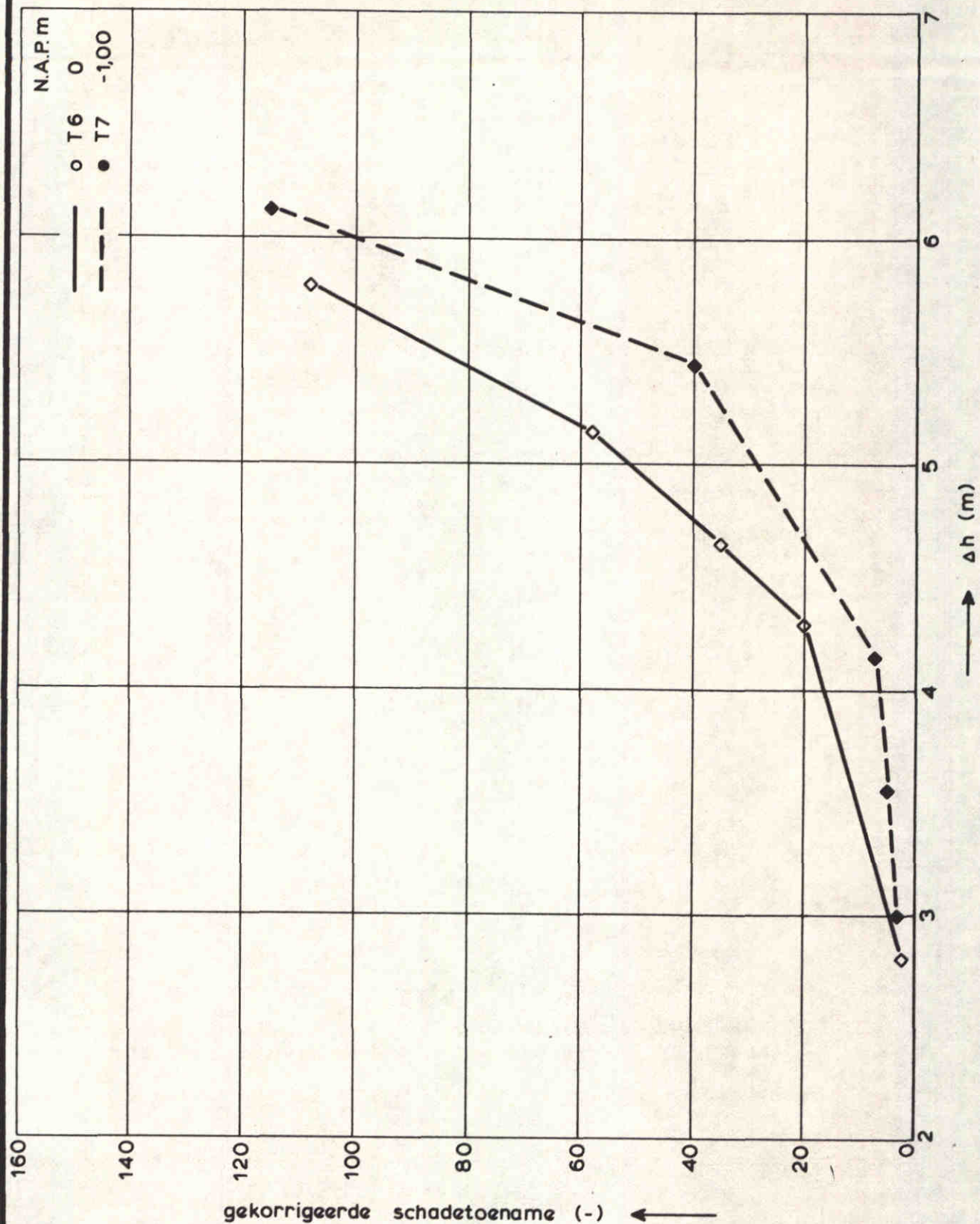
SCHADETOENAME - VERVAL

VARIATIE BENEDENWATERSTAND, T8-T9

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

Q 520

FIG. 10



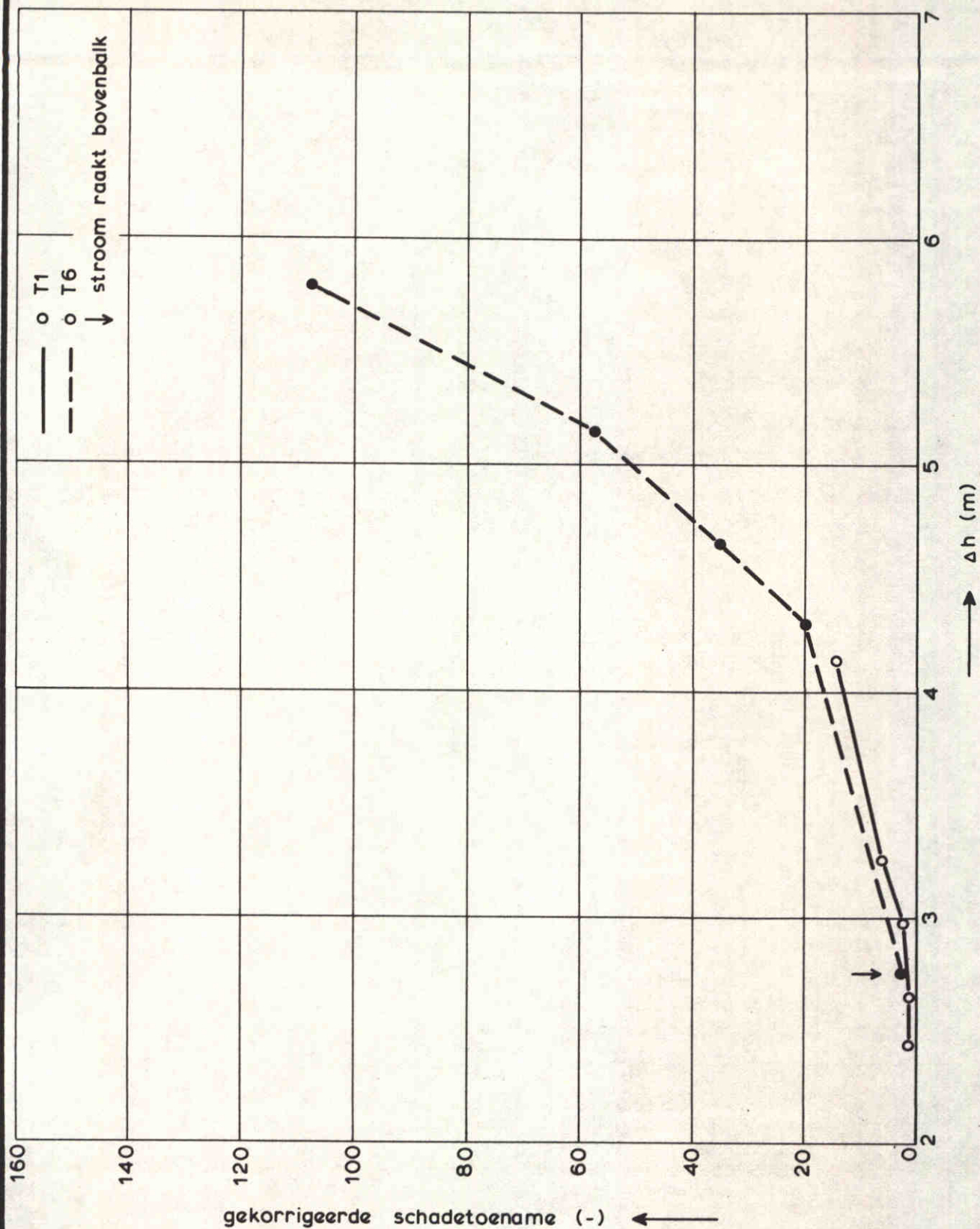
SCHADETOENAME - VERVAL,

VARIATIE BENEDENWATERSTAND, T6 - T7

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

Q 520

FIG. 11

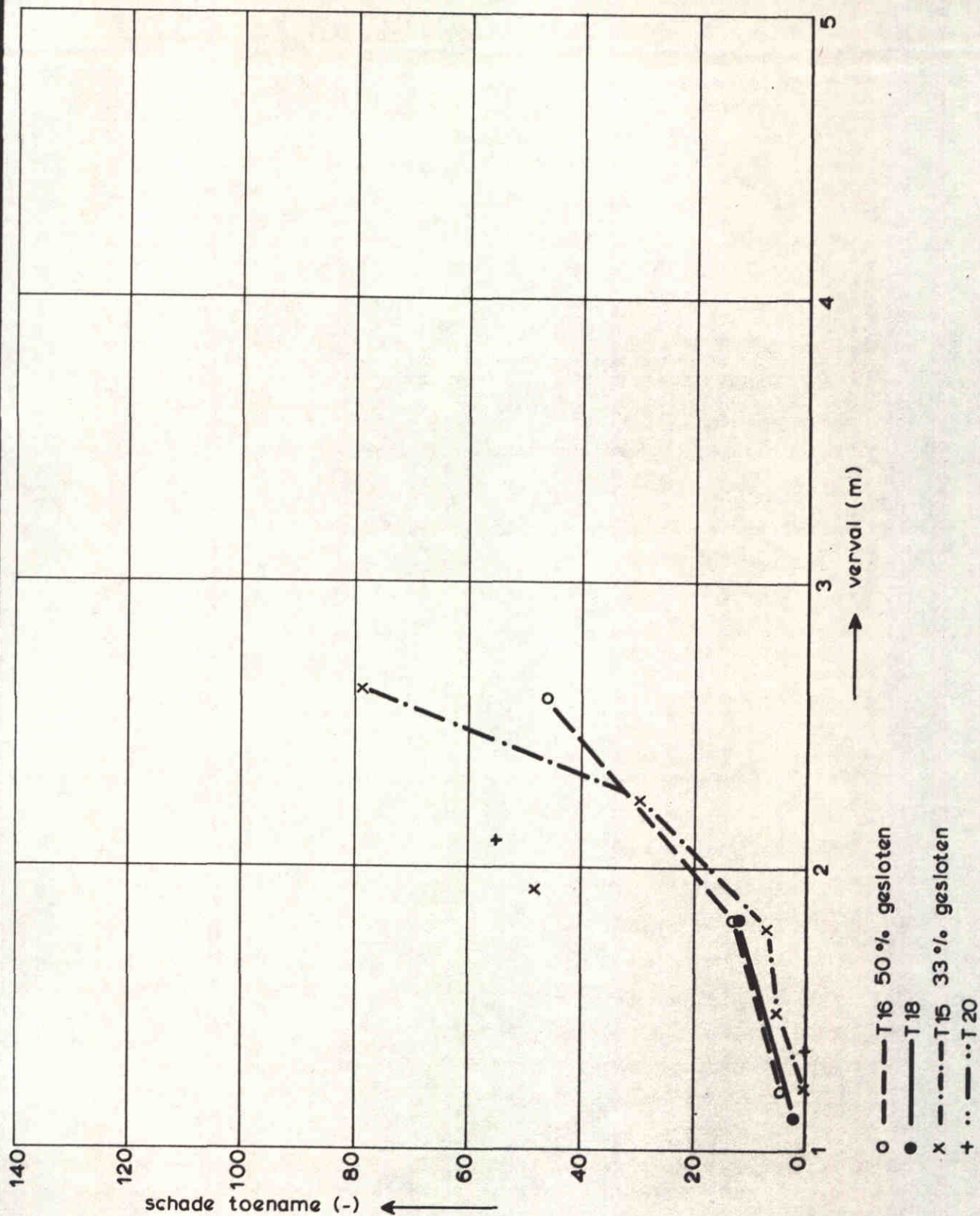


REPRODUKTIE SCHADETOENAME-VERVAL
OPEN KERING

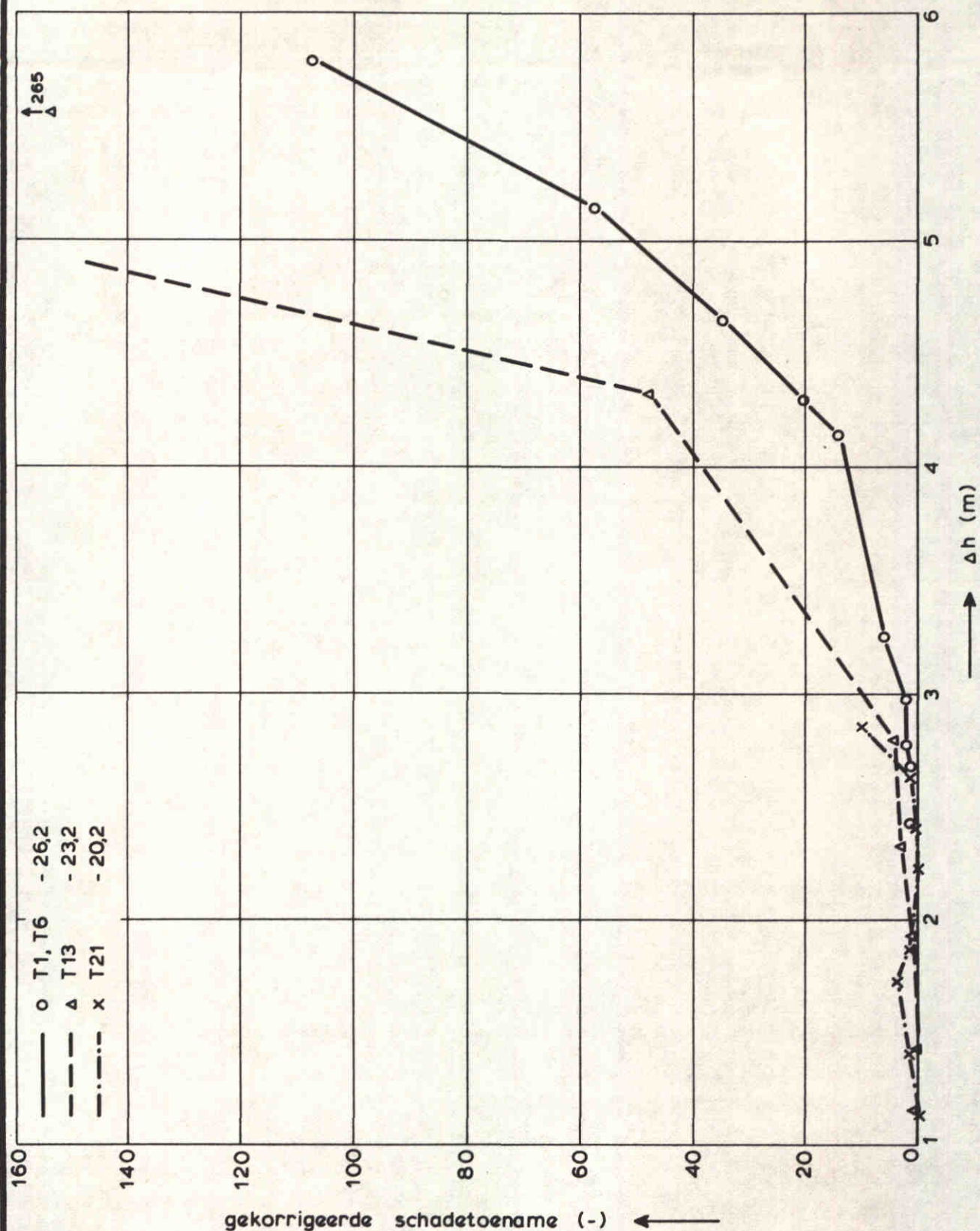
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

Q 520

FIG. 12



REPRODUKTIE SCHADE TOENAME - VERVAL BIJ
33 % EN 50 % GESLOTEN SCHUIF



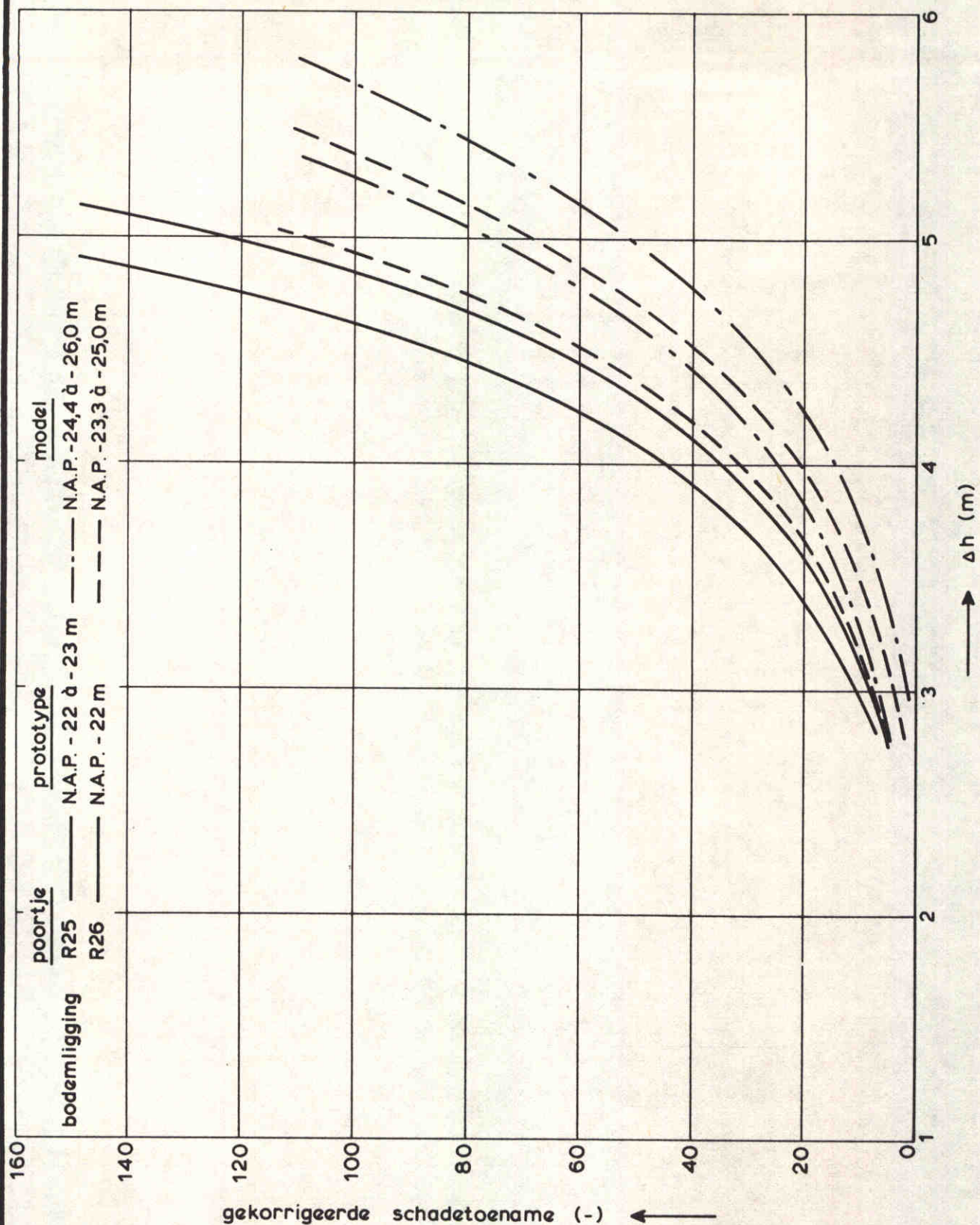
SCHADETOENAME - VERVAL

VARIATIE BODEMLIGGING OVERGANGSKONSTRUKTIE

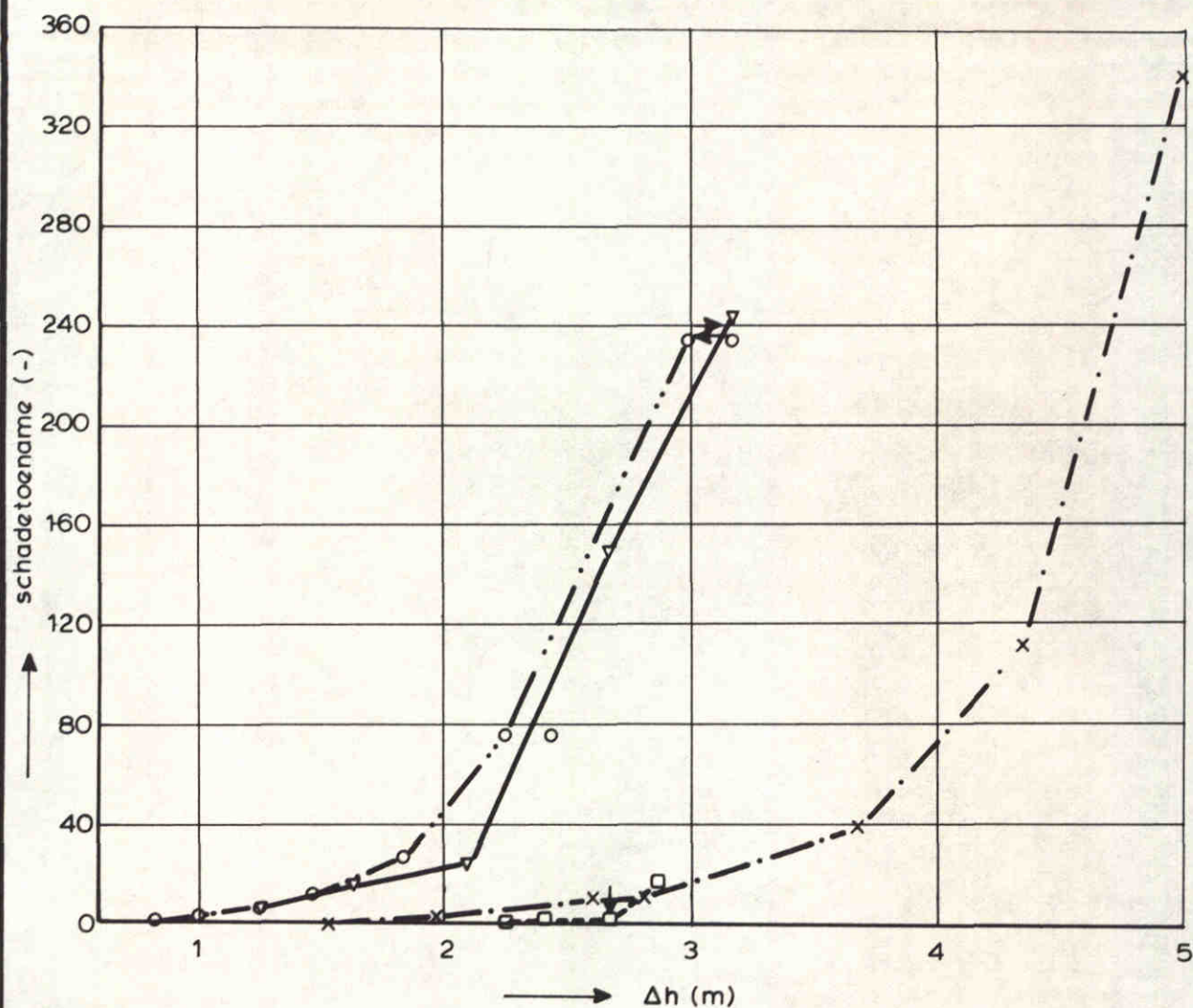
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

Q 520

FIG. 14

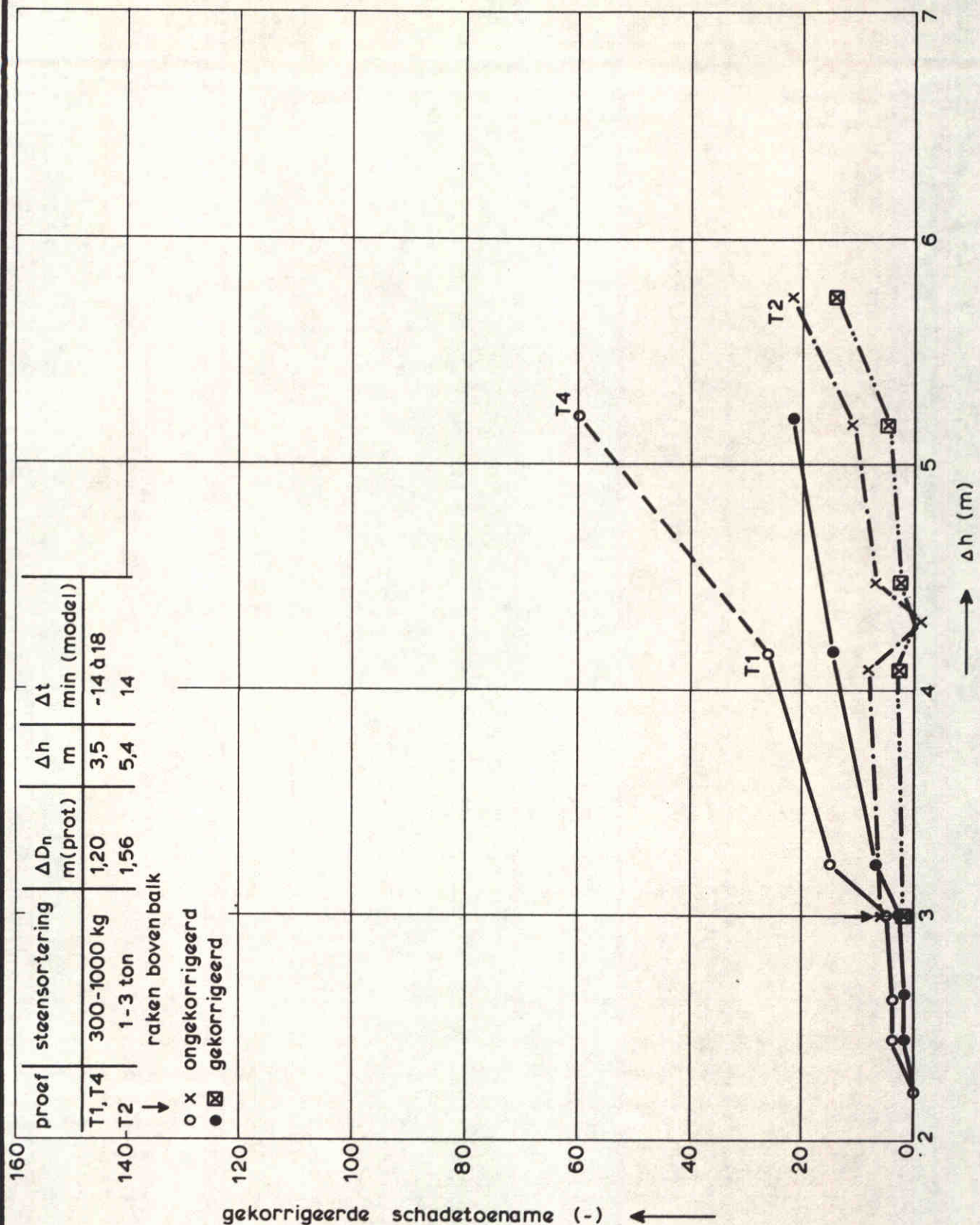


SCHADETOENAME - VERVAL,
 BIJ BODEMLIGGING R25, R26

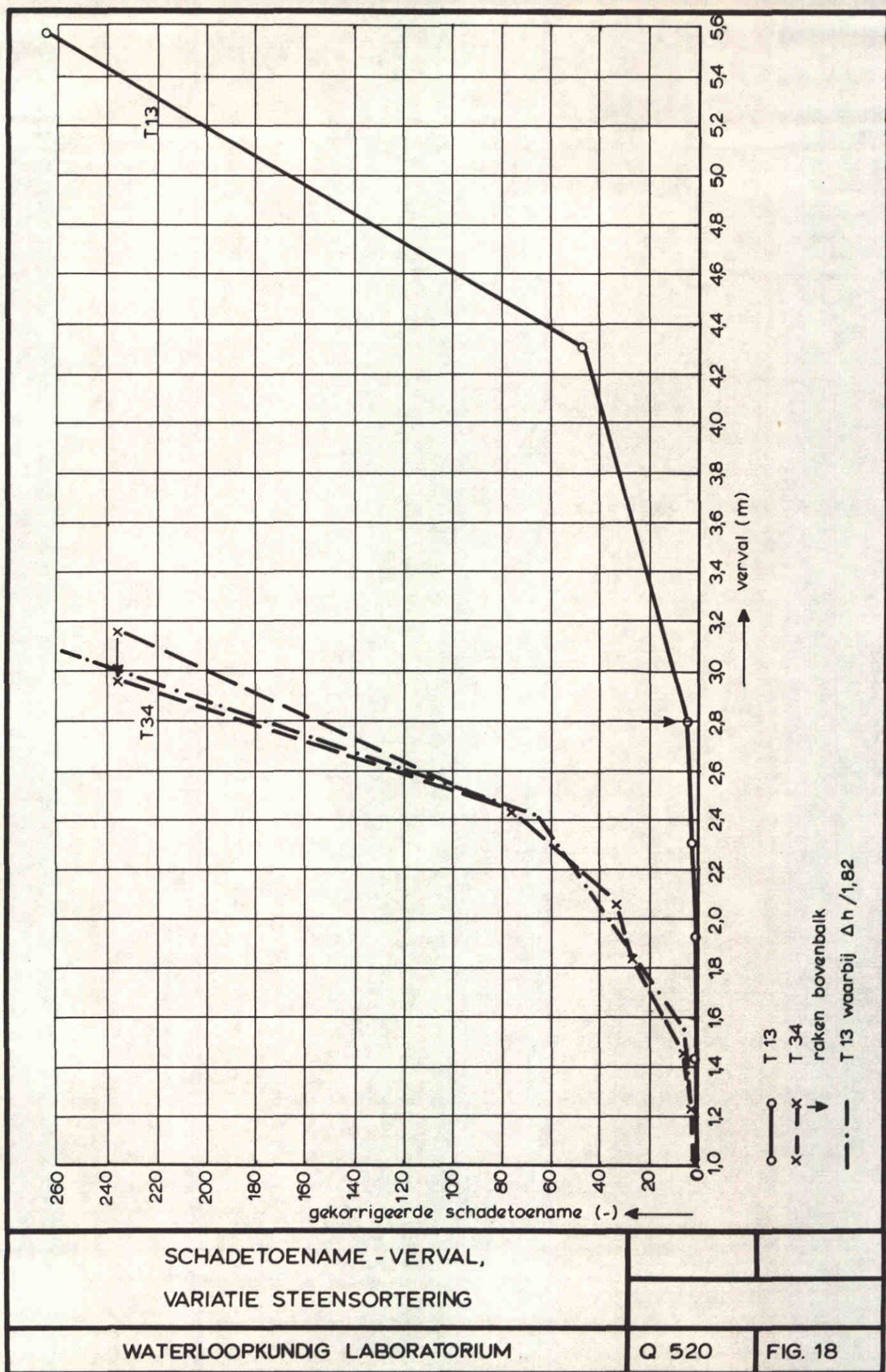


- ...—○ T34 hout velling
 ▽—...—▽ T36 trovidur velling
 x—...—x T37
 □—...—□ T21
 ↓ stroom raakt bovenbalk

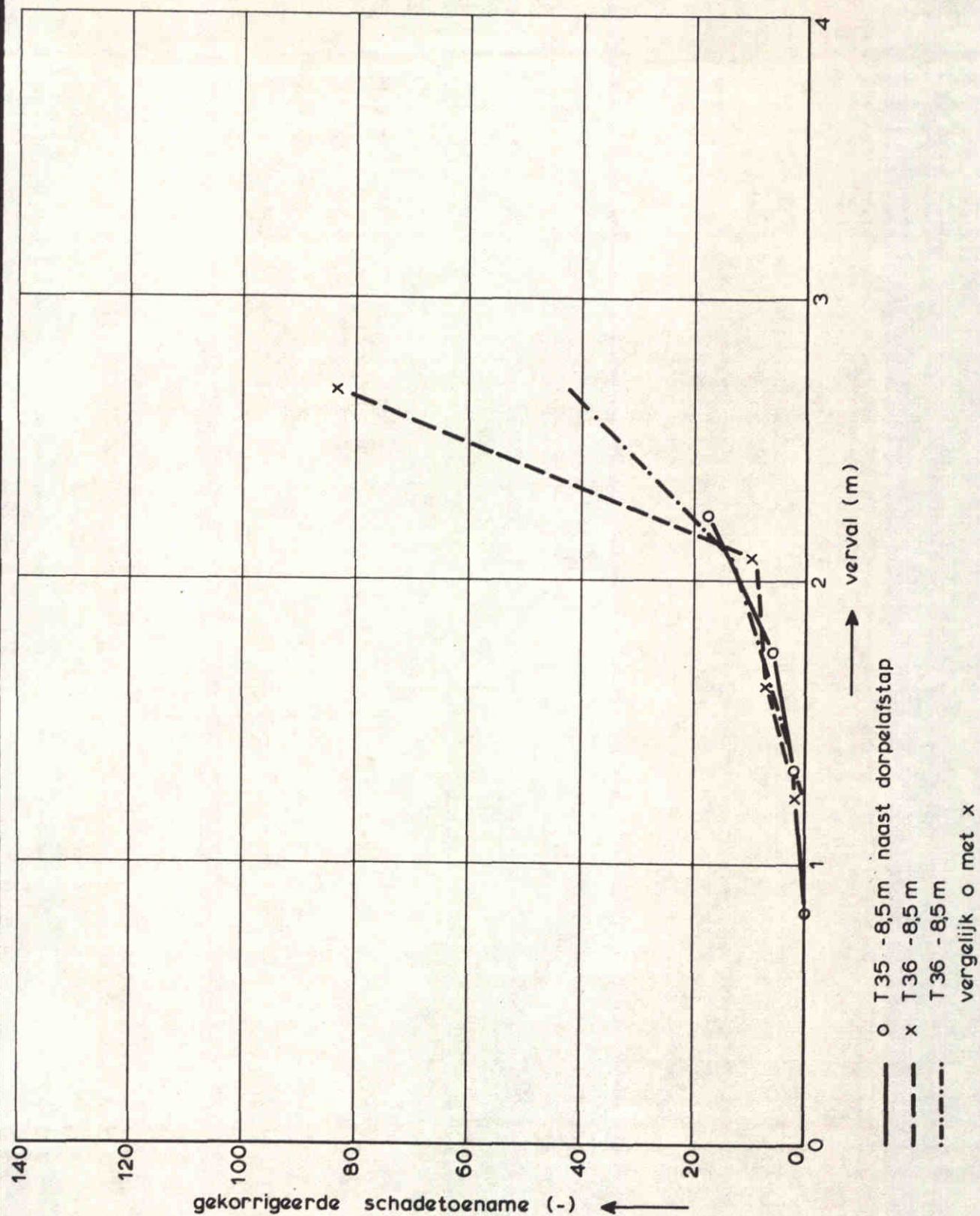
SCHADETOENAME - VERVAL,
INVLOED ONDERLAAG



SCHADETOENAME - VERVAL,
VARIATIE STEENSORTERING



SCHADETOENAME - VERVAL,
VARIATIE STEENSORTERING



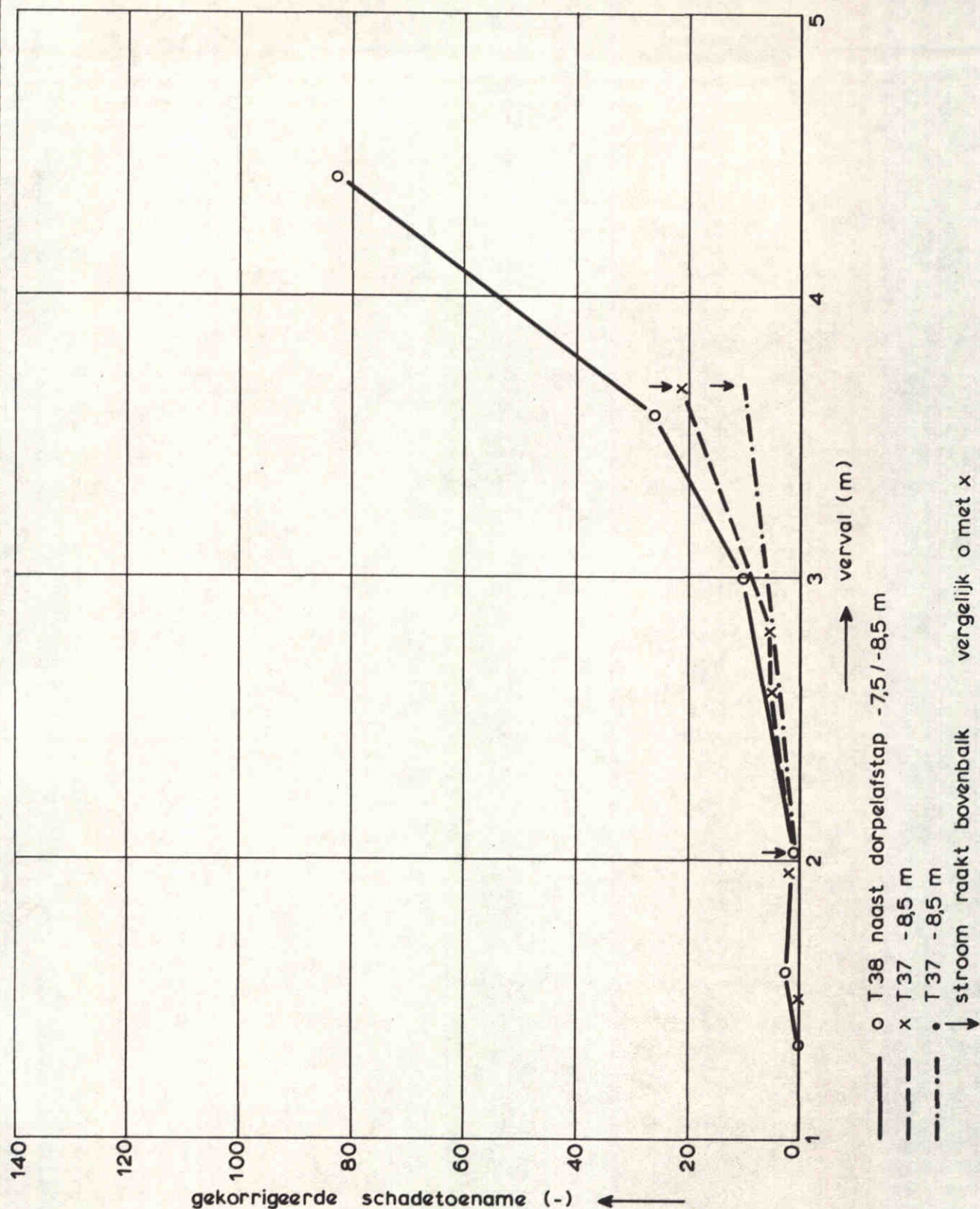
SCHADETOENAME - VERVAL

INVLOED DORPELAFSTAP , T 35 - T 36

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

Q 520

FIG. 19



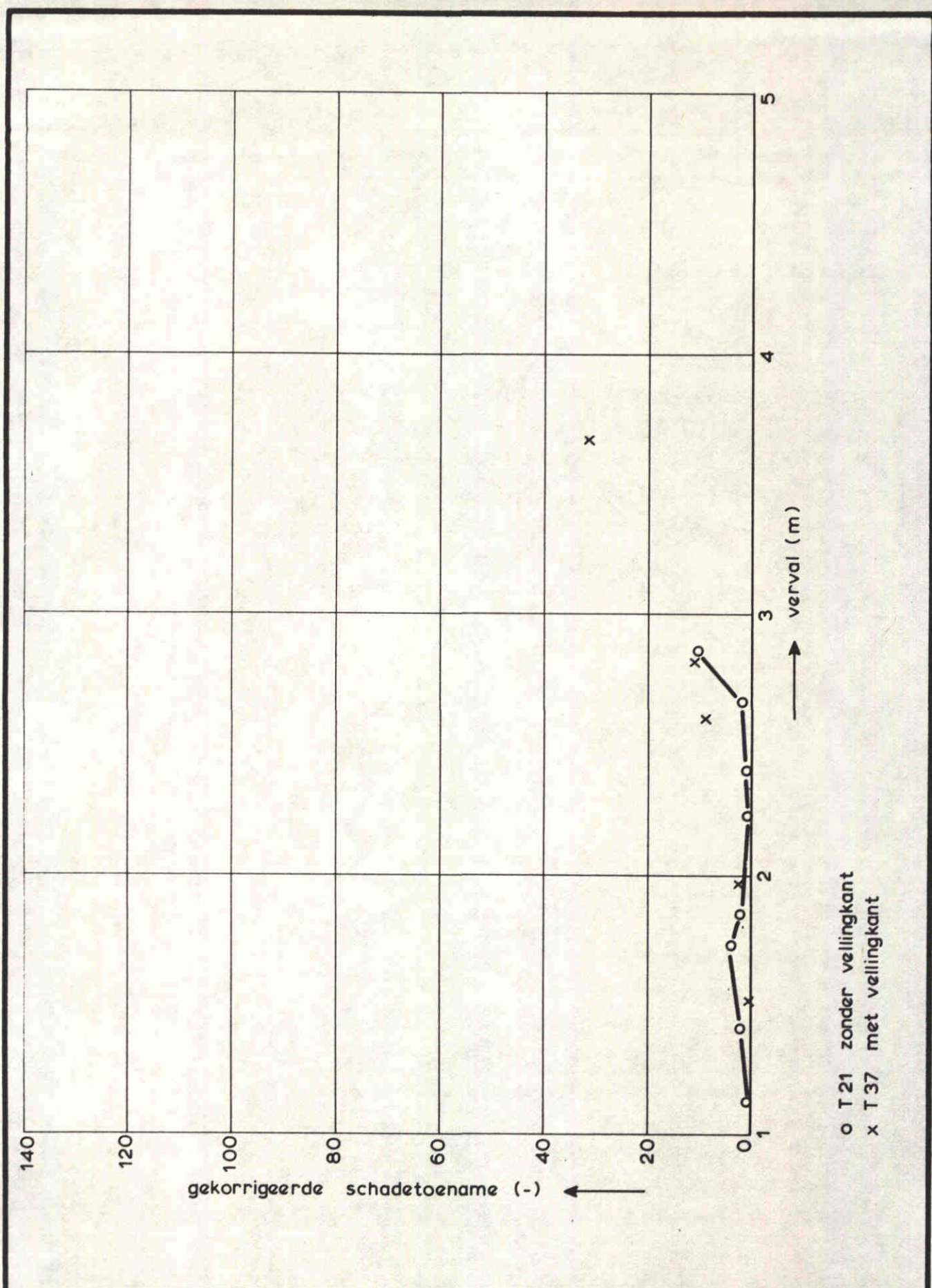
SCHADETOENAME - VERVAL

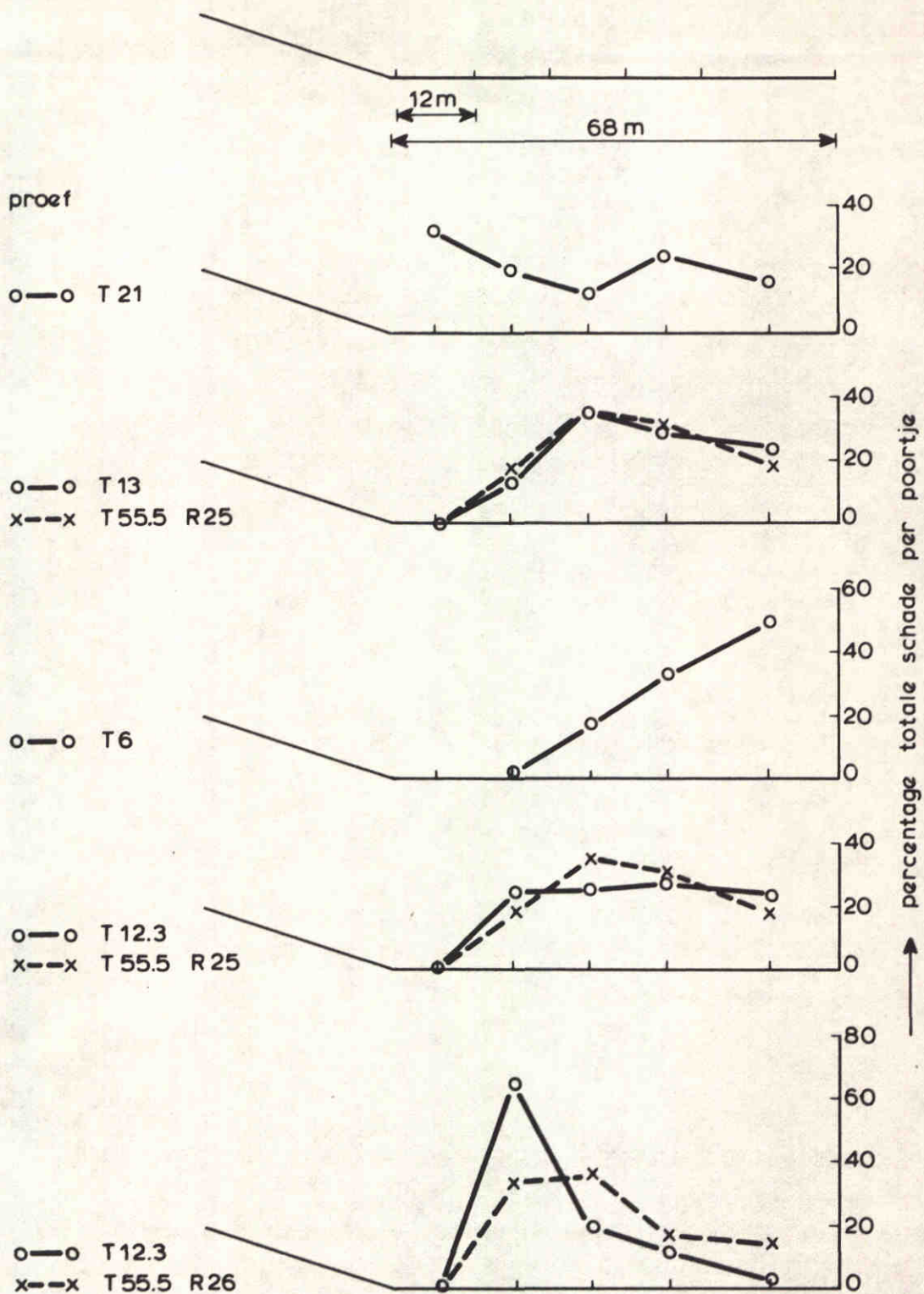
INVLOED DORPELAFSTAP, T37 - T38

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

Q 520

FIG. 20



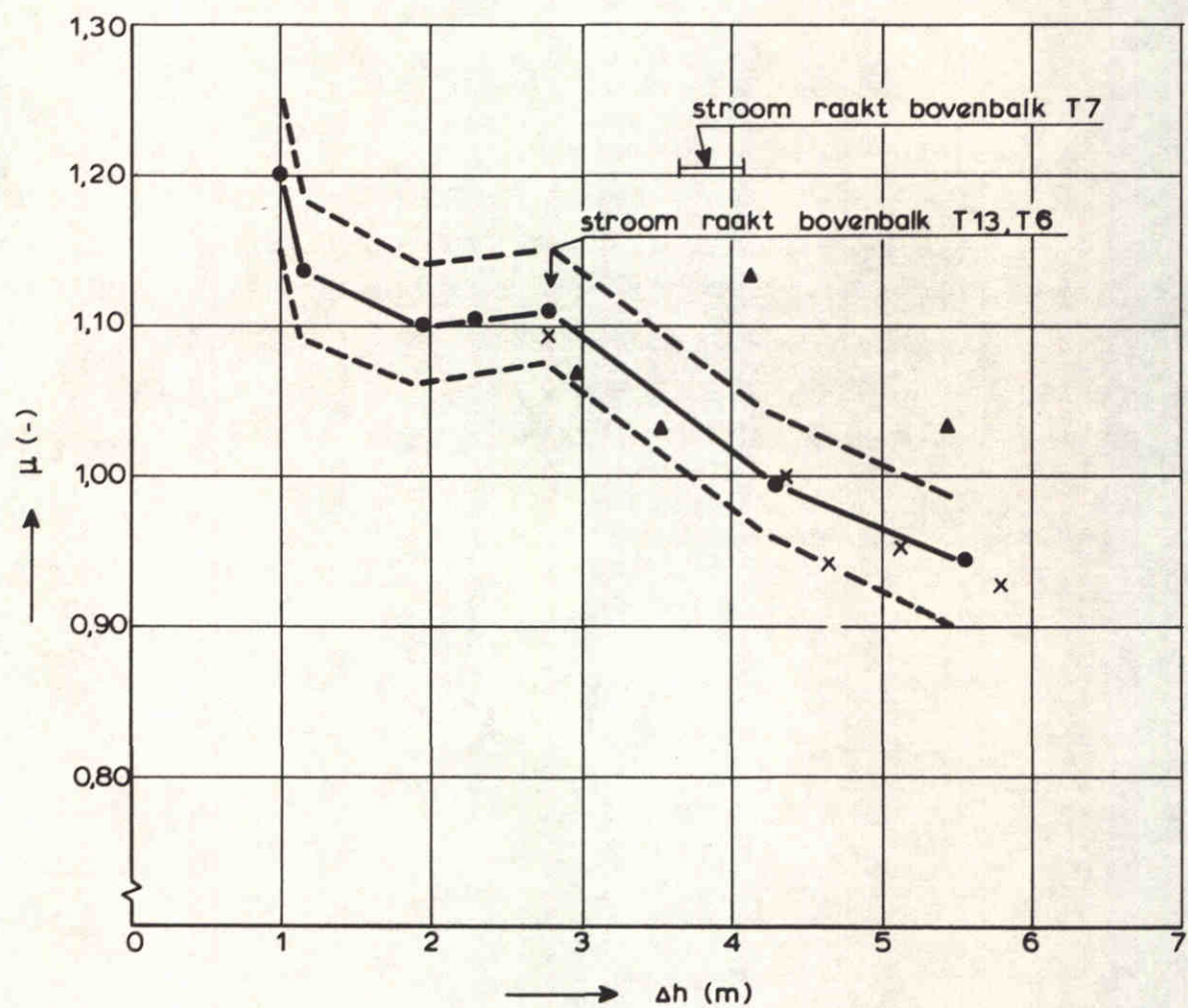


DE PLAATS VAN SCHADE OP DE
OVERGANGSKONSTRUKTIE

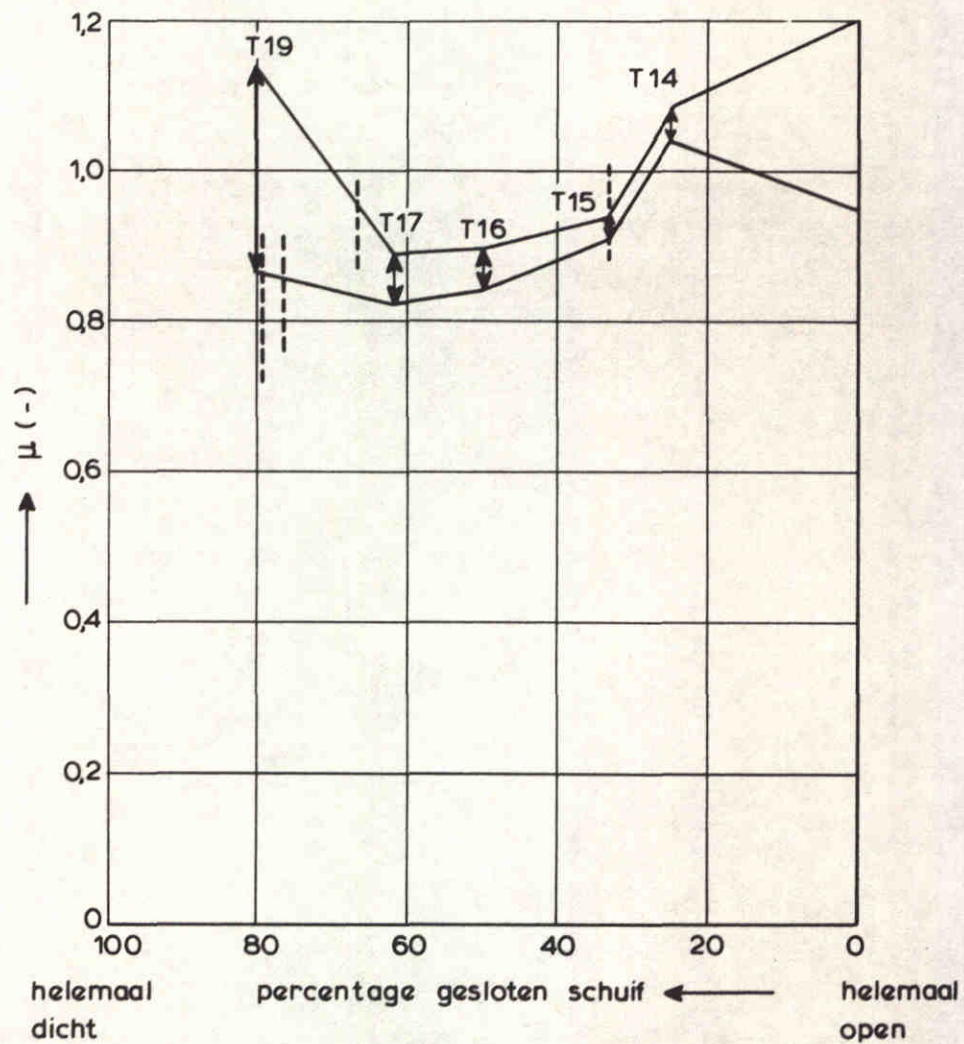
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

Q 520

FIG. 22

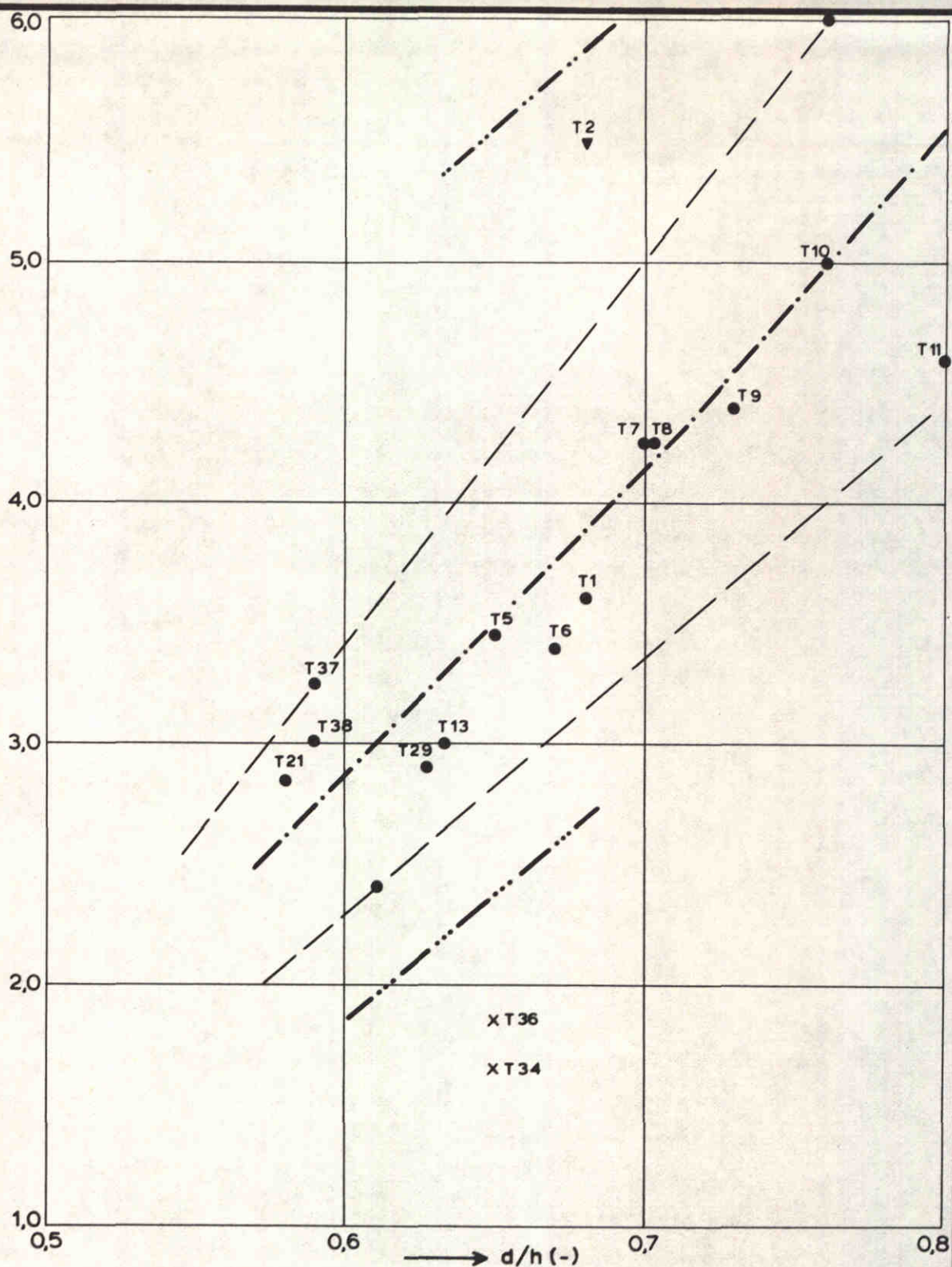


AFVOERCOEFFICIËNT ALS FUNKTIE VAN HET
VERVAL BIJ OPEN POORTJE

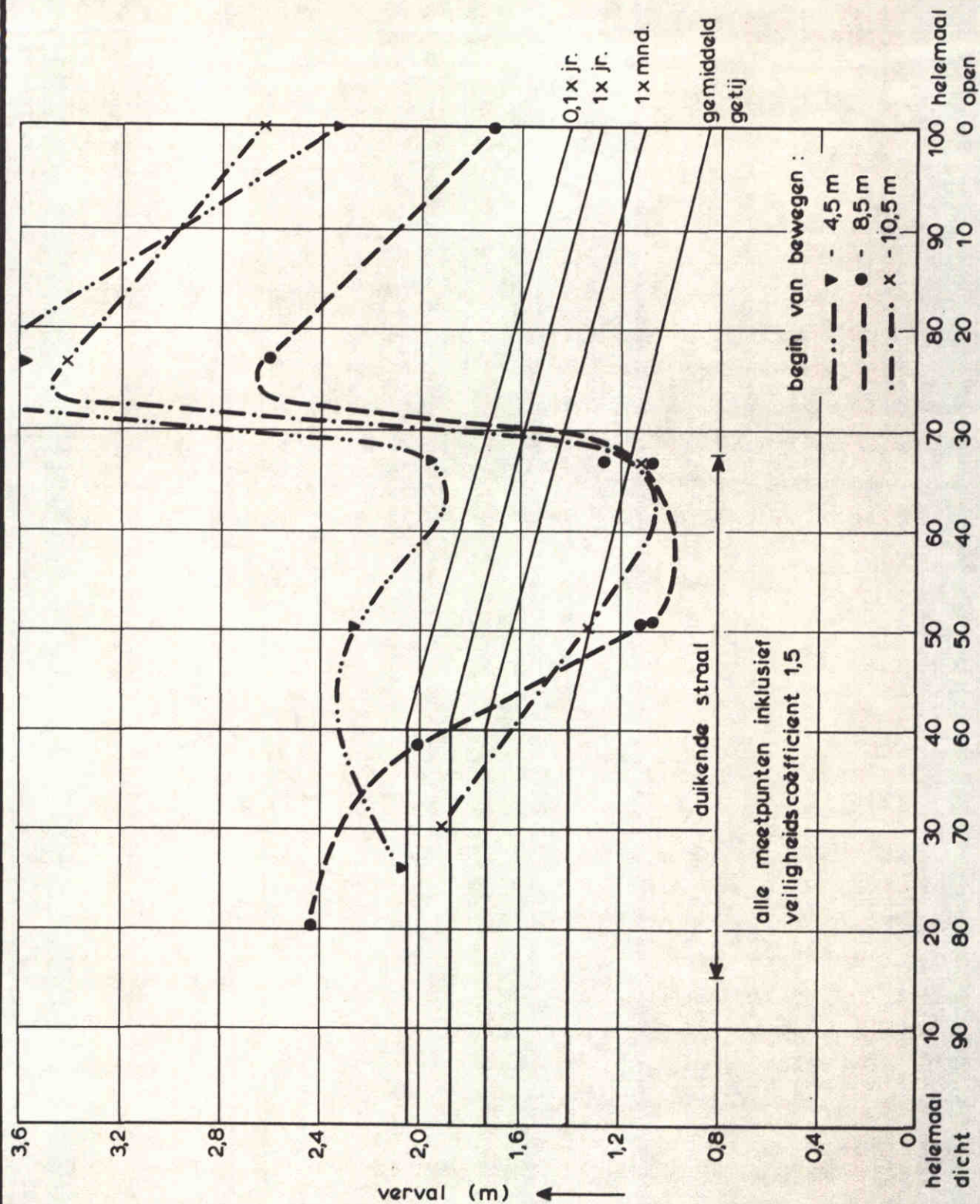


AFVOERCOEFFICIËNT ALS FUNKTIE VAN SLUITINGS-
PERCENTAGE VAN DE SCHUIF

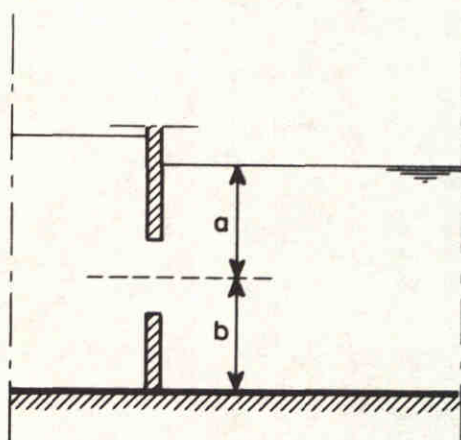
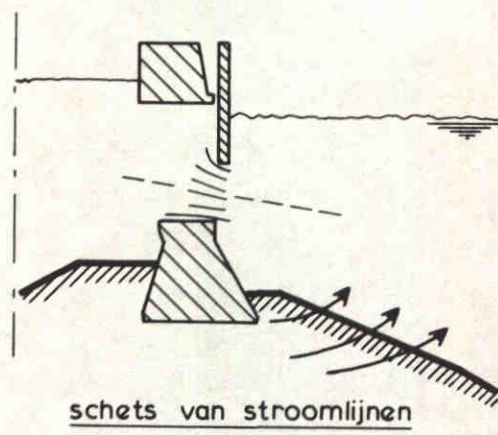
↑ Δh_{cr} begin van schade (m)



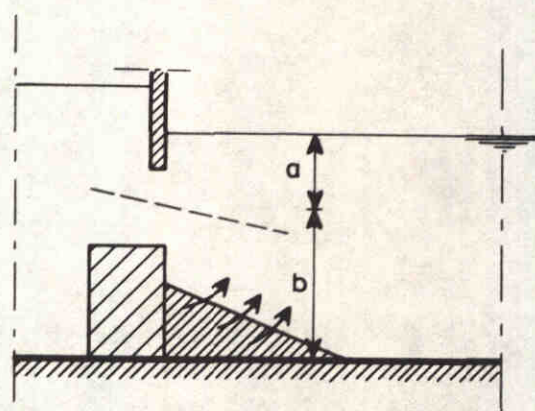
Δh_{cr} ALS FUNKTIE VAN d/h BIJ OPEN POORTJE



TOELAATBAAR VERVAL ALS FUNKTIE VAN
SLUITINGSPERCENTAGE VAN DE SCHUIF



omslag : $a/b = 1$



$a/b = 0,15 \text{ à } 0,32$

----- as van straal in het omslaggebied

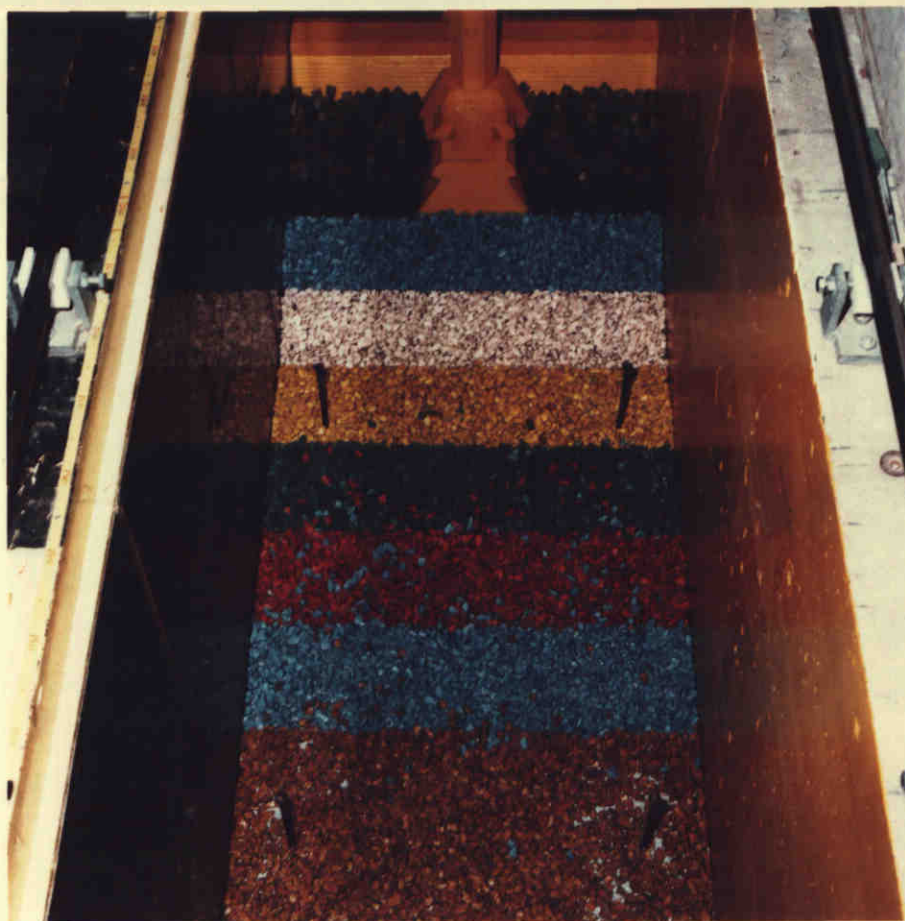
OMSLAAN VAN HET STROOMBEELD

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

Q 520

FIG. 27

foto 1



Schade T4, open poortje, dorpelbalk op NAP-8,5 m

foto 2



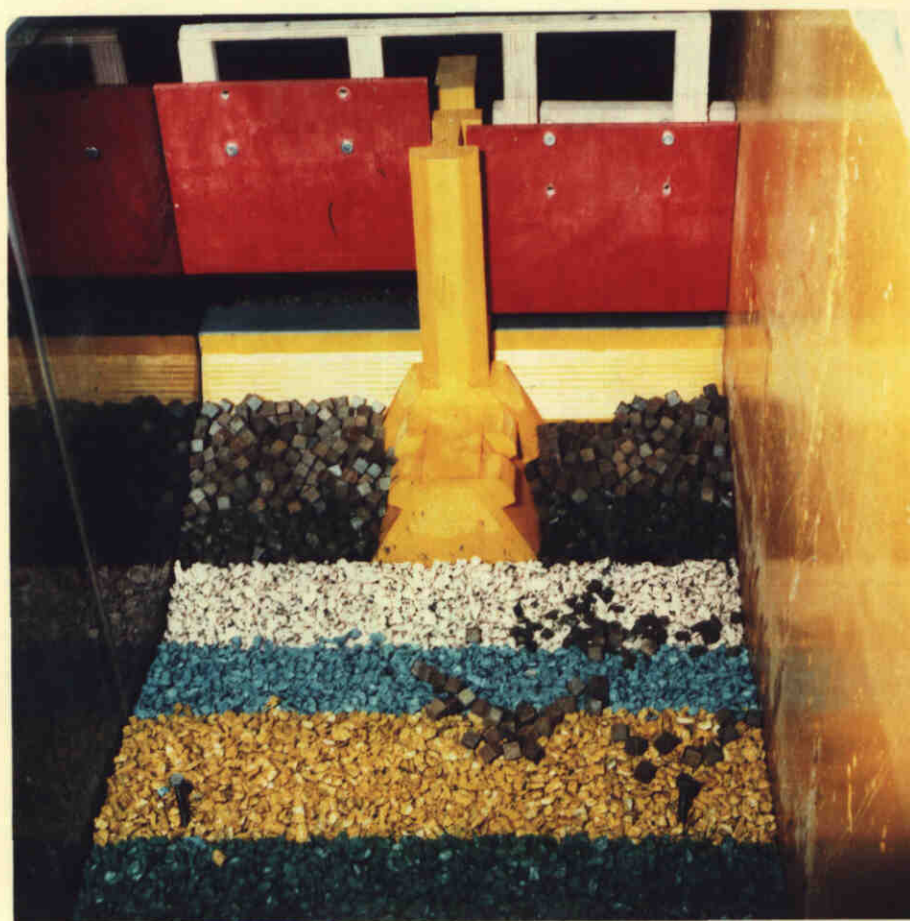
Schade T11, open poortje, dorpelbalk op NAP-5,5 m

foto 3

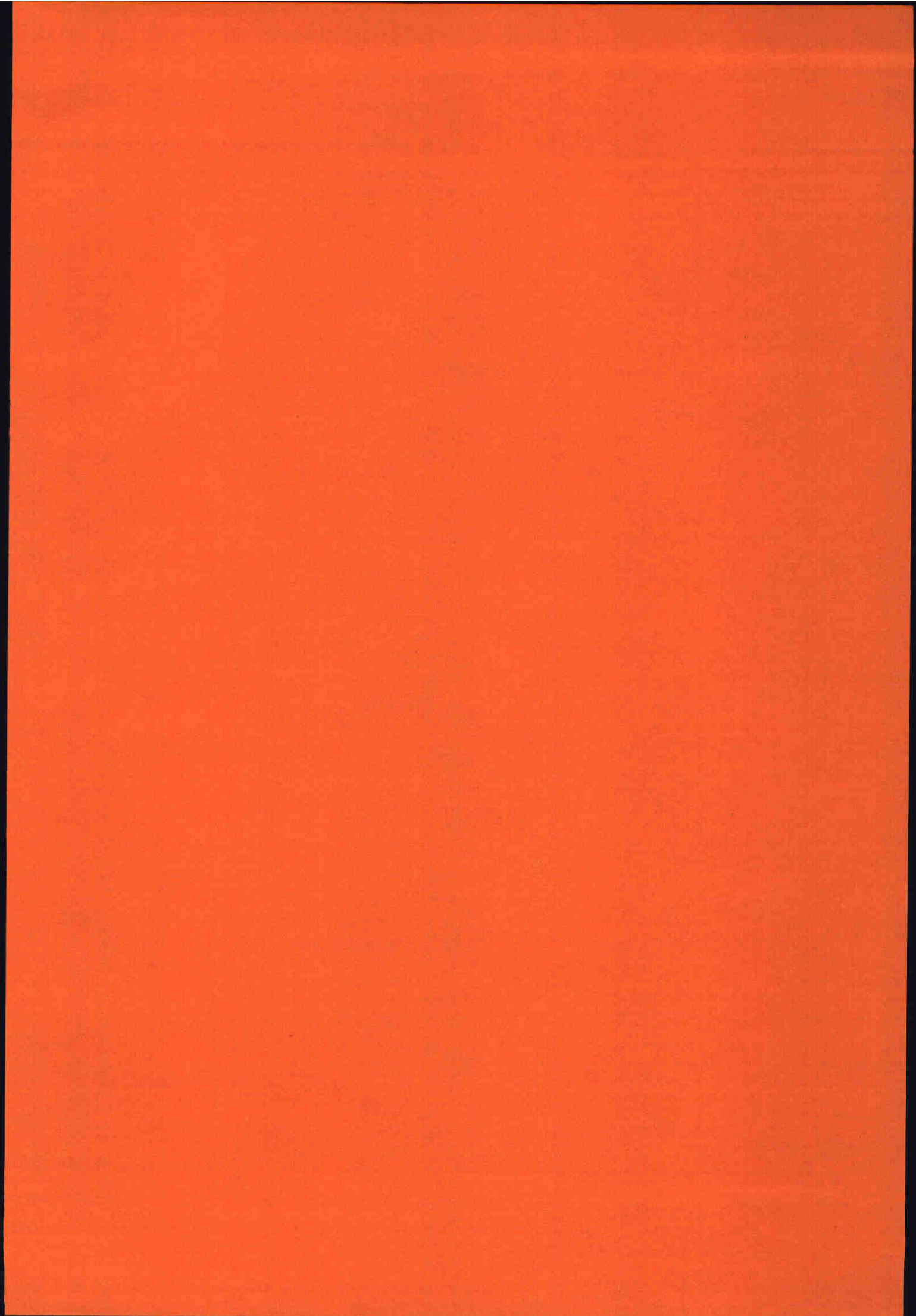


Schade T35, open poortje, dorpelafstap

foto 4



Schade T39, gedeeltelijk gesloten poortje,
dorpelbalk op NAP-8,5 m



Bijlage 1. Afleiding van de formule voor het kritieke debiet.

Het kritieke debiet voor de stabiliteit van de toplaag van de bodemverdediging achter een dam met een brede kruin volgt uit:

$$q_{cr} = 0,78 h \sqrt{g \Delta D_n} \log \{c h / D_n\} \quad (b.1)$$

waarin:

q_{cr}	= kritiek debiet	$(m^3 s^{-1})$
g	= versnelling zwaartekracht	$m s^{-2}$
h	= waterdiepte	(m)
D_n	= nominale steendiameter	(m)
Δ	= relatieve dichtheid	$(-)$
c	= coëfficiënt, die een functie is van de relatieve vernauwing en de taludhelling	$(-)$

In het verslag van het onderzoek M711 deel IV is deze formule met behulp van dimensieanalyse afgeleid. Deze formule kan ook worden afgeleid uit de formules voor een uniforme stroming en een stabiliteitskriterium volgens Shields:

$\psi = 0,03$. De constanten hebben bij een uniforme stroming echter andere waarden als bij de bodemverdediging na een dam met een brede kruin. Formule (b.1) kan voor een uniforme stroming als volgt worden afgeleid:

Chezy-formule:

$$\bar{u} = C \sqrt{h i} \quad (b.2)$$

Definitie kritiek debiet:

$$q_{cr} = \bar{u}_{cr} \cdot h \quad (b.3)$$

White-Colebrook-formule voor de Chezy-coëfficiënt:

$$C = 18 \log \left(\frac{12h}{k_s} \right) \quad (b.4)$$

$$\text{waarin } k_s \approx 2D_n \quad (b.5)$$

Shields-stabiliteitskriterium $\psi = \text{konstant met}$

$$\psi = h i / (\Delta D_n) \quad (\text{b.6})$$

$$\sqrt{h i} = \sqrt{\psi \Delta D_n} \quad (\text{b.7})$$

waarin:

$\bar{u}$	= gemiddelde stroomsnelheid	(m s ⁻¹)
C	= Chezy-coëfficiënt	(m ^{1/2} s ⁻¹)
k_s	= equivalente zandruwheid	(m)
i	= verhang	(-)
ψ	= schuifspanningsparameter	(-)

Substitueer (b.5) in (b.4) en (b.4) in (b.2). Uitdrukking (b.7) is door herschrijven van (b.6) verkregen. Substitueer (b.7) in (b.2) en vervolgens (b.2) in (b.3):

$$q_{cr} = 18 h \sqrt{\psi \Delta D_n} \log \left\{ \frac{6h}{D_n} \right\} \quad (\text{b.8})$$

Stel bij begin van schade $\psi = 0,03$. De versnelling door de zwaartekracht is ook een konstante $g = 9,81 \text{ m s}^{-2}$. Deze waarden zijn in (b.8) ingevuld:

$$q_{cr} = 1,0 h \sqrt{g \Delta D_n} \log \left\{ \frac{6h}{D_n} \right\} \quad (\text{b.9})$$

In uitdrukking (b.9) verschillen alleen de waarden van de coëfficiënten met (b.1). De waarden van de coëfficiënten in (b.1) zijn op de resultaten van fysisch modelonderzoek gebaseerd. Tenslotte wordt opgemerkt dat (b.1) alleen mag worden toegepast in het geldigheidsgebied van de formule:

$$0,2 < \frac{d}{h} < 0,6$$

De resultaten van het onderhavige onderzoek in de Tussenpadgoot zijn een indicatie dat het geldigheidsgebied waarschijnlijk mag worden uitgebreid tot:

$$0,2 < d/h < 0,75$$

Het geldigheidsgebied is voorts beperkt tot constructies met aan de benedenstroomse zijde een taludhelling tussen 1:8 en 1:4.

