

waterloopkundig laboratorium
delft hydraulics laboratory

stormvloedkering Oosterschelde

filterstabiliteit bij de overgang Noma-bovenmat

invloed van zandafzettingen

AFGEHANDELD

verslag modelonderzoek

M 2015/M 2062

november 1986

stormvloedkering Oosterschelde

filterstabiliteit bij de overgang Noma-bovenmat

invloed van zandafzettingen

verslag modelonderzoek

M 2015/M 2062

november 1986

INHOUD

	blz.
Samenvatting en conclusies.....	1
1. <u>Voorgeschiedenis</u>	4
2. <u>Invloed van spleten in filtermateriaal (M 2015)</u>	6
2.1 Inleiding.....	6
2.2 Opzet van het onderzoek.....	6
2.3 Layout van het model.....	7
2.4 Opzet van het proevenprogramma.....	8
2.5 Beschrijving van de uitgevoerde proeven.....	9
2.5.1 Correlatie-proeven (A).....	9
2.5.2 Korte spleet aan benedenstroomse modelzijde (B).....	12
2.5.3 Korte spleet aan bovenstroomse modelzijde (C).....	13
2.5.4 Lange, kleine spleet (D).....	14
2.6 Wijze van vaststellen van het kritieke verhang (i_{kr}).....	15
2.7 Aanvullende metingen.....	16
2.8 Interpretatie van de proefresultaten.....	18
2.8.1 De correlatie-proeven (A).....	18
2.8.2 De relatief korte spleet (B & C).....	20
2.8.3 De relatief lange spleet.....	21
2.9 Samenvatting van proefresultaten.....	21
3. <u>Tussentijdse aanbevelingen voor de uitvoering</u>	23
4. <u>Invloed van de korrelverdeling van het filtermateriaal (M 2062)</u> ..	24
4.1 Inleiding.....	24
4.2 Doelstelling van het aanvullend onderzoek.....	25
4.3 Toegepaste materialen.....	26
4.4 Onderling verband tussen de uitgevoerde proeven.....	26
4.5 Beschrijving van de uitgevoerde proeven.....	28
4.5.1 De correlatie-proeven serie 1 (A).....	28
4.5.2 De correlatie-proeven serie 2 (B).....	28
4.5.3 De correlatie-proeven serie 3 (C).....	29
4.5.4 De proeven met verschillende spleetlengten (D).....	30

INHOUD (vervolg)

	blz.
4.5.5 Proeven met een kleinere spleetdiameter (E).....	31
4.6 Wijze van vaststellen van het kritieke verhang (i_{kr}).....	31
4.7 Aanvullend metingen.....	32
4.7.1 Stroomsnelheidsmetingen in de spleet.....	32
4.7.2 Verhangregistratie in de spleet.....	33
4.7.3 Bepaling van het holte-percentage.....	34
4.8 Interpretatie van de resultaten.....	35
4.8.1 De correlatie-proeven.....	35
4.8.2 De invloed van de spleetlengte.....	35
4.8.3 De invloed van de spleetdiameter.....	36
4.9 Samenvatting van de proefresultaten.....	36

FIGUREN

BIJLAGEN

Samenvatting en conclusies

Bij het ontwerp van de constructie van de overgang tussen de uitloop van de negatieve overlap en de zijrand van de bovenmat is gebruik gemaakt van breuksteen, staal- of koperslak met een sortering $D_f = 40-250$ mm (hierna te noemen "filtermateriaal"). Dit materiaal wordt aangebracht door middel van storten onder water voornamelijk op en tegen het doek van de onder- cq. bovenmat. Direct onder cq. achter dit doek bevindt zich grind in een sortering $D_b = 8 - 40$ mm. De laagdikte van dit grind (hierna te noemen "basismateriaal") in de ondermat bedraagt 12 cm.

Bepalend voor de stabiliteit van deze grindlaag onder een verhangbelasting zijn de volgende premissen:

- 1 - het afdekkende filterdoek is gescheurd of verteerd
- 2 - het afdekkende filtermateriaal is ontmengd tijdens het storten hiervan.

Voor het onderzoek naar de stabiliteit van het basismateriaal onder het filtermateriaal bij verhangen die optreden bij een gesloten kering is uitgegaan van de tamelijk conservatieve aanname van ontmenging van het filtermateriaal tot $D_f = 100-250$ mm direct op de grenslaag. Het onderzoek heeft aangetoond dat deze constructie (het basismateriaal) bestand is tegen een verhang van 0,36, hierna het kritische verhang (i_{krit}) genoemd. Resultaten van dit onderzoek zijn gepresenteerd in rapport "M 1925: Stabiliteit van granulaire filters van de negatieve overlap" (WL, maart 1983).

Tijdens het aanbrengen van de filterlaag in de diverse negatieve overlappen van het sluitgat Hammen van de Stormvloedkering Oosterschelde is ontdekt dat er in het zogenaamde "slootje" langs de rand van de bovenmat sprake is van zandafzettingen waarin zich kokerwormen bevinden. Hierdoor is het niet zonder meer mogelijk het filtermateriaal direct op het doek cq. basismateriaal te storten. Onderzoek in de stroomgoot in Lith heeft aangetoond dat dit zand uit de constructie spoelt onder achterlating van spleten en kanalen, terwijl tevens is geconstateerd dat het basismateriaal lokaal is aangetast.

Bij onderzoek naar de stabiliteit van het basismateriaal onder filtermateriaal waarin zich spleten bevinden met een lengte van ca. 0.5 m ($\hat{=} 3 \times D_{50f}$) en een diameter van $\varnothing 0,15$ m ($\hat{=} 1 \times D_{50f}$) is aangetoond dat het bezwijkverhang voor de constructie ($i = 0.36$) zoals dat bij M 1925 werd gehanteerd, bij lange na niet wordt gehaald. Bij verhangen groter dan 0,10 à 0.15 treedt al erosie op van basismateriaal zonder dat er een stabiele eindsituatie ontstaat. Na dit onderzoek is geconcludeerd dat al het zand in de "slootjes" voorafgaand aan het storten van filtermateriaal dient te worden verwijderd.

Verbetering van storttechnieken en nader onderzoek in het prototype naar de optredende ontmenging van het filtermateriaal heeft geresulteerd in het optimaliseren van het ontmengingscriterium. De bij het modelonderzoek gehanteerde aanname bleek veel te conservatief.

Omdat het reinigen van het slootje belangrijke financiële en planningsconsequenties heeft, is aanvullend onderzoek uitgevoerd naar stabiliteit van het basismateriaal onder filtermateriaal ($D_f = 40-250$ mm) waarin spleten voorkomen. Uit de resultaten van dit laatste onderzoek kan geconcludeerd worden dat bij een gegeven korte spleet de stabiliteit van het basismateriaal onder verhang toeneemt naarmate de gradering van het filtermateriaal verbeterd.

Conclusies

Het onderzoek M 2015, waarvan het verslag te vinden is in het eerste deel van de rapport, heeft geresulteerd in de vaststelling dat de aanwezigheid van spleten in het filtermateriaal (100-250 mm) direct op het basismateriaal een ernstige aantasting van de standzekerheid van de overgangsconstructie zou vormen. Derhalve is geconcludeerd dat het voorkomen van zandresten in deze overgangsconstructie niet toelaatbaar is.

Nader onderzoek met betrekking tot nazak-verschijnselen, gecombineerd met de vaststelling dat de aanname van gradatie van het filtermateriaal bovenmatig conservatief bleek, heeft aanleiding gegeven tot verdergaand stabiliteitsonderzoek.

Het onderzoek M 2062, dat in het tweede deel van dit verslag zijn neerslag vindt, heeft aangetoond dat bij een realistische gradering van het filtermateriaal (70-250 mm) spleten in de constructie ter hoogte van de grenslaag met het basismateriaal toelaatbaar zijn, mits is voldaan aan de volgende voorwaarden:

- 1- de spleetdiameter is kleiner dan 0.15 m (D_{50f})
- 2- de spleetlengte niet groter is dan 0.50 m ($3 * D_{50f}$)

proef nr.	korrelgrootte [mm]				holtepercen- tage filter- materiaal	spleetafmeting		kritiek verhang i_{kr} [-]
	basis- materiaal		filter materiaal			n_f [%]	dwarsafme- tingen	
	D_b	D_{50b}	D_f	D_{15f}	[m ²]		1 [m]	
01	8-40	18	100-250	135	49	geen spleet		onbetrouwb.
02	8-40	18	100-250	135	47	geen spleet		ca. 0,30
03	8-40	18	100-250	135	49	geen spleet		ca. 0,28
04	8-40	18	100-250	135	49	0.15 * 0.15	0.50	ca. 0,21
05	8-40	18	100-250	135	49	0.15 * 0.15	0.50	ca. 0,14
06	8-40	18	100-250	135	46	lange spleet		ca. 0,09
07	8-40	18	100-250	135	49	0.15 * 0.15	0.50	ca. 0,20
08	8-40	18	100-250	135	49	0.15 * 0.15	0.50	ca. 0,18

Overzicht resultaten M 2015

nr.	D_b	D_{50b}	D_f	D_{15f}	n_f	dwarsafme- tingen	1	i_{kr}
01	8-40	28	40-250	82	41	geen spleet		> 0.50
02	8-40	28	40-250	82	41	0.15 * 0.15	0.50	> 0.50
03	8-40	28	70-250	100	45	0.15 * 0.15	0.75	ca. 0.40
04	8-40	28	70-250	100	44	geen spleet		> 0.50
10	8-40	18	70-250	100	45	geen spleet		> 0.50
11	8-40	18	70-250	100	45	0.15 * 0.15	0.30	ca. 0.52
07	8-40	18	70-250	100	45	0.15 * 0.15	0.50	ca. 0.46
05	8-40	18	70-250	100	45	0.15 * 0.15	0.50	ca. 0.40
06	8-40	18	70-250	100	46	0.15 * 0.15	1.00	0.20 à 0.25
08	8-40	18	70-250	100	45	0.10 * 0.10	0.50	> 0.50
09	8-40	18	70-250	100	45	0.10 * 0.10	0.80	ca. 0.28

Overzicht resultaten M 2062

STORMVLOEDKERING OOSTERSCHELDE; FILTERSTABILITEIT BIJ DE OVERGANG NOMA-BOVENMAT

Invloed zandafzettingen

1. Voorgeschiedenis

Aan het eind van 1982 is in opdracht van de hoofdafdeling Waterloopkunde van de Deltadienst van Rijkswaterstaat door het Waterloopkundig Laboratorium onderzoek verricht naar de stabiliteit van grensvlakken in granulaire filterconstructies van de zogenoemde "negatieve overlap" in de Stormvloedkering Oosterschelde.

Het in dit kader uitgevoerde modelonderzoek naar de stabiliteit van het scheidingsvlak basismateriaal (grind: $D_b = 8-40$ mm; $D_{50b} = 18$ mm) en filtermateriaal (basalt-stortsteen: $D_f = 40-250$ mm; $D_{15f} = 35$ mm) is verricht in de Filterbak van het Laboratorium De Voorst. Stabiliteit van andersoortige grensvlakken is bepaald aan de hand van berekeningen en bureaustudies.

Verslaglegging van dit onderzoek is te vinden in het verslag M 1925 - Stabiliteit van de granulaire filters van de negatieve overlap, Waterloopkundig Laboratorium (maart 1983).

Bij genoemd onderzoek naar de stabiliteit van basismateriaal onder filtermateriaal is uitgegaan van de volgende aannamen:

1. Het aanwezige filterdoek van zowel ondermat als bovenmat wordt geacht te zijn bezweken zodat het basismateriaal (grind 8-40 mm), zoals dat is toegepast in de bovenmat en in de bovenste laag van de ondermat, niet meer opgesloten is.
2. Het op het basismateriaal aangebrachte filtermateriaal wordt geacht te zijn ontmengd tijdens het stortproces tot een korrelgradatie groot 100-250 mm
3. Er is sprake van een goede aansluiting tussen filtermateriaal en basismateriaal zodanig dat van spleten en kanalen geen sprake is.

Uit de onderzoeksresultaten zijn met betrekking tot de stabiliteit van het basismateriaal de volgende conclusies geformuleerd:

1. Het basismateriaal (grind: $D_b = 8-40$ mm; $D_{50b} = 18$ mm) is stabiel onder filtermateriaal (basaltstortsteen: $D_f = 100-250$ mm; $D_{15f} = 135$ mm) bij horizontale verhangen evenwijdig aan het grensvlak kleiner dan $i_{hor} = 0,35$. Dit verhang wordt het kritieke verhang (i_{kr}) genoemd.

2. Bij verhangen groter dan i_{kr} ontstaan rondom individuele basaltstenen locale erosiegaten in het basismateriaal. Bij verhangen groter dan $i = 0,40$ is lokale zakking van filterstenen geconstateerd to ca. 0,10 m. Dit wordt als zeer riskant beoordeeld, aangezien de basismateriaal ter plaatse slechts ca. 0,12 m dik is (bovenste laag van de ondermat).
3. Zakking van het gehele pakket filtermateriaal als gevolg van de erosie van het basismateriaal is niet geconstateerd. Dit wordt verklaard uit het zeer locale karakter van de erosie, waardoor gewelfwerking of brugvorming in het filtermateriaal kan optreden.

Als maatgevend criterium voor i_{kr} is aangehouden het horizontaal verhang, waarbij net geen basismateriaal het model verlaat.

2. Invloed van spleten in filtermateriaal (M 2015)

2.1 Inleiding

Tijdens de uitvoering van de overgangsconstructie Noma-bovenmat in de negatieve overlappen van de Stormvloedkering Oosterschelde, is geconstateerd dat het zo genoemde "slootje" tussen bovenmat en grindwiep geheel of gedeeltelijk gevuld is met zand en kokerwormen.

Onderzoek in de stroomgoot in Lith heeft aangetoond dat dit zand onder invloed van verhangen met een vrij lage frequentie van voorkomen uit dit "slootje" wegspoelt. Tussen filtermateriaal en basismateriaal ontstaan ruimten, die slechts zeer gedeeltelijk worden opgevuld door bijzakken van het filtermateriaal (NB! Het bijzakken wordt in sterke mate beïnvloed door de gradatie van het filtermateriaal). Hierdoor ontstaan op de scheiding van de lagen lokaal spleten en kanalen, die een nadelige invloed kunnen hebben op de grootte van het kritieke verhang.

Teneinde de invloed van deze kanalen cq. spleten op de stabiliteit van het basismateriaal vast te stellen is het Waterloopkundig Laboratorium door het Hoofd van de Hoofdafdeling Waterloopkunde van de Deltadienst van Rijkswaterstaat opgedragen modelonderzoek uit te voeren. Het onderzoek is uitgevoerd in de Filterbak van het Laboratorium De Voorst onder leiding van ir. T. van der Meulen en ing. P.J. Visser, laatstgenoemde heeft de verslaglegging verzorgd.

2.2 Opzet van het onderzoek

Doel van de proeven is vast te stellen welke de invloed is van de aanwezigheid van een lokale spleet direct boven het basismateriaal op de stabiliteit van dit basismateriaal bij het optreden van een stationair horizontaal verhang.

De opzet van het onderzoek ziet er als volgt uit:

1. Inbouw van een geschematiseerd spleet in een representatief element van de constructie.
2. Bepaling van het max. toelaatbare verhang (i_{kr}) door stapsgewijze opvoering van het uitwendige verhang en visuele waarneming van het begin van instabiliteit van het basismateriaal.

3. Bepaling van het ogenblik van bezwijken door verdere verhoging van het verhang en registratie van de hoeveelheden uittredend basismateriaal.
4. Door middel van het meten van waterdrukken in het model registreren of, en zo ja waar, verhangconcentraties optreden; één en ander in samenhang met het vastleggen van eventuele schadeplaatsen in de constructie.

Teneinde een goed referentiekader te verkrijgen, zijn de proeven zoveel mogelijk overeenkomstig vorig onderzoek uitgevoerd. Derhalve is gekozen voor uitvoering in de Filterbak van het Laboratorium De Voorst.

2.3 Layout van het model

Evenals bij vorig onderzoek bestaat het model uit een geschematiseerd element van de constructie op ware grootte.

Teneinde in staat te zijn spleten en kanalen in te kunnen bouwen is het voor deze serie proefnemingen noodzakelijk de elementlengte in de Filterbak te verlengen tot 1.75 m (zie figuur 1).

Op een waterdichte houten bodem is een laag basismateriaal (grind 8-40 mm) met een laagdikte van 0,15 m aangebracht.

Op het basismateriaal is een laag filtermateriaal dik 0,35 m aangebracht.

Teneinde ook de situatie langs de langswanden goed te definiëren is gebruik gemaakt van (doorgezaagde) halve basaltstenen die met de bezaagde zijde langs beide langswanden zijn geplaatst. Het geheel is afgedekt met een laag schuimplastic ter uitvulling en een houten deksel voorzien van een perspex ruit. De ene langswand wordt gevormd door een stalen plaat, voorzien van aansluitpunten ten behoeve van waterdrukregistratie met behulp van peilbuizen. De andere wand bestaat uit staalglas, waardoor het mogelijk is de optredende erosiepatronen visueel waar te nemen. Op de deksel is voorts ballast aangebracht ter voorkoming van opdrijven onder invloed van de waterdruk. Deze bovenbelasting rust echter niet op het filtermateriaal.

Het voor het onderzoek gebruikte basismateriaal grind is overeenkomstig de korrelverdeling volgens figuur 2 samengesteld. Hierbij is uitgegaan van de korrelverdeling zoals die ook gebruikt is bij eerder onderzoek (M 1925: Stabiliteit van granulaire filters van de negatieve overlap).

Het in het model toegepaste filtermateriaal basaltstortsteen is in het recente verleden door de opdrachtgever toegeleverd. De dichtheid bedraagt $\rho = 3110 \text{ kg/m}^3$

en is bepaald door weging onder en boven water van een representatief aantal stenen. Het materiaal kan ook gekarakteriseerd worden met behulp van de massaverdeling: (zie figuur 3)

$$M_{15} = 8 \text{ kg}$$

$$M_{50} = 11,3 \text{ kg}$$

$$M_{85} = 18,2 \text{ kg}$$

2.4 Opzet van het proevenprogramma

Daar de modelopzet in doorstroo lengte en -profiel in belangrijke mate afwijkt van die van eerder uitgevoerd onderzoek (M 1925) is het eerst nodig een aantal proeven ter aansluiting uit te voeren. Hierbij wordt het filtermateriaal aansluitend op het basismateriaal aangebracht.

A - Correlatie-proeven met filtermateriaal op basismateriaal zonder spleet:

== inspeelproef proef 1

== holte-percentag e filtermateriaal $n_f = 49 \%$ proef 2

== holte-percentag e filtermateriaal $n_f = 47 \%$ proef 3

Vervolgens wordt de invloed op de stabiliteit van het basismateriaal bepaald van een relatief kort spleetvormig kanaal met afmetingen $0,50 \times 0,15 \times 0,15 \text{ m}^3$ op het scheidingsvlak in het filtermateriaal met een grotere "aanstroom- dan uitstroomafstand" tot de modelranden.

B - Korte spleet aan benedenstroomse modelzijde:

== proef met spleet in filtermateriaal $n_f = 49 \%$ proef 4

== reproductie proef 7

Daarna wordt onderzocht of de plaats van de spleet in het model van invloed is op de stabiliteitsbepaling in het model. Er wordt een spleet ingebouwd met gelijke afmetingen als bij proef 4 maar met een grote "uitstroom- dan aanstroom afstand" tot de modelranden.

C - Korte spleet aan bovenstroomse modelzijde.

== proef met spleet in filtermateriaal $n_f = 49 \%$ proef 5

== reproductie proef 8

Als laatste wordt de invloed onderzocht van een relatief lang spleetvormig kanaal, waarbij instabiliteit van het basismateriaal in de spleet veroorzaakt kan worden door "piping".

D - Lange, kleine spleet:

== proef met lange spleet in filtermateriaal $n_f = 46 \%$ proef 6

Aansluitend zijn diverse aanvullende metingen uitgevoerd, voornamelijk ter bepaling van een aantal kenmerkende materiaal-constanten, zoals massa-verdeling, holte-percentages, etc.

2.5 Beschrijving van de uitgevoerde proeven

2.5.1 Correlatie-proeven (A)

Zoals in het voorgaande is vermeld, dienen de eerste proeven in dit onderzoek voornamelijk ter correlatie met eerder onderzoek, dat in december 1983 is uitgevoerd in de zogenoemde Gele Bak in Lith en het stabiliteitsonderzoek in de Filterbak bij het Waterloopkundig Laboratorium De Voorst eind 1982. Dit is nodig omdat bij genoemde onderzoeken de modelconfiguraties afwijken van de bij dit onderzoek te gebruiken modelopbouw.

Proef 1

Tijdens de uitvoering van proef 1 blijkt het grensvlak aan de instroomzijde instabiel te worden, ver voordat er sprake is van enige beweging van grindkorrels in het midden van het model. Dit wordt voornamelijk veroorzaakt door ongedefinieerde instroming aan de bovenstroomse rand van het model.

Hiervoor zijn drie oorzaken aan te wijzen:

- == de afmeting van de bovenstroomse waterbuffer van de Filterbak is zodanig dat de noodzakelijke debieten een zeer turbulente waterbeweging in deze buffer in stand houden,
- == omdat de normale debietcapaciteit van de Filterbak niet groot genoeg blijkt te zijn om de voor de proeven noodzakelijke grote debieten te leveren, is aan de uitstroomzijde van het model een kloppomp geplaatst die water direct terugpompt in de bovenstroomse buffer. Dit veroorzaakt eveneens grote turbulentie aan de instroomzijde van het model.
- == de asymmetrische ligging van het model ten opzichte van de bovenstroomse buffer (zie figuur 1) is er de oorzaak van dat er een 'dode' hoek in de waterbuffer ontstaat.

Grindkorrels die van het grensvlak aan de instroomzijde worden opgepakt worden voornamelijk weer afgezet aan de uitstroomzijde van het model. Bij uitbouw van het model na de beëindiging van de proef blijken er grindkorrels verspreid over de volledige hoogte van het model afgezet te zijn.

De resultaten van deze proef worden niet representatief geacht voor het onderzoek en zijn dus niet als zodanig gepresenteerd en geïnterpreteerd.

Proef 2 (zie ook tabel en figuur I-1)

Bij de voorbereiding en opbouw van proef 2 zijn de volgende voorzorgen getroffen ten einde vertekening van de resultaten door instroomeffecten te voorkomen:

- == de instroomopening is voorzien van een pakket PVC-buizen teneinde een beter gedefinieerde instroming te bevorderen en
- == over een lengte van ca. 0.35 m (ca. 2 maal D_{50f}) is het grensvlak afgedekt met fijn gaas, zodat het basismateriaal hier is vastgelegd.
- == in de houten deksel is een perspex ruit aangebracht teneinde tijdens de uitvoering van de proeven visueel te kunnen vaststellen of er zich ook grindkorrels afzetten in het filtermateriaal.

Bij de instelling van de eerste vervalstappen wordt kleurstof op verschillende plaatsen in de instroomzijde van het model ingebracht. Het stroombeeld blijkt echter dermate turbulent, dat geen preferente stroomgebieden kunnen worden onderkend in het model.

Bij een uitwendig verhang, groot 0,49 m. (stap 4) beginnen grindkorrels in de grenslaag korrel voor korrel te verrollen. De volgende stap (verval = 0,54 m) treedt voor het eerst een kleine hoeveelheid grind, voornamelijk uit het uitstroomgebied, uit het model. Hoewel de grenslaag tijdens de volgende stappen redelijk stabiel blijft, moet toch worden geconcludeerd dat het kritiek verhang is overschreden. Nadat een verval, groot 0,70 m. (stap 8) is ingesteld, worden redelijke hoeveelheden grind uit het hart van het model verplaatst naar de uitstroomzijde, zonder dat er een noemenswaardige hoeveelheid uit het model treedt. In figuur I-1 kunnen we zien dat er ook steeds een lokaal verhang groter dan het gemiddelde verhang aanwezig is ter plaatse van de raaien 3 - 4 en 6 - 7.

Bij de instelling van stap 9 (verval = 0.76 m) blijkt de stabiliteit van de grenslaag lokaal overschreden. Veel grind komt in beweging en er treedt ook grind uit het model. Het lokaal verhang ter plaatse van raaien 3 - 4 neemt

hierdoor af, echter bij raaien 6 - 7 en volgende neemt het verhang toe. Toch lijkt er een stabiele situatie te zijn ontstaan, want tot stap 13 gebeurt er niet veel. De grenslaag vertoont een aantal duidelijke, zij het ondiepe stroomgaten (max. ca. 4 cm diep). Bij de instelling van een verval, groot 0,95 m bezwijkt de grenslaag echter definitief. Er ontstaan grote gaten, die bij een verdere vergroting van het verval doorzetten tot de bodem van het model.

Proef 3.-(zie ook tabel en figuur I-2)

Om een indruk te krijgen van de invloed van het holte-percentages op de stabiliteit van de scheidingslaag grind-filtermateriaal is, gebaseerd op de visuele impressie dat het filtermateriaal bij proef 2 'redelijk dicht gepakt' opgebouwd is geweest, proef 3 ingebouwd met ca. 22 kgf basaltstenen minder. Dit heeft geresulteerd in een verschil in holte-percentages van 2% (van $n_f = 47\%$ naar $n_f = 49\%$).

Tot een uitwendig verval, groot 0,42 m is er nauwelijks sprake van grindtransport door het model. Wel wordt zeer lokaal een enkele grindkorrel opgenomen en weer afgezet in de lichte van een basaltsteen. Bij een vergroting van het verval tot 0,52 m is er sprake van een lichte aantasting van de grenslaag. De meeste grindkorrels vinden echter elders een stabiele ligplaats, vooral rond basaltstenen, slechts weinig grind treedt uit het model.

Bij de volgende stap (verval = 0,58 m) treedt een serieuze beschadiging op van de grenslaag. Redelijk veel grind (ca. 3 kg) blijkt na ca. 1 uur uit het model verdwenen te zijn. Bij geleidelijke vergroting van het uitwendig verval tot 0,67 m (stap 8) wordt wel redelijk veel beweging in het model waargenomen, maar er treedt zeer weinig grind uit het model. Klaarblijkelijk vindt afzetting elders in het filtermateriaal plaats. In figuur I-2 is ook duidelijk te zien, dat bovenstrooms van het hart van het model de verhangen minder snel toenemen dan benedenstrooms.

Bij de instelling van een verval, groot 0,73 m (stap 9) treden plotseling grote hoeveelheden grind uit het model en zakken sommige basaltstenen weg: het model is bezweken.

Bij het verwijderen van de filterlaag in het model blijkt het grind door het gehele model te zijn afgezet. Vooral voor het hart van het model bevindt zich een grindophoging, waardoor de doorlatendheid hier minder zal zijn geworden. Dit verklaart de grote energieverliezen benedenstrooms van het midden tijdens stap 7 e.v., Dit wordt nog eens bevestigd door de vondst van een erosie-kuil van ca. 8 cm diep tussen raai 6 en 7.

2.5.2 Korte spleet aan benedenstroomse modelzijde (B)

Bij deze proeven is zoals gezegd de invloed op de stabiliteit van de grenslaag onderzocht van een in het filtermateriaal aangebrachte kleine, relatief korte spleet. Gekozen is voor een lengte van 0,50 m en een diameter van $0,15 \times 0,15 \text{ m}^2$, hetgeen correspondeert met de afmeting van 3 stuks basaltstenen met een gemiddelde diameter ($D_{50f} = \text{ca. } 150 \text{ mm}$) De nadruk heeft hierbij gelegen op de invloed van verhangconcentraties bovenstrooms van de spleet en de te verwachten debietconcentraties in de spleet zelf. Teneinde de stabiliteit van het filtermateriaal direct boven de kunstmatige spleet te waarborgen wordt een stalen raamwerk in het model ingebouwd, waarop de basaltstenen rusten.

Proef 4. (zie ook tabel en figuur I-3)

Bij de uitvoering van proef 4 treedt tot een verval van 0,29 m geen noemenswaardig beweging op. Wanneer echter het verval wordt opgevoerd tot 0,33 m manifesteert zich een eerste lokaal erosie-proces direct benedenstrooms van de kunstmatige spleet. De hier vanaf het begin aanwezige natuurlijke spleet diept zich uit tot een kanaal, dat een kortsluiting maakt met het benedenstroomse pand van de Filterbak (zie foto 1). Bij een verval van 0,42 m (stap 4) treedt plotseling een grenslaag-instabiliteit op in het gebied direct bovenstrooms van de kunstmatige spleet. Grindkorrels worden door de spleet afgevoerd. Het kritieke verhang is overschreden, maar de hoeveelheid grind, die uitspoelt, is nog niet verontrustend te noemen.

Bij de instelling van een verval van 0,46 m gaat overal in het model grind bewegen. Opvallend is dat bij de instelling van dit verval het debiet blijkt te zijn afgenomen, om later (stap 6) weer toe te nemen. Ditzelfde geldt voor het verhang tussen raai 3 en 7. Erosie lijkt een langzaam maar gestaag proces. Daarom wordt deze vervalinstelling gedurende ruim 2 uur gehandhaafd. Er blijkt een stabiele situatie te ontstaan zonder dat er duidelijk sprake is van erosie-kuilen. Na de instelling van een verhang van 0,49 m zet erosie zich duidelijk door en ontstaan er erosie-kuilen in de grenslaag, echter vooral buiten de kunstmatige spleet (zie foto 2).

Proef 7 (zie ook tabel en figuur I-4)

Direct na de instelling van een verval van 0,29 m ontstaat aan de benedenstroomse zijde van de kunstmatige spleet langs het glas een klein erosiekanaal. Bij het vergroten van het verval tot 0,32 m verrollen enkele grindkor-

rels en stapelen zich op tegen basaltstenen. Het erosiekanaaltje wordt iets groter en er vindt verdere opstapeling van grindkorrels plaats. Bij instellen van een groter verval (0,37 m) valt meer beweging waar te nemen, vooral in het benedenstroomse deel van het model. Een weinig basismateriaal treedt uit het model, maar van significante schade-ontwikkeling is nog geen sprake. Pas bij een verval van 0,48 m kan gesproken worden van overschrijding van het kritieke verhang. Er treedt schade op aan de bovenstroomse en aan de onderstroomse zijde van de spleet. Toch kan gesproken worden van een zich stabiliserende situatie, want bij vergroting van het verval tot 0,54 m treedt toch weinig verandering op in de toestand van de grenslaag, alleen de vorming van erosie kuilen is iets duidelijker waar te nemen. Pas tijdens het instellen van een verval van 0,58 m bezwijkt het model definitief.

2.5.3 Korte spleet aan bovenstroomse modelzijde (C)

Bij twee proeven is de korte, kunstmatige spleet gesitueerd aan de bovenstroomse zijde van het model ter hoogte van de raaien 3 tot 5. Proef 8 is een herhaling van proef 5.

Proef 5. (zie ook tabel en figuur I-5)

Bij de instelling van de eerste stap met een verval van 0,29 m treedt er een gering aantal grindkorrels uit het benedenstroomse gebied van het model uit. In het model lijkt een zekere heroriëntatie van diverse grindkorrels op te treden onder invloed van het verhang.

Na vergroting van het verval tot 0,33 m wordt het kritiek verhang klaarblijkelijk overschreden. Waar precies het erosie-proces begint kan niet visueel worden vastgesteld. In de kunstmatige spleet is geen beweging of langtransport te zien. Bij verdere vergroting van het verval tot 0,38 m verandert er niet veel. Weinig grind treedt uit het model. De bij de vorige stap ontstane instabiliteit moet een zeer lokaal karakter hebben!

Wanneer echter het verval wordt opgevoerd tot 0,42 m ontstaat er een behoorlijke instabiliteit ergens in het middel van het model. Er is slechts een geringe beweging in de kunstmatige spleet te ontwaren, terwijl er toch nogal veel grind uit het model treedt. Na vergroting van het verval tot 0,47 m ontstaat er een erosie-kuil aan de benedenstroomse zijde van de spleet tussen de basaltstenen, die daarop beginnen weg te zakken. Opmerkelijk is dat, ondanks een verhoging van het verval en de hieruit voortvloeiende vergroting van

het inwendig verhang, het debiet niet toeneemt.

Bij nog verder vergroting van het verval bezwijkt het model geheel.

Proef 8. (zie ook tabel en figuur I-6)

Bij een verval van 0,33 m treedt voor het eerst beweging op van grindkorrels in de kunstmatige spleet. Ook treden een aantal grindkorrels uit het model. Als het verval wordt opgevoerd tot 0,43 m wordt het kritiek verhang overschreden en ontstaat er een erosie-kuil aan de benedenstroomse zijde van de spleet in de basaltstenen. Al het uittredende grind komt uit dit gat vandaan. Na het vergroten van het verval blijken zowel het inwendige verhang als het debiet toch kleiner geworden te zijn. De hoeveelheid uittredend grind neemt echter niet spectaculair toe.

Bij een verval van 0,58 m worden belangrijke delen van de grenslaag instabiel, zakken basaltstenen weg en bezwijkt derhalve het model.

2.5.4 Lange, kleine spleet (D)

Bij proef 4 en 5 (korte spleten) is nauwelijks of geen erosie ontstaan in de spleten zelf. Alle schade is opgetreden voornamelijk aan de boven- en benedenstroomse zijde van de spleten. Daarom is bij de opzet van proef 6 gekozen voor een tamelijk lang, zij het relatief klein kanaal in het filtermateriaal.

Proef 6. (zie ook tabel en figuur I-7)

Bij de instelling van de eerste stap met een verval van 0,29 m over het model treedt er direct een kleine hoeveelheid grind uit het model. Dit zijn voornamelijk kleinere grindkorrels, die door de stroming van het grensvlak worden gelicht en voor een deel worden afgevoerd. Vrij snel stelt zich opnieuw een stabiele situatie in. Bij vergroting van het verval tot 0,33 m is het opvallend te moeten constateren, dat zowel het inwendig verhang als het debiet niet in die mate toenemen als mag worden verwacht. Er ontstaat een lichte beweging in de spleet; ook de wat grotere grindkorrels gaan aan de wandel en verrollen naar de benedenstroomse zijde van de spleet, waar een opstapeling van grind ontstaat (zie ook figuur I-7a-1).

Vergroting van het verval tot een waarde van 0,38 m heeft als onmiddellijk resultaat, dat veel grind begint te bewegen. Duidelijk is het kritieke verhang zowel in de spleet, als ook in de benedenstroomse zijde van het model ruim overschreden. Desondanks stabiliseert de situatie zich enigszins (zie ook

figuur I-7a-2), zoals ook moge blijken uit de geringe uitstoot van grind bij vergroting van het verval tot 0,43 m. Bij dit verval treedt wel enige vervlakking op van de erosie-kuil in de spleet (vergelijk figuur I-7a-3 en figuur I-7b-4).

Na vergroting van het verval tot 0,48 m wordt met name de grenslaag buiten de spleet instabiel. Veel grindtransport vindt plaats via de spleet, waardoor een verdergaande vervlakking van de erosiekuil en een hogere opstapeling van grind aan de benedenstroomse zijde van de spleet optreedt. Bij verdere vergroting van het verval bezwijkt de grenslaag en zakken er basalt stenen weg: het model is bezweken.

2.6 Wijze van vaststellen van het kritieke verhang (i_{kr})

De manier van vaststelling van het moment van overschrijden van het kritieke verhang in een bepaalde modelopbouw bij de proeven in dit onderzoek wijkt af van die, gebruikt bij het onderzoek M1925. Dit vindt zijn oorzaak in de relatief grote verschillen in geometrische eigenschappen van de toegepaste modelopstellingen.

Bij het onderzoek (M 1925) naar de stabiliteit van basismateriaal 8-40 mm. onder het (tijdens het storten uitgezeefd) filtermateriaal is de tijdens het stromen uitgespoelde hoeveelheid basismateriaal bepaald door weging tijdens de proef. Door de grote verschillen in korrelsamenstelling tussen basismateriaal en filtermateriaal (mate van gradering $P = D_{15f}/D_{50b} = 0.140/0,018 = \text{ca. } 8$) en de relatief korte lengte van de ongezochte modelconfiguraties (ca. $5 \times D_{50f}$) is de veronderstelling gewettigd, dat al het opgenomen grind ook het model verlaat. Algemeen kan worden gesteld dat het korrelskelet van het filtermateriaal een geometrisch open filter vormt voor kiezelstenen van 8-40 mm diameter.

Door de hoeveelheden uitgespoeld grind uit te zetten tegen het verhang, waarbij uitspoeling optrad, is door extrapolatie bepaald bij welk verhang voor het eerst van erosie sprake is. Dit verhang is het kritiek verhang genoemd. Dit verhang laat zich achteraf het beste omschrijven als het verhang waarbij "af en toe een grindkorrel verplaatst".

Bij de voorbereiding van het onderzoek M 2015 is gekozen voor een afwijkende modelopbouw. De reden hiervoor is gelegen in de te onderzoeken stabiliteit van basismateriaal onder filtermateriaal, waarin zich tijdens de bouw spleet-

vormige kanalen hebben gevormd. De lengte van het model is vergroot, terwijl in verband met de debiet- en verhang-capaciteit van de Filterbak het doorstroomprofiel is verkleind, hetgeen heeft geresulteerd in modelafmetingen $l \times b \times h = 1,75 \times 0,60 \times 0,36 \text{ m}^3$.

Tijdens de uitvoering van de proeven blijkt dat de optredende instabiliteit van de grenslaag, zowel onder het filtermateriaal als in de kunstmatige spleet, slechts zeer gedeeltelijk gevolgd wordt door volledig uittreden van het geërodeerde grind. Zowel aan de bovenstroomse als aan de benedenstroomse zijde van het model treedt in de regel het eerst beweging op. Alleen het grind, dat aan de benedenstroomse zijde instabiel wordt, treedt volledig uit, de rest blijft gedeeltelijk in het filtermateriaal hangen.

Een en ander leidt tot de conclusie, dat de bepaling van het kritieke verhang niet alleen gebaseerd mag worden op de hoeveelheden uittredend grind maar ook op de visuele waarnemingen van beweging van grindkorrels in het zichtbare deel van het model. Het aldus gehanteerde criterium voor het kritieke verhang laat zich het beste omschrijven als "korrels van de wandel, lokaal en niet permanent".

2.7 Aanvullende metingen

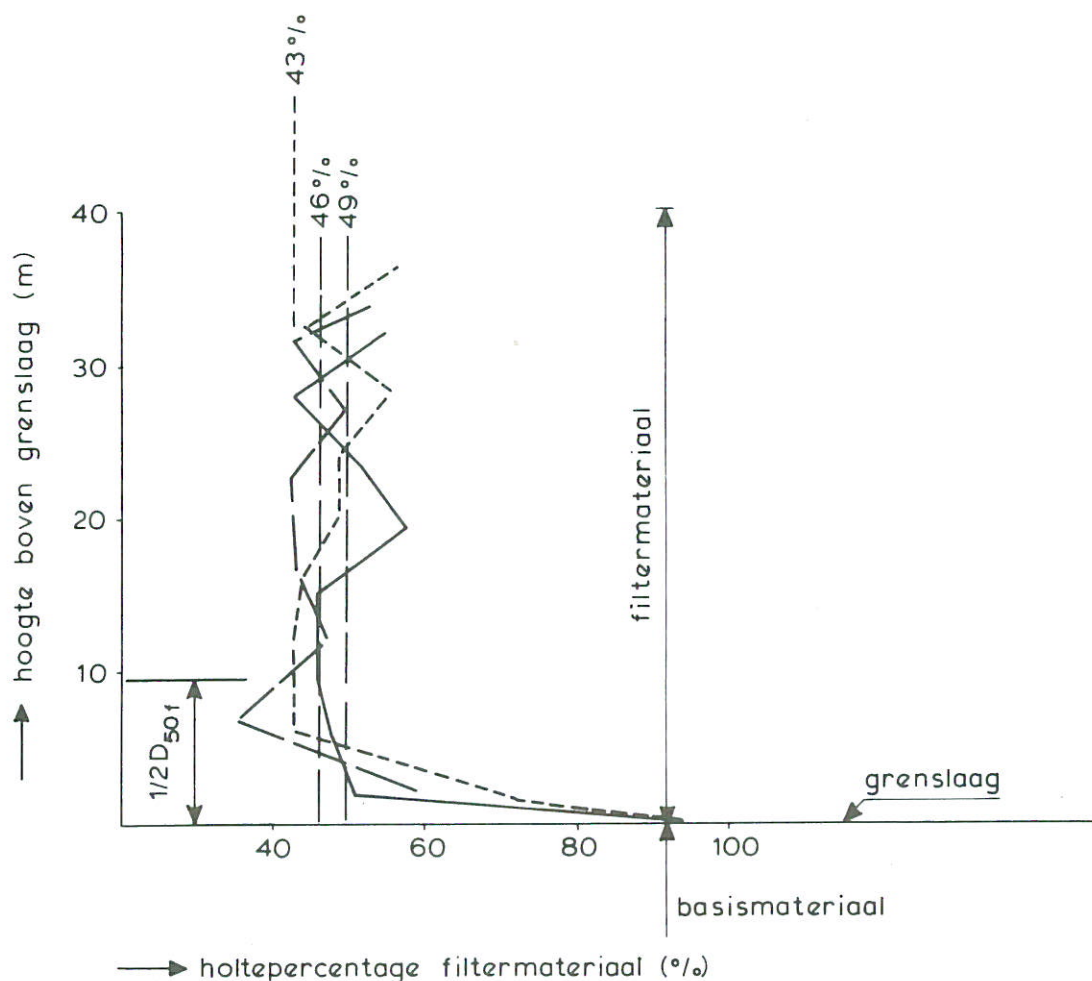
Voor de aanvang van de proeven is een grindmengsel samengesteld overeenkomstig de korrelverdeling van het basismateriaal, dat gebruikt is bij de uitvoering van de stabiliteitsproeven M 1925. De korrelverdeling is gepresenteerd in figuur 2.

Bij de proeven is ook gebruik gemaakt van dezelfde basalstenen als bij M 1925. Omdat er voor dit materiaal geen geschikte set zeven beschikbaar was, is geen korrelverdeling van de basalt-breuksteen bepaald. Teneinde toch inzicht te krijgen in de afmeting van de stenen en de sortering van het mengsel filtermateriaal is elke steen afzonderlijk gewogen. Met de aldus verkregen massa-gegevens zijn een massa-sorteringsgrafiek (figuur 3a) en een massa-overschrijdingskromme (figuur 3b) samengesteld. Tevens is de dichtheid van basalt op $\rho = 3110 \text{ kg/m}^3$ bepaald door middel van weging van een representatief aantal stenen onder en boven water.

Tijdens de uitvoering van de proeven is het holte-percentages van het in het model aangebrachte filtermateriaal bepaald door het gewicht van de gebruikte basaltstenen te delen door het volume dat door de basalt wordt ingenomen. Bij de proeven 1, 2 en 3 bedroeg dit volume: $1,75 \times 0,60 \times 0,36 \text{ m}^3 = 0,378 \text{ m}^3$. Om

bij de proeven 4,5,7 en 8 hetzelfde holte-percentages te handhaven, is steeds dat deel van de basaltstenen niet gebruikt, dat normaliter de ruimte van de kunstmatige spleet zou hebben gevuld.

Na beëindiging van de stroomproeven in de Filterbak is het werkelijke holte-percentages van de basaltstapeling gemeten. Hiervoor is een houten bak gebruikt met dezelfde afmetingen als het filterpakket, te weten (lxbxh) 1,75 x 0,60 x 0,36 m³. Hierin zijn de basaltstenen op dezelfde willekeurige manier aangebracht als dat in de Filterbak is gebeurd. Daarna is deze houten kist in stappen gevuld met water, waarbij de stijghoogte en de toegevoegde hoeveelheid is gemeten. Dit resulteert in de volgende holtepercentages:



2.8 Interpretatie van de proefresultaten

Uit visuele waarnemingen tijdens de uitvoering van de proeven is gebleken dat de eerste, vaak geringe uitstoot van basismateriaal voornamelijk aan de benedenstroomse (uitstrooms-) zijde is opgepakt. De absolute hoeveelheid is niet zonder meer maatgevend voor de bepaling van de grootte van het kritieke verhang i_{kr} , zoals bij eerder onderzoek is aangenomen, maar kan slechts indicatief worden gebruikt. Als 'beter' criterium geldt het visueel vastgestelde optreden van "verplaatsing van significante hoeveelheden grindkorrels, lokaal maar niet noodgedwongen permanent". Immers, ook lokale, niet voortschrijdende grenslaagerosie kan op den duur aanleiding zijn voor ontoelaatbare aantasting van de laag basismateriaal in het prototype.

2.8.1 De correlatie-proeven (A)

De absolute groottes van het kritieke verhang die zijn gevonden bij dit onderzoek zijn lager dan die welke gevonden zijn bij eerder onderzoek (M 1925).

Hiervoor kunnen een drietal oorzaken worden aangewezen:

- 1 - de geconstateerde verschillen in toegepast holte-percentages in de diverse modelconfiguraties,
- 2 - de verschillen in modelopbouw (lengte, breedte en hoogte) en
- 3 - de afwijkende wijze van bepalen van de grootte van het kritieke verhang.

Teneinde de verschillende proefresultaten onderling met elkaar te kunnen vergelijken, wordt gebruik gemaakt van de volgende relaties:

$$i_{kr} = \alpha \cdot v_{*kr}^2 \quad (1)$$

waarin:

$$\alpha = \frac{0,06}{n_f^3 \cdot (D_{15f})^{4/3}} + \frac{n_f^{5/3} \cdot (D_{15f})^{1/3}}{1000 \cdot (D_{50b})^{5/3}} \quad (2)$$

$$v_{*kr} = (\psi \cdot \Delta \cdot g \cdot D_{50b})^{1/2} \quad (3)$$

Substitueren we (3) in (1) dan vinden we de volgende betrekking:

$$i_{kr} = \alpha * \beta * \psi \quad (4)$$

waarin:

$$\beta = \Delta \cdot g \cdot D_{50b} \quad (5)$$

Wanneer we de gevonden modelwaarden en de resultaten van de diverse kenmerkende proeven in betrekking (4) substitueren, vinden we het volgende overzicht.

Proef nr.	modelwaarden			afgeleide modelwaarden		meetresultaat	constante v.Shields	berekende waarden
	D _{15f} (m)	D _{50b} (m)	n _f (-)	α	β			
						i _{kr} (-)	γ' (-)	i _{kr} ^{v*kr} (m/s)
M 1925/T4	0,140	0,018	0,41	12,07	0,291	0,35 à 0,40	0,10-0,11	0,290,13
M 1925/T3	0,140	0,018	0,43	10,48	0,291	0,35 à 0,40	0,12-0,13	0,250,13
M 2015/ 2	0,135	0,018	0,47	8,46	0,291	0,30	0,12	0,200,13
M 2015/ 3	0,135	0,018	0,49	7,49	0,291	0,26 à 0,28	0,12-0,13	0,180,13

Uit bovenstaande tabel laten zich de volgende feiten afleiden:

- 1- De gevonden waarden ψ_s (kolom 8) zijn, alhoewel onderling nagenoeg gelijk door alle 4 de proefopstellingen, veel groter dan mag worden verwacht voor een dergelijke grenslaag ("open-water analogie: $\psi_w = 0,04 \text{ à } 0,05$) Wanneer we deze waarden van de "open-water analogie" substitueren in (1) en (3), dan zien we dat de aldus berekende waarden voor het kritieke verhang (kolom 9) ca. 30% lager zijn dan de gemeten waarden (kolom 7)
- 2- De gekozen afwijkingen in de combinatie "modelopbouw en wijze van bepaling van het kritiek verhang" leveren ten opzichte van die van M 1925 wat betreft de vaststelling van het kritiek verhang i_{kr} in relatie tot het holtepercentage van het filtermateriaal n_f nagenoeg overeenkomende resultaten.

2.8.2 De relatief korte spleet (B & C)

Bij beschouwing van de proeven met een relatief korte spleet (lengte x breedte x hoogte = $0,50 \times 0,15 \times 0,15 \text{ m}^3$) in de benedenstroomse helft van het model (ter hoogte van raai 5, 6 en 7) is allereerst vast te stellen, dat het kritieke verhang wordt overschreden als het verval wordt verhoogd tot 0,42 m. Uit de metingen van de drukhoogte ter plaatse van de raaien 3 en 7 volgt dat dit kritieke verhang i_{kr} kleiner of gelijk is aan 0,20. Bij een kleiner verval is er weliswaar sprake van enige beweging en zelfs een weinig erosie, maar toch kan er daarbij niet echt gesproken worden van "korrels aan de wandel. Schade manifesteert zich het eerst direct bovenstrooms van de spleet en naast de spleet, dus daar waar verhangconcentraties mogen worden verwacht.

Bij verhangen in de orde van grootte van i_{kr} valt een lichte voorkeur voor afzetten van elders opgenomen grind in de spleet waar te nemen, hetgeen het te verwachten geringe effect van debietconcentratie in de relatief korte spleet onderschrijft. Pas bij beduidend hogere verhangen treedt daadwerkelijk erosie op in de spleet.

Wanneer de spleet in de bovenstroomse modelhelft is aangebracht (ter hoogte van raai 3, 4 en 5) blijkt de stabiliteit van de grenslaag beduidend lager te zijn. Bij een verval van 0,33 m (proef 5) wordt tussen raai 3 en 7 een inwendig verhang van 0,15 geregistreerd. Instabiliteit wordt het eerst overschreden ter hoogte van raai 5 in het midden van het model. Bij de andere proef (8) ontstaat de eerste beweging aan de benedenstroomse zijde van de spleet. In beide proeven is de ontstane instabiliteit zeer lokaal en bij verhoging van het verval permanent optredend. Vermeldenswaardig is verder nog dat verhoging van het verval van 0,33 m tot 0,42 m nauwelijks beweging van grind oplevert, waaruit mag worden geconcludeerd dat er zich een redelijk stabiele situatie heeft gevormd.

Resumerend kan gesteld worden, dat bij de aanwezigheid van een korte spleet (lengte ca $3\frac{1}{2} \times D_{50f} = 0,50 \text{ m}$) op de grenslaag in het model het verval niet groter mag worden dan 0,33 m, hetgeen resulteert in een toelaatbaar inwendig verhang $i_{kr} = 0,15$. Schade zal zich voornamelijk manifesteren rondom de korte spleet, waarbij er sprake zal zijn van een tendens tot afzetten van grind in de spleet.

Gelet op de geconstateerde afhankelijkheid van de plaats van eerste erosie in het model ten opzichte van de plaats van de ingebouwde spleet, moet worden

vermeld, dat klaarblijkelijk de lengte van het model niet voldoende groot is geweest. De bovenstroomse en benedenstroomse modelranden hebben in enigerlei mate invloed gehad op de grenslaag-stabiliteit beneden-, respectievelijk bovenstrooms van de spleet.

2.8.3 De relatief lange spleet

Uit de resultaten van proef 6 blijkt zonneklaar, dat het effect van een spleetlengte van ca. 9 maal D_{50f} (= ca. 1,25 m) op de stabiliteit van de grenslaag aanzienlijk is. Het feit, dat bij een redelijk groot verval van 0,33 m er slechts een inwendig verhang groot 0,09 tussen raai 3 en 7 wordt gemeten, geeft aan, dat een belangrijk deel van het water via de spleet in plaats van via het filtermateriaal van het hoge naar het lage pand van de Filterbak stroomt. In hoeverre dit verschijnsel nog wordt versterkt door het geringere holte-percentages van het filtermateriaal bij deze proef (ten opzichte van de andere proeven met een korte spleet) kan niet worden vastgesteld.

Zoals te verwachten treedt erosie eerst en voornamelijk op in het midden van de spleet ter hoogte van raai 5 en vindt er afzetting van grind plaats aan de benedenstroomse zijde van de spleet.

2.9 Samenvatting van proefresultaten

1. De meting zoals uitgevoerd in de toegepaste modelopbouw corresponderen met die van eerdere onderzoeken (met name M 1925), als rekening wordt gehouden met het verschil in holtepercentages.
2. Het holtepercentages in de filterlaag waarin geen spleten voorkomen is zeer bepalend voor de stabiliteit van het basismateriaal (zie resultaat proef 2 en 3 en de correlatie met de resultaten van M 1925).
3. Relatief korte spleten in de opbouw van het filter resulteren in een aanmerkelijke reductie van het toelaatbare verhang. Rondom de spleet zal als eerste instabiliteit optreden. Erosie van basismateriaal in een spleet treedt pas bij aanmerkelijk grotere verhangen op.
4. Ook bij relatief lange, maar nauwe spleten treedt bij kleine verhangen instabiliteit van basismateriaal op. Hier ontstaat echter een erosiekuil door debietconcentraties in de spleet.

5. Bij verhangen in de orde van grootte van het ontwerpverhang voor de constructie in het maatgevende poortje zijn in het model in korte tijd erosiegaten ontstaan. In de scheidingslaag zijn de gaten dieper dan 0.15 m, dus dieper dan de grindlaag in het prototype dik is. In het model is de constructie dus bezweken. Door het ontbreken van bovenbelasting kan uit deze proeven niet worden vastgesteld of een tussentijds bijzakken van het filtermateriaal invloed heeft op het bezwijkgedrag.

3. Tussentijdse aanbevelingen voor de uitvoering

Beschouwing van de resultaten van uitgevoerde proeven in relatie met uitkomsten en aanbevelingen van eerder onderzoek leidt tot de volgende aanbevelingen voor de uitvoering:

1. Gelet op de zeer sterke reductie van het kritieke verhang voor de constructie ter plaatse van ontstane spleten en/of kanalen ter plaatse van het scheidingsvlak van basismateriaal en filtermateriaal dient geconcludeerd te worden dat het zogenaamde "slootje" over nagenoeg de gehele lengte zorgvuldig dient te worden gereinigd van zand en andere, soms organische, verontreiniging.
2. Doordat de korrelverdeling van het filtermateriaal van invloed is op het toelaatbare verhang en derhalve op de standzekerheid van het basismateriaal ter plaatse van de grenslaag verdient het aanbeveling tijdens de uitvoering aandacht te schenken aan de mate van ontmenging tijdens het aanbrengen van het filtermateriaal.
3. Gelet op de invloed op de locale erosie van het basismateriaal rondom individuele basaltstenen van het filtermateriaal als gevolg van inhomogeniteiten van dit filtermateriaal is het van belang tijdens de uitvoering te letten op de gradering van de te gebruiken stortsteen.

4. Invloed van de korrelverdeling van het filtermateriaal (M 2062)

4.1 Inleiding

Naarmate de uitvoering in het prototype vordert trekken een tweetal zaken de aandacht.

1. Aanpassingen in het stortprocédé gepaard met de nodige aandacht tijdens het stortproces van het filtermateriaal resulteren, blijkens waarnemingen tijdens en na het aanbrengen van de stortsteen, in een naar verhouding betere gradering van het filtermateriaal ter plaatse van het scheidingsvlak met het basismateriaal, dan in eerdere studies was voorzien.
2. Naarmate de tijd, voorafgaand aan het reinigen van het zogenaamde "slootje" in de negatieve overlap langer is, wordt het moeilijker dit slootje volledig schoon te maken. Een en ander tendeert naar een uiteindelijke vertraging van het gehele bouwbedrijf.

Mede gezien in het licht van ervaringen van eerdere onderzoeken mag verwacht worden, dat een betere gradering van het filtermateriaal ter plaatse van de grenslaag zal resulteren in een betere standzekerheid van dit basismateriaal onder invloed van het verhang evenwijdig aan dit scheidingsvlak. Als kan worden aangetoond dat een betere gradering van het filtermateriaal ook positieve effecten heeft op de erosiebestendigheid van basismateriaal bij voorkomende spleten en/of inhomogeniteiten in de grenslaag en indien deze verbetering kan worden gekwantificeerd in relatie met het ontwerpverhang en spleetdimensies, dan bestaat de mogelijkheid dat het in hoofdstuk 2.8 geformuleerde reinigingscriterium kan worden herzien.

Een en ander is voor de Hoofdafdeling Waterloopkunde van de Deltadienst van Rijkswaterstaat aanleiding geweest om aan het Waterloopkundig Laboratorium opdracht te verlenen in het kader van het onderzoek naar de invloed van zandafzettingen op de filterstabiliteit bij de overgang Noma-bovenmat aanvullend onderzoek te doen.

4.2 Doelstelling van het aanvullend onderzoek

Met het aanvullend onderzoek wordt beoogd vast te stellen hoe groot het toelaatbare, kritieke verhang i_{kr} is voor het basismateriaal, indien dit niet, zoals in eerder onderzoek is afgedekt met filtermateriaal, bestaande uit ontmengde basaltstortsteen ($D = 100-250$ mm), maar met beter gegradeerd materiaal met een sortering van bijvoorbeeld $D = 40-250$ mm.

Tevens dient te worden vastgesteld wat de invloed is van de toepassing van dit beter gegradeerd materiaal op het kritieke verhang bij het voorkomen van spleten van diverse afmetingen.

Hiertoe ziet de opzet van het onderzoek er als volgt uit:

1. Inbouw van een model met of zonder een duidelijk gedefinieerde spleet in het filtermateriaal direct op de grenslaag met het basismateriaal, waarbij de afmetingen van de toegepaste spleten gerelateerd zijn aan de sorteringarakteristieken van het filtermateriaal.
2. Door middel van een stapsgewijze verhoging van het verhang vaststellen hoe groot voor de ingebouwde modelconfiguratie het kritieke verhang is, waarbij het moment van instabiliteit van het basismateriaal in belangrijke mate visueel zal worden bepaald met als criterium: "korrels aan de wandel, lokaal maar niet noodzakelijk permanent":
3. Indien mogelijk door voortgaande verhoging van het verhang de invloed hiervan vaststellen op de instabiliteit en de schaal, waarop erosie zich uitbreidt.
4. Evenals bij de voorgaande onderzoeken in het model met behulp van stijgbuisregistraties mogelijke verhangconcentraties registreren.
5. Met behulp van een micromolen de gemiddelde stroomsnelheid meten in een in het model ingebouwde spleet.

4.3 Toegepaste materialen

Omdat de resultaten zeer praktisch gericht worden gebruikt, is voor het model gebruik gemaakt van basaltmateriaal zoals dat bij de constructie van de overgang Noma-bovenmat wordt toegepast. Dit materiaal, basaltstortsteen 40-250 mm is door de opdrachtgever toegeleverd. Voorafgaand aan de proeven is door weging van de individuele stenen en door zeping zowel de massaverdeling als de korrelverdeling vastgesteld. Resultaten hiervan zijn gepresenteerd in de figuren 2 en 3.

De opdrachtgever heeft ook het basismateriaal ter beschikking gesteld. Vooruitlopend op de bepaling van de zeefkromme is dit materiaal voor diverse proeven gebruikt. Uit de korrelverdeling is echter komen vast te staan, dat niet het juiste mengsel is geleverd. Door zeven en opnieuw mengen is een mengsel samengesteld met de verlangde sortering en een $D_{50b} = 0.018$ m. Met dit mengsel zijn de overige proeven uitgevoerd.

De korrelverdeling van het geleverde materiaal met een $D_{50b} = 0.028$ m en die van het samengestelde en vereiste mengsel met $D_{50b} = 0.018$ m zijn gepresenteerd in figuur 2.

4.4 Onderling verband tussen de uitgevoerde proeven

Allereerst is gebruik gemaakt van de materialen, zoals die door de opdrachtgever ter beschikking zijn gesteld, dus filtermateriaal met een sortering 40 - 250 mm ($D_{15f} = 0,082$ m) en basismateriaal met een sortering van 8 - 40 mm ($D_{50b} = 0.028$ m). Omdat het filtermateriaal afwijkt in korrelsortering van dat wat bij eerder onderzoek is gebruikt, is het eerst nodig proeven ter aansluiting uit te voeren.

A - Correlatie-proeven (1e serie)

== proef zonder spleet	proef 1
== proef met spleet 0,50 x 0,15 x 0,15 m ³	proef 2

Bij deze eerste proeven zonder en met spleet blijkt zelfs bij het maximaal in te stellen verval geen erosie-schade op te treden. Op grond hiervan wordt het filtermateriaal gezeefd, zodanig dat er een korrelsortering ontstaat van 70 - 250 mm met een kenmerkende korrelgrootte $D_{15f} = 0,100$ m. Hiermee worden opnieuw de proeven ter aansluiting met eerdere resultaten uitgevoerd.

B - Correlatie-proeven (2e serie)

- == proef met spleet $0,50 \times 0,15 \times 0,15 \text{ m}^3$ proef 3
- == proef zonder spleet proef 4

Na beëindiging van deze proeven blijkt dat de D_{50} van het geleverde basismateriaal niet aan de vereiste $D_{50b} = 0,018 \text{ m}$ voldoet maar grover is met een $D_{50b} = 0,028 \text{ m}$. Het wordt uitgezeefd tot de juiste korrelsortering, waarna hiermee en met het filtermateriaal 70 - 250 mm opnieuw proeven ter aansluiting met eerder onderzoek wordt uitgevoerd.

C - Correlatie-proeven (3e serie)

- == proef zonder spleet proef 10
- == proef met spleet $0,50 \times 0,15 \times 0,15 \text{ m}^3$ proef 5
- == reproductie proef 5 proef 7

Met filtermateriaal 70 - 250 mm ($D_{15f} = 0,100 \text{ m}$) en basismateriaal 8 - 40 mm ($D_{50b} = 0,018 \text{ m}$) is vervolgens bij een gelijkblijvende doorstroomopening van de spleten de invloed van spleetlengte op de stabiliteit van basismateriaal onderzocht.

D - proeven met verschillende spleetlengten

- == proef met lange spleet $1,00 \times 0,15 \times 0,15 \text{ m}^3$ proef 6
- == proef met korte spleet $0,30 \times 0,15 \times 0,15 \text{ m}^3$ proef 11

Om ook inzicht te krijgen in de invloed van de doorstroomopening op de stabiliteit zijn de volgende proeven uitgevoerd.

E - proeven met kleinere doorstroomopening

- == proef met spleet $0,50 \times 0,10 \times 0,10 \text{ m}^3$ proef 8
- == proef met lange spleet $0,80 \times 0,10 \times 0,10 \text{ m}^3$ proef 9

Simultaan met de verhangregistraties in de modellen met een spleet zijn ook stroomsnelheidsmetingen in de spleet uitgevoerd. Omdat voor een juiste interpretatie van deze snelheden de verdeling van het poriëngehalte over de hoogte van het filtermateriaal belangrijk is, is dit poriëngehalte als gemiddelde bepaald per proef en in detail gemeten in een proefopstelling. Het gemiddeld poriegehalte, zoals te vinden in de tabellen van elke proef, is gecorrigeerd voor de aanwezige spleten.

4.5 Beschrijving van de uitgevoerde proeven

4.5.1 De correlatie-proeven serie 1 (A)

Proef 1. (zie ook tabel en figuur II-1)

Bij de voorbereiding en opbouw van proef 1 ontstaat er een goed afgedekt scheidingsvlak. Dit komt voornamelijk doordat een klein deel van de 40 -70 mm fractie van de basalt-breuksteen door het filtermateriaal heenzakt tot op het basismateriaal. Tijdens de uitvoering van de stroomproef ligt hier en daar wel eens een stukje van dit basalt te trillen (voornamelijk bij de grote vervallen), maar enige verplaatsing is niet geconstateerd. Het maximaal in te stellen verval in de Filterbak is ca. 1,0 m. Hierbij is een inwendig verhang tussen raai 3 en 7 gemeten van ca. 0,53. Tussen raai 6 en 7 is lokaal een verhang gemeten van ca. 0,75.

Proef 2. (zie ook tabel en figuur II-2)

Zoals bij de opbouw van de vorige proef al is gezien, valt een deel van de kleine fractie van het filtermateriaal door tot op de grenslaag. Ook bij deze proef is dit het geval. De grenslaag in de kunstmatige spleet is afgedekt met een laag van het veel stabielere basaltmateriaal. Deze laag is ongeveer 30 mm dik en is er de oorzaak van dat het grind van het basismateriaal niet kan eroderen bij het maximaal in te stellen verval. Bij dit verval, groot ca. 1 m is tussen raai 3 en 7 een inwendig verhang gemeten van 0,57, terwijl tussen raai 3 en 4 lokaal een grootste verhang van ca. 0,90 is waargenomen.

4.5.2 De correlatie-proeven serie 2 (B)

Proef 3. (zie ook tabel en figuur II-2)

Bij toepassing van het filtermateriaal 70 - 250 mm is er geen sprake meer van doorvallen van de kleine fractie van het filtermateriaal. Bij een verval, groot 0,70 wordt er een lichte trilling waargenomen bij diverse grindkorrels in de kunstmatige spleet. Een enkele grindkorrel in de spleet verrolt, maar het uitgetreden grind komt allemaal uit de benedenstroomse rand van het model. Elders is het materiaal stabiel. Bij vergroting van het verval neemt de hoeveelheid uittredend grind nauwelijks toe. Ook aan de benedenstroomse zijde is

het kritieke verhang dus nog niet bereikt. Bij instelling van een verval groot 0,90 m wordt plotseling transport van grindkorrels door de spleet waargenomen. Een deel hiervan komt tot rust in de spleet, een ander deel treedt uit het model. Er is duidelijk sprake van "korrels aan de wandel". Het inwendig verhang tussen raai 3 en 7, waarbij deze instabiliteit optreedt, is ca. 0,40. Of dit ook de grootte van het kritiek verhang is, is echter arbitrair, omdat daar waar de instabiliteit optreedt een lokaal verhang is geregistreerd van ca. 0,50. Ook het verhang over de totale modellengte ('uitwendig' verhang = ca. 0,50) indiceert een grotere waarde van het kritieke verhang.

Proef 4. (zie ook tabel en figuur II-4)

Bij de uitvoering van deze proef kan geen kritiek verhang worden bereikt. Bij het maximaal in te stellen verval verrolt een enkele grindkorrel, maar van het criterium "korrels aan de wandel, lokaal maar niet permanent" is nog lang geen sprake.

4.5.3 De correlatie-proeven serie 3 (C)

Proef 10. (zie ook tabel en figuur II-5)

Deze proef is in een later stadium uitgevoerd met filtermateriaal 70 - 250 mm en een holte-percentag $n_f = \text{ca } 45\%$ (overeenkomend met dat van proef 5 en 7) op basismateriaal 8 - 40 mm. Bij deze proef is bij een maximaal in te stellen verval van ca. 0,95 m geen sprake van instabiliteit van de grenslaag geconstateerd. Het bij dit verval gemeten inwendig verhang tussen raai 3 en 7 is weliswaar slechts $i = 0,37$, maar lokaal treedt een veel groter verhang op. Tussen raai 4 en 5 wordt een verhang geregistreerd groot ca. 0,80. Het verhang over het totale model bedraagt ca. 0,54. Dus de aanname is gewettigd dat deze modelconfiguratie stabiel is bij verhangen die kleiner of gelijk zijn dan ca. 0,50.

Proef 5 (zie ook tabel en figuur II-6)

Deze proef is uitgevoerd met een holte-percentag van $n_f = 45\%$. Bij een verval groot 0,62 m wordt er een lichte trilling waargenomen bij de grindkorrels in het scheidingsvlak. Een gering aantal grindkorrels rollen uit de benedenstroomse modelrand. Pas bij een verval groot ca. 0,76 m rollen er in de spleet een klein aantal korrels een eindje weg. Bij de volgende stap wordt aan de benedenstroomse zijde instabiliteit waargenomen, doch in de rest van het model blijft de

grenslaag in rust. Pas bij een verval van 0,95 m is plotseling de stabiliteit overschreden. Tussen raai 6 en 7 erodeert een deel van de grindkorrels. Dit treedt op bij een lokaal verhang van ca. 0,74, terwijl tussen raai 3 en 7 op dat moment een inwendig verhang wordt gemeten van ca. 0,40. Het uitwendig verhang over het gehele model bedraagt dan ca. 0,50.

Proef 7 (zie ook tabel en figuur II-7)

Deze proef is een reproductie van proef 5. Bij een verval van ca. 0,62 m worden een aantal grindkorrels verplaatst over een kleine afstand in de kunstmatige spleet. Sommige andere korrels liggen te trillen. Bij een verval van ca. 0,79 m wordt iets meer beweging zichtbaar. Enkele grotere grindkorrels rollen onder het filtermateriaal weg en komen in de spleet weer tot rust. Bij een verval van ca. 0,94 m gaat er duidelijk grind aan de haal; het kritieke verhang is overschreden (i_{kr} is kleiner of gelijk aan 0,46).

4.5.4 De proeven met verschillende spleetlengten (D)

Proef 6 (zie ook tabel en figuur II-8)

Deze proef kan gezien worden als een vervolg op proef 6 van het voorgaande onderzoek (M 2015: tabel en figuur I-7). De spleetlengte komt er nagenoeg mee overeen. Alleen de doorsnede verschilt en het meest opvallende verschil is het toegepaste filtermateriaal 70 - 250 mm en het hieruit voortvloeiende holtepercentage.

Doordat het filtermateriaal slecht 'doorzichtig' is door een goede sortering van de korrels, kan niet eenduidig worden vastgesteld, bij welk verval het kritieke verhang wordt overschreden. Duidelijk is echter wel dat bij een verval van 0,35 m nog niet van instabiliteit sprake is, terwijl bij een verval van 0,51 m het grind in de spleet duidelijk "aan de wandel gaat". Daarom zal het kritieke verhang tussen 0,20 en 0,25 liggen.

Proef 11 (zie ook tabel en figuur II - 9)

Bij een verval groot 0,92 m is voor het eerst in deze modelopstelling sprake van optredende instabiliteit, en wel in het gebied bovenstrooms van de kunstmatige spleet. Grindkorrels worden opgenomen en via de korte spleet voor een belangrijk deel uit het model afgevoerd. Een klein deel vindt een stabiele plaats in de spleet. Er is sprake van zeer lokaal optredende schade, zoals ook blijkt tijdens het verwijderen van het filtermateriaal na beëindiging van de

proef. De schade is opgetreden ter hoogte van de raaien 4 en 5, waar tijdens het stromen een lokaal verhang is geregistreerd van ca. 0,70. Te zelfder tijd is een inwendig verhang in het hele model tussen de raaien 2 en 8 gemeten van ca. 0,53. Gelet op het schadebeeld wordt geconcludeerd dat dit laatste verhang het kritieke verhang i_{kr} is.

4.5.5 Proeven met een kleinere spleetdiameter (E)

Proef 8. (zie ook tabel en figuur II-10)

Tijdens de uitvoering van deze proef is bij een maximaal in te stellen verval van 0,97 m geen instabiliteit vastgesteld. Wel liggen bij dit verval enkele grindkorrels te trillen, maar van "korrels aan de wandel" is nog totaal geen sprake.

Proef 9 (zie ook tabel en figuur II-11)

Bij de instelling van een verval van 0,45 m liggen in het gebied direct bovenstrooms van de kunstmatige spleet een aantal grindkorrels te trillen. Een enkele grindkorrel verrolt een klein eindje. Bij vergroting van het verval tot 0,53 m treedt vrij plotseling een redelijk groot transport op van grind. Dit wordt opgenomen in het bovenstroomse deel van het model kort voor de spleet en een deel treedt uit het model. Het grootste deel komt tot rust in het benedenstroomse deel van de kunstmatige spleet: het kritieke verhang is overschreden. Desondanks blijft bij volgende verhogingen van het verval de situatie in het model vrij stabiel. Slechts een enkele grindkorrel verrolt iets, voornamelijk uit het midden van de spleet. Bij een verval van ca. 0,83 m ontstaat een erosiekuil in de kunstmatige spleet en beginnen er basaltstenen in het bovenstroomse gebied te verzakken. Het model begint te bezwijken.

4.6 Wijze van vaststellen van het kritieke verhang i_{kr}

Door de betere sortering van korrelgroottes in het toegepaste filtermateriaal en het hiermee in verband staande lagere holte-percentages in de filterlaag is de kans, dat grindkorrels, die onder invloed van het verhang lokaal in het model worden opgepakt, volledig het model verlaten, nog kleiner dan bij de proeven van vorige onderzoeken. Het filtermateriaal is nagenoeg geometrisch dicht voor het basismateriaal. Aan de waarde van de bepaling van de hoeveelheid uitgetreden grind is dan ook bij de uiteindelijke vaststelling van het

kritieke verhang i_{kr} slechts een marginaal belang toegekend. De bepaling van het ogenblik van optreden van instabiliteit van het scheidingsvlak berust bij deze proeven dan ook voornamelijk op de waargenomen bewegingen in het model. Hierbij wordt het kritieke verhang als overschreden beschouwd wanneer in het model "beweging dan wel verplaatsing van significante hoeveelheden korrels, lokaal maar niet noodzakelijk permanent" is geconstateerd. Wanneer hiervan geen sprake is, is alsnog bij het verwijderen van het filtermateriaal gelet op schade aan het scheidingsvlak, waarvan in alle redelijkheid zou mogen worden verondersteld, dat er geen herstel door natuurlijk invloeden zou kunnen optreden. Is een dergelijke schade aanwezig dan wordt dit alsnog beschouwd als een overschrijden van het kritieke verhang.

4.7 Aanvullende metingen

4.7.1 Stroomsnelheidsmetingen in de spleet

Bij diverse proeven zijn in het midden van de kunstmatige spleet stroomsnelheidsmetingen uitgevoerd met behulp van een van boven ingebrachte micromolen. Bij de diverse opvolgende verval-instellingen is hiermee in stappen van ca. 2.5 cm over de spleethoogte de stroomsnelheid gemeten. In de tabellen achterin dit verslag zijn de gemiddelde snelheden in de spleet en de stroomsnelheid direct boven het basismateriaal gepresenteerd.

Bij de proeven met een spleetdoorsnede van $0.15 * 0.15 \text{ m}^2$ (proef 5,6,7 en 11) treedt kort voor het bereiken van het kritieke verhang een gemiddelde snelheid in de spleet op van ca. 0.85 m/s.

Bij proef 11 (spleetlengte ca. 0.30 m/kritiek verhang $i_{krt} = \text{ca. } 0.52$) treedt instabiliteit op bovenstrooms van de spleet. Er vindt grindtransport plaats door de spleet, een klein deel van het opgenomen grind wordt afgezet in de spleet, maar het grind in de spleet zelf wordt niet instabiel.

Bij proeven 5 en 7 (spleetlengte ca. 0.50 m/kritieke verhangen respectievelijk ca. 0.46 en ca. 0.40) ontstaat instabiliteit voornamelijk in het benedenstroomse deel van het model. Bij proef 7 is ook een lichte instabiliteit waargenomen in het bovenstroomse model, maar de hier opgenomen grindkorrels worden nagenoeg allemaal afgezet in de spleet. Kort voor het bereiken van het kritieke verhang worden in de spleet kleinere grindkorrels opgenomen, maar van significante schade is geen sprake.

Bij proef 6 (spleetlengte ca. 1.00 m/kritieke verhang 0.20 à 0.25) treedt de instabiliteit op halverwege de spleet. Duidelijk is dat de gemeten gemiddelde snelheid in de spleet van 0.87 m/s de grenswaarde is voor het basismateriaal bij deze spleetlengte.

De snelheidsmetingen bij de proeven met een kleinere spleetdiameter, ($0.10 * 0.10 \text{ m}^2$) (proef 8 en 9) zijn minder eenduidig.

Bij proef 8 (spleetlengte = ca. 0.50 m) treedt geen instabiliteit op bij een gemiddeld verhang van ca. 0.55, dit zelfs ondanks het voorkomen van lokale verhangen in het model groter dan 0.80. Ook in de spleet treedt geen instabiliteit op, al liggen bij een gemeten snelheid in de spleet van 0.70 m/s wel een aantal individuele grindkorrels te trillen.

Bij proef 9 (spleetlengte ca. 0.80 m/kritiek verhang ca. 0.28) is geen instabiliteit in de spleet geconstateerd bij het kritieke verhang. Het grootste deel van het opgenomen grind wordt weer afgezet in de spleet. Pas bij een veel hoger verval ontstaat een erosiekuil in het grind in de spleet, waardoor enkele basaltstenen verzakken. Deze instabiliteit treedt op bij een stroomsnelheid van ca. 0.70 m/s. Bij kleinere vervallen zijn dan al grotere stroomsnelheden in de spleet gemeten.

4.7.2 Verhangregistratie in de spleet

Bij de uitvoering van de proeven 8 en 9 zijn naast snelheidsmetingen ook verhangwaarnemingen uitgevoerd in de spleet. De lokale drukhoogten zijn gemeten met behulp van stijgbuisaansluitingen, haaks op de hoofdstroomrichting geplaatst boven- en onderin de bovenstroomse- en benedenstroomse zijde van de spleet. De onderlinge horizontale afstand bedroeg 0.50 m en het onderlinge verschil in hoogte bedroeg 0.08 m.

Bij de uitvoering van proef 8 (korte, kleine spleet) is het kritieke verhang niet overschreden. Het grootste geregistreerde horizontale verhang in de spleet bedroeg 0.20, waarbij geen significante schade aan de grenslaag van het basismateriaal is geconstateerd.

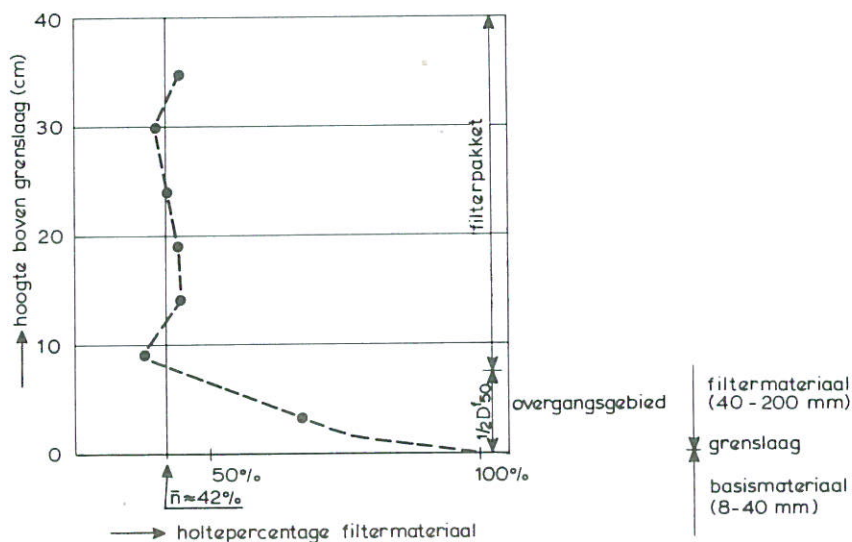
Bij de uitvoering van proef 9 (lange, kleine spleet) is kort voor het bereiken van het kritieke verhang in de spleet een horizontaal verhang van 0,10 waar-

genomen. Bij het kritieke verhang worden grindkorrels, die elders zijn opgepakt, gedeponerd in de spleet. Pas bij een verhang in de spleet van $i = 0.12$ treedt erosie op in het hart van de spleet zelf.

4.7.3 Bepaling van het holte-percentage

Bij de inbouw van de diverse proeven is nauwkeurig het totale gewicht van het gebruikte filtermateriaal bijgehouden. Hiermee is het gemiddelde holte-percentage n_f , zoals gepresenteerd in de tabellen, voor elke proef bepaald.

Na afloop van de uitvoering van de stroomproeven is in een houten bak met dezelfde inwendige dimensie als de Filterbak de variatie in poriëngehalte van het filtermateriaal over de hoogte bepaald. Hierbij is ervan uitgegaan dat het filtermateriaal niet in het grind gedrukt wordt, een acceptabele aanname gezien het feit dan initieel de grenslaag bestaat uit het filterdoek van de boven- cq. ondermat. De resultaten zijn gepresenteerd in onderstaande figuur:



Randeffecten aan zijde en kopkanten van de bak op het gemeten holte-percentage zijn zover mogelijk onderdrukt door de toepassing van een representatief aantal doorgezaagde basaltstenen. Verder dient opgemerkt te worden dat bovenstaande verdeling van het holte-percentage geldt voor filtermateriaal dat zonder spleten, aangesloten op het basismateriaal is aangebracht. De gemiddelde holte-percentages, zoals te vinden in de tabellen van elke proef zijn gecorrigeerd voor de aanwezige spleet-afmetingen.

4.8 Interpretatie van de resultaten

4.8.1 De correlatie-proeven

De resultaten van de correlatie-proeven (proef 1, 2, 3, 4 en 10) geven een veel grotere stabiliteit te zien dan de overeenkomstige proeven uit eerder onderzoek. Zoals mag worden verwacht heeft een betere gradatie van het filtermateriaal zoals toegepast bij de proeven (40-250 mm in plaats van 100-250 mm) een stabiliserende invloed op de grindlaag. Ook de bij de proeven 4 en volgende toegepaste "slechtere" sortering van het filtermateriaal (70-250 mm) resulteert in grotere stabiliteit voor het onderliggende grind. Bij een aaneengesloten lagenpakket is bij een inwendig verhang van ca. 0.50 nog geen significante instabiliteit geconstateerd.

Opgemerkt moet worden dat bij de proeven 1, 2, 3 en 4 dit gunstige resultaat mede wordt veroorzaakt door de te grote D_{50} van het basismateriaal.

4.8.2 De invloed van de spleetlengte

Uit de diverse proeven blijkt, dat het kritieke verhang voor de constructie kleiner is naarmate de spleetlengte groter is. Verder is het opvallend dat tot een spleetlengte van ca. 0.50 m (ca. 3 maal D_{f50} instabiliteit van de grenslaag zich voordoet rondom de spleet, terwijl bij grotere spleetlengtes de stabiliteit van het basismateriaal in de spleet als eerste wordt overschreden. Tot een spleetlengte van ca. 3 maal D_{f50} (ca. 0.50 m) kan er worden gesproken van een geleidelijke reductie van het kritieke verhang. Bij grotere spleetlengten neemt het kritieke verhang veel drastischer af.

De proefresultaten leiden tot de vaststelling dat bij spleten met een lengte niet groter dan 3 maal D_{f50} het gevonden kritieke verhang groter of gelijk is aan 0,40. Spleten van deze afmeting vormen dus geen gevaar voor de standzekerheid van de constructie in het prototype.

Verder is het opvallend dat bij spleten met een doorsnede van $0.15 \times 0.15 \text{ m}^2$ de gemiddelde stroomsnelheid in de spleet kort voor het bereiken van het kritieke verhang onafhankelijk van de plaats waar de eerste instabiliteit optreedt (of rondom of in de spleet) ongeveer 0.85 m/s bedraagt.

4.8.3 De invloed van de spleetdiameter

Vergelijken we proef 5 en 7 met proef 8 dan kan worden vastgesteld dat een kleinere spleetdiameter bij gelijke (relatief korte) spleetlengte resulteert in een wat groter kritiek verhang.

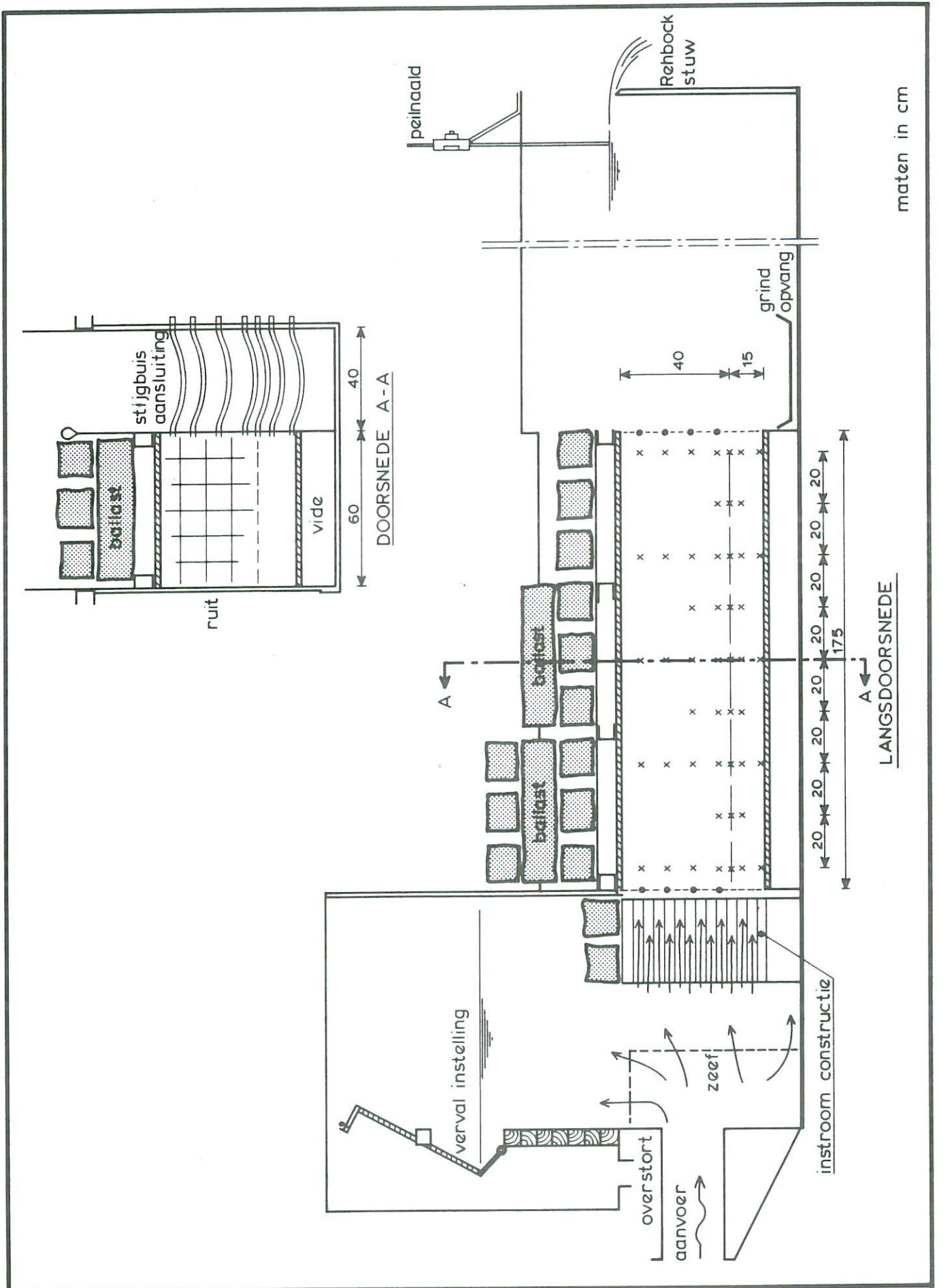
Vergelijken we de uitkomsten van proef 6 en 9 met elkaar, dan blijkt dat bij de kleinere spleetdiameter bij een gelijke (relatief lange) spleetlengte de schade bij nagenoeg overeenkomende waarden voor het kritieke verhang optreedt rondom maar wel buiten de eigenlijke spleet.

4.9 Samenvatting van de proefresultaten

Uit aanvullend onderzoek kunnen de volgende conclusies worden getrokken:

1. De invloed van de korrelsortering van het filtermateriaal op de stabiliteit van het basismateriaal is zeer wezenlijk.
Bij een aaneengesloten overgang is geen erosie vastgesteld bij verhangen $i < 0,55$. Het fijnere materiaal in de filterlaag valt direct op het basismateriaal en fungeert als een soort verzwaarde afdeklaag.
2. Ook bij het aanwezig zijn van spleten zorgt een betere gradering van het filtermateriaal voor een stabielere constructie. De stabiliteit is echter afhankelijk van spleetlengte en in mindere mate van de diameter van de spleet.
3. Lange spleten ($L > 5 \times D_{f50}$) veroorzaken een aanmerkelijk lager kritiek verhang dan korte spleten ($L < 3 \times D_{f50}$).
4. Invloed van de spleetdiameter is gering. Spleten met een diameter van D_{f50} hebben niet een aantoonbaar slechtere invloed op de stabiliteit van het basismateriaal dan spleten met een kleinere diameter.
5. De stroomsnelheid in de spleet neemt weliswaar globaal toe met een toenemend verval bij de diverse spleetconfiguraties, doch door het te locale karakter van de uitgevoerde metingen gepaard aan de zeer grote lokale turbulenties zijn de resultaten nauwelijks geschikt voor nadere kwantitatieve analyse.

6. Ook met een realistische gradering van het filtermateriaal is het holtepercentage ter hoogte van de grenslaag wezenlijk groter dan die hogerop in het filterpakket.



maten in cm

MODEL-FACILITEIT FILTERBAK

SCHAAL 1: 2000

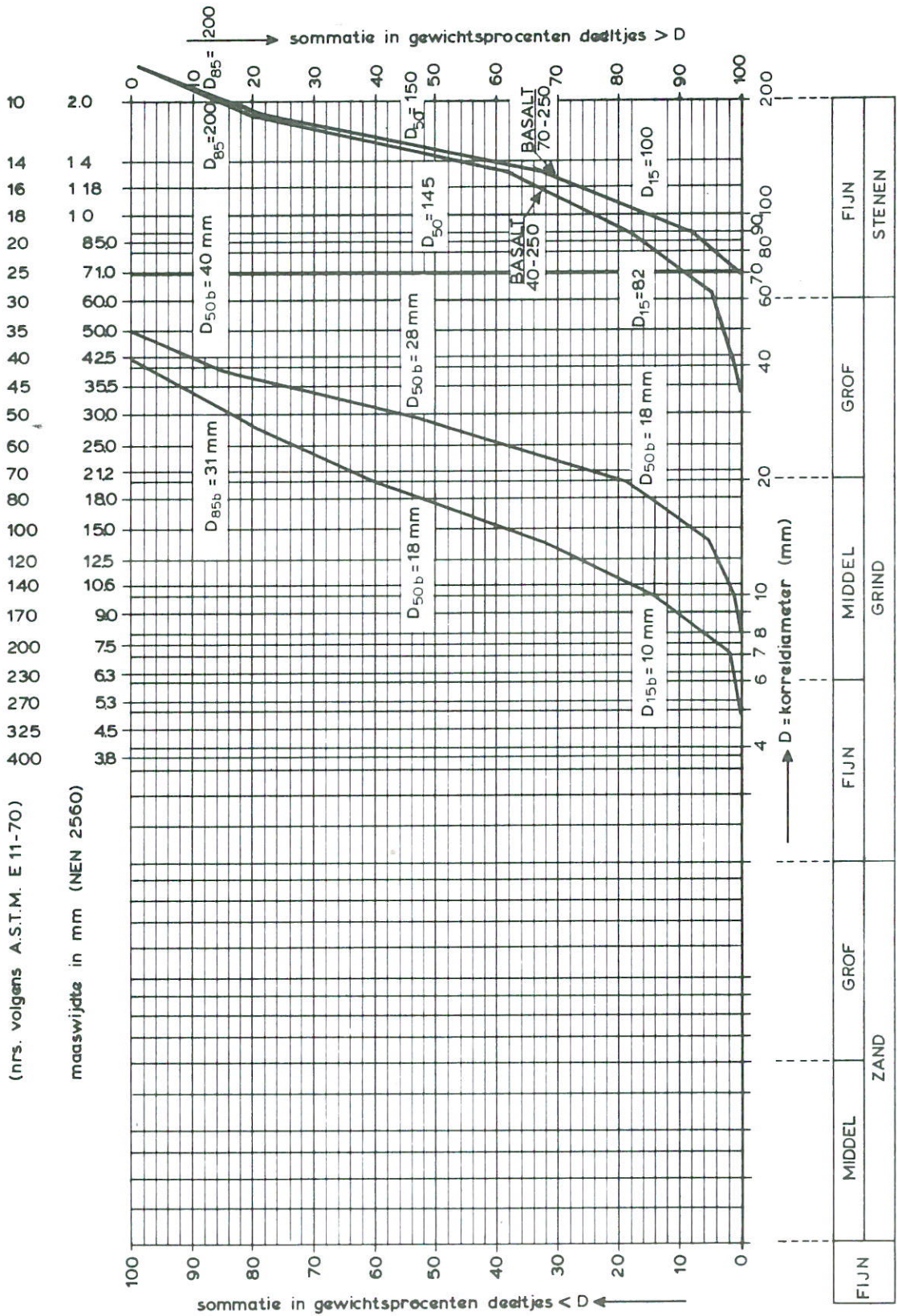
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

M 2062

FIG. 1

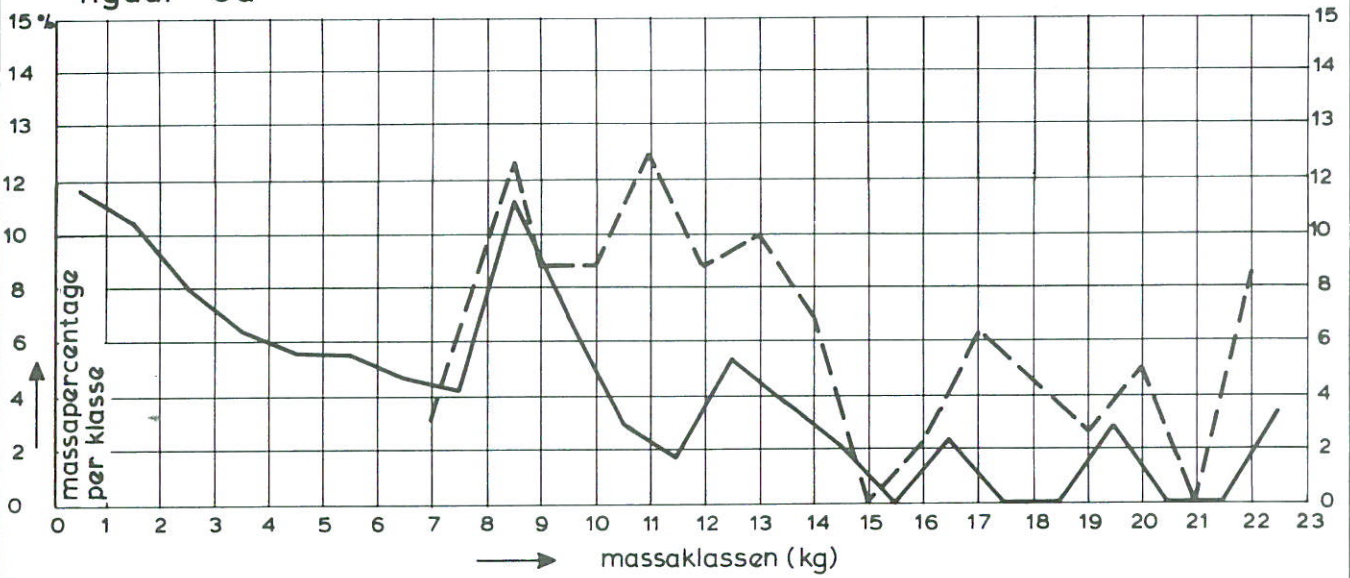
(nrs. volgens A.S.T.M. E 11-70)

maaswijdte in mm (NEN 2560)

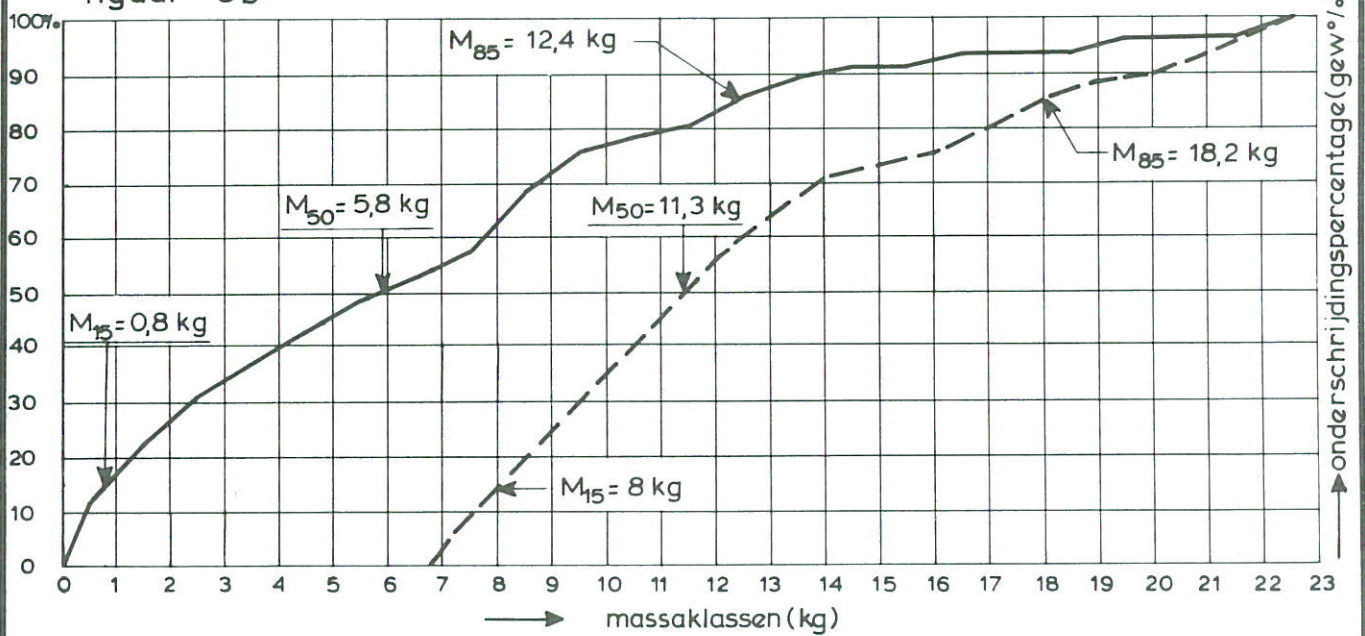


KORRELVERDELING BASISMATERIAAL GRIND EN
EN FILTERMATERIAAL BASALT

figuur 3a



figuur 3b



- basaltstortsteen 70 - 250 mm (M2062)
- - - basaltstortsteen 100 - 250 mm (M15/M1925)

MASSAVERDELING VAN BASALTSTORTSTEEN

Filterstabiliteit bij de overgang

NOMA - bovenmat

Invloed van zandlezen

Bijlage I

M 2015 - Modelonderzoek

Tabellen en Figuren

Foto's

M 2015/Proef 2

filtermateriaal basalt-breuksteen

korrel-gradatie : $D_f = 100 - 250$ mm
 significante korrelgrootte : $D_{15f} = 135$ mm
 holte-percentage : $n_f = 47\%$

basismateriaal grind

korrel-gradatie : $D_b = 8 - 40$ mm
 significante korrelgrootte : $D_{50b} = 18$ mm

"geen kunstmatige spleet aangebracht".

stap no.	uitw. verval over model [mm]	debiet door totale model [l/s]	inwendig verhang tussen 3 en 7 [--]	uitgespoeld grind (Σ) [kg]	waarnemingen en bijzonderheden
1	314	39,8	0,19	--	geen beweging.
2	360	43,2	0,21	--	geen beweging.
3	420	45,9	0,26	--	geen beweging.
4	491	49,2	0,30	--	eerste grindkorrels bewegen.
5	542	51,9	0,30	0,15	<u>kritiek verhang overschreden!</u> eerste grind treedt uit het model
6	593	53,8	0,33	0,15	geen uittredend grind, wel beweging van grindkorrels
7	649	54,8	0,37	0,15	(idem)
8	700	56,5	0,38	0,15	(idem)
9	760	57,4	0,47	0,65	veel beweging en uittredend grind
10	807	61,7	0,49	0,65	veel beweging van grindkorrels, echter geen uittredend grind.
11	856	64,4	0,51	0,85	opnieuw treedt grind uit het model.
12	907	64,4	0,53	0,85	veel beweging van grindkorrels, echter geen uittredend grind.
13	950	69,8	0,54	1,60	veel uittredend grind, kuilvorming tussen basaltstenen.
14	982	73,5	0,54		doorgaande erosie van grind, veel kuilen tot de houten bodem.

Tabel I-1: Meetresultaten en waarnemingen M 2015/proef 2.

M 2015/Proef 3

filtermateriaal basalt-breuksteen

korrel-gradatie : $D_f = 100 - 250$ mm
 significante korrelgrootte : $D_{15f} = 135$ mm
 holte-percentage : $n_f = 49\%$

basismateriaal grind

korrel-gradatie : $D_b = 8 - 40$ mm
 significante korrelgrootte : $D_{50b} = 18$ mm

"geen kunstmatige spleet aangebracht".

stap no.	uitw. verval over model [mm]	debiet door totale model [l/s]	inwendig verhang tussen 3 en 7 [--]	uitgespoeld grind (Σ) [kg]	waarnemingen en bijzonderheden
1	306	41,8	0,19	--	geen beweging.
2	367	45,0	0,22	--	geen beweging.
3	419	49,0	0,26	--	lokale grindkorrel opgenomen en afgezet bij basaltsteen
4	469	51,5	0,28	0,6	<u>kritiek verhang overschreden!</u> weinig grind treedt echter uit.
5	519	53,1	0,30	1,05	(idem)
6	578	59,1	0,32	5,60	serieuze aantasting van grenslaag 1.20 uur verval gehandhaafd.
7	625	60,0	0,37	5,60	veel bewegende grind, afzetting van grind elders in filterlaag.
8	673	60,8	0,40	6,60	eenweinig grind treedt uit. Rest wordt in filterlaag afgezet.
9	728	63,5	0,44		veel grind uit model, waarna erosie zich voorzet.

Tabel I-2: Meetresultaten en waarnemingen M 2015/proef 3.

M 2015/Proef 4

filtermateriaal basalt-breuksteen

korrel-gradatie : $D_f = 100 - 250$ mm
 significante korrelgrootte : $D_{15f} = 135$ mm
 holte-percentagte : $n_f = 49\%$

basismateriaal grind

korrel-gradatie : $D_b = 8 - 40$ mm
 significante korrelgrootte : $D_{50b} = 18$ mm

kunstmatige spleet t.h.v. raaien 5 t/m 7

dimensies: doorsnede = ca. 0,15 m
 lengte = ca. 0,50 m

stap no.	uitw. verval over model [mm]	debiet door totale model [l/s]	inwendig verhang tussen 3 en 7 [--]	uitgespoeld grind (Σ) [kg]	waarnemingen en bijzonderheden
1	286	42,6	0,13	--	geen beweging.
2	330	48,2	0,16	--	erosie in kleine natuurlijke spleet, kanaalvorming ontstaat.
3	377	54,0	0,18	0,95	redelijk heftige beweging van grind naast de spleet in basalt
4	424	55,7	0,21	1,60	<u>kritiek verhang overschreden!</u> erosie van grind vóór de spleet.
5	464	53,1	0,23	17,60	grindafvoer vind vooral plaats via de kunstmatige spleet. Geen erosie in de spleet.
6	463	57,4	0,25	20,00	later treedt een stabiele situatie op.
7	486	58,2	0,26	25,34	voorschrijdende erosie over de hele grenslaag, erosie-kuilen
8	483	65,3	0,27		basaltstenen in hart van model zakken weg, model bezweken.

Tabel I-3: Meetresultaten en waarnemingen M 2015/proef 4.

M 2015/Proef 7

filtermateriaal basalt-breuksteen

korrel-gradatie : $D_f = 100 - 250$ mm
 significante korrelgrootte : $D_{15f} = 135$ mm
 holte-percentage : $n_f = 49\%$

basismateriaal grind

korrel-gradatie : $D_b = 8 - 40$ mm
 significante korrelgrootte : $D_{50b} = 18$ mm

kunstmatige spleet t.h.v. raaien 5 t/m 7 (herhaling van proef 4)

dimensies: doorsnede = ca. 0,15 m
 lengte = ca. 0,50 m.

stap no.	uitw. verval over model [mm]	debiet door total model [l/s]	inwendig verhang tussen 3 en 7 [--]	uitgespoeld grind (Σ) [kg]	waarnemingen en bijzonderheden
1	294	43,2	0,13	--	geen beweging.
2	321	47,3	0,15	--	lichte beweging van grindkorrel
3	365	51,4	0,17	0,15	geringe beweging, vooral benedenstroms van spleet.
4	426	55,6	0,20	0,60	<u>kritiek verhang overschreden!</u> erosie voor en na spleet.
5	464	58,2	0,22	0,60	wel enige beweging, nauwelijks uittredend grind.
6	484	60,9	0,23	9,00	lichte vorming van erosiekuilen in model
7	542	65,4	0,25	10,25	voortschrijdende erosie in model, grotere kuilen ontstaan.
8	583	68,2	0,27		veel uittredend grind, model bezwijkt op diverse plaatsen.

Tabel I-4: Meetresultaten en waarnemingen M 2015/proef 7.

M 2015/Proef 5

filtermateriaal basalt-breuksteen

korrel-gradatie : $D_f = 100 - 250$ mm
 significante korrelgrootte : $D_{15f} = 135$ mm
 holte-percentage : $n_f = 49\%$

basismateriaal grind

korrel-gradatie : $D_b = 8 - 40$ mm
 significante korrelgrootte : $D_{50b} = 18$ mm

kunstmatige spleet t.h.v. raaien 3 t/m 5

dimensies: doorsnede = ca. 0,15 m
 lengte = ca. 0,50 m

stap no.	uitw. verval over model [mm]	debiet door totale model [l/s]	inwendig verhang tussen 3 en 7 [--]	uitgespoeld grind (Σ) [kg]	waarnemingen en bijzonderheden
1	285	48,2	0,12	0,65	gering aantal grindkorrels uit benedenstroomse modelzijde.
2	329	53,1	0,15	3,50	<u>kritiek verhang overscheden!</u> geen beweging in kunstm. spleet
3	378	55,7	0,17	4,80	weinig grind treedt uit model, wel intern transport in model.
4	423	62,7	0,21	10,00	instabiliteit in midden van model, geen beweging in spleet.
5	469	62,6	0,24	14,00	erosie-kuil aan benedenstroomse zijde, basaltstenen zakken weg.
6	520	67,1	0,26	25,3	model bezweken
7	523	65,3	0,24	26,90	verhang en debiet wordt kleiner ondanks vergroting van verval!
8	567	67,1	0,26	29,00	verhang en debiet weer gelijk aan stap 6! verval weer groter.
9	620	70,8	0,30	33,75	benedenstrooms erosie-kuil tot houten bodem van model.

Tabel I-5: Meetresultaten en waarnemingen M 2015/proef 5.

M 2015/Proef 8

filtermateriaal basalt-breuksteen

korrel-gradatie : $D_f = 100 - 250$ mm
 significante korrelgrootte : $D_{15f} = 135$ mm
 holte-percentage : $n_f = 49\%$

basismateriaal grind

korrel-gradatie : $D_b = 8 - 40$ mm
 significante korrelgrootte : $D_{50b} = 18$ mm

kunstmatige spleet t.h.v. raaien 3 t/m 5 (herhaling van proef 5)

dimensies: doorsnede = ca. 0,15 m
 lengte = ca. 0,50 m

stap no.	uitw. verval over model [mm]	debiet door totale model [l/s]	inwendig verhang tussen 3 en 7 [--]	uitgespoeld grind (Σ) [kg]	waarnemingen en bijzonderheden
1	288	47,3	0,14	--	geen beweging
2	332	49,7	0,15	0,40	herrangschikking van grind in model.
3	379	53,9	0,15	0,40	geen beweging in model waargenomen.
4	430	58,2	0,18	2,00	<u>kritiek verhang overschreden!</u> erosie-kuil benedenstrooms.
5	475	55,6	0,17	2,40	ontstaan van kleine erosie-gaten in grenslaag.
6	532	60,0	0,18	3,25	uitdiepen van erosie-kuil benedenstrooms van kunstm. spleet.
7	577	64,5	0,20	5,20	hele grenslaag wordt instabiel, basaltstenen zakken weg.
8	629	66,3	0,22	5,60	voortgaande erosie rond basaltstenen.
9	676	72,8	0,24	6,00	(idem)
10	722	73,8	0,28	9,20	model bezeken!

Tabel I-6: Meetresultaten en waarnemingen M 2015/proef 8.

M 2015/Proef 6

filtermateriaal basalt-breuksteen

korrel-gradatie : $D_f = 100 - 250$ mm
 significante korrelgrootte : $D_{15f} = 135$ mm
 holte-percentage : $n_f = 46\%$

basismateriaal grind

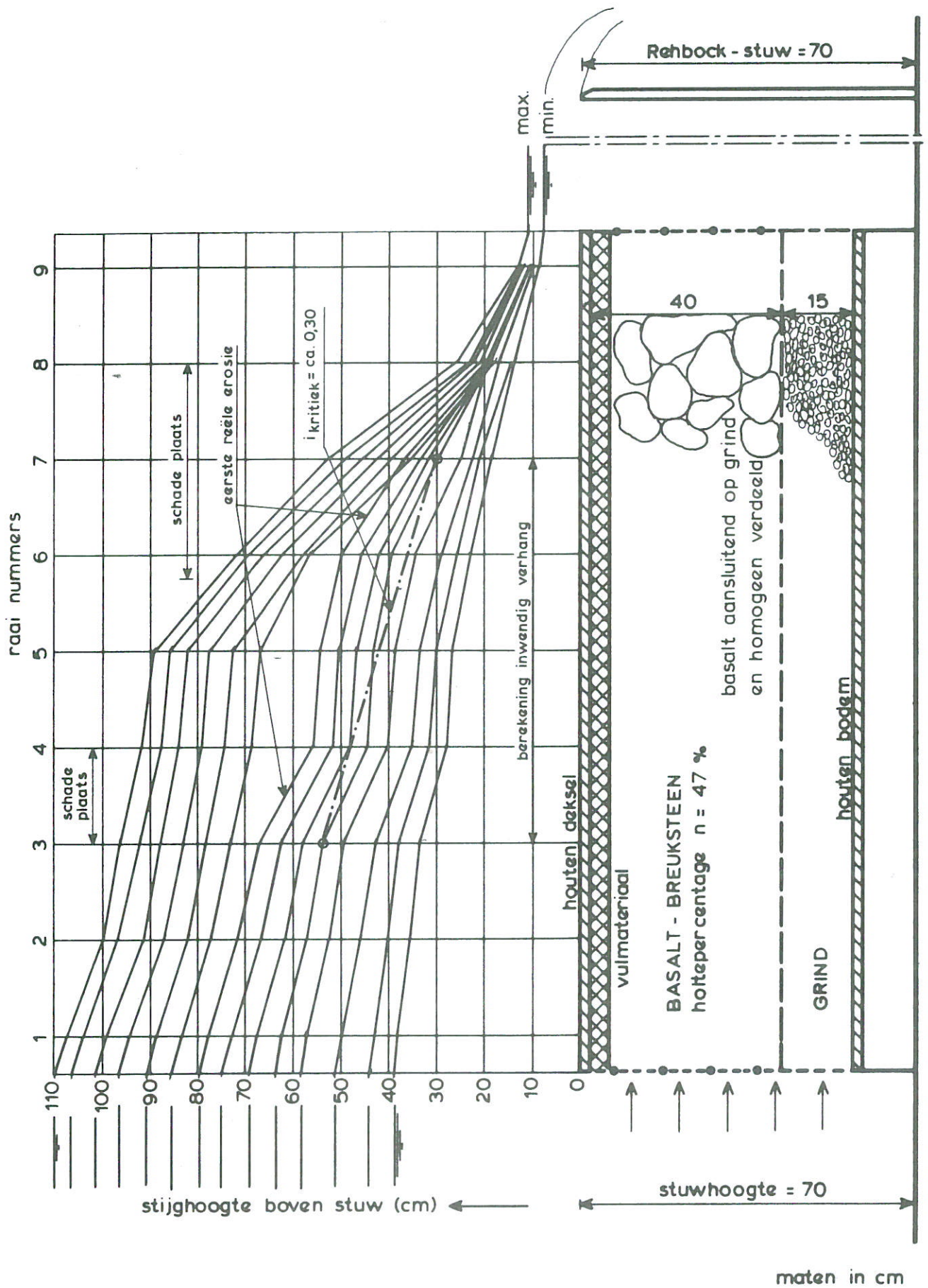
korrel-gradatie : $D_b = 8 - 40$ mm
 significante korrelgrootte : $D_{50b} = 18$ mm

Kunstmatige lange spleet langs glas tussen raaien 2 t/m 8.

dimensies: doorsnede = ca. 0,10 m
 lengte = ca. 1,25 m

stap no.	uitw. verval over model [mm]	debiet door totale model [l/s]	inwendig verhang tussen 3 en 7 [--]	uitgespoeld grind (Σ) [kg]	waarnemingen en bijzonderheden
1	285	45,0	0,08	0,40	geringe beweging van grind in spleet, herrangschikking.
2	332	47,4	0,09	0,80	erosie-kuiltje in middel spleet <u>kritiek verhang overschreden!</u> afzetting aan benedenstr. zijde
3	380	52,3	0,11	5,15	duidelijke erosiekuil in spleet
4	429	55,7	0,12	6,10	bewegingen heftiger, ook erosie in de rest van het model.
5	479	58,2	0,13	22,90	gehele grenslaag wordt aangetast, weinig erosie in spleet!
6	523	60,0	0,14	27,90	basalt zakt weg na ontstaan van erosiekuil, model bezwijkt.

Tabel I-7: Meetresultaten en waarnemingen M 2015/proef 6.



MODEL - CONFIGURATIE EN MEETRESULTATEN

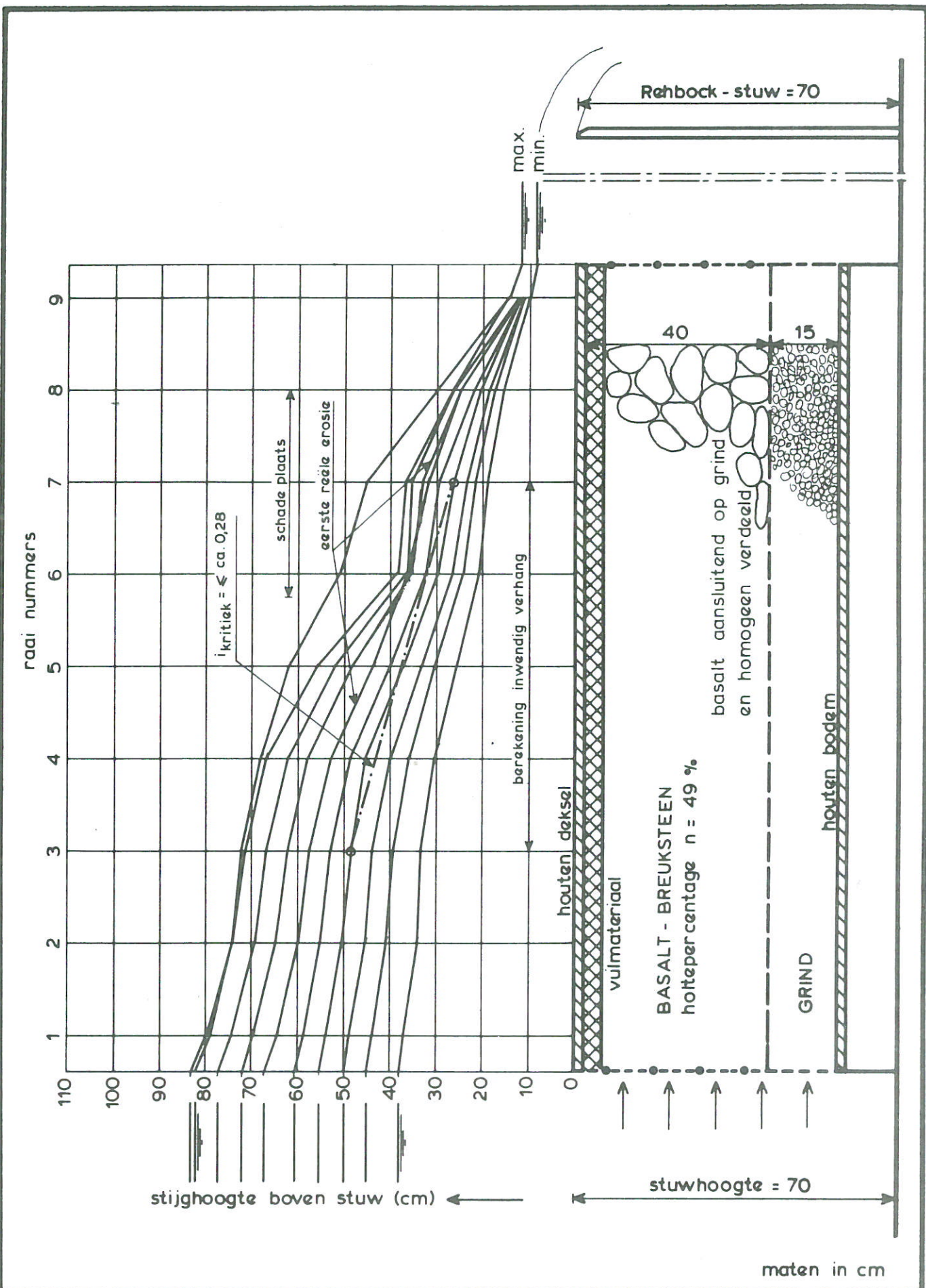
PROEF 2

B'JLAGE I

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

M 2015

FIG. I - 1



MODEL - CONFIGURATIE EN MEETRESULTATEN

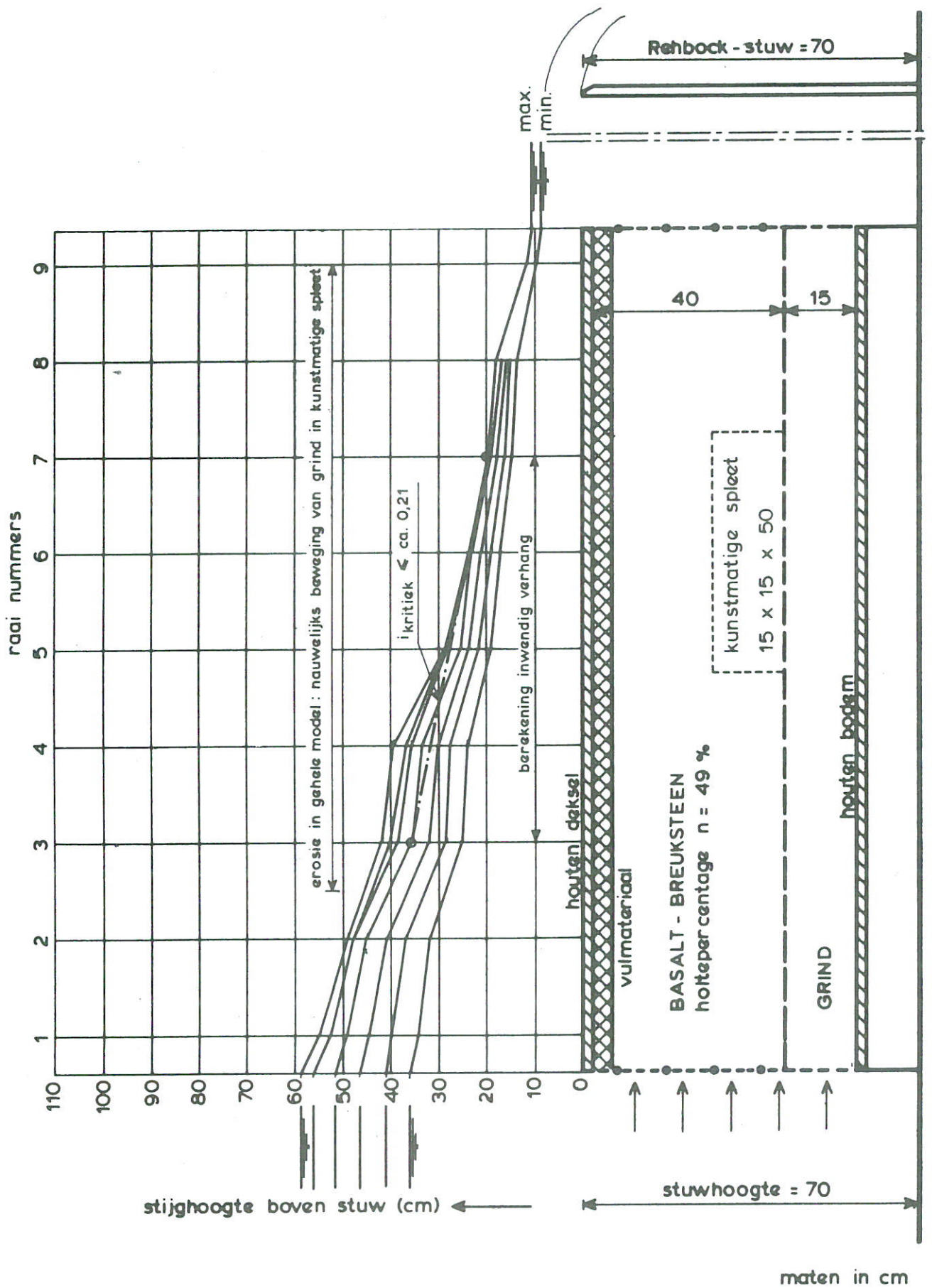
PROEF 3

BIJLAGE I

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

M 2015

FIG. I-2



MODEL - CONFIGURATIE EN MEETRESULTATEN

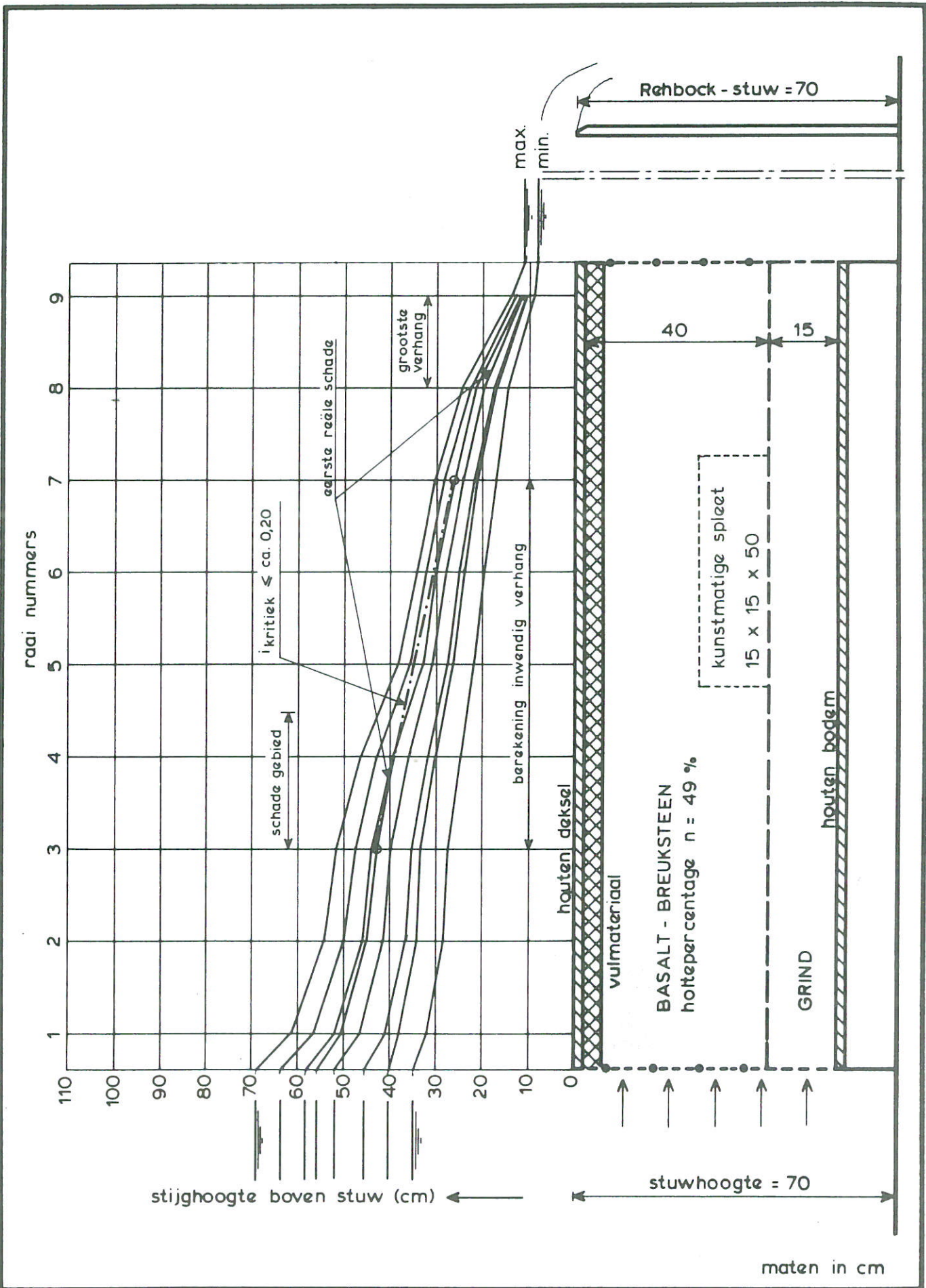
PROEF 4

B'JLAGE I

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

M 2015

FIG. I- 3



MODEL - CONFIGURATIE EN MEETRESULTATEN

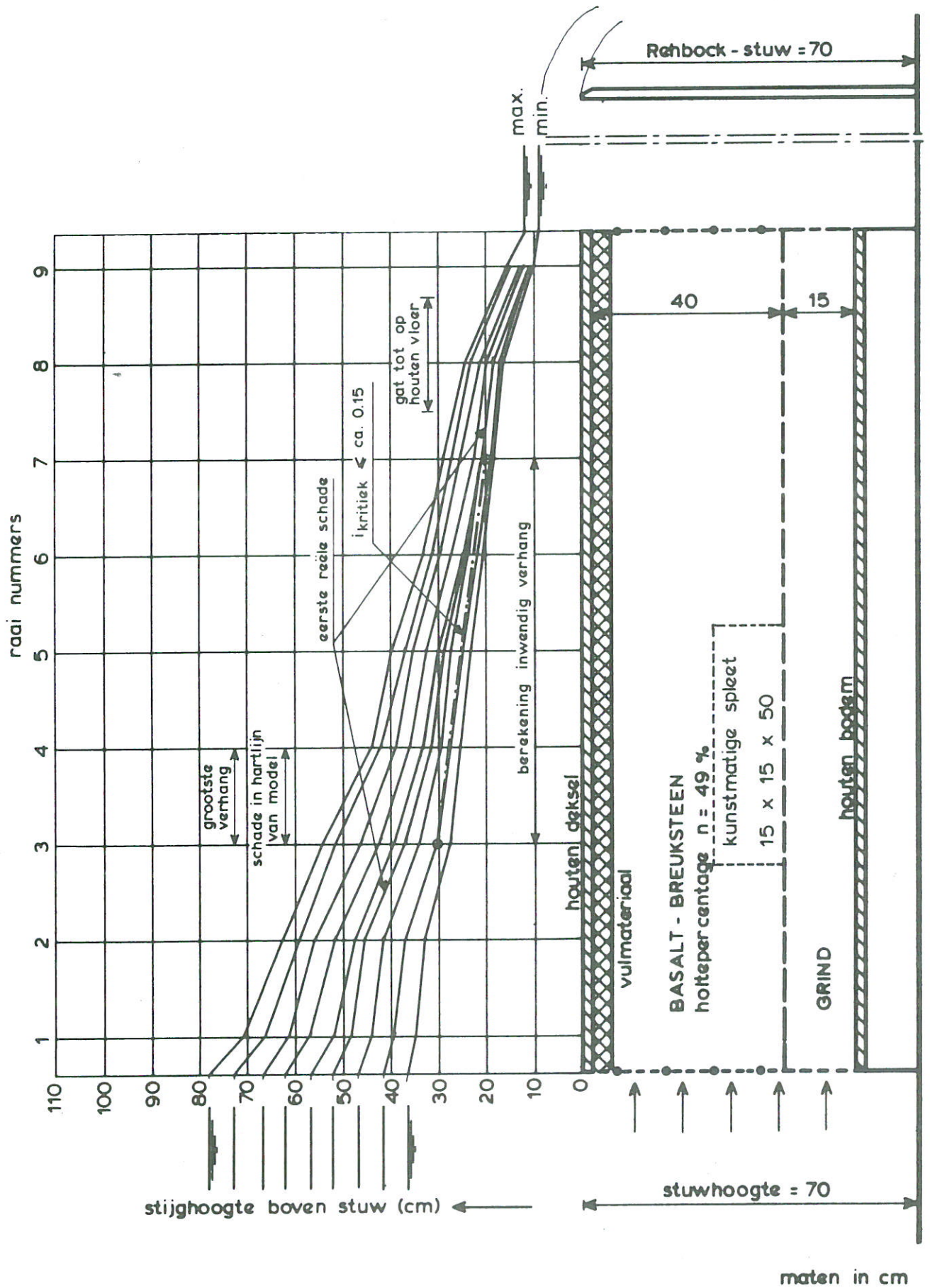
PROEF 7

B'JLAGE I

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

M 2015

FIG. I - 4



MODEL - CONFIGURATIE EN MEETRESULTATEN

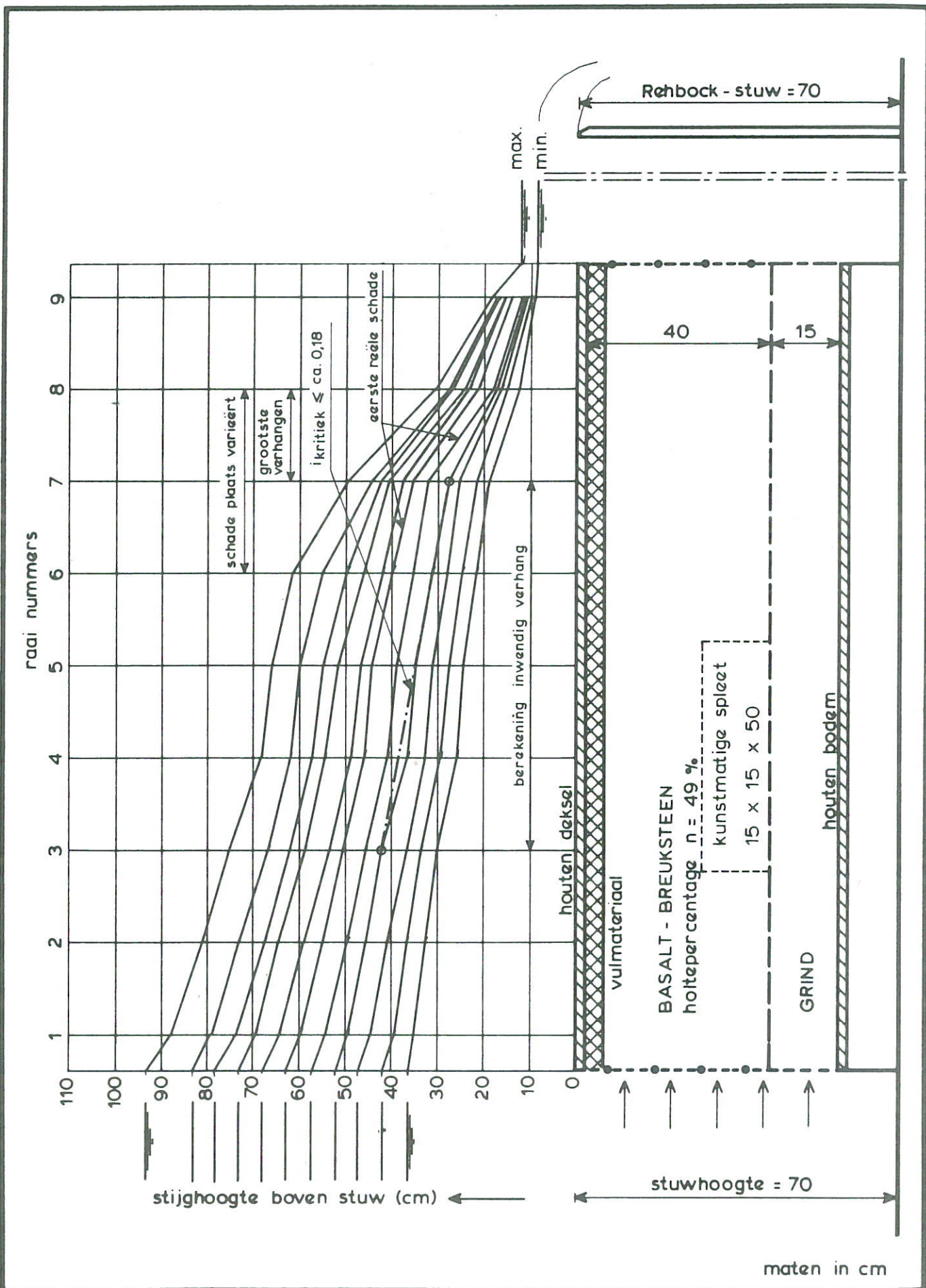
PROEF 5

B'JLAGE I

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

M 2015

FIG. I - 5



MODEL - CONFIGURATIE EN MEETRESULTATEN

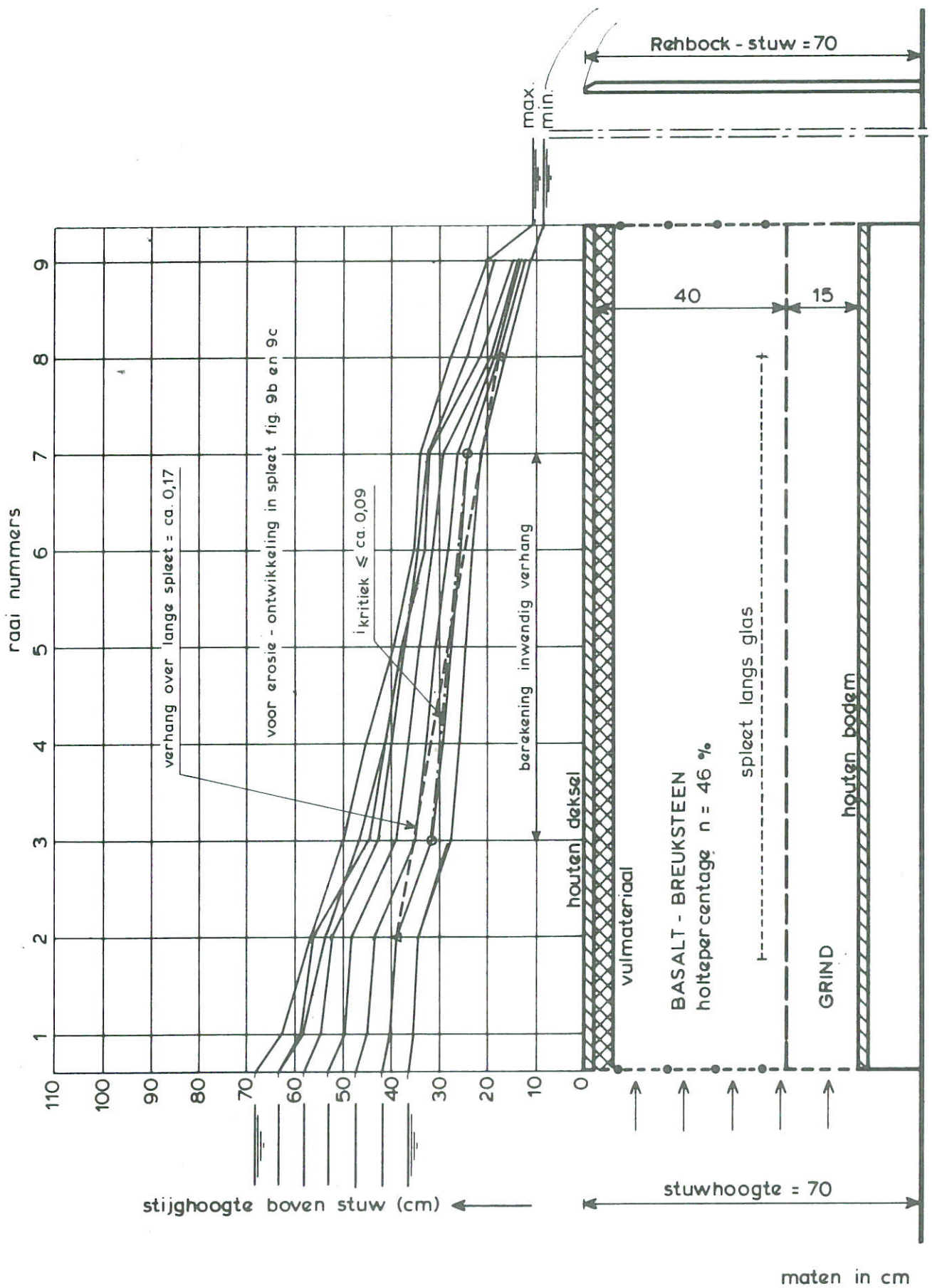
PROEF 8

BIJLAGE I

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

M 2015

FIG. I - 6



MODEL - CONFIGURATIE EN MEETRESULTATEN

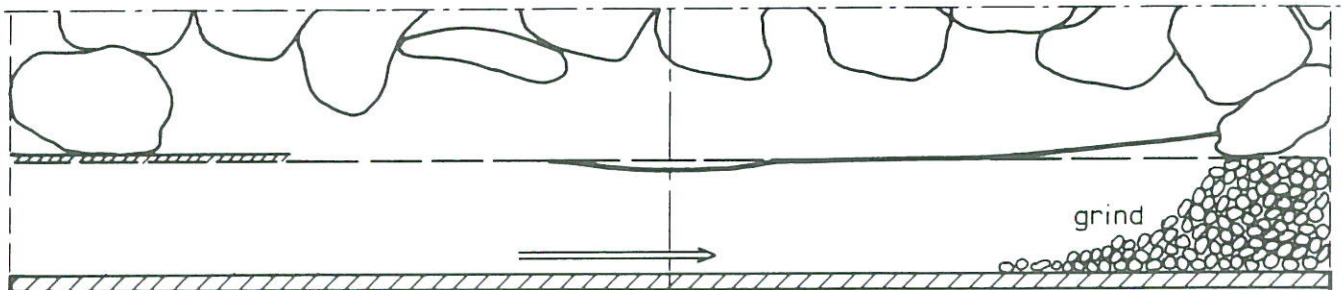
PROEF 6

B'JLAGE I

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

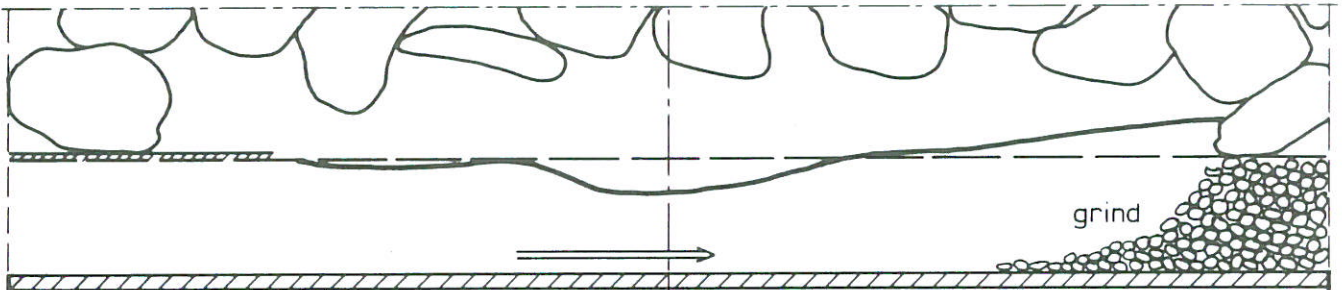
M 2015

FIG. I-7



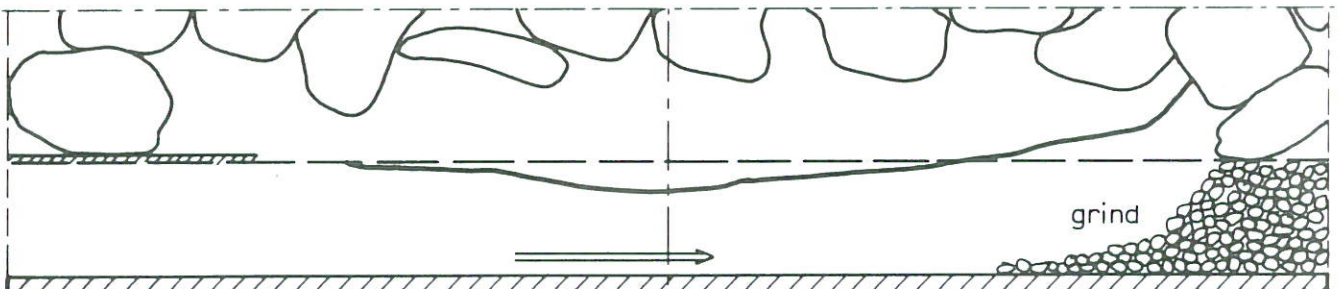
kort na instelling van verval, groot 0,33 m

1



kort na instelling van verval, groot 0,38 m

2



kort voor instelling van verval groot, 0,43 m

3

VOORBEELDEN VAN EROSIE ONTWIKKELING
IN LANGE SPLEET LANGS GLAS

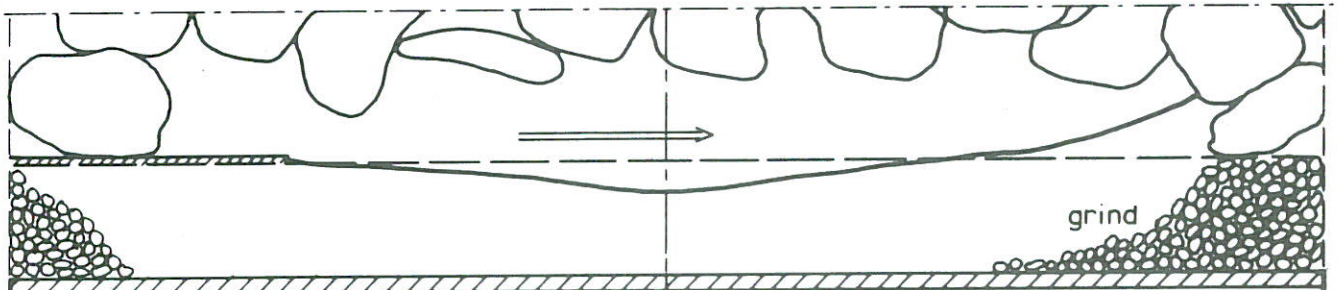
PROEF 6

B'JLAGE I

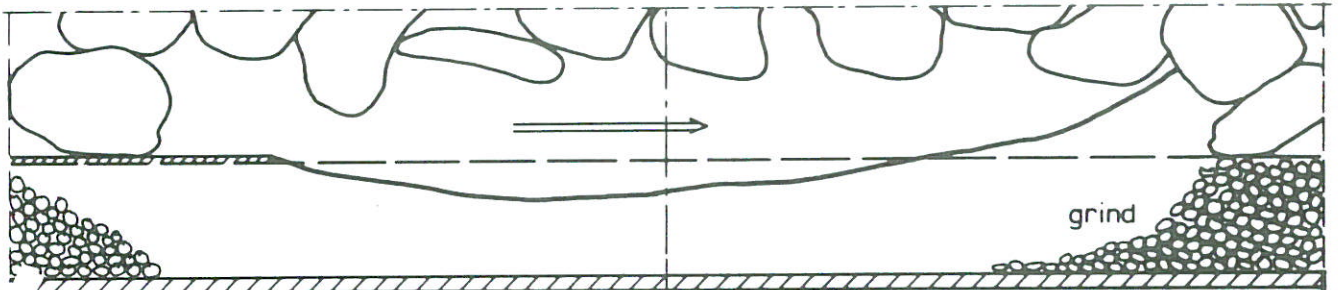
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

M 2015

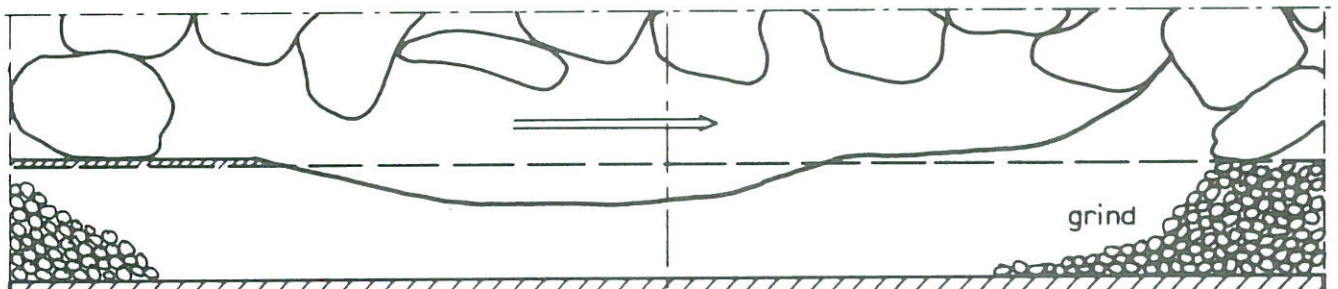
FIG.I- 7a



kort voor instelling van verval, groot 0,48 m
4



kort voor instelling van verval, groot 0,52 m
5



eindsituatie
6

EROSIE - PROFIELEN IN LANGE SPLEET
LANGS GLAS

PROEF 6

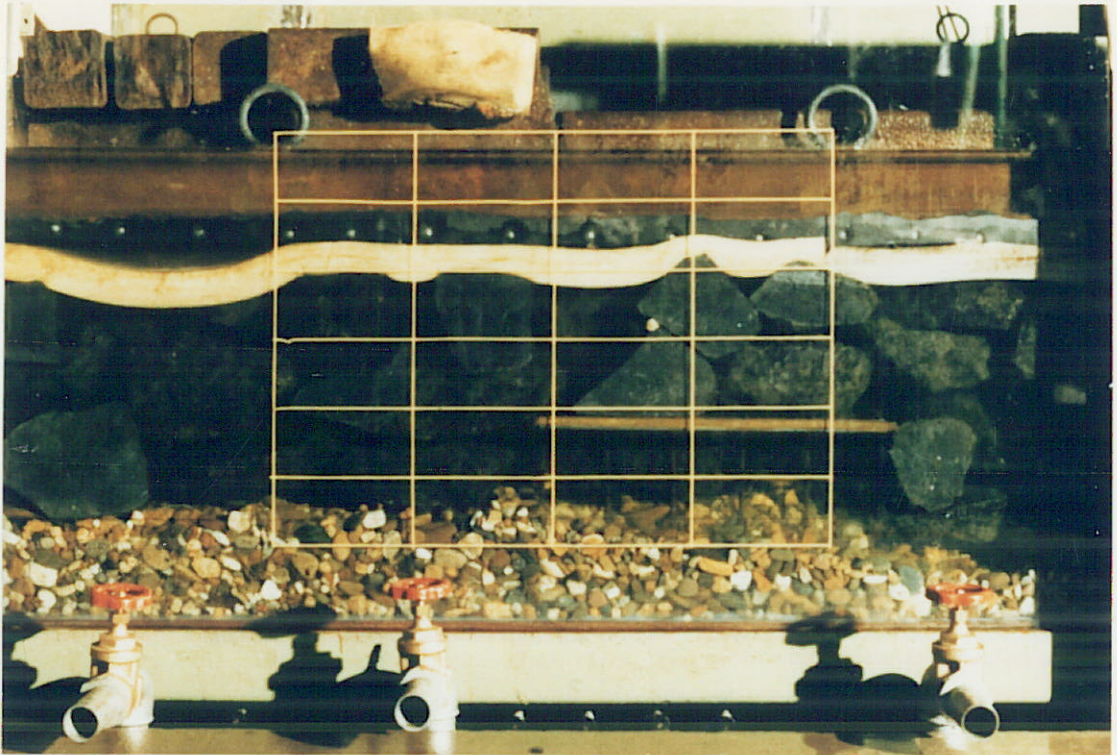
BIJLAGE I

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

M 2015

FIG. I - 7b

- bovenstroomse zijde -

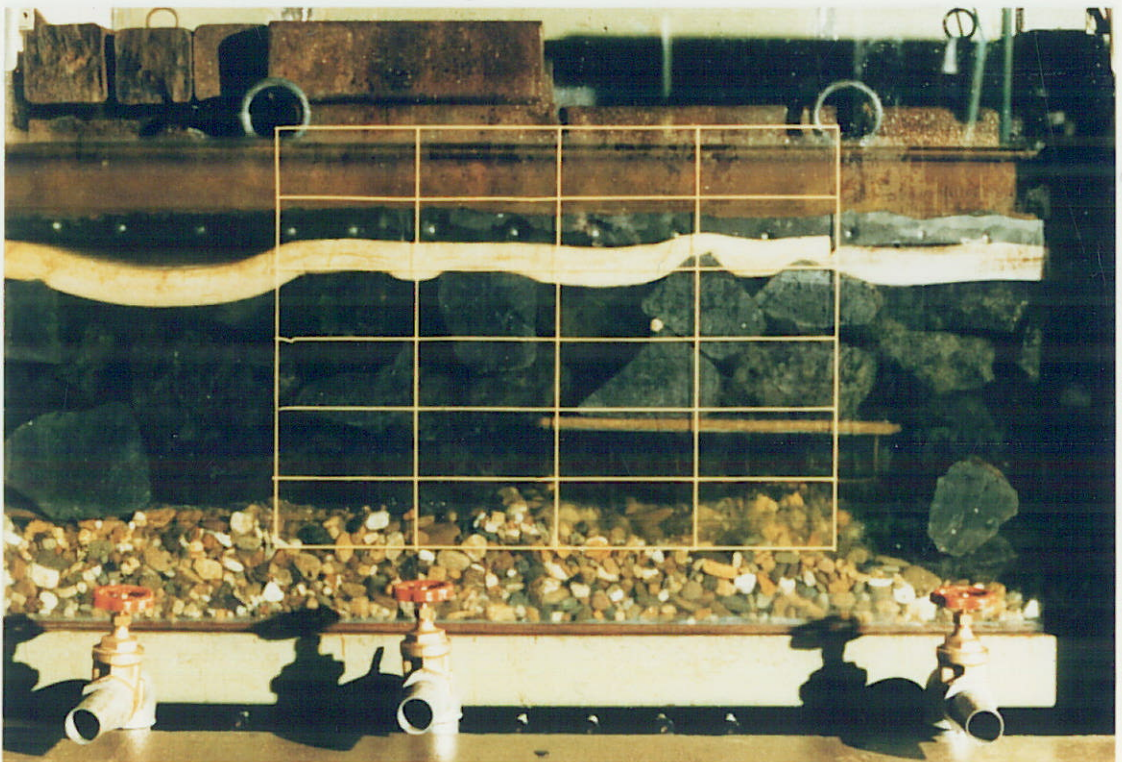


- benedenstroomse zijde -

Foto 1 : M 2015/proef 4, verval 0,42 m.

Let op het gevormde natuurlijk kanaaltje aan de rechterzijde.
(benedenstrooms van de kunstmatige spleet langs het gras)

- bovenstroomse zijde -



- benedenstroomse zijde -

Foto 2 : M 2015/proef 4, verval 0,46 m.

Afgezaagde steen aan rechterzijde is verzakt. Let ook op het
verschil in erosie-diepte van het natuurlijk kanaaltje.

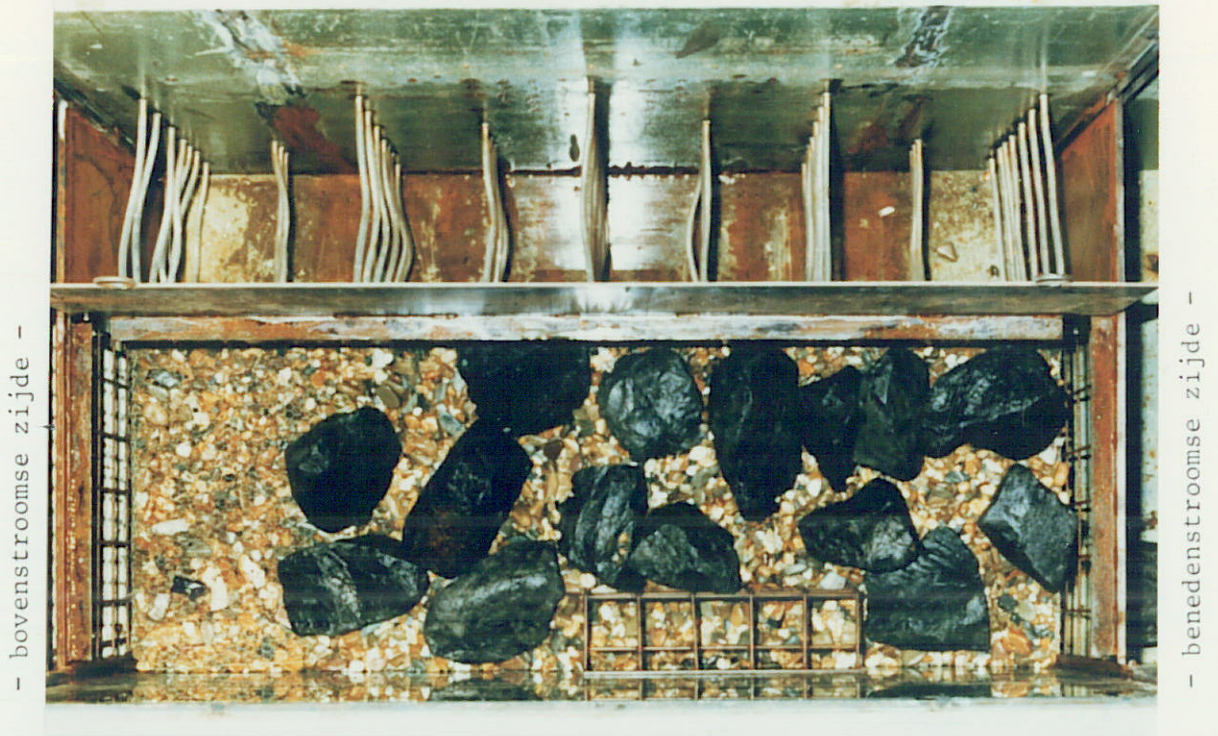


Foto 3 : M 2015/proef 4, uitbouw van het model (bovenaanzicht)

Let op het dekkingspercentage van de grote basaltstenen op het basismateriaal en de plaats van de kunstmatige spleet.

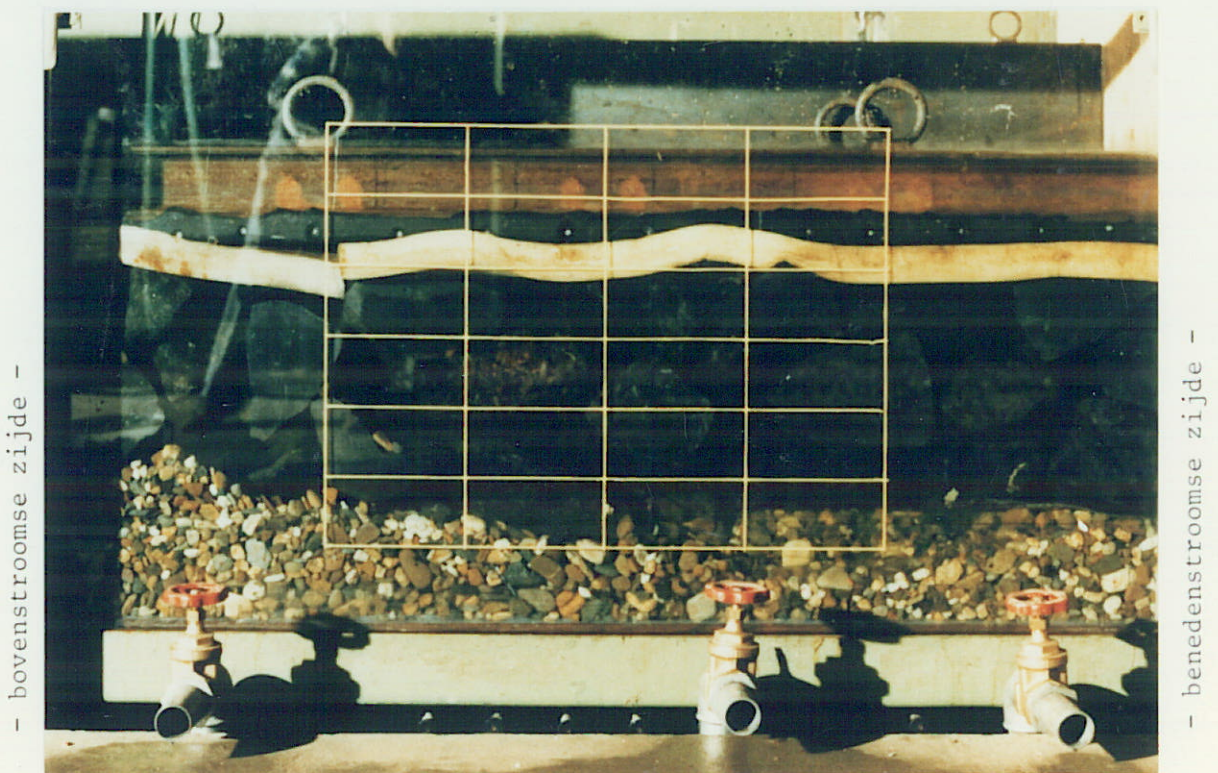


Foto 4 : M 2015/proef 6, situatie na einde proef.

Let op de erosiekuil tussen de twee afsluiters ter linkerzijde (bovenstrooms) en de opstapeling van grind ter rechterzijde.

Filterstabiliteit bij de overgang
Noma-bovenmat

Invloed van zandlenzen

Bijlage II

M 2062 - Aanvullend onderzoek

Tabellen en Figuren

M 2062/Proef 1

filtermateriaal basalt-breuksteen

korrel-gradatie : $D_f = 40 - 250$ mm
 significante korrelgrootte : $D_{15f} = 82$ mm
 holte-percentagte : $n_f = 40.5\%$

basismateriaal grind

korrel-gradatie : $D_b = 8 - 40$ mm
 significante korrelgrootte : $D_{50b} = 28$ mm

geen kunstmatige spleet.

stap no.	uitw. verval over model [mm]	debiet door totale model [l/s]	inwendig verhang tussen 3 en 7 [--]	uitgespoeld grind (Σ) [kg]	additionele waarnemingen en bijzonderheden.
1	458	42,1	0,26	-	geen beweging te zien
2	502	44,3	0,28	-	"
3	582	48,3	0,31	-	"
4	644	50,9	0,34	-	"
5	725	54,8	0,37	-	"
6	788	58,8	0,40	-	"
7	848	59,1	0,45	-	"
8	912	61,8	0,48	-	"
9	987	64,3	0,52	-	"
10	1006	65,9	0,53	-	max. in te stellen verval.

Tabel II-1: Meetresultaten en waarnemingen M 2062/proef 1.

M 2062/Proef 2

filtermateriaal basalt-breuksteen

korrel-gradatie : $D_f = 40 - 250$ mm
 significante korrelgrootte : $D_{15f} = 82$ mm
 holte-percentage : $n_f = 41.3\%$

basismateriaal grind

korrel-gradatie : $D_b = 8 - 40$ mm
 significante korrelgrootte : $D_{50b} = 28$ mm

Kunstmatige spleet t.h.v. raaien 5 t/m 7

dimensies: doorsnede = ca. 0,15 m
 lengte = ca. 0,50 m

stap no.	uitw. verval over model [mm]	debiet door totale model [l/s]	inwendig verhang tussen 3 en 7 [--]	uitgespoeld grind (Σ) [kg]	additionele waarnemingen en bijzonderheden.
1	515	45,2	0,27	-	
2	580	47,7	0,31	-	
3	652	51,3	0,34	-	
4	720	54,1	0,39	-	
5	792	56,0	0,43	-	
6	864	59,1	0,48	-	
7	935	62,0	0,53	-	
8	1008	63,9	0,57	-	max. in te stellen verval.

Tabel II-2: Meetresultaten en waarnemingen M 2062/proef 2.

M 2062/Proef 3

filtermateriaal basalt-breuksteen

korrel-gradatie : $D_f = 70 - 250$ mm
 significante korrelgrootte : $D_{15f} = 100$ mm
 holte-percentage : $n_f = 45.3\%$

basismateriaal grind

korrel-gradatie : $D_b = 8 - 40$ mm
 significante korrelgrootte : $D_{50b} = 28$ mm

Kunstmatige spleet t.h.v. raaien 5 t/m 7
 dimensies: doorsnede = ca. 0,15 m
 lengte = ca. 0,75 m

stap no.	uitw. verval over model [mm]	debiet door totale model [l/s]	inwendig verhang tussen 3 en 7 [--]	uitge-spoeld grind [kg]	additionele waarnemingen en bijzonderheden.
1	484	49,1	0,23	-	geen beweging waargenomen
2	549	53,6	0,26	-	"
3	618	56,9	0,29	-	"
4	690	59,8	0,30	0,65	licht bewegende grotere stenen in de spleet
5	810	64,6	0,33	0,75	idem
6	833	69,0	0,36	0,80	idem
7	906	72,4	0,40	3,80	<u>kritiek verhang overschreden!</u> erosiekuil in filtermateriaal

Tabel II-3: Meetresultaten en waarnemingen M 2062/proef 3.

M 2062/Proef 4

filtermateriaal basalt-breuksteen

korrel-gradatie : $D_f = 70 - 250$ mm
 significante korrelgrootte : $D_{15f} = 100$ mm
 holte-percentagte : $n_f = 44.4\%$

basismateriaal grind

korrel-gradatie : $D_b = 8 - 40$ mm
 significante korrelgrootte : $D_{50b} = 28$ mm

geen kunstmatige spleet.

stap no.	uitw. verval over model [mm]	debiet door totale model [l/s]	inwendig verhang tussen 3 en 7 [--]	uitgespoeld grind (Σ) [kg]	additionele waarnemingen en bijzonderheden.
1	484	43,7	0,26	-	
2	553	46,9	0,31	-	
3	619	50,1	0,34	-	
4	700	53,8	0,40	-	
5	768	56,6	0,41	-	
6	838	59,4	0,45	-	
7	912	62,6	0,49	-	
8	984	65,0	0,53	-	max. in te stellen verval.

Tabel II-4: Meetresultaten en waarnemingen M 2062/proef 4.

M 2062/Proef 10

filtermateriaal basalt-breksteen

korrel-gradatie : $D_f = 70 - 250 \text{ mm}$
 significante korrelgrootte : $D_{15f} = 100 \text{ mm}$
 holte-percentagte : $n_f = 45.2\%$

basismateriaal grind

korrel-gradatie : $D_b = 8 - 40 \text{ mm}$
 significante korrelgrootte : $D_{50b} = 18 \text{ mm}$

geen kunstmatige spleet.

stap no.	uitw. verval over model [mm]	debiet door totale model [l/s]	inwendig verhang tussen 3 en 7 [--]	uitgespoeld grind (Σ) [kg]	additionele waarnemingen en bijzonderheden.
1	447	50,0	0,22	-	
2	523	55,9	0,26	-	
3	592	61,9	0,28	-	
4	666	65,0	0,31	-	
5	734	68,5	0,33	-	
6	805	72,9	0,36	-	
7	870	74,8	0,37	-	
8	947	71,5	0,37	-	max. in te stellen verval.

Tabel II-5: Meetresultaten en waarnemingen M 2062/proef 10.

M 2062/Proef 5

filtermateriaal basalt-breuksteen

korrel-gradatie : $D_f = 70 - 250$ mm
 significante korrelgrootte : $D_{15f} = 100$ mm
 holte-percentagte : $n_f = 45.4\%$

basismateriaal grind

korrel-gradatie : $D_b = 8 - 40$ mm
 significante korrelgrootte : $D_{50b} = 18$ mm

Kunstmatige spleet t.h.v. raaien 4 t/m 6
 dimensies: doorsnede = ca. 0,15 m
 lengte = ca. 0,50 m

NB! Snelheidsmetingen in de spleet.

stap no.	uitw. verval over model [mm]	debiet door totale model [l/s]	inwendig verhang tussen 3 en 7 [--]	uitgespoeld grind (Σ) [kg]	stroomsnelheid		waarnemingen en bijzonderheden.
					in spleet [m/s]	langs grenslaag. [m/s]	
1	457	51,2	0,21	-	0,64	0,60	
2	554	56,7	0,26	-	0,68	0,69	
3	620	60,4	0,29	0,05	0,75	0,75	lichte trilling van grindkorrels in spleet
4	669	61,8	0,30	0,05	0,78	0,73	
5	718	64,7	0,33	0,05	0,74	0,71	
6	760	67,1	0,34	0,05	0,86	0,87	enkele korrels verrollen door spleet
7	808	71,0	0,37	0,70	0,82	0,75	instabiliteit aan de benedenstroomse modelzijde
8	858	72,7	0,39	0,70	0,86	0,77	
9	916	75,7	0,41	0,70	0,97	0,81	<u>kritiek verhang overschreden: erosie tussen 6 en 7</u>
10	948	77,8	0,43	0,70	0,96	0,69	
11	943	81,4	0,42	0,70	0,99	0,75	

Tabel II-6: Meetresultaten en waarnemingen M 2062/proef 5.

M 2062/Proef 7

filtermateriaal basalt-breuksteen

korrel-gradatie : $D_f = 70 - 250$ mm
 significante korrelgrootte : $D_{15f} = 100$ mm
 holte-percentagte : $n_f = 45.4\%$

basismateriaal grind

korrel-gradatie : $D_b = 8 - 40$ mm
 significante korrelgrootte : $D_{50b} = 18$ mm

Kunstmatige spleet t.h.v. raaien 5 t/m 7
 dimensies: doorsnede = ca. 0,15 m
 lengte = ca. 0,50 m

NB! Snelheidsmetingen in de spleet.

stap no.	uitw. verval over model [mm]	debiet door totale model [l/s]	inwendig verhang tussen 3 en 7 [--]	uitgespoeld grind (Σ) [kg]	stroomsnelheid		waarnemingen en bijzonderheden.
					in spleet [m/s]	langs grenslaag. [m/s]	
1	472	58,8	0,24	-	0,58	0,18	
2	545	63,8	0,29	-	0,63	0,18	
3	619	67,2	0,33	0,15	0,74	0,24	lichte beweging in het grind
4	683	71,5	0,36	0,15	0,76	0,24	
5	735	72,3	0,38	0,20	0,69	0,67	
6	786	75,3	0,40	0,20	0,84	0,83	iets meer beweging in grotere grindkorrels
7	825	77,2	0,43	0,20	0,89	0,83	
8	878	81,1	0,45	0,20	0,93	0,54	
9	935	82,6	0,46	0,20	0,83	0,30	<u>kritiek verhang overschreden!</u> geen erosie in spleet.

Tabel II-7: Meetresultaten en waarnemingen M 2062/proef 7.

M 2062/Proef 6

filtermateriaal basalt-breksteen

korrel-gradatie : $D_f = 70 - 250$ mm
 significante korrelgrootte : $D_{15f} = 100$ mm
 holte-percentage : $n_f = 46.4\%$

basismateriaal grind

korrel-gradatie : $D_b = 8 - 40$ mm
 significante korrelgrootte : $D_{50b} = 18$ mm

Kunstmatige lange spleet t.h.v. raaien 3 t/m 7
 dimensies: doorsnede = ca. 0,15 m
 lengte = ca. 1,00 m

NB! Snelheidsmetingen in de spleet.

stap no.	uitw. verval over model [mm]	debiet door totale model [l/s]	inwendig verhang tussen 3 en 7 [--]	uitgespoeld grind [kg]	stroomsnelheid		waarnemingen en bijzonderheden.
					in spleet [m/s]	langs grenslaag. [m/s]	
1	353	54,6	0,19	0,05	0,85	0,77	geen beweging
2	419	59,7	0,22	0,05	0,84	0,79	lichte trilling van grind
3	451	61,1	0,23	0,05	0,80	0,56	
4	510	64,6	0,26	0,10	0,87	0,93	korrels aan de wandel <u>kritiek verhang overschreden!</u>
5	563	68,3	0,28	0,10	0,83	0,73	
6	608	71,0	0,31	0,10	0,81	0,67	

Tabel II-8: Meetresultaten en waarnemingen M 2062/proef 6.

M 2062/Proef 11

filtermateriaal basalt-breksteen

korrel-gradatie : $D_f = 70 - 250$ mm
 significante korrelgrootte : $D_{15f} = 100$ mm
 holte-percentage : $n_f = 44.8\%$

basismateriaal grind

korrel-gradatie : $D_b = 8 - 40$ mm
 significante korrelgrootte : $D_{50b} = 18$ mm

Kunstmatige korte spleet t.h.v. raaien 5 t/m 7
 dimensies: doorsnede = ca. 0,15 m
 lengte = ca. 0,50 m

NB! Snelheidsmetingen in de spleet.

stap no.	uitw. verval over model [mm]	debiet door totale model [l/s]	inwendig verhang tussen 3 en 7 [--]	uitgespoeld grind (Σ) [kg]	stroomsnelheid		waarnemingen en bijzonderheden.
					in spleet [m/s]	langs grenslaag. [m/s]	
1	428	55,3	0,20	-	0,44	0,10	
2	497	65,0	0,23	-	0,60	0,18	
3	565	65,5	0,26	-	0,64	0,22	
4	635	70,1	0,29	-	0,60	0,40	
5	706	74,8	0,32	-	0,53	0,18	
6	777	77,2	0,36	-	0,57	0,24	
7	848	78,4	0,39	-	0,83	-	licht bewegen van korrels
8	923	80,7	0,43	0,60	0,78	-	<u>kritiek verhang overschreden!</u>

Tabel II-9: Meetresultaten en waarnemingen M 2062/proef 11.

M 2062/Proef 8

filtermateriaal basalt-breuksteen

korrel-gradatie : $D_f = 70 - 250$ mm
 significante korrelgrootte : $D_{15f} = 100$ mm
 holte-percentage : $n_f = 44.5\%$

basismateriaal grind

korrel-gradatie : $D_b = 8 - 40$ mm
 significante korrelgrootte : $D_{50b} = 18$ mm

Kunstmatige kleine spleet t.h.v. raaien 5 t/m 7
 dimensies: doorsnede = ca. 0,10 m
 lengte = ca. 0,50 m

NB! Snelheid- en verhangmetingen in de spleet.

stap no.	uitw. verval over model [mm]	debiet door totale model [l/s]	inwendig verhang tussen 3 en 7 [--]	uitgespoeld grind (Σ) [kg]	stroomsnelheid		verhang bovenin spleet. [-]	verhang opm. onderin spleet. [-]
					in spleet [m/s]	langs grens-laag. [m/s]		
1	322	42,1	0,20	-	0,31	0,26	0,08	0,03
2	446	50,6	0,26	-	0,34	0,28	0,08	0,03
3	523	55,8	0,30	-	0,46	0,36	0,13	0,08
4	593	59,7	0,36	-	0,48	0,32	0,15	0,10
5	667	63,2	0,40	-	0,39	0,32	0,15	0,10
6	740	67,2	0,45	-	-	-	0,18	0,15
7	806	70,1	0,47	-	0,64	0,34	0,18	0,13
8	878	73,2	0,50	-	0,70	0,56	0,18	0,07
9	970	76,3	0,55	-	0,62	0,40	0,20	0,10 1)

Tabel II-10: Meetresultaten en waarnemingen M 2062/proef 8.

- 1) max in te stellen verval.
 kritiek verhang is niet overschreden!

M 2062/Proef 9

filtermateriaal basalt-breuksteen

korrel-gradatie : $D_f = 70 - 250$ mm
 significante korrelgrootte : $D_{15f} = 100$ mm
 holte-percentage : $n_f = 44,5\%$

basismateriaal grind

korrel-gradatie : $D_b = 8 - 40$ mm
 significante korrelgrootte : $D_{50b} = 18$ mm

Kunstmatige kleine, lange spleet t.h.v. raaien 4 t/m 7

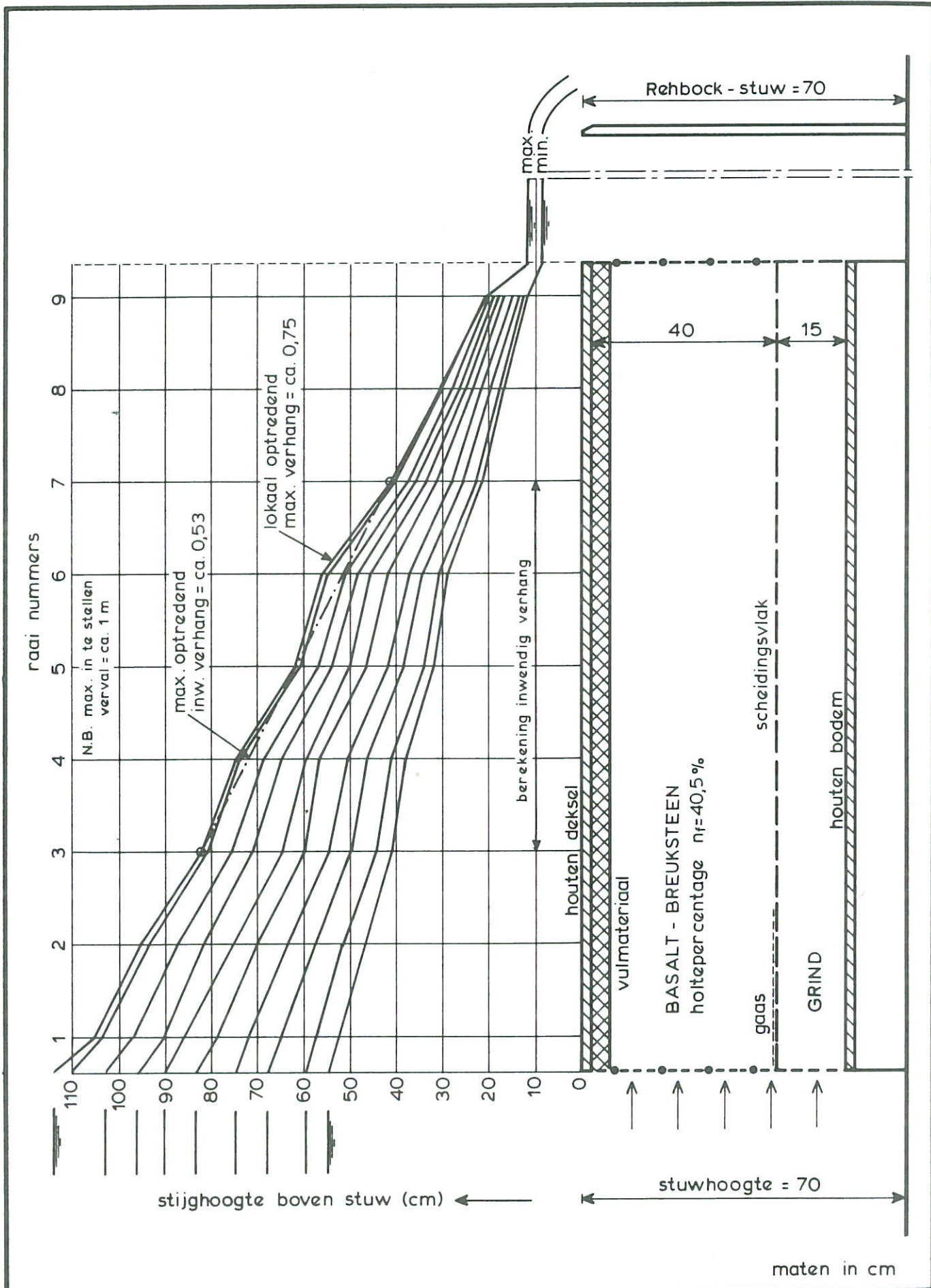
dimensies: doorsnede = ca. 0,10 m
 lengte = ca. 0,80 m

NB! Snelheids- en verhangmetingen in de spleet.

stap no.	uitw. verval over model [mm]	debiet door totale model [1/s]	inwendig verhang tussen 3 en 7 [--]	uitgespoeld grind (Σ) [kg]	stroomsnelheid		verhang bovenin spleet. [-]	verhang onderin spleet. [-]	opm.
					in spleet [m/s]	langs grenslaag. [m/s]			
1	185	33,5	0,12	-	0,34	0,20	0,05	0,02	
2	325	43,5	0,18	-	0,46	0,26	0,07	0,02	
3	445	51,9	0,24	-	0,42	0,30	0,10	0,08	1)
4	523	56,9	0,28	0,05	0,77	0,42	0,08	0,00	2)
5	604	61,9	0,33	0,05	0,77	0,37	0,10	0,02	3)
6	667	65,0	0,36	0,05	0,75	0,35	0,12	0,03	
7	738	68,4	0,40	0,10	0,71	0,45	0,12	0,07	
8	834	71,7	0,45	0,15	0,32	0,22	0,03	0,00	4)

Tabel II-11: Meetresultaten en waarneming M 2062/proef 9

- 1) enkele grindkorrels verrollen.
- 2) kritiek verhang overschreden!
- 3) stabiele situatie. Geen transport van korrels.
- 4) ontstaan van erosiekuil in spleet.
basaltstenen zakken weg.



MODEL - CONFIGURATIE EN MEETRESULTATEN

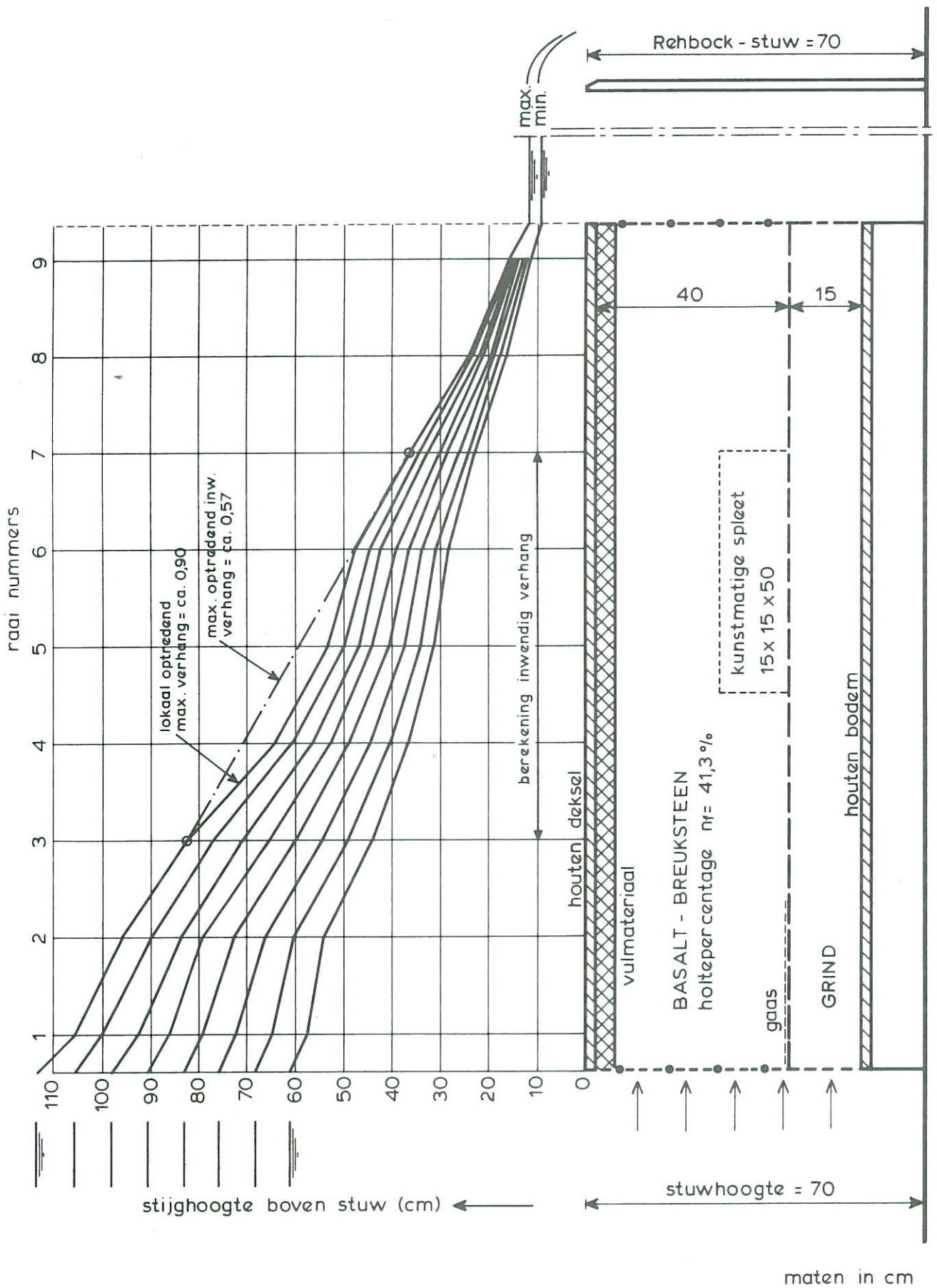
PROEF 1

BIJLAGE II

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

M 2062

FIG. II-1



MODEL - CONFIGURATIE EN MEETRESULTATEN

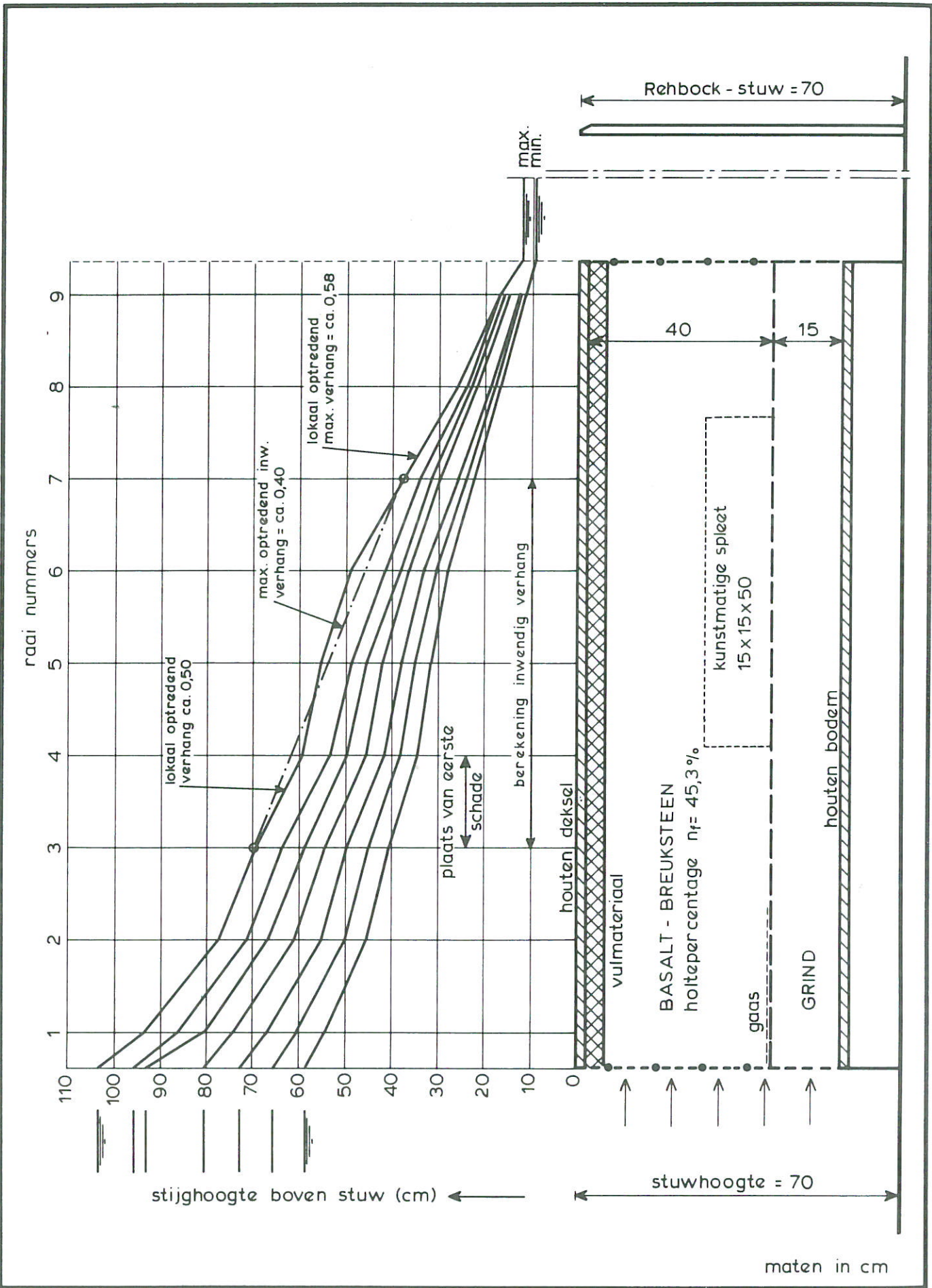
PROEF 2

BULAGE II

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

M 2062

FIG. II - 2



MODEL - CONFIGURATIE EN MEETRESULTATEN

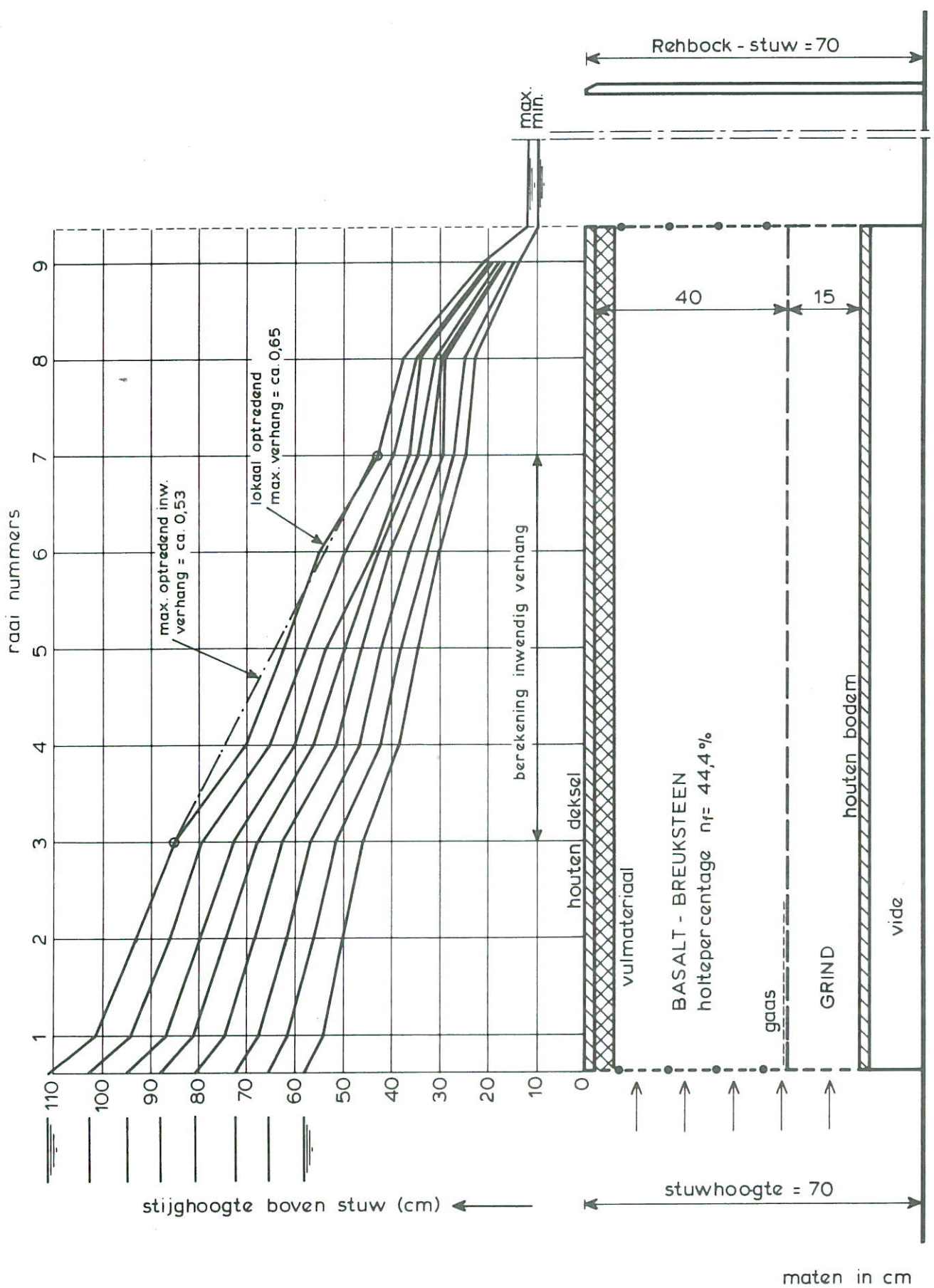
PROEF 3

BIJLAGE II

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

M 2062

FIG. II - 3



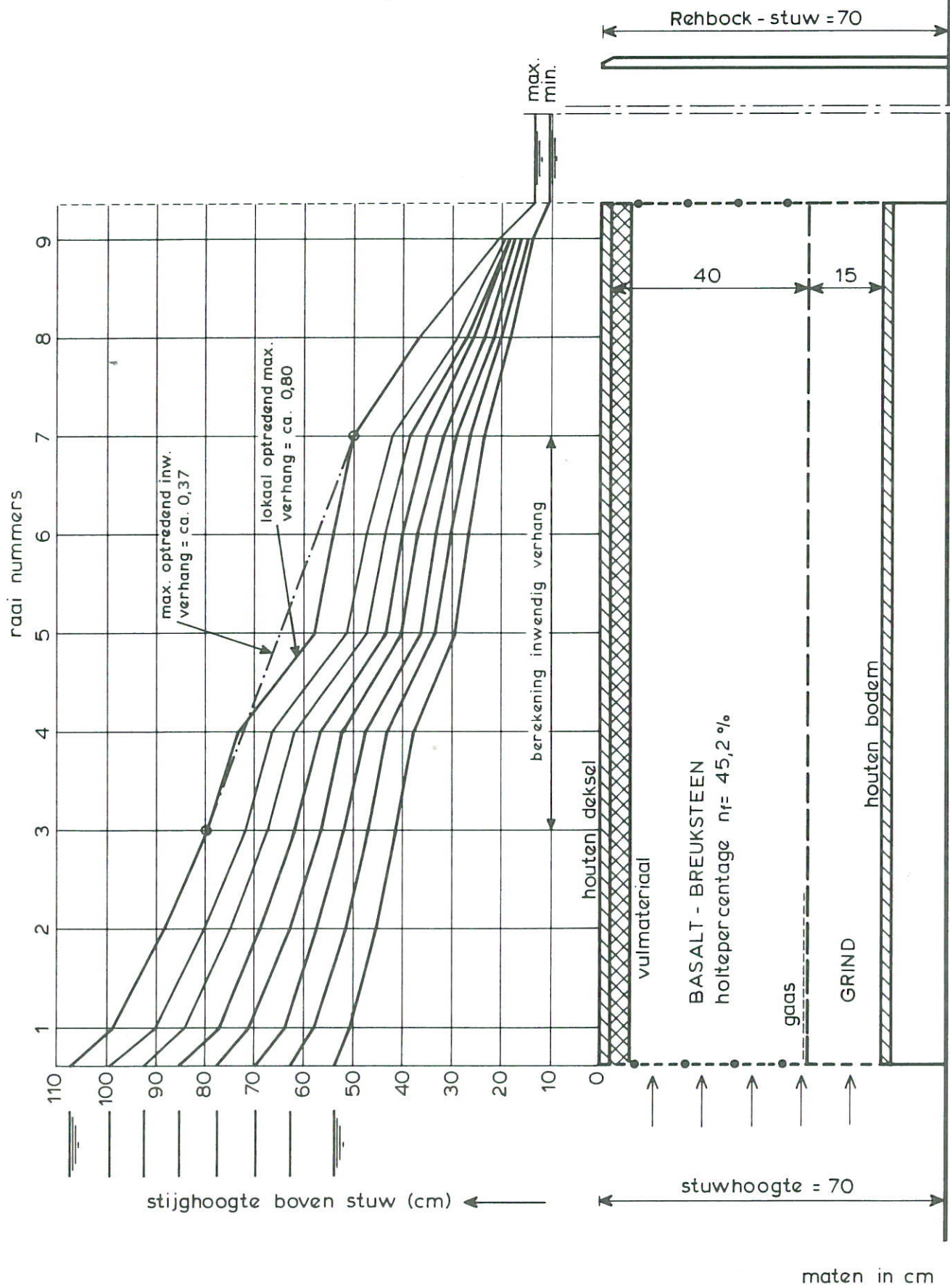
MODEL - CONFIGURATIE EN MEETRESULTATEN

PROEF 4

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

M 2062

FIG. II - 4



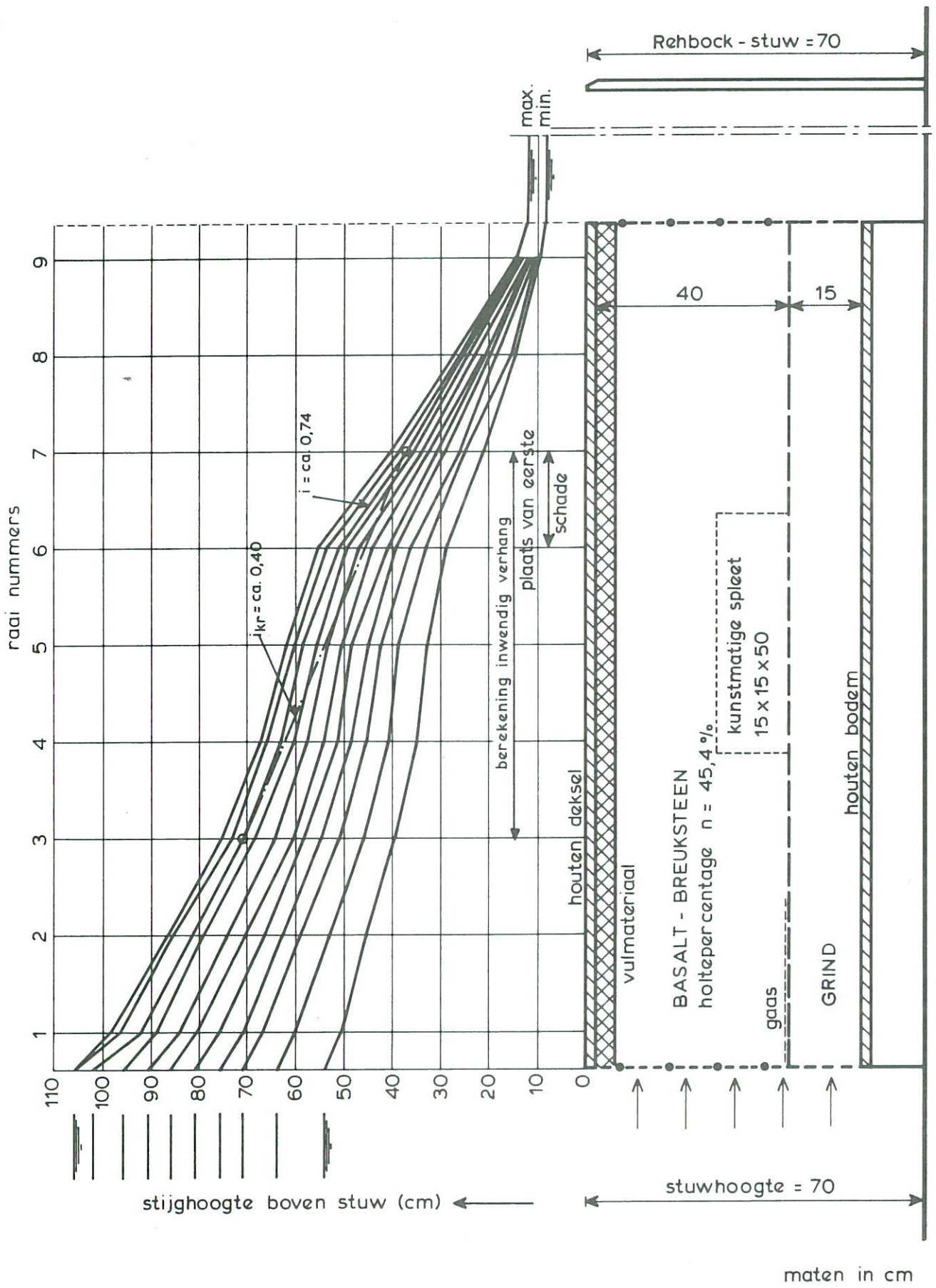
MODEL - CONFIGURATIE EN MEETRESULTATEN

PROEF 10

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

M 2062

FIG. II - 5



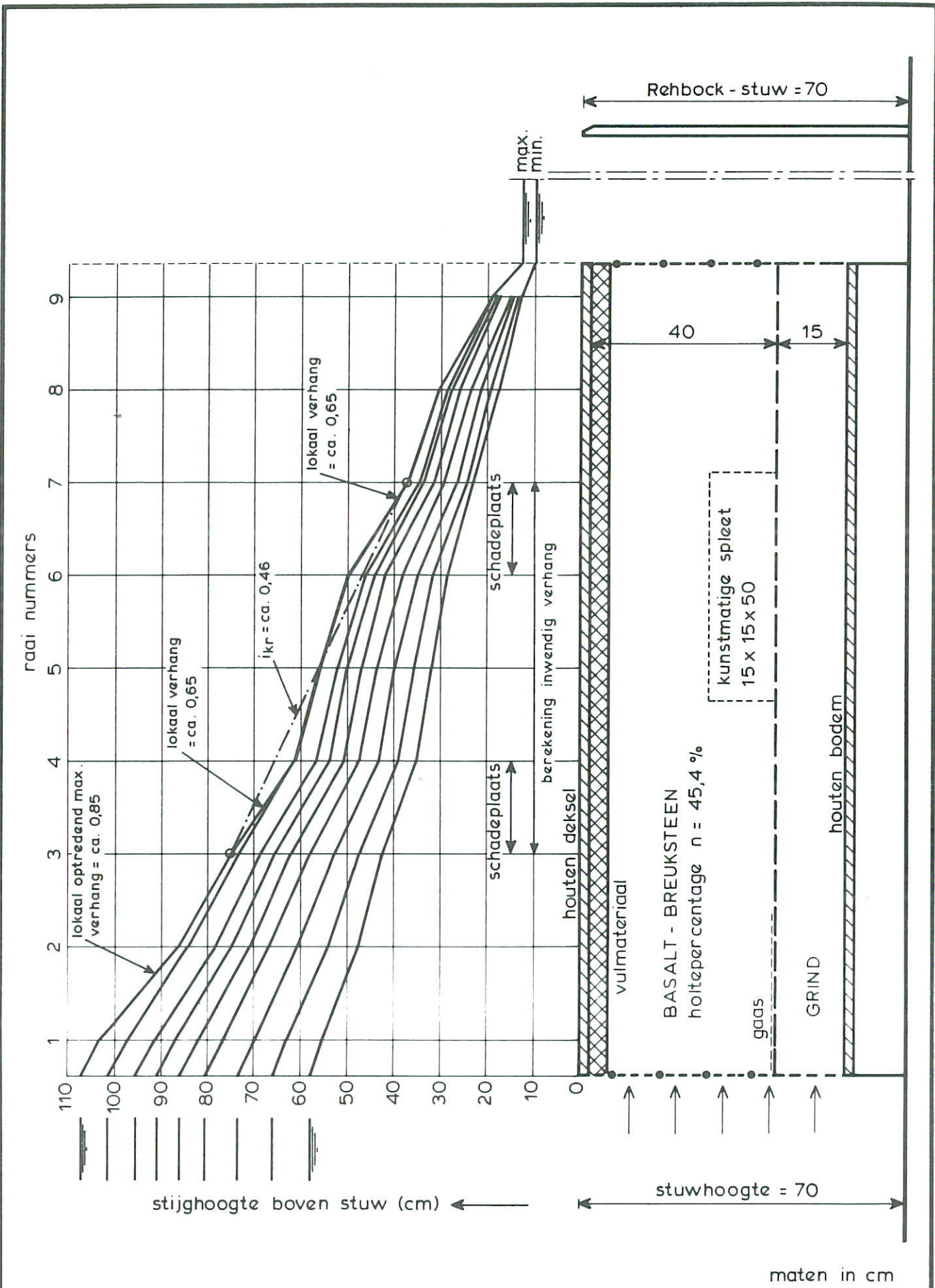
MODEL - CONFIGURATIE EN MEETRESULTATEN

PROEF 5

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

M 2062

FIG. II - 6



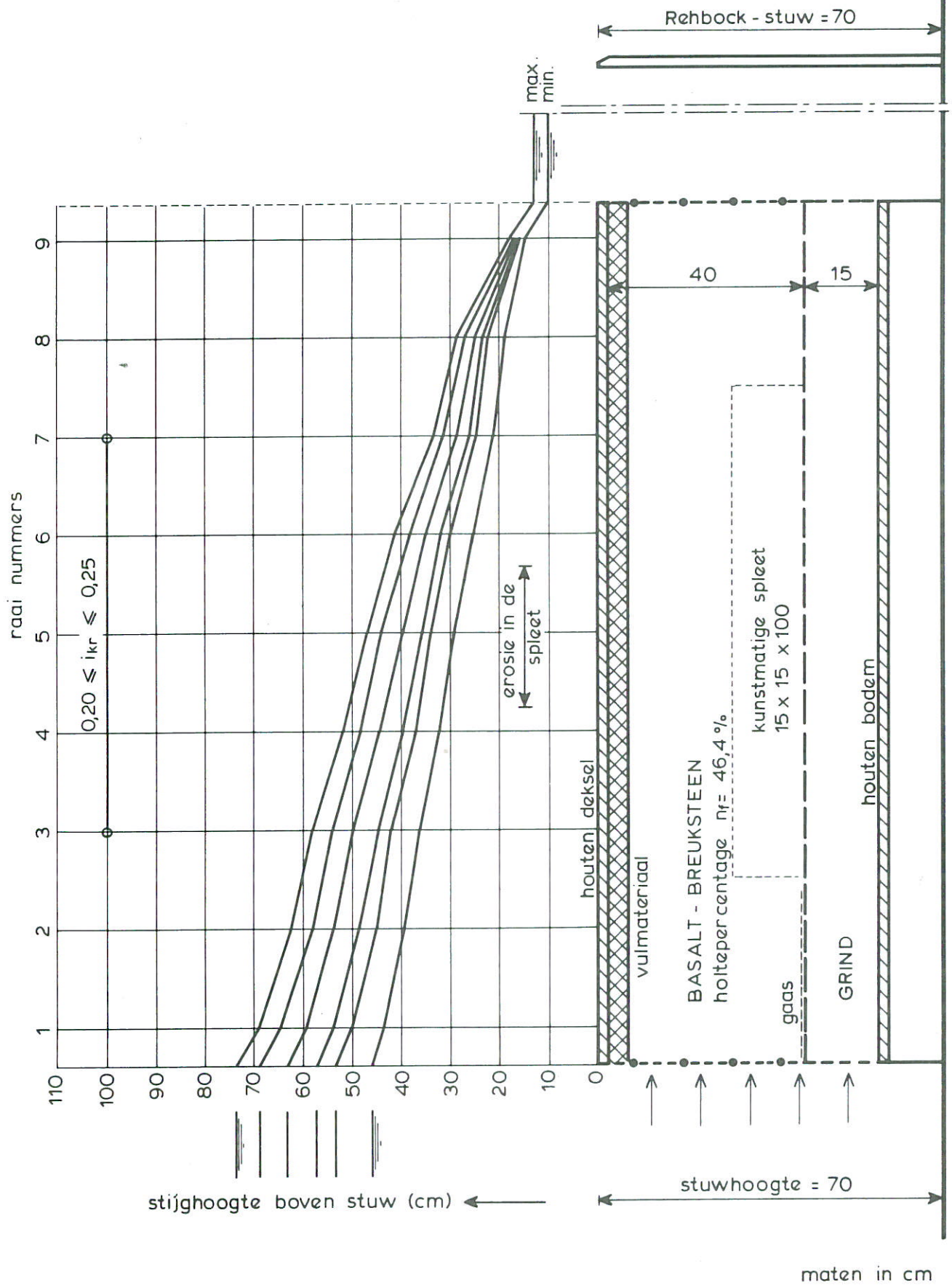
MODEL - CONFIGURATIE EN MEETRESULTATEN

PROEF 7

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

M 2062

FIG. II - 7



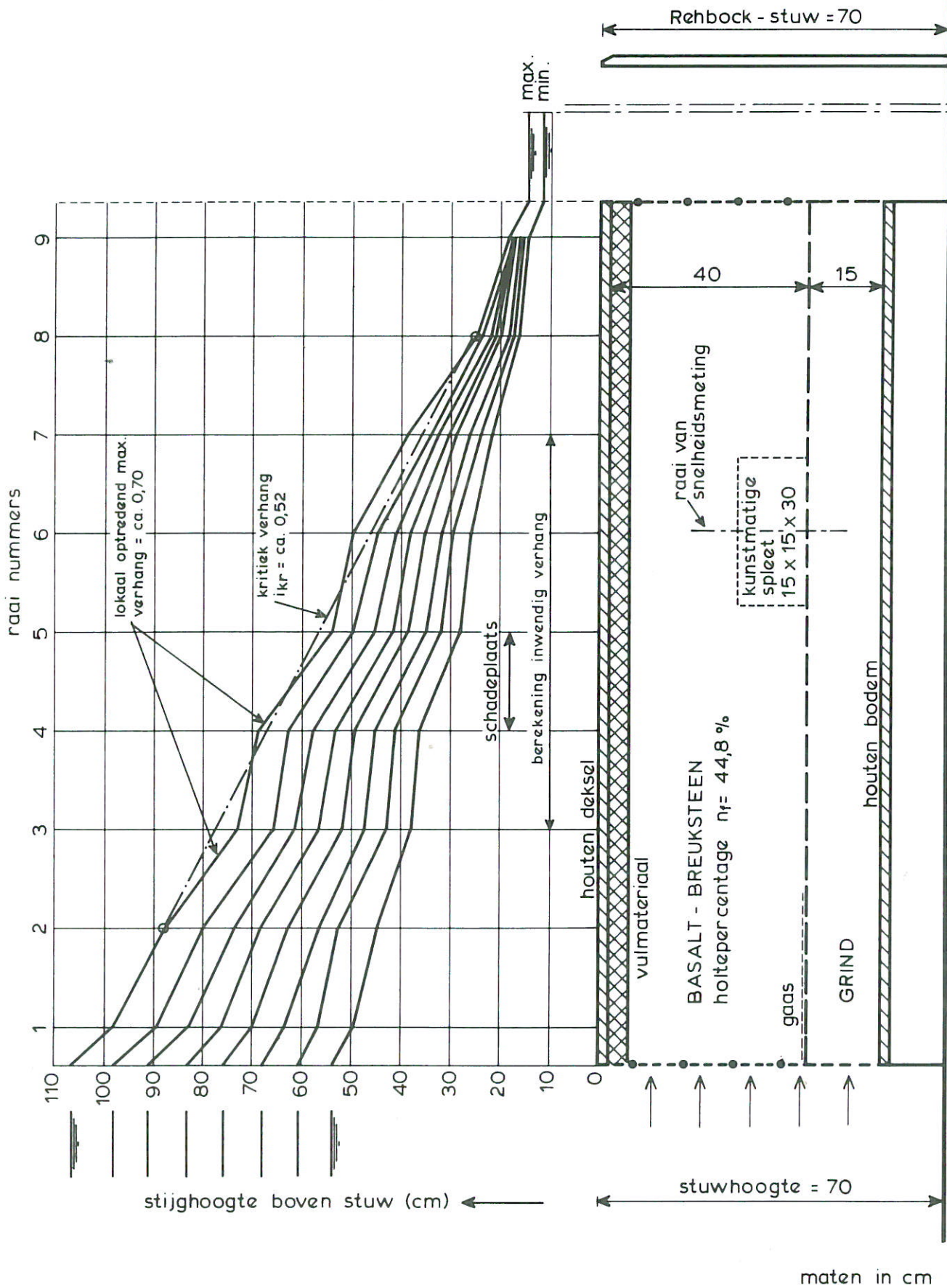
MODEL - CONFIGURATIE EN MEETRESULTATEN

PROEF 6

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

M 2062

FIG. II - 8



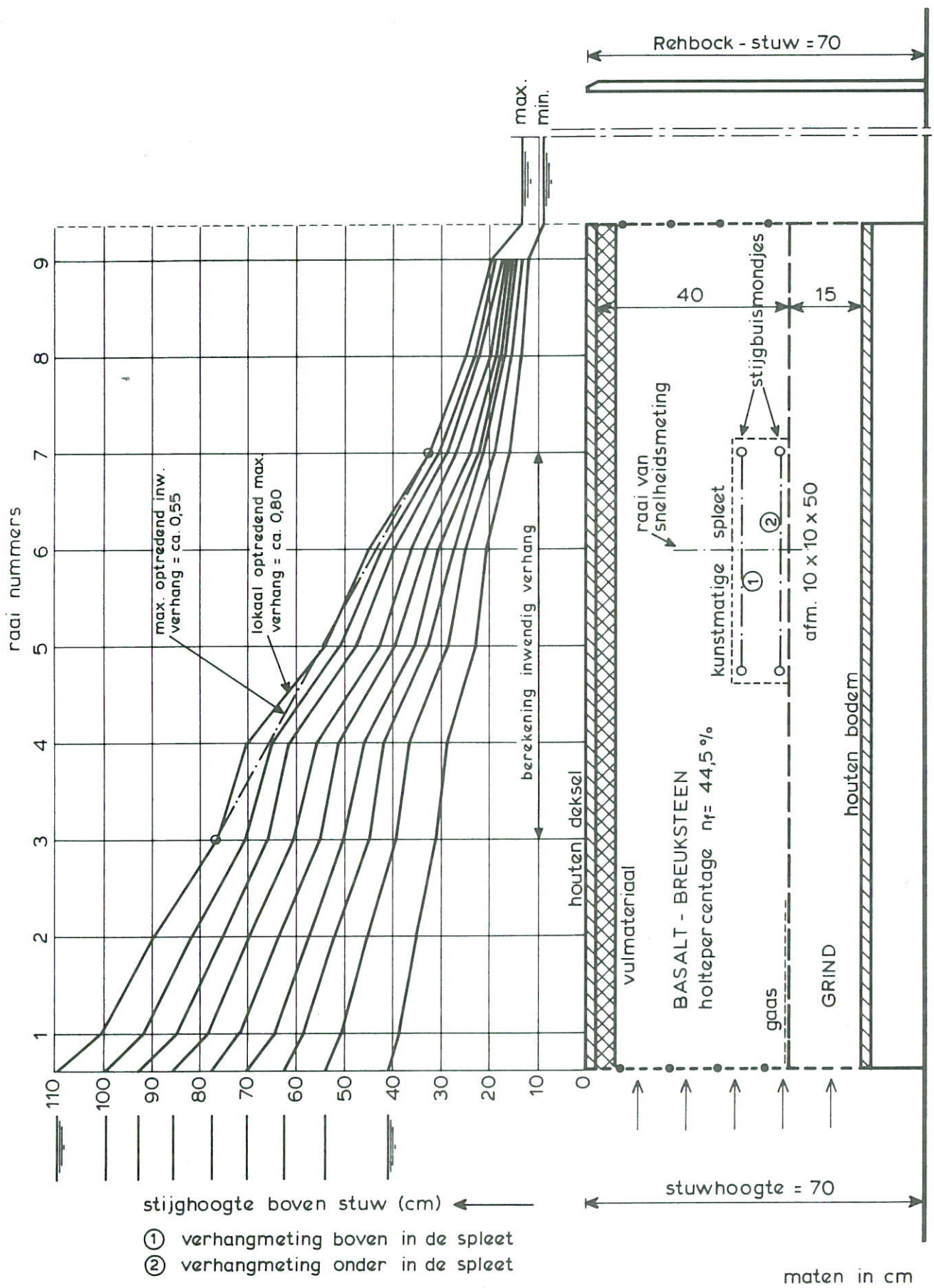
MODEL - CONFIGURATIE EN MEETRESULTATEN

PROEF 11

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

M 2062

FIG. II-9



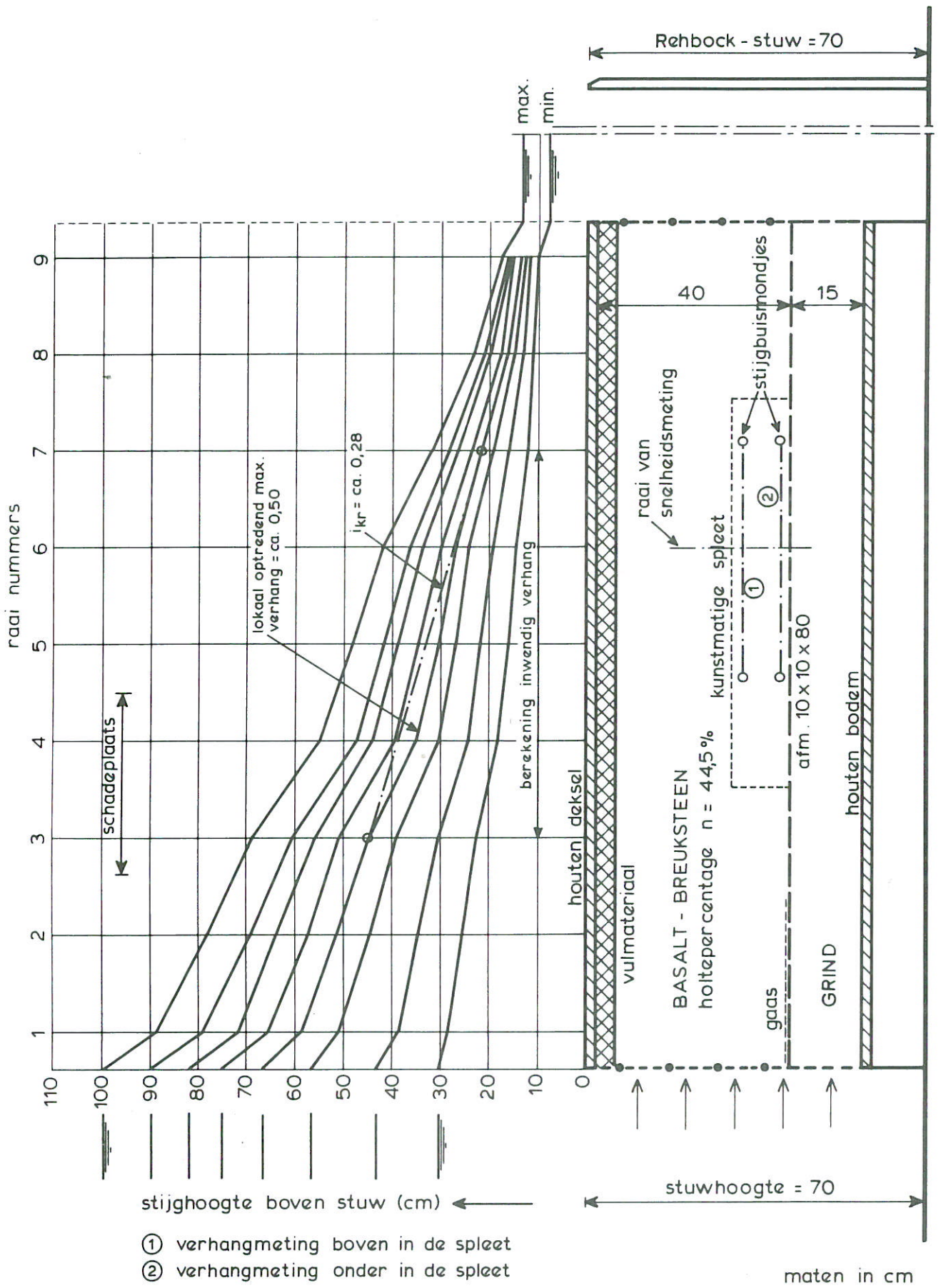
MODEL - CONFIGURATIE EN MEETRESULTATEN

PROEF 8

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

M 2062

FIG. II - 10



MODEL - CONFIGURATIE EN MEETRESULTATEN

PROEF 9

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

M 2062

FIG. II - 11

p.o. box 177

2600 mh delft

the netherlands