

waterloopkundig laboratorium
delft hydraulics laboratory

stormvloedkering Oosterschelde

stroombestendigheid van de drempel
tijdens de bouwphase

AFGEHANDELD

verslag modelonderzoek

M 1524 deel I

augustus 1983

stormvloedkering Oosterschelde

stroombestendigheid van de drempel
tijdens de bouwfase

verslag modelonderzoek

M 1524 deel I

augustus 1983

INHOUD

	blz.
1. <u>Inleiding</u>	1
1.1 Doel van het onderzoek.....	1
1.2 Opdracht en uitvoering.....	2
2. <u>Samenvatting</u>	4
3. <u>Inrichting van de proeven</u>	6
3.1 Invloeden met betrekking tot de stabiliteit.....	6
3.2 Schematisaties bij het modelonderzoek.....	6
3.2.1 Stroom- en golfrandvoorwaarden.....	7
3.2.2 Drempelopbouwfasen.....	7
3.2.3 Cunet.....	8
3.2.4 Bouwfront.....	8
3.2.5 Pijlers.....	8
3.2.6 Pijlerafstand.....	9
3.2.7 Bestortingstypen.....	9
3.2.8 Waterdiepte.....	9
3.3 Definitie van de invloedsfactoren.....	10
3.4 Fasering van het modelonderzoek.....	12
3.5 Proevenprogramma.....	13
3.5.1 Proeven met één pijler.....	13
3.5.2 Proeven met het bouwfront.....	14
4. <u>Resultaten</u>	15
4.1 Algemeen.....	15
4.2 Invloedsfactoren voor de verschillende sluitgatlokaties.....	15
4.3 Verband tussen kritieke aanstroomsnelheid en steengewicht voor willekeurige lokaties.....	20
4.4 Benodigde steenafmetingen bij ontwerpomstandigheden.....	21
5. <u>Kanttelingen</u>	24
5.1 Onderzoekresultaten algemeen.....	24
5.2 Schade bij overschrijding van de kritieke stroomsnelheid.....	24
5.3 Verhoging van de kritieke stroomsnelheid bij een plaatselijke bodemafdekking.....	25

TABELLEN

- 1 Stroomrandvoorwaarden Roompot
- 2 Stroomrandvoorwaarden Schaar
- 3 Stroomrandvoorwaarden Hammen
- 4 k_1
- 5 k_2
- 6 k_3
- 7 k_4
- 8 k_5
- 9 k_6
- 10 k_7
- 11 Voorbeeld berekening $k_1 \dots k_7$ Roompot, opbouwfase b
- 12 Benodigde steenzwaarden

FIGUREN

Dwarsprofielen

- 1 Roompot
- 2 Schaar
- 3 Hammen

Stroombestendigheid bouwfasen drempel

- 4 Roompot, opbouwphase a
- 5 Roompot, opbouwphase b
- 6 Roompot, opbouwphase c
- 7 Roompot, opbouwphase d
- 8 Schaar, opbouwphase a
- 9 Schaar, opbouwphase b
- 10 Schaar, opbouwphase c
- 11 Schaar, opbouwphase d
- 12 Hammen, opbouwphase a
- 13 Hammen, opbouwphase b
- 14 Hammen, opbouwphase c
- 15 Hammen, opbouwphase d

Steenzwaarten

- 16 Roompot
- 17 Schaar
- 18 Hammen

- 19 Schadetoename bij overschrijding van \bar{u}_k , opbouwfasen a en b
- 20 Steenverplaatsing bij toenemende stroomsnelheid

SYMBOLLEN

C	coëfficiënt van De Chézy	$(m^{1/2}/s)$
d	ligging onderkant voetplaat onder maaiveld	(m)
D ₅₀	diameter van de steen, die door 50% van de totale massa aan stenen wordt overschreden	(m)
D _n	$\sqrt[3]{G_{50}/\rho_s}$	(m)
g	versnelling van de zwaartekracht	(m/s^2)
G ₅₀	massa van de steen, die door 50% van de totale massa wordt overschreden	(kg)
h	waterdiepte	(m)
H _i	inkomende golfhoogte	(m)
H _{max}	maximale golfhoogte	(m)
k	produkt van k ₁ ... k ₇	(-)
k ₁	invloedsfaktor geometrische stroomverwijding ter plaatse van cunet	(-)
k ₂	korrektiefaktor van k ₁	(-)
k ₃	invloedsfaktor geometrische vernauwing ter plaatse van pijlers en (eventuele) drempelopbouwfasen	(-)
k ₄	korrektiefaktor van k ₃	(-)
k ₅	invloedsfaktor bouwfrontsituatie	(-)
k ₆	invloedsfaktor scheve aanstroming	(-)
k ₇	invloedsfaktor golven	(-)
L	golflengte	(m)
L _o	golflengte op diep water	(m)
p	0,4 in $\xi = p \kappa c / \sqrt{g}$	(-)
T	golfperiode	(s)
u	stroomsnelheid	(m/s)
\bar{u}	gemiddelde stroomsnelheid in de vertikaal	(m/s)
\bar{u}_k	kritieke aanstroomsnelheid	(m/s)
\bar{u}_{ok}	kritieke aanstroomsnelheid vlak bed	(m/s)
u _o	amplitude van de orbitaalsnelheid aan de bodem	(m/s)
β	hoek van aanstroming (β = 0 is rechte aanstroming)	(°)
Δ	relatieve soortelijke dichtheid	(-)
κ	konstante van Von Kärman	(-)
ξ	golfparameter	(-)
ρ	dichtheid water	(kg/m^3)
ρ _s	dichtheid bodemmateriaal	(kg/m^3)
τ _c	schuifspanning aan de bodem ten gevolge van stroom	(N/m^2)
τ _r	schuifspanning aan de bodem ten gevolge van stroom en golven	(N/m^2)

STORMVLOEDKERING OOSTERSCHELDE

STROOMBESTENDIGHEID VAN DE DREMPEL TIJDENS DE BOUWFASE

1. Inleiding

1.1 Doel van het onderzoek

Voorgeschiedenis

Tot eind 1977 was slechts enig oriënterend onderzoek verricht naar de stroombestendigheid van de drempel van de stormvloedkering in de Oosterschelde tijdens de bouwfase. Dit betrof de stroombestendigheid van een cutterbare grindbestorting tijdens de plaatsing van putten (inklusief bouwkuipen) van het in die tijd vigerende ontwerp van de stormvloedkering [1], [2], [3]. Voorts werden ten behoeve van hetzelfde ontwerp de stabiliteit van enige drempelopbouwfasen rond de pijlers op putten onderzocht [4].

Na wijziging van het ontwerp van de stormvloedkering tot een (monoliet) pijlerdam kwam de vraag naar voren in hoeverre, op grond van resultaten uit voornoemde onderzoeken, een voorspelling zou kunnen worden gegeven van de benodigde steendiameters voor de diverse drempelopbouwfasen van het gewijzigde ontwerp van de kering. Al gauw bleek, dat dit niet zonder nader modelonderzoek mogelijk zou kunnen zijn. Voor de oorzaak hiervan is een tweetal punten aan te wijzen. Ten eerste bestond het vermoeden dat de pijlergeometrie in het nieuwe ontwerp een ongunstig effect op de stroombestendigheid van de drempelmaterialen zou uitoefenen: men vergelijkte hiertoe de hoekige, ongunstige hydraulische vorm van de pijlercaisson met de afgeronde en gestroomlijnde putten.

Ten tweede waren de diverse drempellagen bij het pijlerontwerp qua steenafmetingen aan strenge restrikties gebonden in verband met de vereiste filterwerking. Dit laatste punt vereiste relatief kleine steendiameters, terwijl door het eerste punt de stroomaanval relatief zou kunnen toenemen. Uit globale becijferingen leek de situatie dermate kritisch te zijn, met name voor de fijnkorrelige bestortingen rond de voet van de pijlers, dat alleen modelonderzoek hier voldoende inzicht in zou kunnen verschaffen.

Probleemstelling

Tijdens de opzet van het modelonderzoek werd als doel gesteld dat een bruikbare voorspelling van de benodigde steenafmetingen tijdens de diverse opbouwfasen van de drempel zou moeten kunnen worden gegeven. Met nadruk staat hier een "bruikbare" voorspelling, aangezien een optimale dimensionering van de steenafmetingen

een erg omvangrijk en kostbaar modelonderzoek zou vergen. Dit laatste is in te zien als wordt bedacht, dat vele bouwstadia van de drempel vóórkomen met een scale van bouwfrontsituaties, waardoor de randvoorwaarden voor stroom- en golf-aanval zich steeds weer wijzigen. Voorts zou een probabilistische benadering zijn vereist (effekten van een scala van randvoorwaarden met verschillende kansen van voorkomen op de drempellagen in verschillende situaties).

Uit een oogpunt van de beperkte beschikbare tijd zou een dergelijke aanpak zeker niet realiseerbaar zijn geweest.

De filosofie achter het onderhavige onderzoek was, dat aan de hand van de resultaten een bruikbare indruk van de benodigde steenafmetingen zou kunnen worden verkregen ter ondersteuning van een globaal drempelontwerp. Met behulp van het onderhavige modelonderzoek zouden hiertoe de stabiliteitscriteria voor enige geschematiseerde situaties kunnen worden vastgesteld. De stroomrandvoorwaarden voor overeenkomstig geschematiseerde situaties zouden worden benaderd met behulp van een berekeningsmethode, die getoetst was aan de hand van metingen in de modellen M1000 en M1001. Over deze berekeningsmethode is elders (notitie STODHO M51, [5] WL nota R1219/M1000/M1001, [6] en interim-verslag M1000-10 [12]) gerapporteerd.

Na invulling van de bijbehorende stroom- en golf-randvoorwaarden voor de verschillende opbouwfasen kan per situatie globaal de minimaal benodigde steenafmeting dan wel het minimale steengewicht worden geschat. De interpretatie van de resultaten in het onderhavige verslag loopt tot en met deze fase. Hierbij moet echter worden bedacht dat het vaststellen van de minimaal benodigde steenafmetingen geen praktische waarde (meer) heeft in verband met de inmiddels achterhaalde stroomrandvoorwaarden en slechts dient ter illustratie. Bovendien zijn spreidingen in belasting en sterkte niet in beschouwing genomen. Dit laatste is, nadien voor steeds meer geaktualiseerde randvoorwaarden, binnen Rijkswaterstaat wel verder toegepast.

De volgende fase is een zaak van de ontwerper: het vaststellen van de steenafmetingen mede aan de hand van de stroombestendigheidseisen (onderhavig verslag), filtereisen en uitvoeringstechnische eisen (beschikbare steensorteringen en dergelijke).

1.2 Opdracht en uitvoering

Na voorbereidende besprekingen met Rijkswaterstaat in de maanden oktober en november 1977, werd 23 december 1977 schriftelijk per brief V9003/77 door de

Hoofdafdeling Waterloopkunde van de Deltadienst opdracht gegeven tot uitvoering van het modelonderzoek. Het modelonderzoek was gesplitst in een onderzoek naar drempellagen rond één enkele pijler en een onderzoek naar drempellagen in een (geschematiseerde) bouwfrontsituatie met meerdere pijlers.

Eerstgenoemd onderzoek vond plaats in de faciliteit de Tussenpadgoot op schaal 1:50; dat onderzoek wordt beschreven in verslag M 1524, deel II.

Het tweede onderzoek werd in de Golfbak op schaal 1:45 uitgevoerd. Een verslag van deze proeven is in het verslag deel III ondergebracht.

Het onderzoek stond onder leiding van ir. G.J. Akkerman die ook het onderhavige verslag (deel I) heeft opgesteld. De verslagen deel II en deel III werden respectievelijk door ing. J.J. Taat en ing. C. van Hardeveld opgesteld.

Van de zijde van de Hoofdafdeling Waterloopkunde werd het onderzoek begeleid door ir. M.R. van der Does de Bije.

De late verschijning van dit verslag is een gevolg van een capaciteitstekort ten tijde van de afronding van de proeven, zodat volstaan werd met het verwerken van de resultaten in het Eindrapport Drempelontwerp, nota nr. 3, DREMBU-M-78.023. In een later stadium werd in overleg met de opdrachtgever als nog besloten om de resultaten in afzonderlijke verslagen weer te geven.

2. Samenvatting

In de verslagen M 1524 wordt het onderzoek beschreven ter bepaling van de mate van stroomaanval op de drempel van de stormvloedkering in de Oosterschelde tijdens de bouwfase en de daaruit voortvloeiende benodigde steenafmetingen van de verschillende drempellagen.

Om de hoeveelheid modelonderzoek te beperken is een schematisatie toegepast voor de veelheid aan situaties die tijdens de bouwfase kunnen voorkomen. Tevens werd de stroomrandvoorwaarde zeer beperkt gevarieerd en in feite losgekoppeld van het eigenlijke modelonderzoek. In het modelonderzoek werd de kritieke aanstroomsnelheid bepaald voor een beperkt aantal steensorteringen voor een aantal geschematiseerde situaties betreffende aanlegdiepte cunet, drempel opbouw, pijlerfront, waterdiepte, combinatie met golven en rechte of scheve aanstroming. Vergelijking van de gevonden kritieke aanstroomsnelheid met de kritieke aanstroomsnelheid voor een ongestoorde stroomsituatie leverde per situatie een invloedsfaktor op.

Onderscheid werd gemaakt tussen situaties, waarbij een enkele pijler aanwezig was en situaties, waarbij een bouwfront met meerdere pijlers betrokken was. Het onderzoek met de enkele pijler dat werd uitgevoerd in de Tussenpadgoot wordt in deel II beschreven. In deel III wordt het onderzoek in de Golfbak beschreven.

In dit verslag (deel I) wordt een overzicht gegeven van de opzet en inrichting van het totale onderzoek. Met behulp van meetresultaten uit de delen II en III werden vervolgens de invloedsfactoren bepaald en verwerkt tot een criterium voor de stroombestendigheid voor de verschillende sluitgatlokaties. Na invulling van de kenmerkende stroom- en golfrandvoorwaarden in deze criteria werden de benodigde steenafmetingen vastgesteld. Met nadruk moet worden gesteld dat de steenafmetingen indicatief zijn in verband met het oriënterend karakter van het onderzoek, alsmede in verband met de inmiddels sterk verouderde randvoorwaardenvoorspelling en het niet in beschouwing nemen van spreiding in belasting en sterkte.

De resultaten van het onderzoek werden tevens verwerkt in het "Eindrapport drempelontwerp, nota nr. 3, DREMBU-M-78.023" dat in augustus 1978 is verschenen. Vanaf 1981 zijn door Rijkswaterstaat steeds opnieuw geaktualiseerde berekeningen uitgevoerd, op basis van de in dit verslag gepresenteerde invloedsfactoren, echter met geaktualiseerde stroomrandvoorwaardenvoorspellingen en met

inachtneming van de spreiding in belasting en sterkte. Op deze wijze zijn faalkansen voor de verschillende opbouwfasen voor alle "poortjes" vastgesteld. Hiervoor wordt dan ook naar de diverse (informele) rapporten verwezen welke bij projektbureau 3 (drempel) binnen de organisatie van de stormvloedkering zijn verschenen en mogelijk nog zullen verschijnen.

3. Inrichting van de proeven

3.1 Invloeden met betrekking tot de stabiliteit

Eerst werd nagegaan welke factoren de stroombestendigheid van de drempelbestortingen zouden kunnen beïnvloeden.

Zo zijn er primair de stroom- en golfrandvoorwaarden die de aanval op de stabiliteit van de stenen veroorzaken.

De mate waarin deze aanval doorwerkt op de bestortingen is afhankelijk van de beïnvloeding van het stroom- en golfbeeld door de aanwezigheid van het bouwfront. Van belang hierbij zijn:

- De verdiepte ligging van de drempelopbouwfasen ten opzichte van het maaiveld (meer of minder blootgesteld aan stroom- en golfaanval)
- De stroomvernaauwing ter plaatse van het bouwfront door de aanwezigheid van de pijlers en reeds aangebrachte drempellagen.

Ten aanzien van het eerste punt kan onderscheid worden gemaakt in de eventuele mate van stroomvertraging ten gevolge van de geometrische verwijding door de relatief diepere ligging ter plaatse van het cunet en beïnvloeding van het stroombeeld door vervorming van de snelheidsverticalen en verhoogde turbulentie.

Bij het tweede punt kan worden gedacht aan een drietal invloeden:

- Stroomversnelling door de geometrische vernauwing door pijlers en aanwezige drempellagen.
- Verdere beïnvloeding van het stroombeeld door de aanwezigheid van de pijlers en reeds aangebrachte drempellagen; de mate van stroomlijning van de pijlers en drempellagen zijn hierbij bepalend.
- De plaatselijke aanwezigheid van de kop van een bouwfront ten opzichte van een recht aangestroomde keringsektie.

Bij alle genoemde punten is ook de waterdiepte van belang.

Voorts kan bij stroom- en golfaanval de eb- en vloedrichting, de hoek van aanstroming en de golfrichting ten opzichte van een bouwfront worden onderscheiden.

3.2 Schematisaties bij het modelonderzoek

In verband met de korte tijd waarin tot een bruikbaar inzicht in de mate van stroomaanval op de drempel in aanbouw moest worden gekomen, waren nog al wat schematisaties van de voornoemde parameters noodzakelijk. In het navolgende zullen deze schematisaties worden uiteengezet.

3.2.1 Stroom- en golfrandvoorwaarden

De maatgevende stroom- en (in mindere mate) de golfrandvoorwaarden zijn afhankelijk van het bouwstadium van de kering en daarmee van de bouw van de drempel. Bijgevolg zou een heel scala van randvoorwaarden in model moeten worden onderzocht. Dit was echter praktisch onmogelijk, zodat gezocht werd naar een andere methodiek. Deze werd gevonden in het enerzijds loskoppelen van de stroomrandvoorwaarden van het modelonderzoek en anderzijds het voor elke lokatie opstellen van een stabiliteitskriterium (met daarin de kritieke stroomsnelheid als functie van de steenzwaarte). De maatgevende stroomrandvoorwaarden zouden dan achteraf in het stabiliteitskriterium ingevuld kunnen worden. Dit laatste zou dan een bijbehorende minimale steenzwaarte verschaffen.

Van de eb- en vloedstroom werd alleen de laatste onderzocht. Aanstroomhoeken waren steeds 0° (rechte aanstroming) dan wel 15° (scheve aanstroming) volgens bijvoorbeeld deel III, figuur 6 en 8.

Bij de golfrandvoorwaarden in model is verondersteld dat deze onafhankelijk zijn van de voortgang van de bouw van de kering.

Noodgedwongen werden regelmatige golven toegepast.

Aanvankelijk werd een inkomende golfhoogte van circa 3,0 m met een bijbehorende periode van 7,6 s gebruikt; later werden deze waarden, op grond van meer recente informatie ([7], Van Loenen en Bruinsma, R.W.S., 4-1-1978), bijgesteld tot circa 2,0 m en 5,4 s. Deze golfkenmerken werden geacht op te treden met een frekwentie van één maal per jaar bij maximale stroom en een benedenwaterstand van N.A.P. + 2 m. In model vielen stroom- en golfrichting samen.

Voor overige modeltechnische beperkingen, zoals reflektieverschijnselen tegen het bouwfront, wordt verwezen naar deel III, paragraaf 3.3.

3.2.2 Drempelopbouwfasen

De drempel zal worden opgebouwd uit een aantal lagen met over de sluitgatlokaties variërende dikten en samenstellingen. Besloten werd slechts een viertal drempelniveaus in beschouwing te nemen en wel gelegen op gelijke hoogte met de onderkant van de pijlervoetplaat (\cong bovenkant fundatiebed), 1,5 m hoger (\cong uitvullaag), 3,5 m en 6,0 m hoger. Deze opbouwfasen, respectievelijk a, b, c en d genoemd, zijn weergegeven in tabel 6. Met nadruk dient te worden gesteld, dat

deze opbouwfasen niet steeds korresponderen met de verschillende drempellagen in het ontwerp (aangezien deze laatste in het ontwerp variërende dikten hadden), maar met bepaalde drempelopbouwhoogten.

3.2.3 Cunet

De cunetdiepte is, evenals de drempeldikte, afhankelijk van de plaats in de sluitgaten. In model werd volstaan met het beproeven van een drietal situaties:

- 1 Onderkant voetplaat op gelijke hoogte met het maaiveld.
- 2 Onderkant voetplaat 5 m onder maaiveld.
- 3 Onderkant voetplaat 10 m onder maaiveld.

Deze variabele is alleen onderzocht in de Tussenpadgoot.

In de Golfbak was steeds sprake van een niet verdiepte situatie.

3.2.4 Bouwfront

Een deel van het modelonderzoek werd uitgevoerd met een recht aangestroomde, in aanbouw zijnde drempelsectie met één enkele pijler (zie deel II).

Bij het overige modelonderzoek werd een geschematiseerd bouwfront toegepast (zie deel III). Dit bouwfront werd als volgt geschematiseerd (deel III, figuren 4 ... 16).

- Vijf tot zes pijlers bij rechte aanstroming en vijf tot zes bij scheve (15°) aanstroming (deel III, figuren 4 ... 9).
- Steeds een tweetal opbouwfasen per proefopstelling aanwezig, namelijk a en b (bijvoorbeeld deel III, figuur 15) of c en d (bijvoorbeeld deel III, figuur 16).
- Horizontaal voor- en achterland.
- Geen convergerende stroming bij de scheve aanstroming (vergelijk deel III, figuur 7).

3.2.5 Pijlers

De pijlers werden zo goed mogelijk geometrisch gelijkvormig weergegeven in overeenstemming met het tijdens het onderzoek relevante pijlerontwerp volgens tekening O.S.3013^C. Dit ontwerp betrof een pijler met voetplaatafmetingen van $25 \times 60 \text{ m}^2$. Als vereenvoudiging ten aanzien van dit ontwerp, werd voor het variabele niveau van de uitkragende sponning voor de oplegging van de dorpelbalken standaard een vast niveau in model aangehouden. Deze kwam overeen met de laagst gelegen sponning, aangezien deze het meest ongunstig leek (deel II, figuur 3).

3.2.6 Pijlerafstand

Ten tijde van het modelonderzoek werd de pijlerafstand gewijzigd van 40 m in 45 m. Het proevenprogramma werd hierop aangepast wat betreft het onderzoek met het bouwfront. Het onderzoek met de enkele pijler werd niet aangepast in verband met schaalkonsekwenties; de wandafstand bleef hier bijgevolg 40 m (prototype).

3.2.7 Bestortingstypen

Omdat werd getracht aan de hand van de resultaten uit het onderzoek relaties vast te stellen tussen enerzijds de kritieke aanstroomsnelheid (waarbij schade optreedt aan de betreffende drempelopbouwfase) en anderzijds de steenzwaarte, was het niet noodzakelijk alle mogelijke prototype-bestortingen op (lengte) schaal te reproduceren. Dit zou overigens ook niet goed mogelijk zijn geweest in verband met schaaleardeffekten en modeltechnische onbruikbaarheid van te fijne materialen. Met het oog op stroombeeld- en/of viskositeitsafwijkingen (zie deel II, paragraaf 3.4) was het echter wel gewenst een niet te veel afwijkende modelbestorting te kiezen. Voor het onderzoek met een bouwfront werd voor opbouwfasen a en b één type bestorting aangehouden en voor opbouwfasen c en d vooreerst hetzelfde type, doch later voor c en d een zwaardere sortering (deel III, paragraaf 2.1).

Bij het onderzoek met één enkele pijler werden proeven verricht waarbij werd getracht inzicht te verkrijgen in de konsekwenties van het niet op lengteschaal weergegeven van de modelbestortingen, zie deel II, paragraaf 3.4.

3.2.8 Waterdiepte

Ofschoon ook de waterdiepte (bijvoorbeeld ten opzichte van de onderkant voetplaat) in het prototype van plaats tot plaats verschilt, werden in het model met de enkele pijler slechts twee uitersten toegepast, te weten: 20 m en 38 m ten opzichte van de onderkant van de pijlervoetplaat. Bij de proefopstelling met het bouwfront werd vooreerst 20 m aangehouden, wat na verloop van tijd werd gewijzigd in 25 m mede met het oog op het intussen veranderde ontwerp ten aanzien van de plaatsingsdiepte van de pijlers op ondiepe lokaties.

3.3 Definitie van de invloedsfactoren

Ondanks de verschillende schematisaties, die in paragraaf 3.2 zijn vermeld, was het uit oogpunt van tijd en kosten niet mogelijk om alle resterende parameters met elkaar te variëren.

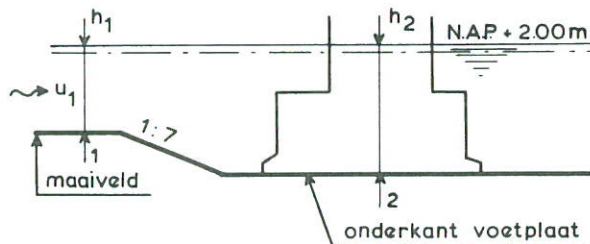
Gekozen is daarom voor het bepalen van invloedsfactoren, die de invloed aangeven van een variabele op de kritieke aanstroomsnelheid voor een bepaalde steensoort in een situatie waarbij de betreffende variabele kenmerkend is, ten opzichte van de kritieke aanstroomsnelheid bij een vlak bed (eenparige stroming) voor dezelfde steensoort. De kritieke stroomsnelheid bij een eenparige stroom is bekend en kan worden uitgedrukt in kenmerkende steenafmetingen (bijvoorbeeld D_{50} , D_n of G_{50} [8, 9]).

Door het vaststellen van invloedsfactoren die de verschillende invloeden in rekening brengen, kan aldus voor een bepaalde situatie de relatie tussen kritieke aanstroomsnelheid en steenafmeting worden bepaald. De probleemstelling is hiermee teruggebracht tot het definiëren en vervolgens bepalen van deze invloedsfactoren. Verondersteld wordt hierbij dat de invloedsfactoren superponeerbaar zijn. Naar verwachting is dit een conservatieve aanname. Een verdere onderbouwing is niet zonder nader onderzoek mogelijk.

De volgende invloedsfactoren worden onderscheiden.

k_1 = Invloed van de stroomvertraging door de geometrische verwijding van raai 1 naar raai 2 ten opzichte van de onderkant voetplaat bij een waterstand van N.A.P. +2,0 m (= maatgevende waterstand)

$$= \frac{h_2}{h_1} \text{ (zie onderstaande schets)}$$

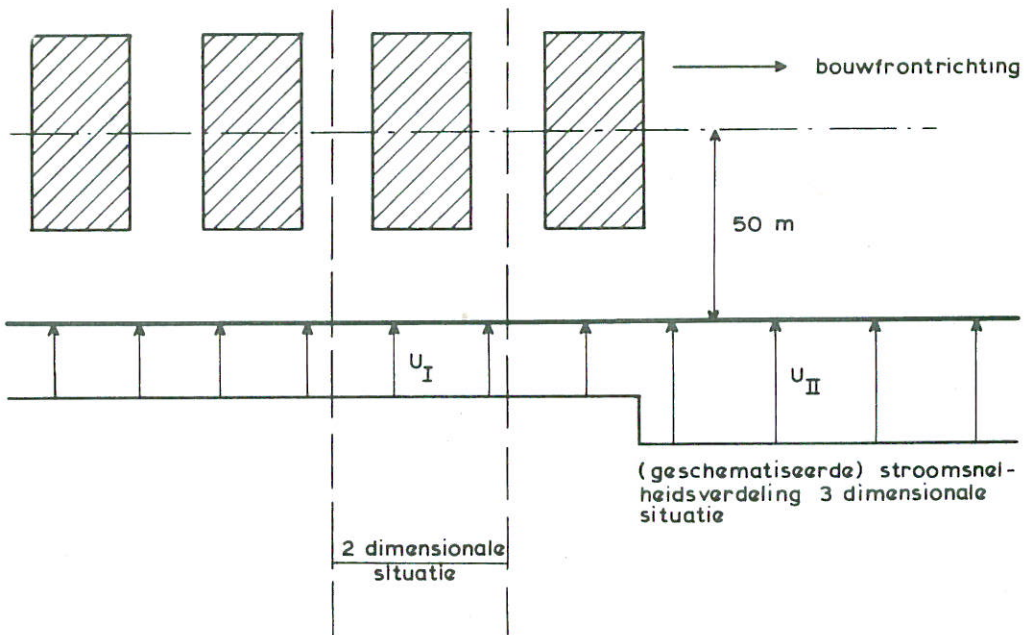


k_2 = Korrektiefactor van k_1 voor het in rekening brengen van vervorming van het stroombeeld (stroomloslating en dergelijke) en verhoging van de turbulentie-intensiteit van de stroming bij verwijding van raai 1 naar raai 2.

k_3 = Invloed van de geometrische vernauwing ter plaatse van raai 2 door de aanwezigheid van de pijler en de reeds aangebrachte drempellagen.

k_4 = Korrektiefactor van k_3 voor het in rekening brengen van de verstoring van het plaatselijke stroombeeld door de pijler en reeds aangebrachte drempellagen. De mate van stroomlijning van pijler en drempellagen is hierbij bepalend (vergelijk: bij ideale stroomlijning zou $k_4 = 1$ zijn).

k_5 = Invloed van de aanwezigheid van een bouwfront ten opzichte van de tweedimensionale situatie (zie schets). De referentie-stroomsnelheid is hierbij u_I .



k_6 = Invloed van scheve ten opzichte van rechte aanstroming

k_7 = Invloed van additionele golfwerking (stroming plus golven ten opzichte van alleen stroming).

Alle voornoemde factoren zijn afhankelijke van de waterdiepte.

Aldus wordt de navolgende uitdrukking verkregen:

$$\bar{u}_k = k_1 \cdot k_2 \cdot k_3 \cdot k_4 \cdot k_5 \cdot k_6 \cdot k_7 \bar{u}_{0k} \quad (1)$$

waarin:

- \bar{u}_k = kritieke aanstroomsnelheid (overeenkomstig referentiesnelheid u_I) (m/s)
- $k_1 \dots k_7$ = voornoemde invloedsfactoren
- \bar{u}_{ok} = kritieke aanstroomsnelheid voor het ongestoorde bed en eenparige stroming bovenstrooms (buiten de invloedsfeer) van een eventueel aanwezig cunet (m/s)

Na globale kontrôle tijdens inregelproeven in de Tussenpadgoot bleek de relatie tussen \bar{u}_{ok} en kenmerkende steendiameter D_n te kunnen worden benaderd met:

$$\bar{u}_{ok} = 4,85 \log \left(\frac{6h}{D_n} \right) \cdot (D_n)^{0,5} \quad (2)$$

(deze relatie komt neer op een Shields-parameter Ψ van circa 0,044, bij een relatieve dichtheid $\Delta = 1,65$)

met

$$h = h_1 = \text{waterdiepte bovenstrooms} \quad (\text{m})$$

$$D_n = \left(\frac{G_{50}}{\rho_s} \right)^{0,33}, \text{ met} \quad (\text{m})$$

$$G_{50} = \text{massa maatgevende steen} \quad (\text{kg})$$

$$\rho_s = \text{dichtheid stenen} = 2650 \quad (\text{kg/m}^3)$$

(2) kan ook worden geschreven als:

$$\bar{u}_{ok} = 1,3 \log \left(\frac{83h}{(G_{50})^{0,333}} \right) (G_{50})^{0,167} \quad (3)$$

waarbij is verondersteld dat $\rho_s = 2650 \text{ kg/m}^3$.

3.4 Fasering van het modelonderzoek

Tijdens de besprekingen die aan het modelonderzoek vooraf gingen, kwam al gauw het idee naar voren om het onderzoek te splitsen in twee delen: één deel in de Tussenpadgoot met een enkele pijler en één deel in de Golfbak met een bouwfrontsituatie. De gedachten die daaraan ten grondslag lagen waren de volgende.

- a Veel schematisaties waren min of meer gevoelsmatig gekozen. In een smalle goot, waarbij de proeven relatief snel verlopen, zou eerder kunnen blijken of bepaalde schematisaties al of niet zinvol zouden zijn.
- b Door de keuze van de invloedsfactoren (zie paragraaf 3.3), kunnen een aantal daarvan ($k_1 \dots k_4$) in een tweedimensionale proefopstelling (met één enkele pijler) worden bepaald, terwijl het vaststellen daarvan in een omvangrijker proefopstelling veel geld en tijd zou vergen.
- c Zoals eerder gesteld, waren de toegepaste modelbestortingen niet direkt afgeleid van (mogelijk te verwachten) prototypebestortingen. Naast de voor de hand liggende reden dat prototypebestortingen juist mede aan de hand van het onderhavige modelonderzoek nog zouden worden gekozen, waren hiervoor ook modeltechnische redenen aan te geven (de modelstortsteentjes mogen niet te klein zijn). In een kleine proefopstelling met één pijler was op meer efficiënte wijze na te gaan in hoeverre deze handelwijze konsekwenties zou kunnen hebben bij het bepalen van sterk van de modelbestorting afwijkende ontwerpbestortingen.

Daar staat tegenover dat een proefopstelling met een redelijk aantal pijlers wel noodzakelijk was om de invloed van het bouwfront (k_5) en scheve aanstroming (k_6) vast te stellen. Dank zij de keuze van de Golfbak voor dit deel van het onderzoek, kon hierbij tevens de invloed van golven (k_7) worden nagegaan.

Bij deze opzet werd de aanname gedaan dat de factoren $k_1 \dots k_4$ en $k_5 \dots k_7$ onderling afhankelijk zouden zijn, ofwel dat de invloedsfactoren over en weer superponeerbaar zouden zijn. Dit lijkt voor enkele combinaties weliswaar twijfelachtig (vergelijk bijvoorbeeld diepe inbaggeringen en scheve aanstroming), maar deze werkwijze werd binnen de totaalopzet van dit onderzoek desondanks acceptabel geacht.

3.5 Proevenprogramma

3.5.1 Proeven met één pijler

Resumerend kunnen voor de proeven in de kleine proefopstelling de volgende doelstellingen worden aangegeven:

- a Bepalen van de factoren $k_1 \dots k_4$
- b Ondersteuning bij de interpretatie van de resultaten.

ad. a Variabelen waren:

- Opbouwfase (a, b, c en d; bij één proef opbouwfase e op 10 m boven de onderkant voetplaat, zie deel II)
- Verdieping ter plaatse van het cunet (ligging onderkant pijlervoet onder maaiveld: 0, 5 en 10 m)
- Waterdiepte (afstand benedenwaterstand tot onderkant pijlervoet: 20 en 38 m).

ad. b Hierbij werden de volgende proeven uitgevoerd:

- Variatie van steenafmetingen (D_n in prototypematen: 0,16, 0,23, 0,33, 0,51 en 0,66 m). Deze proeven werden alléén uitgevoerd bij opbouwfase a en een verdieping van 0 m.
- Bepaling van de kritieke stroomsnelheid voor het begin van schade (= het standaard criterium), maar ook voor het net in beweging komen van de stenen. De marge tussen beide stroomsnelheden zou van belang kunnen zijn voor het (achteraf) kiezen van een veiliger schade criterium.
- Proeven met de (fijne) bestorting die in de grote proefopstelling met het bouwfront was toegepast. Hierbij werd de schadebepaling op overeenkomstige wijze (met geverfde stroken) uitgevoerd. Deze proeven dienden om de modellen op elkaar te ijken en als referentie voor de bepaling van k_5 (deel III, paragraaf 4.2).

Voor een meer uitgebreide beschrijving van de proeven wordt verwezen naar deel II, paragraaf 2.5.

3.5.2 Proeven met het bouwfront

De proeven met het bouwfront hadden tot doel de factoren $k_5 \dots k_7$ vast te stellen. Tijdens de uitvoering van de proeven werden enige randvoorwaarden bijgesteld, zoals:

- pijlerafstand (40 m naar 45 m)
- waterdiepte (20 m naar 25 m)
- golven ($H_i \approx 3,0$ m en $T = 7,6$ s naar $H_i \approx 2,0$ m en $T = 5,4$ s)...

Voorts werd in het verloop van het onderzoek een zwaardere modelbestorting gekozen voor opbouwfasen c en d ($D_n = 0,50$ m in plaats van 0,22 m prototype). Voor een meer uitgebreide beschrijving van de proeven wordt hier volstaan met verwijzing naar deel III.

Een overzicht van de uitgevoerde proeven is in deel III, tabel 1 weergegeven.

4. Resultaten

4.1 Algemeen

De bepaling van de invloedsfactoren $k_1 \dots k_4$ is in deel II beschreven, van $k_5 \dots k_7$ in deel III.

Deze factoren gelden slechts voor de onderzochte situaties. Niettemin werden de randvoorwaarden zoveel mogelijk zo gekozen dat een redelijk bruikbaar beeld werd verkregen van de gevoeligheid van de factoren voor variatie van die randvoorwaarden.

In paragraaf 4.2 wordt nader ingegaan op de vaststelling van de factoren $k_1 \dots k_7$ voor de in het prototype voorkomende situaties.

Uitgaande van de definitie van de factoren kan vervolgens het verband tussen kritieke stroomsnelheid (\bar{u}_k) en massa (G_{50}) voor de geschematiseerde sluitgatlokaties worden vastgesteld (paragraaf 4.3). De lokaties stemmen hierbij overeen met die uit het stroomrandvoorwaarden onderzoek ([6], nota R1219/M1000/M1001).

Na invulling van de maatgevende stroomrandvoorwaarden kunnen de benodigde steenafmetingen voor de verschillende opbouwfasen van plaats tot plaats worden geschat (paragraaf 4.4).

4.2 Invloedsfactoren voor de verschillende sluitgatlokaties

In deze paragraaf wordt nader ingegaan hoe de factoren $k_1 \dots k_7$ bepaald zijn voor de (geschematiseerde) sluitgatlokaties uit figuren 1, 2 en 3, aan de hand van inter- of extrapolatie van gemeten verbanden.

Tabel 11 geeft een voorbeeld van de berekening van de $k_1 \dots k_7$ waarden, waarbij de gegevens uit de tabellen 1 tot en met 10 zijn gebruikt.

Het zal duidelijk zijn dat de verkregen waarden veelal globaal zijn, gezien het geringe aantal meetpunten.

k_1 en k_2

De invloed van stroomverwijding door een verdiepte ligging van de pijlervoetplaat ten opzichte van het maaiveld, wordt weergegeven door de factoren k_1 en k_2 . Bedacht dient te worden dat stroomverwijding hier een relatief begrip is. Het kan zijn dat er in feite sprake is van stroomvernauwing ten gevolge van hogere liggende drempelopbouwfasen. De invloed hiervan wordt echter in de factoren k_3 en

k_4 verdisconteerd.

Voor k_1 wordt de waterstand in het cunet (ten opzichte van de onderkant van de voetplaat) gedeeld door de waterstand vóór het cunet. Als waterstand kan bij benadering de benedenwaterstand (bij ontwerpomstandigheden circa N.A.P. + 2 m) worden aangehouden. In tabel 4 is de geometrie-faktor k_1 voor de verschillende sluitgatlokaties weergegeven. De k_2 faktor (tabel 5) kan worden opgevat als korrektiefaktor van k_1 met het oog op stroombeeldveranderingen (vervorming snelheidsverticalen, neervorming), inclusief verhoging van de turbulentie-intensiteit als gevolg van (relatieve) stroomvertraging. k_2 blijkt volgens deel II, figuur 5 doorgaans kleiner dan 1,0 te zijn, hetgeen een relatieve vergroting van de stroomaanval betekent. Bij een kleinere verdieping nadert k_2 tot 1,0. Vermeld moet worden dat de taluds van het cunet flauw waren (1:7), aangezien deze situatie maatgevend wordt geacht. Bij steile en diepe inbaggeringen zou, juist voor de laaggelegen kritieke opbouwfasen, een belangrijk gunstiger situatie aanwezig kunnen zijn. Dit is in dit kader niet verder onderzocht, mede in verband met de onzekerheid in de keuze van het ontwerp van de cunetten.

k_3 en k_4

Na een eventuele vertraging als gevolg van de cunetten ondergaat de stroom een versnelling ter plaatse van het bouwfront als gevolg van de aanwezigheid van pijlers en reeds aanwezige drempelopbouwfasen. Daarnaast wordt het stroombeeld plaatselijk beïnvloed doordat de pijlers en ook de drempellagen, niet ideaal zijn gestroomlijnd. Zo ontstaan bij de pijlers secundaire stromingen (loslaatwervels en dergelijke) die de stroomaanval in de nabijheid verhogen.

k_3 is gedefinieerd als de beïnvloeding van de stroomsnelheid door de relatieve geometrische vernauwing ter plaatse van de keel van een tweedimensionale pijlersektie als gevolg van de aanwezigheid van pijler en eventuele drempelopbouwfasen (ten opzichte van de onderkant van de pijlervoet). Deze vernauwing is betrokken op de feitelijke ontwerp (beneden) waterstand (hier: N.A.P. + 2 m).

k_4 is de korrektiefaktor van k_3 voor het in rekening brengen van de genoemde lokale stroombeeldverstoringen. Bovendien is in k_4 het effect verwerkt van het niet noodzakelijk ter plaatse van de keel optreden van de schade. De invloedsfaktor k_3 is voor willekeurige sluitgatlokaties in tabel 6 weergegeven, de factoren k_4 zijn in tabel 7 vermeld.

k₅

Een sluitende definitie van een invloedsfaktor die de invloed van het bouwfront in rekening brengt ten opzichte van een tweedimensionale situatie is niet goed te geven in verband met het geschematiseerde stroomsnelheidsbeeld dat in het rekenmodel (dat de randvoorwaarden levert) wordt verondersteld op te treden op de overgang van bouwfront naar resterend sluitgat.

De faktor k_5 is hier gedefinieerd als aangegeven in tabel 8. De stroomsnelheid in de tweedimensionale proefopstelling werd hiertoe vergeleken met die vlak voor de maatgevende pijler in de proefopstelling met het bouwfront, waarbij dezelfde aantasting plaatsvond (bij het bouwfront aan één zijde van de pijler) van hetzelfde modelmateriaal. Aldus werd vastgesteld dat k_5 voor opbouwphase a circa 0,9 bedroeg en voor opbouwfasen b, c en d op circa 1,0 was te stellen. Deze waarden worden, bij gebrek aan meer metingen, geacht geldig te zijn in alle situaties. Voor verdere informatie wordt verwezen naar deel III, paragraaf 4.2.

k₆

Tot nu toe is verondersteld dat rechte aanstroming zal optreden, dat wil zeggen op voldoende afstand bovenstrooms van het bouwfront, buiten de direkte invloeds-sfeer van de individuele pijlers. Met name in de ondiepere delen van de sluitgaten zal dit echter in het algemeen niet het geval zijn. Aldus moet een aparte faktor worden gedefinieerd, k_6 , waarbij deze invloed in rekening wordt gebracht. Ter bepaling van k_6 is het modelbouwfront steeds zowel recht als 15° scheef in de Golfbak ingebouwd. Uit vergelijking van de recht en scheef aangestroomde situatie voor opbouwfasen a, b, c en d werden de korresponderende factoren k_6 gevonden (tabel 9). Hierbij werd verondersteld dat een negatieve aanstroombhoek hetzelfde effect als een positieve hoek zou hebben.

k₇

De faktor k_7 brengt de invloed van golven in rekening, die tijdens maatgevende stroomomstandigheden kunnen optreden. Deze golven zijn niet bijzonder hoog (vergelijkbaar met regelmatige golven met $H_1 \approx 2$ m en $T = 5,6$ s volgens [7]), zodat alleen in de ondiepe delen van de sluitgaten de stroombestendigheid van de drempelopbouwfasen hierdoor zal kunnen worden beïnvloed.

De faktor k_7 kon slechts zeer globaal worden geschat, zoals in het navolgende zal blijken.

De metingen met behulp waarvan k_7 werd bepaald, hebben betrekking op een waterdiepte van 25 m en regelmatige golven ($H_1 \approx 2$ m en $T = 5,4$ s); eerdere metingen waarbij hogere golven ($H_1 \approx 3$ m en $T = 7,6$ s) en een kleinere waterdiepte (20 m) werden toegepast, moeten in verband met tussentijds veranderde inzichten als te ongunstig worden beschouwd en worden hier dan ook verder buiten beschouwing gelaten. De meetwaarden van k_7 staan in tabel 10 vermeld. Teneinde het verloop van k_7 met de waterdiepte te schatten werd onderstaande werkwijze gevolgd (voor een verklaring van de symbolen, zie de symbolenlijst).

De verhouding van totale schuifspanning (stroom en golven) τ_r en schuifspanning bij alleen stroom τ_c is volgens [10]

$$\frac{\tau_r}{\tau_c} = 1 + \frac{1}{2} \xi^2 \cdot \frac{u_o^2}{u^2}$$

met

$$\xi = \frac{p \cdot \kappa \cdot C}{\sqrt{g}} \approx 0,4 \cdot 0,4 \cdot \frac{C}{\sqrt{g}} = 0,16 \cdot \frac{C}{\sqrt{g}}$$

Deze uitdrukking van τ_r/τ_c geldt voor een éénparige stroom over een (vrijwel) vlakke bodem.

De pijlers vervormen echter het stroom- en golfbeeld. In verband hiermee wordt de relatie van τ_r/τ_c aangepast, volgens:

$$\frac{\tau_r}{\tau_c} = 1 + \frac{1}{2} \xi^2 \cdot \frac{u_o^2}{u^2} \cdot A ,$$

waarin A de versterkingsfaktor door de aanwezigheid van pijlers etc. voor de stroom- en golfaanval voorstelt (experimenteel te bepalen).

Omdat het golfbeeld door vele reflecties (tegen bouwfront en gootwanden) slecht was gedefinieerd, werden behalve de inkomende golfhoogte, die zo goed mogelijk op 2 m werd ingesteld, ook in de nabijheid van het schadegebied (bij de maatgevende pijler) golfhoogten gemeten. Uit registratie van circa 200 golven werd per meetpunt de maximale gemeten golfhoogte bepaald, waarna deze over de meetpunten werd gemiddeld. Enigszins arbitrair werd deze maximale golfhoogte als bepalend voor de stabiliteit van het schadegebied beschouwd. Het bleek aldus dat deze " H_{\max} " steeds circa 3 m bedroeg. Het ligt dan voor de hand deze H_{\max}

waarde in te voeren in de 1^e orde benadering van de orbitaalsnelheid aan de bodem.

$$u_o = \frac{2\pi}{T} \cdot \frac{H}{2 \sinh\left(\frac{2\pi h}{L}\right)} = \frac{2\pi}{T} \cdot \frac{H_{\max}}{2 \sinh\left(\frac{2\pi h}{L}\right)}$$

Met $T = 5,4$ s, $H_{\max} = 3$ m en $L = L_o \tanh \frac{2\pi h}{L}$, waarbij $L_o \sim 50$ m, volgt voor u_o in prototypematen:

$$u_o = \frac{1,7}{\sinh(0,126 h)}$$

Het is niet nodig dat de waarden van τ_r/τ_c worden uitgerekend, want het verloop van $k_7(h)$ kan direkt uit $u_o(h)$ worden herleid, door rechtstreeks van de meetpunten uit te gaan. Uit de definitie van k_7 volgt immers dat:

$$1 - k_7 \quad :: \quad \sqrt{\tau_r} \quad :: \quad \sqrt{\frac{\tau_r}{\tau_c}}$$

Onder aanname dat u en A onafhankelijk van H zijn, kan dan worden gesteld

$$1 - k_7(h) \quad :: \quad u_o(h)$$

ofwel

$$\frac{1 - k_7(h)}{1 - k_7(25)} = \frac{u_o(h)}{u_o(25)},$$

met $k_7(25)$ als meetpunt behorend bij de ingestelde $u_o(25)$.

De lijnen in tabel 10 zijn op deze wijze tot stand gekomen.

De uit tabel 10 afgeleide waarden van k_7 hebben strikt genomen alleen betrekking op de onderzochte bestorting (in prototypematen: $D_n = 0,495$ m; $\rho_s \approx 2580$ kg/m³). Omrekenen naar een andere diameter is feitelijk wat betreft k_7 niet toegestaan, aangezien wel het stroomaandeel verandert (vergelijk de benadering $u :: \sqrt{D_n}$) maar niet het golfaandeel. Dit houdt in dat bij grotere diameters de invloed van golven, indien de hier bepaalde k_7 wordt aangehouden, wordt overschat terwijl bij kleinere diameters te weinig golfinvloed in rekening wordt gebracht. Anderzijds is dit effect niet zo gevoelig (vergelijk weer $u :: \sqrt{D_n}$), dat een kleine omrekening niet toelaatbaar zou zijn, zeker met het oog op de wel zeer globale bepaling van k_7 . Indien deze faktor bij de dimensionering van de

drempellagen een belangrijke rol zou spelen, lijkt in verband met het voorgaande een nadere toetsing en evaluatie echter zeker gewenst.

4.3 Verband tussen kritieke aanstroomsnelheid en steengewicht voor willekeurige lokaties

Met de voor de verschillende sluitgatlokaties bepaalde waarden van $k_1 \dots k_7$ is het verband bekend tussen de kritieke aanstroomsnelheid en de steenafmetingen. Relatie (3), paragraaf 3.3.:

$$u_k = k \cdot 1,3 \log \left(\frac{83h}{(G_{50})^{0,333}} \right) (G_{50})^{0,167} ,$$

met

$$k = k_1 \cdot k_2 \cdot k_3 \cdot k_4 \cdot k_5 \cdot k_6 \cdot k_7$$

Omwille van de mogelijkheid van een flexibele interpretatie werd besloten dit verband grafisch te presenteren, met voor elke lokatie en opbouwphase één bijbehorende lijn.

Deze grafieken werden als computerplots uitgevoerd met het oog op tijdwinst en eventuele eenvoudige hiernieuwde uitvoer op een later tijdstip als er sprake zou zijn van wijziging en/of verfijning van de invloedsfactoren.

In de figuren 4 tot en met 15 zijn de grafieken weergegeven. Voor de dichtheid van de bestortingen is 2650 kg/m^3 aangehouden. Dat de feitelijke dichtheden van de modelbestortingen hiervan iets afweken is niet zo van belang, omdat hiermee alleen de factoren $k_1 \dots k_7$ werden bepaald. Daarbij lijkt het, in verband met de geringe afwijkende situaties, alleszins acceptabel om $k_1 \dots k_7$ ook voor een soortelijke dichtheid van 2650 kg/m^3 als geldig te veronderstellen.

Onder de aanname dat $k_1 \dots k_7$ onafhankelijk zijn van de dichtheid, kan ook worden omgerekend naar andere prototype-dichtheden.

Dit gaat als volgt:

Globaal geldt:

$$u_k : : \sqrt{\Delta g D_n}$$

Bij gelijkblijvende $u = u_k$

$$D_n \quad : \quad : \quad \frac{1}{\Delta}$$

of

$$\frac{D_n(\Delta)}{D_n(1,65)} = \frac{1,65}{\Delta}$$

Verder is

$$G_{50} = D_n^3 \cdot \rho_s$$

dus

$$\frac{G_{50}(\Delta)}{G_{50}(1,65)} = \left(\frac{1,65}{\Delta}\right)^3 \cdot \frac{\rho_s}{2650} \tag{4}$$

Als voorbeeld kan dienen $\rho_s = 2800 \text{ kg/m}^3$ en 3000 kg/m^3 . Hierbij worden respectievelijk $G_{50}(1,8)/G_{50}(1,65) = 0,81$ en $G_{50}(2,0)/G_{50}(1,65) = 0,64$. Ook kan op deze wijze de invloed van zout water worden verdisconteerd. Is bijvoorbeeld in de Oosterscheldemonding $\Delta = 1,59$ van materiaal dat in zoete omstandigheden $\Delta = 1,65$ en $\rho_s = 2650 \text{ kg/m}^3$ heeft, dan wordt de correctie in de massa volgens (4):

$$\frac{G_{50}(1,59)}{G_{50}(1,65)} \approx 1,09$$

Globaal moet de massa dus met circa 10% worden verhoogd.

Mede omdat echter de soort van de bestortingen in het prototype nog geenszins is vastgesteld, wordt in het navolgende eenvoudigheidshalve steeds uitgegaan van omstandigheden voor zoet water.

4.4 Benodigde steenafmetingen bij ontwerpomstandigheden

De volgende stap is het invullen van een bepaalde waarde van de aanstroomsnelheid u_k . Voor deze waarde, die voor elke sluitgatlokatie verschillend is, kan worden uitgegaan van een bepaald ontwerpkriterium, bijvoorbeeld stroomomstandigheden die zich gemiddeld ééns per jaar voordoen.

In het onderhavige verslag zijn zowel voor een dergelijk "ontwerpgetij" (1 x per jaar) als het gemiddeld getij de bijbehorende minimaal benodigde steenzwaarten bepaald (tabel 12).

De stroomrandvoorwaarden met betrekking tot de aanstroomsnelheid \bar{u} en aanstroomhoek β (nodig voor het bepalen van k_G) zijn in de tabellen 1, 2 en 3 weergegeven. Deze randvoorwaarden volgden uit berekeningen die werden uitgevoerd voor [6].

In eerste instantie zijn de, aldus bepaalde, minimaal benodigde steenafmetingen door Rijkswaterstaat verwerkt in het eindrapport drempelontwerp [11].

Thans, bij het verschijnen van dit verslag, zijn deze randvoorwaarden achterhaald en zijn binnen Rijkswaterstaat berekeningen met de geaktualiseerde randvoorwaarden uitgevoerd, waarbij ook de spreiding in belasting en sterkte (tot op zekere hoogte) werd meegenomen. Deze "faalkans"-berekeningen werden in 1981 uitgevoerd voor materialen van de negatieve overlap, kern van de drempel en de overgangskonstructie op basis van bouwfasenplanning PL 544. In verband met de inmiddels opnieuw herziene, bouwfasenplanning worden, ten tijde van het verschijnen van dit verslag, opnieuw geaktualiseerde berekeningen voorzien.

Het zal duidelijk zijn dat de hier gepresenteerde resultaten van de benodigde steenafmetingen bij ontwerpomstandigheden, in het licht van het bovenstaande, geen praktische waarde (meer) hebben en slechts dienen ter illustratie.

Als de steengewichten grafisch worden uitgezet per sluitgatlokatie, valt op dat de sprongen in steengewichten van naastliggende lokaties soms erg groot zijn. Dit is kennelijk het gevolg van grove schematisaties in de verschillende lokaties en mogelijk ook in de "berekende" stroomsnelheden. Daarenboven is geen enkele veiligheidscoëfficiënt in de tot nu toe gevolgde werkwijze ingebouwd, integendeel: bij de kritieke stroomsnelheid treedt reeds enige schade op (zie delen II en III). Het wordt daarom aanbevolen om de omhullende van de trapjeslijn aan te houden als globale richtlijn voor het voorspellen van enige beperkte aantasting van de steenzwaarten. In de figuren 16, 17 en 18 zijn deze omhullenden weergegeven voor de dagelijkse omstandigheden (gemiddeld getij) en de ontwerpomstandigheden (1 x per jaar getij).

In het totale beeld van de minimaal benodigde steenzwaarten valt het navolgende op:

Voor Roompot en Schaar lopen de lijnen van de verschillende opbouwfasen vrij dicht bij elkaar. Voor de Hammen zijn opbouwfasen b en a "uitschieters" respectievelijk naar boven en beneden. Dit uitschieters worden voornamelijk veroorzaakt door afwijkende ontwerpstromsnelheden (tabel 3, zie bijvoorbeeld locatie 4).

De algemene indruk is dan ook dat wat de invloedsfactoren, dus zuiver de stroombestendigheid, betreft de verschillen relatief kleiner zijn tussen de opeenvolgende opbouwfasen. Dit blijkt ook uit de tabellen met $k_1 \dots k_7$. Slechts opbouwfase b in de tabel met k_6 wijkt sterk af; deze afwijking is gebaseerd op slechts één meetpunt en is dus niet als betrouwbaar te kwalificeren.

Een recht-toe-recht-aan verklaring van de figuren 16, 17 en 18 is niet meer mogelijk, omdat naast de wisselende (marginale) stroombestendigheid ook de ontwerpstromsnelheden van situatie tot situatie verschillen.

5. Kanttekeningen

5.1 Onderzoekresultaten algemeen

Bij de probleemstelling in paragraaf 2.1 is gesteld dat beoogd werd een bruikbare indruk van de benodigde steenafmetingen te verkrijgen. De resultaten moeten dan ook als indicatief worden gezien. Een nauwkeurige dimensionering van de minimaal benodigde steenafmetingen op grond van de tot nu toe verkregen resultaten moet beslist worden ontraden.

De te volgen werkwijze om te komen tot een ontwerp met voldoende stroombestendige drempelmaterialen is de taak van de ontwerper. De hier verkregen uitkomsten zijn de eerste stap, waarbij globaal kan worden voorzien wat voor stenen zonder enige veiligheidsmarge minimaal benodigd zullen zijn. Na het voorlopig kiezen van de steenbestortingen, die op grond van praktische overwegingen niet onbelangrijk kunnen afwijken van de minimaal benodigde, kan worden nagegaan in welke situaties en/of op welke lokaties eventueel sprake is van een kritieke toestand. Het is denkbaar, dat afhankelijk van de ernst van deze toestand een tweetal werkwijzen wordt gevolgd. Blijkt de stroombestendigheid twijfelachtig (nèt kritiek) dan kan het zinvol zijn om in een op die situatie geënt modelonderzoek (met de juiste randvoorwaarden) een nadere toetsing te doen. Blijkt de kritieke stroomsnelheid echter ruimschoots te worden overschreden dan moet worden nagegaan wat daarvan de gevolgen zouden kunnen zijn. Desnoods dienen aanvullende maatregelen te worden bedacht. Tot die laatste zou een tijdelijke of permanente afdekking van een smalle zone rond de pijlers kunnen worden gerekend. Deze maatregelen zouden effectief kunnen zijn, omdat de schade zeer geconcentreerd rond de pijlers bleek op te treden tijdens het onderhavige modelonderzoek (paragraaf 5.3).

5.2 Schade bij overschrijding van de kritieke stroomsnelheid

Ofschoon het nagaan van schade bij overschrijding van de kritieke stroomsnelheid feitelijk geen punt van onderzoek was, is toch een indruk omtrent deze schade verkregen tijdens het modelonderzoek in de Golfbak. Hierbij werd namelijk het verband bepaald tussen stroomsnelheid en schade, teneinde de kritieke stroomsnelheid te kunnen bepalen. Na een voldoende groot aantal schadelijnen te hebben verkregen, werd de kritieke stroomsnelheid gedefinieerd als die stroomsnelheid waarbij een schade van 25 stenen (uit de vakken verplaatst) zou optreden (zie deel III). De schade bij deze kritieke stroomsnelheid veroorzaakte

bij de toegepaste bestorting met $D_n = 0,22$ m (prototype) doorgaans een geconcentreerde kuil aan de bovenstroomse kopeinden van de voetplaat met een diepte van orde 0,5 m (prototype) bij de opbouwfasen a en b.

Voor dezelfde bestorting is in figuur 19 de relatieve toename van de stroomsnelheid met de relatieve schadetoename weergegeven voor enkele situaties zonder golven. Daaruit blijkt dat een zevenvoudige schade (naar aantal) op kan treden bij een overschrijding van de kritieke stroomsnelheid met circa 20%. De maximale (theoretische) kuildiepte kan worden geschat door een kuil te beschouwen als een op zijn punt staande halfkegel met flanken onder natuurlijk talud (1:1,5). Indien het poriëngehalte op 0,5 wordt gesteld, dan geldt als de steendiameters klein zijn ten opzichte van de kuildiepte: maximale kuildiepte = $0,26 \sqrt[3]{\text{schade}}$.

Op de figuur zijn de op deze wijze bepaalde maximale kuildiepten, welke in praktijk wel wat kleiner zullen zijn, eveneens vermeld.

Uit tendenzen die werden geconstateerd bij andere onderzoeken zoals M1402 [1], M1378 [3]) blijkt dat bij kleinere steendiameters de relatieve schade (naar aantal stenen) groter kan zijn en omgekeerd, zodat deze schatting alleen geldig mag worden geacht voor de genoemde steenafmeting.

5.3 Verhoging van de kritieke stroomsnelheid bij een plaatselijke bodemafdekking

Een plaatselijke bodemafdekking kan de kritieke stroomsnelheid voor de opbouw-fase als geheel aanmerkelijk verhogen. Dit effect kan mede op grond van de proefresultaten grof worden geschat. Hiertoe nemen we een plaatselijke bodemafdekking rond de pijlervoetplaat in beschouwing, aangezien dit een praktisch toepasbare oplossing zou kunnen zijn. Deze bodemafdekking zou kunnen bestaan uit een bestorting op een verzwaarde filtermat. Aantasting in de directe nabijheid van de pijlers wordt hiermee voorkomen. Bij een verder opgevoerde stroomsnelheid zal buiten de afdekking aantasting kunnen ontstaan.

In figuur 20 is een beeld gegeven van steenverplaatsingen, bij verschillende stroomsnelheden.

Bij een afdekking ter breedte van 5 m uit de voetplaat blijkt aldus een marge van zeker 20%, maar mogelijk ook meer dan 30% (onderste figuur) aanwezig te zijn in de stroomsnelheid.

Een andere schatting kan plaatsvinden met behulp van een afzonderlijk uitgevoerde meting van de bodemsnelheden op 4 m uit de voetplaat van de pijler

op 1 m boven de bodem, als aangegeven in deel II, figuur 9.

De lokale stroomsnelheidstoename is circa 60%, hetgeen betekent dat afgezien van de turbulentie buiten de lokale invloed van de pijlervoet de invloedsfactor k circa $1/1,6 = 0,62$ zou hebben bedragen. Deze bleek bij het in aanmerking nemen van de lokale beïnvloeding steeds rond 0,45 te liggen (in alle drie sluitgaten). Door afdekking zou dus een winst kunnen ontstaan in toelaatbare stroomsnelheid tot circa

$$\frac{0,62 - 0,45}{0,45} \times 100\% \approx 40\%.$$

Bovenstaande redenering gaat slechts op voor (vrijwel) rechte aanstroming. Voor scheve aanstroming is te weinig informatie voorhanden, al lijkt eenzelfde tendens wel aanwezig te zijn.

REFERENTIES

- 1 AKKERMAN, G.J.,
Stormvloedkering Oosterschelde, Ontgrondingen rond putten bij gedeeltelijk verdedigde bodem,
Waterloopkundig Laboratorium, verslag modelonderzoek M1402, WL8-59, 1976
- 2 VAN HARDEVELD, C.,
Stormvloedkering Oosterschelde, De stabiliteit van de bestorting in de uitsparingen voor een puttenfundering en van de aanstorting om de putten,
Waterloopkundig Laboratorium, verslag modelonderzoek M1408-I, 1978
- 3 AKKERMAN, G.J.,
Stormvloedkering Oosterschelde, Uitschuring rondom de putten tijdens plaatsing.
Waterloopkundig Laboratorium, verslag modelonderzoek M1471 (nog niet verschenen)
- 4 AKKERMAN, G.J.,
Stormvloedkering Oosterschelde, Stabiliteit drempelmateriaal tijdens bouwfase van pijlers op putten,
Waterloopkundig Laboratorium, verslag modelonderzoek M1329, WL8-63, 1976
- 5 VAN DER DOES DE BYE, M.R.,
Stabiliteit van materiaal in bouwfasen,
Rijkswaterstaat Deltadienst, Notitie STODHO M 51, oktober 1977
- 6 VAN DER DOES DE BYE, M.R. en THABET, R.A.H.,
Stormvloedkering Oosterschelde, Stroomsnelheidsverdeling bouwfasen tijdens plaatsing pijlers, berekeningsmethode en -resultaten,
Waterloopkundig Laboratorium, nota R1219/M1000/M1001, 1978
- 7 VAN LOENEN, G. en BRUINSMA, J.,
Ontwerpnorm en werkbaarheid hefeiland,
Brief Rijkswaterstaat Deltadienst, januari 1978
- 8 SCHUKKING, W.H.P.,
Systematisch onderzoek naar twee- en driedimensionale ontgrondingen,
Waterloopkundig Laboratorium, verslag modelonderzoek M648/M863, banden I, II en III, 1972

REFERENTIES (vervolg)

- 9 SCHUKKING, W.H.P.,
Begin van beweging van bodemmateriaal,
Waterloopkundig Laboratorium, speurwerkverslag S159 deel I, 1971
- 10 BIJKER, E.W.,
Some considerations about scales for coastal models with movable bed,
Delft Hydraulics Laboratory, Publication 50, 1967
- 11 Stormvloedkering Oosterschelde, Eindrapport drempelontwerp,
Nota nr. 3, DREMBU-M-78.023, augustus 1978
- 12 HARTSUIKER, G.,
Stormvloedkering Oosterschelde, berekening van stroomsnelheden bij een aantal
bouwfases van de stormvloedkering, Waterloopkundig Laboratorium,
interim verslag M1000-10, 1978

op- bouwfase \ lokatie		lokatie										
		2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	
a	\bar{u}_1	0,88*	1,13	1,41*	1,46	1,63	1,82	1,88	1,75	0,89	0,84*	
	β	-20	17	12	8	8	5	2,5	3	8	1	
b	\bar{u}_1	0,88	1,06*	1,41	1,29	1,58	1,84	1,98	1,90	1,58	0,84	
	β	-20	18	12	10	9	6	4,5	6	24	1	
c	\bar{u}_1	0,93*	0,99	1,07	1,30	1,53	1,85	2,06	1,95	1,72	0,86	
	β	6	20	12	11	11	6,5	6,5	8	22	1	
d	\bar{u}_1	0,97	0,91*	1,07	1,30	1,50	1,74	1,80*	1,82*	1,92	0,86	
	β	16	20	12	12	12	12	8	10	20	1	

gemiddeld getij

Voor het ontwerpgetij worden de waarden van \bar{u}_1 met 1,39 vermenigvuldigd.

\bar{u}_1 in m/s

β in $^\circ$, + = stroming met component in de bouwfrontrichting

* = geïnterpoleerd

lokaties volgens figuur 1, opbouwfasen volgens tabel 6

Tabel 1 Stroomrandvoorwaarden Roompot

op- bouwfase \ lokatie		lokatie					
		1	2	3	4	5	6
a	\bar{u}_1	0,76*	1,23	1,63*	1,90*	1,86	1,29*
	β	6	5	-11	-14	-15	-16
b	\bar{u}_1	0,76	1,33	1,73	1,90*	1,91	1,29
	β	6	11	-14	-15	-15	-16
c	\bar{u}_1	0,82	1,50	1,75*	1,88	1,94	1,33
	β	12	17	-15	-16	-15	-18
d	\bar{u}_1	0,93	1,73*	1,77	1,86	1,81	1,33
	β	18	17	-17	-16	-15	-18

gemiddeld getij

Voor het ontwerpgetij worden de waarden van \bar{u}_1 met 1,39 vermenigvuldigd

\bar{u}_1 in m/s

β in $^\circ$, + = stroming met component in de bouwfrontrichting

* = geïnterpoleerd

lokaties volgens figuur 2, opbouwfasen volgens tabel 6

Tabel 2 Stroomrandvoorwaarden Schaar

op- bouwfase \ lokatie		2	3	4	5	6	7
		a	\bar{u}_1	1,38	1,56	1,37	1,33
	β	12	12	2	-2	-3	-10
b	\bar{u}_1	1,46	1,68	1,87	1,38	1,18	0,95*
	β	12	19	14	2	-4	-10
c	\bar{u}_1	1,88*	1,78	1,71	1,56	1,22	0,99
	β	12	19	18	11	-3	-10
d	\bar{u}_1	1,88*	1,78	1,55*	1,48	1,52	1,03
	β	12	19	19	14	6	-2

gemiddeld getij

Voor het ontwerpgetij worden de waarden van \bar{u}_1 met 1,39 vermenigvuldigd

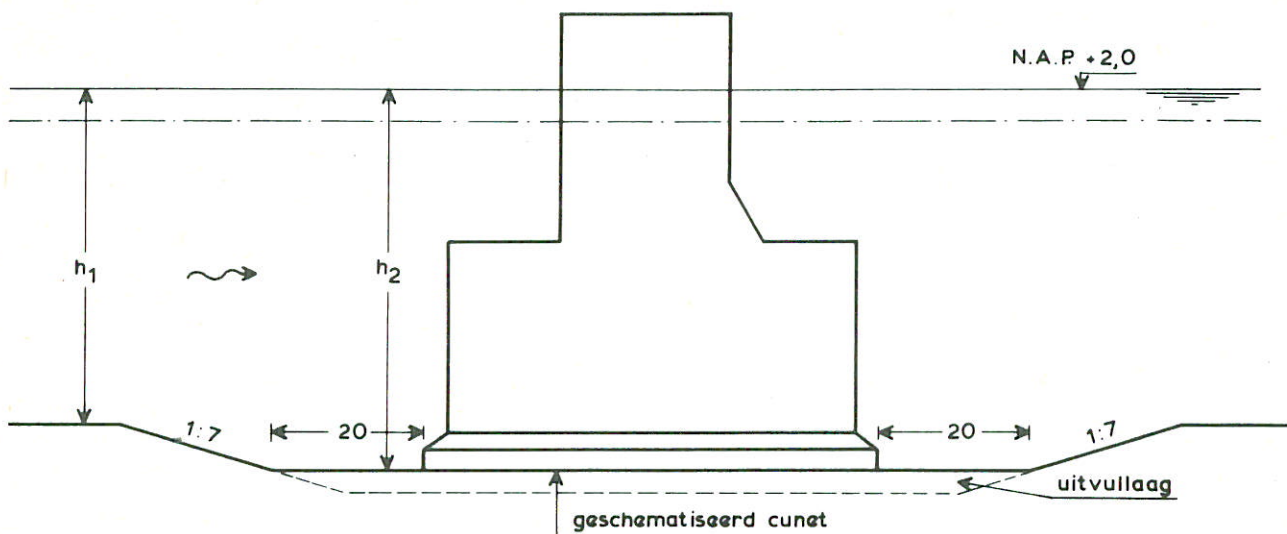
\bar{u}_1 in m/s

β in $^\circ$, + = stroming met component in de bouwfrontrichting

* = geïnterpoleerd

lokaties volgens figuur 3, opbouwfasen volgens tabel 6

Tabel 3 Stroomrandvoorwaarden Hammen



$$K_1 = \frac{h_2}{h_1} \text{ (ongeacht opbouwfase drempel)}$$

maten in m

ROOMPOT

plaats	alle opbouwfasen
2	1,79
3	1,00
4	1,00
5	1,00
6	1,00
7	1,02
8	1,09
9	1,27
10	1,53
11	1,89

SCHAAR

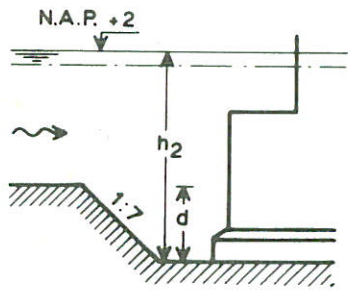
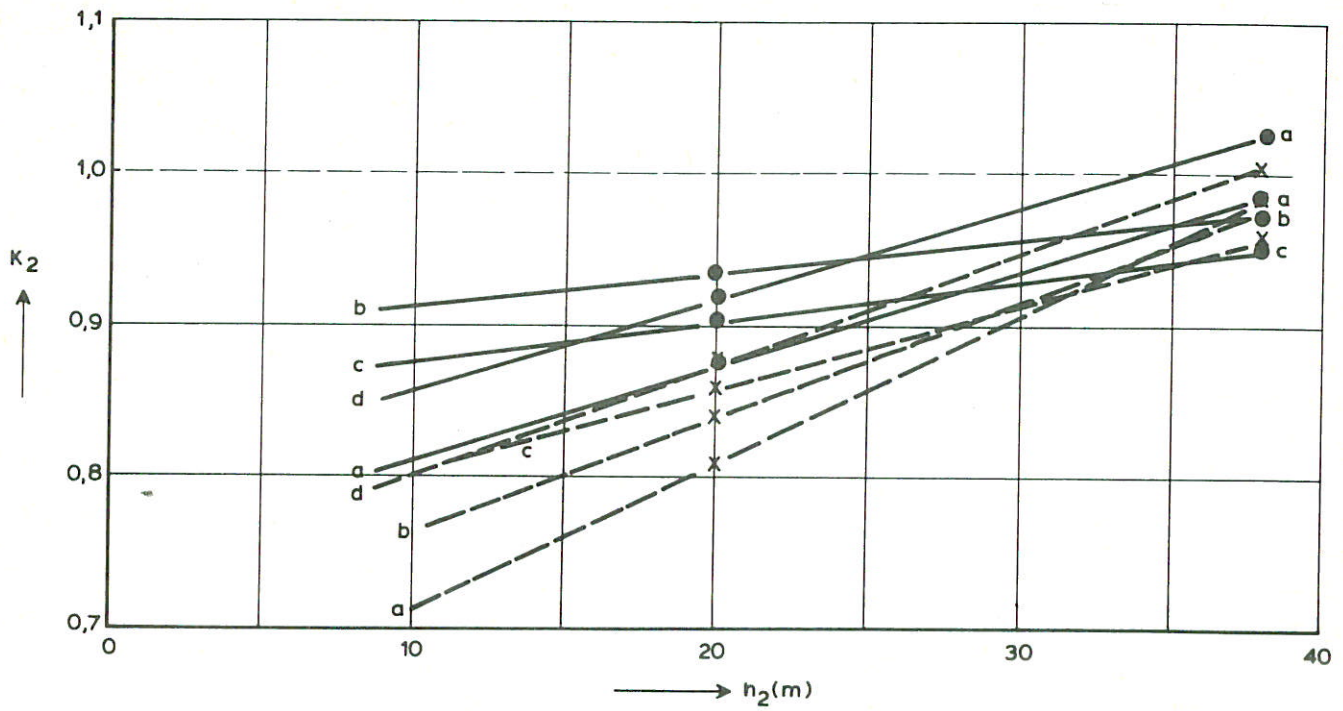
plaats	alle opbouwfasen
1	2,04
2	1,42
3	1,23
4	1,19
5	1,13
6	1,25

HAMMEN

plaats	alle opbouwfasen
2	1,61
3	1,32
4	1,04
5	1,02
6	1,17
7	1,39

lokaties volgens figuren 1,2 en 3

Tabel 4 k_1



meetpunten
 ● $d = 5$ m
 X $d = 10$ m
 $K_2 = 1,0$ als $d \leq 0$ m
 bij tussengeschikte d (kromlijnige)
 interpolatie

ROOMPOT

plaats	opbouwfasen			
	a	b	c	d
2	0,86	0,86	0,88	0,91
3	1,00	1,00	1,00	1,00
4	1,00	1,00	1,00	1,00
5	1,00	1,00	1,00	1,00
6	1,00	1,00	1,00	1,00
7	0,99	1,00	1,00	1,00
8	0,97	0,98	0,96	1,00
9	0,92	0,95	0,92	0,97
10	0,88	0,90	0,90	0,93
11	0,84	0,85	0,88	0,90

SCHAAR

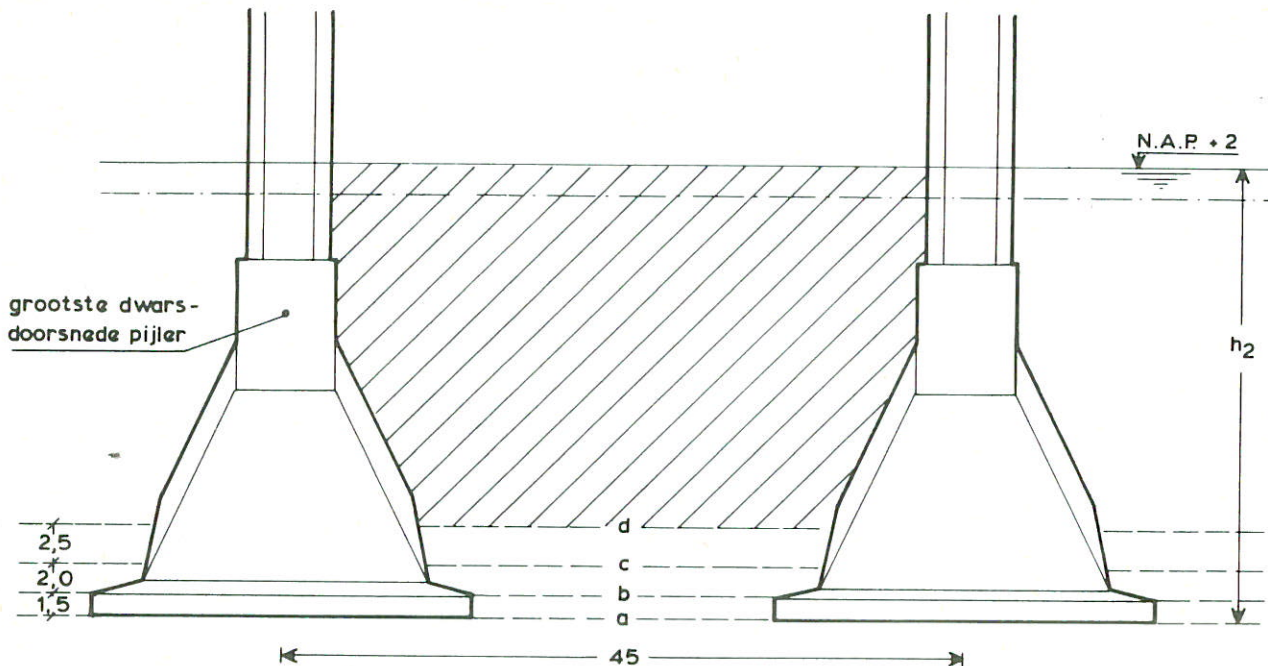
plaats	opbouwfasen			
	a	b	c	d
1	0,83	0,83	0,87	0,89
2	0,88	0,92	0,90	0,93
3	0,92	0,95	0,92	0,97
4	0,93	0,96	0,93	0,97
5	0,94	0,97	0,95	0,98
6	0,91	0,95	0,92	0,95

HAMMEN

plaats	opbouwfasen			
	a	b	c	d
2	0,87	0,87	0,89	0,92
3	0,90	0,94	0,91	0,95
4	0,99	1,00	0,99	1,00
5	0,99	1,00	1,00	1,00
6	0,93	0,96	0,94	0,98
7	0,88	0,92	0,90	0,94

opbouw fasen volgens tabel 6
 lokaties volgens figuren 1, 2 en 3

Tabel 5 k_2



$$K_3 = \frac{\text{natte oppervlak}}{45 \times h_2} \quad (\text{bijv. opbouwfase d: } K_3 = \frac{\text{hatched area}}{45 \times h_2})$$

maten in m

ROOMPOT

plaats	opbouwfasen			
	a	b	c	d
2	0,72	0,70	0,68	0,62
3	0,74	0,72	0,70	0,64
4	0,75	0,74	0,72	0,67
5	0,76	0,74	0,73	0,68
6	0,76	0,74	0,73	0,68
7	0,76	0,74	0,72	0,68
8	0,75	0,74	0,72	0,67
9	0,74	0,72	0,75	0,64
10	0,73	0,71	0,68	0,63
11	0,72	0,70	0,67	0,61

SCHAAR

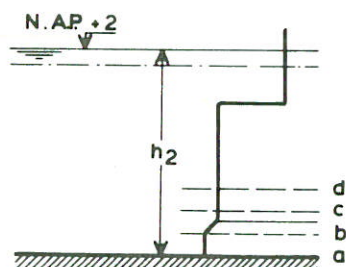
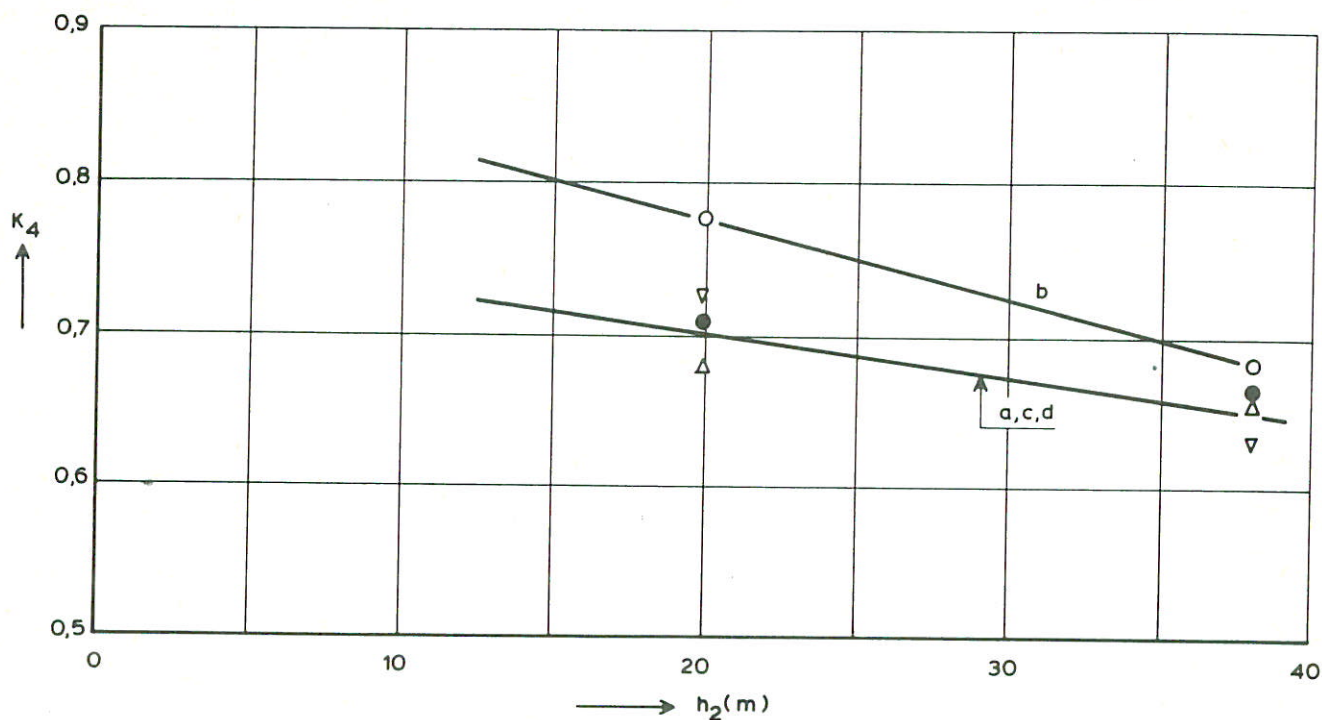
plaats	opbouwfasen			
	a	b	c	d
1	0,72	0,70	0,67	0,61
2	0,73	0,71	0,68	0,62
3	0,73	0,72	0,69	0,64
4	0,74	0,72	0,70	0,64
5	0,73	0,72	0,69	0,64
6	0,72	0,70	0,68	0,62

HAMMEN

plaats	opbouwfasen			
	a	b	c	d
2	0,72	0,70	0,68	0,62
3	0,73	0,72	0,69	0,64
4	0,74	0,72	0,70	0,64
5	0,74	0,72	0,70	0,64
6	0,73	0,72	0,69	0,64
7	0,72	0,70	0,68	0,62

lokaties volgens figuren 1,2 en 3

Tabel 6 k_3



meetpunten

- a
- b
- △ c
- ▽ d

ROOMPOT

plaats	opbouwfasen			
	a	b	c	d
2	0,69	0,75	0,69	0,69
3	0,68	0,74	0,68	0,68
4	0,67	0,72	0,67	0,67
5	0,67	0,71	0,67	0,67
6	0,67	0,71	0,67	0,67
7	0,67	0,71	0,67	0,67
8	0,67	0,72	0,67	0,67
9	0,68	0,73	0,68	0,68
10	0,69	0,74	0,69	0,69
11	0,69	0,75	0,69	0,69

SCHAAR

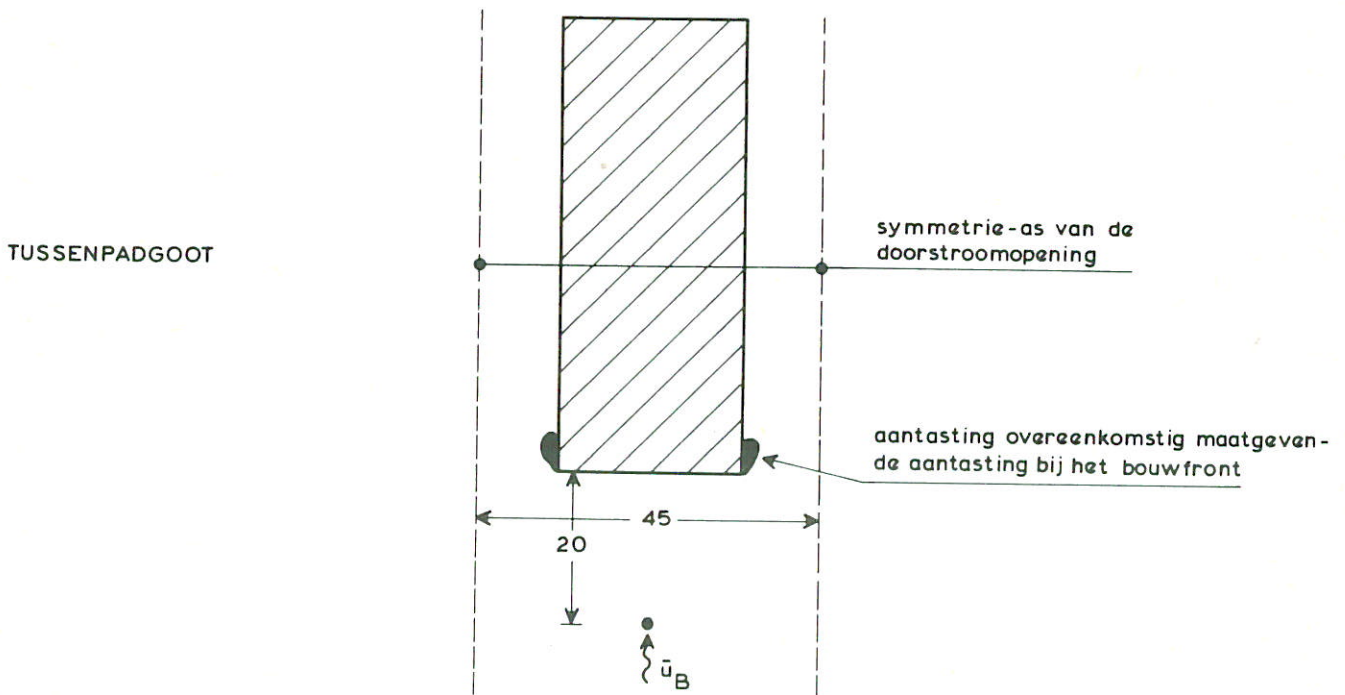
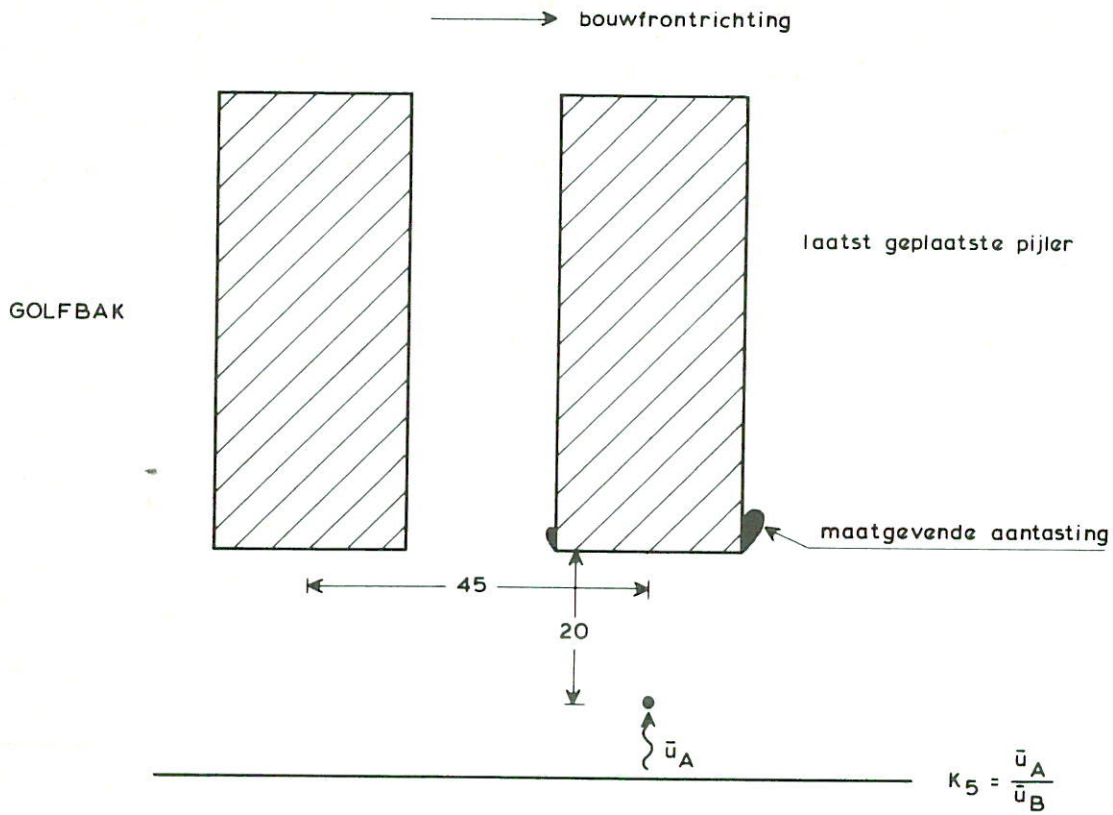
plaats	opbouwfasen			
	a	b	c	d
1	0,69	0,75	0,69	0,69
2	0,69	0,75	0,69	0,69
3	0,68	0,74	0,68	0,68
4	0,68	0,74	0,68	0,68
5	0,68	0,74	0,68	0,68
6	0,69	0,75	0,69	0,69

HAMMEN

plaats	opbouwfasen			
	a	b	c	d
2	0,69	0,75	0,69	0,69
3	0,68	0,74	0,68	0,68
4	0,68	0,73	0,68	0,68
5	0,68	0,73	0,68	0,68
6	0,68	0,74	0,68	0,68
7	0,69	0,75	0,69	0,69

lokaties volgens figuren 1,2 en 3

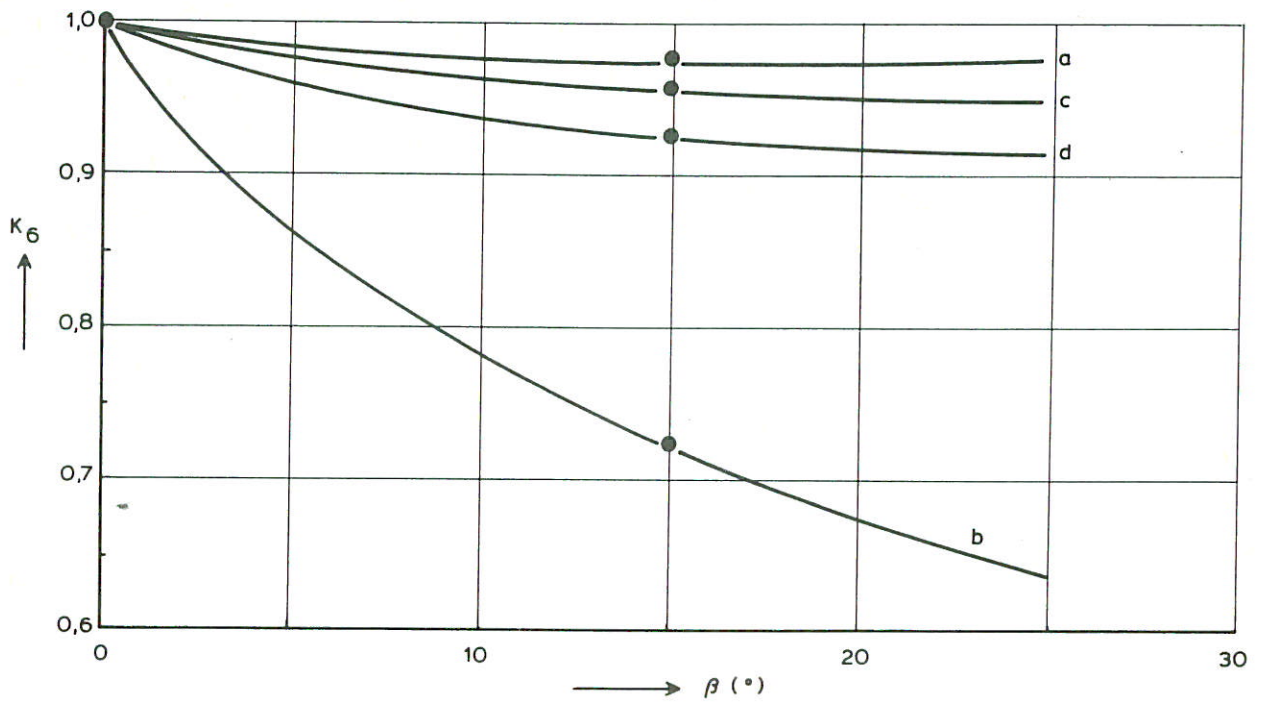
Tabel 7 k_4



opbouwfase	a	$k_5 \approx 0,9$
opbouwfase	b	$k_5 \approx 1,0$
opbouwfase	c	$k_5 \approx 1,0$
opbouwfase	d	$k_5 \approx 1,0$

maten in m
opbouwfase volgens tabel 6

Tabel 8 k_5



● meetpunten, $d=0$, $h_2 = 25$ m



ROOMPOT

SCHAAR

HAMMEN

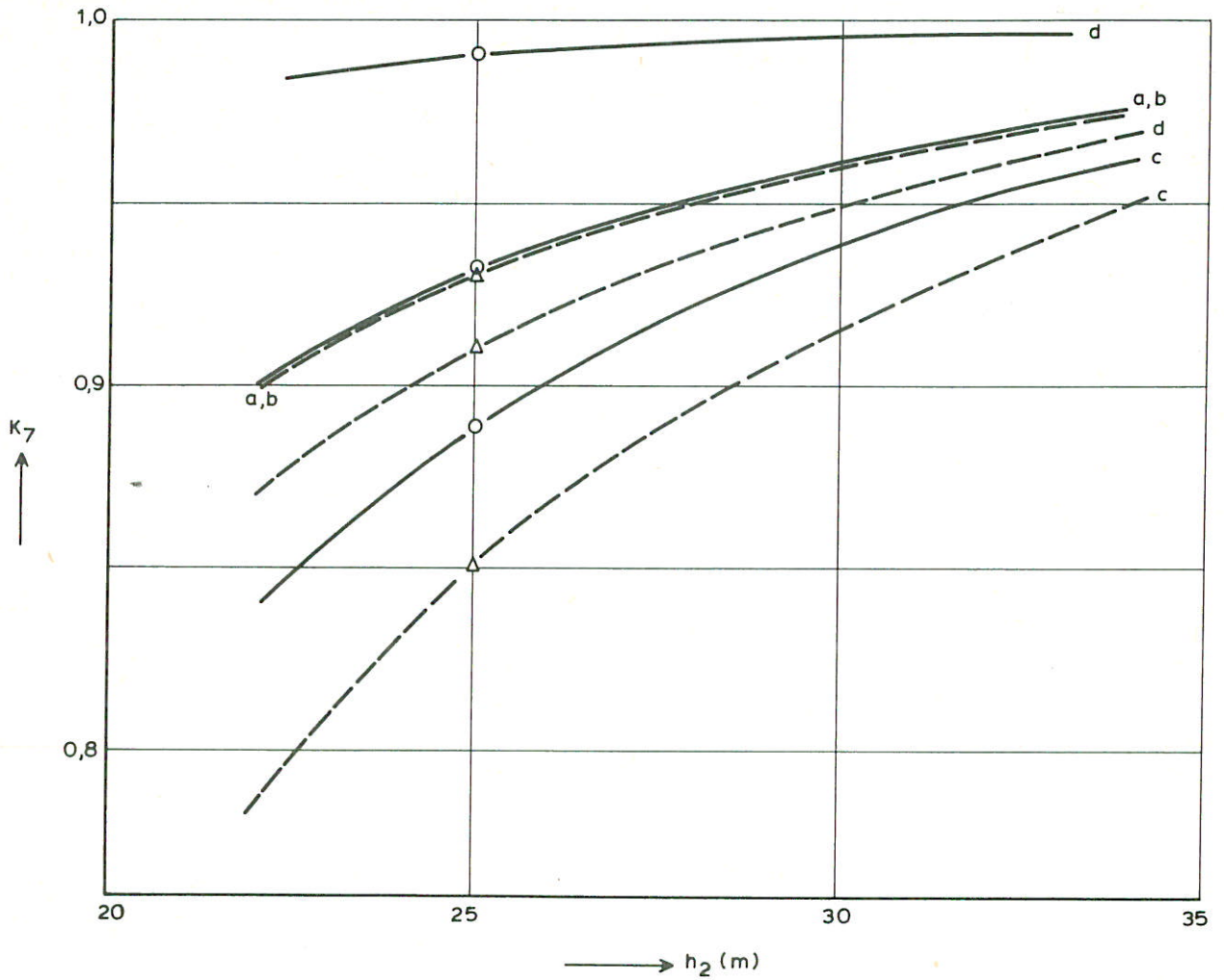
plaats	opbouwfasen			
	a	b	c	d
2	0,98	0,67	0,98	0,93
3	0,98	0,69	0,91	0,93
4	0,98	0,75	0,97	0,94
5	0,99	0,78	0,97	0,94
6	0,99	0,79	0,97	0,94
7	0,99	0,84	0,98	0,94
8	1,00	0,87	0,98	0,95
9	0,99	0,84	0,97	0,94
10	0,99	0,65	0,96	0,93
11	1,00	0,96	1,00	0,99

plaats	opbouwfasen			
	a	b	c	d
1	0,99	0,84	0,97	0,93
2	0,99	0,76	0,96	0,93
3	0,98	0,73	0,96	0,93
4	0,98	0,72	0,96	0,93
5	0,98	0,72	0,96	0,93
6	0,98	0,71	0,96	0,93

plaats	opbouwfasen			
	a	b	c	d
2	0,98	0,75	0,97	0,94
3	0,98	0,68	0,96	0,93
4	1,00	0,73	0,96	0,93
5	1,00	0,93	0,97	0,93
6	1,00	0,88	0,99	0,96
7	0,99	0,78	0,97	0,98

opbouwfase volgens tabel 6
lokaties volgens figuren 1,2 en 3

Tabel 9 k_6



meetpunten
 —○— $\beta = 0^\circ$
 ---△--- $\beta = 15^\circ$
 bij tussenliggende β rechtlijnig geïnterpoleerd

ROOMPOT

SCHAAR

HAMMEN

plaats	opbouwfasen			
	a	b	c	d
2	0,93	0,93	0,87	0,90
3	0,95	0,95	0,89	0,92
4	0,97	0,97	0,88	0,96
5	0,97	0,97	0,95	0,97
6	0,97	0,97	0,95	0,97
7	0,97	0,97	0,96	0,97
8	0,97	0,97	0,96	0,97
9	0,95	0,95	0,92	0,95
10	0,94	0,94	0,86	0,90
11	0,93	0,93	0,88	0,98

plaats	opbouwfasen			
	a	b	c	d
1	0,93	0,93	0,85	0,89
2	0,93	0,93	0,86	0,91
3	0,95	0,95	0,86	0,92
4	0,95	0,95	0,90	0,94
5	0,95	0,95	0,88	0,93
6	0,93	0,93	0,88	0,90

plaats	opbouwfasen			
	a	b	c	d
2	0,93	0,93	0,86	0,93
3	0,95	0,95	0,87	0,91
4	0,95	0,95	0,89	0,93
5	0,95	0,95	0,91	0,94
6	0,95	0,95	0,91	0,97
7	0,93	0,93	0,87	0,98

opbouwfase volgens tabel 6
 lokaties volgens figuren 1.2 en 3

Tabel 10 k_7

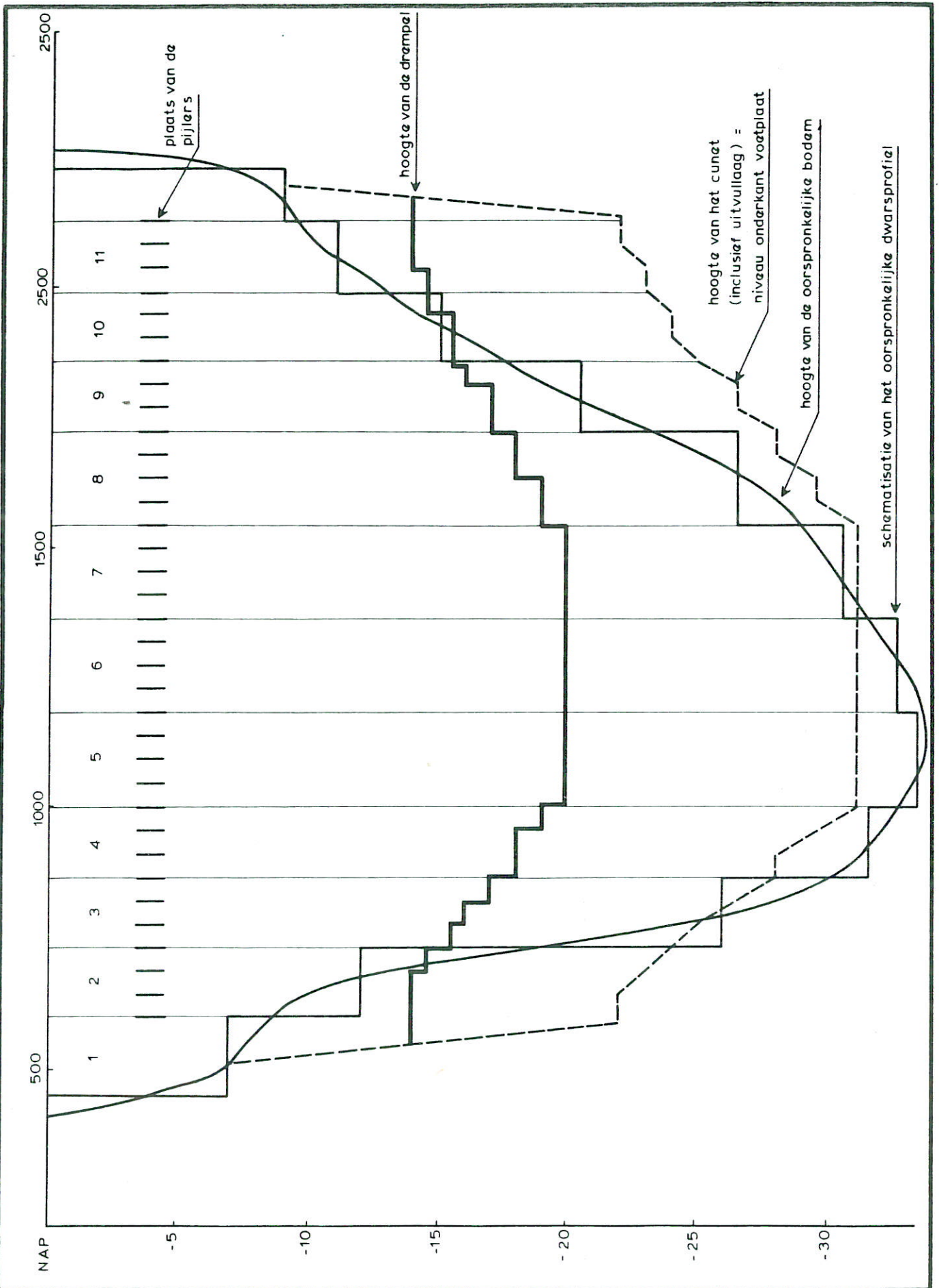
plaats	opbouwfase				niveau bodem (t.o.v.NAP) (m)	h ₁ (m)	cunet diepte (m)	h ₂ (m)	aanstroom hoek (o)	k factoren						
	a	b	c	d						k 1	k 2	k 3	k 4	k 5	k 6	k 7
R ₂		X			12,0	14,0	11,0	25,0	20	1,79	0,86	0,70	0,75	1,00	0,67	0,93
R ₃		X			26,0	28,0	0	28,0	18	1,00	1,00	0,72	0,74	1,00	0,69	0,95
R ₄		X			29,0	31,0	0	31,0	12	1,00	1,00	0,74	0,72	1,00	0,75	0,97
R ₅		X			31,0	33,0	0	33,0	10	1,00	1,00	0,74	0,71	1,00	0,78	0,97
R ₆		X			31,0	33,0	0	33,0	9	1,00	1,00	0,74	0,71	1,00	0,79	0,97
R ₇		X			30,5	32,5	0,5	33,0	6	1,02	1,00	0,74	0,71	1,00	0,84	0,97
R ₈		X			26,5	28,5	2,5	31,0	4,5	1,09	0,98	0,74	0,72	1,00	0,87	0,97
R ₉		X			20,5	22,5	6,0	28,5	6	1,27	0,95	0,72	0,73	1,00	0,84	0,95
R ₁₀		X			15,0	17,0	9,0	26,0	24	1,53	0,90	0,71	0,74	1,00	0,65	0,94
R ₁₁		X			11,0	13,0	11,5	24,5	1	1,89	0,85	0,70	0,75	1,00	0,96	0,93

Tabel 11 Voorbeeld

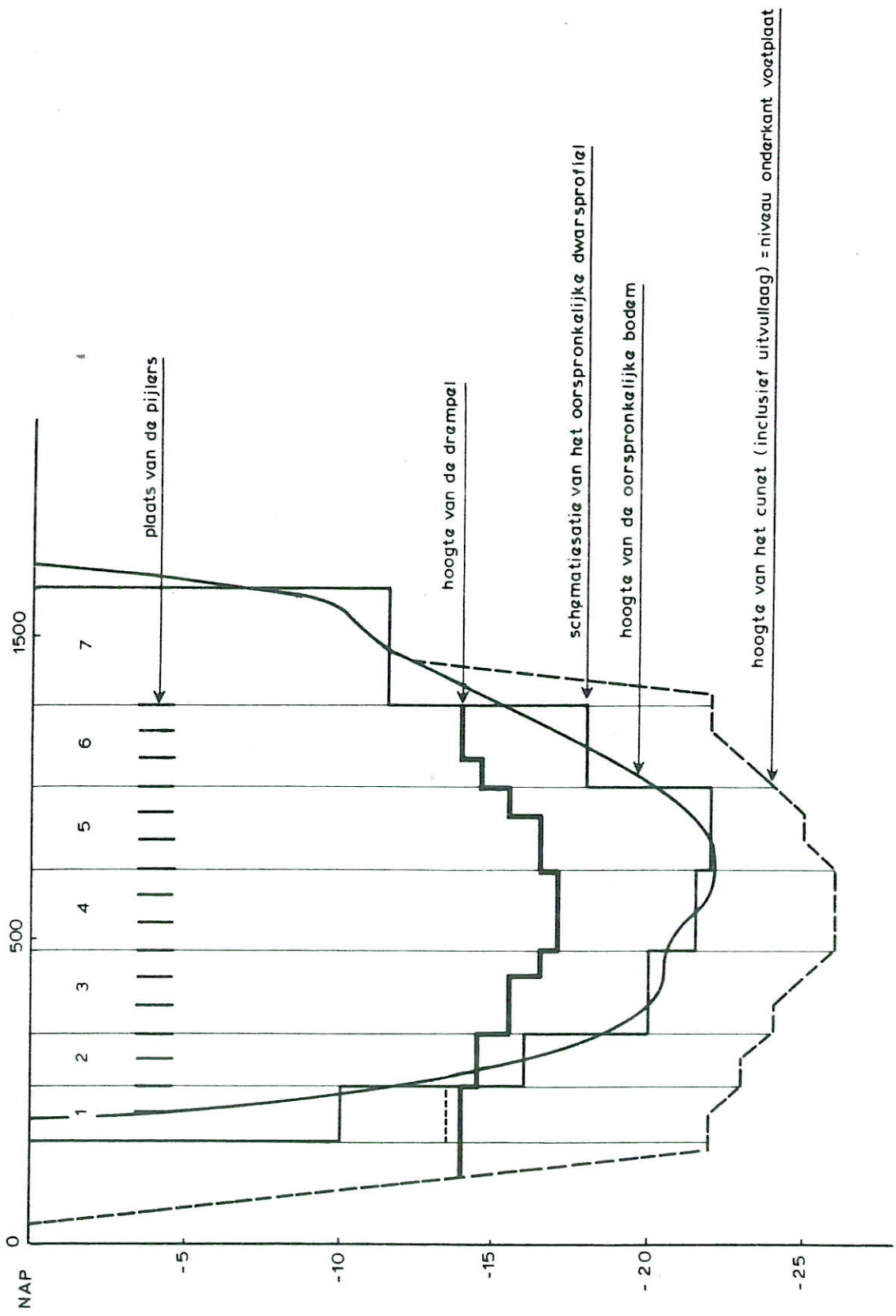
Berekening $k_1 \dots k_7$ Roompot, opbouwphase b

sluitgatlokatie	minimale steenzwaarte G ₅₀ (kg) / D _n (10 ⁻² m)								getij
	a		b		c		d		
R 2	-	-	-	-	-	-	-	-	gemiddeld
R 3	-	-	0,06	2,8	-	-	-	-	
R 4	0,10	3,3	0,23	4,4	-	-	-	-	
R 5	0,10	3,4	0,08	3,1	-	-	0,07	3,0	
R 6	0,24	4,5	0,35	5,1	0,13	3,6	0,22	4,3	
R 7	0,54	5,9	0,70	6,4	0,51	5,8	0,63	6,2	
R 8	0,58	6,0	0,67	6,3	1,07	7,4	0,50	5,7	
R 9	0,22	4,4	0,30	4,8	0,60	6,1	0,43	5,5	
R 10	-	-	0,40	5,3	0,17	4,0	0,58	6,0	
R 11	-	-	-	-	-	-	-	-	
S 1	-	-	-	-	-	-	-	-	
S 2	-	-	-	-	0,05	2,7	0,40	5,3	
S 3	0,22	4,4	0,78	6,7	0,50	5,7	0,72	6,5	
S 4	0,75	6,6	1,77	8,5	0,85	6,9	1,03	7,3	
S 5	0,91	7,0	2,90	10,3	1,68	8,6	1,23	7,7	
S 6	-	-	0,10	3,4	0,06	2,9	0,12	3,5	
H 2	-	-	0,06	2,8	0,26	4,6	0,29	4,8	
H 3	0,10	3,4	0,73	6,5	0,44	5,5	0,57	6,0	
H 4	0,08	3,1	3,02	10,4	0,66	6,3	0,57	6,0	
H 5	0,07	2,9	-	-	0,29	4,8	0,35	5,1	
H 6	-	-	-	-	-	-	0,14	3,7	
H 7	-	-	-	-	-	-	-	-	
R 2	-	-	-	-	-	-	-	-	ontwerp (1 x per jaar)
R 3	0,29	4,8	0,79	6,7	0,23	4,5	0,14	3,7	
R 4	1,30	7,9	3,17	10,6	0,21	4,3	0,23	4,5	
R 5	1,38	8,1	1,06	7,4	0,46	5,6	0,92	7,0	
R 6	3,41	10,9	4,98	12,3	1,70	8,6	3,06	10,5	
R 7	7,80	14,3	10,2	15,7	7,26	14,0	9,23	15,2	
R 8	8,45	14,7	9,76	15,4	16,0	18,2	7,21	14,0	
R 9	3,21	10,7	4,38	11,8	9,06	15,1	6,43	13,0	
R 10	-	-	6,27	13,3	2,60	9,9	9,23	15,2	
R 11	-	-	-	-	-	-	-	-	
S 1	-	-	-	-	-	-	-	-	
S 2	0,18	4,1	0,54	5,9	0,76	6,6	6,13	13,2	
S 3	3,22	10,7	11,9	16,5	7,44	14,1	10,9	16,0	
S 4	11,4	16,3	28,3	22,0	12,9	17,0	16,1	18,3	
S 5	14,2	17,5	46,5	26,0	26,8	21,6	19,4	19,4	
S 6	0,58	6,0	1,45	8,2	0,92	7,0	1,71	8,6	
H 2	0,24	4,5	0,83	6,8	3,92	11,4	4,44	11,9	
H 3	1,51	8,3	11,6	16,4	6,49	13,5	8,55	14,8	
H 4	1,10	7,5	48,7	26,4	9,90	15,5	8,23	14,6	
H 5	0,93	7,1	0,59	6,1	4,22	11,7	5,06	12,4	
H 6	0,15	3,8	0,14	3,8	0,29	4,8	1,93	9,0	
H 7	-	-	-	-	0,05	2,7	-	-	

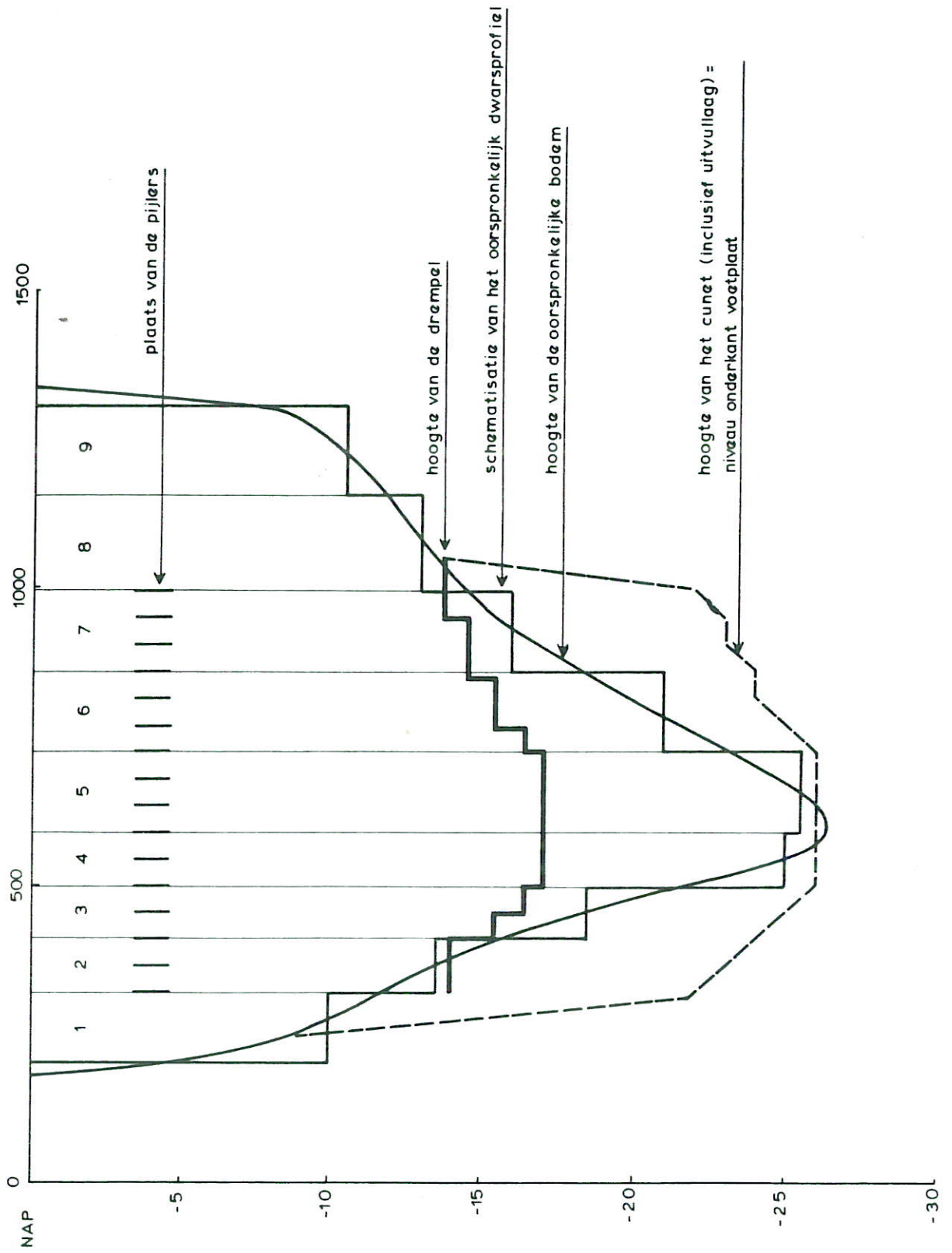
Tabel 12 Benodigde steenzwaarden (voorbeeld)



DWARSPROFIEL ROOMPOT



DWARSPROFIEL SCHAAR

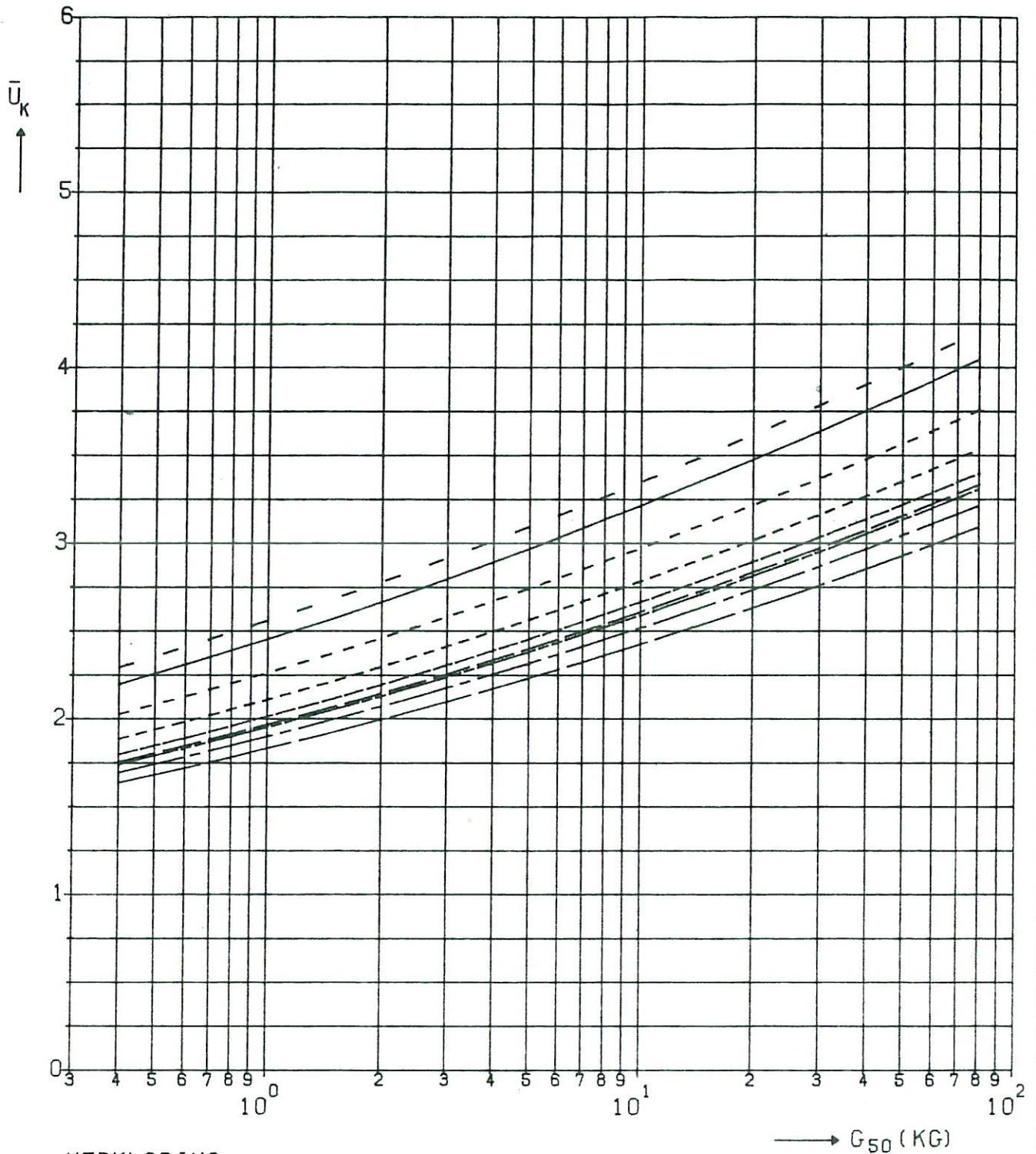


DWARSPROFIEL HAMMEN

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

M 1524-I

FIG. 3



VERKLARING

—————	PLAATS 2	K= 0.62
—————	PLAATS 3	K= 0.42
—————	PLAATS 4	K= 0.43
—————	PLAATS 5	K= 0.44
—————	PLAATS 6	K= 0.44
—————	PLAATS 7	K= 0.44
—————	PLAATS 8	K= 0.46
—————	PLAATS 9	K= 0.50
—————	PLAATS 10	K= 0.55
—————	PLAATS 11	K= 0.65

$$\bar{U}_K = K \bar{U}_{0K}$$

$$\bar{U}_{0K} = 1.3 \text{ LOG} \left(\frac{83 \text{ h}}{(G_{50})^{0.333}} \right) (G_{50})^{0.167}$$

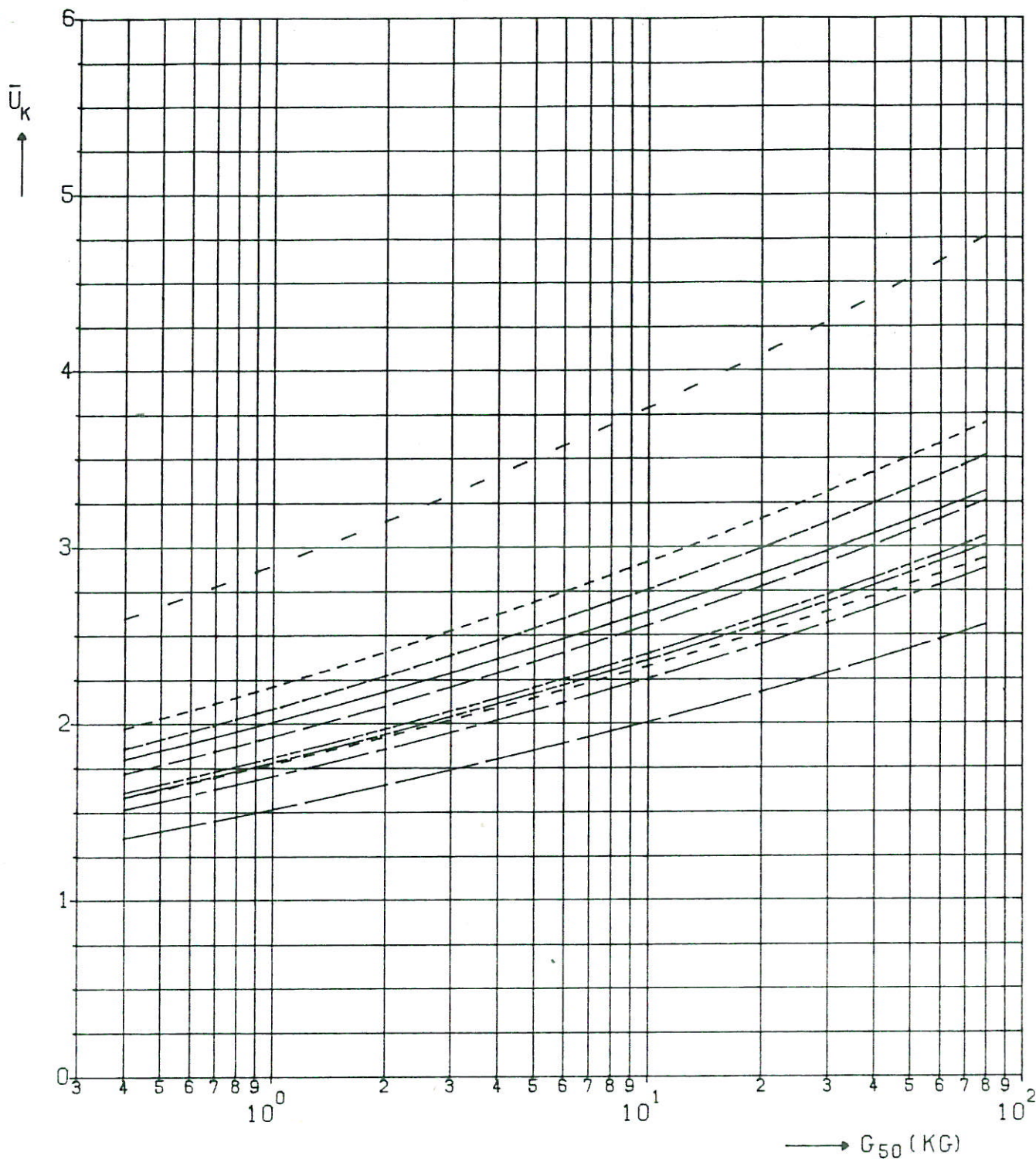
STROOMBESTENDIGHEID BOUWFASEN DREMPEL
ROOMPOT , OPBOUWFASE a

$\rho_0 = 2650 \text{ KG/M}^3$

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

M1524-I

FIG. 4



VERKLARING

—————	PLAATS 2	K= 0.50
—————	PLAATS 3	K= 0.35
—————	PLAATS 4	K= 0.38
—————	PLAATS 5	K= 0.40
—————	PLAATS 6	K= 0.40
—————	PLAATS 7	K= 0.43
—————	PLAATS 8	K= 0.47
—————	PLAATS 9	K= 0.52
—————	PLAATS 10	K= 0.43
—————	PLAATS 11	K= 0.73

$$\bar{U}_K = K \bar{U}_{0K}$$

$$\bar{U}_{0K} = 1.3 \text{ LOG} \left(\frac{83 \text{ h}}{(G_{50})^{0.333}} \right) (G_{50})^{0.167}$$

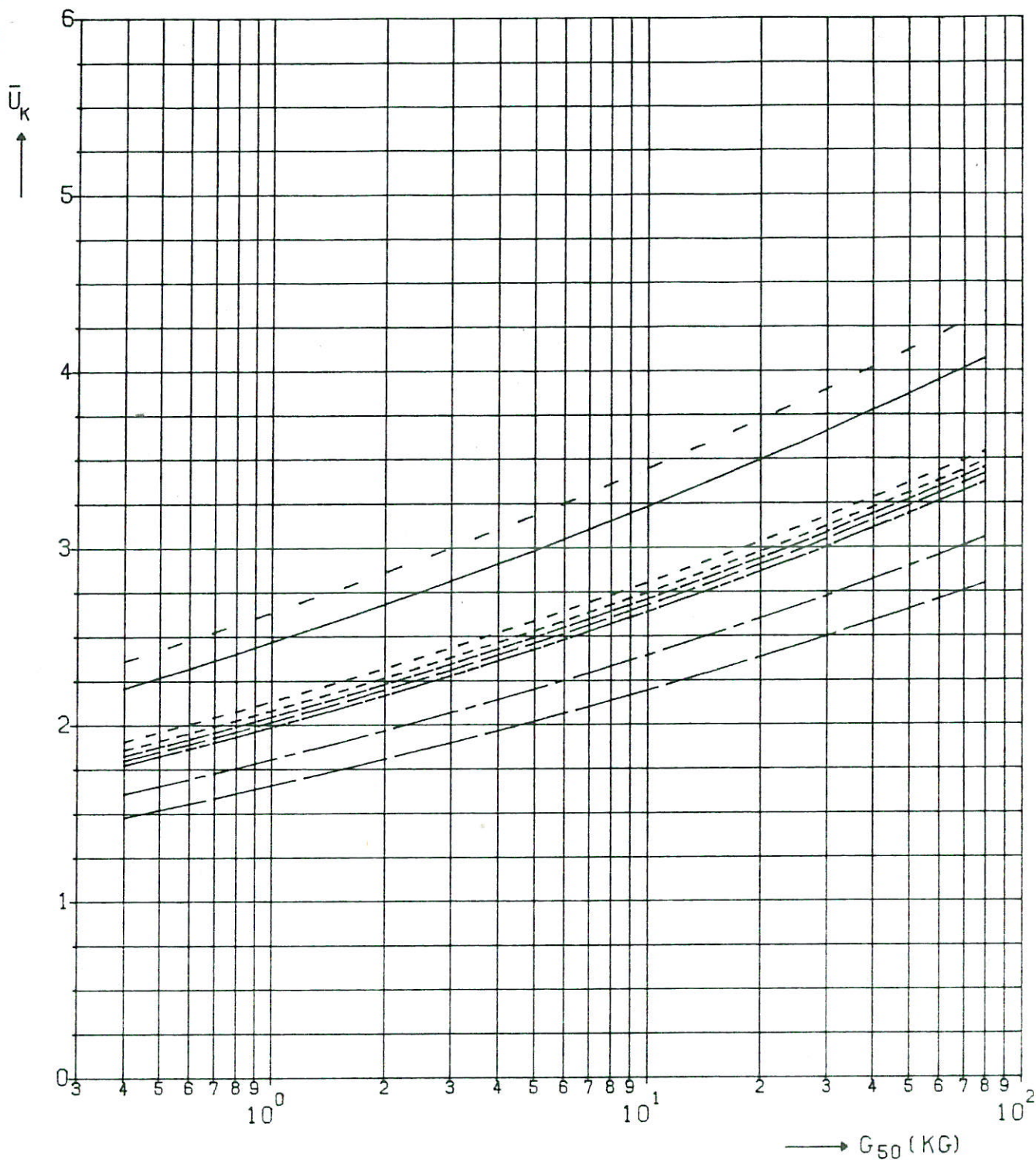
STROOMBESTENDIGHEID BOUWFASEN DREMPEL
ROOMPOT , OPBOUWFASE b

RHO=2650 KG/M³

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

M1524-I

FIG. 5



VERKLARING

—————	PLAATS 2	K= 0.62
—————	PLAATS 3	K= 0.38
—————	PLAATS 4	K= 0.41
—————	PLAATS 5	K= 0.44
—————	PLAATS 6	K= 0.44
—————	PLAATS 7	K= 0.45
—————	PLAATS 8	K= 0.47
—————	PLAATS 9	K= 0.49
—————	PLAATS 10	K= 0.52
—————	PLAATS 11	K= 0.67

$$\bar{U}_K = K \bar{U}_{0K}$$

$$\bar{U}_{0K} = 1.3 \text{ LOG} \left(\frac{83 \text{ h}}{(G_{50})^{0.333}} \right) (G_{50})^{0.167}$$

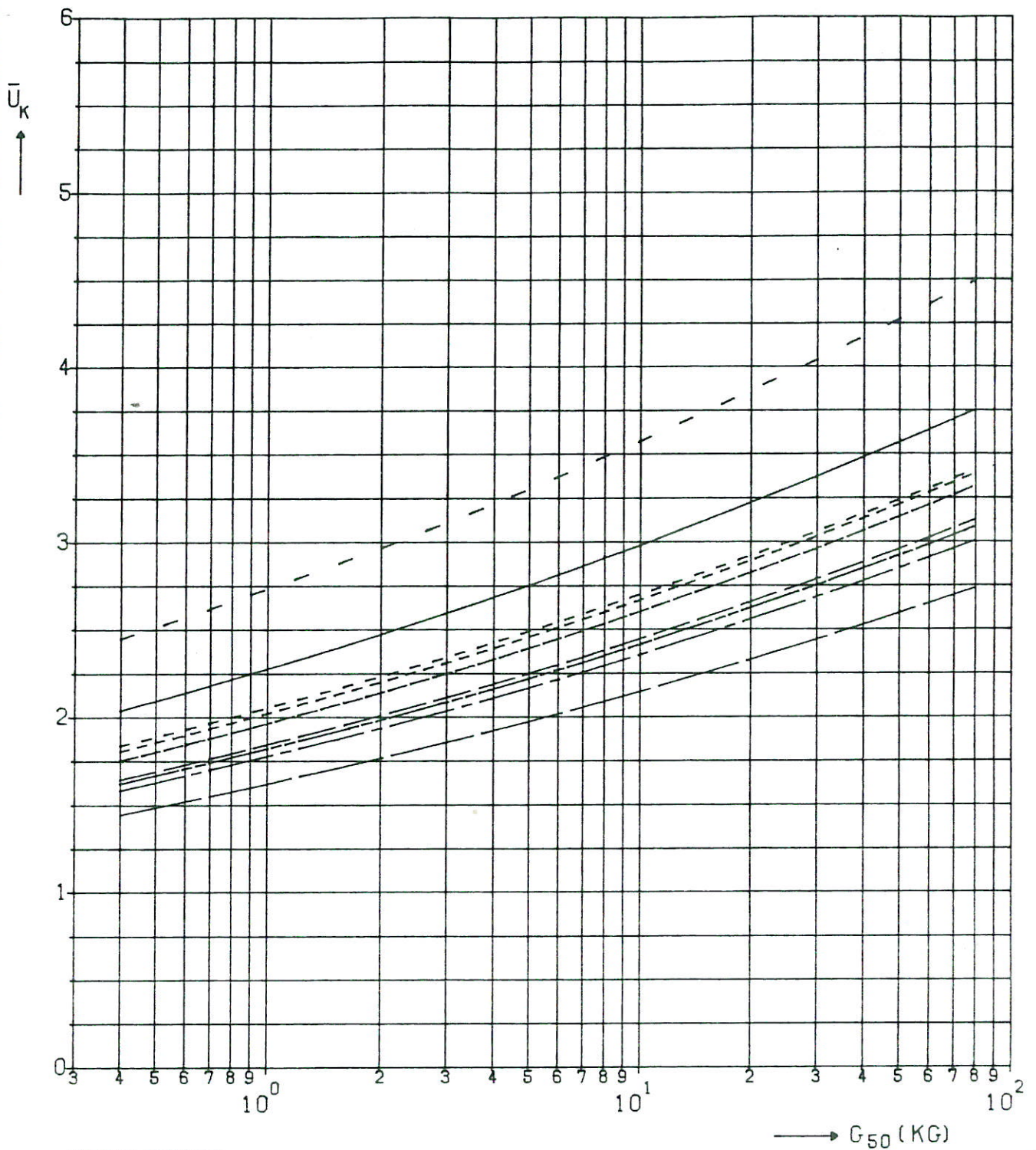
STROOMBESTENDIGHEID BOUWFASEN DREMPEL
 ROOMPOT , OPBOUWFASE c

RHO=2650 KG/M³

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

M1524-I

FIG. 6



VERKLARING

—————	PLAATS 2	K= 0.57
—————	PLAATS 3	K= 0.37
—————	PLAATS 4	K= 0.40
—————	PLAATS 5	K= 0.41
—————	PLAATS 6	K= 0.41
—————	PLAATS 7	K= 0.41
—————	PLAATS 8	K= 0.45
—————	PLAATS 9	K= 0.48
—————	PLAATS 10	K= 0.50
—————	PLAATS 11	K= 0.69

$$\bar{U}_K = K \bar{U}_{0K}$$

$$\bar{U}_{0K} = 1.3 \text{ LOG} \left(\frac{83 \text{ h}}{(G_{50})^{0.333}} \right) (G_{50})^{0.167}$$

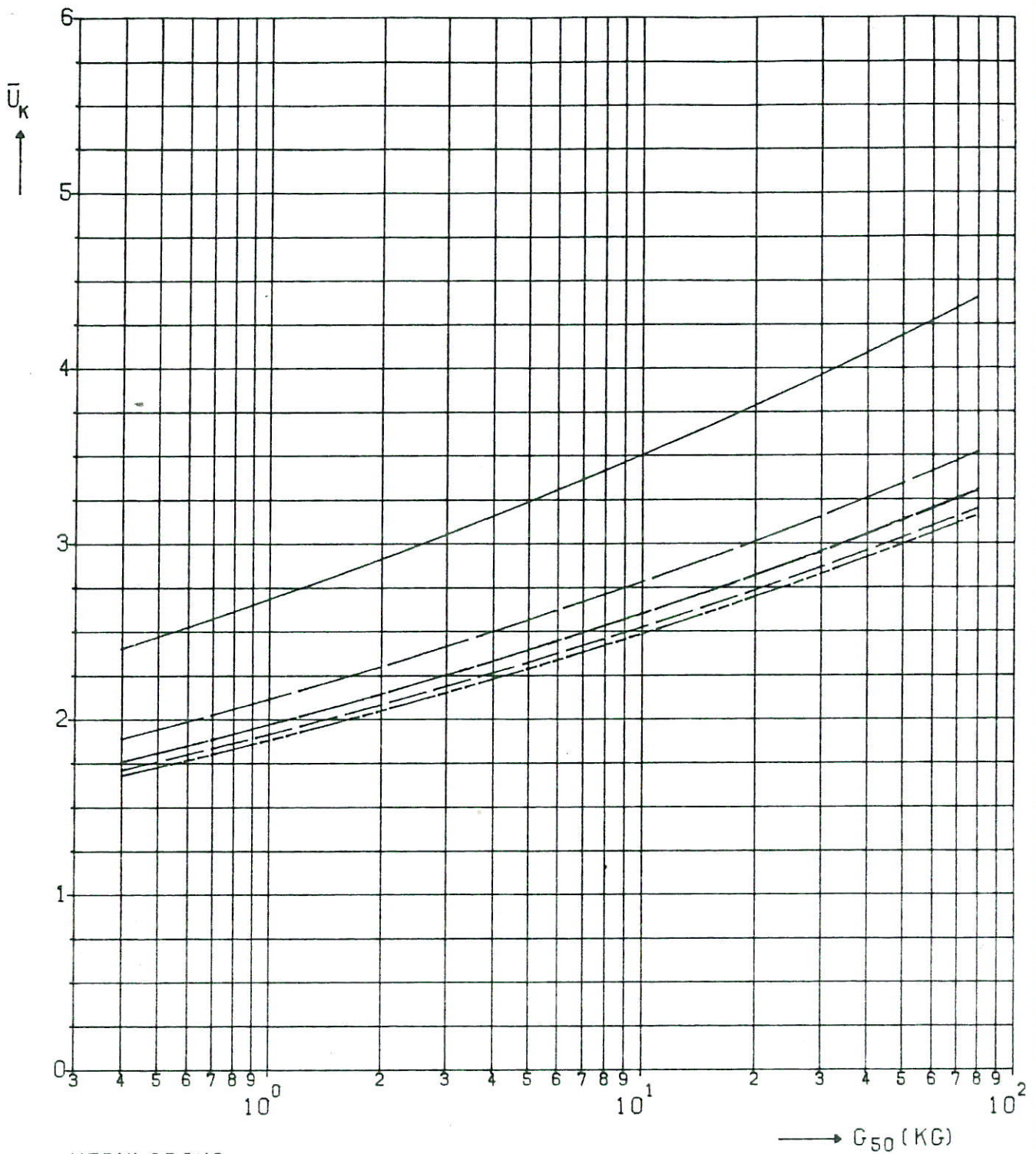
STROOMBESTENDIGHEID BOUWFASEN DREMPEL
 ROOMPOT , OPBOUWFASE d

RHO=2650 KG/M³

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

M1524-I

FIG. 7



VERKLARING

—————	PLAATS 1	K= 0.69
—————	PLAATS 2	K= 0.51
-----	PLAATS 3	K= 0.46
-----	PLAATS 4	K= 0.46
-----	PLAATS 5	K= 0.44
-----	PLAATS 6	K= 0.46

$$\bar{U}_K = K \bar{U}_{0K}$$

$$\bar{U}_{0K} = 1.3 \text{ LOG} \left(\frac{83 \text{ h}}{(G_{50})^{0.333}} \right) (G_{50})^{0.167}$$

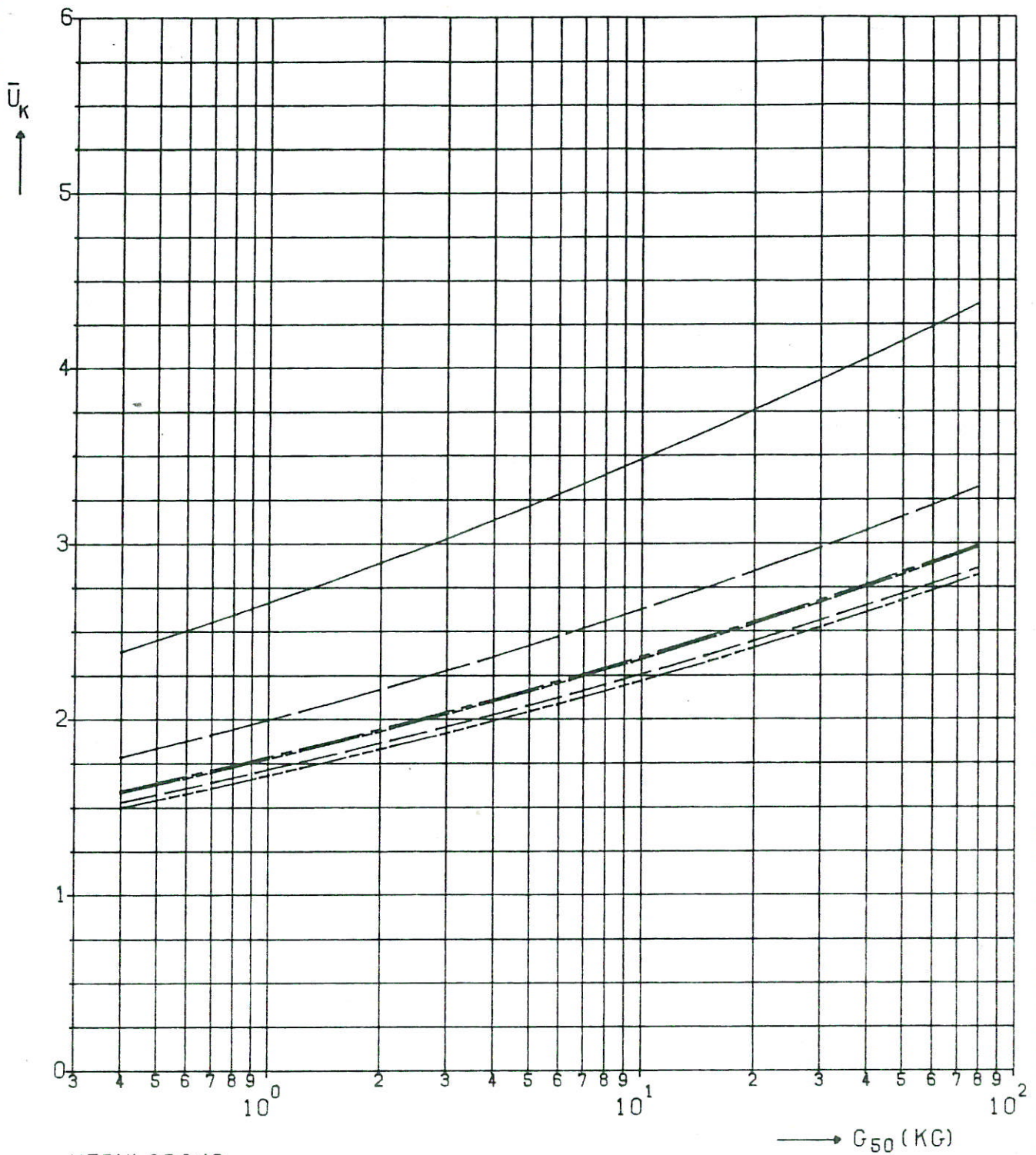
STROOMBESTENDIGHEID BOUWFASEN DREMPEL
SCHAAR , OPBOUWFASE a

$\rho = 2650 \text{ KG/M}^3$

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

M1524-I

FIG. 8



VERKLARING

—————	PLAATS 1	K= 0.68
—————	PLAATS 2	K= 0.48
—————	PLAATS 3	K= 0.42
—————	PLAATS 4	K= 0.41
—————	PLAATS 5	K= 0.39
—————	PLAATS 6	K= 0.41

$$\bar{U}_K = K \bar{U}_{0K}$$

$$\bar{U}_{0K} = 1.3 \text{ LOG} \left(\frac{83 \text{ h}}{(G_{50})^{0.333}} \right) (G_{50})^{0.167}$$

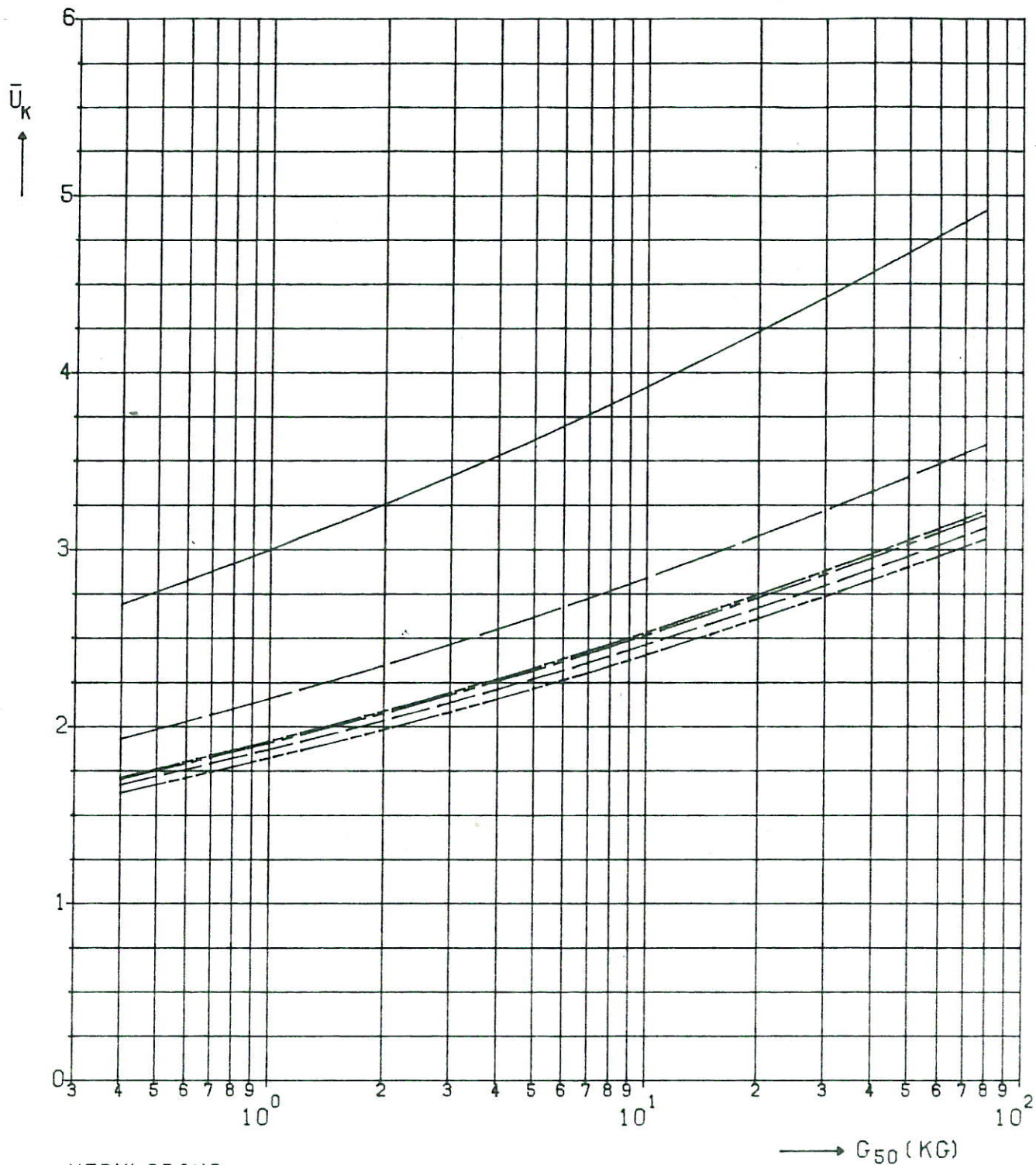
STROOMBESTENDIGHEID BOUWFASEN DREMPEL
SCHAAR , OPBOUWFASE b

$\rho_0 = 2650 \text{ KG/M}^3$

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

M1524-I

FIG. 9



VERKLARING

—————	PLAATS 1	K= 0.77
—————	PLAATS 2	K= 0.52
—————	PLAATS 3	K= 0.45
—————	PLAATS 4	K= 0.45
—————	PLAATS 5	K= 0.42
—————	PLAATS 6	K= 0.45

$$\bar{U}_K = K \bar{U}_{0K}$$

$$\bar{U}_{0K} = 1.3 \text{ LOG} \left(\frac{83 \text{ h}}{(G_{50})^{0.933}} \right) (G_{50})^{0.167}$$

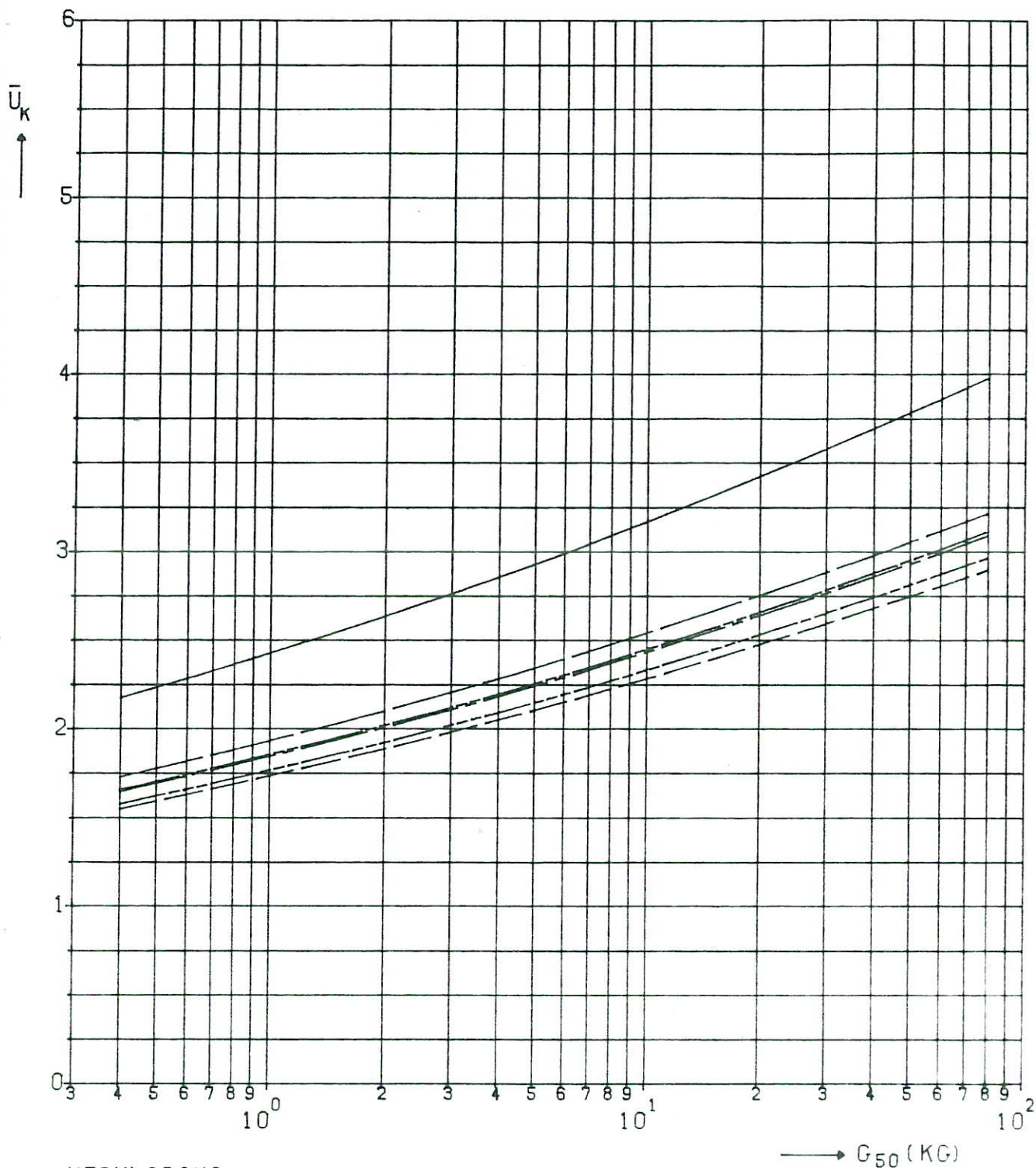
STROOMBESTENDIGHEID BOUWFASEN DREMPEL
SCHAAR , OPBOUWFASE c

$\rho_0 = 2650 \text{ KG/M}^3$

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

M1524-I

FIG. 10



VERKLARING

—————	PLAATS 1	K= 0.62
—————	PLAATS 2	K= 0.47
—————	PLAATS 3	K= 0.44
—————	PLAATS 4	K= 0.43
—————	PLAATS 5	K= 0.41
—————	PLAATS 6	K= 0.41

$$\bar{U}_K = K \bar{U}_{0K}$$

$$\bar{U}_{0K} = 1.3 \text{ LOG} \left(\frac{83 \text{ h}}{(G_{50})^{0.333}} \right) (G_{50})^{0.167}$$

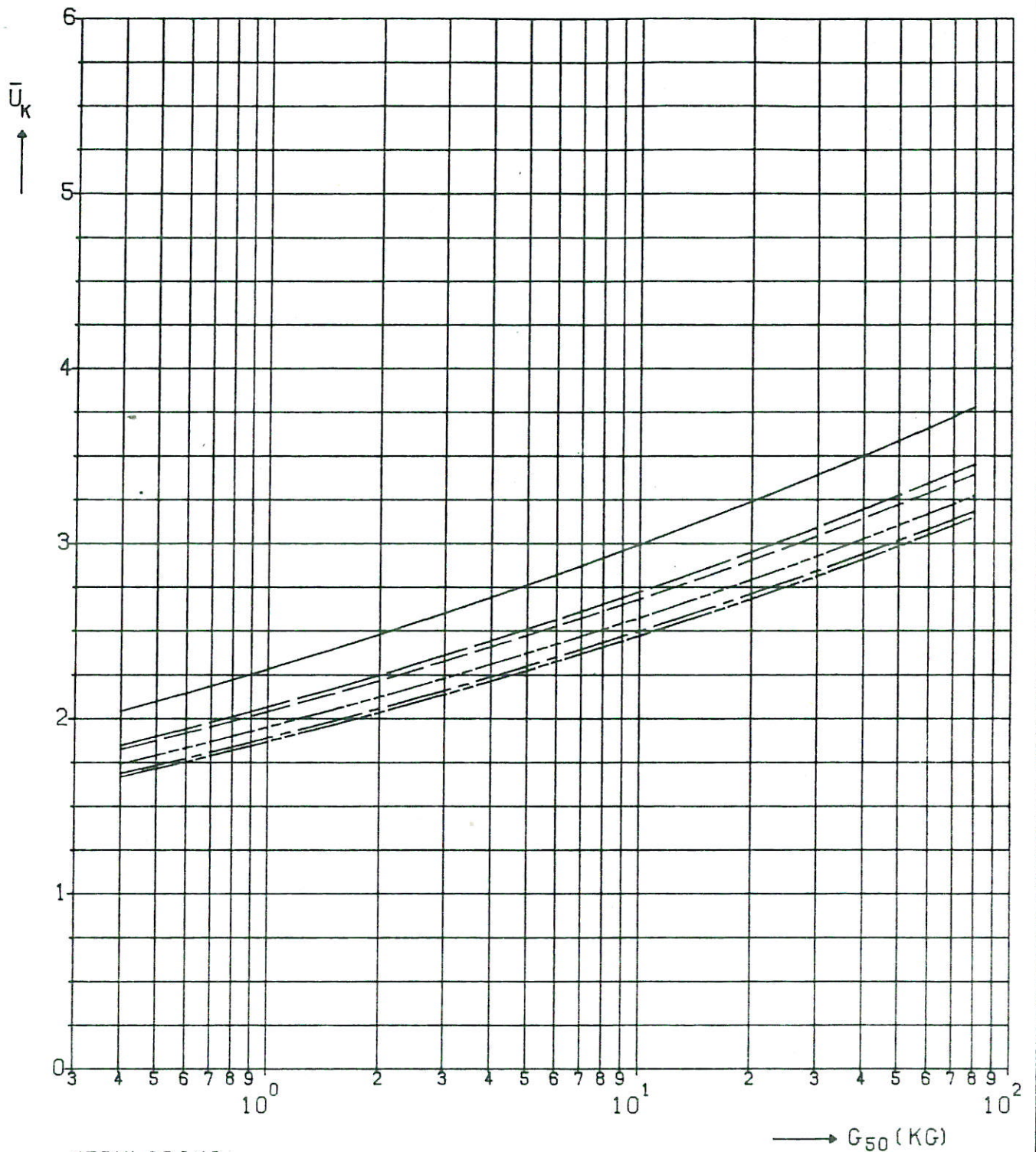
STROOMBESTENDIGHEID BOUWFASEN DREMPEL
SCHAAR , OPBOUWFASE d

$\rho = 2650 \text{ KG/M}^3$

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

M1524-I

FIG. 11



VERKLARING

—————	PLAATS 2	K= 0.56
—————	PLAATS 3	K= 0.49
— · — · —	PLAATS 4	K= 0.43
— · — · —	PLAATS 5	K= 0.43
— · — · —	PLAATS 6	K= 0.46
— · — · —	PLAATS 7	K= 0.49

$$\bar{U}_K = K \bar{U}_{0K}$$

$$\bar{U}_{0K} = 1.3 \text{ LOG} \left(\frac{83 \text{ h}}{(G_{50})^{0.333}} \right) (G_{50})^{0.167}$$

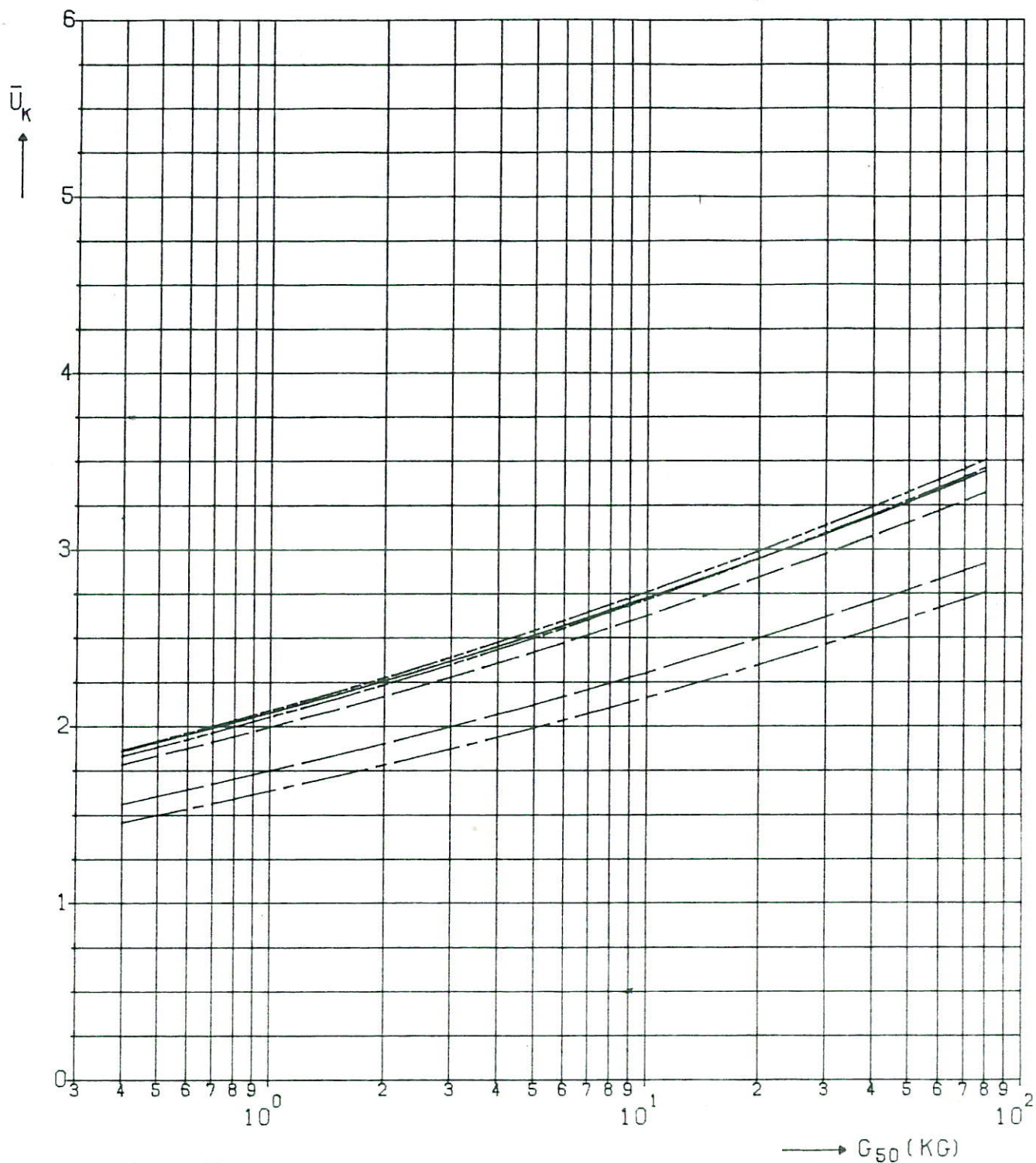
STROOMBESTENDIGHEID BOUWFASEN DREMPEL
 HAMMEN , OPBOUWFASE a

RHO=2650 KG/M³

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

M1524-I

FIG. 12



VERKLARING

—————	PLAATS 2	K= 0.51
—————	PLAATS 3	K= 0.42
—————	PLAATS 4	K= 0.37
—————	PLAATS 5	K= 0.47
—————	PLAATS 6	K= 0.49
—————	PLAATS 7	K= 0.48

$$\bar{U}_K = K \bar{U}_{0K}$$

$$\bar{U}_{0K} = 1.3 \text{ LOG} \left(\frac{83 \text{ h}}{(G_{50})^{0.333}} \right) (G_{50})^{0.167}$$

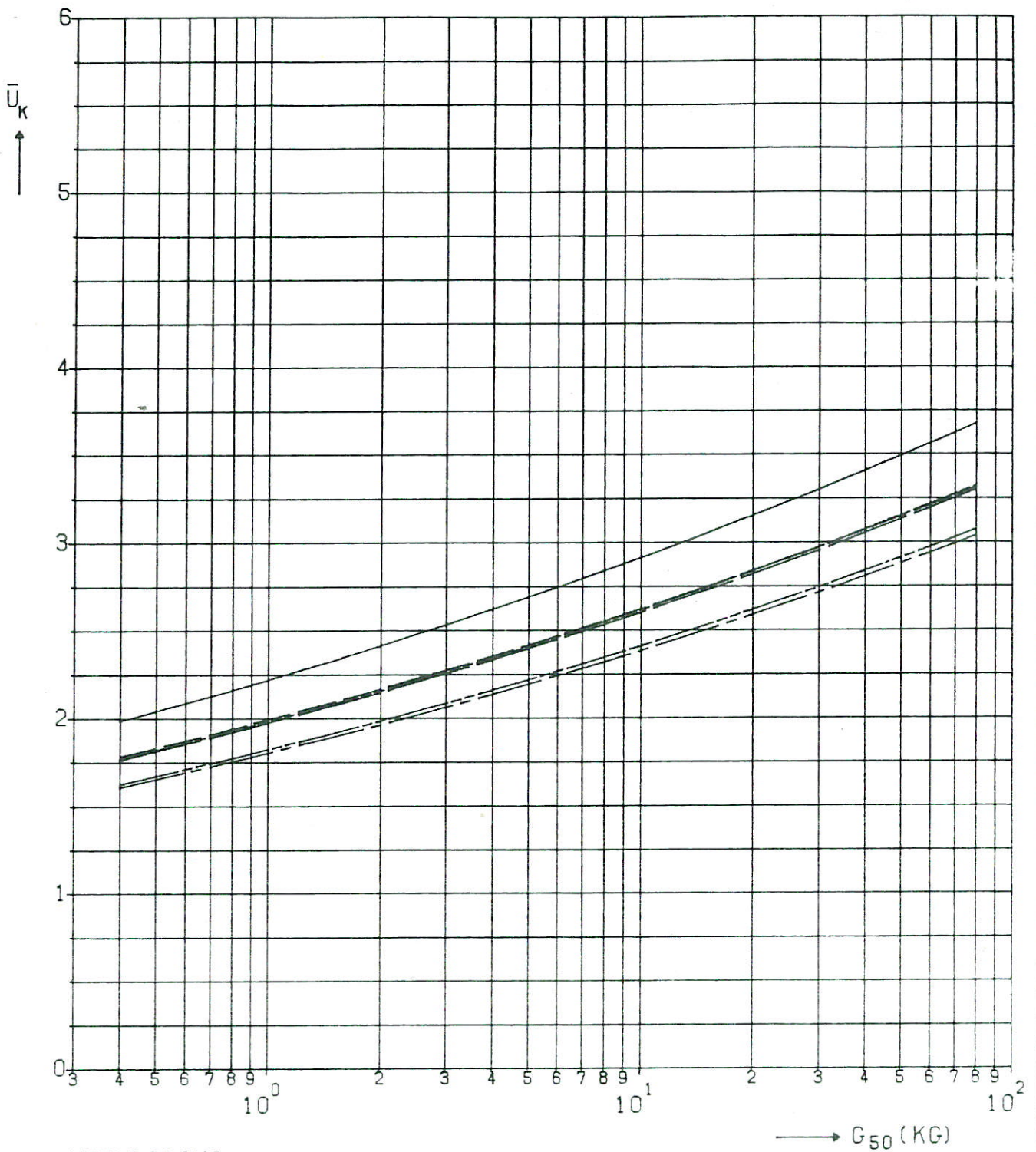
STROOMBESTENDIGHEID BOUWFASEN DREMPEL
 HAMMEN , OPBOUWFASE b

$\rho_0 = 2650 \text{ KG/M}^3$

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

M1524-I

FIG. 13



VERKLARING

—————	PLAATS 2	K= 0.55
—————	PLAATS 3	K= 0.47
—————	PLAATS 4	K= 0.41
—————	PLAATS 5	K= 0.42
—————	PLAATS 6	K= 0.46
—————	PLAATS 7	K= 0.48

$$\bar{U}_K = K \bar{U}_{0K}$$

$$\bar{U}_{0K} = 1.3 \text{ LOG} \left(\frac{83 \text{ h}}{(G_{50})^{0.333}} \right) (G_{50})^{0.167}$$

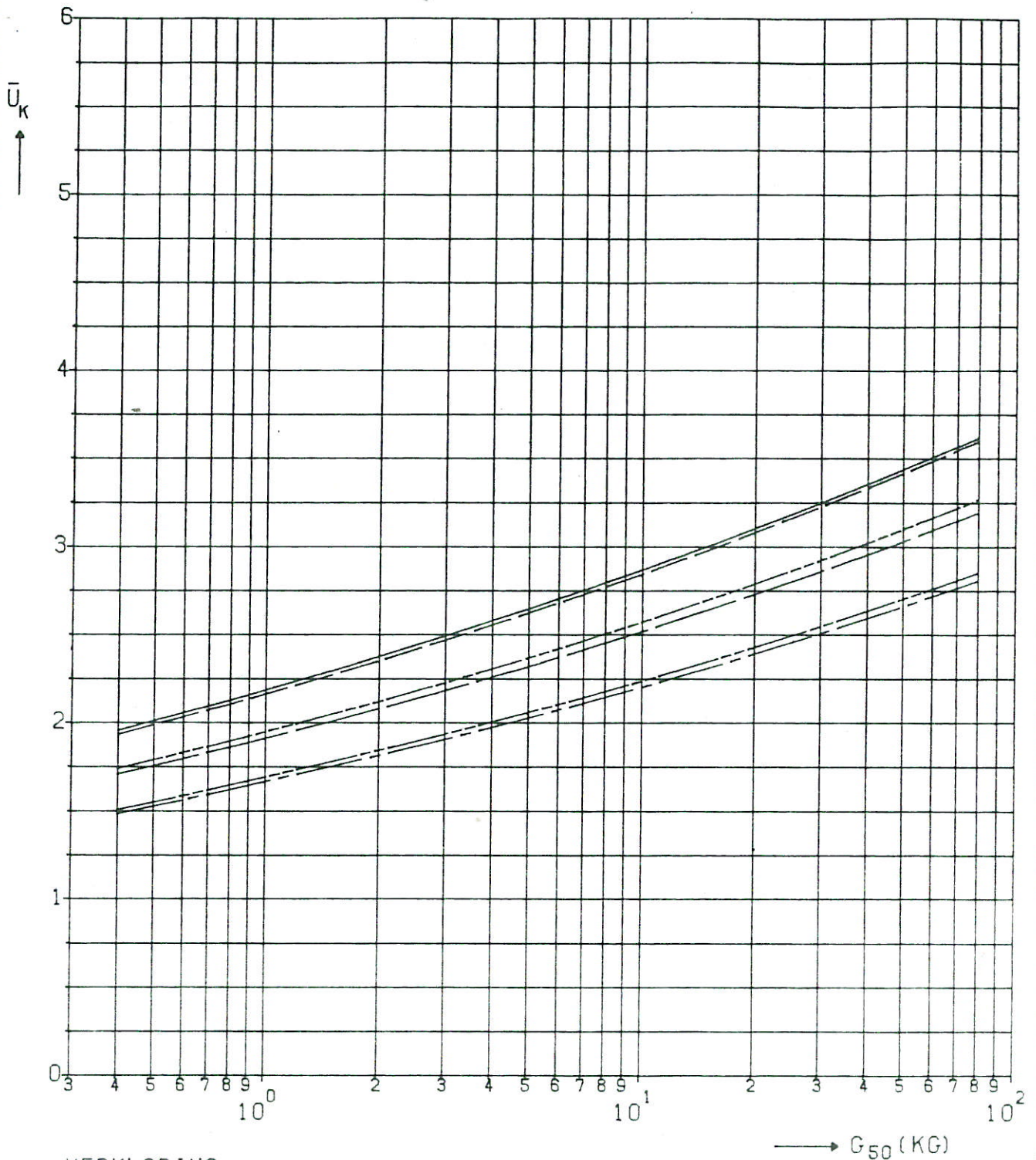
STROOMBESTENDIGHEID BOUWFASEN DREMPEL
HAMMEN , OPBOUWFASE c

$\rho_H = 2650 \text{ KG/M}^3$

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

M1524-I

FIG. 14



VERKLARING

—————	PLAATS 2	K= 0.54
—————	PLAATS 3	K= 0.45
—————	PLAATS 4	K= 0.38
—————	PLAATS 5	K= 0.39
—————	PLAATS 6	K= 0.46
—————	PLAATS 7	K= 0.52

$$\bar{U}_k = K \bar{U}_{0k}$$

$$\bar{U}_{0k} = 1.3 \text{ LOG} \left(\frac{83 \text{ h}}{(G_{50})^{0.333}} \right) (G_{50})^{0.167}$$

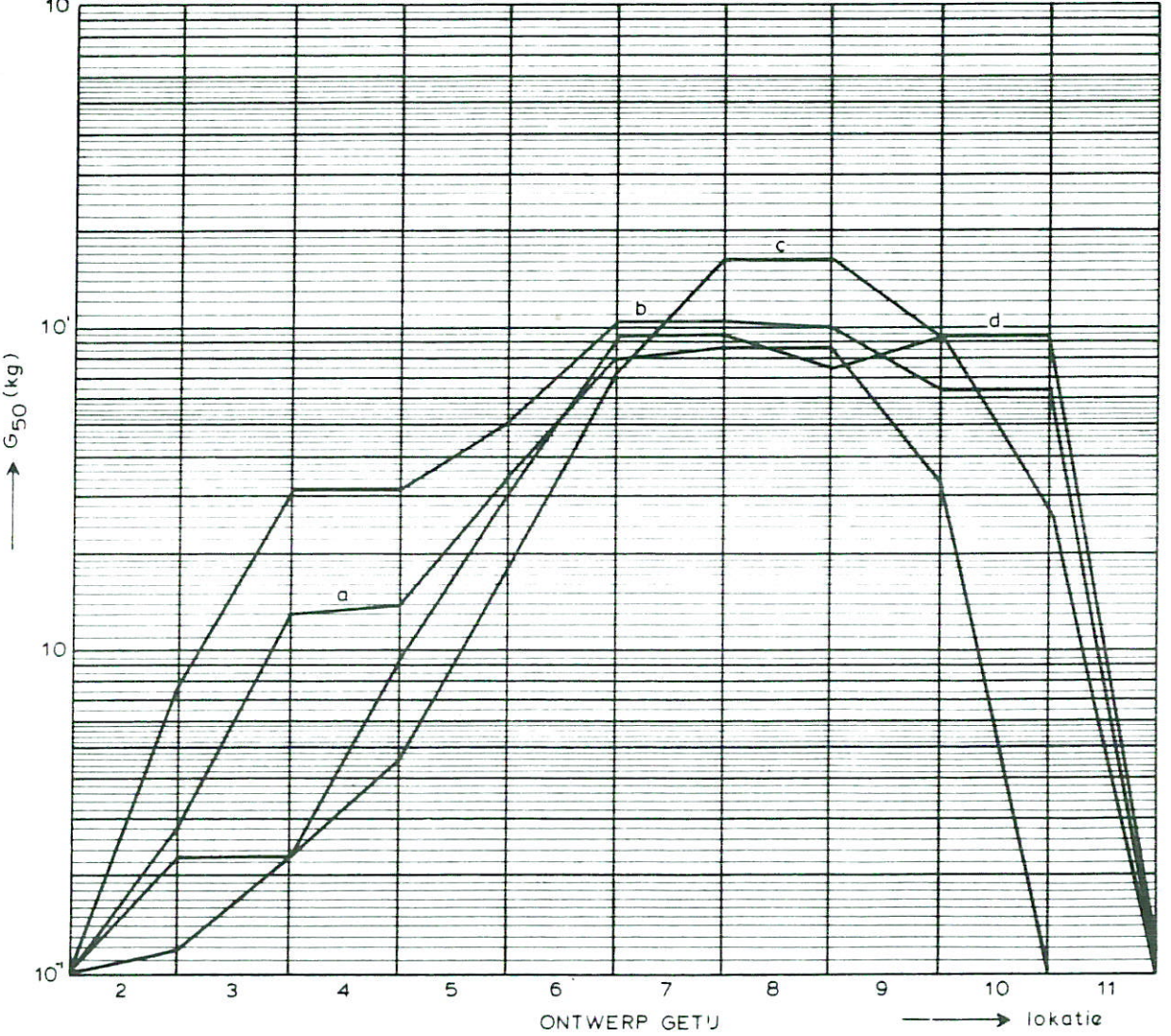
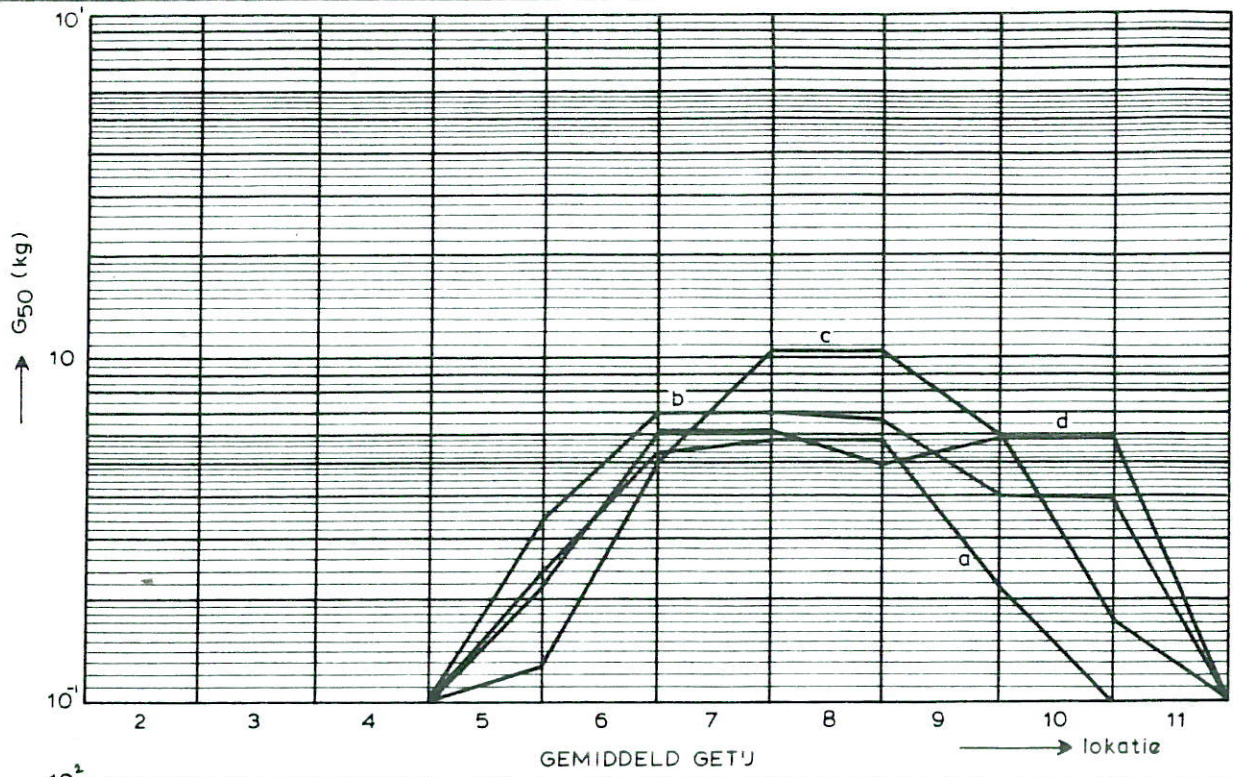
STROOMBESTENDIGHEID BOUWFASEN DREMPEL
 HAMMEN , OPBOUWFASE d

$\rho_H = 2650 \text{ KG/M}^3$

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

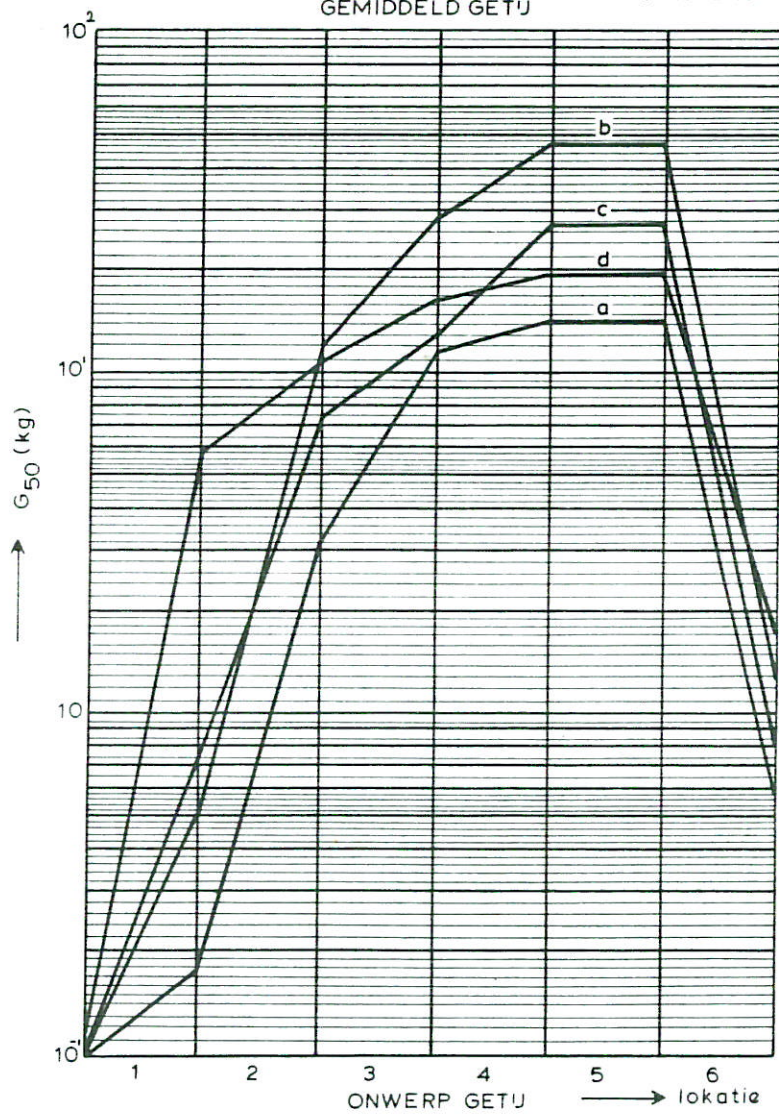
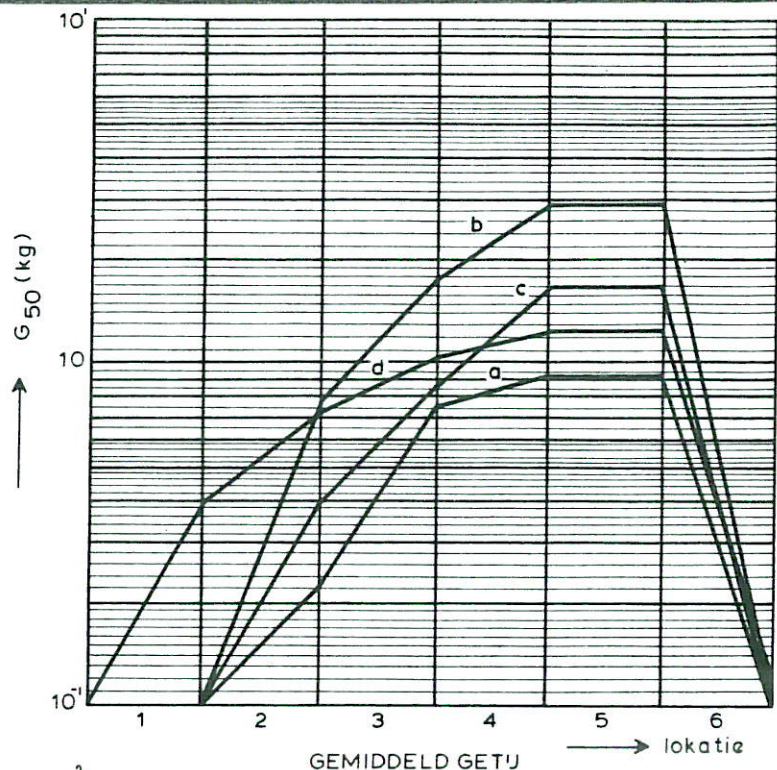
M1524-I

FIG. 15



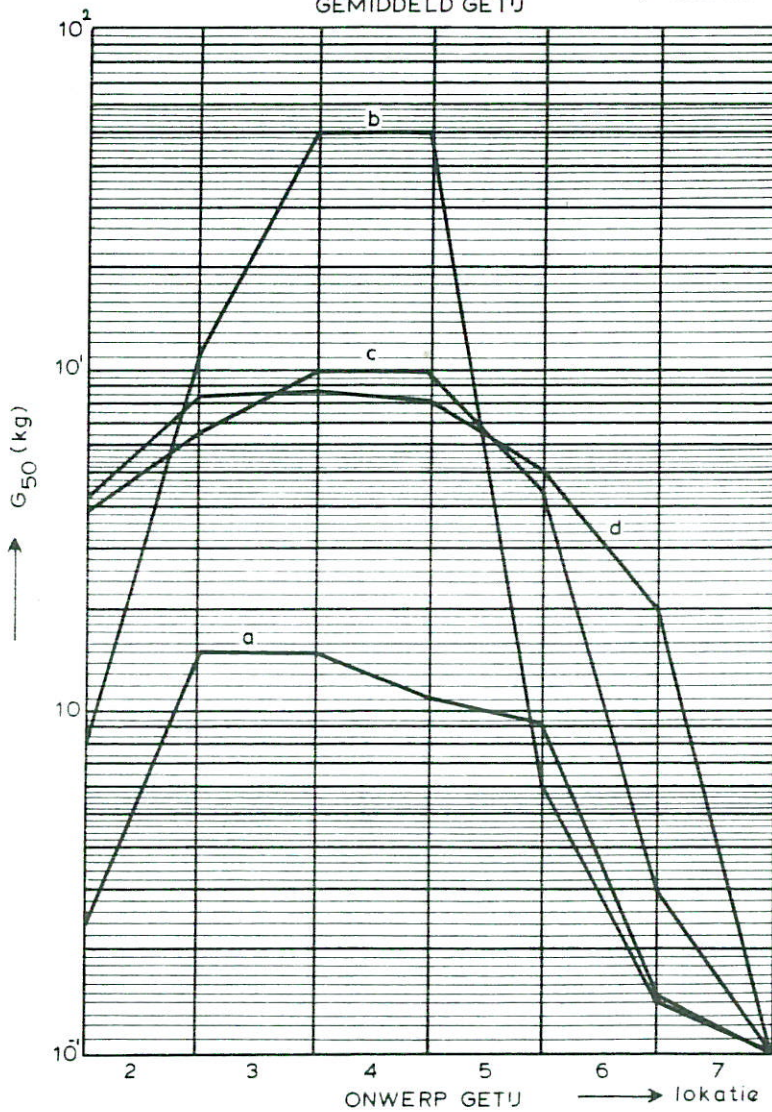
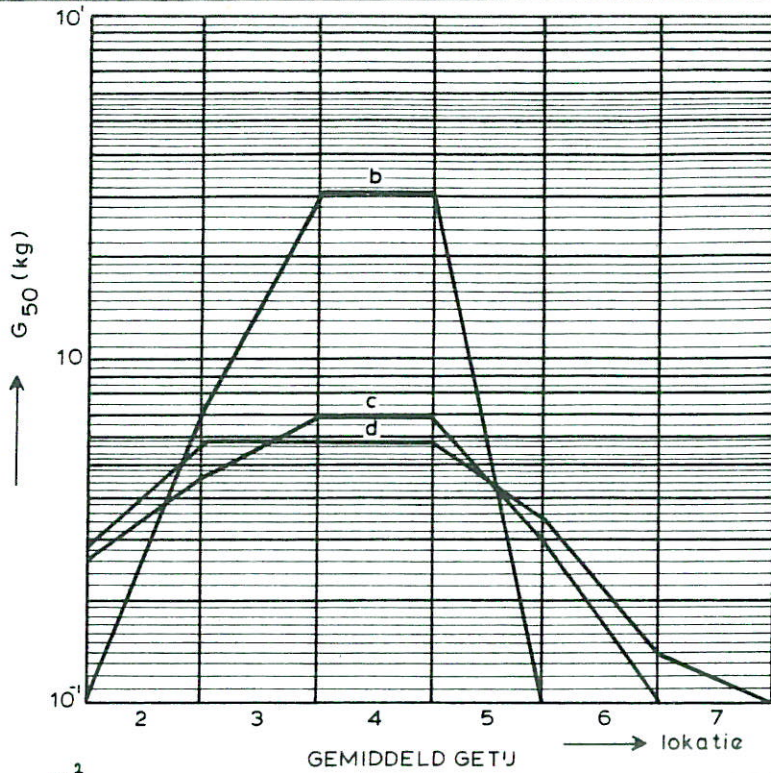
STEENZWAARTEN ROOMPOT *

* enige aantasting



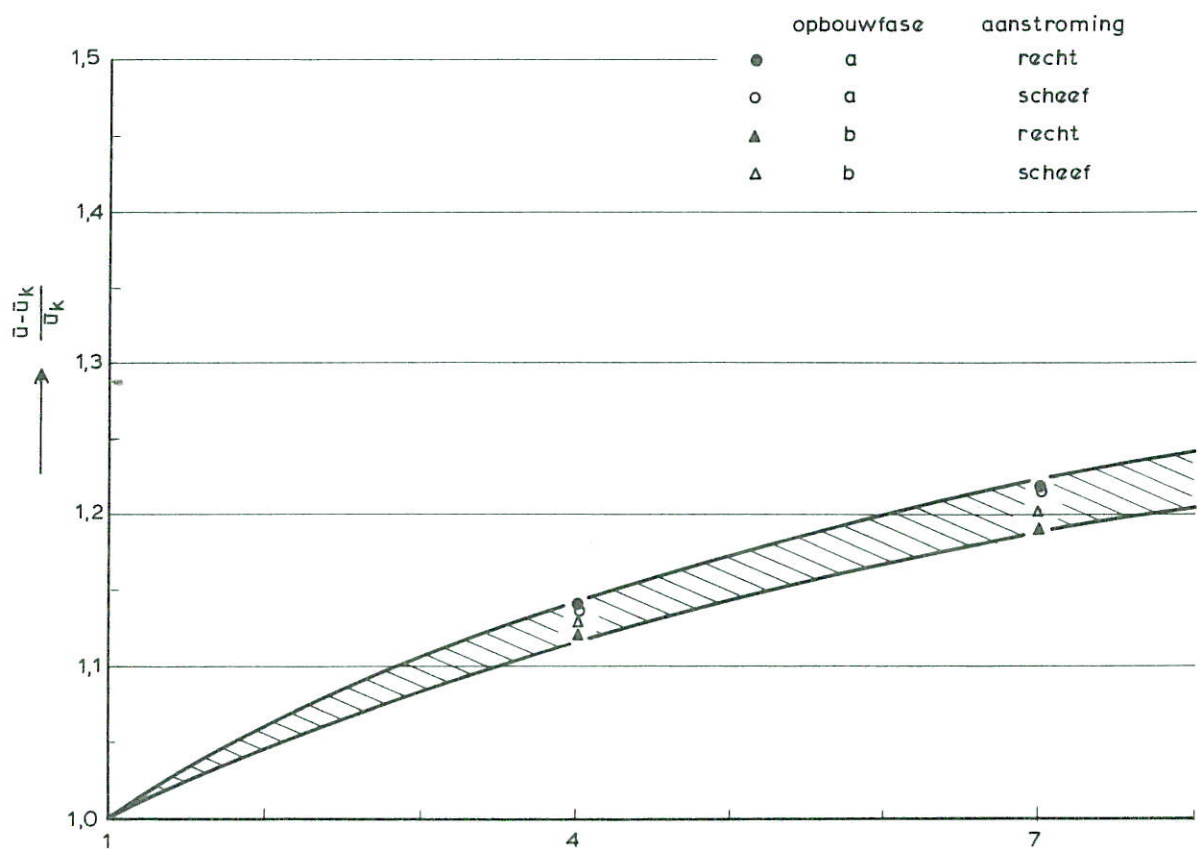
STEENZWAARTEN SCHAAR *

* enige aantasting



STEENZWAARTEN HAMMEN *

* enige aantasting



→ relatieve schade = $\frac{\text{schade bij } \bar{u}}{\text{schade bij } \bar{u}_k}$



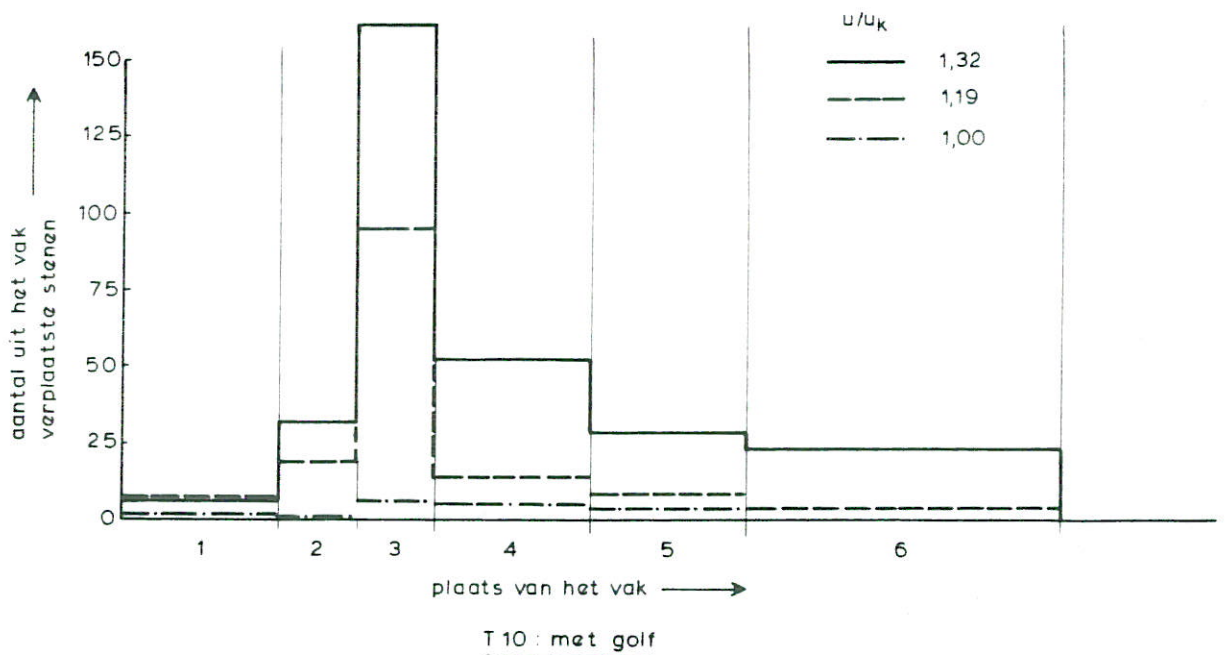
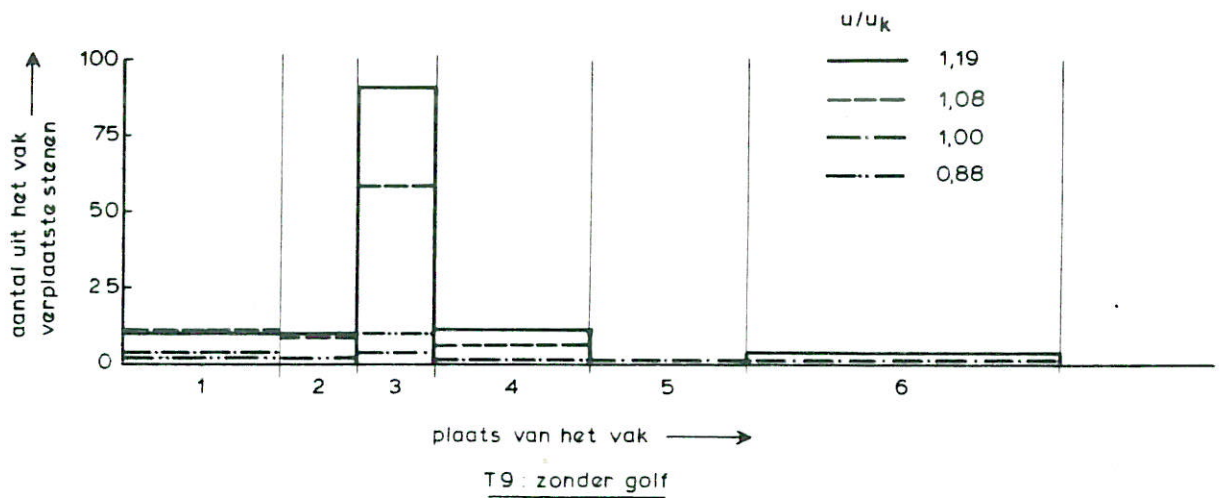
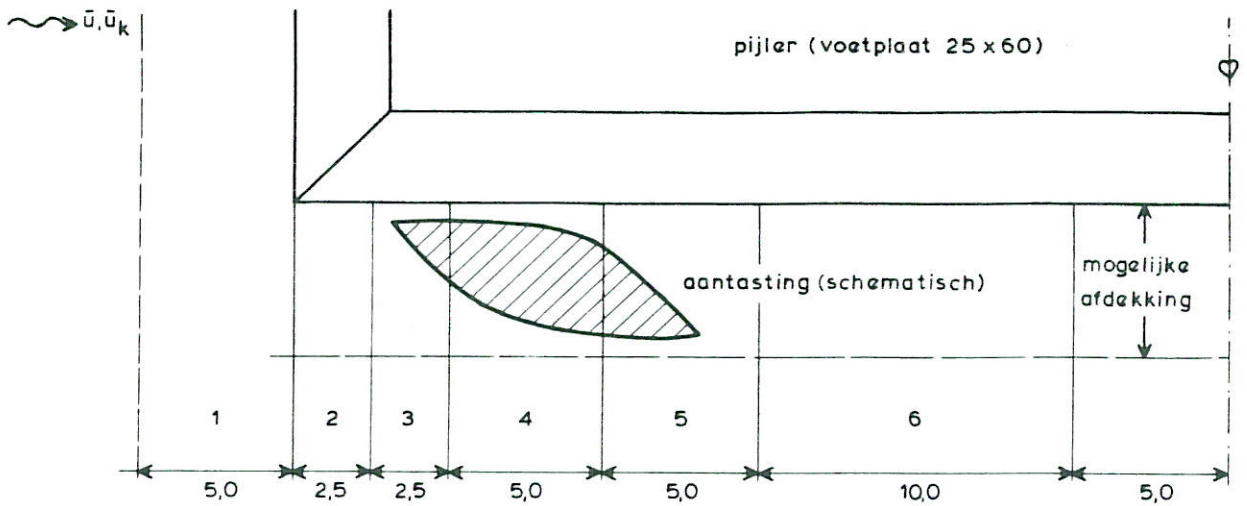
→ aantal verplaatste stenen ($D_n = 0,22 \text{ m}$) aan één zijde van een pijler



→ maximale (theoretische) kuil diepte (m)

bestortingsdiameter $D_n = \sqrt[3]{\frac{G_{50}}{\rho_s}} = 0,22 \text{ m}$

SCHADETOENAME B'J OVERSCHR'JDING VAN \bar{u}_k
OPBOUWFASEN a EN b



STEENVERPLAATSING BIJ TOENEMENDE
STROOMSNELHEID

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

M 1524-I

FIG. 20

p.o. box 177

2600 mh delft

the netherlands