



laboratorium voor grondmechanica delft
delft soil mechanics laboratory

Alternatieve

materialen

als

filterlaag



laboratorium voor grondmechanica

stichting waterbouwkundig laboratorium



postbus 69, 2600 AB delft
stieltjesweg 2, delft
telefoon 015-569223
telex: 38234 soil nl
postgiro: 234342
bank: mees en hope nv delft
rek.nr. 25.92.35.911
(giro: 6400)
k.v.k. S 145040 delft

ALTERNATIEF FILTERMATERIAAL.
RAPPORT

CO-272550/18
september 1985
Adel/AO

Opgesteld in opdracht van
de Deltadienst
te Den Haag

Projectleider: dr. H. den Adel
Projectbegeleider: ir. A. Bezuijen
Afdeling WATERBOUWKUNDIGE CONSTRUCTIES
Afdelingshoofd: ir. P. Lubking





- 0. Inhoudsopgave
 - Lijst van de gebruikte symbolen

- 1. Inleiding

- 2. Vraagstelling

- 3. Het verslag in een notedop
 - 3.1. Inleiding
 - 3.2. Samenvatting

- 4. Filtersterkte
 - 4.1. Buitenland
 - 4.2. Nederland
 - 4.2.1. Verhangen loodrecht op het grensvlak
 - 4.2.2. Verhangen parallel aan het grensvlak
 - 4.2.3. Samengestelde verhangen
 - 4.2.4. Niet stationair
 - 4.2.5. Hellend vlak
 - 4.2.6. Bepaling verhouding D_{15}/d_{50}
 - 4.3. Interne stabiliteit
 - 4.4. Doorlatendheid

- 5. Fysische en chemische eigenschappen
 - 5.1. Staalslakken
 - 5.2. Mijnsteen
 - 5.3. Silex
 - 5.4. Vergelijking
 - 5.5. Chemische eigenschappen, het milieu
 - 5.5.1. LD slakken
 - 5.5.2. Mijnsteen
 - 5.5.3. Silex
 - 5.5.4. Fosforslakken

- 6. Effecten van splijting
 - 6.1. Simpel splijtingsmodel





- 6.2. Verificatie van het model
- 6.3. Gedrag in de tijd
- 6.4. Bepalingen van het model
- 6.5. Effect op de doorlatenheid
- 6.6. Effect op de filterwerking
 - 6.6.1. Effect op de loodrechte filterwerking
 - 6.6.2. Effect op de parallelle filterwerking
- 6.7. Effect op de uitstroming door de spleten
- 6.8. Effect op de interne stabiliteit

- 7. Hydraulische randvoorwaarden
 - 7.1. Verhangen parallel aan het grensvlak
 - 7.2. Verhangen loodrecht op het grensvlak
 - 7.3. Golfklappen

- 8. Effecten t.g.v. verkittigting
 - 8.1. Doorlatendheid
 - 8.2. Filterwerking
 - 8.3. Voorbeeld
 - 8.4. Golfklappen
 - 8.5. Vertikale korrelspanning

- 9. Zeefeisen voor stabiel materiaal
 - 9.1. Probleemstelling
 - 9.1.1. Illustratie
 - 9.2. Ontwerpverhang
 - 9.3. Onderzochte situaties
 - 9.4. Berekening zeefband
 - 9.4.1. De eerste eis
 - 9.4.2. De tweede eis
 - 9.5. Zeefband bij smalle korrelverdelingen
 - 9.6. Zeefband bij brede korrelverdelingen
 - 9.7. Doorlatendheid
 - 9.8. Conclusie en kanttekeningen

- 10. Zeefeisen voor alternatief materiaal





- 10.1. Splitsing en verwerking
 - 10.1.1. Voorspelling van de cumulatieve korrelverdeling
 - 10.1.2. Restricties
 - 10.1.3. Aanbevelingen
- 10.2. Verkitting
 - 10.2.1. Analyse
 - 10.2.2. Restricties
 - 10.2.3. Aanbevelingen
- 11. Casestudie mijnsteen van de Deltagootproeven
 - 11.1. Inleiding
 - 11.2. Uitwerking
 - 11.2.1. Porositeit
 - 11.2.2. Loodrecht kritiek verhang
 - 11.2.3. Parallel kritiek verhang
 - 11.2.4. Interne stabiliteit
 - 11.3. Doorlatendheid
 - 11.4. Conclusies
- 12. Verwachting voor slakken
 - 12.1. Algemeen
 - 12.2. Eenlaagsfilter
 - 12.2.1. LD slakken 0/10 mm
 - 12.2.2. LD slakken 10/80 mm
 - 12.3. Meerlaagsfilter
 - 12.4. Menging van de 10/80 en de 0/10 slakken
 - 12.5. Fosforslakken
 - 12.6. Conclusies
- 13. Aanbevelingen
 - 13.1. Verkennend erosie onderzoek
 - 13.2. Begripsverruimend onderzoek
 - 13.2.1. Verwerking en splitsing
 - 13.2.2. Verkitting
- 14. Referenties





Appendix A

Appendix B





Lijst van de gebruikte symbolen.

A	Oppervlakte doorstroomopening
B	Hulpcoefficient
C	Constante van Chézy
D	Diameter van het filtermateriaal
D_x	Diameter van de zeefopening waarbij x% door de zeef valt
F	Reductie factor
H	Golfhoogte
O_x	Maat voor de opening, waarbij x% door het geotextiel valt
P	Druk
$P(x)$	Massafractie door zeef met diameter x
R	Hydraulische straal
S	Dikte stenen
U	Uniformiteit
V	Volume per seconde door het filter
b	Dikte onderlaag
c	Halveringskans
d	Diameter van het basismateriaal
d_a	Maximale diameter
d_i	Minimale diameter
d_{max}	Maximale diameter
d_{min}	Minimale diameter
e	Ruwheid
f_i	i-de zeeffractie
g	Versnelling van de zwaartekracht
h	Breedte en hoogte van een kanaaltje
i	Verhang
i_l^c	Loodrecht kritiek verhang
i_p^c	Parallel kritiek verhang
i_l	Loodrecht optredend verhang
i_p	Parallel optredend verhang
k	Doorlatendheid
k_t	Turbulente doorlatendheid





n	Porositeit
p	Gradatie
q	Debiet
r	Evenredigheidsconstante (golfklappen)
t	Tijd
v	Watersnelheid
v_*	Kritieke schuifspanningssnelheid volgens Shields
z	Zeeffractie tussen C31.5 en C45
Δ	Relatieve dichtheid van de korrels onder water
α	Macht van het verhang
β	Hellingshoek van het talud
δ	Laminaire sublaag
γ	Filter parameter
γ_w	Volumieke kracht van water
η	Viscositeit
λ	Leklengte
μ	Ruwheid bodem
ν	Kinematische viscositeit
ψ_s	Shields parameter
ρ	Volumieke massa korrels
ρ_w	Volumieke massa water
ρ'_b	Volumieke massa van het basismateriaal, onder water
gemeten	
ϕ	Inwendige hoek van wrijving
σ	Korrelspanning
τ	Relaxatie tijd halveringsproces
χ	Variatie coefficient





1. Inleiding.

Bij de produktie van metalen zoals staal, koper en niet-metalen zoals fosfor komen in ruime hoeveelheden nevenprodukten vrij, in de vorm van slakken. Voor deze slakken wordt meestal wel een afnemer gevonden. Bijvoorbeeld in de wegenbouw worden slakken gebruikt als verharde onderlaag, maar niet alle typen slakken zijn bruikbaar, vanwege onvoldoende stabiliteit en onaantrekkelijkheid ten gevolge van hun soms hoge volumieke massa.

Ook bij de mergelwinning voor de bereiding van van cement blijft veel restmateriaal over. De mergel is voorzien van natuurlijke materialen, die echter niet in het cement gebruikt kunnen worden. Dit restmateriaal, onder de verzamelnaam Silex, wordt reeds een tiental jaren gebruikt in de waterbouw, b.v. als opvullaag onder gezette steen.

Een derde materiaal, dat in ruime mate vooral in het buitenland is opgeslagen is mijnsteen. Dit materiaal is een restprodukt bij de kolenwinning. Mijnsteen kan zeer verschillende samenstellingen hebben, het is een typisch verzamel produkt. De spreiding in de eigenschappen, bijvoorbeeld de verweringsgevoeligheid kan daarom groot zijn. Ook mijnsteen wordt reeds geruime tijd toegepast in de waterbouw bijvoorbeeld als perskade of als tussenlaag onder gezette steen.

De slakken en de mijnsteen vormen zowel voor de producent als voor de overheid een probleem. Dumping van dit materiaal leidt tot extra kosten voor de producent en het wekt vanwege milieuaspecten argwaan bij de kritische burgerij. Vooral in stilstaand of langzaam stromend water kunnen slakken en mijnsteen een bijdrage leveren aan de vervuiling van het water ten gevolge van uitloging. Momenteel wordt deze problematiek nog diepgaand bestudeerd.





In de waterbouw bestaat behoefte aan granulaire materialen, ter voorkoming van erosie van waterkerende constructies. Het is dan logisch om na te gaan, of deze materialen, nog breder dan tot nu toe ook in de waterbouw toegepast kunnen worden. Over de bruikbaarheid, voornamelijk als opvul materiaal, zijn reeds diverse nota's verschenen [1],[2].





2. Vraagstelling.

In het kader van het onderhoud van oude dijken en de constructie van nieuwe zal in de toekomst materiaal nodig zijn, zowel als filter als ook als uitvullaag. Daarom heeft de Deltadienst van Rijkswaterstaat aan het LGM opdracht verleend de volgende vragen te beantwoorden:

- * Is alternatief materiaal bruikbaar als filter, direct op de te beschermen onderlaag?
- * Welke eisen moeten aan het te gebruiken granulaire materiaal gesteld worden?
- * Welke extra eisen moeten aan alternatieve materialen gesteld worden?
- * Wat zijn de knelpunten bij de beoordeling?
- * Is praktisch vervolgonderzoek nodig, en zo ja welk?

De te beschouwen alternatieve materialen zijn staalslakken (LD), mijnsteen en Silex.





3. Het rapport in een notedop.

3.1. Inleiding.

Onderzoek aan steenzettingen heeft aangetoond, dat de stabiliteit van afzonderlijke stenen afhangt van de verhouding in de doorlatendheid van de onderlagen en die van de stenen. Door het pakket stenen doorlatend te maken, wint de zetting aan stabiliteit; dit heeft echter tot gevolg dat er eisen aan het materiaal van de onderlagen gesteld moeten worden. De verhangen in de onderlaag worden immers door de doorlatende steenlaag groter. Om te voorkomen dat de dijk zelf beschadigd wordt, moeten er bovendien eisen voor de grootte van het gebruikte materiaal in de onderlagen worden gesteld.

De beide eisen zijn tegenstrijdig. Enerzijds mag het onder de stenen liggende materiaal niet door de spleten wegspoelen, anderzijds moet het de onderlaag tegen erosie beschermen. Dit houdt in, dat het materiaal voldoende grof moet zijn om niet door de spleten te kunnen verdwijnen, en voldoende fijn om een adequaat filter voor de ondergrond te zijn. Uit deze voorwaarden kunnen waarden afgeleid worden voor de zeefband van het materiaal in de onderlaag.

Een extra complicatie vormt de verweringsgevoeligheid van alternatieve materialen. Door voortschrijdende verwerking kan na verloop van tijd het materiaal zo ver verfijnd zijn, dat het door de spleten kan uitspoelen. Een niet te verontachtzamen effect ten gevolge van de verwerking is de verlaging van de interne stabiliteit van de tussenlaag.

Een hiermee samenhangend effect is verpapping. Dit treedt vooral bij mijnsteen op. Door capillaire werking van het verloederde materiaal ontstaat een klei-achtige slurry met een geringe doorlatendheid. De drainerende werking van de tussenlaag komt hierdoor in gevaar.

Een ander nadelig effect heeft de verkitting van het materiaal; hierdoor kunnen krachtendragende lagen gevormd worden, die onder invloed van een bovenbelasting slechts weinig vervormen.



Bij gedeeltelijke erosie kan dan het filter niet meer voldoende bijzakken, zodat de erosie in versterkte mate kan doorgaan.

De alternatieve materialen zijn gevoeliger voor breuk dan bijvoorbeeld grind. Derhalve hebben de afgeleide eisen betrekking op het materiaal, zoals dit na het aanbrengen aanwezig is. Dit elimineert een voorgeschreven wijze van behandelen van het materiaal.

Dit rapport zal een kwalitatief antwoord zien te geven voor de grenswaarden, die bij de constructie aangehouden moeten worden. Daarnaast worden aanbevelingen gedaan voor nog uit te voeren speurwerk naar die zaken, die met behulp van de theorie slechts gebrekkig kunnen worden beschreven, of waarvoor een verificatie van de theorie noodzakelijk is.

3.2. Samenvatting.

Er is uitgezocht, aan welke eisen de onderlaag van een steenzetting moet voldoen. Hierbij is vastgesteld dat voor stabiel materiaal, dat wil zeggen materiaal dat niet verweert, breekt of verkit, een band kan worden aangegeven, waarbinnen de cumulatieve korrelverdeling van de onderlaag moet liggen. Als slechts één materiaal als filter gebruikt wordt voor een fijnkorrelige basis, voldoet een materiaal met een smalle korrelverdeling als tussenlaag niet. Voor een materiaal met een brede korrelverdeling is dit wel mogelijk. Opgelet dient te worden dat de korrelverdeling niet te breed wordt, omdat dan interne instabiliteit optreedt.

Met een simpel model is berekend hoe de korrelverdeling van een aan verwerking onderhevig materiaal er na een aantal jaren zal uitzien. Het model voorspelt dat het materiaal intern instabiel wordt. Er zijn echter onvoldoende gegevens beschikbaar om dit model over een lange tijdsduur te toetsen. Er worden aanbevelingen gegeven hoe onderzoek naar deze verschijnselen kan worden opgezet.

Voor de verkitting van het materiaal, dat wil zeggen de vorming van samenhangende brokken, zijn te weinig gegevens bekend om iets te kunnen voorspellen over het langeduur gedrag. Evenmin is bekend of verkitting optreedt in het diameter gebied, dat aangegeven



- 13 -

is voor stabiele materialen. Aanbevelingen voor onderzoek om dit te toetsen zijn aangegeven.



4. Filtersterkte.

In dit hoofdstuk wordt een overzicht gegeven van de stand van zaken over de bestaande empirische regels voor filterstabiliteit en doorlatendheid. Een aantal begrippen, die veelvuldig bij deze regels gebruikt worden, zijn aangegeven in appendix A.

4.1. Buitenland.

In de loop van de tijd zijn veel filterregels gepubliceerd, verworpen en aangepast. Het merendeel van de experimentele onderzoekingen betreft stromingscondities, waarbij de stromingsrichting loodrecht op het grensvlak tussen de onderlaag (basis) en bovenlaag (filter) staat. De hieruit afgeleide criteria geven aan of bij een opgegeven verhouding van karakteristieke diameters van beide materialen een filter-basisconstructie nog net stabiel is. Hieronder wordt verstaan, dat het basismateriaal niet door het filtermateriaal heen getransporteerd wordt. Het valt op, dat bij deze criteria de porositeit van het filtermateriaal van ondergeschikt belang wordt geacht, in dier voege, dat deze grootheid niet gemeten maar (af)geschat wordt, of gerelateerd aan de maximale droge kritieke dichtheid. Voor stromingscondities parallel aan het grensvlak tussen basis en filter wordt in de buitenlandse literatuur nauwelijks of niets gevonden.

Aan constructies bij stroming parallel aan en voor stroming loodrecht op het scheidingsvlak worden dezelfde voorwaarden gesteld, terwijl toch bekend is, dat de kritieke verhangen aanzienlijk verschillen.

Thanikachalan en Sakthivadivel [3] hebben in het begin van de zeventiger jaren een evaluatie gemaakt van de filtercriteria. Zij legden correlaties tussen de verhoudingen van de diverse karakteristieke diameters zowel van de onder- als bovenlagen. Er is voor de notatie afgesproken, dat met de kleine letter d de diameter van een basisdeeltje bedoeld wordt, en met de grote D de diameter van een filterdeeltje. De index i slaat op het massapercentage, dat door de zeef valt. De volgende relatieve criteria zijn opgesteld:



$$\frac{D_{10}}{d_{10}} < 2.5 \frac{d_{60}}{d_{10}} + 5 \quad (4.1)$$

$$\frac{D_{60}}{D_{10}} > 0.941 \frac{D_{10}}{d_{10}} - 5.65 \quad (4.2)$$

$$\frac{D_{50}}{d_{50}} < 2.4 \frac{D_{60}}{D_{10}} + 8 \quad (4.3)$$

Daarnaast is er nog een absoluut criterium van Kawakami et al [4]:

$$\log \left\{ \frac{D_{10}}{d_{10}} - 2 \right\} < \frac{1.9}{\log(d_{10} - 0.001) + 3} \quad (4.4)$$

met d_{10} in mm. N.B. De ongelijkheden (4.1) t/m (4.4) gelden voor stationaire verhangen, loodrecht op het grensvlak.

De formules 4.1 t/m 4.3 zijn weergegeven in bijlage 4.1. De formules zijn in een vorm gegoten, zodat uitgaande van een bekend basismateriaal, het filtermateriaal kan worden bepaald. Laat gegeven zijn een basismateriaal met $d_{60}/d_{10} = 3$, punt A in bijlage 4.1. Ga nu naar punt B. Dit is nog een stabiele verhouding, bij $D_{10}/d_{10} = 8$. Ga vervolgens naar punt C. Ook dit is een stabiele verhouding, $D_{60}/D_{10} = 13$. Ga dan naar punt D, ook deze is weer stabiel, bij $D_{50}/d_{50} = 19$. Tenslotte moet geverifieerd worden of de combinatie d_{60}/d_{10} en D_{50}/d_{50} nog in het stabiele gebied valt. De punten B, C en D zijn vrij gekozen, punt E ligt door de voorafgaande keuzes vast.

De gegeven criteria zijn erg streng, er is geen transport toegestaan. Deze eisen zijn dus veilig. Het criterium van Kawakami, formule (4.4) is in bijlage 4.2 getekend.

Recente buitenlandse publicaties [5] en [6] aangaande proeven met uniform zand en sterk gegradeerd filtermateriaal voor de constructie van stuwdammen geven aan dat:

$$\frac{D_{15}}{d_{85}} < 9 \quad (4.5)$$



Porositeiten werden niet vermeld, maar de dichtheid bedroeg volgens opgave 80 tot 100% van de maximale droge dichtheid. De metingen zijn echter snel uitgevoerd, zodat een langzaam optredend transport niet als zodanig onderkend is. Formule (4.5) is dus onveilig.

4.2. Nederland.

Door het Oosterschelde project heeft het Nederlandse filteronderzoek een enorme stimulans gekregen. Naast stationaire verhangen loodrecht op en parallel aan het grensvlak, werden ook cyclische verhangen onderzocht. Een goede samenvatting van het recente experimentele filteronderzoek wordt gegeven in [7]. Bij de onderzoeken is veelal wel de porositeit van het filtermateriaal betrokken, omdat deze van essentieel belang bleek te zijn. Daarnaast is niet alleen bepaald of er transport van basismateriaal optrad, maar ook bij welke verhangen er transport ging optreden. Deze benadering laat een aanpak van de dimensionering toe, die aangepast is aan het specifieke ontwerp.

4.2.1. Verhangen loodrecht op het grensvlak.

De criteria voor de verhangen loodrecht op het grensvlak zijn niet in formule vorm uitgedrukt. In bijlage 4.3 zijn de curves uitgezet voor basismateriaal met een d_{50} van 0.15 mm (bovenste curve), 0.22 mm (gestreepte curve) en 0.46 mm (onderste curve). Voor cyclische verhangen loodrecht op het grensvlak zijn twee curves gegeven, zie bijlage 4.4. De bovenste (gestreepte) curve geldt voor een basismateriaal met een d_{50} van 0.15 mm, de onderste curve voor een basismateriaal met een d_{50} van 0.55 mm. De tendens is dat naarmate het basismateriaal grover wordt, het kritieke verhang bij dezelfde parameter $\gamma (=n_p D_{15}/d_{50})$ lager is. De waarden van de cyclische kritieke verhangen zijn op hun beurt lager dan die van de stationaire kritieke verhangen. De uniformiteit van het filtermateriaal bij de proeven bedroeg 1.5 à 4.



4.2.2. Verhangen parallel aan het grensvlak.

Voor de verhangen parallel aan het grensvlak is een empirische formule opgesteld [7]. Deze relateert het kritieke verhang aan de schuifspanningssnelheid volgens Shields, v_* .

$$i_p^c = \left\{ \frac{0.06}{n^3 D_{15}^{1/3}} + 0.001 (n^5 D_{15} / d_{50}^5)^{1/3} \right\} v_*^2 \quad (4.6)$$

v_* wordt bepaald of uit een figuur, of in het geval van zand met behulp van de volgende uitdrukking:

$$v_* = 1.3 d_{50}^{0.57} + 8.3 \times 10^{-8} d_{50}^{-1.2} \quad (4.7)$$

Onlangs is een heranalyse [8] van de proeven uitgevoerd, in termen van kritieke snelheden. Deze heeft geleid tot de "openwaterloop analogie". Er staan aanhalingstekens, omdat nog niet zeker is, dat het om een analogie in de ware zin des woords gaat. Bij de "openwaterloop analogie" wordt een relatie gelegd tussen de kritieke poriesnelheden en de diameters van basis- en filtermateriaal. Het kritieke verhang wordt met behulp van een doorlatendheids formule bepaald. Er wordt een onderscheid gemaakt tussen turbulente, laminaire en overgangsstroming. Voor turbulente en overgangsstroming geldt dat:

$$i_p^c = \frac{0.14 \psi_s \Delta}{e^2} \frac{d_{50}}{D_{15} n^3} \quad (4.8)$$

met

$$\Delta = \rho / \rho_w - 1 \quad (4.9)$$



ψ_s is de Shields parameter, e de ruweheids coefficient, ρ de volumieke massa van het materiaal en ρ_w de volumieke massa van water. Voor fijn basismateriaal ($d_{s_0} < 0.8 \text{ mm}$) is $e=0.2$, voor grof materiaal ($d_{s_0} > 0.2 \text{ mm}$) is $e=0.35$. Voor het type overgangsstroming wordt e afhankelijk van de D_{15} . Hierbij moet echter in rekening worden gebracht, dat de doorlatendheid daarbij ook anders afhangt van D_{15} , dan bij turbulente stroming. Dit wordt tamelijk ingewikkeld, maar als een experimenteel gegeven blijkt nu, dat toch van de turbulente formule (4.7) mag worden gebruik gemaakt, indien voor de e waarde 0.2 wordt ingevuld. Waarom dit kan, is nog onduidelijk.

In [9] wordt een theoretische onderbouw aangegeven voor het bezwijkmechanisme van filters bij parallelle stroming. Er wordt hierbij rekening gehouden met microscopische fluctuaties van de orde grootte van een filterkorrel in de stroming van het water in het filter. Deze veroorzaken in de basis macroscopische fluctuaties, van de orde grootte van veel korrels. Op grond van een bezwijkgedrag, dat met een inwendige wrijvingshoek kan worden gekarakteriseerd wordt een formule voor het kritieke verhang, parallel aan het scheidingsvlak, afgeleid. Een relatie wordt gelegd tussen de schuifspanning en de filtersnelheid, v_f via de doorlatendheid.



$$v_f = 0.25 n_f \left\{ \frac{\pi}{6} \frac{t g \phi}{\eta} \rho_b' g \langle d \rangle (v D_{15})^{1/2} \right\}^{2/3} \quad (4.10)$$

$$i_1^c = \frac{v_f}{C0} + \frac{v_f^2}{C1} \quad (4.11)$$

met

$$C0 = C2 \frac{g D^2}{v} \quad (4.12)$$

$$C1 = \frac{g D}{C3} \quad (4.13)$$

$$C2 = 0.0035 n_f^3 / (1 - n_f)^2 \quad (4.14)$$

$$C3 = 0.14 / n_f^5 \quad (4.15)$$

De resultaten van de drie formules voor het parallelle kritieke verhang zijn weergegeven in bijlage 4.5, bij een vaste filterporositeit van $n_f = 0.4$. Het basis materiaal bezit een mediane diameter van $d_{50} = 0.16$ mm. Formule (4.6) is met vierkantjes aangegeven, formule (4.8) met driehoekjes en formule (4.10) met kruisjes. In het gebied van D_{15}/d_{50} tussen 10 en 100 ontlopen de drie formules elkaar weinig. Voor grote waarden van D_{15}/d_{50} divergeert formule (4.6).

De invloed van de porositeit is vrij groot, zie bijlage 4.6. Dit wordt aangetoond met formule (4.10). De vorm van de korrels uit zich niet in de meetresultaten. Binnen de meetnauwkeurigheid leveren hoekige en ronde korrels dezelfde resultaten.



4.2.3. Samengestelde verhangen.

Voor verhangen, die componenten bezitten, zowel parallel aan als loodrecht op het grensvlak is in [10] op grond van een eenvoudig model een relatie afgeleid tussen de loodrechte en de parallelle component van het kritieke verhang, respectievelijk i_p^c en i_1^c . Deze formule, (4.16) beschrijft echter niet voldoende nauwkeurig het gemeten verband tussen i_p^c en i_1^c .

$$i_1 / i_1^c = 1 - i_p / i_p^c \quad (4.16)$$

De relatie tussen i_1^c en i_p^c is schetsmatig in figuur 1 aangegeven.

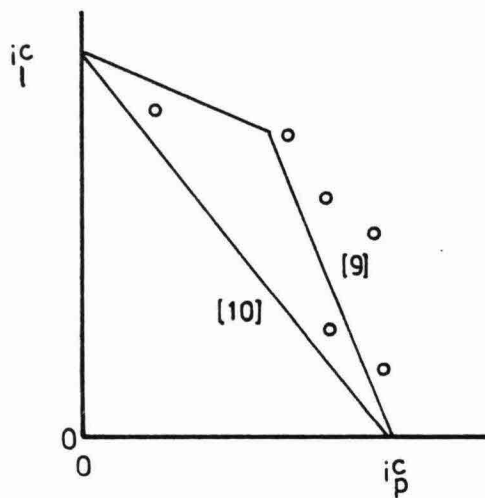


Fig. 1. De relatie tussen de kritieke verhangen bij stroming schuin op het grensvlak. De metingen zijn met rondjes aangegeven.



De metingen tonen aan dat het parallelle kritieke verhang bij lage waarden van het loodrechte verhang nauwelijks beïnvloed wordt. Pas bij een loodrecht verhang van 0.75 neemt het parallelle kritieke verhang snel af naar nul. In [9] wordt een verklaring gegeven voor dit verschijnsel. Bij lage waarden van het loodrechte verhang treedt transport van materiaal op tengevolge van het rollen van afzonderlijke korrels. De invloed van de loodrechte stroming op de bovenste korrels is tamelijk gering. De verticale sleepkracht op een bovenliggende korrel is veel geringer dan op de dieperliggende korrels. Als het loodrechte verhang tamelijk groot is geworden, treedt transport op, omdat de grond afschuift. Er vormt zich een glijvlak op 10 à 20 korrels diep in de basis. Dit is de continuummode. Het loodrechte verhang helpt de grond over de drempel heen om op deze manier te kunnen bezwijken. In [9] wordt aangetoond dat de afhankelijkheid van het loodrechte verhang voor bezwijken in de continuummode veel groter is. De curve knikt, zie figuur 1.

4.2.4. Niet stationair.

Van cyclische effecten is nog weinig bekend. De proeven, die zijn uitgevoerd, zijn onbruikbaar, omdat door de pulserende belasting verdichting van het filter is opgetreden. Het gevolg hiervan is dat de experimenten niet reproduceren. Zeer recent is nieuw experimenteel onderzoek verricht, voornamelijk van een verkennend karakter. Een dominante rol speelt het gedrag van de doorlatendheid als functie van de periode van de cyclische stroming. Bij openwaterlopen is vastgesteld, dat de schuifspanning op de korrels toeneemt bij korter wordende periode en gelijkblijvende watersnelheid. De doorlatendheid neemt echter af, zodat de watersnelheid niet constant blijft. Er zijn dus twee elkaar tegenwerkende effecten. De watersnelheid neemt echter sterker af dan dat de schuifspanning toeneemt. De voorspelling, dat het kritieke verhang bij kleiner wordende golfperiode toeneemt, wordt hierdoor dus bevestigd. De resultaten van de proeven zijn echter nog niet van dien aard, dat uit de metingen een stukje theorie kan worden afgeleid.



4.2.5. Hellend grensvlak.

Het effect van een hellend talud is o.a. in [10] beschreven. De invloed van een helling heeft een verschillende uitwerking op de waarde van de beide kritieke verhangen. Indien de hoek die het grensvlak maakt met een horizontaal vlak β bedraagt, dan geldt voor verhangen loodrecht op het grensvlak:

$$i_1^c(\beta) = i_1^c(0) \cos \beta \quad (4.17)$$

De invloed van de helling is gering. Als $\beta=0.4$ rad, dan is $\cos\beta=0.92$. Voor verhangen parallel aan het grensvlak geldt dat:

$$i_p^c(\beta) = i_p^c(0) \frac{\sin(\phi - \beta)}{\sin(\phi)} \quad (4.18)$$

met ϕ de inwendige wrijvingshoek. Deze laatste formule is dezelfde, die ook bij praktisch onderzoek aan openwaterlopen is aangetoond [8]. De daarbij gevonden waarde van ϕ is vrij hoog (0.8 rad), waarbij aangetekend dient te worden dat $\beta \leq 0.4$ rad was. De verwachting is dat voor $\beta > 0.4$ rad, formule (4.18) niet meer opgaat. Relatie (4.18) is experimenteel voor filters geverifieerd [21]. De waarde van ϕ is eveneens hoog, 1.1 radiaal. De invloed van een helling op het parallelle verhang is vrij groot. Ter illustratie zijn de verhoudingen $i_1^c(\beta) / i_1^c(0)$ en $i_p^c(\beta) / i_p^c(0)$ in bijlage 4.7 getekend.



4.2.6. Bepaling verhouding D_{15}/D_{50} .

Voor de bepaling van D_{15}/d_{50} zijn een zestal bijlagen, 4.8 t/m 4.13, voor d_{50} van 0.15 mm t/m 0.25 mm en voor $d_{50} > 0.82$ mm. De figuur werkt analoog aan bijlage 4.1. Ter verduidelijking wordt de procedure hier schetsmatig aangegeven, via figuur 2. Uit metingen of berekeningen volgen het optredende parallelle en loodrechte verhang, i_p en i_1 . Dit levert het punt A en het punt B. Tengevolge van het loodrechte verhang moet het kritieke verhang dus iets hoger zijn. Deze correctie wordt in het 3e kwadrant uitgevoerd. In het tweede kwadrant wordt de correctie voor het hellende talud aangebracht, waarna via de curve in het eerste kwadrant de D_{15}/d_{50} (punt E) kan worden afgelezen.

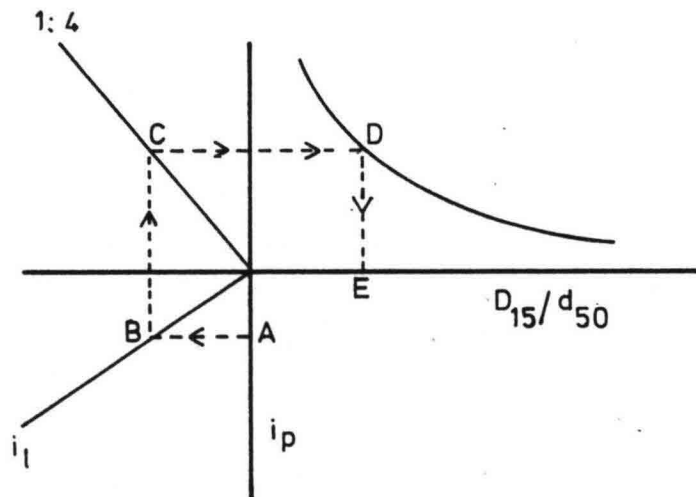


fig. 2. Schematische weergave voor de bepaling voor D_{15}/d_{50} .



4.3. Interne stabiliteit.

Een filter-basisconstructie kan ook falen, indien er in het filter interne erosie optreedt. Hieronder wordt verstaan, dat bijvoorbeeld de kleine korrels in het filter niet voldoende kunnen worden tegengehouden door de eigen filterkorrels. De kleine korrels spoelen dan uit het filter, waardoor de porositeit toeneemt. Tevens wordt de waarde van D_{15} groter, waardoor het kritieke verhang afneemt. Basismateriaal kan door de poriën van het filter worden afgevoerd. Dit verschijnsel treedt vooral op bij sterk gegradeerde materialen.

Aan interne erosie heeft Lubochkov twee moeilijk toegankelijke artikelen gewijd, [12] en [13]. De essentie van het betoog is als volgt:

1. Een zeefcurve wordt in stukken onderverdeeld; de verhouding van de grenzen van een interval bedraagt 2.4. De bedoeling hiervan is, dat korrels uit een interval niet meer door de openingen heen kunnen, die door deeltjes uit het eigen interval gevormd worden.
2. De verhouding tussen de massa's in opvolgende intervallen moet in een bepaald interval (deels empirisch, deels theoretisch bepaald) liggen. De bedoeling hiervan is, dat er voldoende deeltjes zijn om de poriën, gevormd door grote deeltjes, uit het direkt opvolgende interval, te kunnen afsluiten.



Op grond van bovenstaande uitgangspunten worden twee lijnen opgesteld, zie bijlage 4.14. Een materiaal, waarvan de zeefcurve geheel rechts van de onderste lijn ligt, is stabiel. Een zeefcurve, geheel links van de bovenste lijn, is onvoorwaardelijk instabiel. Een curve tussen de twee lijnen in, is stabiel bij niet te grote verhangen. Welke getalwaarden Lubochkov hieronder verstaat, is niet bekend. Een zeefcurve, die aan de kant van de grote deeltjes diameters links van de bovenste curve ligt in het instabiele gebied, maar bij de kleine en middelgrote diameters rechts van de onderste curve, (zie de cirkeltjes in bijlage 4.15), is toch stabiel. Ten eerste zijn de grote korrels veelal krachtendragend, zodat ze ingeklemd liggen en ten tweede zijn er geen poriën, waardoorheen deze korrels kunnen ontsnappen. De grootste kans op interne instabiliteit treedt op, als een interval niet voldoende gevuld is, zie als voorbeeld de curve aangegeven met de kruisjes in bijlage 4.15.

4.4. Doorlatendheid.

Er zijn zeer vele doorlatendheidsformules. Het nadeel is meestal dat ze of in het laminaire gebied gelden of in het turbulente gebied. Ook de meningen over de invloed van de porositeit verschillen nogal. De in [10] afgeleide formule geldt zowel in het laminaire als in het turbulente gebied. Voor water geldt dat:

$$v = 2.2 \times 10^{-5} \frac{(1-n)^2}{n \langle D \rangle} \left\{ \left(1 + 3.6 \times 10^9 \left\{ \frac{n}{1-n} \right\}^4 i \langle D \rangle^3 \right)^{1/2} - 1 \right\} \quad (4.19)$$

waarbij v de watersnelheid (m/s) is gemiddeld over het gehele pakket (een soort debiet), $\langle D \rangle$ de gemiddelde diameter (m), naar aantallen korrels, n de porositeit en i het verhang. De formule is niet toepasbaar voor zand-klei mengsels of voor klei. Een nadeel van deze formule is, dat deze de watersnelheid geeft als functie van het verhang. Voor laminaire stroming wordt via de wet van Darcy de doorlatendheid, k , bepaald:



$$k = v/i \quad (4.20)$$

Voor turbulente of type overgangsstroming wordt veelal een andere (empirische) doorlatendheidswet geponeerd:

$$v = k_t i^\alpha \quad (4.21)$$

met α een getal tussen 0.5 (turbulent) en 1.0 (laminair); k_t is de turbulente doorlatendheid. Voor formule (4.19) kan aangetoond worden dat deze bij turbulente stroming een waarde van α oplevert van 0.5; voor laminaire stroming nadert α naar 1. De formule is in goede overeenstemming met metingen.

De waarde van α wordt gevonden door:

$$\alpha = \frac{d \ln(v)}{d \ln(i)} = \frac{Bi}{2(1 + Bi - \sqrt{1 + Bi})} \quad (4.22)$$

met

$$B = 3.6 \times 10^9 \left\{ \frac{n}{1-n} \right\}^4 \langle D \rangle^3 \quad (4.17)$$

De logaritmes van snelheid en verhang worden gedifferentieerd, omdat α de macht van het verhang is, zie vergelijking (4.21).

De waarde van k_t wordt gevonden door gelijkstelling van de vergelijkingen (4.19) en (4.21):

$$k_t = A \left\{ \sqrt{1+Bi} - 1 \right\} / i^\alpha \quad (4.22)$$

met:

$$A = 2.2 \times 10^{-5} \frac{(1-n)^2}{n \langle D \rangle} \quad (4.25)$$



De gelineariseerde turbulente doorlatendheid, k_1 , bedraagt:

$$k_1 = A \{ \sqrt{(1+Bi)} - 1 \} / i \quad (4.26)$$

De doorlatendheid speelt een dominante rol bij de bepaling van de filterstabiliteit. Via de doorlatendheid wordt de filtersnelheid berekend, die een maat voor de schuifspanning op de korrels is.



5. Fysische en chemische eigenschappen.

In dit hoofdstuk worden de fysische en chemische eigenschappen gezien. De chemische aspecten worden aan het eind van het hoofdstuk behandeld.

5.1. Staalslakken.

Bij de productie van staal komen slakken vrij. De eigenschappen, zoals bestendigheid van de slakken hangen sterk af van het productieproces. Het Linz-Donawitz proces levert echter slakken op, die minder onbestendig zijn, dan andere productieprocessen [14]. De aanbeveling is dan ook om slechts slakken te gebruiken vervaardigd met het Linz-Donawitz proces. Deze slakken worden kortweg LD slakken genoemd. De dichtheid van de slakken is hoger dan die van steen, hetgeen bij de waterbouw een voordeel kan zijn. Als richtwaarde voor de gemiddelde dichtheid wordt 3250 kg/m^3 aangegeven. De sterkte van het materiaal wordt vastgelegd door de snelheid van afkoelen van de slakken, die uit de smelt komen. Gaat deze afkoeling geleidelijk, dan ontstaan er veel minder scheuren en holten, dan wanneer de afkoeling snel verloopt. De sterkte van de slakken is in hoge mate afhankelijk van het voorkomen van deze scheuren en holten. De gemeten druksterkte van één slak varieert tussen de 50 en 400 MPa. Grootheden van een meer vergelijkende waarde, zoals het Los Angeles getal, zijn opgenomen in paragraaf 5.4.

Staalslakken kunnen in een vochtig milieu uiteenvallen. Dit hangt af van de hoeveelheid vrije oxiden. Met water reageren deze tot hydroxiden; hierbij treedt een volumevergroting op. Ingesloten vrije oxiden kunnen op deze manier de slak splijten. Er zal dus een eis aan de gemiddelde hoeveelheid vrije oxiden en hun spreiding moeten worden gesteld, teneinde deze splijting te vermijden of te minimaliseren. Thermische invloeden op de sterkte zijn gering of afwezig.



LD slakken zijn hydraulisch, d.w.z. onder invloed van water binden de fijne delen de grote delen aaneen, het materiaal verkit. Met water gedragen de fijne delen zich als een soort lijm. Er is sprake van een "chemische" reactie. Op deze manier vormt zich een materiaal dat een aanzienlijke druksterkte kan weerstaan. Veel laboratoriumgegevens hierover zijn nog niet bekend. In [14] worden proeven vermeld aangaande een materiaal met een gegeven herkomst en samenstelling. De tendens is, dat de druksterkte van de verkitte slakken nog langzaam in de tijd toeneemt, van ongeveer 0.4 MPa na een week tot 0.6 MPa na een maand. De verkitting vormt een nadeel voor de goede werking van een filter. Dit aspect wordt verder verduidelijkt in hoofdstuk 8.

5.2. Mijnsteen.

De voor Nederland gebruikelijke mijnsteen is vrijgekomen bij de winning van steenkool. Het bestaat deels uit voor de exploitant onbruikbaar gesteente met zeer weinig kool, tot hoeveelheden steenkool, waarvoor het niet meer rendabel is, om de kool eruit te halen. De mijnsteen, die tot nu toe in Nederland is aangeboden, is een sterk gelaagd materiaal. Het is samengesteld uit kleisteen en leisteen. Door consolidatie van klei is kleisteen ontstaan. De dichtheid ligt tussen de 2450 en 2600 kg/m³. Onder atmosferische omstandigheden valt kleisteen uiteen in fijner materiaal: plaatjes van minimaal 2mm. Deze rest is sterk anisotroop. De oorzaak van de verwerking is gelegen in de fluctuaties in de vochtigheidsgraad. Dit is aangetoond door middel van herhaalde bevochtiging en droging. In hoeverre het thermische effect van de droging debet is aan de verwerking, is niet duidelijk, maar ook bij niet thermische vochtigheidsvariatiën treedt verwerking op.



Mijnsteen verloedert. Onder invloed van mechanische belasting verfijnt mijnsteen. Bij toevoeging van water gaat door de verfijning van het materiaal capillaire werking optreden. Er ontstaat cohesief gedrag. Er is daarvoor een optimaal vochtgehalte. Indien er nog meer vocht toestroomt, neemt de cohesie weer af. Er ontstaat dan een papperig materiaal, een slurry. Zonder vocht treedt slechts verfijning op, het water voor de cohesie ontbreekt. Uit experimenten is bekend, dat ook de verdichtingsgraad hierbij een rol speelt. Onverdichte en matig verdichte mijnsteen blijft voldoende doorlatend om water af te voeren. Sterk verdichte mijnsteen wordt zeer ondoorlatend, waardoor onder invloed van water verpapping optreedt.

Mijnsteen zal onder water geen of nauwelijks bruggen kunnen vormen, omdat het optimale vochtgehalte ver overschreden is. Voor krachtendragende bruggen hoeft dus niet gevreesd te worden.

Kleisteel bestaande uit Montmorilloniet kan ten gevolge van reacties met van Cl^- -ionen in zeewater uiteenvallen. Kleisteel uit Illiet en Kaoliniet bleek na twee jaren aan zeewater te zijn blootgesteld, niet gedesintegreerd.



5.3. Silex.

Bij de winning van mergel ten behoeve van de fabricage van cement komt Silex vrij. Dit bestaat voor het grootste gedeelte uit vuursteen en berggrind; de rest bevat het zogeheten tau (zandsteen en kalkzandsteen) en soms harde mergel. De dichtheid van tau is laag, ongeveer 1500 kg/m^3 . De vochtopname is groot, want het bevat veel holten. Silex heeft een dichtheid van 2550 kg/m^3 , vergelijkbaar dus met mijnsteen. De wateropname is gering. Deze vindt voornamelijk aan de oppervlakte plaats, in een dun laagje kalksteen. Silex is resistent voor wisselende atmosferische omstandigheden. Het tau is een tamelijk zacht gesteente. Dooi-vorst variaties veroorzaken in het tau een aanzienlijke verwerking en breuk. Uit analyses is gebleken, dat hoe fijner een uitgezeefde fractie Silex is, des te meer tau deze bevat. Een hoog tau gehalte is nadelig voor de sterkte van het totale materiaal. Silex en tau zijn niet hydraulisch. Onder invloed van tau en kalksteen kan Silex zich cohesief gaan gedragen.

5.4. Vergelijking.

In deze paragraaf worden de grootheden van de drie alternatieve materialen nogmaals vermeld in tabel 5.1. Ook worden grootheden vermeld, die beter tot hun recht komen bij een onderlinge vergelijking van materialen, dan wanneer ze als op zichzelf staande getallen worden gegeven.

Het Los Angeles getal, LAG, geeft aan, in hoeverre een materiaal tegen "malen en breken" kan. Naarmate het getal lager is (minder materiaal door zeef C31.5, zie appendix B), des te beter kan het tegen malen. De verbrijzelings factor, VF, geeft aan, in hoeverre het materiaal een langzaam toenemende dynamische belasting kan weerstaan. Naarmate dit getal hoger is, des te beter is het hiertegen bestand. Bij de dynamische verbrijzelingsfactor, DVF, wordt gezien, in welke mate het materiaal tegen slagbelastingen kan. Hoe lager het getal, des te beter is de weerstand tegen slagen en stoten.



Tabel 5.1

	LD slakken	Mijnsteen	Silex	Tau
ρ (kg/m ³)	3250	2550	2550	1500
Hydraulisch	ja, fijn	nee	nee	nee
LAG (%)	20	---	---	---
VF (%)	85	68 - 74	---	---
DVF (%)	10	---	14	70 - 75
Wateropname %	0.1-10	1 - 5	1	25

Uit deze tabel blijkt, dat LD slakken wat sterker en zwaarder zijn, dan mijnsteen en Silex. Tau is een ongeschikt materiaal. Het is ter vergelijking vermeld. Tau komt echter in Silex voor, dus er dient rekening mee te worden gehouden.



5.5. Chemische eigenschappen, het milieu.

In deze paragraaf worden enige chemische eigenschappen vermeld in verband met de gevolgen voor het milieu bij toepassing van de alternatieve materialen. Een systematisch onderzoek van de effecten op het milieu van een aantal alternatieve materialen is gaande en zal binnenkort worden afgerond. Verder zijn nog enige gegevens bekend van onderzoek dat op "ad hoc" basis is uitgevoerd.

Verontreiniging van het milieu in de waterbouw door alternatief materiaal kan drie oorzaken hebben, te onderscheiden in de volgende categorieën. Er is sprake van primaire verontreiniging, indien het materiaal onder invloed van water in voldoende mate stoffen afstaat die samengevoegd of in combinatie met de reeds aanwezige stoffen schadelijk zijn voor het milieu. Hierbij wordt er van uitgegaan dat het begrip "schadelijk" goed omschreven is. Secundaire verontreiniging ontstaat als in de loop der tijd tijdens de opslag aan het alternatieve materiaal vreemde, daar niet toe horende, stoffen zijn toegevoegd, die schadelijk voor het milieu zijn. Binaire verontreiniging is een vorm van secundaire verontreiniging. Hierbij zijn aan het oorspronkelijke materiaal stoffen toegevoegd waardoor een reactie is ontstaan met schadelijke nevenprodukten. Het belang van deze scheiding is, dat primaire verontreiniging inherent aan het materiaal is, terwijl secundaire en binaire verontreiniging veelal voorkomen kan worden, waardoor toepassing toch plaats kan vinden. Verder is van belang te onderscheiden of het water, zoet of zout is en of er sprake is van stilstaand cq. weinig stromend water of dat er voldoende aan- en afvoer is.

5.5.1. LD slakken.

Het RIZA [23] en het Hygiene Insitut des Ruhr Gebiets [24] hebben vastgesteld, dat LD slakken in zout of zoet water nauwelijks zware metalen afscheiden. Er treedt slechts een geringe verhoging van de pH op, (neutraal water zou iets basisch worden) en ook de afgifte van fluor is voldoende klein.



5.5.2. Mijnsteen.

In het kader van de opvulling met mijnsteen van een zandwinput aan de Maas is onderzoek verricht aan mijnsteen. In zoet water met weinig stroming bleek de concentratie sulfaten te stijgen tot waarden uiteenlopend van enige honderden milligrammen tot enkele grammen per liter. Deze concentraties liggen boven de norm voor sulfaten in IMP-oppervlakte water: maximaal 100 mg/l.

5.5.3. Silex.

Silex bestaat voor het grootste gedeelte uit grind. Dit zal nauwelijks aanleiding kunnen geven tot verontreiniging. In hoeverre Tau en Kalksteen het water verontreinigen is onbekend.

5.5.4. Fosforlakken.

Fosforlakken bevatten 3% fluorverbindingen. In zout water levert dit geen problemen op, ook niet door uitwisseling via micro organismen. Het RIZA ontraadt het gebruik in stilstaand of traag stromend zoet water. Voor stromend water is er op dit moment nog geen eenduidig advies. Toepassing zal voorlopig per situatie beoordeeld moeten worden. De aanwezige natuurlijke radioactiviteit is weliswaar hoog maar hij ligt ver beneden de huidige wettelijke normen. Fosforlakken leveren geen relevante bijdrage aan het aanwezige natuurlijke stralingsniveau.



6. Effecten van splijting.

Van de alternatieve materialen is vooral mijnsteen onderhevig aan splijting tengevolge van atmosferische invloeden. Hierdoor verandert de korrelverdeling. Dit heeft invloed op de filterstabiliteit. De splijting van mijnsteen is in [1] conform de RWS normen slechts aan een gedeelte van de korrelverdeling onderzocht. Voor de bepaling van filterstabiliteit moet echter het gedrag van de gehele korrelverdeling bekend zijn. Om toch iets over de invloed van breuk op de doorlatendheid en de filterwerking te kunnen zeggen, wordt een simpel splijtingsmodel opgezet. Dit wordt getoetst aan de experimenten van de bovengenoemde mijnsteenfractie. Met behulp van dit model kan dan het gedrag van de gehele curve worden benaderd.

6.1. Simpel splijtingsmodel.

Er wordt uitgegaan van een zeeffractie tussen twee zeven, in dit geval C31.5 en C45, zie appendix B. Laat de korrels uit deze fractie splijten onder invloed van interne en externe belastingen. Veronderstel dat bij een splijting de korrel in twee gelijke delen breekt. Als de korrels niet al te sterk zijn afgeplat, zijn alle afmetingen van een korrel na drie opeenvolgende splijtingen de helft kleiner geworden. Er zijn acht korrels ontstaan. Deze drie splijtingen worden als één proces beschouwd, al zijn ze dat niet. Dit wordt halvering genoemd. De kans op een halvering, c , hangt van de tijd af, die verstreken is na het aanbrengen van het materiaal en van de mechanische en atmosferische belastingen.

Voor het gemak bij de afleiding wordt nu de kans op splijting gedurende de gehele tijd constant verondersteld. Na die tijd bevindt er zich nog $(1-c)$ -deel van de oorspronkelijke fractie zich tussen de eerstgenoemde zeven; c -deel is gehalveerd, en zou zich tussen de zeven C16 en C22.4 moeten bevinden. Van deze nieuwe fractie zal c -deel inmiddels wederom zijn gehalveerd, dus er resteert $c \times (1-c)$ -deel tussen C16 en C22.4. De rest $c \times c$ -deel zou zich tussen C8 en C11.2 moeten bevinden, maar ook hier zal weer halvering



zijn opgetreden. Dus tussen C8 en C11.2 bevindt zich nog $c \times c \times (1-c)$ -deel. Dit gaat zo door totdat de minimale korreldiameter bereikt is. De fractie, f , na m halveringen bedraagt dus:

$$f(m) = c^m(1-c) \quad (6.1)$$

De fractie na de laatste halvering, n , -er is immers een ondergrens voor de korreldiameters- bedraagt:

$$f(n) = c^n \quad (6.2)$$

Als de oorspronkelijke fractie zich bevond tussen d_{\min} en d_{\max} , dan zijn de diametergrenzen na m halveringen $2^{-m}d_{\min}$ en $2^{-m}d_{\max}$.

De behandeling van een complete zeefcurve gaat analoog. Deel hiertoe eerst de zeefcurve op in allerlei fracties. Hoe een fractie behandeld moet worden, is inmiddels bekend. De hoeveelheid aanwezig materiaal tussen twee zeven kan nu in twee delen worden gesplitst:

1. Oorspronkelijk materiaal. Deze fractie is wat afgenomen.
2. Nieuw materiaal t.g.v. de halveringen. Dit materiaal is na 1,2 of meer halveringen in deze fractie is terecht gekomen. Laat f_i de i -de fractie zijn, zie fig.3.

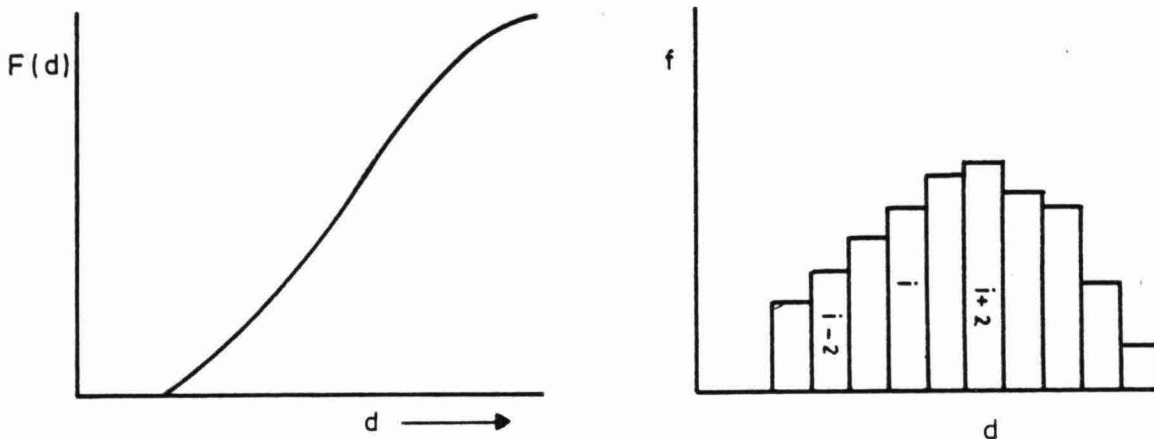


Fig. 3. Zeefcurve en zeeffracties.



De maten van de plaatzeven zijn zo gedimensioneerd, dat na iedere halvering zowel de minimale als de maximale maat twee zeven kleiner geworden is. C90 slaat C63 over maar wordt C45 na een halvering. C63 slaat C45 over maar gaat naar C31.5 na een halvering. Dus de fractie $f_i(t)$ na verloop van tijd bevat

1. $f_i(0) (1-c)$ aan oorspronkelijk materiaal en

2. $\sum_{k=1}^m f_{i+2k}(0) (1-c) c^k$ aan nieuw materiaal, dus:

$$f_i(t) = f_i(0) (1-c) + \sum_{k=1}^m f_{i+2k}(0) (1-c) c^k \quad (6.3)$$

Voor de fracties, die niet meer kunnen halveren worden de bijdragen:

1. $f_i(0)$ aan oorspronkelijk materiaal en

2. $\sum_{k=1}^m f_{i+2k}(0) c^k$ aan nieuw materiaal, dus de totale i -de fractie bedraagt:

$$f_i(t) = f_i(0) + \sum_{k=1}^m f_{i+2k}(0) c^k \quad (6.4)$$

Hierbij moet worden aangetekend, dat in beide gevallen de fracties $f_{i+2k}(0)$ nul kunnen zijn, indien niet van dit soort (grof of fijn) materiaal aanwezig is.

6.2. Verificatie van het model.

Voor de verificatie van het model zijn de gegevens gebruikt van mijnsteen uit "Zollverein" [1]. De gegevens zijn gedigitaliseerd en weergegeven als rondjes in bijlage 6.1. De oorspronkelijke cumulatieve korrelverdeling is getekend als de rechte lijn tussen C31.5 en C45. Er zijn drie lijnen gestippeld. Deze lijnen zijn berekend m.b.v. de simpele theorie voor splijting. De bovenste lijn geldt voor een waarde van $c=0.3$, de middelste voor $c=0.4$ (deze levert de beste resultaten) en de onderste lijn geeft de voorspelling aan voor $c=0.5$. De overeenstemming voor deze mijnsteen is goed. Dit is een indicatie, dat het model redelijk is en dat het



ook toegepast kan worden voor een totale zeefcurve. Ook hiervoor zijn weer de gegevens van de mijn Zollverein gebruikt. De bijbehorende berekening met $c = 0.4$ is grafisch weergegeven in bijlage 6.2. Deze berekening kan niet getoetst worden aan experimentele gegevens. De resultaten staan vermeld in tabel 6.1.

Tabel 6.1

	Onverweerd	Verweerd
D_{15} (mm)	27.6	15.3
D_{50} (mm)	61.2	41.7
$\langle D \rangle$ (mm)	26.3	5.1

De waarden van D_{15} en D_{50} zijn de waarden waarbij 15 respectievelijk 50 procent van de massa door de zeef verdwijnt. $\langle D \rangle$ is de gemiddelde diameter van het materiaal, naar aantal korrels bepaald. Deze volgt uit een vrij lastige berekening, maar uit tabel 6.1 blijkt dat $\langle D \rangle$ kleiner of gelijk is aan D_{15} . Aan het gebruik van D_{15} wordt dan ook de voorkeur gegeven boven D_{50} , als het te ingewikkeld is om $\langle D \rangle$ te bepalen.

6.3. Het gedrag in de tijd.

In het voorafgaande werd de kans op halvering na een zekere tijd gezien. Intuïtief wordt reeds aanvoeld, dat naarmate het materiaal langer blootgesteld wordt aan belastingen en vochtigheidsfluctuaties, de kans op splijting groter wordt. In [16] is experimenteel aangetoond, dat de zeefrest op C31.5, z , uit de fractie tussen C31.5 en C45 als volgt van de tijd afhangt:

$$z = \exp(-t/\tau) \quad (6.5)$$

τ is de relaxatietijd van dit proces. De waarde van τ verschilt van mijn tot mijn. Hoe groter τ is, des te gringer is de invloed van



verwerking op dit materiaal. Aangezien z in het simpele splijtingsmodel direkt aan $1-c$ gerelateerd is, zie bijlage 6.3,

$$c(t) = 1 - z = 1 - \exp(-t/\tau), \quad (6.6)$$

is de afleiding in hoofdstuk 6.1 dus eigenlijk niet correct. Er werd daar immers van uitgegaan, dat gedurende de periode, dat de mijnsteen aan splijting veroorzakende omstandigheden was blootgesteld, de kans op splijting, c , constant was. c is dus het tijd gemiddelde van $c(t)$. De waarde is afhankelijk van de beschouwde tijdsduur, a .

$$c(a) = \frac{\int_0^a dt c(t)}{\int_0^a dt} = 1 - \frac{\tau}{a} (1 - \exp(-a/\tau)) \quad (6.7)$$

Het verloop van $c(a)$ is eveneens getekend in bijlage 6.3, de onderste curve. In [16] wordt afgeleid dat τ ongeveer twee jaar is. Zodoende wordt voor $c(2) \approx 0.37$ gevonden. Deze waarde komt redelijk overeen met de 0.4, die uit bijlage 6.1 volgt.

In principe moet een ingewikkelder probleem worden opgelost, maar aangezien het model in zijn totaliteit bij gebrek aan experimentele gegevens nog niet geverifieerd kan worden, is van de uitwerking voorlopig afgezien. De waarde van c wordt constant verondersteld.

6.4. Beperkingen van het model.

Een van de aannamen is dat de splijtingskans voor alle diameterwaarden dezelfde is. Slechts voor de kleinste korrels, waarvan experimenteel is vastgesteld, dat deze niet meer splijten, is de breekkans gelijk aan nul gesteld. In een reëler model zou de splijtingskans langzaam met de diameter moeten afnemen. Ook van deze uitbreiding is voorlopig afgezien.



De zeefcurve werd ingedeeld in intervallen, begrensd door de waarden van de C-zeven. De verdelingsfunctie van de massa mondt daardoor uit in een grof histogram. Als de verdelingsfunctie benaderd kan worden door middel van een continu differentieerbare functie, wordt de berekende zeefcurve minder hoekig; deze hoekigheid viel reeds in bijlage 6.1 op.

Het nu afgeleide model gaat uit van een aantal benaderingen. Desondanks is het echter wel geschikt voor simpele demonstraties om kwalitatieve voorspellingen te ondersteunen.

6.5. Effect op de doorlatendheid.

De in hoofdstuk 4.4 gebruikte doorlatendheidsformule (4.19) wordt hier toegepast. Door verwerking treden twee effecten op: de gemiddelde diameter van het materiaal en de porositeit nemen af. Beide verlagen de doorlatendheid. Vooral omdat het aanvangsmateriaal grof is, treedt er turbulente stroming op, terwijl na verwerking de stroming van het overgangstype kan zijn. Dit maakt een vergelijking in de vorm van doorlatendheden niet simpel. Daarom worden de filtersnelheden gegeven. Dit is de gemiddelde snelheid, gemeten via het debiet. De aannames voor de vergelijking en de resultaten staan in tabel 6.2.

Tabel 6.2

	Onverweerd	Verweerd
p	5.0	9.7
U	3.3	5.0
n	0.35	0.3
$\langle D \rangle$ (mm)	26.3	5.1
i	0.5	0.5
v_f (mm/s)	52	1.2



De filtersnelheid wordt een factor 4 lager. De verhouding tussen de doorlatendheid van de toplaag en de onderlaag verandert dus eveneens sterk. De waarde van de turbulente doorlatendheid wordt met behulp van de formules (4.19), (4.21) en (4.22) bepaald. Voor onverweerde mijnsteen wordt gevonden:

$$v = k_t i^{0.51} \quad (6.8)$$

$$k_t = 0.075 \text{ (m/s)}$$

en voor verweerde mijnsteen:

$$v = k_t i^{0.75} \quad (6.9)$$

$$k_t = 0.024 \text{ (m/s)}$$

6.6. Effect op de filterwerking.

Ook voor de filterwerking zijn er verschillen. Omdat het materiaal is verfijnd, is het filter in staat om bij hogere verhangen de basis te beschermen, of anders gesteld kan fijner basismateriaal gebruikt worden bij een gelijkblijvend kritiek verhang. De effecten worden voor stroming loodrecht op en parallel aan het grensvlak separaat behandeld.

6.6.1. Effect op de loodrechte filterwerking.

Breng onverweerde mijnsteen aan op een basis bestaande uit zand met een d_{50} van 0.2 mm. De verhouding $n D_{15}/d_{50}$ bedraagt dan ongeveer 48. Het bijbehorende kritieke verhang is ruwweg 1. Voor verweerde mijnsteen wordt de verhouding ≈ 27 , met een onveranderd kritiek verhang.



6.6.2. Effect op de parallelle filterwerking.

Er wordt hetzelfde basismateriaal gebruikt, met een d_{50} van 0.2 mm. Voor de berekening van het kritieke parallelle verhang wordt gebruikt gemaakt van formule (4.10), zie bijlage (4.10). Het parallelle kritieke verhang is dan ongeveer 0.05. Na de verwerking is de waarde van D_{15} een factor twee kleiner geworden, zodat het parallelle kritieke verhang dan is opgelopen tot 0.1. Bij onverweerd materiaal zou een veel grover basis materiaal gebruikt moeten zijn.

6.7. Effect op de uitstroming door de spleten.

Vorkomen dient te worden dat de opvullaag (het filter) tussen de spleten van de steenzetting kan verdwijnen. Dit legt zekere eisen op aan de korrelgrootte van het filtermateriaal. Indien hieraan voldaan is voor onverweerd materiaal, kan door de verfijning de korreldiameter zodanig veel kleiner worden, dat het materiaal moeiteloos kan ontsnappen van onder de stenen. Omdat door de verwerking de gradatie van het materiaal groter wordt, kan er afpleistering optreden. Alleen uit het bovenste gedeelte van de opvullaag stromen de kleinste korrels weg. De grote blijven achter, zodat een soort afdekkende laag ontstaat, waardoor de kleine korrels uit dieper gelegen lagen niet meer passeren. De interne stabiliteit moet dan in feite voor de bescherming zorgen.

6.8. Effect op de interne stabiliteit.

Door de verwerking wordt de gradatie van het materiaal steeds groter. Hierdoor neemt de kans op verlies aan interne stabiliteit toe. Of dit nadelig is, kan het best grafisch getoetst worden, zie bijlage 6.4. Voor diameters grover dan C31.5 loopt de zeefcurve van het verweerde materiaal in het meta-stabiele gebied. Omdat het hier om grove korrels gaat is er bij deze graad van verwerking nog geen gevaar voor verlies aan interne stabiliteit.



7. Hydraulische randvoorwaarden

Dit hoofdstuk heeft niet als oogmerk het probleem van de belastingen op te lossen. Het wordt aan de begeleidingsgroep "Steenzettingen" overgelaten hierover een beslissing te nemen. Er wordt slechts gebruik gemaakt van de kennis op dit gebied, zoals deze bijvoorbeeld in [17] is uiteengezet.

7.1. Verhangen parallel aan het grensvlak.

Het naar beneden gerichte verhang parallel aan het talud in de onderlaag is een functie van de golfhoogte H , de lek lengte, λ , en de taludhelling β :

$$i_p / \sin \beta = f(H/\lambda) \quad (7.1)$$

met:

$$\lambda = \sin \beta \sqrt{(bS)} \sqrt{(k/k')} \quad (7.2)$$

b is de dikte van de onderlaag, S de dikte van de stenen, k de doorlatendheid van de onderlaag, k' die van de stenen. De redactie van vergelijking (7.2) is iets anders dan gebruikelijk. Deze vorm heeft als voordelen dat onmiddellijk duidelijk wordt dat λ een lengtemaat is (de wortel uit het produkt van twee lengtematen) en dat de verhouding van de doorlatendheden slechts van belang is, en dus niet hun absolute waarde. Voor $H/\lambda > 4$ wordt $i_p / \sin \beta \approx 1$. De golfhoogte is dan niet meer van belang. De lek lengte bedraagt enige decimeters, dus voor golven van een meter of hoger geldt dat:

$$i_p \approx \sin \beta \quad (7.3)$$



In het algemeen is de ontwerpgolf groter dan een meter, dus als bovengrens voor het parallelle verhang kan $\sin \beta$ worden aangehouden. De naar boven gerichte component (de helling op) kan nog wat groter zijn. Voor de korrelstabiliteit is deze component van weinig belang. De zwaartekracht werkt bij deze transportrichting tegen, terwijl bij transport het talud af de zwaartekracht meewerkt.

7.2. Verhangen loodrecht op het grensvlak.

Over het verhang loodrecht op het grensvlak is minder bekend. Bij metingen werd de aandacht gericht op de verhangen in het filter [18]. De verhangen in het zand van een dijk zijn hier echter bepalend voor het transport. Uit de metingen valt op te maken dat er in de filterlaag een aanzienlijke demping optreedt van de verhangen. Het verhang loodrecht op het grensvlak in het filter bedraagt ruwweg 0.05. Uit de verhouding van de doorlatendheid van het zand ($k_z = 3 \times 10^{-4}$ m/s) en die van de filterlaag ($k_f = 0.1$ m/s) zou een vertikaal verhang volgen van ongeveer 15. Dit is wel wat veel, om geloofwaardig over te komen.

Het loodrechte verhang is voornamelijk niet stationair. Uit berekeningen met een golfindringings model is bekend dat de demping van niet stationaire verhangen in zand aanmerkelijk is. De verhangen zijn dan juist bovenin nabij de grenslaag basis-filter maximaal.

Uit [19] is bekend, dat het loodrechte verhang ruwweg 0.3 bedraagt. De beïnvloeding op het parallelle verhang is gering, zie hoofdstuk 4.2.3.



7.3. Golfklappen.

Door het breken van golven op het talud ontstaan golfklappen. De intensiteit van deze klappen wordt aangegeven door middel van drukken, P [17]:

$$P = \gamma_w r H, \quad (7.4)$$

met

$$\gamma_w = \rho_w g \quad (7.5)$$

waarbij γ_w de volumieke kracht van water is, H de golfhoogte en r een constante (ruwweg 3), ρ_w de dichtheid van water en g de versnelling van de zwaartekracht. De afhankelijkheid van r van de taludhelling wordt hier verwaarloosd. De golfhoogte varieert voor beschut open water van 1.3 m tot ruwweg 5 m voor buiten water.



8. Effecten t.g.v. verkitting.

Onder invloed van water worden de LD slakken samen gekit door de fijne fracties. Het materiaal kan daardoor trek opnemen en druk weerstaan. Voor de interne stabiliteit van het filter is dit gunstig, maar als het filter niet meer bijzakt in een eventuele erosiegeul, is dit juist ongunstig.

8.1. Doorlatendheid.

De invloed van verkitting op de doorlatendheid hangt sterk af van de aanwezige hoeveelheid fijn materiaal. Indien weinig fijn materiaal aanwezig is, zullen de wat grotere slakken aaneengebonden zijn door de kleinere. De poriën zullen in hun algemeenheid open blijven voor waterdoorstroming, zodat de doorlatendheid nauwelijks beïnvloed zal worden. Indien echter veel fijn materiaal aanwezig is en de poriën van de grote slakken opgevuld zijn met fijn materiaal, kan de doorlatendheid door de verkitting afnemen. Metingen hiervan zijn niet mogelijk, omdat door de doorlatendheidsmeting altijd verkitting zal optreden.

8.2. Filterwerking.

Het effect bij filterwerking wordt geïllustreerd met figuur 4.



fig. 4. De effecten van verkitting bij erosie.



Door de verkitting zal het filtermateriaal star worden. Indien nu erosie van de basis optreedt, bijvoorbeeld zand wordt getransporteerd, dan kan het filter in zijn totaliteit veel moeilijker bijzakken, dan wanneer er geen verkitting zou zijn opgetreden. De mate waarin het filter de basis volgt, hangt af van de druksterkte van het materiaal.

8.3. Voorbeeld.

Dit voorbeeld is bedoeld om te illustreren, wat er bij voldoende grote druksterkte bij verkitting van het filter kan optreden. Het staat niet vast dat de berekende waarden in werkelijkheid ook zullen worden vastgesteld. De aannames zijn daarvoor niet voldoende gefundeerd. Laat door het filter water stromen. De parallel optredende verhangen zijn ongeveer gelijk aan de sinus van de helling [17] dus:

$$i_p = \sin \beta. \quad (8.1)$$

kanaaltje nu een gedeelte van het filter af, en bepaal het volume, V , dat per seconde door dit gedeelte stroomt:

$$V = A q = A k_t i_p^\alpha \quad (8.2)$$



A is de oppervlakte van de doorsnijing, q het specifieke debiet, k_t de turbulente doorlatendheid en i het verhang. Laat bijvoorbeeld het deel 0.25 m hoog zijn en 1 m breed. Bij onverweerde mijnsteen, zie hoofdstuk 6, is $k_t \approx 0.075 \text{ m}^{1/2}/\text{s}$ en $\alpha \approx 0.5$. Derhalve is $V \approx 0.01 \text{ m}^3/\text{s}$. Neem nu aan dat het filtermateriaal volledig ondoorlatend is. Tengevolge van erosie vormt zich een kanaaltje in het zand, direkt onder het filter. Door de verkitting zakt het filter niet bij. Dit kanaaltje zal, onder aanname dat het debiet niet verandert, het volume V afvoeren. De vraag is nu: "hoe groot moet dit kanaaltje zijn, zodat de snelheid in het kanaaltje bij de bodem voldoende laag is, dat er geen zand meer wordt getransporteerd?". Ga uit van turbulente stroming. Achteraf moet nog gecontroleerd worden of de stroming inderdaad turbulent is. De gemiddelde snelheid in het kanaaltje wordt beschreven met:

$$\bar{v} = C \sqrt{Ri}, \quad (8.3)$$

waarbij R de hydraulische straal van het kanaaltje is en C de coefficient van Chézy. C wordt gegeven door:

$$C = 18 \log (6R / (\mu + \delta/7)) ; \quad (8.4)$$

μ is de ruwheid van de bodem. Deze wordt gelijkgesteld aan $3d_{50}$; δ is de dikte van de visceuse sublaag. Deze is grof benaderd met 1 mm. Het volume, dat door dit kanaaltje stroomt is:

$$V_k = h^2 v \quad (8.5)$$

Het kanaaltje wordt geschematiseerd door middel van een rechthoekig profiel van h hoog en breed. De hydraulische straal R is dan:

$$R \approx h/4 \quad (8.6)$$



De relatie tussen de kritieke schuifspanningssnelheid v_* en de gemiddelde snelheid, \bar{v} , in het kanaaltje luidt [8]:

$$\bar{v} = \frac{C}{\sqrt{g}} v_* \quad (8.7)$$

met

$$v_* = \{ \psi_S \Delta g d_{50} \}^{1/2} \quad (8.8)$$

g is de versnelling van de zwaartekracht. Δ is gegeven door formule (4.9); ψ_S is de Shieldsparameter, zie bijlage 8.1; d_{50} is de mediane diameter van het zand.

Eis nu dat het volume, dat door het gedeelte van het filter stroomde, voordat verkitting optrad thans geheel door het kanaaltje stroomt:

$$V = V_k \quad (8.9)$$

Door substitutie van de formules (8.4), (8.5), (8.6), (8.7) en (8.8) in (8.9) volgt hieruit:

$$V = 18h^2 \log \left\{ \frac{1.5h}{\mu + \delta/7} \right\} \sqrt{\psi_S \Delta d_{50}} \quad (8.10)$$

h is de onbekende in deze vergelijking; d_{50} bedraagt 0.2 mm, zodat $\psi_S = 0.065$; $\Delta = 1.65$.



Bij oplossing van (8.10) wordt voor de waarde van h ongeveer 20 cm gevonden. Dit houdt in, dat als deze benadering mag worden toegepast, er een geul zich zal vormen in het zand van 20 cm diep en breed. Ter controle wordt het Reynoldsgetal bepaald van deze stroming. De gemiddelde snelheid wordt berekend uit vergelijking (8.5); $\bar{v} = 0.25$ m/s. De hydraulische straal van het kanaal, $R = 0.05$ m, zodat $Re \approx 10^4$. Bij deze waarde is de stroming turbulent, dus de benadering van Chézy mag in dit geval gemaakt worden.

Bij deze berekening dient opgemerkt te worden, dat het een "worst case" situatie betreft. Pas in exorbitante gevallen zal het filter geheel ondoorlatend zijn. Bij slechts een geringe doorlatendheid hoeft niet al het water door het kanaaltje te worden afgevoerd. Filter en basis zijn dan nog voldoende doorlatend, om ook in de drainerende taak bij te dragen. De aanname van slechts één kanaaltje per strekkende meter is volkomen willekeurig. Er is bovendien geen rekening gehouden met een taludhelling. Aan de buitenzijde kan niets van dit kanaaltje opgemerkt worden, omdat het verkitte filter geen zakking vertoont. Ook bij gedeeltelijke verkitting kan extern niet beoordeeld worden, of er erosie van de dijk is opgetreden.

8.4. Golfklappen.

De vraag is gerezen of golfklappen verkitting kunnen verbreken. Het is zinnig om naast elkaar te zetten de druksterkte van bijvoorbeeld slakken en de drukken afkomstig van golfklappen. Deze waarden staan in bijlage 8.2. Hieruit blijkt dat de druksterkte groter is dan de golfdrukken, dus de verkitte lagen kunnen niet gebroken worden door de golfklappen.



8.5. Vertikale korrelspanning.

Er wordt een benadering gemaakt voor de verticale korrelspanning, uitgaande van een laag verzadigde LD-slakken van 0.6m dik, met daarbovenop een laag stenen van 0.2m dik (zie figuur 5).

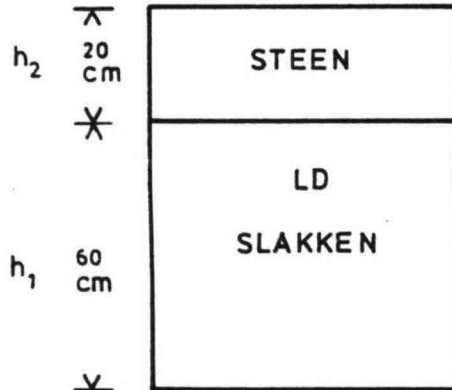


fig. 5. Schets van de opbouw van het pakket.

Uitgaande van een droge dichtheid van 3200 kg/m^3 en een porositeit van 0.4 wordt de natte dichtheid 2300 kg/m^3 . De korrelspanning σ_v , is dan:

$$\sigma_v = g (\rho_{\text{verz}} - \rho_w) h_1 + g \rho_{\text{beton}} h_2 \quad (8.11)$$

ρ_{verz} is de dichtheid van de verzadigde LD-slakken, ρ_{beton} de dichtheid van beton, h_1 de dikte van de laag slakken en h_2 de dikte van de stenen. Met $\rho_{\text{beton}} = 2000 \text{ kg/m}^3$ bedraagt σ_v ongeveer 11 kN/m^2 . Ter vergelijking: de druksterkte van een soort LD-slakken bedraagt ruwweg 500 kN/m^2 , een factor 50 sterker.



9. Zeefeisen voor stabiel materiaal.

9.1. Probleemstelling.

Zoals reeds in hoofdstuk 3 is uiteengezet lijken er tegenstrijdige eisen te zijn voor de karakteristieke diameters van het filtermateriaal.

1. Het moet voldoende klein zijn om de basis te kunnen beschermen.
2. Het moet voldoende groot zijn om niet tussen de stenen door naar buiten te kunnen spoelen.

Voorkomen moet worden, dat deze eisen daadwerkelijk tegenstrijdig zijn.

9.1.1. Illustratie.

In het onderstaande worden schematisch twee tegenstrijdige eisen gecombineerd. Uit de eerste eis volgt dat de diameters van de korrels kleiner moeten zijn dan een zekere waarde. De zeefcurve van het materiaal moet dus links van de (arbitraire) rechte lijn liggen, zie figuur 6a.

De tweede voorwaarde vereist dat de zeefcurve van het filter rechts van de (even zo arbitraire) rechte komt te liggen. De geldige gebieden zijn aangegeven met "in orde", de ongeldige gebieden met "onvoldoende". De "in orde" gebieden zijn gearceerd.

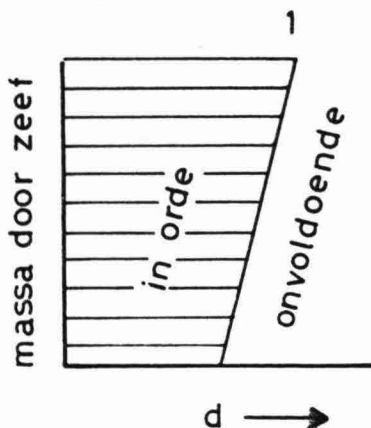


Fig. 6a. Eis 1.
vanwege basis

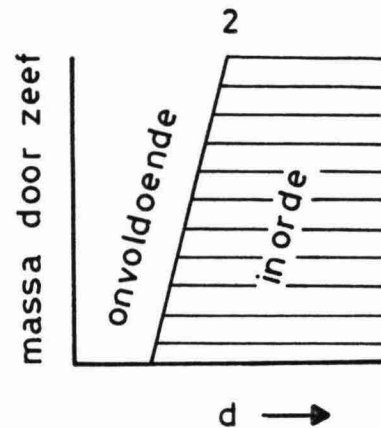


Fig. 6b. Eis 2.
vanwege filter



Er moet echter aan beide eisen worden voldaan. Er zijn dan drie mogelijkheden:

- a). De lijn van eis 2 ligt links van die van eis 1. De gebieden "in orde" overlappen elkaar. In dit overlappende gebied wordt aan beide eisen voldaan, dus dit gebied bakent geldige zeefcurves af, zie figuur 7a.
- b). De lijn van eis 2 valt samen met die van eis 1. Juist op deze lijnen overlappen de gebieden elkaar; er wordt daar aan beide eisen voldaan. Dit soort situaties dient vermeden te worden omdat ze kritiek zijn. Bij geringe afwijkingen van de vereiste rechte wordt de situatie instabiel. Het diagram staat in figuur 7b.
- c). De lijn van eis 2 ligt rechts van de lijn van eis 1. De gebieden overlappen elkaar niet meer. Nergens wordt aan beide eisen voldaan. De eisen zijn dus tegenstrijdig, zie figuur 7c.

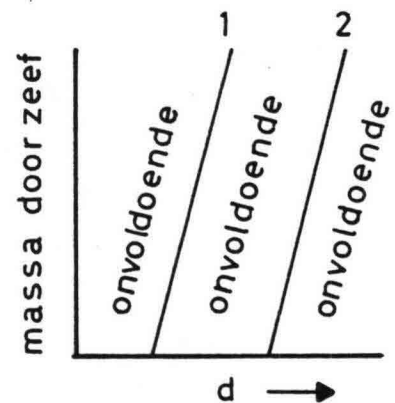
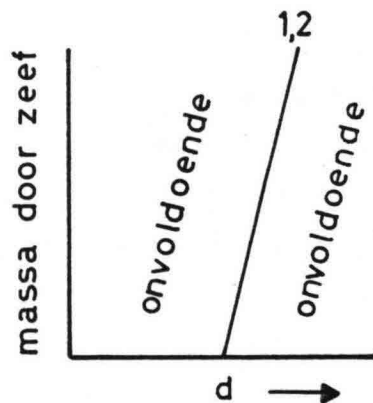
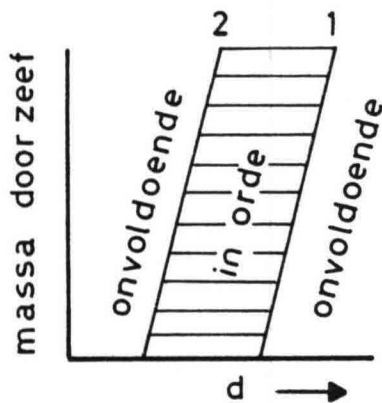


Fig. 7a. Overlappend. Fig. 7b. Kritiek. Fig 7c. Tegenstrijdig.

Indien de gevallen b en c optreden, kan er met slechts één tussenlaag geen stabiele onderlaag worden geconstrueerd. Met twee tussenlagen is dit dan wellicht wel mogelijk. Dit wordt op dezelfde manier onderzocht als bij één tussenlaag.



9.2. Ontwerp verhang.

De in hoofdstuk 7 geformuleerde verhangen worden gebruikt als ontwerp verhangen. Aangezien geen analytische oplossing voor de zeefbanden beschikbaar is, wordt de afbakening van de zeefband grafisch geïllustreerd. Er is geen veiligheidsfactor ingebouwd. Indien dit toch gewenst is, gaat dit het eenvoudigst door het ontwerp verhang te delen door de gewenste veiligheidsfactor.

Bij steenzettingen treden gecombineerde parallelle en loodrechte verhangen op. Daarnaast zijn de verhangen gedeeltelijk niet-stationair. In hoofdstuk 4.2.4 wordt aangetoond, dat het effect van cyclische verhangen nog niet geheel duidelijk is. De schrijver dezes is meer geneigd om er van uit te gaan dat het kritieke verhang door de cyclische effecten zal toenemen. Er wordt hier als compromis aangehouden, dat de kritieke verhangen onveranderd blijven. De loodrechte verhangen in het zand zijn maximaal 0.3. Omdat de waarde van deze verhangen minstens een factor drie kleiner is dan het loodrechte kritieke verhang, volstaat het om het parallelle verhang als maatgevend te beschouwen. De invloed van het loodrechte verhang op het parallelle verhang wordt in hoofdstuk 4.2.3 beschreven.

Ook de taludhelling heeft invloed op de waarde van het parallelle kritieke verhang, zie hoofdstuk 4.2.5. Hiermee en met de mediane korreldiameter van de basis wordt rekening gehouden bij de bepaling van de zeefbanden. Bij de invloed van de taludhelling wordt een ϕ -waarde van 1.0 radiaal aangenomen. Uitgaande van het ontwerp verhang kan nu via de diverse formules de verhouding D_{15}/d_{50} worden berekend. Om het rekenwerk te vereenvoudigen waren de constructie grafieken getekend. Hun werking is in hoofdstuk 4.2.6 uiteengezet. De laatste variabele is de diameter van de openingen in de toplaag. Deze openingen hangen sterk van de gebruikte steensoort af. Hierbij moet aan spleten van ongeveer 2 mm gedacht worden. Basalt of basaltachtige toplagen vertonen meestal wat grotere gaten van 5 mm tot ongeveer 25 mm.



9.3. Onderzochte situaties

Er worden taludhellingen gebruikt, n.l., 1:2, 1:3 en 1:4. Daarnaast wordt er van twee verschillende soorten zand uitgegaan: $d_{50} = 0.2$ mm en $d_{50} = 0.82$ mm. Voor de toplaag zijn er ook nog drie mogelijkheden: spleten van 2 mm, een dichte laag met gaten van 5 mm en een open laag met gaten van 25 mm. Er zijn dan achttien combinaties; deze zijn aangegeven in tabel 9.1.

tabel 9.1.

m	talud			d_{50} (mm)		toplaag gaten (mm)		
	1:2	1:3	1:4	0.2	0.82	2	5	25
1	x			x		x		
2	x			x			x	
3	x			x				x
4	x				x	x		
5	x				x		x	
6	x				x			x
7		x		x		x		
8		x		x			x	
9		x		x				x
10		x			x	x		
11		x			x		x	
12		x			x			x
13			x	x		x		
14			x	x			x	
15			x	x				x
16			x		x	x		
17			x		x		x	
18			x		x			x

Achtereenvolgens worden deze mogelijkheden gezien.



9.4. Berekening zeefband.

9.4.1. De eerste eis.

Bereken met de reductie factoren voor helling en gecombineerde verhangen een totale reductiefactor, $F(<1)$. Als het kritieke verhang bij een horizontaal grensvlak zonder verticale stroming i^c bedraagt, dan verminderen de helling en de loodrechte stroming dit verhang tot Fi^c . Het optredende verhang, i , mag dan Fi^c niet overschreiden, met andere woorden:

$$i < F i^c \quad (9.1)$$

Het kritieke verhang moet dan bij de dimensionering van het filter gelijk zijn aan:

$$i^c < i/F \quad (9.2)$$

Uit het kritieke verhang volgt de waarde van D_{15} bij een (aangenomen) porositeit van het filtermateriaal en een waarde van d_{50} . De gradatie van het filtermateriaal ligt dan nog niet vast, evenals de vorm van de zeefcurve. Hiervoor moeten eveneens weer aannamen worden gemaakt. Indien er geen aannamen zouden worden gemaakt, dan zouden er nog meer mogelijkheden dan de huidige twaalf moeten worden nagegaan. Derhalve wordt arbitrair vastgelegd dat de zeefcurve logaritmisch verloopt. Er zullen twee korrelverdelingen behandeld worden, een brede en een wat smallere. Uit de theorie volgen de karakteristieke diameters. Om de cumulatieve korrelverdelingen snel te kunnen tekenen, is het handig als de minimale en maximale diameters bekend zijn.

In figuur 8 is aangegeven hoe voor een bepaalde korrelverdeling uit de zeefcurve deze waarden bepaald kunnen worden. Door de cumulatieve korrelverdeling op daartoe geschikt grafiek papier uit te zetten tegen de diameter kan meestal een recht middenstuk in de cumulatieve verdeling worden aangetroffen.



Door extrapolatie hiervan worden de waarden van de minimale en maximale diameter gevonden. Voor de berekening zijn formules afgeleid.

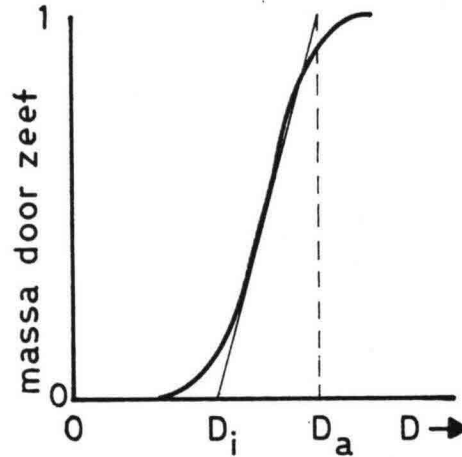


fig. 8 Bepaling van de minimale en maximale diameter.

Omdat de cumulatieve korrelverdeling logaritmisch met de diameter verloopt, geldt voor de fractie $P(x)$ door de zeef met zeefmaat x :

$$P(x) = \{ \ln(x / D_i) \} / \{ \ln(D_a / D_i) \} \quad (9.3)$$

en

$$D_{90}/D_{10} = (D_a / D_i)^{0.8} \quad (9.4)$$

D_i en D_a zijn de minimale en maximale diameters van dit geschematiseerde materiaal. Uit (9.4) volgt dat:

$$D_a = (D_{90}/D_{10})^{1.25} D_i \quad (9.5)$$

Via het kritieke verhang wordt D_{15} bepaald. Vul nu in dat $P(D_{15})=0.15$ in formule (9.3). Daaruit volgt dat:

$$D_i = D_{15} (D_{10}/D_{90})^{0.1875} \quad (9.6)$$



De berekening van D_{15} gaat schematisch als volgt:

1. Bepaal uit (4.18) de invloed van de taludhelling en combineer deze met de correctie voor gecombineerde verhangen.
2. Stel hieruit het parallelle kritieke verhang samen.
3. Bereken met (4.10) de waarde van D_{15} .
4. Bepaal met (9.6) en (9.5) D_i en D_a . De zeefcurve volgens eis 1 kan dan getekend worden.

Deze opzet maakt een geautomatiseerde berekening van de zeefcurves mogelijk. Voorlopig is hiervan nog afgezien. De figuren 6a kunnen nu in principe getekend worden.

9.4.2. De tweede eis.

Voor de tweede eis moet gezien worden of het filtermateriaal voldoende grof is, om niet door de gaten tussen de stenen te kunnen spoelen. De stenen vormen op zich geen filter, de laag is slechts één steen dik. Het is een eerder afdekkende laag, die op een geotextiel lijkt. Er zijn nu diverse eisen ter voorkoming van uitspoeling te formuleren, in opvolgende mate van strengheid:

1. De kleinste korreldiameter van het filter moet groter zijn dan de grootste gaten tussen de stenen.
2. De D_{15} van het filter moet groter zijn dan de grootste gaten tussen de stenen.
3. De gemiddelde diameter van de filterkorrels moet groter zijn dan de grootste gaten tussen de stenen.
4. De grootste korreldiameter van het filter moet groter zijn dan de grootste gaten tussen de stenen.

Wordt een vergelijking gemaakt met de criteria voor de geotextielen, dan resteren er twee mogelijkheden, te weten 2 en 4. Bij geotextielen wordt een verhouding gezien tussen de O_{98} en een D_x . O_{98} is die grootte van de gaten, waarvoor geldt dat 98% van de gaten kleiner is dan O_{98} . De twee criteria maken onderscheid tussen de gradatie van het te beschermen materiaal.



Onder dynamische belastingen en een smalle korrelverdeling geldt [20] dat:

$$O_{98} / D_{15} < 1.0 \quad (9.7)$$

Hierbij wordt toegestaan dat maximaal 15 volumeprocent van het filter uitspoelt.

Een materiaal, dat een brede korrelverdeling heeft, kan afpleistering vertonen. Bij afpleistering treedt slechts transport op van het fijne materiaal. Voor de korrels met kleine diameters kan de kritieke schuifspanningssnelheid reeds overschreden zijn, terwijl voor de grote korrels dit nog niet het geval is. De grote korrels blijven daarom achter in de constructie. Het oorspronkelijke nog niet uitgespoelde materiaal wordt dan afgedekt met een laagje, dat uit grote korrels bestaat. Dit laagje kan als filter beschouwd worden voor het onderliggende onaangetaste materiaal. Dit is nog verduidelijkt in figuur 9.

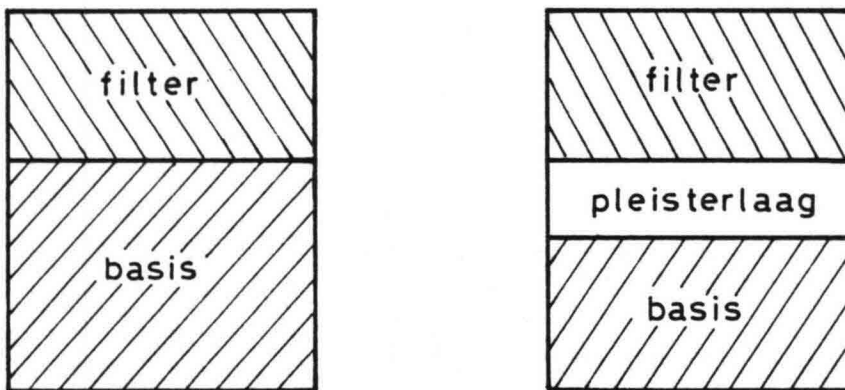


Fig. 9. Afpleistering.

Indien het filtermateriaal voldoende gegradeerd is, (een brede korrelverdeling) zodat afpleistering kan optreden, wordt als eis gesteld dat:

$$O_{98} / D_{85} < 1.0 \quad (9.8)$$



Voldoende gegradeerd betekent in het algemeen dat de gradatie $p > 10$.

Uit deze twee vergelijkingen blijkt dat het voordelig is om uit te gaan van een grote gradatie, $p > 10$, maar de kans op interne instabiliteit en ontmenging neemt hierdoor toe. Met de relaties (9.7) of (9.8) kan eveneens een zeefcurve getekend worden, uitgaande van een in hoofdstuk 9.5 en 9.6 aangenomen gradatie. Dit wordt een curve volgens figuur 6b. De combinatie van deze twee curves levert of een geldige zeefband, of slechts ongeldige gebieden. Omdat de curves parallel lopen, kan al direkt door vergelijking van de waarden van de D_{15} afgeleid worden of er een geschikte zeefband getekend kan worden of dat er sprake is van strijdige eisen. Er is een zeefband als de D_{15} van de eerste eis (bescherming basis) groter is dan die van de tweede (voorkoming van uitspoeling). In alle andere gevallen is er geen zeefband, waarin aan beide eisen kan worden voldaan.

Voor smalle korrelverdelingen wordt een D_{15} vastgesteld. Voor brede korrelverdelingen is dit de D_{85} , zie relatie (9.8). Deze wordt omgerekend naar D_{15} via:

$$D_{15} = (D_{10} / D_{90})^{0.875} D_{85} \quad (9.9)$$

Voor O_{98} wordt de geschatte grootte van het grootste gat genomen.

9.5. Zeefband bij smalle korrelverdelingen.

Voor de gradatie wordt een arbitraire waarde van 3.5 aangehouden. De waarde van de porositeit is niet bekend. Als waarde wordt 0.37 gebruikt. Dit is een gemiddelde voor de maximale droge dichtheid en los gestort materiaal. Omdat de gradatie kleiner dan 10 is, zal er geen afpleistering optreden. Daarom moet gebruik gemaakt worden van criterium (9.7). Hieruit volgt dat:

$$D_{15} > 5 \text{ of } 25 \text{ mm} \quad (9.10)$$



De waarden van D_{15} staan voor beide eisen in tabel 9.2.

tabel 9.2.

m	F	i^C	Eis 1			Eis 2		
			D_{15} (mm)	D_i (mm)	D_a (mm)	D_{15} (mm)	D_i (mm)	D_a (mm)
1	0.52	0.87	1.8	1.5	7.0	2.0	1.6	7.6
2	0.52	0.87	1.8	1.5	7.0	5.0	3.9	19.0
3	0.52	0.87	1.8	1.5	7.0	25.0	20.0	95.0
4	0.52	0.87	4.9	3.8	17.0	2.0	1.6	7.6
5	0.52	0.87	4.9	3.8	17.0	5.0	3.9	19.0
6	0.52	0.87	4.9	3.8	17.0	25.0	20.0	95.0
7	0.63	0.50	2.7	2.2	10.5	2.0	1.6	7.6
8	0.63	0.50	2.7	2.2	10.5	5.0	3.9	19.0
9	0.63	0.50	2.7	2.2	10.5	25.0	20.0	95.0
10	0.63	0.50	4.9	3.8	17.0	2.0	1.6	7.6
11	0.63	0.50	4.9	3.8	17.0	5.0	3.9	19.0
12	0.63	0.50	4.9	3.8	17.0	25.0	20.0	95.0
13	0.69	0.35	3.6	2.9	13.8	2.0	1.6	7.6
14	0.69	0.35	3.6	2.9	13.8	5.0	3.9	19.0
15	0.69	0.35	3.6	2.9	13.8	25.0	20.0	95.0
16	0.69	0.35	4.9	3.8	17.0	2.0	1.6	7.6
17	0.69	0.35	4.9	3.8	17.0	5.0	3.9	19.0
18	0.69	0.35	4.9	3.8	17.0	25.0	20.0	95.0

Het nummer m refereert naar de condities, zoals deze vermeld zijn in tabel 9.1.

De cumulatieve korrelverdeling volgens de eerste eis is getekend, samen met de criteria van Lubochkov in bijlage 9.1. De interne stabiliteit is verzekerd. De diameter is in dimensieloze eenheden ongerekend. Dit vereenvoudigt de mogelijkheid tot vergelijken van twee verschillende korrelverdelingen.



Door te eisen dat D_{15} volgens eis 2 (voorkom uitspoeling tussen de stenen) kleiner moet zijn dan D_{15} volgens eis 1 (voorkom erosie van de basis) kan de filterlaag aan beide voorwaarden voldoen.

Bij inspectie van tabel 9.2 valt op dat slechts bij m is 4, 7, 10, 13 en 16 aan beide voorwaarden kan worden voldaan. Dit houdt in dat een éénlaagsfilter voldoet onder een zetting met spleten van 2 mm. De zeefbanden voor de filterlaag zijn getekend in de bijlagen 9.2 t/m 9.4. In de overige gevallen blijkt echter dat D_{15} van eis 1 altijd kleiner is dan de D_{15} volgens eis 2. Er kan dus geconcludeerd worden dat een eenlaagsfilter met een smalle korrelverdeling niet voldoet tussen een laag gezette stenen, waarvan de O_{98} groter is dan 5 mm en een basis materiaal met een d_{50} kleiner dan 0.82 mm. Wel stabiele combinaties zijn mogelijk als de d_{50} van het basismateriaal groter is dan ongeveer 1 mm en/of de O_{98} van de zetting kleiner is dan 4.5 mm. Bij spleten van 2 mm voldoet dus een éénlaagsfilter wel.

9.6. Zeefband bij brede korrelverdelingen.

De waarde van de gradatie wordt arbitrair vastgesteld op 16. De waarde van de porositeit wordt analoog met het vorige hoofdstuk vastgelegd op 0.3. De gradatie is groter dan 10, daarom kan er afpleistering optreden, dus er wordt nu van voorwaarde (9.8) gebruik gemaakt:

$$D_{85} > 5 \text{ of } 25 \text{ mm} \quad (9.11)$$

Met formule (9.9) wordt D_{85} omgerekend tot een D_{15} waarde. De minimale en maximale diameters volgen analoog. De situaties uit tabel 9.1. zijn weer uitgezet in tabel 9.3. Door de vrij hoge waarde van de gradatie kunnen er problemen met de interne stabiliteit komen. Ook dreigt bij dit soort materiaal het gevaar voor ontmenging.



De waarden van D_{1s} volgend uit de eerste eis (bescherming basis) zijn eveneens vermeld in tabel 9.3.

tabel 9.3.

m	Eis 1			Eis 2		
	D_{1s} (mm)	D_i (mm)	D_a (mm)	D_{1s} (mm)	D_i (mm)	D_a (mm)
1	2.9	1.7	55.8	0.17	0.10	3.3
2	2.9	1.7	55.8	0.44	0.26	8.4
3	2.9	1.7	55.8	2.2	1.31	42.0
4	4.9	2.9	94.0	0.17	0.10	3.3
5	4.9	2.9	94.0	0.44	0.26	8.4
6	4.9	2.9	94.0	2.2	1.31	42.0
7	4.5	2.7	81.7	0.17	0.10	3.3
8	4.5	2.7	81.7	0.44	0.26	8.4
9	4.5	2.7	81.7	2.2	1.31	42.0
10	4.9	2.9	94.0	0.17	0.10	3.3
11	4.9	2.9	94.0	0.44	0.26	8.4
12	4.9	2.9	94.0	2.2	1.31	42.0
13	6.3	3.7	121.0	0.17	0.10	3.3
14	6.3	3.7	121.0	0.44	0.26	8.4
15	6.3	3.7	121.0	2.2	1.31	42.0
16	4.9	2.9	94.0	0.17	0.10	3.3
17	4.9	2.9	94.0	0.44	0.26	8.4
18	4.9	2.9	94.0	2.2	1.31	42.0

Bij inspectie van tabel 9.3 valt op dat nu alle combinties voldoen. De oorzaak hiervan is, dat er afpleistering kan optreden, omdat de korrelverdeling breed is. De zeefbanden zijn getekend in de bijlagen 9.5 t/m 9.8.



9.7. Doorlatendheid.

Voor de doorlatendheid kunnen twee globale eisen worden geformuleerd.

1. De doorlatendheid van de filterlaag moet minimaal enige keren groter zijn dan de doorlatendheid van de basis.
2. De doorlatendheid van de filterlaag moet minimaal enige keren lager zijn dan de doorlatendheid van de toplaag [17].

Aan de eerste eis kan voldaan worden als de verhouding $D_{15} / d_{50} > 3$ is. Als stroming zowel in de basis als in het filter turbulent is, moet $D_{15} / d_{50} > 7$.

De tweede eis komt voort uit de voorwaarden dat $H/\lambda > 8$ moet zijn voor open zettingen [17]. Uit vergelijking (7.2) volgt dan dat:

$$k < (H^2 k') / (64 b S \sin^2 \beta) \quad (9.12)$$

De doorlatendheid k wordt via de vergelijkingen (4.20) en (4.13) omgerekend naar een diameter $\langle D \rangle$, dat wil zeggen bij vaste waarden van de dikte van de onderlaag, taludhelling, toplaag en golfbelasting kan nog een eis voor de diameter van het materiaal in de filterlaag opgesteld worden. Een wat meer praktische benadering is om de dikte van de onderlaag, b , te berekenen, uitgaande van een uitvoerbaar ontwerp en vastliggende materialen:

$$b < (H^2 k') / (64 k S \sin^2 \beta) \quad (9.13)$$

Gebruikmakend van onverweerde mijnsteen uit tabel 6.2, $k \approx 10$ mm/s en $k' \approx 1$ mm/s, een dikte van de toplaag van 0.2 m, een talud van 1:4 en een ontwerpgolf van 1.3 m volgt hieruit dat $b < 0.2$ m moet zijn. Zowel van vergelijking (9.12) in combinatie met (4.19) en (4.26) als ook (9.13) kunnen ontwerpgrafieken getekend worden.



9.8. Conclusie en kanttekeningen.

Uit de berekeningen volgt dat materialen met een smalle korrelverdeling alleen geschikt zijn om met een éénlaagsfilter de basis te beschermen en ook onder de stenen te blijven bij spleten smaller dan 2 mm. De lagen met een brede korrelverdeling vertonen afpleistering, zodat er een nieuwe filterlaag wordt gevormd, direct onder de toplaag. Deze houdt verdere erosie van de onderlaag tegen. Bij de toetsing, of een materiaal voldoet, moet tevens gelet worden op de helling van cumulatieve korrelverdeling. Deze moet ongeveer gelijk zijn aan de helling van de bandgrenzen. Een te smalle verdeling vertoont immers geen afpleistering en een te brede of onregelmatige verdeling loopt kans intern instabiel te zijn.

Indien het te gebruiken materiaal toch een smalle cumulatieve korrelverdeling heeft, dan moet of een meerlaagsfilter worden toegepast, een beschermend geotextiel voor het basismateriaal, of de toplaag moet smalle spleten hebben. De eisen voor de verschillende lagen van zo'n filters kunnen zo ruim geformuleerd worden, dat het zinvoller is van een specifiek geval (voorhanden zijnde materialen) uit te gaan, in plaats van een algemene opzet.



10. Zeefeisen voor alternatief materiaal.

In dit hoofdstuk wordt analoog aan het vorige hoofdstuk te werk gegaan voor het alternatieve materiaal. Er moeten nu nog twee neveneffecten behandeld worden: splijting (c.q. verwerking) en verkitting. De splijting houdt in, dat het materiaal verfijnt. Voor de stabiliteit van de basis is dit niet erg, maar het materiaal wordt te fijn, om nog door de stenen te worden tegengehouden. De verkitting verhoogt de kans op erosie van de basis. Als de druksterkte gering is, zakt het filter bij die erosie weer bij, zodat het proces wordt verminderd.

In het vorige hoofdstuk is aangetoond, dat slechts materiaal met een brede korrelverdeling in een éénlaagsfilter adequaat kan functioneren. Daarom wordt er voor het alternatieve materiaal, slechts van brede verdelingen uitgegaan, waarin afpleistering kan optreden.

10.1. Splijting en verwerking.

10.1.1. Voorspelling van de cumulatieve korrelverdeling.

Indien met het model uit hoofdstuk 6.3 geëxtrapoléerd wordt naar een situatie na 10 jaren, wordt gevonden dat $\bar{c}(10) \approx 0.8$, zie bijlage 6.3. De zeefcurve van de mijnsteen is getekend in bijlage 10.1, aangegeven met kruisjes. De met driehoekjes berekende curve is de schatting na twee jaren. Tevens zijn de originele curve (vierkantjes) en de criteria van Lubochkov voor interne stabiliteit getekend. Op grond van de extrapolatie met het simpele zakkingsmodel wordt voorspeld dat na 10 jaren het verweerde materiaal niet meer intern stabiel is. De fijne fracties kunnen door het filter uitspoelen. Deze fijne fracties zijn tevens voldoende klein, om tussen de stenen door te kunnen verdwijnen.



10.1.2. Restricties.

Uit bovenstaande analyse volgt dat na een tiental jaren het materiaal intern instabiel is geworden. Het model, dat dit voorspelt, is niet perfect. Het halveert steeds een korrel, het middelt over de tijd, de splijtingskans neemt niet af voor kleine diameters en tenslotte is de verdelingsfunctie van het materiaal grof geschematiseerd. Al deze feiten vormen een slechte basis om een betrouwbare extrapolatie naar een tijdsduur van 10 jaren te maken; met andere woorden: de werkelijkheid kan sterk afwijken van de voorspelling.

De uitspoeling van het materiaal zal vooral aan de kant van de fijne korrels van de zeefcurve plaatsvinden. De curve vlakt daar ter plaatse af. In hoeverre dit transport optreedt, kan nog niet aangegeven worden.

10.1.3. Aanbevelingen.

Het is pas zinvol een splijtingsmodel verder te gaan ontwikkelen, als het ook getoetst kan worden aan experimentele gegevens, die vergaard zijn specifiek voor splijting. Ook onderzoek aan in de praktijk gebruikt materiaal kan gebruikt worden, mits de begin condities, zoals zeefcurve, soort materiaal en herkomst eenduidig vastgelegd en te achterhalen zijn. Verlies van materiaal uit de onderlagen is daarbij niet te kwantificeren. Voor de bepaling van de hoeveelheden weggestroomd materiaal bij interne erosie moet gebruik gemaakt worden van een transportmodel in combinatie met experimenten.

10.2. Verkitting.



10.2.1. Analyse.

Uit de beschouwingen in hoofdstuk 8 is gebleken dat volledige ondoorlatendheid van het filter moet worden voorkomen. De stroming van het water in de onderlagen verloopt daarbij geheel in de basis (dijk); aanzienlijke erosie van de basis kan daardoor optreden.

Indien er weinig verkitting optreedt, heeft dit vrijwel geen invloed op de doorlatendheid van de slakken. Er is dan nog voldoende drainerende werking. Verder is de druksterkte van belang. Indien de druksterkte van de orde van grootte is van de verticale gronddruk, kan de binding tussen de slakken verbroken worden, indien onder de slakken lokaal geen grond aanwezig is; er ontbreekt dan steundruk. In hoofdstuk 8.5 is aangetoond, dat bij een pakket slakken van een halve meter dik de gronddruk aldaar ruwweg 10 kN/m^2 bedraagt. Dit is dus een richtwaarde voor de maximaal toelaatbare druksterkte.

10.2.2. Restricties.

Er is geen model dat de verkitting beschrijft. Er zijn immers geen of te weinig gegevens, waaruit zelfs maar een simpel model kan worden afgeleid danwel getoetst. Er ligt dus nog een geheel onderzoeksterrein open.

10.2.3. Aanbevelingen.

Primair dient te worden nagegaan of bij materialen met een D_{15} waarde in het millimeter gebied (2 à 3 mm) verkitting optreedt. Ook praktisch onderzoek aan bestaande constructies kan hierover informatie verschaffen. Indien verkitting bij deze diameters voorkomt, moet de sterkte ervan onderzocht worden, enerzijds als functie van de tijd anderzijds als functie van de concentratie fijn materiaal. Daarnaast moet onderzocht worden hoe de relatie druksterkte t.g.v. verkitting versus korreldiameter verloopt. Met deze gegevens kan dan een model opgesteld en getoetst worden, om het verschijnsel te kwantificeren.



11. Casestudie mijnsteen van de Deltagootproeven.

In dit hoofdstuk zal worden geïllustreerd, in hoeverre de proeven, die met mijnsteen in de Deltagoot gedaan zijn, behandeld kunnen worden met de theorie uit de voorafgaande hoofdstukken.

11.1. Inleiding.

Er zijn experimenten op het Waterloopkundig Laboratorium "de Voorst" uitgevoerd om de doorlatendheid van mijnsteen te bepalen. De doorlatendheid van het in de Deltagoot gebruikte materiaal is op indirecte wijze bepaald uit metingen in de filterbak. De zeefcurves van het zand en de mijnsteen zijn getekend in bijlage 11.1. Het zand is tamelijk steil. Het kan gekarakteriseerd worden door een d_{50} van 0.24 mm. Voor mijnsteen zijn drie curves getekend in opvolgende mate van grofheid. Het grofste materiaal werd in de Deltagoot aangetroffen, het fijnste materiaal dichtbij de bodem van het verdichte pakket in de filterbak. De D_{15} waarden staan in tabel 11.1. Ook de gradatie is daarin vermeld. Voor de monsters 2 en 3 zijn deze geschat uit de extrapolatie van de bekende zeefcurves. De dichtheid van de mijnsteen is door onderdompeling bepaald: $\rho \approx 2600 \text{ kg/m}^3$. De droge dichtheid van het materiaal uit de Deltagoot bedroeg $\rho \approx 1800 \text{ kg/m}^3$.

Tabel 11.1

Monster	D_{15} (mm)	p (-)
1	4.2	30
2	3.5	≈ 40
3	2.7	≈ 60



11.2. Uitwerking.

11.2.1. Porositeit.

Uit de metingen van de dichtheid en de droge dichtheid volgt dat de porositeit, n , van het materiaal uit de Deltagoot 0.3 ± 0.02 bedraagt. Hierbij is de conclusie uit het WL rapport gevolgd, dat $\rho \approx 2600 \text{ kg/m}^3$ bedraagt. Het feit dat er nog andere waarden van de porositeit zijn gevonden, is verdisconteerd in de opgegeven onzekerheid in de porositeit.

11.2.2. Loodrecht kritiek verhang.

De waarden van n (0.3), d_{50} (0.24 mm) en D_{15} zijn nu bekend. Hieruit wordt γ ($= n D_{15} / d_{50}$) berekend, waarmee uit bijlage 4.3 de verhangen kunnen worden afgelezen. De verhangen staan in tabel 11.2. De onzekerheden worden hier veroorzaakt door de afleesnauwkeurigheid in combinatie met het feit dat voor $d_{50} = 0.24 \text{ mm}$ geen curve is gegeven. Er is daarom geïnterpoleerd.

Tabel 11.2

Monster	γ	i_1^c
1	5.4	1.7 ± 0.2
2	4.5	2.8 ± 0.4
3	3.5	5.5 ± 0.7

11.2.3. Parallel kritiek verhang.

Het parallelle kritieke verhang is bepaald met de 10 formule (4.0). De verhangen staan in tabel 11.3

Tabel 11.3

Monster	D_{15} (mm)	i_p^c (-)
1	4.2	0.7 ± 0.1
2	3.5	0.8 ± 0.15
3	2.7	1.0 ± 0.2

Op grond van de helling van het talud en het te verwachten loodrechte verhang wordt de waarde van D_{15}/d_{50} bepaald met behulp van bijlage 4.12 ($d_{50} = 0.25$ mm). De maximale waarde van D_{15} die hieruit berekend wordt, bedraagt 6.5 mm. Omdat de gradatie van het materiaal groot is ($p \approx 40$), kan met het uitspoelcriterium volgens vergelijking (9.11) gewerkt worden. De berekende zeefband staat in tabel 11.4. Een grafische weergave van de zeefband met de zeefcurve van het gebruikte mijnsteen is in bijlage 11.2 gegeven.

Tabel 11.4

O_{max} (mm)	D_{15} (mm)	Eis 1			Eis 2	
		D_i (mm)	D_a (mm)	D_{15} (mm)	D_i (mm)	D_a (mm)
2	6.5	3.2	320	0.08	0.04	4.0
5	6.5	3.2	320	0.2	0.1	10
25	6.5	3.2	320	1.0	0.5	50

Het grootste gedeelte van alle curves ligt binnen de zeefband.

Slechts de stofstaart valt er gedeeltelijk buiten.



11.2.4. Interne stabiliteit.

In bijlage 11.3 is de zeefcurve van het materiaal uit de Deltagoot getekend samen met de criteria van Lubochkov. Als maximale diameter is 100 mm aangehouden. Het fijne deel van het materiaal, 1 tot 10 mm, ligt in het stabiele gedeelte. Het grove deel, 10 tot 100 mm, ligt gedeeltelijk in het instabiele gebied. Volgens het in hoofdstuk 4.3 gestelde kan er dan uitspoeling van dit materiaal optreden. Echter de middenfractie, rond 10 mm, ligt in het gebied, waar het materiaal bij kleine verhangen nog intern stabiel is.

Visuele waarnemingen bij de de doorlatendheidsproeven in de filterbak duiden er op dat bij het vullen met water en het inspoelen van het pakket slechts de stofstaart gedeeltelijk is weggespoeld. De grove fractie kon de bak niet verlaten, omdat een rooster dit verhinderde. Dit rooster is niet verstopt geraakt met fijner materiaal. Het maximale verhang bij deze proeven bedroeg 0.8. Massaverlies werd niet aangetoond; er werden helaas geen metingen daartoe verricht.

11.3. Doorlatendheid.

Op grond van de uit de zeefcurves afgeleide waarden van de D_{15} en de afgeschatte waarde van de porositeit wordt voor monster 2 de volgende doorlatendheidsrelatie voorspeld, geldend rond $i = 0.5$:

$$k_t \approx 0.015 \times i^{0.75} \quad (\text{m/s}). \quad (11.1)$$



CO-272550/18

- 73 -

11.4. Conclusies.

1. De waarde van het loodrechte kritieke verhang is vele malen groter dan de opgetreden loodrechte verhangen.
2. De gebruikte mijnsteen is nog intern stabiel bij niet te grote verhangen. Doorlatendheids metingen bevestigen dit gedeeltelijk.
3. De zeefcurves van de mijnsteen liggen binnen de toelaatbare zeefband voor stabiel materiaal, zoals deze met de theorie berekend kan worden. Het tijdsbestek van de proeven was te kort om verfijning aan te tonen.



12. Verwachting voor slakken.

12.1. Algemeen

Bij de LD-slakken van de firma Pelt & Hooykaas valt op, dat de zeefcurve recht is op \sqrt{d} papier. De zeefkromme is dus een verschoven Fullercurve; deze wordt beschreven d.m.v.:

$$P(x) = \frac{\sqrt{x/D_a} - \sqrt{D_i/D_a}}{1 - \sqrt{D_i/D_a}}, \quad (12.1)$$

zodat als $x = D_y$ geldt dat

$$D_y = D_a \{ 0.01 \times y + (100-y) \times 0.01 \sqrt{D_i/D_a} \}^2 \quad (12.2)$$

y is het massapercentage dat door de zeef valt, met opening D_y . De gradatie, $p (= D_{90}/D_{10})$ bedraagt dus:

$$p = \frac{(0.9 + 0.1 \sqrt{D_i/D_a})^2}{(0.1 + 0.9 \sqrt{D_i/D_a})^2} \quad (12.3)$$

Indien de gradatie of de D_i/D_a verhouding gegeven is, kan bij een opgegeven D_y de waarde van D_a en D_i worden berekend:

$$D_a = \frac{D_y}{(0.01 \times y + 0.01 \times (100-y) \sqrt{D_i/D_a})^2} \quad (12.4)$$

en tamelijk triviaal

$$D_i = (\sqrt{D_i/D_a})^2 D_a \quad (12.5)$$



12.2. Eenlaags filters.

Bekeken zal worden hoe de LD slakken 0/10 mm en 10/80 mm, zie bijlage 12.1, als een eenlaags filter kunnen werken. Er worden twee soorten analyses gemaakt. De ene is vergelijkbaar met de analyse uit hoofdstuk 9. Indien geen stabiele combinatie mogelijk is, wordt in de andere nagegaan aan welke eisen het basismateriaal en de toplaag van stenen moet voldoen, om wel een stabiele combinatie te verkrijgen.

12.2.1. LD slakken 0/10 mm.

De gradatie $p = (D_{90}/D_{10})$ van dit materiaal bedraagt 16. Er kan dus afpleistering optreden. De ondergrens van het materiaal wordt gerelateerd aan een D_{85} waarde (9.11). De vergelijking van onder- en bovengrens wordt vereenvoudigd als de D_{85} wordt omgerekend naar een D_{15} :

$$D_{15} = D_{85} \left\{ \frac{0.15 + 0.85 \sqrt{D_i/D_a}}{0.85 + 0.15 \sqrt{D_i/D_a}} \right\}^2 \quad (12.6)$$

Alle mogelijkheden uit hoofdstuk 9 worden ook voor de slakken nagegaan. Tabel 9.1 wordt hier nogmaals vermeld.



tabel 9.1.

m	talud			d ₅₀ (mm)		toplaag gaten (mm)		
	1:2	1:3	1:4	0.2	0.82	2	5	25
1	x			x		x		
2	x			x			x	
3	x			x				x
4	x				x	x		
5	x				x		x	
6	x				x			x
7		x		x		x		
8		x		x			x	
9		x		x				x
10		x			x	x		
11		x			x		x	
12		x			x			x
13			x	x		x		
14			x	x			x	
15			x	x				x
16			x		x	x		
17			x		x		x	
18			x		x			x

Omdat p groot is, wordt voor de porositeit 0.3 aangenomen. Een tabel, vergelijkbaar met tabel 9.3 kan nu voor de LD slakken 0/10 worden opgezet uitgaande van een verschoven Fullerkromme. De ligging van de zeefcurve, aangegeven met vierkantjes, ten opzichte van de onder en bovengrenzen is grafisch weergegeven in de bijlagen 12.2 t/m 12.5.

De waarden van de eisen staan ook vermeld in tabel 12.1.



tabel 12.1

m	Bovengrens			Ondergrens		
	D_{15} (mm)	D_i (mm)	D_a (mm)	D_{15} (mm)	D_i (mm)	D_a (mm)
1	2.9	0.8	39.4	0.19	0.05	2.6
2	2.9	0.8	39.4	0.48	0.13	6.5
3	2.9	0.8	39.4	2.4	0.6	33.0
4	4.9	1.4	66.5	0.19	0.05	2.6
5	4.9	1.4	66.5	0.48	0.13	6.5
6	4.9	1.4	66.5	2.4	0.6	33.0
7	4.5	1.3	61.0	0.19	0.05	2.6
8	4.5	1.3	61.0	0.48	0.13	6.5
9	4.5	1.3	61.0	2.4	0.6	33.0
10	4.9	1.4	66.5	0.19	0.05	2.6
11	4.9	1.4	66.5	0.48	0.13	6.5
12	4.9	1.4	66.5	2.4	0.6	33.0
13	6.3	1.7	86.0	0.19	0.05	2.6
14	6.3	1.7	86.0	0.48	0.13	6.5
15	6.3	1.7	86.0	2.4	0.6	33.0
16	4.9	1.4	66.5	0.19	0.05	2.6
17	4.9	1.4	66.5	0.48	0.13	6.5
18	4.9	1.4	66.5	2.4	0.6	33.0

Uit de bijlagen blijkt dat deze staalslakken onder dichte zettingen met een $O_{9,8}$ van 2 tot 5 mm nog kunnen voldoen, daarentegen dat het materiaal door een open zetting ($O_{9,8} = 25$ mm) kan uitspoelen. Er is in dit laatste geval aan tweede laag nodig. Steenzettingen met een $O_{9,8}$ kleiner dan 8 mm voldoen nog.

12.2.2. LD slakken 10/80 mm.

Uit hoofdstuk 9 volgt dat de D_{15} van de slakken maximaal 6 mm mag zijn, zie tabel 9.3. De D_{15} waarde van de slakken is echter 16 mm. Er is dus geen stabiele filter-basis combinatie mogelijk; het basis materiaal kan uitspoelen. Er wordt vervolgens nagegaan, wat de diameter van het basismateriaal moet zijn, als er geen uitspoeling mag plaatsvinden. Reeds aangetoond is, dat 0.82 mm te fijn was, dus de stroming is geheel turbulent. De berekende situaties bevinden zich bij een aantal taludhellingen tussen 1:2 en 1:5. Omdat de optredende belasting voor het grove materiaal hoog is, moet het filter geometrisch dicht zijn. De minimale waarde van de d_{50} van de basiskorrels moet dus 2.7 mm zijn.

De gradatie van deze slakken bedraagt 5.5. Deze waarde is te laag om afpleistering te laten optreden. Er moet dus voldaan worden aan criterium (9.10). De karakteristieke waarden van de ondergrens zijn gegeven in tabel 12.2

tabel 12.2

ondergrens		LD slakken		
$O_{9,8}$ (mm)	D_i (mm)	D_{15} (mm)	D_a (mm)	D_{15} (mm)
2	1.1	2	10.7	15
5	2.9	5	26.5	15
25	14.5	25	134.0	15

Uit tabel 12.2 blijkt dat open zettingen ($O_{9,8} = 2$ tot 5 mm) voldoende dicht zijn om de slakken tegen te kunnen houden. De open zetting ($O_{9,8} = 25$ mm) heeft te grote gaten. Het houdt de slakken niet tegen. Een steenlaag met een $O_{9,8}$ van 15 mm is de ondergrens. Groter mogen de openingen niet zijn. De ondergrenzen zijn getekend in bijlage 12.6.



12.3. Meerlaagsfilter.

In hoofdstuk 12.2.1 is aangetoond dat het LD 0/10 mm als bescherming van het basismateriaal voldoet. Dit is voornamelijk gebaseerd op de afpleistering die in de slakken moet optreden. Deze afpleistering is een verschijnsel, waarvoor de grenzen niet scherp gedefinieerd zijn. Uit de bijlagen 12.2 t/m 12.5 blijkt dat de cumulatieve korrelverdeling vrij dicht bij de ondergrens ligt. Als er gedeeltelijke afpleistering optreedt, is er een aanzienlijke erosie mogelijk. Om een wat meer betrouwbare constructie te beschouwen, wordt een meerlaagsfilter behandeld, bestaande uit een laag LD slakken 0/10 mm met daarbovenop een laag LD slakken 10/80 mm.

De stabiliteit van het 0/10 mm t.o.v. de basis is reeds in hoofdstuk 12.2.1. behandeld. De stabiliteit van het 10/80 t.o.v. de steenzetting is in hoofdstuk 12.2.2. gezien. Resteert de stabiliteit van het 0/10 t.o.v. het 10/80. De verhouding tussen D_{15} (10/80) en d_{50} (0/10), D_{15}/d_{50} bedraagt 3.5. Dit is een verhouding, die in het geometrische dichte gebied ligt. Transport zal pas gaan optreden bij een verhang van groter dan 1. De combinatie (0/10)-(10/80) is onderling stabiel.

12.4. Menging van de 10/80 en de 0/10 slakken.

Als beide materialen gemengd worden, ontstaat een materiaal, dat sterk gegradeerd is. Dit is voordelig, omdat dan afpleistering kan optreden. Het materiaal zal niet zo snel door de toplaag kunnen verdwijnen, dan wanneer de gradatie klein is. Er ontstaat echter het gevaar van ontmenging bij het aanbrengen van het materiaal. Ook verlies van interne stabiliteit moet voorkomen worden. Of deze verschijnselen zullen optreden, hangt af van de mengverhouding van beide materialen. Aangezien niet vast staat, in welke verhouding 0/10 en 10/80 gemengd worden, of gemengd zijn, kan hierop nog geen antwoord worden gegeven.



12.5. Fosforslakken.

De fosforslakken (zie bijlage 12.7) hebben een gradatie van 7. Ook dit is een materiaal, waarin volgens de theorie nauwelijks afpleistering kan optreden. Het kan dus niet als een eenlaagsfilter gebruikt worden, zie tabel 9.2. Er is dus nog een extra filter nodig, om de basis met fijn zand, $d_{50} = 0.2$ mm te beschermen. De waarde van D_{15} is 5.6 mm. Dit betekent dat de O_{98} van de toplaag kleiner dan 5.6 mm moet zijn. De slakken kunnen door open zettingen ($O_{98} = 25$ mm) uitspoelen. Omdat de belastingen hoog zijn en het filtermateriaal grof is, moeten de fosforslakken een geometrische filter vormen voor de extra onderlaag. Dit betekent dat de d_{50} van het materiaal onder de fosforslakken 0.9 a 1 mm groot moet zijn.

tabel 12.3

	Ondergrens (mm)	Bovengrens (mm)
D_i	0.19	1.0
D_{15}	0.37	2.0
D_{50}	1.0	5.4
D_a	2.5	13.3

Ga er van uit dat deze tussenlaag ook een gradatie van ruwweg 7 heeft en dat de korrelverdeling ook volgens een verschoven Fullerverdeling verloopt. Uitgaande van een D_{50} van dit extra filter van 1 mm is de waarde van D_{15} 0.37 mm. De d_{50} van het zand is 0.2 mm, dus $D_{15}/d_{50} = 1.85$. Dit is geometrisch dicht. De band, waarbinnen de cumulatieve korrelverdeling van dit extra filter moet liggen, is aangegeven in bijlage 12.8. De karakteristieke diameters staan in tabel 12.3.



Bij de fosforslakken moet er goed op worden toegezien dat de afkoeling gelijkmatig is verlopen. Zogeheten "tout venant" materiaal is vaak te snel afgekoeld, waardoor de slakken sterk verpulveren. Dit veroorzaakt instabiliteit.

12.6. Conclusies.

- * Indien LD slakken 0/10 mm worden afgedekt met 10/80 mm, is een stabiele filterconstructie ontstaan bij toplagen met een $O_{9,8}$ van kleiner dan 15 mm.
- * Bij gebruik van toplagen met een $O_{9,8}$ van 25 mm dient het 0/10 mm met een grover materiaal dan 10/80 mm te worden afgedekt.
- * Vermenging van 0/10 mm met 0/80 mm wordt ontraden in verband met verlies van interne stabiliteit en gevaar op ontmenging bij het aanbrengen.
- * Tussen de fosforslakken en de onderlaag dient nog een extra filter of een geotextiel gebruikt te worden.
- * Ook de fosforslakken zijn te fijn om onder een open zetting ($O_{9,8} = 25$ mm) te blijven liggen.



13. Aanbevelingen.

13.1. Verkennend erosie onderzoek.

Er dient een simpele modelproef gedaan te worden. Mijnssteen wordt blootgesteld aan voor onderlagen vigerende omstandigheden. Het massaverlies wordt gemeten. De proef moet na afloop zorgvuldig afgebroken worden, zodat de te meten verschillen in zeefcurve geheel en al afkomstig zijn van de proef en niet van het menselijke ingrijpen na het experiment.

13.2. Begripsverruimend onderzoek.

13.2.1. Verwering en splijting.

Er dient onderzocht te worden, hoe het langeduur gedrag van het materiaal is. Daarbij dient het complete materiaal en niet slechts een fractie beschouwd te worden. Voor een snelle afwikkeling van de proeven dient zachte mijnssteen gebruikt te worden, met een korte relaxatietijd, bijvoorbeeld "Walsum". Tegelijkertijd moet voor de verklaring en de berekeningen een theoretisch model opgezet worden, dat aan bovenstaande metingen getoetst kan worden. Voor het goede begrip van de splijting en de verwering dient een gedeelte van het materiaal in een separaat experiment gemarkeerd te worden, zodat het splijtingsproces gevolgd kan worden.

13.2.2. Verkitting.

Primair zal experimenteel vastgesteld moeten worden of staalslakken met diameters tussen de 2 en 10 mm verkitten. Indien er zulk een verkitting optreedt, moet nagegaan worden hoe de druksterkte en van de tijd, concentratie en diameter afhangt.

14. Referenties.

- 1 G.J. Laan.
De toepasbaarheid van mijnsteen in de waterbouw.
WKE-R-78156, vierde versie, mei 1983
- 2 K. Dekker.
Onderzoek gebruik van mijnsteen. Deltadienst afd. O.N.W.
rapport 2.1.7. okt. 1965
- 3a V. Thanikachalam, R. Sakthivadivel.
Rational design criteria for protective filters. Can.
Geotechn. J. 11(1974) blz. 309.
- 3b V. Thanikachalam, R. Sakthivadivel.
Grain size criteria for protective filters - an enquiry. Soil
and foundations, Vol 14 no.4 dec. 1974, Jap. Soc. of Soil
Mechanics and Foundation Eng.
- 3c V. Thanikachalam, R. Sakthivadivel.
Design of filter thickness based on the application of the
queueing theory. Theory Journ. of Hydr. Res. Vol 13(1975)2
blz. 207-219
- 4 K. Kawakami, Y. Esashi
On drainage filter for earth structure. Abstract of papers.
16th ann. meeting, Jap. Soc. of Civ. Eng. 1961
- 5 J.L. Sherard, L.P. Dunnigan, J.R. Talbot
Basic properties of sand and gravel filters. Journ.
Geotechn. Eng 110(1984)6 blz. 684-700
- 6 J. la Fleur
Filtertesting of broadly graded cohesionless tills. Can.
Geotechn. Journ. 21(1984)4 blz 634-643



- 7 A.F.F. de Graauw, T. van der Meulen, M van der Does de Bye
Design criteria for granular filters. Publicatie 287. W.L.
jan. 1983
- 8 M. Klein Breteler
De openwaterloop analogie. Nota 1881-16. Nov 1984. W.L.V.
- 9 M.A. Koenders
Hydraulic criteria for filters. Estuary Physics London
juli 1985.
- 10 H. den Adel
Literatuurstudie filters. LGM 1983. CO-258901/88
- 11 A.A.F. de Graauw
Stabiliteit van granulaire filters bij cyclische verhangen
evenwijdig aan het grensvlak. W.L. M1544. jul. 1981
- 12 E.A. Lubochkov
Piping resistant non cohesive soils. Ivestia VN II G
71(1962) blz 61-89. In het Russisch. Engelse vertaling
- 13 E.A. Lubochkov
Grafische en analytische methoden voor de bepaling van de
interne stabiliteit van niet cohesieve grondsoorten.
Ivestia VN II G 78(1965) blz 255-280. In het Russisch.
Nederlandse vertaling
- 14 G.J. Laan
Kwaliteit en kwaliteitscontrole van slakken voor de
waterbouw. Concept rapport/ mondelinge mededelingen
- 15 G.J. Laan
Onderzoek van zwarte mijnsteen ter beoordeling van de
toepasbaarheid in de wegenbouw. BGA 76-10. Nov. 1977.



G.J. Laan

De bestandheid van zwarte mijnsteen tegen verwerking.

WKE-R-80001, RL-KO-R-80-01

- 17 A. Bezuijen, K. den Boer
Taludbekleding van gezette steen, overzicht onderzoek 1980-1984. M1975 / M 1881 deel XV (WL), CO-272500/7 (LGM). Okt. 1984.
- 18 Diverse auteurs
Taludbekledingen van gezette steen, fase 2. M1795 / M1881 deel VII (WL), CO-258901/118 (LGM). Mei 1984.
- 19 A. Bezuijen, M.Th. de Groot
Oeverbeschermingen. M1115 deel XII-B (WL), CO-273160/13, CO-416459/37
- 20 H.J.M. Ogink
Investigation on the hydraulic characteristics of synthetic fabrics
- 21 M. Klein Breteler
Erosie in granulaire filters, voorlopige resultaten
W.L.V., H 4174/M 1881-16, juni 1985.
- 22 NNI
Controle zeven. Draadzeven en plaatzeven met ronde e vierkante gaten. NEN 2560 (1980)
- 23 A.H.H. Dijkzeul
De afgifte van zware metalen en fluoride door diverse oeverbeschermingsmaterialen. RIZA nota 79.025
Lelystad 1979



CO-272550/18
- 86 -

Bewig, Schlössner

Das Wasserverhalten von Stahlwerkschlacken

Beurteilung aus gewässerkundlichen Sicht. Dir. Tgb Nr A

1038/82

Hygiene Institut des Ruhrgebiets. Gelsenkirchen, mei 1982.

Appendix AEnige begrippen in verband met zeven.

Voor de volledigheid worden nog enige begrippen verduidelijkt, die veelvuldig bij het ontwerpen filters worden gebruikt.

* De porositeit, n , van het materiaal is de verhouding tussen het volume van de niet vaste stoffen, V_{gl} in een verzameling korrels en het volume, V , van de verzameling korrels, inclusief de holten:

$$n = \frac{V_{gl}}{V} \quad (A.1)$$

* De mediane diameter d_{50} , de massa gemiddelde diameter, is die waarde van de diameter waarvoor geldt dat 50 gewichtsprocenten van het materiaal een kleinere diameter heeft dan d_{50} . Voor de d_{10} is dit 10 gewichtsprocenten.

* De gemiddelde diameter, $\langle d \rangle$, is een ensemble gemiddelde. De diameter wordt gemiddeld naar het aantal deeltjes. Deze diameter speelt een dominante rol bij de doorlatendheid.

$$\langle d \rangle = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N d(i) \quad (A.2)$$

met N het aantal deeltjes en $d(i)$ de diameter van deeltje met nummer i .

* De gradatie, p , is de verhouding tussen de d_{90} en de d_{10} van het materiaal. Het is een maat voor de breedte van de korrelverdeling.

$$p = d_{90}/d_{10} \quad (A.3)$$



* Een andere maat voor de breedte van de korrelverdeling is de uniformiteit, U . Dit is de verhouding tussen d_{60} en d_{10} .

$$U = d_{60}/d_{10} \quad (\text{A.4})$$

Bij benadering geldt voor een lognormale korrelverdeling dat

$$p \approx \frac{1+\chi}{1-\chi} \quad (\text{A.5})$$

met χ de variatie coefficient.

Er is met een kleine letter d gewerkt, dus strikt gesproken zouden deze formules slechts voor het basismateriaal gelden. Ze gelden natuurlijk ook voor het filter.

* De filtersnelheid, v_f , is de snelheid van het door het filter stromende water, waarbij het debiet q (in m^3/s) gedeeld wordt door de oppervlakte, A , van de dwarsdoorsnede op de stromingsrichting:

$$v_f = q/A \quad (\text{A.6})$$

De poriesnelheid, v_p , wordt uit het debiet en de uitstroomopening van het filter bepaald:

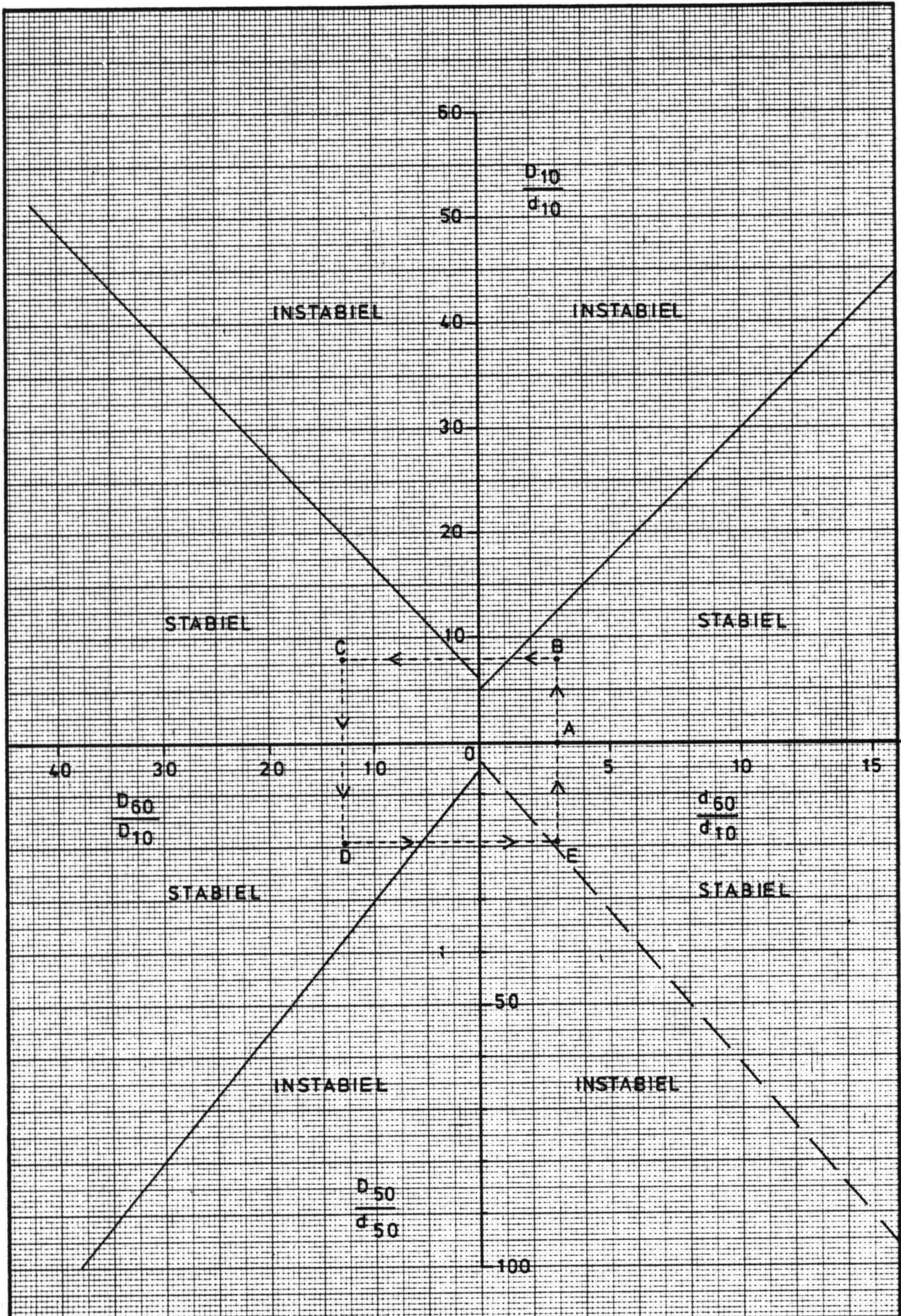
$$v_p = q/nA \quad (\text{A.7})$$

Appendix B.

Enige opmerkingen over zeven.

De cumulatieve korrelverdeling van een materiaal wordt in het algemeen met zeven discreet benaderd. Het Nederlands Normalisatie Instituut (NNI) heeft een standaard voor zeven opgesteld [21]. Er zijn twee soorten zeven, draadzeven en plaatzeven. Draadzeven bestaan uit een gevlochten net van draden. De draadzeven, die voornamelijk toegepast worden bij korreldiameters beneden de 4 mm, hebben altijd vierkante gaten. De afmeting van de openingen wordt opgegeven in mm of cm. Bij plaatzeven zijn de openingen in de bodem geboord of gestanst. Deze kunnen zowel rond (R) als vierkant (C = carré) zijn. De afmeting van de openingen is in mm opgegeven, voorafgegaan door C of R.





laboratorium voor grondmechanica delft

telefoon: (015) - 56 92 23

telex: 33326 solab nl

d.d.

85 09 04

get.



gec.

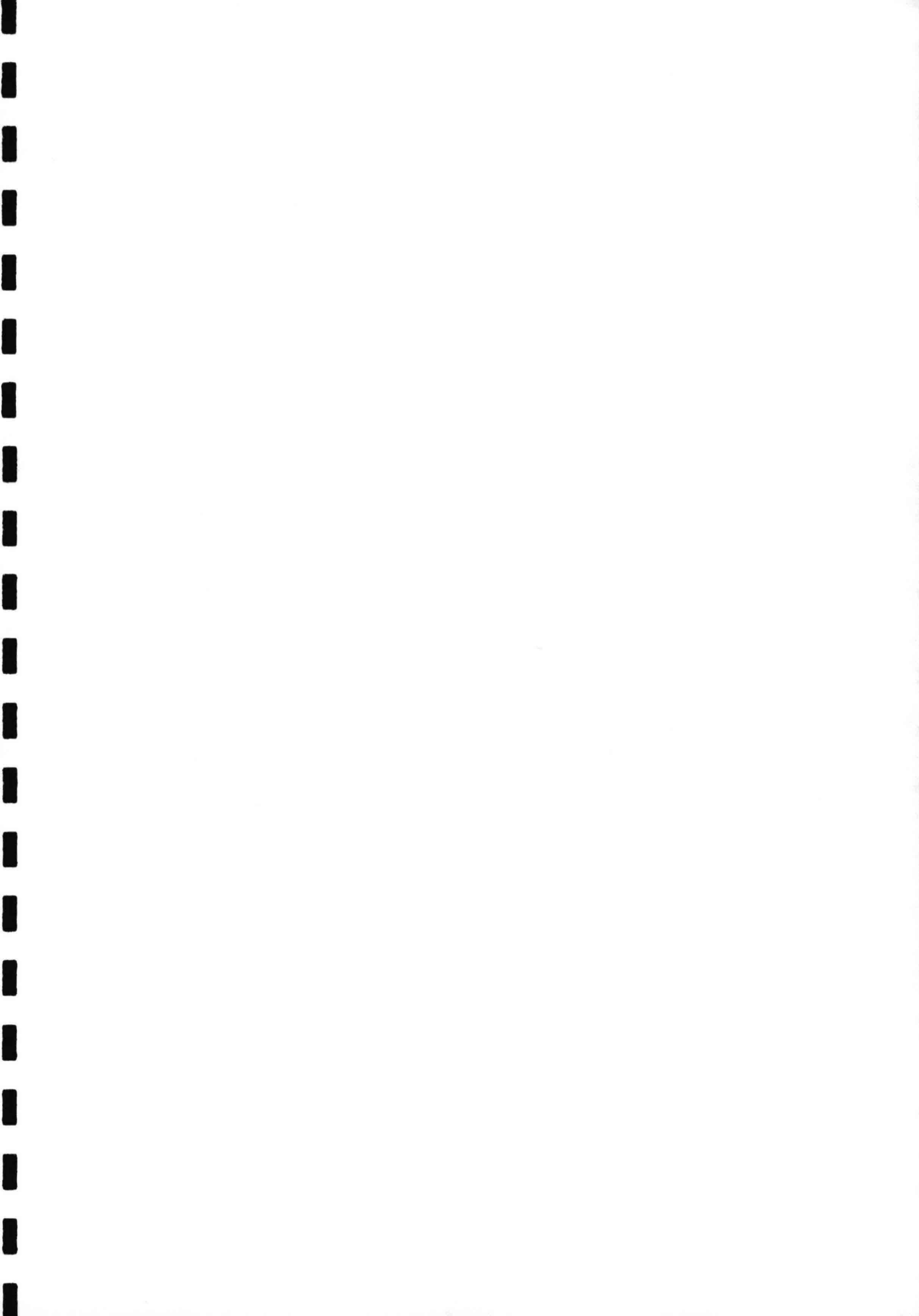
FORMULES (4,1),(4,2) EN (4,3)

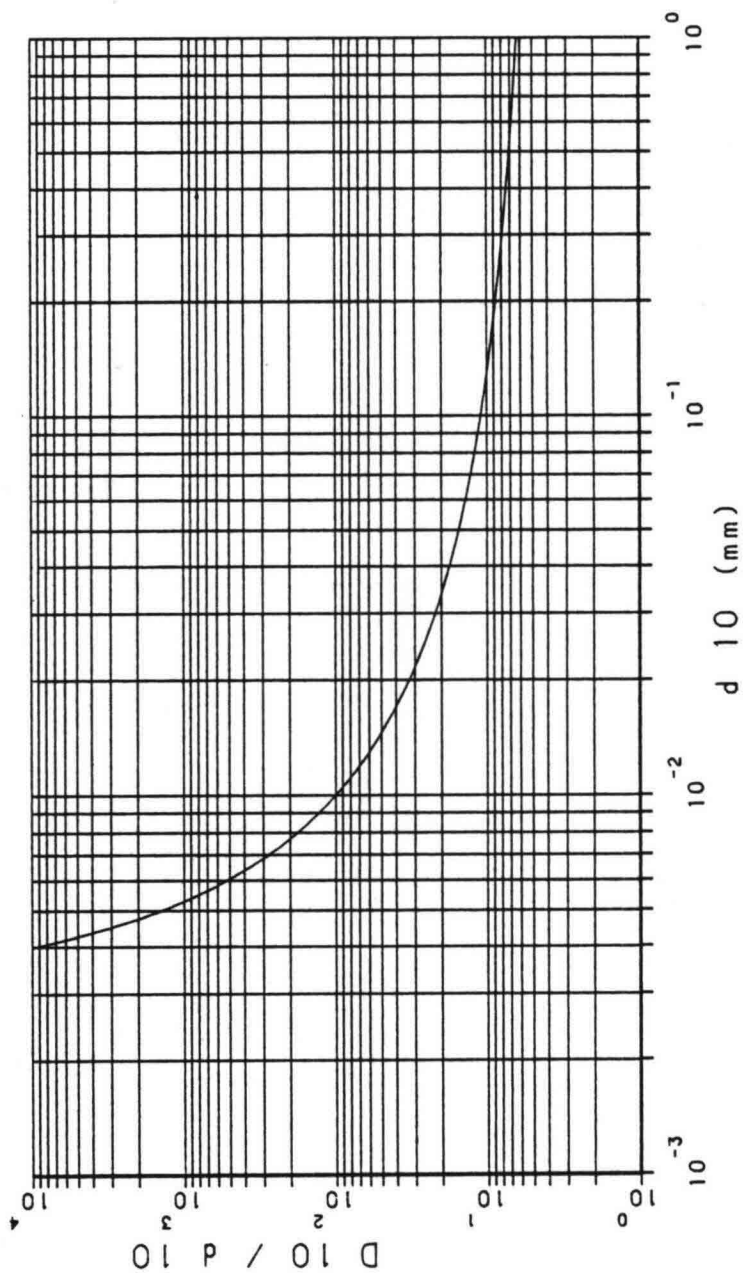
CO-416640

BIJL. 4.1

form.

A₄





LABORATORIUM VOOR GRONDMECHANICA DELFT

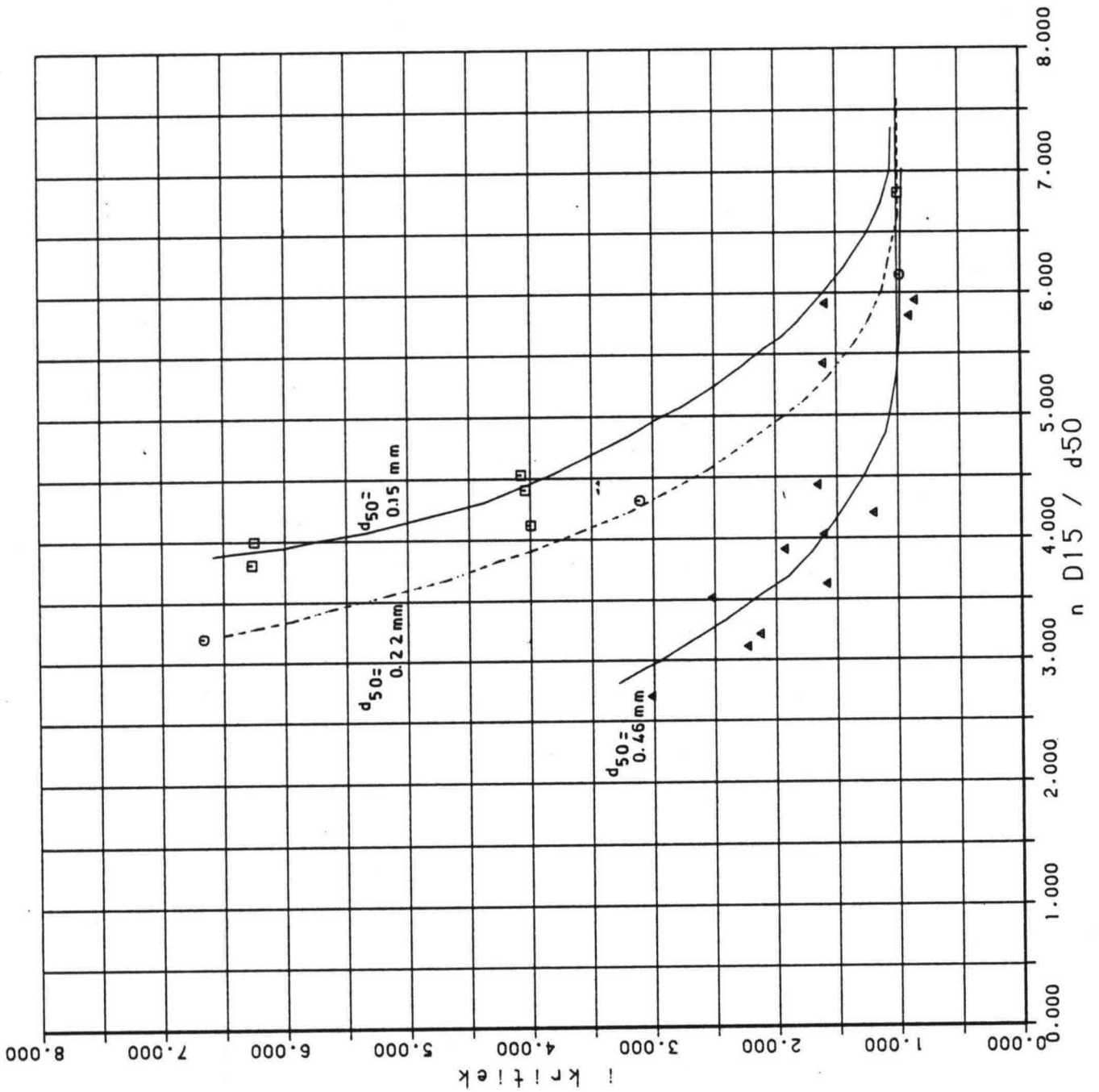
85-09-17

Absoluut criterium van Kawakami [4]
Formule (4.4)

CO-416640 Hda

BIJL. 42





LABORATORIUM VOOR GRONDMECHANICA DELFT

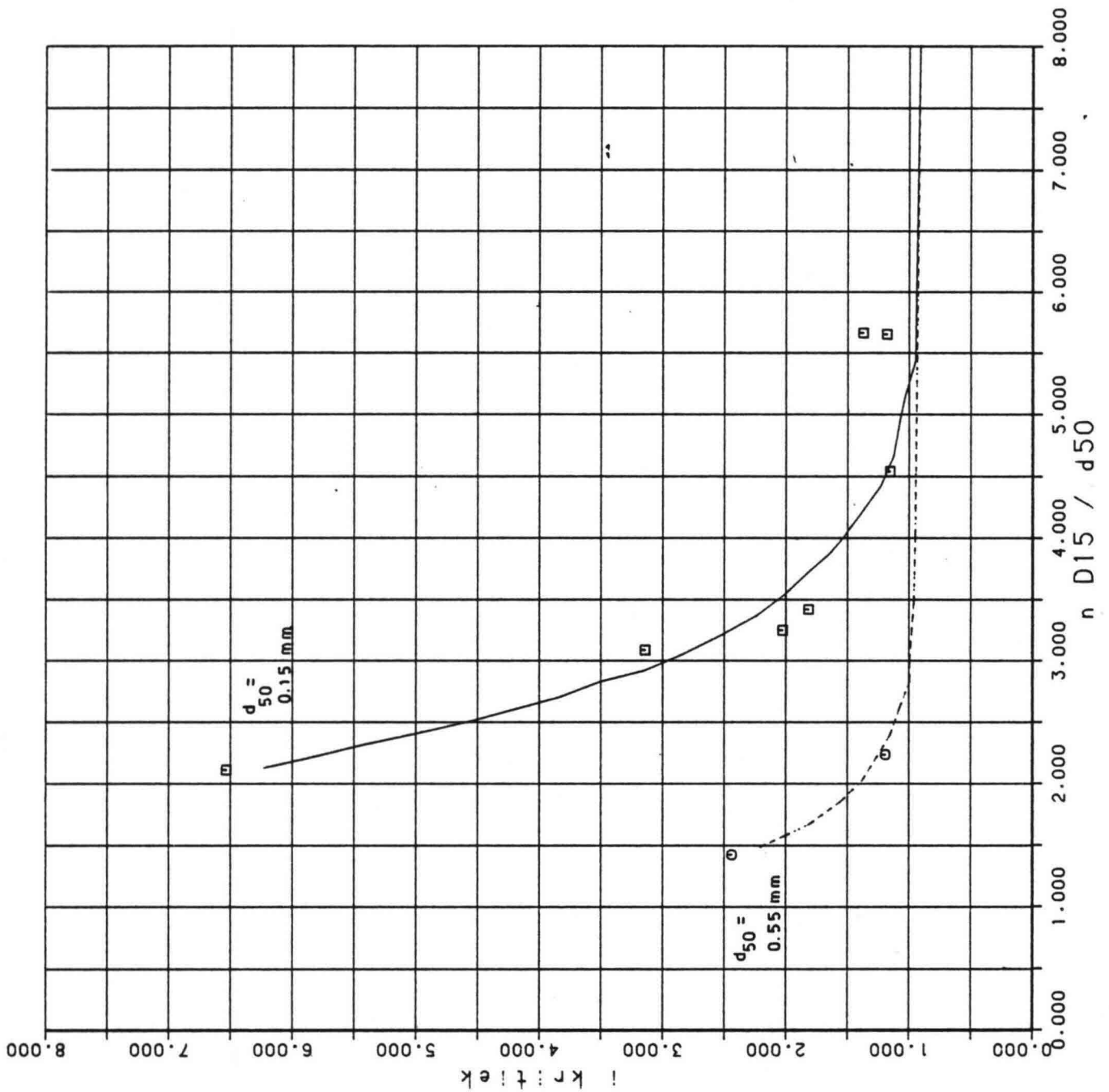
85-09-17

Kritieke verhangen loodrecht op het grensvlak

CO-416640 Hda

BIJL. 43





LABORATORIUM VOOR GRONDMECHANICA DELFT

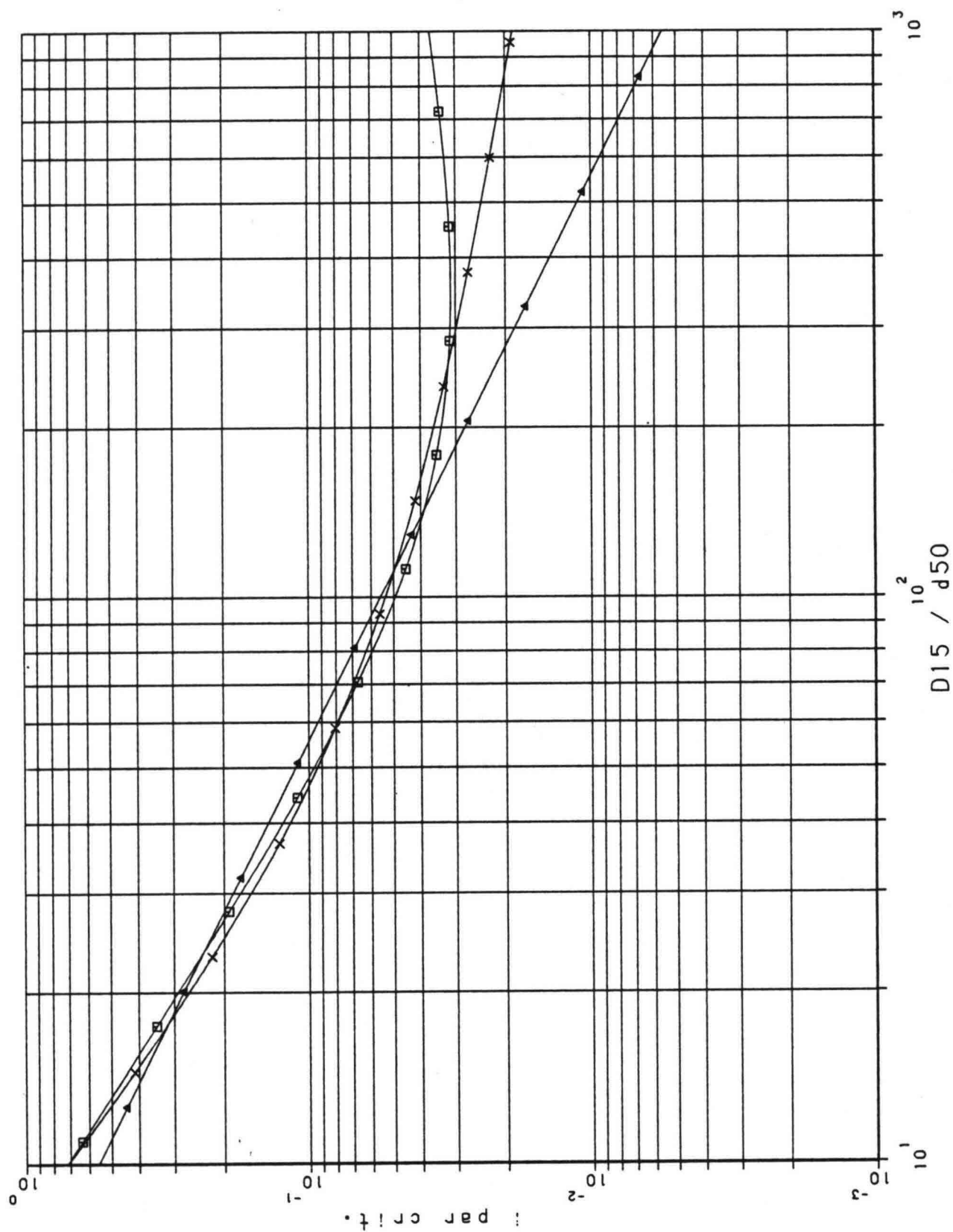
85-09-17

Kritieke cyclische verhangen loodrecht op het grensvlak; voorbeelden.

CO-416640 Hda

BIJL. 4.4





LABORATORIUM VOOR GRONDMECHANICA DELFT

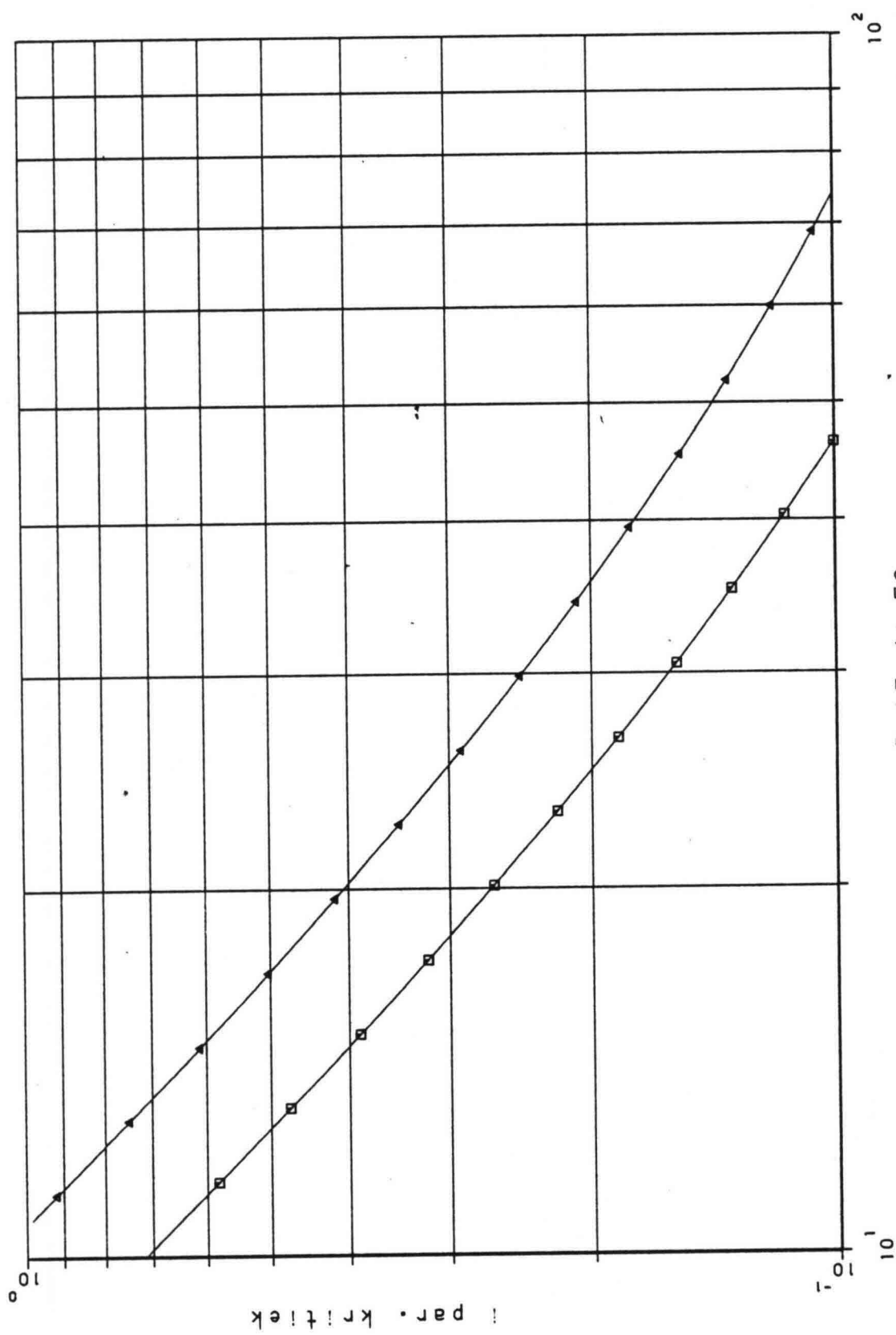
85-09-17

De formules 4.6 (vierkantjes), 4.8 (drie hoekjes) en 4.10 (kruisjes)

CO-416640 Hda

BIJL. 45



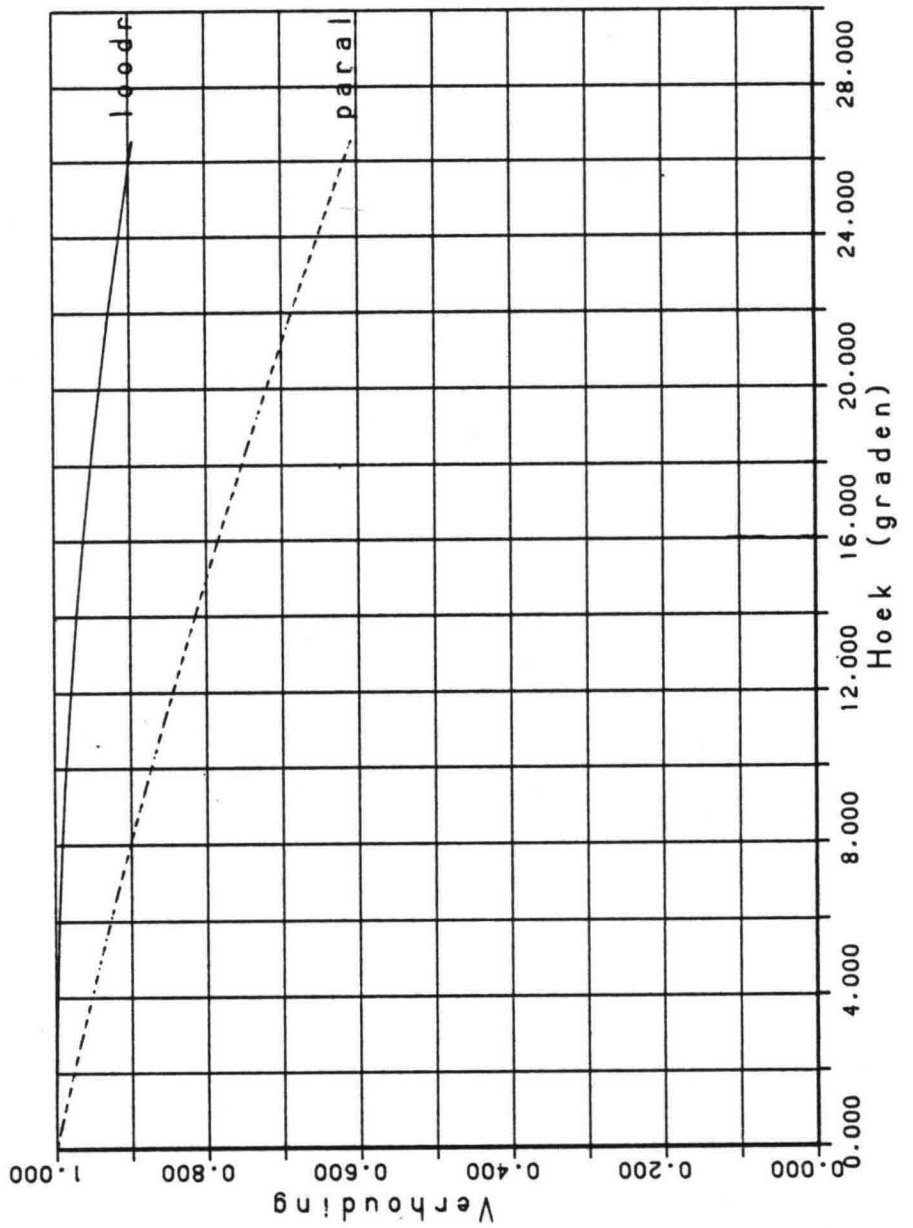


LABORATORIUM VOOR GRONDMECHANICA DELFT 85-09-17

De invloed van de porositeit. $n=0.4$
(rondjes) en $n=0.35$ (driehoekjes)

CO-416640 Hda
BIJL. 4.6





LABORATORIUM VOOR GRONDMECHANICA DELFT

85-09-17

Verband tussen helling en reductiefactor
bij parallelle en loodrechte verhangen

CO-416640 Hda

BIJL. 47



Talud	i loodrecht	porositeit
A = horizontaal	a = 0	1 = 0.3
B = 1:10	b = 0.1	2 = 0.35
C = 1:7	c = 0.2	3 = 0.4
D = 1:5	d = 0.3	4 = 0.45
E = 1:4	e = 0.4	
F = 1:3	f = 0.5	
G = 1:2.5	g = 0.6	
H = 1:2	f = 0.7	



laboratorium voor grondmechanica delft
 telefoon: (015) 569223
 telex: 38234 soil nl

85-09-09



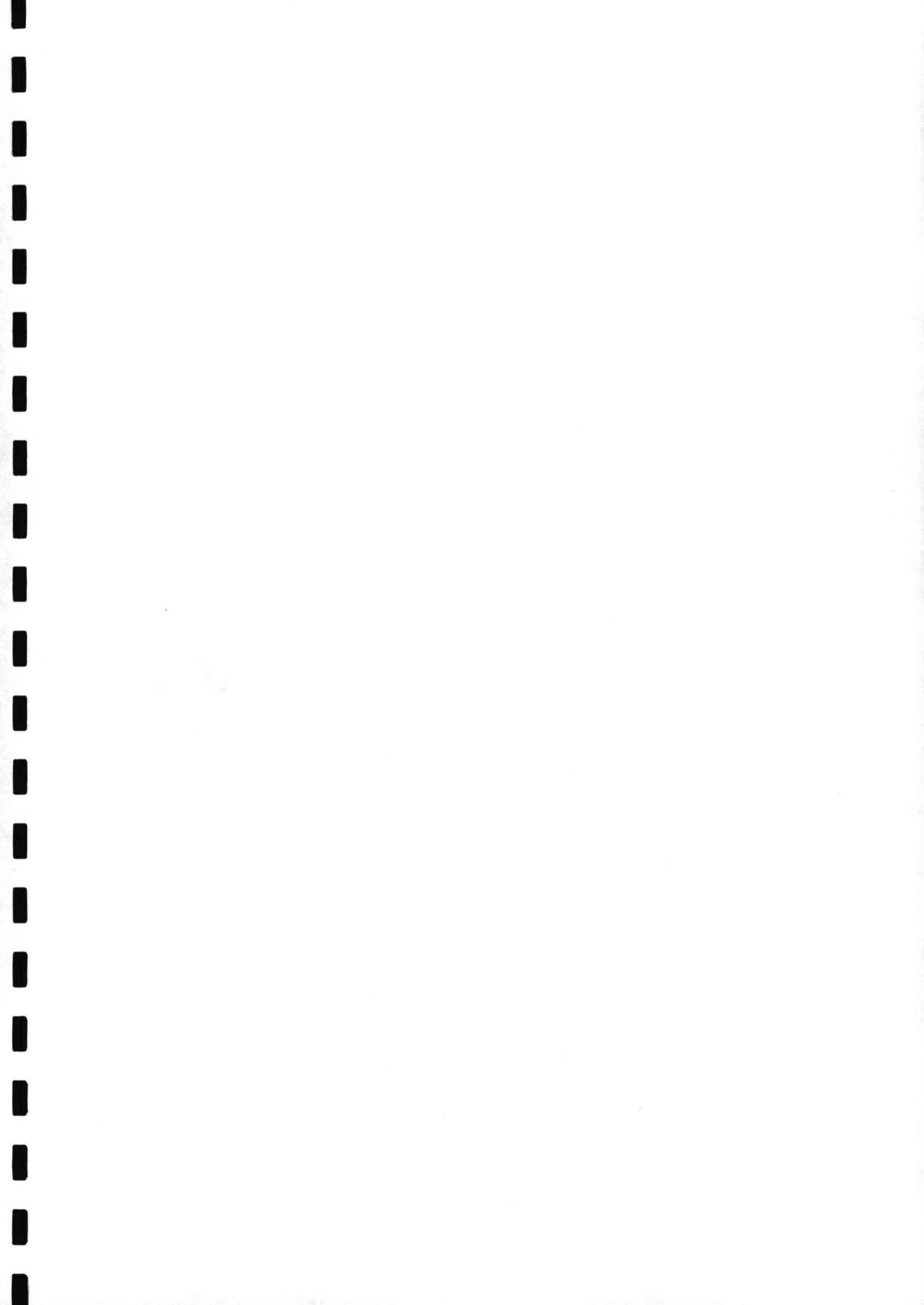
LEGENDA BIJ DE VOLGENDE ZES BIJLAGEN

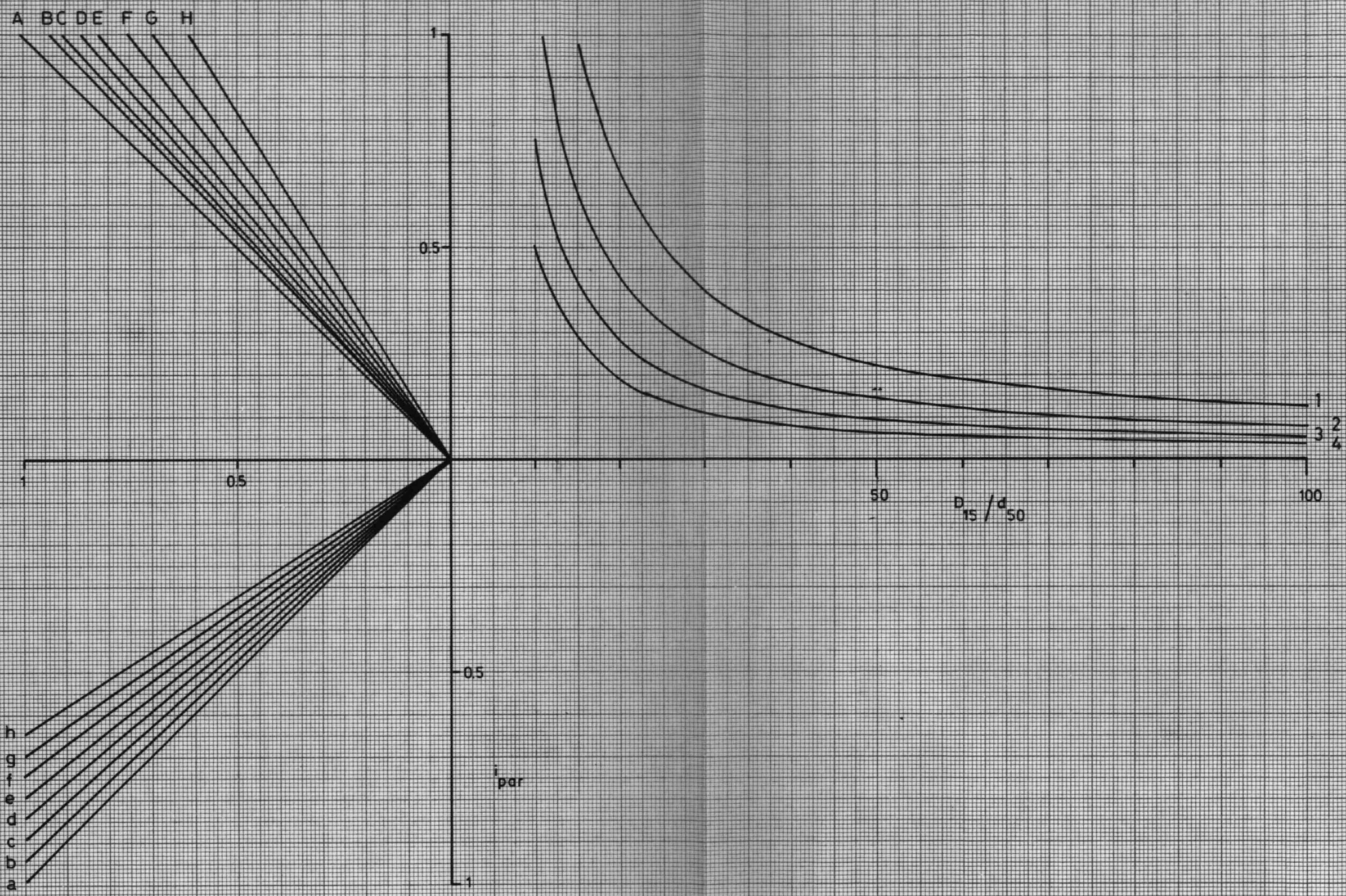
CO-416640

gec

BIJL.

form
A₄





laboratorium voor grondmechanica delft
 telefoon: (015) - 569223
 telex: 38234 solab nl

d = 0.150 mm

d.d. 85-09-03

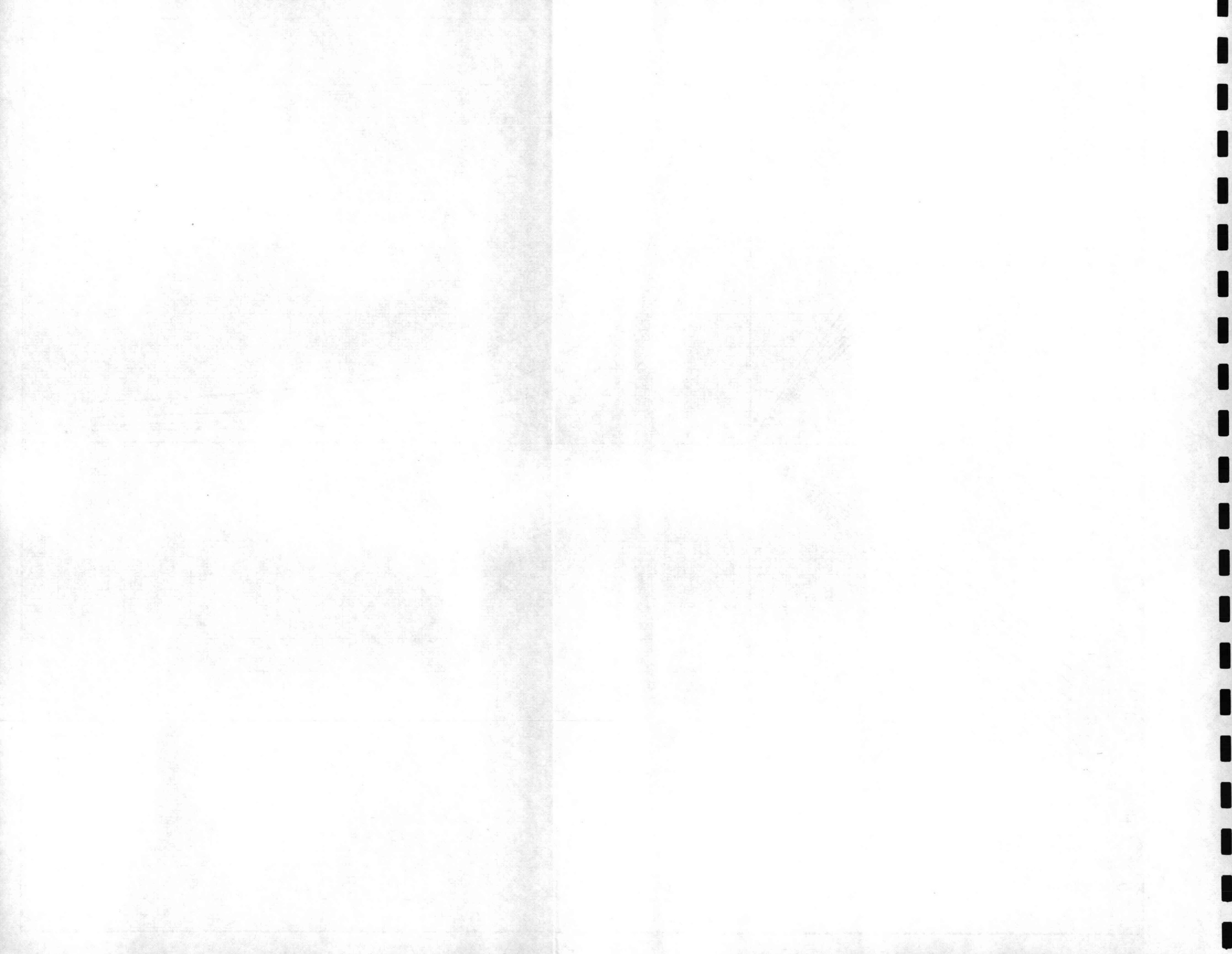
CO-416640

BIJL. 4.8

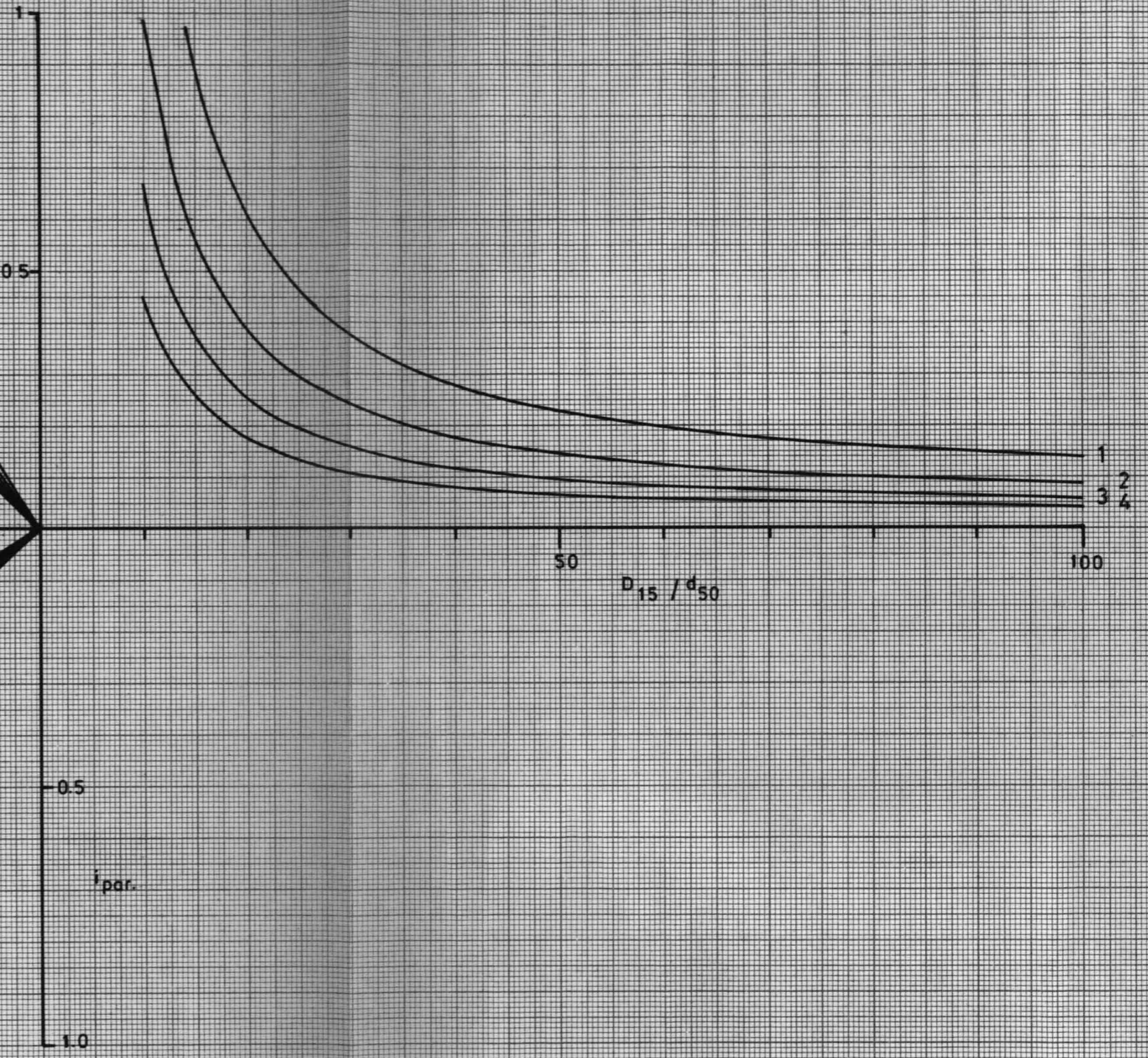
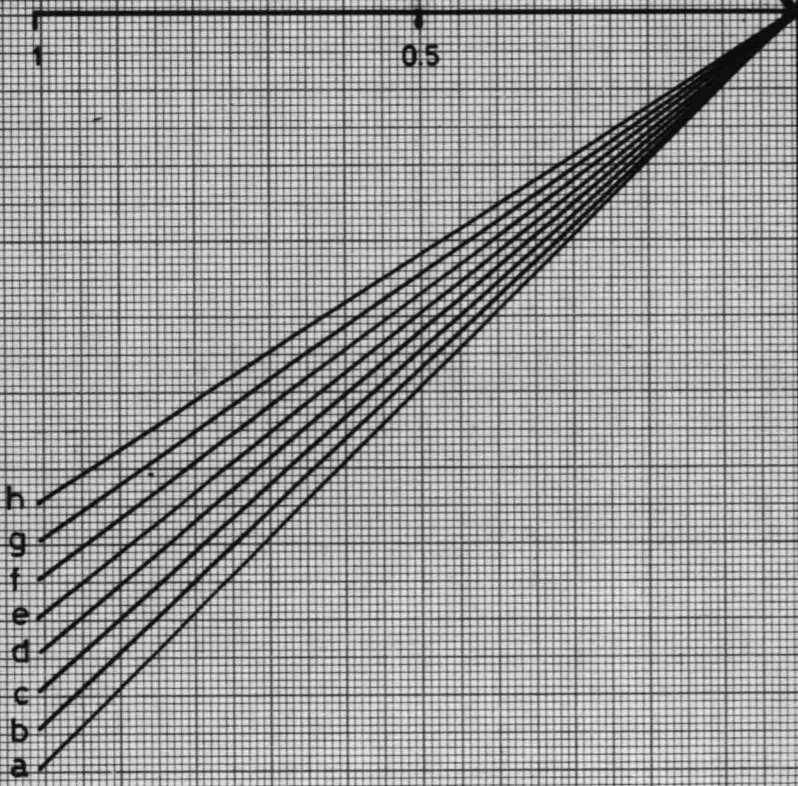
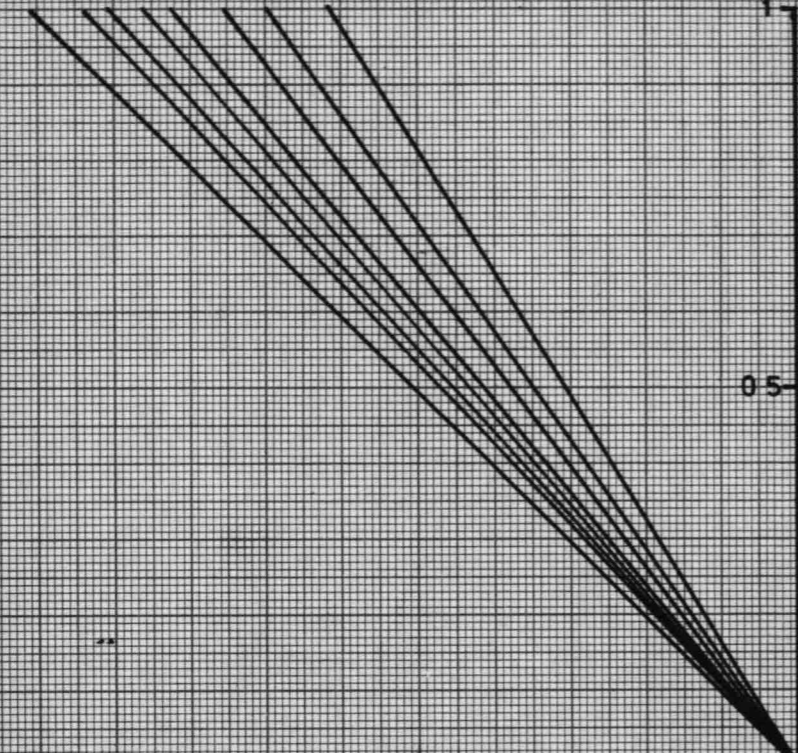
get.

gec.

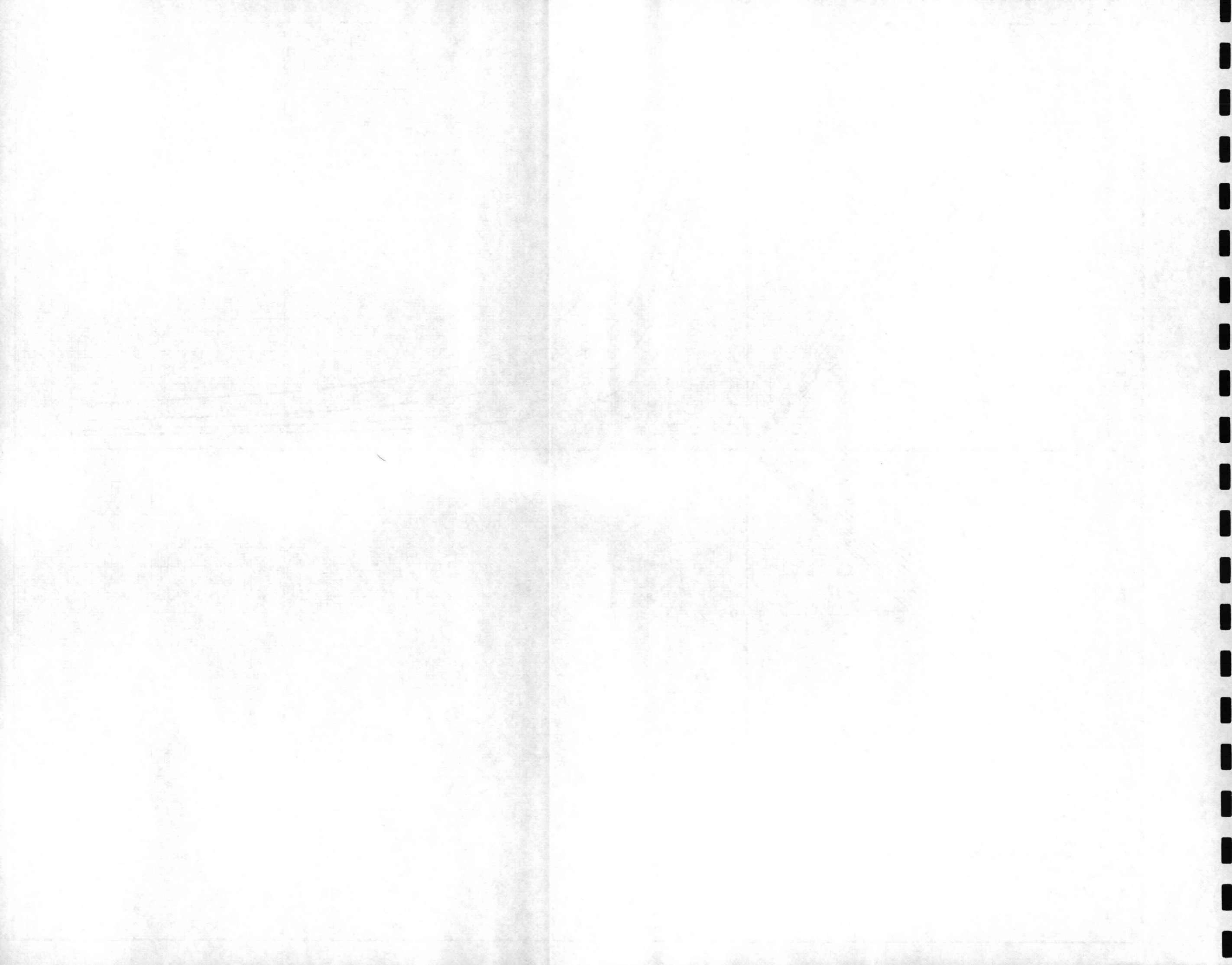
form. 30/40



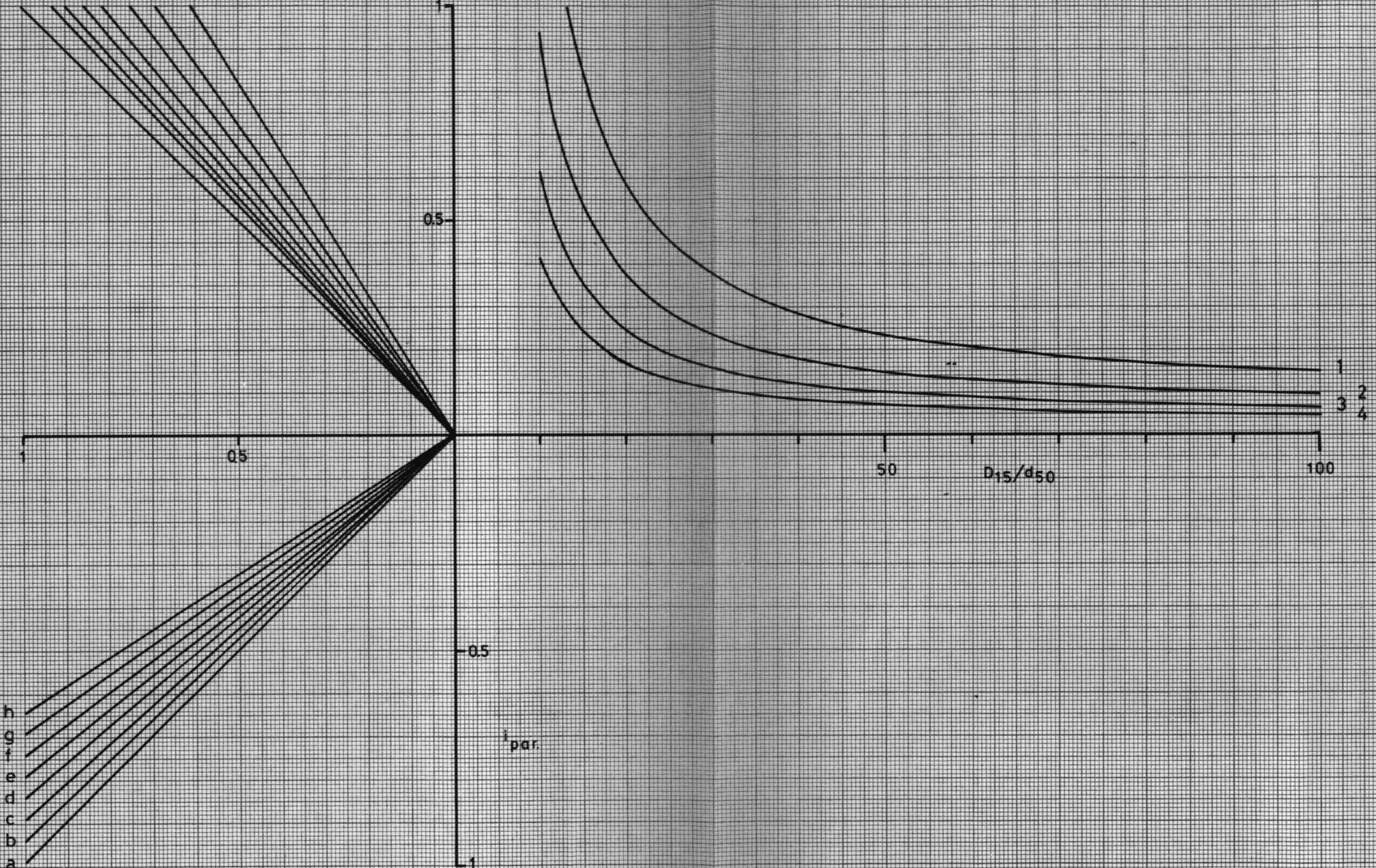
A BCDE F G H





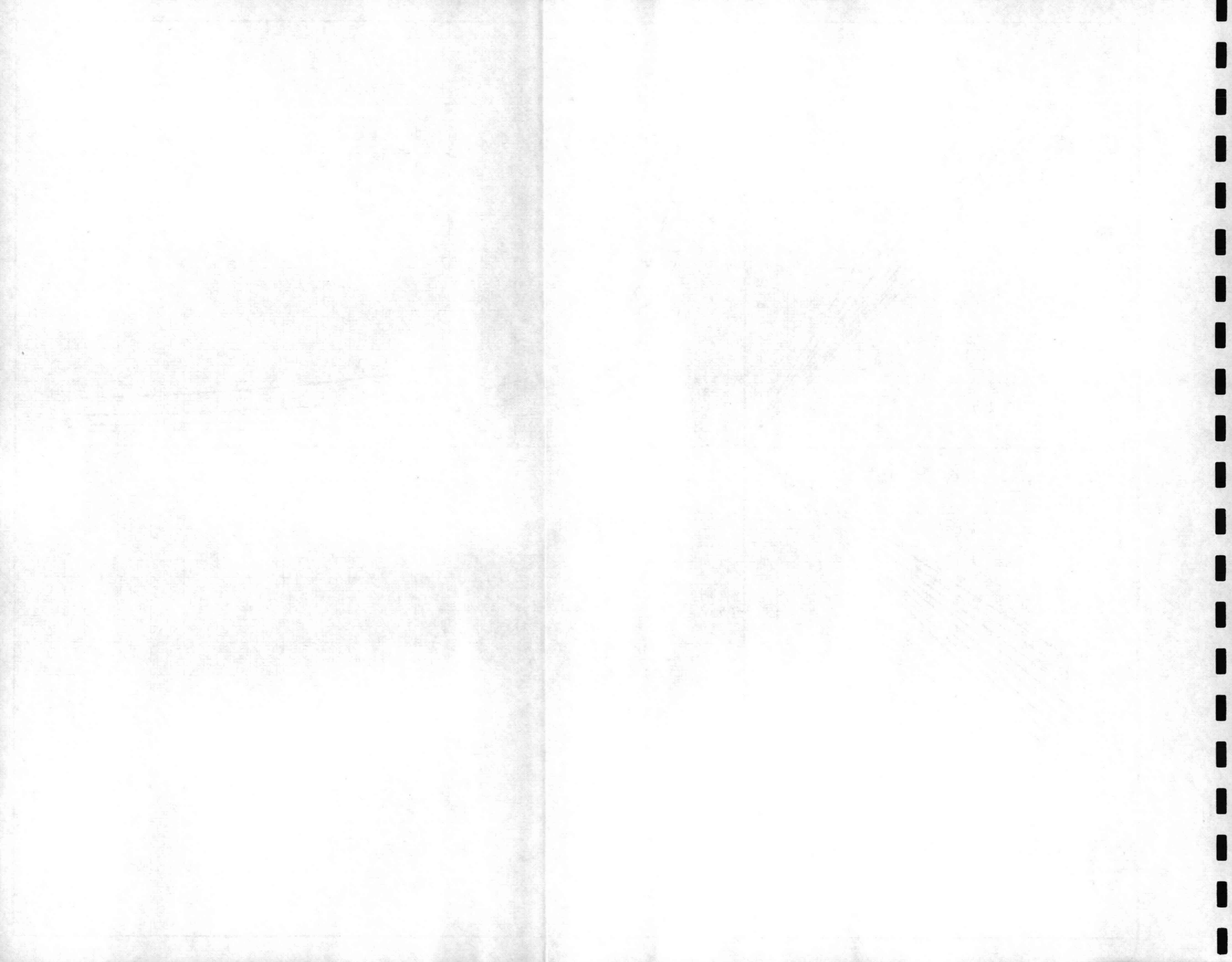
 <p>laboratorium voor grondmechanica delft telefoon: (015)-569223 telex: 38234 solab nl</p>	d.d.	get.
	85-09-03	
	CO-416640	gec.
d = 0.175mm	BIJL. 4.9	form. 30/40

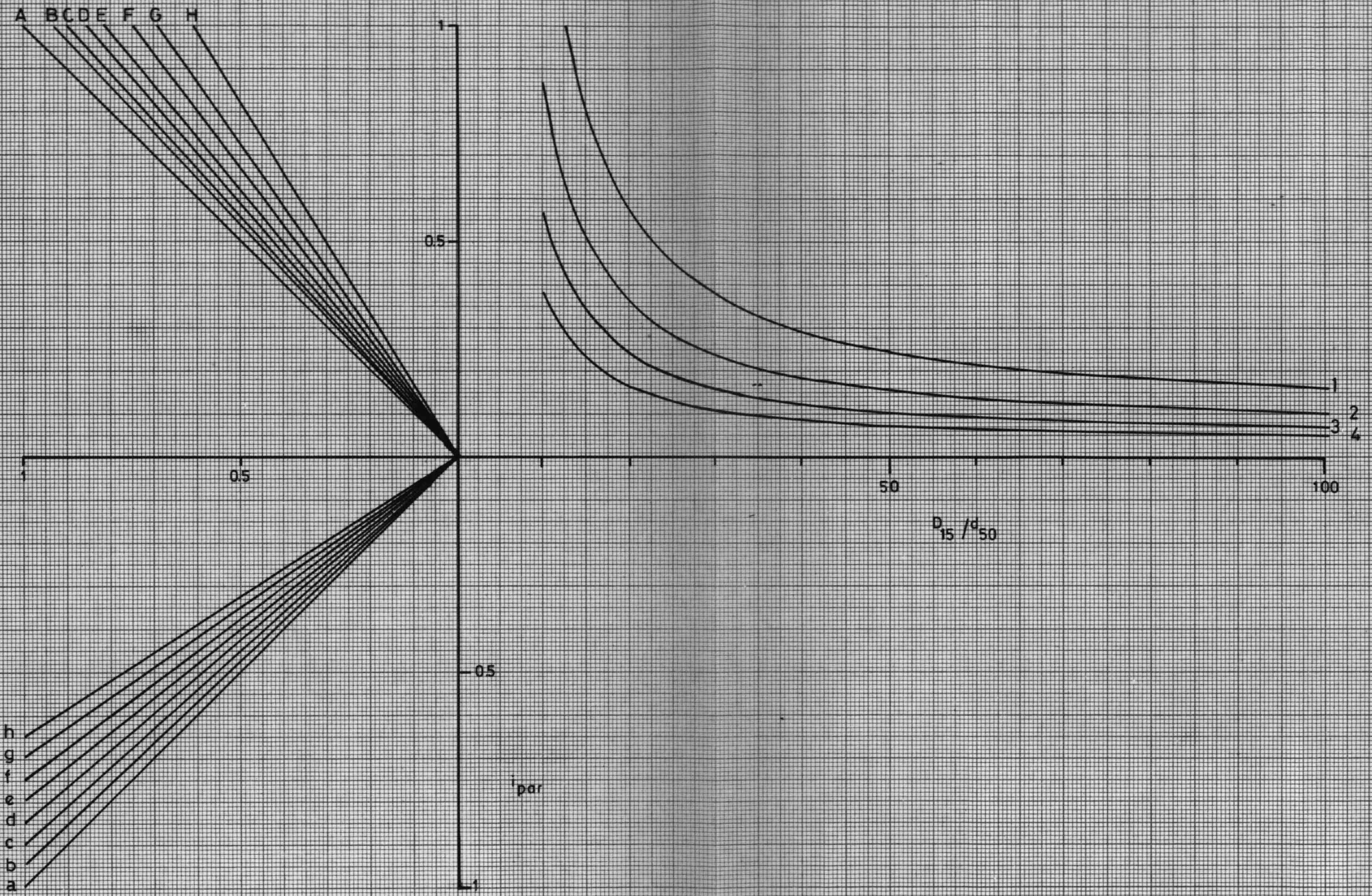




A B C D E F G H

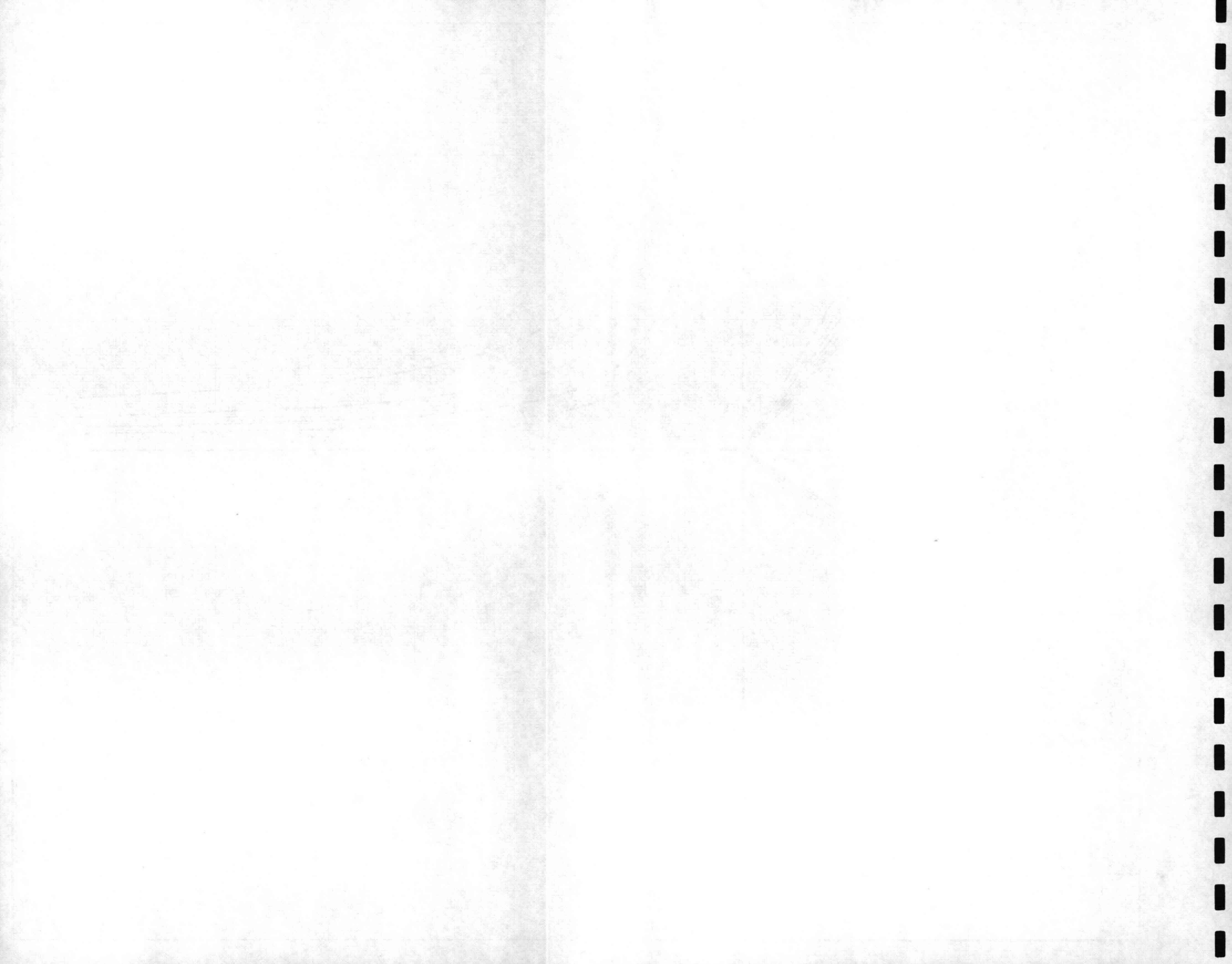


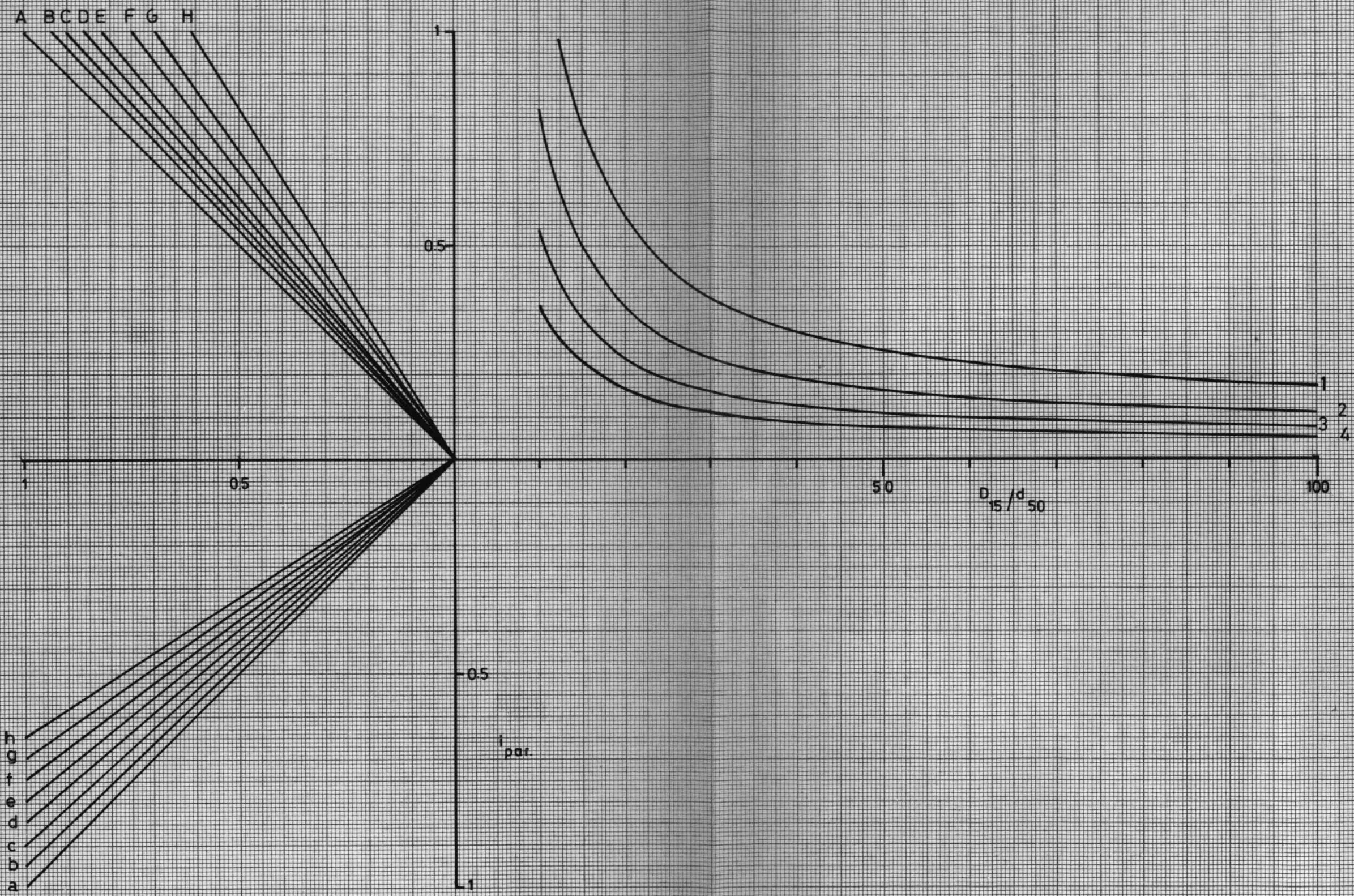
 laboratorium voor grondmechanica delft telefoon: (015)-569223 telex: 38234 solab nl	d.d. 85-09-03	get. 
	d = 0.200 mm	CO-416640
	BIJL. 4.10	form. 30/40






 laboratorium voor grondmechanica delft telefoon: (015)-56 92 23 telex: 38234 solab nl	d.d.	get.
	85-09-03	
d = 0.225 mm	CO-416640	gec.
BIJL. 4.11	form. 30/40	

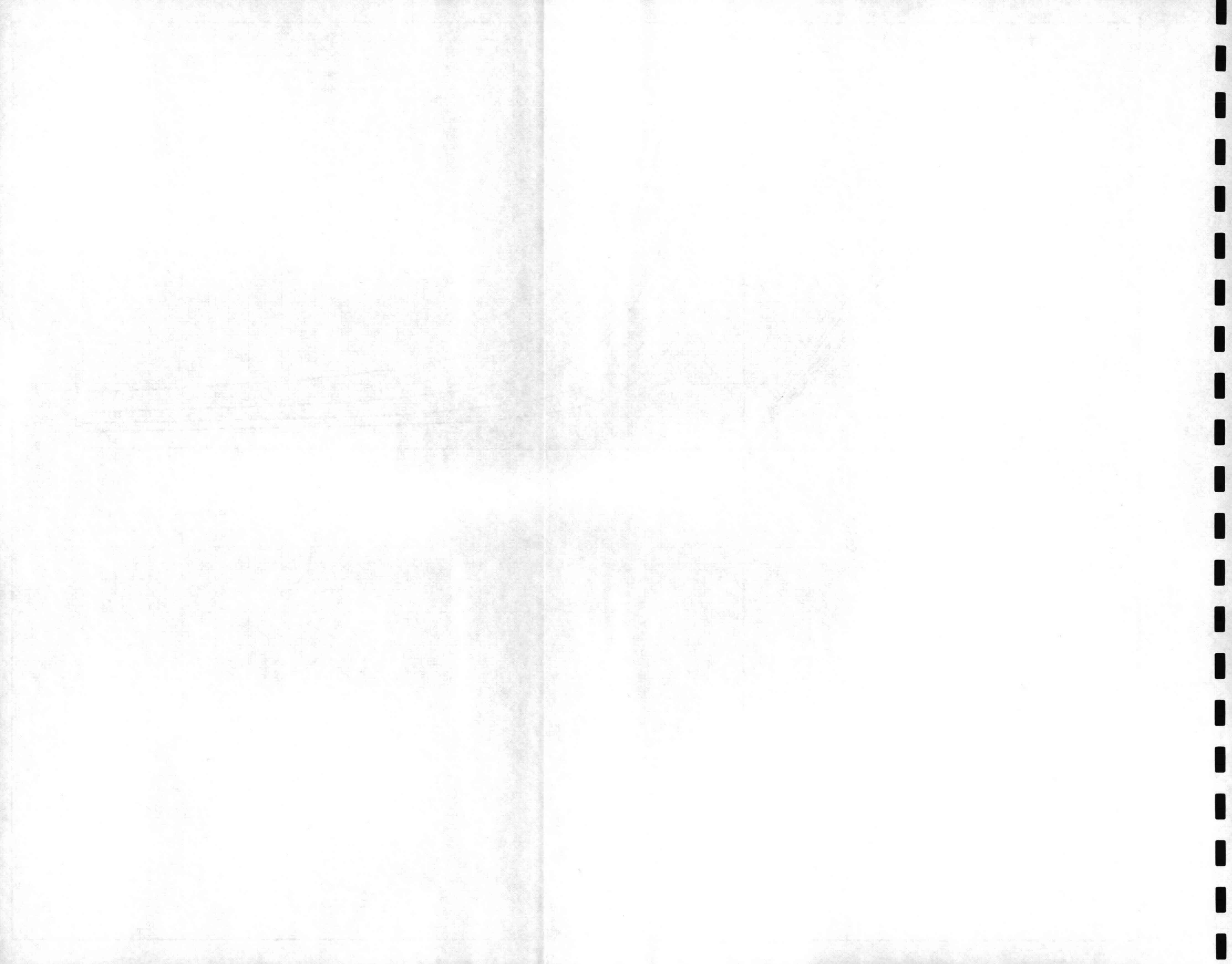




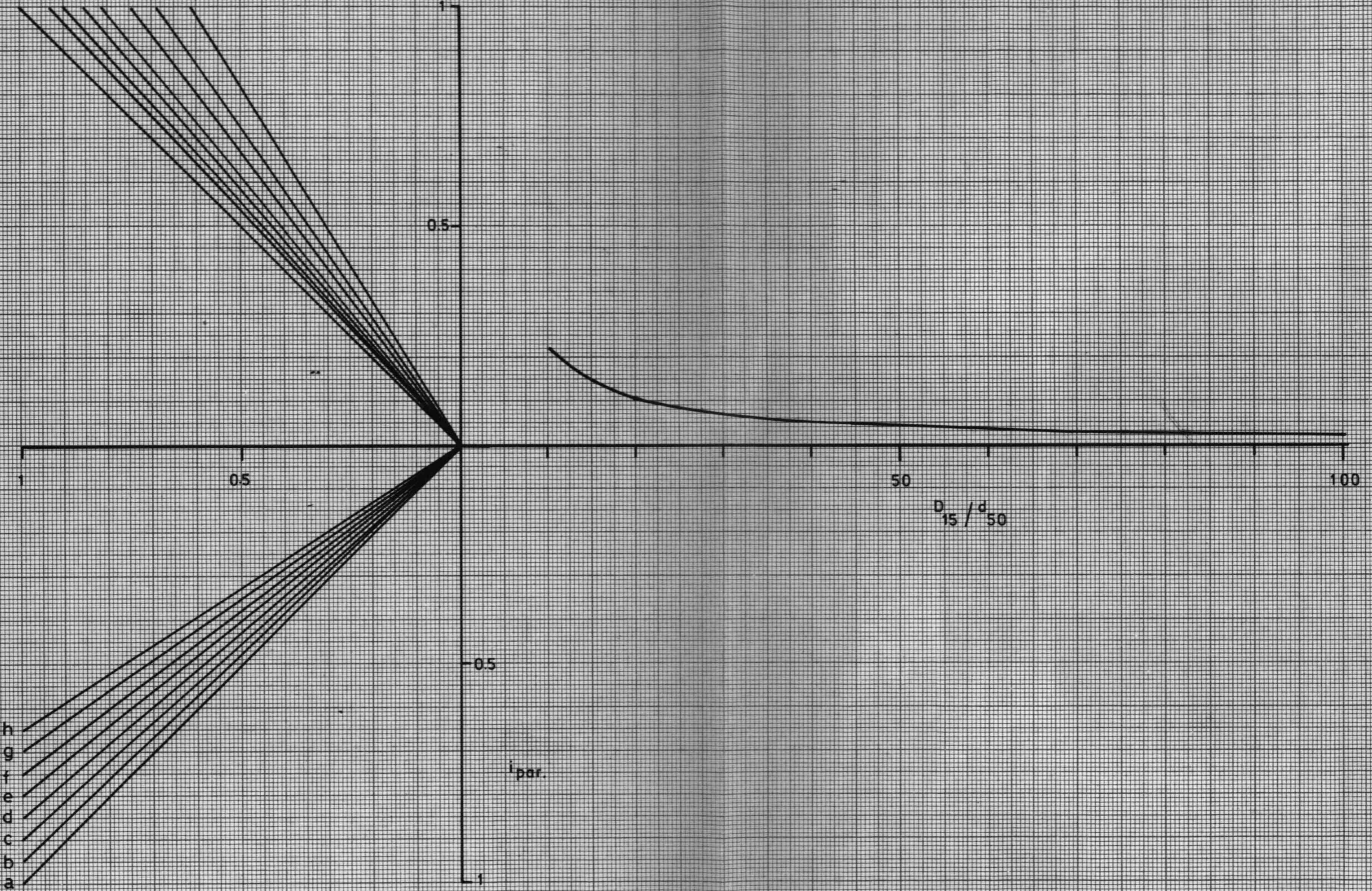

laboratorium voor grondmechanica delft
 telefoon: (015) - 569223 telex: 38234 solab nl

$d = 0.250 \text{ mm}$

d.d.	85-09-03	get.	
	CO-416640	gec.	
BIJL. 4.12		form.	30/40



A B C D E F G H



a
b
c
d
e
f
g
h



laboratorium voor grondmechanica delft
telefoon: (015) - 569223
telex: 38234 solab nl

d=0.820 mm

d.d.
85-09-03

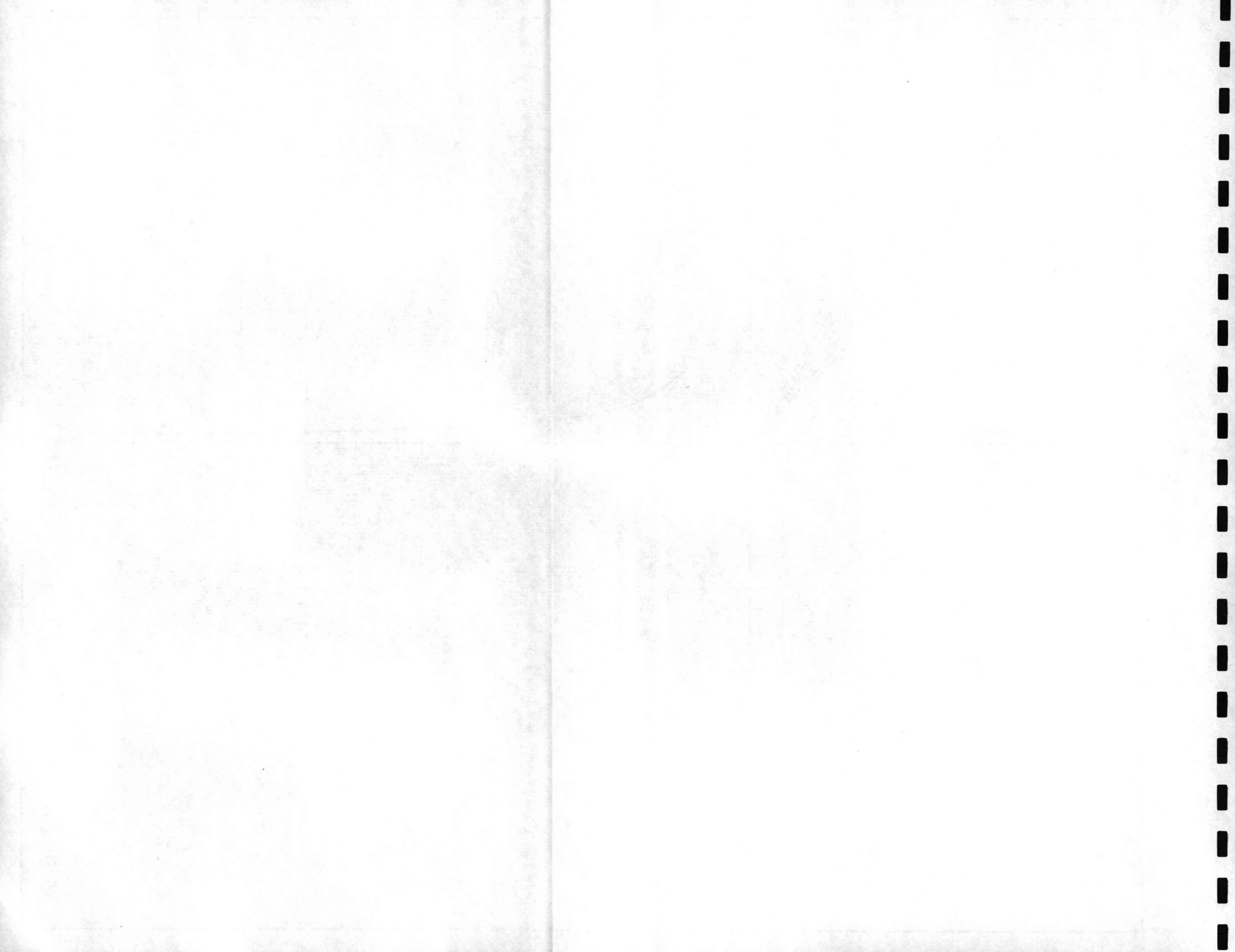
CO-416640

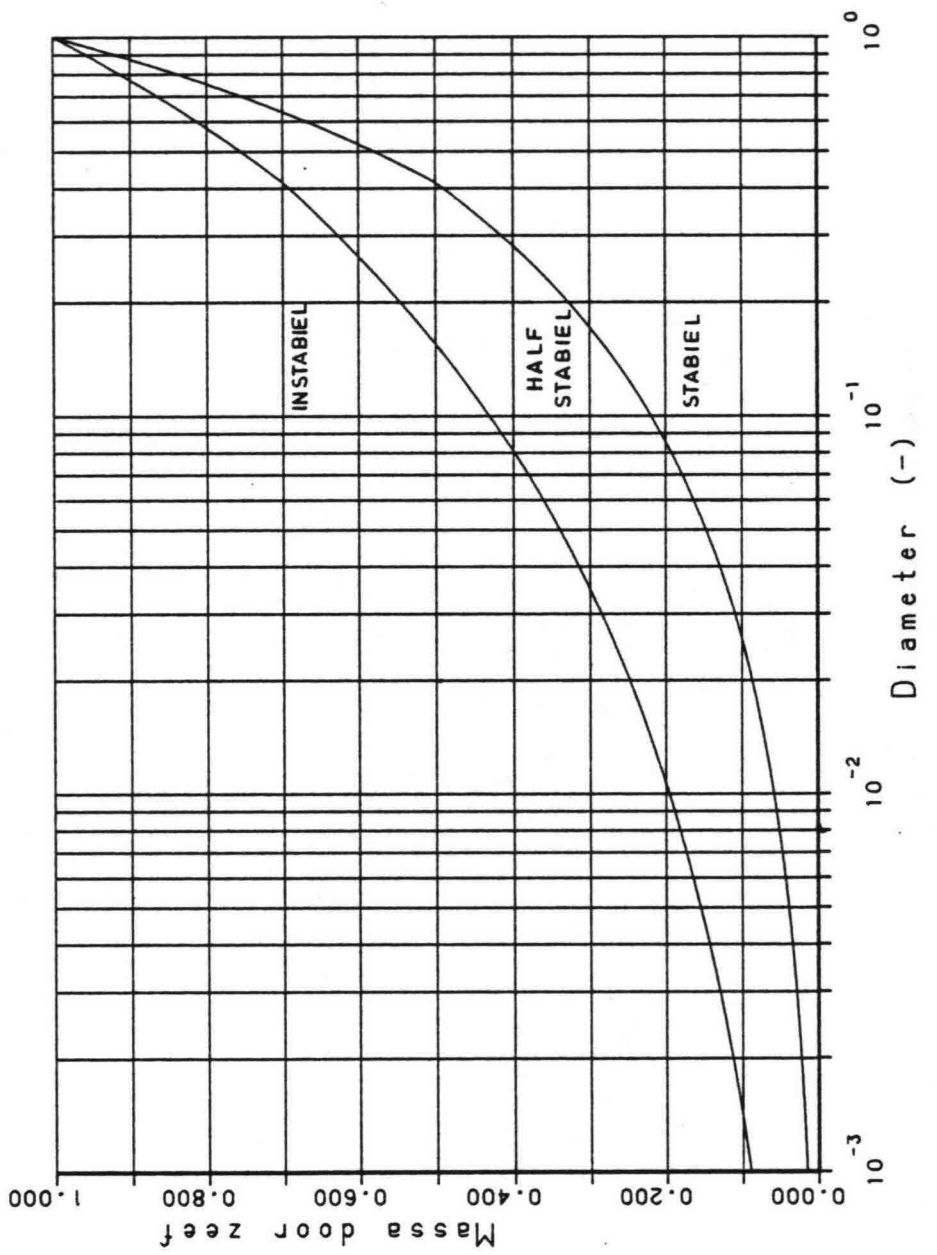
BIJL. 4.13

get.

gec.

form.
30/40





LABORATORIUM VOOR GRONDMECHANICA DELFT

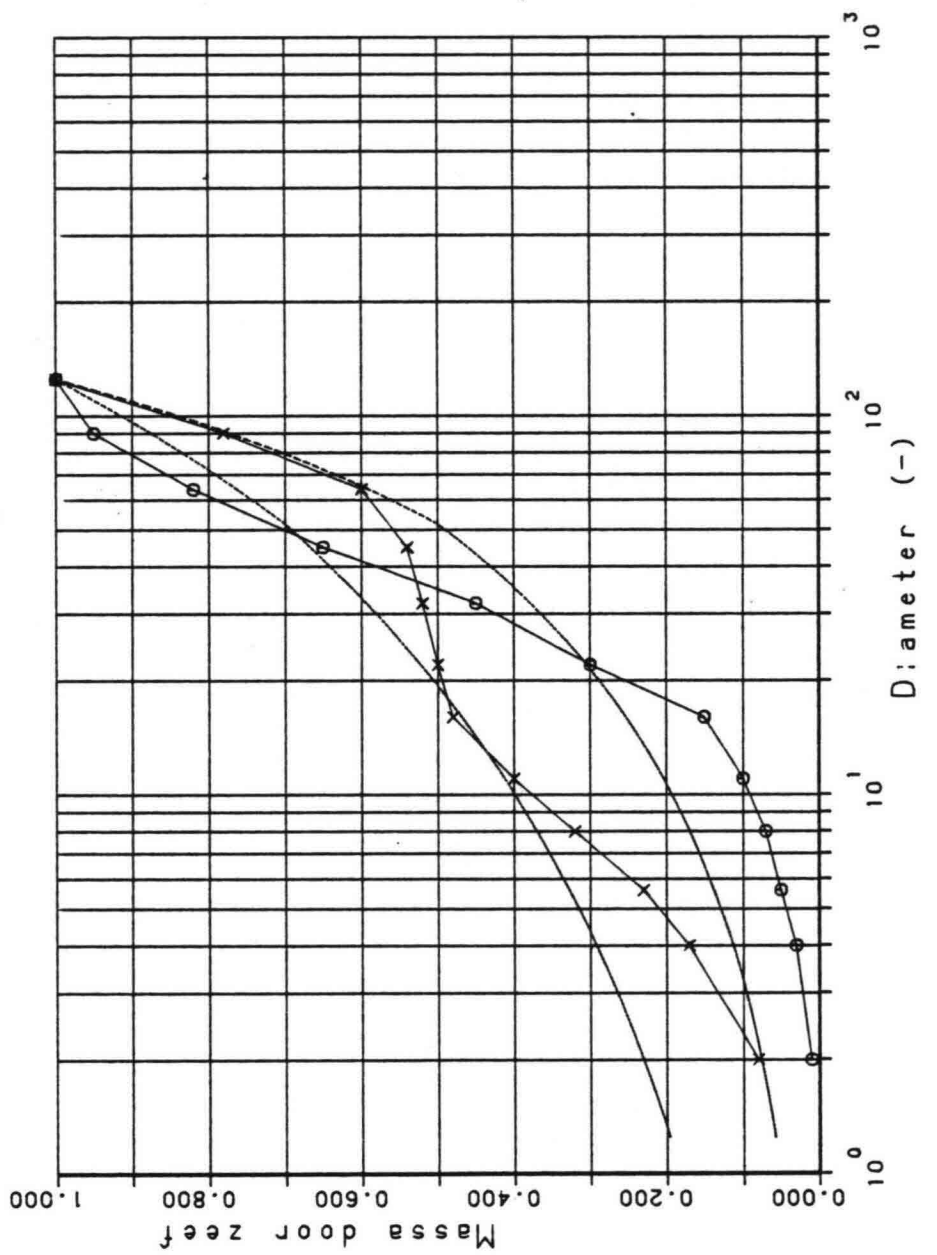
85-09-17

Interne stabiliteitscurves volgens
Lubochkov

CO-416640 Hda

BIJL. 4.14





LABORATORIUM VOOR GRONDMECHANICA DELFT

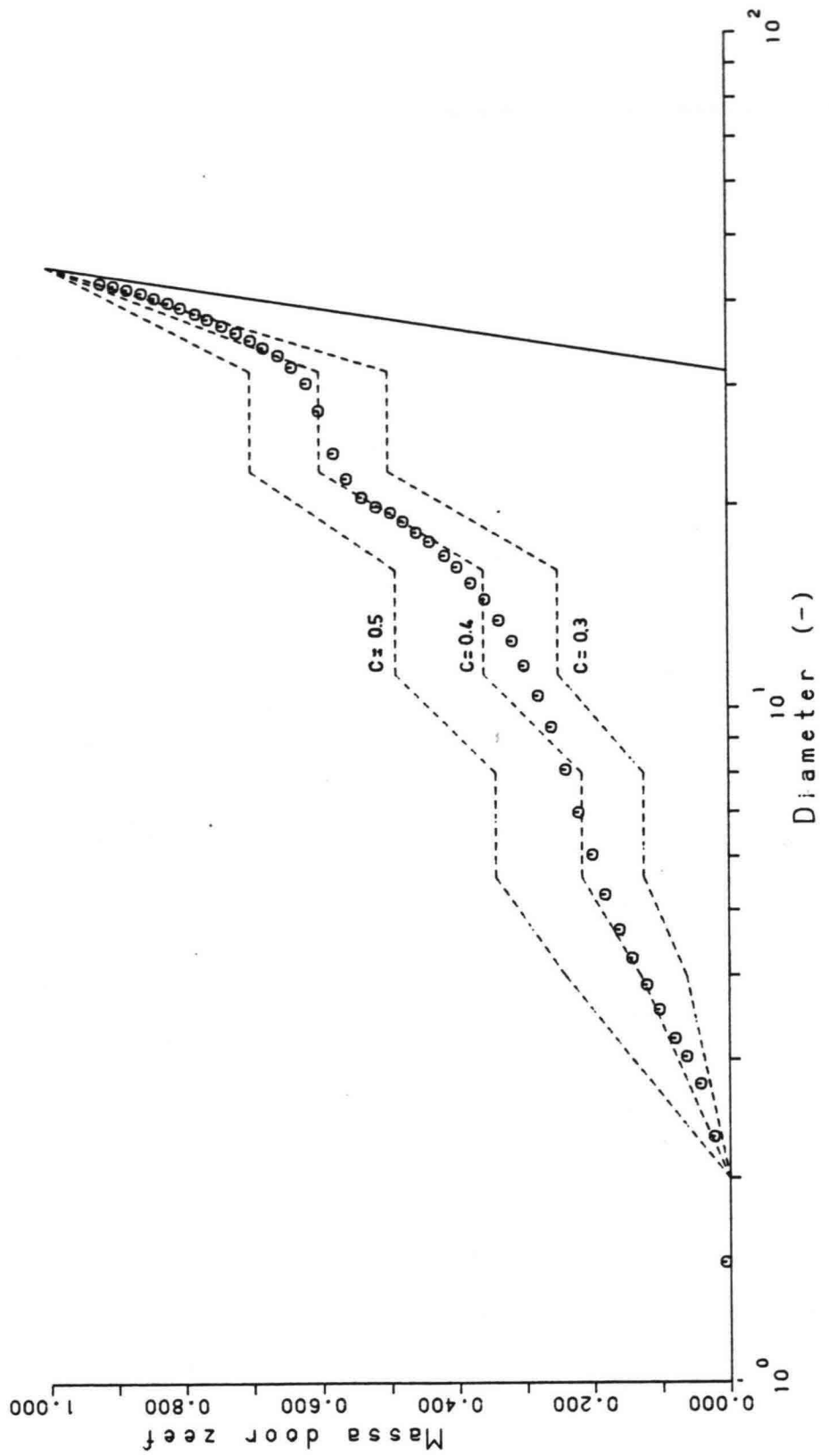
85-09-17

Interne stabiliteitscurves volgens
Lubochkov

CO-416640 Hda

BIJL. 4.15





LABORATORIUM VOOR GRONDMECHANICA DELFT

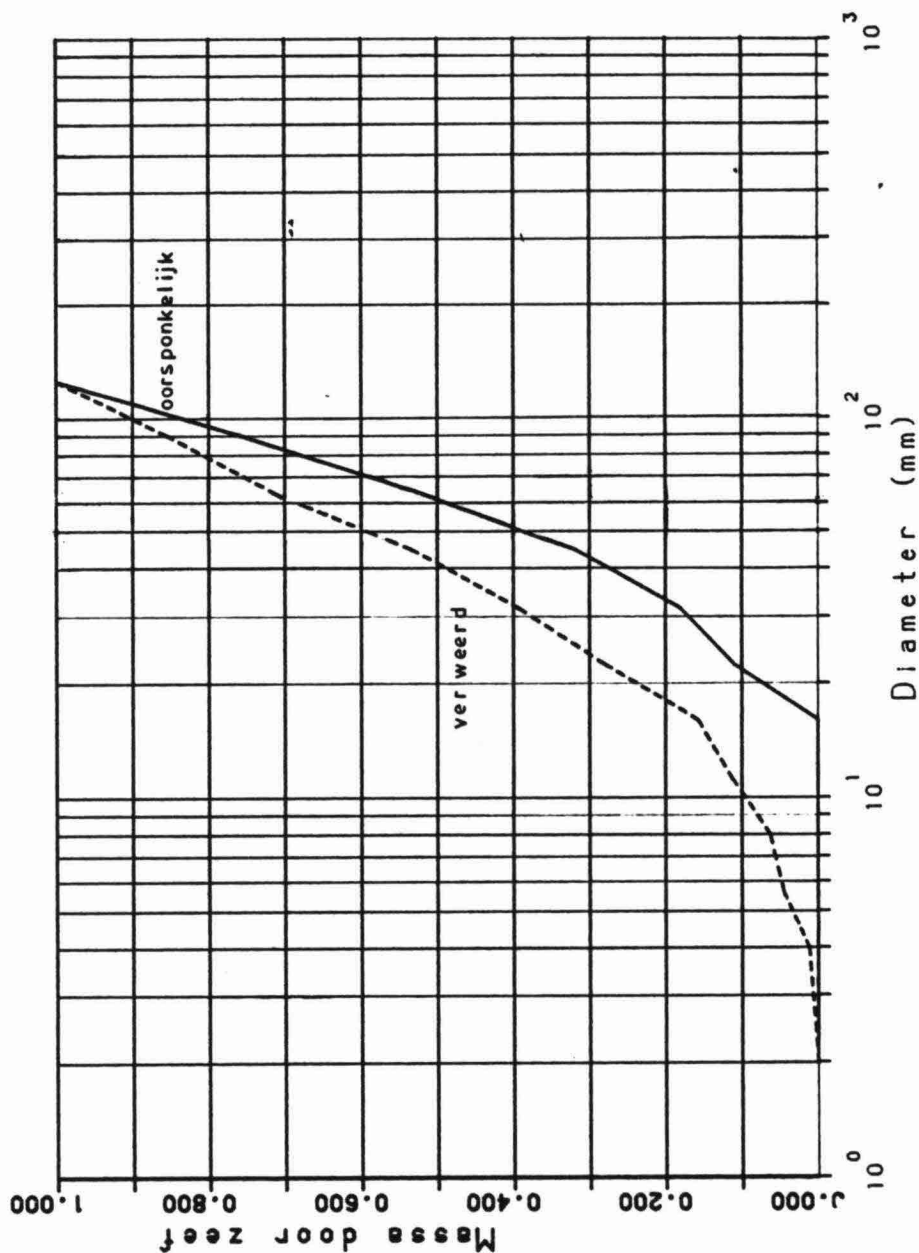
85-09-17

Verweerde mijnsteen, fractie C31.5-C45
na 2 jaren

CO-416640 Hda

BIJL. 6.1





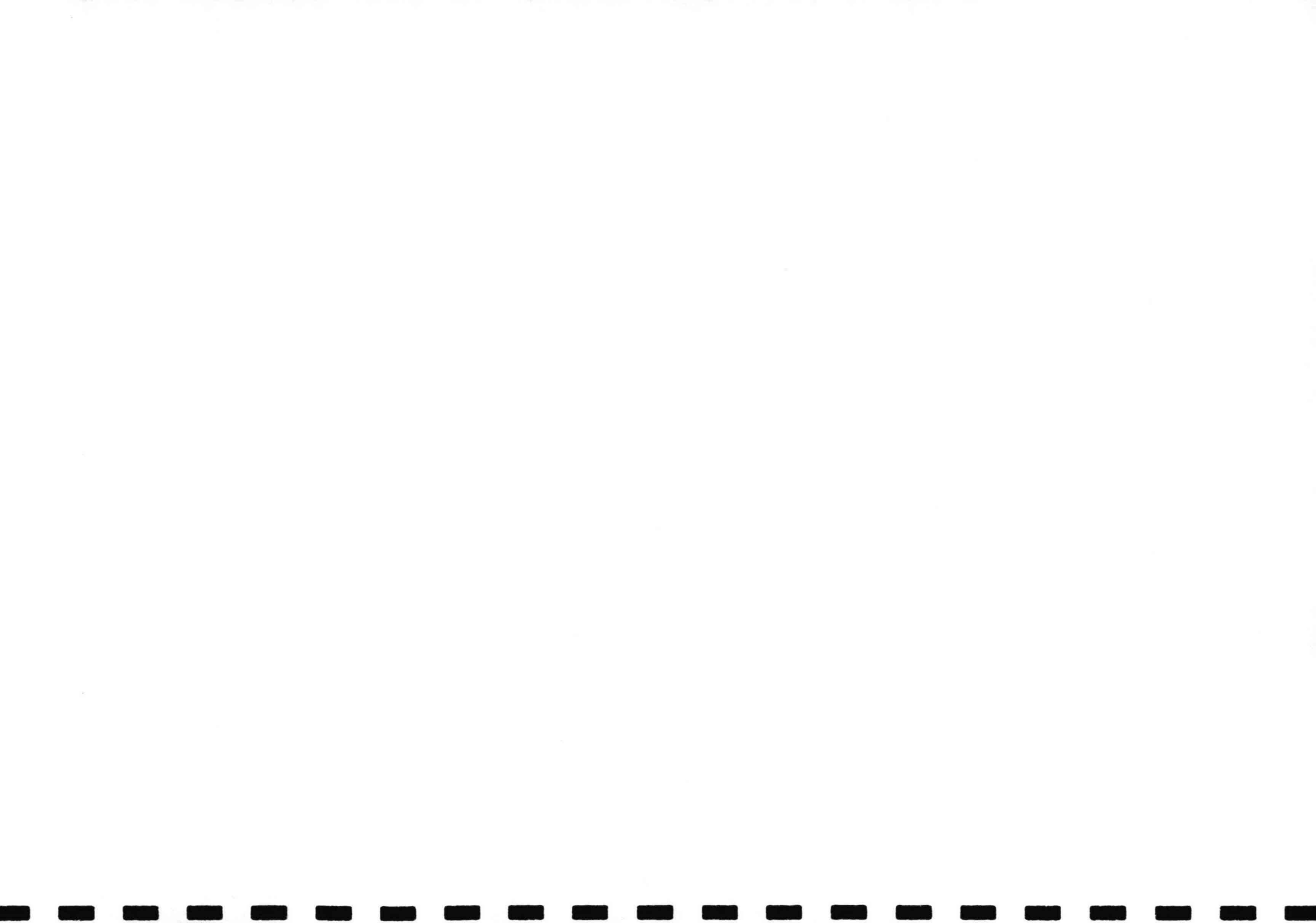
LABORATORIUM VOOR GRONDMECHANICA DELFT

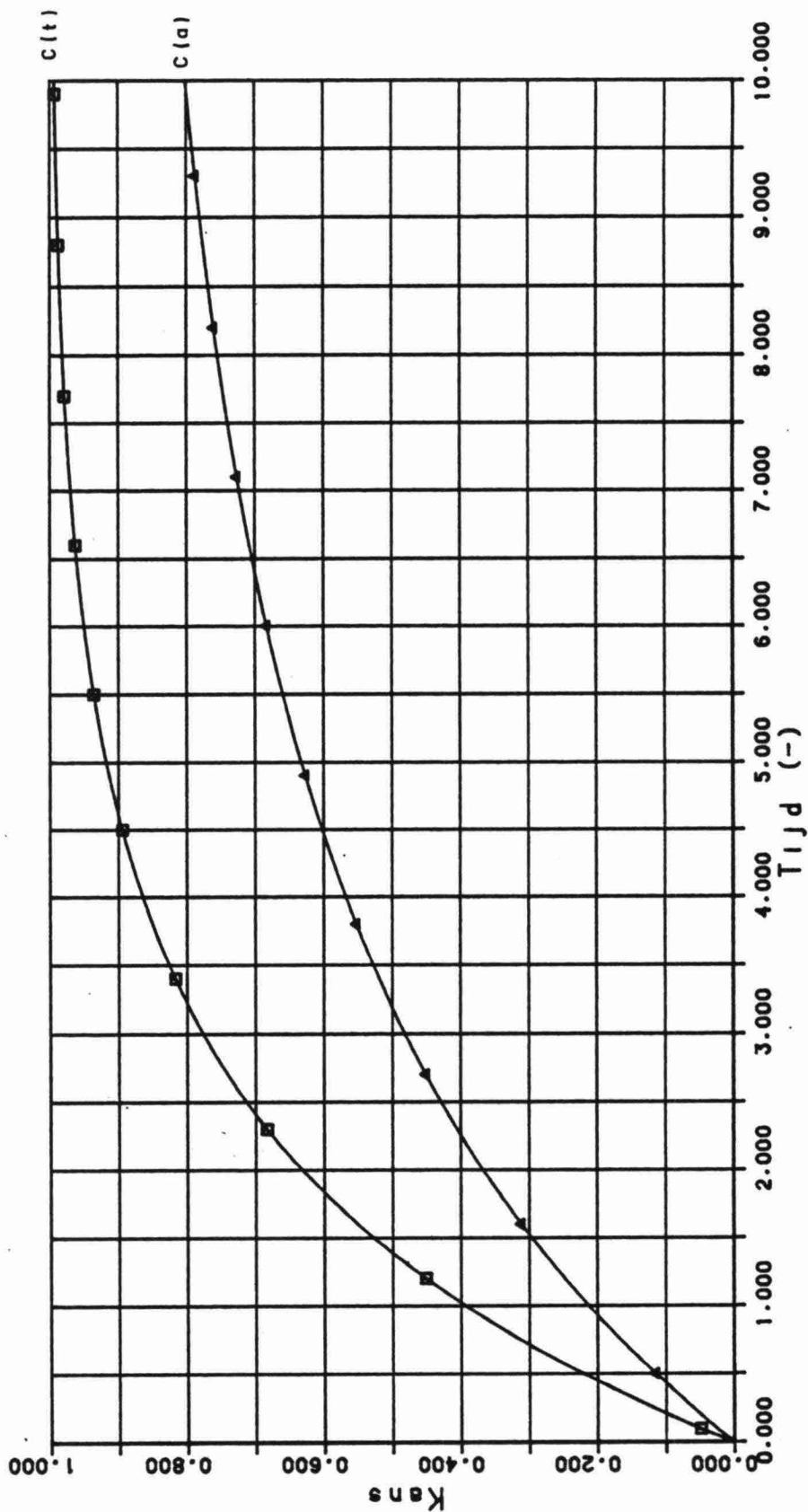
85-09-17

Splijting en verwerings model toegepast op mijnsteen uit Zollverein

CO-416640 Hda

BIJL. 62





LABORATORIUM VOOR GRONDMECHANICA DELFT

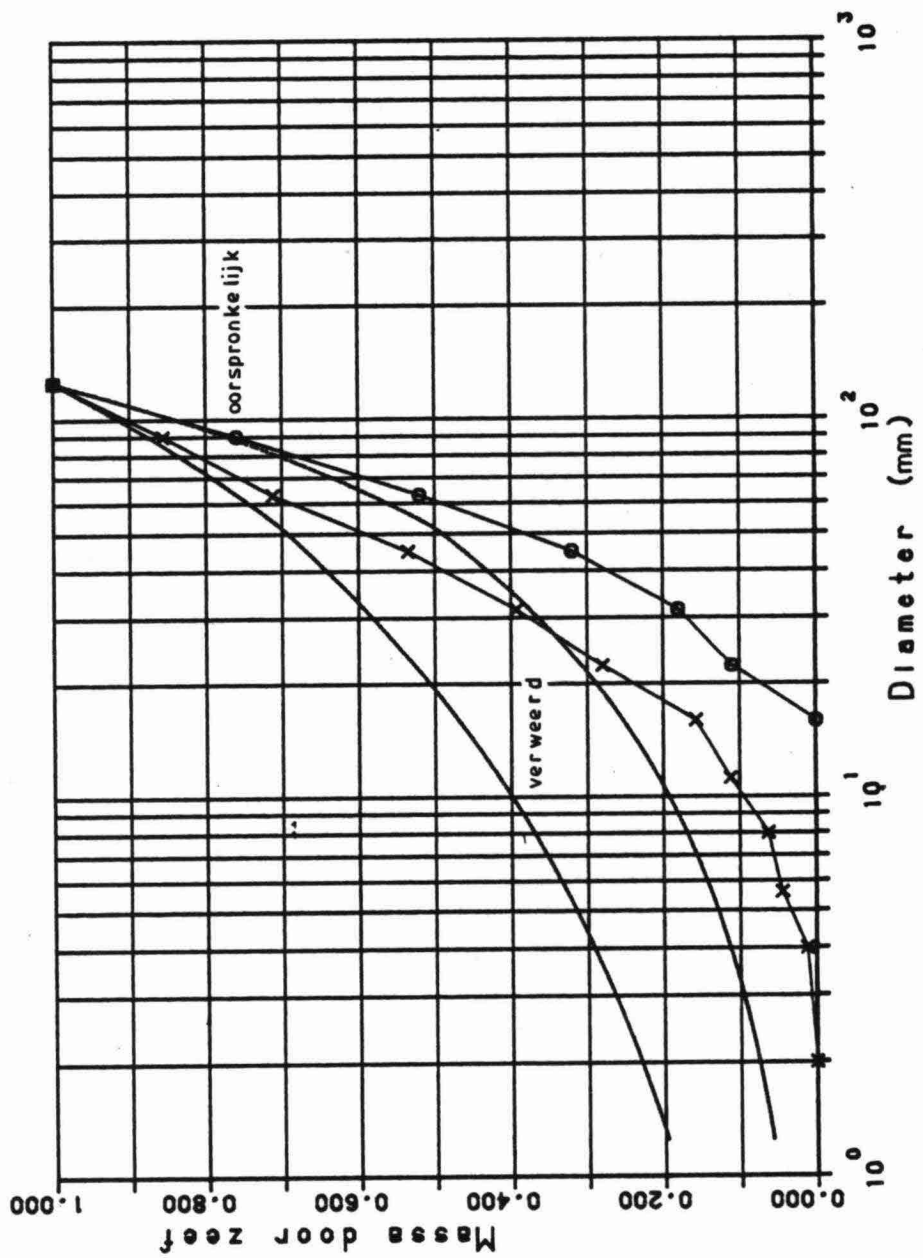
85-09-17

Kans op halvering $c(t)$ (rondjes) en het
tijdgemiddelde $c(a)$ (driehoekjes)

CO-416640 Hda

BIJL. 63





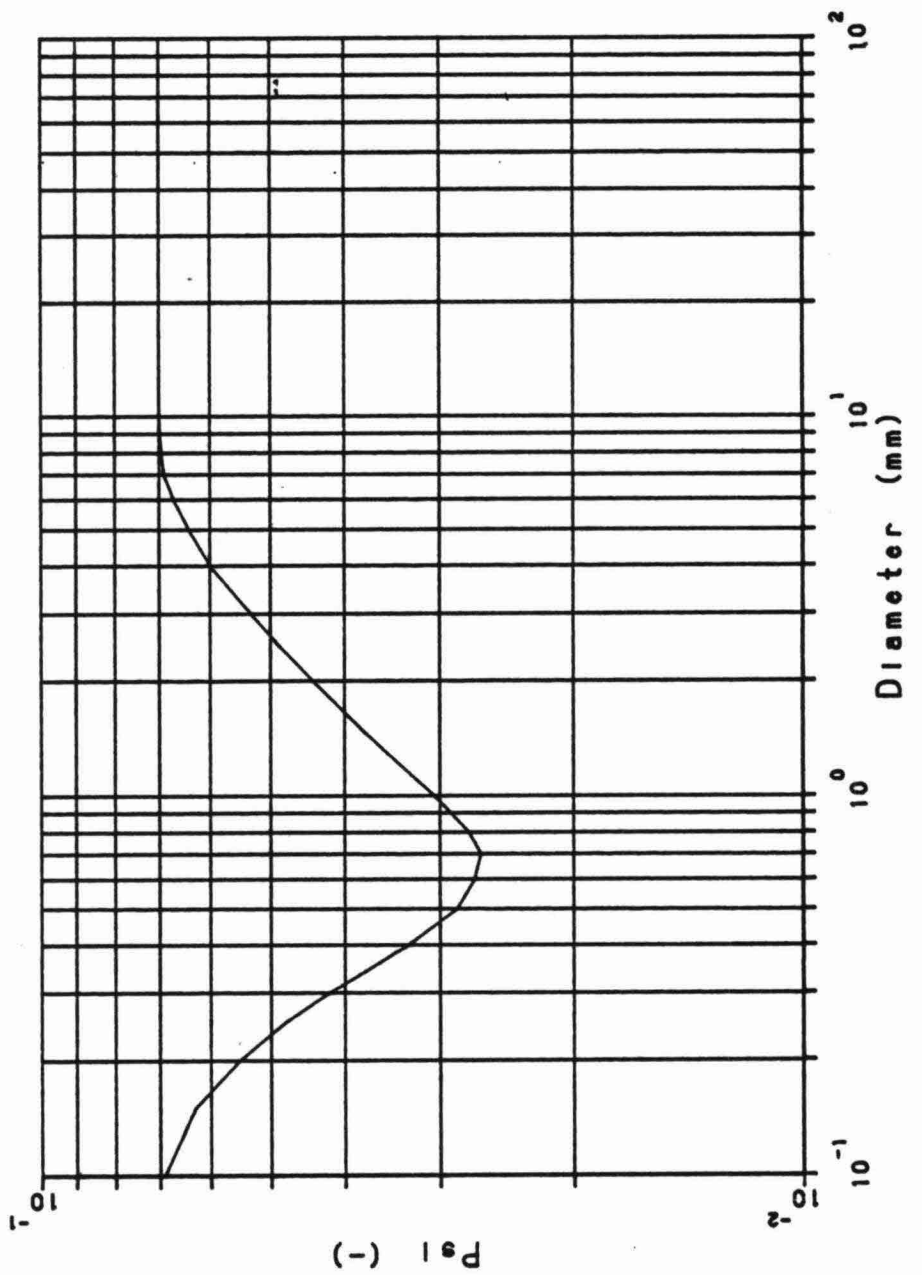
LABORATORIUM VOOR GRONDMECHANICA DELFT

85-09-17

Splijting en verwerings model voor mijn-
steen, Zollverein, intern stabiel?

CO-416640 Hda

BIJL. 64



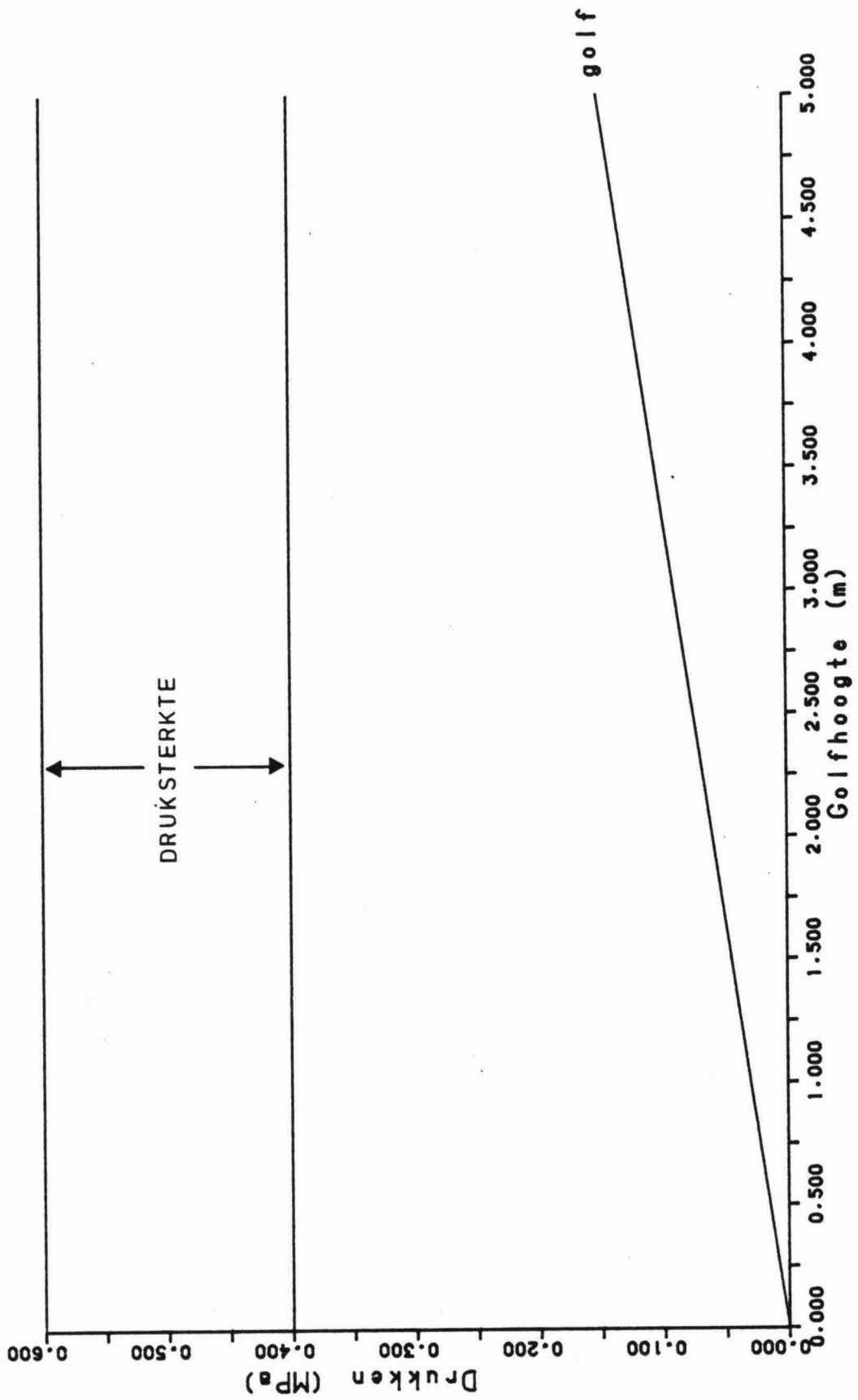
LABORATORIUM VOOR GRONDMECHANICA DELFT

85-09-17

Shields parameter, omgerekend naar diameter

CO-416640 Hda

BIJL. 8.1



LABORATORIUM VOOR GRONDMECHANICA DELFT

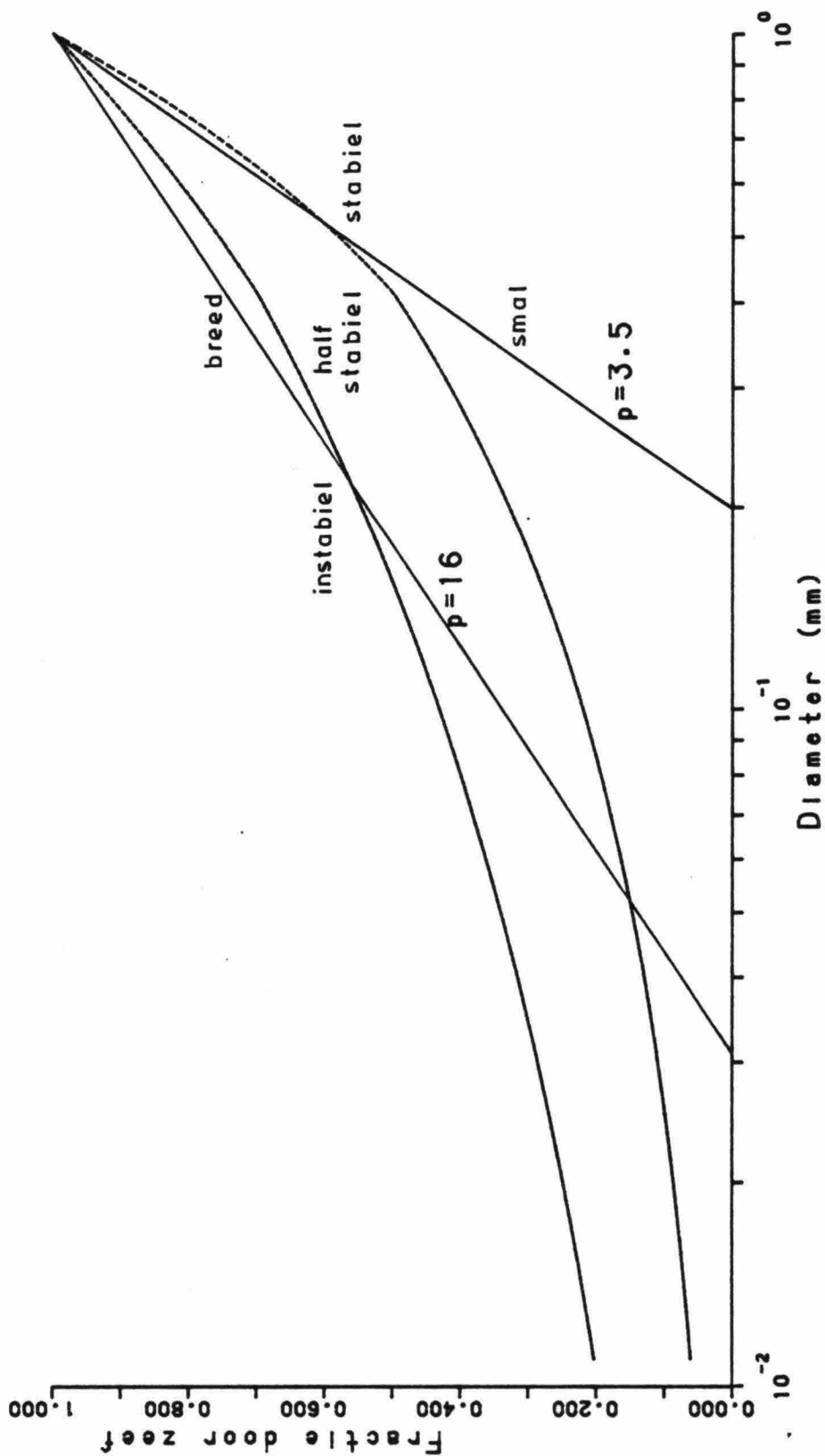
85-09-17

Vergelijking van de druksterkte van LD-slakken met drukken van de golfklappen

CO-416640

Hda

BIJL. 82



LABORATORIUM VOOR GRONDMECHANICA DELFT

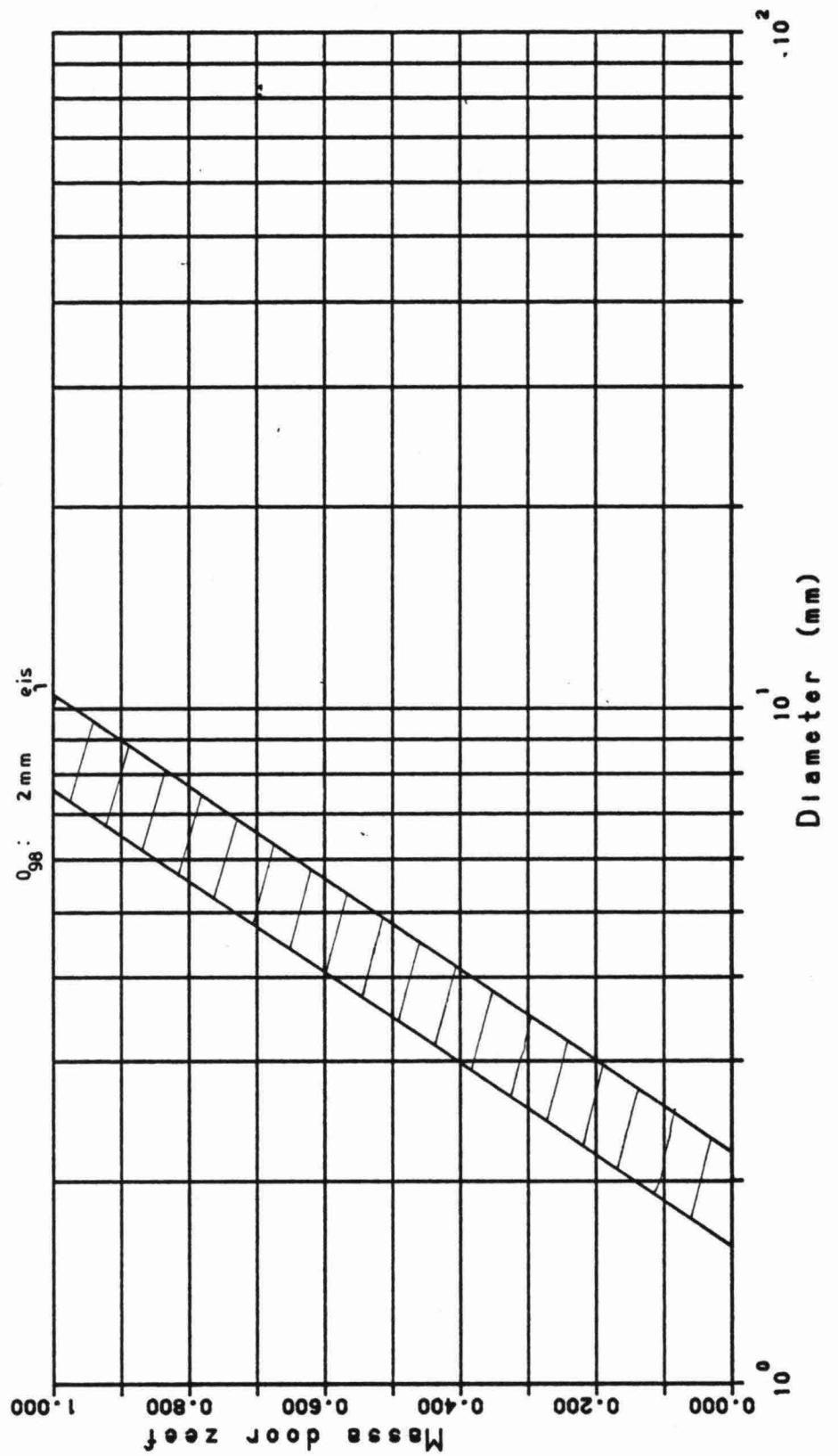
85-09-17

Toetsing interne stabiliteit. Criteria
Lubochkov en moedercurves $p=3.5$ en 16

CO-416640

Hda

BIJL. 9.1



LABORATORIUM VOOR GRONDMECHANICA DELFT

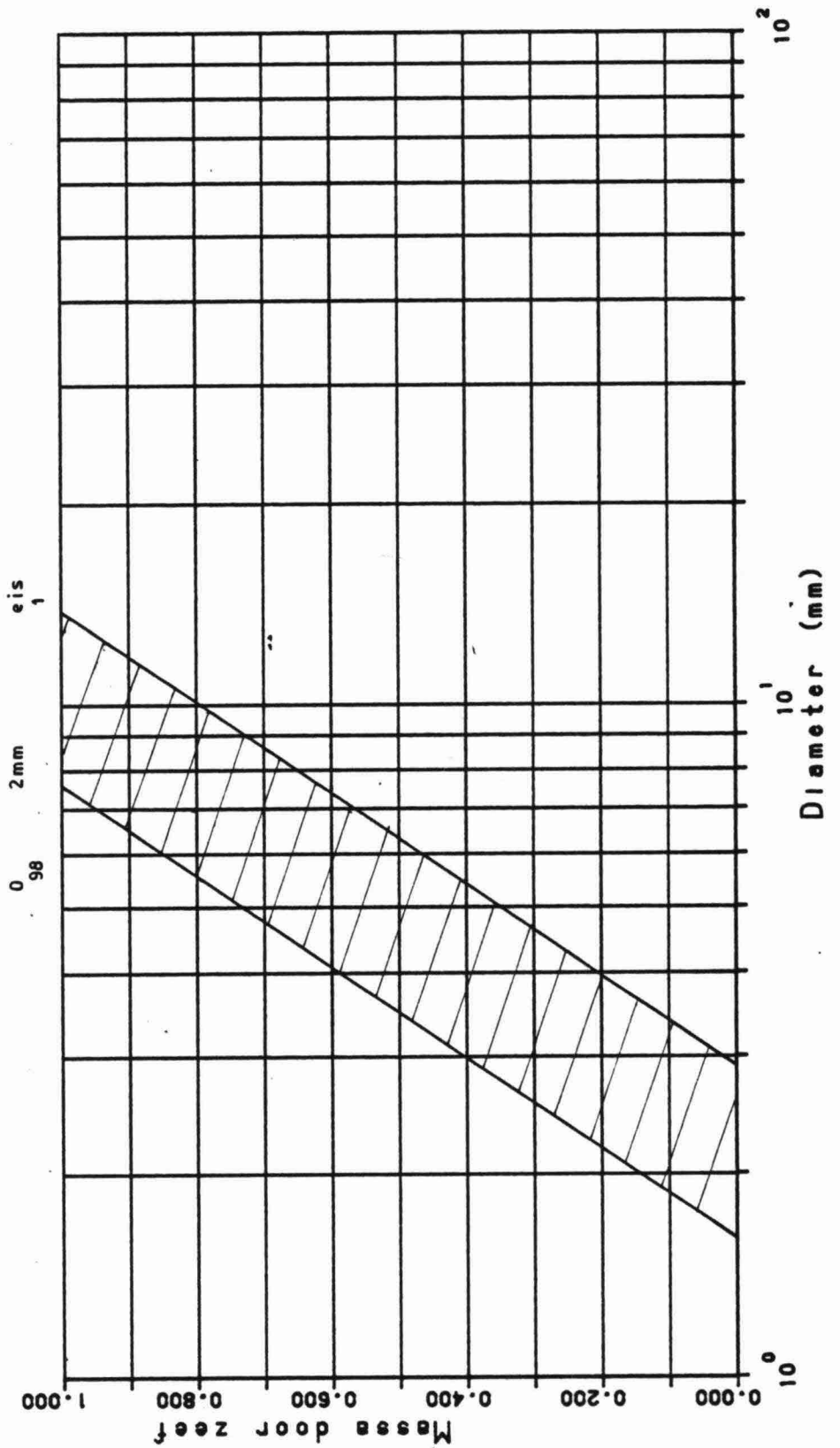
85-09-17

Zeefband bij een smalle korrelverdeling
Talud 1:3 $d_{50}=0.2\text{mm}$

CO-416640

Hda

BIJL. 92



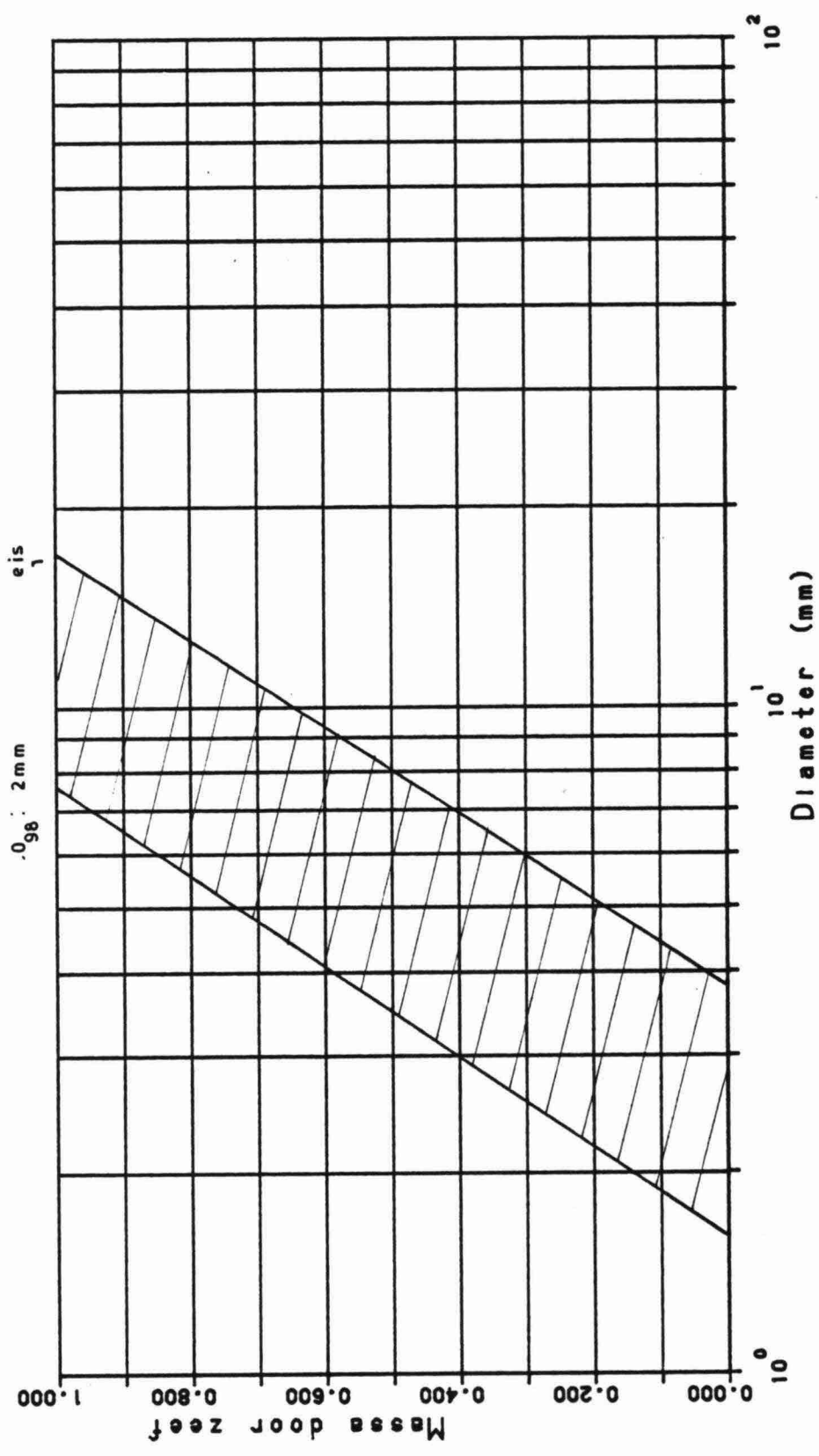
LABORATORIUM VOOR GRONDMECHANICA DELFT


85-09-17

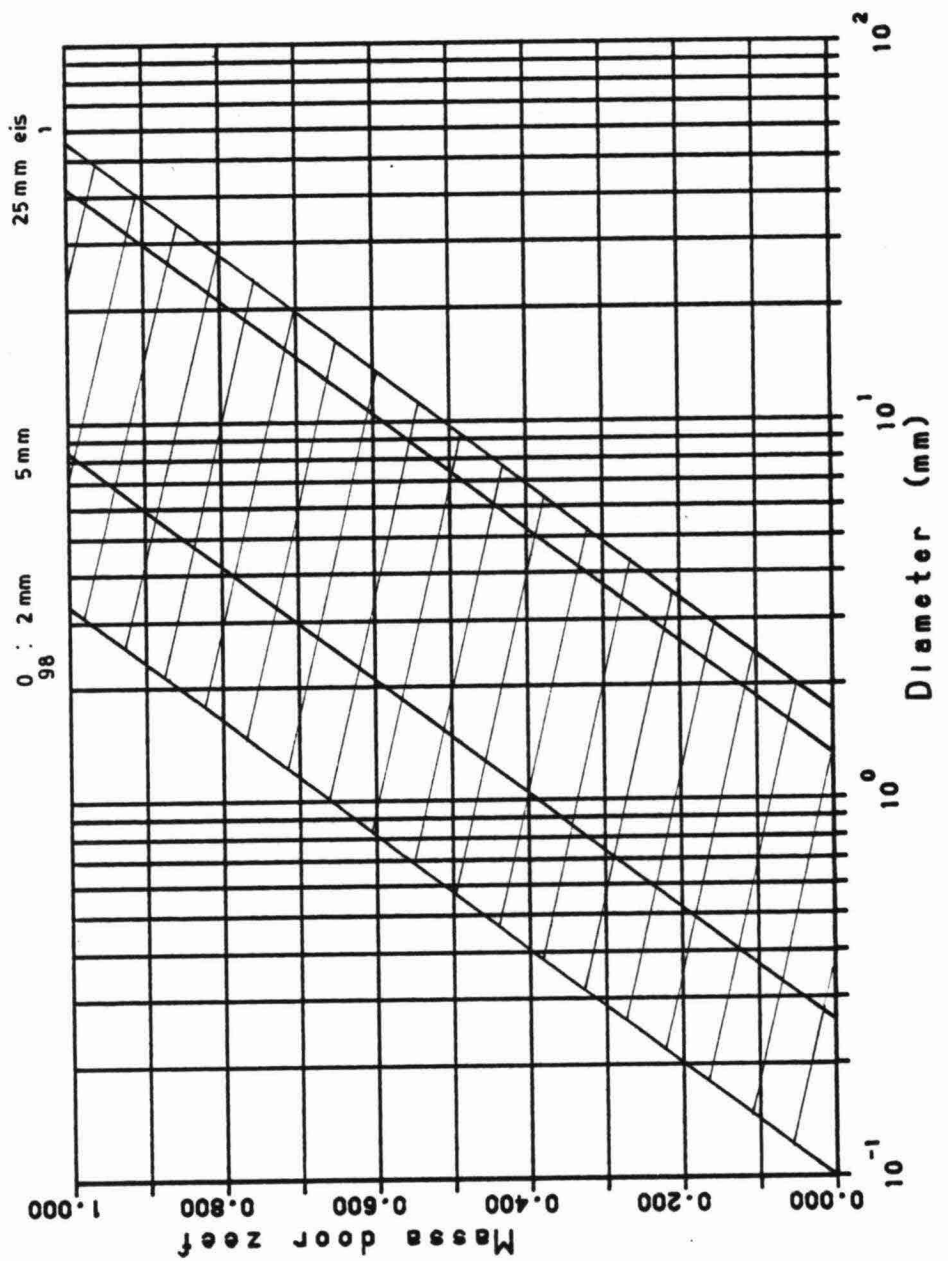
Zeefband bij een smalle korrelverdeling
 Talud 1:4 d₅₀=0.2mm

CO-416640 Hda

BIJL. 93



	LABORATORIUM VOOR GRONDMECHANICA DELFT	85-09-17	
	Zeefband bij een smalle korrelverdeling Talud 1:2, 1:3 en 1:4; d ₅₀ =0.82mm	CO-416640	Hda
		BIJL. 94	



LABORATORIUM VOOR GRONDMECHANICA DELFT

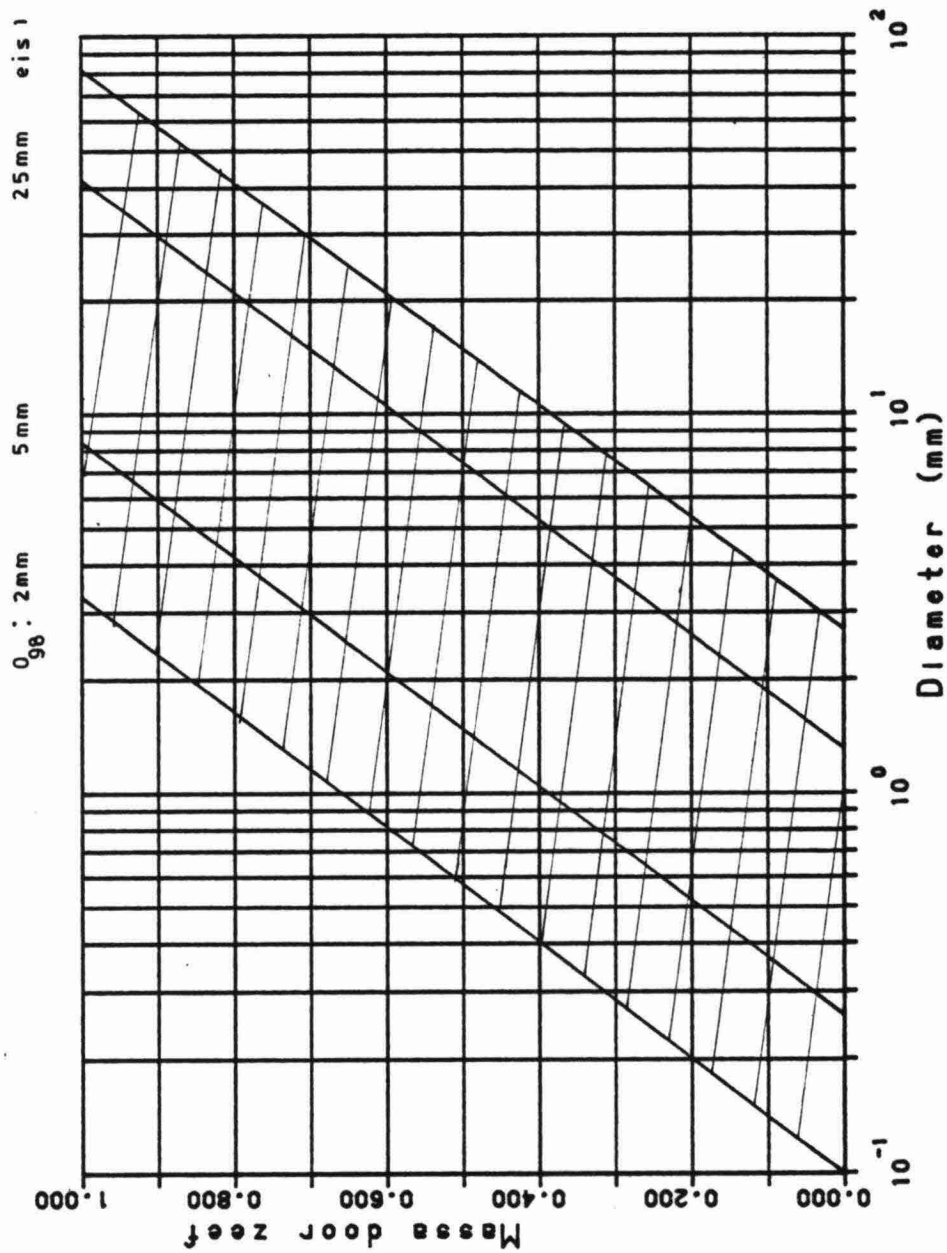
85-09-17

Zeefband bij een brede korrelverdeling
 Talud 1:2 $d_{50}=0.2\text{mm}$

CO-416640 Hda

BIJL. 95





LABORATORIUM VOOR GRONDMECHANICA DELFT

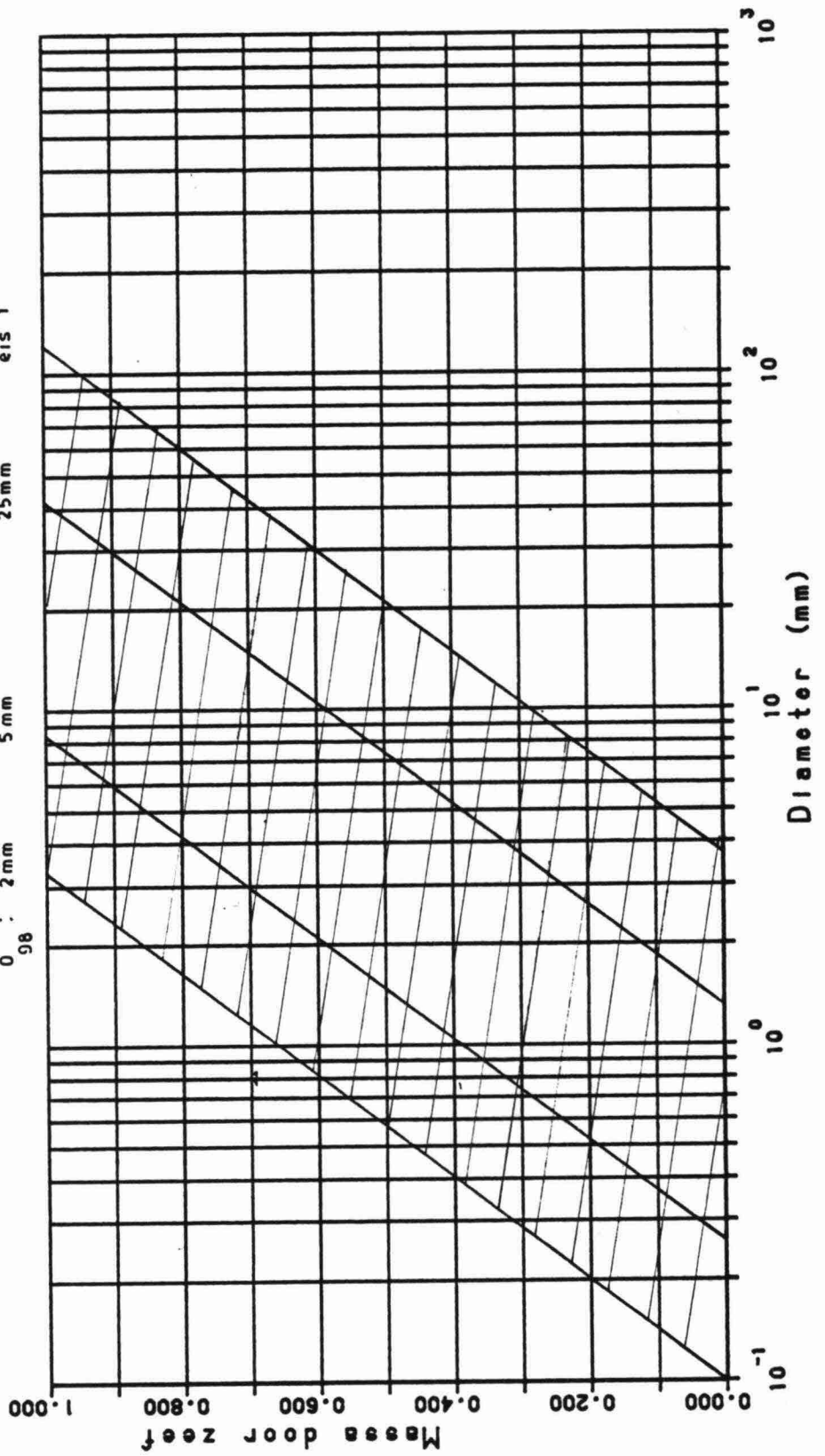
85-09-17

Zeefband bij een brede korrelverdeling
 Talud 1:3 $d_{50}=0.2\text{mm}$

CO-416640 Hda

BIJL. 96





LABORATORIUM VOOR GRONDMECHANICA DELFT

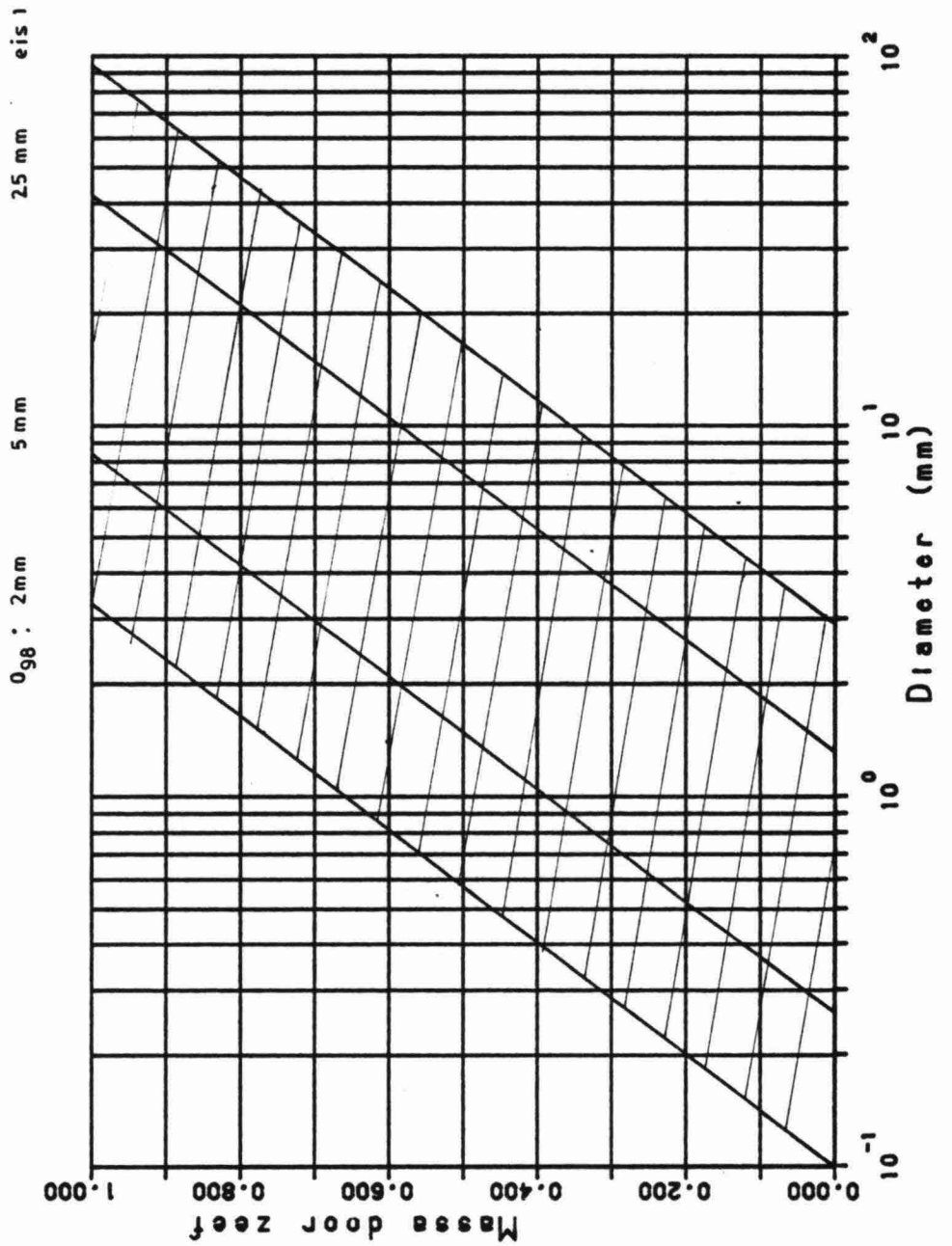
85-09-17

Zeefband bij een brede korrelverdeling
Talud 1:4 $d_{50}=0.2\text{mm}$

CO-416640 Hda

BIJL. 97





LABORATORIUM VOOR GRONDMECHANICA DELFT

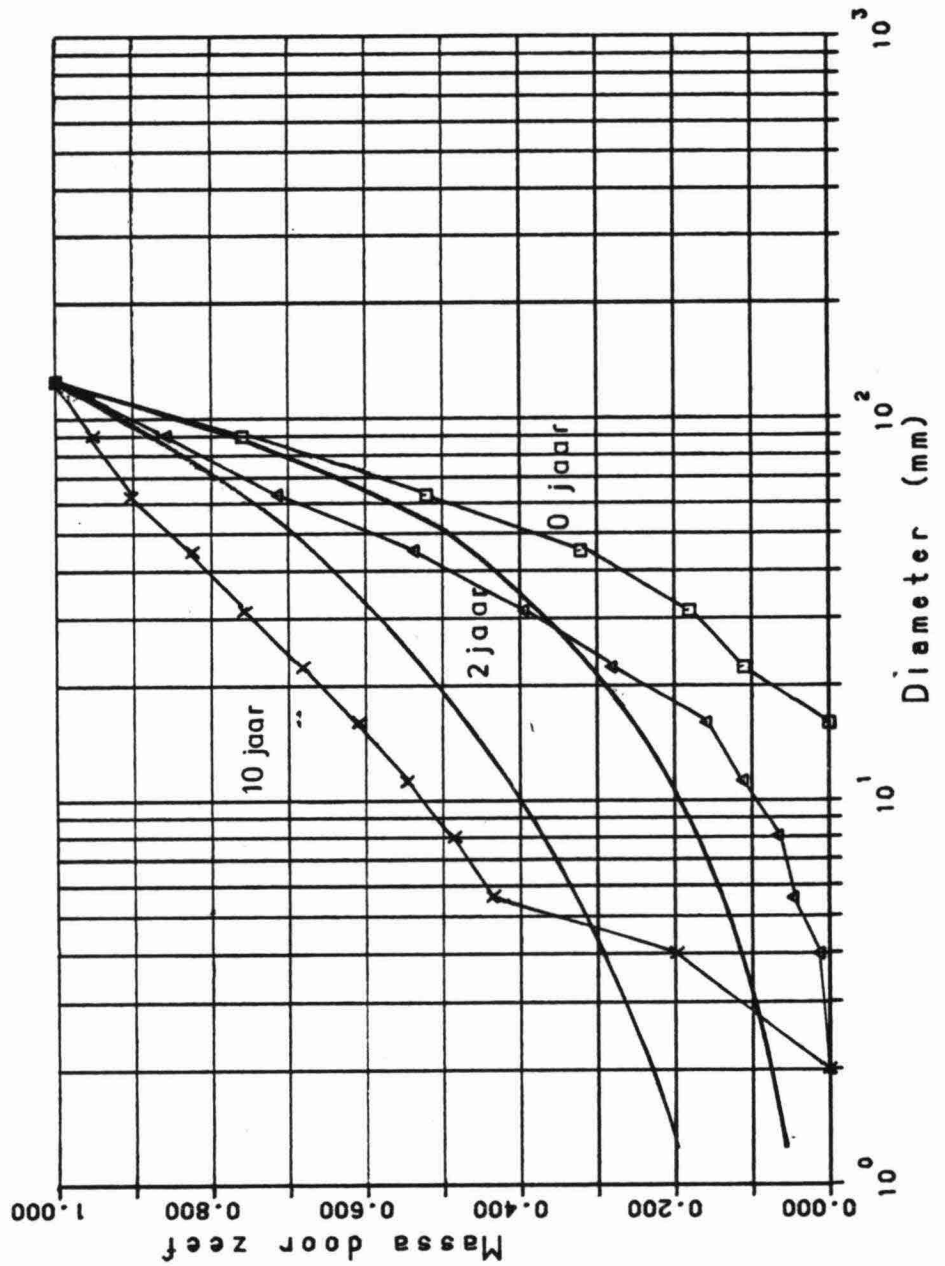
85-09-17

Zeefband bij een brede korrelverdeling
 Talud 1:2, 1:3 en 1:4; d50=0.82mm

CO-416640 Hda

BIJL. 98





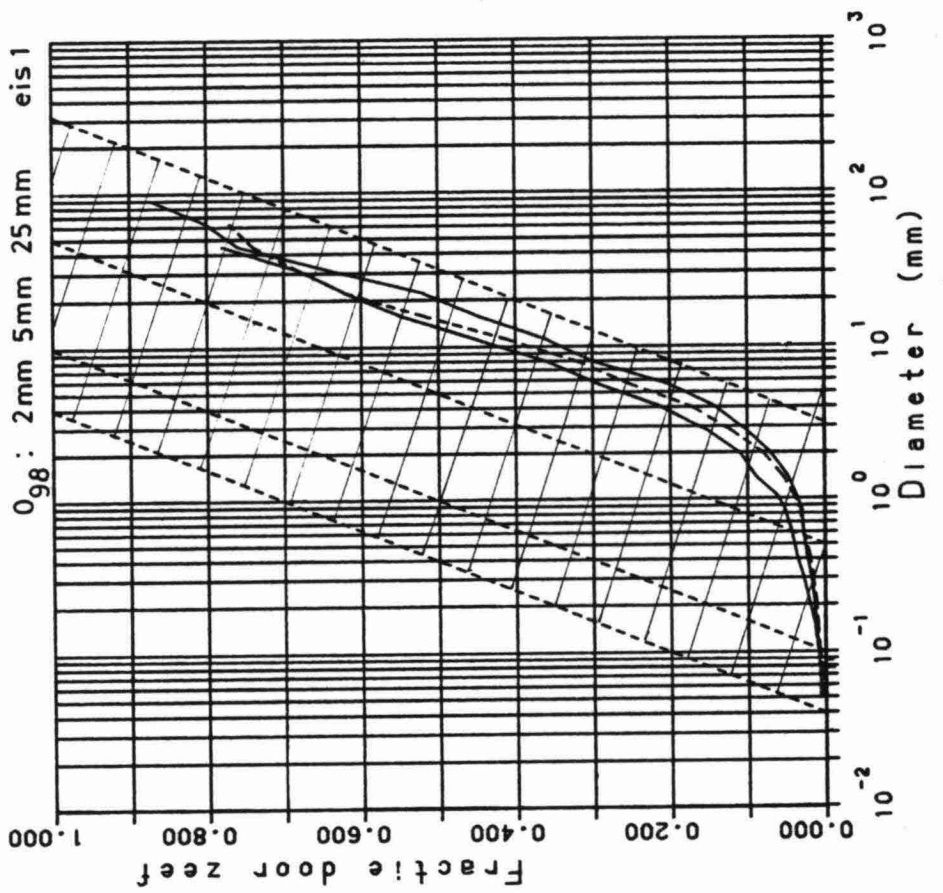
LABORATORIUM VOOR GRONDMECHANICA DELFT

85-09-17

Verweringsmodel. Resultaten na 0, 2 en 10 jaar.

CO-416640 Hda

BIJL. 10.1



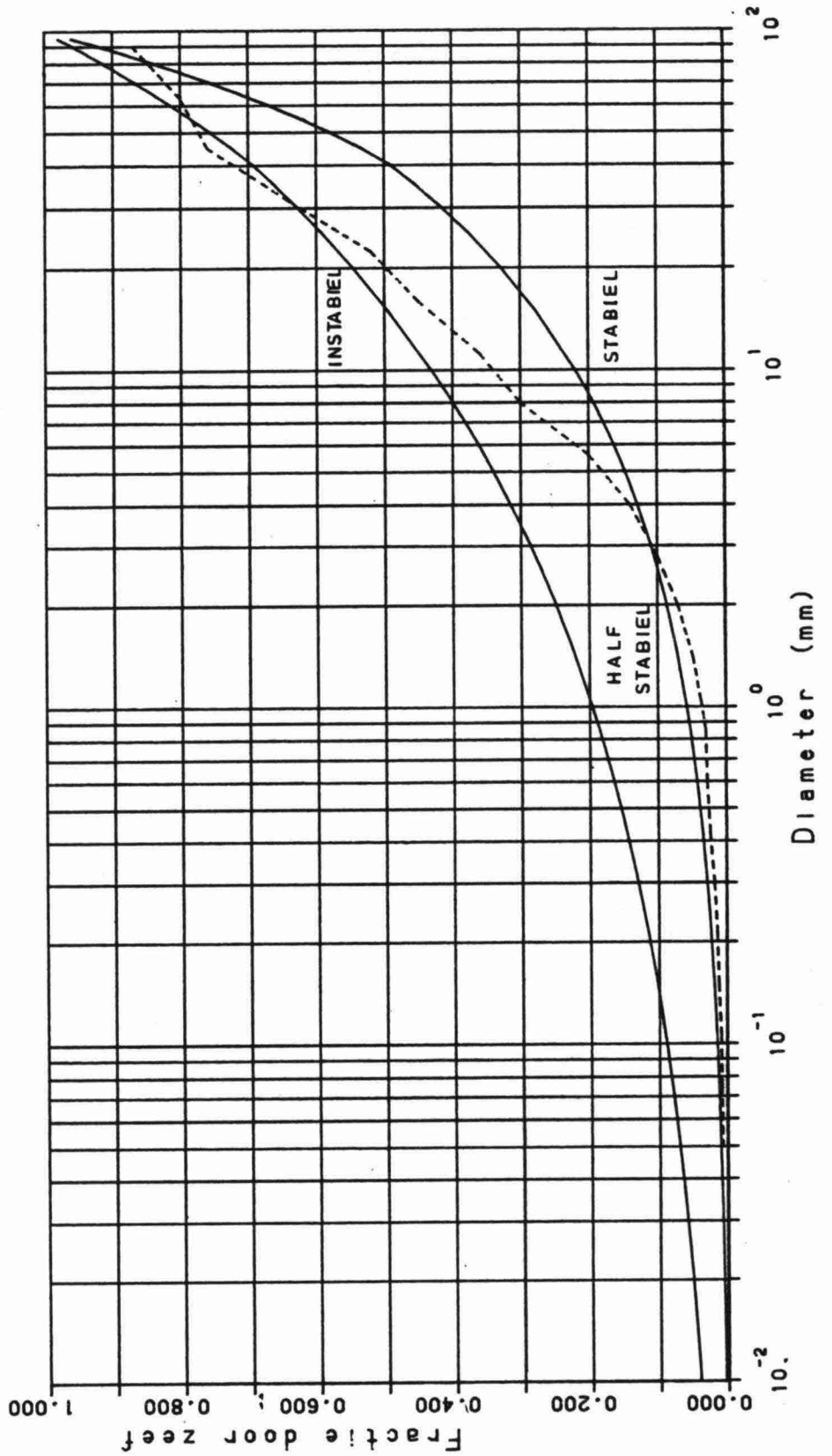
LABORATORIUM VOOR GRONDMECHANICA DELFT

85-09-17

Toetsing zeefcurves van mijnsteen uit de
Deltagoot en filterbak aan de zeefbanden

CO-416640 Hda

BIJL. 11.2



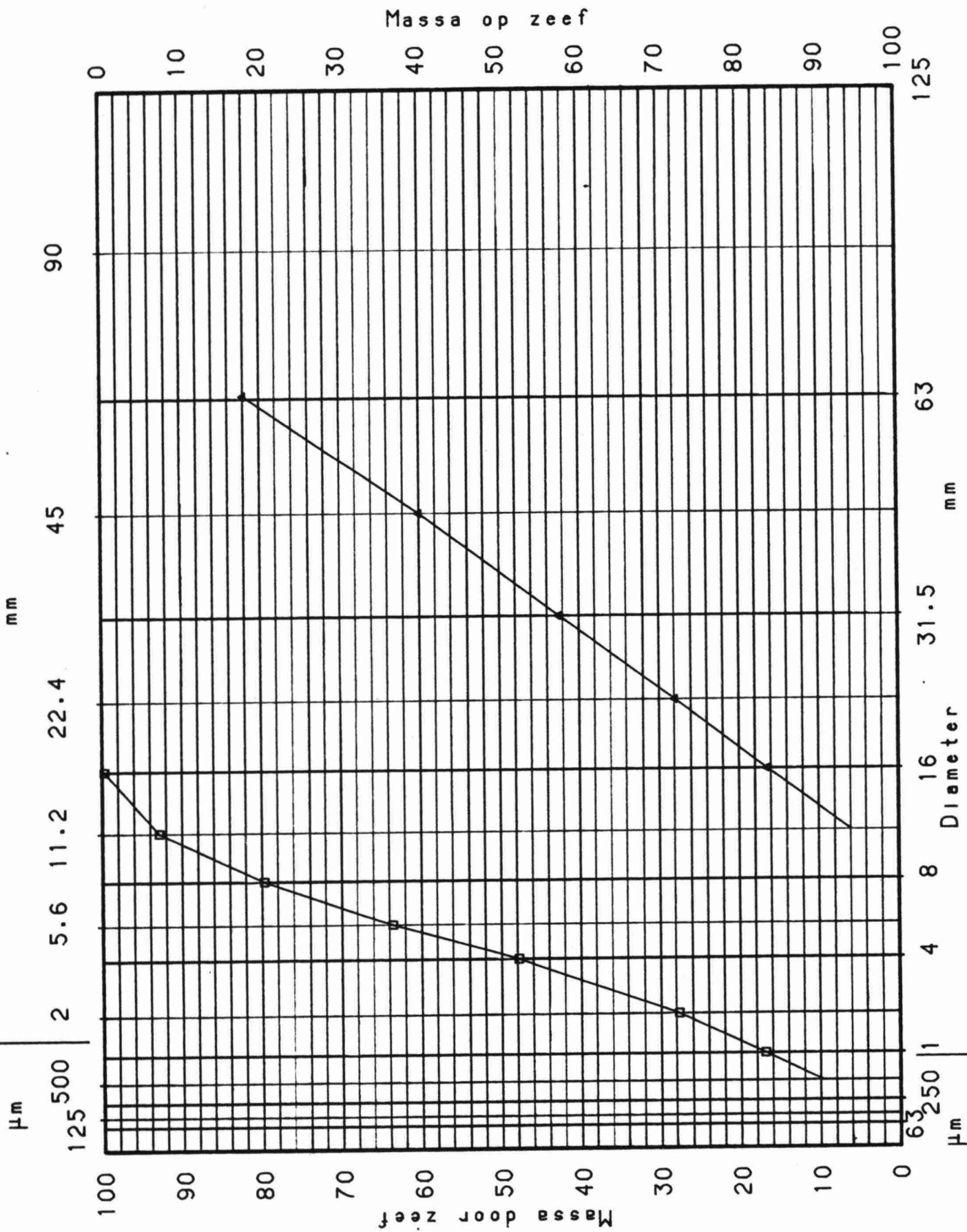
LABORATORIUM VOOR GRONDMECHANICA DELFT

85-09-17

Beoordeling van de interne stabiliteit
boven- en ondergrens volgens Lubochkov

CO-416640 Hda

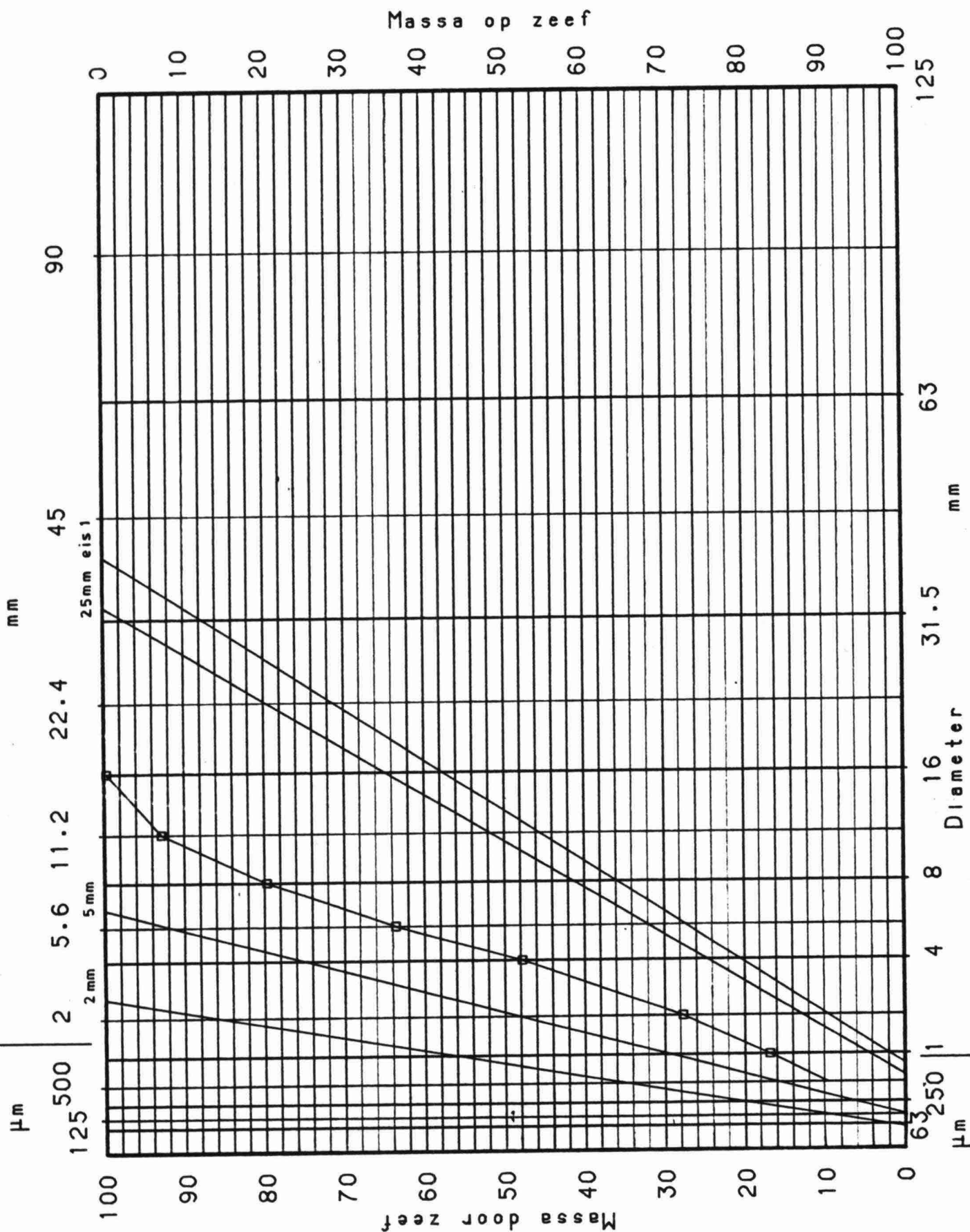
BIJL. 11.3



LABORATORIUM VOOR GRONDMECHANICA DELFT 85-09-17

Cumulatieve korrelverdeling van LD slakken, 0/10 mm en 10/80 mm

CO-416640 Hda
BIJL. 12.1



LABORATORIUM VOOR GRONDMECHANICA DELFT

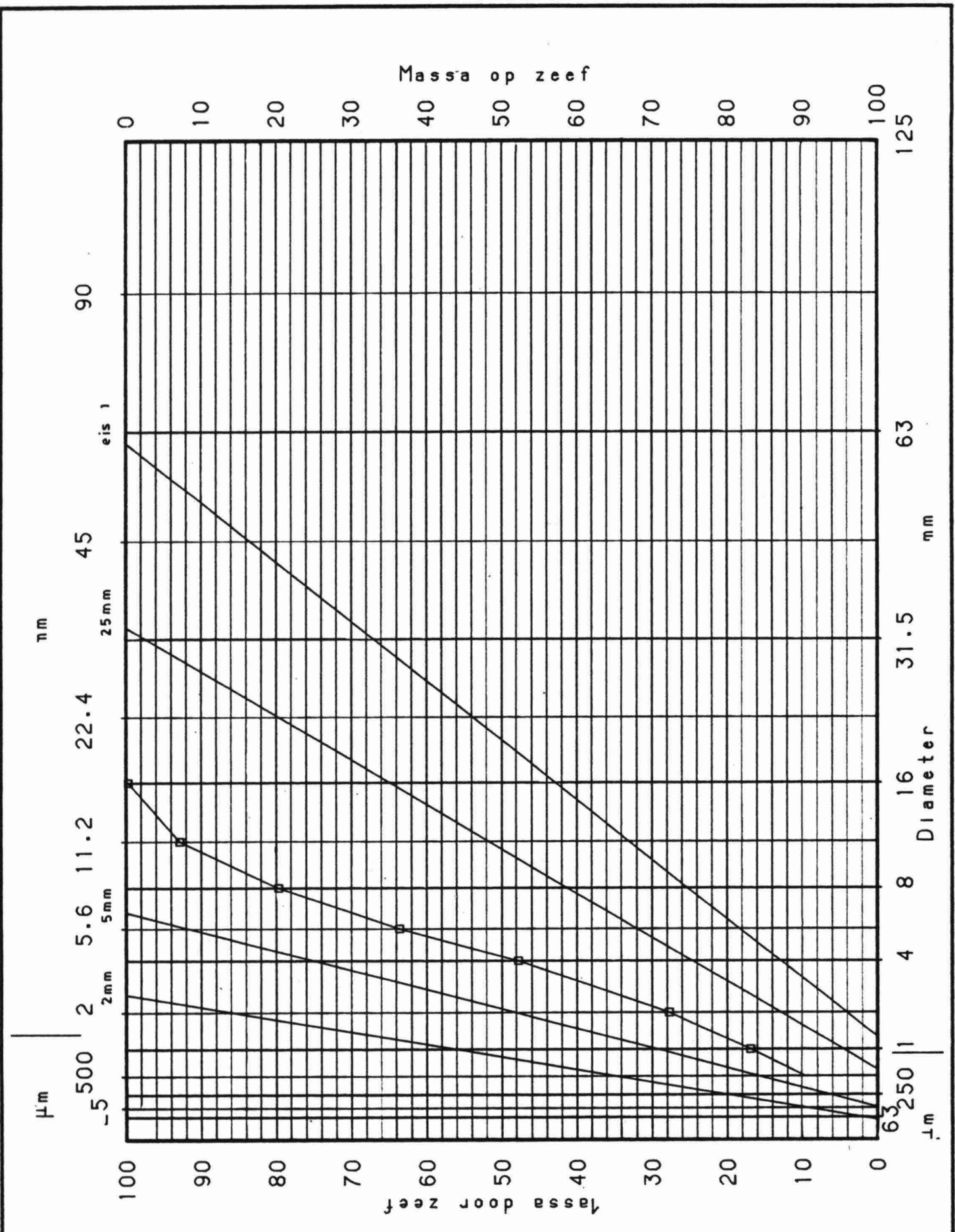
85-09-17

Toetsing cumulatieve korrelverdeling van LD slakken 0/10 mm; talud 1:2; $d_{50}=0.2\text{mm}$

CO-416640 Hda

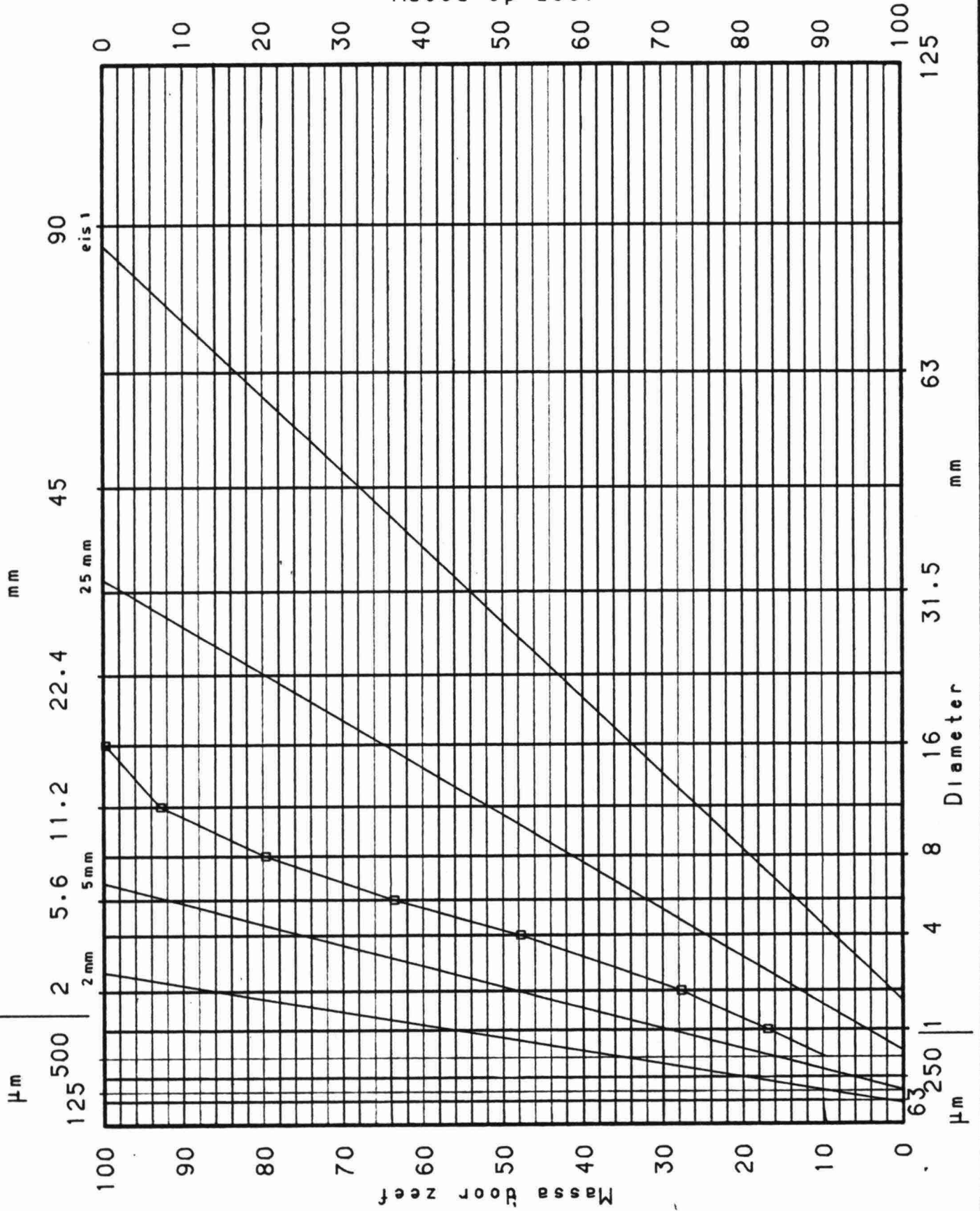
BIJL. 122





19	LABORATORIUM VOOR GRONDMECHANICA DELFT	85-09-17	
Toetsing cumulatieve korrelverdeling van LD slakken 0/10 mm; talud 1:3; d50=0.2mm		CO-416640	Hda
		BIJL. 123	

Massa op zeef



LABORATORIUM VOOR GRONDMECHANICA DELFT

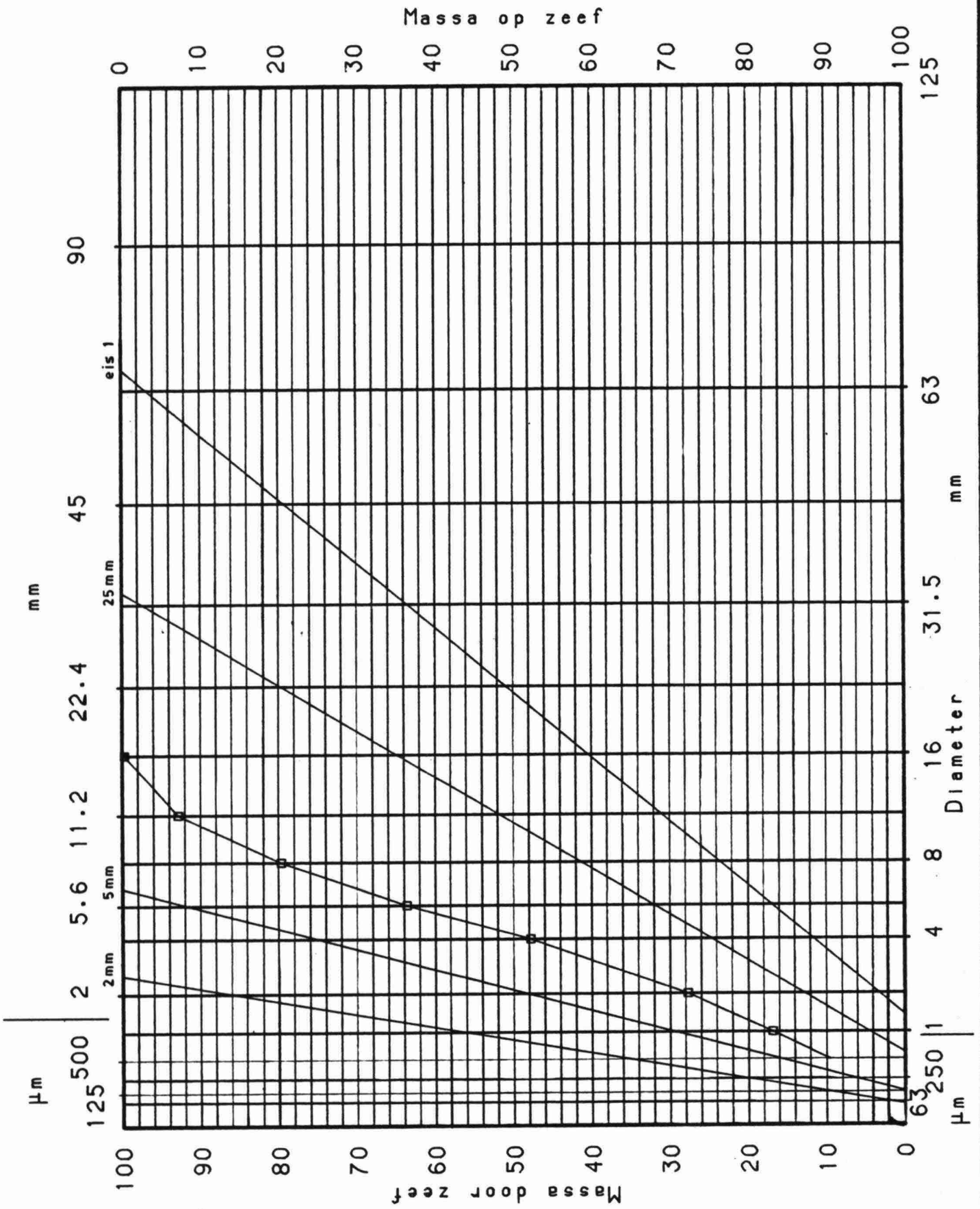
85-09-17

Toetsing cumulatieve korrelverdeling van LD slakken 0/10 mm; talud 1:4; $d_{50}=0.2\text{mm}$

CO-416640 Hda

BIJL. 124





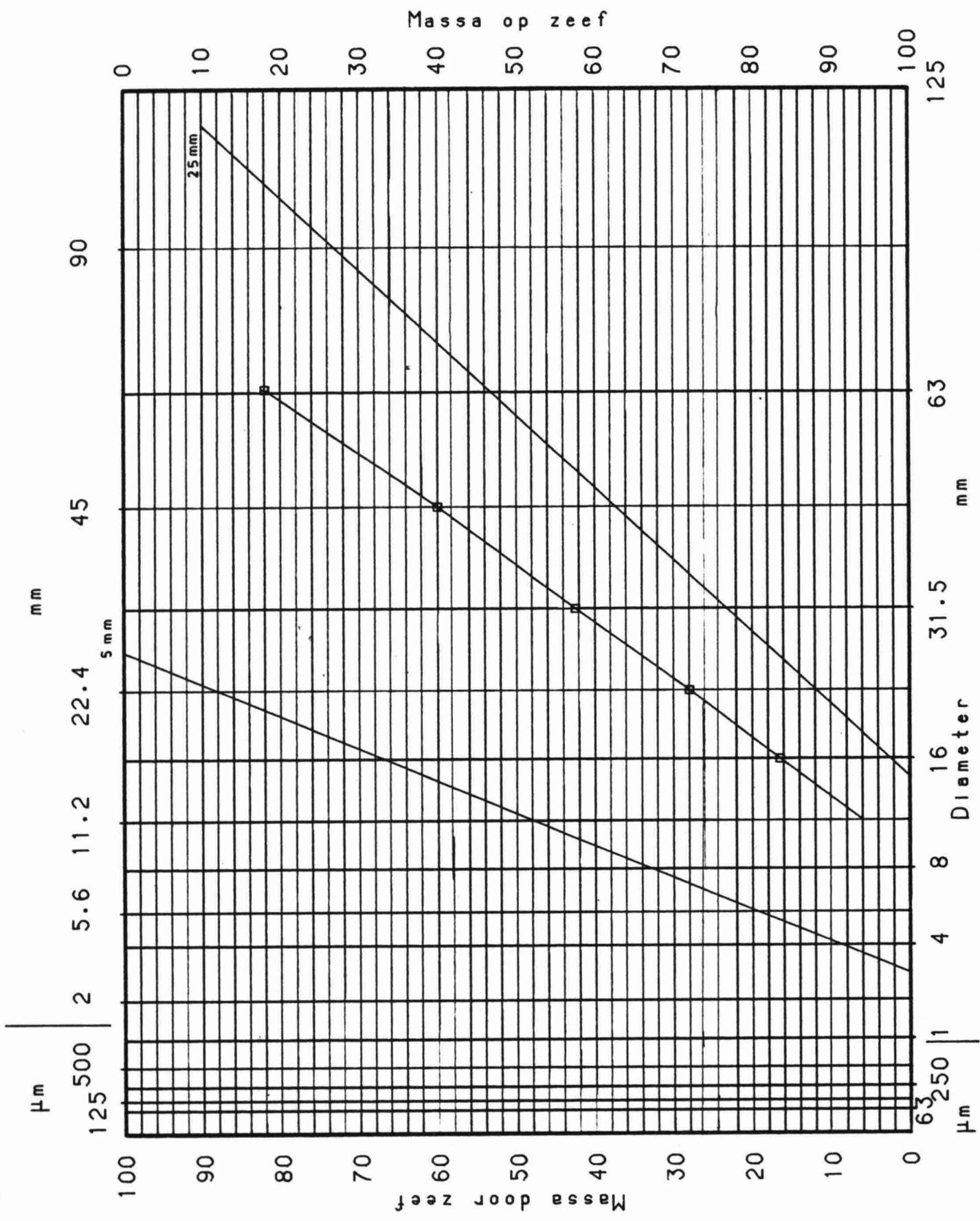
LABORATORIUM VOOR GRONDMECHANICA DELFT

85-09-17

Toetsing cumulatieve korrelverdeling van LD slakken 0/10 mm; $d_{50}=0.82\text{mm}$

CO-416640 Hda

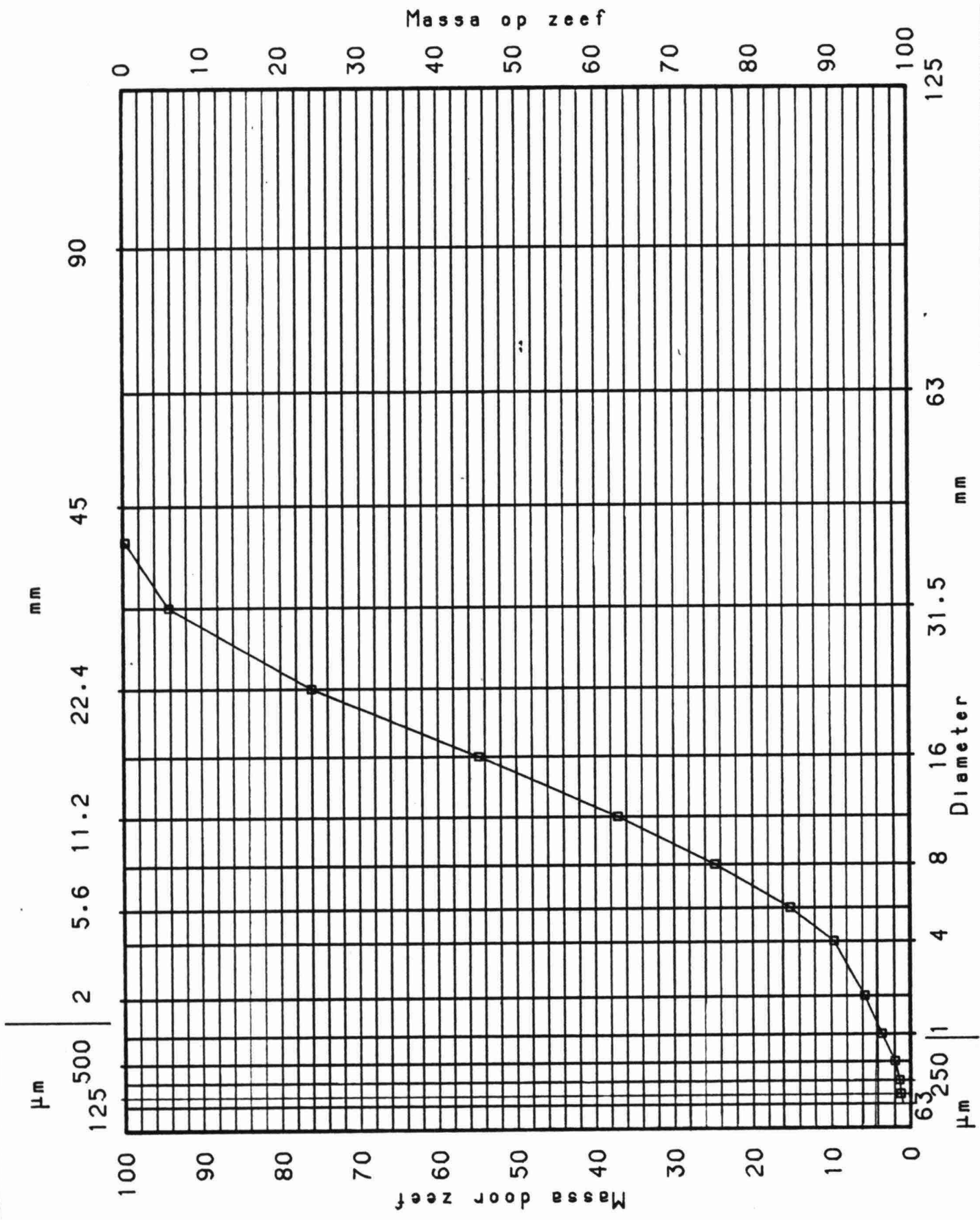
BIJL. 125



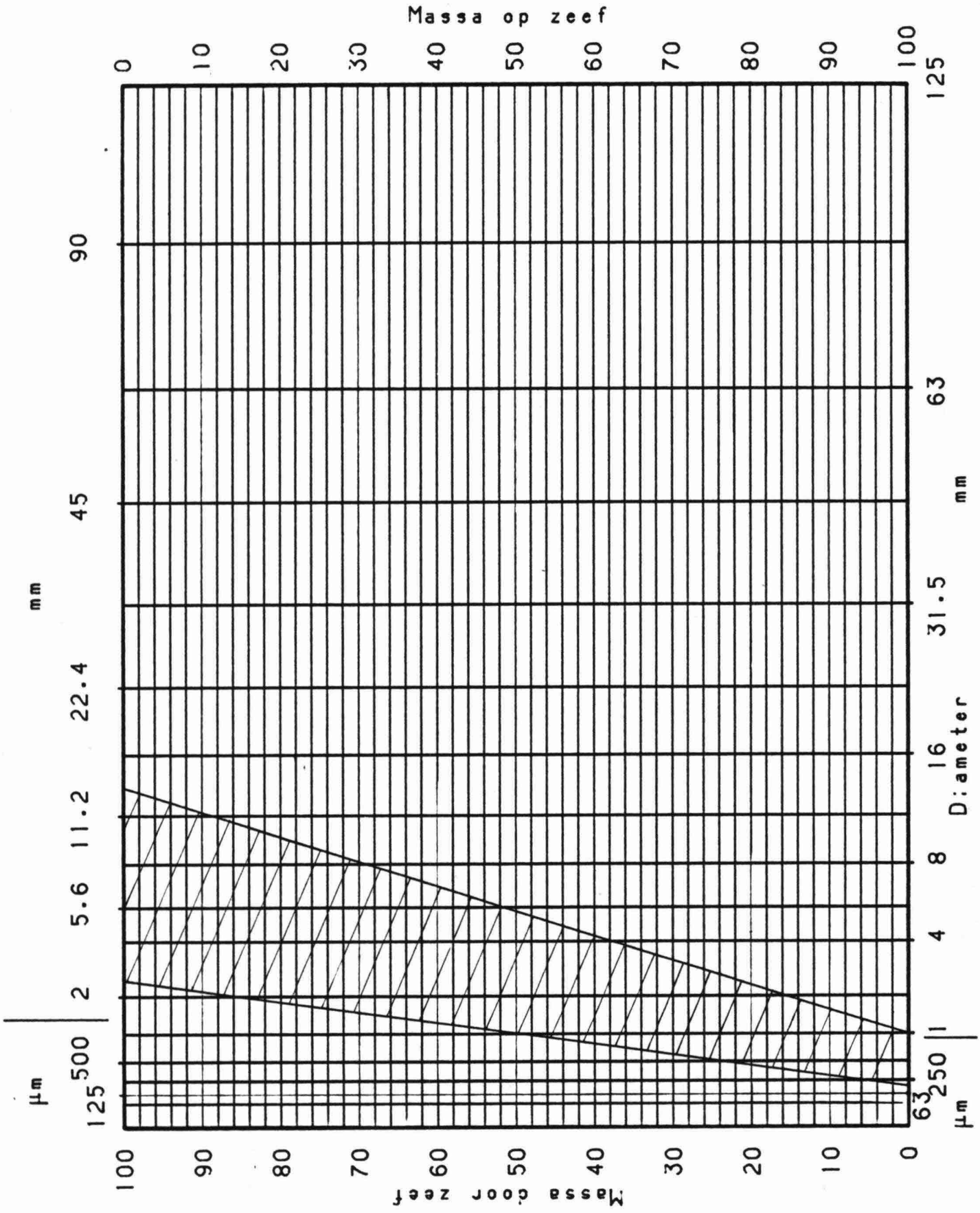
LABORATORIUM VOOR GRONDMECHANICA D LFT 85-09-17

Toetsing cum. korverd. LDslakken 10/80mm
talud 1:2-1:4 bij $d_{50}=0.82$ mm

CO-416640 Hda
BIJL. 126



	LABORATORIUM VOOR GRONDMECHANICA DELFT		85-09-17	
	Cumulatieve korrelverdeling van fosfor slakken 1/40 mm		CO-416640	Hda
			BIJL. 127	



	LABORATORIUM VOOR GRONDMECHANICA DELFT		85-09-17	
	Zeefband voor het extra filter onder de fosforslakken 1/40 mm		CO-416640	Hda
			BIJL. 128	



