

waterloopkundig laboratorium



laboratorium voor grondmechanica



taubekleding van gezette steen, fase 2

evaluatie Oesterdam onderzoek
grondmechanische aspecten en
rekenmodel STENZEL

verslag berekeningen

M 1735 / N 1881 ccc. X W.
CO 258901 / 91 en 141 1GV

februari 1984

taludbekleding van gezette steen, fase 2

**evaluatie Oesterdam onderzoek-
grondmechanische aspecten en
rekenmodel STEENZET**

verslag berekeningen

**M 1795 / M 1881 deel X WL
CO 258901 / 91 en 141 LGM**

februari 1984

Inhoud

Voorwoord

1. Waterspanningen onder steenzettingen.

Opzet van en resultaten van berekeningen met het computerprogramma

STEENZET

2. Evaluatie berekeningen

Voorwoord

In dit deel zijn twee grondmechanische studies gebundeld, te weten:

1. De berekening van overdrukken over steenzettingen met het speciaal voor dit doel ontwikkelde computerprogramma STEENZET. In deze studie wordt de opzet van het programma STEENZET besproken en worden resultaten met een geschematiseerde hydraulische randvoorwaarde vergeleken met een analytische oplossing en ELNAG-metingen. Tenslotte worden berekeningen gepresenteerd waarbij in de Deltagoot gemeten hydraulische randvoorwaarden gebruik zijn als invoer voor het programma en daarmee berekende waterspanningen vergeleken worden met de gemeten waterspanningen.
2. Enige schematische berekeningen om de invloed van bepaalde mechanismen, die aanleiding kunnen zijn tot schade aan een steenzetting, af te schatten en controle of de modellen van de Oesterdam in de Scheldegoot en Deltagoot representatief waren voor het prototype. Met behulp van de schematische berekeningen is onderzocht:
 - a. Wat de invloed is van toestroming van water door de filterlaag op de overdruk, als een blok uit de zetting verwijderd wordt.
 - b. Of, in bepaalde omstandigheden, dynamica een belangrijk mechanisme is voor het ontstaan van schade aan zettingen.
 - c. Wat de invloed is van de filterlaag op de doorlatendheid van een steenzetting.
 - d. Hoe de schaling van de doorlatendheid van prototype naar Deltagootmodel en naar Scheldegootmodel van de Oesterdam moet worden uitgevoerd voor een representatief model.

Voor de conclusies uit beide studies wordt verwezen naar het hoofdstuk samenvatting en conclusies op bladzijde 1 van waterspanningen onder steenzettingen en het hoofdstuk conclusies op blz. 3 van Evaluatieberekeningen.

Bij het gebruik van bovengenoemde studies moet men er op bedacht zijn dat op het moment van schrijven de doorlatendheid van de toplaag alleen bekend was uit een beperkte doorlatendheid onderzoek aan blokken van 0,25 x 0,25 x 0,10 m. Later doorlatendheid onderzoek heeft aangetoond dat de in het eerste onderzoek afgeleide empirische formule zeker niet geldig is buiten het gebied waarvoor de proeven zijn uitgevoerd, te weten voor spleetbreedtes tussen de blokken van 0 tot 3,5 mm. Ook is gebleken dat voor grotere spleten de doorlatendheid niet onafhankelijk is van de dikte van de zetting maar evenredig met de wortel uit de dikte.

WATERSPANNINGEN ONDER STEENZETTINGEN

OPZET VAN EN RESULTATEN VAN BEREKENINGEN MET HET COMPUTERPROGRAMMA
STEENZET

FEBRUARI 1983

CO-258901/91

A. BEZUIJEN

Inhoudsopgave

Samenvatting en conclusies

1. Inleiding
2. Opzet computerprogramma
 - 2.1. Drukverdeling in filterlaag
 - 2.2. Bepaling freatische lijn in filterlaag
 - 2.3. De hydraulische randvoorwaarden
3. Vergelijking met analytische oplossing en ELNAG-metingen
4. Vergelijking met meetresultaten
 - 4.1. Inleiding
 - 4.2. Aanpassingen programma voor simulatie
 - 4.2.1. Variatie in taludhelling
 - 4.2.2. Variërende doorlatendheid steenzetting
 - 4.3. Gemeten en berekende drukken
5. Berekening invloed waterstand bij Scheldegoot- en Deltagootonderzoek t.b.v. de Oesterdam.
 - 5.1. Resultaten metingen
 - 5.2. Opzet en resultaten berekeningen
 - 5.3. Vergelijking en conclusies
6. Steenzettingen op mijnsteen ondergrond
 - 6.1. Motivatie en berekening
 - 6.2. Conclusies
7. Ontwerpgrafieken
8. Conclusies

Referenties

Appendices

Samenvatting en conclusies

Dit rapport behandelt de opzet en resultaten van het computerprogramma STEENZET.

Dit programma is geschreven in opdracht van de Deltadienst van Rijkswaterstaat om de waterspanningen in een filterlaag* onder een betonblokkenglooiing te kunnen simuleren. Uit een eerdere analytische berekening en metingen in de Deltagoot is namelijk gebleken dat bij golfaanval, de waterspanningen in de vlijlaag zo groot kunnen worden, dat de blokkenglooiing instabiel wordt. Met behulp van de eindige differentie methode wordt de stroming in de filterlaag berekend voor een willekeurige golf randvoorwaarde. Daarbij wordt uitgegaan van laminaire stroming in de filterlaag uitsluitend in een richting evenwijdig aan de filterlaag. De stroming door de blokken is semi-turbulent verondersteld, naar aanleiding van experimenten. De freatische lijn in de filterlaag wordt bepaald met de golf randvoorwaarde. Vergelijking van berekeningsresultaten met experimenten in de Deltagoot van het Waterloopkundig Laboratorium "De Voorst" geven goede overeenkomst tussen de metingen en de berekeningen. Ook de eerder uitgevoerde analytische berekeningen en metingen aan een elektrisch analogon model kunnen met grote nauwkeurigheid gereproduceerd worden. Met het programma bleek de invloed van de waterstand op de schadegolfhoogte zoals gemeten bij het kleinschalig onderzoek t.b.v. de Oesterdam verklaard te kunnen worden. Het programma is gebruikt voor het maken van ontwerpgrafieken, die echter in hun bruikbaarheid beperkt worden door het nog ontbreken van een beschrijving van de hydraulische randvoorwaarde als functie van de golfparameters en de helling van het talud (de drukverdeling op het talud t.g.v. de golgaanval). Aangegeven wordt dat een beschrijving die het set-down punt geeft als functie van deze parameters mogelijk reeds voldoende is, voor het in de praktijk vaak voorkomende geval van goed aansluitende betonblokken op een filterlaag.

*Met het woord filterlaag wordt bedoeld die laag die zich rechtstreeks onder de steenzetting bevindt. In het programma wordt aangenomen dat deze laag een beperkte dikte heeft en doorlatend is t.o.v. onderliggend materiaal. Afhankelijk van de dikte en het materiaal waaruit deze laag is opgebouwd, worden hiervoor ook de woorden: vlijlaag, uitvullaag of filter gebruikt.

1. Inleiding

In het kader van het vooronderzoek naar de stabiliteit van gezette steen is door Ir. J.B. Sellmeijer van het Laboratorium voor Grondmechanica een berekening gemaakt, die de quasistatische drukken onder een steenzetting ten gevolge van de drukhoogte van de golven beschrijft [1].

In deze analytische berekening wordt uitgegaan van een oneindig lang dijktalud onder konstante helling. Onder de steenzetting bevindt zich een materiaal dat vaak doorlatend is t.o.v. de overige materialen in de constructie en daarom ook wel als filterlaag of kortweg filter wordt aangeduid.

De stroming in het filter wordt evenwijdig aan het talud verondersteld. Het dijklichaam onder het filter is ondoorlatend beschouwd. De hydraulische randvoorwaarde is geschematiseerd tot een sinus- of trochoïde golfvorm, die alleen tijdsafhankelijk is. Daarbij wordt uitgegaan van een doorgaande insijpeling voor dat gedeelte van de steenzetting dat zich onder de maximale golfhoogte bevindt. Dus ook voor het gedeelte van de steenzetting dat zich bevindt tussen de maximale en actuele waterstand. Dit omdat aangenomen wordt dat de golf dermate snel fluctueert, dat de voegen tussen de stenen onder de maximale golfhoogte altijd gevuld zijn met water.

Door de begeleidingsgroep onderzoek naar stabiliteit van taludbekledingen en teenkonstrukties in de Deltagoot werd de gebruikte hydraulische randvoorwaarde als grootste tekortkoming gezien van het rekenmodel. Besloten werd daarom de berekening uit te voeren met een reëlere hydraulische randvoorwaarde. Deze hydraulische randvoorwaarde zou bepaald worden met behulp van de resultaten van de Oesterdamproeven in de Deltagoot. De gemeten drukken aan de buitenzijde van het talud worden dan geschematiseerd tot een functie van tijd en plaats. Voor proef T43 [4] is deze schematisatie grotendeels uitgevoerd. Het bleek mogelijk de druk te schrijven als functie van tijd en plaats, maar de procedure bleek zeer bewerkelijk. Ook bleek, uit vergelijking met andere proeven, dat de drukverdeling sterk afhankelijk is van de golfhoogte en golfperiode, zodat voor elke andere golf weer een geheel nieuwe schematisatie uitgevoerd moet worden.

In overleg met Ir. J.B. Sellmeijer en Ir. C.J. Kenter is toen besloten tot een numerieke aanpak. De gemeten drukken kunnen dan rechtstreeks gebruikt worden als invoer voor het computerprogramma. Behalve het bovengenoemde bleek deze opzet nog meer voordelen te hebben:

- a. In de analytische oplossing was het noodzakelijk de doorlatendheid van de steenzetting, die alleen ter plaatse van de spleten tussen de stenen aanwezig is, te schematiseren tot een continue doorlatendheid. Bij een numerieke oplossing is dit discrete karakter van de doorlatendheid van de steenzetting eenvoudig in te brengen.
- b. De invloed van de eindigheid van de steenzetting of variatie in de taludhelling kan heel eenvoudig in een numerieke berekening ingebracht worden.
- c. De mogelijkheid om de overdrukken te berekenen bij onregelmatige golven is bij een numerieke oplossingsmethode aanwezig.
- d. De mogelijkheid is aanwezig ook turbulente of semi-turbulente stroming in rekening te brengen. Zonder ingrijpende wijziging kunnen ingewikkelder geometrieën doorgerekend worden, kan elastische berging ingebouwd worden, of nagegaan worden wat de invloed is van de waterverplaatsing op de drukverdeling, op het moment dat een steen van het talud gelicht wordt.

Dit rapport behandelt de opzet van het ontwikkelde computerprogramma STEENZET en resultaten van met dit programma uitgevoerde berekeningen. De indeling van dit rapport is als volgt:

In hoofdstuk 2 wordt de opzet van STEENZET besproken. Hoofdstuk 3 geeft een vergelijking met de analytische oplossing van Sellmeijer en de ELNAG-metingen [2]. Deze vergelijking diende als test voor het programma. In hoofdstuk 4 wordt de simulatie van de Oesterdamproeven behandeld en worden de berekende waterspanningen in de filterlaag vergeleken met de gemeten waterspanningen. In hoofdstuk 5 wordt onderzocht wat de invloed is van de waterstand op de berekende overdruk en worden de resultaten vergeleken met het Scheldegoot-onderzoek t.b.v. de Oesterdam. In hoofdstuk 6 wordt nagegaan wat de invloed is van een afnemende doorlatendheid van de filterlaag t.o.v. de doorlatendheid van de spleten, wat zeer waarschijnlijk is als een filterlaag van mijnsteen wordt toegepast.

In hoofdstuk 7 worden eerste ontwerpgrafieken gepresenteerd. Hoofdstuk 8 tenslotte geeft de conclusies weer.

Dit rapport is opgesteld door ir. A. Bezuijen van het Laboratorium voor Grondmechanica.

2. Opzet computerprogramma

2.1. Drukverdeling in filterlaag

De drukverdeling in het filter wordt berekend met behulp van eindige differenties. De grootte van de intervallen is de afstand tussen twee spleten. Anders gezegd de lengte van de gebruikte stenen (zie fig. 1).

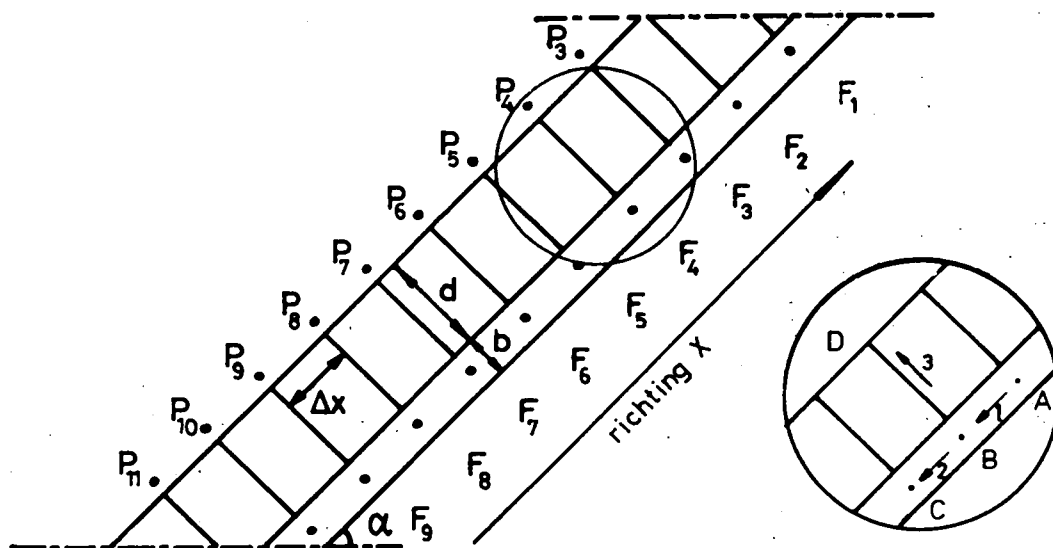


Fig. 1. Schematisatie van steenzetting voor berekening met eindige differenties. P_i is de druk buiten op de steenzetting in punt i , F_i de druk in het filter in punt i . De inzet geeft aan de eerste, tweede en derde term van formule 1.

Voor stroming evenwijdig aan de aangegeven x richting in fig. 1 kan de volgende vergelijking opgesteld worden voor de druk F_i in een punt i .

van boven	- van onderen	= door spleet uitstromend
instromend water	uitstromend water	water
(1)	(2)	(3)

$$kb \frac{F_{i-1} + \Delta x \sin \alpha - F_i}{\Delta x} - kb \frac{F_i - (F_{i+1} - \Delta x \sin \alpha)}{\Delta x} =$$

$$= k' \Delta x \frac{F_i - (p_i + d \cos \alpha)}{d} \quad (1)$$

Hierin is:

- F_i de druk in het filter in punt i in meter waterkolom (m)
- p_i de druk op de steenzetting in punt i in meter waterkolom (m)
- Δx de lengte van de stenen (m)
- d de dikte van de stenen (m)
- b de dikte van de filterlaag (m)
- α de hoek van het talud met de horizontaal
- k de doorlatendheid van het filter (m/s)
- k' de doorlatendheid van de steenzetting (m/s)

De termen $\Delta x \sin \alpha$ en $d \cos \alpha$ zijn correcties voor het plaatshoogte verschil tussen de punten A, C en D t.o.v. B in fig.1. Omdat in praktijk- of modelmetingen de hydraulische randvoorwaarden P_i altijd in drukken i.p.v. stijghoogten worden opgegeven, in ten gunste van een directe invoering in het programma STEENZET in de afleidingen hierboven eveneens uitgegaan van drukken in meters waterkolom i.p.v. stijghoogten. k' is de doorlatendheid, die gevonden wordt, wanneer de lek door de steenzetting als kontinu wordt opgevat. De doorlatendheid door één spleet is dus $k' \Delta x$. Hierbij is de invloed van een aanstroomweerstand door stroming naar de spleten, zoals behandeld in [9] verwaarloosd.

Uitwerken van formule 1 geeft, met $\frac{kbd}{k' \Delta x^2} = \beta$ en $p_i + d \cos \alpha = P'_i$

$$F_i = \frac{1}{1+2\beta} \{ \beta * (F_{i-1} + F_{i+1}) + P'_i \} \quad (2)$$

Aan de onderkant van de steenzetting is de tweede term uit formule 1 gelijk aan nul. F_i is dan te schrijven als:

$$F_i = \frac{1}{1+\beta} \{ \beta (F_{i-1} + \Delta x \sin \alpha) + P'_i \} \quad (3)$$

Indien de freatische lijn zich tot boven in het filter bevindt en de elastische berging verwaarloosd wordt, geldt als extra randvoorwaarde dat de hoeveelheid uit het filter stromende water gelijk is aan de hoeveelheid water die het filter instroomt (er is dan geen freatische berging meer mogelijk in het filter). Er moet dan dus gelden

$$\sum_{i=1}^N (p'_i - F_i) = 0 \quad (4)$$

met N het totale aantal spleten.

Wanneer de freatische lijn zich niet boven in het filter bevindt, geldt voor de punten die boven de freatische lijn liggen:

$$F_i = 0$$

Nu is alleen de druk in het punt dat juist onder de freatische lijn ligt nog niet bekend (zie fig. 2).

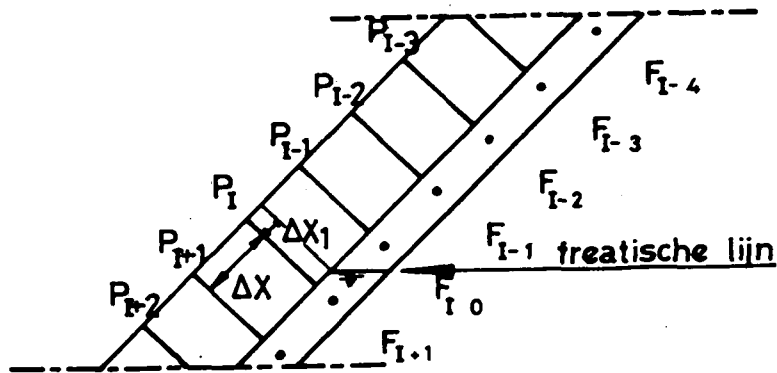


Fig. 2. Invloed van de freatische lijn op F_i .

In fig. 2 is de druk $F_{i-1} = 0$, maar als formule 1 toegepast zou worden, zou de druk F_i overschat worden, omdat de druk op de freatische lijn onder $i-1$ nog steeds nul is, terwijl volgens formule 1 aangenomen wordt dat de druk direct onder $i-1$ al een van nul afwijkende waarde heeft.

De druk F_i is te berekenen door in formule 1 in de eerste term $F_{i-1} = 0$ te stellen en Δx te vervangen door Δx_1 (zie fig. 2.). Uitwerken geeft dan:

$$F_i = \frac{(F_{i+1} + p'_i/\beta) \Delta x_1}{(\Delta x_1/\beta + \Delta x + \Delta x_1)} \quad (5)$$

Wanneer nu op een tijdstip t_1 de ligging van de freatische lijn in het filter bekend is, evenals de golfrandvoorwaarde, dan kan de drukverdeling in het filter berekend worden, door, afhankelijk van de plaats van het punt i , één van de vergelijkingen 2 t/m 5 op te lossen. Voor oplossing van deze vergelijkingen is de relaxatie methode gekozen. Dat betekent, dat uitgegaan wordt van een geschatte oplossing voor de drukken F_i . Afhankelijk van de plaats van het punt i wordt dan met behulp van die geschatte oplossing en een van de formules 2 t/m 5 een nieuwe F_i berekend. Bij de berekening F_i wordt dan de waarde van F_{i+1} genomen uit de geschatte oplossing en de waarde F_{i-1} zoals die dan juist berekend is. Als F_i berekend is, kan die de plaats van de geschatte waarde van F_i overnemen en kan F_{i+1} berekend worden met de nieuw berekende F_i maar de geschatte waarde voor F_{i+2} . Op deze wijze kan de druk op alle punten i berekend worden waarna weer bij het eerste punt begonnen wordt. Deze procedure wordt herhaald totdat elke nieuwe berekende F_i minder dan 5 o/oo verschilt met een eerder berekende of het verschil kleiner is dan 0,1 mm waterkolom.

Het bleek dat de convergentie snelheid van deze procedure te verhogen is door, wat men noemt, overrelaxatie toe te passen. Bij overrelaxatie neemt de nieuw berekende druk (F_i^n) niet de plaats in van de oude (F_i^0), maar wordt de uiteindelijke druk (F_i) berekend met de volgende formule:

$$F_i = (1-w) * F_i^o + w F_i^n \quad (6)$$

w bepaalt de mate van overrelaxatie en is een getal tussen de 1 en 2.

Voor $w = 1$ wordt formule 7

$$F_i = F_i^n \quad (7)$$

welke formule dus bij gewone relaxatie gebruikt wordt. De convergentie snelheid bleek het grootst als $w = 1,6$.

Als in het filter geen vrij wateroppervlak aanwezig is en F_1 dus berekend moet worden met formule 4, moet een andere procedure gevolgd worden. Uit formule 4 volgt:

$$F_1 = \sum_{i=2}^N (p_i - F_i) + p_1 \quad (8)$$

Wordt deze vergelijking echter ingevoerd in de iteratie-lus, dan blijkt de oplossing niet stabiel, waarschijnlijk omdat alle afwijkingen in p_i en F_i nu bij elkaar opgeteld worden. Daarom is gekozen voor de volgende formule:

$$F_i = \frac{\sum_{i=2}^N (p_i - F_i) + p_1 + (n-1) F_1^o}{N} \quad (9)$$

Omdat de overrelaxatie reeds is toegepast in de berekening van de overige waarden F_i , werd bij de berekening van F_1 geen overrelaxatie meer toegepast.

In appendix D is een listing gegeven van subroutine DRUKV.

2.2. Bepaling freatische lijn in het filter

De freatische lijn wordt bepaald met een explicite methode.

Aangenomen wordt dat op tijdstip 0 de freatische lijn gelijk is aan de stilwaterlijn en dat dan ook de buitenwaterstand gelijk is aan de stilwaterlijn. Op tijdstip Δt zal de buitenwaterstand iets gewijzigd zijn, maar gedurende de tijd Δt zal ook boven de stilwaterlijn doorgaande insijpeling plaats gevonden hebben. Met de door subroutine GOLF te gegeven waarden voor p'_i wordt door de in 2.1. beschreven subroutine DRUKV de waarden van F_i bepaald. Bij deze eerste bepaling is ervan uitgegaan dat de freatische lijn in het filter nog steeds de stilwaterlijn is.

De hoeveelheid water die in of uit het filter stroomt, wordt bepaald door de som van de drukverschillen $p_i + d \cos \alpha - F_i$ gedeeld door de doorlatendheid van de steenzetting. Met behulp van fig. 1 is af te leiden dat een een volume V een verandering (dh) van de freatische lijn geeft volgens: $dh = \Delta x \sin \alpha V / bn$. Combinatie van bovenstaande formules geeft met $P'_i = P_i + d \cos \alpha$:

$$dh = \frac{k' \Delta x \sin \alpha}{b d n} \sum_{i=1}^N (p'_i - F_i) \cdot \Delta t \quad (10)$$

Hierin is:

n = de porositeit van het filter

b = de dikte van het filter

d = de dikte van de steenzetting

k' = de doorlatendheid van de steenzetting

Δx = de lengte van de stenen

$p'_i = p_i + d \cos \alpha$.

Deze verandering van de freatische lijn wordt bij de oorspronkelijke freatische lijn (h) opgeteld.

Nu kan de golfrandvoorwaarde voor het tijdstip $2\Delta t$ door subroutine GOLF berekend worden. Daarna kan met die waarden van p'_i een nieuwe F_i berekend worden. Bij deze berekening worden als eerste benadering van F_i die waarden gebruikt die gevonden waren bij de benadering op tijdstip Δt . Het resultaat daarvan kan weer gebruikt worden om de freatische lijn aan te passen enzovoort. Deze procedure wordt uitgevoerd in het hoofdprogramma.

2.3. De hydraulische randvoorwaarden

In STEENZET wordt de hydraulische randvoorwaarde ingevoerd via een aparte subroutine. Dit geeft de mogelijkheid de gebruikte randvoorwaarde vrij eenvoudig te variëren. De gebruikte hydraulische randvoorwaarden zijn:

- a. Een sinusvormig op en neergaande horizontale waterstand. Deze randvoorwaarde is gebruikt om de resultaten van STEENZET te kunnen toetsen aan de analytische oplossing van J.B. Sellmeijer. In een later stadium is deze randvoorwaarde nog gebruikt om voorlopige ontwerpgrafieken te maken. De subroutine GOLF voor deze hydraulische randvoorwaarde is gegeven in appendix D.
- b. Een hydraulische randvoorwaarde die gevormd werd met behulp van de gemeten golfdrukken op het talud van het model van de Oesterdam in de Deltagoot.

Met de resultaten van verschillende metingen kan de hydraulische randvoorwaarde voor regelmatige golven voor verschillende perioden en golfhoogtes gesimuleerd worden. In principe is ook de mogelijkheid aanwezig metingen met onregelmatige golven te simuleren, maar bij de metingen met onregelmatige golven bleken 3 drukopnemers defect, waardoor de resultaten te onbetrouwbaar zouden zijn. Daarom is voorlopig afgezien van simulatie van de resultaten met onregelmatige golven.

De subroutine MGOLF die de hydraulische randvoorwaarde bepaald uitgaande van de gemeten drukken is gegeven in appendix. D.

3. Vergelijking met analytische oplossing en ELNAG-metingen

Om te onderzoeken of het ontwikkelde computerprogramma juiste resultaten geeft, zijn de resultaten van met het programma uitgevoerde berekeningen vergeleken met de analytische oplossing van J.B. Sellmeijer [1] en de ELNAG-metingen [2].

Alle berekeningsmethoden hebben dezelfde hydraulische randvoorwaarde: Een sinusvormig in de tijd variërende horizontale waterstand. De analytische berekening en de berekening met STEENZET gaan uit van doorgaande insijpeling in het filter. Doorgaande insijpeling wil zeggen, dat ook als de golf zich teruggetrokken heeft, er op het gedeelte van de steenzetting onder de maximale waterstand, maar boven de momentane waterstand water achterblijft. Dit water kan continu door de spleten naar binnen sijpelen, tenzij de druk in het filter ter plaatse van de spleet hoger is, dan de drukhoogte van een waterkolom ter lengte $d \cos \alpha$. In de ELNAG-metingen wordt niet uitgegaan van doorgaande insijpeling. De resultaten van zowel de analytische berekening als de ELNAG-metingen geven, in een dimensiloze grafiek, zowel de maximale overdruk over de zetting als de hoogte van de freatische lijn als functie van de parameter $\frac{H}{\lambda}$, met H de golfhoogte en λ de "lek lengte", in [1] die gedefinieerd is als:

$$\lambda = \sin \alpha \sqrt{\frac{k \cdot b \cdot d}{k'}} \quad (11)$$

In de berekening met het computerprogramma STEENZET wordt voor een waarde van $\frac{H}{\lambda}$ een aantal golfperiodes doorgerekend. Na elke golfperiode wordt de gemiddelde waarde van de freatische lijn bepaald. Zodra de gemiddelde hoogte van de freatische lijn gedurende een golfperiode minder dan 1% verschilt met de gemiddelde hoogte van de voorgaande periode wordt de berekening beëindigd. De dan gevonden gemiddelde hoogte van de freatische lijn en de in de laatste golfperiode gevonden maximale overdruk zijn vergeleken met de door Sellmeijer en met ELNAG gevonden waarden.

De resultaten zijn gegeven in fig. 3.

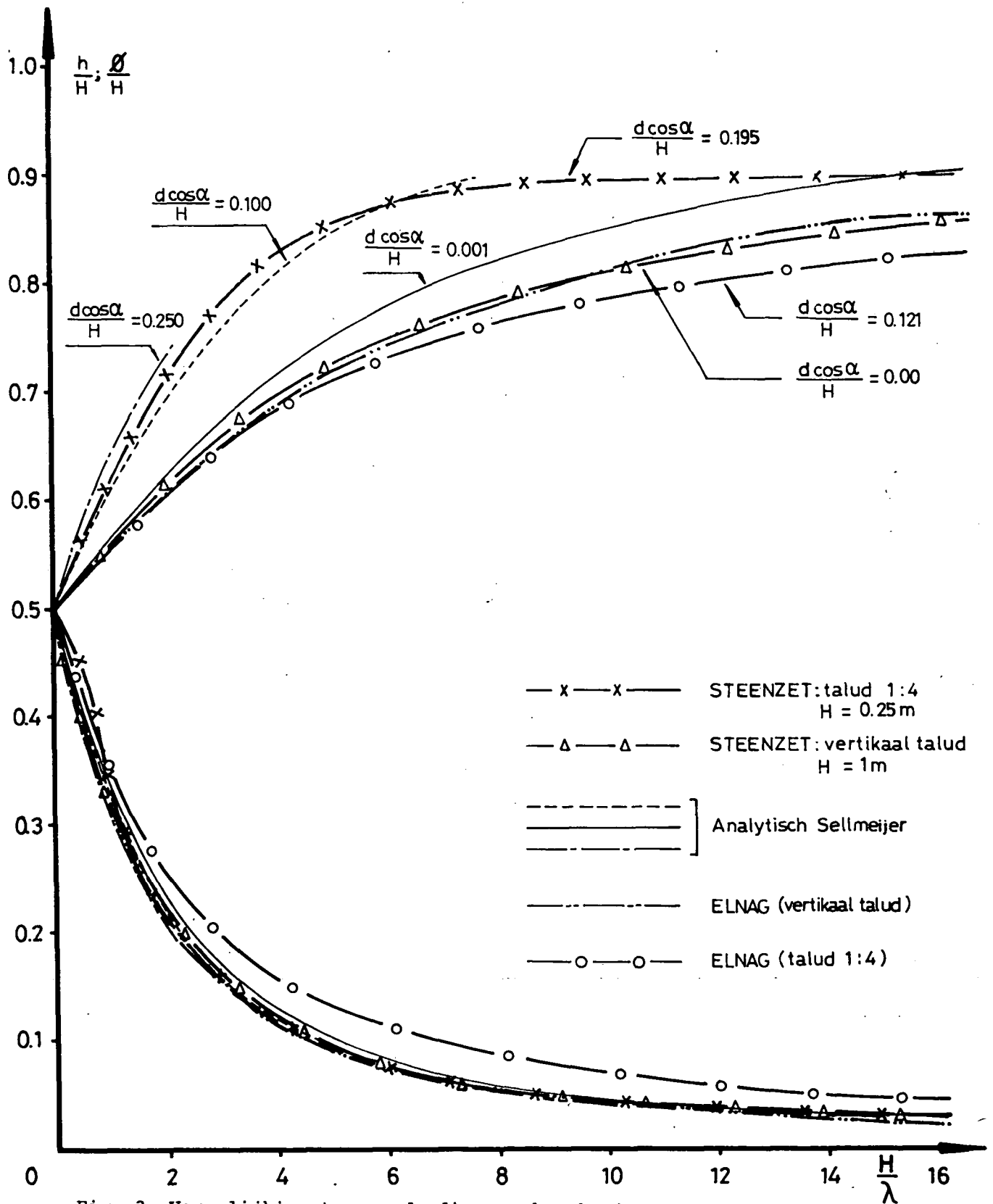


Fig. 3. Vergelijking tussen de diverse berekeningen.

De bovenste lijnen geven de freatische lijn in het filter en de onderste lijnen geven de maximale overdruk over de zetting volgens de diverse berekeningen.

De berekende maximale overdruk voor vertikaal talud blijkt bij alle drie de berekeningsmethoden goed overeen te stemmen. De ligging van de freatische lijn voor vertikaal talud wijkt af bij de analytische oplossing voor hogere waarden van $\frac{H}{\lambda}$ in vergelijking met de andere 2 oplossingen. In de analytische oplossing is voor deze bepaling echter een benadering gebruikt die niet meer geldt voor hogere waarden van $\frac{H}{\lambda}$. Voor talud 1 : 4 wijkt de maximale overdruk in de ELNAG-metingen sterk af van de analytische berekening en de berekening met STEENZET, die beiden goed overeenstemmen. In appendix A wordt aangegeven dat dit veroorzaakt wordt door het op verschillende wijze in rekening brengen van de doorlatendheid van het filter in de ELNAG-metingen in vergelijking met de analytische oplossing en STEENZET. Latere 2-dimensionale analogon metingen [5] hebben aangetoond, dat de in de ELNAG-metingen hieromtrent gedane aanname minder juist is.

De door STEENZET gevonden gemiddelde hoogte van de freatische lijn komt redelijk overeen met de analytische oplossing, maar wijkt af van de ELNAG-metingen, ook na correctie voor het op verschillende wijze invoeren van de doorlatendheid van het filter. Dit wordt veroorzaakt door het al of niet uitgaan van doorgaande sijpeling.

Concluderend kan gezegd worden dat de 3 berekeningsmethoden goed overeenstemmen en dat afwijkingen tussen de verschillende uitkomsten volledig te verklaren zijn uit verschillen in de diverse berekeningen.

Opmerkelijk is dat uit deze vergelijking blijkt dat het al niet meenemen van doorgaande sijpeling nauwelijks van invloed blijkt op de berekende maximale overdruk. Wel blijkt deze aanname invloed te hebben op de ligging van de freatische lijn in het filter. Nu zal voor relatief ondoorlatende zettingen de aanname van doorgaande insijpeling het meest waarschijnlijk zijn. Voor meer doorlatende zettingen zal niet van deze aanname uitgegaan kunnen worden. Omdat de invloed op de maximale overdruk, de belangrijkste grootheid in dit onderzoek, nihil is, is zonder verder onderzoek in het volgende uitgegaan van doorgaande insijpeling.

Tot slot is, voor parameters die gevonden zijn bij het Oesterdamonderzoek in de Deltagoot, een berekening gemaakt om de variatie in de freatische lijn te onderzoeken. In de analytische oplossing was aangenomen dat deze variatie verwaarloosbaar klein is. Het resultaat van deze berekening staat in fig. 4. De hoogte van de freatische lijn per golfperiode blijkt, voor deze keuze van parameters nauwelijks te variëren. Ook blijkt uit deze figuur de geringe invloed van de freatische lijn op de maximale overdruk, die ook in fig. 4 is uitgezet. Terwijl de freatische lijn gedurende de berekening stijgt is de maximale overdruk nageenough konstant.

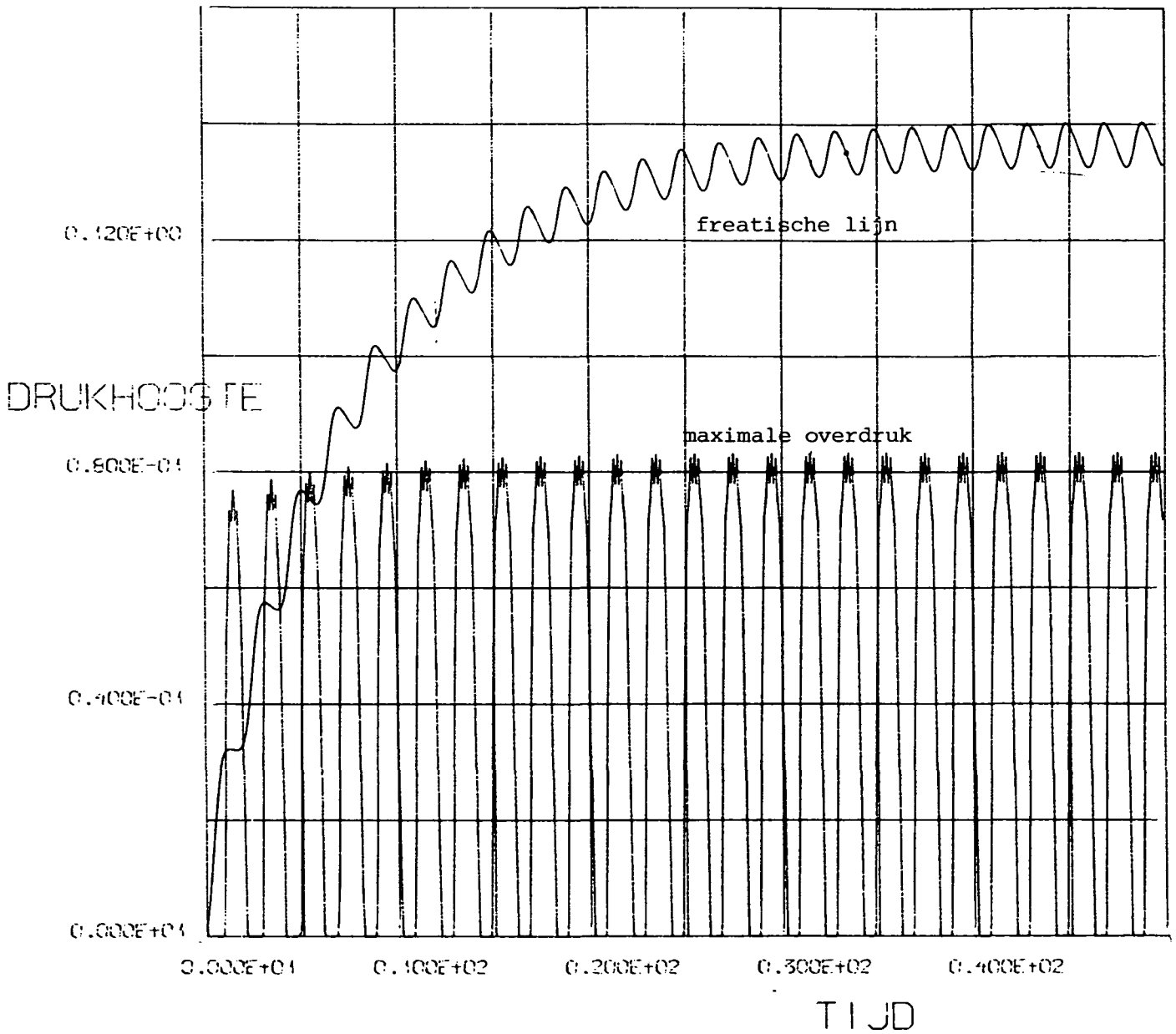


Fig. 4. Verloop van de freatische lijn in het filter en de maximale overdruk bij een op $t = 0$ beginnende sinus-vormige randvoorwaarde met een golfhoogte van 0,5 meter.

Parameters:

$H = 0,5 \text{ m}$, $d = 0,10 \text{ m}$, $b = 0,15 \text{ m}$, $k = 0,3 \text{ m/s}$, $k' = 0,007 \text{ m/s}$

4. Vergelijking met meetresultaten

4.1. Inleiding

Zoals vermeld in de inleiding van dit rapport, is het programma STEENZET ontwikkeld, om de mogelijkheid te hebben tijdens proeven gemeten overdrukken te kunnen simuleren. Als eerste test waren hiervoor de resultaten van het schaal 1:2 model onderzoek ten behoeve van de Oesterdam in de Deltagoot beschikbaar. Om de resultaten van het Oesterdamonderzoek beter te kunnen narekenen, zijn in het programma enige wijzigingen aangebracht:

- De mogelijkheid is ingebouwd een talud te simuleren met op verschillende hoogtes verschillende taludhellingen. Dit omdat het Oesterdammodel de helling van het talud 1 : 4 was onder de 2 m + N.A.P. en 1 : 20 boven de 2 m + N.A.P.
- De stroming door de spleten is semi-turbulent verondersteld. Uit doorlatendheidsonderzoek aan steenzettingen was namelijk gebleken dat deze stroming als semi-turbulent i.p.v. laminair beschouwd moet worden.

In het volgende worden eerst deze wijzigingen besproken, waarna berekende en gemeten resultaten met elkaar vergeleken worden. Alle in dit hoofdstuk besproken afmetingen zijn modelafmetingen. In prototype zouden alle afmetingen dus een factor 2 groter zijn.

4.2. Variatie in taludhelling

De eerste versie van dit computerprogramma had evenals de analytische som slechts de mogelijkheid één hoek α als taludhelling in te voeren. Het model van de Oesterdam in de Deltagoot had echter op 2 m + N.A.P. een knik in het talud. Door de flauwe helling van deze zogenaamde plasberm blijft tijdens golfaanval daarop een waterlaag achter (zie ook [6]) die door de spleten in de filterlaag sijpelt.

Om deze variatie in taludhelling ook in het computermodel in te bouwen, zijn in het hoofdprogramma de volgende wijzigingen aangebracht:

a. De hoogte van de onderkant van verschillende spleten (HS_i) wordt in de gewijzigde versie bepaald door de volgende formules:

$$HS_i = H_{\max} - (i-1) \Delta x \sin \alpha_1 \text{ voor } HS_{i-1} > 2 \cdot d \cos \alpha_i \quad (12)$$

en

$$HS_i = HS_k - (i-k) \Delta x \sin \alpha_2 \text{ voor } HS_{i-1} < 2 \cdot d \cos \alpha_1 \quad (13)$$

Voor de Kde spleet geldt $HS_k < 2 \cdot d \cos \alpha$, $HS_{k-1} > 2 \cdot d \cos \alpha_1$. Voor de betekenis van de overige symbolen zie fig. 5.

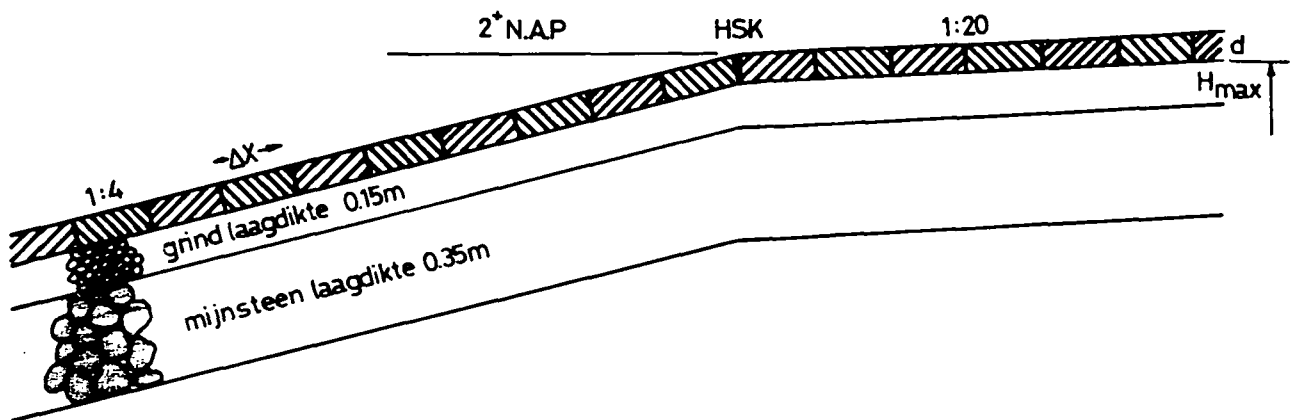


Fig. 5.: taludbekleding Oesterdam.

b. De bepaling van de freatische lijn in het filter. De formules bij een knik in het talud zijn:

$$dh = \frac{k' \Delta x \sin \alpha_1}{b d n} \sum_{i=1}^N (p'_i - F_i) \cdot \Delta t \text{ voor } h > 2 \cdot d \cos \alpha \quad (14)$$

en

$$dh = \frac{k' \Delta x \sin \alpha_2}{b d n} \sum_{i=1}^N (p'_i - F_i) \Delta t \text{ voor } h < 2 \cdot d \cos \alpha \quad (15)$$

Een speciaal geval is dan nog als geldt:

$h < 2 \cdot d \cos \alpha$ maar $h + dh > 2 \cdot d \cos \alpha$
of $h > 2 \cdot d \cos \alpha$ maar $h + dh < 2 \cdot d \cos \alpha$

Voor het eerste geval wordt h dan bepaald met de formule

$$h = 2 \cdot d \cos \alpha_1 + [h + dh - (2 \cdot d \cos \alpha_1)] \frac{\sin \alpha_1}{\sin \alpha_2} \quad (16)$$

Waarbij dh met formule 15 berekend is.

Voor het tweede geval geldt dezelfde formule maar dan met $\sin \alpha_1$ en $\sin \alpha_2$ omgewisseld en wordt d_h berekend met formule 14.

In de subroutine DRUKV blijven de in 2.1. behandelde formules ongewijzigd, alleen

is $\alpha = \alpha_1$ voor $HS_i > 2 \cdot d \cos \alpha_1$

en $\alpha = \alpha_2$ voor $HS_i < 2 \cdot d \cos \alpha_1$

en uiteraard veranderen de formules daar waar de knik in het talud zit.

Formule 2 wordt dan:

$$F_i = \frac{1}{1+2\beta} \{ \beta [F_{i-1} + \Delta x (\sin \alpha_1 - \sin \alpha_2) + F_{i+1}] + p'_i \} \quad (17)$$

en formule 6 is voor dat geval:

$$F_i = \frac{\beta \Delta x [\sin \alpha_1 - \sin \alpha_2] + \beta \cdot F_i + p_i}{1. + \beta + \beta \Delta x_1 / \Delta x_2} \quad (18)$$

De subroutine die de hydraulische randvoorwaarde geeft blijft ongewijzigd.

4.3. Variërende doorlatendheid steenzetting

Tijdens het ontwikkelen van dit computerprogramma werden de resultaten bekend van het onderzoek doorlatendheid steenzettingen [7], waarin de doorlatendheid van de steenzetting onder verschillende omstandigheden is gemeten. Het bleek dat de doorlatendheid van de zetting niet alleen afhankelijk is van de spleetbreedte, maar ook van het verhang.

Voor vierkante blokken van 25 x 25 x 10 cm resulteerde dit in de volgende empirische formule voor verhangen variërend van 10 tot 200%,

$$k = \frac{306 s^{1,73}}{i^{0,307}} \quad (19)$$

waarin: s de spleet

i het verhang

De doorlatendheid k' van de zetting in m/s is bepaald als of de zetting opgevat kan worden als een homogeen doorlatende laag. Deze formule kan gebruikt worden om de doorlatendheid van een zetting te bepalen. Daarbij kan voor i dat verhang over de zetting ingevuld worden dat optreedt als de zetting instabiel wordt. Voor betonblokken met een soortgelijke massa van 2.350 kg/m^3 is dat bij $i = 1,35$.

Omdat in dit programma een iteratieve methode gebruikt is om de drukverdeling in het filter te bepalen (zie § 2.1.), kan echter deze formule eenvoudig ingeprogrammeerd worden. Na een iteratie-cyclus zijn de verhangen in het filter te berekenen uit de golfrandvoorwaarde op het talud en de in de iteratie cyclus berekende oplossing van de drukverdeling in het filter. De op deze manier berekende verhangen kunnen gebruikt worden om met formule 19 de doorlatendheid voor de verschillende spleten te berekenen. In de volgende iteratie cyclus kan die doorlatendheid gebruikt worden om een betere benadering van de drukverdeling te krijgen, waarna dan weer nieuwe doorlatendheden berekend worden enz. Dit proces gaat door totdat de drukverdeling in het filter per cyclus minder verandert dan de in § 2.2. genoemde voorwaarden. Ook de doorlatendheid per spleet zal dan gedurende de laatste cycli nauwelijks veranderen.

Nu blijkt uit formule 19 dat een verhang 0 aanleiding zou geven tot een oneindige doorlatendheid en dus tot numerieke problemen. In werkelijkheid is dan natuurlijk het geldigheidsgebied van deze empirische formule overschreden. In dit programma wordt daarom voor de berekening van de doorlatendheid een minimaal verhang van 10^{-4} gebruikt.

Tenslotte dient dan nog de doorlatendheid van de spleet berekend te worden daar waar het talud overgaat van een helling 1 : 4 naar een helling 1 : 20. In het schaalmodel van de Oesterdam in de Deltagoot zijn ook bij deze overgang vierkante blokken toegepast, wat betekent dat ter plaatse van de overgang, de spleet aan de bovenkant van de blokken groter is dan aan de onderkant. Met behulp van de resultaten van het onderzoek doorlatendheid steenzetting is deze doorlatendheid te berekenen. Deze berekening is uitgevoerd in Appendix B. Het resultaat is dat in dit geval de doorlatendheid ter plaatse van de knik in het talud 3 maal de normale doorlatendheid is. In dit computerprogramma wordt de doorlatendheid met form. 19 berekend, daarna wordt getest of de spleet zich op de overgang bevindt, zo ja, dan wordt het resultaat van form. 19 met 3 vermenigvuldigd.

In Appendix D is een listing gegeven van subroutine DRUKV na deze wijzigingen.

4.4. Gemeten en berekende drukken

Met behulp van STEENZET zijn proeven uit het Oesterdamonderzoek in de Deltagoot nagerekend. Het betrof hier proeven uit de serie voor regelmatige golven. Tijdens de proevenserie met onregelmatige golven bleken enige golfdruk-opnemers niet naar behoren te functioneren. Daarom is deze serie niet gebruikt voor toetsing van de ontwikkelde rekenmethode.

In tabel 1 zijn enige gegevens opgenomen van de gebruikte proeven.

proef nr.	golfperiode T (s)	golfhoogte H (m)	$\frac{\tan \alpha}{\sqrt{H/L_0}}$ ξ	gem. waterstand t.o.v. N.A.P. (m)
T26	4,24	0,18	3,12	2,0
T30	4,24	0,30	2,42	2,0
T43	2,13	0,50	0,94	1,75
T44	6,00	0,16	4,68	1,75

Tabel 1.: Gegevens over nagerekende proeven. Alle parameters zijn modelparameters α = de hellingshoek van het talud. L_0 = de golflengte in diep water. Voor de betekenis van de parameter ξ zie [11].

Het computerprogramma vraagt de golfdruk ter plaatse van de spleten tussen de stenen. Van de metingen is de golfdruk ter plaatse van de drukopnemers bekend. De golfdruk ter plaatse van de spleten wordt uit deze gemeten golfdruk bepaald, door het gewogen gemiddelde te nemen van de twee drukopnemers, die zich het dichtst bij de spleet bevinden. Het gewogen gemiddelde wil zeggen, dat voor de bepaling van de golfdruk ter plaatse van de spleet de gemeten golfdruk, door de drukopnemer die zich dichterbij de spleet bevindt, evenredig meer meetelt dan de golfdruk gemeten door de drukopnemer die zich verder van de spleet of bevindt.

In formule:

$$p_i = (1-A) MP_j + A.MP_{j+1} \quad (20)$$

met

$$A = \frac{c}{d}$$

waarin:

p_i = de druk ter plaatse van de i de spleet
 MP_j = de gemeten druk ter plaatse van de j drukopnemer.

c en d zijn afmetingen, aangegeven in fig. 6 op de volgende bladzijde. De druk ter plaatse van de spleten die zich onder de onderste drukopnemer bevinden wordt berekend door uit te gaan van de gemeten druk bij de onderste opnemer en daarbij het drukhoogteverschil tussen de spleet en die opnemer op te tellen.

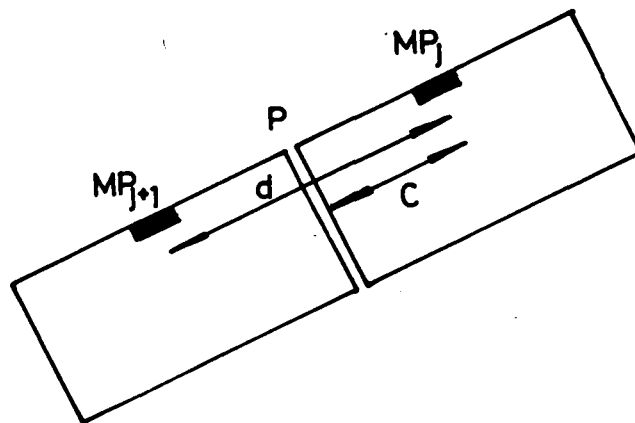


fig. 6. Afmetingen ter bepaling van het gewogen gemiddelde van de golf-
druk. De zwarte rechthoekjes geven de plaatsen van de golfdruk-
opnemers aan.

Met de op deze wijze berekende golfdrukken berekende de computer de waterspanningen in het filter. Deze berekende waterspanningen ter plaatse van de spleten zijn vergeleken met de gemeten waterspanningen. De gemeten waterspanningen zijn bepaald met waterspanningsmeters die gemonteerd zijn midden in een steen.

De afstand tussen de berekende waterspanning en de meest nabij gelegen gemeten waterspanning is dus een halve steenlengte (0,125 m). De resultaten van de berekeningen zijn in dezelfde vorm uitgevoerd als plots die van de metingen beschikbaar waren. Hierdoor is er enig verschil tussen de plots van de proeven T26 en T30 enerzijds en T43 en T44 anderzijds. De figuren 7 en 8 geven de resultaten voor proef T30 op verschillende plaatsen van het talud. De indeling van de figuren is als volgt: De bovenste grafiek geeft de bij een drukopnemer gemeten golfdruk (de doorgetrokken lijn) en de met behulp van vergelijking 20 berekende golfdruk bij de dichtstbijzijnde spleet. De middelste figuur geeft de gemeten en met behulp van STEENZET berekende waterspanning. De onderste figuur geeft de gemeten waterspanning min de golfdruk min de druk equivalent met het steengewicht in vergelijking met de berekende waarden. Als dit getal positief is, is de zetting potentieel instabiel. De berekening is uitgevoerd met 2 verschillende spleetbreedtes. Metingen in de Deltagoot hadden een gemiddelde spleetbreedte opgeleverd van 0,7 mm.

Betere aanpassing tussen de berekende en gemeten waterspanning bleek echter mogelijk door uit te gaan van een spleetbreedte van 1,0 mm. Afwijkingen tussen de gemeten spleetbreedte en de, voor goede aanpassing noodzakelijk, in de berekeningen ingevoerde spleetbreedte kunnen zijn ontstaan onnauwkeurigheden in de meting ter bepaling van formule 19, of onnauwkeurigheden in de bepaling van de spleetbreedte in de deltagoot (de gevonden spleetbreedte is klein t.o.v. de ruwheid van de blokken). Ook kunnen er fouten zitten in de bepaling van de doorlatendheid van de filterlaag of kan deze tijdens de proeven lucht bevat hebben. Omdat slechts de relatieve doorlatendheid van belang is, kunnen deze fouten ook gecompenseerd worden door een andere spleetbreedte te kiezen.

Beide berekeningen zijn weergegeven in de figuren.

De figuren 9 en 10 geven dezelfde resultaten, maar nu voor de proef T26 omdat bij deze proef de golfhoogte kleiner is, is één vergelijkingspunt veranderd. De in de figuren genoemde spleten en meetinstrumenten zijn terug te vinden in fig. 11, die een overzicht geeft van de instrumentatie tijdens de proeven T26 en T30. Van de proeven T43 en T44 waren resultaten beschikbaar in de vorm van plots waarin de gemeten golfdruk en de waterspanning min een druk equivalent met het steengewicht in één grafiek zijn uitgezet. Als de golfdruk lager is dan de waterspanning - het equivalente steengewicht is de situatie potentieel instabiel. De resultaten voor proef T43 zijn gegeven in de figuren 12 en 13. De waterspanningen zijn berekend voor $k = 0,1$ m/s en $s = 1$ mm wat als beste fit uit de proeven T26 en T30 naar voren gekomen is en voor $k = 0,18$ m/s en $s = 1,2$ mm, wat overeenkomt met een vergelijkbare waarde van de lek lengte (λ) en ook vergelijkbare resultaten geeft. De afwijking met de gemeten spleetbreedte is dan echter aanzienlijk groter. Figuur 14 geeft de resultaten voor de verschillende waarden van k en de spleetbreedte in één figuur voor spleet 10. Ook is voor deze proef nagerekend hoe de waterspanningsopbouw is bij het begin van de golfaanval. Voor $k = 0,18$ m/s en $s = 1,2$ mm staan de resultaten voor spleet 13 in fig. 15.

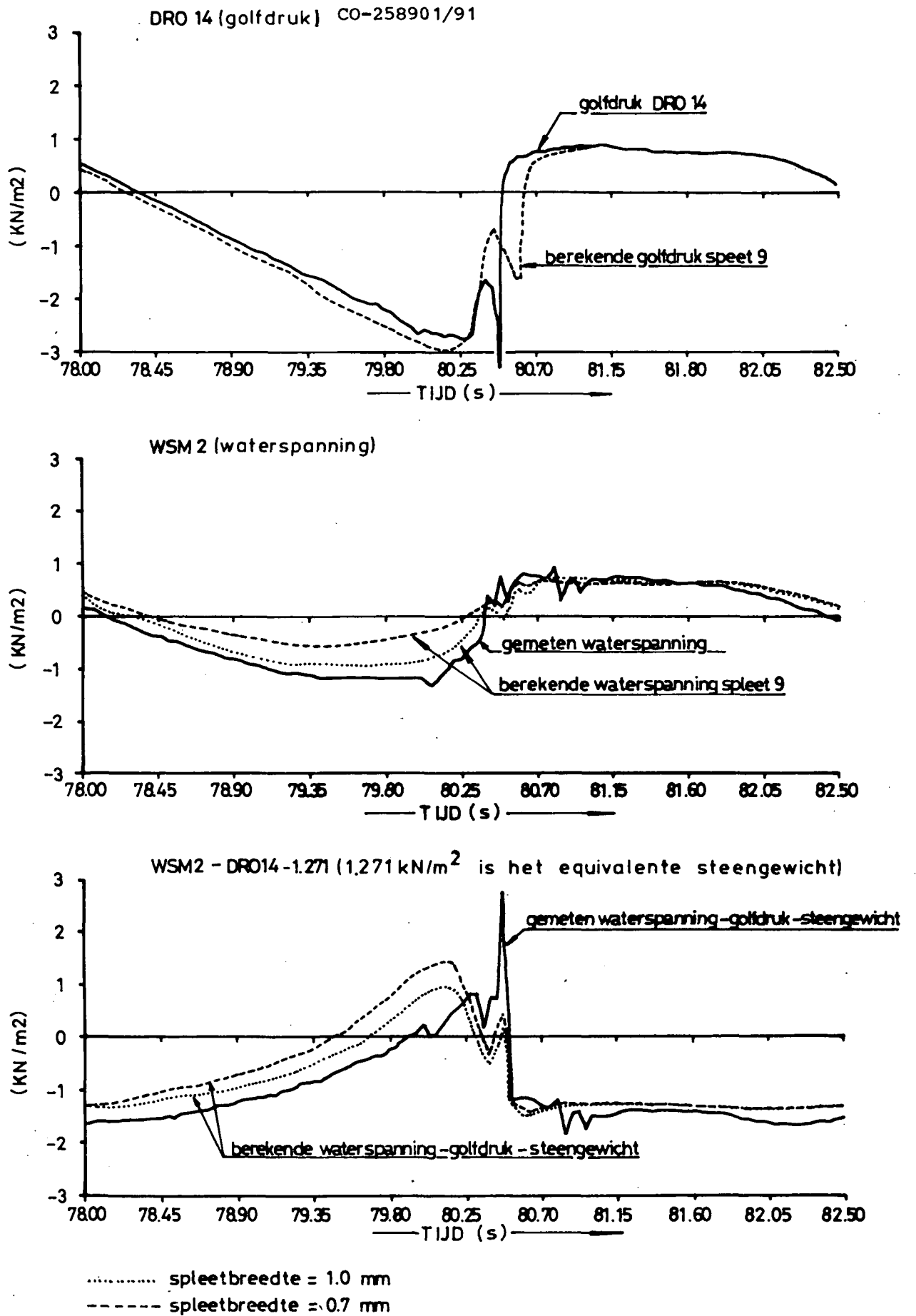


Fig. 7: Vergelijking berekende en gemeten drukken voor proef T30 bij spleet 9.

CO-258901/91

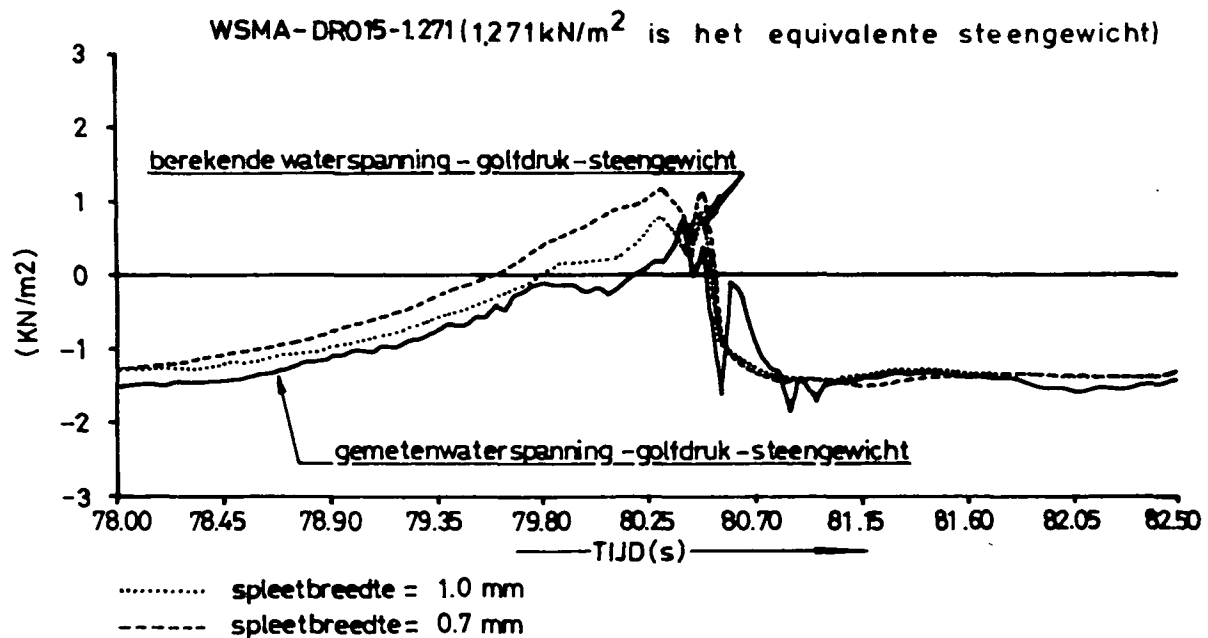
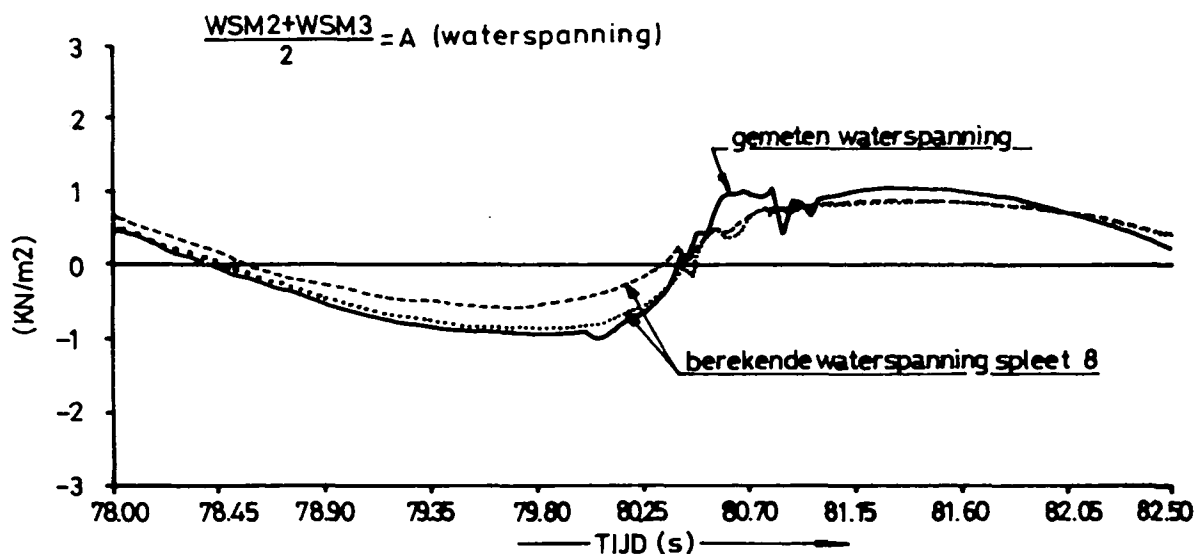
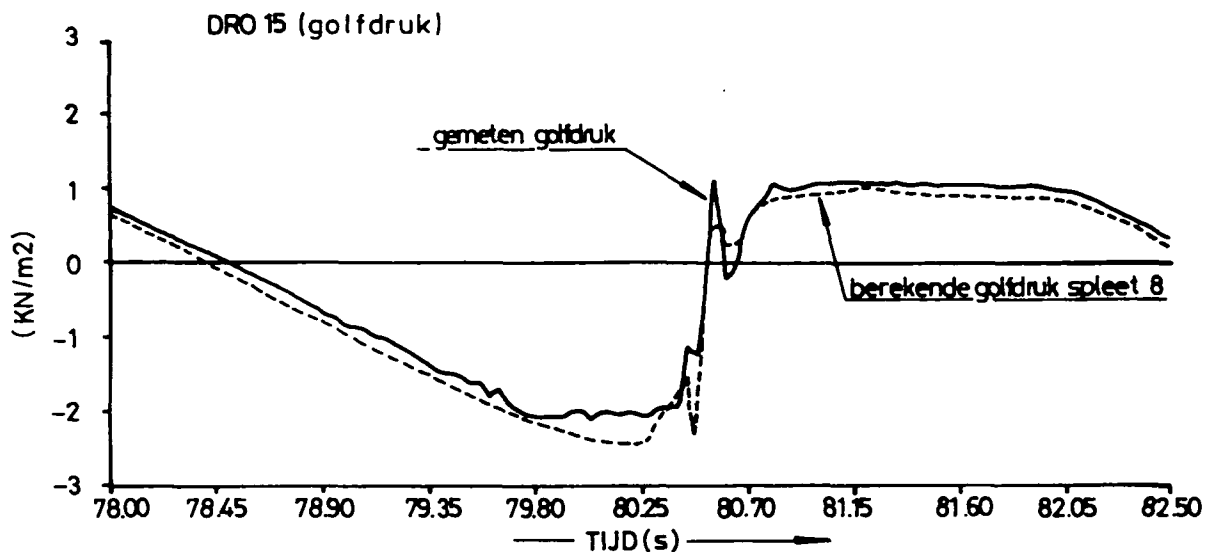
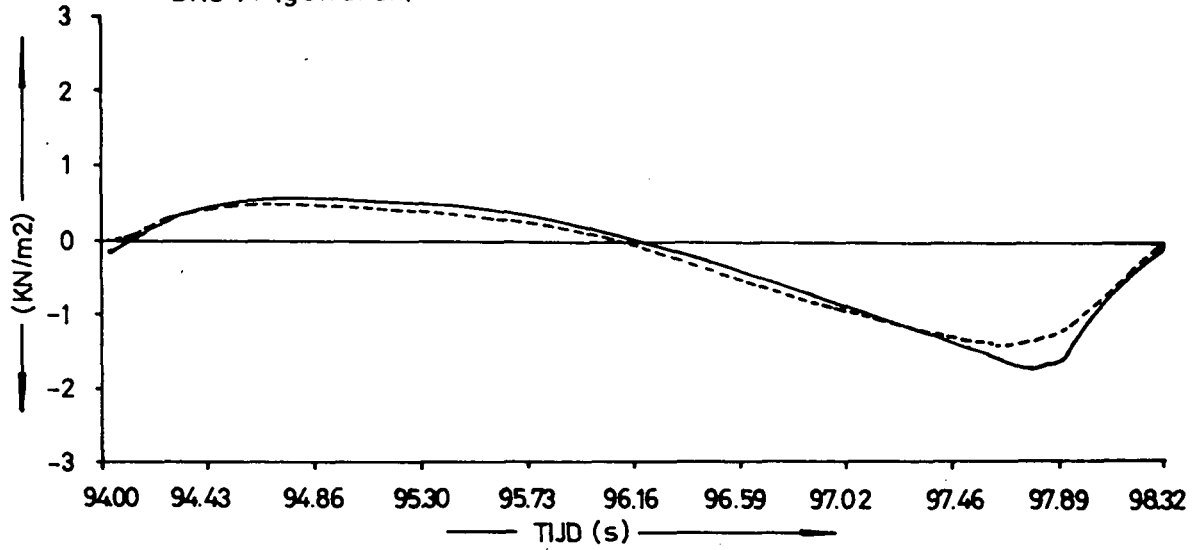
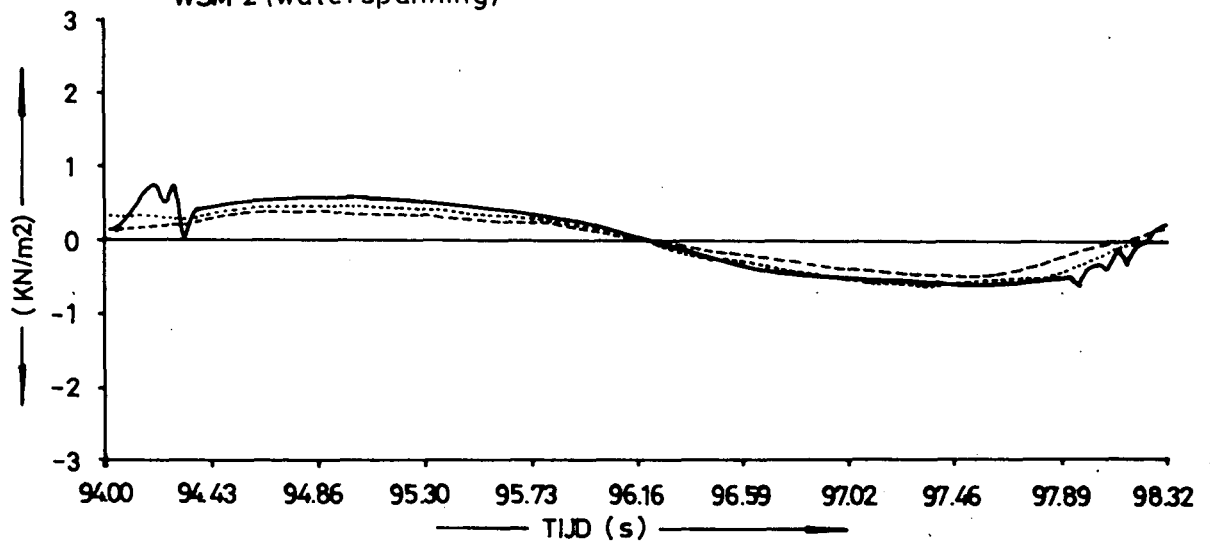


Fig. 8: Vergelijking berekende en gemeten drukken voor proef T30 bij spleet 8.

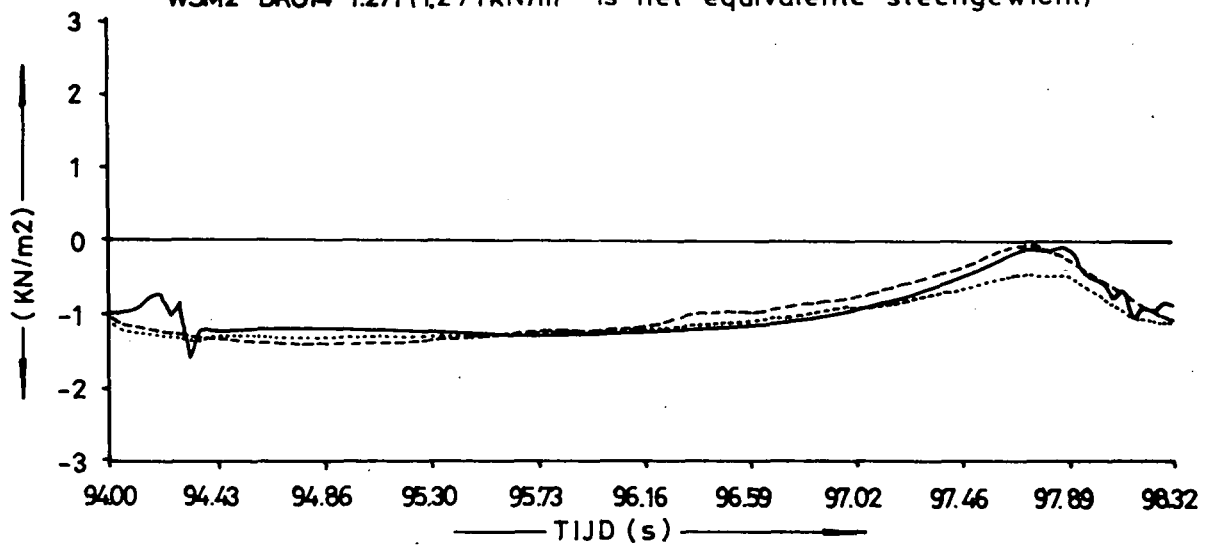
DRO 14 (golfdruk) CO-258901/91



WSM 2 (waterspanning)



WSM2-DRO14-1.271 (1.271kN/m² is het equivalente steengewicht)



..... s = 1 mm
----- s = 0.7 mm

Fig. 9: Vergelijking berekende en gemeten drukken voor proef T26 bij spleet 9.

CO-258901/91

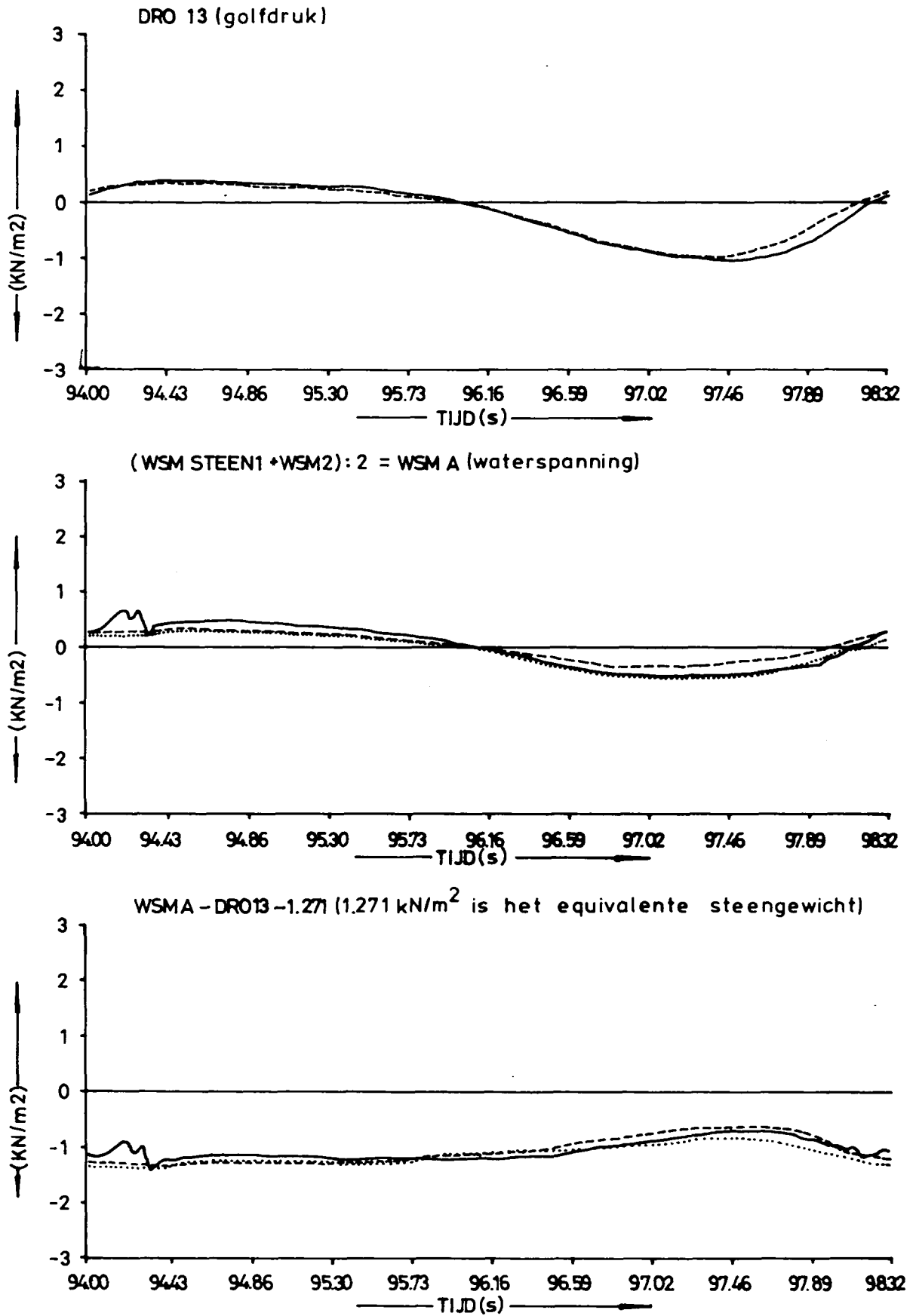
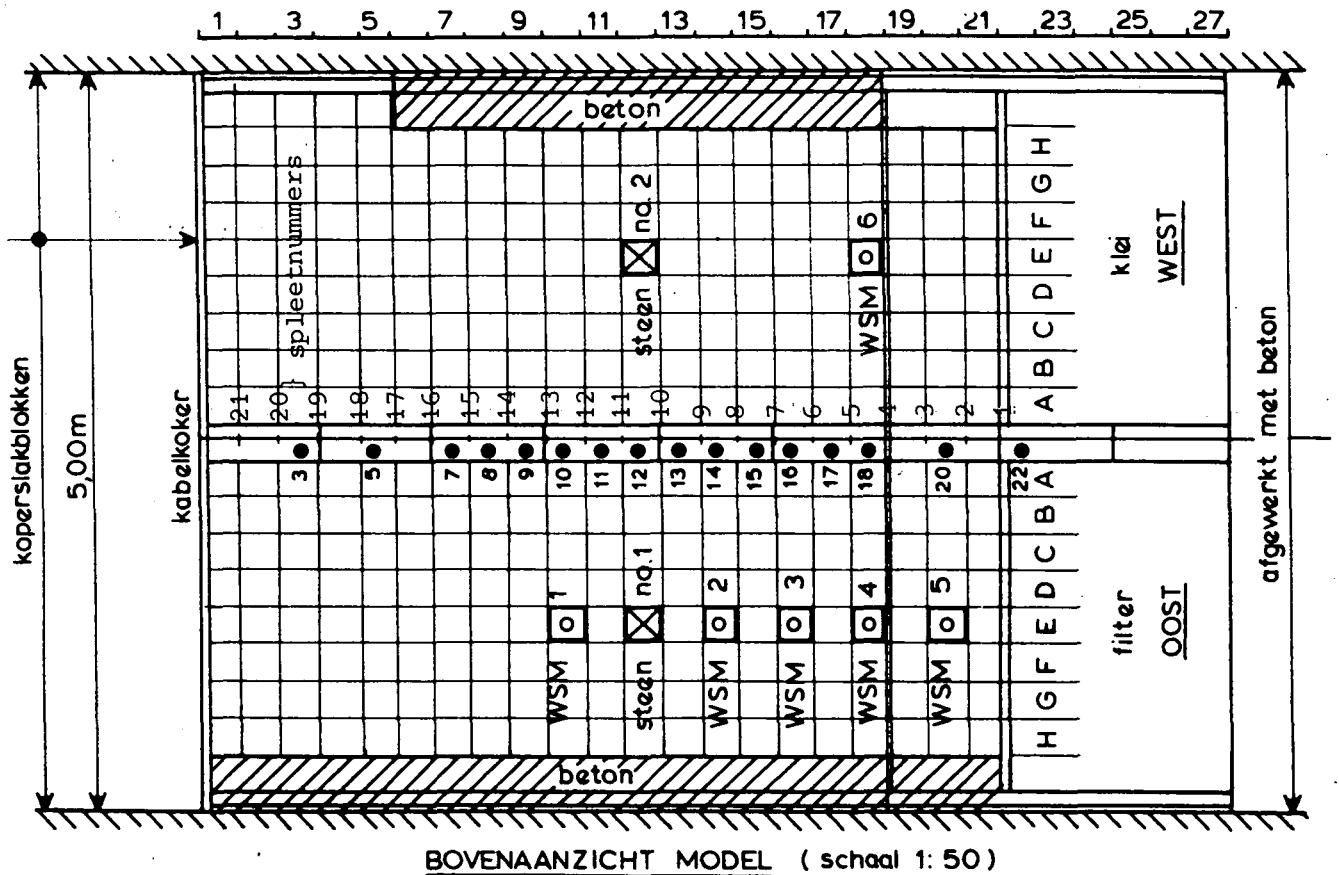
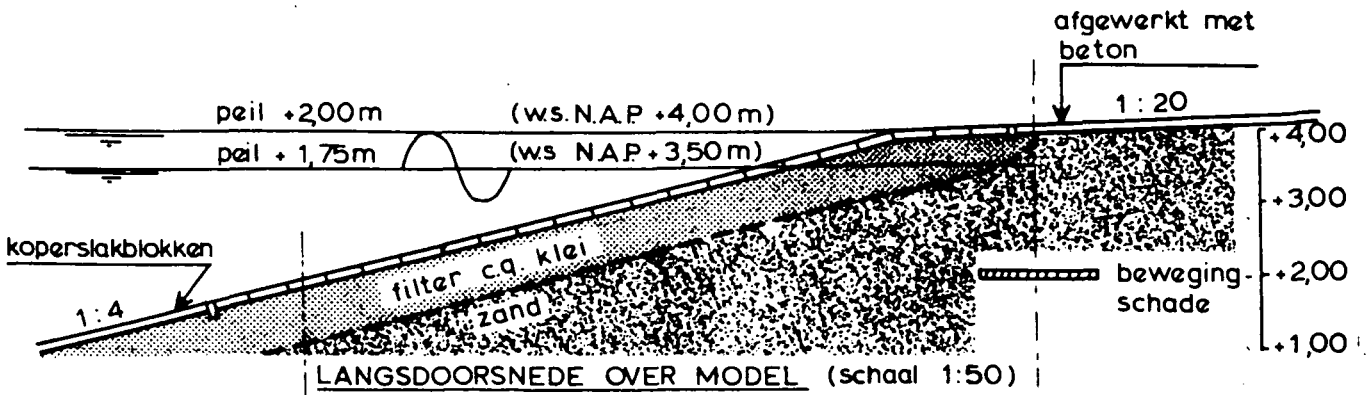


Fig. 10: Vergelijking berekende en gemeten drukken voor proef T26 bij spleet 10.



PROEVENSERIE OP DUNNE BLOKKEN,
REGELMATIGE GOLVEN FILTER + KLEI

plaats instrumenten :

- ↑↑↑ oplopmeter
- golfdrukmeter
- schade - steen
- ⊗ geïnstrumenteerde - steen
- waterspanningsopnemer in steen

(blokdimensies in model :
afm. 25 × 25 × 10 cm³)

Fig. 11: Overzicht drukopnemers, waterspanningsmeters en spleetnummers in het talud bij de proeven T26 en T30.

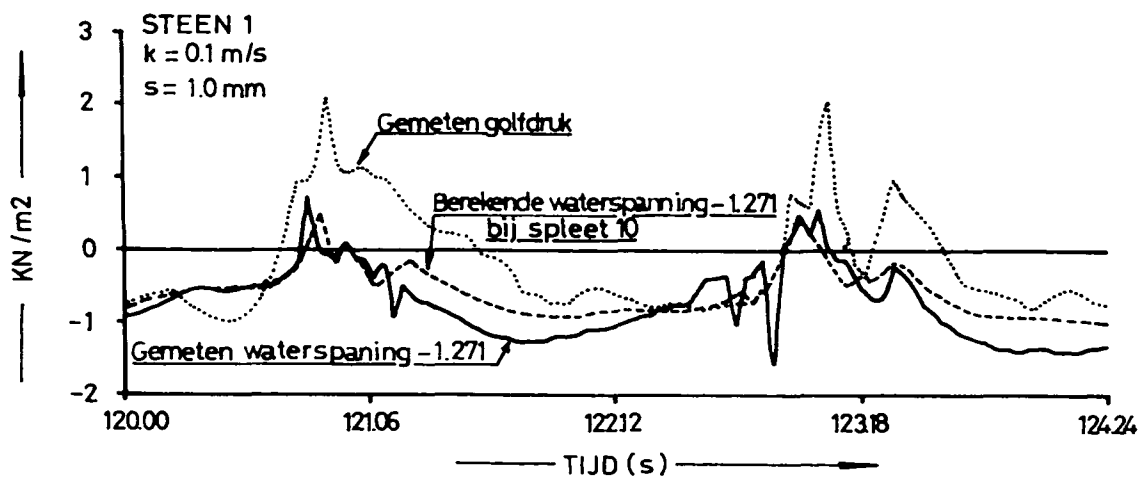
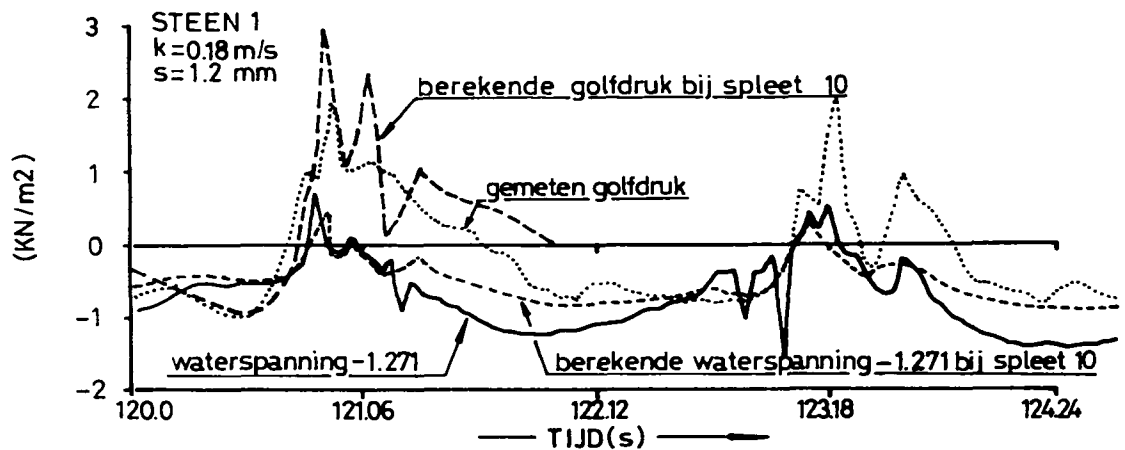


Fig. 12: Vergelijking berekende en gemeten drukken voor proef T43 bij spleet 10.

1,271 kN/m² is het equivalente onderwatergewicht van de zetting.

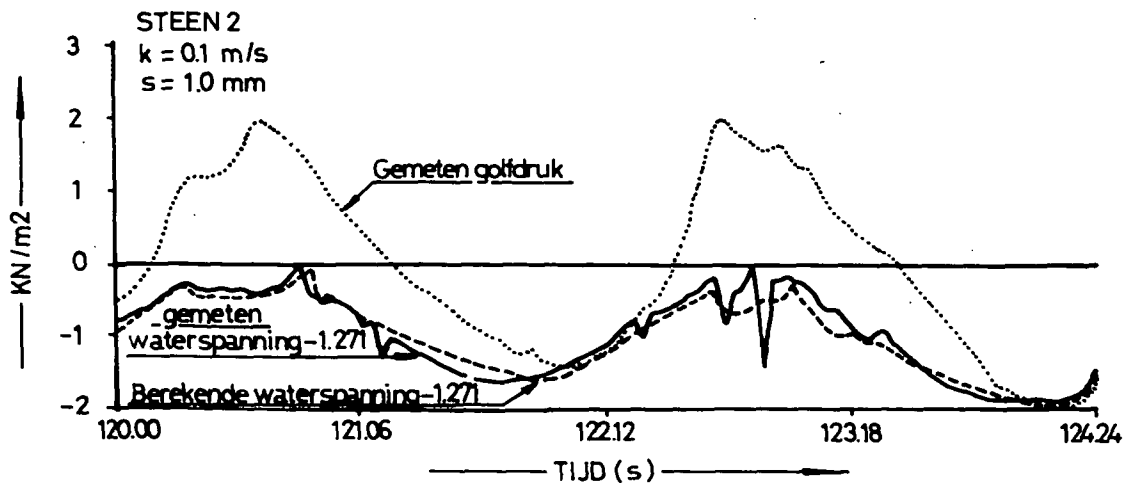
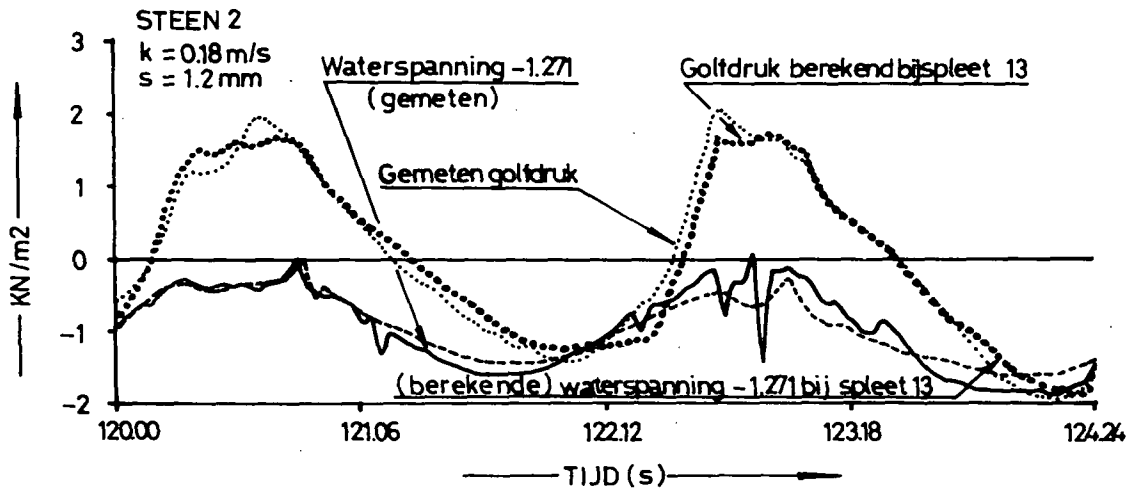


Fig. 13: Vergelijking berekende en gemeten drukken voor proef T43 bij spleet 13.

1,271 kN/m² is het equivalente onderwatergewicht van de zetting.

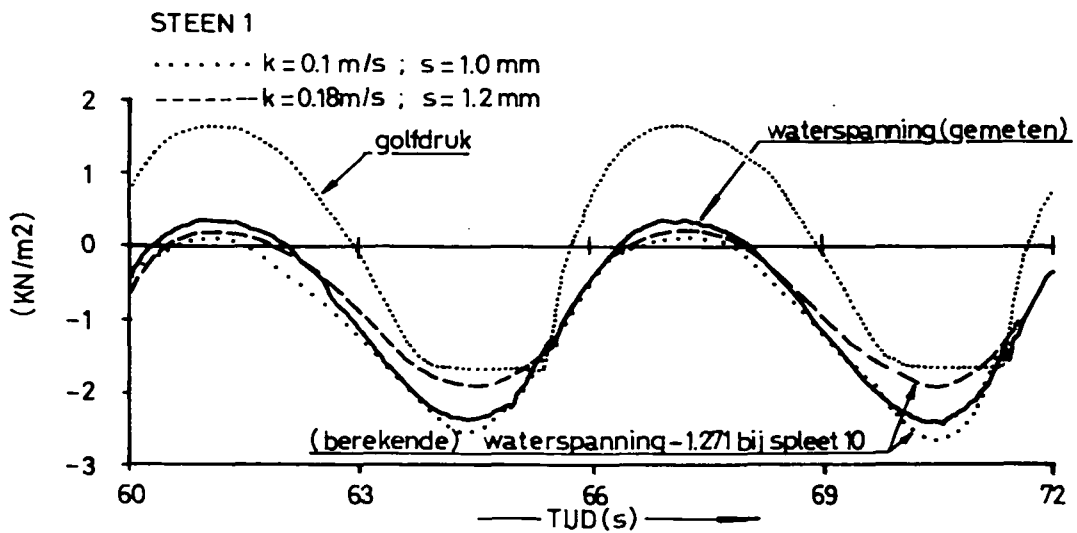


Fig. 14: Vergelijking berekende en gemeten drukken voor proef T44 bij spleet 10.

1,271 kN/m is het equivalente onderwatergewicht van de zetting.

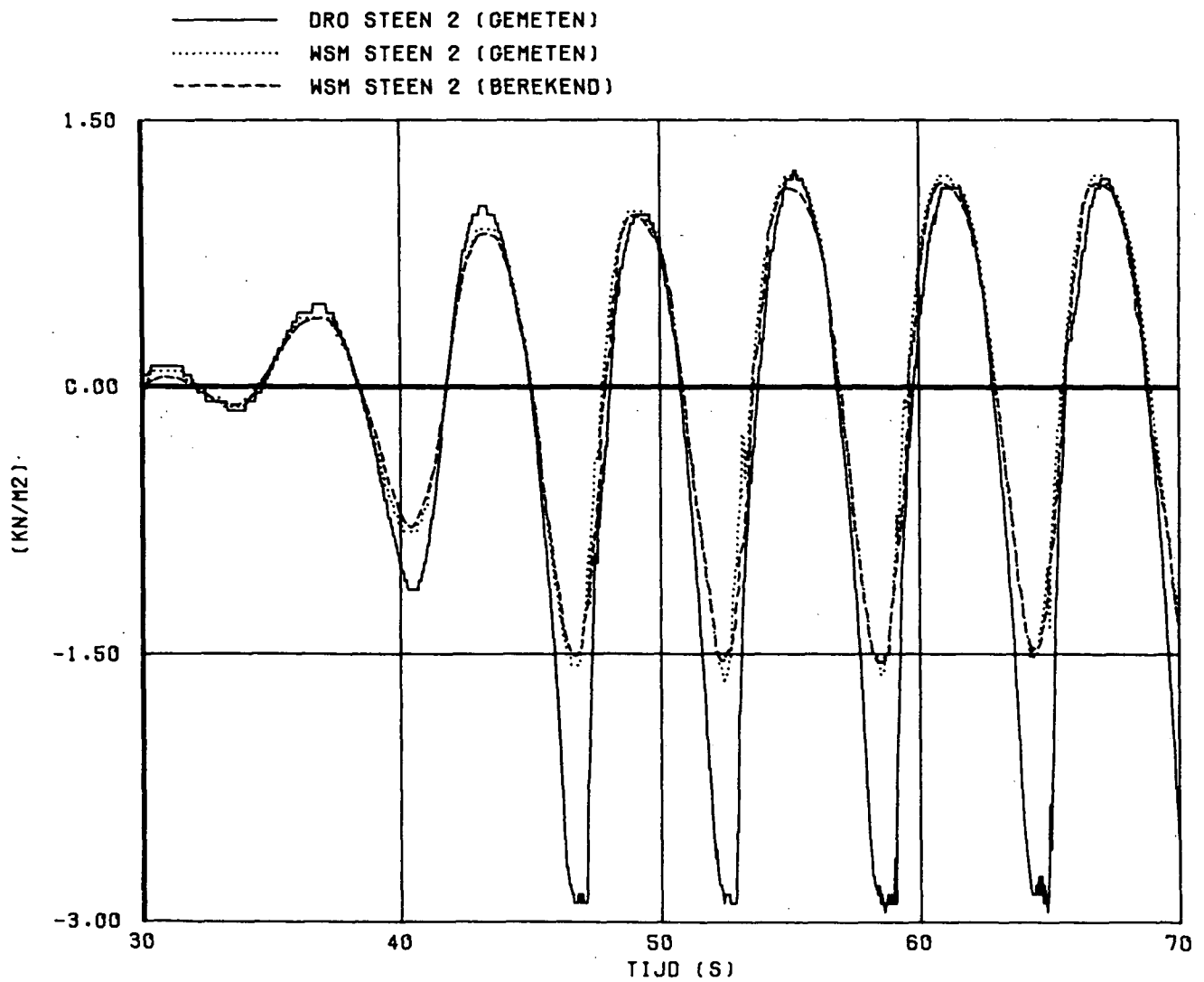
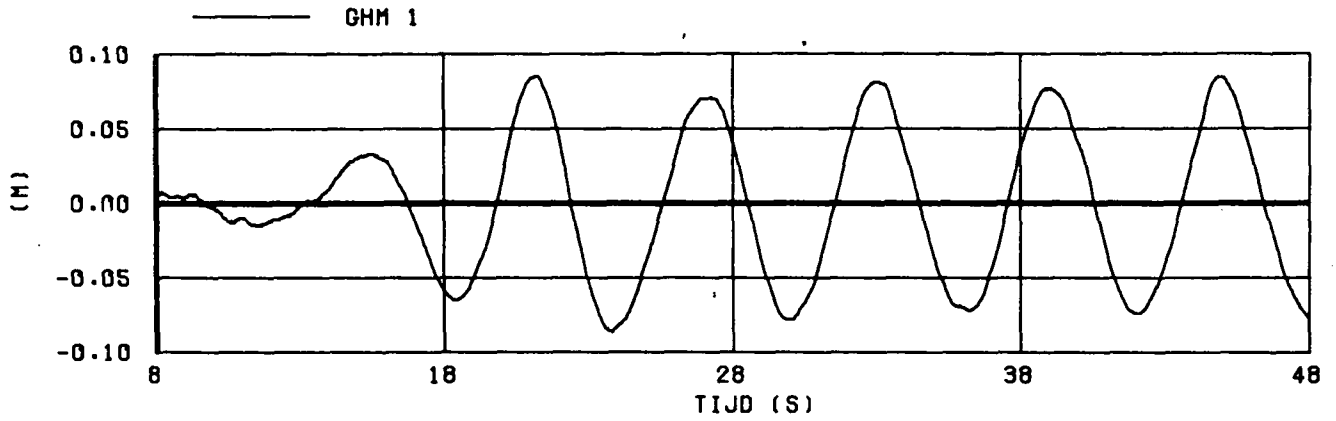
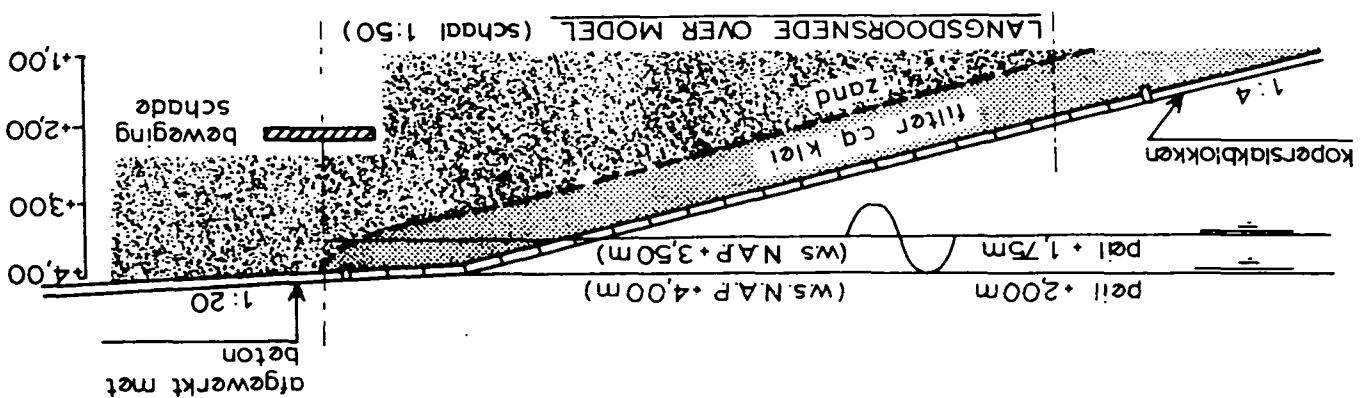
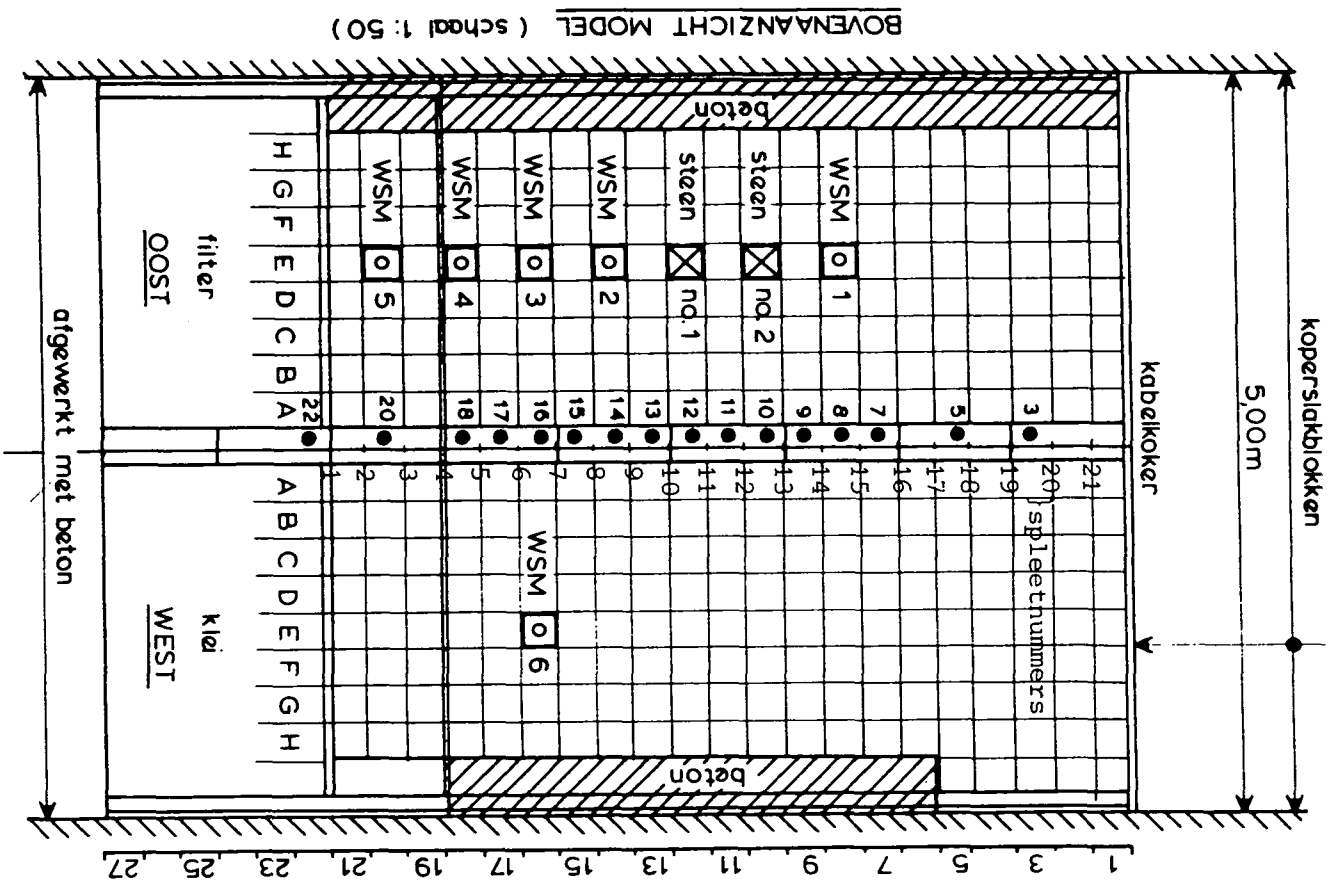


Fig. 15: Vergelijking berekende en gemeten drukken voor begin golfaanval voor proef T44 bij spleet 13. $k = 0,18$ m/s en $s = 1,2$ mm.



PROEVENRIE OP DUNNE BLOKKEN,
REGELMATIGE GOLVEN FILTER + KLEI



- plaats instrumenten:
- o plooppmeter
 - golfdrukmeter
 - schade - steen
 - geïnstreunde - steen
 - waterspanningsopnemer in steen
- (blokdimensies in model :
afm. 25 x 25 x 10 cm³)

Fig. 16: Overzicht drukopnemers, waterspanningsmeters en spleetnummers in het talud, bij de proeven T43 en T44.

Figuur 16 geeft een overzicht van de instrumentatie bij de proeven T43 en T44. De in de voorafgaande figuren gepresenteerde waterspanningen en golfdrukken zijn gegeven t.o.v. de waterspanning resp. golfdruk bij stil water.

De resultaten tonen aan dat de gemeten waterspanning in de filterlaag redelijk tot goed te simuleren is met het computerprogramma. Ook blijken relatief kleine aanpassing van de gemeten doorlatendheden voldoende om een optimale fit tussen de berekende en gemeten waterspanning te krijgen.

De verschillen tussen de gemeten golfdruk midden op de steen en de via het gewogen gemiddelde bepaalde golfdruk ter plaatse van de spleet, een halve steen verder, blijken vrij groot, zeker op het moment dat de golven breken. Hierdoor ontstaan de grootste verschillen in de grafieken die de waterspanning min golfdruk min steengewicht in de figuren 7 t/m 10 geven. Toch is het programma op dit punt niet verder geoptimaliseerd. Het bleek namelijk dat op dezelfde hoogte langs het talud, maar op verschillende plaatsen ook zeer verschillende golfdrukken gemeten zijn. Zie fig. 17, die de resultaten geeft van proef T43 op dezelfde hoogte langs het talud maar op ruim één meter afstand [4].

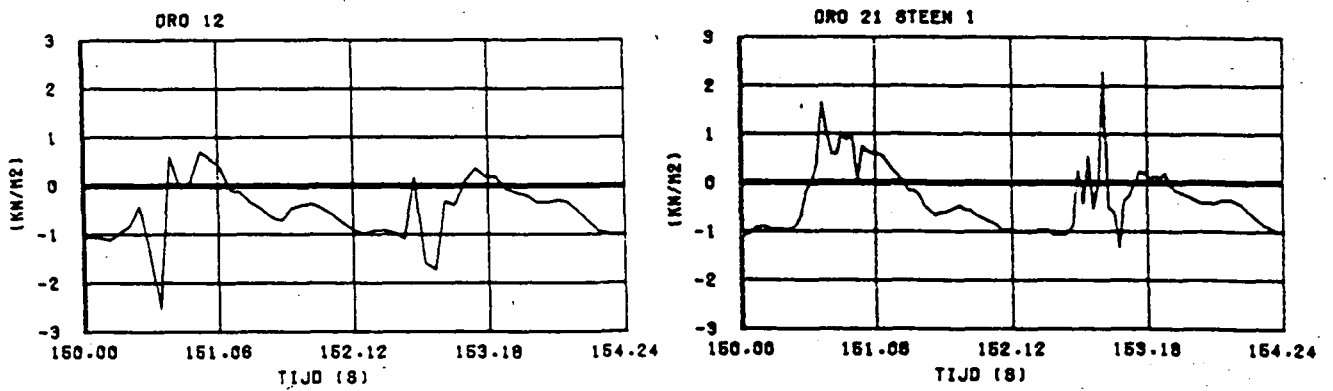


Fig. 17: Gemeten drukken op twee verschillende plaatsen, maar op dezelfde hoogte op het talud (uit [4] proef T43).

Het gemeten golfbeeld was blijkbaar niet geheel 2-dimensionaal. Dit kon veroorzaakt worden door randeffecten van de goot, of een niet helemaal loodrecht op de goot liggend model, waardoor stroming in de breedte richting van de goot kan ontstaan. Enige afwijking tussen de gemeten golfdruk en die golfdruk die gebruikt is in de berekeningen is dan ook toelaatbaar.

5. Berekening invloed waterstand bij Scheldegoot- en Deltagootonderzoek
t.b.v. de Oesterdam

5.1. Resultaten metingen

Bij het kleinschalig onderzoek t.b.v. de Oesterdam in de Scheldegoot is gebleken dat het schadegolfhoogte bij verschillende waterstanden verschillend was. Deze verschillen bleken niet verklaard te kunnen worden door de verschillen in golfvorm bij verschillende waterdieptes. Het grootschalig onderzoek t.b.v. de Oesterdam geeft bij onregelmatige golven ook verschillen in schadegolfhoogte, maar in veel mindere mate. Bij de blokken van 0,15 cm dik (model maat) zijn de verschillen verwaarloosbaar. De verschillen in de diverse schadegolfhoogten blijken uit fig. 18 waarin $\frac{H}{\Delta D}$ tegen ξ uitgezet is. De verschillen zijn met name bij het Scheldegoot onderzoek opmerkelijk, te meer daar bij een lagere waterstand een hogere schadegolfhoogte gemeten wordt. Dit is in tegenpraak met de in hoofdstuk 7 te presenteren ontwerpgrafieken (die berekend zijn uitgaande van een variërende horizontale waterstand). Deze geven aan dat verlaging van de waterstand aanleiding geeft tot hogere overdrukken en dus lagere schadegolfhoogtes. Voor de proevenseries geldt dat deze afhankelijkheid van de schadegolfhoogte van de waterstand alleen geconstateerd is bij onregelmatige golven. Bij het Scheldegoot onderzoek omdat alleen onregelmatige golven onderzocht zijn, bij het Deltagootonderzoek omdat nooit bij dezelfde regelmatige golf de waterstand gevarieerd is.

De modellen van de Oesterdam in de Scheldegoot en de Deltagoot waren niet geheel identiek. Het Scheldegootmodel bestond uit een steenzetting op een filterlaag vanaf 1,80 m + N.A.P. tot 4,00 m + N.A.P. (prototype afmetingen) onder helling 1 : 4. Het verdere profiel van de Oesterdam was vervaardigd met beton. Bij het model van de Oesterdam in de Deltagoot was vanaf 1,80 m + N.A.P. tot 4,00 m + N.A.P. eveneens een steenzetting op een filterlaag aangebracht onder een helling 1 : 4, maar boven de 4,00 m + N.A.P. lagen nog 3 blokken op dezelfde filterlaag onder een helling 1 : 20, zodat een model ontstaat zoals getekend in b.v. fig. 16. In het volgende zal nagegaan worden of de verschillende schadegolfhoogtes bij wisselende waterstand m.b.v. het ontwikkelde rekenprogramma verklaard kunnen worden en/of verschillen tussen de resultaten van het Deltagoot onderzoek en Scheldegoot onderzoek verklaard kunnen worden door verschillen in geometrie.

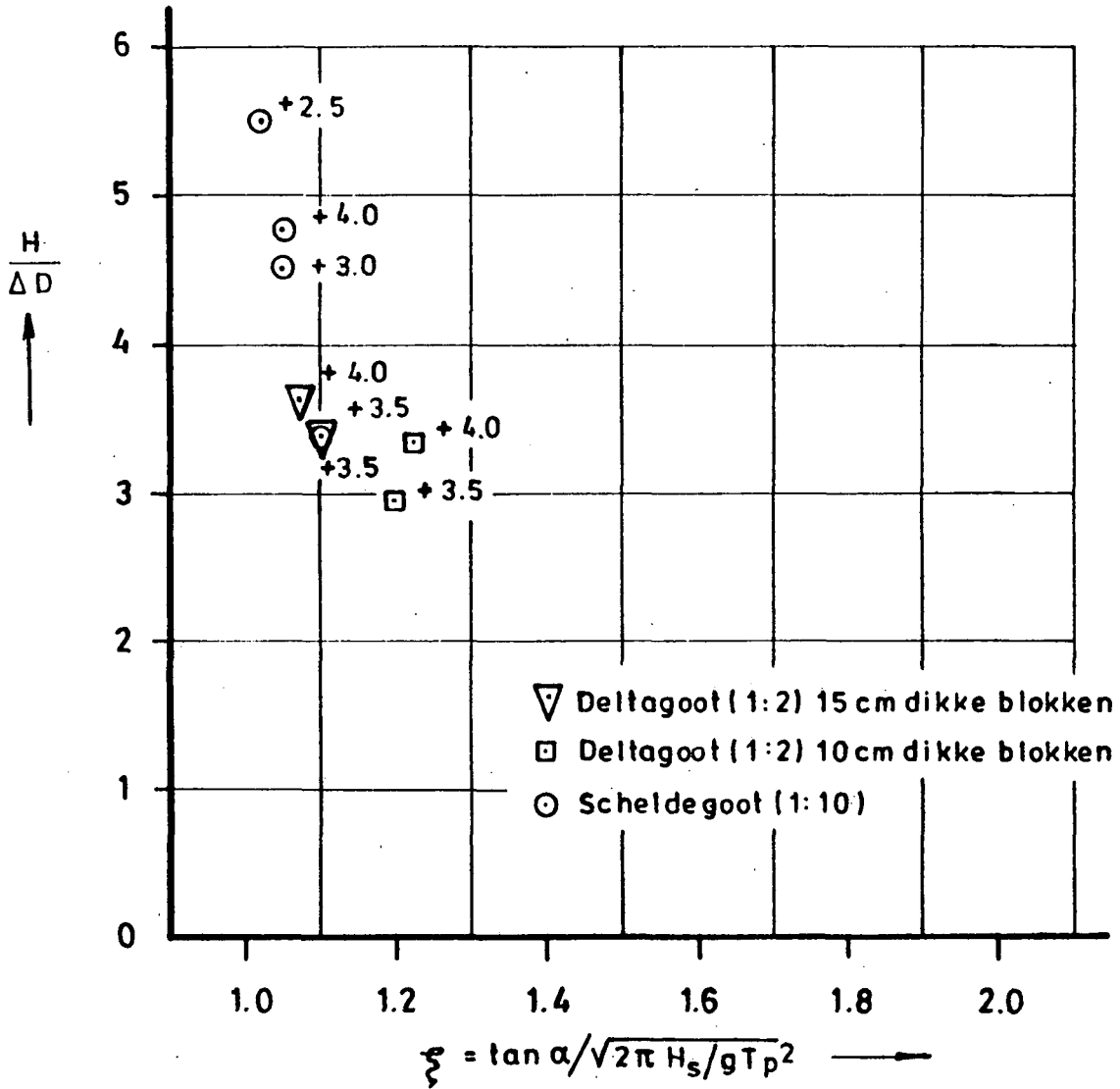


fig. 18: $\frac{H'}{\Delta D}$ - ξ voor kleinschalig en grootschalig onderzoek t.b.v. de Oesterdam met blokken op filterlaag uit [6] en [10].

5.2. Opzet en resultaten van berekeningen

In de analytische oplossing van Sellmeijer [1] is de schadegolfhoogte onafhankelijk van de waterstand. De ELNAG-metingen en de in hoofdstuk 7 gepresenteerde ontwerpgrafieken geven bij lagere waterstanden lagere schadegolfhoogten, dit in tegenstelling tot de metingen. Nu is bij al deze berekeningen de golfhoogte geschematiseerd tot een horizontaal variërende waterstand. Bij de hier volgende berekening is gebruik gemaakt van een gemeten golfrandvoorwaarde. Omdat geen geschikte data voor onregelmatige golven voorhanden zijn, is gebruik gemaakt van de golfdrukmeting bij proef T30 van het Oesterdamonderzoek voor regelmatige golven. Met de bij deze proef gemeten golfdrukken is golfaanval op verschillende plaatsen van het talud gesimuleerd. Bij deze simulatie is de golfhoogte constant gehouden, zodat het resultaat van de berekening geen hogere of lagere schadegolfhoogte is, maar een lagere of hogere overdruk onder de toplaag. Het Oesterdammodel in de Scheldegoot is gesimuleerd als een steenzetting met een constante helling 1 : 4 op een filterlaag. Het model in de Deltagoot is gesimuleerd op de in hoofdstuk 4 aangegeven manier. Om een betere vergelijking van de resultaten mogelijk te maken, is in beide modellen de doorlatendheid van de zetting zowel als de filterlaag onafhankelijk van het verhang verondersteld. De bij de simulatie gebruikte afmetingen voor het Scheldegootmodel zijn een factor 5 groter dan de modelafmetingen en komen dus overeen met de afmetingen van het Deltagootmodel. De doorlatendheidsverhoudingen zijn voor de beide modellen gelijk gekozen, ongeveer vergelijkbaar met de in hoofdstuk 4 gevonden waarden. Omdat de dikte van de filterlaag in het Scheldegootmodel relatief kleiner is dan in het Deltagootmodel is de lek lengte parameter λ voor het Deltagootmodel wat groter. Te verwachten is dan ook dat de berekende overdrukken bij de simulatie van het Deltagootmodel wat groter zullen zijn. Voordat de berekening is uitgevoerd, staat niet vast waar de overdruk maximaal wordt, daarom is het programma zo gewijzigd dat elke tijdstap de maximale overdruk ergens onder de toplaag opgeslagen wordt. Deze maximale overdruk wordt na de berekening uitgeplot. Het resultaat van de simulatie van de Scheldegootproeven voor verschillende waterstanden is gegeven in fig. 19 en in tabel 2.

Deze berekening is ook uitgevoerd voor verschillende waterstanden bij het Deltagootmodel. De resultaten staan gegeven in fig. 20. Om na te gaan wat de invloed is van de doorlatendheidsverhoudingen, is de berekening bij een waterstand van 3,5 m + N.A.P. en 4 m + N.A.P. herhaald met voor de Scheldegootsimulatie een 2 maal hogere doorlatendheid van de toplaag en voor de Deltagootsimulatie een 1,4 maal hogere doorlatendheid. De resultaten van deze berekeningen staan in fig. 21 en 22.

waterstand in prototype t.o.v. N.A.P. (m)	berekende overdruk (kN/m ²)
2,5	1,76
3,0	2,25
3,5	2,36
4,0	2,16

Tabel 2: Berekende maximale overdruk voor de golfrandvoorwaarde van proef T30 bij verschillende waterstanden.

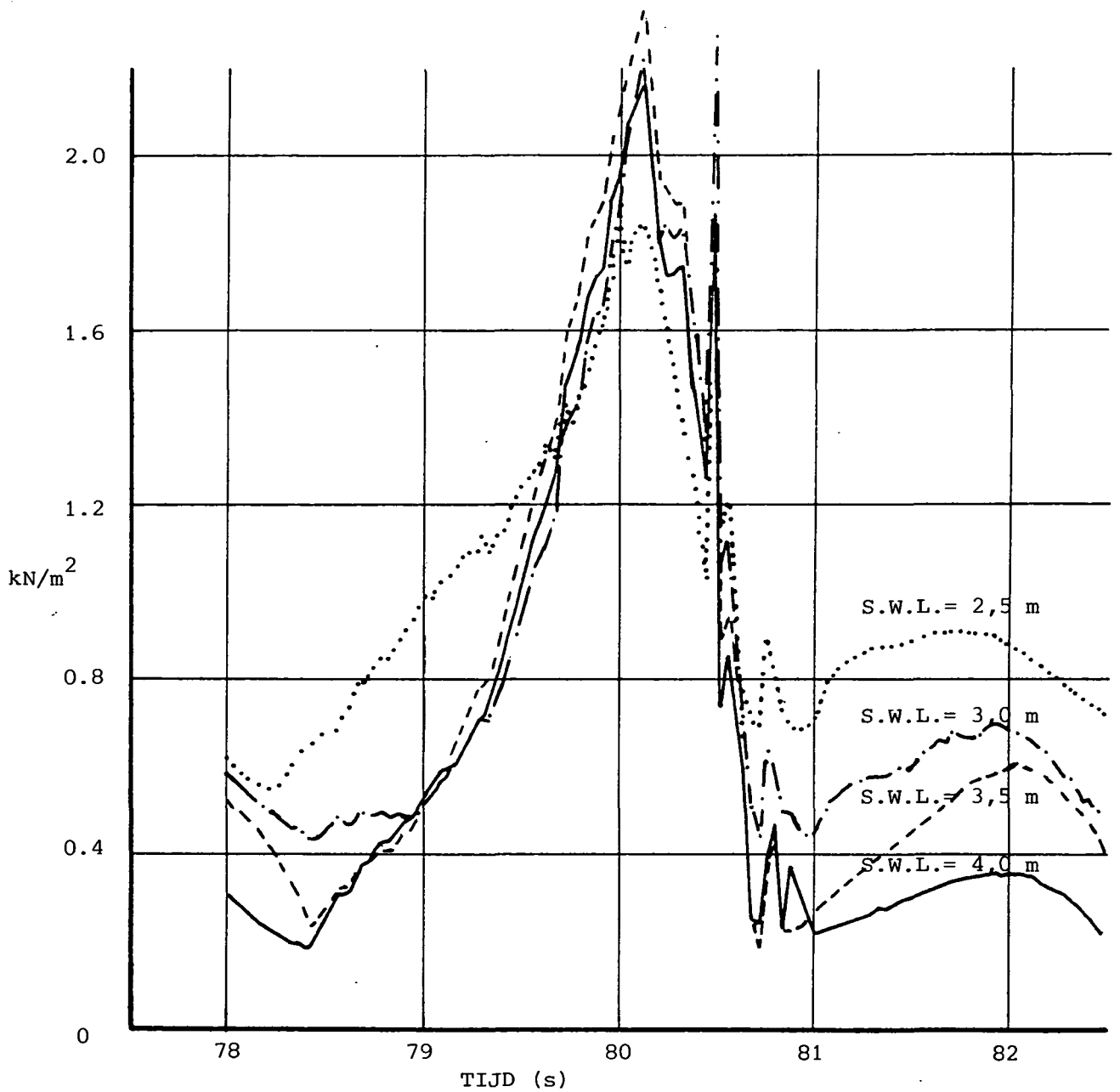


fig. 19: Berekende overdruk bij simulatie van de Scheldegootproeven t.b.v. de Oesterdam met verschillende hoogten van de stilwaterlijn (S.W.L.). De golftrandvoorwaarde is van proef T30. Om de randvoorwaarde te kunnen toepassen zijn de afmetingen 5 x vergroot.

Parameters $k = 0,1 \text{ m/s}$, $k' = 0,0015 \text{ m/s}$

$d = 0,1 \text{ m}$ $b = 0,125 \text{ m}$ $\Delta x = 0,204 \text{ m}$

taludhelling 1 : 4

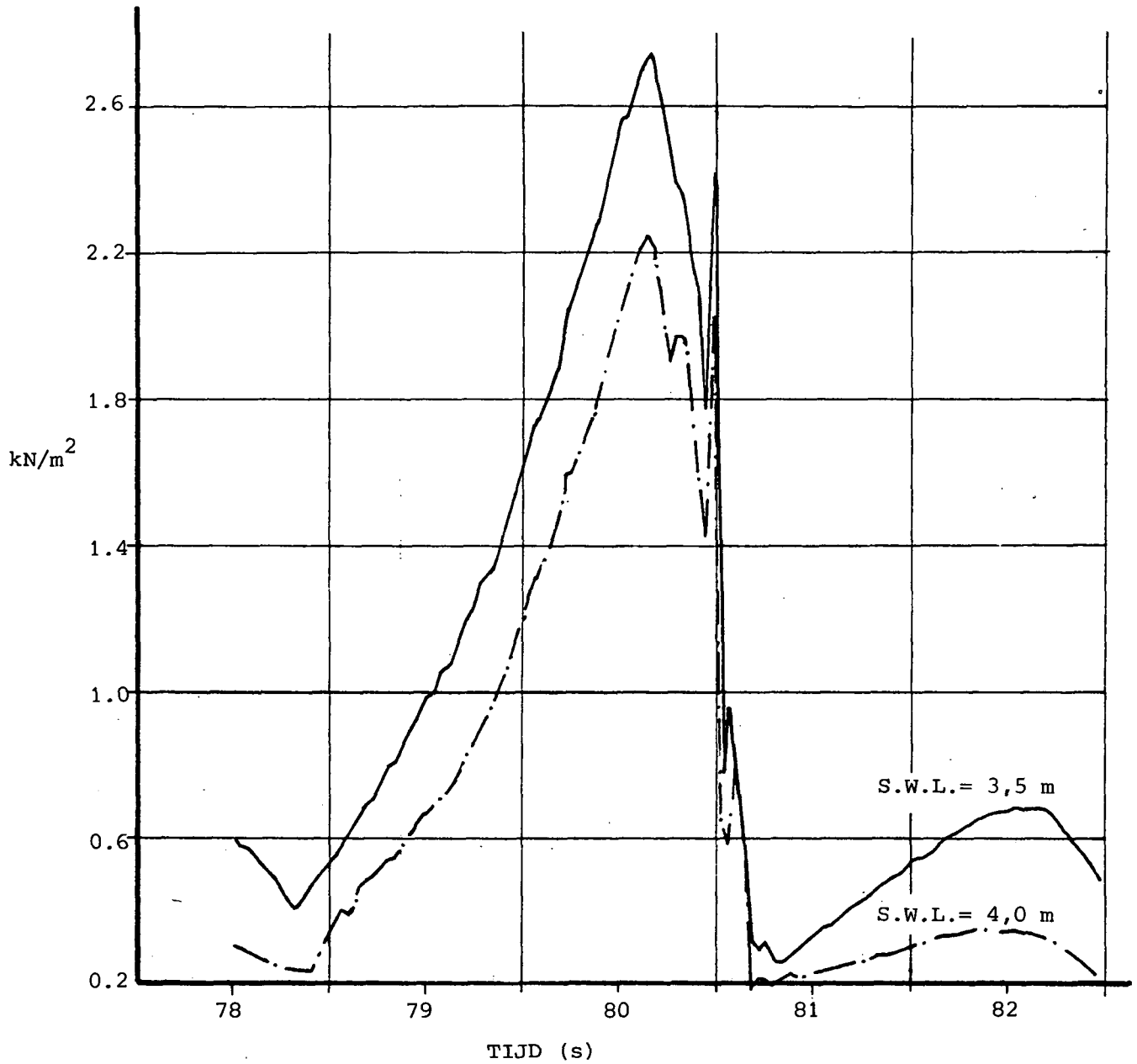


fig. 20: Als fig. 19, maar nu voor het Deltagootmodel.

Parameters $k = 0,1 \text{ m/s}$ $k' = 0,0015 \text{ m/s}$

$d = 0,1 \text{ m}$ $b = 0,15 \text{ m}$ $\Delta x = 0,25 \text{ m}$

taludhelling 1 : 20 en 1 : 4.

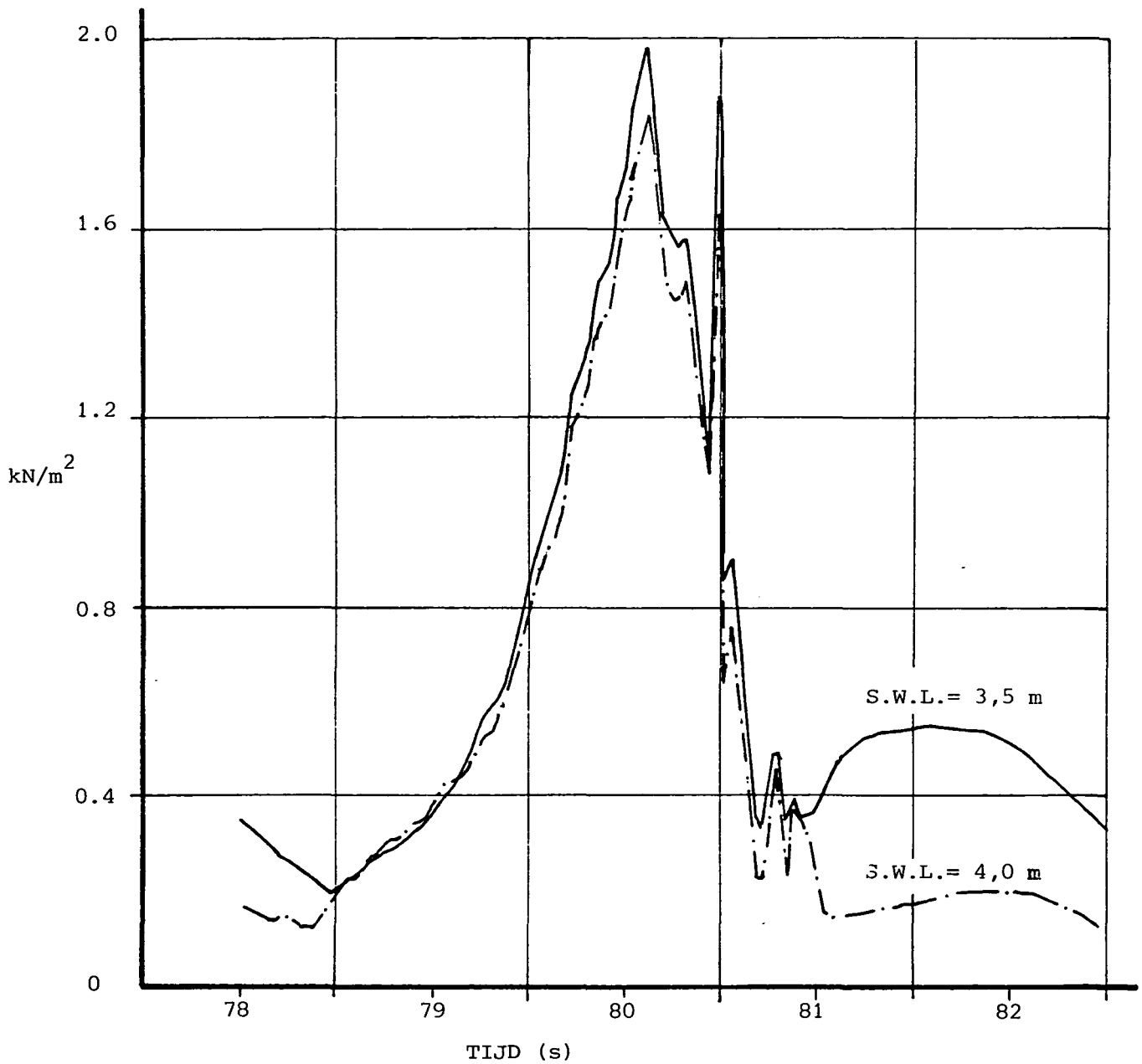


fig. 21: Berekende overdruk bij simulatie van de Scheldegootproeven
t.b.v. de Oesterdam voor 3,50 m en 4,00 m + N.A.P. (prototype
afmetingen) met een t.o.v. fig. 18 2 x vergrootte
doorlatendheid in de toplaag
parameters: $k' = 0,003 \text{ m/s}$
overige zie fig. 18.

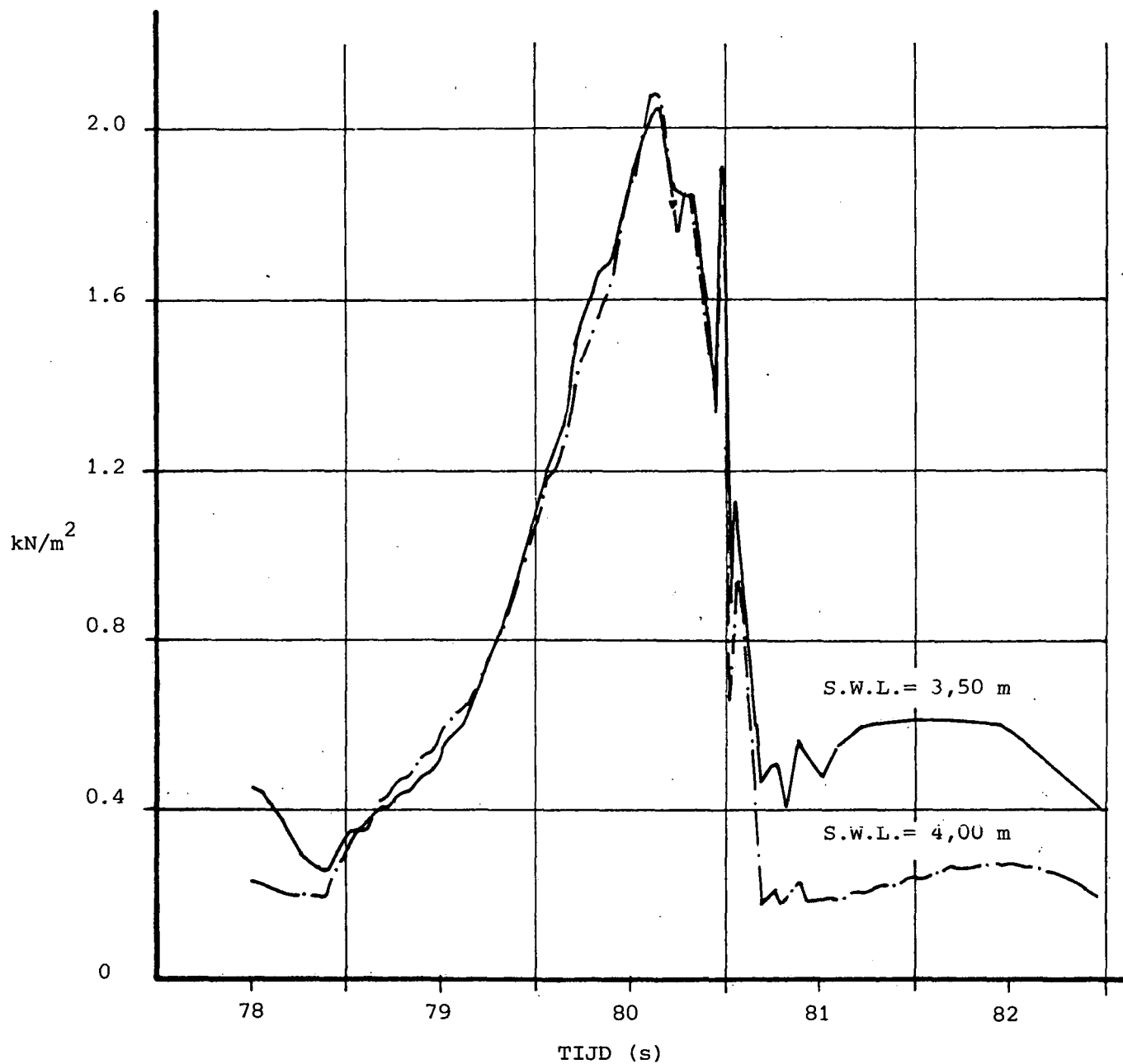


fig. 22: Als fig. 21, maar nu voor het Deltagootmodel. De doorlatendheid van de toplaag is nu 1,4 maal de doorlatendheid in fig. 20.

parameters: $k' = 0,021 \text{ m/s}$

overige zie fig. 19.

5.3 Vergelijking en conclusies

De verschillen tussen de berekende overdrukken bij simulatie van de Scheldegootproeven voor verschillende waterstanden blijken goed overeen te komen met de verschillen in de gevonden schadegolfhoogtes bij het kleinschalig onderzoek t.b.v. de Oesterdam. Voor die waterstand waarbij in het onderzoek de schadegolfhoogte het grootst was, wordt de kleinste overdruk berekend en omgekeerd. Bij de simulatie van het Deltagootonderzoek t.b.v. de Oesterdam bleek de berekende overdruk nog meer afhankelijk van de waterstand dan bij de simulatie van de Scheldegootproeven, dit in tegenstelling tot de metingen.

Uit de resultaten met verhoogde doorlatendheid blijkt dat bij de Deltagootsimulatie de maximale overdruk bijna onafhankelijk is van de waterstand als de doorlatendheid met een factor 1,4 verhoogd is. Bij de simulatie van het Scheldegootonderzoek is echter ook bij een 2 maal vergrootte doorlatendheid de overdruk bij een stilwaterlijn van 3,5 m + N.A.P. in prototype nog duidelijk hoger als bij 4,00 m + N.A.P. Bij deze hogere doorlatendheid en dus kortere λ wordt blijkbaar de invloed van de berm merkbaar. Deze laatste doorlatendheid van de toplaag in de Deltagootsimulatie komt beter overeen met de meetresultaten zoals besproken in hoofdstuk 4, dan de eerst gekozen doorlatendheid. Voor de Scheldegootsimulatie is moeilijk vast te stellen welke doorlatendheden gekozen moeten worden, omdat de doorlatendheid van de toplaag en filterlaag niet bepaald zijn.

De verklaring voor de afhankelijkheid van de overdrukken van de waterstand in de Scheldegoot is als volgt:

- Als de stilwaterlijn gelijk ligt met de bovenkant van de bekleding, zal de freatische lijn in de filterlaag niet hoger worden dan het stilwaterniveau. Tijdens de golfterugloop kan dus maar weinig overdruk opgebouwd worden door de waterstandsverschillen in de filterlaag en op het talud. (Dit wordt wel het mechanisme van quasistationaire verschildrukken genoemd, welke term overigens niet geheel juist is). Zie fig. 24 in vergelijking met fig. 23.

De resulterende maximale overdruk zal in hoofdzaak bepaald worden door dat de golfdruk van de komende golf ook voor de golf uit al onder het talud merkbaar is. Dit wordt wel het mechanisme overdrukken t.g.v. het voorlopen van de waterspanningen genoemd (omdat deze waterspanningen ook zouden optreden in een stationaire situatie met dezelfde hydraulische randvoorwaarde is ook deze term niet geheel juist.) Voor een gemiddelde waterstand van 3,5 m + N.A.P. in prototype zullen beide bovengenoemde mechanismen de overdruk bepalen en zal dus de maximale overdruk hoger zijn. Bij een waterstand van 3 m + N.A.P. blijkt de maximale overdruk op te treden 3 à 4 blokken van de onderkant van de zetting. Dit betekent dat de invloed van het tweede mechanisme minder wordt, als in fig. 23. Uit hoofdstuk 6 blijkt echter dat het eerste mechanisme bij lage waterstanden belangrijker wordt. Het is dus niet bij voorbaat te zeggen of de overdruk hoger of lager zal worden. Uit de berekening blijkt dat afnemende invloed van het tweede mechanisme dominant is. De overdruk wordt dus iets minder. Voor een waterstand van 2,5 m + N.A.P. in prototype geldt bovenstaande redenering voor 3 m + N.A.P. in versterkte mate. Gezien de uitkomst voor 3 m + N.A.P. is dus te verwachten dat de overdruk verder afneemt. Dit blijkt ook uit de berekeningen.

Het Deltagootmodel van de Oesterdam met 0,15 cm dikke blokken is niet gesimuleerd. Dat de verschillen tussen een gemiddelde waterstand van 4,00 m + N.A.P. en 3,50 m + N.A.P. in prototype hier kleiner zijn dan bij 10 cm dikke blokken is eenvoudig in te zien. Uit [6] blijkt dat $\frac{H}{\Delta D}$ voor blokken van 15 cm vergelijkbaar of iets hoger is dan bij blokken van 10 cm. Dit betekent dat de schadegolfhoogte groter is bij blokken van 15 cm. Het punt van maximale overdruk, dat zich meestal bij het golfteruglooppunt bevindt, zal dan ook lager liggen (zie de gestreepte golf in fig. 24). Hierdoor zal bij een waterstand van 4,00 m + N.A.P. in prototype toch een voldoende groot verschil aanwezig zijn tussen de waterstand in de filter laag en op het talud ($\Delta h'$ in fig. 24) voor het opbouwen van overdrukken, dit i.t.t. de situatie bij blokken van 10 cm (Δh in fig. 24). Bij een blokdikte van 15 cm zullen dus bij een waterstand van 4,00 m + N.A.P. beide in de vorige alinea mechanismen de overdruk bepalen evenals bij 3,5 m + N.A.P. De schadegolf zal dus gelijk zijn.

Concluderend kan dus gesteld worden dat met STEENZET ook de invloed van waterstandsvariaties te voorspellen zijn, die niet a priori afgeschat kunnen worden.

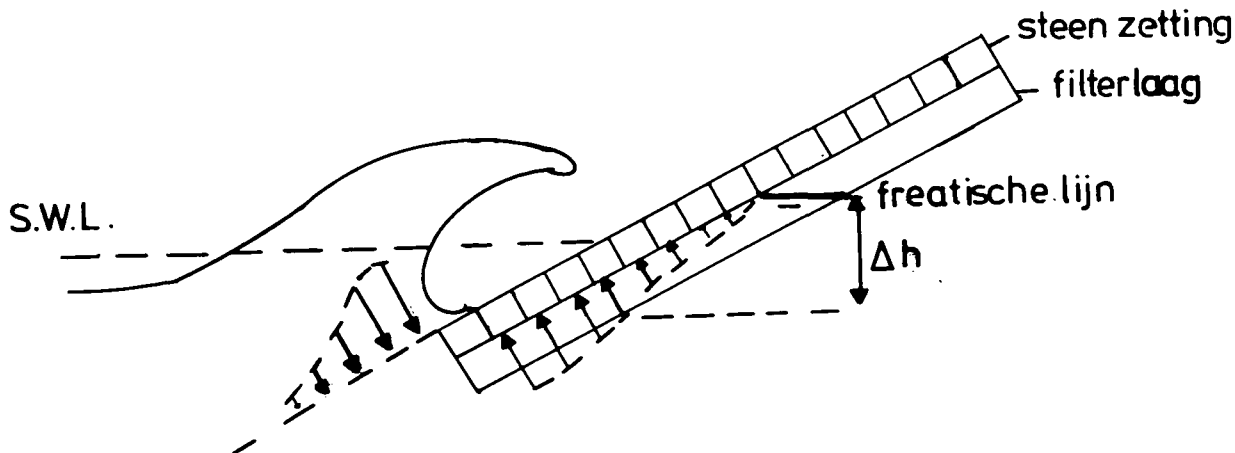


Fig. 23. Schets van overdrukken bij lage waterstand. Hoge golfdrukken van de aankomende golf zijn niet merkbaar in de filterlaag, waardoor lagere overdrukken ontstaan.

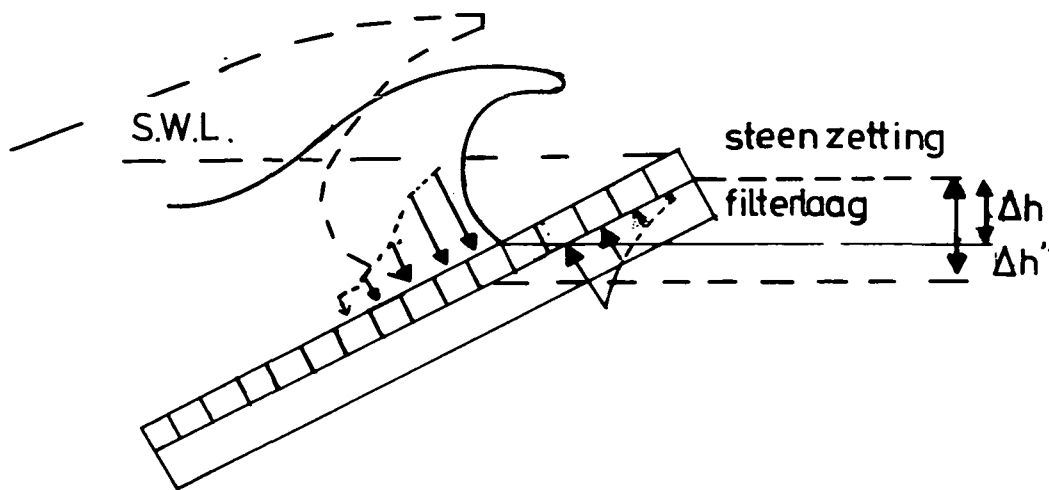


fig. 24. Golfaanval bij hoge waterstand. Nu wel overdrukken door de hoge druk van de aankomende golf in de filterlaag, maar het verschil tussen de freatische lijn in het filter en het golf-teruglooppunt van de golf (Δh) is kleiner. De gestreepte golf geeft de situatie weer voor een hogere schadegolfhogote door b.v. dikkere blokken. Δh is duidelijk toegenomen.

6. Steenzettingen op mijnsteen ondergrond

6.1. Motivatie en berekeningen

Het model van de Oesterdam in de Deltagoot was opgebouwd uit twee secties. In de ene sectie waren de blokken geplaatst op een 10 of 15 cm dikke laag grind (8-23 mm) met daaronder een mijnsteenlaag. In de andere sectie waren de blokken rechtstreeks op een ondergrond van klei geplaatst. In de sectie waar de blokken geplaatst waren op grind ontstonden bij golfaanval grote overdrukken over de zetting, waardoor de zetting bij relatief lage golfhoogtes instabiel werd. In de sectie waar de blokken rechtstreeks op klei geplaatst waren, werden veel kleinere overdrukken over de zetting gemeten en was de zetting ook voor veel grotere golfhoogtes stabiel. De lagere overdrukken die gemeten zijn in de kleisectie worden veroorzaakt door de veel lagere doorlatendheid van klei in vergelijking met grind.

In de praktijk blijkt echter dat aan het gebruik van klei onder steenzetting ook nadelen verbonden zijn. De eisen die aan klei gesteld moeten worden om uitspoeling van de klei te voorkomen, zijn gedeels onbekend. Wel is zeker dat in de praktijk lang niet alle klei aan die eisen voldoet. Mechanische verwerking is moeilijk en de verwerking stelt hoge eisen aan de klimatologische omstandigheden met name de vochtigheid. Nu is het verschil in doorlatendheid tussen klei en grind erg groot. In de Deltadienst is de mogelijkheid geopperd een beter te verwerken materiaal te gebruiken met een kleinere doorlatendheid dan grind maar groter dan klei. Hierbij werd gedacht aan mijnsteen. De doorlatendheid van mijnsteen is sterk afhankelijk van de mate van verdichten bij aanbrengen en de mate waarin de mijnsteen "verweerd" is. De doorlatendheid aan vers aangebrachte niet verdichte mijnsteen is maximaal $\pm 0,05$ m/s. De doorlatendheid van geheel verweerde mijnsteen is 10^{-4} m/s. De gegeven doorlatendheden geven niet meer aan dan een orde van grootte gezien de grote spreiding in materiaaleigenschappen van mijnsteen. Bij een gegeven korrelverdeling en porositeit kan de doorlatendheid overigens m.b.v. [8] berekend worden.

Met behulp van de golfbrandvoorwaarde voor proef T30 is nagegaan wat de invloed is van de doorlatendheid van de onderlaag op de maximale overdrukken.

Met het rekenprogramma is een configuratie nagerekend van 10 cm dikke blokken van 25 x 25 cm op een vlijlaag van 15 cm met een doorlatendheid variërend van 0,05 tot 10^{-4} m/s.

Omdat de grootste doorlatendheid de meest onveilige situatie weergeeft, is hier de grootste aandacht aan besteed. Ook omdat korte tijd na het aanbrengen van mijnsteen deze nog niet verweerd zal zijn. Daarom is doorgerekend een k van 0,05, 0,02 en 0,01 m/s en zijn de resultaten vergeleken met die van het Oesterdamonderzoek waar $k = 0,1$ m/s. Daarnaast is ook de meest gunstige situatie $k = 10^{-4}$ m/s doorgerekend. Aangenomen is, dat zich onder de vlijlaag een geheel ondoorlatende laag bevindt.

De spleetbreedte tussen de stenen is 0,7 mm.

Voor de verschillende waarden van de doorlatendheid is met behulp van de resultaten van de evaluatie berekeningen [9] nagegaan of de aanstroomweerstand naar de spleet van belang is. Hierbij doet zich een moeilijkheid voor: In het rekenprogramma wordt uitgegaan van laminaire stroming. In werkelijkheid zal de stroming naar de spleten turbulent zijn voor $k > 0,01$ m/s. Voor $k < 2 \cdot 10^{-3}$ m/s kan de stroming als laminair beschouwd worden. In het tussenliggende gebied $2 \cdot 10^{-3} < k < 0,01$ is de stroming semi-turbulent (zie ook literatuurstudie filters [8]). In het voor ons meest interessante gebied $k > 0,01$ m/s is de stroming dus turbulent. Voor de bepaling van de aanstroomweerstand moet dus van turbulente stroming uitgegaan worden, terwijl alleen de laminaire doorlatendheid gegeven is. Nu is voor het narekenen van de Oesterdamproeven in de Deltagoot de laminaire doorlatendheid (k_L) bepaald door in de empirisch gevonden doorlatendheid formule $i = 0,25$ in te vullen. Uit hoofdstuk 4.3. is gebleken dat de op die wijze bepaalde k_L resultaten gaf die goed overeenkwamen met de gemeten resultaten. Nu is op dezelfde wijze de turbulente doorlatendheid (k_T) te bepalen uit de gegeven k_L door na te gaan welke k_T bij $i = 0,25$ een zelfde filtersnelheid geeft als de gegeven k_L . Wanneer k_T op deze wijze bepaald is kan met de in het rapport "Evaluatie Berekeningen" afgeleide formule de verhouding tussen de spleetweerstand en de aanstroomweerstand afgeschat worden.

$$\frac{P_r - P_s}{P_s - P_o} = \frac{2}{dk_T} \left(\frac{38,27}{\pi} \right)^2 s \quad 2,45 \quad (21)$$

Met $d = 0,1$ m en $s = 0,7 * 10^{-3}$ m is met deze formule de verhouding tussen de aanstroomweerstand en de spleetweerstand berekend. In die gevallen waarin de aanstroomweerstand niet verwaarloosbaar is, is ook uitgerekend welke spleetbreedte, maar dan zonder aanstroomweerstand (S(red.)), overeenkomt met dezelfde doorlatendheid als een spleet van 0,7 mm, maar dan met aanstroomweerstand. Ook voor de ondergrens is doorlatendheid $k_L = 10^{-4}$ m/s is deze berekening uitgevoerd, maar nu is uitgegaan van de formule voor de aanstroomweerstand voor laminaire stroming. Onder dezelfde aannames als voor turbulente stroming is voor laminaire stroming af te leiden:

$$\frac{P_r - P_s}{P_o - P_s} = \frac{38,27 \ln 10}{d \pi k} s^{1,727} \quad (22)$$

De resultaten van de berekening van de aanstroomweerstand zijn gegeven in onderstaande tabel:

k_L (m/s)	k_T (m/s) ²	$\frac{\Delta p_a}{\Delta p_s}$	s (red.) mm
0,1	$2,5 * 10^{-3}$	0,021	0,7
0,05	$6,25 * 10^{-4}$	0,086	0,7
0,02	10^{-4}	0,54	0,545
0,01	$2,5 * 10^{-5}$	2,1	0,362
10^{-4}	n.v.t.	10	0,175

Tabel 3: Verhouding tussen spleetweerstand en aanstroomweerstand voor spleten van 0,7 mm en verschillende doorlatendheden, plus gereduceerde spleetbreedtes (zie ook tekst).

$$K_1 = q/i \text{ met:}$$

q het specifieke debiet (m/s)

i het verhang ()

$$k_T = q^2/i \quad (\text{m}^2/\text{s}^2)$$

Voor een doorlatendheid $k_L < 0,02$ m/s gaat de aanstroomweerstand een rol spelen en wordt de gereduceerde spleetbreedte snel kleiner.

Met behulp van het ontwikkelde rekenprogramma is voor de waarden van k_L en de gereduceerde spleetbreedte uit tabel 2 de overdruk over de zetting bepaald met de hydraulische randvoorwaarde van proef T30.

De resultaten zijn gegeven in fig. 23 en fig. 26.

Fig. 25 geeft de gemeten golfdruk bij die spleet waar de maximale overdruk optreedt en de berekende waterspanningen min steengewicht bij dezelfde spleet. Wanneer de laatstgenoemde lijn hoger ligt dan de golfdruk is de zetting potentieel instabiel. Nog duidelijker is dit in te zien in fig. 26 waar de waterspanning min de golfdruk minus het steengewicht is uitgezet. Als deze druk positief is, is de zetting potentieel instabiel. De dikte van de steenzetting is in deze figuren 0,1 m.

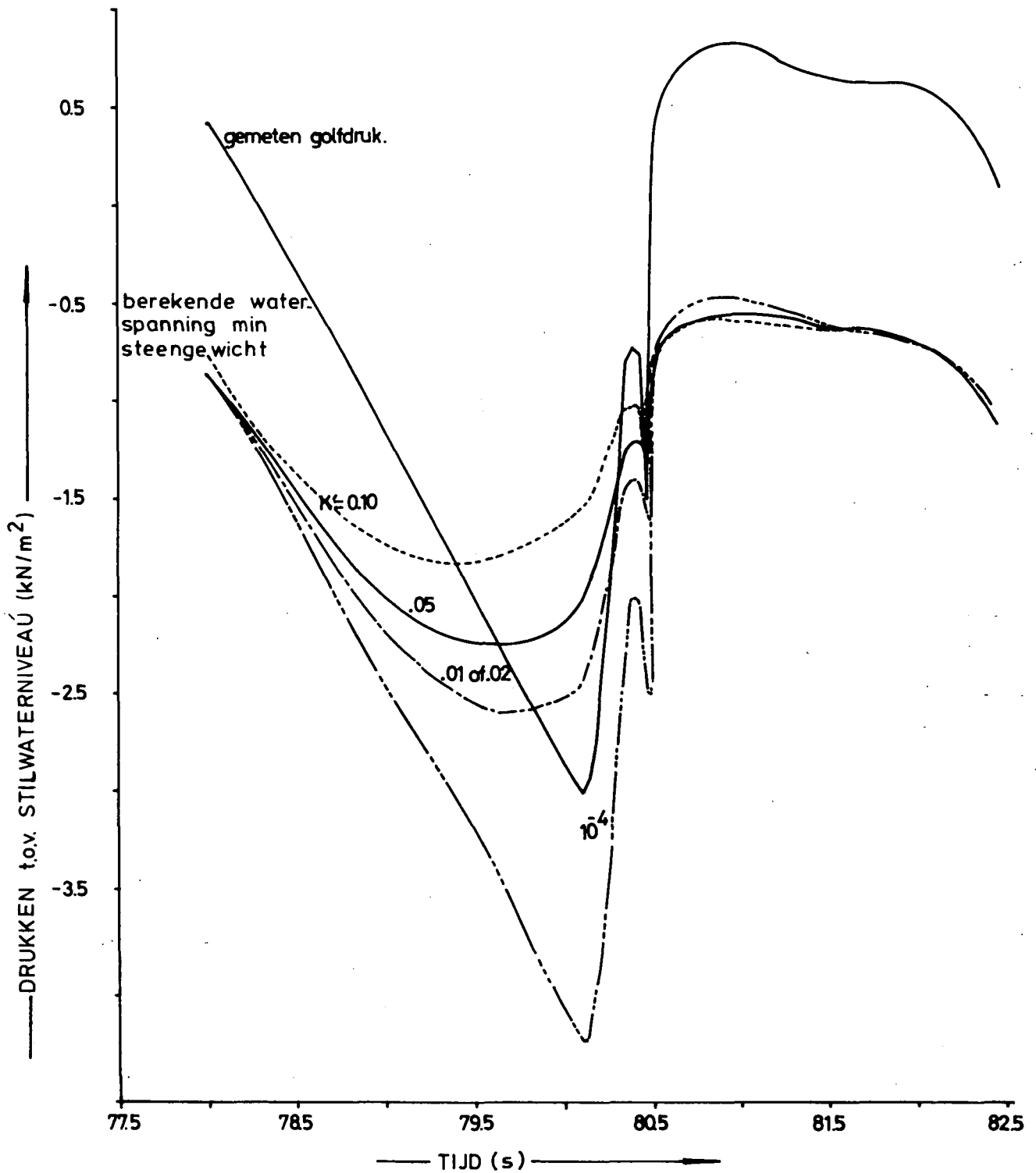


Fig. 25: Gemeten golfdruk en berekende waarden voor de waterspanning min steengewicht voor proef T30 bij verschillende waarden van de doorlatendheid van de onderlaag spleetbreedte is 0,7 mm. Drukken ter plaatse van spleet 9. Zie ook toelichting bij volgende figuur.

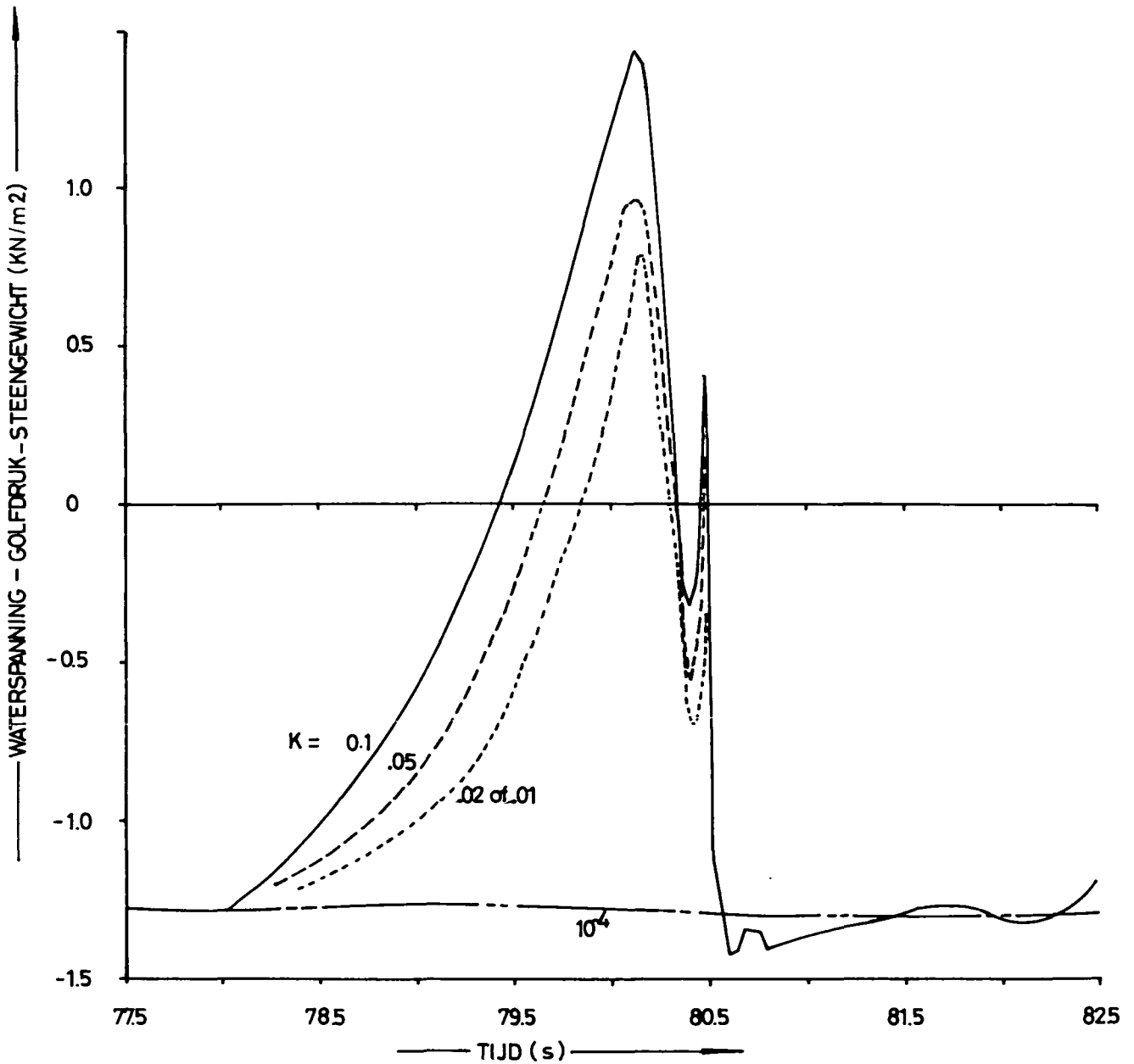


Fig. 26: Proef T30. Waterspanning-golfdruk-steengewicht voor verschillende waarden van de doorlatendheid in de onderlaag, ter plaatse van spleet 9. Voor $k = 10^{-4}$ m/s is ook de aanstroming naar de spleten van de zetting laminair verondersteld, in de andere gevallen is deze turbulent verondersteld.
 $k = 0,1$ m/s is een doorlatendheid representatief voor grind.
 $k = 10^{-4}$ m/s is een doorlatendheid representatief voor zand.
De doorlatendheid van mijnsteen kan zich tussen deze twee uitersten bevinden.

6.2. Conclusies

Uit 19 blijkt dat bij afnemende doorlatendheid de overdrukken eerst afnemen maar dat het resultaat voor $0,01 < k_L < 0,02$ gelijk is. Dit is ook het gebied, zoals blijkt uit tabel 2, waar de aanstroomweerstand dominant wordt.

Het is vrij eenvoudig in te zien dat, als de aanstroomweerstand dominant is, de overdrukken niet meer zullen veranderen. Als dit namelijk het geval is, bepaalt de doorlatendheid van het materiaal van de filterlaag zowel de doorlatendheid van de filterlaag als de stroming door de spleten. De in de analytische berekening gedefinieerde lek lengte:

$$\lambda = \sin \alpha \sqrt{\frac{k b d}{k'}} \quad (23)$$

met:

- k = de doorlatendheid van de vlijlaag
- b = de dikte van de vlijlaag
- d = de dikte van de steenzetting
- k' = de doorlatendheid van de steenzetting

blijft dan ook constant. Volgens de resultaten van de analytische berekening houdt dit in dat ook de overdruk constant is.

Voor $k < 0,01$ m/s kan niet meer zonder meer uitgegaan worden van turbulente stroming.

Ook de in de evaluatie berekeningen gedane aanname dat

$$\left(\frac{P_o - P_s}{d}\right)^{0,387} \approx 1, \text{ met } P_o \text{ de druk aan de buitenkant van de spleet en}$$

P_s de druk aan de filterzijde in de spleetopening, is dan niet meer geldig. Om die reden kan voor het gebied:

$2 \cdot 10^{-3} < k < 0,01$ m/s.

nu nog geen uitspraak gedaan worden en zijn aanvullende studies noodzakelijk. Voor $k = 10^{-4}$ m/s de doorlatendheid van zand is de stroming zeker laminair. De aanstroomweerstand is nu relatief, ten opzichte van de stromingsweerstand van de vlijlaag, veel kleiner. De overdrukken blijken dan ook verwaarloosbaar.

Voor de doorlatendheid van mijnsteen geldt dat hoge eisen aan de korrelgrootte zowel als de verdichting gesteld moeten worden om er zeker van te zijn dat de doorlatendheid kleiner is dan 0,01 m/s.

In vergelijking met de filtersectie van het Oesterdammodel in de Delta-goot blijken de overdrukken voor een vlijlaag van mijnsteen, met een doorlatendheid van 0,01 m/s, 25% lager te zijn. Verdere reductie zou mogelijk zijn door de blokkenglooiing zodanig uit te voeren dat de aanstroomweerstand verwaarloosbaar is. Dit is te verwezelijken door kleinere blokken en/of per blok meerdere gaten aan te brengen.

7. Ontwerpgrafieken

Het ontwikkelde rekenprogramma is ook gebruikt voor het vervaardigen van een serie ontwerpgrafieken. In deze grafieken wordt, voor verschillende golfhoogtes, de overdruk gegeven als functie van de parameter $\sqrt{\frac{k'}{b d k}}$. Voor deze ontwerpgrafieken is uitgegaan van een talud wat zich uitstrekt van N.A.P. tot voldoende ver boven N.A.P., zodat de gehele golf op het talud komt. De overdrukken zijn berekend bij een waterstand van 3 en 5 m + N.A.P. Als randvoorwaarde is een sinusvormig variërende horizontale waterstand gebruikt, omdat een algemene beschrijving van de hydraulische randvoorwaarde nog niet beschikbaar is. Dit laatste maakt de toepasbaarheid van deze grafieken voorlopig nog onzeker. Wel is uit het tot nu toe uitgevoerde onderzoek naar voren gekomen dat voor het voorspellen van de maximale overdruk met deze ontwerpgrafieken de beschrijving van de hydraulische randvoorwaarde niet al te ingewikkeld hoeft te zijn. Hiervoor zijn de volgende argumenten:

- uit fig. 4 bleek dat de maximale overdruk bijna onafhankelijk is van de freatische lijn in het filter. Deze freatische lijn is afhankelijk van de voorgaande golven. Het feit dat de maximale overdruk onafhankelijk is van de hoogte van de freatische lijn, geeft aan dat voor de overdruk de momentane randvoorwaarde veruit het belangrijkste is en wel op het punt waar de buitenwaterstand minimaal is.
De voorgaande golven behoeven voor een algemene randvoorwaarde voor dit probleem dan ook niet in beschouwing genomen te worden.
- De evaluatie van het Oesterdamonderzoek in de Deltagoot heeft eveneens aangetoond dat een enkele diepe set-down aanleiding geeft tot schade en dat de invloed van voorgaande golven gering is [4].
- Voor drie proeven met regelmatige golven bleek het moment van bewegen van de zetting bij dezelfde afstand tussen de maximale set-down (H_d) en gemiddelde waterstand (H_{gem}) plaats te vinden, zie tabel 3. Wegens het ontbreken van een goede golf terugloop meting tijdens deze proeven is H_d bepaald aan de hand van de drukopnemers op het talud.

Daar het hoogteverschil tussen deze drukopnemers minimaal 6 cm was is deze meting niet erg betrouwbaar. Het exact gelijk zijn van $H_{gem} - H_d$ in tabel 3 moet dan ook als toeval beschouwd worden.

proefnr.	golfperiode	H_{gem}	H_d (m)	$H_{gem} - H_d$ (m)
T41	2,10	1,75	1,54	0,21
T27	4,25	2,00	1,79	0,21
T44	6,00	1,75	1,54	0,21

Tabel 4: Resultaten van Oesterdamproeven waarbij begin van beweging gesignaleerd is.

Door $H_{gem} - H_d$ als halve golfhoogte te beschouwen is onderzocht in hoeverre dit resultaat overeenkwam met de analytische oplossing [1]. De verschillen in de op deze wijze gemeten en berekende golfhoogtes bleken vrij groot. De op bovenstaande wijze gemeten golfhoogte is dus 42 cm. De met de analytische oplossing berekende golfhoogte bleek ± 60 cm. te zijn. Nu is dit grote verschil tussen de gemeten en berekende golfhoogte ten dele te verklaren uit het feit dat voor de parameters van het Oesterdam model, bij de golfhoogte waarbij begin van beweging optreed, de met het analytisch model berekende overdruk vrij ongevoelig is voor de golfhoogte. Door b.v. de doorlatendheid van de zetting (de spleetbreedte) aan te passen is veel sneller overeenstemming tussen de gemeten en berekende drukkken mogelijk. De werkelijk gemeten spleetbreedte is 0,7 mm. Overeenstemming tussen de meting en de analytische oplossing is er bij een spleetbreedte van 0,55 mm.

Bovenstaande resultaten geven goede hoop dat met de resultaten van het onlangs uitgevoerde kleinschalig onderzoek, waarbij de set-down van de golven wel nauwkeurig geregistreerd is, de gemeten hydraulische randvoorwaarde vrij eenvoudig geschematiseerd kan worden, tot een formule die dezelfde maximale overdruk geeft. Zoals blijkt uit hoofdstuk 5 zal echter bij deze schematisatie ook rekening gehouden moeten worden met de golfdrukken van de volgende golf.

Uit tabel 3 blijkt dat voor een relatief ondoorlatende zetting op een doorlatend filter mogelijk een goede beschrijving van het set-down punt reeds voldoende is.

Voorlopig echter presenteren de grafieken eerder de stand van het onderzoek dan dat zij de basis vormen voor een doordacht ontwerp.

Wanneer we de resultaten van de ontwerpgrafieken bezien valt op:

- a. Voor zeer kleine waarden van $\sqrt{\frac{k'}{b d k}}$ blijken overdrukken mogelijk die groter zijn dan de halve golfhoogte. Dit omdat ook in de limiet $\sqrt{\frac{k'}{b d k}} \rightarrow 0$ de freatische lijn in het filter hoger ligt dan de gemiddelde waterstand.
- b. Voor kleine waarden van $\sqrt{\frac{k'}{b d k}}$ is de maximale overdruk bij een gemiddelde waterstand van 3 m + N.A.P. hoger dan bij een gemiddelde waterstand van 5 m + N.A.P. Een hogere maximale overdruk bij een lagere waterstand is ook gevonden in het Scheldegootonderzoek en bij de ELNAG-metingen [10] en [2].

Deze beide verschijnselen blijken verband te houden met de aanname dat de zetting zich uitstrekt tot N.A.P. In Appendix C wordt dit verder uitgewerkt.

Voor grotere waarden van $\sqrt{\frac{k'}{b d k}}$ is de overdruk voor een gemiddelde waterstand van 3 m soms lager dan bij een gemiddelde waterstand van 5 m. Dit wordt veroorzaakt door de numerieke rekenmethode, die de druk alleen ter plaatse van de spleten berekent.

Uit de figuren blijkt dat voor grote waarden van $\sqrt{\frac{k'}{b d k}}$ de maximale overdruk bijna onafhankelijk geworden is van de golfhoogte. Voor waarden van $\sqrt{\frac{k'}{b d k}}$ die buiten de grafieken vallen, is voor golfhoogtes groter dan 0,5 m een goede schatting van de overdruk:

$$\Delta\phi = 1/2 \sin \alpha \sqrt{\frac{b d k}{k'}} \quad (24)$$

met α de helling van het talud.

In deze schatting blijkt de overdruk dus geheel onafhankelijk van de golfhoogte.

Bij gebruik van deze grafieken moet men er ook rekening mee houden dat in de grafieken, zoals ze nu gepresenteerd zijn, de in evaluatie berekeningen[9] behandelde aanstroomweerstand door het filter naar de stenen niet verdisconteerd is. De grafieken zijn geldig als de doorlatendheid gelijkmatig over de toplaag verdeeld is. Als de doorlatendheid slechts in een paar punten van de toplaag geconcentreerd is, moet met veel hogere overdrukken rekening worden gehouden. De doorlatendheid van de toplaag kan dan afgeschat worden zoals in hoofdstuk 5 gedaan is.

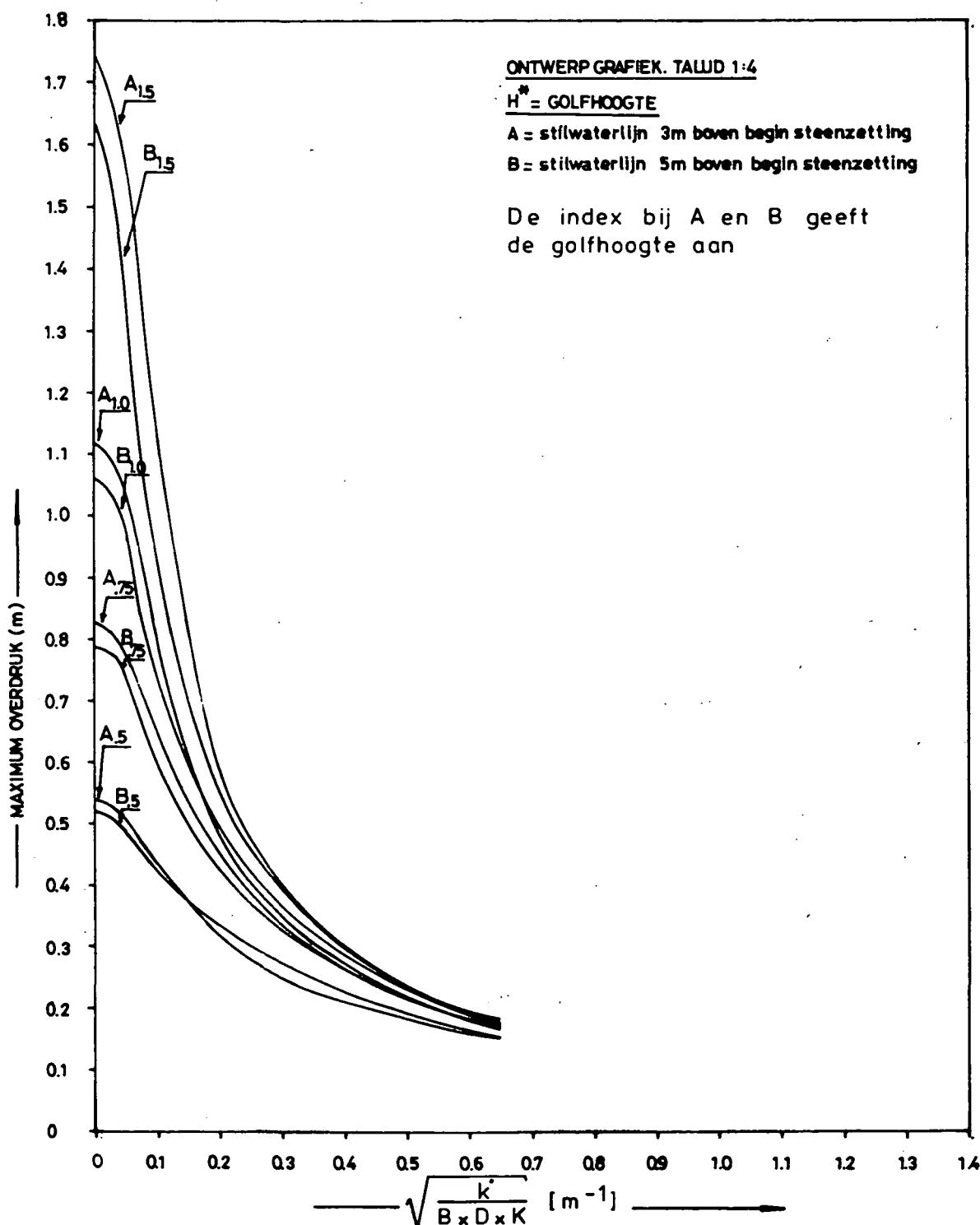


fig. 27: Ontwerpgrafiek voor talud 1 : 4. Maximaal optredende overdruk voor verschillende waterstanden en golfhoogtes tegen $\sqrt{\frac{k'}{k b d}}$ met

k' = doorlatendheid steenzetting

k = doorlatendheid filterlaag

b = dikte filterlaag

d = dikte steenzetting.

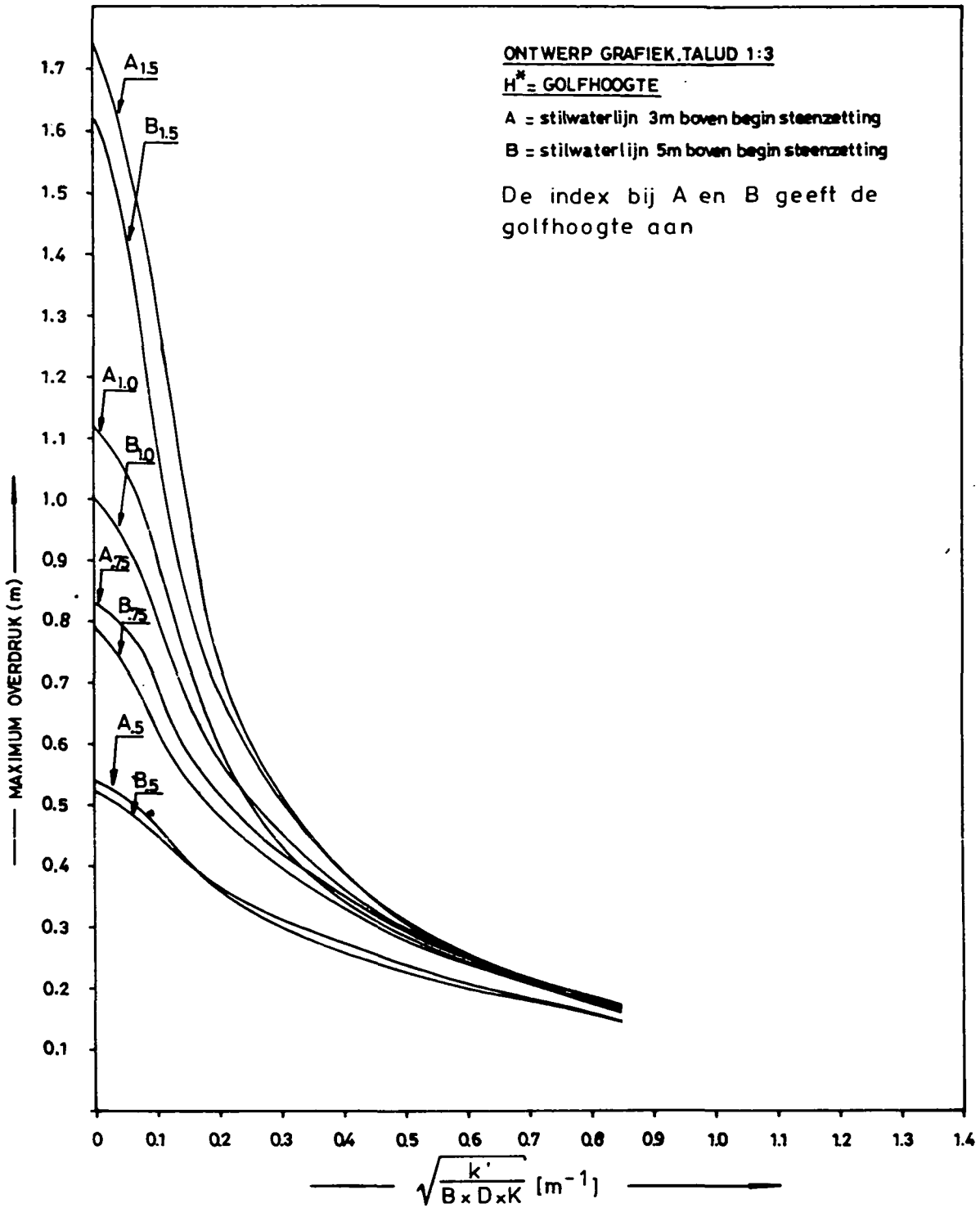


fig. 28: Ontwerpgrafiek voor talud 1 : 3. Maximaal optredende overdruk voor verschillende waterstanden en golfhoogtes tegen $\sqrt{\frac{k'}{k b d}}$ met

k' = doorlatendheid steenzetting

k = doorlatendheid filterlaag

b = dikte filterlaag

d = dikte steenzetting.

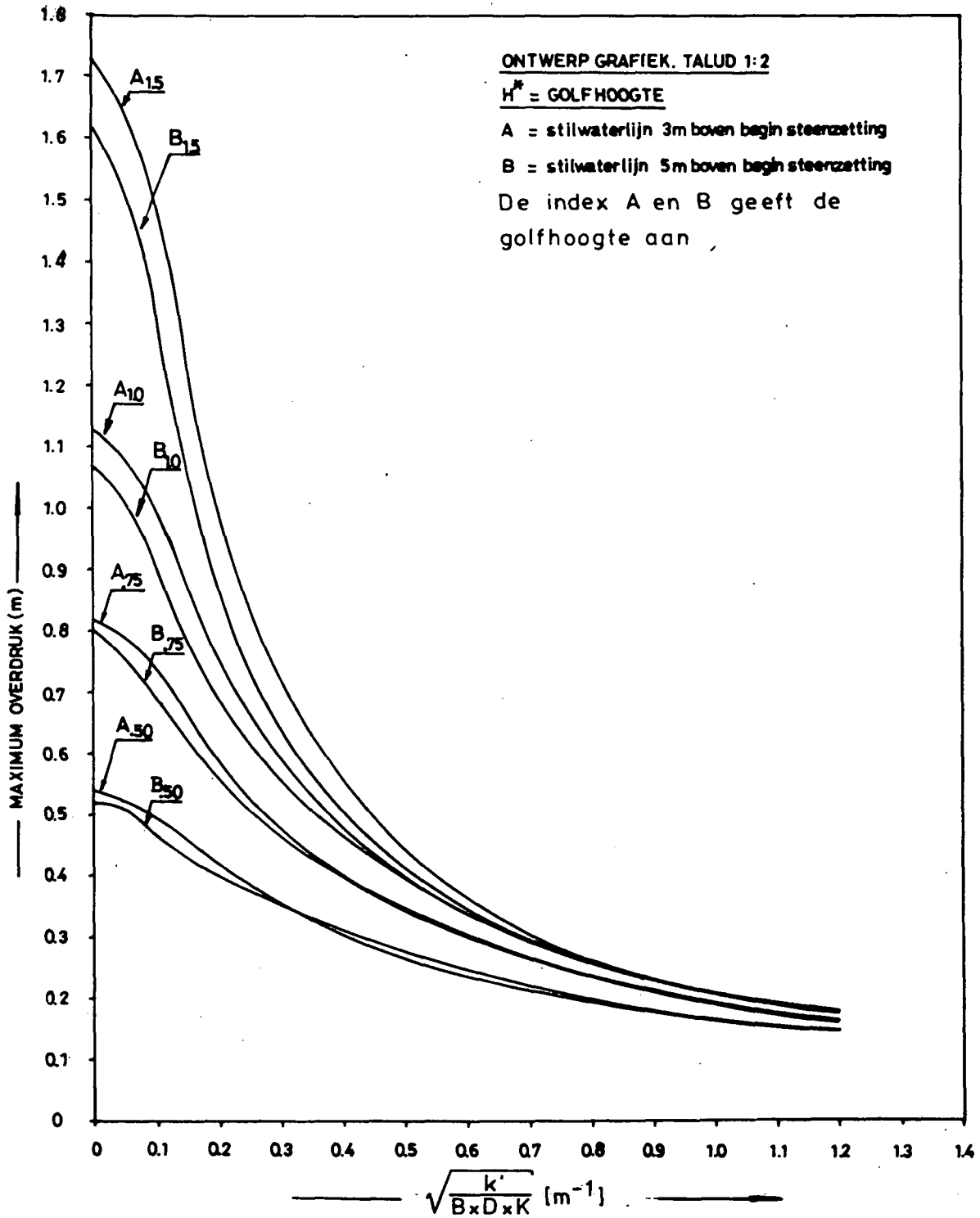


fig 29: Ontwerpgrafiek voor talud 1 : 2 Maximaal optredende overdruk

voor verschillende waterstanden en golfhoogtes tegen $\sqrt{\frac{k'}{k b d}}$
met

k' = doorlatendheid steenzetting

k = doorlatendheid filterlaag

b = dikte filterlaag

d = dikte steenzetting.

8. Conclusies

Met het ontwikkelde computerprogramma kunnen de waterspanningen onder een blokkenglooiing goed gesimuleerd worden. Tenminste als de blokken geplaatst zijn op een filterlaag met onder de filterlaag relatief ondoorlatend materiaal.

Met dit programma kan snel nagegaan worden wat de invloed is van het wijzigen van één of meer parameters in een ontworpen taludbekleding. De onzekerheid over wat precies de invloed is van de aanstroomweerstand op de doorlatendheid van de zetting maakt het echter in dit stadium alleen mogelijk definitieve uitspraken te doen, als de, met behulp van de in Evaluatie Berekeningen [9] gegeven formules, afgeschatte aanstroomweerstand verwaarloosbaar is t.o.v. de spleetweerstand, zoals blijkt uit hoofdstuk 5.

In hoofdstuk 7 is aangetoond dat het programma geschikt is voor het maken van ontwerpgrafieken voor uiteenlopende situaties. Behalve de genoemde onzekerheid over de invloed van de aanstroomweerstand, is hierbij nog het probleem dat er geen algemene beschrijving is van de hydraulische randvoorwaarde op het talud. In hoofdstuk 7 is echter ook aangegeven dat dit geen onoverkomelijk probleem behoeft te zijn als goede set-down metingen ter beschikking komen.

Met de ontwikkeling van dit programma is een stuk gereedschap ter beschikking gekomen wat aangeeft welke overdrukken onder een blokkenglooiing te verwachten zijn, bij gegeven golfaanval en geometrie. Ook bij die constructies die, b.v. door afwijkende geometrie niet met een ontwerpgrafiek te ontwerpen zijn.

Referenties

- [1] Sellmeijer, J.B.
Overdrukken op steenzetting door drukhoogte golven.
- [2] Burg van der, J.C., Nagtegaal, G.J.
ELNAG-metingen van golfdemping in een grindlaag onder een betonblokkenglooïng op een talud.
- [3] Bezuijen, A.
Aanvulling bij rapport "overdrukken op steenzetting door drukhoogte golven" en vergelijking met ELNAG-resultaten en methode v.d. Veer.

Bovenstaande referenties uit:

Taludbekleding van gezette steen, fase 0.

Oriënterende grondmechanische studies.

M 1795, deel IV WL, CO-255780/45 LGM, juli 1982.

- [4] Taludbekleding van gezetten steen fase 2.
Evaluatie Oesterdam onderzoek (hydraulische aspecten).
M 1795, deel VIII WL, CO-258901 LGM, 1983.
- [5] Burg van der, J.C.
Analogonmetingen op Teledeltos papier (niet gepubliceerd).
- [6] Grootschalig onderzoek ten behoeve van de Oesterdam (meetverslag band A).
Taludbekleding van gezette steen, fase 1
M 1795, deel VI WL, CO-258840/7 LGM, juli 1982.
- [7] Taludbekleding van gezette steen fase 2.
Doorlatendheidsbepaling Oesterdam model Deltagoot.
M 1795/1881, deel VI WL, CO-258901/118 LGM
- [8] Adel den, H.
Literatuurstudie filters
CO-258901/88 LGM, februari 1983

- [9] Bezuijen, A.
Evaluatie-berekeningen
CO-258901/147, LGM, oktober 1983
- [10] Kleinschalig onderzoek ten behoeve van de Oesterdam (meetverslag)
Taludbekleding van gezette steen fase 0
M 1795 deel V WL, CO-258840/9 LGM, juli 1982.
- [11] Hydraulische aspecten, verslag literatuurstudie
Taludbekleding van gezette steen fase 0
M 1795 deel II WL, CO 255780/43 LGM, juli 1982.

Appendix A

Verklaring voor het verschil tussen de gevonden waarden voor $\frac{\Delta\phi}{A}$ in de berekening van Sellmeijer en de ELNAG-meting.

De hoofdoorzaak, waardoor verschil ontstaat in de berekende waarden van $\frac{\Delta\phi}{A}$ bij beide berekeningen (resp. [1] en [2]), is een andere wijze van invoeren van de doorlatendheid voor schuin talud.

Dit kan duidelijk gemaakt worden met behulp van fig. A1.

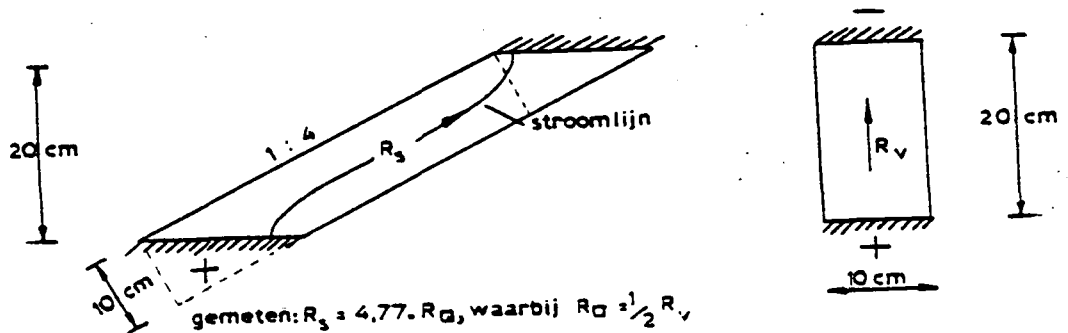


Fig. A1: Bepaling van de doorlatendheid in de ELNAG-berekening voor schuin talud. Gestippeld is aangegeven wat het equivalent hiervan is in de berekening van Sellmeijer en in dit computerprogramma.

Dit is dezelfde figuur als fig. 3 in het rapport over de ELNAG-metingen [2] (met uitzondering van de gestippelde lijnen).

In dat rapport wordt met deze figuur aangegeven hoe de doorlatendheid bij schuin talud berekend is. Met teledeltos papier werd de vorm van fig. A1 gemaakt.

Van deze vorm werd de weerstand gemeten door de gearceerde gebieden goed geleidend te maken t.o.v. de rest van het papier en dan de weerstand over die gebieden te meten. Gevonden werd, dat de op deze wijze gemeten weerstand 4,77 x de weerstand van een vierkant stukje materiaal is (R_p).

In de berekening van Sellmeijer wordt alleen bij de afstroming van de freatische lijn uitgegaan van horizontale afstroming, waarvoor een zogenaamde inspeelverschuiving afgeleid is, die echter verderop in de berekening verwaarloosd wordt. Voor het overige wordt er van uitgegaan dat de stroomlijnen in het filter evenwijdig zijn aan het talud. De weerstand in het filter is met deze aanname ook met teledeltos papier te bepalen. Dit zou dan de vorm van de gestippelde rechthoek moeten hebben.

Uit de afmetingen is eenvoudig te leiden dat dan voor de filter weerstand geldt:

$$R_s = 8 * R_p$$

Wanneer in de berekening van Sellmeijer en de ELNAG-metingen uitgegaan wordt van dezelfde R_p , dus dezelfde doorlatendheidscoëfficiënt voor het filter, dan is de filterweerstand in de berekening van Sellmeijer $8/4,77 = 1,68$ x die gebruikt is in de ELNAG-metingen.

Om de resultaten van ELNAG en Sellmeijer te kunnen vergelijken, moet het resultaat van Sellmeijer vergeleken worden met het resultaat van ELNAG voor een R_p die 1,68 maal de R_p is in de berekening van Sellmeijer is.

De resultaten voor $\frac{\Delta\phi}{A}$ in de berekening van Sellmeijer moeten vergelijkbaar zijn met de resultaten van de ELNAG metingen, door de resultaten van Sellmeijer te vergelijken met die van ELNAG met een doorlatendheidscoëfficiënt die 0,6 maal zo groot is.

In fig. A2 zijn de resultaten van de ELNAG-metingen aan de hand van bovenstaande gecorrigeerd. De overeenkomst met de berekening van Sellmeijer is dan heel bevredigend.

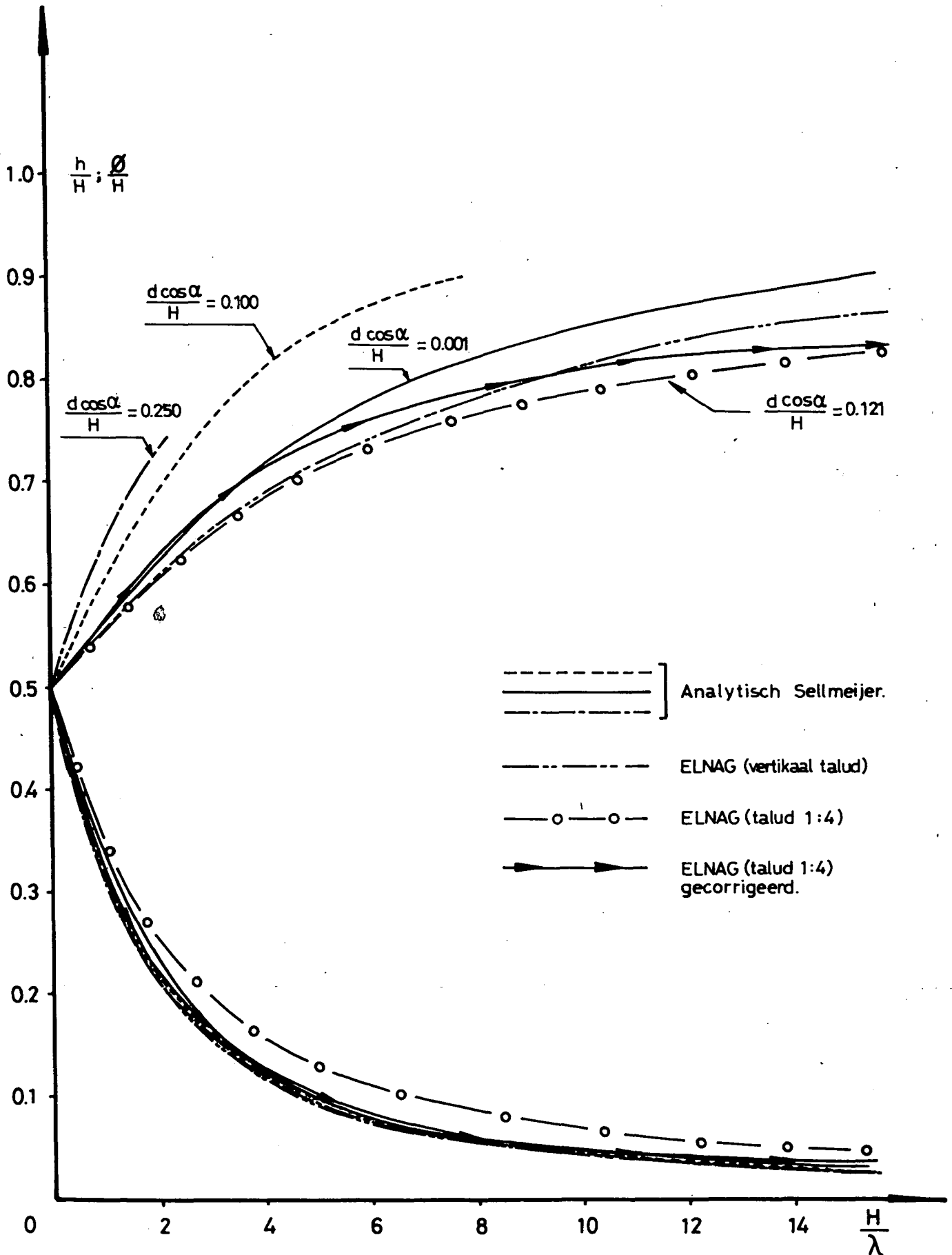


Fig. A2. Overeenkomst tussen de ELNAG-metingen en de berekening van Sellmeijer na correctie voor het op verschillende wijze invoeren van de doorlatendheid.

Appendix B

Berekening doorlatendheid spleet bij overgang taludhelling van 1 : 4 naar 1 : 20.

Daar waar het talud overgaat van een helling 1 : 4 naar een helling 1 : 20 heeft de spleet tussen de blokken de vorm zoals weergegeven in fig. B1.

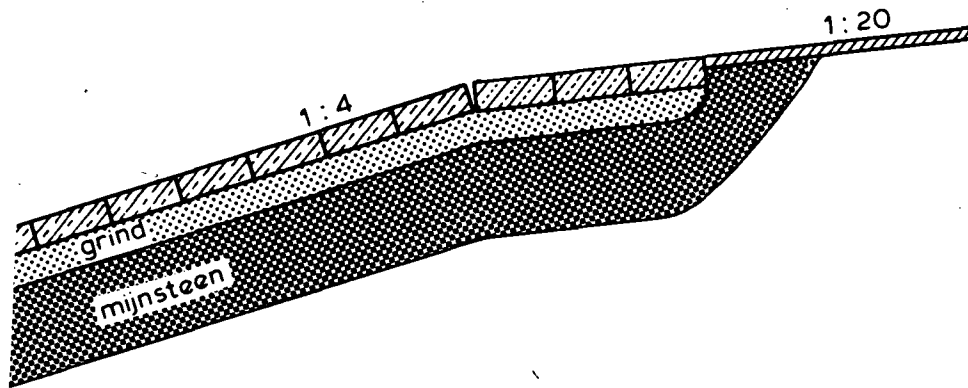


Fig. B1: Vorm van de spleet tussen de blokken bij de overgang 1 : 4 naar 1 : 20 in taludhelling.

In het onderzoek doorlatendheid steenzetting is voor het debiet door de spleet afgeleid:

$$Q_s = A_s * 38,27 * s^{0,727} * i^{0,643} \quad (B1)$$

waarin:

Q_s = debiet door de spleet in $[m^3/s]$

A_s = het doorstroomde spleet oppervlak $[m^2]$

s = spleetbreedte in $[m]$

i = verhang

De index "s" duidt op "spleet". Nu moet over de gehele spleet het debiet constant zijn.

Wanneer we stellen:

D_o = de spleetbreedte bij de onderkant van de blokken

D_b = de spleetbreedte bij de bovenkant van de blokken

d = de dikte van de blokken

kunnen we definiëren:

$$a = \frac{D_b - D_o}{d}$$

en zal de spleetbreedte ter plaatse x (zie fig. C1) gegeven worden door:

$$s = D_o + ax$$

Het doorstroomde spleet-oppervlak wordt eveneens bepaald door de spleetbreedte dus

$$A_s = (D_o + ax) l$$

waarin:

l = de lengte van de spleet aangeeft.

Formule B1 is nu te schrijven als:

$$Q_s = 38,27 \cdot l (D_o + ax)^{1,727} \cdot i^{0,693}$$

De verdere berekening wordt inzichtelijker als we lettersymbolen invoeren dus stellen we:

$$A_o = 38,27$$

$$c = 1,727$$

$$d = 0,693$$

Voor Q_s kunnen we nu schrijven:

$$Q_s = A_o l (D_o + ax) \cdot i^d$$

of:

$$i = \left(\frac{Q_s}{A_o l} \right)^{\frac{1}{d}} \cdot \left(\frac{1}{D_o + ax} \right)^{c/d} \quad (B3)$$

Het totale potentiaal verschil tussen de boven en onderkant van het talud ($\phi_b - \phi_o$) wordt gegeven door:

$$\phi_b - \phi_o = \int_0^{x_o} i \, dx$$

Invullen geeft:

$$\phi_b - \phi_o = \left(\frac{Q_s}{A_o l} \right)^{1/d} \int_0^{x_o} \left(\frac{1}{D_o + ax} \right)^{c/d} dx \quad (B4)$$

waaruit volgt:

$$\phi_b - \phi_o = \left(\frac{Q_s}{A_o l} \right)^{1/d} \left[\frac{(D_o + a x_o)^{1 - c/d} - D_o^{1 - c/d}}{(1 - c/d) a} \right] \quad (B5)$$

Voor Q_s kunnen we dus schrijven:

$$Q_s = a.l. (\phi_b - \phi_o)^d \left[\frac{(1 - c/d) a}{(D_o + a x_o)^{1 - c/d} - D_o^{1 - c/d}} \right] \quad (B6)$$

Voor een spleet met konstante breedte geldt formule B1.

Nu met:

$$A_s = D_o . l$$

dus geldt voor een spleet met konstante breedte:

$$Q_s = A_s l \left(\frac{\phi_b - \phi_o}{x_o} \right)^d D_o^c \quad (B7)$$

De verhouding tussen de doorlatendheden van enerzijds de spleet met constante breedte en anderzijds de spleet met variërende breedte is gelijk aan de verhouding tussen de debieten bij constant potentiaal verschil. Wanneer we de doorlatendheid en het debiet van de spleet met constante breedte aangeven met een index "s" en voor de spleet op knik in het talud met in index "k", volgt uit de tot nu toe afgeleide formules:

$$\frac{k_k}{k_s} = \frac{Q_k}{Q_s} = \frac{x_o^d}{D_o^c} \left[\frac{(1 - c/d) a}{(D_o + a x_o)^{1 - c/d} - D_o^{1 - c/d}} \right]^d \quad (B8)$$

Invullen van de getallen met $D_o = 0,7 \cdot 10^{-3} \text{ m}$ $a = 2 \cdot 10^{-3}$ en $x_o = 0,1 \text{ m}$ geeft:

$$k_k = 3,0 k_s$$

Deze waarde is dan ook in het computerprogramma ingevoerd. Omdat het resultaat afhankelijk is van D_o , zou voor een andere spleetbreedte een andere faktor ingevoerd moeten worden. Deze afwijking is echter verwaarloosd.

Appendix C

Freatische lijn en overdrukken bij relatief ondoorlatende zettingen van eindige lengte.

a. Bepaling ligging freatische lijn in het filter

Eerst wordt de ligging van de freatische lijn bepaald voor een vertikaal talud. In deze berekening wordt er van uitgegaan dat de zetting zo ondoorlatend is, dat de drukhoogte overal in het filter constant is en gelijk aan de hoogte van de freatische lijn h . Met andere woorden: Het verhang in het filter is verwaarloosbaar. Voor een stationaire situatie moet nu gelden: De drukhoogte aan de filterzijde maal het oppervlak van de zetting waardoor water uit het filter kan stromen is gelijk aan de gemiddelde drukhoogte van de vrije waterspiegel maal het gemiddeld oppervlak van de zetting waardoor water naar binnen kan stromen.

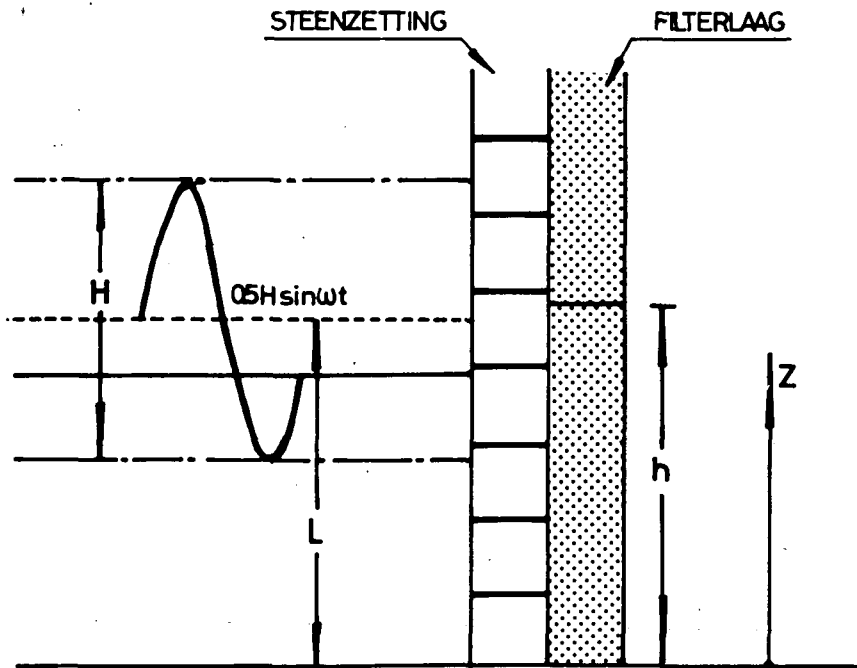


Fig. C1: Bepaling van de hoogte van de freatische lijn voor een eindig vertikaal ondoorlatend talud.

Met behulp van fig. C1 kan met bovenstaande worden afgeleid:

$$\begin{aligned} h^2 &= \frac{1}{T} \int_0^T (L + 0,5 H \sin \omega t) (L + 0,5 H \sin \omega t) dt \\ &= \frac{1}{T} \int_0^T (L^2 + \frac{H^2}{4} \sin^2 \omega t + 2LH \sin \omega t) dt \end{aligned} \quad (C1)$$

T: de periode van de golf

w: de cirkelfrequentie van de golf ($\omega t = 2\pi$).

$$h^2 = L^2 + 1/8 H^2 \quad (C2)$$

De freatische lijn ligt dus boven de gemiddelde waterstand (L). De berekening voor een talud onder een helling α verloopt analoog. De berekening is alleen wat ingewikkelder, omdat nu ook de insijpeling door de spleten boven de momentane, maar onder de maximale waterstand in rekening gebracht moet worden. Daarom bleek het in dit geval eenvoudiger de berekening te maken uitgaande van de druk in plaats van de drukhoogte. Dan moet nu gelden dat aan weerszijden van de steenzetting de druk maal het in-respectievelijk uitstromend oppervlak gemiddeld genomen over een golfperiode aan elkaar gelijk is. Met behulp van fig. C2 is voor dit geval af te leiden:

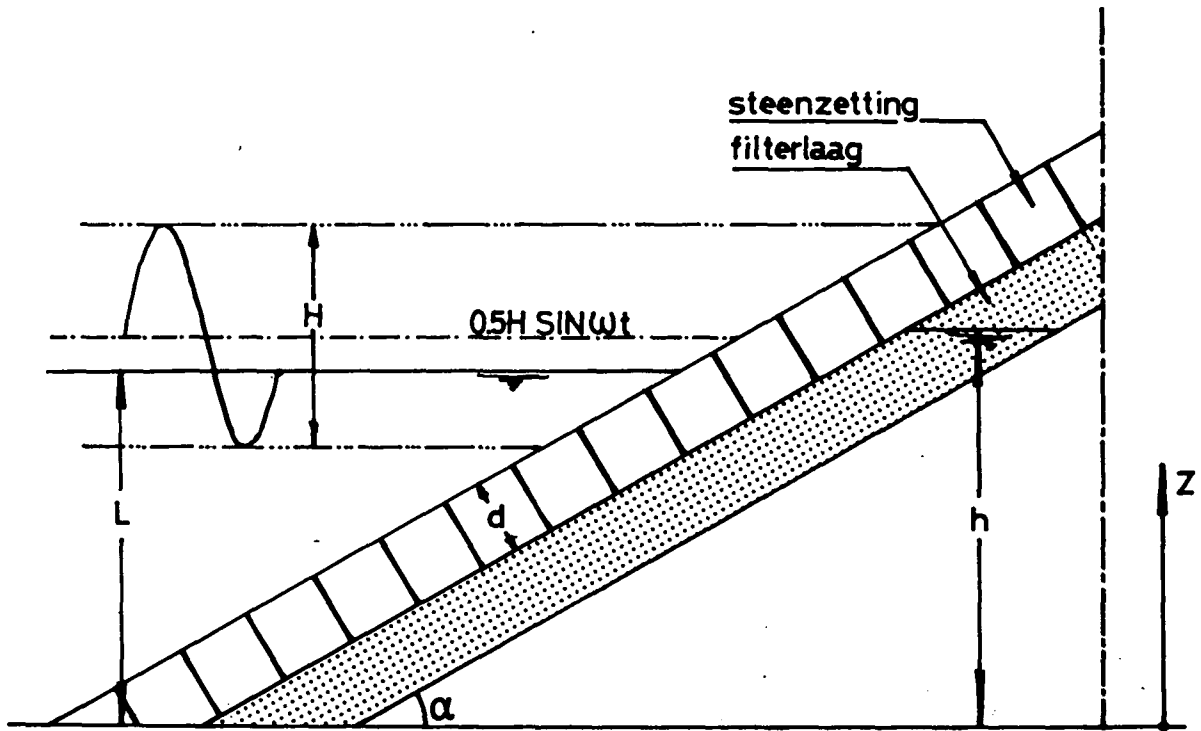


Fig. C2: Als fig. C1 maar nu talud onderhelling.

$$\frac{1}{T} \int_0^T \int_0^h (h-z) dz dt = \frac{1}{T} \int_0^T \left[\int_0^{L+0,5H-d \cos \alpha} (L+0,5H \sin \omega t - z) dz + \int_0^d d \cos \alpha dz \right] dt \quad (C3)$$

met $c = L + 0,5 H - d \cos \alpha$

Uitwerken geeft:

$$h^2 = L^2 + \frac{1}{8} H^2 - d^2 \cos^2 \alpha + Hd \cos \alpha$$

Ook hier blijkt de freatische lijn in het filter hoger te liggen dan de gemiddelde waterstand aan de buitenzijde van het filter. Zoals te verwachten is, is de verhoging groter dan in het geval het talud verticaal verondersteld wordt, want $H > d \cos \alpha$.

b. Bepaling overdrukken

Voor de ondoorlatende zettingen zoals in a behandeld, is de drukhoogte in het filter overal gelijk aan de hoogte (h) van de freatische lijn. De maximale overdruk is dus eenvoudig de hoogte van de freatische lijn min de minimale buitenwaterstand.

$$\Delta\phi = h - (L - 0,5 H) \quad (C4)$$

Voor een talud onder een helling α geldt dus:

$$\Delta\phi = \sqrt{L^2 + \frac{1}{8} H^2 - d^2 \cos^2 \alpha + Hd \cos \alpha} - L + 0,5 H \quad (C5)$$

Deze formule is gebruikt voor de berekening van $\Delta\phi$ voor kleine waarden van $\sqrt{\frac{k'}{b d k}}$. De overeenkomst met de via STEENZET gevonden waarden was goed. Het relatieve verschil tussen de beide uitkomsten was maximaal 2%. Om de invloed van L op $\Delta\phi$ te bepalen, herschrijven we de formule voor $\Delta\phi$:

$$\Delta\phi = L \left[\sqrt{1 + \frac{H^2}{8L^2} - \frac{d^2 \cos^2 \alpha}{L^2} + \frac{Hd \cos \alpha}{L^2}} - 1 \right] + 0,5 H \quad (C6)$$

Voor $L > H > 3d \cos \alpha$ geldt dat de termen onder het wortelteken rechts van de 1 klein zijn t.o.v. 1. Voor de wortel kan dus bij benadering geschreven worden:

$$1 + \frac{H^2}{16L^2} - \frac{d^2 \cos^2 \alpha}{2L^2} + \frac{Hd \cos \alpha}{2L^2}$$

en dus voor $\Delta\phi$:

$$\Delta\phi \approx \frac{H^2}{16L^2} - \frac{d^2 \cos^2 \alpha}{2L^2} + \frac{Hd \cos \alpha}{2L^2} + 0,5 H \quad (C7)$$

In de limiet $L \rightarrow \infty$ geldt dus:

$$\Delta\phi = 0,5 H \text{ of } \frac{\Delta\phi}{H} = 0,5$$

wat ook het resultaat is van de analytische oplossing. Omdat $H > d \cos \alpha$, is voor eindige waarden van L , $\Delta\phi > 0,5 H$ en $\Delta\phi$ groter naarmate L kleiner is. Voor $L = 3$ m zijn dus grotere overdrukken te verwachten dan voor $L = 5$ m. Dit komt overeen met de getoonde ontwerpgrafieken.

Appendix D

In deze appendix wordt een listing gegeven van sommige programma onderdelen.

1. De subroutine die de drukverdeling in het filter berekent.

SUBROUTINE DRUKV (AANTAL, BETA, ALFA, DX, H, FREA)

AANTAL = het aantal spleten N

$$BETA = \frac{k b d}{k' \Delta x^2} \quad ()$$

ALFA = de hoek van het talud met de horizontaal (α) ()

DX = de lengte van de stenen (Δx) (m)

H = de hoogte van de freatische lijn (m)

FREA = een integer die aangeeft of er een vrij wateroppervlak in het filter aanwezig is.

2. De subroutine die de drukverdeling in het filter berekent voor simulatie van de Oesterdammetingen. Als DRUKV maar na de wijzigingen zoals besproken in hoofdstuk 4.2.

SUBROUTINE DRUKV (AANTAL, BETA1, HSS, D, ALFA1, ALFA2, IHOOG, DX, H, FREA).

De niet in 1 benoemde parameters betekenen:

$$BETA1 = \frac{k b d}{\Delta x^2} \quad (m/s)$$

HSS = de spleetbreedte tot de macht 1,727 (m^{1,727})

D = de dikte van de steenzetting (m)

ALFA1 = de hoek van het bovenste gedeelte van het talud met de horizontaal ()

ALFA2 = de hoek van het onderste gedeelte van het talud met de horizontaal (m)

IHOOG = nummer van de spleet waar de hoek van het talud overgaat van ALFA1 naar ALFA2.

3. De subroutine voor de bepaling van de sinusvormige hydraulische randvoorwaarde:

SUBROUTINE GOLF (T, D, ALFA, HG, AANTAL, DX, HMAX, HSTIL)

waarin de niet eerder benoemde parameters zijn:

T = de tijd (s)
HG = de buitenwaterstand op tijdstip T (m)
HMAX = de maximale buitenwaterstand (m)
HSTIL = de hoogte van de stilwaterlijn (m)

4. De subroutine voor bepaling van de hydraulische randvoorwaarde uitgaande van gemeten drukken

SUBROUTINE MGOLF (T, D, ALFA1, ALFA2, IHOOG, HG, AANTAL, DX)

Al deze parameters zijn in 1, 2 of 3 al benoemd.

Met behulp van deze subroutines werd het hoofdprogramma aangepast aan de gewenste resultaten. Het hoofdprogramma werd zo specifiek toegepast op de gewenste uitvoer dat het niet zinvol is daarvan een listing te geven.

```

SUBROUTINE DRUKV(AANTAL,BETA,D,ALFA,DX,H,FREA)
C   BEREKENT DE DRUKVERDELING IN HET FILTER BIJ GEGEVEN FHI
C   EN H
COMMON FHI(50),F(50),HOOG(50)
INTEGER TAL,AANTAL
LOGICAL FREA
DATA NRELX/100/
L=0
W=1.6
TAL=0
FREA=.TRUE.
LOOP(AANTAL)
.  TAL=TAL+1
.  IF(HOOG(TAL).GT.H)
.  .  F(TAL)=0.
.  ELSE
.  .  EXIT LOOP
.  ENDIF
END LOOP
IF(TAL.EQ.AANTAL)
.  WRITE(6,102)
102 .  FORMAT(' *****FOUTE GEOMETRIE*****')
ENDIF
LOOP(NRELX)
.  L=L+1
C   WRITE(6,1000)L,F,FHI
C1000 FORMAT(I3,10(1X,1PE12.4))
.  J=0
.  K=0
.  FOUT=0.
.  FOR I=TAL,AANTAL,1
.  .  FH=F(I)
.  .  HULP=1./(2.*BETA+1.)
.  .  IF (I.EQ.1)
.  . .  SOM=0
.  . .  FOR IJ=2,AANTAL
.  . . .  SOM=SOM+(FHI(IJ)-F(IJ))
.  . . .  END FOR
.  . .  F(I)=(SOM+FHI(I)+(AANTAL-2.)*FH)/(AANTAL-1.)
.  . .  FREA=.FALSE.
.  .  ELSE
.  . .  IF(I.EQ.AANTAL)
.  . . .  F(I)=1./(1.+BETA)*(BETA*(F(I-1)+DX*SIN(ALFA))+FHI(I))
.  . . .  ELSE
.  . . . .  IF (I.EQ.TAL)
.  . . . . .  XR=H-HOOG(TAL)
.  . . . . .  DX1=(H-HOOG(TAL))/SIN(ALFA)
.  . . . . .  IF (DX1.LT.0..OR.DX1.GT.DX)
.  . . . . . .  WRITE(6,101)DX1,I,TAL,HOOG(TAL),H
.  . . . . . .  I=' I3'
101 .  . . . . . .  FORMAT(' *****FOUT IN DX1 *****      DX1='1PE12.4/'
+.  . . . . . .  '      TAL='I3/'      HOOG(TAL)='1PE12.4'      H='1PE12.4')
.  . . . . . .  STOP

```

```

. . . . . ENDIF
. . . . . IF(DX1.LT.0.0001*DX)
. . . . . . F(I)=0.
. . . . . . GOTO 1
. . . . . ELSE
. . . . . . F(I)=(F(I+1)*DX1+FHI(I)/BETA*DX1)/(DX1/BETA+DX+DX1)
. . . . . . ENDIF
. . . . . ELSE
. . . . . . F(I)=HULP*(BETA*(F(I-1)+F(I+1))+FHI(I))
. . . . . . ENDIF
. . . . . ENDIF
. . . . . ENDIF
. . . . . IF(F(I).LT.5.E-4)
. . . . . . F(I)=0.
. . . . . . GOTO 1
. . . . . ENDIF
. . . . . IF (I.NE.1) F(I)=(1.-W)*FH+W*F(I)
. . . . . HBF=DABS(F(I)-FH)
. . . . . IF (HBF.LT.1.E-4) HBF=0.
. . . . . ERR=HBF/F(I)
. . . . . IF (ERR.GT.FOUT)
C WRITE(6,)I
. . . . . IFF=I
. . . . . FOUT=ERR
. . . . . ENDIF
1 . . . . . CONTINUE
. . . . . END FOR
C WRITE(6,) FOUT
. . . . . IF (FOUT.LT.5.E-4)
. . . . . NRELX=50
. . . . . EXIT LOOP
. . . . . ENDIF
END LOOP
IF (L.EQ.NRELX)
. . . . . WRITE(6,100)L,IFF,FOUT,F
100 . . . . . FORMAT(' ***** GEEN KONVERGENTIE ***** '/I5,I5,1X,1PE12.4/
+. . . . . 10(1X,1PE12.4))
. . . . . STOP
ENDIF
RETURN
END

```



```

SUBROUTINE DRUKV(AANTAL,BETA1,HSS,D,ALFA1,ALFA2,IHOOG,DX,H,FREA)
BEREKENT DE DRUKVERDELING IN HET FILTER BIJ GEGEVEN FHI
EN H
COMMON FHI(50),F(50),HOOG(50),KACC(50)
REAL KACC
INTEGER TAL,AANTAL
LOGICAL FREA
DATA NRELX/100/
L=0
W=1.6
TAL=0
FREA=.TRUE.
LOOP(AANTAL)
.  TAL=TAL+1
.  IF(HOOG(TAL).GT.H)
.  .  F(TAL)=0.
.  .  VI=DABS(FHI(TAL))/D
.  .  IF(VI.LT.1.E-4) VI=1.E-4
.  .  KACC(TAL)=306.*HSS/VI**.307
.  .  IF(TAL.EQ.IHOOG) KACC(TAL)=3.*KACC(TAL)
.  ELSE
.  .  EXIT LOOP
.  ENDF
END LOOP
IF(TAL.EQ.AANTAL)
.  WRITE(6,102)
102 .  FORMAT(' *****FOUTE GEOMETRIE*****')
ENDIF
LOOP(NRELX)
.  L=L+1
C  WRITE(6,1000)L,F,FHI
C1000 FORMAT(I3,10(1X,1PE12.4))
.  J=0
.  K=0
.  FOUT=0.
.  FOR I=TAL,AANTAL,1
.  .  FH=F(I)
.  .  IF(I.LT.IHOOG)
.  .  .  ALFA=ALFA1
.  .  ELSE
.  .  .  ALFA=ALFA2
.  .  ENDF
.  .  BETA=BETA1/KACC(I)
.  .  HULP=1./(2.*BETA+1.)
.  .  IF (I.EQ.1)
.  .  .  SOM=0
.  .  .  FOR IJ=2,AANTAL
.  .  .  .  SOM=SOM+(FHI(IJ)-F(IJ))*KACC(IJ)
.  .  .  END FOR
.  .  .  F(I)=(SOM/KACC(I)+FHI(I)+(AANTAL-2.)*FH)/(AANTAL-1.)
.  .  .  FREA=.FALSE.
.  .  ELSE

```

```

. . . IF(I.EQ.AANTAL)
. . . . F(I)=1./(1.+BETA)*(BETA*(F(I-1)+DX*SIN(ALFA))+FHI(I))
. . . ELSE
. . . . IF (I.EQ.TAL)
. . . . . XR=H-HOOG(TAL)
. . . . . DX1=(H-HOOG(TAL))/SIN(ALFA)
. . . . . IF (DX1.LT.0..OR.DX1.GT.DX)
. . . . . . WRITE(6,101)DX1,I,TAL,HOOG(TAL),H I=' I3
101 . . . . . . FORMAT(' *****FOUT IN DX1 ***** DX1='1PE12.4/'
+. . . . . . ' TAL=' I3/' HOOG(TAL)='1PE12.4' H='1PE12.4)
. . . . . . STOP
. . . . . ENDIF
. . . . . IF(DX1.LT.0.0001*DX)
. . . . . . F(I)=0.
. . . . . . GOTO 1
. . . . . ELSE
. . . . . . IF(I.NE.IHOOG)
. . . . . . . F(I)=(F(I+1)*DX1+FHI(I)/BETA*DX1)/(DX1/BETA+DX+DX1)
. . . . . . . ELSE
. . . . . . . F(I)=BETA*DX*(SIN(ALFA1)-SIN(ALFA2))+BETA*F(I+1)+FHI(I)
. . . . . . . F(I)=F(I)/(1.+BETA+BETA*DX/DX1)
. . . . . . . ENDIF
. . . . . . ENDIF
. . . . . ELSE
. . . . . . IF(I.NE.IHOOG)
. . . . . . . F(I)=HULP*(BETA*(F(I-1)+F(I+1))+FHI(I)) FHI(I)
. . . . . . . ELSE
. . . . . . . F(I)=HULP*(BETA*(F(I-1)+DX*(SIN(ALFA1)-SIN(ALFA2))+F(I+1))+
. . . . . . . ENDIF
. . . . . . ENDIF
. . . . . ENDIF
. . . . . ENDIF
. . . . . VI=DABS(F(I)-FHI(I))/D
. . . . . IF(VI.LT.1.E-4) VI=1.E-4
. . . . . KACC(I)=306.*HSS/VI**0.307
. . . . . IF(I.EQ.IHOOG) KACC(I)=3.*KACC(I)
. . . . . IF(F(I).LT.5.E-4)
. . . . . . F(I)=0.
. . . . . . GOTO 1
. . . . . . ENDIF
. . . . . IF (I.NE.1) F(I)=(1.-W)*FH+W*F(I)
. . . . . HBF=DABS(F(I)-FH)
. . . . . IF (HBF.LT.1.E-4) HBF=0.
. . . . . ERR=HBF/F(I)
. . . . . IF (ERR.GT.FOUT)
C WRITE(6,)I
. . . . . IFF=I
. . . . . FOUT=ERR
. . . . . ENDIF
1 . . . . . CONTINUE
. . . . . END FOR
C WRITE(6,) FOUT
. . . . . IF (FOUT.LT.5.E-4)
. . . . . . NRELX=50
. . . . . . EXIT LOOP
. . . . . . ENDIF
END LOOP
IF (L.EQ.NRELX)
. . . . . WRITE(6,100)L,IFF,FOUT,F
100 . . . . . FORMAT(' ***** GEEN KONVERGENTIE ***** '/15,15,1X,1PE12.4/
+. . . . . 10(1X,1PE12.4))
. . . . . STOP
. . . . . ENDIF
. . . . . RETURN
. . . . . END

```

C SUBROUTINE GOLF(T,D,ALFA,HG,AANTAL,DX,HMAX,HSTIL)
C GEEFT DE GOLF RANDVOORWAARDE VOOR SINUSVORMIGE GOLF.
C BIJ DE GOLF RANDVOORWAARDE WORDT D*COS(ALFA) OPGETELD
C VOOR CORRECTIE VAN DE STEENDIKTE.
C

```
INTEGER AANTAL
COMMON FHI(50),F(50),HOOG(50)
PI=4.*DATAN(1.)
HG=HMAX*SIN(2.*PI*T/4.25)+HSTIL
FOR I=1,AANTAL,1
. IF ((HOOG(I)+D*COS(ALFA)).GT.(HMAX+HSTIL))
. . FHI(I)=0.
. ELSE
. . IF ((HOOG(I)+D*COS(ALFA)).GT.HG)
. . . FHI(I)=D*COS(ALFA)
. . ELSE
. . . FHI(I)=HG-HOOG(I)
. . ENDIF
. ENDIF
ENDFOR
RETURN
END
```

```

SUBROUTINE MGOLF(T,D,ALFA1,ALFA2,IHOOG,HG,AANTAL,DX,HSTIL)
C   GEEFT DE GOLF RANDVOORWAARDE VOOR GEMETEN GOLVEN
C   OP TALUD VAN HET DELTAGOOT MODEL VAN DE OESTERDAM
C   VOOR CORRECTIE VAN DE STEENDIKTE WORDT D*COS(ALFA)
C   BIJ DE GEMETEN DRUKKEN OPGETELD
C
INTEGER AANTAL
COMMON FHI(50),F(50),HOOG(50),KACC(50)
COMMON /PM/ MP(17,2500)
SPECIAL COMMON PM
DIMENSION P(17),HDRO(17),PNUL(17)
REAL NULREF(17),KACC
LOGICAL LEES
DATA LEES/.TRUE./
C ****INLEZEN MEETDATA
IF(LEES)
. OPEN 9
. FOR I=1,2500
. . BUFFER IN (9,MP(1,I),B,17,ISTAT)
. . CALL STATUS(9)
. . IF (ISTAT.NE.2) GOTO 100
C WRITE(6,19) (MP(J,I),J=1,17)
C 19 FORMAT(17(I7))
. ENDFOR
. CLOSE 9
. OPEN 10
. READ(10,1)
1 . FORMAT(/)
. READ(10, ,ERR=101)HDRO
. READ(10, ,ERR=102)NULREF
. CLOSE 10
C WRITE(6,20)HDRO
C WRITE(6,20)NULREF
C 20 FORMAT(17(F7.3))
. LEES=.FALSE.
ENDIF
C ****EINDE INLEZEN MEETDATA
PI=4.*DATAN(1.)
C ****BEPALING DRUKKEN BIJ STILSTAAND WATER
FOR I=1,17
. IF (HDRO(I).GE.HSTIL)
. . PNUL(I)=0.
. ELSE
. . PNUL(I)=HSTIL-HDRO(I)
. ENDIF
ENDFOR
K=T/D.04+1
C ****BEPALING GEMETEN DRUKKEN IN METERS WATERKOLOM
IF (K.LE.2500)
. FOR I=1,17
. . P(I)=.005*MP(I,K)-NULREF(I)
. . IF(I.EQ.16) P(I)=-P(I)

```

```

      . P(I)=1./9.8*P(I)+PNUL(I)
      . ENDFOR
C WRITE(6,20)P
C ****INTERPOLATIE IN HET MEETBESTAND TER BEPALING VAN DE DRUKKEN TER
C PLAATSE VAN DE SPLETEN
      . IDRO=17
      . FOR I=1,AANTAL,1
      . . IF(I.LT.IH00G)
      . . . ALFA=ALFA1
      . . ELSE
      . . . ALFA=ALFA2
      . . ENDFOR
      . . HSPL=HOOG(I)+D*COS(ALFA)
      . . FOR J=1,IDRO
      . . . IF (J.LE.IDRO-1)
      . . . . IF (HSPL.LE.HDRO(J).AND.HSPL.GT.HDRO(J+1))
      . . . . . DELTA=HDRO(J)-HDRO(J+1)
      . . . . . ALF=(HDRO(J)-HSPL)/DELTA
      . . . . . FHI(I)=(1.-ALF)*P(J)+ALF*P(J+1)
      . . . . . EXIT FOR
      . . . ENDFOR
      . . ELSE
      . . . FHI(I)=P(J)+HDRO(J)-HSPL
      . . . ENDFOR
      . ENDFOR
C WRITE(6,30)FHI
C30 FORMAT(10(1PE12.4))
      . FOR I=1,AANTAL
      . . IF(I.LT.IH00G)
      . . . ALFA=ALFA1
      . . ELSE
      . . . ALFA=ALFA2
      . . ENDFOR
      . . FHI(I)=FHI(I)+D*COS(ALFA)
      . ENDFOR
ELSE
      . WRITE(6,2) T
2 . FORMAT(' GEEN MEETDATA VOOR T='1PE12.4)
      . STOP
      ENDFOR
      RETURN
100 WRITE(6,3)
3 . FORMAT(' FOUT BIJ INLEZEN MEETDATA')
      STOP
101 WRITE(6,4)
4 . FORMAT(' FOUT BIJ INLEZEN HOOGTE DRUKOPNEMERS')
      STOP
102 WRITE(6,5)
5 . FORMAT(' FOUT BIJ INLEZEN NULREFERENTIES')
      STOP
      END

```

Evaluatieberekeningen

oktober 1983

CO-258901/141

A. Bezuijen

Inhouds-opgave

1. Inleiding
2. Conclusies
3. Invloed toestroming
 - 3.1. Berekening
 - 3.2. Conclusies invloed toestroming
4. Berekening voor afschatting invloed dynamica
 - 4.1. Inleiding
 - 4.2. Berekening
 - 4.3. Conclusies
5. Invloed van de filterlaag op de doorlatendheid van spleten en gaten
6. Schaling Scheldegoot en Deltagootonderzoek ten behoeve van de Oesterdam

1. Inleiding

In deze notitie worden enige berekeningen gepresenteerd die uitgevoerd zijn in het kader van de evaluatie van de resultaten van het Oesterdam-onderzoek in de deltagoot. Deze berekeningen zijn bedoeld als eerste antwoord op vragen die tijdens de evaluatie naar voren kwamen:

A. Wanneer, onafhankelijk van het mechanisme, de overdruk over een steenzetting groter wordt dan het onderwatergewicht van de stenen en de zetting dus potentieel instabiel is, hoe lang moet deze situatie blijven bestaan voordat een steen daadwerkelijk uit de zetting verwijderd wordt?

Dit hangt af van:

- de snelheid waarmee water door de filterlaag toestroomt onder een instabiele steen
- de steenmassa
- de massa van het water tussen steen en filter dat de steen omhoog duwt en het water in het filter
- de aard van de toestroming van het water

Deze berekening wordt gegeven in hoofdstuk 2.

B. Onder welke omstandigheden kunnen blokken uit een steenzetting verwijderd worden door snelle drukvariaties onder de zetting ten gevolge van de golfklap.

Aan de hand van een eenvoudige kogelbaan-berekening wordt nagegaan hoe lang een bepaalde overdruk minimaal moet duren om stenen uit een zetting te verwijderen, als toestroming van water slechts gedurende de impuls van de golfklap nodig is en daarna lucht onder de stenen kan toestromen. Deze berekening wordt gegeven in hoofdstuk 4.

- C. Wanneer de doorlatendheid van een zetting niet continue is, maar geconcentreerd in spleten, zal, wanneer deze zetting op een filterlaag geplaatst wordt, er een extra stromingsweerstand ontstaan, omdat het water door het filter naar de spleten moet stromen. De grootte van deze extra weerstand is sterk afhankelijk van de spleetbreedte en het aantal spleten en wordt berekend in hoofdstuk 5.
- D. Na afloop van de modelproeven in de Scheldegoot en de Deltagoot t.b.v. de Oesterdam is doorlatendheidonderzoek uitgevoerd op de gebruikte materialen.
- Met name de filterlaag en de toplaag zijn uitvoerig onderzocht. In hoofdstuk 6 wordt nagegaan in hoeverre, in het licht van dit onderzoek, het model in de Scheldegoot en in de Deltagoot representatief waren voor het prototype.

De hier gepresenteerde berekeningen zijn vrij schematisch en dienen slechts om de invloed van bepaalde mechanismen af te schatten. Om de invloed van de hier beschouwde mechanismen preciezer te kunnen kwantificeren zijn aanvullende (numerieke) berekeningen noodzakelijk.

Deze notitie is opgesteld door Ir. A. Bezuijen van het Laboratorium voor Grondmechanica.

2. Conclusies

De uitgevoerde berekeningen geven aanleiding tot de volgende conclusies.

De snelheid waarmee een blok uit een zetting verwijderd wordt is sterk afhankelijk van de aard van de toestroming vanuit het filter. Als de blokken in de omgeving van het beschouwde instabiele blok geklemd zijn en dus niet kunnen bewegen, zal het water rondom uit de filterlaag kunnen toestromen en zal eerder schade ontstaan dan wanneer ook de andere blokken die op dezelfde hoogte liggen als het beschouwde blok instabiel worden en er in de filterlaag een 2-dimensionaal stromingsbeeld ontstaat. In het eerste geval ontstaat bij een overdruk van 1,8 maal het onderwatergewicht van de steen op 25 cm afstand van die steen in 0,38 sec. schade; in het andere geval is het na 1,53 sec.

Uit de tweede berekening blijkt dat voor het deltagootmodel van de Oesterdam dynamische effecten van ondergeschikt belang zijn voor het optreden van schade.

De conclusie uit de derde berekening is, dat de extra "aanstroomweerstand" voor de bepaling van de doorlatendheid van de spleten verwaarloosbaar is voor spleten kleiner dan 2,5 mm.

De doorlatendheid van de gaten, zoals die toegepast werden bij sommige Oesterdamproeven wordt hoofdzakelijk bepaald door deze aanstroomweerstand. De vergroting van de effectieve doorlatendheid is daarom veel minder geweest dan oorspronkelijk was gedacht.

Tenslotte kan uit hoofdstuk 6 geconcludeerd worden dat het Deltagootmodel van de Oesterdam representatief is voor het prototype. Voor het Scheldegootmodel is dit niet zeker omdat de spleetbreedte tussen de blokken onbekend is. Aangetoond wordt, dat deze spleetbreedte heel klein moet zijn.

3. Invloed toestroming

3.1. Berekening

Om de invloed van toestroming van water uit de filterlaag bij een instabiele steen af te kunnen schatten, is de steenzetting geschematiseerd als in fig. 1:

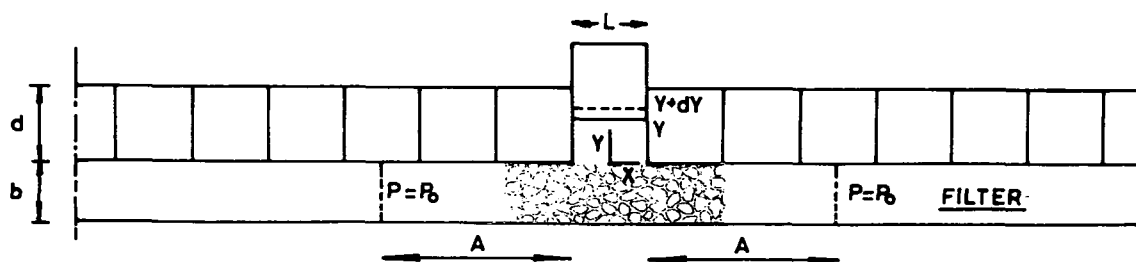


fig. 1: Schematisatie steenzetting voor berekening toestroming

Aangenomen wordt, dat (willekeurig door welk schademechanisme) de druk P_0 op een afstand A van een potentieel instabiele steen constant is. Verder wordt, om de berekening overzichtelijk te houden, aangenomen dat er geen water uit de zetting lekt en dat de druk in de filterlaag onder de instabiele steen constant is.

De druk in het filter juist onder de instabiele steen wordt bepaald door:

- de druk P_0
- het gewicht van de steen
- het gewicht van de kolom water onder de steen, maar boven het filter
- traagheidskrachten veroorzaakt door de massa van de steen, de kolom water onder de steen en het water in het filter
- het verhang in het filter.

Wanneer we de krachten van de bewegende steen en de kolom water beschouwen, blijkt voor de druk P in het filter juist onder de instabiele steen te schrijven:

$$P = [d(S_b - S_w) + y S_w] g + (d S_b + S_w y) \frac{d^2 y}{dt^2} \quad (3.1.)$$

waarin:

d = dikte van de steenzetting (m)

S_w = soortelijke massa van water (kg/m^3)

S_b = soortelijke massa van beton (kg/m^3)

g = de versnelling van de zwaartekracht (m/s^2)

t = de tijd (s)

y = de uitwijking van de steen op tijdstip t .

De eerste term in het rechtergedeelte van deze vergelijking wordt bepaald door het onderwatergewicht van de steen en het gewicht van de kolom water tussen het filter en de steen.

De tweede term wordt bepaald door de traagheidskrachten ten gevolge van de versnelling van de steen en het water.

De druk P is ook te schrijven als functie van het verhang in het filter (evenwijdig aan de zetting) en de versnelling van de hoeveelheid water in het filter tot het punt waar de druk constant is.

Voor een stationaire situatie zijn de traagheidskrachten 0 en is het verhang in de filterlaag te schrijven als:

$$i = \frac{P - P_0}{A S_w g} \quad (3.2.)$$

met:

P_0 = de druk onder de zetting op afstand A van de instabiele steen

A = afstand vanaf de rand van de instabiele steen tot het punt waar de druk constant verondersteld wordt.

Ook geldt:

$$i = \frac{q}{k} \quad (3.3.)$$

waarin:

q = het specifiek debiet door het filter (m/s)

k = de doorlatendheid (m/s)

Het door het filter toestromende water moet gelijk zijn aan de waterverplaatsing onder de steen.

Uit fig. 1 volgt:

$$\frac{dy}{dt} \cdot L = 2 \cdot q \cdot b \quad (3.4.)$$

waarin:

b = de dikte van het filter

L = de lengte van de steen.

Met de formule 3.2., 3.3. en 3.4. is nu af te leiden dat voor een stationaire situatie:

$$(P_0 - P)_{\text{stat.}} = 0.5 \frac{A L}{k b} g S_w \frac{dy}{dt} \quad (3.5.)$$

De traagheidskrachten van het water in het filter tot daar waar geldt $P = P_0$ worden bepaald door de massa van het water en de versnelling daarvan. Voor de massa geldt:

$$M_f = 2 S_w n A.B \quad (3.6.)$$

waarin:

M_f = de totale massa van het water in het filter per lengte eenheid langs het talud tot daar waar

$P = P_0$ (kg) (in fig. 1 de massa van het water in het filter over de lengte A).

n = de porositeit van het filter ()

A en B = afmetingen van het filter (zie fig. 1) (m)

De versnelling blijkt uit formule (3.4.) met $q = n.v$, waarin v de stroomsnelheid van het water in het filter, is formule 3.4. te schrijven:

$$v = \frac{0,5 L}{b n} \frac{dy}{dt} \quad (3.7.)$$

Eénmaal differentiëren geeft de versnelling:

$$a = \frac{dv}{dt} = \frac{0,5 L}{b n} \frac{d^2 y}{dt^2} \quad (3.8.)$$

Dus geldt voor de traagheidskracht per lengte eenheid langs het talud:

$$M_f a = S_w .L.A. \frac{d^2 y}{dt^2} \quad (3.9.)$$

Nu geldt:

$$P_o - P = (P_o - P)_{\text{stat.}} + \frac{M_f a}{2b} \quad (3.10.)$$

ofwel:

$$P_o - P = 0,5 \frac{L}{k} \frac{A}{b} g S_w \frac{dy}{dt} + S_w \frac{LA}{2b} \frac{d^2 y}{dt^2} \quad (3.11.)$$

Als we voor P formule 3.1. invullen, komen we tot de uiteindelijke differentiaalvergelijking:

$$\left(\frac{dS_b}{S_w} + \frac{LA}{2b} + y \right) \frac{d^2 y}{dt^2} + 0,5 \frac{LAg}{kb} \frac{dy}{dt} + gy = \frac{P_o - gd (S_b - S_w)}{S_w} \quad (3.12.)$$

Met als randvoorwaarden:

$$t = 0$$

$$y = 0$$

$$\frac{dy}{dt} = 0$$

Deze vergelijking bleek niet analytisch oplosbaar. Het probleem hierbij is de term $y \frac{d^2 y}{dt^2}$. In de appendix A wordt dan ook een numerieke oplossingsmethode voorgesteld die is uitgewerkt op een HP-41 zakrekenmachine.

Als geldt:

$$\frac{dS_b}{S_w} + \frac{L}{2b} A \gg y \quad (3.13.)$$

is $y \frac{d^2 y}{dt^2}$ verwaarloosbaar en wordt formule 3.12.)

$$\left(\frac{dS_b}{S_w} + \frac{L}{2b} A \right) \frac{d^2 y}{dt^2} + 0,5 \frac{LA g}{kb} \frac{dy}{dt} + gy = \frac{P_o - gd (S_b - S_w)}{S_w} \quad (3.14.)$$

Dit is de differentiaalvergelijking van een gedempte harmonische slinger.

Omdat d en A in alle gevallen groter zijn dan $y, \frac{S_b}{S_w} = 2,35$ en $\frac{L}{2b} = 0,83$ (voor het Deltagootmodel van de Oesterdam) is aan voorwaarde 3.13. in veel gevallen voldaan.

Om de vergelijking overzichtelijker te maken, voeren we in:

$$m = \frac{dS_b}{S_w} + \frac{L}{2b} A \quad (3.15.)$$

$$c = 0,5 \frac{LA g}{k b} \quad (3.16.)$$

$$x = y - \frac{P_o - gd (S_b - S_w)}{g S_w} \quad (3.17.)$$

zodat 3.14. nu te schrijven is als:

$$m \frac{d^2 x}{dt^2} + c \frac{dx}{dt} + g x = 0 \quad (3.18.)$$

met nu de randvoorwaarden:

$$t = 0$$
$$x = - \frac{P_o - g d (S_b - S_w)}{g S_w}$$

$$\frac{dx}{dt} = 0$$

De oplossing van deze vergelijking is in zeer veel handboeken over differentiaalvergelijkingen te vinden, zie b.v. [2]. De oplossing blijkt afhankelijk van de parameter $c^2 - 4 gm$.

Voor:

$c^2 - 4 gm > 0$ is de oplossing overgedempt:

$$x = c_1 e^{r_1 t} + c_2 e^{r_2 t} \quad (3.19.)$$

met:

$$r_1, r_2 = \frac{-c \pm \sqrt{c^2 - 4 gm}}{2m}$$

c_1 en c_2 moeten dan nog bepaald worden uit de randvoorwaarden.

Voor $c^2 - 4 gm = 0$ is de oplossing kritisch gedempt.

$$x = (c_1 + c_2) e^{-(c/2 m)t} \quad (3.20.)$$

en voor:

$c^2 - 4 gm < 0$ is de oplossing een uitdempende slingering.

$$x = e^{-(c/2 m)t} (c_1 \cos \mu t + c_2 \sin \mu t) \quad (3.21.)$$

waarin:

$$\mu = \sqrt{4 gm - c^2} / 2m > 0.$$

Met behulp van de formules 3.15. t/m 3.17. is af te leiden dat de keuze van de oplossing bepaald wordt door de grootte van de parameter A.

Kritieke demping treedt op als:

$$c^2 - 4 gm = 0$$

of met formule 3.15. t/m 3.17.

$$(0,5 \frac{LA g}{k b})^2 - 4g (\frac{dS}{S w} + \frac{L}{2b} A) = 0 \quad (3.22.)$$

Als we deze vergelijking oplossen en voor de verschillende parameters waarden invoeren zoals gevonden in het Oesterdam-onderzoek met een filterlaag onder de blokken [3, 4] dan blijkt dat de oplossing kritisch gedempt is als $A = 11$ cm.

Omdat de steenafmetingen 25 x 25 cm zijn, zou dat betekenen dat de druk in ieder geval binnen een steenafstand van de bewegende steen al constant zou moeten zijn. Dit lijkt zeer onwaarschijnlijk. A zal meestal groter zijn en dus kunnen we de overgedempte oplossing gebruiken. De minimale afstand, waarbinnen de druk constant te beschouwen is, zal toch zeker gelijk zijn aan de steenafmeting dus $A > 25$ cm. In het volgende is uitgegaan van de veronderstelling $A = 25$ cm.

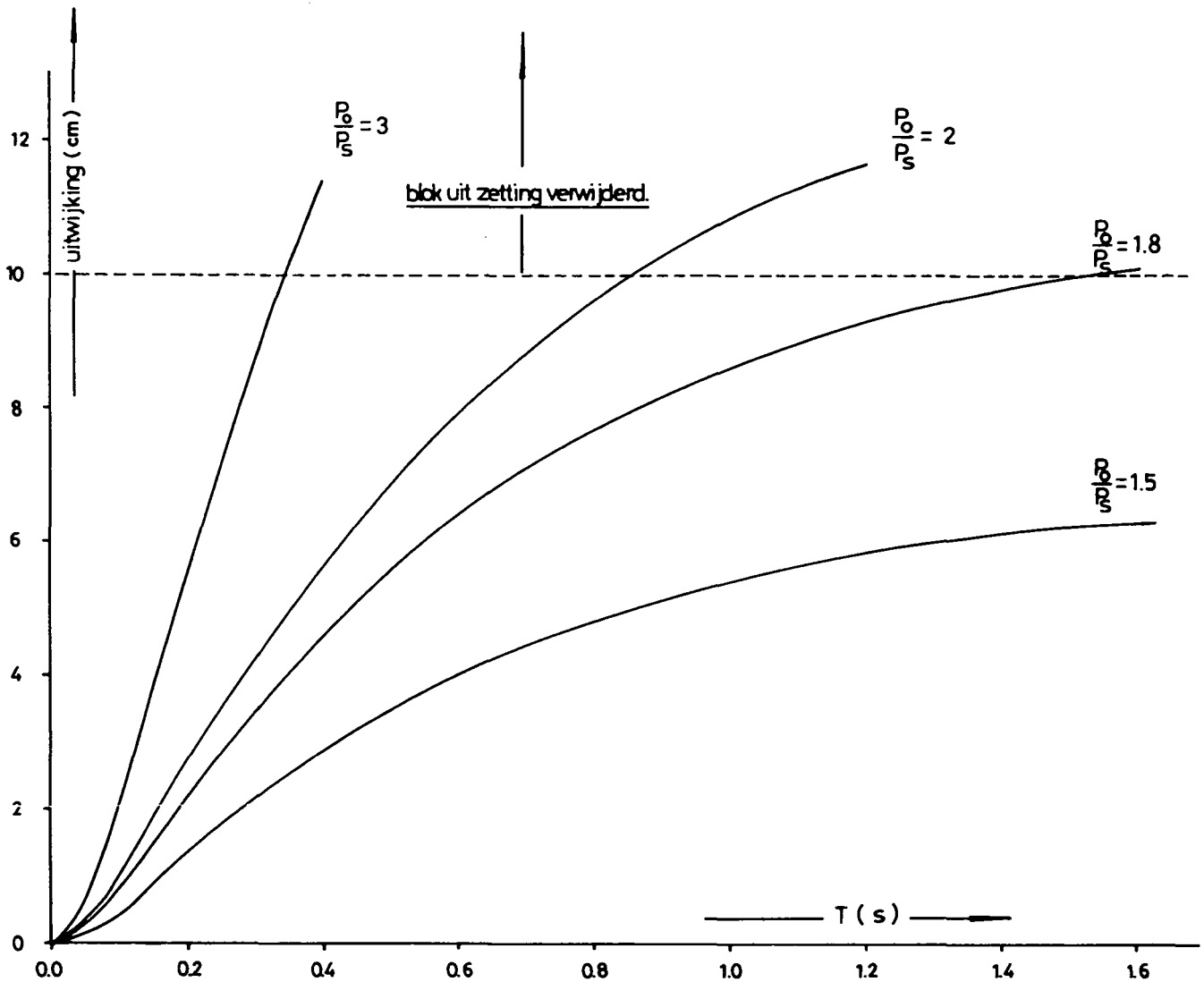


fig. 2: Tijd waarin blok uit zetting verwijderd wordt bij constante overdruk (P_0) op 25 cm afstand van losliggend blok. Bij de berekening is uitgegaan van stroming evenwijdig aan het talud. De resultaten zijn geldig voor het Deltagootmodel van de Oesterdam met dunne blokken. P_s is het druk equivalent van het onderwatergewicht van de blokken.

Met deze aanname en de oplossing van de vergelijking zoals gegeven in formule 3.19 is na te gaan hoe snel een blok uit een zetting verwijderd wordt bij een bepaalde overdruk. Deze berekening is uitgevoerd voor verschillende waarden van de overdruk. Het resultaat is grafisch weergegeven in fig. 2. In werkelijkheid zal om het blok met de in fig. 2 aangegeven snelheid uit de zetting te verwijderen een hogere druk nodig zijn ter plaatse van $P = P_0$ dan in fig. 2 aangegeven. Er zal namelijk ook water tussen de spleten door stromen. Dit water moet ook door het filter aangevoerd worden. Bij de uittreetijden zoals aangegeven in fig. 2 (minder dan 2 sec.) bleek deze hoeveelheid bij het Oesterdammodel echter gering t.o.v. de waterverplaatsing onder het bewegende blok. Bovenstaande berekening schematiseert de situatie waarbij op een bepaalde hoogte van het talud alle blokken los liggen. De storming door het filter is dan alleen evenwijdig aan het talud. Bij een zetting met klemming tussen de blokken zal er binnen de afstand A uit de vorige berekening waarschijnlijk maar één blok losliggen. Het water kan dan van alle kanten toestromen en de stromingsweerstand zal kleiner zijn. Voor deze situatie is een zelfde soort berekening op te zetten als voor het tweedimensionale geval, dat hierboven behandeld is. Uitgangspunt is nu de situatie zoals getekend in fig. 3.

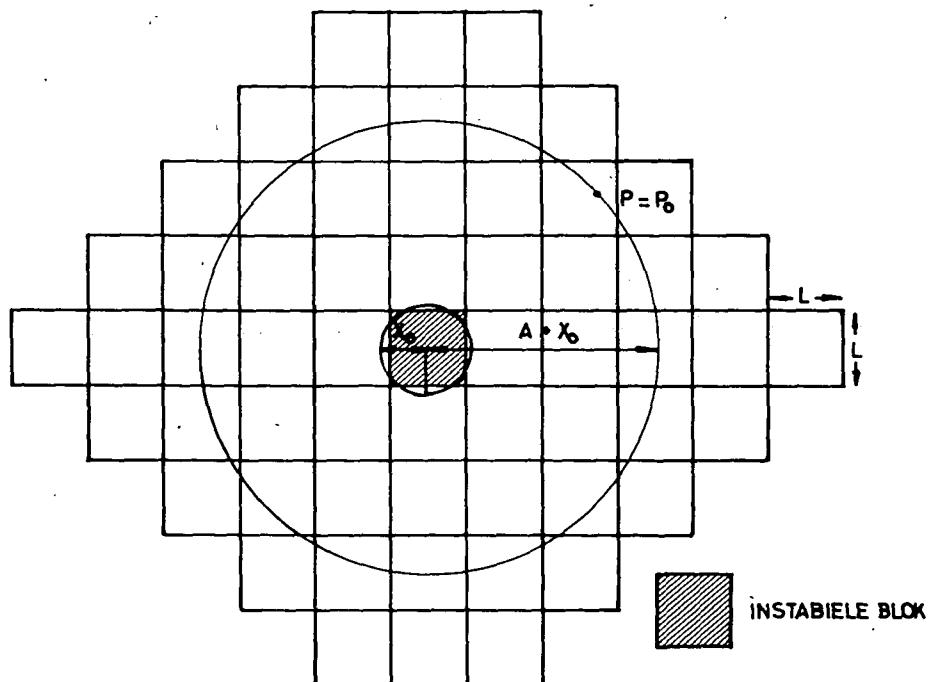


fig. 3: schematisatie blokkenglooiing voor berekening met toestroming van alle kanten van het blok

De aanname is nu dat op een afstand A van het instabiele blok de druk rondom constant P_0 is. Voor $r < x_0$ (zie fig. 3) wordt de druk in het filter gelijk aan P verondersteld. Hoewel de blokken uiteraard vierkant zijn, wordt er in deze berekening voor de eenvoud uitgegaan van een cirkelvormig gebied met $r < x_0$. Wanneer we met deze aannamen de afleiding van de differentiaalvergelijking herbezien, is duidelijk dat formule 3.1. ongewijzigd blijft. Formule 3.11. zal echter een andere vorm krijgen.

In de stationaire situatie is het verhang in een ring op afstand r uit het midden van de instabiele steen (zie ook fig. 3) met $x_0 < r < A$ te schrijven als:

$$i = \frac{Q}{2 \pi r k b} \quad (3.23.)$$

waarin:

Q = het debiet (m^3/s)

k = de doorlatendheid (m/s)

b = de dikte van het filter (m)

r = de afstand tot het midden van de instabiele steen (m)

Voor stationaire stroming is de totale drukval tussen $r = A + x_0$ en $r = x_0$ te schrijven als:

$$(P_0 - P)_{stat} = S_w \cdot g \int_{x_0}^{A + x_0} \frac{Q}{2 \pi k b} dr \quad (3.24.)$$

Uitwerken levert:

$$(P_0 - P)_{stat} = \frac{Q}{2 \pi k b} S_w g \ln \left(\frac{A + x_0}{x_0} \right) \quad (3.25.)$$

Het debiet Q moet gelijk zijn aan het debiet, dat correspondeert met de verplaatsing van de steen:

$$Q = L^2 \frac{dy}{dt} \quad (3.26.)$$

Hiermee wordt formule (3.25.):

$$(P_o - P)_{stat} = \frac{L^2 S_w g}{2 \pi k b} \ln \left(\frac{A + x_o}{x_o} \right) \frac{dy}{dt} \quad (3.27.)$$

De traagheidskrachten die veroorzaakt worden door de massa van het water in het gebied $x_o < r < A$ dienen nu nog berekend te worden. De massa (M_r) van een ring water met straal r en dikte dr (zie fig. 3) is:

$$M_r = n 2 \pi r b S_w dr \quad (3.28.)$$

Voor de snelheid van het water in de filterlaag op afstand r geldt:

$$v = \frac{Q}{n 2 \pi r b} \quad (3.29.)$$

Wat met formule 3.26. te schrijven is als:

$$v = \frac{L^2}{n 2 \pi r b} \frac{dy}{dt} \quad (3.30.)$$

De versnelling volgt door naar de tijd te differentiëren:

$$a = \frac{L^2}{n 2 \pi r b} \frac{d^2 y}{dt^2} \quad (3.31.)$$

De versnellingskrachten op afstand r voor een ring met dikte dr zijn dus:

$$M_r \cdot a = S_w L^2 \frac{d^2 y}{dt^2} \quad dr \quad (3.32.)$$

Integratie geeft de totale traagheidskracht van het water in het filter:

$$\int_{x_o}^{A + x_o} M_r a = A S_w L^2 \frac{d^2 y}{dt^2} \quad (3.33.)$$

De drukval ten gevolge van deze versnellingskracht wordt gevonden door deze kracht te delen door het oppervlak waar de kracht aangrijpt $2 \pi x_o b$. Met formule 3.27. en $x_o = 0,5 L$ geldt voor $P_o - P$:

$$P_o - P = \frac{L^2 S_w g}{2 \pi k b} \ln \left(\frac{A + x_o}{x_o} \right) \frac{dy}{dt} + \frac{S_w LA}{\pi b} \frac{d^2 y}{dt^2} \quad (3.34.)$$

Kombinatie van deze formule met formule 3.1. geeft de uiteindelijke differentiaalvergelijking voor het geval dat het water van rondom toestroomt.

$$\left(\frac{d S_b}{S_w} + \frac{LA}{\pi b} + y \right) \frac{d^2 y}{dt^2} + \frac{L^2 g}{2 \pi k b} \ln \left(\frac{x_o + A}{x_o} \right) \frac{dy}{dt} + gy = \frac{P_o - gd (S_b - S_w)}{S_w} \quad (3.35.)$$

Deze vergelijking is weer te schrijven als vergelijking 3.18, waarin de term $y \frac{d^2 y}{dt^2}$ weer verwaarloosd is.

$$m \frac{d^2 x}{dt^2} + c \frac{dx}{dt} + g x = 0 \quad (3.18.)$$

Maar nu voor de verschillende parameters:

$$m = \frac{dS_b}{S_w} + \frac{LA}{\pi b} \quad (3.36.)$$

$$c = \frac{L^2 g}{2 \pi k b} \ln \left(\frac{x_o + A}{x_o} \right) \quad (3.37.)$$

$$x = y' - \frac{P_o - gd (S_b - S_w)}{g S_w} \quad (3.38.)$$

Voor deze vergelijking voldoet ook een van de oplossing 3.19 t/m 3.21. afhankelijk van de waarden van $c^2 - 4 gm$.

Invullen van de parameters van het Oesterdamonderzoek in de Deltagoot voor de filterzijde geeft als resultaat dat $c^2 - 4 gm < 0$ voor alle A. De oplossing van de differentiaalvergelijking 3.38. wordt dus gegeven door formule 3.21.:

$$x = e^{-c/2 m t} (c_1 \cos \mu t + c_2 \sin \mu t) \quad (3.21.)$$

waarin:

$$\mu = \sqrt{4 gm - c^2} / 2 m$$

Uit invullen van de randvoorwaarden blijkt, dat in dit geval de oplossing te schrijven is als:

$$y = \frac{P_o - gd (S_b - S_w)}{S_w} \left\{ 1 - [\cos \mu t + \sin \mu t] e^{-\frac{c}{2m} t} \right\} \quad (3.39.)$$

Deze oplossing is in fig. 4 grafisch weergegeven voor verschillende waarden van P_o en weer met de aanname $A = 0,25$ m.

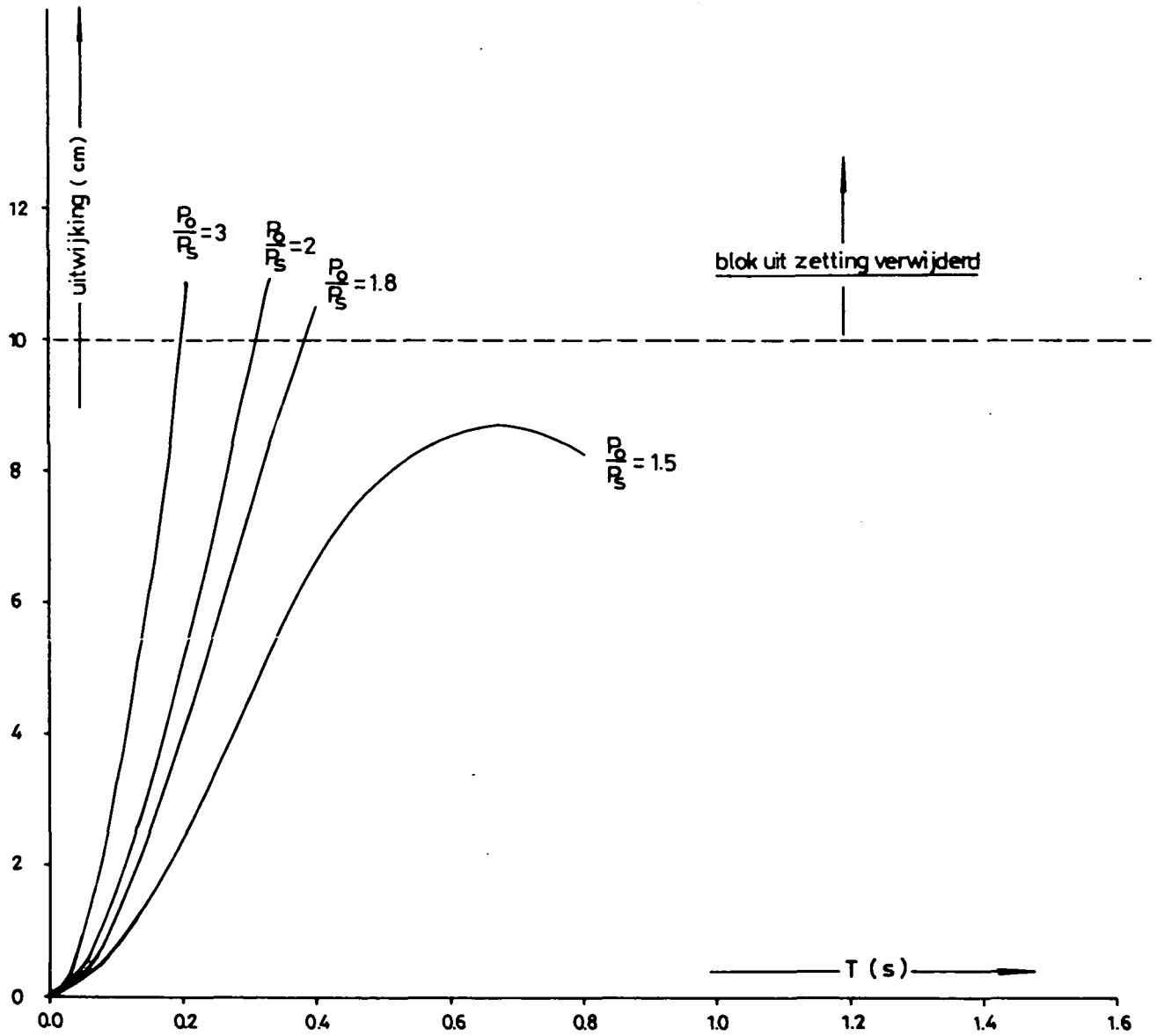


fig. 4: Als fig. 2, maar nu is uitgegaan van toestroming van rondom het blok

3.2. Conclusies invloed toestroming

In de hier gepresenteerde berekeningen is uitgegaan van een zeer geschematiseerde drukverdeling in het filter. De resultaten dienen dan ook slechts gebruikt te worden om bepaalde invloeden af te schatten. Uit de beide berekeningen blijkt dat als het water alleen van boven en onder uit het filter naar het instabiele blok kan toestromen, de stabiliteit van de zetting tegen verwijderen van een blok uit de zetting veel groter is, in vergelijking met een constructie waar water van rondom het instabiele blok toestroomt. Het eerste geval is te vergelijken met een situatie, waar, bijvoorbeeld door een constructie met een pennenrooster, alle blokken los liggen. Het tweede geval is te vergelijken met een zetting waar over een oppervlak van enkele tientallen blokken slechts één blok los ligt en de andere, door bijvoorbeeld klemming, een grotere stabiliteit hebben.

De conclusie moet dus zijn, dat voor een blokkenglooiing op een filterlaag de resultaten van modelproeven, met veel losliggende blokken niet altijd "veilig" te vertalen zijn naar de werkelijkheid met zo af en toe een losliggend blok tussen, door wrijvingskrachten of klemkrachten, gekoppelde blokken. Zolang het criterium is: totaal geen beweging van de blokken, kunnen de resultaten van modelproeven met veel losse blokken zonder meer gebruikt worden.

Als het criterium wordt: geen schade, kunnen de resultaten van deze modelproeven de schadegolf in het prototype overschatten.

Tijdens modelproeven is het criterium: geen beweging moeilijker vast te stellen dan het criterium geen schade. Toch zou ook om andere redenen dan bovengenoemd dit een beter schadecriterium zijn. Zodra de blokken in beweging komen is schade aan de ondergrond mogelijk, waardoor op langere termijn ook schade aan de zetting kan ontstaan, ook al wordt bij de proevenserie niet geconstateerd, dat een blok uit de zetting verwijderd wordt.

Een overdruk van 2x het onderwatergewicht van de blokken van 25 x 25 x 10 cm zoals gebruikt bij het Oesterdamonderzoek moet in het geval van toestroming van rondom 0,31 sec. onder de zetting gehandhaafd blijven op 25 cm van het instabiele blok voordat schade ontstaat, doordat het blok uit de zetting verwijderd is; in het andere geval is dat 0,86 sec.

In werkelijkheid zal echter een overdruk niet op één moment een bepaalde waarde bereiken, maar zich bij het terugtrekken van de golf langzaam opbouwen om daarna bij een brekende golf snel en bij een niet-brekende golf langzaam af te nemen. Wat hiervan de invloed is op de stabiliteit van de steenzetting is met deze eenvoudige berekening niet na te gaan. Dit zou onderzocht kunnen worden door de afgeleide differentiaalvergelijkingen te combineren met het computerprogramma STEENZET.

4. Berekening voor afschatting invloed dynamica

4.1. Inleiding

Tijdens de evaluatie van de Oesterdamproeven in de Deltagoot kwam de vraag naar voren wat de mogelijke invloed is van de drukstoot tijdens de golfklap op de stabiliteit van de steenzetting.

De mogelijkheid lijkt reëel, dat gedurende de golfklap, de overdruk over een gedeelte van de steenzetting juist naast de golfklap groter is dan overeenkomt met het gewicht van de zetting. Maar het lijkt twijfelachtig of ook daadwerkelijk schade ontstaat, omdat dan gedurende de korte duur van de golfklap, ongeveer 0,1 sec. een steenvolume water uit het filter onder de instabiele steen moet toestromen. De resultaten van de vorige som gaven al aan dat, voor het filtermateriaal van het model van de Oesterdam in de Deltagoot, dit alleen mogelijk is voor zeer hoge overdrukken. Deze overdrukken zijn gedurende het Oesterdam-onderzoek in de Deltagoot niet gemeten.

De invloed van dit mechanisme leek dus gering.

Tijdens de evaluatie van bovengenoemde experimenten kwam echter nog een ander schademechanisme naar voren. Gedurende de golfklap zou via de ondergrond een gedeelte van de impuls van de golfklap overgedragen worden aan een steen uit de zetting. Wanneer deze steen instabiel wordt, zal er, gedurende de tijd dat de impuls overgedragen wordt, water toestromen. Zodra echter de overdruk over de steen verdwenen is, is het niet meer nodig dat water toestroomt uit de filterlaag, maar als de steen zich bevindt op een droog gedeelte van het talud is het mogelijk dat lucht toestroomt vanaf de bovenzijde van de zetting. De in eerste instantie verkregen impuls zou dan voldoende moeten zijn om de steen uit de zetting te verwijderen.

De nu volgende berekening is opgezet om de mogelijkheid van dit schade-mechanisme te onderzoeken.

4.2. Berekening

In de nu volgende berekening wordt uitgegaan van een horizontaal talud (zie fig. 1). De fout die gemaakt wordt door de resultaten toe te passen op een talud 1 : 4 is kleiner dan 5%.

Voor de nu volgende berekening zijn de volgende aannamen gedaan:

- gedurende de golfklap is de druk onder het blok constant P_0 (de drukopbouw en afbouw gedurende de golfklap + de eventuele drukverlaging t.g.v. toestroming zijn dus niet in deze berekening meegenomen)
- na de golfklap werken geen krachten op het blok behalve de zwaartekracht
- de druk aan de bovenzijde van de steen is 0 kN/m^2 .

Met deze aannamen geldt gedurende de impulsoverdracht:

$$d S_b \frac{d^2 y}{dt^2} = P_0 - P_1 \quad (4.1.)$$

met als randvoorwaarden op $t = 0$:

$$y_0 = 0 \text{ en } \frac{dy}{dt} = 0.$$

Hierin is:

d : de dikte van de steenzetting (m)

S_b : de soortelijke massa van beton (kg/m^3)

P_0 : de druk aan de onderkant van het blok (kN/m^2)

P_1 : de druk overeenkomend met het gewicht van het blok ($= g d S_b$)

De oplossing van vergelijking 4.1. is:

$$y = 1/2 \left(\frac{P_0}{d S_b} - g \right) t^2 \quad (4.2.)$$

Zoals gezegd: Na de impuls van de golfklap is de aanname dat lucht toestroomt onder het blok, zodat de vergelijking dan wordt:

$$d S_b \frac{d^2 y}{dt^2} = - P_1 \quad (4.3.)$$

Met de randvoorwaarden dat op tijdstip t_1 waar de druk P_0 wegvalt de verplaatsing en snelheid van het blok continu zijn.

Wanneer we stellen dat door de impuls $P_0 t_1$ het blok juist uit de zetting verwijderd wordt, dan moet gelden:

$$\frac{dy}{dt} = 0 \text{ als } y = d, \text{ de blokdikte.}$$

Oplossen van de vergelijkingen met deze randvoorwaarden geeft P_0 als functie van t_1 :

$$P_0 = d S_b g \left[0,5 + \frac{1}{t_1} \sqrt{1/4 t_1^2 + 2 \frac{d}{g}} \right] \quad (4.4.)$$

Verder is van belang de verplaatsing van het blok op het tijdstip t_1 , omdat dit een maat is voor de hoeveelheid water die gedurende de tijd t_1 moet toestromen, voordat de druk aan de onderkant wegvalt en de mogelijkheid aanwezig is dat lucht toestroomt tussen het blok en de ondergrond. Als P_0 en t_1 bekend is, volgt de verplaatsing van het blok (y_1) op het tijdstip t_1 rechtstreeks uit de vergelijking 4.2.

$$y_1 = 1/2 \left(\frac{P_0}{d S_b} - g \right) t_1^2 \quad (4.5.)$$

In de geïnstrumenteerde blokken is ook de versnelling gemeten. Deze kan vergeleken worden met de met deze som berekende versnelling (a) gedurende de drukstoot, die volgt uit vergelijking 4.1.:

$$a = \frac{P_o}{dS_b} - g \quad (4.6.)$$

In fig. 5 zijn zowel de druk P_o , de verplaatsing y_1 op tijdstip t_1 als de versnelling gedurende de drukstoot weergegeven als functie van t_1 .

4.3. Conclusies

Uit de berekening blijkt dat het tijdens de evaluatie geopperde schade-mechanisme, zoals in de inleiding (4.1.) beschreven onwaarschijnlijk is. Indien de impulsoverdracht 0,1 sec. duurt, blijkt het blok zich in die tijd al 5 cm verplaatst te hebben en zou in die 0,1 sec. al het halve blokvolume water toe moeten stromen, zodat nog steeds de toestroomsnelheid de reden is, waarom dit mechanisme niet optreedt.

Impulsoverdracht zonder noemenswaardige verplaatsingen van het blok blijken alleen mogelijk bij zeer hoge overdrukken die slechts enkele milliseconden aanhouden, overigens zal verderop blijken dat ook dan nog toestroming de beperkende factor is. Weer uitgaande van een overdruk die 0,1 sec. aanhoudt, dan blijkt uit fig. 5 dat die overdruk 5 kN/m² moet zijn. Met de geïnstrumenteerde stenen is een dergelijke overdruk nooit gemeten. Deze overdruk is ook zo groot, dat ook in de omgeving van de beschouwde steen - stenen instabiel zullen worden, waardoor nog meer water moet toestromen.

Voor t_1 groter dan 0,1 sec is het onwaarschijnlijk dat de drukstoot nog door een golfklap veroorzaakt kan worden, gezien de duur van een golfklap. Voor $t < 0,1$ sec. wordt het toestromingsprobleem alleen maar groter, omdat de traagheidskrachten een steeds grotere rol gaan spelen. Dit blijkt door gebruik te maken van de resultaten van de vorige som, uitgaande van toestroming van rondom de steen (dus differentiaalvergelijking 3.35).

Om in het Deltagootmodel van de Oesterdam met dunne stenen in 0,1 sec. een steen 5 cm te verplaatsen is rondom een druk van $6,8 \text{ kN/m}^2$ nodig op 25 cm van het instabiele blok. Om echter een blok in 0,04 sec 2,4 cm te verplaatsen (hetgeen volgens fig. 5 overeenkomt met dezelfde impuls) is rondom een druk van $14,5 \text{ kN/m}^2$ nodig op 25 cm van het instabiele blok. De versnelling gedurende de golfklap moet dan ook meer dan 3 g zijn. Dergelijke versnellingen zijn nooit gemeten.

Samenvattend kan geconcludeerd worden voor het model van de Oesterdam in de Deltagoot dat schade door dynamische effecten veroorzaakt door de golfklap onwaarschijnlijk is. Dit schademechanisme zou wel een rol kunnen spelen bij veel doorlatender zettingen, op een doorlatender ondergrond. De drukstoot van de golfklap zal dan door de zetting minder gedempt worden en ook toestroming van water uit het filter bij snel verplaatsen van een blok lijkt minder een probleem. Ook als door boogwerking de zetting niet aansluit op de ondergrond, of door erosie aanzienlijke geulen onder de zetting gevormd zijn, is de mogelijkheid aanwezig op schade aan de top laag door dynamische effecten. Toestroming van water tussen de top laag en de zetting is dan mogelijk geworden, waarbij veel grotere debieten mogelijk zijn dan bij toestroming door de filter laag.

OPLOSSING IMPULS VERGELIJKING BLOKKEN OP DROGE GROND

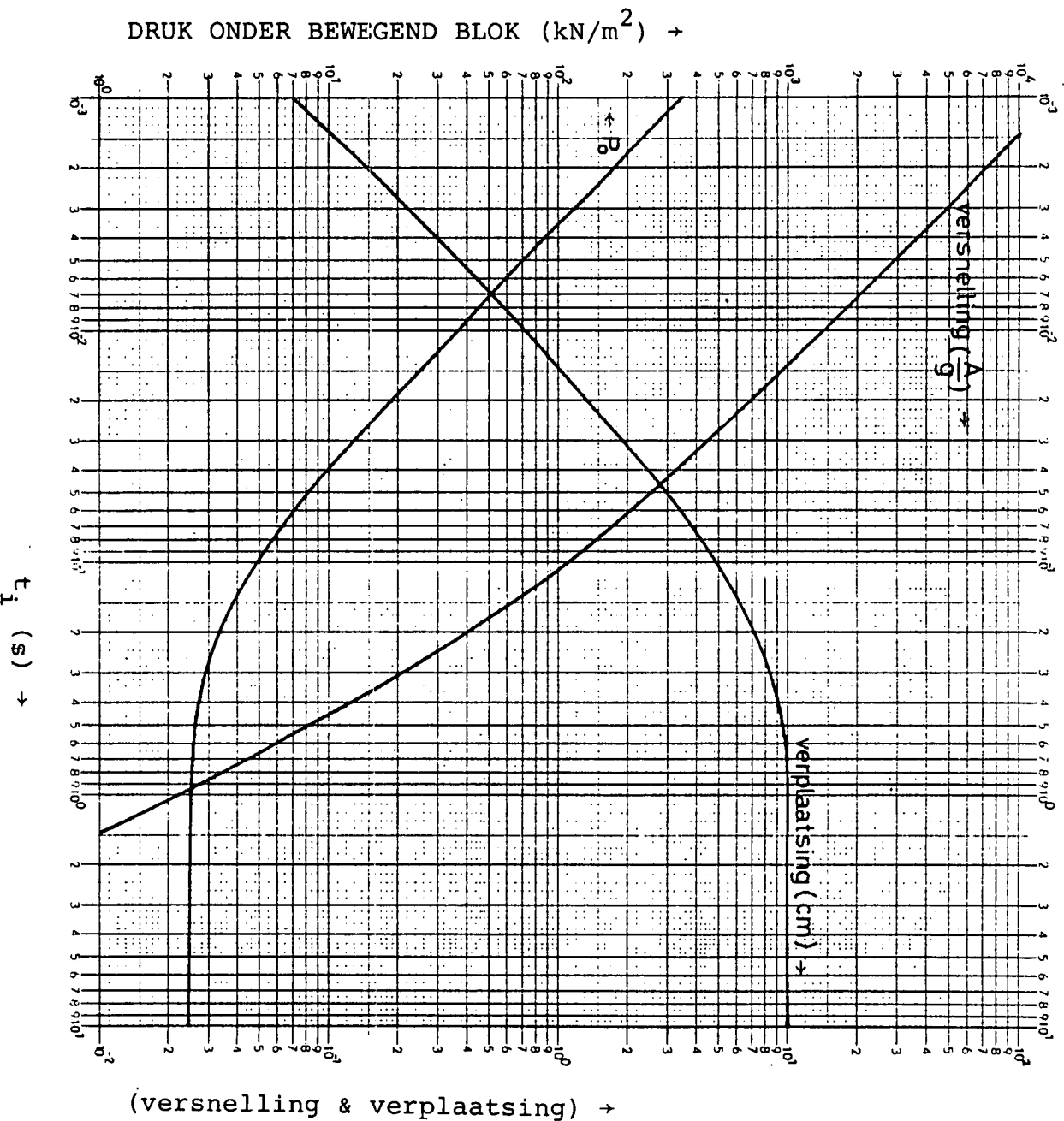


fig. 5: De benodigde overdruk, de verplaatsing van de steen gedurende de impulsoverdracht en de maximale versnelling nodig voor schakel de aan een steenzetting door een geschematiseerde golfklap als functie van de duur (T_i) van de impuls. Parameters uit het Oesterdam-onderzoek voor regelmatige golven, toestroming alleen gedurende de golfklap.

5. Invloed van de filterlaag op de doorlatendheid van spleten en
gaten-----

De stabiliteit van een steenzetting wordt o.a. bepaald door de doorlatendheid van die steenzetting in verhouding tot de doorlatendheid van de zich onder de zetting bevindende filterlaag.

De doorlatendheid van de zetting is gemeten door de zetting te plaatsen op een zeer grofkorrelig materiaal; loodrecht op de zetting een debiet te creëren en de drukval over de zetting te meten. Wanneer echter deze zetting met dezelfde spleetafstand op een filterlaag van fijner materiaal geplaatst wordt met bekende doorlatendheid zal de totale stromingsweerstand niet gelijk zijn aan die van de zetting plus de stromingsweerstand van het filter. Er zal een extra stromingsweerstand ontstaan, omdat het water door het filter naar de spleten moet stromen. Bij de overgang steen - filter is het doorstroomde oppervlak niet het oppervlak van het filter, maar een veel kleiner oppervlak, omdat het water alleen bij de spleten door de steenzetting kan stromen. Met andere woorden: de in eerdere beschouwingen altijd verwaarloosde stromingsweerstand in het filter loodrecht op de zetting kan in bepaalde gevallen van belang zijn.

In het rekenmodel voor overdrukken onder steenzettingen betekent een extra stromingsweerstand bij de spleten een hogere overdruk onder de zetting.

Voor een glooiing waar de doorlatendheid geconstreerd is in één gat in de blokken, geldt bovenstaande redenering in versterkte mate. Het water moet nu door het filter naar het gat toestromen.

Voor zowel laminaire als turbulente stroming is een afschatting te maken van deze extra stromingsweerstand. In de berekening voor laminaire stroming is het uitgangspunt de wet van Darcy:

$$k_L = \frac{Q}{A \cdot i} \quad (5.1.)$$

waarin:

k_L = de doorlatendheid (m/s)

Q = het debiet (m³/s)

A = het doorstroomde oppervlak (m²)

i = het verhang

Voor turbulente stroming geldt:

$$k_T = \frac{v^2}{i} \quad (5.2.)$$

waarin:

k = de doorlatendheid voor turbulente stroming (m^2/s^2)

v^T = de filtersnelheid = $\frac{Q}{A}$ (m/s)

Laminaire stroming

Voor de berekening van de extra stromingsweerstand, veroorzaakt door het filtermateriaal voor een spleet, beschouwen we de configuratie van fig. 6.

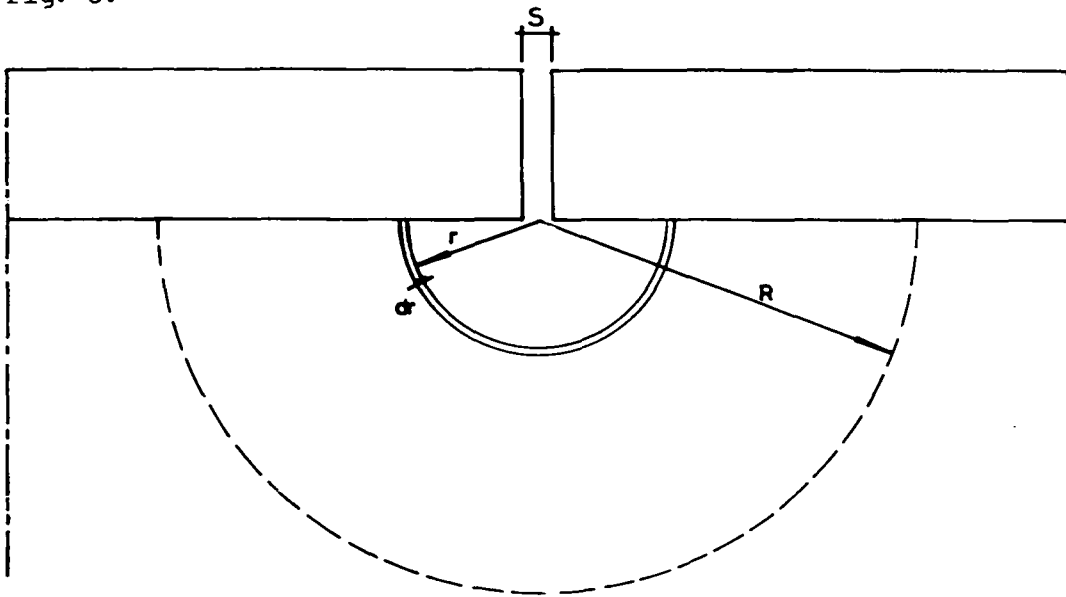


Fig. 6: Filtermateriaal voor spleet. Schematisatie voor berekening stromingsweerstand.

De wet van Darcy voor het filtermateriaal op afstand r van de spleet luidt:

$$k_L = \frac{Q}{Ai} = \frac{Q}{\pi r L i} \quad (5.3.)$$

waarin:

r = de afstand tot de spleet (zie fig. 5)

L = de lengte van de spleet

Dit is te schrijven als:

$$i = \frac{Q}{\pi L k_L r} \quad (5.4.)$$

Hierbij is uitgegaan van cirkelvormige iso-potentiaallijnen rondom de spleet. In werkelijkheid zullen deze iso-potentiaallijnen niet echter cirkelvormig zijn, maar afhankelijk van de stroming in het filter zullen deze lijnen ellipsvormig zijn of verschoven cirkels zijn. Omdat de weerstand het grootst is vlak bij de spleet en daar de iso-potentiaallijnen wel bijna cirkelvormig zijn, is aan te nemen dat door de hier gepresenteerde berekeningen de aanstroomweerstand redelijk bepaald is. De totale drukval in het filter voor de spleet wordt dus gegeven door de integraal:

$$P_R - P_S = 0,5 \int_S^R \frac{Q}{\pi L r k_L} dr \quad (5.5.)$$

met S = de spleetbreedte

Oplossen van de integraal geeft:

$$P_R - P_S = \frac{Q}{\pi L k_L} \ln \frac{R}{0,5 S} \quad (5.6.)$$

In deze formule is alleen de waarde van R onbekend. Nu is het antwoord niet erg gevoelig voor deze parameter. Daarom stellen we $R = 5S$, zodat de oplossing te schrijven is als:

$$P_R - P_S = \frac{Q}{\pi k_L L} \ln 10 \quad (5.7.)$$

De berekening voor de extra filterweerstand voor de aanstroming van een gat in de zetting verloopt analoog.

Aannemend dat de isopotentiallijnen in dit geval bolvormig zijn, geldt op een afstand r van het gat:

$$k_L = \frac{Q}{A i} = \frac{Q}{2\pi r^2 i} \quad (5.8.)$$

Uitwerken van deze formule als voor de aanstroming van een spleet geeft:

$$P_R - P_S = \frac{Q}{2\pi k_L} \left(\frac{1}{0,5*S} - \frac{1}{R} \right) \quad (5.9.)$$

Voor $S \ll R$ is dit te schrijven als:

$$P_R - P_S = \frac{Q}{\pi k_L S} \quad (5.10.)$$

Turbulente stroming

Met formule 5.2.

$$v^2 = k_T \cdot i \quad (5.2.)$$

en $v = \frac{Q}{\pi rL}$ voor aanstroming van een spleet en $v = \frac{Q}{2\pi r^2}$ voor de aanstroming van een gat, bij turbulente stroming, op geheel analoge wijze te berekenen als bij laminaire stroming. Voor een spleet geldt nu:

$$P_R - P_S = \frac{1}{k_t} \left(\frac{Q}{\pi L} \right)^2 \left\{ \frac{1}{0,5*S} - \frac{1}{R} \right\} \quad (5.11.)$$

Wat voor $S \ll R$ te schrijven is als:

$$P_R - P_S = \frac{1}{k_T} \left(\frac{Q}{\pi L}\right)^2 \frac{1}{0,5*S} \quad (5.12.)$$

Voor een gat geldt:

$$P_R - P_S = \frac{1}{3k_T} \left(\frac{Q}{2\pi}\right)^2 \left[\frac{1}{(0,5*S)^3} - \frac{1}{R^3} \right] \quad (5.13.)$$

Wat voor $S \ll R$ te schrijven is als:

$$P_R - P_S = \frac{8}{3k_T} \left(\frac{Q}{2\pi}\right)^2 \frac{1}{S^3} \quad (5.14.)$$

De stroming in het filtermateriaal van de Oesterdam met een gradatie van 8 - 23 mm is voornamelijk turbulent [4].

Daarom is voor turbulente stroming berekend wat de verhouding is tussen de aanstroomweerstand en de spleetweerstand bij verschillende spleetbreedtes. In [4] is bepaald dat het debiet door een spleet te schrijven is als:

$$Q = 38,27 A_S S^{0,727} i^{0,690}$$

of met:

$$A_S = LS:$$
$$Q = 38,27 LS^{1,727} \left(\frac{P_S - P_O}{d}\right)^{0,693} \quad (5.15.)$$

waarin:

- P_O = de druk aan de buitenkant van de spleet
- P_S = de druk aan de binnenkant van de spleet
- d = de dikte van de zetting.

Invullen van 5.15 in 5.12 geeft:

$$\frac{P_r - P_s}{P_o - P_s} = \frac{2}{d k_L} \left(\frac{38,27}{\pi} \right)^2 s^{2,45} \left(\frac{P_o - P_s}{d} \right)^{0,387} \quad (5.16.)$$

Voor $0,5 < \frac{P_o - P_s}{d} < 3$ geldt binnen 25% nauwkeurigheid

$\left(\frac{P_o - P_s}{d} \right)^{0,387} = 1$. Zonder aanstroomweerstand zou gelden

$\frac{P_o - P_s}{d} = 1,37$ als de zetting instabiel wordt. Met aanstroomweerstand wordt dat getal lager. Gezien het oriënterend karakter van de

berekeningen stellen we echter voor de eenvoud:

$\left(\frac{P_o - P_s}{d} \right)^{0,387} = 1$. Voor dat geval is de aanstroomweerstand voor de verschillende spleetbreedtes gegeven in fig. 7. Hierbij is er van uitgegaan dat $d = 0,1$ m en $K_T = 3,39 * 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}^2$.

Bij spleten groter dan 0,4 cm blijkt de aanstroomweerstand dominant te worden.

Interessant is het om de aanstroomweerstand van een gat in de glooiing te berekenen.

Voor een gat van 58 mm geldt volgens het doorlatendheidonderzoek [6]:

$$Q_g = 0,0423 * 0,272 * i^{0,593}$$

$$\approx 0,0115 * i^{0,5} = 0,0115 * \left(\frac{P_s - P_b}{d} \right)^{0,5} \quad (5.17.)$$

Voor de aanstroomweerstand geldt (5.14.):

$$P_R - P_S = \frac{8}{3k_T} \left(\frac{Q}{2\pi}\right)^2 \frac{1}{S^3} \quad (5.14.)$$

Wanneer we voor Q, 5,15 invullen wordt (5.14.):

$$\frac{P_R - P_S}{P_S - P_O} = \frac{8}{3d k_T} \left(\frac{0,0115}{2\pi}\right)^2 \cdot \frac{1}{S^3} \quad (5.16.)$$

Invullen levert voor dezelfde waarden van d en K_T als in fig. 7 en $s = 58$ mm:

$$\frac{P_R - P_S}{P_S - P_O} = 135 \quad (5.17.)$$

Bij de in het Oesterdamonderzoek gebruikte gaten in de blokken was de aanstroomweerstand dus 135x de stromingsweerstand van het gat. De doorlatendheid van de zetting met gaten werd in het doorlatendheidsonderzoek opgegeven als:

$$k_{\text{zetting}} = \frac{306 * s^{1,73}}{i^{0,307}} + \frac{0,0115}{i^{0,407}} \quad (5.18.)$$

waarin de laatste term de doorlatendheid van het gat voorstelt. De gebruikte spleetbreedte bij het Oesterdamonderzoek is 0,7 mm. Uit fig. 6 blijkt dat de doorlatendheid van de spleet nauwelijks beïnvloed wordt door de aanstroomweerstand. Voor het gat blijkt echter uit vergelijking 5.17. de aanstroomweerstand dominant.

CO-258901/141

$$k_T = 3.39 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}^2$$

Dikte steenzetting 0.1m

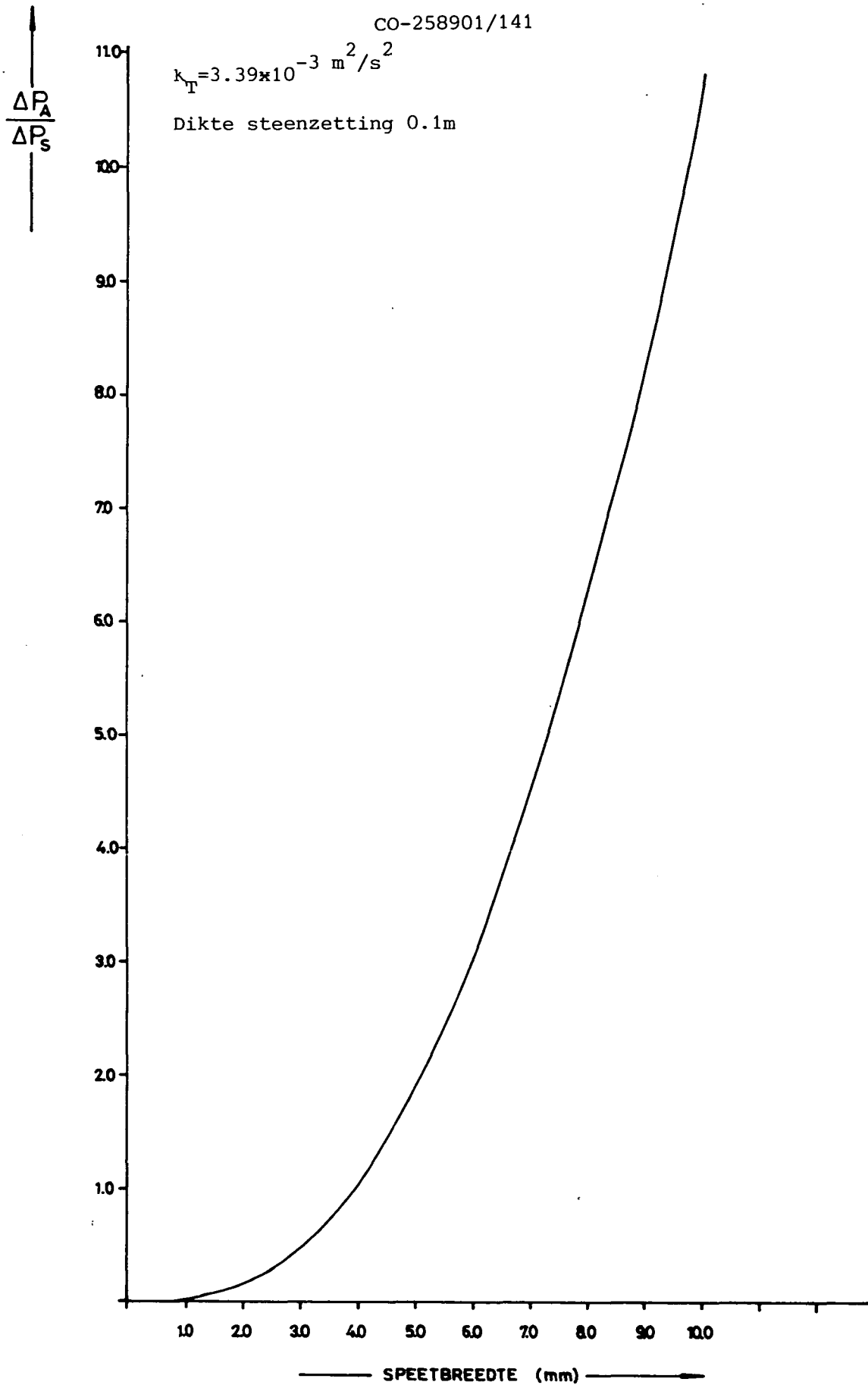


fig.7: Verhouding tussen aanstroomweerstand (P_A) en spleetweerstand (P_S) bij verschillende spleetbreedtes en turbulente stroming in het filter.

De doorlatendheid van het gat is dus maar $\frac{1}{1 + 135}$ maal die uit formule 5.18., zodat, rekening houdend met de aanstroomweerstand, formule 5.18. wordt:

$$k' = \frac{300 * s^{1,73}}{i^{0,3}} + \frac{8,5 * 10^{-5}}{i^{0,4}} \quad (5.19.)$$

Voor een spleetbreedte van 0,7 mm geldt nu:

$$k' = \frac{10^{-3}}{i^{0,3}} + \frac{8,5 * 10^{-5}}{i^{0,4}} \quad (5.20.)$$

Het aanbrengen van de gaten doet de doorlatendheid met ongeveer 8,5% toenemen en dit is veel minder dan op grond van de grootte van de gaten is te verwachten. Het is dan ook begrijpelijk dat de resultaten van het Deltagootonderzoek met of zonder gaten veel minder afweken dan verwacht werd.

6. Schaling Scheldegootonderzoek en Deltagootonderzoek ten behoeve van de Oesterdam

Tijdens het modelonderzoek ten behoeve van de Oesterdam in de Deltagoot (schaal 1 : 2) en de Scheldegoot (schaal 1 : 10) is getracht de schaling zo uit te voeren, dat ook grondmechanisch van een echt schaalmodel gesproken kan worden. In het verdere onderzoek is duidelijk geworden dat voor goede schaling met name de schaling van de doorlatendheid van belang is.

In [5] is aangetoond dat de doorlatendheid moet schalen met de wortel uit de lengteschaal. De lek lengte parameter schaalt dan evenredig met de lengteschaal.

Recent is onderzoek uitgevoerd naar de doorlatendheid van materialen, gebruikt in de schaalmodellen en prototypen [4]. Met de resultaten van dit onderzoek kan worden onderzocht in hoeverre de schaling juist is uitgevoerd.

In het volgende zal eerst worden nagegaan in hoeverre het Scheldegootmodel representatief is voor het Deltagootmodel. Daarna zal worden nagegaan in hoeverre het Deltagootmodel representatief is voor het prototype.

Vergelijking Scheldegootmodel met Deltagootmodel

Resultaten van metingen van de doorlatendheid van de filterlaag onder de steenzetting in het Deltagootmodel en het Scheldegootmodel zijn respectievelijk

$$q_D = 0,06 * i^{0,55} \text{ en } q_S = 0,03 * i^{0,65}$$

waarin de index (D) staat voor het Deltagootmodel en (S) voor het Scheldegootmodel.

Voor goede schaling moet gelden:

$$q_S = \frac{1}{5} \sqrt{5} q_D$$

Voor goede schaling had de doorlatendheidsformule voor het Scheldegoot-onderzoek dus moeten zijn:

$$q_s = 0,027 * i^{0,55}$$

De afwijking met de gemeten waarde is zo klein dat zonder meer gesteld kan worden dat de doorlatendheid van de filterlaag goed geschaald is, hetgeen overeenkomt met de conclusies over de doorlatendheid van de filterlaag in 'Schaalbeschouwingen' [5].

Voor goede schaling moet volgens [5] gelden dat de doorlatendheid van de zetting schaalt met de wortel uit de lengteschaal.

In "Vergelijking doorlatendheidsonderzoeken en consequenties voor schaalregels" [7] is aangetoond dat schaling van de spleetbreedte afhankelijk is van het stromingstype en welke stromingsweerstand dominant is. De spleetbreedte tussen de blokken van het Deltagootmodel van de Oesterdam was vrij klein zodat de stroming waarschijnlijk laminair is. Voor deze kleine spleetbreedten bleek in hoofdstuk 5 de aanstroomweerstand verwaarloosbaar, zodat ook nu net als in [7] de doorlatendheid als functie van de spleetbreedte te bepalen is door combinatie van de laminiare spleetweerstand met de in- en uitstroomweerstand. Voor de bepaling van de in- en uitstroomweerstand kunnen de resultaten van het doorlatendheidsonderzoek [8] worden gebruikt, maar ook nu moet aangenomen worden dat een gedeelte van de spleten door het onderliggende grind is afgedekt. Daarom wordt aangenomen dat de doorlatendheid t.g.v. de in- en uitstroomweerstand $n/100$ maal de gemeten waarde is uit [8] met de blokken op rooster. n is dan de porositeit van de filterlaag in procenten.

Met deze uitgangspunten en de formules van [7] en [8] is de doorlatendheid van de zetting te geven als functie van de spleetbreedte voor zowel het prototype, het Deltagoot-model en het Scheldegootmodel van de Oesterdam. De resultaten zijn gegeven in fig. 8 voor $i = 100\%$ hetgeen een redelijk gemiddelde lijkt voor een losse zetting op moment van bezwijken.

De vergelijking tussen het Deltagootmodel en het Scheldegootmodel is nu heel eenvoudig. De spleetbreedte in het Deltagootmodel was gemiddeld 0,7 mm. Volgens figuur 8 komt dit overeen met een doorlatendheid van $1,1 * 10^{-3}$ m/s. De doorlatendheid van de zetting in de Scheldegoot moet $\sqrt{5}$ maal kleiner zijn dus $4,9 * 10^{-4}$ m/s hetgeen overeenkomt met een spleetbreedte van ongeveer 0,26 mm.

De spleetbreedte tussen de blokken is in het Scheldegoot-onderzoek niet gemeten, zodat niet meer nagegaan kan worden in hoeverre het Scheldegootmodel representatief was voor het Deltagootmodel.

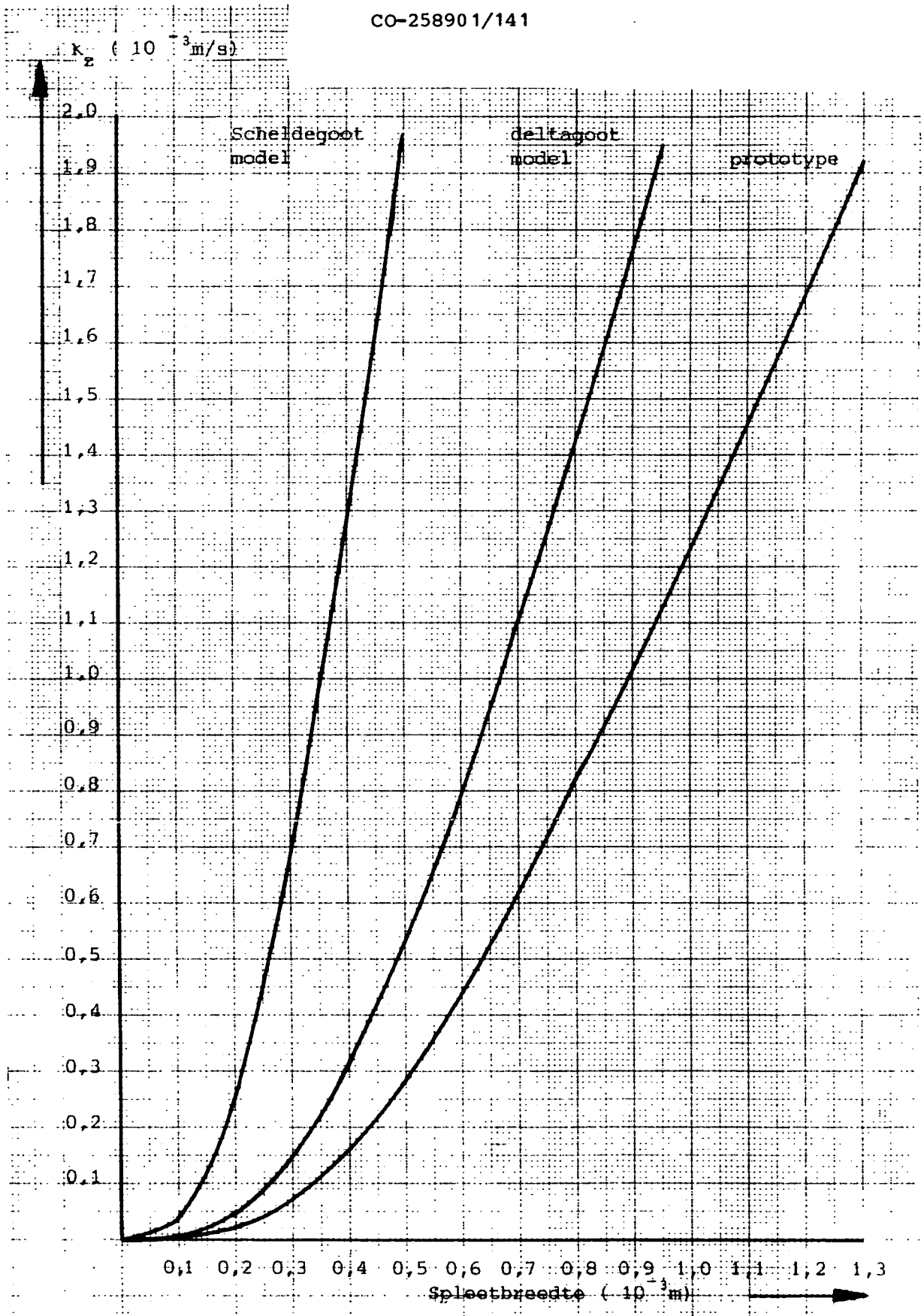


fig. 8: De doorlatendheid van de zetting bij $i = 100\%$ voor verschillende spleetbreedten bij het prototype en het Deltagoot en Scheldegootmodel van de Oesterdam

Vergelijking Deltagootmodel met prototype

De doorlatendheid van de filterlaag in het prototype moet, zoals uit bovenstaande is gebleken, $\sqrt{2}$ maal groter zijn dan de doorlatendheid van de filterlaag in het Deltagootmodel. Bij de metingen is gevonden dat, binnen de meetnauwkeurigheid, de doorlatendheid van het prototypemateriaal ook $\sqrt{2}$ maal groter is dan die van het gebruikte filtermateriaal in de Deltagoot, zodat van goede schaling sprake is.

Voor de schaling van de doorlatendheid van de steenzetting is ook nu weer gebruik te maken van fig. 8. De doorlatendheid in het prototype moet $\sqrt{2}$ maal zo groot zijn.

Dit betekent, dat de schaling van prototype naar model goed is uitgevoerd als de spleetbreedte in het prototype ongeveer 1,15 mm is.

Nu wordt de invloed van de doorlatendheid van de steenzetting op de stabiliteit van deze bepaald door de lek lengte parameter λ . Het is gebleken dat $\lambda \sim \sqrt{1/k'}$, waarin k' de doorlatendheid van de zetting is. een fout in de schaling van k' geeft dus een fout in de schaling van λ die slechts 0,5 maal zo groot is.

Uit bovenstaande volgt, dat de schaling van de doorlatendheid van de filterlaag goed is uitgevoerd en de schaling van de doorlatendheid van de toplaag niet precies is te achterhalen, maar waarschijnlijk ook redelijk is. Geconcludeerd kan daarom worden dat het Deltagootmodel van de Oesterdam representatief is voor het prototype.

Referenties

1. Sellmeijer, J.B.
Overdrukken op steenzettingen door drukhoogtegolven
M 1795, deel IV, WL CO-25578/45, LGM, juli 1982.
2. Boyce, W.E., Di Prima, R.C.
Elementary differential equations and boundary value problems
John Wiley and sons, Inc. (1969).
3. Grootschalig onderzoek ten behoeve van de Oesterdam taludbekleding van gezette steen, fase 1.
M 1795, deel VI, WL, CO-258840/7 LGM, juli 1982
4. Taludbekleding van gezette steen, fase 2
M 1795/M1881 deel VII WL, CO-258901/118 LGM, september 1983
5. Kenter, C.J.
Schaalbeschouwing grondmechanische aspecten
M 1795, deel IV, WL, CO-25578/45 LGM, juli 1982
6. "Doorlatendheid van de steenzetting"
Uit: Taludbekleding van gezette steen, fase 2.
M 1795 - 1881, deel VII WL, CO-258901 LGM.
7. Bezuijen, A.
Vergelijking doorlatendheidonderzoeken en consequenties voor schaalregels.
Uit: Taludbekleding van gezette steen, fase 2.
M 1795 - 1881, deel VII WL, CO-258901 LGM.

APPENDIX

Numerieke oplossing differentiaalvergelijking

De vergelijkingen 3.12 en 3.35 zijn beiden te schrijven als:

$$(m + y) \frac{dy^2}{dt^2} + c \frac{dy}{dt} + g = \frac{P_o - gd (S_b - S_w)}{S_w} \quad (A1)$$

met m en c voor 3.12 en 3.35 verschillende constanten.

Deze vergelijking is op te lossen door over te gaan op eindige differenties. Gebruikmakend van de zogenaamde centrale differenties kunnen we schrijven:

$$\frac{dy}{dt} \approx \frac{0,5 (y_{t+\Delta t} - y_{t-\Delta t})}{\Delta t} \quad (A2)$$

en

$$\frac{d^2 y}{dt^2} = \frac{y_{t+\Delta t} - 2y_t + y_{t-\Delta t}}{\Delta t^2} \quad (A3)$$

met

$$F = \frac{P_o - gd (S_b - S_w)}{S_w} \quad (A4)$$

kunnen we voor (A1) nu schrijven:

$$y_{t+\Delta t} = \frac{(M+y_t)(2y_t - y_{t-\Delta t}) + F\Delta t^2 + 1/2 Cy_{t-\Delta t} \Delta t - gy_t \Delta t^2}{(M+y_t + 0,5 C \Delta t)} \quad (A5)$$

Deze vergelijking is op te lossen voor elke t als y_o en $y_{o-\Delta t}$ bekend zijn. Uit de randvoorwaarden volgt dan:

$$y_o = y_{o-\Delta t} = 0$$

Voor voldoende klein tijdstip is de oplossing van A5 zonder noemenswaardige fout te vergelijken met de oplossing van A1.

A5 is opgelost met behulp van een HP-41 zakrekenmachine. In fig. A1 zijn de resultaten vergeleken met die van de benaderende analytische oplossing zoals gegeven in hoofdstuk 2.1. De overeenkomst met de oplossing van vergelijking 14 blijkt heel goed, maar de verwaarlozing van $y \frac{dy}{dt}$ in vergelijking 35 blijkt aanleiding te geven tot grotere afwijkingen, maar de benadering blijkt goed bruikbaar als de uitwijkingen kleiner zijn dan 10 cm, dus voordat instabiliteit ontstaat en voordat de uitwijking maximaal is. Dit is voor deze berekening het interessantste gebied.

De in fig. 4 gegeven krommen zijn dus bruikbaar.

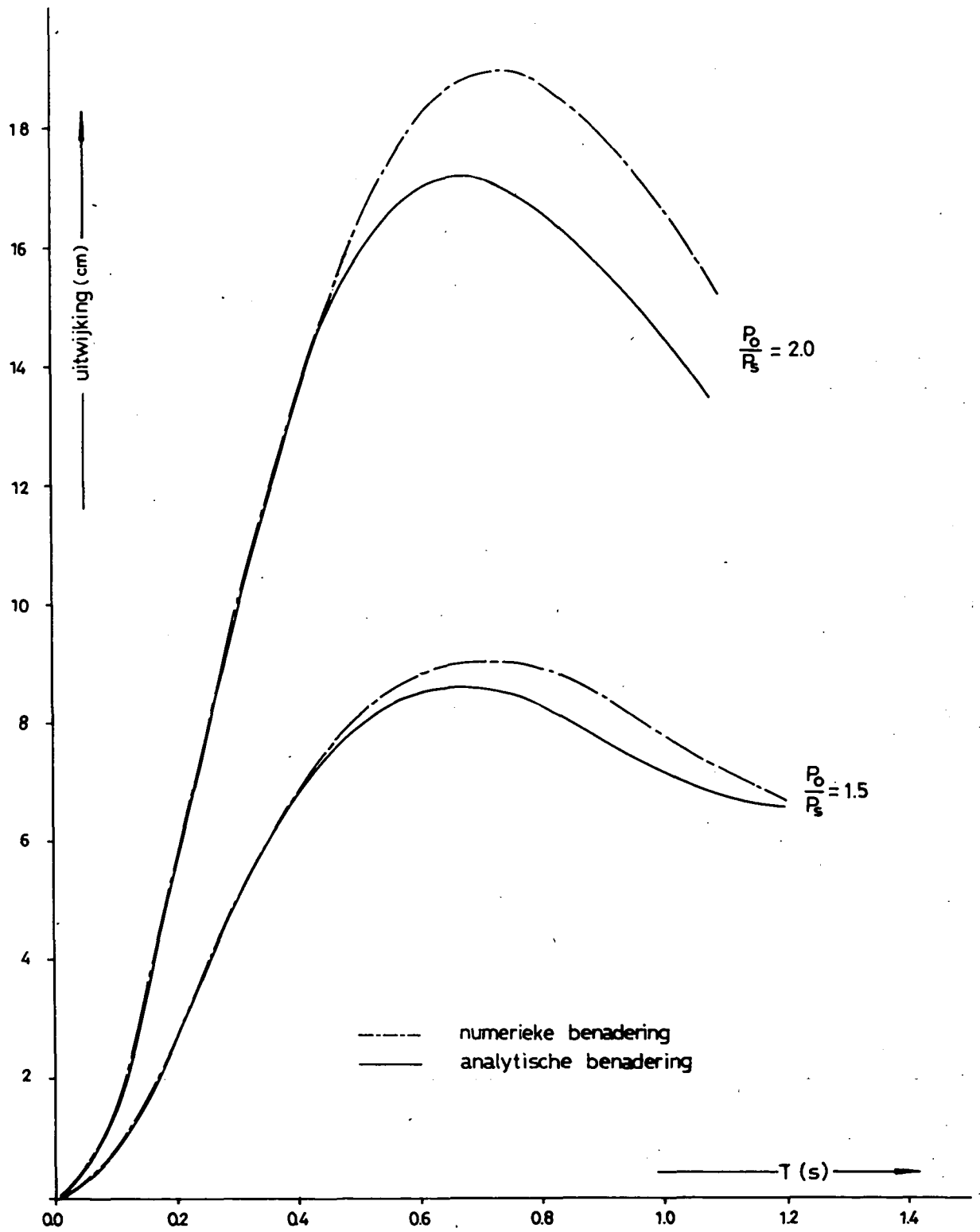


fig. A1: vergelijking numerieke en benaderende analytische oplossing

waterloopkundig laboratorium postbus 177 2600 MH delft
laboratorium voor grondmechanica postbus 69 2600 AB delft