

2e EXEMPLAAR

waterloopkundig laboratorium
delft hydraulics laboratory

stormvloedkering Oosterschelde

afdichtingseigenschappen grindworsten

AFGEHANDELD

verslag modelonderzoek

R 1366

november 1981

BIBLIOTHEEK
10. DEC. 1981 Waterloopkundig Laboratorium
Postbus 177 - DELFT

2e EXEMPLAAR

stormvloedkering Oosterschelde

afdichtingseigenschappen grindworsten

verslag modelonderzoek

R 1366

november 1981

INHOUD

	blz.
1. <u>Inleiding</u>	1
1.1 Opdracht en doel van het onderzoek.....	1
1.2 Konklusies.....	2
2. <u>Nadere beschouwing over onderloopsheid</u>	3
3. <u>Opzet en uitvoering van de proeven</u>	7
4. <u>Resultaten van het onderzoek in de filterbak</u>	9
4.1 Invloed flexibiliteit van de constructie.....	9
4.1.1 Referentieproef met een starre constructie (T1).....	9
4.1.2 Grindworst voorzien van een waterdicht omhulsel.....	9
4.2 Invloed waterdoorlatendheid grindworst.....	10
4.3 Invloed bovenbelasting (T4 en T5).....	11
4.4 Invloed afwezigheid omhulsel van de grindworst (T6).....	12
4.5 Grindworst direct geplaatst op de blokkenmat (T7 en T8).....	13
4.6 Reducerende werking van schuimrubberflappen onder de grind- worst (T9 ... T14).....	13
4.7 Invloed van het aanbrengen van een vervalspreider op de blokken- mat	15
5. <u>Potentiaalverloop bij de grindworsten volgens SEEP</u>	17
6. <u>Nadere beschouwing over de toepassing van de vervalspreider op de blokkenmat</u>	18
6.1 Uitvoeringson nauwkeurigheden.....	18
6.2 Invloed cyclische belasting.....	19

LITERATUUR

TABEL

FIGUREN

FIGUREN

- 1 Filterbak Lith
- 2 Proefopstellingen T1...T4
- 3 Proefopstellingen T5...T8
- 4 Proefopstellingen T9...T16
- 5 Potentiaallijnen en snelheden, T6
- 6 Potentiaallijnen en snelheden, T16

STORMVLOEDKERING OOSTERSCHELDE

AFDICHTINGSEIGENSCHAPPEN GRINDWORSTEN

1. Inleiding

1.1 Opdracht en doel van het onderzoek

In het kader van het onderzoek voor de stormvloedkering in de Oosterschelde werd in opdracht van de Hoofdafdeling Waterloopkunde van de Deltadienst van de Rijkswaterstaat onderzoek verricht naar de afdichtende eigenschappen van grindworsten. De rondom de pijlers aan te brengen grindworsten moeten zorgen voor een goede afsluiting van de groutmassa en moeten tevens voorkomen dat een eventueel onder de pijler aanwezige zandlaag uitspoelt. Verondersteld wordt, dat er zich na het positioneren van de pijler en het neerlaten van de grindworst een laag zand van 0,2 m dikte bevindt, zowel onder de pijler als onder de grindworst. Tengevolge van verval en golven ontstaan er verhangen in de genoemde zandlaag, die bij overschrijding van een kritieke waarde erosie van zanddeeltjes kan veroorzaken, waarbij een onder de grindworst doorlopend geultje kan ontstaan. Dit verschijnsel wordt "piping" of onderloopsheid genoemd. Aangezien de grindworst een zekere stijfheid bezit, is het mogelijk dat de grindworst het geultje kan overbruggen. In dit geval zijn er twee mogelijkheden, te weten:

- het kanaaltje breidt zich in breedterichting uit, waardoor de taluds van het geultje steeds flauwer worden en de grindworst op den duur bijzakt. Verondersteld wordt dat het erosieproces dan stopt.
- het geultje breidt zich in lengterichting uit. In dit geval blijven de taluds steil en bestaat de mogelijkheid dat door het stabiele geultje steeds meer zand van onder de pijler weg gevoerd wordt. Deze situatie is ongewenst, omdat dit ontoelaatbare zettingen van de pijler tot gevolg kan hebben.

Het doel van het onderzoek is na te gaan, in hoeverre de grindworst in staat is het migratieproces van zand onder de pijler tegen te gaan.

Het onderzoek werd uitgevoerd in samenwerking met de Afdeling Ontwikkeling Nieuwe Werkmethoden van de Deltadienst van de Rijkswaterstaat, het Laboratorium voor Grondmechanica en het Waterloopkundig Laboratorium. De berekeningen met het computerprogramma voor grondwaterstromingsproblemen SEEP werden uitgevoerd

door ir. J.M. de Wit van het Laboratorium voor Grondmechanica. Het onderzoek in de filterbak bij de stroomgoot Lith werd uitgevoerd door ir. J.L.M. Konter van het Waterloopkundig Laboratorium in samenwerking met ing. M.L.P. van Campen van de Afdeling Ontwikkeling Nieuwe Werkmethoden van de Deltadienst van de Rijkswaterstaat. Dit verslag werd samengesteld door ir. J.L.M. Konter.

1.2 Konklusies

- 1 De grindworst is door de stijfheid van het doek niet in staat bij te zakken in door onderloopsheid ontstane geultjes in het zand onder de grindworst.
- 2 Schuimrubberflappen van voldoende afmetingen en elasticiteit kunnen het erosieproces afremmen en stoppen. In verband met de veroudering van het schuimrubber is dit geen praktische oplossing.
- 3 Een granulair filter, bestaande uit een sterk gegradeerd materiaal, zakt wel bij in de door onderloopsheid ontstane geultjes, maar uit het bijgezakte filtermateriaal spoelen de fijne fracties weg. Door de aldus ontstane grove grindlaag (drain) kan erosie van zand plaatsvinden.
- 4 Indien de grindworst direct op de bovenzijde van de fundatiemat wordt geplaatst, dus wanneer er geen zandlens aanwezig is, is er een goede zandafdichtende werking te verwachten.
- 5 Door de bovenzijde van de fundatiemat ter plaatse van de grindworst waterdicht te maken, wordt het ontstaan van het aandrijfmechanisme voor onderloopsheid verhinderd. Grote uittreeverhagen in het zandbed en het daarmee gepaard gaande zandtransport zal dan niet meer plaatsvinden, mits de grindworst waterdoorlatend is.
- 6 Bij een eventuele wijziging in de uitvoering van de constructie pijler-grindworst-fundatiemat, kan het risico voor onderloopsheid worden geschat met behulp van het door berekening verkregen potentiaalbeeld.

2. Nadere beschouwing over onderloopsheid

Behalve het uitspoelen van fijn materiaal op de scheiding van filterlagen bestaat ook de mogelijkheid van wegspoelen van korrels op het grensvlak tussen vaste lichamen en een korrelskelet bij aanwezigheid van een kwelstroom. De hierdoor ontstane geulvorming onder de vervalkerende constructie wordt onderloopsheid genoemd.

Een vergelijkbaar proces met hetzelfde resultaat kan zich voordoen binnen het korrelmateriaal, wanneer de korrelverdeling zodanig is samengesteld, dat het fijnste materiaal wordt uitgespoeld. Als gevolg hiervan ontstaan relatief doorlatende gangen, waardoor de korrelsamenhang verbroken kan worden en onderloopsheid kan optreden. In dit geval wordt gesproken van suffosie of interne erosie.

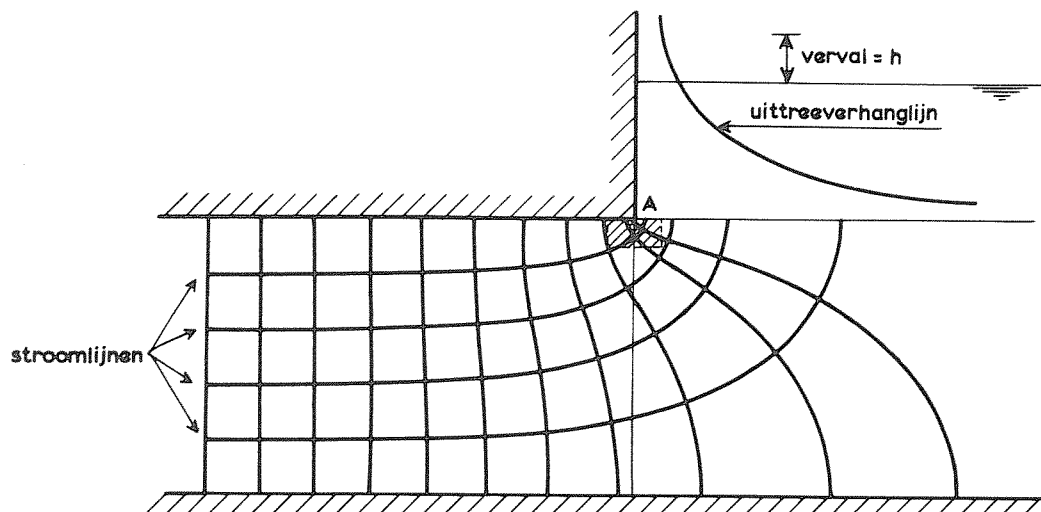
Uitspoelen van korrels zal aanvangen wanneer het plaatselijk optredende verhang een kritieke waarde overschrijdt. In het geval van bovenbelasting geldt voor een verticale grondwaterstroom

$$i_{\text{kritiek}} = (1-n) \frac{\rho_z - \rho_w}{\rho_w} + \frac{P}{F \cdot l \cdot \rho_w \cdot g}$$

waarin:

n	= poriëngehalte	(-)
ρ_z	= dichtheid zand	(kg/m ³)
ρ_w	= dichtheid water	(kg/m ³)
P	= bovenbelasting	(N)
F	= oppervlakte eenheid	(m ²)
l	= dikte zandlaag	(m)
g	= versnelling van de zwaartekracht	(m/s ²)

Bij overschrijding van het kritieke verhang wordt het verticale evenwicht van het korrelpakket verbroken. Uitspoelen van korrels zal het eerst plaatsvinden waar de effectieve korrelspanning gering is, derhalve op plaatsen waar geen bovenbelasting op het korrelskelet aanwezig is en dan daar waar een groot uit-treeverhang aanwezig is, zoals bijvoorbeeld bij punt A in figuur 2.1 (zie blz. 4).



Figuur 2.1 Potentiaalbeeld bij de beëindiging van een waterdichte constructie

Wanneer mede als gevolg van de horizontale component van de waterbeweging onder de constructie tevens het horizontale evenwicht wordt verbroken, zal materiaal in horizontale richting worden meegevoerd. Door terugschrijdende erosie zal na enige tijd onder de constructie een doorgaande geul kunnen worden gevormd.

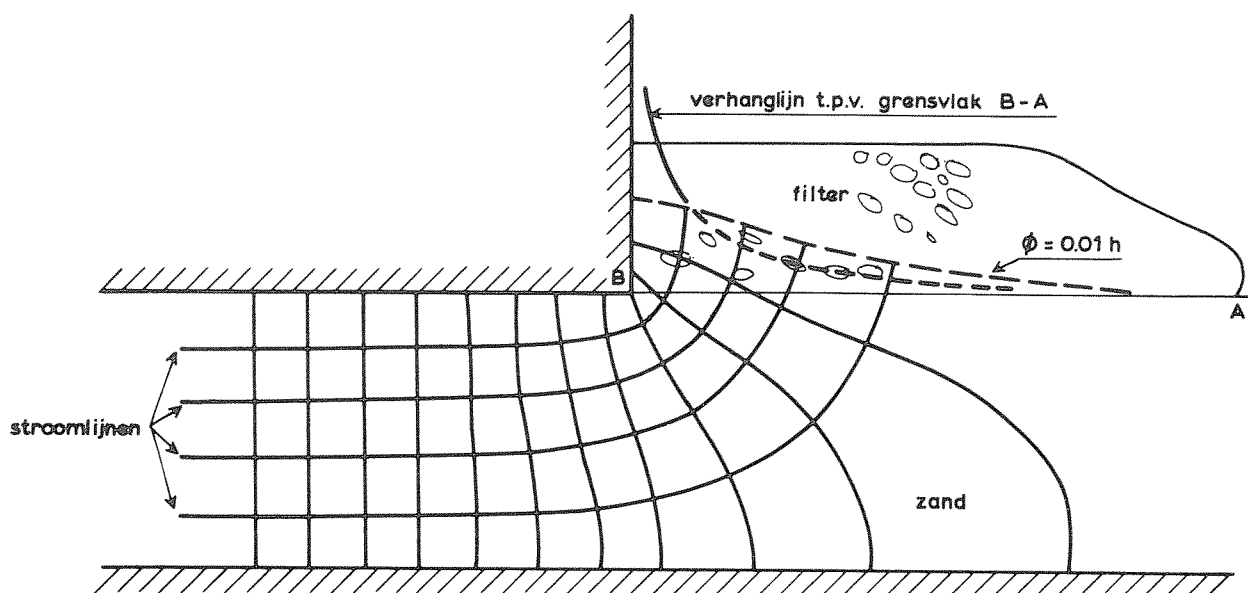


Figuur 2.2 Potentiaalbeeld rondom een kanaaltje in een horizontale doorsnede

Het erosieproces zal beginnen op de meest kwetsbare plek, bijvoorbeeld bij een inhomogeniteit in de bodem. Uit figuur 2.2 blijkt dat het proces niet uit zichzelf zal stoppen. Wanneer zich eenmaal een geultje gevormd heeft, neemt de

concentratie van potentiaallijnen niet af, maar zelfs nog iets toe. Ook dwars op de stroomrichting is een concentratie van potentiaallijnen waar te nemen. Tezamen met de verticale stromingscomponent zal deze concentratie van potentiaallijnen ook een uitbreiding van de geul in dwarsrichting tot gevolg kunnen hebben. In de praktijk worden dan ook vaak meanderende geultjes gevonden met een doorsnede ter grootte van enkele vierkante centimeters.

In het algemeen probeert men onderloopsheid te voorkomen door het toepassen van zo groot mogelijke kwallengten (verlaging van het gemiddelde verhang) en of door toepassing van een filterconstructie benedenstrooms. Onder andere Griffith [1] en Lane [2] hebben dit verschijnsel bestudeerd en hebben criteria opgesteld voor de toelaatbare gemiddelde verhangen bij stuwdammen. Voor stationaire langdurige belastingen worden toelaatbare gemiddelde verhangen genoemd van 0,06 à 0,1 voor fijn zand, indien geen filterconstructie wordt toegepast. Bij toepassing van een filterconstructie worden de uittreeverhangen (bij A) gereduceerd en wordt het zand ter plaatse van het maximaal optredende verhang (bij punt B) tegengehouden (zie figuur 2.3).



Figuur 2.3 Potentiaalbeeld bij de beëindiging van een waterdichte constructie en toepassing van een filter

Bij het onderzoek naar de afdichtende werking van de grindworsten staan de volgende vragen centraal:

- In hoeverre zorgen de grindworsten voor een voldoende filterwerking?
- Als de grindworsten niet voldoende als filter werken, bijvoorbeeld door het waterdicht zijn van het omhulsel, is dan de flexibiliteit van het omhulsel voldoende om de door de stroming ontstane geultjes af te dichten en daardoor het erosieproces te stoppen?
- Kan, door het lokaal toepassen van waterdichte folies het potentiaalbeeld dusdanig beïnvloed worden, dat grote uittreeverhangen niet optreden, waardoor het ontstaan van geultjes door de stroming wordt voorkomen?

3. Opzet en uitvoering van de proeven

Voor een goede reproductie van het verschijnsel in het model is het van belang dat de mogelijkheid tot bijzakken van de grindworst in de (al dan niet van tevoren ontstane) geultjes goed in het model wordt weergegeven. Ook de filtereigenschappen (waterdoorlatendheid, zanddichtheid) van de materialen moeten aan bepaalde eisen voldoen. Deze eisen resulteren in een zogenaamde elementproef, waarbij het gedeelte van de pijler nabij de grindworst op prototypeschaal wordt ingebouwd en waarbij het stromingsbeeld in het element in model en prototype identiek zijn. De materialen werden daarom niet op schaal aangebracht.

In verband met de afmetingen van de grindworst (circa 2,5 m breed en 1 m hoog) en de in te stellen verhangen (orde 1,0) werd in eerste instantie gedacht aan een proef in de stroomgoot te Lith. Gezien de relatief lange uitvoeringstijd van de proeven bij een dergelijke grote proefopstelling werd besloten eerst een aantal elementproeven uit te voeren in een filterbak opgesteld naast de stroomgoot in Lith (zie figuur 1). In verband hiermee moest de breedte van de grindworst van 2,50 m worden teruggebracht tot 0,50 m.

In het prototype zal tengevolge van het verval over de kering onder de pijler in het fundatiebed een gemiddeld verhang ontstaan ter grootte van het quotiënt van verval en lengte van de pijler. Dit gemiddelde verhang in de bovenste laag van het fundatiebed werd ook in het model ingesteld.

In de filterbak werd daartoe de bovenste laag van het fundatiebed ingebouwd (bestaande uit grind 0,3 - 32 mm), een gedeelte van de pijler met de grindworst, bestaande uit een kunststoffilter gevuld met grind 0,3 - 32 mm, en daartussen een zandlens ter dikte van 0,2 m (zie figuur 2, T2, T3 en T4). De breedte van het schot (de pijlerrand) bedroeg bij T2...T6A 0,1 m. De breedte van de grindworst bedroeg 0,5 m.

Het onderzoek werd begonnen met een referentieproef (T1) waarbij een stijve plaat op een zandlaag was geplaatst (zie figuur 2). De breedte van de plaat was 0,5 m overeenkomstig de breedte van de grindworst bij de volgende proeven. In de stalen achterwand van de filterbak waren stijgbuisaansluitingen aangebracht, waaruit globaal het potentiaalbeeld afgeleid kon worden. Voor het meten van de locale uittreeverhangen zou een dermate groot aantal stijgbuisaansluitingen noodzakelijk zijn dat het stroombeeld en het erosieproces zou worden verstoord. De metingen van de stijghoogten werden dan ook vrijwel uitsluitend gebruikt voor het instellen van de randvoorwaarden.

Het erosieproces kon visueel worden gevolgd via de glazen wand aan de voorzijde van de filterbak en aan de benedenstroomse zijde van de grindworst. De ontwikkeling van de geulen midden onder de grindworst en aan de achterwand kon tijdens de proeven niet worden gevolgd. Wel kon door het voorzichtig afbreken van het model bij bepaalde proeven het patroon van de geulen zichtbaar gemaakt worden.

Uit het verloop van de stijghoogten bij de proeven T2...T6A bleek dat voor de situaties met een waterdoorlatende grindworst de breedte van het schot te smal was, waardoor er een kromming van stroomlijnen onder het schot ontstond. Alhoewel deze kromming van stroomlijnen van geringe invloed is op de voor het erosieproces van belang zijnde uittreeverhangen werd het schot verbreed tot 0,6 m. Het stroombeeld werd hierdoor meer in overeenstemming gebracht met het stroombeeld in het prototype, zijnde een horizontale stroming onder de pijlers. Uit de figuren 5 en 6 volgt dat de stroming onder het 0,6 m brede schot horizontaal is.

Door in het model dezelfde materialen voor grindworst en uitvullaag te kiezen als in het prototype, stelde ook het potentiaalbeeld rondom en in de grindworst zich op overeenkomstige wijze in.

Met deze eenvoudige elementproeven werd onderzoek verricht naar de invloed op de ontwikkeling van de geulvorming onder de grindworst van: (zie tabel 1)

- de flexibiliteit van de "grindworstconstructie"
- de waterdoorlatendheid van de grindworst
- de bovenbelasting op de grindworst
- de stijfheid van het omhulsel van de grindworst
- de reducerende werking van schuimrubber onder de grindworst
- een vervalspreider op de blokkenmat.

Tijdens het onderzoek in de filterbak werden ook een aantal berekeningen uitgevoerd met het rekenprogramma SEEP. Met behulp van dit rekenprogramma kon het potentiaalbeeld rondom de grindworst goed worden berekend. Uit de resultaten van het onderzoek in de filterbak en de berekeningen volgde dat het verschijnsel niet werd beïnvloed door de breedte van de grindworst, zodat de proeven in de stroomgoot overbodig werden en daarom niet werden uitgevoerd.

4. Resultaten van het onderzoek in de filterbak

4.1 Invloed flexibiliteit van de constructie

4.1.1 Referentieproef met een starre constructie (T1)

Bij proef T1 werd een stijve plaat op een zandlaag geplaatst waarover een verval kon worden aangebracht. Reeds bij een gering verval ($\Delta h = 0,15$ m), of gemiddeld verhang van $0,15/0,5 = 0,3$ treedt zand uit bij A, waarna een terugschrijdend geultje ontstaat. Wanneer dit geultje (doorsnede circa 1 cm^2) eenmaal de bovenstroomse rand heeft bereikt verloopt het ontgrondingsproces zeer snel. Zettingen van de starre plaat, waardoor het proces zou kunnen stoppen konden uiteraard niet optreden. Deze proef was echter bedoeld als referentie voor de proeven met de flexibeler grindworsten. Proef T1 werd 2 maal uitgevoerd. De kritieke gemiddelde verhangen waarbij de constructie bezweek bedroegen 0,6 en 0,4.

De verschillen in kritiek verhang ontstaan waarschijnlijk door de verschillen in initiële aansluiting van de plaat aan de ondergrond en in de tijdsduur waarover de verschillende verhangen zijn ingesteld. De gevonden waarden zijn hoger dan de voor stuwdammen toelaatbaar geachte gemiddelde verhangen van 0,1 (zie Hfdst.2).

4.1.2 Grindworst voorzien van een waterdicht omhulsel

In proef T2 werd nagegaan of een flexibeler constructie, zoals de grindworst, een door onderloopsheid ontstane geul zou afsluiten en daardoor transport van zand zou voorkomen. De grindworst was aan de onderzijde voorzien van een waterdicht omhulsel. Overeenkomstig de prototypesituatie was onder de 0,2 m dikke zandlaag een laag fundatiebedmateriaal aangebracht. Het fundatiebedmateriaal bestond bij deze proeven uit grind 0,3 - 32 mm, opgebouwd volgens een Füller-kromme.

Om te vermijden dat bij het bezwijken van de constructie teveel erosie zou optreden, werd in het Oosterschelde-zand een zanddicht vlies aangebracht. De opstelling van proef T2 wijkt derhalve enigszins af van de opstelling bij proef T1. Met name door het aanbrengen van de laag fundatiebedmateriaal ontstaat een afwijking van het potentiaalbeeld. Bij de benedenstroomse beëindiging van de grindworst ontstaat een extra omhooggerichte stromingcomponent die in vergelijking met de situatie van T1 het resultaat ongunstig beïnvloedt. De bij T2

waargenomen verschijnselen waren overigens gelijk aan die bij de proef met de stijve plaat (T1). Bij een gering gemiddeld verhang (0,25) trad bij A (zie figuur 2) welvorming op. De wel verplaatste zich in bovenstroomse richting terwijl in benedenstroomse richting zand werd getransporteerd en er een geultje ontstond. Toen de wel de bovenstroomse rand van het schot had bereikt, verliep het ontgrondingsproces zeer snel. Hieruit kan de conclusie worden getrokken dat een waterdichte grindworst niet in staat is het ontstaan van een geultje te voorkomen. Ten opzichte van het relatief kleine geultje gedraagt de grindworst zich als een starre constructie. De grindworst zakt niet bij in het geultje en is derhalve niet in staat het geultje af te sluiten. Wel kan met de flexibeler grindworst een relatief betere initiële aansluiting aan de ondergrond worden verkregen dan met een stijve plaat. Het kritieke gemiddelde verhang waarbij de constructie bezweek bedroeg bij T2: 1,1. Deze waarde moet kwalitatief worden gezien. Ook bij een lager gemiddeld verhang maar met een langere belastingduur zal de constructie naar verwachting bezwijken. Bij de eerste proeven T1...T4 ging echter de interesse uit naar het al dan niet bijzakken van de grindworst en niet naar de exacte waarde van het gemiddelde kritieke verhang.

4.2 Invloed waterdoorlatendheid grindworst

Om het ontstaan van onderloopsheid tegen te gaan wordt vaak een filterconstructie toegepast (zie hfdst.2). In verband hiermee werd de grindworst waterdoorlatend gemaakt. De maximale locale verhangen zouden op moeten treden, daar waar het zand wordt tegengehouden door de met filtermateriaal gevulde grindworst (punt B in figuur 2). Het filtermateriaal in de grindworst bestond bij deze proef uit grind 0,3 - 32 mm, opgebouwd volgens een Füllerkromme. Het kritieke gemiddelde verhang was bij deze proef wat hoger (1,4) dan het kritieke gemiddelde verhang bij de proef met de waterdichte grindworst (1,1). Ook de waterdoorlatende grindworst kon het ontstaan van onderloopsheid niet voorkomen. Mede door de stroming in het fundatiebed ontstaan toch uittreeverhangen bij punt A in figuur 2. Uit een naderhand uitgevoerde SEEP-berekening voor een overigens iets andere geometrie bleek dat, tengevolge van de relatief waterondoorlatende zandlaag onder de grindworst, bij A toch relatief grote uittreeverhangen ontstonden (zie hfdst. 5 en figuur 5).

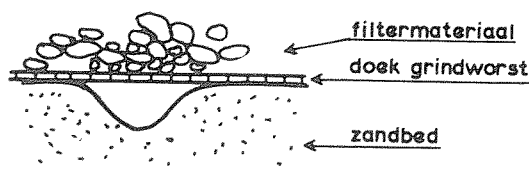
Voor het potentiaalbeeld is er weinig verschil tussen een aan de onderzijde

waterdichte grindworst en een waterdoorlatende grindworst op een relatief waterondoorlatende zandlaag. Vanwege de relatief grote doorlatendheid van het fundatiebedmateriaal zal het grootste deel van het debiet, door deze laag gaan. Bij A treedt dit water weer uit, waardoor een meanderende geul ontstaat van A naar B.

4.3 Invloed bovenbelasting (T4 en T5)

In T4 en T5 werd het effect van een bovenbelasting op het verschijnsel onderzocht. Tengevolge van een bovenbelasting neemt het kritieke verhang voor een verticale stroming toe (zie hfdst.2). Bovendien zou de bovenbelasting meer kracht op de grindworst uit kunnen oefenen en deze beter in de geultjes drukken. Om het verhang in het fundatiebed beter in te kunnen stellen werd bovenstrooms de zandlaag onderbroken (zie figuur 2).

Bij T4 werd het eerst piping waargenomen bij een gemiddeld verhang van 0,8. Het verticale verhang over de zandlaag ter plaatse van A bedroeg circa 1,0. Bij T5, waarin de dikte van de zandlaag werd verminderd tot 0,05 m (zie figuur 3), werd bij een gemiddeld verhang van 0,1 het eerst welvorming waargenomen. Het verticale verhang bij A bedroeg toen circa 0,6. Het gemiddeld verhang werd daarna langzaam opgevoerd tot 0,25. Waargenomen werd dat de geul langs de wand zich langzaam in bovenstroomse richting uitbreidde. Na 2 uur stromen met een gemiddeld verhang van 0,25 werd het erosieproces versneld door het gemiddeld verhang op te voeren naar 0,42. Bij dit verhang bezweek de constructie langs de glaswand. Bij het voorzichtig afbreken van de proefopstelling waren er meerdere geultjes in het zandbed waarneembaar. Gezien de vorm van deze geultjes is het verklaarbaar dat de grindworst niet in staat is de steile taluds van de geultjes te volgen. Door de samenhang in het doek kunnen de geultjes overspannen worden. De bovenbelasting op de grindworst heeft hierop geen invloed, omdat deze bovenbelasting niet of nauwelijks de korrelspanning op de taluds verhoogt.



4.4 Invloed afwezigheid omhulsel van de grindworst (T6)

Omdat het grind 0,3 - 32 mm tot zeer grote verhangen zanddicht is, en granulair materiaal wel kan bijzakken werd proef (T6A) uitgevoerd waarbij het omhulsel van de grindworst werd weggelaten. Bij de vorming van een geultje zou het filtermateriaal het geultje kunnen opvullen. Uit de proef bleek, dat bij A wederom welvorming plaatsvond, hetgeen in overeenstemming is met proef T5, omdat het potentiaalbeeld door de afwezigheid van het omhulsel niet was gewijzigd. Het filtermateriaal (grindworst) zakte nu wel bij, maar er ontstond nu een drain welke werd opgebouwd uit de grovere fracties van het filter. De fijnere fracties bleken te zijn weggespoeld. Omdat het bezwijken van de proefopstelling ook kon zijn veroorzaakt door de geringe dikte van het filter (afstand BC) werd deze proef herhaald met een iets gewijzigde proefopstelling. De hoogte van de grindworst werd ter plaatse van het schot verdubbeld. Bovendien werd het schot verbreed tot 0,6 m. Hiermee werd tevens bereikt dat de stroming onder het schot horizontaal werd, hetgeen meer in overeenstemming is met het prototype (zie ook hoofdstuk 5 en figuur 5 en 6). Bij de proeven T6B ... T16 werd als randvoorwaarde een gemiddeld verhang in het fundatiebed van 0,15 ingesteld (behorend bij een verval van 7,5 m tussen zeezijde en Oosterscheldezijde en een pijlervoet van 50 m). Het gedrag van de grindworst werd bij deze proevenserie derhalve onderzocht bij (extreme) prototype-omstandigheden. Bij proef T6B, waar in het fundatiebedmateriaal een gemiddeld verhang van 0,15 werd ingesteld, ontstond vrijwel direct een gering zandtransport bij punt A, dat continu doorging. Tijdens de proef ontstond er een geul onder het horizontale schot. Deze geul werd aangevuld, waarna er verder geen geulen meer werden waargenomen. Na circa 150 uur werd de proefopstelling afgebroken. Hierbij werd geconstateerd dat het zand onder het zeegrind plaatselijk was weggespoeld. Er werden tot aan het schot doorgaande geulen geconstateerd, welke gevuld waren met de grovere fracties uit het grind 0,3 - 32 mm. Onder het schot werden geen geulen geconstateerd.

Een herhalingsproef gaf reeds na circa 2 uren, tijdens de opbouw van het gemiddeld verhang naar 0,15 een doorgaande geul onder het schot en het grond 0,3 - 32 mm van de grindworst te zien. Dat er inderdaad van een doorgaande geul sprake was kon worden aangetoond met een bovenstroomse injectie van kleurstof en worden afgeleid uit een toename van het debiet met een factor 3. Het zandtransport, dat continue doorging, was echter niet zo groot dat van een

plotseling bezwijken sprake was. De grovere fracties van het zeegrind, die de geultjes opvulden, reduceerden de stroomsnelheden blijkbaar in voldoende mate om bezwijken te voorkomen.

De conclusie die uit T6 getrokken kan worden is dat ook een zanddicht granulaire filter, opgebouwd volgens een Füllerkrumme, niet in staat is onderloopsheid te voorkomen, en de ontstane geultjes voldoende af te dichten. De mogelijkheid bestaat, dat een filter bestaande uit ongegradeerd materiaal wel goede resultaten zal leveren. In verband met zandichtheids- en stroombestendigheidseisen is hiervoor een filter opgebouwd uit meerdere lagen nodig, hetgeen op uitvoeringstechnische bezwaren stuit.

4.5 Grindworst direct geplaatst op de blokkenmat (T7 en T8)

Uit de proeven T7 en T8, waarbij het filtermateriaal in de grindworst met (T7) of zonder (T8) omhulsel direct op de zanddichte blokkenmat werd geplaatst, bleek dat bij het maximaal instelbare gemiddelde verhang in het fundatiebed (circa 0,3) er geen zand van onder het schot werd verplaatst. Dit was ook te verwachten, omdat het filtermateriaal zanddicht is tot zeer hoge stationaire verhangen. Bovendien ontstaat er een gunstiger potentiaalbeeld. Vertikale verhangen aan de benedenstroomse kant van de grindworst treden niet meer op, waardoor ook geen uitspoeling van de fijne fracties uit het filtermateriaal meer plaatsvindt. Het zandvrij maken van de blokkenmat vlak voor het plaatsen van de grindworst levert echter onoverkomelijke uitvoeringstechnische bezwaren op.

4.6 Reducerende werking van schuimrubberflappen onder de grindworst (T9...T14)

Uit het voorgaand onderzoek kan geconcludeerd worden dat de grindworsten niet in staat zijn bij te zakken in de geultjes, die ontstaan door onderloopsheid. De samenhang in het doek verhindert het bijzakken in de geultjes met de steile taluds.

Een materiaal dat deze geultjes wel zou kunnen afdichten is schuimrubber. Het schuimrubber wordt onder invloed van de bovenbelasting van de grindworst en het drempelmateriaal ingedrukt. Vanwege de elasticiteit zal het schuimrubber weer uitzetten als er door onderloopsheid ruimte in het zandbed ontstaat. Om deze gedachtengang te beproeven werden enkele proeven met schuimrubberflappen uitgevoerd (T9, T10 en T12).

Bij proef T9 en T10 werd de onderzijde van de grindworst voorzien van 3 schuimrubberflappen van $0,1 \times 0,1 \text{ m}^2$ (in onbelaste toestand) op onderlinge afstand van 0,1 m. Bij een gemiddeld verhang van 0,15 in het fundatiebedmateriaal werd geen doorgaand zandtransport geconstateerd, zowel bij een waterdoorlatende (T9), als een waterdichte (T10) grindworst. Het schuimrubber bleek voldoende veerkracht te bezitten om de in het begin ontstane geultjes af te dichten. Tijdens proef T9 werd na 80 uur stromen het grind 30 - 150 mm schoongemaakt en al het zand benedenstrooms van de grindworst verwijderd. Bij deze schoonmaak bleek dat de benedenstroomse zijde van de grindworst plaatselijk direkt op het zanddichte vlies lag. De conclusie die hieruit getrokken kan worden is dat de dikte van de schuimrubberlaag ten opzichte van de dikte van de zandlens belangrijk is. Na het aanbrengen van het grind 30 - 150 mm en de bovenbelasting werd nog 60 uur met een gemiddeld verhang van 0,15 in het fundatiebed gestroomd, waarbij geen transport van zand meer werd geconstateerd.

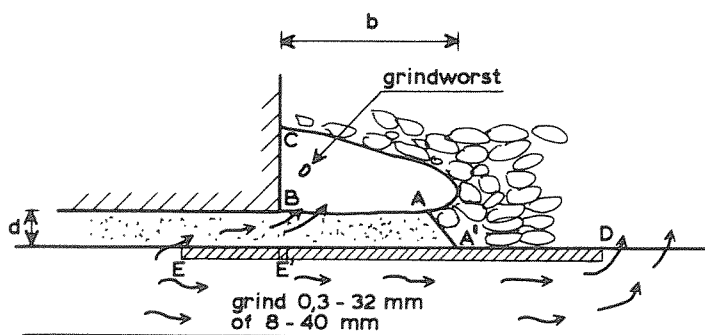
De proef werd ook uitgevoerd met 3 schuimrubberflappen, die in onbelaste toestand 0,05 m in plaats van 0,10 m hoog waren (T12). De dikte van de schuimrubberflappen was nu in onbelaste toestand gelijk aan de dikte van de zandlaag. Bij een gemiddeld verhang van 0,15 in het fundatiebed bleek deze constructie na 4 uren te bezwijken. Daarvoor was een proef uitgevoerd met een schuimrubberflap met een hoogte van 0,03 m in onbelaste toestand (T11). Tijdens de opbouw van het gemiddeld verhang naar 0,1 ontstond echter al een doorgaand zandtransport. Uit de proeven T13 en T14 bleek dat bij toepassing van één schuimrubberflap met een hoogte van 0,1 m aan de benedenstroomse beëindiging ook bij gemiddelde verhangen van circa 0,08 in het fundatiebed doorgaand zandtransport ontstond.

De conclusie, die hieruit getrokken kan worden, is dat het in principe mogelijk is de door onderloopsheid ontstane geultjes in het zand onder de grindworst af te dichten, mits de hoogte van de schuimrubberflappen in onbelaste toestand minimaal 2 maal de dikte van het zandlaagje bedraagt, en het schuimrubber over vrijwel de gehele onderzijde van de grindworst aanwezig is.

Bij de uiteindelijke diktebepaling van de schuimrubberlaag moet rekening gehouden worden met een verminderende veerkracht tengevolge van veroudering van het materiaal. Aangezien geen garanties kunnen worden gegeven over een voldoende veerkracht van het schuimrubber tijdens de levensduur van de kering is dit geen praktische oplossing.

4.7 Invloed van het aanbrengen van een vervalspreider op de blokkenmat

Een (ten aanzien van onderloopsheid) aanmerkelijk gunstiger potentiaalbeeld rondom de grindworsten ontstaat, wanneer de blokkenmat, waar de pijler op rust, ter plaatse van de steunvlakken onder de pijlervoet en de grindworst waterdicht wordt uitgevoerd. De stroming wordt daardoor gedwongen onder de vervalspreider door te stromen en kan uittreden voorbij de benedenstroomse beëindiging van de grindworst. (zie figuur 4.7).



Figuur 4.7

De onderloopsheid veroorzakende grote uittreeverhangen bij A' treden niet meer op. Als bovendien de grindworst waterdoorlatend wordt uitgevoerd zal ook de stroming in de zandlaag geen problemen opleveren, omdat het merendeel van het debiet door de zandlaag in de omgeving van B afvloeit. Naarmate de breedte van de grindworst (b) groter is dan de dikte van de zandlaag (d) zal dit beter gelukken.

Deze constructie werd beproefd met de proefopstelling volgens figuur 4 (T15 en T16). Met het grind 0,3 - 32 mm in de onderste laag (T16) kon een maximaal gemiddeld verhang van 0,3 in deze laag ingesteld worden. Door de grote waterdoorlatendheid van het grind 8 - 40 mm (zie figuur 4), zoals dat volgens het vigerend ontwerp in de bovenste laag van het fundatiebed toegepast zal worden, lukte dat niet bij de proefopstelling T5. Het verval werd in T15 grotendeels opgenomen door ten opzichte van grind 8 - 40 mm waterondoorlatende vlies op het scheidingsvlak DF. Het resultaat van de proeven T15 en T16 was geheel volgens verwachting. Het grootste deel van de uitgaande stroom vindt plaats beneden-

strooms van de vervalspreider en veroorzaakt geen onderloopsheid. Een gedeelte van de stroming treedt uit via het zandlaagje en de grindworst, waarbij echter geen zandtransport tussen vervalspreider en grindworst optreedt, omdat de uit-treeverhangen bij A nu gering zijn.

5. Potentiaalverloop bij de grindworsten volgens SEEP

In de filterbak te Lith kan met behulp van de stijgbuizen slechts een globaal beeld verkregen worden van het optredende potentiaalbeeld.

Om meer informatie te verkrijgen over locale verhangen, met name ter plaatse van de beëindiging van de grindworst, is het potentiaalverloop voor T6 en T16 berekend met het rekenprogramma voor grondwaterstromingsproblemen SEEP (zie [3]).

Uit de potentiaalverdeling van proef T6 (zie figuur 5) blijkt dat de zandlaag tussen de grindworst en het fundatiebed relatief waterdicht is. Hierdoor treedt slechts een gering deel van het water uit bij punt B. De hoofdstroom loopt onder de grindworst en de zandlaag door, waardoor in de zandlaag bij punt A' toch relatief grote uittreeverhangen ontstaan. De uittreeverhangen in de zandlaag bij punt A' kunnen wel worden voorkomen door op het zeegrind een waterdicht membraam aan te brengen (zie figuur 6). Een concentratie van potentiaallijnen treedt op ter plaatse van de beëindiging van de pijler (punt B). De grote verhangen die hiermee gepaard gaan kunnen geen erosie veroorzaken door de aanwezigheid van het filtermateriaal in de grindworst. Aan de benedenstroomse zijde van het waterdichte membraam treden wel grote stroomsnelheden op, maar erosie van zand benedenstrooms van de grindworst is geen probleem. In de zandlaag onder de grindworst treden geen verhangen en stroomsnelheden meer op en is derhalve geen gevaar voor onderloopsheid, hetgeen ook uit de proeven T15 en T16 bleek. Dit resultaat geeft tevens aan dat het risico voor onderloopsheid geschat kan worden met behulp van een door berekening verkregen potentiaalbeeld.

6. Nadere beschouwing over de toepassing van de vervalspreider op de blokkenmat

6.1 Uitvoeringson nauwkeurigheden

De goede werking van de in 4.7 genoemde constructie kan worden verstoord door de volgende factoren, die tengevolge van uitvoeringson nauwkeurigheden zouden kunnen ontstaan.

- 1 Doorponsing van de vervalspreider ter plaatse van de rand van de pijlervoet.
- 2 Toleranties in de plaats van de vervalspreider ten opzichte van de grindworst.
- 3 Het waterdicht worden van de grindworst door het grouten.
- 4 Ongelijkheden van de bovenkant van het fundatiebed.

Ad 1. Deze situatie geeft nauwelijks wijziging in het potentiaalbeeld. De kortsluitstroom E'-B (zie figuur 4.7) kan via de grindworst afvloeien en bij D treedt geen wijziging op.

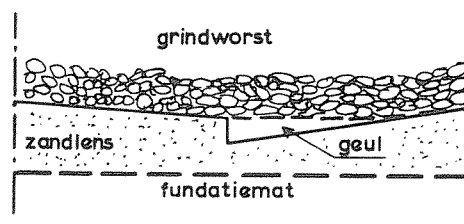
Wel kan een gevaarlijke situatie ontstaan als de kunststoffilters in de fundatiemat kapot gaan. Het zand onder de pijler kan dan via de bovenste laag van het fundatiebed (grind 8 - 40 mm) afgevoerd worden.

Ad 2. Zolang de grindworst gedeeltelijk op de vervalspreider ligt over een afstand, die een orde groter is dan de dikte van de zandlaag, geeft dit geen problemen. Het erosieproces zal stoppen op die plaats waar de grindworst op de vervalspreider ligt.

Ad 3. In principe kan nu onderloopsheid optreden als de uittreeverhangen bij A groot zijn. Volgens het criterium dat bij stuwdammen gehanteerd wordt mag het gemiddelde verhang in de laag AB maximaal 0,1 zijn.

Aannemende dat het verhang in het fundatiebed (0,15) ook in de zandlaag optreedt is het gevaar voor onderloopsheid bij een waterdichte grindworst niet denkbeeldig.

Ad 4. Tengevolge van het verdichten met behulp van een trilplaat zou een doorgaande geul in de zandlens kunnen ontstaan.



Als deze geul zich uitstrekt van A naar B kan een kortsluitstroom ontstaan met een sterke erosie als gevolg. Of deze geul in het prototype kan ontstaan hangt onder meer af van de volgende factoren:

- wordt de geul opgevuld met grout?
- hoe valt de grindzak over de geul?
- wat doen eventuele rillen onder de grindzak?

Hiernaar zal nader onderzoek op schaal 1:1 moeten worden verricht.

6.2 Invloed cyclische belasting

In het kader van het onderzoek R 1366 is geen onderzoek naar de invloed van cyclische belastingen verricht. Bij de onderzoeken M 1701 en M 1754 is studie verricht naar de afkalving van geulen onder de fundatiemat voor respectievelijk stationaire en cyclische belastingen. Uit deze onderzoeken werd onder meer gevonden dat bij cyclische belasting de erosiesnelheid groter is dan bij een stationaire belasting. De taluds van de onstane geultjes zijn bij een cyclische belasting echter flauwer, zodat het bijzakken van de grindworst makkelijker op kan treden. Bij de oplossing met de vervalspreider (T15 en T16) ontstaat bovendien een potentiaalbeeld waarbij onderloopsheid en ook afkalving wordt voorkomen. Het is te verwachten dat ook bij cyclische belastingen het water goed via de laag 8 - 40 mm en of via de grindworst zal worden afgevoerd, waardoor bovengenoemde constructie naar verwachting ook bij cyclische belastingen zal voldoen.

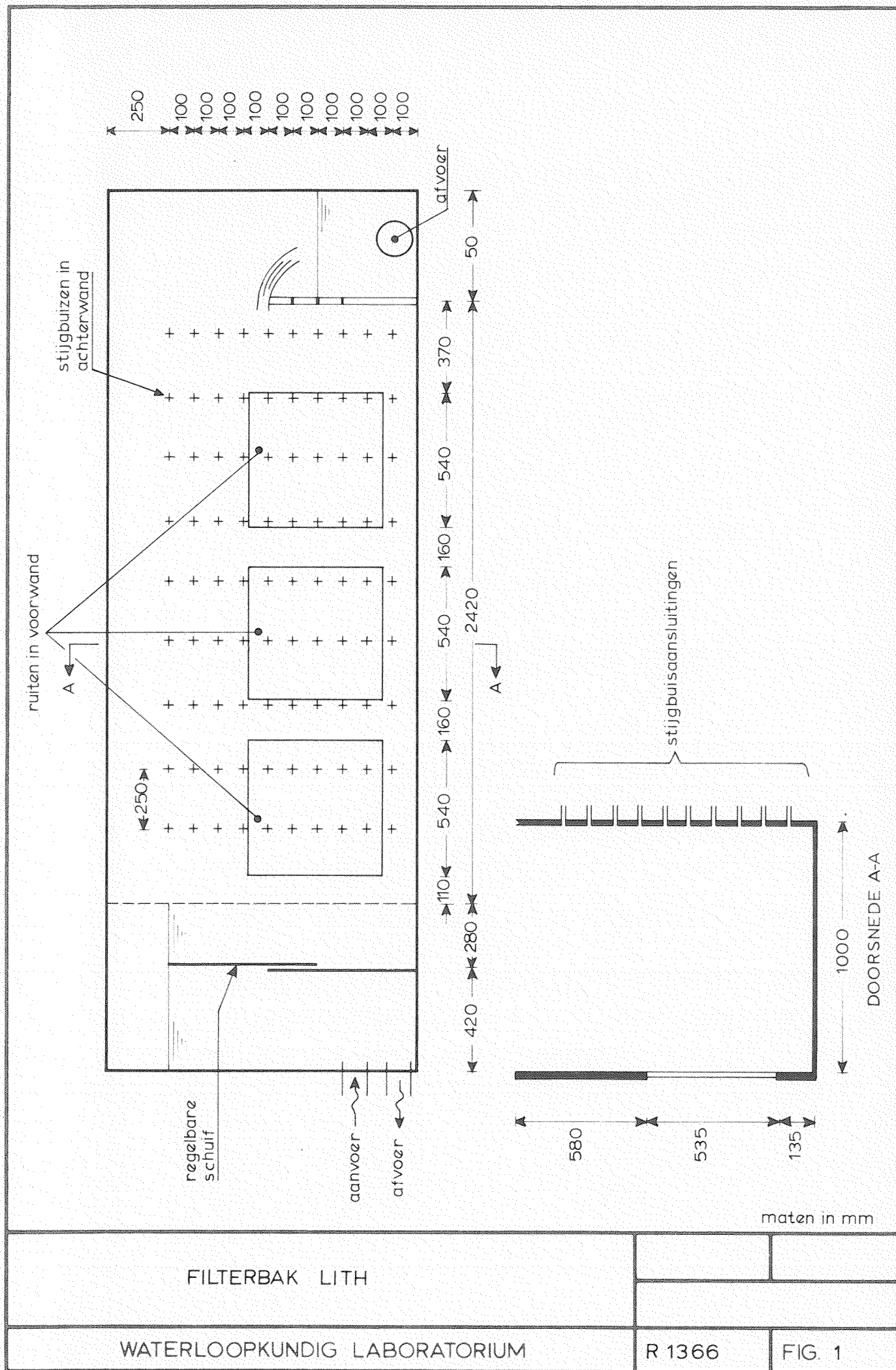
LITERATUUR

- 1 GRIFFITH, W.M.
The stability of weir foundations on sand soil subject to hydrostatic pressure
Minutes of Proceedings J.C.E. 1913-14 Vol. 197, Pt III
- 2 LANE, E.W.
Security from under-seepage masonry dams on earth foundations
Trans ASCE no 100, 1935
- 3 Laboratorium voor Grondmechanica en ir. F. BARENDs
Gebruikershandleiding SEEP/1, grondwaterstromingsproblemen

Proef	omhulling grindworst	bovenbelasting kg/m ²	dikte zandpakket m	schuimrubber a/d onderzijde	
				aantal	breedte x hoogte m
T1	star (hout, plexiglas)	-	0,20	-	
T2	waterdoorlatend doek	-	0,20	-	
T3	waterdoorlatend doek	-	0,20	-	
T4	waterdoorlatend doek	650	0,20	-	
T5	waterdoorlatend doek	650	0,05	-	
T6	geen	650	0,05	-	
T7	geen	-	0	-	
T8	waterdoorlatend doek	-	0	-	
T9	waterdoorlatend doek	650	0,05	13	0,1 x 0,1
T10	waterdoorlatend doek	650	0,05	3	0,1 x 0,1
T11	waterdoorlatend doek	650	0,05	1	0,1 x 0,03
T12	waterdoorlatend doek	650	0,05	3	0,1 x 0,05
T13	waterdoorlatend doek	650	0,05	1	0,1 x 0,1
T14	waterdoorlatend doek	650	0,05	1	0,1 x 0,1
T15	waterdoorlatend doek	650	0,05*	-	
T16	waterdoorlatend doek	650	0,05*		

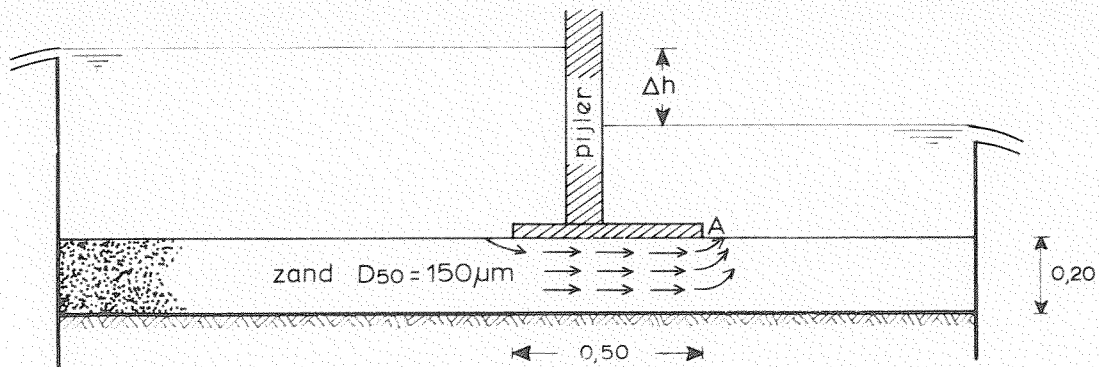
* vervalspreider boven de fundatiemat onder de grindworst

Tabel 1 Overzicht verrichte proeven

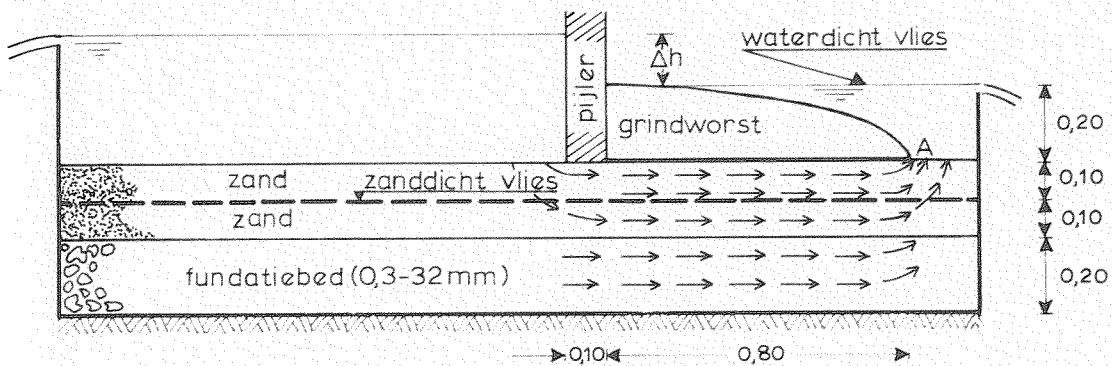


FILTERBAK LITH

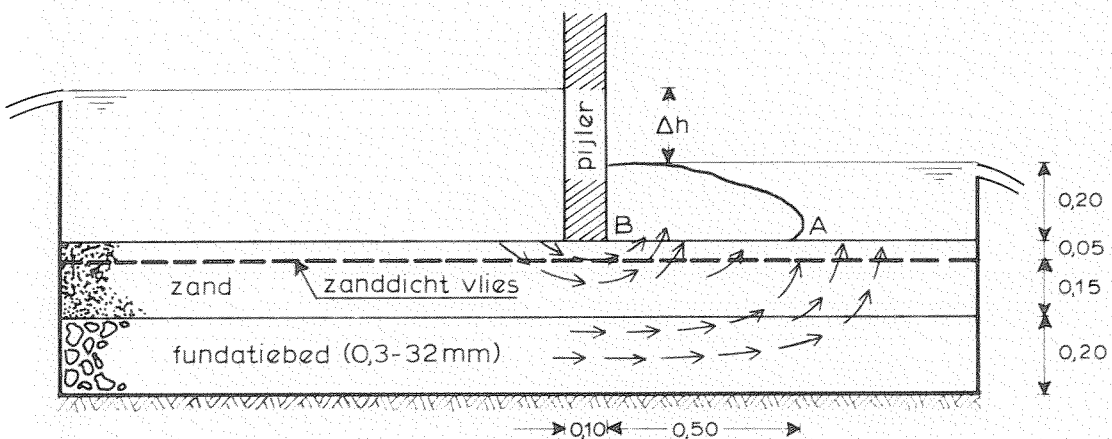
T1



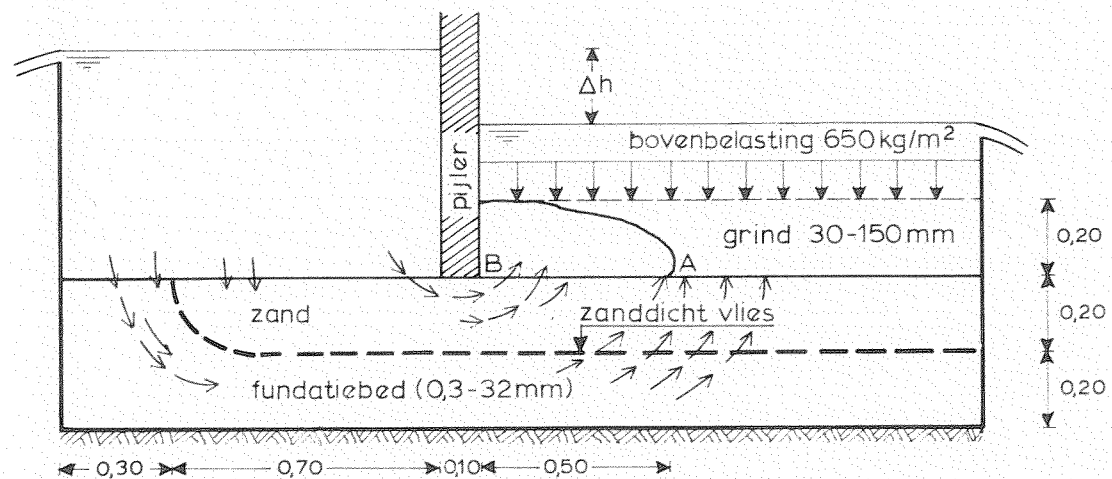
T2



T3



T4



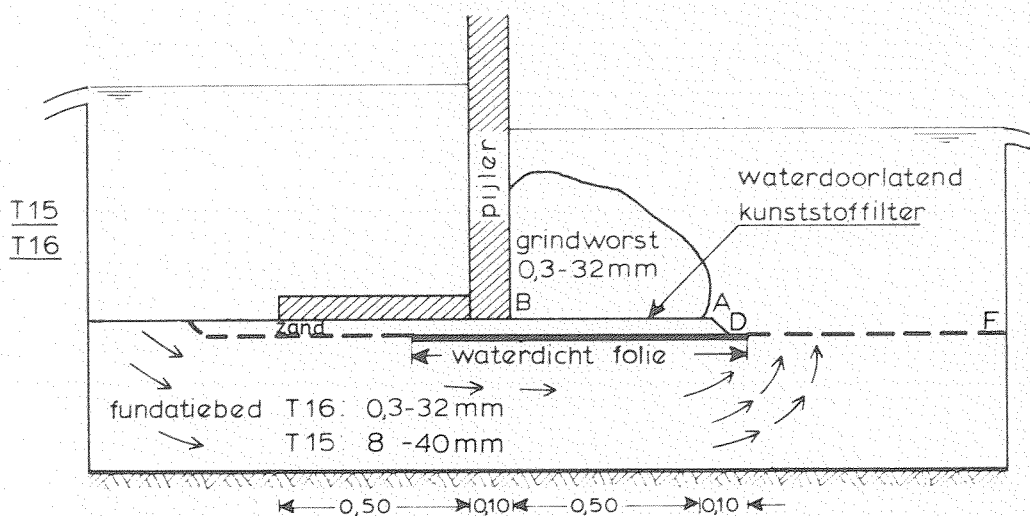
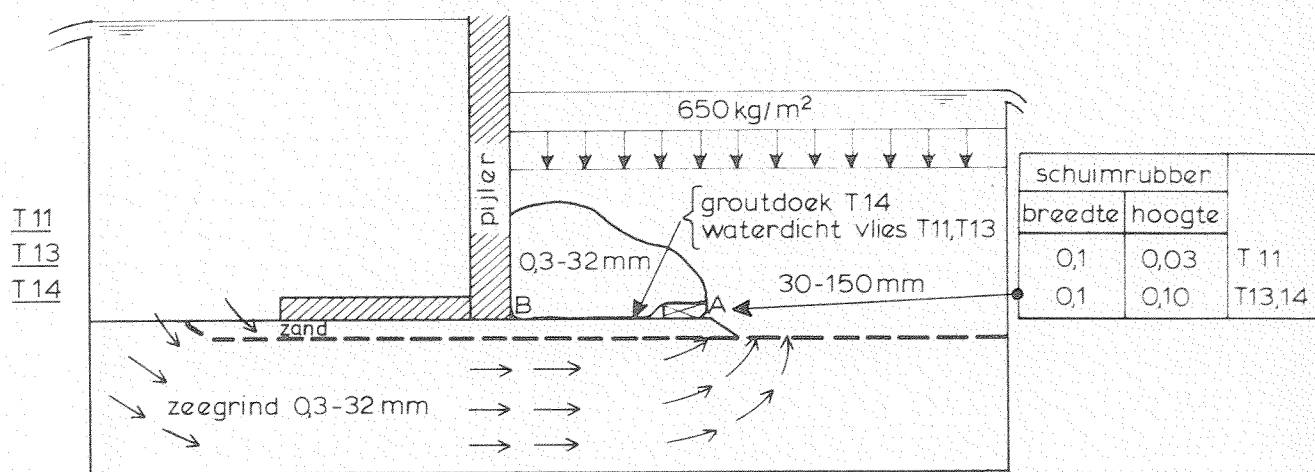
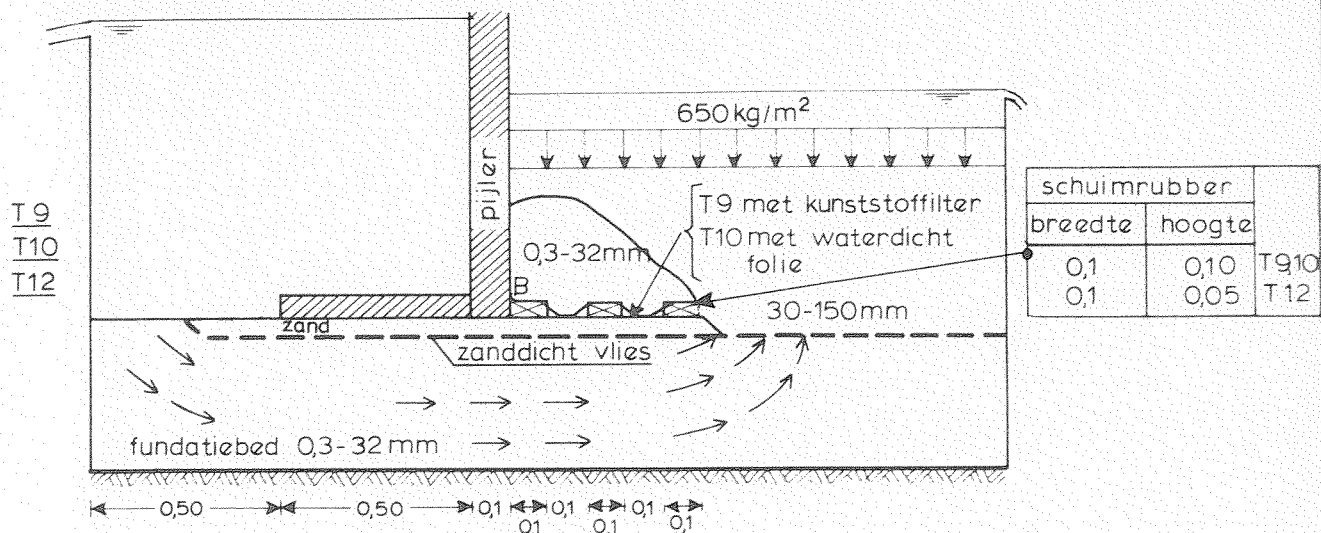
PROEFOPSTELLINGEN

T1...T4

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

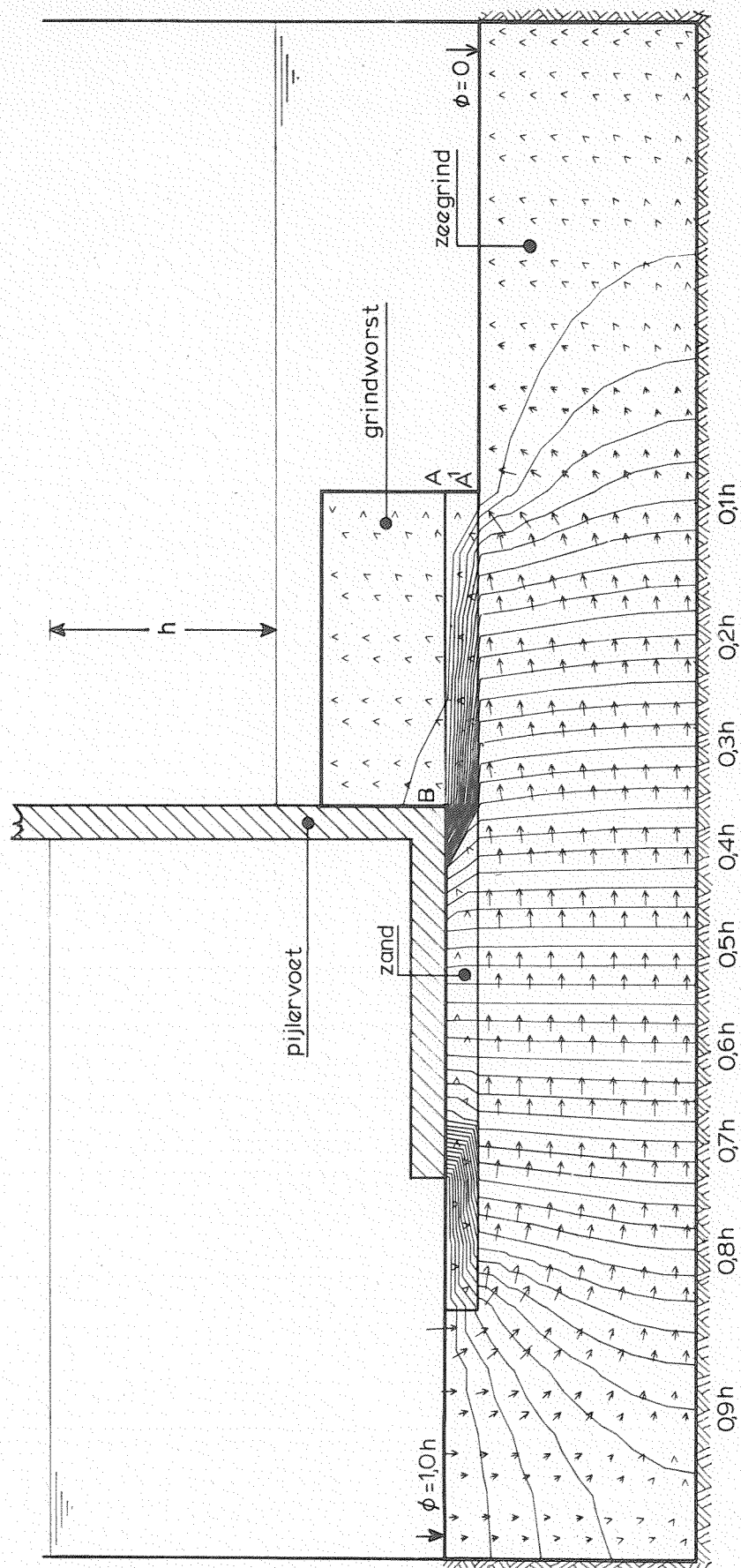
R 1366

FIG 2



PROEFOPSTELLINGEN

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM



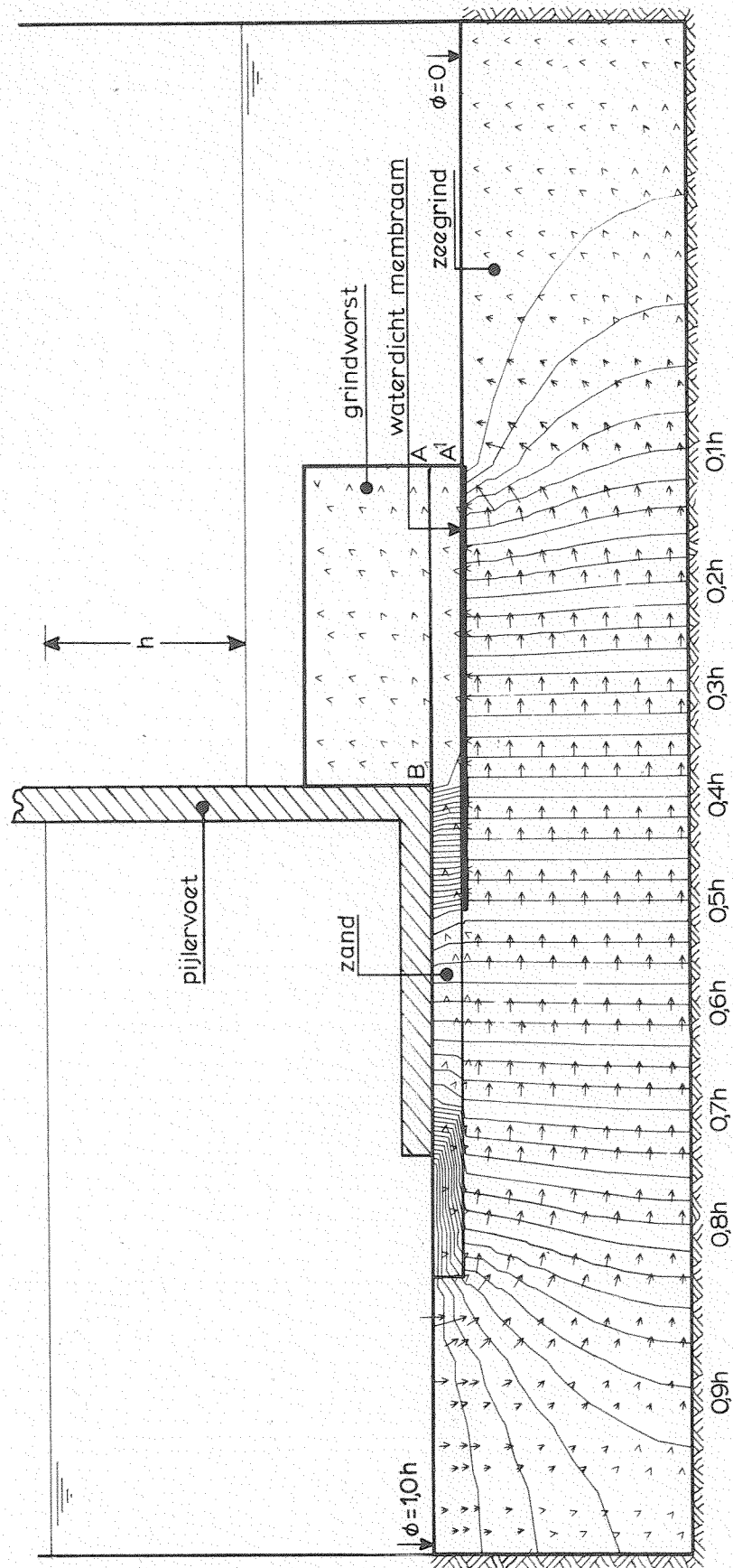
POTENTIAALLIJNEN EN SNELHEDEN

T6

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

R 1366

FIG. 5



POTENTIAALLUNEN EN SNELHEDEN

T 16

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

R 1366

FIG. 6

p.o. box 177

2600 mh delft

the netherlands