

**T**echnische  
**A**dviescommissie voor de  
**W**aterkeringen

Werkgroep A, Belasting en Bekleding

Meting van getij en freatische lijn  
Open taludbekleding





Opdrachtgever:  
Rijkswaterstaat  
Dienst Weg- en Waterbouwkunde, TAW-A2

## Meting getij en freatische lijn Open taludbekleding

**Bundeling van huidige kennis**

**A. Bezuijen, T.P. Stoutjesdijk**

**October 1993**



**GRONDMECHANICA  
DELFT**

1. Rapport nr.	2. Serie nr. A2.93.66	3. Ontvanger catalogus nummer	
4. Titel en sub-titel Meting van getij en freatische lijn Open taludbekleding Bundeling huidige kennis		5. Datum rapport october 1993	
		6. Code uitvoerende organisatie	
7. Schrijvers ir. A. Bezuijen, ir. T.P. Stoutjesdijk		8. Nr. rapport uitvoerende organisatie CO-341960/16	
9. Naam en adres opdrachtnemer GRONDMECHANICA DELFT Postbus 69 2600 AB DELFT		10. Projectnaam TAWA*Open bekledingen/Reststerkte	
		11. Contractnummer DWW 667	
12. Naam en adres opdrachtgever RIJKSWATERSTAAT Dienst Weg- en Waterbouwkunde Postbus 5044 2600 GA DELFT		13. Type rapport eindrapport	
		14. Code andere opdrachtgever	
15. Opmerkingen projectbegeleider DWW: ir. B. P. Rigter			
16. Referaat  In het kader van het onderzoek aan open taludbekledingen zijn metingen verricht van getij en freatische lijn bij steenzettingen. Dit rapport bundelt de hierbij opgedane kennis en ervaring. Het meetsysteem wordt besproken, de belangrijkste resultaten worden besproken, en de voor- en nadelen van de meetmethode komen aan bod. In de Appendices zijn de separate meetverslagen en analyses van de metingen zoals deze tot dusver zijn uitgevoerd opgenomen. Dit rapport maakt deel uit van een serie rapporten over veldmetingen. Deze serie bestaat, behalve uit dit rapport, uit een bundeling van de kennis van natuurmetingen (gedrag taludbekleding bij storm), een bundeling van de kennis van infiltratiemetingen en uit een samenvattend verslag van de drie typen metingen.			
17. Trefwoorden Open taludbekleding, steenzetting, veldmeting, leklengte, lektijd		18. Distributiesysteem op aanvraag	
19. Classificatie vrij toegankelijk	20. Classificatie deze pagina vrij toegankelijk	21. Aant. blz. 180	22. Prijs

**INHOUD**

**blz.:**

1.	SAMENVATTING EN CONCLUSIES	1
2.	MEETMETHODE	5
3.	RESULTATEN	7
4.	VOOR- EN NADELEN	9

Appendix A: Lang-periodieke golven en variërende doorlatendheid in STEENZET/1+

Appendix B: Getij en freatische lijn op Afsluitdijk

Appendix C: Getij en freatische lijn op Lauwersmeerdam

## 1. SAMENVATTING EN CONCLUSIES

In de rekenmodellen die het gedrag van een taludbekleding van gezette steen onder een belasting bestaande uit korte golven beschrijven speelt het begrip lek lengte een belangrijke rol. Deze lek lengte wordt berekend onder aanname, dat de freatische lijn in de filterlaag geheel bepaald wordt door de hoogte van de buitenwaterstand en de golfdruk op het talud. Dit houdt in, dat de waterstand in de filterlaag ten minste even hoog is als de buitenwaterstand, en meestal zelfs hoger ligt als gevolg van golfwerking op het talud.

De vraag kan worden gesteld of deze aanname altijd juist is. De mogelijkheid bestaat, dat de toplaag dusdanig ondoorlatend is, dat er slechts een beperkte hoeveelheid water in en uit het filter kan stromen. Hierdoor kan een verschil in amplitude en fase optreden tussen de waterbeweging op de toplaag en de waterbeweging in de filterlaag. Om dit verschil te kunnen kwantificeren is het begrip lektijd ontwikkeld. Als het verloop van de buitenwaterstand wordt benaderd door:

$$h_o = A_o \sin\left(\frac{2\pi t}{T_o}\right)$$

$h_o$  = buitenwaterstand  
 $A_o$  = amplitude van de beweging van de buitenwaterstand  
 $T_o$  = periode van de beweging van de buitenwaterstand  
 $t$  = tijd

en het verloop van de waterstand in de filterlaag wordt uitgedrukt als:

$$h_f = A_f \sin\left(\frac{2\pi(t-\tau)}{T_o}\right)$$

$h_f$  = waterstand in de filterlaag  
 $A_f$  = amplitude van de waterbeweging in de filterlaag  
 $\tau$  = faseverschil tussen beweging van buitenwaterstand en waterstand in de filterlaag

dan kan voor een oneindig lang talud met een uniforme doorlatendheid en een ondoorlatende teenconstructie worden afgeleid dat de verandering in waterstand in de filterlaag wordt beschreven met:

$$\frac{dh_f}{dt} = -\frac{2\pi}{T_k}(h_f - h_o)$$

De term  $T_k$  wordt de lektijd genoemd, en is gedefiniëerd als:

$$T_k = \frac{2\pi n \Lambda}{k_f \sin \alpha}$$

$k_f$  = doorlatendheid van de filterlaag  
 $n$  = porositeit van de filterlaag  
 $\alpha$  = taludhelling  
 $\Lambda$  = lek lengte

Bladnummer : - 2 -

Ons kenmerk: CO-341960/16

Datum : oktober 1993

De verhouding van amplitude binnen en buiten de constructie kan in lektijd worden uitgedrukt:

$$\frac{A_f}{A_o} = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{T_k}{T_o}\right)^2}}$$

Het faseverschil  $\tau$  bedraagt:

$$\tau = \frac{T_o}{2\pi} \arctan\left(\frac{T_k}{T_o}\right)$$

In het verloop van het onderzoek zijn ook formules opgesteld voor zettingen met een eindige lengte en voor zettingen met een doorlatende teenconstructie.

Als het talud een eindige lengte heeft dan heeft dit tot gevolg dat, ten opzichte van de lektijd bij een oneindig lange zetting, de lektijd toeneemt. Dit effect wordt sterker naarmate de leklengte groter is. Een doorlatende teenconstructie leidt tot een kleinere lektijd.

Uit de algemene formule van de lektijd kan worden afgeleid, dat de lektijd toeneemt bij toenemende porositeit en leklengte en bij afnemende filterdoorlatendheid en taludhelling. Bij een grote lektijd ontstaat, blijkens de formules, een groot faseverschil en een grote afname van de amplitude van de waterbeweging in het filter in vergelijking met de waterbeweging op het talud.

In de afgelopen twee jaar zijn enkele metingen gedaan van de freatische lijn als functie van het getij. Het doel van deze metingen was:

- na te gaan of de hierboven geschetste verschijnselen in het veld inderdaad optreden.
- na te gaan of de lektijdtheorie een goed beeld geeft van wat er gebeurt.

In de loop van het onderzoek is ook het model STEENZET/1+ aangepast om te kunnen rekenen met golven met een lange periode, zoals het getij. Uit vergelijking van de resultaten van het numerieke model met de analytische lektijdtheorie bleek dat:

- de lektijdtheorie geeft een goede benadering van de amplitudedemping en het faseverschil
- STEENZET/1+ geeft een verhoging van de gemiddelde waterstand in de filterlaag. De analytische methode geeft dit niet. Dit wordt veroorzaakt doordat het filter sneller volstroomt dan leegstroomt. Dit kan verklaard worden uit een verschil in doorstroomoppervlak. Tijdens vullen is de buitenwaterstand altijd hoger dan de binnenwaterstand. Het doorstroomoppervlak is dan groter. De binnenwaterstand bereikt niet een even hoog niveau als de buitenwaterstand. Hierdoor is het doorstroomoppervlak tijdens leeglopen gemiddeld kleiner.
- de analytische methode kan niet worden gebruikt als het talud gedurende enige tijd droogvalt.
- de analytische methode houdt geen rekening met golfwerking (golven met een korte periode) op het talud. Golfwerking op het talud heeft in twee opzichten invloed. Ten eerste is er sprake van golfloop. Hierdoor is een groter gedeelte van het talud nat dan bij een horizontale buitenwaterspiegel. Er stroomt over een grotere oppervlakte water de constructie in. Dit geeft een verhoging van de gemiddelde waterstand in het filter. Het tweede aspect heeft een soortgelijke werking. Door de golfwerking is de gemiddelde druk op het talud groter dan overeenkomt met een horizontale buitenwaterspiegel. Het verhang over de top laag is deels groter dan wordt aangenomen. Ook hierdoor komt de gemiddelde waterspiegel in de filterlaag hoger te liggen.

Bladnummer : - 3 -

Ons kenmerk: CO-341960/16

Datum : oktober 1993

Een over de hoogte van de zetting variërende doorlatendheid, bijvoorbeeld omdat de zetting in de getijzone dichtgeslibd is en in de zone boven hoogwater niet, geeft het geheel een aanzienlijk complexer aanzicht. De analytische methode voorziet niet in dit geval. De numerieke berekeningen geven een redelijk inzicht, maar de resultaten zijn erg gevoelig voor kleine veranderingen. Zo kan als de buitenwaterstand boven de getijzone uitstijgt, de zetting van boven af snel gevuld raken met water. Als de buitenwaterstand vervolgens weer zakt, is de zetting gevuld met water dat niet snel weg kan stromen. Hierdoor ontstaat een situatie met naar buiten gerichte drukken onder de toplaag. Dit is een ongunstige situatie.

De waarde van de doorlatendheid van het filtermateriaal is een belangrijke factor in het voorspellen van de waarde van de lektijd, en dus in het voorspellen van het gedrag van een zetting. De aan te houden waarde voor een gegeven constructie is vaak slechts binnen bepaalde grenzen af te schatten, met name als niet bekend is of de filterlaag is aangezand of niet.

Een andere complicerende factor in het gebruik van de lektijdtheorie is de exacte waarde voor de teendoorlatendheid. Deze is niet te meten, maar kan wel grote invloed hebben op de resultaten. Dit maakt het voorspellen van de lektijd van een bepaalde constructie zeer lastig.

De analytische en numerieke methodes verliezen hun geldigheid op het moment dat er sprake is van een niet te verwaarlozen wisselwerking tussen filterlaag en basismateriaal. Als het filtermateriaal een vergelijkbare doorlatendheid heeft als het basismateriaal, zal er geen sprake meer zijn van een 'gesloten' systeem van toplaag en filterlaag, zoals wordt aangenomen in de modellering. In feite wordt de gehele dijk, inclusief basismateriaal, gevuld met water, en niet meer alleen het filter.

In dit verslag (hoofdstuk 3) worden resultaten gegeven van metingen van getij en freatische lijn en van de analyse van deze metingen te Colijnsplaat (Appendix A), op de Afsluitdijk (Appendix B) en op de Lauwersmeerdam (Appendix C). Daarnaast is het interessant om het resultaat van een meting in Breskens hier te vermelden. Op de zeedijk te Breskens zijn twee zogenaamde natuurmetingen uitgevoerd. Eén van deze metingen betrof een bekleding van colloïdaal beton, de andere werd uitgevoerd op een zetting van basaltblokken. Bij dit type meting worden drukopnemers op het talud geplaatst en een aantal waterspanningsmeters in de filterlaag. De onderste van deze waterspanningsmeters in de filterlaag bevond zich op een niveau van meer dan een meter onder de hoogst gemeten buitenwaterstand. Toch gaven de waterspanningsmeters geen uitslag. Dit betekent, dat het freatisch niveau in de filterlaag de onderste waterspanningsmeter niet heeft bereikt, en dat er dus een niveauverschil van meer dan een meter is opgetreden tussen waterstand in en buiten de constructie. Dit verschil kan worden toegeschreven aan ofwel een lage doorlatendheid van toplaag en filtermateriaal, ofwel aan de invloed van het basismateriaal.

De metingen en de analyse geven aanleiding tot de volgende conclusies:

- bewezen is, dat er een aanzienlijk verschil op kan treden tussen waterstand in de filterlaag en de buitenwaterstand. Deze verschillen zijn in het algemeen groter dan verwacht kan worden op basis van schattingen van doorlatendheden uit modelproeven of theoretische formules.
- het niveau van de freatische lijn is van belang om te kunnen voorspellen wat voor belasting op de toplaag op zal treden. In het ene geval is dit gunstiger dan de gebruikte aanname in de modellen voor korte golven (de buitenwaterstand is duidelijk hoger dan de binnenwaterstand: er treedt geen naar buiten gerichte druk onder de blokken op), in het andere geval wordt de belasting onderschat (de buitenwaterstand is sneller gezakt dan de freatische lijn: een overdruk ten gevolge van een korte golf moet worden vermeerderd met een stationair drukniveau omdat de freatische lijn hoger staat dan de gemiddelde buitenwaterstand).
- het is van groot belang de doorlatendheden van toplaag, filterlaag en teenconstructie te kennen. Zonder deze waardes voldoende goed te kennen is het wagen van een voorspel-

Bladnummer : - 4 -

Ons kenmerk: CO-341960/16

Datum : october 1993

ling zeer riskant. In feite moet dan van het slechtste geval worden uitgegaan. Dit onderstreept het nut van goede veldmeetmethoden.

- Het basismateriaal kan een belangrijke rol spelen, met name als het zand betreft en het filter is ingezand. In dat geval schieten analytische en numerieke methoden te kort. Het uitvoeren van een meting of het uitbreiden van de modellering kan uitkomst bieden.
- Van groot belang bij de analyse is de nauwkeurigheid van de metingen. Hierbij speelt het vaststellen van de nulpuntsafwijking van de waterspanningsmeters in de filterlaag een cruciale rol. Vooral bij een zetting met een grote leklengte kan een afwijking van 1 of meerdere centimeters groot verschil uitmaken.
- Het is niet in alle gevallen mogelijk een goed onderscheid te maken in de rol die uitwisseling van water tussen uitvullaag, filterlaag en basismateriaal speelt. De modellering van één-dimensionale stroming gaat alleen op als het basismateriaal relatief ondoorlatend is, en in gevallen waar de doorlatendheid van de uitvullaag, indien aanwezig, duidelijk groter is dan de doorlatendheid van het filter. De modellering voldoet minder als de filterlaag doorlatender is dan de uitvullaag, of het basismateriaal een relatief belangrijke bijdrage aan de totale toe- en afstroming naar de filterlaag levert.



Bladnummer : - 5 -

Ons kenmerk: CO-341960/16

Datum : october 1993

## 2. MEETMETHODE

In principe kan de meting op verschillende manieren worden uitgevoerd. Van belang is alleen dat zowel de waterstand aan de buitenzijde van de constructie als de stijghoogte in de filterlaag worden bepaald. De in dit rapport besproken metingen zijn alle uitgevoerd met behulp van waterspanningsmeters in de filterlaag. Om het getij te registreren is gebruik gemaakt van een peilbuislogger (Lauwersmeerdam), of van drukopnemers op het talud (Colijnsplaat, Afsluitdijk). Om de waterspanningsmeters in de filterlaag te kunnen plaatsen, zijn met behulp van een kernboor gaten in de toplaag geboord. Door deze gaten worden de waterspanningsmeters in de filterlaag geplaatst. Vervolgens worden de gaten afgedicht met PUR-schuim. Het is in principe ook mogelijk een blok te lichten, de meter te plaatsen en vervolgens het blok terug te plaatsen. Dit wordt echter niet aangeraden, omdat het de situatie te veel verstoort.

De meetsignalen worden verzameld op een datalogger-systeem. Omdat het om lang-periodieke verschijnselen gaat is het voldoende om het signaal laag-frequent te bemonsteren, met tussenpozen van bijvoorbeeld 1 minuut. Het signaal wordt wat regelmatig als gedurende 1 minuut met 1 Hz wordt gemeten, waarna het gemiddelde van deze minuut wordt bepaald en weggeschreven op de datalogger. Als er golven op het talud staan kan het nodig zijn de meetfrequentie van 1 Hz korter te kiezen of de meetperiode te verlengen om een goed gemiddelde te kunnen bepalen.

Uitgangspunt van de meting is, dat de lektijd bepaald moet kunnen worden. De buitenwaterstand en de freatische lijn moeten gemeten kunnen worden. Hiertoe kan met weinig meters volstaan worden: in principe is één drukopnemer op het talud en één waterspanningsmeter in de filterlaag voldoende om een meting te verrichten. Dit levert ten aanzien van de ligging van de freatische lijn echter beperkt betrouwbare resultaten. De waterspanningsmeter geeft informatie over de stijghoogte in de filterlaag. Deze moet met behulp van een aangenomen leklengte worden geëxtrapoleerd naar een punt waar zich de freatische lijn bevindt. Dit is onvoldoende betrouwbaar. Om de betrouwbaarheid van de meting te verhogen is het aan te bevelen zeker in de filterlaag meerdere opnemers te plaatsen op verschillende hoogtes. Hierdoor middelen afwijkingen uit, terwijl het verloop van de stijghoogte in de filterlaag belangrijke extra informatie kan opleveren. Uit het verloop van de stijghoogte kan, gecombineerd met de belasting (de stijghoogte op de toplaag), een schatting van de leklengte worden verkregen.

Een tweede reden om meerdere waterspanningsmeters in het filter te plaatsen is juist gelegen in het feit, dat de stijghoogte in de filterlaag zich aanpast aan de buitenwaterstand. Bij constructies met een korte leklengte voltrekt zich deze aanpassing over korte afstand. Als in dit geval een enkele, te diep geplaatste, waterspanningsmeter is toegepast, dan is het buitengewoon moeilijk om een betrouwbare schatting van de ligging van de freatische lijn te krijgen.

In het geval dat gemeten wordt, terwijl er op het talud sprake is van golfwerking, zoals bijvoorbeeld bij de natuurmeting, dan is het van belang dat op de toplaag meerdere drukopnemers zijn geplaatst. Hiermee wordt de gemiddelde druk op het talud gedurende de meting bepaald. Deze is in dit geval niet gelijk aan de stilwaterlijn. Met name bij een relatief doorlatende toplaag een dichte teenconstructie speelt golfloop een belangrijke rol.

Belangrijke factoren in het analyseren van de resultaten van de meting zijn de doorlatendheden van toplaag, filterlaag, uitvullaag (indien aanwezig) en in bepaalde gevallen ook van teenconstructie en/of basismateriaal. De toplaagdoorlatendheid kan het beste ter plaatse worden gemeten, bijvoorbeeld met behulp van de 'bakkenmethode'. Hierbij worden bakken met een open onderkant op de toplaag geplaatst. De randen van de bakken worden afgedicht. Vervolgens wordt de bak volgepompt met water en wordt de hoeveelheid water geregistreerd die per tijdseenheid uit de bakken door de toplaag heen stroomt. Dit is een maat voor de toplaagdoorlatendheid. Als er indicatie is, dat de doorlatendheid kan variëren over de hoogte, bijvoorbeeld omdat het onderste gedeelte van de zetting is ingezand, dan is het van belang dit ook te meten.

Om de filterdoorlatendheid te kunnen bepalen is de beste methode om, indien mogelijk, een

Bladnummer : - 6 -

Ons kenmerk: CO-341960/16

Datum : october 1993

monster te nemen van het filtermateriaal. Hieruit volgt niet alleen of dat materiaal dat op de ontwerptekening staat ook inderdaad wordt aangetroffen, maar ook of het filter is ingezand of niet. Uit de korrelverdeling kan een schatting worden gemaakt van de filterdoorlatendheid.

De doorlatendheid van de teenconstructie is moeilijker te bepalen, maar deze kan wel degelijk een rol spelen. Uiteraard is het mogelijk de stijghoogte direct voor en direct na de teenconstructie te meten. Hiermee kan het verhang worden bepaald, maar ligt de doorlatendheid nog niet direct vast. Vooral nog wordt de doorlatendheid van de teenconstructie pas achteraf in de beschouwingen betrokken.

Als de doorlatendheden van filterlaag en toplaag in dezelfde orde van grootte liggen als de doorlatendheid van het basismateriaal, dan is het moeilijk vol te houden dat dit in de beschouwing verwaarloosd kan worden. Stel dat onder de toplaag alle doorlatendheden gelijk zijn, dan moet niet alleen een filter worden gevuld met water, maar een geheel dijklichaam. Dit zal verhinderen dat de freatische lijn snel kan stijgen.

Bladnummer : - 7 -

Ons kenmerk: CO-341960/16

Datum : oktober 1993

### 3. RESULTATEN

De natuurmeting te Colijnsplaat is gebruikt als eerste mogelijkheid om de analytische theorie van de lektijd te toetsen (Appendix A). Omdat hier sprake was van een topplaagdoorlatendheid die duidelijk varieerde over de hoogte, en de analytische methode hier niet in voorzag, is het model STEENZET/1+ dusdanig aangepast dat gerekend kon worden met een variërende doorlatendheid en een lang-periodieke golf. De doorlatendheid van het filter kan in het model niet eenvoudig worden gevarieerd; deze is over de volledige hoogte van de zetting gelijk. Omdat het op voorhand niet de bedoeling is geweest de meting te gebruiken als een meting van de freatische lijn is de meting bij hoogwater gestopt. Dit is achteraf jammer, omdat juist het verloop bij een dalende waterspiegel extra informatie had kunnen verschaffen. De top laag van Haringmanblokken in de getijzone is zeer ondoorlatend ( $5 \cdot 10^{-7}$  m/s). Bij deze lage doorlatendheid is naar verwachting de lektijd zeer groot, en er zal een groot faseverschil en amplitudeverschil optreden tussen buitenwaterstand en de reactie van de freatische lijn in het filter. Blijkens de meting is dit niet het geval. Het filter bestond uit een uitvullaag van steenslag van enkele centimeters dik met daaronder een laag mijnsteen van 1 meter dik. De binnenwaterstand loopt weliswaar achter bij de buitenwaterstand, doch veel minder dan blijkens de waarden voor de doorlatendheid van top laag en filter laag werd verwacht. Er zijn blijkbaar andere invloeden. Een eerste mogelijkheid is, om een zekere doorlatendheid aan de teenconstructie toe te kennen. Dit bleek in dit geval grote invloed te hebben. Omdat de top laag zo ondoorlatend is, wordt in de berekening de invloed van een doorlatende teenconstructie overheersend. Met deze aanname werd de meting redelijk dicht genaderd door de resultaten van de berekening.

In tweede instantie is de invloed van de golfwerking op het talud bekeken. Deze heeft invloed, omdat een groter deel van het talud nat wordt dan bij een horizontale waterspiegel. Dit effect wordt nog versterkt, doordat de doorlatendheid van de zetting boven de getijzone een factor 100 groter was. Toch bleek de invloed beperkt ten opzichte van de invloed van een doorlatende teenconstructie. Als de teen ondoorlatend werd gekozen nam vooral de gemiddelde waterstand in het filter toe als de invloed van golfloop in rekening werd gebracht.

Een en ander leidde tot een qua tendens succesvolle simulatie met het rekenmodel van de meting. Toch moet geconstateerd worden, dat de simulatie moeizaam is verlopen, en dat de gedane aannames omtrent de doorlatendheid van met name uitvullaag ( $1 \cdot 10^{-2}$  m/s) en in mindere mate teenconstructie ( $2,5 \cdot 10^{-4}$  m/s) wel erg op de grens van het waarschijnlijke balanceren. Geconcludeerd werd, dat bij deze lage doorlatendheid van de top laag het van eminent belang is te weten wat de exacte waarde van de doorlatendheid van filter, uitvullaag en teenconstructie is. Zonder deze waarden is een betrouwbare voorspelling van de ligging van de freatische lijn in de filter laag niet mogelijk.

Van de tweede natuurmeting te Breskens is het resultaat al kort gememoreerd in hoofdstuk 1. Er werden geen waterspanningen in de filter laag gemeten, noch bij de meting op een top laag van colloïdaal beton, noch bij de meting op een basaltzetting. Uit dit gegeven kan worden afgeleid dat de waterstand in de filter laag (een ongeveer 50 cm dikke laag van fosforslakken, die vermoedelijk sterk was ingezand) ten minste een meter lager is gebleven dan het maximale niveau van de buitenwaterstand. Mede omdat er sprake was van aanzienlijke golfwerking op het talud is dit slechts te verklaren met behulp van de opgestelde theorie door een zeer lage doorlatendheid voor zowel filter als top laag te veronderstellen. Een andere verklaring kan zijn, dat vanwege de geconstateerde sterke inzanding, het filter een vergelijkbare doorlatendheid heeft als het basismateriaal van het dijklichaam. In dat geval vindt een niet te verwaarlozen uitwisseling van water plaats tussen filter en basis. Tegelijkertijd ontstaat een situatie waarin niet slechts de filter laag gevuld wordt met water, maar het gehele dijklichaam. Hierdoor kan de waterspiegel in de dijk niet snel stijgen.

De meting in Breskens is verder niet uitgewerkt.

De derde natuurmeting is uitgevoerd op de Afsluitdijk (Appendix B). De zetting bestaat uit twee

Bladnummer : - 8 -

Ons kenmerk: CO-341960/16

Datum : october 1993

gedeelten. Onderaan, in de getijzone bestaat de toplaag uit basalt op een circa 30 cm dikke laag puin. Boven de getijzone bevindt zich een toplaag van basaltblokken op 10 cm steenslag op 20 cm puin. Er deed zich hier een situatie voor, dat de freatische lijn in de filterlaag 20 tot 30 centimeter hoger lag dan de buitenwaterstand. Met andere woorden, niet alleen werd een wisseling in de buitenwaterstand bijna direct gevolgd door de waterstand in het filter, maar door de golfwerking op het talud lag dit niveau zelfs hoger dan de buitenwaterstand. Er was sprake van een perfect evenwicht tussen de gemiddelde druk op het talud en de ligging van de freatische lijn. Bij het narekenen van de meting met het numerieke model traden de nodige problemen op. Aangetoond kon worden dat de doorlatendheden van de toplaag boven de getijzone zo hoog was, dat alleen het leeglopen van de zetting bij een dalende buitenwaterspiegel enig houvast bood voor het vaststellen van de eigenschappen van de zetting. Lager op het talud was echter een andere toplaag aanwezig, terwijl de filterlaag eveneens anders was opgebouwd. Omtrent de doorlatendheid van de teenconstructie was niets met zekerheid te zeggen. Het tijdstip van droogvallen van de waterspanningsmeters, die op verschillende hoogtes in de filterlaag waren aangebracht gaven een belangrijke indicatie van de snelheid waarmee de filterlaag leegstroomde. Hier trad het probleem op, dat achteraf bleek dat de nulpuntscorrectie niet meer was te achterhalen. De nulpuntscorrectie van de waterspanningsmeters wordt normaal gesproken in het laboratorium verricht. Omdat er lange tijd gewacht is op gunstige omstandigheden om de meting uit te kunnen voeren bleken de meters echter dusdanig te zijn verlopen, dat dit geen bruikbare ijking opleverde. Al met al ontstond de situatie dat de meting met het numerieke model redelijk konden worden benaderd, maar dat het aantal onbekenden zo groot was, dat de waarde van de berekening beperkt is. De meting op zich bevestigt het beeld, dat voor het basaltongedeelte boven de getijzone de doorlatendheden voldoende groot waren, dat de gebruikte schematisering van de freatische lijn in het STEENZET-programma inderdaad klopt. De gemiddelde freatische lijn ligt boven de gemiddelde buitenwaterstand.

De enige meting tot nu toe die specifiek gericht is geweest op het meten van getij en freatische lijn is in juli 1992 uitgevoerd op de Lauwersmeerdam (Appendix C). Aan de zeezijde ligt hier een zetting bestaande uit een toplaag van koperslakblokken op een laag grind van circa 10 cm op een mijnsteenlaag van 1 meter dik. Op deze locatie was uit eerdere onderzoeken al betrekkelijk veel bekend omtrent de doorlatendheden van de toegepaste materialen. Uit de meetresultaten kon direct worden afgeleid, dat de freatische lijn ten opzichte van de buitenwaterstand in zeer beperkte mate varieerde, en dat er tussen beide waterbewegingen sprake was van een groot faseverschil. Bij numerieke simulatie van de meting bleek dit echter geheel niet op te treden. De verklaring voor dit verschil werd gezocht in de invloed van het basismateriaal van de dijk. De basis en het voorland bestaan uit zand. Dit heeft een doorlatendheid die in dezelfde grootte-orde ligt als de doorlatendheid van de toplaag en de laag grind hieronder. De laag mijnsteen is aanzienlijk doorlatender. De verklaring voor het gemeten gedrag kon alleen worden gevonden door ofwel de doorlatendheid van de toplaag en eventueel de grindlaag enkele grootte-ordes lager te kiezen, ofwel door te stellen dat het basismateriaal dusdanig doorlatend was, dat het in staat was om een aanzienlijke hoeveelheid water uit de mijnsteenlaag op te nemen, waardoor de waterstand in de mijnsteenlaag niet al te zeer toe kon nemen. Dit laatste lijkt de meest waarschijnlijke verklaring.

Bladnummer : - 9 -

Ons kenmerk: CO-341960/16

Datum : oktober 1993

#### 4. VOOR- EN NADELEN

In dit hoofdstuk worden de voor- en nadelen van de meting van getij en freatische lijn, als middel om de lektijd en leklengte van een constructie te bepalen, op een rijtje gezet. Hierbij wordt de meting vergeleken met twee andere typen metingen van lektijd en leklengte. Dit zijn de zogenaamde meting in de natuur van het gedrag van een constructie onder stormomstandigheden (verder kortweg natuurmeting genoemd) en de infiltratiemeting. Voor een nadere omschrijving van deze meetmethoden wordt verwezen naar de betreffende verslagen in deze serie over veldmetingen.

De meting van getij en freatische lijn is in feite bedoeld om de lektijd te kunnen bepalen. Als er voldoende meters in het filter zijn geplaatst kan uit het verloop van de stijghoogte over de hoogte ook een schatting worden gegeven van de leklengte. Om de lektijd te meten is slechts 1 andere methode beschikbaar: de infiltratieproef. Andere methoden om leklengte te bepalen zijn de natuurmeting en de infiltratieproef.

Ten opzichte van de infiltratieproef is het voornaamste voordeel van de meting van getij en freatische lijn, dat gemeten wordt aan een natuurlijke situatie; het is een directe meting van het verschijnsel waarom alles draait. Direct met de resultaten van de meting is bekend of er sprake is van een duidelijk verschil in stijghoogte in en buiten de constructie, en of dit problemen oplevert. Een nadere analyse kan vervolgens de reactie in andere gevallen dan de gemeten voorspellen met behulp van de grootheid 'lektijd'. Bij de infiltratiemeting wordt, uitgaande van een opgelegde belasting, uit de reactie in de filterlaag de lektijd bepaald via een numeriek model. Dit kan minder ingewijden afschrikken, omdat niet het direct met de natuurlijke verschijnselen verbonden is, en bovendien een complex 2-dimensionaal stromingsprobleem betreft.

Ten opzichte van de natuurmeting heeft de meting van getij en freatische lijn vooral het praktische voordeel, dat de meting onder alle omstandigheden kan worden uitgevoerd, terwijl de natuurmeting alleen onder stormomstandigheden nut heeft. Nadeel van de meting van getij en freatische lijn ten aanzien van het bepalen van leklengte is, dat de meting alleen een analytische schatting van de leklengte oplevert, en dan nog alleen als de freatische lijn duidelijk afwijkt van het getijniveau, met andere woorden als de lektijd groot is.

Over het algemeen zal de meting van getij en freatisch niveau plaatsvinden bij een regulier getij. Dit heeft als nadeel, dat alleen in de getijzone gemeten wordt, en niet op het niveau van bijvoorbeeld de maatgevende storm. Aangezien de eigenschappen van de constructie aanzienlijk kunnen variëren over de hoogte is dit een serieus probleem. Uitgaande van lage doorlatendheden in de getijzone kan zo een laag freatisch niveau voorspeld worden, maar als hoger op het talud een grotere doorlatendheid aanwezig is, kan dit een veel te optimistisch beeld geven.

Bij het analyseren van de metingen is geconstateerd, dat de doorlatendheid van de teenconstructie een belangrijke rol kan spelen, met name als de toplaag in verhouding minder doorlatend is. Het is zeer moeilijk gebleken de doorlatendheid van de teen goed af te schatten. Op dit moment is evenmin duidelijk of er een betrouwbare meetmethode ontwikkeld kan worden.

Bij het analyseren van de metingen met STEENZET/1+ wordt aangenomen, dat alleen water via de teen of de toplaag in en uit het filter kan stromen. Als het basismateriaal uit een zeer ondoorlatend materiaal bestaat, dan is dit een redelijke aanname. Het is echter niet meer dan redelijk om te veronderstellen, dat er ook uitwisseling van water tussen filterlaag en basismateriaal plaatsvindt. Immers, als het freatisch niveau in de filterlaag stijgt, dan ontstaat er tussen filter en basis een verhang. Als er sprake is van enige doorlatendheid zal er water gaan stromen. In hoeverre dit de meting beïnvloedt, is vooral afhankelijk van de verhouding in doorlatendheid. Voor wat betreft de analyse van een meting moet dit als nadeel worden aangemerkt. Het kan echter ook een voordeel inhouden. Als aangetoond kan worden, dat dit mechanisme een rol speelt, dan kan met een berekening die ook het basismateriaal in de beschouwing betreft aangetoond worden, dat bij het ontwerppeil geen grote belasting op kan treden, eenvoudig omdat het water in de filterlaag niet zo hoog kan stijgen. Nadelig is vervolgens echter wel, dat ook leeglopen, ofwel het volgen van een dalende buitenwaterstand, langzaam gaat. Dit kan voor bepaalde gedeelten van de zetting juist weer hogere belastingen ten gevolge hebben.

APPENDIX A:

Lang-periodieke golven en variërende doorlatendheid  
in STEENZET/1+

CO-335150/7  
December 1992

LANG-PERIODIEKE GOLVEN  
EN VARIERENDE DOORLATENDHEID  
IN STEENZET/1+

Aanpassingen aan model  
Vergelijk met theorie  
Simulatie meting Colijnsplaat

CO-335150/7  
December 1992

Opgesteld in opdracht van:  
RIJKSWATERSTAAT  
Dienst Weg- en Waterbouwkunde  
Postbus 5044  
2600 GA Delft

AFDELING WATERBOUWKUNDIGE CONSTRUCTIES  
Projectleider: Dr. H. den Adel  
Projectbegeleider: Ir. T. Stoutjesdijk  
Afdelingshoofd: Ir. E. Janse

Inhoud:

Symbolenlijst	ii
1. Inleiding	1
2. Oneindig lange zetting, uniforme doorlatendheid	2
3. Eindig lange zetting, uniforme doorlatendheid	5
3.1 Theorie	5
3.2 Lange zetting in STEENZET	6
3.3 Zetting met beperkte lengte in STEENZET	7
3.4 Verhoging van de gemiddelde waterstand in het filter	8
4. Doorlatende teenconstructie, uniforme doorlatendheid	10
4.1 Theorie	10
4.2 STEENZET-berekeningen	12
5. Buitenwaterstand beneden teen	13
6. Niet-uniforme doorlatendheid	14
7. Case study Colijnsplaat	16
7.1 Te simuleren situatie	16
7.2 Simulatie	17
7.3 Invloed van uitvullaag	18
7.4 Invloed van de run-up	20
7.5 Conclusie	21
8. Conclusies	23
Referenties	25
Bijlagen	
Appendix A : Modificaties aan STEENZET voor invloed getijden	
Appendix B : Notities DWW betreffende lektijd	
B1: Invloed langperiodieke golven op stijghoogteverschil over top laag bij grote lek lengte, N 526	
B2: Invloed overgangsconstructies op lektijd, N 616	
B3: Nogmaals: lektijd, teenconstructie en prototypemetingen, N 647	
Appendix C : Notities GD betreffende lektijd	
C1: Lektijd bij natuurmeting Colijnsplaat, N 580	
C2: Aanvulling op notitie N 580, N 621	



bladnummer : - ii -  
 ons kenmerk: CO-335150/7  
 datum : December 1992

Symbolenlijst

A	doorstroomoppervlak	[m <sup>2</sup> ]
A	factor voor doorlatendheid onderste spleet	[-]
A <sub>0</sub>	amplitude beweging buitenwaterstand	[m]
A <sub>f</sub>	amplitude beweging freatisch oppervlak	[m]
b	dikte filter	[m]
B	blokbreedte	[m]
D	dikte toplaag	[m]
D15	karakteristieke korreldiameter	[m]
h <sub>0</sub>	buitenwaterstand	[m+NAP]
h <sub>f</sub>	hoogte freatisch oppervlak in filter	[m+NAP]
h <sub>gem</sub>	gemiddelde waterstand	[m+NAP]
H <sub>i</sub>	hoogte inkomende golf	[m]
i	verhang	[-]
k'	doorlatendheid toplaag	[m/sec]
k <sub>f</sub>	doorlatendheid filter	[m/sec]
k <sub>s</sub>	doorlatendheid onderste spleet	[m/sec]
k <sub>sT</sub>	doorlatendheid willekeurige spleet	[m/sec]
k <sub>Te</sub>	equivalente doorlatendheid toplaag	[m <sup>3</sup> /sec/m]
L	afstand tussen stilwaterlijn en teen	[m]
L	lengte blok	
n	porositeit	[-]
q	debiet door toplaag	[m <sup>3</sup> /sec]
q <sub>s</sub>	debiet door onderste spleet	[m <sup>3</sup> /sec/m]
R <sub>u</sub>	golfoploop	[m]
s	spleetbreedte	[m]
t	tijd	[sec]
T <sub>0</sub>	golfperiode	[sec]
T <sub>k</sub>	lektijd (oneindig lang talud)	[sec]
T <sub>k,t</sub>	lektijd, eindig lang talud, doorlatende teenconstructie	[sec]
T <sub>k,ond.t</sub>	lektijd, eindig lang talud, ondoorlatende teen	[sec]
X	doorlatendheidslengte van teenconstructie	[m]
α	taludhelling	[rad]
ξ <sub>0</sub>	brekerparameter	[-]
Δ	leklengte	[m]
Δ <sub>e</sub>	equivalente leklengte	[m]

bladnummer : - iii -  
ons kenmerk: CO-335150/7  
datum : December 1992

$\tau$  faseverschil

[sec]

## 1. INLEIDING

In diverse notities van ir. B. P. Rigter is het begrip lektijd geïntroduceerd en uitgewerkt tot een handzame analytische methode om het gedrag van een steenzetting met een grote lek lengte onder invloed van lang-periodieke golven te beschrijven. In reactie hierop is in volgende notities (GD) gekeken of deze theorie bevestigd kon worden door natuurmetingen bij Colijnsplaat. Dit bleek niet het geval. Het hoofddoel van deze studie kan daarom als volgt worden geformuleerd:

- het vergelijken van de resultaten van de theoretische afleiding van de lektijd met STEENZET berekeningen (hoofdstuk 3 en 4)
- het narekenen van de metingen bij Colijnsplaat met STEENZET ten einde een verklaring te vinden voor het geconstateerde verschil met de theorie (hoofdstuk 7).

De theoretische afleiding is geldig voor zettingen met uniforme doorlatendheid, waarbij de waterstand zich gedurende de gehele periode tussen top en teen van de zetting bevindt. In praktijkgevallen zijn dit niet altijd geldige aannames. Met STEENZET is daarom onderzocht wat de invloed op de resultaten is als:

- de waterstand zich gedurende een zekere periode onder de teen van het talud bevindt (hoofdstuk 5).
- de zetting een over de hoogte variërende doorlatendheid heeft (hoofdstuk 6)

Om berekeningen te kunnen maken met STEENZET moesten een aantal aanpassingen worden uitgevoerd om het programma geschikt te maken voor lang-periodieke golven en een doorlatendheid die varieert over de hoogte. Deze aanpassingen zijn gedocumenteerd in appendix A. De theoretische afleiding van de lektijd in de notities van ir. B. P. Rigter, waarnaar in dit rapport herhaaldelijk wordt verwezen, zijn als referentie opgenomen in appendix B. De simulatie van de waarnemingen bij Colijnsplaat zijn gebaseerd op notities N 580 en N 621. Deze zijn opgenomen in appendix C.

## 2. ONEINDIG LANGE ZETTING, UNIFORME DOORLATENDHEID

In notitie N 526 van ir. B.P. Rigter [Appendix B1] wordt het begrip lektijd geïntroduceerd voor een oneindig lange zetting en uniforme doorlatendheid. De gevonden verbanden kunnen niet in de aangepaste STEENZET-versie worden nagerekend, omdat geen oneindig lange zettingen kunnen worden ingevoerd. Later zal blijken, dat de eindige lengte van een zetting wel degelijk een rol kan spelen. Dit hoofdstuk wordt daarom gebruikt om de analytische benadering toe te lichten. Dat is het uitgangspunt voor de verdere studie.

In notitie N 526 wordt voor de stijgsnelheid (of daalsnelheid) van het freatisch vlak afgeleid:

$$\frac{dh_f}{dt} = - \frac{k_f}{n} \cdot \sin^2 \alpha \cdot \left[ 1 - e^{-\frac{h_f - h_0}{\Lambda \cdot \sin \alpha}} \right] \quad (2.1)$$

Bij grote leklengtes wordt verondersteld, dat

$$\Lambda \cdot \sin \alpha \gg |h_f - h_0| \quad (2.2)$$

zodat vergelijking (2.1) kan worden vereenvoudigd tot:

$$\frac{dh_f}{dt} = - \frac{k_f \cdot \sin \alpha}{n \cdot \Lambda} \cdot (h_f - h_0) \quad (2.3)$$

De definitie voor de lektijd is:

$$T_k = \frac{2 \cdot \pi \cdot n \cdot \Lambda}{k_f \cdot \sin \alpha} \quad (2.4)$$

Vergelijking (2.3) kan dan worden geschreven als:

$$\frac{dh_f}{dt} = - \frac{2\pi}{T_k} \cdot (h_f - h_0) \quad (2.5)$$

Als de buitenwaterstand wordt gegeven door een sinusvormige kromme:

$$h_0 = A_0 \cdot \sin\left(\frac{2\pi t}{T_0}\right) \quad (2.6)$$

dan blijkt de vergelijking voor de freatische lijn bij een oneindig lange zetting eveneens sinusvormig:

$$h_f = A_f \cdot \sin\left(\frac{2\pi \cdot (t - \tau)}{T_0}\right) \quad (2.7)$$

waarin  $A_f$  de amplitude van de beweging van de freatische lijn is en  $\tau$  het faseverschil met de buitenwaterstand. Op tijdstip  $t = \frac{T_0}{4} + \tau$  geldt, dat de freatische lijn maximaal is en gelijk is aan de buitenwaterstand op dat tijdstip. Hieruit volgt:

$$A_f = A_0 \cdot \sin\left(\frac{\pi}{2} + \frac{2\pi\tau}{T_0}\right) \quad (2.8)$$

Hiermee valt vergelijking (2.8) ook te schrijven als:

$$A_f = A_0 \cdot \frac{1}{\sqrt{\left(1 + \left(\frac{T_k}{T_0}\right)^2\right)}} \quad (2.9)$$

Voor het faseverschil valt af te leiden:

$$\tau = \frac{T_0}{2\pi} \cdot \arctan\left(\frac{T_k}{T_0}\right) \quad (2.10)$$

In bijlagen 1 en 2 zijn deze relaties getekend. Het maximale faseverschil is gelijk aan een kwart van de periode  $T_0$ , terwijl de amplitude van de waterbeweging in het filter asymptotisch naar nul nadert.

Dit is het uitgangspunt voor verdere berekeningen om na te gaan wat de invloed is van:

- niet-oneindig lange zettingen (hoofdstuk 3)
- doorlatende teenconstructies (hoofdstuk 4)

Met behulp van de lektijd moet kunnen worden aangegeven wanneer de freatische lijn in het filter de buitenwaterstand volgt, en wanneer niet. Ter bepaling van de gedachten kunnen eens wat getallen worden ingevuld. Een redelijk normale zetting zou kunnen worden benaderd met  $n = 0.35$ ,  $\Lambda = 0.5$  m,  $k_f = 1 \cdot 10^{-3}$  m/s en helling 1 : 3. De lektijd is dan 58 min, ofwel ongeveer 1 uur. Een zeer kleine lektijd volgt uit:  $n = 0.3$ ,  $\Lambda = 0.1$  m,  $k_f = 1 \cdot 10^{-2}$  m/s en helling 1 : 2. De lektijd wordt 42 sec, dus nog geen minuut. De lektijd kan ook zeer groot worden,

bladnummer : - 4 -  
ons kenmerk: CO-335150/7  
datum : December 1992

bijvoorbeeld met  $n = 0.4$ ,  $\Delta = 15$  m,  $k_f = 1 \cdot 10^{-4}$  m/s en helling 1 : 5  
resulteert een lektijd van 534 uur, ofwel zo'n 22 dagen.

### 3. EINDIG LANGE ZETTING, UNIFORME DOORLATENDHEID

#### 3.1 Theorie

In notitie N 616 van ir. B.P. Rigter [Appendix B2] wordt de lektijdtheorie uitgebreid voor zettingen die niet oneindig lang zijn en die een teenconstructie met een zekere doorlatendheid hebben. In dit hoofdstuk wordt alleen het feit dat een zetting een eindige lengte heeft in beschouwing genomen. Dit komt in feite overeen met het geval van een volledig dichte teenconstructie in N 616.

De reactie van het freatische vlak wordt nu berekend met:

$$\frac{dh_f}{dt} = - \frac{2 \cdot \pi}{T_{k, \text{ond.}t}} \cdot (h_f - h_0) \quad (3.1)$$

waarin:

$$T_{k, \text{ond.}t} = T_k \cdot \frac{e^{\frac{2L}{\Lambda}} + 1}{e^{\frac{2L}{\Lambda}} - 1} \quad (3.2)$$

met:  $T_{k, \text{ond.}t}$  = de lektijd voor een eindig lange zetting  
 $T_k$  = de lektijd voor een oneindig lange zetting  
 $L$  = de afstand tussen stilwaterlijn en teen  
 $\Lambda$  = de leklengte

In bijlage 3 is het verband tussen  $\frac{L}{\Lambda}$  en  $\frac{T_{k, \text{ond.}t}}{T_k}$  uitgezet. Te zien is, dat bij zettingen met een lengte  $L$  korter dan de leklengte de effectieve lektijd  $T_{k, \text{ond.}t}$  sterk toeneemt. Bij grotere lengtes  $L$  is de invloed beperkt.

Uit vergelijkingen (2.9) en (2.10) kunnen nu ook het faseverschil en amplitudeverschil worden berekend door  $T_k$  te vervangen door  $T_{k, \text{ond.}t}$ . De gevolgen daarvan zijn zichtbaar gemaakt in bijlagen 4 en 5. Bij afnemende lengte van de zetting (ten opzichte van de leklengte) neemt het faseverschil toe en de amplitude  $A_f$  af.

3.2 Lange zetting in STEENZET

Gekeken wordt of de gevonden theoretische verbanden hetzelfde resultaat opleveren als de aangepaste STEENZET versie. In eerste instantie is hierbij gekeken naar een zo lang mogelijk talud (50 blokken van 50 cm lang). De filterdoorlatendheid is bewust vrij groot gemaakt om ook bij een redelijk doorlatende toplaag een lange lek lengte te krijgen. De theorie is alleen geldig voor lange lek lengten (zie voorwaarde (2.2)). Een voordeel van de STEENZET-berekeningen is, dat ze ook voor kortere lek lengten een goed resultaat opleveren. De gegevens voor de berekeningen zijn samengevat in tabel 3.1.

Grootheid	Waarde
Helling talud	1 : 3
Bovenzijde talud	NAP + 1.75 m
Onderzijde talud	NAP - 5.75 m
Getij Hmax	NAP + 1.50 m
Hmin	NAP - 1.50 m
Hstil	NAP
Periode $T_0$	43200 sec = 12 uur
Dikte toplaag	0.25 m
Dikte filter	1.00 m
Porositeit filter	0.35
Doorlatendheid filter	$5.2 \cdot 10^{-2}$ m/s

Tabel 3.1 Invoergegevens voor berekeningen

De toplaagdoorlatendheid kan in STEENZET variabel over de hoogte worden opgegeven. Voor deze serie berekeningen wordt een uniforme toplaagdoorlatendheid aangehouden. Voor doorlatendheden  $k'$  groter dan  $1 \cdot 10^{-5}$  m/s wordt de buitenwaterstand in het filter vrijwel gevolgd. In bijlage 6 wordt geschetst hoe de freatische lijn reageert op de buitenwaterstand voor toplaagdoorlatendheden variërend van  $1 \cdot 10^{-5}$  m/s tot  $1 \cdot 10^{-7}$  m/s. De resultaten worden samengevat in tabel 3.2.



bladnummer : - 7 -  
 ons kenmerk: CO-335150/7  
 datum : December 1992

$k'$ [m/sec]	$A_{fS}$ [m]	$\tau_S$ [sec]	$h_{gemS}$ [m+NAP]	$A_{f\infty}$ [m]	$\tau_\infty$ [sec]	$A_{fL}$ [m]	$\tau_L$ [sec]
$1 \cdot 10^{-5}$	1.49	1086	0.00	1.49	764	1.46	1616
$5 \cdot 10^{-6}$	1.39	2442	0.03	1.48	1076	1.36	2969
$1 \cdot 10^{-6}$	0.64	7505	0.11	1.41	2332	0.61	7901
$5 \cdot 10^{-7}$	0.35	8891	0.14	1.34	3183	0.33	9277
$1 \cdot 10^{-7}$	0.08	10005	0.17	1.00	5776	0.07	10489

Tabel 3.2 Berekeningsresultaten en vergelijking met theorie  
 Teenconstructie op NAP - 5.75 m.

De vergelijking tussen amplitude en faseverschil volgens STEENZET ( $A_{fS}$  en  $\tau_S$ ), de theorie voor een oneindig lang talud ( $A_{f\infty}$  en  $\tau_\infty$ ) en de theorie voor een niet-oneindig lang talud ( $A_{fL}$  en  $\tau_L$ ) is ook zichtbaar gemaakt in de bijlagen 7 en 8. Er is een opmerkelijk goede overeenkomst tussen de STEENZET-berekeningen en de theorie voor een niet-oneindig lang talud.

Een fenomeen, dat niet direct volgt uit de theorie, is de verhoging van de gemiddelde waterstand  $h_{gemS}$  in het filter. Deze blijkt boven het stilwaterniveau te liggen.

### 3.3 Zetting met beperkte lengte in STEENZET

Om de invloed van de lengte van de zetting na te lopen is de eerste serie berekeningen nog twee maal herhaald met de onderzijde van het talud op NAP - 3.75 m, respectievelijk NAP - 1.75 m. De resultaten worden in tabel 3.3 en 3.4 gegeven.

De resultaten zijn ook in grafiekvorm gepresenteerd in bijlagen 9 en 10. Het blijkt, dat naarmate het talud korter wordt, de amplitude  $A_f$  afneemt, het faseverschil toeneemt en de gemiddelde waarde van de freatische lijn hoger komt te liggen. De overeenkomst met de theorie blijkt wederom zeer goed (zie bijlagen 11 en 12). Er treedt enige afwijking op in de berekende fase bij een korte constructie. Dit is vermoedelijk te wijten aan het feit dat de gemiddelde freatische lijn steeds hoger komt te liggen.

$k'$ [m/sec]	$A_{fS}$ [m]	$\tau_S$ [sec]	$h_{gemS}$ [m+NAP]	$A_{fL}$ [m]	$\tau_L$ [sec]
$1 \cdot 10^{-5}$	1.42	1799	0.05	1.42	2317
$5 \cdot 10^{-6}$	1.25	3618	0.10	1.24	4146
$1 \cdot 10^{-6}$	0.45	8262	0.18	0.42	8829
$5 \cdot 10^{-7}$	0.24	9144	0.21	0.22	9792
$1 \cdot 10^{-7}$	0.05	9893	0.23	0.04	10596

Tabel 3.3 Berekeningsresultaten en vergelijking met theorie  
 Teenconstructie op NAP - 3.75 m.

$k'$ [m/sec]	$A_{fS}$ [m]	$\tau_S$ [sec]	$h_{gemS}$ [m+NAP]	$A_{fL}$ [m]	$\tau_L$ [sec]
$1 \cdot 10^{-5}$	1.16	3697	0.23	1.21	4350
$5 \cdot 10^{-6}$	0.86	5641	0.29	0.85	6673
$1 \cdot 10^{-6}$	0.24	8544	0.36	0.20	9861
$5 \cdot 10^{-7}$	0.12	8584	0.39	0.10	10328
$1 \cdot 10^{-7}$	0.03	8587	0.40	0.02	10705

Tabel 3.4 Berekeningsresultaten en vergelijking met theorie  
 Teenconstructie op NAP - 1.75 m.

#### 3.4 Verhoging van de gemiddelde waterstand in het filter

Zoals uit voorgaande twee paragrafen blijkt, ligt de gemiddelde waarde van de freatische lijn boven de gemiddelde buitenwaterstand. Dit is uitgezet in bijlage 13. Een eenvoudige beschouwing volstaat om dit verschijnsel te verklaren.

Zolang de buitenwaterstand hoger is dan de waterstand in het filter, stroomt er water in de zetting. Als de waterstand in het filter hoger is dan de buitenwaterstand dan stroomt er water uit. Gemiddeld over een getijperiode moet er evenveel water in- als uitstromen. Ofwel:

$$\int_0^T q \cdot dt = 0 \quad (3.3)$$

bladnummer : - 9 -  
ons kenmerk: CO-335150/7  
datum : December 1992

waarin  $q$  het debiet door de toplaag voorstelt. Dit debiet kan ook worden geschreven als:

$$q = k' \cdot A \cdot i \quad (3.4)$$

Interessant hieraan is de grootte  $A$ : het doorstroomoppervlak. Deze wordt, als de buitenwaterstand hoger is, bepaald door de buitenwaterstand, en als de binnenwaterstand hoger is, bepaald door de binnenwaterstand. Het verloop van het doorstroomoppervlak in de tijd wordt geschetst in bijlage 14. Hieruit blijkt duidelijk, dat bij instromen van water het doorstroomoppervlak groter is dan bij uitstromen. Dit moet dus gecompenseerd worden door de periode dat er water uitstroomt langer te maken. Dit gebeurt door de gemiddelde waterstand in het filter te verhogen.

#### 4. DOORLATENDE TEENCONSTRUCTIE, UNIFORME DOORLATENDHEID

##### 4.1 Theorie

Ook het geval waarin de teenconstructie doorlatend is kan voor een uniforme toplaagdoorlatendheid analytisch worden berekend. Hiertoe is een aanpassing van de formule voor de lektijd nodig:

$$T_{k,t} = T_k \cdot \frac{e^{\frac{2L}{\Lambda} + \left(\frac{X - \Lambda}{X + \Lambda}\right)}}{e^{\frac{2L}{\Lambda} - \left(\frac{X - \Lambda}{X + \Lambda}\right)}} \quad (4.1)$$

waarin X staat voor de doorlatendheidslengte van de teenconstructie in meter. X varieert van 0 (open teen) tot  $\infty$  (dichte teen). Als X = 0 volgt:

$$T_{k,t} = T_k \cdot \frac{e^{\frac{2L}{\Lambda} - 1}}{e^{\frac{2L}{\Lambda} + 1}} \quad (4.2)$$

en als X =  $\infty$ :

$$T_{k,t} = T_k \cdot \frac{e^{\frac{2L}{\Lambda} + 1}}{e^{\frac{2L}{\Lambda} - 1}} \quad (4.3)$$

en als X =  $\Lambda$ :

$$T_{k,t} = T_k \quad (4.4)$$

Dit laatste geval komt overeen met een oneindig lange zetting. De bovenstaande formules zijn grafisch weergegeven in bijlage 15.

De doorlatendheid van de teenconstructie wordt voorgesteld door de onderste spleet een zekere doorlatendheid te geven, variërend van 0 tot  $\infty$ . Nu kan voor het debiet door de onderste spleet gesteld worden:

$$q_s = k_s \cdot s \cdot i \quad (4.5)$$

met:  $q_s$  = debiet door onderste spleet in  $m^2/s$  per blokbreedte  
 $k_s$  = doorlatendheid onderste spleet in m/s

bladnummer : - 11 -  
ons kenmerk: CO-335150/7  
datum : December 1992

s = spleetbreedte in m  
i = verhang

Een andere manier om dit te schrijven is:

$$q_s = k_{Te} \cdot B \cdot i \quad (4.6)$$

waarin:  $k_{Te}$  = de equivalente doorlatendheid van de toplaag (de doorlatendheid waarbij  $k_s \cdot s = k_{Te} \cdot B$ ) in m/s

B = blokbreedte in m

Met behulp van de equivalente doorlatendheid van de toplaag kan ook de equivalente leklengte  $\Lambda_e$  worden geïntroduceerd, waarna blijkt dat:

$$X = \frac{\Lambda_e^2}{B} \quad (4.7)$$

met:  $\Lambda_e^2 = \frac{D \cdot b \cdot k_f}{k_{Te}}$  (4.8)

b = dikte filter in m

We kunnen nu verband leggen tussen X en de doorlatendheid van de onderste spleet:

$$X = \frac{\Lambda_e^2}{B} = \frac{D \cdot b \cdot k_f}{k_{Te} \cdot B} = \frac{D \cdot b \cdot k_f}{k_s \cdot s} \quad (4.9)$$

Bijvoorbeeld: D = 0.25 m  
b = 0.50 m  
 $k_f = 1 \cdot 10^{-3}$  m/s  
 $k_s = 1 \cdot 10^{-2}$  m/s  
s = 0.0015 m

geeft: X = 8.33 m

Voor verwerking in STEENZET is het nuttig  $k_s$  uit te drukken in een aantal malen de doorlatendheid van een spleet die de toplaagdoorlatendheid representeert:

$$k_{sT} = k' \cdot \frac{B \cdot L}{s \cdot (B + L)} \quad (4.10)$$

bladnummer : - 12 -  
 ons kenmerk: CO-335150/7  
 datum : December 1992

met:  $k_{sT}$  = doorlatendheid willekeurige spleet in m/s  
 $k'$  = doorlatendheid toplaag in m/s  
 L = lengte blok

Nu is:

$$k_s = 0.5 \cdot A \cdot k_{sT} \quad (4.11)$$

ofwel de doorlatendheid van de onderste spleet is A maal de doorlatendheid van een willekeurige spleet, gedeeld door 2 omdat de onderste spleet slechts over een half blok wordt meegerekend, terwijl een willekeurige spleet over een heel blok meetelt.

In STEENZET wordt het getal A ingevoerd. Hieruit kan de waarde X berekend worden. Voor een waarde  $A = 0$  volgt  $X = \infty$  (dichte teen) en voor  $A = \infty$  volgt  $X = 0$  (open constructie).

#### 4.2 STEENZET-berekeningen

De gegevens van de constructie zijn dezelfde als in het vorige hoofdstuk (zie tabel 3.1). Als gegevens zijn bovendien gebruikt de spleetbreedte  $s$  ( $= 0.0015$  m) en de blokbreedte  $B$  ( $= 0.5$  m). Er wordt gekozen voor een vrij korte constructie, waarbij de teen op NAP  $-1.75$  m ligt. De toplaagdoorlatendheid is klein ( $1 \cdot 10^{-7}$  m/s). De doorlatendheid van de onderste spleet wordt gevarieerd.

A	$k_s$	X	X/A	$A_{fS}$	$\tau_S$	$h_{gemS}$	$A_{f,t}$	$\tau_t$
[-]	[m/s]	[m]	[-]	[m]	[sec]	[m+NAP]	[m]	[sec]
0	0	$\infty$	$\infty$	0.03	8587	0.40	0.02	10705
375	0.0063	694	1.92	0.65	7448	0.01	0.64	7755
750	0.0125	347	0.96	1.04	5525	0.00	1.02	5641
1500	0.025	173	0.48	1.27	3842	-0.04	1.32	3451
$\infty$	$\infty$	0	0	-	-	-	1.50	117

Tabel 4.1 Berekeningsresultaten en vergelijking met theorie  
 Doorlatende teenconstructie

De vergelijking tussen theorie en berekening is nog steeds zeer goed te noemen. De gemiddelde waterstand in het filter daalt met toenemende doorlatendheid van de teen. De figuur in bijlage 16 geeft een indruk van de resultaten.

bladnummer : - 13 -  
ons kenmerk: CO-335150/7  
datum : December 1992

#### 5. BUITENWATERSTAND BENEDEN TEEN

Een situatie die in de praktijk veel voorkomt, maar waarvoor de analytische methode geen oplossing biedt, is die waarbij de buitenwaterstand gedurende enige tijd onder de teenconstructie komt te liggen. Hier is slechts een enkel geval uitgewerkt: de

toplaagdoorlatendheid is  $1 \cdot 10^{-6}$  m/s, en het getij komt steeds lager op het talud te liggen. De zetting is gekozen met de teenconstructie op NAP - 2 m. Het getij heeft steeds een amplitude van 1.5 m. De stilwaterlijn zakt van NAP naar NAP - 0.60 m en vervolgens naar NAP - 1.25 m.

Het effect hiervan wordt zichtbaar in bijlage 17. De amplitude van de waterbeweging in het filter wordt steeds kleiner naarmate de gemiddelde buitenwaterstand zakt. De reden hiervoor is simpel: het natte oppervlak wordt steeds kleiner.

## 6. NIET-UNIFORME DOORLATENDHEID

Zoals bij de doorlatendheidsmetingen bij Colijnsplaat werd geconstateerd kan de doorlatendheid van de toplaag een functie zijn van de hoogte. Het proces van inzanding van een zetting zal naar verwachting in het getijgebied sneller gaan dan in het gebied daarboven.

Een over de hoogte variabele doorlatendheid heeft gevolgen voor de reactie van de constructie bij belasting van zowel korte golven als lang-periodieke golven. Bij lang-periodieke golven wordt echter een groter verschil in doorlatendheid verwacht, omdat de stilwaterlijn in hoogte verandert.

De versie van STEENZET voor lang-periodieke golven is aangepast om een over de hoogte variërende doorlatendheid te kunnen simuleren. Hierbij is er van uitgegaan, dat de toplaagdoorlatendheid op een aantal punten bekend is, bijvoorbeeld door doorlatendheidsmetingen. Er wordt opgegeven op welke hoogtes welke doorlatendheden zijn gemeten. Tussen twee hoogtes wordt logaritmisch geïnterpoleerd. Als op hoogte 1 een doorlatendheid  $1 \cdot 10^{-5}$  m/s is gemeten en op hoogte 2 een doorlatendheid  $1 \cdot 10^{-7}$  m/s, dan is de doorlatendheid hier midden tussenin  $1 \cdot 10^{-6}$  m/s. Boven het hoogste punt en onder het laagste punt wordt de doorlatendheid constant gehouden.

Getracht wordt de veroudering van een zetting na te bootsen. Zoals geconstateerd bij Colijnsplaat kan de doorlatendheid van de toplaag variëren van  $5 \cdot 10^{-3}$  m/s (niet verouderd), tot  $5 \cdot 10^{-7}$  m/s (volledig verouderd). In de meest ongunstige situatie verouderd de toplaag, maar blijft de filterdoorlatendheid gelijk. Omdat bij een ondoorlatende toplaag naar verwachting de doorlatendheid van de teen een belangrijke rol speelt, is ook deze gevariëerd.

Voor de berekeningen wordt uitgegaan van een zetting van NAP - 2 m tot NAP + 2 m. Het getij gaat van NAP - 1.5 m tot NAP + 1.5 m. De doorlatendheid van de toplaag wordt opgegeven in twee punten: NAP - 1.5 m en NAP + 1.5 m. De filterdoorlatendheid blijft constant:  $5 \cdot 10^{-2}$  m/s. De toplaagdoorlatendheid kan slechts in beperkte mate worden gevariëerd: als de toplaagdoorlatendheid groter wordt dan  $5 \cdot 10^{-5}$  m/s wordt het systeem instabiel. De tijdstap is dusdanig groot dat bij een grote toplaagdoorlatendheid er zoveel water in en uit het filter stroomt, dat de waterstand in het filter rond de buitenwaterstand gaat schommelen. Er kan dus worden gesteld, dat deze gevallen niet interessant meer zijn, omdat er voldoende water door de toplaag kan stromen om geen grote verschillen met de buitenwaterstand te creëren. De volgende gevallen zijn berekend:



bladnummer : - 15 -  
ons kenmerk: CO-335150/7  
datum : December 1992

$k'$ op NAP+1.5 m	$k'$ op NAP-1.5 m	doorlatendheid onderste spleet
$5 \cdot 10^{-5}$ m/s	$5 \cdot 10^{-7}$ m/s	A = 1
$1 \cdot 10^{-5}$ m/s	$5 \cdot 10^{-7}$ m/s	A = 1
$5 \cdot 10^{-6}$ m/s	$5 \cdot 10^{-7}$ m/s	A = 1
$5 \cdot 10^{-7}$ m/s	$5 \cdot 10^{-7}$ m/s	A = 1, A = 1000

Tabel 6.1 Berekeningsgevallen

Uit de berekeningen met een ondoorlatende teenconstructie volgt, dat als de toplaagdoorlatendheid varieert tussen  $5 \cdot 10^{-5}$  en  $5 \cdot 10^{-7}$  m/s het programma al niet meer goed reageert (zie bijlage 18). Er blijft door de lage doorlatendheid lager op de zetting veel water in de constructie aanwezig. Bij een opgaande waterstand komt de binnenwaterstand geruime tijd boven de maximale buitenwaterstand. Het leegstromen van de zetting gaat vervolgens vrij langzaam. De invloed van de variërende toplaagdoorlatendheid uit zich voornamelijk in een vormverandering ten opzichte van de sinusvormige buitenwaterstand. Bij een stijgende waterstand in het filter gaat deze stijging steeds sneller, omdat de doorlatendheid steeds toeneemt. Het dalen van de waterstand in het filter gaat vervolgens in het begin snel, en vervolgens steeds langzamer. Het verloop van de binnenwaterstand krijgt hierdoor een 'zaagtand'-achtig karakter.

Als de teenconstructie volledig doorlatend wordt aangenomen (A=1000) (bijlage 19) dan is dit effect verdwenen. Bij deze lage doorlatendheden van de toplaag overheerst de stroming door de teen het proces.

bladnummer : - 16 -  
ons kenmerk: CO-335150/7  
datum : December 1992

## 7. CASE STUDY COLIJNSPLAAT

### 7.1 Te simuleren situatie

Er is in de nog korte historie van het onderzoek naar het begrip lektijd al veel verwarring ontstaan door het verschil tussen stijghoogte in een punt en de ligging van de freatische lijn. Dit is uitstekend uiteengezet in notitie N 647 (Appendix B3). Om verdere verwarring te voorkomen wordt hier voor alle duidelijkheid precies weergegeven wat er gesimuleerd is. Bij de natuurmeting zijn om het half uur de waterspanningsmeters in de filterlaag uitgelezen. De gemiddelde waarde hiervan geeft de stijghoogte in het filter weer. Deze zelfde stijghoogte wordt ook in STEENZET uitgerekend, alleen wordt het daar uitgedrukt als verschildruk. Uit de waarden van de drukopnemers bovenop de toplaag wordt de buitenwaterstand afgeleid. Gemeten is de buitenwaterstand en de stijghoogte op twee hoogtes onder het talud. In tabel 7.1 en in bijlage 20 staan de meetwaarden uitgezet.

Tijdstip [uur]	Buitenwaterstand [m + NAP]	$\phi$ op NAP + 0.30 m [m + NAP]	$\phi$ op NAP + 0.56 m [m + NAP]
17:00	0.48	0.30	0.56
17:30	0.72	0.60	0.56
18:00	1.03	0.86	0.82
18:30	1.28	1.10	1.06
19:00	1.39	1.27	1.22
19:30	1.44	1.36	1.31

Tabel 7.1 Meetwaarden

Uit deze stijghoogtes kan niet zonder meer de ligging van de freatische lijn worden afgelezen. De enige manier om hier achter te komen, is door met STEENZET de stijghoogtes te simuleren. Op het moment dat deze stijghoogtes kloppen kan ook de freatische lijn worden berekend.

### 7.2 Simulatie

De werkwijze is als volgt:

- Met de gegevens van tabel 7.2 wordt een STEENZET-berekening gemaakt. Hierbij wordt verondersteld, dat de teen dicht is, en dat er geen invloed van golfoploop is.
- De teen kan doorlatender worden aangenomen als de stijghoogte in het filter een te kleine amplitude heeft

bladnummer : - 17 -  
ons kenmerk: CO-335150/7  
datum : December 1992

- De invloed van golfoploop wordt in de beschouwing betrokken als de gemiddelde waterstand te laag is.
- Als de stijghoogte in het filter op deze manier juist is gesimuleerd, wordt de bijbehorende freatische lijn bepaald.

Grootheid	Waarde
Helling talud	1 : 4
Bovenzijde talud	NAP + 4.50 m
Onderzijde talud	NAP - 0.99 m
Getij $A_0$	1.39 m
Hstil	NAP + 0.06 m
Periode $T_0$	44700 sec
Dikte toplaag	0.25 m
Lengte blok	0.50 m
Breedte blok	0.50 m
Spleetbreedte	0.0015 m
Doorlatendheid filter	$4 \cdot 10^{-4}$ m/s
Doorlatendheid teen	$A = 1$
Doorlatendheid toplaag op NAP+4.20 m:	$k' = 5 \cdot 10^{-3}$ m/s
op NAP+2.75 m:	$k' = 8 \cdot 10^{-5}$ m/s
op NAP+0.70 m:	$k' = 5 \cdot 10^{-7}$ m/s

Tabel 7.2 Invoergegevens voor simulatie Colijnsplaat

Uit het resultaat (zie bijlage 21) blijkt, dat de simulatie van de stijghoogtes verre van succesvol is. De toplaag is zo ondoorlatend en de leklengte zo lang, dat de aanpassing van de stijghoogtes aan de buitenwaterstand (zoals berekend) ver achterloopt bij de gemeten waarden. De volgende stap is derhalve het aanpassen van de doorlatendheid van de teenconstructie. In bijlage 22 is de doorlatendheid van de teen tot onwaarschijnlijke hoogte opgevoerd. Toch is de amplitude van de waterbeweging onder de toplaag onvoldoende om in de buurt van de gemeten stijghoogtes te komen.

Er zijn twee verklaringen denkbaar:

- Er is sprake van een uitvullaag die duidelijk doorlatender is dan de filterlaag. Bij de simulatie van de natuurmeting is aangenomen dat dit niet het geval is. Blijkt dit echter wel het geval, dan moet voor de bepaling van de leklengte uit de natuurmeting alleen de uitvullaag worden meegerekend. Hierdoor worden de individuele doorlatendheden van filter en uitvullaag duidelijk anders dan tot nu toe verondersteld.

- Er is sprake van een niet onaanzienlijke invloed van de golfwerking op het talud. Door de korte golven op het getij te superponeren wordt bereikt dat een groter deel van het talud 'nat' is dan wanneer alleen rekening wordt gehouden met de stilwaterlijn van het getij. Door regen tijdens de meting kan dit effect versterkt worden; in feite is dan een groot gedeelte van het talud nat.

### 7.3 Invloed van uitvullaag

Een mogelijkheid is, om bij de bepaling van de lek lengte in plaats van filter- plus uitvullaag, alleen de uitvullaag in de beschouwing mee te nemen. Dit is redelijk als de uitvullaag van steenslag een duidelijk grotere doorlatendheid heeft dan de filterlaag van mijnsteen. Er vindt dan weinig uitwisseling van water plaats tussen uitvullaag en filter. In ieder geval voor de kortdurende golven kan dan gesteld worden, dat het gedrag van de constructie bepaald wordt door de doorlatendheid van de uitvullaag. De gemeten lek lengte van 13 meter leidt tot een doorlatendheid van de uitvullaag van  $1.1 \cdot 10^{-2}$  m/s, in plaats van een doorlatendheid van  $4 \cdot 10^{-4}$  m/s voor filter plus uitvullaag. Hierbij kan worden opgemerkt, dat de waterspanningsmeters bij de natuurmeting direct onder de blokken, dus in de uitvullaag, geplaatst waren.

Voor de berekening met een lang-periodieke golf, is het van belang ook de filterdoorlatendheid te weten. Immers, ook als de filterlaag relatief ondoorlatend is, zal er in een langere periode uitwisseling van water tussen uitvullaag en filterlaag plaatsvinden. Er moet nu gerekend worden met een andere lek lengte dan in het geval van de kort-periodieke golf.

In STEENZET worden filterlaag en uitvullaag samengesteld tot 1 laag met een zekere doorlatendheid en porositeit. Vervolgens wordt de berekening uitgevoerd. In werkelijkheid is de situatie gecompliceerder. Het is bijvoorbeeld best mogelijk, dat de uitvullaag duidelijk doorlatender is dan de filterlaag. Bij een stijgende waterstand wordt de uitvullaag het snelst gevuld met water. Er ontstaat een stijghoogteverschil tussen uitvullaag en filterlaag, waardoor water uit de uitvullaag naar het filter stroomt. Er ontstaat een situatie met twee-dimensionale stroming. In STEENZET/1+ wordt alleen rekening gehouden met stroming evenwijdig aan het talud.

Er kan een berekening worden uitgevoerd waarin rekening wordt gehouden met de mogelijkheid dat voor korte golven de lek lengte wordt bepaald door de doorlatendheid van de uitvullaag. De teen wordt volledig doorlatend verondersteld. Als onbekende blijft dan de doorlatendheid van de filterlaag van mijnsteen over.

Voor de doorlatendheid van de filterlaag kan een schatting worden gemaakt. De waarde van de D15 van mijnsteen ligt qua orde-grootte tussen 1 mm en 10 mm (gebaseerd op korrelverdelingen van mijnsteen bij

bladnummer : - 19 -  
ons kenmerk: CO-335150/7  
datum : December 1992

Lauwersmeerdam). Gekozen wordt voor 1 mm om de aanname dat de doorlatendheid van het filter sterk minder is dan die van de uitvullaag te onderbouwen. De doorlatendheid van het filter wordt hiermee  $5 \cdot 10^{-3}$  m/s. Hiermee is de berekening ook uitgevoerd. In [3] wordt al gesteld, dat de filterdoorlatendheid tussen  $6 \cdot 10^{-4}$  en  $6 \cdot 10^{-3}$  m/s moet liggen. De doorlatendheid van de onderste spleet levert een schatting op van de doorlatendheid van de teenconstructie. De doorlatendheid van de onderste spleet kan worden geschat op:

$$k_s = \frac{A}{2} \cdot k' \cdot \frac{B \cdot L}{s \cdot (B+L)} \quad (7.2)$$

Ingevuld met  $A = 4000$  en een spleetbreedte van 1.5 mm komt dit op 0.167 m/s/m'. In werkelijkheid stroomt het water echter niet door de onderste spleet, maar door de teenconstructie. Deze heeft in principe een doorstroomoppervlak van de filterdikte maal 1 m', in dit geval dus  $1 \text{ m}^2$ , terwijl de onderste spleet een doorstroomoppervlak heeft van  $s \cdot 1 \text{ m}$ . De doorlatendheid van de teenconstructie komt dan uit op  $2.5 \cdot 10^{-4}$  m/s. Als we er vanuit gaan dat de teenconstructie bestaat uit planken met grote kieren ertussen en dat voor de teenconstructie zand ligt is dit een vrij hoge, maar geen onmogelijke waarde.

In bijlage 23 is het resultaat van een berekening, waarbij met deze nieuwe gegevens rekening is gehouden. De doorlatendheid van de teen is gekozen op  $A = 4000$ . Dit is ongeveer de grens van wat maximaal als teendoorlatendheid mogelijk wordt geacht. Nu blijkt dat de gemeten stijghoogtes tot op enkele centimeters benaderd kunnen worden.

Er blijft een verschil van 5 à 10 cm tussen gemeten en berekende freatische lijn. De berekende freatische lijn ligt nog iets te laag. Dit kan wellicht worden veranderd door de invloed van golfoploop in de beschouwing te betrekken.

#### 7.4 Invloed van golfoploop

De grootte van de run-up kan worden bepaald uit de formule:

$$\frac{R_u}{H_i} = 0.9 \cdot \xi_o \quad (7.3)$$

waarin:  $R_u$  = de run-up in meters  
 $H_i$  = de hoogte van de inkomende golf  
 $\xi_o$  = de brekerparameter

bladnummer : - 20 -  
ons kenmerk: CO-335150/7  
datum : December 1992

De golfhoogte en golfperiode van de korte golven resulteren in een waarde van de brekerparameter van 1 à 1.5, de hoogte van de inkomende golf is 0.20 à 0.35 m. De waarde voor de run-up varieert tussen 0.20 m en 0.50 m.

In de STEENZET-versie voor lange golven is de golfrandvoorwaarde zodanig aangepast, dat rekening gehouden kan worden met run-up. Hierbij is de invloed van run-up geschematiseerd als een bepaalde hoogte boven de stilwaterlijn, die weliswaar geen druk op het talud heeft, maar waarbij de spleten voortdurend gevuld zijn met water. Hierdoor vindt ook boven de stilwaterlijn insijpeling plaats. Er zijn twee berekeningen gemaakt met de gegevens van paragraaf 7.3: met een run-up van 0.35 m en met een run-up van 0.70 m. Deze twee gevallen komen overeen met de verwachte run-up en twee maal de verwachte run-up.

In beide gevallen is de doorlatendheid van de teen gelijk gekozen aan  $A = 4000$ , omdat dit de beste simulatie van de freatische lijn oplevert.

#### 7.5 Conclusie

De simulatie van de meting van de freatische lijn bij Colijnsplaat is qua tendens succesvol. Door de uitvullaag als maatgevend te beschouwen voor de natuurmeting op korte golven en de filterlaag plus de uitvullaag als maatgevend voor lange golven wordt een eerste stap in de goede richting gezet. Door de teenconstructie als zeer doorlatend aan te nemen wordt de tendens goed weergegeven, maar wel blijkt de berekende freatische lijn 5 à 10 cm lager te liggen dan de gemeten freatische lijn. Het meenemen van de invloed van de run-up heeft hier enige invloed op (enkele centimeters). Het resterende verschil wordt toegeschreven aan de onzekerheden in de bepaling van de exacte hoogteligging van de meters:

- als gevolg van niet exact bekende hoogte van boorgat
- als gevolg van mogelijk niet loodrecht op de top laag boren
- als de waterspanningsmeters een of meer centimeters in de uitvullaag zitten in plaats van exact onder de top laag.

## 8. CONCLUSIES

Aan de hand van een directe vergelijking tussen de resultaten van de analytische benadering en STEENZET-sommen voor lang-periodieke golven kunnen de volgende conclusies getrokken worden:

- De theoretische benadering met behulp van het begrip lektijd geeft een goede indruk van het gedrag van amplitude en faseverschil van de freatische lijn in het filter als reactie op een lang-periodieke golf.
- De analytische benadering geeft geen verhoging van de gemiddelde waterstand in het filter, terwijl deze in STEENZET wel berekend wordt. Dit leidt tot een onderschatting van het maximale waterstandverschil.
- Mede door de verhoging van de gemiddelde waterstand in het filter verandert de vorm van de kromme die de waterstand in het filter beschrijft als functie van de tijd van een sinus-vormige naar een iets meer 'zaagtand'-vormige.
- De analytische methode kan niet toegepast worden op zettingen met een over de hoogte wisselende doorlatendheid.
- De analytische methode kan evenmin worden gebruikt als het talud gedurende de golfperiode enige tijd droogvalt.

Als de buitenwaterstand zich gedurende een deel van de golfperiode beneden de teen bevindt, heeft dit tot gevolg dat de amplitude van de beweging in het filter afneemt ten opzichte van de situatie waarbij de buitenwaterstand zich gedurende de gehele golfperiode op de zetting bevindt. Dit is ten gevolge van een kleiner oppervlak waardoor water door de toplaag stroomt.

Bij een over de hoogte variërende doorlatendheid kan geconcludeerd worden, dat in dat geval:

- zowel lektijd als leklengte variëren over de hoogte. Er is dus geen sprake meer van 'de' lektijd en 'de' leklengte van een constructie.
- bij een doorlatendheid die naar beneden toe steeds verder afneemt, de zetting snel 'volloopt' bij hoogwater en langzaam 'leegloopt'. Hierbij heeft de doorlatendheid van de teen een grote invloed.

De simulatie van de meting van de lektijd bij Colijnsplaat geeft aan dat:

- Het is voor de lektijd van eminent belang te weten wat de exacte waarde is van de doorlatendheid van filter en teenconstructie. Deze twee doorlatendheden overheersen in dit geval de reactie van de freatische lijn, mede omdat de toplaagdoorlatendheid in het beschouwde gebied zo klein is.

bladnummer : - 22 -  
ons kenmerk: CO-335150/7  
datum : December 1992

- Bij een zeer grote doorlatendheid van de teenconstructie is invloed van variabele toplaagdoorlatendheid en van run-up betrekkelijk klein.
- De ligging van de freatische lijn kan worden nagerekend, echter wel met hoge waarden voor zowel doorlatendheid van de teenconstructie als van het filter. Omdat de toplaag in sterke mate veroudering vertoont, kunnen er vraagtekens worden gezet bij deze hoge doorlatendheden.

In algemene zin kan omtrent het begrip lektijd worden opgemerkt, dat:

- het bij kort-periodieke golven van belang is te weten waar de freatische lijn zich bevindt. Zoals in dit rapport afdoende is aangetoond kan dit sterk afwijken van de aannames in de huidige rekenmodellen.
- de verschillen tussen buiten- en binnenwaterstand onder invloed van lange golven kunnen groot zijn. Er kan een aanzienlijke opwaartse druk op de blokken worden uitgeoefend.
- het, om tot een goede voorspelling van de ligging van de freatische lijn te komen, noodzakelijk is om doorlatendheid van teenconstructie en filter te kennen. Deze grootheden zijn echter juist moeilijk in het veld te meten. De doorlatendheid van de teenconstructie is ook analytisch moeilijk te voorspellen.  
Dit heeft tot gevolg dat in praktijkgevallen het een riskante zaak kan zijn met de analytische methode of met STEENZET/1+ de ligging van de freatische lijn te voorspellen. Dit onderstreept het belang van methoden om de lektijd in het veld te meten.



bladnummer : - 23 -  
ons kenmerk: CO-335150/7  
datum : December 1992

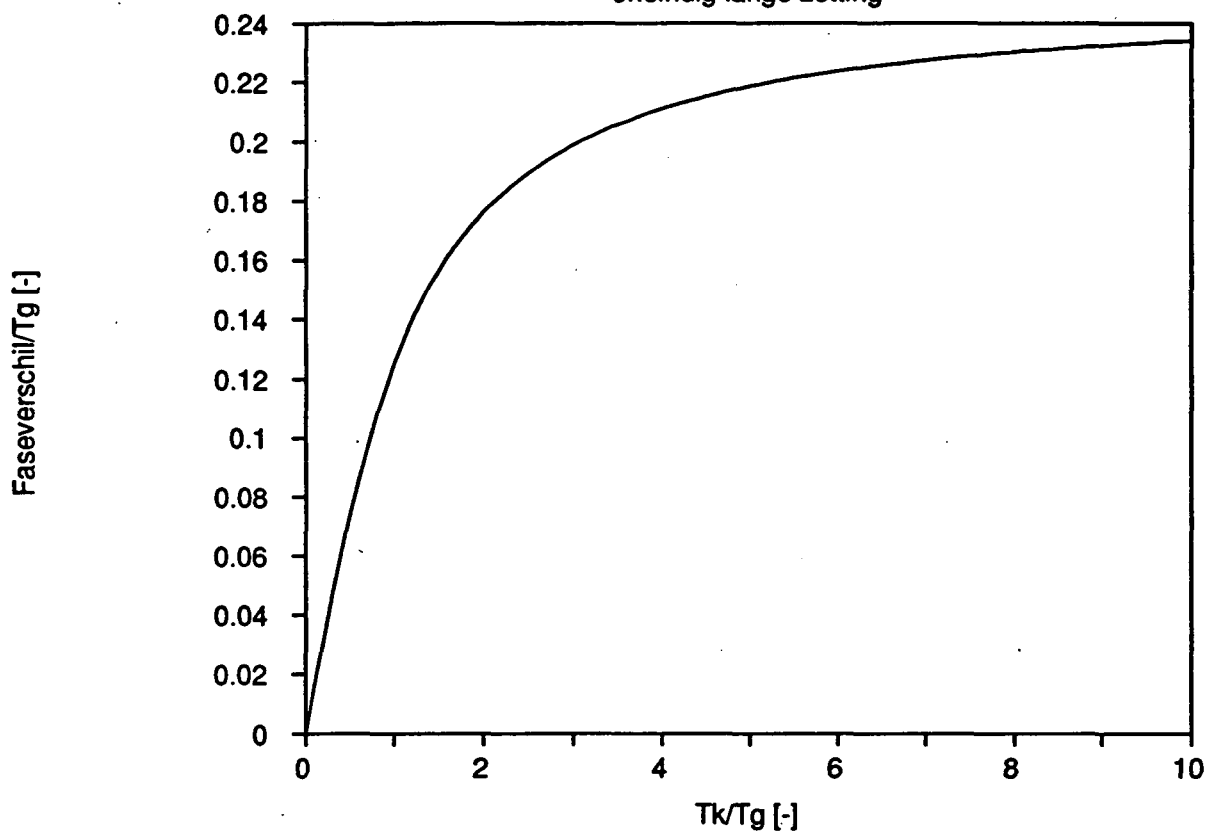
#### REFERENTIES

1. Natuurmeting te Colijnsplaat en simulatie met STEENZET/1+, Grondmechanica Delft, CO-319330/5, N 557, okt. 1991
2. Tussentijdse rapportage eerste meetcampagne natuurmetingen op meetlocatie Noord Beveland, DWV, 1990
3. Numerieke simulatie van pompinjectieproeven in een steenzetting, concept, Grondmechanica Delft, CO-332440/2, N 592, feb. 1992

BIJLAGEN

## Faseverschil als functie van lektijd

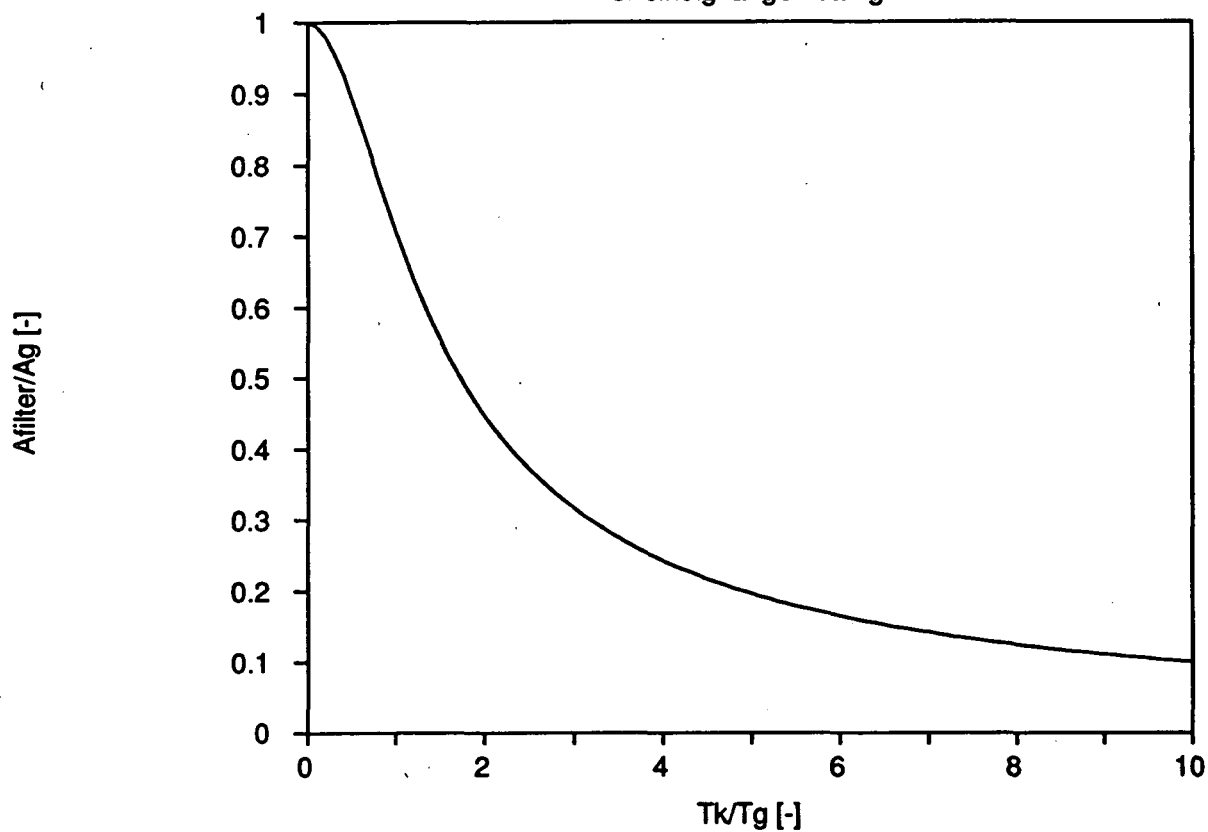
oneindig lange zetting




 <b>GRONDMECHANICA DELFT</b>	Postbus 69, 2600 AB Delft Telefoon (015) 69 35 00	Telefax (015) 61 08 21 Telex 38234 soil nl	d.d. <b>NOV.'92</b>	get. <b>Weg</b>
<b>THEORETISCH FASE VERSCHIL ALS FUNCTIE VAN LEKTIJD ONEINDIG LANGE ZETTING</b>			<b>CO - 335150</b>	gez.
			<b>BIJL. 1</b>	form. <b>A4</b>

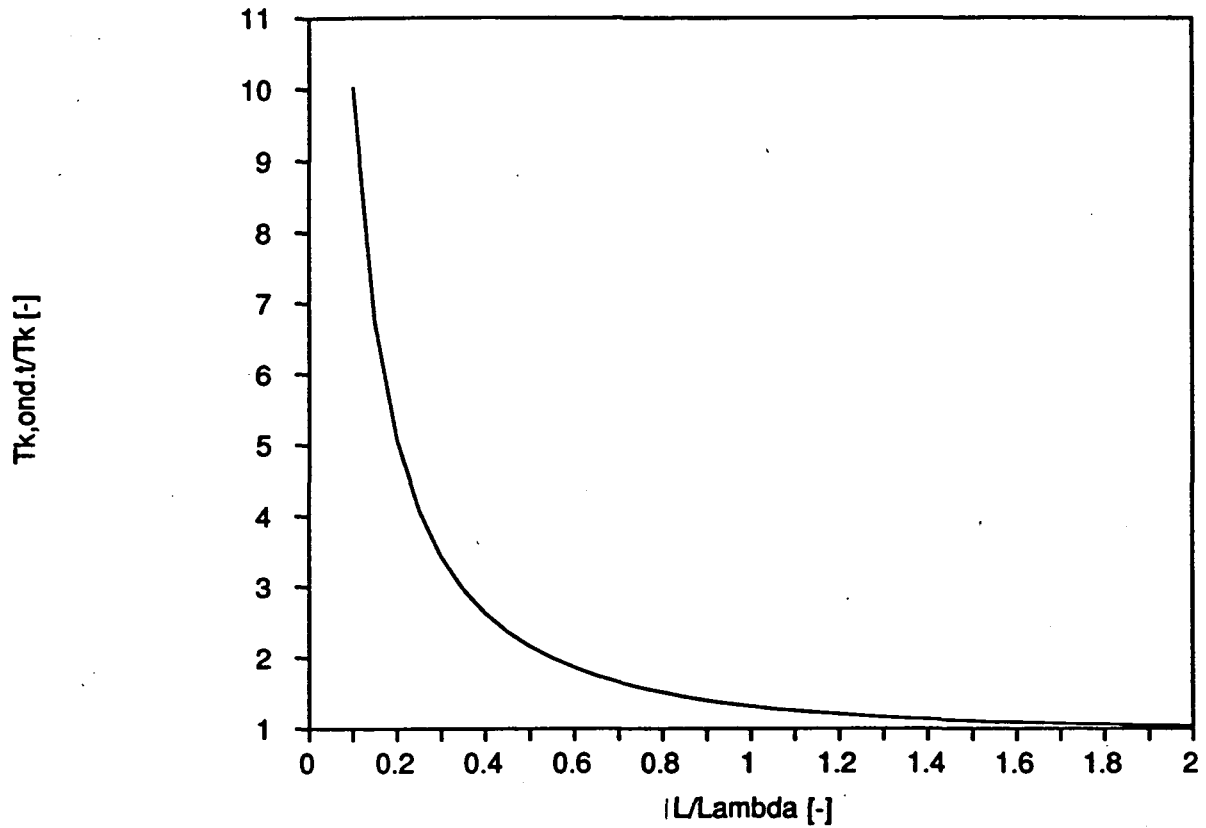
## Amplitudeverschil als functie lektijd


oneindig lange zetting



 <p><b>GRONDMECHANICA DELFT</b></p>	Postbus 69, 2600 AB Delft Telefoon (015) 69 35 00 Telefax (015) 61 08 21 Telex 38234 soil nl	d.d. <b>NOV.'92</b>	get. <b>Weg</b>
THEORETISCH AMPLITUDE VERSCHIL ALS FUNCTIE VAN LEKTIJD ONEINDIG LANGE ZETTING		CO - 335150	gez.
		BIJL. 2	form. A4

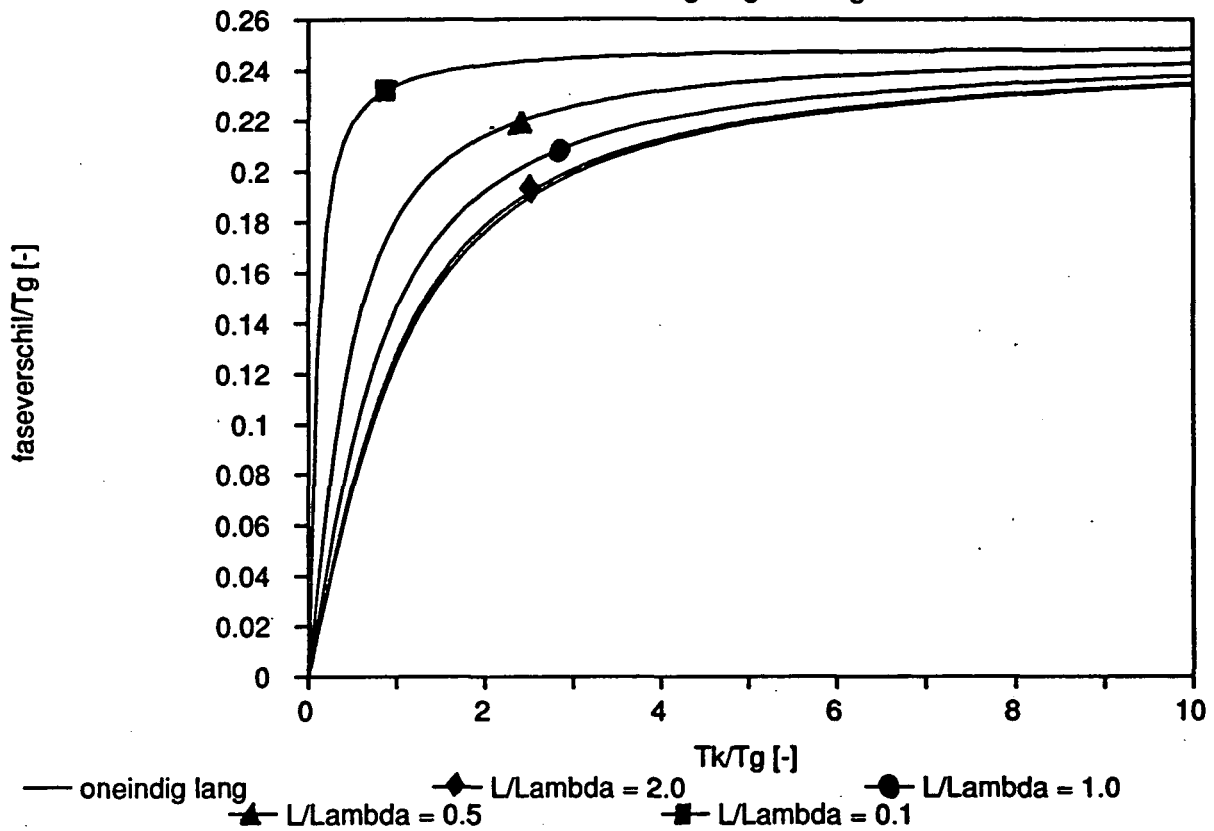
## Lektijd bij eindig lange zetting




 <b>GRONDMECHANICA DELFT</b>	Postbus 69, 2600 AB Delft Telefoon (015) 69 35 00	Telefax (015) 61 08 21 Telex 38234 soil nl	d.d. <b>NOV.'92</b>	get. <b>Weg</b>
<b>LEKTIJD BIJ EINDIG LANGE ZETTING</b>			<b>CO - 335150</b>	gez.
			<b>BIJL. 3</b>	form. A4

## Faseverschil als functie van lektijd

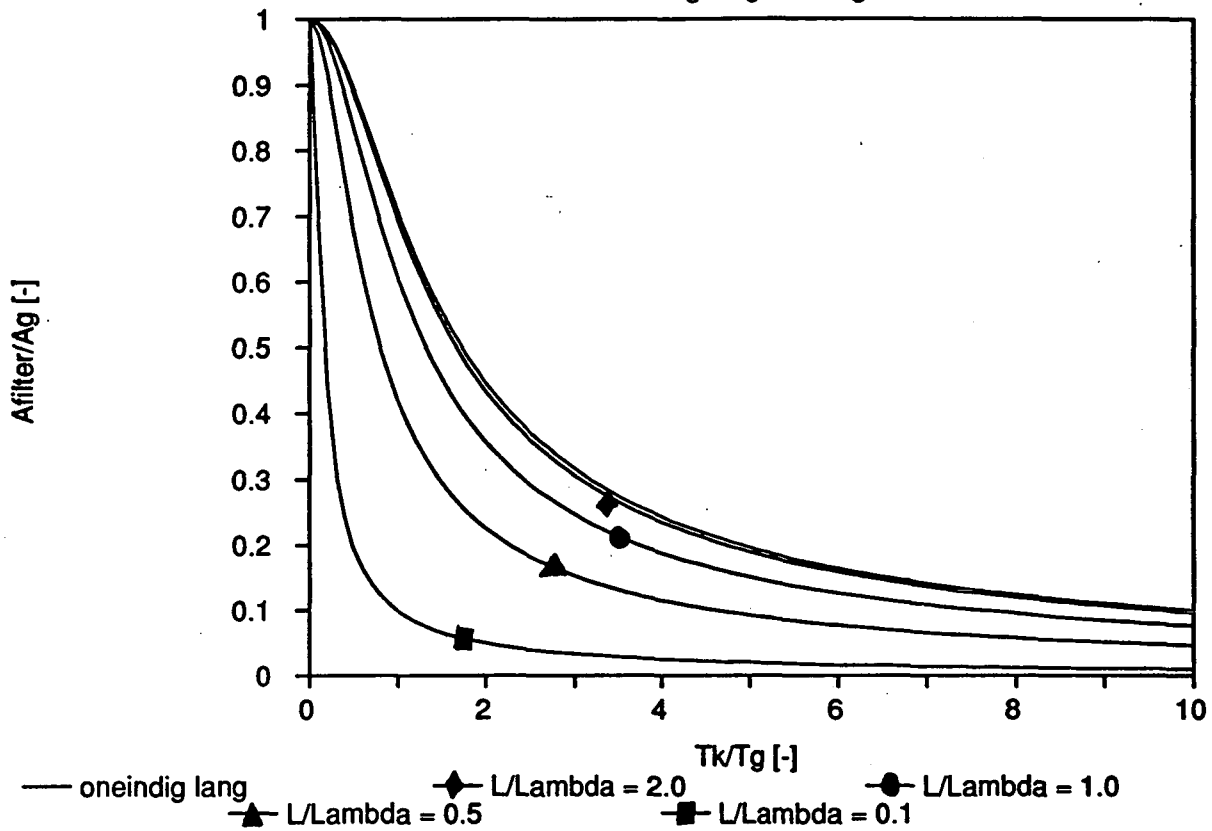
eindig lange zetting



 <p><b>GRONDMECHANICA DELFT</b></p>	<p>Postbus 69, 2600 AB Delft Telefoon (015) 69 35 00</p>	<p>Telefax (015) 61 08 21 Telex 38234 soil nl</p>	<p>d.d. <b>NOV.'92</b></p>	<p>get. <b>Weg</b></p>
<p><b>FASE VERSCHIL ALS FUNCTIE VAN LEKTIJD EINDIG LANGE ZETTING</b></p>			<p><b>CO - 335150</b></p>	<p>gez.</p>
			<p><b>BIJL. 4</b></p>	<p>form. <b>A4</b></p>

## Amplitudeverschil als functie lektijd

eindig lange zetting



**GRONDMECHANICA  
DELFT**

Postbus 69, 2600 AB Delft  
Telefoon (015) 69 35 00

Telefax (015) 61 08 21  
Telex 38234 soil nl

d.d.  
**NOV.'92**

get.  
**Weg**

**AMPLITUDE ALS FUNCTIE VAN LEKTIDJ  
EINDIG LANGE ZETTING**

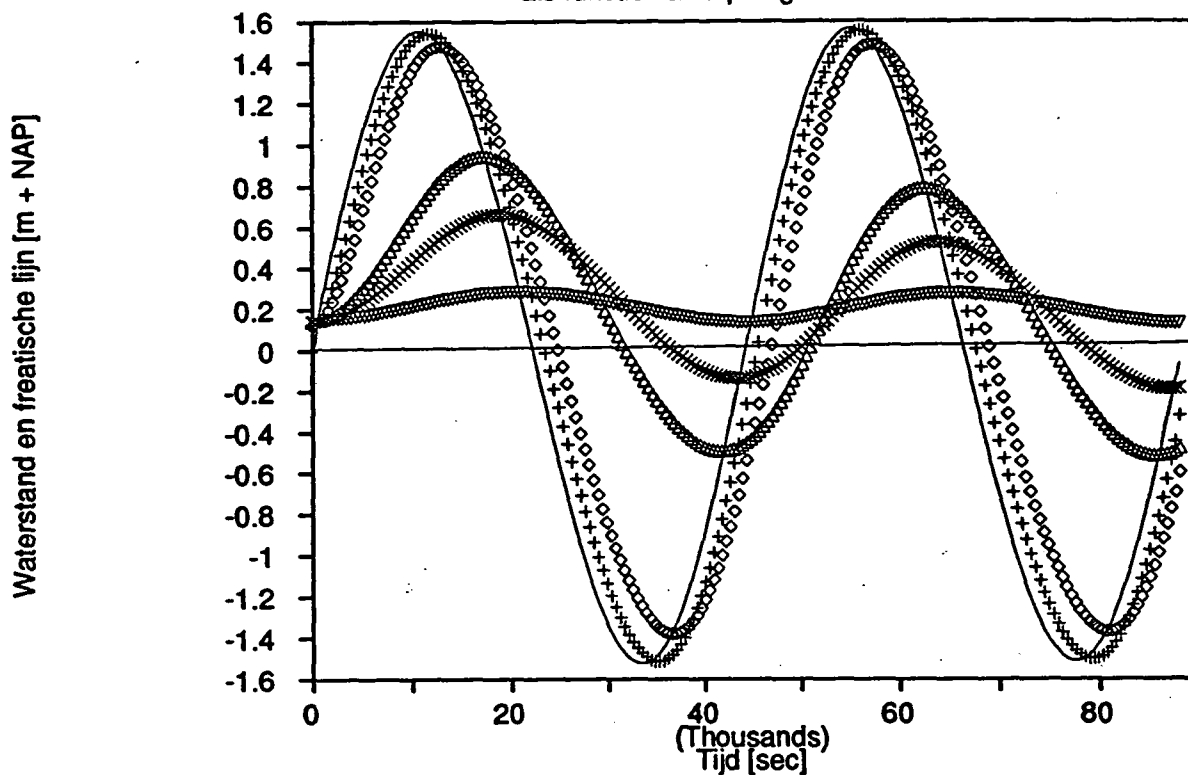
**CO - 335150**

gez.

**BIJL. 5**

form.  
**A4**

## Reactie freatische lijn als functie van toplaagdoorlatendheid



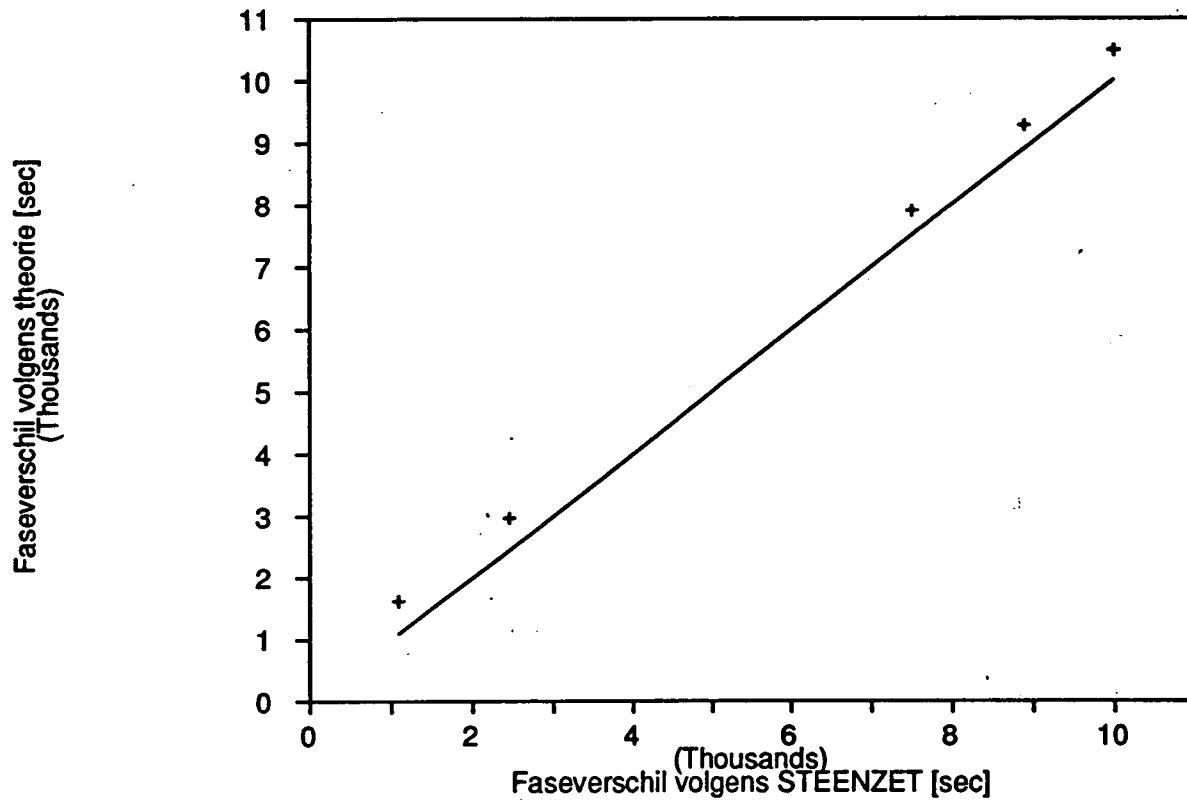
— getij
+  $k' = 1E-5$  m/s
◇  $k' = 5E-6$  m/s  
△  $k' = 1E-6$  m/s
×  $k' = 5E-7$  m/s
▽  $k' = 1E-7$  m/s


<b>GRONDMECHANICA DELFT</b>	Postbus 69, 2600 AB Delft    Telefax (015) 61 08 21 Telefoon (015) 69 35 00    Telex 38234 soil nl	d.d. <b>NOV.'92</b>	get. <b>Weg</b>
<b>INVLOED TOPLAAGDOORLATENDHEID OP FREATISCHELIJN</b>		<b>CO - 335150</b>	gez.
		<b>BIJL. 6</b>	form. <b>A4</b>



## Vergelijk theorie met STEENZET

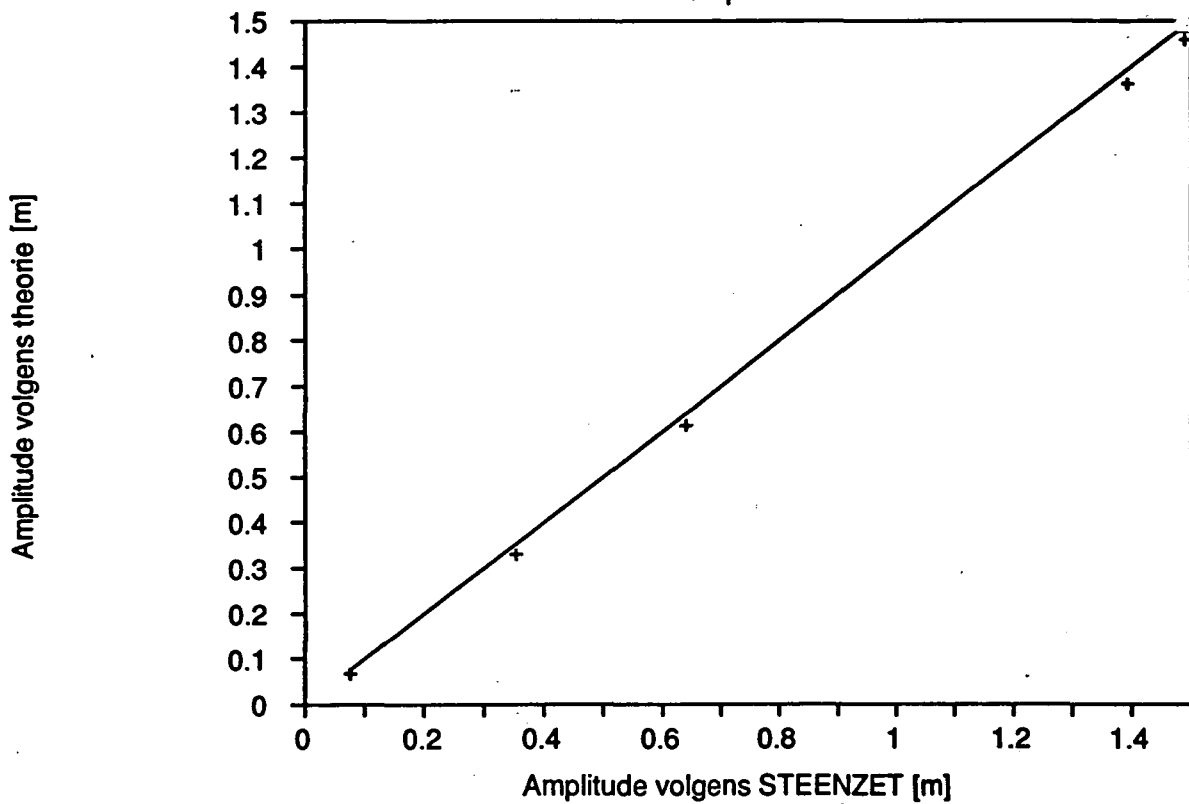
faseverschil



 <b>GRONDMECHANICA DELFT</b>	Postbus 69, 2600 AB Delft Telefoon (015) 69 35 00	Telefax (015) 61 08 21 Telex 38234 soil nl	d.d. <b>NOV.'92</b>	get. <b>Weg</b>
<b>VERGELIJK THEORIE MET STEENZET FASEVERSCHIL</b>			<b>CO - 335150</b>	gez.
			<b>BIJL. 7</b>	form. <b>A4</b>

## Vergelijk theorie met STEENZET

amplitude



GRONDMECHANICA  
DELFT

Postbus 69, 2600 AB Delft  
Telefoon (015) 69 35 00

Telefax (015) 61 08 21  
Telex 38234 soil nl

d.d.  
NOV.'92

get.  
Weg

VERGELIJK THEORIE MET STEENZET  
AMPLITUDE

CO - 335150

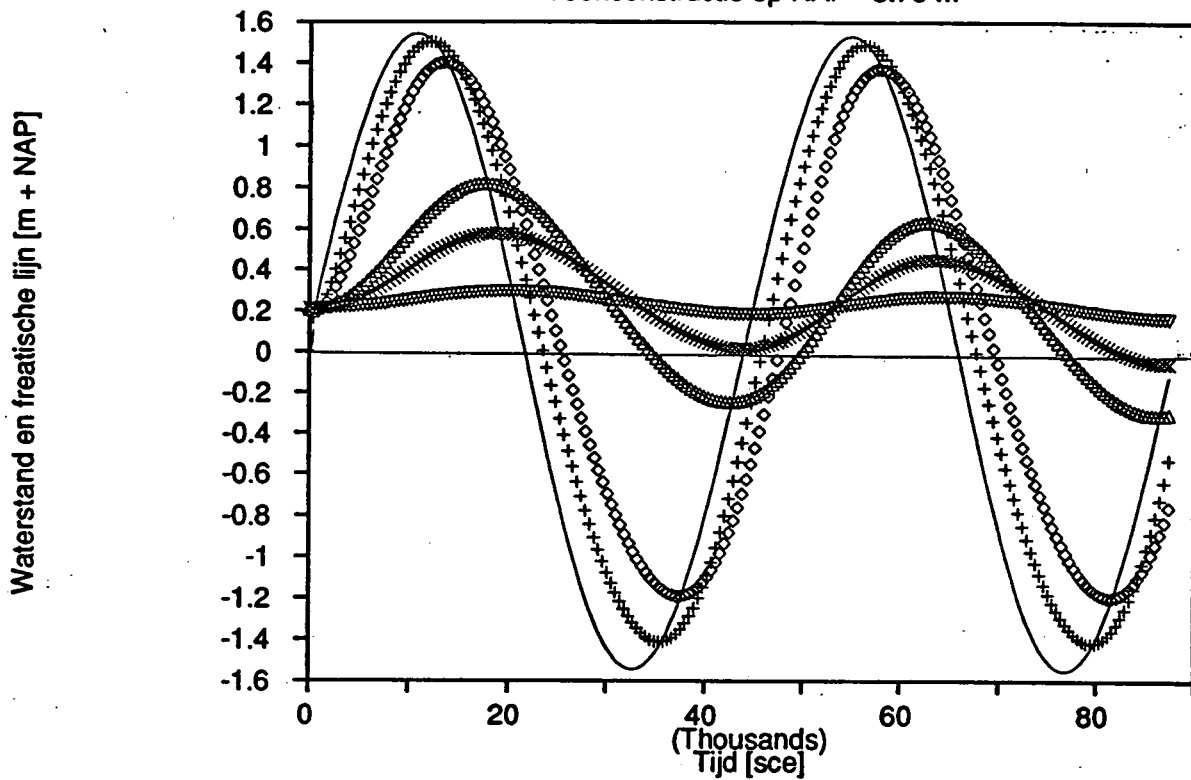
gez.

BIJL. 8


form.  
A4

## Reactie freatische lijn

Teenconstructie op NAP - 3.75 m



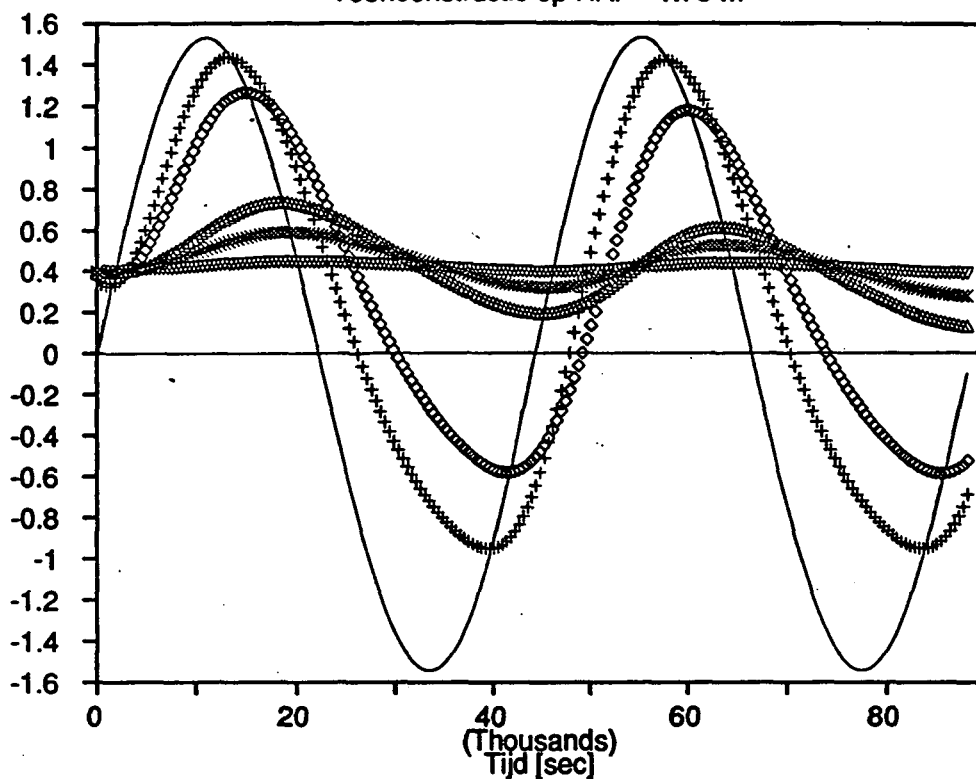
— getij
+ k' = 1E-5 m/s
◇ k' = 5E-6 m/s  
△ k' = 1E-6 m/s
× k' = 5E-7 m/s
▽ k' = 1E-7 m/s

 <p><b>GRONDMECHANICA DELFT</b></p>	<p>Postbus 69, 2600 AB Delft Telefoon (015) 69 35 00</p>	<p>Telefax (015) 61 08 21 Telex 38234 soil nl</p>	<p>d.d. <b>NOV.'92</b></p>	<p>get. <b>Weg</b></p>
<p><b>REACTIE FREATISCHE LIJN TEEN OP N.A.P.-3.75m</b></p>			<p><b>CO - 335150</b></p>	<p>gez.</p>
			<p><b>BIJL. 9</b></p>	<p>form. A4</p>


## Reactie freatische lijn

Teenconstructie op NAP - 1.75 m

Waterstand en freatische lijn [m + NAP]

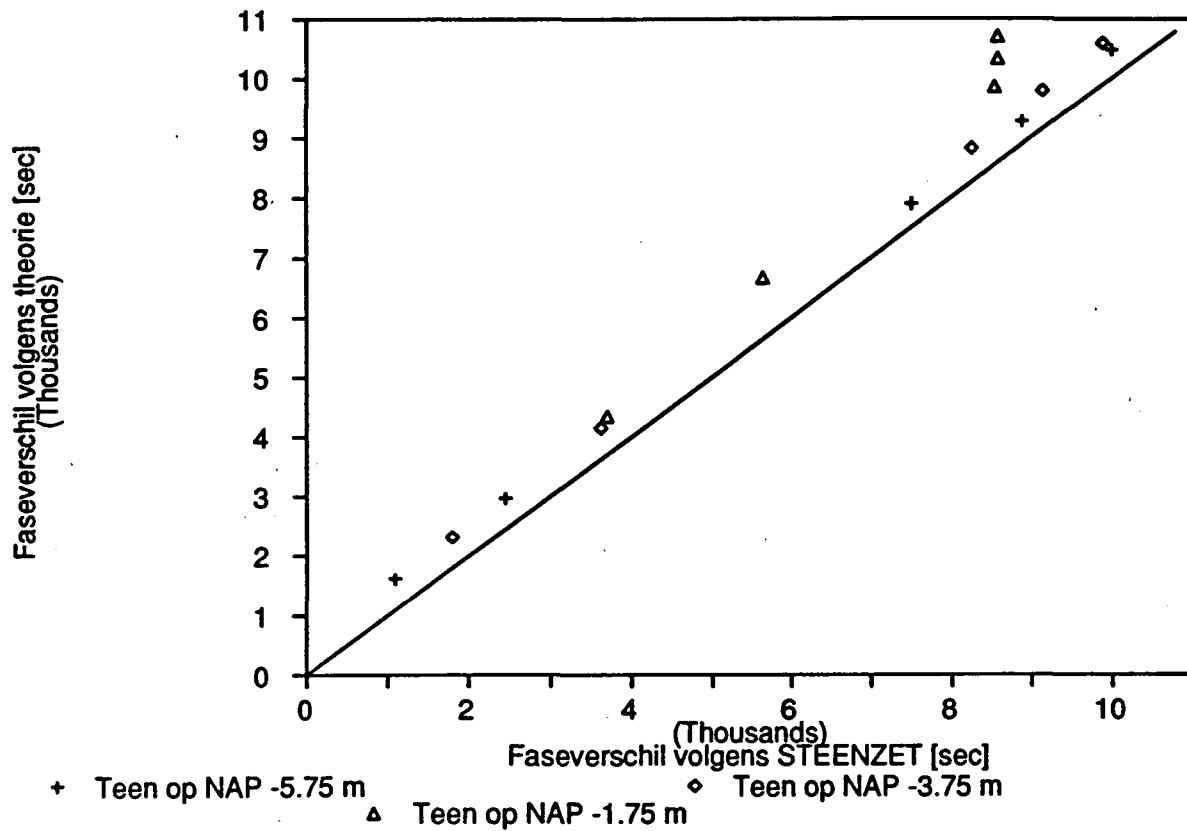



— getij  
 Δ  $k' = 1E-6$  m/s      +  $k' = 1E-5$  m/s      ◇  $k' = 5E-6$  m/s  
 ×  $k' = 5E-7$  m/s      ▽  $k' = 1E-7$  m/s

 <b>GRONDMECHANICA DELFT</b>	Postbus 69, 2600 AB Delft Telefoon (015) 69 35 00	Telefax (015) 61 08 21 Telex 38234 soll nl	d.d. NOV.'92	get. Weg
			CO - 335150	gez.
			BIJL. 10	form. A4
<b>REACTIE FREATISCHE LIJN</b> <b>TEEN OP N.A.P.-1.75m</b>				

## Vergelijking Steenzet en theorie

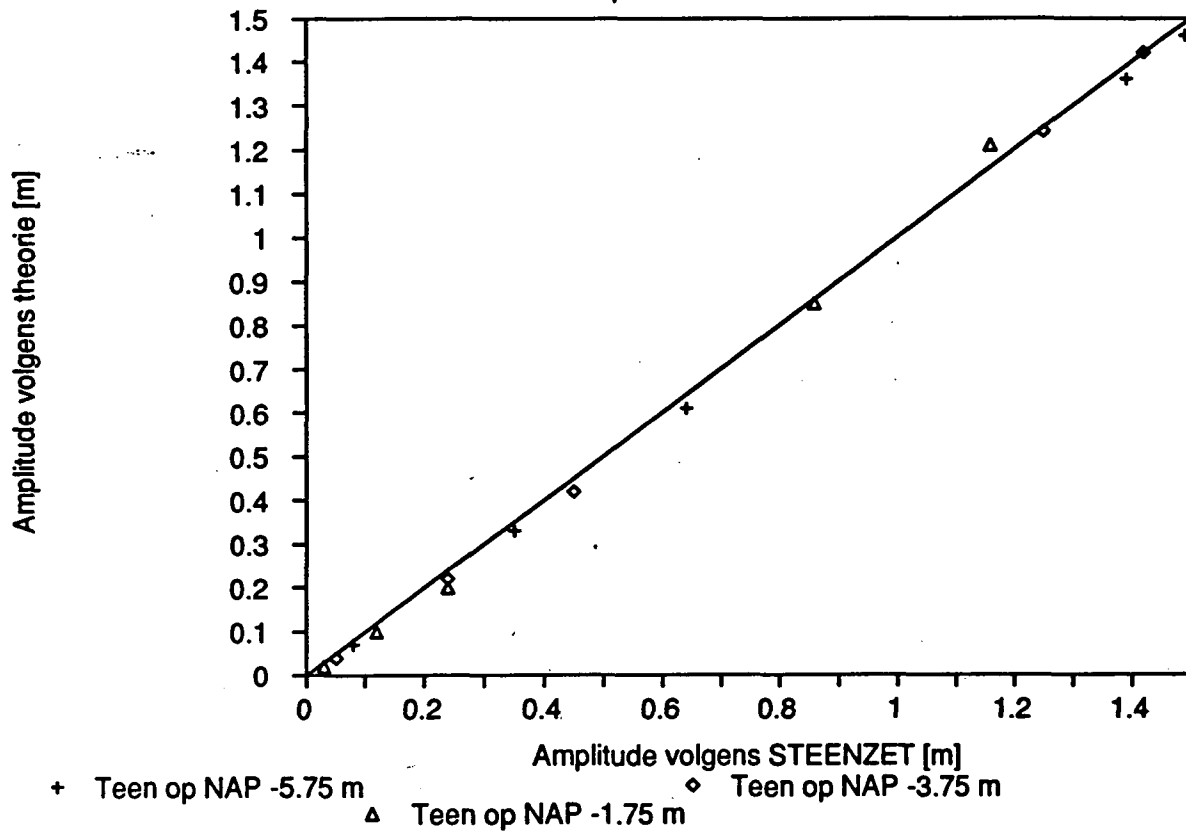
Faseverschil



 <b>GRONDMECHANICA DELFT</b>	Postbus 69, 2600 AB Delft Telefoon (015) 69 35 00 Telefax (015) 61 08 21 Telex 38234 soil nl	d.d. <b>NOV.'92</b>	get. <b>Weg</b>
<b>VERGELIJKING THEORIE MET STEENZET</b> <b>EINDIG LANGE ZETTING</b> <b>FASEVERSCHIL</b>		<b>CO - 335150</b>	gez.
		<b>BIJL. 11</b>	form. <b>A4</b>

## Vergelijking Steenzet en theorie

Amplitude binnenwaterstand



GRONDMECHANICA  
DELFT

Postbus 69, 2600 AB Delft  
Telefoon (015) 69 35 00

Telefax (015) 61 08 21  
Telex 38234 soll nl

d.d.  
NOV.'92

get.  
Weg

VERGELIJKING THEORIE MET STEENZET  
EINDE LANGE ZETTING  
AMPLITUDE

CO - 335150

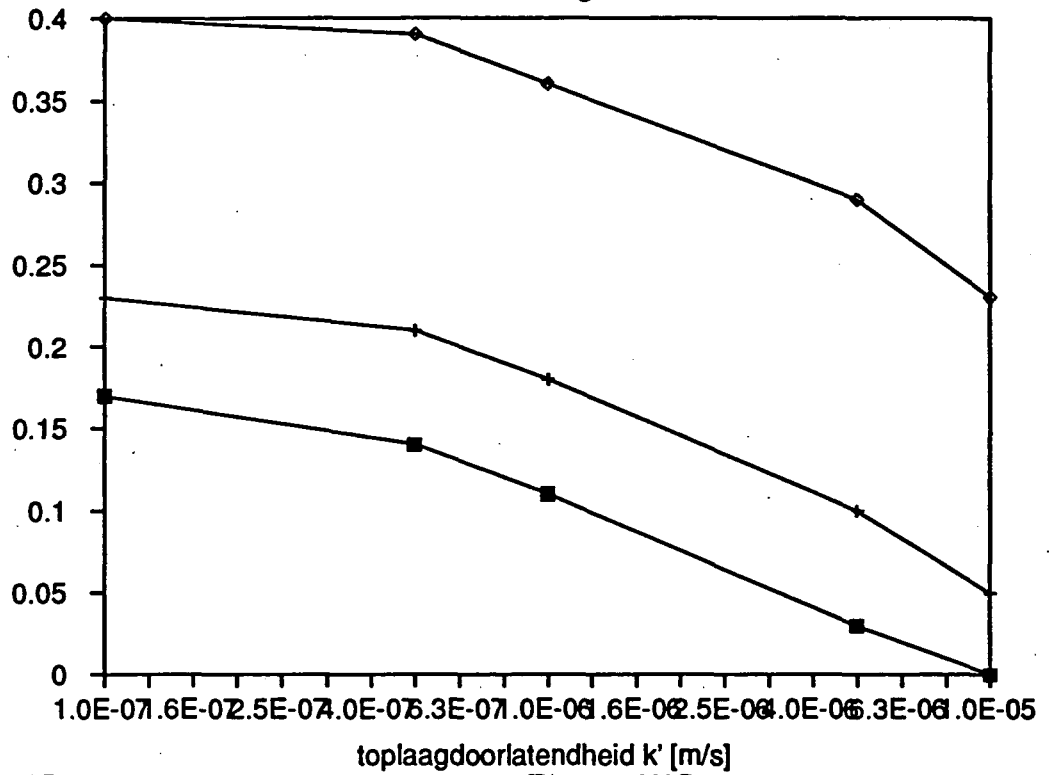
gez.

BIJL. 12

form.  
A4

## Ligging gemiddelde freatische lijn als functie van hoogte teen en $k'$

Hoogte gemidd. freatische lijn [m+NAP]

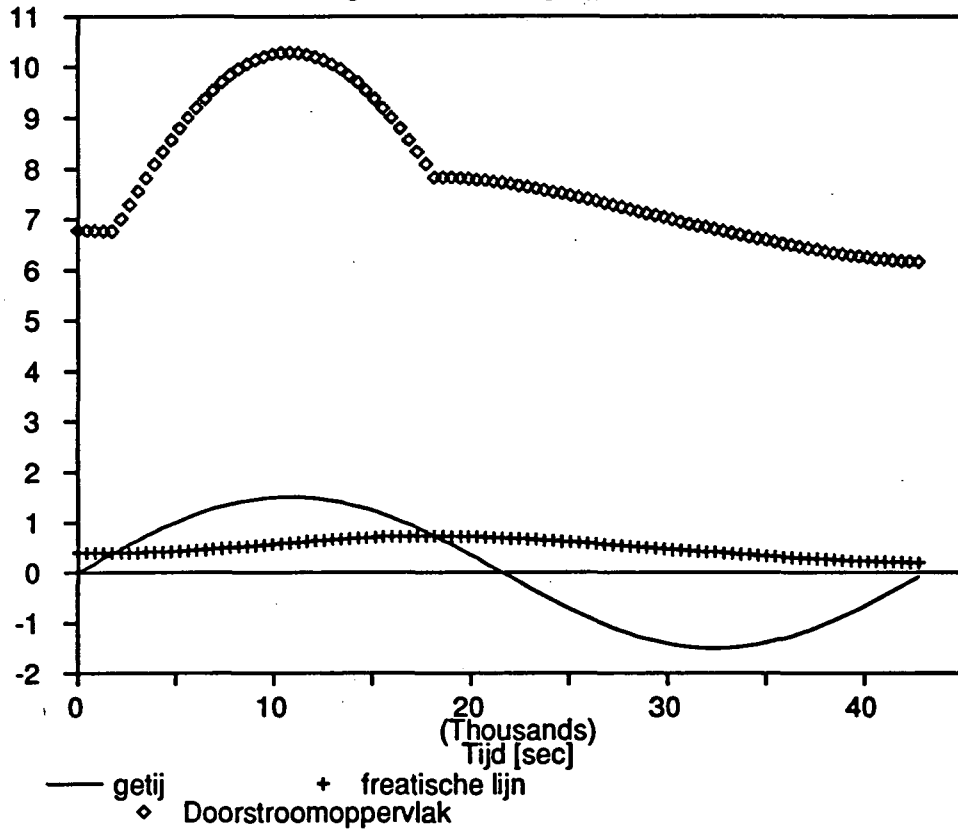



Teen op NAP -5.75 m     
  Teen op NAP -1.75 m     
  Teen op NAP -3.75 m

GRONDMECHANICA DELFT	Postbus 69, 2600 AB Delft Telefoon (015) 69 35 00	Telefax (015) 61 08 21 Telex 38234 soll nl	d.d. NOV.'92	get. Weg
GEMIDDELDE FREATISCHE LIJN ALS FUNCTIE VAN DOORLATENDHEID EN HOOGTE TEENCONSTRUCTIE			CO - 335150	gez.
			BIJL. 13	form. A4

## Doorstroomoppervlak gedurende een getijperiode

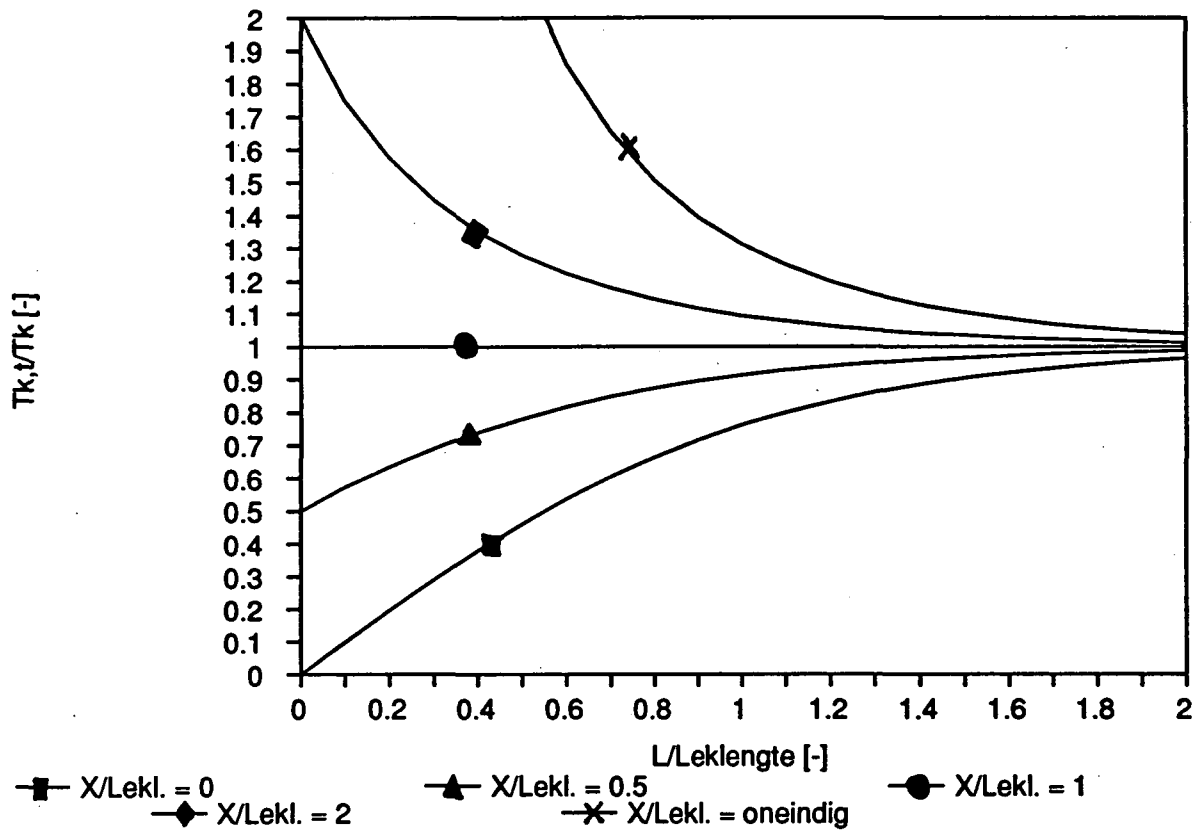
Waterstand [m+NAP] resp. oppervlak [m2]



 <p><b>GRONDMECHANICA DELFT</b></p>	Postbus 69, 2600 AB Delft Telefoon (015) 69 35 00 Telefax (015) 61 08 21 Telex 38234 soil nl	d.d. <b>NOV.'92</b>	get. <b>Weg</b>
<b>DOORSTROOM OPPERVLAK GEDURENDE EEN GETIJ</b>		<b>CO - 335150</b>	gez.
		<b>BIJL. 14</b>	form. <b>A4</b>



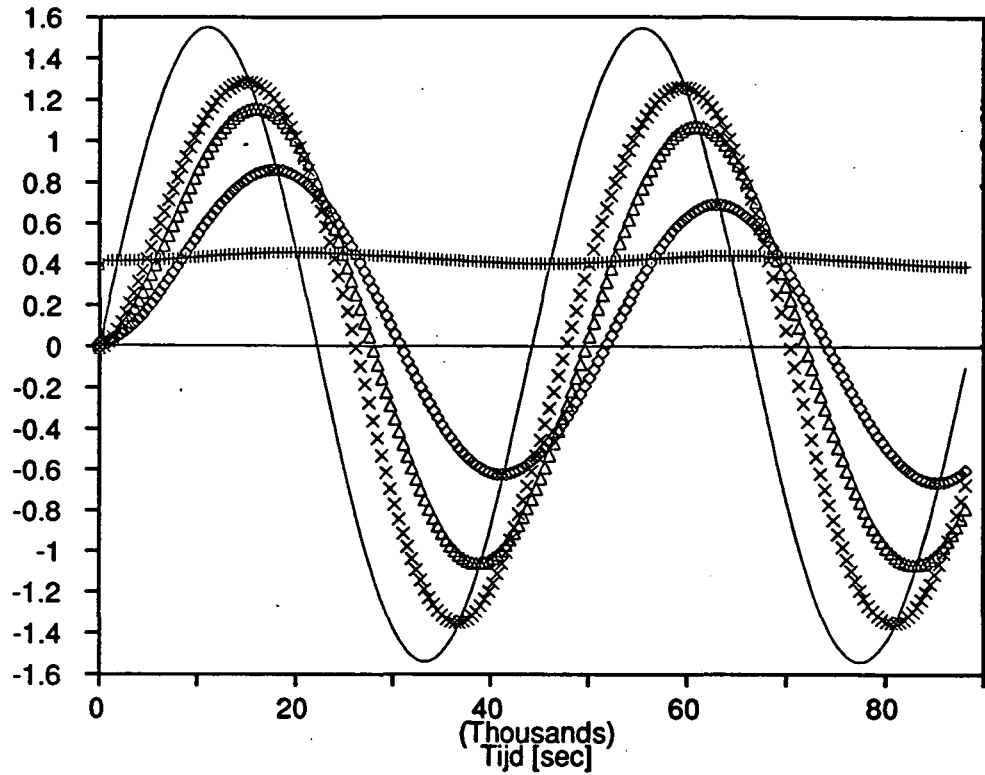
## Invloed van doorlatende teen



<b>GRONDMECHANICA DELFT</b>	Postbus 69, 2600 AB Delft Telefoon (015) 69 35 00 Telefax (015) 61 08 21 Telex 38234 soll nl	d.d. <b>NOV.'92</b>	get. <b>Weg</b>
<b>INVLOED DOORLATENDE TEEN THEORETISCH</b>		<b>CO - 335150</b>	gez.
		<b>BIJL. 15</b>	form. A4

## Reactie freatische lijn met doorlatende teenconstructie

Waterstand en freatische lijn [m+NAP]



— getij

+ ondoorlatende teen  
 $\Delta$  X/Lekl. = 0.96

$\times$  X/Lekl. = 0.48

$\diamond$  X/Lekl. = 1.92

**GRONDMECHANICA  
DELFT**

Postbus 69, 2600 AB Delft  
Telefoon (015) 69 35 00

Telefax (015) 61 08 21  
Telex 38234 soil nl

d.d.  
NOV.'92

get.  
Weg

**REACTIE FREATISCHE LIJN  
INVLOED DOORLATENDE TEENCONSTRUCTIE**

CO - 335150

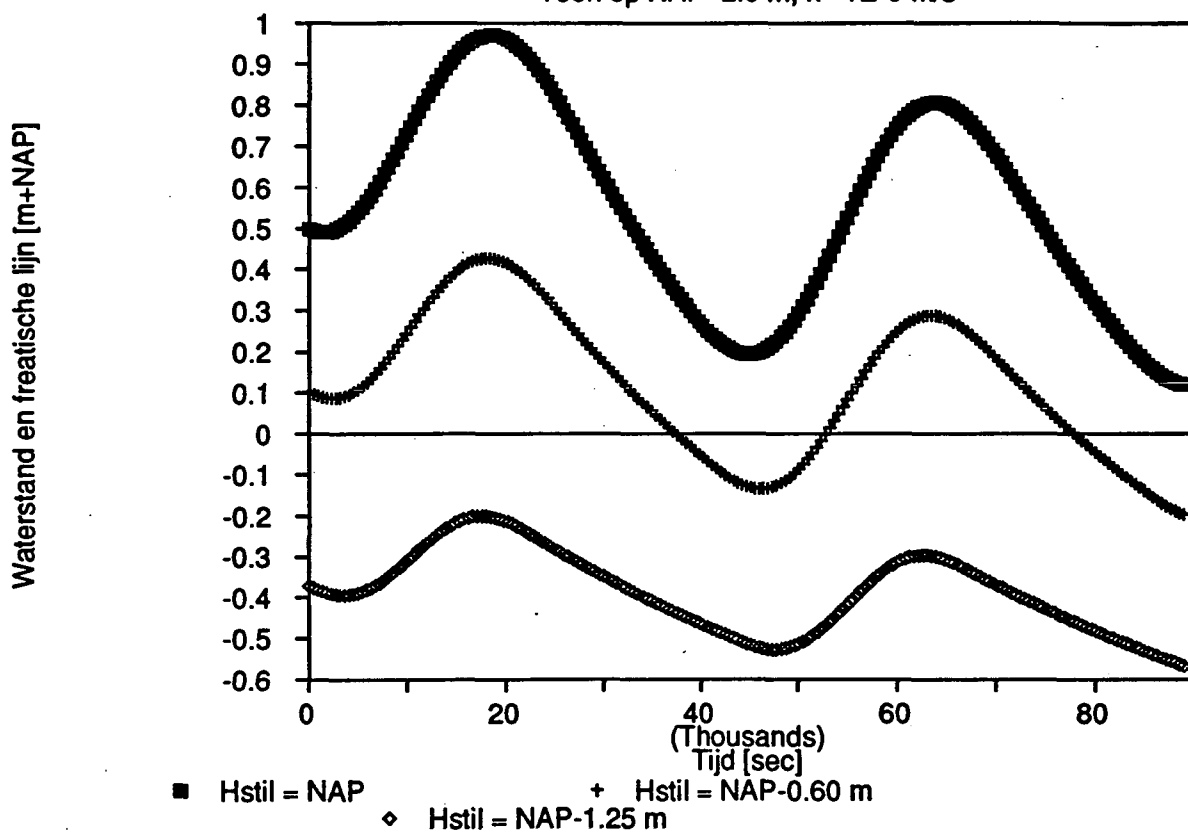
gez.

BIJL. 16

form.  
A4

## Getij onder teenconstructie

Teen op NAP -2.0 m,  $k'=1E-6$  m/s



**GRONDMECHANICA  
DELFT**

Postbus 69, 2600 AB Delft  
Telefoon (015) 69 35 00

Telefax (015) 61 08 21  
Telex 38234 soil nl

d.d.  
**NOV. '92**

get.  
**Weg**

**FREATISCHE LIJN  
GETIJ DEEL VAN PERIODE ONDER TEENCONSTRUCTIE**

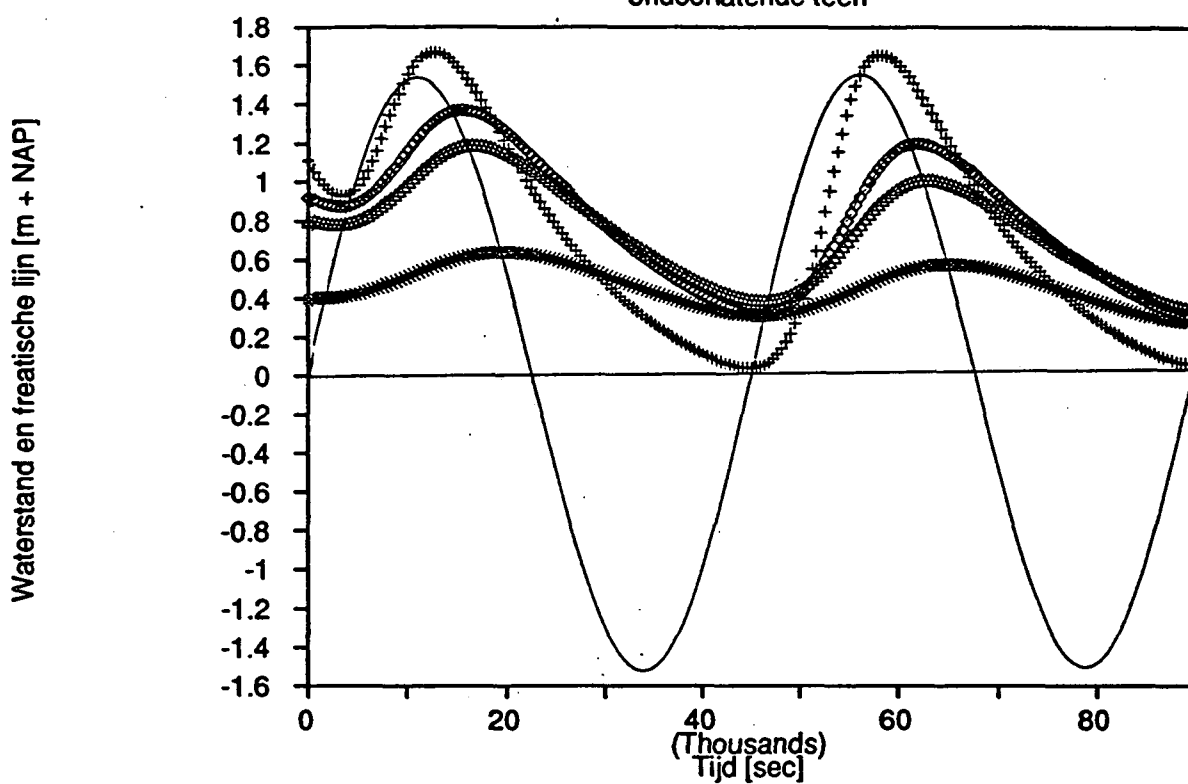
**CO - 335150**

gez.

**BIJL. 17**

form.  
**A4**

## Niet-uniforme doorlatendheid ondoorlatende teen



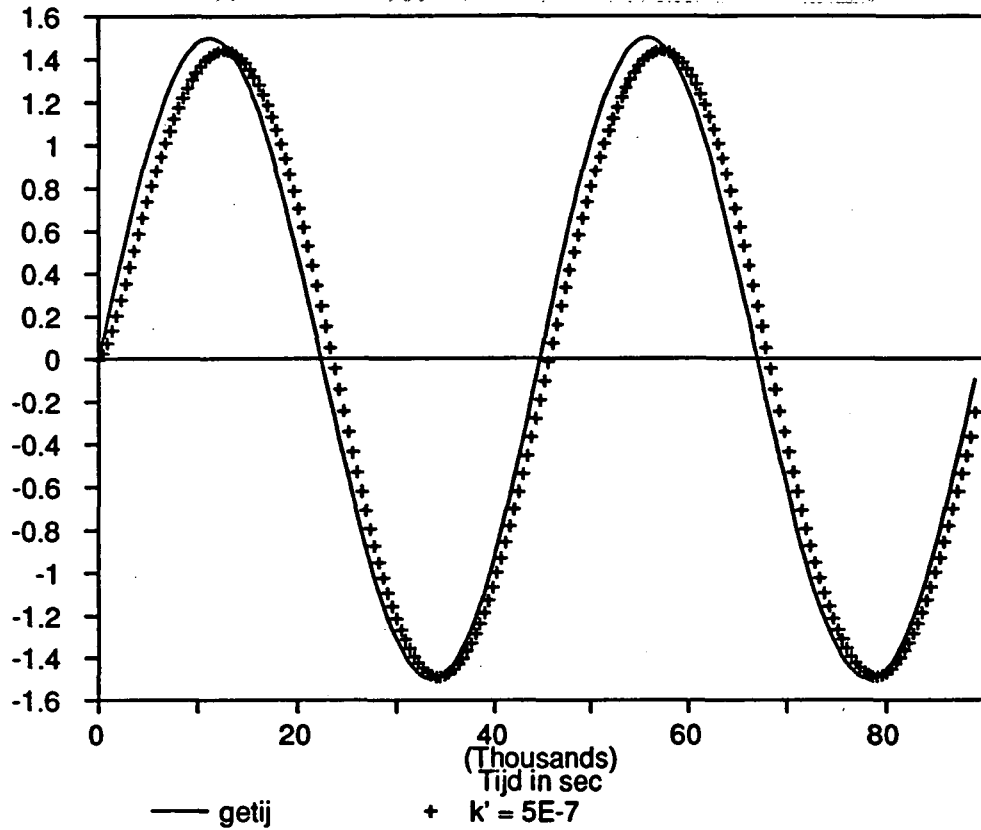
— getij

- + K' 5E-5 tot 5E-7
- ◇ K' 1E-5 tot 5E-7
- Δ K' 5E-6 tot 5E-7
- x K' 5E-7

<b>GRONDMECHANICA DELFT</b>	Postbus 69, 2600 AB Delft Telefoon (015) 69 35 00 Telefax (015) 61 08 21 Telex 38234 soil nl	d.d. <b>NOV.'92</b>	get. <b>Weg</b>
<b>INVLOED NIET - UNIFORME DOORLATENDHEID ONDOORLATENDE TEEN</b>		<b>CO - 335150</b>	gez.
		<b>BIJL. 18</b>	form. <b>A4</b>

## Niet-uniforme doorlatendheid doorlatende teen

Waterstand en freatische lijn in m+NAP



**GRONDMECHANICA  
DELFT**

Postbus 69, 2600 AB Delft  
Telefoon (015) 69 35 00

Telefax (015) 61 08 21  
Telex 38234 soil nl

d.d.  
NOV.'92

get.  
Weg

INVLOED NIET UNIFORME DOORLATENDHEID  
DOORLATENDE TEEN

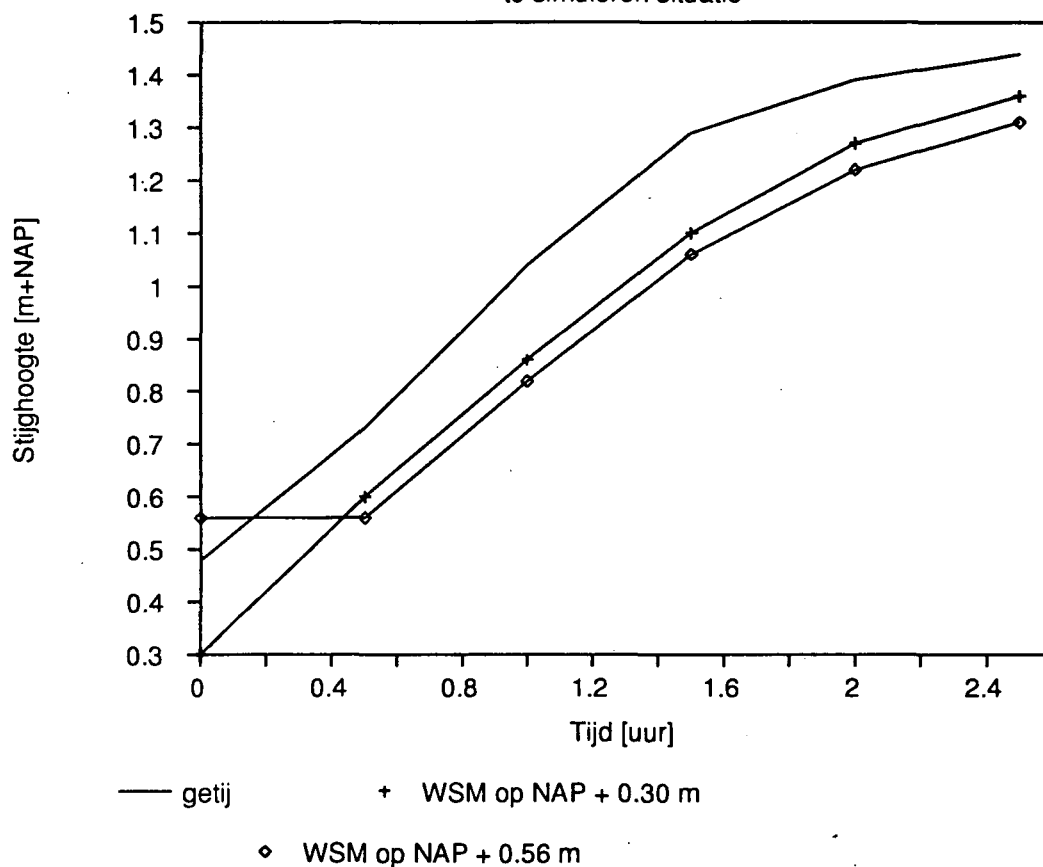
CO - 335150

gez.

BIJL. 19

form.  
A4

## Meting Colijnsplaat te simuleren situatie



GRONDMECHANICA  
DELT

Postbus 69, 2600 AB Delft  
Telefoon (015) 69 35 00

Telefax (015) 61 08 21  
Telex 38234 soil nl

d.d.  
DEC.'92

get.  
Weg

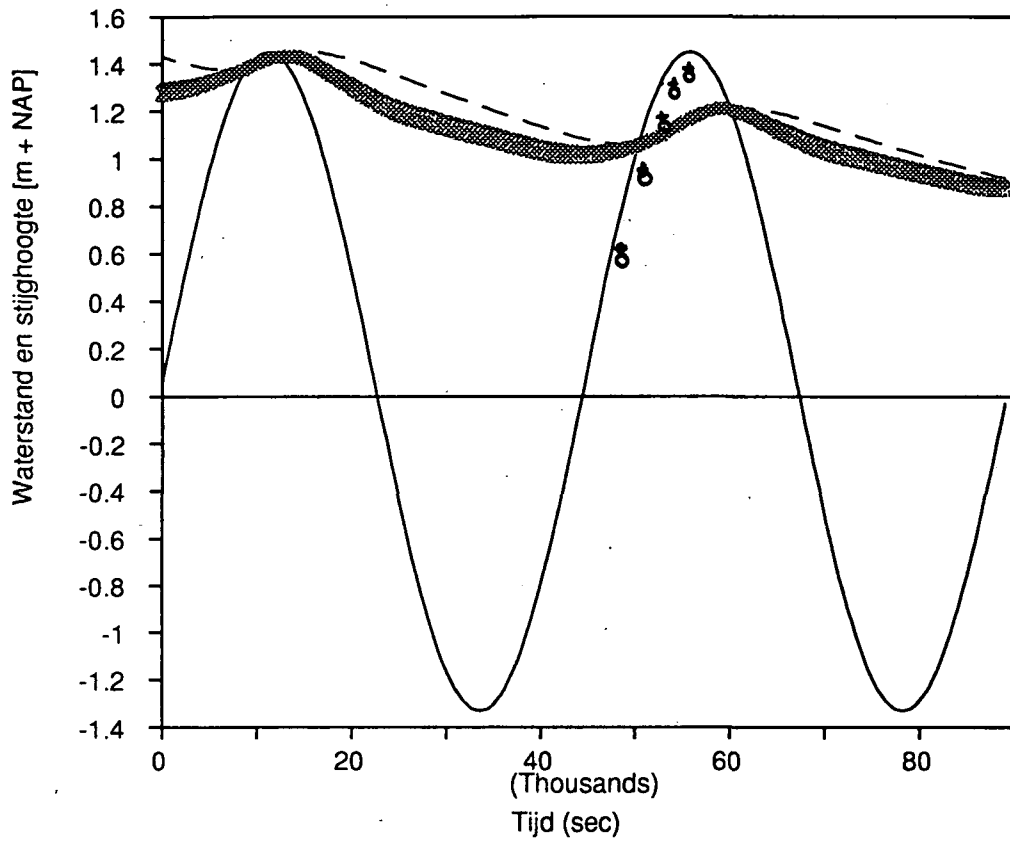
METING COLIJNSPLAAT  
TE SIMULEREN SITUATIE

CO - 335150


gez.

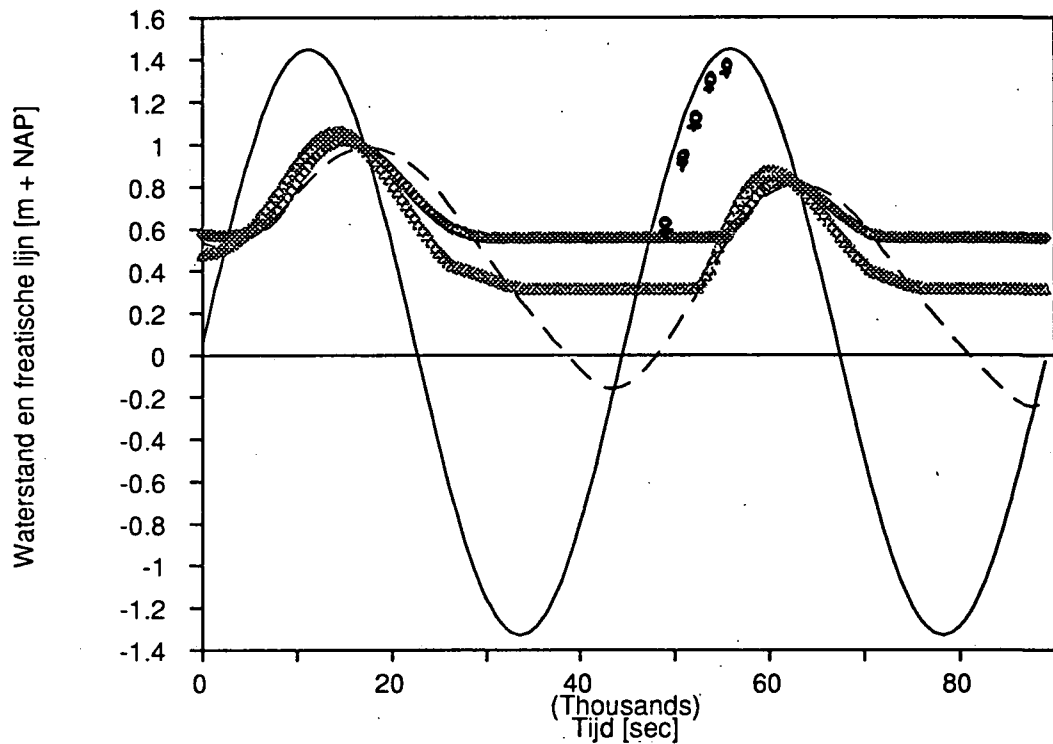
BIJL. 20

form.  
A4




- getij
- - - freatische lijn
- ◆ WSM op +0.30m
- ▲ WSM op NAP +0.56m
- + Meting op +0.56 m
- Meting op +0.30 m

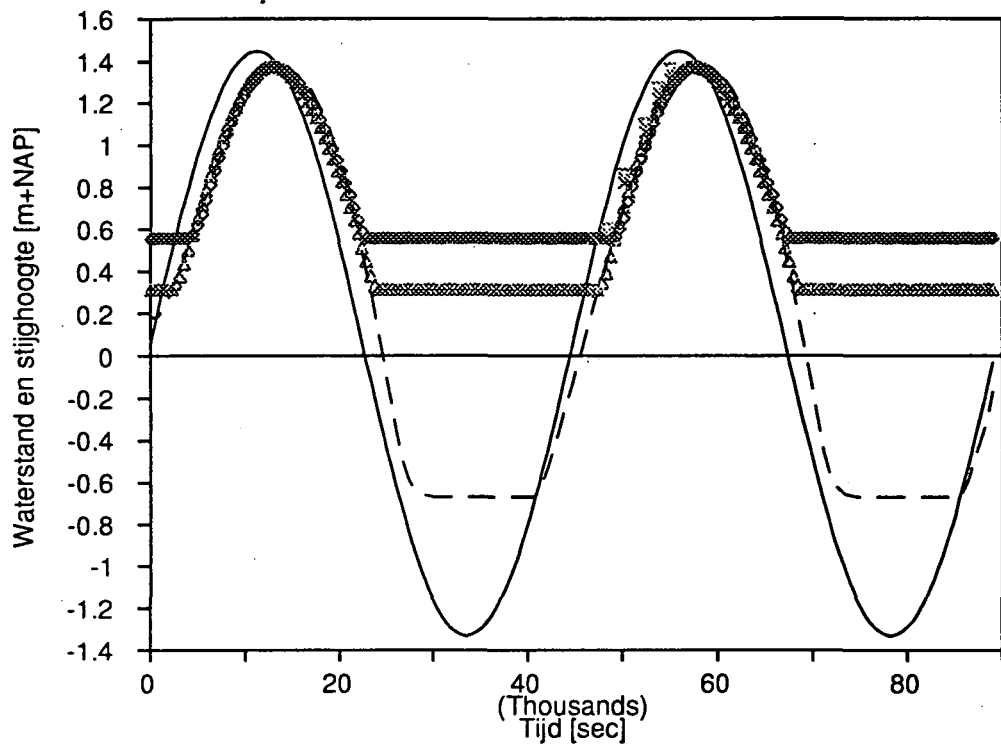
 <b>GRONDMECHANICA DELFT</b>	Postbus 69, 2600 AB Delft Telefoon (015) 69 35 00	Telefax (015) 61 08 21 Telex 38234 soil nl	d.d. <b>DEC.'92</b>	get. Weg
			<b>METING COLIJSPLAAT NAREKENEN STIJGHOOGTES</b>	CO - 335150
			<b>BIJL. 21</b>	form. A4



- getij
- - freatische lijn
- ◊ WSM op NAP + 0.56 m
- + Meting op +0.30 m
- △ WSM op NAP + 0.33 m
- Meting op +0.56 m

 <b>GRONDMECHANICA DELFT</b>	Postbus 69, 2600 AB Delft Telefoon (015) 69 35 00	Telefax (015) 61 08 21 Telex 38234 soil nl	d.d. <b>DEC.'92</b>	get. Weg
			<b>METING COLIJNSPLAAT ZEER GROTE TEEN DOORLATENDHEID</b>	CO - 335150
			BIJL. 22	form. A4





— getij      - - - freatische lijn      ◊ wsm 1 (berekend)  
 Δ wsm 2 (berekend)      × wsm 1 (gemeten)      ▽ wsm 2 (gemeten)


 GRONDMECHANICA  
 DELFT

Postbus 69, 2600 AB Delft  
 Telefoon (015) 69 35 00

Telefax (015) 61 08 21  
 Telex 38234 soil nl

d.d.  
 DEC.'92

get.  
 Weg

METING COLIJNSPLAAT  
 INVLOED UITVULLAAG, DOORLATENDE TEEN

CO - 335150

gez.

BIJL. 23

form.  
 A4

APPENDIX A

MODIFICATIES AAN STEENZET  
VOOR INVLOED GETIJDEN

bladnummer : - 1 -  
ons kenmerk: CO-315150  
datum : 1992-10-26

## MODIFICATIES AAN STEENZET VOOR INVLOED GETIJDEN

### Function ALLTRIM

Deze functie is geheel nieuw voor steenzet. Het doel van de functie is een string te ontdoen van leading en tailing spaces. Tekens, waarvan de ASCII waarde kleiner dan 32 is, dus de control tekens, die voor of na de tekst staan, worden verwijderd. Indien na het eerste 'leesbare' teken control tekens in tekst van de string staan, blijven die staan. Meestal wordt ALLTRIM gebruikt om Tabs en spaties te verwijderen, die voor of na een bestandsnaam voorkomen. DOS kan hiermee niet overweg. De functie is in appendix A afgebeeld.

De werking gaat als volgt. Allereerst wordt de lengte van de string bepaald. Vervolgens wordt ieder teken uit de string bekeken, of het groter dan ASCII 32 is. Zo neen, dan wordt het volgende teken bezien, zo ja, dan wordt de plaats van het eerste echte teken van de string onthouden in de variabele I. Indien er alleen maar rommel in de string staat, wordt het eerste zinvolle teken op 1 gezet, het eerste teken van de string.

De tweede stap is om het laatste zinvolle teken van de string te vinden. Nu wordt van achteraf ieder teken van de string afgelopen. Bij het eerste leesbare teken (geen control teken) wordt gestopt. De plaats komt in J. Indien van achteraf ook alleen maar rommel in de string wordt gevonden, wordt J gelijk gemaakt aan het nummer van het laatste teken: L. De substring wordt naar ALLTRIM gekopieerd en de lengte van de deze string wordt bepaald.

### Subroutine DROOG

De situatie kan zich voordoen, waarbij de onderzijde van de spleet beneden de freatische lijn ligt, dus nat is, terwijl de bovenzijde van de spleet boven momentane waterlijn ligt. In een dergelijk geval mag er programma technisch gezien, geen water door de spleet stromen, omdat het water daarin in werkelijkheid stilstaat. De vraag is hoe je deze visuele waarneming kunt herkennen aan de berekende en geregistreerde drukken.

Als er water op het talud staat, registreren de drukopnemers een druk. Die drukken worden geïnterpoleerd, opdat de druk aan de bovenzijde van de spleet kan worden berekend. Er zijn drie mogelijkheden:

- Als de druk boven in de spleet kleiner dan  $1.E-6$  is, dan staat er geen waterdruk meer op het talud.

Er resteren in dit geval nog twee mogelijkheden:

- 1 De druk onder in de spleet is groter dan  $D \cos(\alpha)$
- 2 De druk onder in de spleet is kleiner dan  $D \cos(\alpha)$

bladnummer : - 2 -  
ons kenmerk: CO-315150  
datum : 1992-10-26

Omdat de zetting scheef staat, is het hoogteverschil tussen onder- en bovenzijde van een blok de dikte van het blok (D) vermenigvuldigd met  $\cos(\alpha)$ . In geval 1 kan er nog water van onder uit door de spleet stromen. Uit de druk boven aan de spleet, die oorspronkelijk 0 was, wordt de stijghoogte (nulniveau: onderzijde van de spleet) berekend door bij de oorspronkelijke druk in de spleet (was 0) de waarde van  $D \cos(\alpha)$  op te tellen. In geval twee is de druk kleiner dan het hoogteverschil tussen onder- en bovenzijde van het blok. Het water staat ergens halverwege de spleet. Er kan dus geen water door de spleet stromen. De stijghoogte buiten op de spleet wordt gelijk gemaakt aan de stijghoogte aan de onderzijde van de spleet. Zonder stijghoogteverschil stroomt er immers geen water.

- Als de druk aan de bovenzijde van de spleet groter dan  $1.E-6$  is, staat er water op het talud.

De derde situatie treedt nu op. Ook nu kan er water door de spleet stromen. Ook nu wordt er om de stijghoogte te berekenen,  $D \cos(\alpha)$  bij de oorspronkelijke druk aan de bovenzijde van de spleet geteld.

Het is duidelijk dat door veranderingen aan de geregistreeerde waarde van de druk aan de buitenzijde van de spleet aan te brengen, de oorspronkelijke waarde wordt overschreven. De oorspronkelijke waarde blijkt later nodig te zijn en dient dus te worden opgeslagen. De tekst van de subroutine is in appendix B afgebeeld.

#### Subroutine DRUKV

In deze routine wordt de stijghoogte in het filter berekend. In de routine is redelijk veel, zij het weinig ingrijpends, gewijzigd.

In de routine is naast de waarde van FHI ook de ongestoorde waarde van FHI nodig: FHIONG. Via common block BOVENOP komen deze waarden binnen.

Omdat de topplaagdoorlatendheid uit metingen is bepaald en wordt berekend, is het zinloos op de oude manier uit de Forchheimer coëfficiënten de doorlatendheid te berekenen. Bovendien is aangenomen dat de doorlatendheid laminair is, dus onafhankelijk van de grootte van het verhang in de spleten. Dit is toegestaan, omdat de aanpassingen aan het programma zijn gemaakt om met ondoorlatende zettingen te kunnen rekenen, waar het getij een invloed kan hebben op de druk over de blokken.

Een bron van constante irritatie was een wat schimmige foutmelding. Als de freatische lijn lager ligt dan de laagste spleet, wordt deze afgedrukt. Bij bestudering van de programma code blijkt al snel, dat de fout wordt veroorzaakt door de te lage ligging van de freatische lijn. Dit is nu bij de foutmelding gezet. Voorkomt uitpakken van gezipte sources.

bladnummer : - 3 -  
ons kenmerk: CO-315150  
datum : 1992-10-26

Een van de oorzaken van de trage convergentie bij het berekenen van de stationaire freatische lijn bleek in DRUKV te liggen. De oorzaak was enerzijds een slechte startwaarde voor de stijghoogte in het filter, anderzijds het feit dat de waarde van de stijghoogte op het talud tijdens het iteratieve proces veranderde. Het eerste probleem is met de subroutine FSTART opgelost. Voor het bepalen van de juiste waarde van de freatische lijn lopen twee iteratieve processen. Het eerste klemt de freatische lijn tussen twee elkaar naderende grenzen in. Het tweede proces bepaalt de stijghoogtes onder de spleten in het filter bij een gekozen ligging van de freatische lijn.

Het eerste proces begint op de maximale hoogte. Omdat de stilwaterlijn duidelijk lager ligt dan de maximale hoogte van het talud, zijn er diverse opnemers, die een FHI waarde van 0 hebben, maar waarvan de waarde van FHI gelijk gezet wordt op de waarde van de stijghoogte in het filter. Echter bij de volgende iteratiestap van het eerste proces ligt de freatische lijn geheel beneden aan het talud. De waarden van FHI hoog boven in het talud hebben dan geen zin meer. Er moet in dat geval weer worden gestart met de oorspronkelijke, ongestoorde waarde van FHI: FHIONG. Omdat FHIONG de waarde van de druk herbergt, en niet de waarde van de stijghoogte, moet FHI hiervoor nog worden aangepast via  $D \cos(\alpha)$ .

Ook in de tweede iteratielus zat een onhandigheidje. Voorafgaand aan iedere iteratie van F onder de spleet I wordt gezien of de huidige waarde van F met zich meebrengt dat natte spleten droog worden of omgekeerd. De juiste waarde van FHI wordt bepaald in de subroutine DROOG. Dit proces wordt voor iedere spleet herhaald. Als de stijghoogten van alle spleten in één iteratielus eenmaal zijn berekend, wordt het proces herhaald. Door het niet-turbulente karakter van de stroming in de toplaag is het niet meer nodig de toplaagdoorlatendheid na iedere iteratielus (de tweede) te bepalen.

Het iteratieve proces moet eens stoppen. Het stopcriterium is dat de verandering van de stijghoogte in het filter 'niet' meer verandert: de verandering moet kleiner dan  $2.E-6$  zijn. NB. Dit is een gevaarlijk criterium. Als de veranderingen klein zijn, kan het eenvoudig voorkomen, dat aan het criterium wordt voldaan, terwijl toch nog niet de juiste waarde van de stijghoogte is gevonden.

Na een iteratielus wordt voor alle spleten nagegaan, wat de maximale fout is. Indien de maximale fout kleiner is dan het criterium, wordt gestopt. Ter controle van de convergentie wordt de waarde van de stijghoogte F onthouden, die de grootste afwijking produceert, de waarde van F, die in de iteratiestap daarvoor was berekend. Ook het nummer van de spleet, die de grootste fout veroorzaakt, wordt onthouden. De subroutine is afgedrukt in appendix C.

#### Subroutine EXTREMA

Deze routine berekent de extrema van een vector. Niets bijzonders, standaard.

bladnummer : - 4 -  
ons kenmerk: CO-315150  
datum : 1992-10-26

### Subroutine FRESTAT

In deze routine wordt de stationaire freatische lijn berekend. De werking is ruwweg als volgt. De drukregistraties van twee complete getijden worden per drukopnemer gemiddeld. Deze gemiddelde druk wordt als randvoorwaarde op het talud gezet. Vervolgens wordt op twee plaatsen, de ene zo ver mogelijk boven in de zetting, de ander zo veel mogelijk aan de onderkant, de freatische lijn gelegd. Daarna wordt bekeken, of er water uit de zetting loopt of er in. Door de twee extrema is het duidelijk dat in normale situaties, met de freatische lijn geheel bovenin er water uit de zetting loopt, en met de freatische lijn geheel beneden, dat er water in zal lopen. Via bisectie wordt het nulpunt gezocht: er loopt netto geen water meer in. Dat kan nog wel betekenen, dat er op sommige plaatsen water in loopt en op andere plaatsen water uitstroomt.

Het probleem is, dat de routine voor de freatische lijn niet goed werkte. Ongeveer goed. Als er echter gesimplificeerde randvoorwaarden worden opgegeven, bij voorbeeld een stationaire waterstand, moet de freatische lijn gelijk zijn aan de stilwaterniveau. Dit bleek niet het geval te zijn. De oorzaak was tweeledig.

De eerste reden is, dat bij gemeten drukken, de opnemers een meetsignaal afgeven. Er kunnen bij voorbaat geen opnemers worden uitgesloten, zo van "Die kunnen toch nooit water registreren." Omdat het een meting is, moet iedere registratie worden meegenomen. Hierop wordt in de beschrijving van MGOLF teruggekomen.

De tweede reden houdt met de eerste reden verband. Het heeft te maken met het feit of een spleet nat of droog is. Dit hangt weer af van de plaats van freatische lijn. Sommige spleten zijn het ene moment nat, het andere moment (bij een veel lagere freatische lijn) zijn ze droog.

De randvoorwaarde wordt uit het tijdgemiddelde van de drukken op de zetting berekend. Echter, door het al dan niet droog zijn van een spleet, kan er aan die randvoorwaarde worden gesleuteld. Echter door het verleggen van de freatische lijn verandert het aantal droge spleten. Het moet mogelijk zijn om een spleet, die eerst nat was, weer droog te krijgen en andersom. Daarom moet de oorspronkelijke waarde van de randvoorwaarde worden opgeborgen. Omdat de waarde moet kunnen communiceren met diverse routines, is een extra common block gemaakt: BOVENOP. Dit bevat een array van MS elementen, met daarin de oorspronkelijke waarde van FHI: FHIONG. Daarnaast wordt een lokaal array gebruikt, om de gemiddelde waarde van FHIONG op te slaan: FHONGEM, ook MS elementen.

Naast de berekening van de gemiddelde waarde van FHI, FHONGEM, wordt ook de gemiddelde waarde van de ongestoorde FHI, FHONGEM berekend. Er is nog een kleine optimalisatie uitgevoerd. De gemiddelde waarde werd in het programma berekend door het optellen van de druk gedeeld door het aantal tijdstappen. De gemiddelde waarde wordt nu bepaald door eerst alle drukken bij elkaar op te tellen en pas daarna te delen door het aantal tijdstappen. Dit scheelt een fors aantal delingen. Ter controle worden de gemiddelde waarden van FHI en FHIONG in een bestand uitgeschreven. Om de berekening te kunnen maken van het netto debiet, worden FHONGEM en FHONGEM gekopieerd naar FHI en FHIONG.

bladnummer : - 5 -  
ons kenmerk: CO-315150  
datum : 1992-10-26

Er wordt met een variabele topplaagdoorlatendheid gerekend. Bovendien is die doorlatendheid klein. Het heeft dus geen zin om met turbulentie rekening te houden. De aanroep van KTOP kan dus vervallen.

Voor het vinden van de freatische lijn wordt een iteratief proces gehanteerd. Bij iedere berekening van het netto debiet moet de druk in het filter worden berekend. Om de berekening te versnellen, wordt een goede startwaarde voor de druk onder de spleten in het filter gegenereerd, met behulp van subroutine FSTART. De berekening van de freatische lijn loopt via bisectie. Als de freatische lijn op een zekere positie ligt, stroomt er netto óf water het talud in óf uit. Bij de start van de bepaling van de freatische lijn worden twee uiterste waarden gehanteerd. De bovenste startwaarde voor de freatische lijn is de hoogte van de onderzijde van de bovenste spleet minus 1 cm. Voor de onderzijde wordt een iets andere schatting gemaakt. Als de stilwaterlijn boven de onderzijde van de onderste spleet ligt, wordt deze waarde aangenomen. Als de stilwaterlijn lager ligt, wordt de hoogte van de stilwaterlijn aangenomen.

Tijdens de berekening van de freatische lijn worden de waarden op het beeldscherm afgedrukt. Dat is geen essentiële handeling, maar vooral toen de convergentie slecht was, bestond er geen inzicht of het programma nog liep en hoe lang het nog zou lopen of dat het hing.

Als de lijn eenmaal is gevonden (de afstand tussen de twee grenzen van de freatische lijn is kleiner dan 0.1 mm) worden de waarde van de drukverdeling in het filter en de drukken op het talud uitgeschreven. Deze kunnen ter controle met Symphony of LineGraph worden getekend. Daarnaast worden de debieten door de spleten berekend, via de subroutine WATERUIT en in die routine uitgeschreven. WATERUIT wordt separaat behandeld. FRESTAT is afgedrukt in appendix D.

#### Subroutine FSTART

In deze subroutine wordt een zinnige startwaarde voor de stijghoogte in het filter berekend, uitgaande van een hydrostatische drukverdeling. Als de hoogte van een spleet lager is dan de hoogte van de freatische lijn, wordt voor de stijghoogte het hoogteverschil tussen freatische lijn en de hoogte van de opnemer aangenomen. Als de opnemer hoger ligt dan de freatische lijn, wordt een waarde van 0 aangenomen. De subroutine is uitgeschreven in appendix E.

#### Subroutine LEESTUUR

Bij de Banach golven wordt de eindtijd van de golf uit de database met golven bepaald. Bij het getij is dit anders. De eindtijd is tweemaal de periode van een getij:  $2 \cdot 12\text{h}25\text{m} = 89400\text{s}$ . Deze tijd wordt in 200 stappen verdeeld. Dit verklaart, waarom de tijdstap DT uit de eindtijd wordt bepaald. Ook de verschildtijd tussen twee maxima is nu anders; deze wordt gerelateerd aan de tijdstap DT: vier keer DT. Deze waarde blijkt later niet nodig te zijn, omdat niet de blokbeweging t.g.v. het getij wordt berekend.

bladnummer : - 6 -  
ons kenmerk: CO-315150  
datum : 1992-10-26

#### Subroutine MGOLF

In deze routine worden de ingelezen drukken van de opnemers omgerekend naar drukken aan de bovenzijde van de spleten. In FRESTAT wordt aangestipt dat bij de bepaling van de drukken op het talud rekening moet worden gehouden of spleten droog of nat zijn. In deze routine gebeurt dit. Om te voorkomen dat water door een droge spleet loopt, wordt de drukregistratie op het talud aangepast. Bij de berekening van de freatische lijn kan het voorkomen dat in de ene iteratie een spleet droog is, terwijl in de andere iteratie de spleet nat is. In de berekening wordt bij een dergelijke verandering de golfrandvoorwaarde aangepast. Daarom zijn de originele waarden nog nodig. Er is een extra vector met meetwaarden gemaakt, een origineel: FHIONG. Hieruit kan de oorspronkelijke waarde worden opgehaald. FHIONG staat in het common block BOVENOP.

STEENZET en Banach zijn geschreven vanuit de optiek om een proef te kunnen narekenen. Drukregistraties zijn daarom altijd 'goed'. Toch viel dit wel eens tegen. Bij de eindverificatie van STEENZET met behulp van de deltagootproeven (SZ### serie) is geconstateerd dat er soms opnemers zijn, waarvan de druk op een bepaalde waarde blijft hangen. Vooral bij open zettingen kan er dan rekentechnisch veel water naar binnen stromen, waardoor de stationaire freatische lijn een stuk hoger komt te liggen dan de stilwaterlijn. Lager liggende opnemers op het talud geven dan echter geen druk meer aan, zodat verondersteld kan worden dat de runup lager is dan de plaats van de drukopnemer, die nog steeds water naar binnen laat lopen. Om die reden is er een stuk coding toegevoegd, dat moet voorkomen dat zonder doorgaande insijpeling zo'n merkwaardige registratie de berekening in het honderd kan sturen. Als de druk in het filter lager is dan de hoogte van de spleet en de buitendruk lager is dan 0.01, dan wordt de buitendruk gelijk aan 0 gemaakt. Wordt hieraan niet voldaan, dan wordt de stijghoogte in FHI geplaatst.

Omdat bij de getijden gebruik wordt gemaakt van een berekende golfrandvoorwaarde, is deze niet behept met meetfouten. Een vangnet, zoals in de vorige alinea beschreven, is dus overbodig. Toch moet met droge en natte spleten rekening worden gehouden. Dit gaat als volgt in zijn werk. Als FHI (druk aan de bovenzijde van de spleet) gelijk is aan nul, staat er geen water. De stijghoogte aan de buitenzijde, FHI, wordt dan gelijk gemaakt aan de stijghoogte aan de binnenzijde. In het andere geval wordt de stijghoogte FHI berekend uit de druk aan de bovenzijde van de spleet. Omdat in de routine tamelijk veel is veranderd, wordt deze afgedrukt in appendix F.

#### Subroutine SCHATNG

Ook dit is een nieuwe routine. De druk aan de onderzijde van de spleten wordt berekend via een iteratief proces. Voor iedere spleet is de wet van Kirchhoff opgeschreven. Naar een punt aan de onderzijde van een spleet stroomt water. Netto mag hier zich geen water ophopen, of anders gezegd, wat er naar toe stroomt, moet er ook weer vandaan stromen. Hieruit volgt een stelsel vergelijkingen, dat iteratief wordt opgelost. Bij de bepaling van de ligging van de freatische lijn wordt



bladnummer : - 7 -  
ons kenmerk: CO-315150  
datum : 1992-10-26

ook een iteratieve methode toegepast: bisectie. In de buitenste iteratielus loopt de bepaling van de freatische lijn, in de binnenste de bepaling van de stijghoogte onder in de spleten, in het filter.

Bij het begin van het iteratieproces variëren de ligging van de freatische lijn heel sterk. Hierdoor zijn ook de drukken aan de buitenzijde van de zetting verschillend. Als er eenmaal een oplossing voor de druk onder in de spleten is gevonden, wordt deze tevens gebruikt als startwaarde voor de volgende iteratielus voor de freatische lijn. Deze startwaarde klopte heel goed bij een andere randvoorwaarde. Het iteratieve proces om de stijghoogte onder in de spleten te bepalen werkt via het laten leeg- of vollopen van de filterlaag door de toplaag. Omdat de toplaag zeer ondoorlatend is, loopt deze maar heel langzaam leeg. Omdat het iteratieproces nogal langdurig was, is getracht om het te versnellen. Overrelaxatie heeft enigszins geholpen, maar was niet doorslaggevend. Belangrijker was, dat de oplossing voor de druk aan de onderzijde van de spleten bij ondoorlatende toplagen vrijwel hydrostatisch bleek te zijn. Een dergelijke hydrostatische drukverdeling is als startwaarde ingevuld voor de druk aan de onderzijde van de spleten. De startwaarde wordt in subroutine FSTART bepaald. Deze methode gaf een aanzienlijke versnelling van het rekenproces. De routine is afgedrukt in appendix G.

#### Subroutine SORTPOIN

Met deze routine wordt een gesorteerde index aangemaakt. Deze index geeft de volgorde van elementen uit een vector, zodanig dat die vector wordt gesorteerd, zie tabel.

Getallen:	3.7	9.5	1.5	-4.0	3.0
Index bij start:	1	2	3	4	5
Index 1e slag:	1	3	4	5	2
Index 2e slag:	3	4	5	1	2
Index 3e slag:	4	3	5	1	2
Index 4e slag:	4	3	5	1	2

Het kleinste element staat dus op plaats 4 van de getallen, het grootste op plaats 2 van de getallen.

#### Tabel 1 Voorbeeld werking subroutine SORTPOIN

De volgorde van de elementen van de vector wordt hierbij niet veranderd. Het voordeel hiervan is, dat andere vectoren, die dezelfde volgorde als H hebben, ook via die index meegesorteerd worden. Als het om veel andere vectoren gaat, behoeven de elementen niet allemaal van plaats te veranderen.

De subroutine werkt als volgt. Eerst wordt de index aangemaakt als een vector met olopende getallen van 1 t/m n, het aantal elementen. Het eigenlijke sorteren gebeurt bij afwezigheid van een 'qsort' routine in Fortran in twee lussen. De eerste lus geeft het eindpunt van de tweede lus weer. Na de eerste sorteeractie staat de index (2), die naar het grootste element wijst, op de laatste plaats [5]. Bij de volgende keer behoeft die dus niet meer mee te doen.

bladnummer : - 8 -  
ons kenmerk: CO-315150  
datum : 1992-10-26

In de binnenste lus wordt het eigenlijke 'op volgorde zetten' uitgevoerd. Het getal, dat het n-de element van de index aanwijst wordt voor de eenvoud A genoemd. Het getal, dat door de n+1-ste element van de index wordt aangewezen, heet B. Indien A groter is dan B, zou A en B moeten worden verwisseld. Niet de getallen A en B worden verwisseld, maar de indices die naar A en B wijzen: index(n) en index(n+1) worden verwisseld.

De eerste keer dat de getallen worden verplaatst, komt het grootste element geheel achterin. Bij de volgende slag komt het een na grootste getal vlak voor het grootste. Bij iedere lus kan er dus steeds één getal minder worden onderzocht.

De tekst van deze routine is afgedrukt in appendix H.

#### Subroutine STEENZ

Dit is het hart van het gehele programma. Deze is op enkele punten gewijzigd. Een groot gedeelte van de routine, vooral in de tijdslus, kon echter worden verwijderd, omdat het berekenen van de blokbeweging en het maken van invoerbestanden voor plotjes bij getijden niet van belang is. Verder zijn er wat stukken van het programma verschoven. Het oogt heel anders, maar het is in feite oude wijn in nieuwe zakken.

STEENZET heeft een stuk coding, waarin array's worden geïnitieerd. Dit is voor de duidelijkheid naar het begin van het programma geschoven. De doorlatendheid van de toplaag is bij ingespoelde zettingen afhankelijk van de hoogte van de spleten boven de stilwaterlijn. Die variabele toplaagdoorlatendheid wordt berekend in de subroutine VARTOP. Vanwege het variabel zijn van de toplaagdoorlatendheid is de lek lengte ook afhankelijk van de plaats. Daarom wordt met de subroutine EXTREMA de minimale en maximale toplaagdoorlatendheid gezocht, waarmee de minimale en maximale lek lengte wordt berekend. Daarbij wordt rekening gehouden met de eventuele aanwezigheid van een uitvulling. Beide doorlatendheden en de bijbehorende lek lengtes worden uitgeschreven in het uitvoerbestand.

De runup wordt in STEENZET bepaald via de subroutine NATOPP. Echter bij getijden wordt met runup op een andere manier rekening gehouden. De runup wordt in de golfrandvoorwaarde verdisconteerd. Zowel bij het aanmaken van de drukken ten gevolge van het getij als bij het rekenen in STEENZET moet de grootte van de runup worden opgegeven. Deze wordt via een in de commandoregel ingetikt getal aan het programma medege-deeld.

Een kleine verandering is, dat de hoogte van de spleten niet meer wordt afgedrukt in STEENZET. Voor de analyse van de situatie zijn andere hulpbestanden, die in FRESTAT worden beschreven en die beter geschikt zijn voor verwerking in andere programma's.

Na de aanroep van FRESTAT wordt de waarde van de stationaire freatische lijn uitgeschreven. In de komende lus wordt de stijghoogte in het talud en de blokbeweging berekend. Hierin zijn we nu niet geïnteresseerd. Wat wel belangrijk is, is de ligging van de freatische lijn tijdens het getij.

bladnummer : - 9 -  
ons kenmerk: CO-315150  
datum : 1992-10-26

Dit wordt in dezelfde lus berekend als de stijghoogte in het filter en de blokbeweging. Allereerst wordt de druk op het talud per tijdstip ingelezen (MGOLF). Vervolgens wordt de actuele stijghoogte in het filter berekend (DRUKV). Uit de actuele waarde van de stijghoogte in het filter en op het talud wordt berekend, hoeveel water er in of uit het talud loopt. Dit wordt omgerekend naar een verandering van de hoogte van de freatische lijn (FREAT). In die hoogte zijn we geïnteresseerd, want die is ook gemeten. Daarna wordt de tijd aangepast en begint het lieve leven van voor af aan. De subroutine is in appendix I afgebeeld.

#### Subroutine VARTOP

Het effect van het getij op een dichtgeslibde zetting dient te worden onderzocht. Beneden de getijzone is de zetting zeer ondoorlatend, boven de getijzone is hij zeer doorlatend. In de oude versie van Steenzet en Banach is de toplaagdoorlatendheid constant. Alleen de onderste spleet kan iets (on)doorlatender worden gemaakt. Bij het huidige doel van het onderzoek past evenwel een variabele toplaagdoorlatendheid. Deze wordt in VARTOP berekend.

In de routine wordt het bestand met gemeten toplaagdoorlatendheden ingelezen. De opbouw van dit bestand is als volgt:

Aantal metingen	
Hoogte van de eerste meting	Gemeten eerste toplaagdoorlatendheid
....	
Hoogte van de laatste meting	Gemeten laatste toplaagdoorlatendheid

In getallen als voorbeeld:

```
3
2.5 4.E-3
0.45 7.E-7
-0.5 5.E-7
```

Eerst wordt gepoogd het bestand met metingen te openen. De metingen staan in DATA\INLEK.DAT. Omdat GETIJ bij voorkeur vanuit de STEENZET directory wordt gedraaid, kunnen de gegevens bij de andere bestanden met invoergegevens worden opgeslagen. Vervolgens wordt na het lezen van het aantal metingen nagegaan of er niet meer metingen zijn, dan er spleten in de zetting bestaan. Dit is niet waarschijnlijk, maar het zoekalgoritme loopt anders fout. Daarna worden de gemeten hoogten en toplaagdoorlatendheden ingelezen. Deze behoeven niet noodzakelijkerwijs gesorteerd te zijn. Met de subroutine SORTPOIN wordt een indexvector aangemaakt, waarmee niet alleen de hoogten van de opnemers zijn gesorteerd, maar tegelijkertijd ook de bijbehorende gemeten doorlatendheden op volgorde staan.

bladnummer : - 10 -  
ons kenmerk: CO-315150  
datum : 1992-10-26

Het eigenlijke toekennen van de doorlatendheid aan de spleten kan nu zijn aanvang nemen. Als een spleet hoger ligt dan de hoogste meting of lager ligt dan de laagste meting, wordt de hoogste respectievelijk de laagste waarde aangehouden. Voor spleten, die tussen de hoogste en laagste meting liggen, worden twee metingen geselecteerd, die het meest nabij de spleet liggen. Tussen die twee metingen wordt logaritmisch geïnterpoleerd. De reden hiervoor is, dat bij sterk verschillende toplaagdoorlatendheden een lineaire interpolatie een vrij hoge waarde voor de tussenliggende spleten oplevert. Omdat de spleetvulling door het getij wordt geregeld, is het idee dat er een vrij abrupte overgang is tussen doorlatende en ondoorlatende spleten. Logaritmische interpolatie geeft dit gedrag beter aan dan lineaire interpolatie.

Laten  $(h_1, k_1)$  en  $(h_2, k_2)$  de twee meetpunten zijn, waartussen de spleet met gegeven hoogte  $h$  en onbekende doorlatendheid  $k$  ligt. De doorlatendheid van de spleet is dan:

$$k = k_2 * \left[ k_2/k_1 \right]^{\frac{h - h_2}{h_2 - h_1}}$$

De tekst van de routine is in appendix J afgedrukt.

#### Subroutine VOORW

Bij Banach wordt zo veilig mogelijk gerekend. Er wordt daarom rekening gehouden met doorgaande insijpeling. Die insijpeling komt voort uit de runup van golven. Als het getijde puur wordt gezien, is er geen runup te verwachten. Er wordt daarom zonder doorgaande insijpeling gerekend. De variabele INSIJP, die op 1 stond, wordt op 0 gezet.

Met het effect van golven, die een runup veroorzaken, is op een andere manier rekening gehouden: de golfrandvoorwaarde is enigszins aangepast. Dit is in het programma MAAKGOLF beschreven.

#### Subroutine WATERUIT

Tijdens de programmaontwikkeling bestond er twijfel over de juistheid van de oplossing voor de freatische lijn. Om de gevonden oplossing te controleren, is het debiet per spleet nodig. Dit wordt in de vergelijkbare routine WATRUIT (zonder de E) niet expliciet uitgerekend, noch afgedrukt: slechts de som. Een verdere toevoeging is dat in WATERUIT ook het totale debiet wordt afgedrukt. Deze routine wordt na de berekening van de stationaire freatische lijn aangeroepen ter controle van de gegevens. Een absoluut criterium lijkt niet zo handig, omdat de toplaagdoorlatendheid juist indien getijden van belang zijn, nogal laag kan zijn (orde van 0.1  $\mu\text{m/s}$ ).

bladnummer : - 11 -  
ons kenmerk: CO-315150  
datum : 1992-10-26

Eerst wordt bij de gevonden waarde van de freatische lijn de drukverdeling in het filter onder de spleten bepaald. Uit het quotiënt van het drukverschil over de spleet en de doorlatendheid van die spleet wordt het debiet door de spleet berekend. Voor het grootste deel is WATRUIT gebruikt, met enkele kleine modificaties. De routine is afgedrukt in appendix K.

#### Subroutine WRTSTUUR

Niets essentieel is in deze routine veranderd. De onderste spleet kan in de oude versie van Steenzet doorlatender of ondoorlatender worden gekozen dan de andere spleten. Omdat de toplaagdoorlatendheid zo laag is, kan de doorlatendheid van de teenconstructie wel eens een belangrijke invloed op de hoogte van de freatische lijn hebben. Om deze wat hogere doorlatendheid en het daarbij behorende veel grotere doorstroomoppervlak te kunnen verdisconteren, kan de factor, waarmee de doorlatendheid van de onderste spleet wordt vermenigvuldigd, vrij groot worden. Maximaal kon een waarde van 999.99 worden afgedrukt. Voor getallen groter dan 1000 wordt overgeschakeld op de exponentiële notatie.

bladnummer : - 12 -  
ons kenmerk: CO-315150  
datum : 1992-10-26

## HET PROGRAMMA RUNUP

Met dit programma kan een externe randvoorwaarde op het talud worden aangemaakt. Tevens kan rekening worden gehouden met de aanwezigheid van golven: een runup.

Het programma is een voorbeeld van een ontwikkelaarsprogramma. Er is geen aandacht besteed aan een GUI of zelfs maar een simpele UI. Tik een commando in met wat getallen er achter, de rest gaat dan vanzelf. Het is ook niet de bedoeling dat dit programma buiten GD komt.

### Gebruik

Het programma dient als volgt te worden aangeroepen:

RUNUP Bestandsnaam Getijamplitude Honder Hboven Hstil Runup

Bestandsnaam: Dit is de naam van het bestand, waarin de randvoorwaarde, na berekening, dient te worden geplaatst. De extensie is verplicht .C. De extensie mag niet worden opgegeven. Het programma plakt die .C er zelf achter.

Getijamplitude: De amplitude van het getij. Aangenomen is dat het getij sinusvormig is met een amplitude A:

$$G(T) = A \sin (2 \pi T / 12h25m)$$

Honder: De hoogte van de onderzijde van het talud.

Hboven: De hoogte van de bovenzijde van het talud.

Hstil: De hoogte van de stilwaterlijn, de gemiddelde waterhoogte, na uitmiddelen van het getij.

Runup: De hoogte (verticaal dus) waarover het talud ten gevolge van golven nog wordt bevochtigd.

### Programmabeschrijving

Het aantal opnemers en het aantal tijdstippen staat in het bestand param.inc. Voor enkele niet beschreven hulpprogramma's zijn dezelfde grootheden nodig, vandaar een include. Er zijn vier arrays: T(N), bevat de tijden tijdens twee getijden, S(N) bevat op die tijden de hoogte van het getij, H(M) bevat de hoogte van de (verzonnen) opnemers. De resultaten komen terecht in het array IW(M,N). Dit is een integer\*2, dus uitwisselbaar met STEENZET.

Het programma begint te controleren of er voldoende argumenten in de commandoregel zijn meegegeven, via de function IARGC(). Omdat ook de naam van het programma meetelt (argv[0] in C), moeten er 7 argumenten zijn. Indien er geen 7 argumenten worden gevonden, wordt een geheugensteuntje afgedrukt. Vervolgens worden de argumenten binnengehaald. Hiervoor is de subroutine GETARG. Als retourwaarde komt altijd een character variabele. Via een internal read kan de charactervariabele

bladnummer : - 13 -  
ons kenmerk: CO-315150  
datum : 1992-10-26

in een getal worden omgezet. Ter controle wordt nagegaan of de waarde van Hstil tussen Honder en Hboven ligt. Zo niet, dan wordt een foutmelding afgedrukt. De geometrie klopt dan niet.

Verdere voorbereiding voor de berekening is nodig. De tijdstippen, waarop een randvoorwaarde is gewenst, worden aangemaakt met LINBER: equidistante tijdstippen. Dezelfde routine wordt gebruikt voor het vullen van de vector met de hoogten van de drukopnemers. Tenslotte wordt na het openen van het unformatted uitvoerbestand, de waarde van het getij op ieder tijdstip berekend.

Nu komt het lastigste: het bepalen van de waarden van de drukken, de randvoorwaarde. In Banach wordt met relatieve drukken gewerkt. Dit heeft als voordeel dat de drukopnemers niet te lijden hebben van systematische afwijkingen. Dit gaat vooral goed bij drukken beneden de stilwaterlijn. Er kunnen vier situaties worden onderscheiden, afhankelijk van de actuele waarde van de waterstand (getij):

1. Opnemer beneden de stilwaterlijn, opnemer ligt beneden de actuele waterhoogte.
2. Opnemer beneden de stilwaterlijn, opnemer ligt boven de actuele waterhoogte.
3. Opnemer boven de stilwaterlijn, opnemer ligt beneden de actuele waterhoogte.
4. Opnemer boven de stilwaterlijn, opnemer ligt boven de actuele waterhoogte.

In geval 1 staat de opnemer onder water. De druk is gelijk aan de berekende waterdruk ten gevolge van het getij.

In geval 2 staat de opnemer droog. Zijn druk is gelijk aan het negatieve hoogteverschil tussen stilwaterlijn en hoogte opnemer. Bij deze waarde kan nog 1 mm wmk worden opgeteld, als er sprake is van runup. De opnemer moet dan liggen in het runup gebied (boven de actuele waterlijn en beneden de actuele waterlijn vermeerderd met de runup hoogte).

In geval 3 staat de opnemer tijdelijk onder water. De waarde van de druk is gelijk aan de actuele hoogte van de waterlijn verminderd met het verschil in hoogte tussen opnemer en stilwaterlijn.

In geval 4 staat de opnemer droog. Zijn druk is 0. Indien de opnemer ligt in het gebied tussen de actuele waterlijn en de actuele waterlijn vermeerderd met de runuphoogte, wordt bij die druk 0 lmm waterkolom opgeteld.

Na het berekenen van de drukken worden deze eerst met 1000 vermenigvuldigd, waarna ze kunnen worden geconverteerd naar type integer\*2. Die waarde wordt vervolgens opgeslagen in het array IW. Als alle drukken zijn berekend, worden ze naar het uitvoerbestand geschreven. De broncode van het programma is in appendix L afgedrukt.

APPENDIX B

DWW NOTITIES BETREFFENDE LEKTIJD

Ir. B. P. Rigter

B1. Notitie N 526

Invloed langperiodieke golven op stijghoogteverschil  
over toplaag bij grote leklengte, aug. 1991

B2. Notitie N 616

Invloed overgangsconstructies op lektijd  
juni 1992

B3. Notitie N 647

Nogmaals: lektijd, teenconstructie en prototypemetingen  
oktober 1992



notitie N 526

leden TAW-A2  
aan: ir.B.P.Rigter  
van: 7 augustus 1991  
datum: Invloed langperiodieke golven op stijghoogteverschil  
onderwerp: over toplaag bij grote leklengte.

=====

### I. INLEIDING.

Bij het commentaar op het concept-handboek steenzettingen waren vragen (o.a. van P.Struik) naar de invloed van deining. Onlangs kwamen J. Niemeijer (WBA) en K.v.d.Hoek (BD) met de vraag welke invloed een deining van 10 sec. met een golfhoogte van 1 m. heeft in vergelijking met windgolven met een golfhoogte van 1 m. Mede gezien de bij de natuurmetingen geconstateerde grote ondoorlatendheden van de toplagen is het belang van beantwoording van deze vragen toegenomen. Het is immers denkbaar dat het water in het filter de daling van de waterstand als gevolg van langperiodieke fluctuaties niet kan volgen, zodat grote overdrukken optreden. Deze moeten dan gesuperponeerd worden op de overdrukken als gevolg van de windgolven. In deze notitie worden enige beschouwingen over deze invloed gegeven die ik vorig jaar al heb opgesteld, maar die ik wegens niet gebleken vraag toen niet heb uitgewerkt. Behalve deining vallen natuurlijk alle waterstandsveranderingen, van bui-oscillaties tot getijden, onder de theorie.

Het blijkt dat behalve de leklengte ook de in deze notitie ingevoerde lektijd van belang is. Bij een in verhouding tot de "lektijd" korte periode van de waterstandsverandering blijft het freatisch vlak in het filter praktisch op een konstante hoogte. Als de leklengte dan ook groot is in relatie tot de golfhoogte zullen grote overdrukken optreden. Als de periode van de waterstandsfluctuatie langer is dan de lektijd volgt het freatisch vlak de verandering van het buitenwater met een zekere demping en faseverschuiving. Hierdoor worden de overdrukken beperkt.

De hier gepresenteerde theorie wordt ondersteund door de bijdragen van Sellmeijer en Bezuijen aan het onderzoeksverslag "oriënterende grondmechanische studies", deel IV uit de reeks "taludbekleding van gezette steen", gedateerd juli 1982. Dat verslag was echter gericht op het bepalen van de gemiddelde, stationair veronderstelde, verhoging van het freatisch vlak tijdens kortdurende golven en niet op de variatie van dit vlak tijdens de golfperiode. In het genoemde rapport is ook een verslag opgenomen van metingen met een electrisch analogon. Deze metingen bevestigen de theorie van deze notitie.

## II. STIJGHOOGTE- EN WATERSTANDSVERSCHILLEN EN DE INVLOED VAN DE LEKLENGTE.

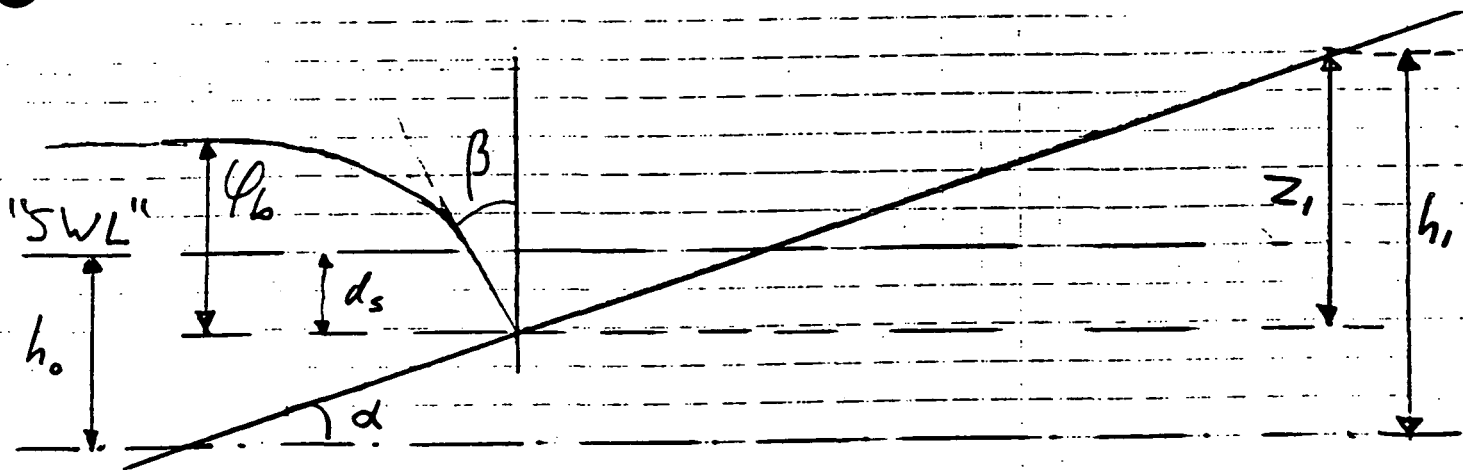
In notitie N 446bis is aangetoond dat het maximale stijghoogteverschil voor windgolven bij een "exponentiël" golffront berekend kan worden met de formule (18) uit die notitie, die enigszins herschreven luidt:

$$\varphi_w = \frac{1}{2} \Lambda \sin \alpha \left[ 1 + \frac{1}{0,17 \xi_0 + \frac{\Lambda \sin \alpha}{\varphi_b}} \right] \left( 1 - e^{-\frac{2z_1}{\Lambda \sin \alpha}} \right) \quad (1)$$

In deze formule is gebruik gemaakt van de relatie:

$$\operatorname{tg} \alpha * \operatorname{tg} \beta = 0,17 \xi_0$$

In formule (1) is  $z_1$  gelijk aan de verticale afstand tussen het freatisch vlak in het filter en het snijpunt van golffront met het talud (zie figuur 1).



Figuur 1: Definitieschets bij formule 1.

In figuur 2 zijn enige grafieken gegeven voor  $\varphi_w/\varphi_b$  als functie van  $\Lambda \sin \alpha / \varphi_b$  voor verschillende waarden van  $\varphi_0/\varphi_b$  en  $\xi_0$ .

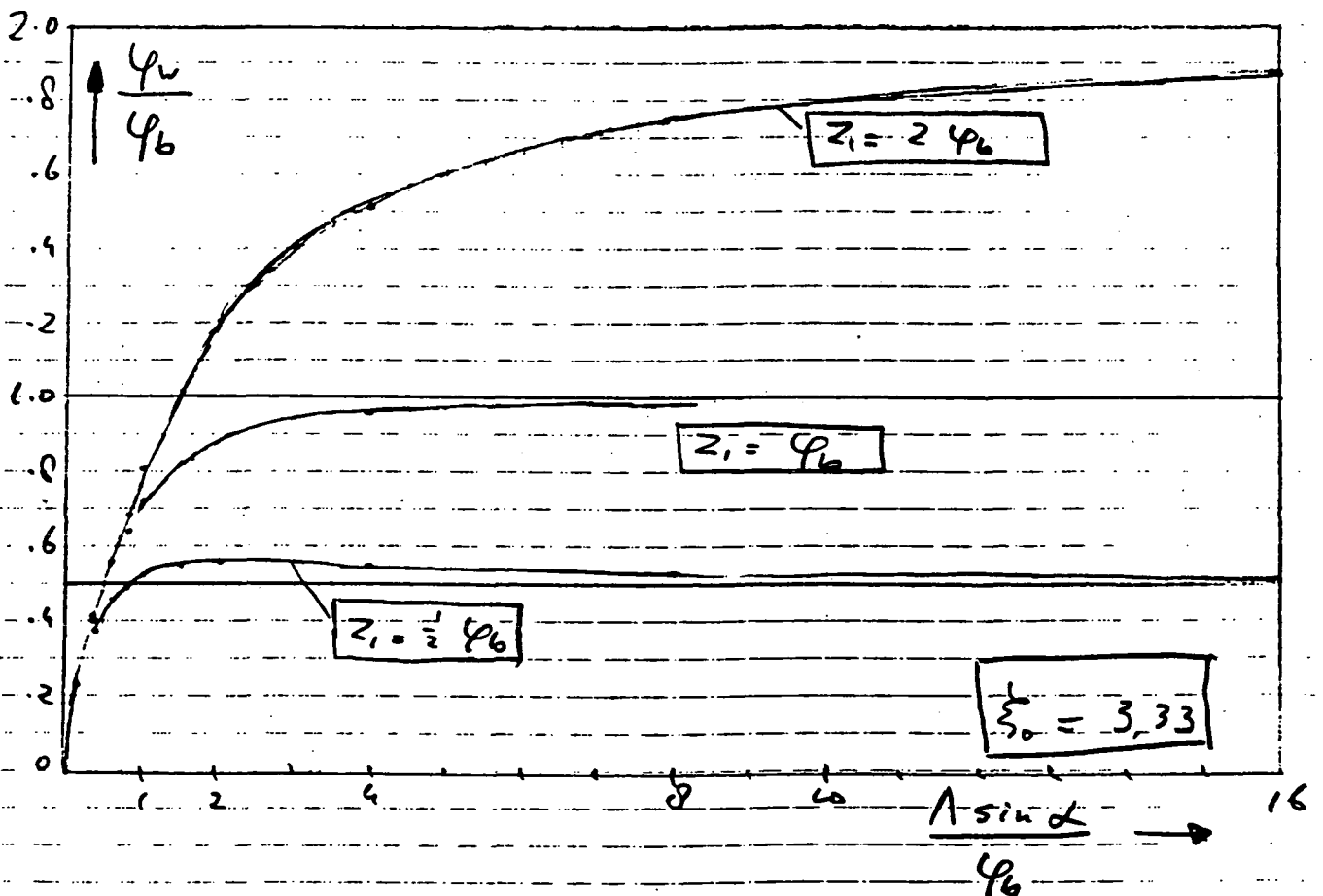
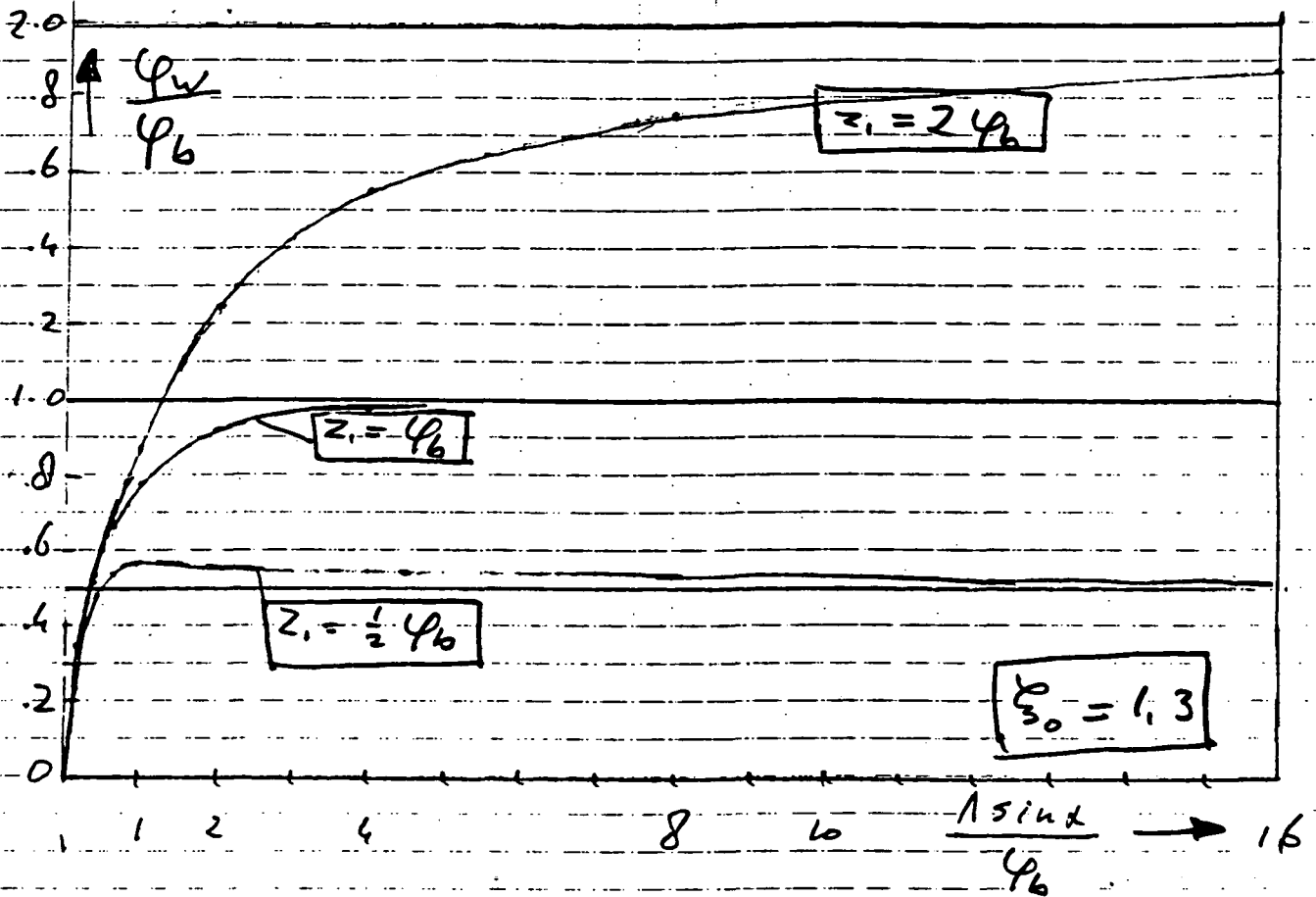
Als:

$$\Lambda \sin \alpha < z_1$$

volgt:

$$\varphi_w = \frac{1}{2} \Lambda \sin \alpha \left[ 1 + \frac{1}{0,17 \xi_0 + \frac{\Lambda \sin \alpha}{\varphi_b}} \right]$$

Deze formule is een aardige vuistregel voor het berekenen van



Figuur 2: Enige relaties tussen maximaal  
 sliphoogte verschil, tekentype, theoretische lijn en  
 breuk naar...

het stijghoogteverschil bij de tot nu toe gebruikelijke lek-  
 lengten van één meter of minder. Bij kleine lek lengte is het  
 maximale stijghoogteverschil dus onafhankelijk van het ver-  
 schil in waterstanden in het filter en van het buitenwater.  
 Deining en andere langperiodieke golven hebben dan dus geen  
 invloed op het maximum stijghoogteverschil (of het moet zijn  
 dat zij de hoek van het golf front  $\beta$  en het maximum stijghoog-  
 teverschil  $\varphi_b$  beïnvloeden).

Als de lek lengte echter veel groter is dan  $z_1$  en  $\varphi_b$ , dus :

$$\lambda \sin \alpha > z_1$$

en :

$$\lambda \sin \alpha > \varphi_b$$

volgt:

$$\varphi_w = z_1$$

Dit is dus gewoon het stijghoogteverschil bij een hydrosta-  
 tisch drukverloop in het filter.

In het algemene geval van windgolven en langperiodieke golven  
 en niet te kleine maar ook niet zeer grote lek lengten geldt  
 vergelijking (1), waardoor dus een reductie van de overdrukken  
 verkregen wordt. Het is dan wel belangrijk de waarde van  $z_1$  te  
 kennen.

Als de variabele hoogte van het freatische vlak aangegeven  
 wordt met  $h_1$  en de eveneens variabele hoogte van de buitenwa-  
 terstand met  $h_0$ , dan is (zie Figuur 1):

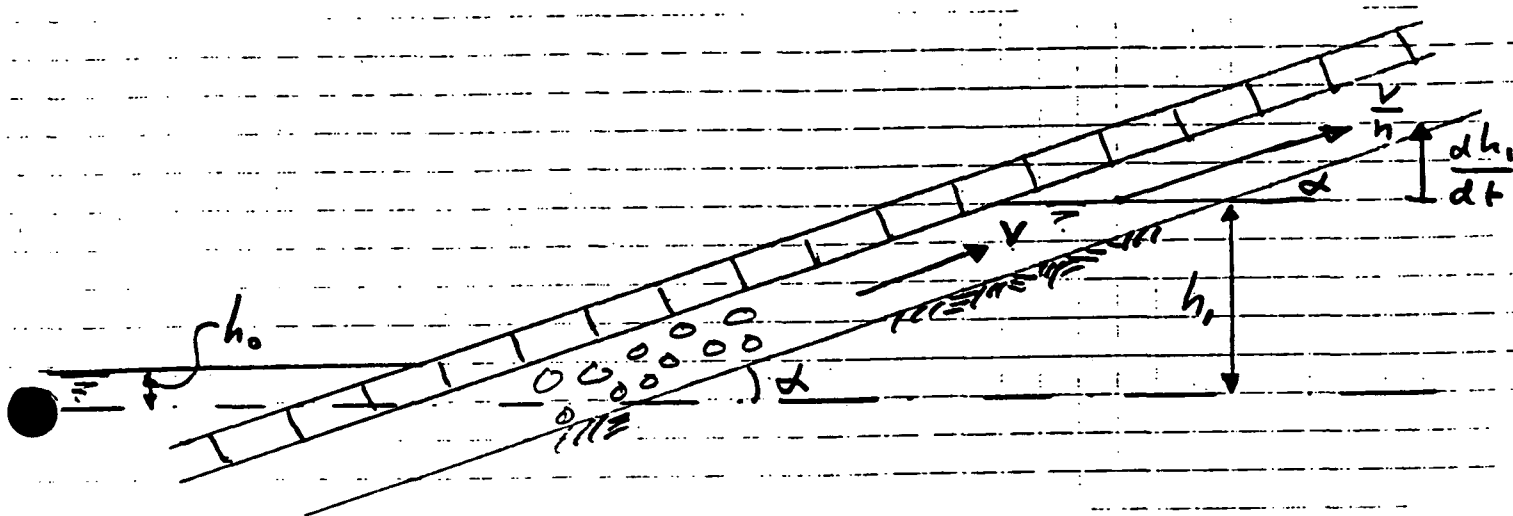
$$z_1 = (h_1 - h_0) + d_s \quad (2)$$

waarin  $d_s$  de rundown is van de windgolf. Voor deze rundown is  
 de relatie met  $H_0$  en de brekerparameter bekend.

In deze notitie gaat het om de bepaling van de maximale waarde  
 van  $(h_1 - h_0)$ . De belangrijkste aanname is dat de waterstand in  
 het filter bij de grote lek lengten, die in de praktijk kenne-  
 lijk optreden, bepaald wordt door de langperiodieke golven en  
 niet door de windgolven. Dit wordt aannemelijk gemaakt door  
 aan te tonen dat het freatisch vlak in het filter bij kortpe-  
 riodieke golven met hydrostatische drukverdeling ook nauwe-  
 lijks hoger is dan de gemiddelde waterstand.

### III. KORT-PERIODIEKE HYDROSTATISCHE GOLVEN.

Als het specifieke debiet van het water in het filter, evenwijdig met het talud, nabij het freatisch vlak wordt aangegeven met  $v$  en de effectieve porositeit van het filter met  $n$  dan geldt (zie ook Figuur 3):



Figuur 3: Relatie tussen stijgsnelheid freatisch vlak en specifiek debiet.

$$\frac{dh_1}{dt} = \frac{v \sin \alpha}{n} \quad (3)$$

Sellmeijer breidt deze vergelijking uit met insijpeling van water uit de toplaag boven het freatisch vlak hetzij tengevolge van het buitenwater, als dat hoger staat dan het freatisch vlak, hetzij tengevolge van de aanname dat de toplaag verzadigd blijft met water dat uit de toplaag blijft lekken, ook al staat er geen water meer boven. Beide invloeden zijn zowel voor zeer kleine als voor zeer grote lek lengten verwaarloosbaar (zie appendix). Bovendien zal de toplaag bij langdurige perioden zeker niet verzadigd blijven. Daarom worden beide effecten in deze notitie ook voor "gewone" lek lengten buiten beschouwing gelaten. Het gaat om de hoofdlijn!

Het specifieke debiet  $v$  is volgens Darcy afhankelijk van de gradiënt van de stijghoogte in het filter :

$$v = -k_f \frac{d\phi_f}{dx} \quad (4)$$

De gradiënt van de stijghoogte moet wel genomen worden ter plaatse van het freatisch vlak! Deze gradiënt wordt bepaald met de theorie van Wolsink voor de stijghoogte van het water

in het filter op elk moment:

$$\frac{\delta^2 \varphi_f}{\delta x^2} = \frac{\varphi_f - \varphi_T}{\Lambda^2}$$

Uit de oplossingen van deze vergelijking voor de situaties waarin het freatisch vlak zowel hoger als lager staat dan het buitenwater wordt gevonden (voor de afleiding zie appendix):

$$\frac{d\varphi_f}{dx} = \sin\alpha * [1 - e^{-\frac{h_1 - h_0}{\Lambda \sin\alpha}}] \quad (5)$$

Ook hier brengt Sellmeijer enige nuances aan, samenhangend met een beschouwing over relaties nabij het freatisch vlak (zie appendix). Voor de grote lijn zijn deze nuances niet belangrijk.

Substitutie van bovenstaande uitdrukking (5) in de formule van Darcy (4) en vervolgens in de vergelijking voor de stijgsnelheid van het freatisch vlak (3) levert:

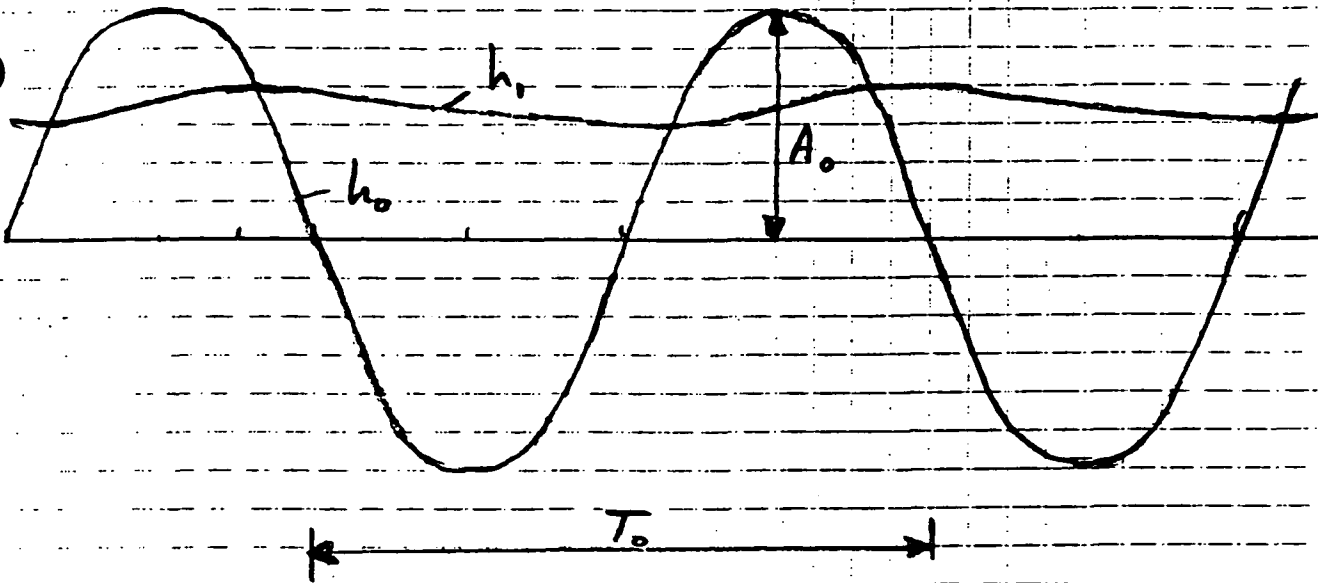
$$\frac{dh_1}{dt} = -\frac{k_f}{n} \sin^2\alpha * [1 - e^{-\frac{h_1 - h_0}{\Lambda \sin\alpha}}] \quad (6)$$

Als het freatisch vlak hoger staat dan het buitenwater daalt het freatisch vlak. Bij zeer grote lek lengte is de daalsnelheid volgens bovenstaande formule zeer gering. Bij kleiner lek lengte is de daalsnelheid groter, maar nooit meer dan  $(k_f/n)\sin^2\alpha$

Als het freatisch vlak lager staat dan het buitenwater stijgt het freatisch vlak. Bij zeer grote lek lengte is de stijgsnelheid eveneens zeer gering. Bij zeer kleine lek lengten kan de stijgsnelheid evenwel relatief groot worden.

Over het algemeen is de stijgsnelheid groter dan de daalsnelheid. Het verloop van  $h_1$  in de tijd bij een gegeven sinusvormig verloop van  $h_0$  ziet er dus uit als in Figuur 4. Hieruit volgt dus dat de gemiddelde waterstand in het filter hoger is dan de gemiddelde waterstand van het buitenwater.

Als de periode van de golfbeweging kort is, is de waterstand in het filter praktisch konstant, omdat de daalsnelheid zo gering is. Deze praktisch konstante waterstand van het freatisch vlak is volgens de door Sellmeijer aangegeven methode te bepalen door vergelijking (6) te integreren over een periode  $T_0$  en daarbij in het rechterlid  $h_1$  gelijk te stellen aan een constante  $h_{1, gem}$ .



Figuur 4: Verloop van buitenwaterstand en freatisch vlak in de tijd.

Dit leidt na enige bewerkingen tot:

$$\frac{h_{1gem}}{A \sin \alpha} = \ln \left[ \int e^{\frac{A_0 \sin \omega t}{A \sin \alpha}} \frac{dt}{T_0} \right] \quad (7)$$

net:

$$\omega = 2\pi / T_0$$

$$\int_0^T e^{\sin \alpha} da$$

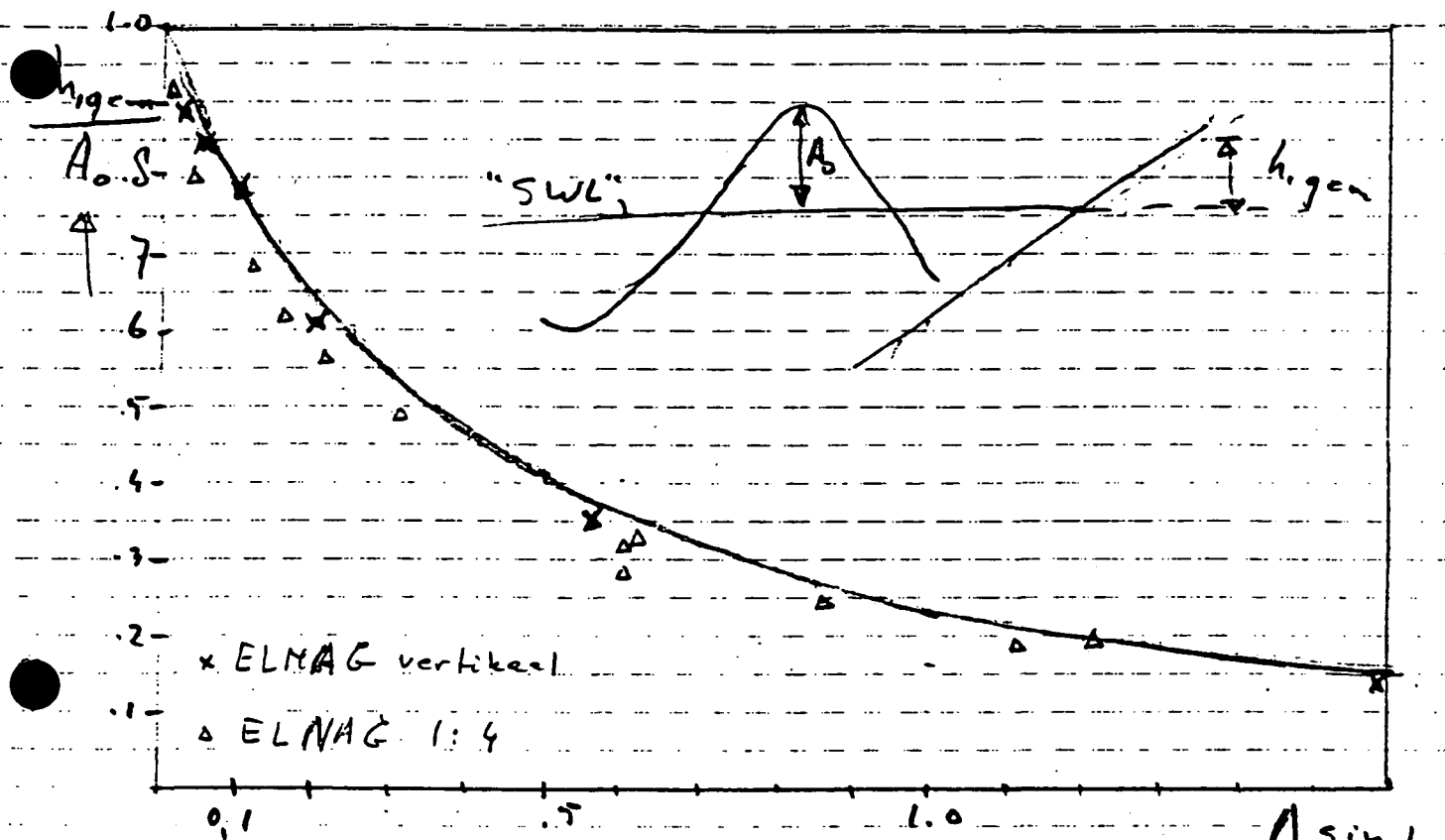
In deze vergelijking is  $A_0$  de amplitude van de golf van het buitenwater.

Numerieke oplossing van de integraal voor verschillende waarden van  $A_0 / A \sin \alpha$  leidt tot Figuur 5 of Figuur 6. Deze laatste figuur is goed vergelijkbaar met de figuur die de oplossing volgens Sellmeijer weergeeft in het rapport uit 1982.

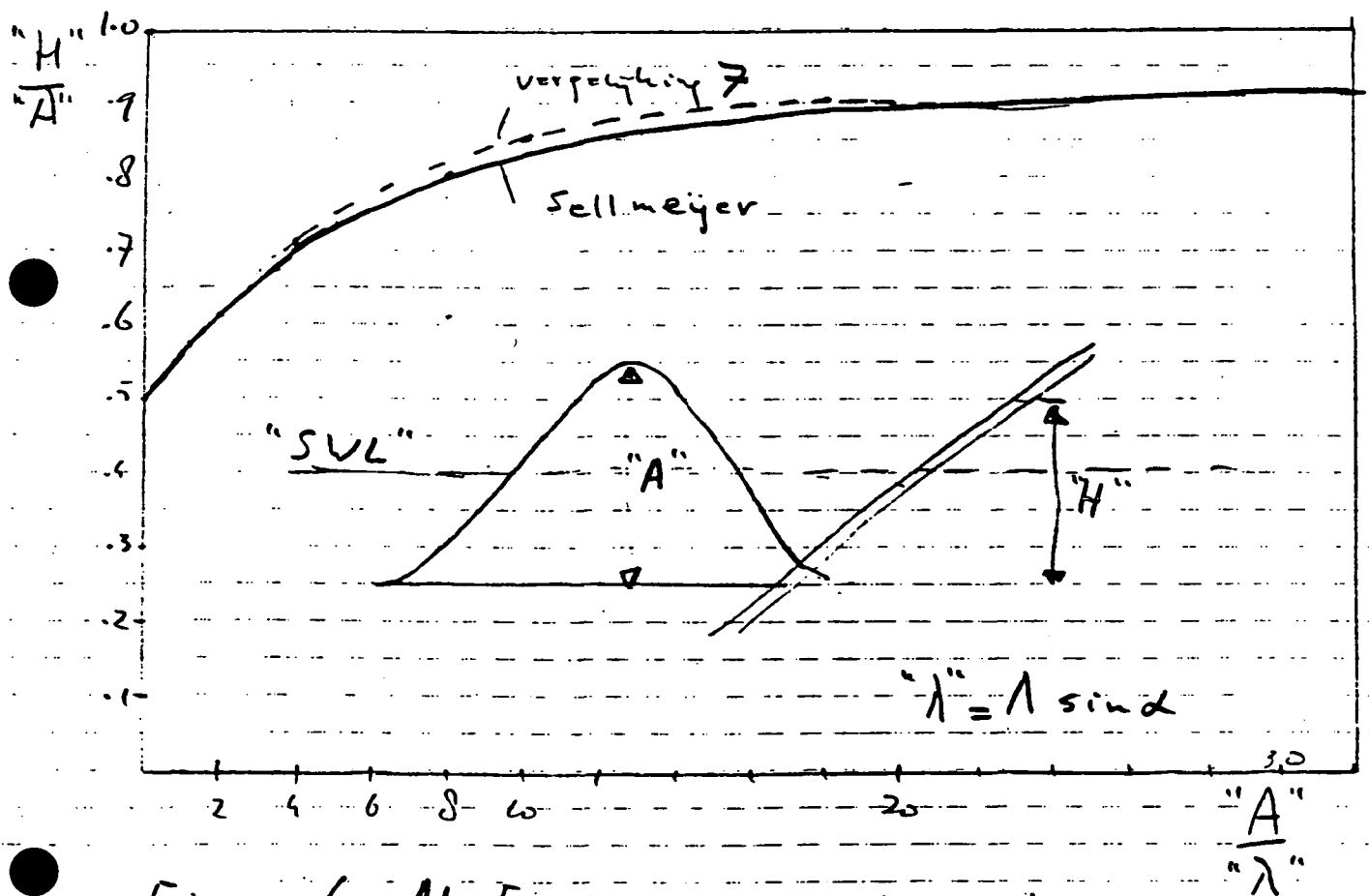
De conclusie luidt dat voor kortperiodieke golven met hydrostatische drukverdeling geldt dat de gemiddelde als konstant te beschouwen waterstand in het filter gelijk wordt aan de gemiddelde buitenwaterstand als de lekhoogte ( $A \sin \alpha$ ) groot is t.o.v. de amplitude, terwijl de waterstand in het filter gelijk wordt aan de maximale buitenwaterstand als de lekhoogte zeer klein is t.o.v. de amplitude.

Hiermee is aannemelijk gemaakt dat de gemiddelde als konstant te beschouwen waterstand in het filter bij grote lekhoogten eveneens bij kortperiodieke windgolven gelijk wordt aan de gemiddelde buitenwaterstand.

Dit betekent dat het ongunstig is om bij de berekening van windgolven bij lange lek lengten uit te gaan van een hoog freatisch vlak!



Figuur 5: hoogte free-surface lijn als functie van lek lengte (vergelijking 7)



Figuur 6: Als Figuur 5, maar in notatie volgens Sellmeijer.

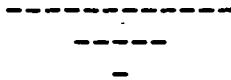


Ten behoeve van de verificatie van de theorie met de ELNAG-proeven (paragraaf V) is het belangrijk op te merken dat het maximale stijghoogteverschil voor deze kortdurende hydrostatische golven gevonden wordt uit vergelijking (1) door hierin te stellen  $\varphi_b = 0$ ,  $\xi_0 = \infty$  en  $z_1 = A_0 + h_{gem}$ . Het resultaat is

$$\varphi_w = \frac{1}{2} A \sin \alpha \left( 1 - e^{-\frac{2(A_0 + h_{gem})}{A \sin \alpha}} \right) \quad (8)$$

Omdat met formule (7)  $h_{1, gem}$  bekend is kan  $\varphi_w$  worden berekend. In Figuur 7 is het dimensieloze stijghoogteverschil uitgezet als functie van de dimensieloze lek lengte, in Figuur 8 is de presentatie volgens Sellmeijer weergegeven. Als  $A \sin \alpha < A_0$  volgt dat:

$$\varphi_w = \frac{1}{2} A \sin \alpha$$



#### IV. LANG-PERIODIEKE GOLVEN BIJ GROTE LEKLENGTEN.

Als de golfperiode langer wordt is de stand van het freatisch vlak niet meer als konstant te beschouwen. Dat is gunstig want bij een konstant blijvend freatisch vlak is de kans op overdrukken groter. De vraag is wanneer (bij welke frekwentie) het freatisch vlak nog als konstant mag worden beschouwd en wanneer niet. Omdat dit vooral van belang is bij lange lek lengten zal vanaf nu worden verondersteld dat:

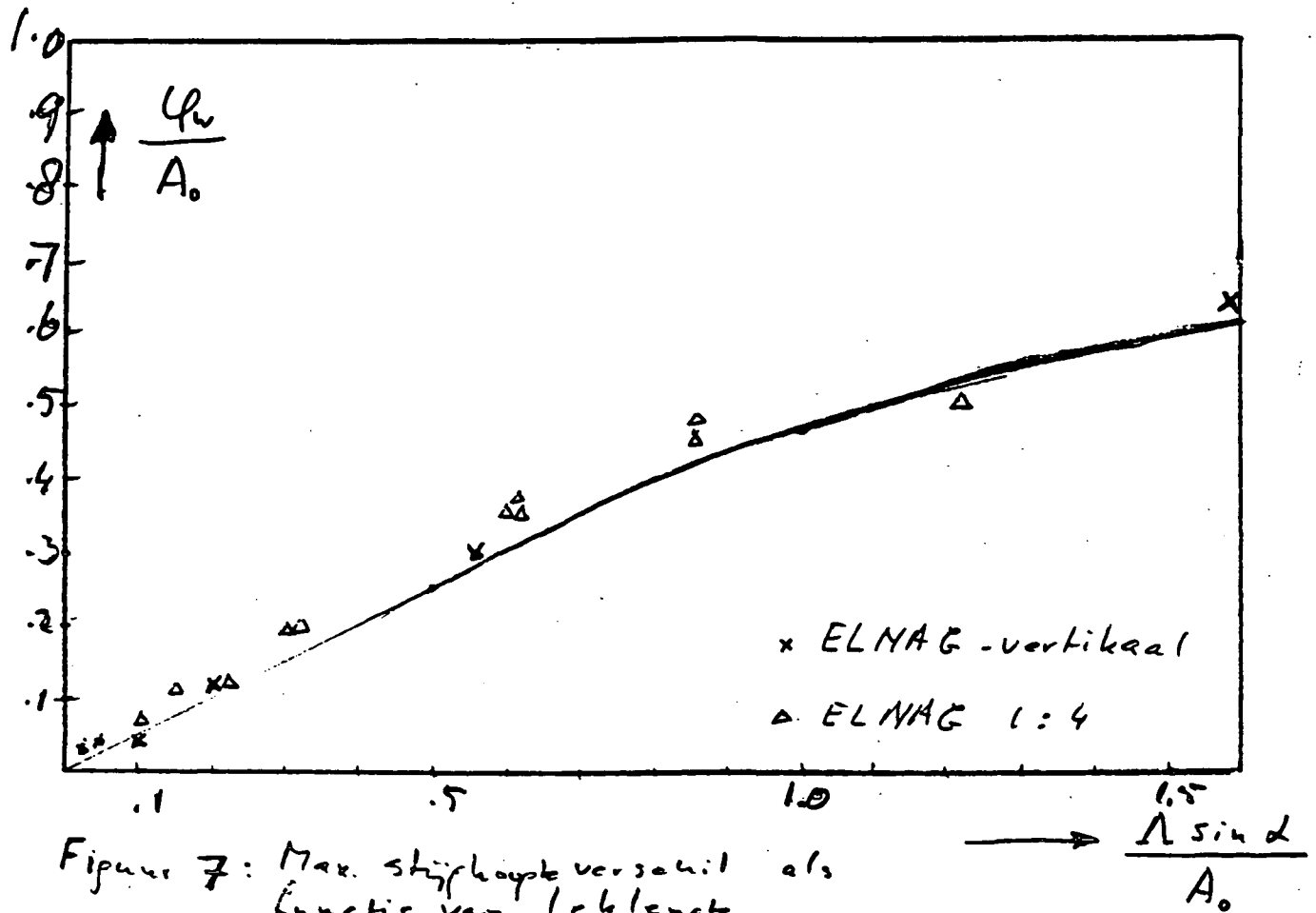
$$A \sin \alpha > |h_1 - h_0|$$

In die gevallen kan vergelijking (6) benaderd worden met:

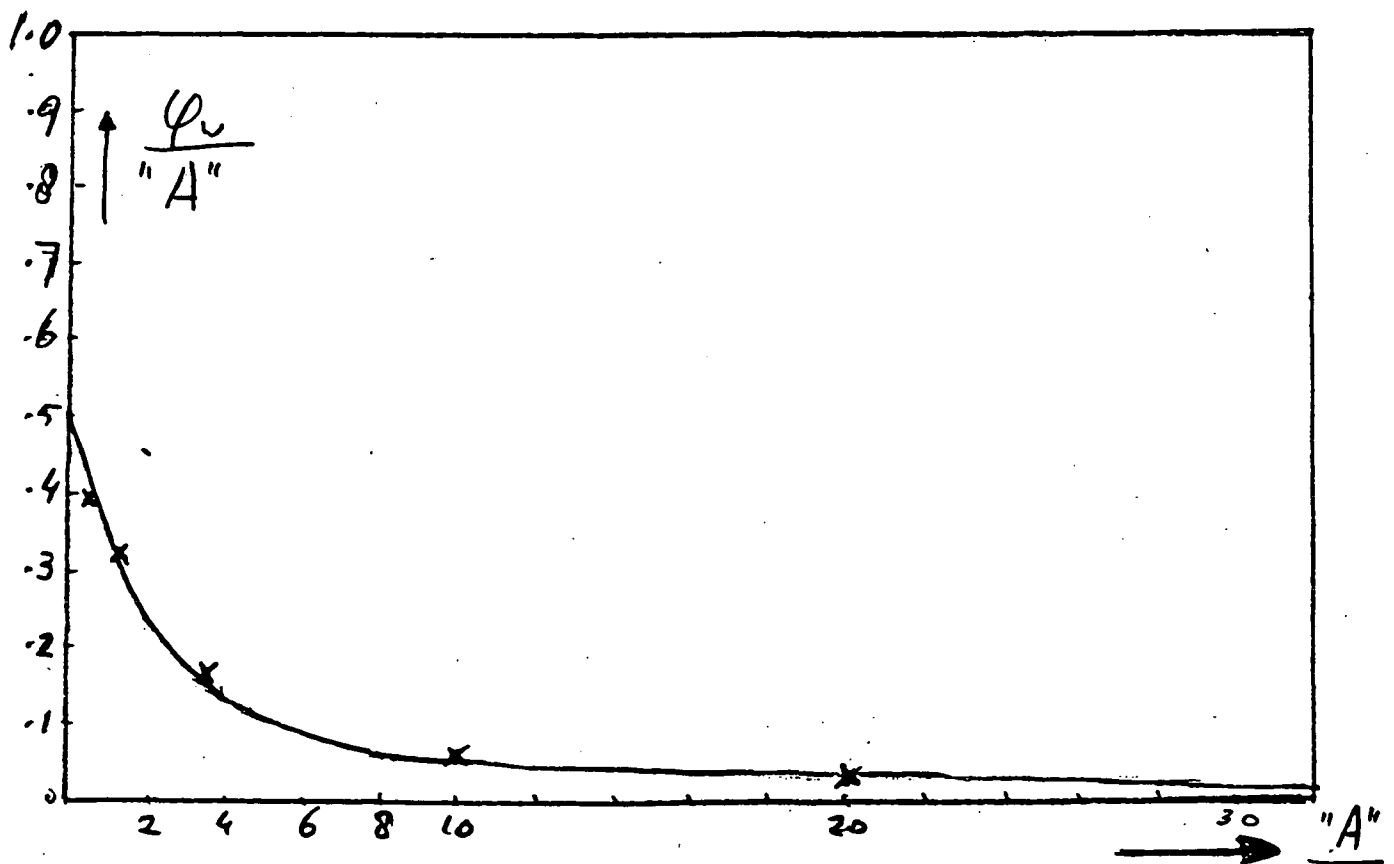
$$\frac{dh_1}{dt} = -\frac{k \sin \alpha}{n \Lambda} (h_1 - h_0) \quad (9)$$

Definiëren we nu de lekperiode of lektijd door:

$$T_k = \frac{2\pi n \Lambda}{k_f \sin \alpha} = \frac{2\pi n}{\sin \alpha} \sqrt{\frac{d_T}{k_T} * \frac{d_f}{k_f}} \quad (10)$$



Figuur 7: Max. stijghoek verschil als functie van leklengte



Figuur 8: Als Figuur 7, maar in notatie volgens Sellmeijer. (zie Figuur 6)

dan wordt de differentiaalvergelijking voor de relatie tussen de freatische lijn en het buitenwater:

$$\frac{dh_1}{dt} = -\frac{2\pi}{T_k} (h_1 - h_0) \quad (11)$$

Uit de definitie van de lektijd blijkt dat deze altijd toeneemt als de doorlatendheden van top- of filterlagen afnemen. Als de verhouding van deze doorlatendheden gelijk blijft, dus de leklengte gelijk blijft, neemt de lektijd omgekeerd evenredig met de doorlatendheid toe!

Nemen we nu aan dat de buitenwaterstand een sinusvormig verloop heeft, gekarakteriseerd door:

$$h_0 = A_0 \sin \frac{2\pi t}{T_0}$$

waarin  $A_0$  de amplitude van de oscillatie is en  $T_0$  de periode, dan is de oplossing voor de beweging van het freatisch vlak:

$$h_1 = \frac{A_0}{\sqrt{1 + \left(\frac{T_k}{T_0}\right)^2}} \sin 2\pi \frac{(t - \tau)}{T_0} \quad (12)$$

In deze formule is  $\tau$  de faseverschuiving.

In Figuur 9 is de amplitude van de freatische lijn zoals die volgt uit vergelijking (12) afgebeeld als functie van  $T_0/T_k$ . Uit deze vergelijking en Figuur 9 blijkt dat de amplitude van de beweging van het freatische vlak naar nul gaat en er dus nauwelijks beweging van dit vlak optreedt als  $T_0/T_k$  klein is, dus als de golfperiode klein is t.o.v. de lektijd. Bij doorlatendheidscoëfficiënten in de grootte-orde van  $k_r = 10^{-2}$  m/s,  $k_r = 10^{-3}$  m/s en laagdikten in de grootte-orde van 0.30 m is de leklengte in de grootte-orde van 10 m (lekhooft orde 3 m) en de lektijd van de orde van 100 minuten. Het freatisch vlak blijft dan bij alle fluctuaties van het buitenwater, kleiner dan ca. 2 m met een periode kleiner dan 10 minuten, praktisch gelijk. De amplitude van de beweging van het freatisch vlak is dan immers minder dan een tiende van de amplitude van de variatie van het buitenwater. Dit geeft dus overdrukken in de orde van die fluctuaties.

Voor langer perioden van de fluctuaties van het buitenwater beweegt het freatisch meer en zullen de verschillen tussen de waterstanden minder worden. Uit Figuur 9 is dus ook een maat af te leiden voor de maximale periode waarbij het freatisch vlak nog constant kan worden beschouwd. Wordt de fluctuatie van het freatisch vlak voor deze periode gesteld op 10% van  $A_0$ , dan is  $T_0/T_k = 0,1$ .

We kunnen concluderen dat als  $T_0/T_k < 0,1$  de hoogte van het freatisch vlak als konstant beschouwd kan worden en bepaald kan worden met vergelijking (7) of Figuur 9, terwijl als  $T_0/T_k > 1$  het freatisch vlak in de tijd verloopt volgens vergelijking (11).

Wegens de faseverschuiving is het maximale waterstandsverschil niet gelijk aan het verschil in de amplitudes van beide oscillaties. Uit vergelijkingen (10) en (11) volgt :

$$h_1 - h_0 = \frac{A_0}{\sqrt{1 + \left(\frac{T_0}{T_k}\right)^2}} \sin 2\pi \frac{(t - \tau_1)}{T_0}$$

Voor het maximale waterstandsverschil wordt dus gevonden:

$$\frac{(h_1 - h_0)_{\max}}{A_0} = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{T_0}{T_k}\right)^2}} \quad (13)$$

Let wel dat onder het wortelteken van vergelijking (13) iets anders staat dan onder het wortelteken van vergelijking (12)! In Figuur 10 is het bovenstaande verband tussen  $(h_0 - h_1)_{\max}/A_0$  en  $T_0/T_k$  grafisch weergegeven.

Bij gegeven  $A_0$  en  $T_0/T_k$  volgt uit Figuur 10 of formule (13) de maximale waarde van  $(h_0 - h_1)/A_0$ . Dan is de maximale waarde van  $(h_0 - h_1)$  dus bekend en kan de maximale  $z_1$  bepaald worden met formule (2) (Figuur 1). Met behulp van formule 1 (Figuur 2) is dan de maximale waarde van het stijghoogteverschil  $\varphi_w$  te bepalen.

Voor de situatie waarbij alleen naar de invloed van langperio-dieke golven gekeken wordt stellen we  $\varphi_b = 0$  en  $\xi_0 = \infty$ . Als ook formule (13) in formule (1) gesubstitueerd wordt ontstaat:

$$\frac{\varphi_w}{A_0} = \frac{1}{2} \frac{A \sin \alpha}{A_0} \left[ 1 - e^{-\frac{1}{2} \frac{A \sin \alpha}{A_0} \sqrt{1 + \left(\frac{T_0}{T_k}\right)^2}} \right] \quad (14)$$

Vergelijking (14) is afgebeeld op de Figuren 11 en 12. Duide-lijk is te zien dat als  $A \sin \alpha / A_0 > 1$  à 2 de stijghoogte in het freatisch vlak in hoofdzaak bepaald wordt door de waarde van  $T_0/T_k$ .

-----  
-----  
-

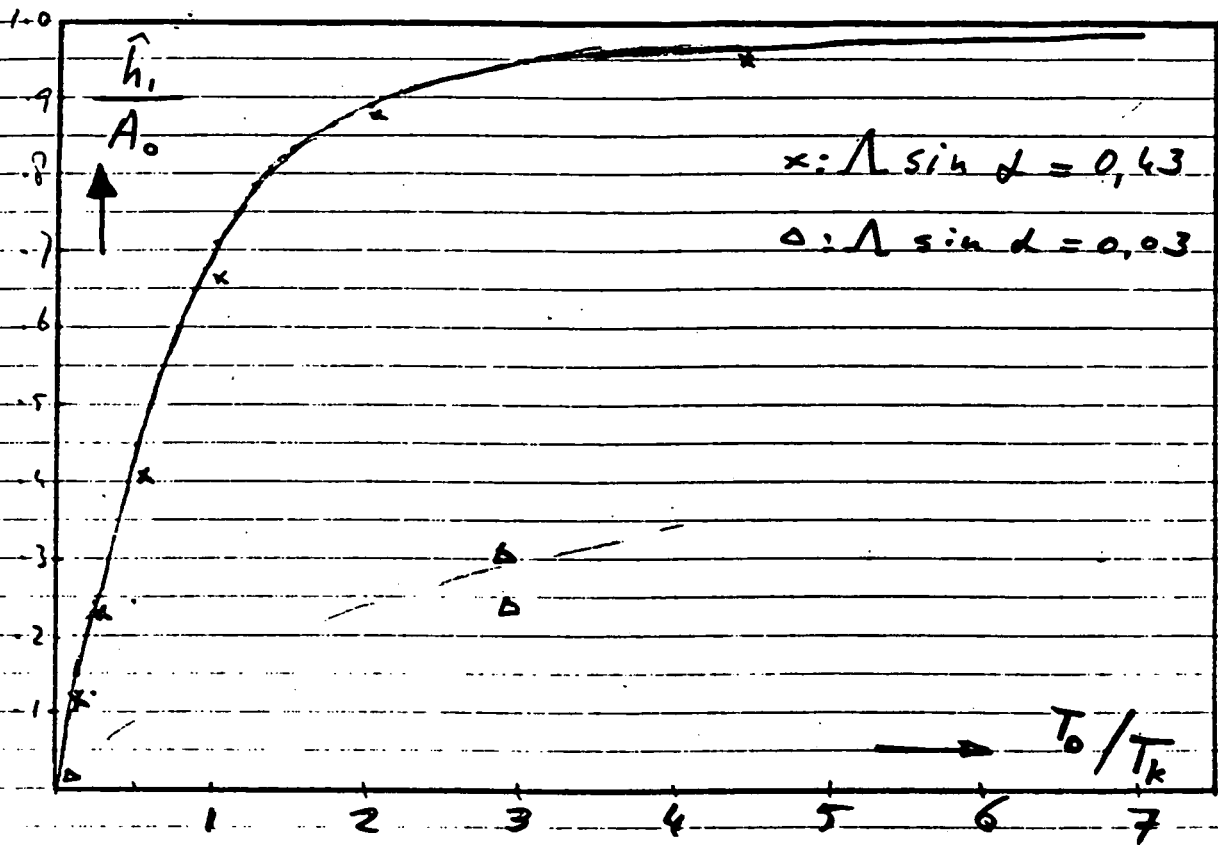


Figure 9: Amplitude freetische lgn in filter als functie van  $T_0/T_k$ .

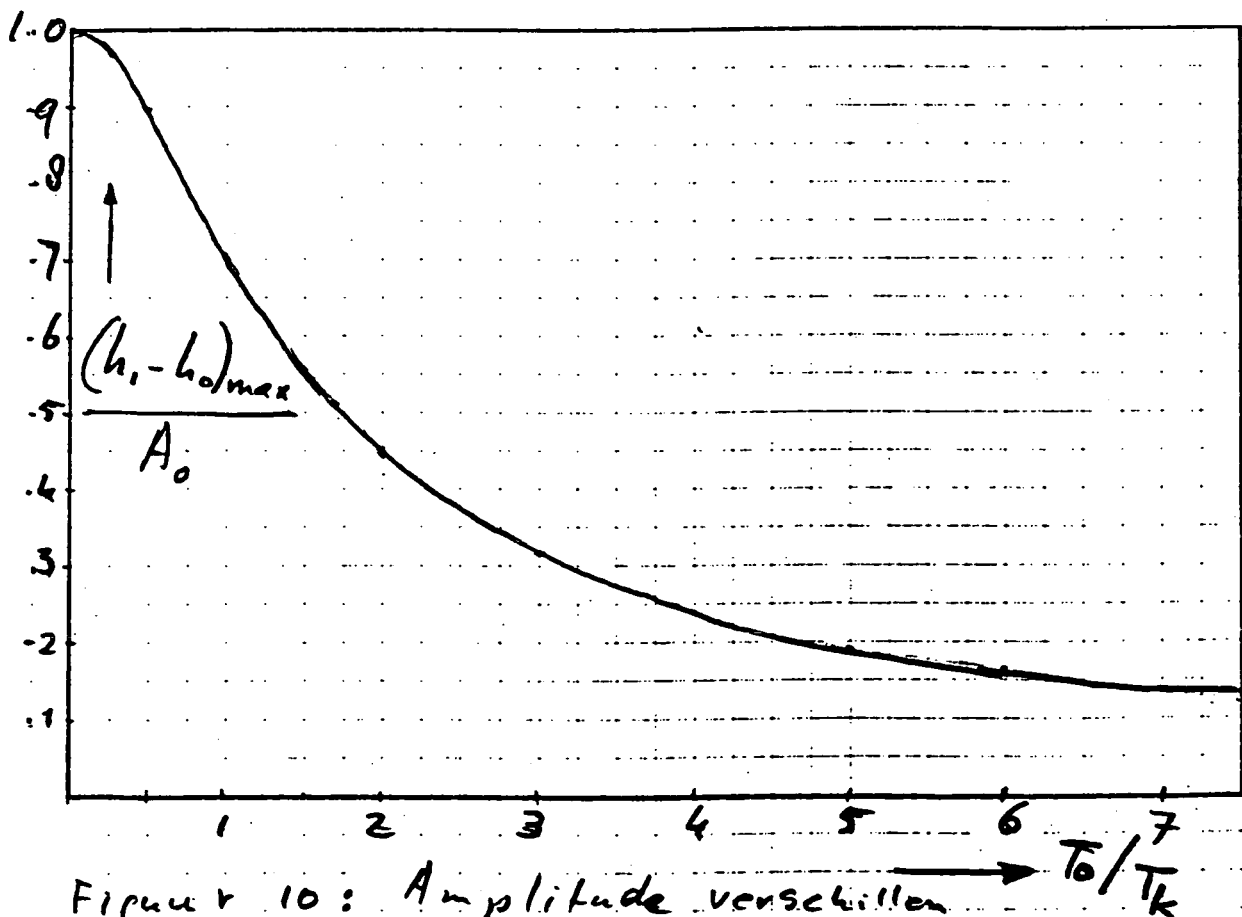
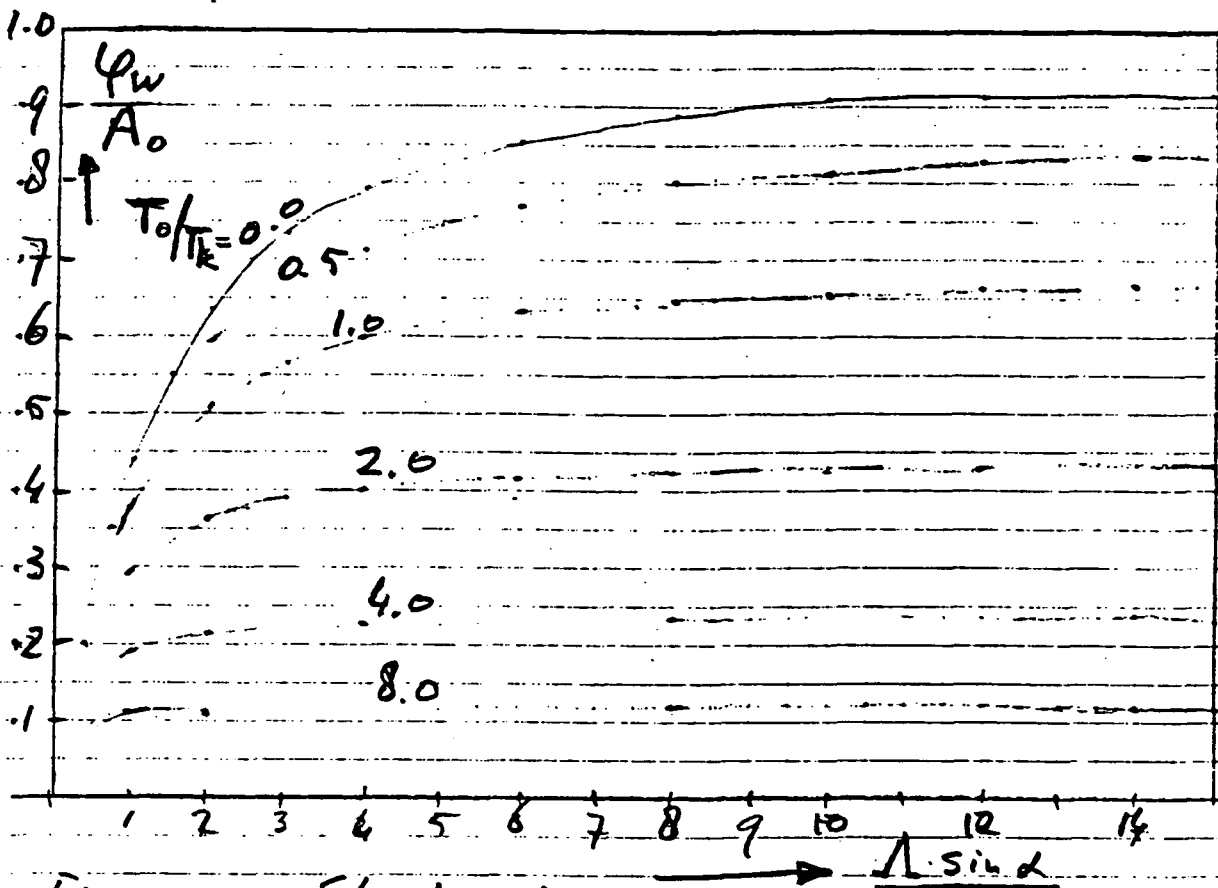
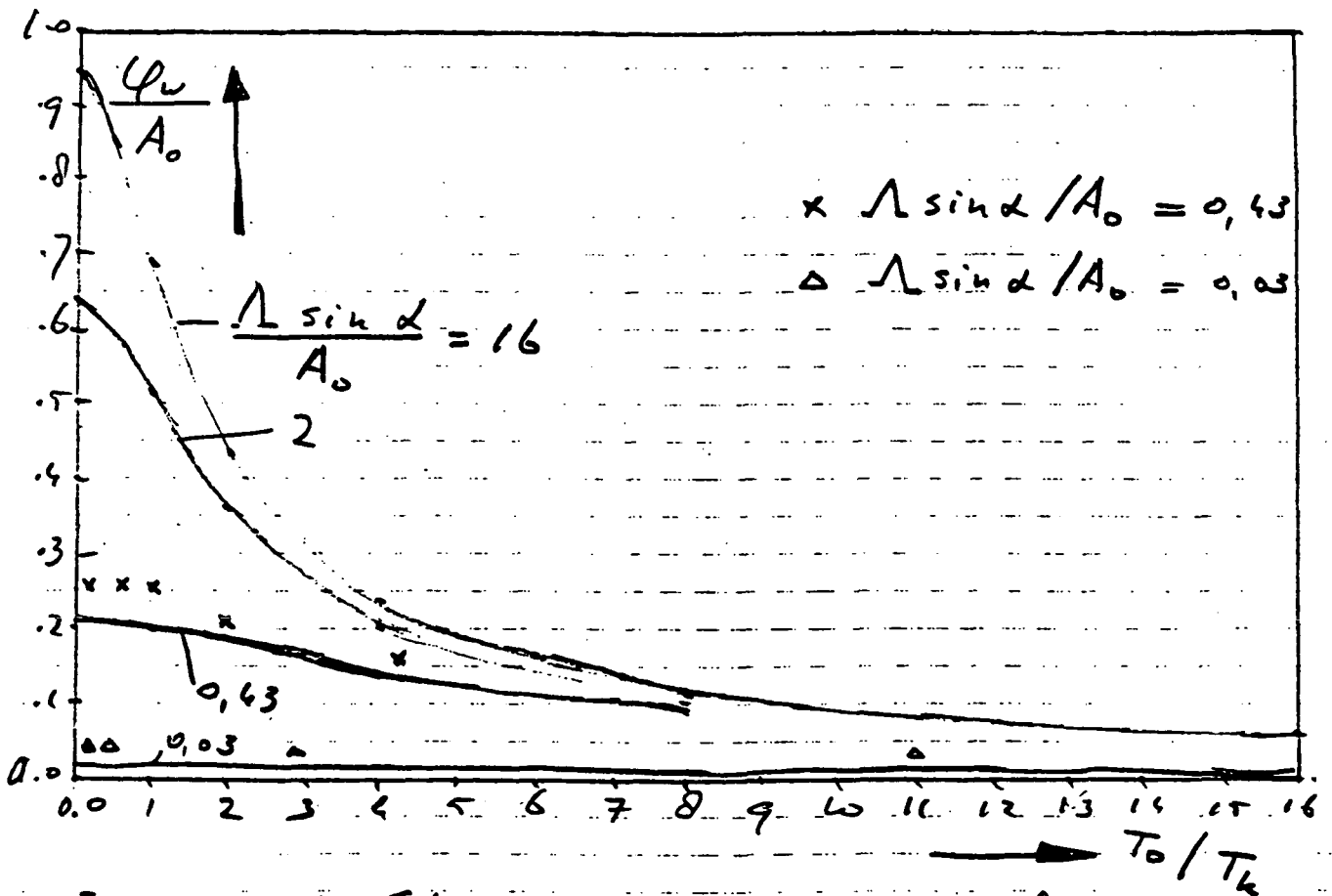


Figure 10: Amplitude verschillen in waterstanden als functie van  $T_0/T_k$



Figuur 11: Stijphoofteverschil  $\frac{\Lambda \sin \alpha}{A_0}$  als functie van lekhoofte en  $T_0 / T_k$



Figuur 12: Stijphoofteverschil als functie van lekhoofte en  $T_0 / T_k$

## V. VERIFICATIE MET ELNAG-METINGEN.

In het meermalen genoemde rapport "Oriënterende grondmechanische studies" uit 1982 is ook een verslag opgenomen, geschreven door ing. J.C. van der Burg en ing. G.J. Nagtegaal, betreffende de metingen van de golfdemping in een elektrisch netwerk-analogon ELNAG. Met dit netwerk was het mogelijk door toepassing van de juiste weerstanden, condensatoren, spanningen etc. een analoge rekenmachine of fysisch model te maken. Hiermee konden de stijghoogte van het water in het filter en de overdrukken over de top laag als gevolg van het aanbrengen van een in de tijd sinusvormig variërende "hydrostatische" belasting worden gemeten. Er zijn proeven uitgevoerd waarmee een vertikaal talud werd nagebootst, en proeven met een talud 1:4.

### Vertikaal talud (tabel I).

Deze proeven zijn aangegeven met de letters GOOT, gevolgd door 2 cijfers. Veel proeven betroffen de invloed van de tijd die nodig was om een praktisch stationair freatisch vlak te bereiken, alsmede reproductieproeven, terwijl er ook een hele serie is gewijd aan het onderzoek naar de invloed van de lengte van het talud. Ons interesseren thans alleen die proeven waarbij de lek lengte en lektijd zijn gevarieerd en waarbij de invloed van de lengte van het talud verwaarloosbaar wordt geacht. Dat zijn de proeven GOOT 50, 55, 57, 60, 75, 76 en 91. De gegevens van deze proeven zijn vermeld in tabel I. Overigens zijn in deze proeven alleen de lek lengten bewust gevarieerd door variatie van de top laag doorlatendheid. De resultaten betreffende hoogte van het freatisch vlak en maximaal stijghoogteverschil zijn ook weergegeven in de Figuren 5, 7 en 8. In alle gevallen geldt dat  $T_0/T_x < 1$  zodat volgens de theorie formules (7) en (8) zouden moeten gelden. Bovendien blijkt dat in de meeste proeven  $A_{sin} / A_0 < 1$  zodat het maximale stijghoogteverschil gelijk is aan de halve lekhoogte.

### Talud 1:4, kleine lek lengte (tabel II).

De proeven met talud 1:4 zijn aangegeven met GTH, gevolgd door een nummer. In tabel II zijn die proeven opgenomen waarvan de lek lengte gevarieerd werd door variatie van de top laag doorlatendheid (net als in tabel I). Bij een aantal proeven is bovendien de golfhoogte  $A_0$  of de golfperiode  $T_0$  gevarieerd. In alle proeven was  $T_0/T_x \ll 1$ , zodat de formules (7) en (8) zouden moeten gelden. In de Figuren 5 en 7 zijn de resultaten weergegeven.

### Talud 1:4, grote filterdoorlatendheid (tabel III).

In tabel III zijn de gegevens van een serie proeven opgenomen waarin de doorlatendheid van het filter 0,2 m/s is gehouden, terwijl deze doorlatendheid in de andere proeven (tabellen I en II) 0,01 was. Vervolgens werd de top laag doorlatendheid gevarieerd. Bij deze proeven zijn de maximaal en minimaal waargenomen standen van het freatische vlak genoteerd. Omdat  $T_0/T_x < 1$  blijven de variaties beperkt. Het is niet bekend waarom bij deze proeven wel de variaties van het freatisch

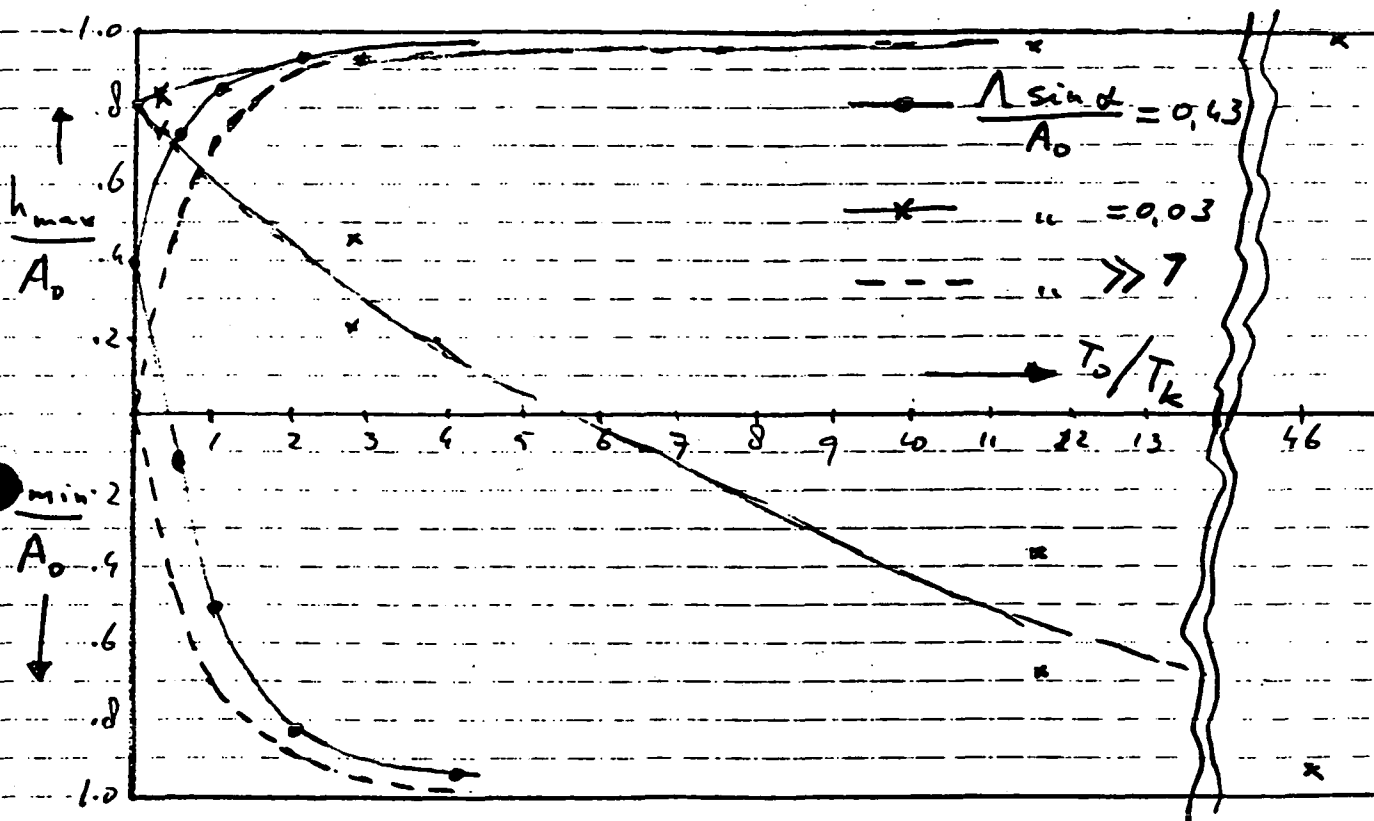
vlak zijn opgetreden, maar in de proeven vermeld in de tabellen I en II niet (of zijn ze niet gemeten?). Overigens volgen de maximale standen van de freatische lijn en de maximale stijghoogteverschillen het beeld van de Figuren 5 en 7 (de punten behorende bij deze tabel zijn niet in deze figuren opgenomen).

Talud 1:4, grote waarden van  $T_0/T_k$  (tabel IV).

In tabel IV tenslotte zijn proeven opgenomen waarbij de doorlatendheden van toplaag en filter zijn gevarieerd, terwijl de lek lengte konstant bleef. Dit leidde tot twee series waarin  $T_0/T_k$  bij twee waarden van de lek lengte over een ruim bereik werd veranderd. In deze serie is heel duidelijk te zien dat bij kleine waarden van  $T_0/T_k$  het freatisch vlak konstant is en bij toenemende waarden inderdaad meebeweegt met de buitenwaterstand.

In Figuur 9 zijn de amplitudes van de freatische lijn uitgezet. Het blijkt dat bij grote lek lengte de theoretische lijn volgens vergelijking (12) heel goed gevolgd wordt. Bij kleine lek lengte is dat niet het geval.

In Figuur 12 zijn de gemeten maximale stijghoogten vergeleken met de theoretische waarden volgens vergelijking (14). Het blijkt dat voor  $A \sin \alpha / A_0 = 0,43$  de theoretische lijn heel aardig benaderd wordt.



Figuur 13: Maximale en minimale standen freatisch vlak als functie van lek lengte en  $T_0/T_k$  volgens metingen en volgens theorie langperiodieke golven.



In Figuur 13 tenslotte zijn de verlopen van de maximale en minimale standen van de freatische lijn weergegeven als functie van  $T_o/T_k$ , zowel volgens de theorie voor grote lek lengten als volgens de metingen met middelgrote en kleine lek lengten. Uit de Figuren 9, 12 en 13 blijkt dat de theorie voor langperiodieke golven, gepresenteerd in deze notitie, opgaat voor waarden van  $A \sin \alpha / A_o > 1$ .

Als we geïnteresseerd zijn in het nauwkeurige verloop van het freatisch vlak voor kleiner (ongevaarlijker) lek lengten dan zal vergelijking (6) numeriek moeten worden opgelost.

-----  
 -----  
 -

## VI. VOORBEELDBEREKENINGEN.

In dit hoofdstuk zullen we voor een zetting met een grote lek lengte en een grote lektijd de stijghoogteverschillen berekenen bij een windgolf alleen, bij langperiodieke golven alleen en bij combinaties van langperiodieke golven en windgolven. We beschouwen een zetting met:

helling 1:4,  $d_r = 0,25$ ,  $d_r = 0,50$ ,  $k_r = 10^{-5}$  m/s en  $k_r = 10^{-3}$  m/s.

De lek lengte is dan 3,54 m en de lekhoogte 0,88 m. De lektijd wordt berekend op 35400 s.

Voor de berekening van de stijghoogteverschillen bij windgolven alleen of in combinatie met langperiodieke golven stellen we :

$H/L_o = 0,06$  zodat  $\xi_o = 1,0$ .

Bij een golfhoogte  $H = 1$  m vinden we voor  $\varphi_o$  en  $d_a$  :

$$\varphi_o = 0,36(0,25/0,06)^{1/2} = 0,72 \text{ m}$$

$$d_a = 0,11(0,25/0,06)^{0,8} = 0,33 \text{ m}$$

Uit vergelijking (13) en Figuur 10 volgt dat tot  $T_o/T_k = 0,25$

$$(h_1 - h_o) = A_o \tag{A}$$

Dit geldt dus tot  $T_o = 8850 \text{ s} = 150 \text{ min.} = 2,5 \text{ uur.}$

Voor een getij van 12,5 uur geldt  $T_o/T_k = 1,27$  dus volgens vergelijking (13):

$$(h_1 - h_o) = 0,62 * A_o \tag{B}$$

Voor de berekening van de stijghoogteverschillen maken we

gebruik van formules (1) en (2).

Bij windgolven alleen of in combinatie met langperiodieke golven volgt uit formule (1) met de boven berekende waarden:

$$\varphi_w = 0,77*(1 - e^{-z_1/0,44}) \quad (C)$$

Voor alleen langperiodieke golven stellen we  $\xi_0 = \infty$  en  $\varphi_b = 0$ , waarna uit formule (1) en de berekende waarden volgt:

$$\varphi_w = 0,44*(1 - e^{-z_1/0,44}) \quad (D)$$

Bij windgolven met  $H = 1$  m wordt door de tot nu toe gehuldigde theorie gesteld:

$$z_1 = \varphi_b = 0,72 \text{ m}$$

$$\text{Uit vergelijking (C) volgt dan: } \varphi_w = 0,62 \text{ m}$$

Volgens de hier gepresenteerde theorie is bij de grote lek- lengte voor alleen windgolven:

$$z_1 = d_s = 0,33 \text{ m}$$

$$\text{Uit vergelijking (C) volgt dan: } \varphi_w = 0,41 \text{ m}$$

dus aanzienlijk minder dan de vorige!

Voor deiningen en seiches (zonder windgolven) tot een periode van 2,5 uur wordt eveneens een golfhoogte van 1 m aangenomen, dus  $A_0 = 0,5$  m. Voor de afstand  $z_1$  en stijghoogteverschil  $\varphi_b$  vinden we volgens de formules (2), (A) en (D):

$$z_1 = (h_1 - h_0) + d_s = 0,50 + 0,0 = 0,50 \text{ m}$$

$$\varphi_w = 0,30 \text{ m}$$

dus van dezelfde grootte-orde als de windgolven alleen!

Voor de combinatie van deining (of seiches) met een golfhoogte van 1 m en windgolven met een golfhoogte van 1 m vinden we met de formules (2), (A) en (C):

$$z_1 = (h_1 - h_0) + d_s = 0,50 + 0,33 = 0,83 \text{ m}$$

$$\varphi_w = 0,65 \text{ m}$$

dus aanzienlijk groter dan windgolven alleen of deining (seiches) alleen en toevallig bijna even groot als de berekening met oude theorie voor de windgolf alleen.

Kijken we nu ook naar een getij met een amplitude van 2,0 m (getijverschil van 4,0 m). Uit vergelijking (B) volgt dan  $h_1 - h_0 = 1,24$  m. Voor het getij alleen volgt  $z_1 = 1,24$  m en met formule (D)

$$\varphi_w = 0,41 \text{ m}$$

dus het getij geeft dezelfde overdrukken als de windgolf!

Voor de combinatie van getij en windgolf volgt met vergelijkingen (2), (B) en (C):

$$z_1 = 1,24 + 0,33 = 1,57 \text{ m}$$

$$\varphi_w = 0,75 \text{ m}$$

dus zeer grote stijghoogteverschillen.

Voor de combinatie getij ( $A_0 = 2$  m), deining ( $A_0 = 0,5$  m) en windgolf ( $H = 1$  m) wordt gevonden:

$$z_1 = (h_1 - h_0) + d_s = 1,24 + 0,50 + 0,33 = 2,07 \text{ m}$$

$$\varphi_w = 0,77 \text{ m}$$

Dit is het maximaal mogelijke stijghoogteverschil bij deze windgolf en deze lek lengte. Groter getijden of deining geven hetzelfde stijghoogteverschil.

## VII. CONCLUSIES.

\* Bij gebruik van de formule van Wolsink-Banach voor de berekening van stijghoogteverschillen wordt gemakshalve gesteld dat  $z_1 = \varphi_b$  met als motivering dat het resultaat niet zo gevoelig is voor de waarde van  $z_1$  en bovendien is dit een veilige aanname. Reeds in notitie N 446bis is aangetoond dat bij grote lek lengten het resultaat wel degelijk gevoelig is voor de waarde van  $z_1$ . Formule (1) van deze notitie geeft ongeveer dezelfde resultaten als de formule van Wolsink-Banach en daar geldt dus hetzelfde voor. Juist bij grote lek lengten kunnen door het stellen van  $z_1 = \varphi_b$  zeer onnauwkeurige resultaten worden verkregen. Zolang we te maken hebben met enkel windgolven en geen andere waterstandsveranderingen is het resultaat veilig maar duur! In hoofdstuk III van deze notitie is het aannemelijk gemaakt dat bij grote lek lengten een betere benadering is het freatisch vlak gelijk te veronderstellen aan de gemiddelde waterstand, zodat  $z_1 = d_1$ .

\* Indien er ook langperiodieke golven optreden kan het maximale stijghoogteverschil eveneens berekend worden met formule (1). De waarde van  $z_1$  moet dan berekend worden met formule (2). Hierin komt het verschil in waterstand ( $h_1 - h_0$ ) voor. Bij een gegeven verloop in de tijd van de buitenwaterstand kan het verloop van de freatische lijn in het filter en dus de maximale waarde van ( $h_1 - h_0$ ) berekend worden met de differentiaalvergelijking (6). Het verdient aanbeveling om hiervoor een programma te laten schrijven.

\* Voor grote lek lengte is de maximale waarde van ( $h_1 - h_0$ ) te berekenen met formule (13).

\* Met de formules (2) en (1) is dan het maximale stijghoogteverschil te berekenen. In het rekenvoorbeeld (vorige hoofdstuk) is aangetoond dat het resultaat groter en dus onveiliger kan zijn dan de berekening bij enkel windgolven met  $z_1 = \varphi_b$ . In het algemeen geldt voor langperiodieke golven dat hoe ondoorlatender de top- en filterlagen worden des te groter worden de stijghoogteverschillen, zelfs bij gelijkblijvende lek lengte!

\* Als  $\Lambda \sin \alpha / A_0 \ll 1$  en  $T_0 / T_k \ll 1$  kan de stand van het freatische vlak voor hydrostatische golven berekend worden met de methode aangegeven door Sellmeijer en in essentie weergegeven in hoofdstuk III. Het freatische vlak is dan hoger dan de konstant veronderstelde buitenwaterstand, maar dit heeft maar weinig invloed op de waarde van het stijghoogteverschil. Het verdient aanbeveling te onderzoeken of niet-hydrostatische windgolven hetzelfde effect hebben.

\* Eén en ander is bevestigd met ELNAG-proeven. Uit deze proeven is ook gebleken dat er invloeden zijn van overgangsconstructies en dat er soms zeer veel perioden nodig zijn om de berekende periodieke schommelingen van het freatisch vlak te bereiken. Hierover is in deze notitie nog niets gezegd, maar dient niet uit het oog te worden verloren.

\* Tenslotte blijkt dat bij zeer kleine lek lengten de metingen afwijken van de theorie. Dit kan zijn veroorzaakt door de discretisering van het ELNAG-model (verklaring gegeven door Bezuijen) of doordat bij zeer kleine lek lengten de basisvergelijking niet meer geldt (zie N 427). Vanwege de kleine stijghoogteverschillen lijkt het niet interessant dit verder te onderzoeken.

-----  
-----  
-

$$A_0 = 1 \text{ m} \quad T_0 = 5 \text{ s} \quad k_p = 0,01 \quad n = 0,4$$

$$T_k = \frac{2\pi n A}{k_p \sin \alpha} = 251 \text{ A}$$

GOOT	$\Delta$ (m)	$T_k$ (s)	$T_0/T_k$	$h_{\text{rogem}}$ (m)	$\varphi_w$ (m)
50	0,56	140	0,03	0,35	0,29
55	0,05	12,5	0,40	0,85	0,045
57	0,20	50	0,10	0,67	0,11
60	1,78	400	0,0125	0,14	0,63
75	0,03	7,5	0,66	0,88	0,02
76	3,16	800	0,006	0,05	0,78
91	0,10	25	0,20	0,79	0,07

TABEL I: Gegevens van ELMAG-proeven met vertikaal falend (sind = 1)

$A_0 = 1 \text{ m}$  (bech GTH 09 en 10),  $T_0 = 5 \text{ s}$  (bech GTH 11 t/m 14)

$k_p = 0,01 \text{ m/s}$

$T_0/T_k = \frac{k_p \sin \alpha \cdot T_0}{2\pi \cdot h}$

$h = 0,4$

GTH	$\Lambda \sin \alpha / A_0$	$T_0/T_k$	$h_{gem} / A_0$	$\varphi_w / A_0$	Bijz. h.
00	0,86	$1,2 \cdot 10^{-3}$	0,24	0,45	
01	0,64	$2,0 \cdot 10^{-3}$	0,33	0,35	
02	0,31	$4 \cdot 10^{-3}$	0,49	0,19	
03	0,15	$8 \cdot 10^{-3}$	0,62	0,11	
57	0,11	$11 \cdot 10^{-3}$	0,68	0,06	
05	0,05	$23 \cdot 10^{-3}$	0,80	0,04	
08	0,012	0,10	0,90	0,02	
09	0,22	$11 \cdot 10^{-3}$	0,56	0,12	$A_0 = 0,5 \text{ m}$
10	1,22	$2 \cdot 10^{-3}$	0,20	0,50	$A_0 = 0,5 \text{ m}$
11	0,61	$2,7 \cdot 10^{-4}$	0,28	0,35	$T_0 = 2,5 \text{ s}$
12	0,61	$4 \cdot 10^{-3}$	0,32	0,35	$T_0 = 40 \text{ s}$
13	0,61	$8 \cdot 10^{-3}$	0,32	0,35	$T_0 = 20 \text{ s}$
14	0,61	$5 \cdot 10^{-4}$	0,20 ?	0,35	$T_0 = 1,25 \text{ s}$
40	0,86	$1,2 \cdot 10^{-3}$	0,25	0,48	
41	0,61	$2 \cdot 10^{-3}$	0,33	0,37	
42	0,31	$4 \cdot 10^{-3}$	0,48	0,20	
43	0,15	$8 \cdot 10^{-3}$	0,62	0,12	
44	0,11	$1,1 \cdot 10^{-2}$	0,69	0,07	
47	0,03	$4,5 \cdot 10^{-2}$	0,82	0,04	
54	1,21	$1 \cdot 10^{-3}$	0,18	0,58	

TABEL II: Gegevens van ELNAG - proeven met talud 1:4 en kleine waarde  $T_0/T_k$

$$A_0 = 1 \text{ m}, \quad T_0 = 5 \text{ s}, \quad n = 0,4$$

$$T_0 / T_k = \frac{k_p \sin \alpha}{2\pi n \Lambda} \cdot T_0 = 0,10 \cdot k_p \cdot \frac{T_0}{\Lambda} = \frac{0,5}{\Lambda} k_p$$

GTH	$k_p$	$\Lambda \sin \alpha / A_0$	$T_0 / T_k$	$H_{\max}$	$H_{\min}$	$Q_v$
20	0,2	0,04	0,07	0,86	0,67	0,04
21	0,2	0,05	0,045	0,85	0,69	0,04
22	0,2	0,11	0,022	0,77	0,63	0,07
23	0,2	0,22	0,011	0,63	0,51	0,13
24	0,2	0,43	0,006	0,47	0,36	0,26
25	0,2	0,87	0,003	0,30	0,23	0,45
26	0,2	0,02	0,125	0,84	0,67	0,04
27	0,2	0,01	0,25	0,97	0,80	0,02

TABEL III : Gevoens van ELNAG-proeven met talud 1:4, iets groter waarden van  $T_0 / T_k$  dan proeven tabel II.

$$A_0 = 1 \mu \quad T_0 = 55 \quad h = 0,4$$

$$T_0 / T_k = 0,5 k_p / \Lambda$$

GTH	$k_p$	$\Lambda < 2 A_0$	$T_0 / T_k$	$H_{max}$	$H_{min}$	$\psi_u$
28	1,96	0,53	0,25	0,73	-0,11	0,26
29	3,72	"	4,09	0,85	-0,49	0,26
30	7,84	"	2,19	0,93	-0,82	0,21
31	4,68	"	4,38	0,97	-0,94	0,16
32	0,98	"	0,27	0,61	+0,15	0,26
33	0,49	"	0,137	0,53	+0,29	0,26
34	0,12	"	0,033	0,45	+0,37	0,26
35	0,0,5	"	$4 \cdot 10^{-3}$	0,40	+0,40	0,26
44	0,02	0,03	0,09	0,82	+0,81	0,04
50	0,04	"	0,18	0,82	+0,80	"
51	0,64	"	2,91	0,92	+0,46	"
52	2,56	"	11,64	0,96	-0,38	"
53	10,24	"	46,55	0,98	-0,93	"
62	0,02	0,03	0,09	0,80	+0,79	0,04
63	0,04	"	0,18	0,81	+0,76	"
64	0,64	"	2,91	0,86	+0,24	"
65	2,56	"	11,64	0,93	-0,78	"
66	10,24	"	46,55	0,97	-0,98	"

TABEL IV: Gegevens ELMAG-proeven met tabel 1:4 en grote waarden van  $T_0 / T_k$





Aan

Leden TAW-A2 (Steenzettingen).

Contactpersoon

ir. B.P. Rigter.

Doorkiesnummer

Datum

juni 1992

Bijlage(n)

Ons kenmerk

Uw kenmerk

Onderwerp

Invloed overgangsconstructie op lektijd.

### I. INLEIDING.

In nota N 526 werd aangetoond dat het freatisch vlak in het filter van een steenzetting zich niet onmiddellijk aanpast aan de langperiodieke golven (deining, seiches, getijden) van het buitenwater en dat dus niet gerekend kan worden alsof het freatisch vlak op hetzelfde niveau is als het geval zou zijn bij een permanente hoogte van de buitenwaterstand. Het freatisch vlak reageert op periodieke veranderingen van de buitenwaterstand en wel zodanig dat de amplitude minder is dan die van de buitenwaterstand, terwijl er ook een faseverschuiving optreedt. Eén en ander wordt bepaald door de verhouding van lektijd en golfperiode. In genoemde nota is de formule voor de lektijd afgeleid voor oneindig lange taluds met grotere leklengte :

$$(1) \quad T_k = \frac{2\pi n\Lambda}{k_f \cdot \sin\alpha}$$

Uit metingen van waterdrukken in het filter van de steenzetting bij Colijnsplaat werd een grote leklengte afgeleid. Daarbij zou volgens bovenstaande formule een lange lektijd van ca. 70 uur horen. Hierbij behoort een faseverschuiving van ongeveer 3 uur. Er is echter slechts een faseverschuiving van ca. 1 uur gemeten, wat overeenkomt met een lektijd van ca. 10 uur. Ook de amplitude van de freatische lijn komt meer overeen

met een lektijd van ca. 10 uur dan met een lektijd van 70 uur. In notitie N beredeneert Stoutjesdijk al dat een doorlatende teenconstructie de lektijd zal verminderen.

In N 602 wordt het begrip weerstandstijd geïntroduceerd voor steenzettingen met een waterdichte toplaag en een teenconstructie met beperkte doorlatendheid:

$$(2) \quad T_v = \frac{(2\pi n)}{\sin \alpha} \left[ \frac{h_0}{k_f \sin \alpha} + \frac{d_f d_T}{s k_s} \right] = \frac{2\pi n}{k_f \sin \alpha} \left[ L_0 + \frac{\Lambda_c^2}{B} \right]$$

waarin:

$\Lambda_c$ : de equivalente lek lengte die overeenkomt met dezelfde spleetbreedte als bij de teenconstructie.

Voor een volledig open teenconstructie is de equivalente lek lengte  $\Lambda_c = 0$  en is de weerstandstijd volgens bovenstaande formule alleen evenredig met de lengte van de ondoorlatende steenzetting tussen teenconstructie en waterlijn. Als deze lengte klein wordt, wordt de weerstandstijd of lektijd dus ook klein.

In deze nota wordt de algemene formule voor de lektijd afgeleid voor een doorlatende steenzetting met een overgangconstructie.

$$(3) \quad T_{k,t} = \frac{2\pi n \Lambda}{k_f \sin \alpha} \cdot \frac{\left[ \frac{X + \Lambda}{X - \Lambda} \right] e^{2\frac{L}{\Lambda}} + 1}{\left[ \frac{X + \Lambda}{X - \Lambda} \right] e^{2\frac{L}{\Lambda}} - 1} = T_k \cdot \frac{e^{2\frac{L}{\Lambda}} + \left( \frac{X - \Lambda}{X + \Lambda} \right)}{e^{2\frac{L}{\Lambda}} - \left( \frac{X - \Lambda}{X + \Lambda} \right)}$$

Aangetoond wordt dat deze formule overgaat in de formule (1) voor  $L \rightarrow \infty$  en in de formule (2) voor  $\Lambda \rightarrow \infty$ .

Daardoor is de algemene vergelijking die de respons van het freatisch vlak in het filter op een verandering van de buitenwaterstand beschrijft te schrijven als:

$$(4) \quad \frac{dh_f}{dt} = - \frac{2\pi}{T_{k,t}} \cdot (h_f - h_b)$$

In N 526 wordt verwezen naar een aantal appendices, die echter nog niet gereed waren en dat nu nog niet zijn. Eén zo'n appendix betreft de afleiding van vergelijking (5) van die nota:

$$\frac{d\varphi_f}{dx} = \sin\alpha \cdot \left[ 1 - e^{-\frac{(h_f - h_b)}{\Lambda \sin\alpha}} \right]$$

Overigens wordt in die nota gesteld dat deze formule geldt voor situaties waarin het freatisch vlak zowel hoger als lager staat dan het buitenwater. Dit is niet juist. Maar als

$$|(h_f - h_b) / \Lambda \sin\alpha| \ll 1$$

(dus voor grotere lek lengten) volgt :

$$\frac{d\varphi_f}{dx} = \frac{h_f - h_b}{\Lambda}$$

Substitutie in de vergelijking die de verplaatsing van het freatisch vlak beschrijft levert:

$$(4a) \quad \frac{dh_f}{dt} = - \frac{2\pi}{T_k} \cdot (h_f - h_b)$$

Dit is vergelijking (11) van nota N 526 en deze vergelijking geldt voor situaties waarin het freatisch vlak zowel hoger als lager staat. In deze nota wordt dit bewezen, zodat voorliggende nota als die betreffende appendix beschouwd kan worden.

In hoofdstuk II worden basisvergelijkingen afgeleid, welke leiden tot de bepaling van de lektijden voor verschillende doorlatendheden van overgangsconstructies. In dat hoofdstuk wordt de situatie beschouwd waarin het freatisch vlak hoger is dan de buitenwaterstand.

In hoofdstuk III worden de formules voor deze lektijden zelf afgeleid.

In hoofdstuk IV wordt de situatie beschouwd waarin het freatisch vlak lager is dan de buitenwaterstand.

-----  
-----  
-

II. AFLEIDING BASISVERGELIJKINGEN INDIEN FREATISCH VLAK IN FILTER HOGER DAN BUITENWATERSTAND.

In Figuur 1 is een steenzetting met teenconstructie getekend op zeker tijdstip, waarop het freatisch vlak hoger staat dan het buitenwater. De afstand tussen waterlijn en teenconstructie wordt aangegeven met L.

De randvoorwaarde voor het freatisch vlak luidt:

$$\frac{dh_f}{dt} = \frac{v_f \cdot \sin \alpha}{n}$$

waarin  $v_f$  het specifiek debiet is van het filter ter plaatse van het freatisch vlak en  $n$  het poriëngehalte.

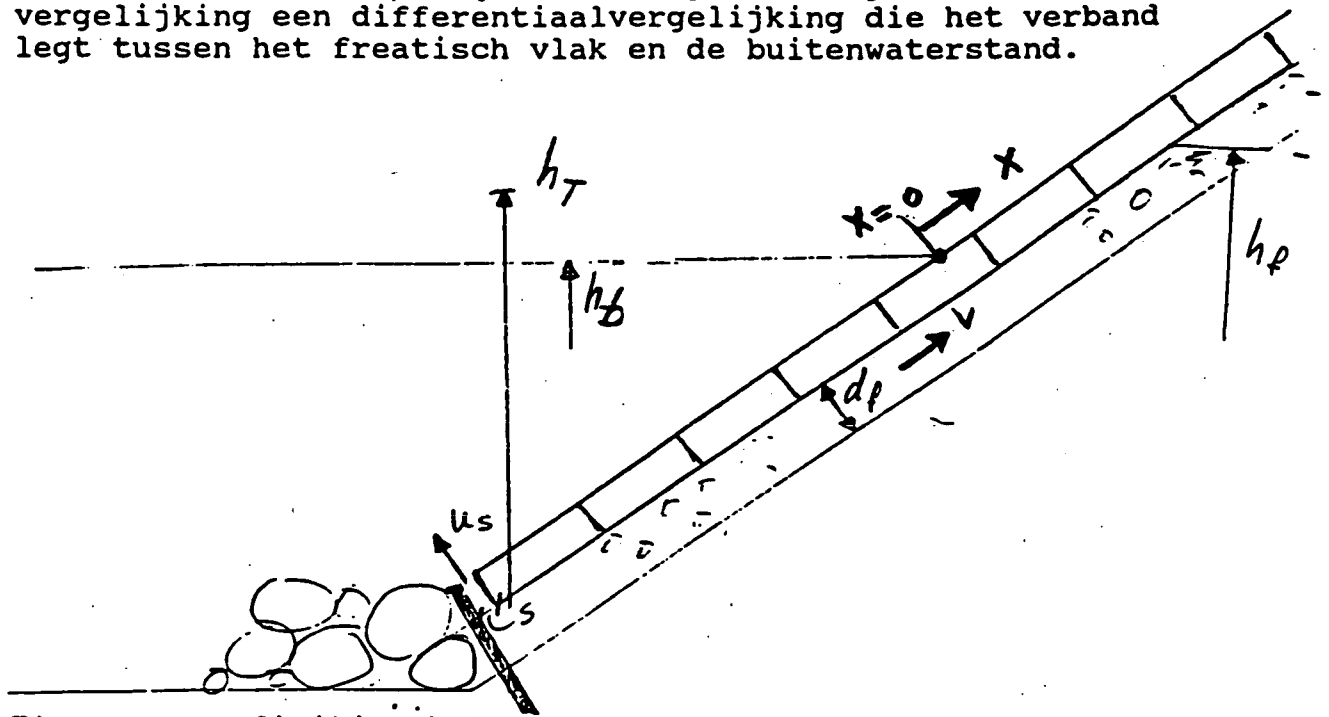
Voor  $v_f$  geldt:

$$v_f = -k_f \frac{d\phi_f}{dx}$$

zodat voor de randvoorwaarde-vergelijking voor het freatisch vlak geschreven kan worden:

$$(5) \quad \frac{dh_f}{dt} = - \frac{k_f \cdot \sin \alpha}{n} \cdot \frac{d\phi_f}{dx}$$

Het gaat er dus om de gradiënt van de stijghoogte van het water in het filter ter plaatse het freatisch vlak te bepalen als functie van het verschil tussen hoogte freatisch vlak en buitenwaterstand ( $h_f - h_b$ ). In dat geval volgt uit de laatste vergelijking een differentiaalvergelijking die het verband legt tussen het freatisch vlak en de buitenwaterstand.



Figuur 1: Definitieschets.

Voor de stijghoogte  $\phi_f$  in het filter geldt op elk moment de filtervergelijking:

$$(6) \quad \frac{\delta^2 \phi_f}{\delta x^2} = \frac{\phi_f - \phi_T}{\Lambda^2}$$

De x-as ligt evenwijdig met het talud, het nulpunt wordt op het snijpunt van het talud met de waterlijn aangenomen. De positieve richting van x wijst omhoog. Dan geldt:

voor  $x < 0$   $\phi_T = 0$  en voor  $x > 0$   $\phi_T = \sin \alpha$

De algemene oplossing voor  $x < 0$  luidt dan:

$$(7) \quad \phi_{f1} = A \cdot e^{+\frac{x}{\Lambda}} + B \cdot e^{-\frac{x}{\Lambda}}$$

en voor  $x > 0$  :

$$(8) \quad \phi_{f2} = x \cdot \sin \alpha + C \cdot e^{+\frac{x}{\Lambda}} + D \cdot e^{-\frac{x}{\Lambda}}$$

Uit vergelijking (8) volgt voor de gradiënt ter plaatse van het freatisch vlak ( $x = (h_f - h_b) / \sin \alpha$ ):

$$(9) \quad \frac{d\phi_{f2}}{dx} = \sin \alpha + \frac{C}{\Lambda} \cdot e^{+\frac{(h_f - h_b)}{\Lambda \sin \alpha}} - \frac{D}{\Lambda} \cdot e^{-\frac{(h_f - h_b)}{\Lambda \sin \alpha}}$$

Ter plaatse van het freatisch vlak geldt ook:

$$\phi_{f2} = (h_f - h_b)$$

waardoor uit vergelijking (8) volgt:

$$(10) \quad C = -D \cdot e^{-2 \frac{(h_f - h_b)}{\Lambda \sin \alpha}}$$

Substitutie van (10) in (9) levert:

$$(11) \quad \frac{d\phi_{f2}}{dx} = \sin \alpha - 2 \frac{D}{\Lambda} \cdot e^{-\frac{(h_f - h_b)}{\Lambda \sin \alpha}}$$

waardoor voor vergelijking (5) geschreven kan worden:

$$\frac{dh_f}{dt} = - \frac{k_f \cdot \sin \alpha}{n} \cdot \left( \sin \alpha - 2 \frac{D}{\Lambda} \cdot e^{-\frac{(h_f - h_b)}{\Lambda \sin \alpha}} \right)$$

Als de e-macht klein is, dus voor grotere lek lengten, wordt dit:

$$(12) \quad \frac{dh_f}{dt} = - \frac{k_f \cdot \sin \alpha}{n} \cdot \left[ \sin \alpha - 2 \frac{D}{\Lambda} \left( 1 - \frac{h_f - h_b}{\Lambda \sin \alpha} \right) \right]$$

Voorts gelden in  $x = 0$  de volgende twee randvoorwaarden:

$$\begin{array}{lcl} \text{voor } x = 0 & : & \phi_n = \phi_n \\ \text{en} & : & d\phi_n/dx = d\phi_n/dx \end{array}$$

Hiermee volgt uit de vergelijkingen (7) en (8):

$$(13) \quad A + B = C + D$$

$$(14) \quad A - B = \Lambda \cdot \sin \alpha + C - D$$

Uit de som van bovenstaande relaties volgt:

$A = + \frac{1}{2} \Lambda \cdot \sin \alpha + C$ , waarvoor na substitutie van (10) geschreven kan worden:

$$(15) \quad A = \frac{1}{2} \Lambda \sin \alpha + D \cdot e^{-2 \frac{(h_f - h_b)}{\Lambda \sin \alpha}}$$

Uit het verschil van vergelijkingen (13) en (14) volgt:

$$(16) \quad B = -\frac{1}{2} \Lambda \sin \alpha + D$$

Vergelijkingen (10), (15) en (16) definiëren de onbekenden C, A en B als functie van de onbekende D. Om de onbekenden te vinden is nog één randvoorwaarde nodig. Deze wordt geleverd door de al dan niet doorlatendheid van de teenconstructie.

We zullen nu vier gevallen bekijken:

- 1 oneindig lang talud
- 2 volledig dichte teenconstructie
- 3 volledig open teenconstructie
- 4 willekeurige teenconstructie

Voor elk van deze gevallen wordt een randvoorwaarde opgesteld, wat resulteert in een vierde vergelijking in A, B, C en D. Samen met de vergelijkingen (10), (15) en (16) zijn de onbekenden dan op te lossen. De hiermee gevonden uitdrukking voor D wordt dan gesubstitueerd in vergelijking (12) en daarmee is het mogelijk de betreffende formule voor de lektijd te bepalen.

### III. OPLOSSING INTEGRATIECONSTANTEN EN BEPALING LEKTIJDEN.

1 - Oneindig lang talud:

Met de randvoorwaarde:

$$\text{voor } x = -\infty : \phi_n = 0$$

volgt uit vergelijking (7) :

$$B = 0$$

Uit vergelijking (16) volgt dan:

$$D = \frac{1}{2}\Lambda \cdot \sin\alpha$$

Substitutie van deze oplossing in vergelijking (12) levert:

$$\frac{dh_f}{dt} = - \frac{k_f \cdot \sin\alpha}{n} \cdot \frac{(h_f - h_b)}{\Lambda} = - \frac{2\pi}{T_k} \cdot (h_f - h_b)$$

waarin  $T_k$  de lektijd volgens vergelijking (1) is.

Voor verdere behandeling van dit geval wordt naar nota N 526 verwezen.

2 - Volledig dichte teenconstructie .

Met de randvoorwaarde:

$$\text{voor } x = -L : v_{\text{teen}} = -k_f \cdot d\phi_n/dx = 0 \text{ of } d\phi_n/dx = 0$$

volgt uit vergelijking (7) :

$$A = B \cdot e^{+2\frac{L}{\Lambda}}$$

Substitutie van vergelijkingen (15) en (16) levert:

$$D = \frac{1}{2}\Lambda \cdot \sin\alpha \cdot \frac{e^{+2\frac{L}{\Lambda}} + 1}{e^{+2\frac{L}{\Lambda}} + e^{-2\frac{(h_f - h_b)}{\Lambda \sin\alpha}}}$$

Voor  $L \rightarrow \infty$  volgt  $D = \frac{1}{2}\Lambda \cdot \sin\alpha$ , wat klopt met het geval van een oneindig lang talud.

Substitutie van deze uitdrukking voor D in vergelijking (12) levert:

$$\frac{dh_f}{dt} = - \frac{k_f \cdot \sin^2 \alpha}{n} \cdot \frac{e^{+2\frac{L}{\Lambda}} - e^{-\frac{(h_f-h_b)}{\Lambda \sin \alpha}}}{e^{+2\frac{L}{\Lambda}} + e^{-2\frac{(h_f-h_b)}{\Lambda \sin \alpha}}} \cdot \left[ \frac{(h_f-h_b)}{\Lambda \sin \alpha} \right]$$

Om deze vergelijking te vereenvoudigen nemen we weer aan dat het waterstandsverschil  $(h_f - h_b)$  veel kleiner is dan  $\Lambda \cdot \sin \alpha$ . Dan is te schrijven voor de factor:

$$\frac{e^{+2\frac{L}{\Lambda}} - e^{-\frac{(h_f-h_b)}{\Lambda \sin \alpha}}}{e^{+2\frac{L}{\Lambda}} + e^{-2\frac{(h_f-h_b)}{\Lambda \sin \alpha}}} = \frac{e^{2\frac{L}{\Lambda}} - 1}{e^{2\frac{L}{\Lambda}} + 1}$$

en voor de gehele vergelijking:

$$\frac{dh_f}{dt} = - \frac{k_f \cdot \sin \alpha}{n \Lambda} \cdot \left( \frac{e^{2\frac{L}{\Lambda}} - 1}{e^{2\frac{L}{\Lambda}} + 1} \right) \cdot (h_f - h_b)$$

Definiëren we nu de lektijd voor een ondoorlatende teenconstructie door:

$$(17) \quad T_{k, \text{ond. t}} = \frac{2\pi n \Lambda}{k_f \sin \alpha} \cdot \frac{e^{2\frac{L}{\Lambda}} + 1}{e^{2\frac{L}{\Lambda}} - 1} = T_k \cdot \frac{e^{2\frac{L}{\Lambda}} + 1}{e^{2\frac{L}{\Lambda}} - 1}$$

waarin  $T_k$  de lektijd is voor een oneindig lang talud (vergelijking (1)), dan volgt:

$$\frac{dh_f}{dt} = - \frac{2\pi}{T_{k, \text{ond. t}}} (h_f - h_b)$$

De oplossing van deze vergelijking komt geheel overeen met de overeenkomstige vergelijking (11) van N526. In Figuur 2 is de verhouding van de lektijd bij een ondoorlatende teenconstructie met de lektijd van een oneindig lang talud uitgezet tegen  $L/\Lambda$ .

We zien dat



voor  $L \rightarrow \infty$ ,  $T_{k, \text{ond. t.}} \rightarrow T_k$   
 en voor  $L \rightarrow 0$ ,  $T_{k, \text{ond. t.}} \rightarrow \infty$

Een gesloten teenconstructie geeft dus een grotere lektijd dan een oneindig lang talud, hetgeen te verwachten is omdat de uitwisseling van water door de toplaag minder wordt naarmate de oppervlakte waarover uitgewisseld kan worden kleiner is.

### 3. Volledig open teenconstructie.

Nu geldt voor  $x = -L$ :  $\phi_n = \phi_b = 0$

Uit vergelijking (7) volgt dan:

$$A = -B \cdot e^{2\frac{L}{\lambda}}$$

Substitutie van vergelijkingen (15) en (16) levert:

$$D = \frac{1}{2} \Lambda \cdot \sin \alpha \cdot \frac{e^{+2\frac{L}{\lambda}} - 1}{e^{-2\frac{L}{\lambda}} - e^{-2\frac{(h_f - h_b)}{\Lambda \sin \alpha}}}$$

Op geheel met de vorige paragraaf overeenkomstige wijze wordt voor de differentiaalvergelijking voor  $h_f$  afgeleid:

$$\frac{dh_f}{dt} = - \frac{k_f \cdot \sin \alpha}{n\Lambda} \cdot \left( \frac{e^{2\frac{L}{\lambda}} + 1}{e^{2\frac{L}{\lambda}} - 1} \right) \cdot (h_f - h_b)$$

Definiëren we nu de lektijd voor een volledig doorlatende teen door:

$$(18) \quad T_{k, \text{voll. t.}} = \frac{2\pi n\Lambda}{k_f \sin \alpha} \cdot \frac{e^{2\frac{L}{\lambda}} - 1}{e^{2\frac{L}{\lambda}} + 1} = T_k \cdot \frac{e^{2\frac{L}{\lambda}} - 1}{e^{2\frac{L}{\lambda}} + 1}$$

waarin  $T_k$  de lektijd is voor een oneindig lang talud (vergelijking (1)), dan volgt:

$$\frac{dh_f}{dt} = - \frac{2\pi}{T_{k, \text{voll. t.}}} (h_f - h_b)$$

en ook deze vergelijking komt overeen met vergelijking (11) van N526. In Figuur 2 is de verhouding van de lektijd bij een volledig doorlatende teenconstructie met de lektijd van een oneindig lang talud uitgezet tegen  $L/\Lambda$ .

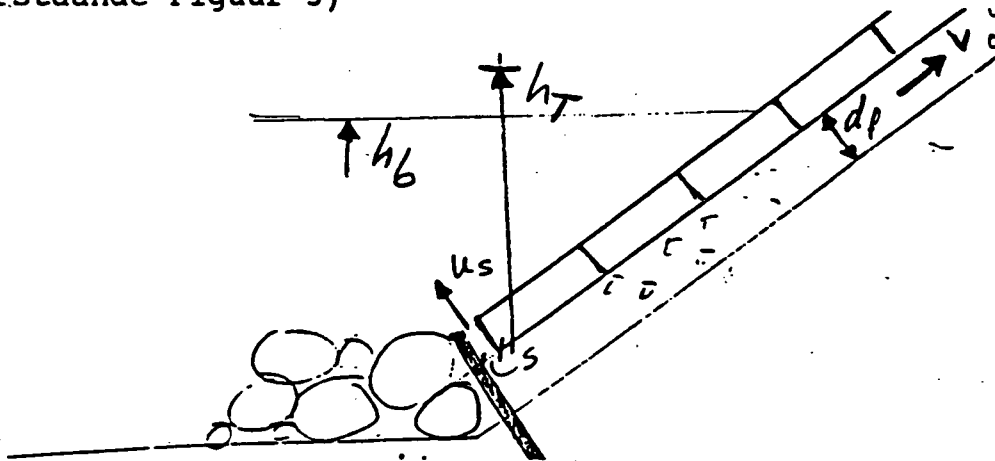
We zien dat

voor  $L \rightarrow \infty$ ,  $T_{k,voll.t} \rightarrow T_k$   
 en voor  $L \rightarrow 0$ ,  $T_{k,voll.t} \rightarrow 0$

Een volledig open teenconstructie geeft dus een kleinere lektijd dan een oneindig lang talud, hetgeen te verwachten is omdat de uitwisseling van filterwater met buitenwater toe zal nemen naarmate de afstand tussen teenconstructie en waterlijn kleiner is.

#### 4. Willekeurig doorlatende teenconstructie.

Om de randvoorwaarde voor dit geval wiskundig te formuleren beschouwen we dezelfde teenconstructie als in N 602 (zie onderstaande Figuur 3)



Figuur 3: Steenzetting met niet volledig doorlatende teenconstructie.

Voor de snelheid van het water in de spleet is te schrijven:

$$u_s = k_s \frac{(h_T - h_b)}{d_T}$$

Het debiet door de spleet naar buiten is  $s \cdot u_s$ . Om een indruk van de mogelijke waarden van  $k_s$  te verkrijgen stellen we het debiet door de spleet gelijk aan het debiet per m lengte over een blokbreedte  $B$  door een doorlatende toplaag met een equivalente doorlatendheidscoëfficiënt  $k_{Tc}$ . Uit deze gelijkstelling volgt:

$$k_s = k_{T_0} (B/s)$$

dus:

$$u_s \cdot s = k_{T_0} \cdot B \cdot \frac{(h_T - h_b)}{d_T}$$

De k-waarde voor een spleet is dus te schatten uit de k-waarde van een toplaag met dezelfde spleetbreedte en die te vermenigvuldigen met de verhouding van blokbreedte en spleetbreedte.

Het debiet door de spleet ( $u_s \cdot s$ ) is gelijk aan het debiet door het filter ( $v_f \cdot d_f$ ). Gelijkstelling van beide debieten levert, rekening houdend met het teken:

$$u_s \cdot s = - v_f \cdot d_f$$

Uit de laatste twee vergelijkingen volgt

$$(h_T - h_b) = - v_f \cdot \frac{d_T d_f}{B \cdot k_{T_0}}$$

Omdat  $h_T$  de stijghoogte is van het water in het filter nabij de teenconstructie, en  $h_b$  de stijghoogte van het buitenwater, en omdat het verschil in stijghoogte van het filterwater met het buitenwater wordt aangegeven met  $\phi_n$ , en omdat

$$v_f = - k_f \cdot d\phi_n/dx$$

volgt

$$\phi_{f1} = d_f d_T \frac{k_f}{k_{T_0}} \cdot \frac{1}{B} \cdot \frac{d\phi}{dx} = \frac{(\Lambda_0)^2}{B} \cdot \frac{d\phi_{f1}}{dx}$$

Voor een volledig open teenconstructie is de equivalente leklengte 0 en volgt  $\phi_n = 0$ , voor een volledig dichte teenconstructie is de equivalente leklengte oneindig en volgt  $d\phi_n/dx = 0$ , hetgeen klopt met de randvoorwaarden voor open en dichte teenconstructies.

In plaats van de karakterisering van de doorlatendheid van de teen met de equivalente leklengte kunnen we ook stellen:

$$(19) \quad \varphi_{f1} = X \cdot \frac{d\varphi_{f1}}{dx}$$

waarin:

X : de doorlatendheidslengte ( $\chi$ ) van de teenconstructie [m]

X varieert van 0 (open teen) tot  $\infty$  (dichte teen).

Met deze uitdrukking kunnen we ook teenconstructies beschrijven met een doorlatende damwand of die bestaan uit een hoop stortsteen.

Vergelijking (19) is dus de algemene formulering van de randvoorwaarde voor een teenconstructie. Substitutie van de uitdrukking (7) voor  $\phi_n$  en de daarvan afgeleide uitdrukking voor de gradiënt in vergelijking (19) (met  $x = -L$ ) levert:

$$A \cdot e^{-\frac{L}{\Lambda}} + B \cdot e^{+\frac{L}{\Lambda}} = \frac{X}{\Lambda} \cdot (A \cdot e^{-\frac{L}{\Lambda}} - B \cdot e^{+\frac{L}{\Lambda}})$$

ofwel:

$$A = B \cdot \frac{X + \Lambda}{X - \Lambda} \cdot e^{+2\frac{L}{\Lambda}}$$

Substitutie van vergelijkingen (15) en (16) levert:

$$D = \frac{1}{2} \Lambda \cdot \sin \alpha \cdot \frac{\left(\frac{X + \Lambda}{X - \Lambda}\right) e^{+2\frac{L}{\Lambda}} - 1}{\left(\frac{X + \Lambda}{X - \Lambda}\right) e^{+2\frac{L}{\Lambda}} - e^{-2\frac{(h_f - h_b)}{\Lambda \sin \alpha}}}$$

Op geheel met de vorige paragraaf overeenkomstige wijze wordt voor de differentiaalvergelijking voor  $h_f$  afgeleid:

$$\frac{dh_f}{dt} = - \frac{k_f \cdot \sin \alpha}{n \Lambda} \cdot \left( \frac{\left[\frac{X + \Lambda}{X - \Lambda}\right] e^{2\frac{L}{\Lambda}} + 1}{\left[\frac{X + \Lambda}{X - \Lambda}\right] e^{2\frac{L}{\Lambda}} - 1} \right) \cdot (h_f - h_b)$$

We definiëren we nu de lektijd voor een niet volledig doorla-

tende teen door:

$$(20) \quad T_{k,t} = \frac{2\pi n\Lambda}{k_f \sin \alpha} \cdot \frac{\left[\frac{X+\Lambda}{X-\Lambda}\right] e^{2\frac{L}{\Lambda}} + 1}{\left[\frac{X+\Lambda}{X-\Lambda}\right] e^{2\frac{L}{\Lambda}} - 1} = T_k \cdot \frac{e^{2\frac{L}{\Lambda}} + \left(\frac{X-\Lambda}{X+\Lambda}\right)}{e^{2\frac{L}{\Lambda}} - \left(\frac{X-\Lambda}{X+\Lambda}\right)}$$

waarin  $T_k$  de lektijd is voor een oneindig lang talud (vergelijking (1)). Dit is de algemene formule voor de lektijd. Voor  $X = 0$  (open teen) volgt de formule (18) voor de lektijd van een volledig doorlatende teenconstructie, voor  $X = \infty$  (dichte teen) volgt de formule (17) voor de lektijd bij een volledig ondoorlatende teenconstructie en voor  $L \rightarrow \infty$  volgt de formule (1) voor de lektijd van een oneindig lang talud.

Met de algemene formule voor de lektijd is de algemene differentiaalvergelijking voor het verband tussen de hoogte van het freatisch vlak en de buitenwaterstand dus inderdaad:

$$(4) \quad \frac{dh_f}{dt} = - \frac{2\pi}{T_{k,t}} (h_f - h_b)$$

In Figuur 2 is de verhouding van de lektijd bij een niet volledig doorlatende teenconstructie (enkele waarden van  $X/\Lambda$  tot de lektijd van een oneindig lang talud uitgezet tegen  $L/\Lambda$ .

Aangetoond zal nu worden dat vergelijking (20) overgaat in vergelijking (2) als de lek lengte  $\Lambda$  zeer groot wordt, dus als de toplaag ondoorlatend wordt. In dat geval geldt:

$$e^{2\frac{L}{\Lambda}} = 1 + 2\frac{L}{\Lambda}$$

en is voor vergelijking (20) te schrijven:

$$T_{k,t} = T_k \cdot \frac{(X+\Lambda) \cdot e^{2\frac{L}{\Lambda}} + (X-\Lambda)}{(X+\Lambda) \cdot e^{2\frac{L}{\Lambda}} - (X-\Lambda)} = T_k \cdot \frac{(X+\Lambda) \left(1 + 2\frac{L}{\Lambda}\right) + (X-\Lambda)}{(X+\Lambda) \left(1 + 2\frac{L}{\Lambda}\right) - (X-\Lambda)}$$

Verder uitwerken levert:

$$T_{k,t} = T_k \cdot \frac{X + L + X \cdot \frac{L}{\Lambda}}{\Lambda + L + X \cdot \frac{L}{\Lambda}} = \frac{T_k}{\Lambda} \cdot \frac{X + L + X \cdot \frac{L}{\Lambda}}{1 + \frac{L}{\Lambda} + \frac{X}{\Lambda} \cdot \frac{L}{\Lambda}}$$

Voor  $\Lambda \rightarrow \infty$  wordt dit:

$$T_{k,t} = \frac{T_k}{\Lambda} \cdot (L + X) = \frac{2\pi n}{k_f \sin \alpha} (L + X)$$

en dit is precies vergelijking (2).

Bij de laatste stap in deze afleiding is gebruik gemaakt van:

$$T_w = \frac{2\pi n}{k_f \sin \alpha} \cdot (L + X) = \frac{2\pi n \Lambda}{k_f \cdot \sin \alpha} \cdot \frac{L + X}{\Lambda} = T_k \cdot \frac{L + X}{\Lambda}$$

We kunnen ook gelijk van deze relatie uitgaan, in combinatie met formule (20), waardoor:

$$\frac{T_{k,t}}{T_w} = \frac{\left[ \frac{(X + \Lambda) \cdot e^{2\frac{L}{\Lambda}} + (X - \Lambda)}{(X + \Lambda) \cdot e^{2\frac{L}{\Lambda}} - (X - \Lambda)} \right]}{\left[ \frac{X + L}{\Lambda} \right]} = \frac{\frac{T_{k,t}}{T_k}}{\frac{X}{\Lambda} + \frac{L}{\Lambda}}$$

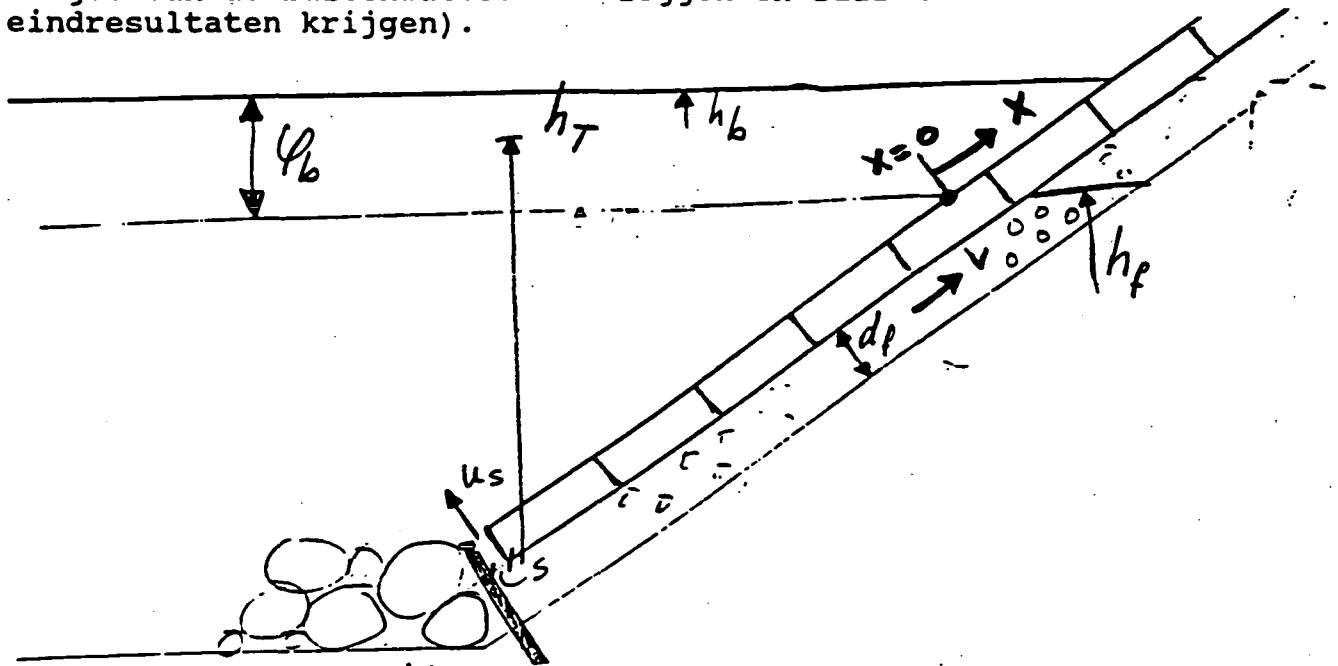
Voor  $L/\Lambda \rightarrow 0$  volgt hieruit:

$$\frac{T_{k,t}}{T_w} = \frac{\Lambda}{X + L} \cdot \frac{X + L + X \frac{L}{\Lambda}}{\Lambda + L + X \frac{L}{\Lambda}} = \frac{1 + \frac{L}{\Lambda} \cdot \frac{X}{X + L}}{1 + \frac{L}{\Lambda} \left(1 + \frac{X}{\Lambda}\right)} = 1$$

In Figuur 4 is de waarde van  $T_{k,t} / T_w$  uitgezet tegen  $L/\Lambda$  voor verschillende waarden van  $X/\Lambda$ .

IV. AFLEIDING LEKTIJD INDIEN FREATISCH VLAK IN FILTER LAGER DAN BUITENWATERSTAND.

In Figuur 5 is een steenzetting met teenconstructie getekend op zeker tijdstip, waarop het freatisch vlak lager staat dan het buitenwater. In dit geval kiezen we het nulpunt van de x-as ter plaatse van het freatisch vlak. Dit heeft tot gevolg dat het uiterlijk van sommige e-machten en andere factoren niet altijd overeenkomt met die in de vorige hoofdstukken. (We kunnen uiteraard het nulpunt van de x-as ook nu weer ter hoogte van de buitenwaterstand leggen en zullen dan dezelfde eindresultaten krijgen).



Figuur 5: Definitieschets.

Bij verwaarlozing van de invloed van het lekwater door de toplaag boven het freatisch vlak geldt weer:

$$(5) \quad \frac{dh_f}{dt} = \frac{v_f \cdot \sin \alpha}{n} = - \frac{k_f}{n} \cdot \sin \alpha \cdot \frac{d\phi_f}{dx}$$

We hoeven nu alleen de oplossing van de filtervergelijking (6) te onderzoeken voor  $x < \text{of} = 0$   
Daar geldt nu dus voor de stijghoogte van het buitenwater:

$$(21) \quad \phi_T = -(h_f - h_b)$$

en is de oplossing van (6):

$$(22) \quad \phi_f = \phi_T + A \cdot e^{+\frac{x}{\lambda}} + B \cdot e^{-\frac{x}{\lambda}}$$

Voor de gradiënt ter plaatse van het freatisch vlak volgt:

$$(23) \quad \frac{d\phi_f}{dx} = \frac{A - B}{\Lambda}$$

Ter plaatse van het freatisch vlak geldt ook:

$$\phi_f = 0, \text{ zodat uit (22) volgt:}$$

$$(24) \quad A = - (B + \phi_T)$$

en (23) wordt:

$$(25) \quad \frac{d\phi_f}{dx} = - \frac{2B + \phi_T}{\Lambda}$$

Waardoor voor vergelijking (5) nu geschreven kan worden:

$$(26) \quad \frac{dh_f}{dt} = + \frac{k_f \cdot \sin \alpha}{n} \cdot \left( \frac{2B + \phi_T}{\Lambda} \right)$$

We onderzoeken weer de vier gevallen. In elk geval stellen we de randvoorwaarde bij de teen vast, waarmee we naast vergelijking (24) een tweede vergelijking in A en B hebben. Oplossing van B en substitutie in (26) levert de vergelijking waarmee de lektijd bepaald wordt.

1 - Oneindig lang talud:

Met de randvoorwaarde:

voor  $x = -\infty$ :

$$\phi_f = \phi_b$$

volgt uit (22)

$$B = 0$$

zodat volgens vergelijkingen (26) en (21):

$$\frac{dh_f}{dt} = - \frac{k_f \cdot \sin \alpha}{n} \cdot \frac{h_f - h_b}{\Lambda} = - \frac{2\pi}{T_k} \cdot (h_f - h_b)$$

Dit is dezelfde vergelijking als verkregen werd voor het geval waarin het freatisch vlak boven de buitenwaterstand stond.



## 2 - Volledig dichte teenconstructie.

Voor  $x = -L$  moet weer gelden  $d\phi_f/dx = 0$  dus: volgt uit vergelijking (22):

$$A \cdot e^{-\frac{L}{\Lambda}} - B \cdot e^{+\frac{L}{\Lambda}} = 0$$

Substitutie van A uit (24) en uitwerken levert:

$$B = -\varphi_T \cdot \frac{1}{e^{2\frac{L}{\Lambda}} + 1}$$

Substitutie in (26) levert:

$$\frac{dh_f}{dt} = -\frac{k_f \cdot \sin \alpha}{n\Lambda} \cdot \left( \frac{e^{2\frac{L}{\Lambda}} - 1}{e^{2\frac{L}{\Lambda}} + 1} \right) \cdot (h_f - h_b)$$

en dit is dezelfde vergelijking als in hoofdstuk III paragraaf 2 werd gevonden, leidend tot formule (17) voor de lektijd van een volledig dichte teenconstructie.

## 3 - Volledig open teenconstructie.

Nu geldt voor  $x = -L$  :

$$\phi_f = \phi_T$$

Hiermee volgt uit vergelijkingen (22) en (24):

$$B = \varphi_T \cdot \frac{1}{e^{2\frac{L}{\Lambda}} - 1}$$

Substitutie in (26) levert:

$$\frac{dh_f}{dt} = -\frac{k_f \cdot \sin \alpha}{n\Lambda} \cdot \left( \frac{e^{2\frac{L}{\Lambda}} + 1}{e^{2\frac{L}{\Lambda}} - 1} \right) \cdot (h_f - h_b)$$

en dit is dezelfde vergelijking als in hoofdstuk III paragraaf 3 werd gevonden, leidend tot formule (18) voor de lektijd van een volledig open teenconstructie.

4 - Willekeurig doorlatende teenconstructie.

Voor  $x = -L$  geldt:

$$\varphi_f - \varphi_T = X \cdot \frac{d\varphi_f}{dx}$$

Substitutie van vergelijking (22) voor  $\varphi_f$  en de daarvan afgeleide gradiënt voor  $x = -L$  levert samen met vergelijking (24):

$$B = -\varphi_T \cdot \left[ \frac{\frac{X - \Lambda}{X + \Lambda}}{e^{+2\frac{L}{\Lambda}} + \frac{X - \Lambda}{X + \Lambda}} \right]$$

Substitutie in (26) leidt met (21) tot:

$$\frac{dh_f}{dt} = -\frac{k_f \cdot \sin\alpha}{n\Lambda} \cdot \left( \frac{[\frac{X + \Lambda}{X - \Lambda}] e^{2\frac{L}{\Lambda}} + 1}{[\frac{X + \Lambda}{X - \Lambda}] e^{2\frac{L}{\Lambda}} - 1} \right) \cdot (h_f - h_b) = -\frac{2\pi}{T_{k,t}} (h_f - h_b)$$

en hieruit volgt dezelfde formule (20) voor de lektijd als in hoofdstuk III paragraaf 4.

Hiermee is aangetoond dat in het willekeurige geval van een steenzetting met een leklengte die een factor 2 à 3 groter is dan  $(h_f - h_b)/\sin\alpha$ , met een willekeurig doorlatende teenconstructie, het verband tussen het freatisch vlak in het filter en de buitenwaterstand gegeven wordt door vergelijking

$$(4) \quad \frac{dh_f}{dt} = -\frac{2\pi}{T_{k,t}} (h_f - h_b)$$

waarin  $T_{k,t}$  gegeven wordt door formule (20).

#### V. CONCLUSIES.

In Figuur 2 is te zien dat als  $L > 1,5 \Lambda$  de teenconstructie geen invloed meer heeft. Voor een leklengte van 10 m. betekent dit dat de teenconstructie geen invloed meer heeft als  $L$  meer dan 15 m. is. Als  $L$  minder is dan  $0,5 \Lambda$  (in ons voorbeeld 5 m.) is het al dan niet doorlatend zijn van de teenconstructie zeer belangrijk.

In Figuur 5<sup>4</sup> is te zien dat voor  $L \ll \Lambda$  de lektijd nadert tot de weerstandstijd, gedefinieerd in N 602. Een probleem bij het gebruik van Figuur 5<sup>4</sup> is dat in  $T_w$  zowel  $L$  als  $X$  voorkomen. Bovendien treden interpretatieproblemen op als  $X \rightarrow \infty$ . Daarom wordt voorgesteld de weerstandstijd bij een volkomen doorlatende teenconstructie als referentie in te voeren :

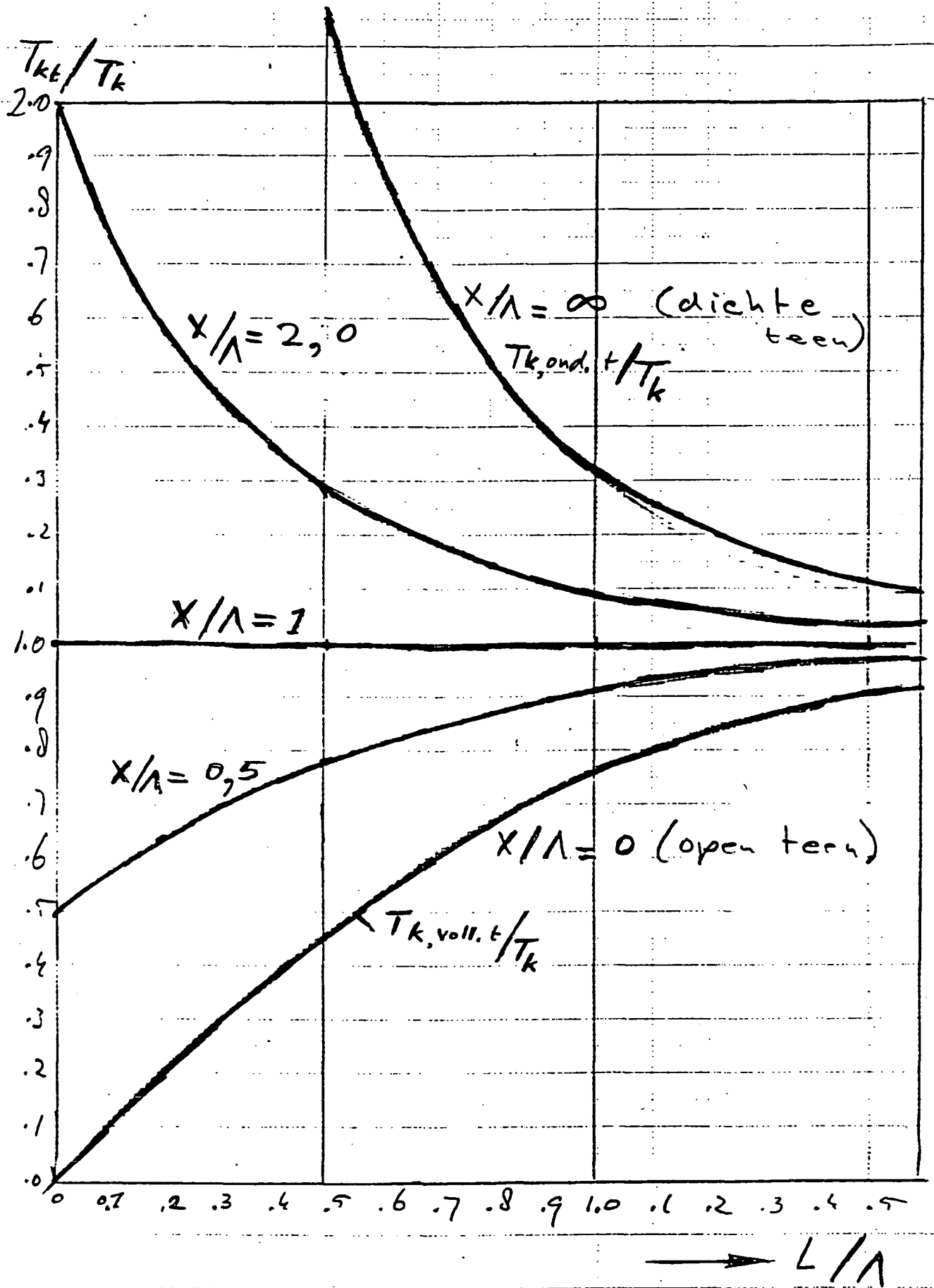
$$(27) \quad T_{w0} = \frac{2\pi nL}{k_f \cdot \sin\alpha}$$

Uit vergelijking (20) volgt dan :

$$(28) \quad \frac{T_{k,t}}{T_{w0}} = \frac{\Lambda}{L} \cdot \frac{e^{2\frac{L}{\Lambda}} + \left(\frac{X - \Lambda}{X + \Lambda}\right)}{e^{2\frac{L}{\Lambda}} - \left(\frac{X - \Lambda}{X + \Lambda}\right)} = \frac{\Lambda}{L} \cdot \frac{T_{k,t}}{T_k}$$

In Figuur 6 is  $T_{k,t}/T_{w0}$  uitgezet tegen  $L/\Lambda$ . Deze figuur laat evenals Figuur 2, zien dat voor  $L/\Lambda < 0,5$  de lektijd zeer gevoelig is voor  $X$ , maar voor  $L/\Lambda > 1,5$  is er nauwelijks nog invloed van de teenconstructie en geldt  $T_{k,t} = T_k$ .

Er is geen duidelijke voorkeur uit te spreken voor één van de figuren 2, 4 of 6.



Figuur 2

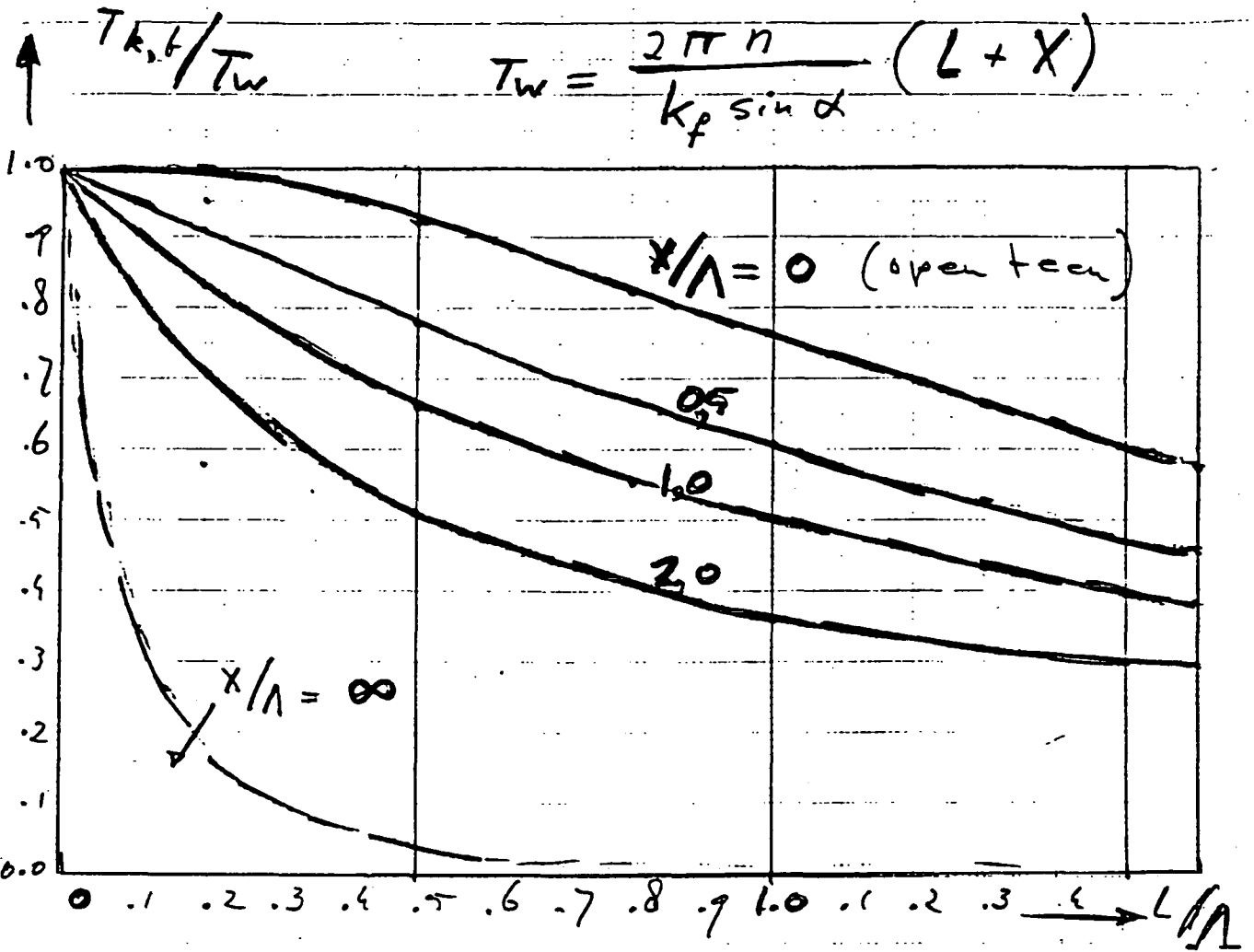


Figure 4

$T_{kt}/T_{No}$

$$T_{wo} = \frac{2\pi n L}{k_f \sin \alpha}$$

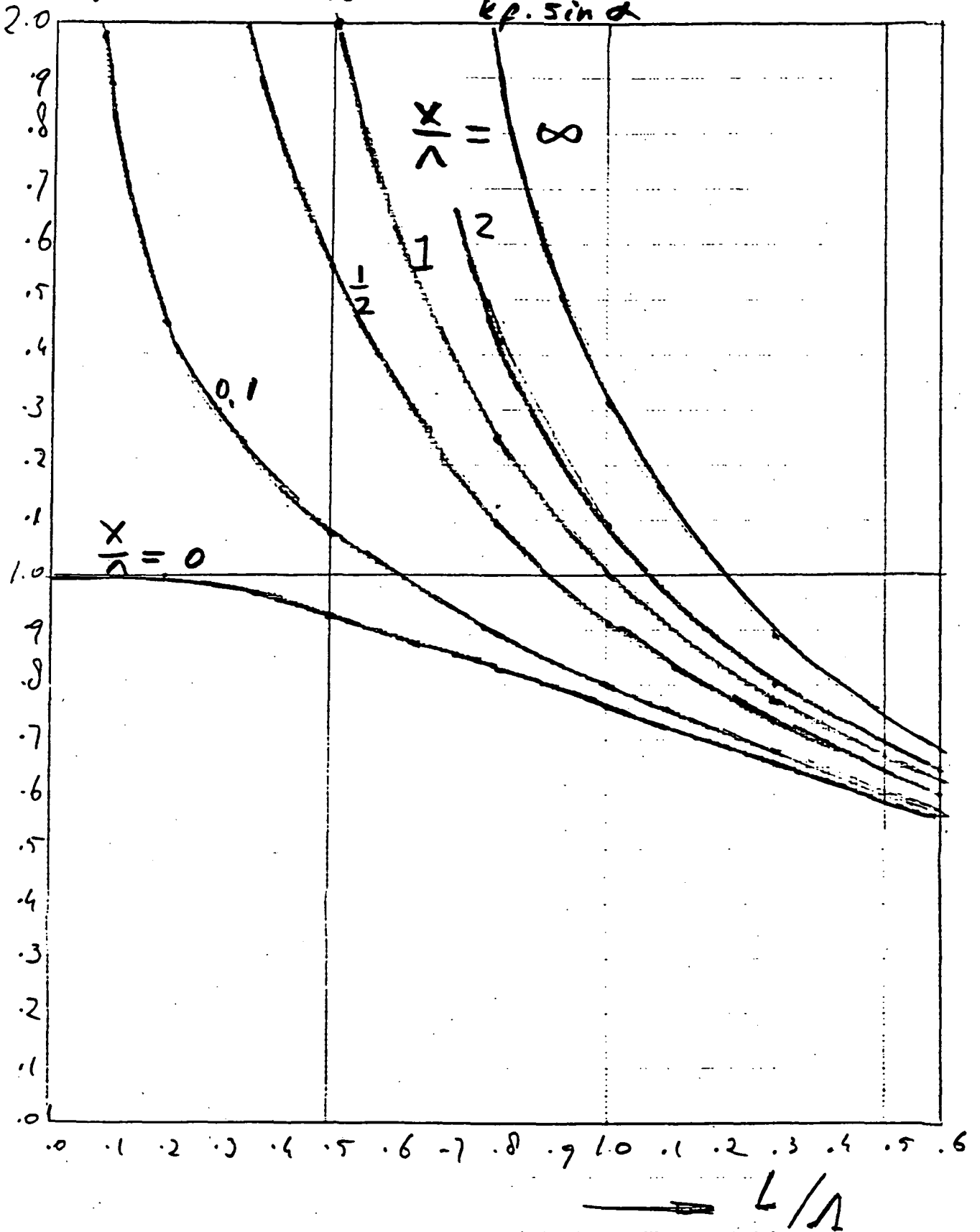


Figure 6



Aan

de leden van projectgroep TAW-A2 (Steenzettingen)

Contactpersoon

ir. B.P. Rigter

Doorkiesnummer

Datum

15 juni 1992

Bijlage(n)

Ons kenmerk

Uw kenmerk

Aanvulling N 616

Onderwerp

In de haast N 616 af te maken is Figuur 6 als afbeelding van vergelijking (28) geproduceerd, terwijl deze figuur strijdig is met mijn eigen ideeën over het gebruik van dimensieloze grootheden in grafieken. De constructielengte  $L$  en de doorlatendheidslengte  $X$  zijn in die figuur namelijk dimensieloos gemaakt (geschaald) met de leklengte  $A$ , terwijl de lektijd dimensieloos is gemaakt met de weerstandstijd  $T_{\infty}$ , welke evenredig is met  $L$ . Dit heeft tot gevolg dat bij constante leklengte  $A$  en bij kleiner wordende  $L$  figuur 6 een overtrokken beeld geeft van de toename van de lektijd, omdat bij kleiner wordende  $L$  de schaling van de lektijd ook kleiner wordt.

Bijgaande Figuur 7 voldoet daarom beter. In deze figuur, die eveneens een weergave is van formule (28), zijn de leklengte  $A$  en de doorlatendheidslengte  $X$  geschaald met de constructielengte  $L$  en de lektijd is geschaald met de weerstandstijd voor een open teenconstructie met dezelfde constructielengte  $L$ . Deze figuur geeft een goed beeld van hoe de lektijd verandert bij verandering van  $A$  en  $X$ , terwijl  $L$  constant blijft.

Figuur 7 is de tegenhanger van Figuur 2. Figuur 2 geeft een goed beeld van hoe de lektijd verandert bij verandering van  $L$  en  $X$  terwijl de leklengte  $A$  constant blijft. In deze figuur zijn alle dimensieloze grootheden geschaald met een factor die evenredig is met  $A$ .

De Figuren 2 en 7 zijn eigenlijk de meest praktische figuren. Figuur 2 te gebruiken bij constructielengtes  $L$  die klein zijn vergeleken met de leklengte; Figuur 7 te gebruiken bij constructielengtes die groot zijn vergeleken met de leklengte. Voor  $L = A$  geven de figuren dezelfde waarden voor  $X = 0$  en voor  $X = \infty$ .

N.B. In Figuur 7 naderen alle krommen voor grote waarden van  $A$  naar een limiet:  $1 + (X/L)$

Postadres postbus 3044, 2600 CA Delft

Bezoekadres van der Burghweg 1

Telefoon 015-699111

Telefax 015-611361

Telex 38043

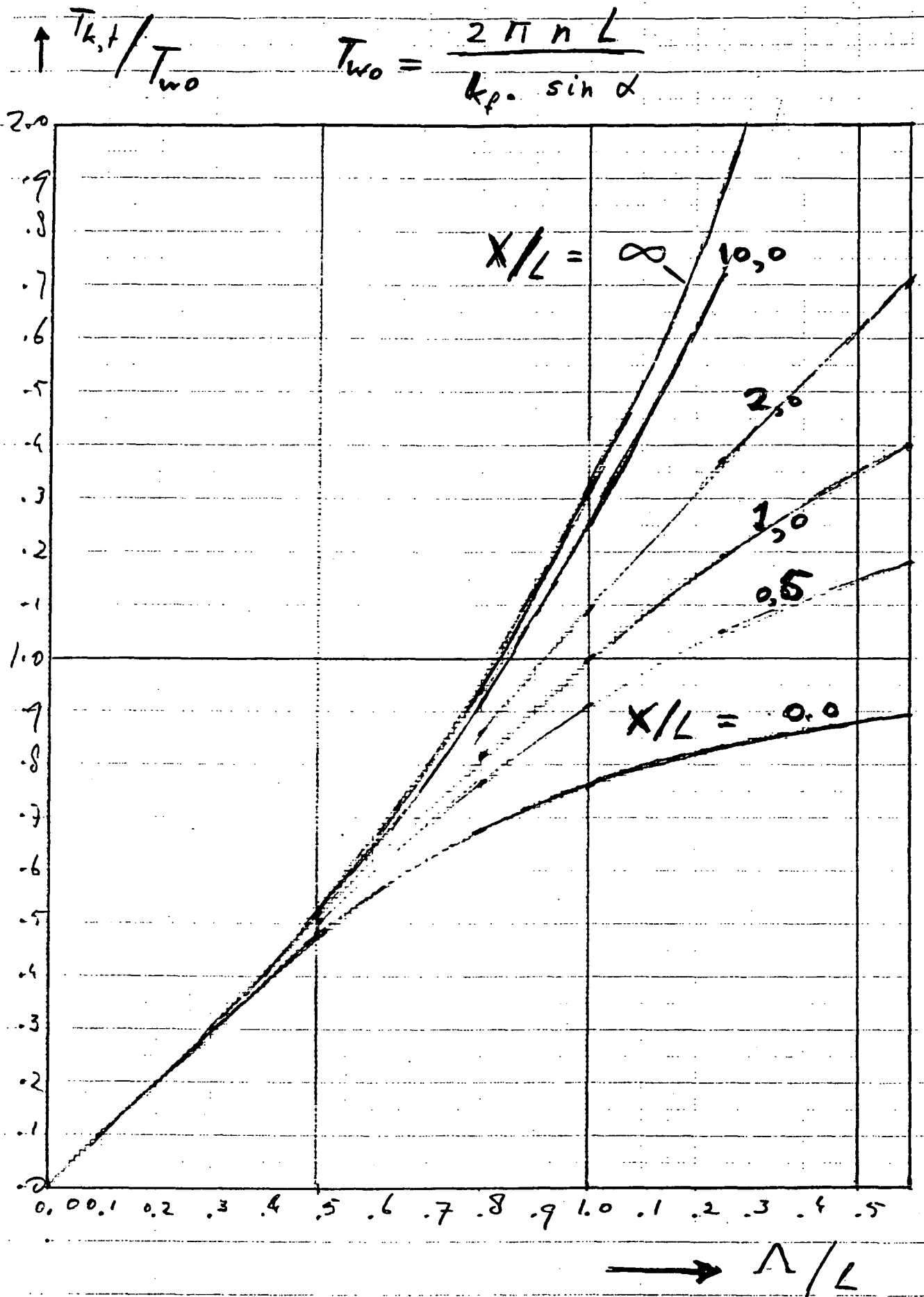
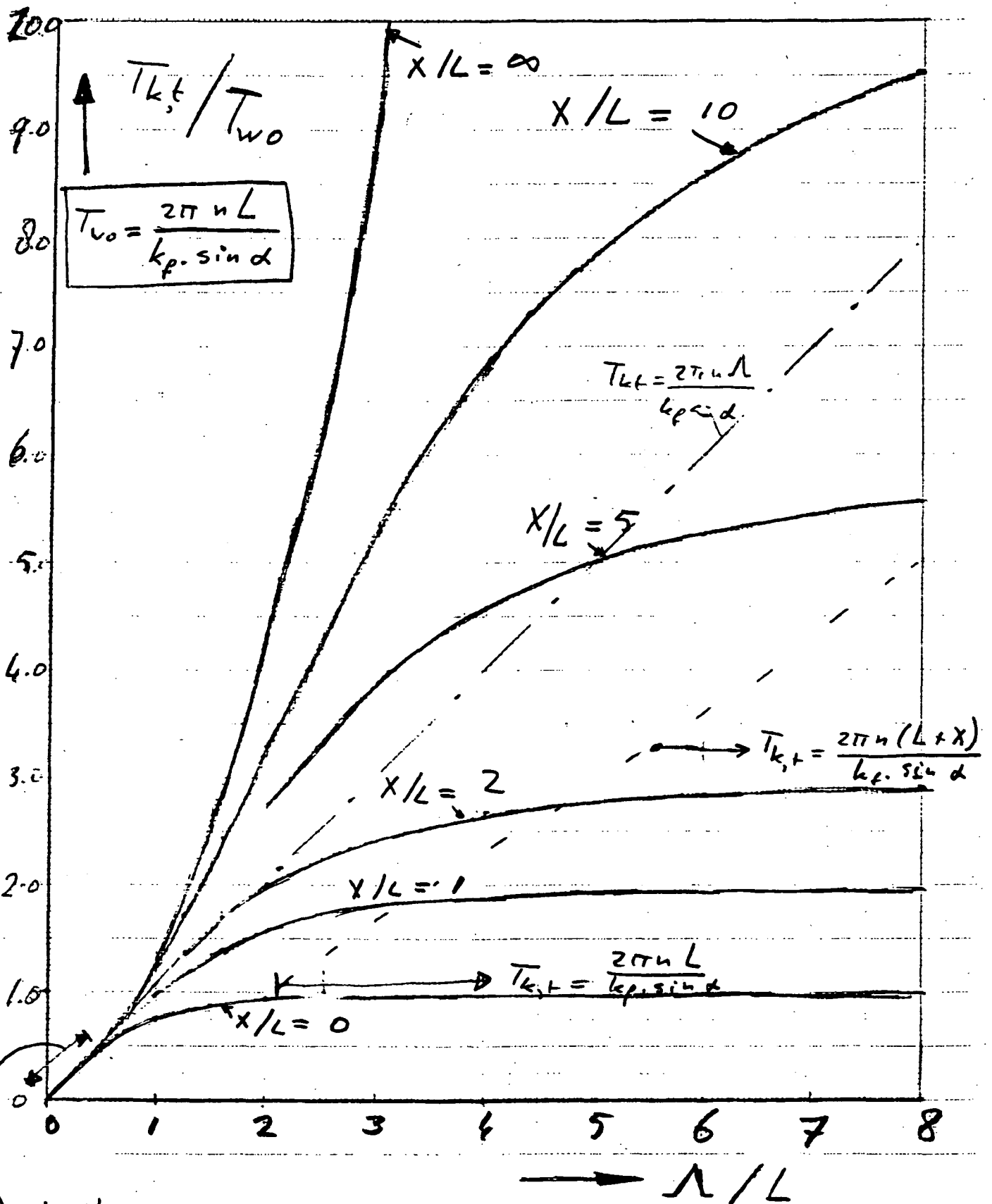


Figure 7





$T_{k,t} = \frac{2\pi n L}{k_p \sin \alpha}$

Links van streepijeslijn:  $T_{k,t} = \frac{2\pi n (L+x)}{k_p \sin \alpha}$



Aan

Leden TAW-A2 (Steenzettingen).

Contactpersoon

Ir. B.P. Rigter.

Doorkiesnummer

Datum

26 oktober 1992

Bijlage(n)

Ons kenmerk

Uw kenmerk

Onderwerp

Nogmaals: lektijd, teenconstructie en prototypemetingen.

---

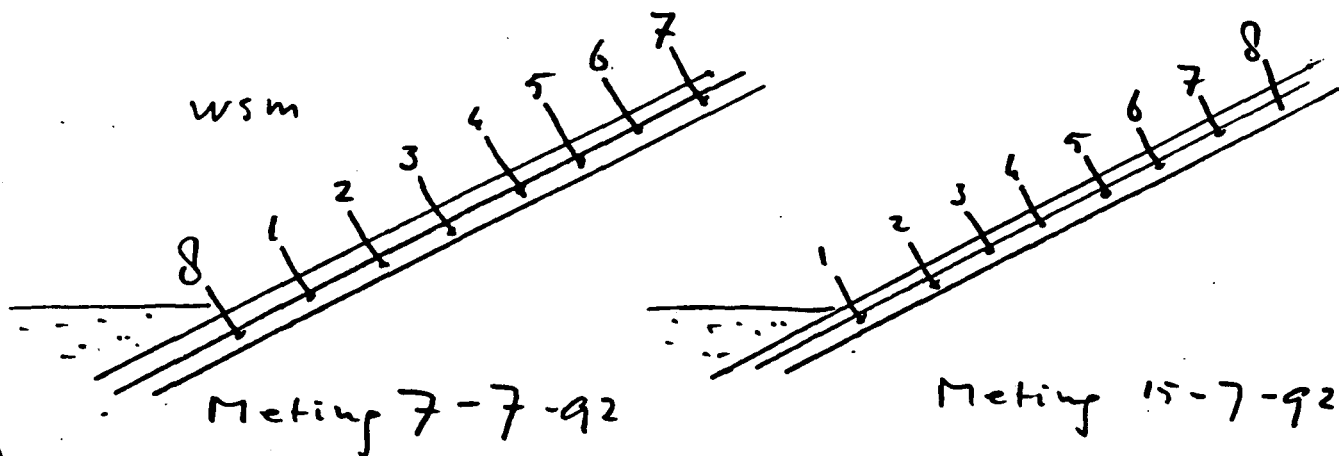
## 1. Inleiding.

In notitie N 526 voerde ik het begrip lektijd in. Bij grote lektijden is de beweging van het freatische vlak gedempt ten opzichte van de fluctuaties van het buitenwater zoals het getij en bovendien treedt er een faseverschuiving op. Aangenomen dat bij grote lek lengte de stijghoogte in het filter op niet te grote afstand ongeveer gelijk zou zijn aan de hoogte van de freatische lijn zou deze faseverschuiving geverifieerd kunnen worden met metingen van de stijghoogte in het filter. Een eerste poging met behulp van de met een ander doel verrichte metingen in Colijnsplaat leek aan te tonen dat er wel een faseverschuiving was, maar veel minder dan berekend. Suggesties dat de teenconstructie de lektijd beïnvloedt werden wiskundig-theoretisch uitgewerkt in N 616. Het resultaat was dat een open teenconstructie de lektijd verkleint, terwijl een dichte teenconstructie de lektijd vergroot.

In juli zijn metingen bij Lauwersoog uitgevoerd, speciaal met het doel om de lektijdtheorie te verifiëren. Een gedetailleerd verslag is in de maak. In eerste instantie leken de resultaten ook hier teleurstellend. Er blijkt echter een eenvoudige verklaring te zijn voor de geringe faseverschuivingen die gemeten worden in het filter. In deze nota worden eerst kort de betreffende metingen beschreven. Daarna volgt een verklaring voor de geconstateerde faseverschuivingen. Tenslotte wordt de verklaring uitgewerkt in wiskundige termen.

## 2. Globale beschrijving van de metingen en van de resultaten.

In een raai loodrecht op de dijk zijn een aantal (8) waterspanningsmeters aangebracht in het filter onder de steenzetting. Zij



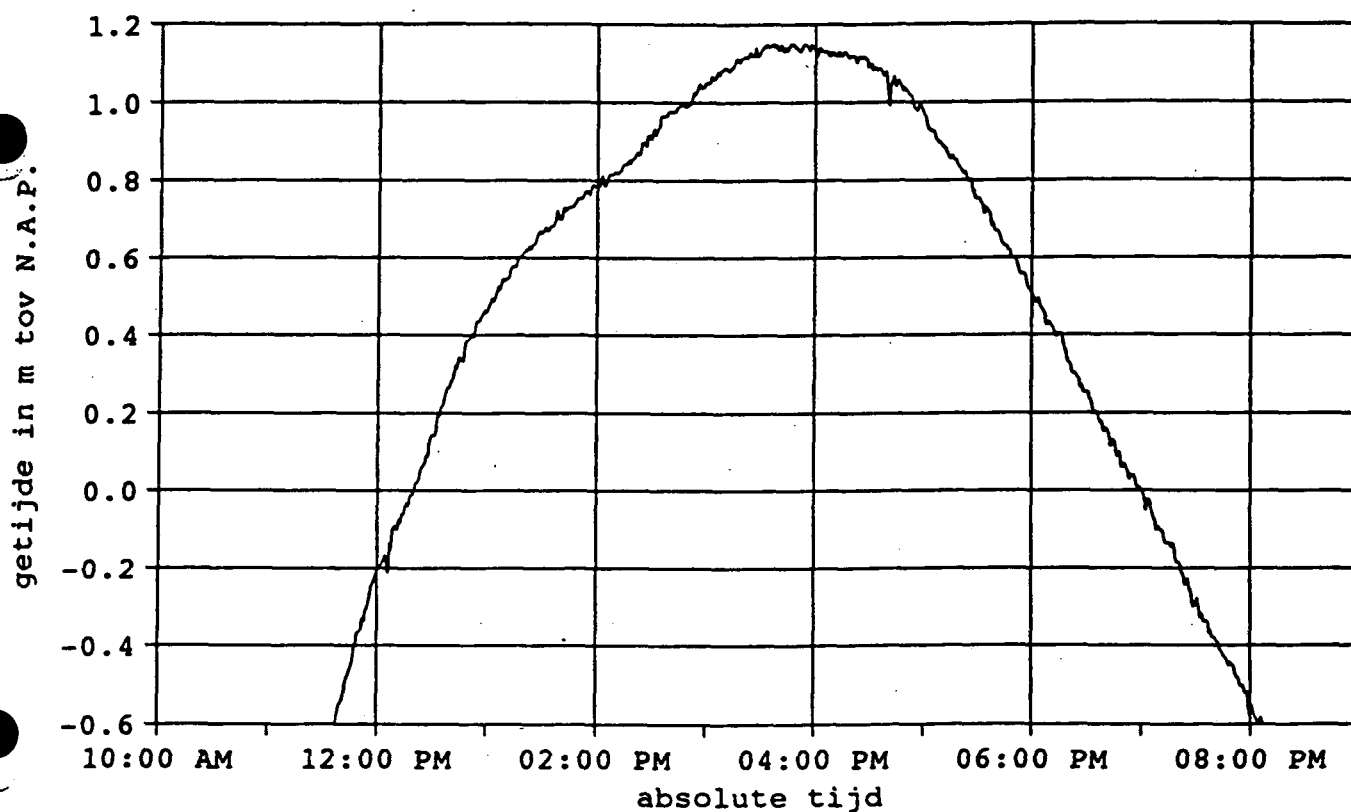
Figuur 1. Globale plaatsbepaling waterspanningsmeters.

werden gelijkelijk verdeeld tussen het niveau van het voorland en ruim hoogwater (Figuur 1). In Figuur 2a is het verloop van de plaatselijk gemeten waterstand op 7 juli 's middags weergegeven, in de figuren 2b en 2c ziet men het (ongecorrigeerde) verloop van de gemeten stijghoogte. Omdat wsm 1 het getij goed volgt werd gedacht dat de afdichting van het gat in de steenzetting, nodig om de wsm aan te brengen, niet dicht was, vandaar het woord "lekkage". Wsm 8 lag dicht bij de teen en geeft een veel kleiner reactie op het getij, maar er is nauwelijks sprake van een faseverschuiving. Wsm 2 en 3 liggen dicht bij de freatische lijn en tonen een faseverschuiving en een demping van de amplitude. Wsm 4 (Fig. 2c) reageert nauwelijks en de andere wsm helemaal niet, zodat de freatische lijn niet boven NAP + 0,10 m. komt.

De volgende getijmeting vond plaats op 15 juli overdag. Figuur 3a toont het plaatselijk gemeten getij. Figuur 3b de registraties van waterspanningsmeters 1 t/m 6. Dit keer is te zien dat de wsm 1 t/m 5 een toenemende demping laten zien, terwijl wsm 6 een iets afwijkend gedrag vertoont. Figuur 3c toont de registraties van de wsm 5 t/m 8. Hier is iets vreemds: 7 heeft maar even water, wat er op duidt dat de maximale hoogte van het freatische lijn ongeveer NAP + 0,20 m is, maar de hoger gesitueerde wsm 8 registreert over ca twee uren ook water. We laten dit in deze notitie buiten beschouwing.

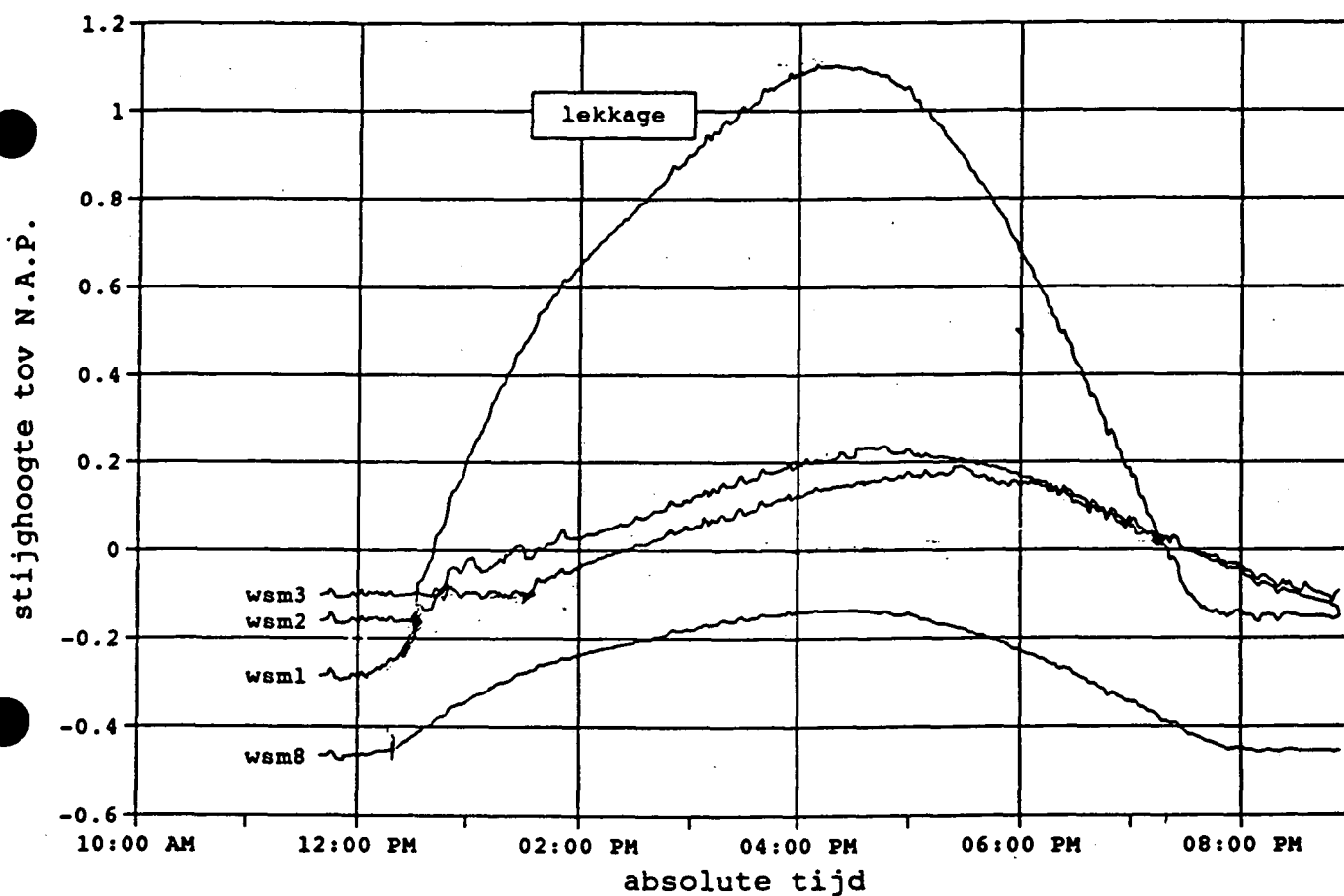
Beide getijmetingen laten zien dat er over het algemeen slechts een geringe faseverschuiving (van de maximaal gemeten stijghoogte) t.o.v. het getij is. Bovendien lijkt de demping met name bij de lagere wsm (met een enkele uitzondering) gering wat op lekkage leek te duiden. Belangrijkste is echter de constatering dat de gemeten stijghoogten al gaan afnemen terwijl het buitenwater een

Getijdemeting Lauwersoog  
 getijdemeting 07/07 - 08/07/92



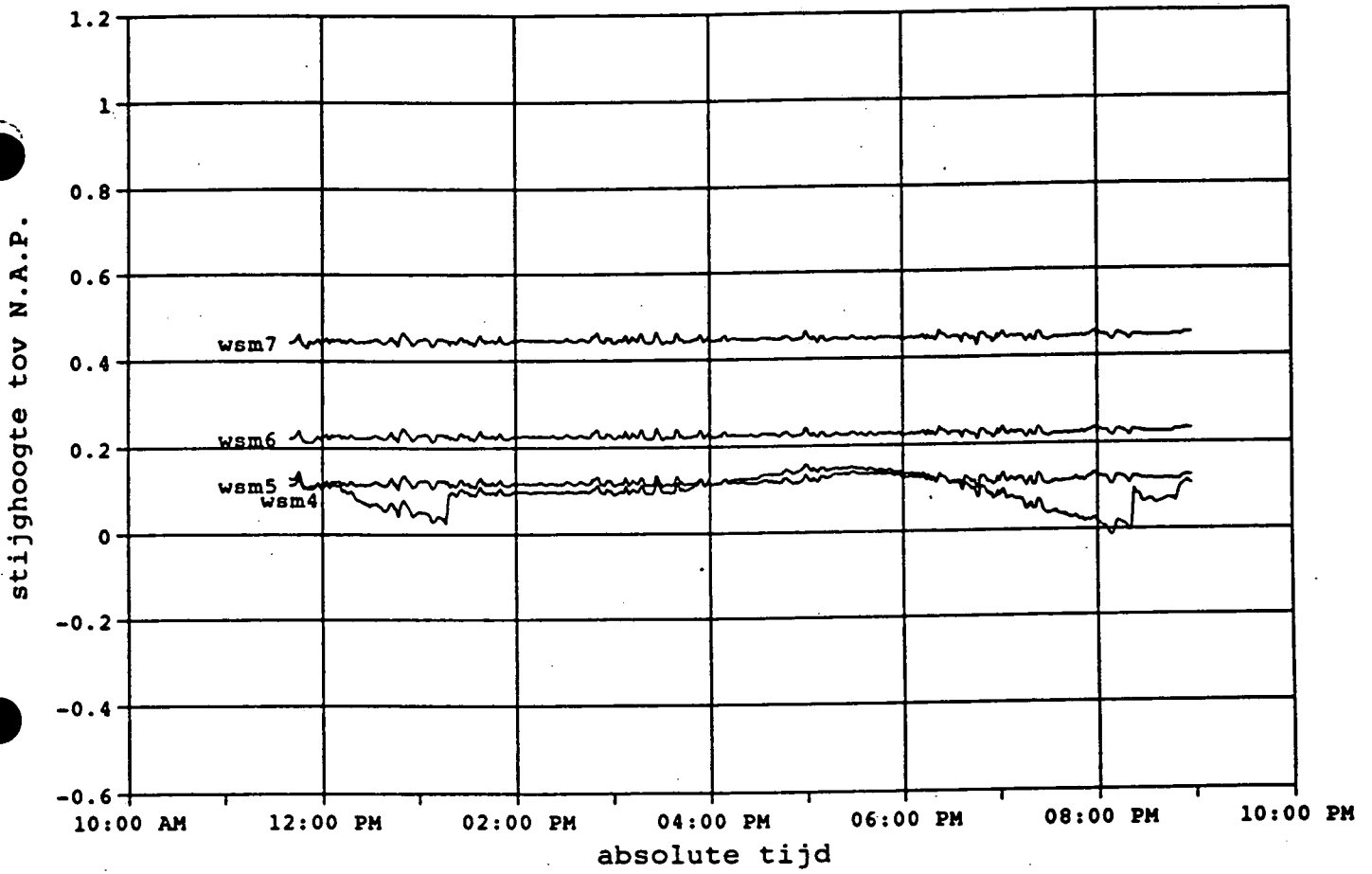
Figuur 2a

Getijdemeting Lauwersoog  
getijde 07/07/92 in filter



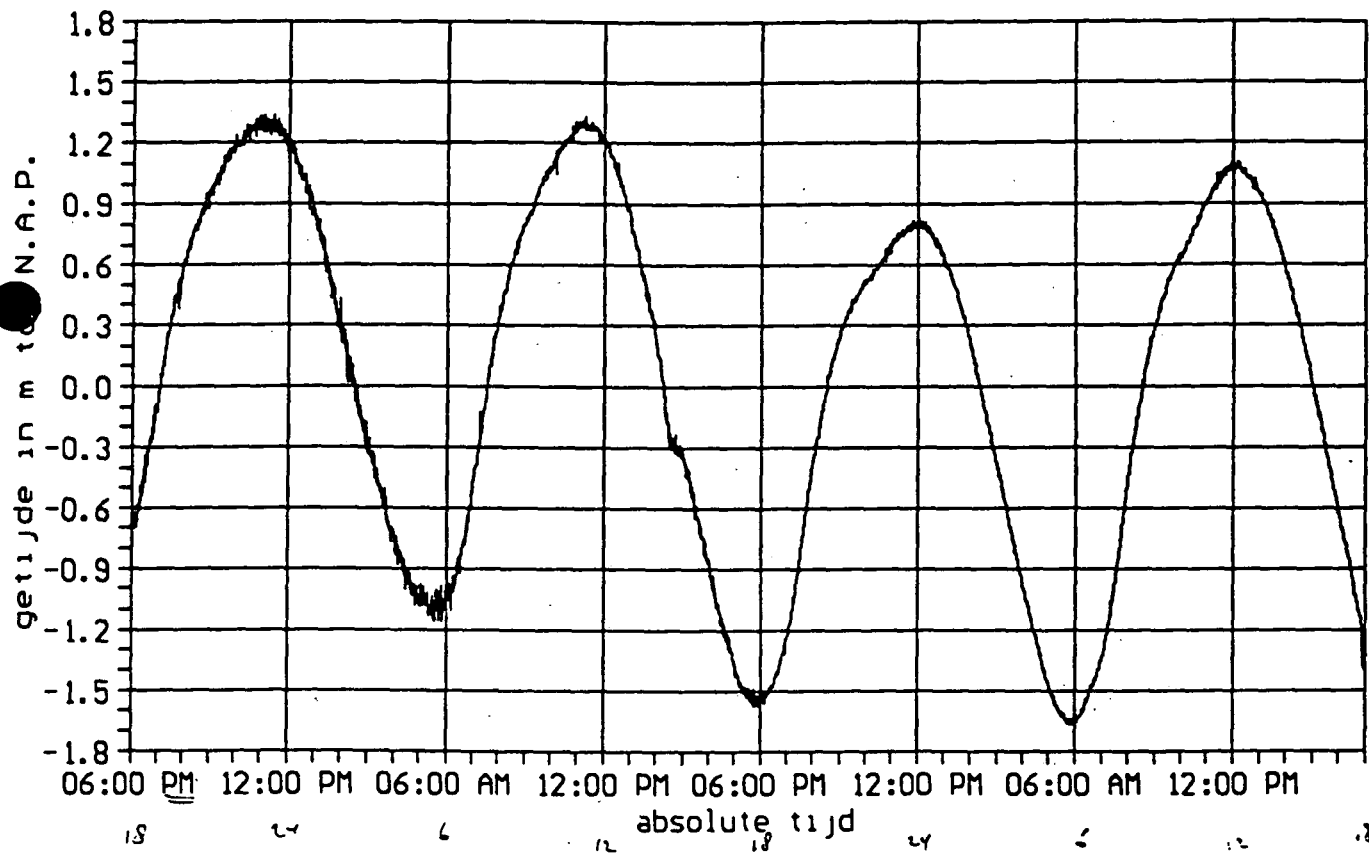
Figuur 2 b

Getijdemeting Lauwersoog  
getijde 07/07/92 in filter



Figuur 2 c

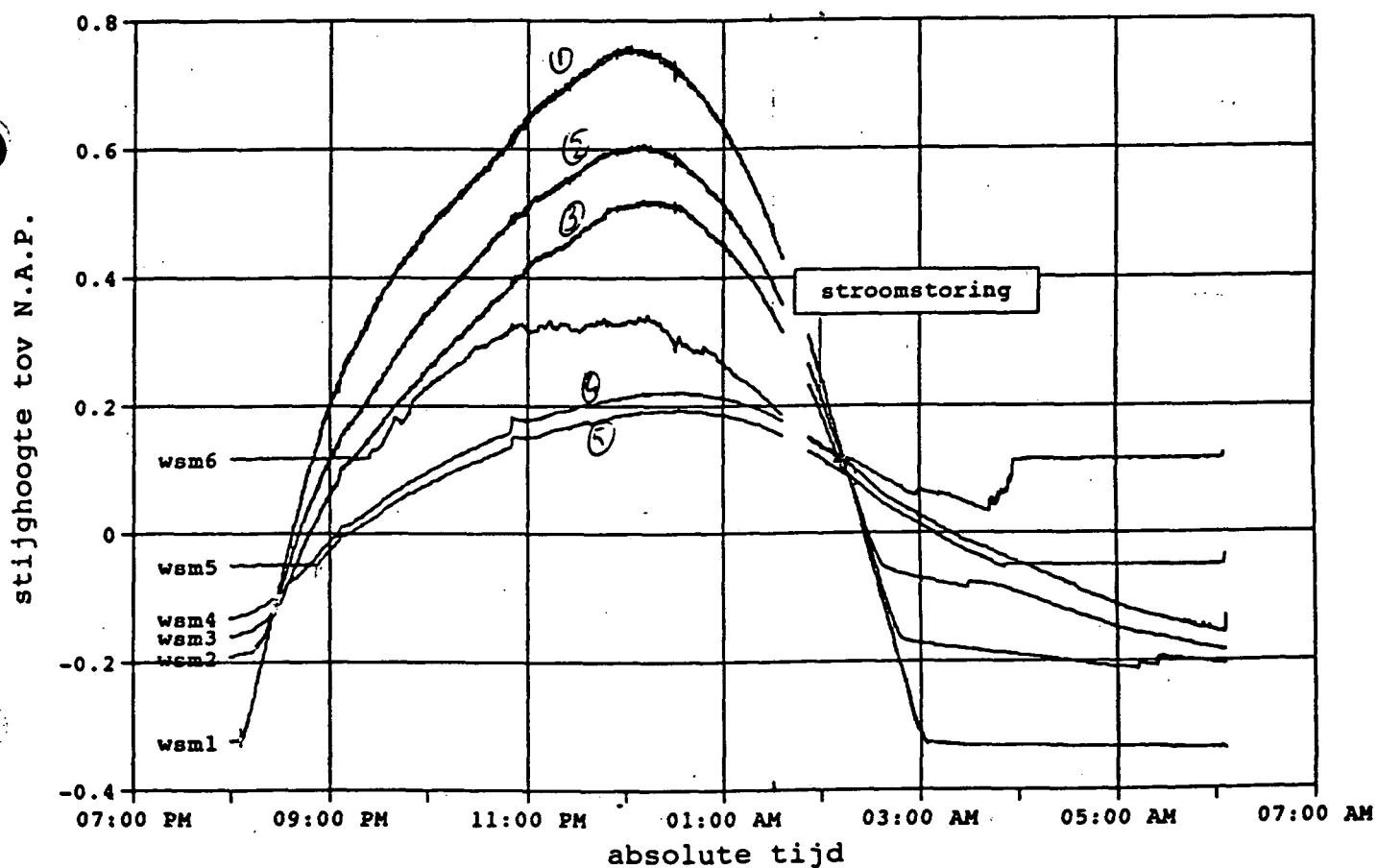
Getijdemeting Lauwersoog  
 getijdemeting 14/07 - 15/07/92



— meting met Barry

Figuur 3a

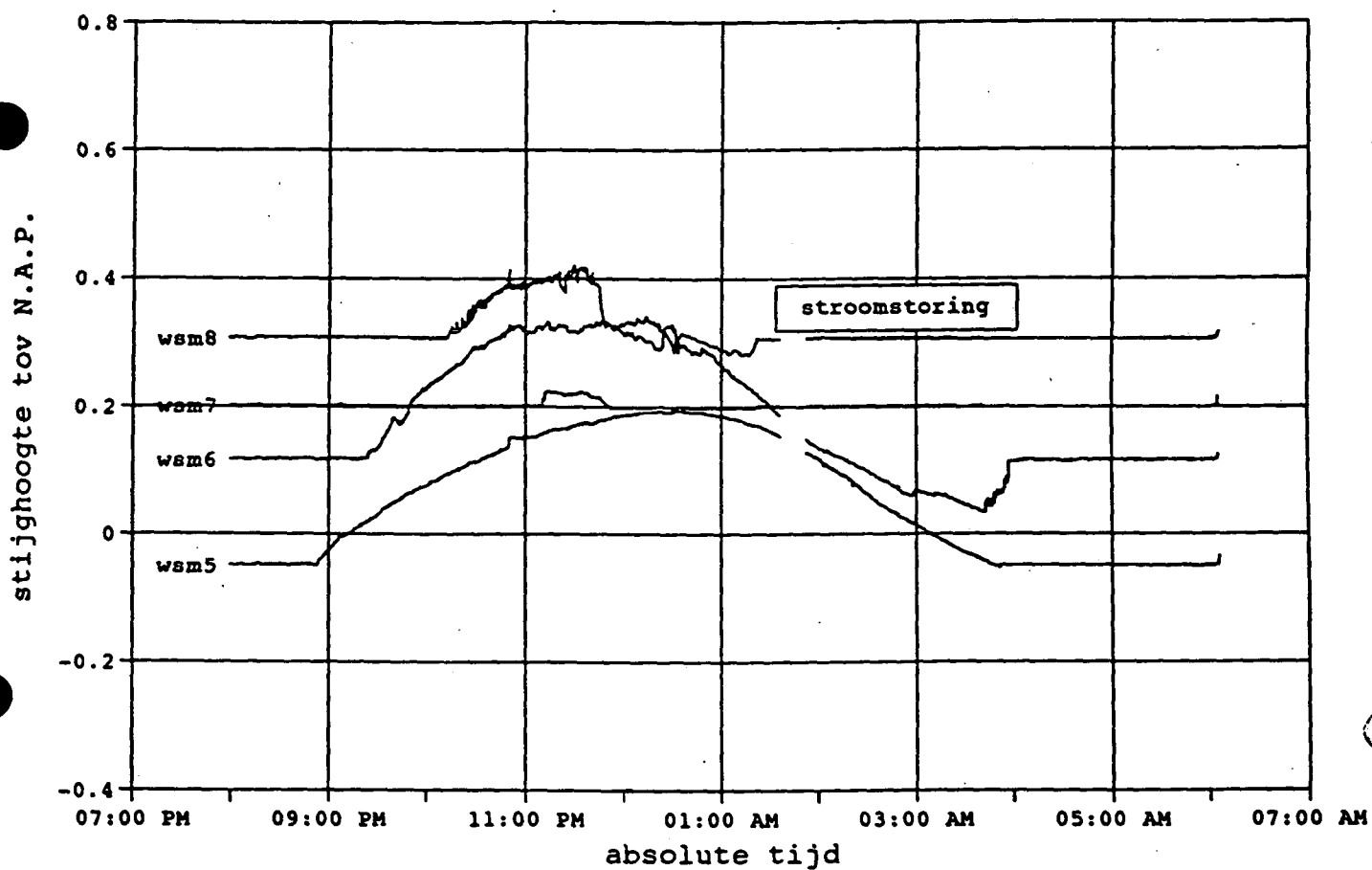
Getijdemeting Lauwersoog  
getijde 15/07/92 in filter



Figuur 36



Getijdemeting Lauwersoog  
getijde 15/07/92 in filter



Figuur 3c

hogere stijghoogte heeft. Dit lijkt op het eerste gezicht merkwaardig, want zolang het buitenwater hoger is dan de freatische lijn verwacht men een toename van de hoogte van de freatische lijn en dus van de gemeten stijghoogten. In de volgende paragraaf worden deze vragen opgelost, dan wel dwalingen rechtgezet.

### 3. Verklaring voor het waargenomen stijghoogteverloop.

In genoemde notities N 526 en N 616 wordt bij de afleiding gebruik gemaakt van de semi-permanente stijghoogteverdeling van het water in het filter. Uit deze stijghoogteverdeling ter hoogte van het freatisch vlak volgt namelijk de snelheid van het water in het filter ter hoogte van het freatisch vlak en dus de stijg- (of daal-) snelheid van het freatisch vlak. In genoemde notities is verder alleen het gedrag van het freatisch vlak geanalyseerd. De semi-permanente stijghoogte verdeling is niet verder geanalyseerd. Er is slechts van de formules gebruik gemaakt om te komen tot de formule voor de freatische lijn.

In Figuur 4a is een dergelijk semi-permanente stijghoogteverdeling getekend voor het geval waarin de freatische lijn hoger ligt dan het buitenwater. Alle stijghoogten moeten dus liggen tussen het buitenwater en de freatische lijn! De freatische lijn zal zakken.

In Figuur 4b is een dergelijke verdeling getekend voor het geval waarin de freatische lijn lager ligt dan het buitenwater. Alle stijghoogten moeten dus liggen tussen het buitenwater en de freatische lijn! De freatische lijn zal stijgen.

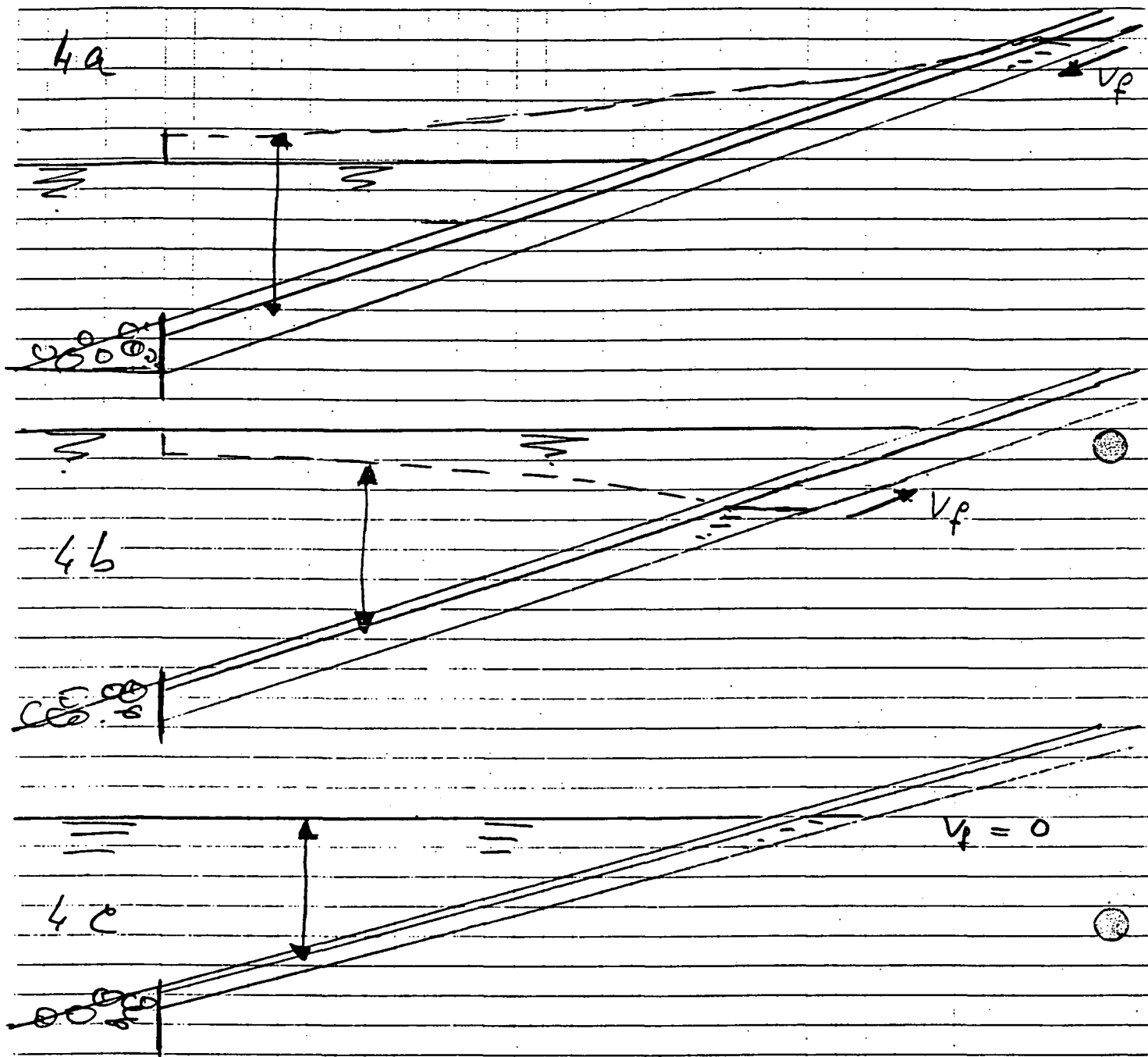
In Figuur 4c is de stijghoogteverdeling getekend voor het geval de freatische lijn gelijk is aan de buitenwaterstand. Alle stijghoogten zijn gelijk. Het water in het filter heeft dus geen snelheid en dus heeft het freatische lijn zijn maximale of zijn minimale stand. Dit betekent dat de snijpunten van de getijkromme met de freatische lijn (Figuur 5a) vallen op de tijdstippen waarop de freatische lijn een extreme waarde bereikt.

De afstand (in de tijd) van deze snijpunten tot de tijdstippen van maximale eb of vloed is dus gelijk aan de faseverschuiving van de beweging van freatische vlak !

Omdat uit de figuren 4a en 4b duidelijk is dat de stijghoogte van het water in het filter in een punt tussen teenconstructie en freatische lijn altijd tussen de buitenwaterstand en de freatische lijn moet liggen (Figuur 5b), **MOETEN ALLE STIJGHOOGTELIJNEN DOOR DEZEELFDE PUNTEN GAAN !!!**

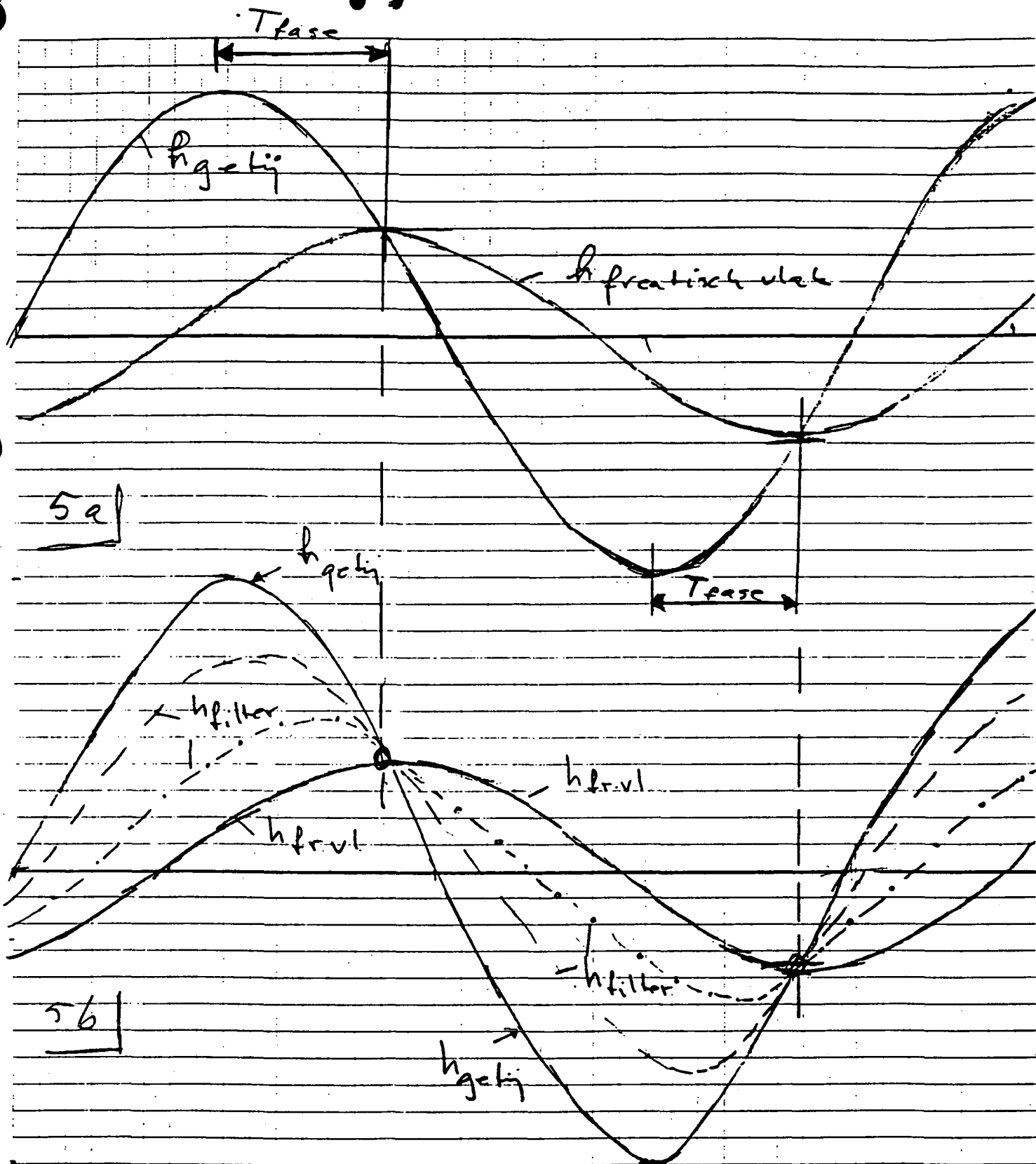
In de figuren 2b en 3b is te zien dat dit inderdaad (met een enkele kleine uitzondering, -meetfouten?-) het geval is.

Uit Figuren 2a en b volgt een faseverschuiving van ruim 3 uur, uit Figuren 3a en b een verschuiving van ruim 2 uur. Zouden we de faseverschuiving volgens de oude methode bepaald hebben, uit de vergelijking van een stukje meting van bijvoorbeeld de stijgende lijn van wsm 1 (Fig. 3b) met de getijlijn (Fig. 3a) dan zouden we een faseverschuiving van 10 à 20 minuten hebben



FIGUUR 4: Stijphooftevverloop als:

- a: freetisch vlak  $>$  buiten water
- b: freetisch vlak  $<$  buiten water
- c: freetisch vlak  $=$  buiten water

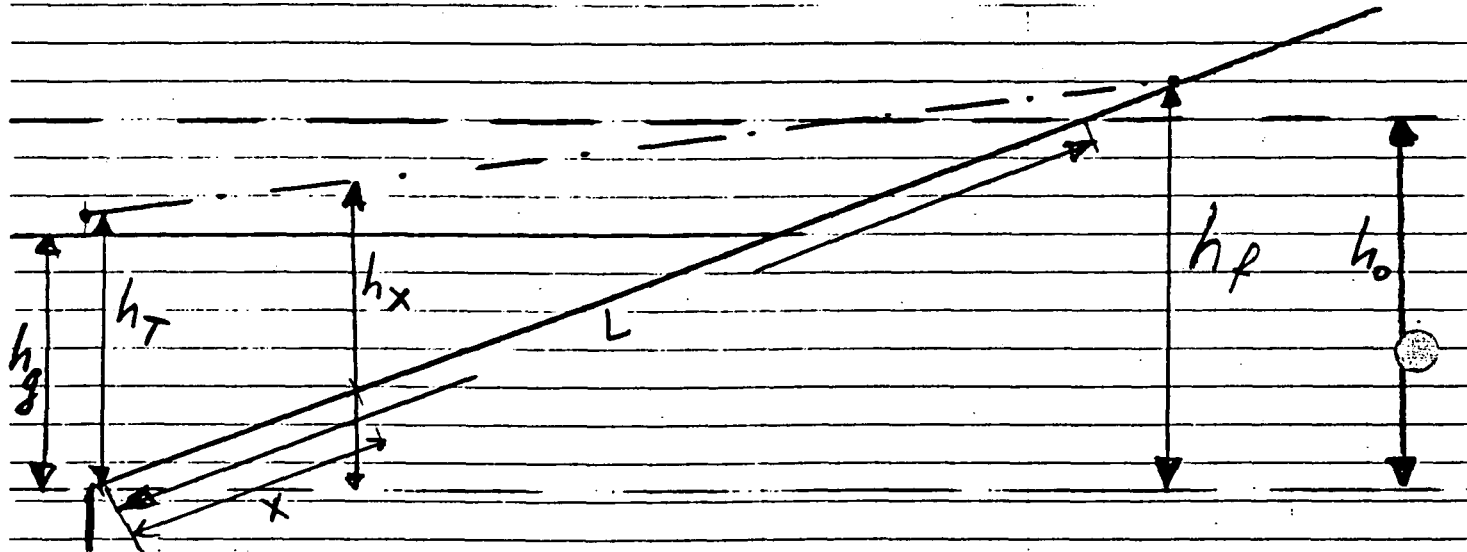


FIGUUR 5: Faseverschuiving en demping  
 a: Freestische lijn en getij  
 b: Als a, + stijphoopen van twee punten

gerapporteerd. Als de getijkromme een grote amplitude heeft t.o.v. de beweging van het freatisch vlak dan volgt uit bijvoorbeeld Figuur 4b dat als de buitenwaterstand een tijdje later (later dan de getekende situatie) is gedaald, ook de stijghoogten onder in het talud zullen zijn gedaald, hoewel de buitenwaterstand nog hoger is dan het freatisch vlak. Het is dus NIET WAAR dat de stijghoogte moet blijven toenemen zolang de buitenwaterstand hoger is dan het freatisch vlak. Dit is alleen het geval voor punten in de nabijheid van het freatisch vlak. In de volgende paragraaf zal dit nader uitgewerkt worden.

#### 4. Wiskundige uitwerking.

Het stijghoogteverloop van situaties als geschetst in de Figuren 4a en b is wiskundig te beschrijven met behulp van de formules in N 616 voor het geval met een willekeurige doorlatendheid van de teenconstructie. Hiermee is het mogelijk de stijghoogte in een willekeurig punt te beschrijven als functie van de buitenwaterstand en de hoogte van het freatisch vlak. Door voor deze waterstanden de getijvorm te nemen (bijvoorbeeld een sinus), is het mogelijk de stijghoogte in een willekeurig punt als functie van de tijd op te schrijven. De formules zijn behoorlijk ingewikkeld en zullen hier achterwege blijven. We zullen slechts als illustratie het geval beschouwen van een zetting met een lekengte groter dan de lengte van het talud tussen het buitenwaterniveau en de teen. In dat geval moet het verloop van de stijghoogte tussen teen en freatisch vlak lineair zijn (Figuur 6).



Figuur 6: Lineair verloop stijghoogte.

Beschrijven we nu de stijghoogten en waterstanden ten opzichte van een horizontaal vlak door de teenconstructie dan zijn:

- $h_g$  : de buitenwaterstand met getij.
- $h_T$  : de stijghoogte in het filter vlak achter de teen. Als de teen volledig doorlatend is is  $h_T$  gelijk aan  $h_g$ .
- $h_x$  : de stijghoogte in een willekeurig punt van het filter.
- $h_p$  : de hoogte van het freatisch vlak.
- $h_o$  : de gemiddelde waterstand.

Uit de figuur leidt men af (als de beweging van de het freatisch vlak klein vergeleken met het getij):

$$h_x = \frac{x}{L} h_f + \frac{L-x}{L} h_r$$

Door in deze formule de formules voor  $h_f$  en  $h_r$  (sinussen met verschillende amplitude en met een faseverschuiving) in te vullen ontstaat voor elke  $x$  een eigen sinus met een eigen amplitude en een eigen faseverschuiving. Voor kleine  $x/L$  is benadert die sinus de sinus van  $h_r$ , voor grote  $x/L$  (ongeveer 1), de sinus van het freatisch vlak. De sinus van de stijghoogte vlak achter de teen is ntuurlijk afhankelijk van de doorlatendheid van de teen. Bij een grote doorlatendheid is die gelijk aan de getijkromme.

APPENDIX C

C1. Notitie N 580

Lektijd bij natuurmeting Colijnsplaat, januari 1992

C2. Notitie N 621

Aanvulling op notitie N 580, juni 1992

bladnummer : - C1.1 -  
ons kenmerk: CF-332250  
datum : Januari 1991

## REFERENTIES

### NOTITIE LEKTIJD BIJ NATUURMETING COLIJNSPLAAT

Herziene versie van notitie N566

#### 1. Inleiding

Naar aanleiding van de TAW-vergadering d.d. 25-10-1991 en het rapport "Belasting en sterkte van toplagen" [1] is onderzocht of uit de resultaten van de natuurmeting te Colijnsplaat een indicatie verkregen kan worden omtrent de ligging van de freatische lijn in het filter. Dit blijkt inderdaad het geval.

In de TAW-vergadering d.d. 14-01-1992 bleek over notitie N566 nog enige verwarring te bestaan ten aanzien van de juiste plaatshoogte van de meters ten opzichte van elkaar, de juiste betekenis van het begrip lektijd en de oorzaak van het grote verschil tussen theorie en praktijk. In deze notitie zijn deze opmerkingen verwerkt.

#### 2. Het begrip "lektijd"

In notitie 526 van ir. B. Rigter [2] is het begrip lektijd gedefiniëerd:

$$T_k = \frac{2 \cdot \pi \cdot n \cdot \Lambda}{k \cdot \sin \alpha}$$

waarin:  $T_k$  : de lektijd (s)  
n : de porositeit (-)  
 $\Lambda$  : de leklengte (m)  
k : de doorlatendheid van het filter (m/s)  
 $\alpha$  : de taludhelling (°)

De lektijd geeft aan over welke tijdsperiode een verandering in buitenwaterstand gevolgd wordt door de freatische lijn in het filter. Naarmate de lektijd groter is, zal de variatie van de freatische lijn in het filter afnemen ten opzichte van de variatie van de buitenwaterstand. Bij grote lektijd is sprake van faseverschil ('naujling') en amplitudeverschil ('demping') van de freatische lijn ten opzichte van de buitenwaterstand.

#### 3. Theoretische waarde van de lektijd

Bij de doorlatendheidsmetingen [4] werd op een hoogte van NAP + 0.70 m een topplaagdoorlatendheid gemeten van  $5 \cdot 10^{-7}$  m/s. Met een leklengte van 13 m (zoals berekend in [3]), een topplagdikte van 0.25 m en een filterdikte van 1 m volgt voor de filterdoorlatendheid een waarde van  $4 \cdot 10^{-4}$  m/s.



bladnummer : - Cl.2 -  
ons kenmerk: CF-332250  
datum : Januari 1991

Met de gegevens van Colijnsplaat, zoals gebruikt in het rapport "Natuurmetingen te Colijnsplaat" [3] volgt:

$n = 0.30$   
 $A = 13 \text{ m}$   
 $k = 4 \cdot 10^{-4} \text{ m/s}$   
 $\alpha = 14^\circ$   
 $T_k = 253226 \text{ s} \approx 70 \text{ uur}$

De lektijd is ongeveer 5.5 maal zo groot als de getijperiode. Volgens notitie N526 moet nu de amplitude van de variatie in de freatische lijn duidelijk minder dan de helft van de variatie van de buitenwaterstand zijn en nauwelijks meer zichtbaar reageren op de buitenwaterstand.

#### 4. Referentieniveau van de meters

Ten aanzien van een juiste bepaling van het referentieniveau van de meters zijn enkele verduidelijkingen noodzakelijk. In figuur Cl.1 is de plaatsing van de waterspanningsmeters (onder de toplaag) en de drukopnemers (op het talud) weergegeven. De waterspanningsmeters die naast de drukopnemers op NAP + 0.54 m en NAP + 0.80 m zijn geplaatst, komen in werkelijkheid onder de blokken een afstand  $D \cdot \cos \alpha$  (= 0.24 m) lager te liggen. In figuur Cl.1 is dit weergegeven. Uit deze figuur kan ook de plaatshoogte van waterspanningsmeters en dichtstbijzijnde drukopnemer worden afgelezen. In onderstaande tabel is dit weergegeven:

Hoogte waterspanningsmeter	Hoogte dichtstbijzijnde drukopnemer
NAP + 0.30 m	NAP + 0.42 m
NAP + 0.56 m	NAP + 0.60 m

Tabel 1. Plaatshoogte van de meters

Ten aanzien van het bepalen van het referentieniveau van de meters moet duidelijk onderscheid gemaakt worden tussen drukopnemers en waterspanningsmeters:

- Waterspanningsmeters geven als ze zich geheel onder water bevinden een absolute waarde. De stijghoogte is dan dus gelijk aan de plaatshoogte + de meetwaarde. De meter is onder water geijkt. Daarom geeft de meter boven water aan dat er onderdruk heerst. Dit kan worden veroorzaakt door capillaire spanningen, of door uitzetting van het membraam. De meetwaarde geeft als de meter zich boven water bevindt geen indicatie voor de stijghoogte.

bladnummer : - C1.3 -  
ons kenmerk: CF-332250  
datum : Januari 1991

- Drukopnemers geven geen absolute waarde. Ze zijn dusdanig temperatuurgevoelig dat ijken geen zin heeft. Voor metingen met drukopnemers kan alleen een referentieniveau worden gevonden door te kijken wanneer ze onder water verdwijnen. Indien voor een meter tijdens een registratie blijkt, dat de meetwaarde afloopt, vervolgens constant blijft en dan weer oploopt, dan is het gedeelte dat constant blijft gelijk aan de plaatshoogte van het instrument. Door de gemiddelde waarde van de meting gelijk te stellen aan de hoogte van de stilwaterlijn, kan het niveau van de stilwaterlijn vastgesteld worden. Voor de metingen met de drukopnemers geldt steeds, dat de stijghoogte gelijk is aan de hoogte van de stilwaterlijn plus de variatie van de meetwaarde ten opzichte van de gemiddelde waarde. Indien van het op deze wijze verkregen referentieniveau wordt teruggerekend naar het moment dat de meter zich boven water bevindt, moet de gecorrigeerde waarde die de meter aangeeft ongeveer overeenkomen met de plaatshoogte.

Bij de natuurmeting te Colijnsplaat is om het half uur gedurende twee à drie minuten een registratie gedaan. De gemiddelde waarde van zo'n registratie is in deze notitie gebruikt.

##### 5. Bepaling van de lektijd uit de metingen

In tabel 2 is oor de onderste waterspanningsmeter (WSM) en de bijbehorende drukopnemer (DRO) uit de gemiddelde waarde van de metingen de stijghoogte  $\phi$  ten opzichte van NAP bepaald. Het resultaat is uitgezet in figuur C2.2.

Tijdstip [uur]	gem. waarde DRO [m]	$\phi$ DRO [m+NAP]	gem. waarde WSM [m]	$\phi$ WSM [m+NAP]
13:45	0.27	0.40	-0.19	0.30
14:15	0.29	0.42	-0.24	0.30
14:52	0.28	0.41	-0.25	0.30
15:20	0.31	0.44	-0.27	0.30
15:53	0.29	0.42	-0.27	0.30
16:30	0.29	0.42	-0.25	0.30
17:00	0.35	0.48	-0.26	0.30
17:30	0.60	0.73	0.30	0.60
18:00	0.91	1.04	0.56	0.86
18:33	1.16	1.29	0.80	1.10
19:00	1.26	1.39	0.97	1.27
19:30	1.31	1.44	1.06	1.36

Tabel 2. Stijghoogte op en onder het talud (DRO op NAP + 0.42 m en WSM op NAP + 0.30 m)

bladnummer : - C1.4 -  
ons kenmerk: CF-332250  
datum : Januari 1991

Het blijkt uit figuur C2.2, dat de buitenwaterstand door de freatische lijn in het filter gevolgd wordt. De metingen zijn met een interval van circa een half uur genomen. Er treedt een maximaal faseverschil op tussen de buitenwaterstand en de freatische lijn van iets meer dan een half uur (tussen 18:33 en 19:00 uur). Het maximale hoogte verschil tussen buitenwaterstand en freatische lijn is 19 cm (om 18:33 uur).

Dezelfde exercitie is uitgevoerd voor de bovenste waterspanningsmeter met bijbehorende drukopnemer (zie tabel 3 en figuur C3.3).

Tijdstip [uur]	gem. waarde DRO [m]	$\phi$ DRO [m+NAP]	gem. waarde WSM [m]	$\phi$ WSM [m+NAP]
13:45	0.10	0.59	-0.14	0.56
14:15	0.10	0.59	-0.27	0.56
14:52	0.11	0.60	-0.32	0.56
15:20	0.12	0.61	-0.34	0.56
15:53	0.12	0.61	-0.36	0.56
16:30	0.11	0.60	-0.38	0.56
17:00	0.12	0.61	-0.36	0.56
17:30	0.22	0.71	-0.00	0.56
18:00	0.53	1.02	0.26	0.82
18:33	0.78	1.27	0.50	1.06
19:00	0.89	1.38	0.66	1.22
19:30	0.95	1.44	0.75	1.31

Tabel 3. Stijghoogte op en onder het talud (DRO op NAP + 0.60 m en WSM op NAP + 0.56 m)

Ook hier volgt de freatische lijn in het filter de buitenwaterstand met een zekere vertraging. Het maximale faseverschil bedraagt circa drie kwartier (vergelijk 18:33 tot 19:30 uur). Het maximale stijghoogteverschil is in dit geval 21 cm (om 18:33 uur).

#### 6. Vergelijking gemeten en theoretische lek lengte

Het gevonden verschil tussen theoretische lektijd ( $\approx 70$  uur) en de lektijd die volgt uit de metingen ( $\approx 0.5$  à  $0.75$  uur) is erg groot. Bovendien is er geen sprake van een demping die zo groot is dat de variatie in freatische lijn duidelijk minder is dan de helft van de variatie in buitenwaterstand.

Een deel van dit verschil is te verklaren door de geconstateerde variatie in topplaagdoorlatendheid over de hoogte [4]. Op NAP + 0.70 m is de topplaagdoorlatendheid  $5 \cdot 10^{-7}$  m/s, terwijl op NAP + 2.75 m de doorlatendheid  $8 \cdot 10^{-5}$  m/s is. De meters zijn geplaatst op NAP + 0.5 m, respectievelijk NAP + 0.8 m. In dit gebied is de lek lengte bepaald op

bladnummer : - Cl.5 -  
ons kenmerk: CF-332250  
datum : Januari 1991

13 m. De waterstand tijdens de metingen neemt toe tot NAP + 1.45 m. Bij deze hogere waterstand kan de topplaagdoorlatendheid een factor 10 groter zijn, en dus de lek lengte een factor 3 kleiner. De lektijd neemt dan af tot een theoretische waarde van ongeveer 23 uur. Als ook de filterdoorlatendheid een factor 10 toeneemt, zal de lek lengte gelijk blijven, maar de theoretische waarde van de lektijd een factor 10 afnemen tot circa 7 uur. Om theoretische waarde en gemeten waarde van de lektijd met elkaar in overeenstemming te brengen moeten zowel filterdoorlatendheid als topplaagdoorlatendheid met een factor 100 toenemen. Dit is niet erg waarschijnlijk.

Een andere verklaring vóór (een deel) van het verschil ligt in het feit, dat er door golfwerking ook water hoger op het talud komt. Bij een filterdoorlatendheid van  $4 \cdot 10^{-4}$  m/s kan dit water een afstand van circa 0.72 m in een half uur afleggen, bij een filterdoorlatendheid van  $4 \cdot 10^{-3}$  m/s is dat 7.2 m. Er kan dus water van hoger op het talud richting de freatische lijn stromen.

Mogelijk is het verschil ook te verklaren uit toevoer van water via teen of basismateriaal naar het filter. Weliswaar wordt aangegeven dat de teen 'waterdicht' is, maar als de topplaagdoorlatendheid  $5 \cdot 10^{-7}$  m/s is, wat is dan 'dicht'?

#### 7. Simpele doorlatendheidsberekening

De bevindingen kunnen gecontroleerd worden met een simpele doorlatendheidsberekening. De teen van de zetting bevindt zich op NAP - 1 m. De helling van de glooiing is 1 : 4. Bij een waterstand van NAP + 1 m is het natte oppervlak  $8 \text{ m}^2/\text{m}'$ . Het stijghoogteverschil over de topplaag is 0.2 m. Met een blokdikte van 0.25 m is het verhang over de topplaag  $i = \Delta\phi/D = 0.8$ . De topplaagdoorlatendheid is  $5 \cdot 10^{-7}$  m/s. Het debiet door de topplaag is gelijk aan:

$$Q_{top} = k \cdot A \cdot i = 5 \cdot 10^{-7} \cdot 8 \cdot 0.8 = 3.2 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$$

In een half uur is dat:

$$V_{top} = Q_{top} \cdot 1800 = 5.76 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3$$

Het filter is 1 m dik en heeft een poriëngehalte van 30 %. Het volume water  $V_{top}$  dat door de topplaag heen stroomt is voldoende voor een verhoging van de freatische lijn van:

$$\Delta\phi = V_{top}/(1\text{m} \cdot 1\text{m} \cdot 0.3) = 0.02 \text{ m}$$

bladnummer : - C1.6 -  
ons kenmerk: CF-332250  
datum : Januari 1991

Hieruit blijkt duidelijk, dat bij een toplaagdoorlatendheid van  $5 \cdot 10^{-7}$  m/s de freatische lijn de buitenwaterstand niet zal kunnen volgen. Is de toplaagdoorlatendheid een factor 10 groter, dan zal is de maximum stijging van de freatische lijn ook 10 maal zo groot, en zal de buitenwaterstand redelijk gevolgd kunnen worden.

#### 8. Conclusies

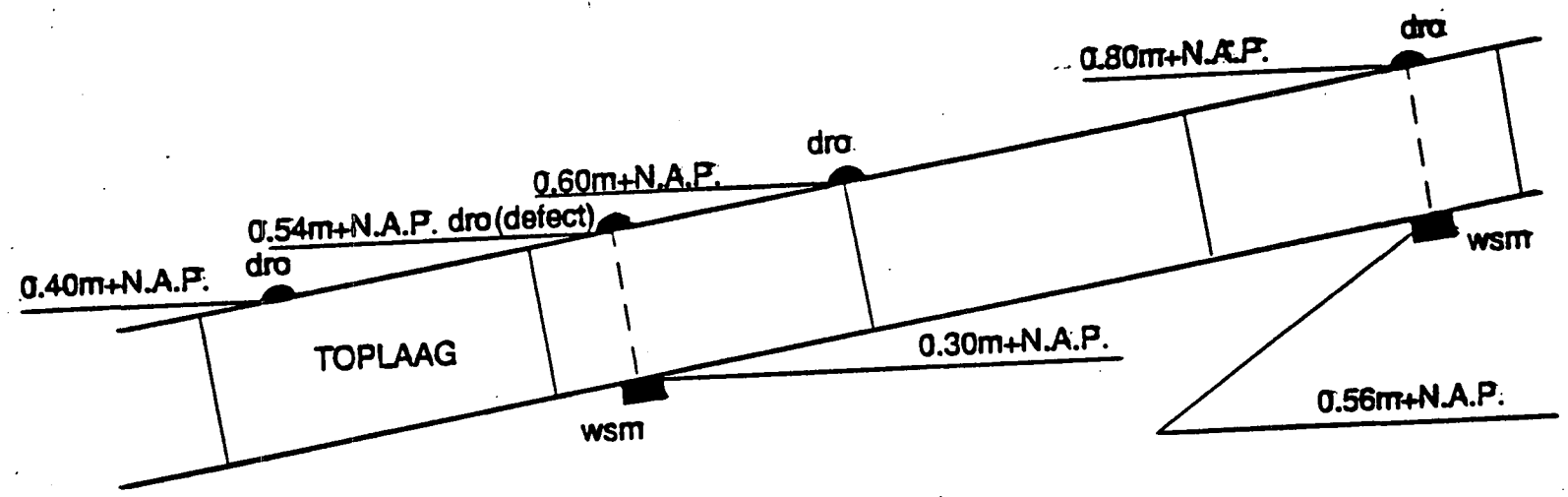
Uit de natuurmetingen te Colijnsplaat is af te leiden, dat de freatische lijn de buitenwaterstand volgt. Er is geen sprake van een groot amplitudeverschil tussen de buitenwaterstand en de freatische lijn. Er treedt een faseverschil op van ongeveer een half uur. Tussen de theoretische waarde van de lektijd en de berekende waarde op basis van de metingen zit een factor 100 verschil. Een deel van dit verschil kan verklaard worden uit de variatie van de doorlatendheid van de toplaag over de hoogte en toestroming van water hoger op het talud richting de freatische lijn. Wellicht kan ook water via teenconstructie of basismateriaal naar het filter stromen.

#### 9. Referenties

- [1] Belasting en sterkte van toplagen, onderzoeksmogelijkheden voor 1992, CO-328850/3, A. Bezuijen, oktober 1991
- [2] Invloed langperiodieke golven op stijghoogteverschil over toplaag met grote leklengte, TAW-A2 notitie N526, B. Rigter, augustus 1991
- [3] Natuurmeting te Colijnsplaat en simulatie met STEENZET/1+, CO-319330/5, TAW-A2 N557, T. Stoutjesdijk, oktober 1991
- [4] Tussentijdse rapportage eerste meetcampagne natuurmetingen op meetlocatie Noord Beveland, april t/m juli 1990, DWW rapport, A. Plooster

bladnummer : - Cl. 7 -  
ons kenmerk: CF-332250  
datum : Januari 1991

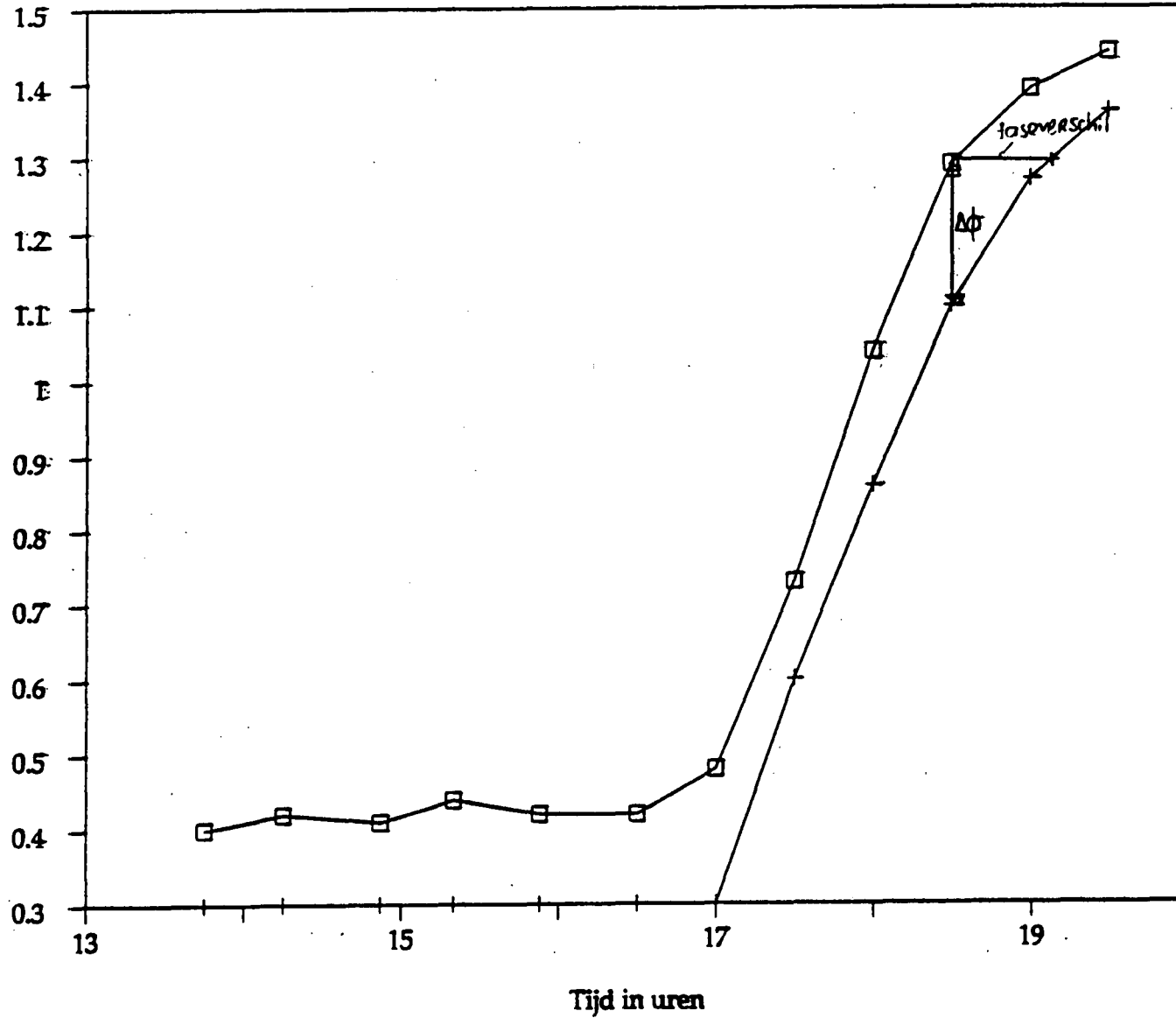
Figuur 1



# Stijghoogte op en onder talud

Natuurmeting Colijnsplaat

Stijghoogte in meter t.o.v. NAP



Figuur 2

bladnummer : - C1.8 -  
ons kenmerk: CF-332250  
datum : Januari 1991

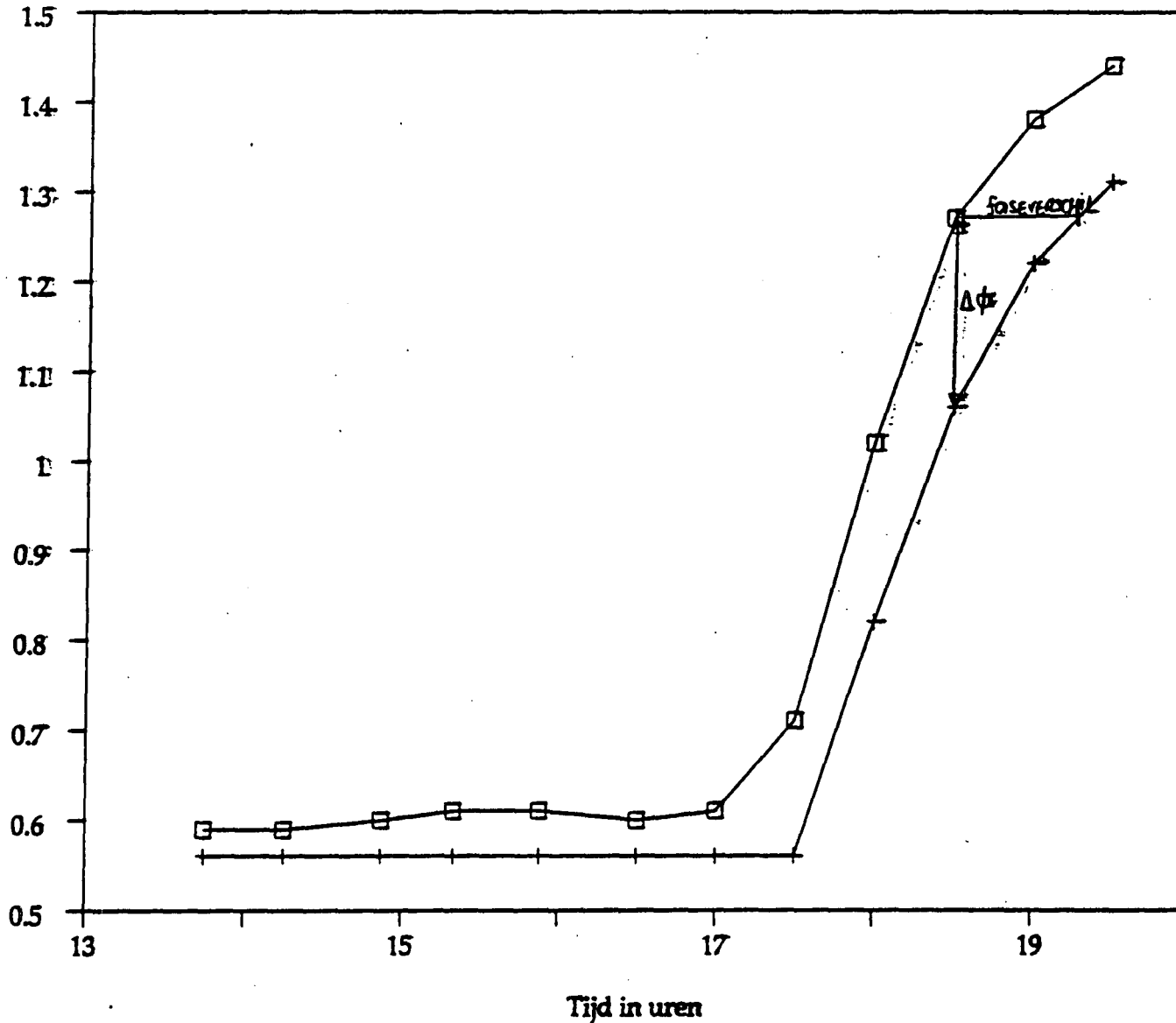
□ DRO op NAP +0.42 m

+ WSM op NAP +0.30 m

# Stijghoogte op en onder talud

Natuurmeting Colijnsplaat

Stijghoogte in meter t.o.v. NAP



□ DRO op NAP +0.60 m

+ WSM op NAP +0.56 m

Figuur 3

bladnummer : - Cl.9 -  
ons kenmerk: CF-332250  
datum : Januari 1991



bladnummer : - C2.1 -  
ons kenmerk: CO-332250  
datum : Juni 1992

Aanvulling op notitie N 580 "Lektijd bij Natuurmeting Colijnsplaat"

1. Het begrip lektijd

In notitie N526 van ir. B. Rigter is het begrip lektijd gedefiniëerd:

$$T_k = \frac{2 \cdot \pi \cdot n \cdot \Lambda}{k \cdot \sin \alpha}$$

waarin  $T_k$  : de lektijd (s)  
n : de porositeit (-)  
 $\Lambda$  : de lek lengte (m)  
k : de doorlatendheid van het filter (m/s)  
 $\alpha$  : de taludhelling (°)

Met de gegevens van Colijnsplaat wordt de waarde van de lektijd:

$$\begin{aligned} n &= 0.30 \\ \Lambda &= 13 \text{ m} \\ k &= 4 \cdot 10^{-4} \text{ m/s} \\ \alpha &= 14^\circ \\ T_k &= 253226 \text{ s} \approx 70 \text{ uur} \end{aligned}$$

De lektijd is ongeveer 5.5 maal zo groot als de getijperiode. Volgens notitie N 526 moet nu de amplitude van de variatie van de freatische lijn in het filter duidelijk minder dan de helft van de variatie van de buitenwaterstand zijn en nauwelijks meer zichtbaar reageren op de buitenwaterstand.

2. Bepaling lektijd uit de metingen

In notitie N 580 is de lektijd geïnterpreteerd als zijnde het faseverschil tussen binnenwaterstand en buitenwaterstand. Dit is onjuist. Zoals blijkt uit notitie N 602, "Invloed van geulen op de stabiliteit van steenzettingen" van ir. B. Rigter, kan het faseverschil wel omgerekend worden naar een lektijd, volgens:

$$T_k = T_g \cdot \tan\left(\frac{2 \cdot \pi \cdot \tau}{T_g}\right)$$

waarin  $T_k$  = de lektijd (s)  
 $T_g$  = periode van het getij (s)  
 $\tau$  = faseverschil (s)

Ingevuld komt een faseverschil van 0.5 à 0.75 uur overeen met een lektijd van 3 à 5 uur.

bladnummer : - C2.2 -  
ons kenmerk: CO-332250  
datum : Juni 1992

3. Vergelijking theoretische en gemeten waarde van de lektijd

Tussen theoretische lektijd ( $\approx 70$  uur) en gemeten waarde van de lektijd (3 à 5 uur) zit een aanzienlijk verschil. Dit verschil kan verklaard worden door:

- als zowel top- als filterdoorlatendheid een factor 10 hoger zijn dan hier is aangenomen, zal de theoretische lektijd circa 7 uur bedragen.
- toestroming van water dat door golven hoger op het talud komt (hoger op het talud is de toplaag doorlatender)
- toestroming van water door teenconstructie of basismateriaal

4. Conclusie

De demping en faseverschuiving van de freatische lijn in het filter ten opzichte van het getij is kleiner dan verwacht zou worden op grond van de theoretische waarde van de lektijd. Tussen theoretische waarde en gemeten waarde van de lektijd zit ongeveer een factor 10 verschil. Dit verschil kan verklaard worden door variatie van de doorlatendheden met de hoogte of door toestroming van water door de teen of het basismateriaal.

APPENDIX B:

Getij en freatische lijn Afsluitdijk

CO-341960/11  
Mei 1993

OPEN TALUDBEKLEDINGEN  
GETIJ EN FREATISCHE LIJN AFSLUITDIJK  
CONCEPT-VERSLAG

CO-341960/11  
mei 1993  
Std/afsluit.gty

Opgesteld in opdracht van:  
Rijkswaterstaat  
Dienst Weg- en Waterbouwkunde

AFDELING GRONDCONSTRUCTIES  
projectleider: ir. T. Stoutjesdijk  
projectbegeleider: ir. A. Bezuijen

bladnummer : - 1 -  
ons kenmerk: CO-341960/11  
datum : mei 1993

INHOUD:	blz.:
1. INLEIDING	1
2. GEGEVENS VOOR DE BEREKENINGEN	2
2.1 Golfdrukken op de toplaag	2
2.2 Stijghoogtes in de filterlaag	2
2.3 Voorkennis uit het onderzoek "Natuurmetingen"	3
2.4 Aanpassing van de STEENZET-versie voor lange golven	5
3. BEPALING LEKTIJD	7
3.1 Berekeningen	7
3.2 Beschouwing op basis lektijdtheorie	8
4. CONCLUSIES	10
REFERENTIES	11
BIJLAGEN	

bladnummer : - 1 -  
ons kenmerk: CO-341960/11  
datum : mei 1993

## 1. INLEIDING

Op 12 november 1992 vond de derde natuurmeting plaats. Locatie was ditmaal de Afsluitdijk, juist ten westen van Breezanddijk. Hierbij werden gedurende een periode van 7,5 uur zowel golfdrukken op het talud als waterspanningen in de filterlaag gemeten. Om het half uur werd gedurende 80 seconden met 25 Hz gemeten met in totaal 12 drukopnemers en 4 waterspanningsmeters. Het gemiddelde van een meetregistratie van 80 seconden geeft een indicatie omtrent de gemiddelde stijghoogteverdeling op en onder de toplaag. Met behulp van de stijghoogteverdeling op het talud op verschillende tijdstippen kan, bij gegeven geometrische en fysische eigenschappen van de constructie, worden berekend hoe de stijghoogteverdeling onder de toplaag is. Voor dit doel is een variant van het STEENZET/1+ programma ontwikkeld [lit. 3]. Deze STEENZET-versie kan met lang-periodieke golven rekenen.

In dit rapport wordt met behulp van de drukverdeling op de toplaag op verschillende tijdstippen berekend wat de reactie is onder de toplaag. Deze reactie is ook gemeten. Door de gemeten en berekende waarden te vergelijken kan worden bepaald wat de doorlatendheden van de constructie zijn en tevens wordt de waarde voor de lektijd gevonden. De lektijd geeft aan of een verandering in buitenwaterstand snel dan wel langzaam wordt gevolgd door het water in de filterlaag.

bladnummer : - 2 -  
ons kenmerk: CO-341960/11  
datum : mei 1993

## 2. GEGEVENS VOOR DE BEREKENINGEN

### 2.1 Golfdrukken op de toplaag

Op de toplaag bevond zich een meetbalk met daarop gemonteerd 12 drukopnemers. Na correctie voor nulstandsuitslag en plaatshoogte, en middeling over de tijd, geven deze meters een gemiddelde stijghoogte in meters ten opzichte van NAP. Dit resulteert in een stijghoogteverdeling op het talud. Een voorbeeld hiervan is gegeven in bijlage 1. Deze stijghoogteverdeling op het talud is op verschillende tijdstippen gemeten. Dit is in principe de golfrandvoorwaarde. Ten behoeve van verwerking met het STEENZET-programma moet de randvoorwaarde op de tijdstippen tussen twee metingen echter ook bekend zijn. De waarden tussen twee tijdstippen zijn rechtlijnig geïnterpoleerd. De gemeten stijghoogte is benaderd met behulp van twee lijnstukken (zie bijlage 1). Het ene lijnstuk geeft de stilwaterlijn aan, het andere de invloed van de golfoploop op de gemiddelde stijghoogte. Hierbij is er rekening mee gehouden, dat de drukopnemers die droogvallen een druk aangeven die overeenkomt met de bovenkant van de meetbalk. De drukopnemers die regelmatig droogvallen geven een te hoge gemiddelde stijghoogte. Hoe verder boven de stilwaterlijn hoe groter de fout. Hiervoor is gecorrigeerd door alleen als er water boven de meter staat (de meter geeft een uitslag) de waarden bij het gemiddelde te tellen en de overige waarden gelijk te stellen aan de plaatshoogte van de bovenkant talud.

De drukopnemers die zich het laagst op het talud bevinden geven een indicatie van de stilwaterlijn. Op deze wijze kan het verloop van de (gemiddelde) stilwaterstand als functie van de tijd worden afgeleid. Dit is gegeven in bijlage 3. Hierin zijn ook de getijden te zien van de meetstations Den Oever en Kornwerderzand.

### 2.2 Stijghoogtes in de filterlaag

Het verloop van de buitenwaterstand in de tijd leidt tot een verandering in de ligging van de freatische lijn in de filterlaag. Dit is gemeten met behulp van waterspanningsmeters in de filterlaag. Deze meters werden aangebracht door gaten in de toplaag te boren met een kernboor. Deze gaten werden vervolgens gedicht met PUR-schuim. Op deze wijze werden in totaal 4 waterspanningsmeters aangebracht. Eén van deze meters bleek niet goed te werken. Van de waterspanningsmeter die het laagst was aangebracht is halverwege de metingen de kabel afgebroken door de golfkrachten. Bij de overige twee meters bleek dat de gaten in de toplaag enigzins lek waren, doordat het PUR-schuim niet volledig was uitgehard voordat het water op het talud kwam. In lit. 1 wordt beargumenteerd dat dit, althans voor wat betreft de korte golven, de meting niet al te zeer heeft beïnvloed.

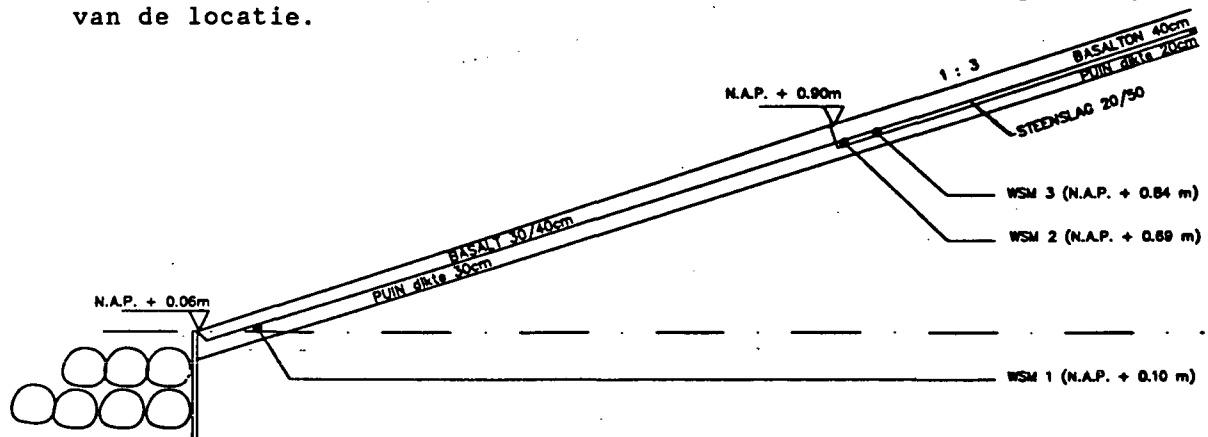
In bijlage 2 wordt de gemiddelde uitslag als functie van de tijd gegeven. Deze is nog niet gecorrigeerd voor nulpuntsuitslag. De reden hiervoor is, dat er voor deze correctie verschillende mogelijkheden zijn, te weten:

- de ijking. Bij de ijking wordt de nulpuntscorrectie bepaald. In het verleden is al meermalen gebleken, dat, als de meters enige tijd opgeslagen hebben gelegen, er sterk van de ijking afwijkende waarden worden gevonden. Omdat er voor het kunnen uitvoeren van een natuurmeting gewacht moet worden op storm, kan de periode tussen ijking en uitvoeren van de meting maanden bedragen. Vanwege de grote tijdsdruk bij het installeren is er veelal geen tijd vlak voor de meting te ijken.
- de waarde bij droogvallen van de meters. Als de meters droogvallen geven ze over het algemeen nog een waarde aan. Deze waarde kan gebruikt worden als nulpuntscorrectie. In sommige gevallen kunnen de meters echter nog een verloop in de tijd te zien geven. In dat geval is de waarde voor de correctiefactor niet duidelijk.

Het blijkt dus moeilijk de gemiddelde waarde van de waterspanningsmeters om te rekenen naar stijghoogtes. Dat maakt het vrijwel onmogelijk de ligging van de freatische lijn uit de metingen te bepalen. Er is echter een uitweg. Uit de metingen op de diverse tijdstippen is wel het verschil in stijghoogte te bepalen, ofwel  $d\phi/dt$  is bekend. Dit is een functie van de lektijd. Als in de simulatie de lektijd juist is gekozen, dan klopt  $d\phi/dt$ . De ligging van de freatische lijn volgt dan uit de STEENZET-berekening. Deze redenering wordt bij de simulatie van de meting gevolgd.

### 2.3 Voorkennis uit het onderzoek "Natuurmeting"

Uit het verslag van de natuurmeting van de Afsluitdijk [lit. 2] is al het een en ander bekend van de geometrische en fysische eigenschappen van de locatie.



Figuur 1. Schets van de constructie-opbouw



De toplaag in de onderste zône bestaat uit basalt, 30 tot 40 cm dik. Hieronder ligt een laag puin van 30 cm dikte. Boven de basalt bevindt zich een toplaag van basalt van 40 cm dikte. Onder de basalt ligt een 10 cm dikke laag steenslag 20/50 op puin (20 cm dik).

Een belangrijk gegeven is de toplaagdoorlatendheid van de basalt.

Deze is bepaald uit in-situ metingen op  $7.4 \cdot 10^{-3}$  m/s. Voorts is de lek lengte van de onderste zone (basalt op puin) in de analyse van de natuurmeting bepaald op 5 à 7 m en de lek lengte van de zône daarboven (basalt op steenslag op puin) is ongeveer 0,5 m. Uitgaande van deze gegevens valt een eerste schatting te maken van de doorlatendheden van basalt, puin en steenslag. Hiertoe wordt de volgende redenering gevolgd:

a. Stel de lek lengte van de onderste zone is 6 m. Dan geldt:

$$(1) \quad \Lambda(\text{basalt}) = \sqrt{\left(\frac{D_{\text{basalt}} \cdot b_{\text{puin}} \cdot k_{\text{puin}}}{k_{\text{basalt}}}\right)} = \sqrt{\left(\frac{0.35 \cdot 0.30 \cdot k_{\text{puin}}}{k_{\text{basalt}}}\right)} = 6 \text{ m}$$

De verhouding tussen de doorlatendheid van het puin en van het basalt is nu bekend:

$$(2) \quad \frac{k_{\text{puin}}}{k_{\text{basalt}}} = 343$$

b. Stel de lek lengte van het basalt gedeelte is 0,5 m. Dan zijn er twee mogelijkheden. Als de doorlatendheid van de laag steenslag veel groter is dan de doorlatendheid van de laag puin, dan geldt:

$$(3) \quad \Lambda(\text{basalton}) = \sqrt{\left(\frac{D_{\text{basalton}} \cdot b_{\text{steen}} \cdot k_{\text{steen}}}{k_{\text{basalton}}}\right)} = \sqrt{\left(\frac{0.4 \cdot 0.1 \cdot k_{\text{steen}}}{7.4 \cdot 10^{-3}}\right)}$$

ofwel:  $k_{\text{steen}} = 4.6 \cdot 10^{-2}$  m/s en  $k_{\text{puin}} \ll k_{\text{steen}}$ .

Als de puin en het steenslag vergelijkbare doorlatendheden hebben, of het puin is doorlatender, dan moet rekening gehouden worden met beide lagen:

$$(4) \quad k_{\text{steen}} \cdot b_{\text{steen}} + k_{\text{puin}} \cdot b_{\text{puin}} = \Lambda^2(\text{basalton}) \cdot \frac{k_{\text{basalton}}}{D}$$

Hieruit volgt:

$$0.1m \cdot k_{\text{steen}} + 0.2m \cdot k_{\text{puin}} = 4.6 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$$

De maximale waarde voor  $k_{\text{steen}}$  ( $k_{\text{puin}}$  is in dat geval verwaarloosbaar) is dus  $4.6 \cdot 10^{-2} \text{ m/s}$ .

Aan de hand van bovenstaande redenering zijn nu drie gevallen ontwikkeld:

Geval 1: De doorlatendheid van de steenslag is veel groter dan de doorlatendheid van puin. Vergelijking (2) en (3) worden toegepast. Dit houdt bijvoorbeeld in:

$$k_{\text{basalton}} = 7.4 \cdot 10^{-3} \text{ m/s}$$

$$k_{\text{steen}} = 4.6 \cdot 10^{-2} \text{ m/s}$$

$$k_{\text{puin}} \ll k_{\text{steen}}, \text{ bijvoorbeeld } 4.6 \cdot 10^{-3} \text{ m/s}$$

$$k_{\text{basalt}} = k_{\text{puin}}/343 = 1.3 \cdot 10^{-5} \text{ m/s.}$$

Geval 2: Doorlatendheid van puin en steenslag is gelijk. Dan is:

$$k_{\text{basalton}} = 7.4 \cdot 10^{-3} \text{ m/s}$$

$$k_{\text{steen}} = k_{\text{puin}} = 1.5 \cdot 10^{-2} \text{ m/s}$$

$$k_{\text{basalt}} = 4.5 \cdot 10^{-5} \text{ m/s}$$

Geval 3: Doorlatendheid van puin is veel groter dan de doorlatendheid van steenslag. Vergelijking (2) en (4) worden toegepast. Dit resulteert bijvoorbeeld in:

$$k_{\text{basalton}} = 7.4 \cdot 10^{-3} \text{ m/s}$$

$$k_{\text{steen}} = 2.2 \cdot 10^{-3} \text{ m/s}$$

$$k_{\text{puin}} = 2.2 \cdot 10^{-2} \text{ m/s}$$

$$k_{\text{basalt}} = 6.4 \cdot 10^{-5} \text{ m/s}$$

Met deze gegevens in het achterhoofd is de simulatie uitgevoerd. In de redenering is impliciet verondersteld, dat het puin onder de basalt dezelfde doorlatendheid heeft als het puin onder het basalton. Het is zeker niet ondenkbaar dat hier ook een verloop in doorlatendheid over de hoogte is.

bladnummer : - 6 -  
ons kenmerk: CO-341960/11  
datum : mei 1993

#### 2.4 Aanpassing van de STEENZET-versie voor lange golven

Om een zetting te kunnen invoeren waarbij de filterlaag in verschillende gedeelten anders is opgebouwd, was een aantal aanpassingen aan de STEENZET-versie voor lang-periodieke golven noodzakelijk. Het principe van deze aanpassingen is vrijwel gelijk aan die voor het invoeren van een variërende toplaagdoorlatendheid over de hoogte [lit. 3]. Het belangrijkste verschil is, dat hier bij het oplosschema 3 punten in de filterlaag worden betrokken, zodat bij de overgang in doorlatendheid een discontinuïteit kan ontstaan. Dit is opgelost door in de iteratieprocedure de doorlatendheid precies op de overgang te middelen. Op deze wijze is de overgang minder scherp en de kans op instabiele verschijnselen gering.

### 3. BEPALING LEKTIJD

#### 3.1 Berekeningen

De gevallen 1, 2 en 3 zijn doorgerekend. De berekende freatische lijn is weergegeven in bijlage 4. Het blijkt, dat in alle drie gevallen de freatische lijn belangrijk hoger ligt dan verwacht. Uit de berekening blijkt dat de freatische lijn niet alleen de buitenwaterstand volgt, maar zelfs 20 à 30 cm daarboven ligt. Dit wordt veroorzaakt door golfoploop. De gemiddelde druk op het talud bij golven is hoger dan de gemiddelde druk bij een horizontale waterspiegel. Dit is ook te zien in bijlage 1.

De rekenresultaten van de drie gevallen liggen vrijwel over elkaar heen. De lektijd voor geval 1, 2 en 3 voor het bovenste gedeelte van de zetting is in de orde grootte van enkele honderden seconden. Dit betekent, dat in alle drie gevallen de doorlatendheden van het bovenste deel van de zetting zo groot zijn, dat er evenwicht is met de golfdruk op het talud. Het verloop van de stijghoogte over de hoogte van de zetting is gering, niet meer dan enkele centimeters over een afstand van enkele meters. Kennelijk is de freatische lijn voortdurend vrijwel in evenwicht met de golfrandvoorwaarde. In bijlage 5 is voor geval 2 het verloop van de stijghoogte op drie hoogtes in de filterlaag gegeven. Dit is vergeleken met de gemeten waarden. Hierbij is gekeken of  $d\phi/dt$  van de meting overeenkomt met die van de berekening. De beide verlopen kunnen redelijk over elkaar gelegd worden. Als de buitenwaterstand zakt ontstaat enig verschil; de meting geeft aan dat de zetting langzamer leegloopt dan uit de berekening blijkt. Dit laatste verschijnsel hangt vooral samen met de lektijd van het onderste deel van de zetting.

Omdat de doorlatendheden van toplaag en filter in het gedeelte met de basalt bekleding min of meer zijn vastgelegd, kan de freatische lijn in de berekening alleen nog gevariëerd worden door de teenconstructie doorlatender te maken. Door de doorlatendheid van de teen te vergroten, kan wellicht de gemiddelde ligging van de freatische lijn worden beïnvloed. Berekeningen zijn gemaakt met een doorlatendheid van de onderste spleet die respectievelijk 10, 100 en 1000 maal zo groot is gekozen als de doorlatendheid van de andere spleten. Overigens wordt hierbij opgemerkt dat op deze wijze niet wordt aangenomen dat juist deze spleet zoveel doorlatender is, maar dat op deze wijze alleen de doorlatendheid van het teenschot in rekening wordt gebracht.

Het resultaat van deze berekeningen is, dat de freatische lijn vrijwel overal even hoog blijft als bij de berekening met een ondoorlatende teenconstructie (zie bijlage 6). Het enige dat verandert is het tijdstip waarop de meters droogvallen: de doorlatendheid van de teenconstructie bepaalt hoe snel de zetting leegloopt als het getijniveau zakt.

Ten slotte is een aantal berekeningen uitgevoerd, waarbij de doorlatendheden van zowel het gedeelte met de basaltbekleding als het gedeelte met de basaltbekleding een factor 10 of een factor 50 zijn verkleind (zie bijlage 7). Hieruit blijkt, dat ook hier weinig invloed van uitgaat als de waterstanden hoog zijn. Kennelijk is de

basaltonbekleding zo doorlatend, dat zelfs een vermindering van de doorlatendheid met een factor 50 geen invloed heeft. De basaltbekleding heeft in alle gevallen slechts invloed op de snelheid waarmee de freatische lijn zakt als de zetting leegloopt. Hiermee kan het tijdstip van droogvallen van de meters worden veranderd. Dit tijdstip is echter ook een functie van de teendoorlatendheid.

### 3.2 Beschouwing op basis lektijdtheorie

Het verloop van de freatische lijn kan ook theoretisch worden benaderd. De theoretische relaties hiervoor zijn afgeleid door ir. B. P. Rigter. In [lit. 3] zijn de betreffende notities opgenomen. Een probleem is, dat de doorlatendheden variëren over de hoogte. Deze discontinuïteit bemoeilijkt een analytische benadering. Het is wel mogelijk de lektijd af te leiden uit de meting. Hiervoor wordt de volgende relatie gebruikt:

$$\frac{dh_f}{dt} = \frac{2 \cdot \pi}{T_k} \cdot (h_f - h_0)$$

met:  $h_f$  = waterstand filter  
 $h_0$  = buitenwaterstand  
 $T_k$  = lektijd  
 $t$  = tijd

De basisformule voor de lektijd, uitgaande van een oneindig lang talud met een uniforme bekleding en een ondoorlatende teenconstructie, luidt:

$$T_k = \frac{2 \cdot \pi \cdot n \cdot \Lambda}{k \cdot \sin \alpha}$$

met:  $n$  = poriëngehalte van het filter  
 $\Lambda$  = de lek lengte van de constructie  
 $k$  = de doorlatendheid van het filter  
 $\alpha$  = de taludhelling

Voor de doorlatendheden zoals deze in de berekeningen zijn gebruikt varieert de lektijd van het basalt-gedeelte tussen 1,5 en 22 uur en van het basalton-gedeelte tussen 200 seconden en 2 uur.

De buitenwaterstand is bepaald door de gemiddelde stijghoogte over het natte deel van het talud te nemen. Dit is hoger dan de stilwaterlijn door de invloed van golfoploop.

De waarde voor  $dh_f/dt$  kan worden afgeleid uit de meting. Vervolgens wordt bekeken welke waarde voor de lektijd hier het beste bij past. Op deze wijze worden waarden gevonden voor de lektijd die variëren van 1,5 tot 8 uur.

Een bijkomend probleem is, dat er in feite geen sprake is één lektijd voor de constructie. Er moet ten minste onderscheid gemaakt worden in

bladnummer : - 9 -  
ons kenmerk: CO-341960/11  
datum : mei 1993

de eigenschappen van het basalt-gedeelte en die van het basalton-gedeelte. Verwacht zou worden, dat bij hoge waterstanden de lektijd vooral bepaald wordt door de eigenschappen van het basalton-gedeelte, terwijl bij lage waterstanden de eigenschappen van het basalt-gedeelte overheersend is. Hierdoor ontstaat het beeld dat de lektijd van de constructie continu varieert met de waterstand. Uit de metingen spreekt wel een trend dat de eigenschappen van het basalt-gedeelte resulteren in een grotere lektijd dan die van het basalton-gedeelte, maar een goede bepaling van dit verschil kan niet gemaakt worden.

#### 4. CONCLUSIES

Het narekenen van de gemeten stijghoogtes in de filterlaag van de natuurmeting op de Afsluitdijk is niet zonder problemen gebleken. Hier-voor kunnen een aantal oorzaken worden aangewezen. Deze punten en de overige conclusies worden onderstaand toegelicht:

- aangetoond is dat de gemeten doorlatendheid van het basaltongedeelte, gecombineerd met de korte lek lengte van dit deel van het talud, in alle berekeningsgevallen leidt tot een freatische lijn die boven het stilwaterniveau ligt. Dit komt overeen met een zeer kleine lek lengte en een drukverdeling die gemiddeld hoger is dan de stilwaterlijn van het getij. Dit laatste wordt uiteraard veroorzaakt door de golfoploop.
- bij deze hoge doorlatendheden heeft een variatie in externe drukrandvoorwaarde directe invloed op de ligging van de freatische lijn. De nauwkeurigheid van de bepaling van de stijghoogtes in de filterlaag wordt dan ook mede bepaald door de nauwkeurigheid waarmee de golf randvoorwaarde kan worden vastgesteld.
- de snelheid waarmee de freatische lijn zakt als de buitenwaterstand zakt is een functie van zowel de doorlatendheid van de basaltbekleding en puinlaag, als van de doorlatendheid van de teenconstructie. Dit maakt het vrijwel onmogelijk de individuele doorlatendheden van teen, basalt en puin vast te stellen.
- de nulpuntscorrectie van de waterspanningsmeters is een probleem. Als de meters niet kort voor de meting zijn geijkt, dan is de nulpuntscorrectie uit de ijking niet meer van toepassing. Ook de waarde die de meters aangeven bij droogvallen kon in dit geval niet worden gebruikt, omdat de meters sterk bleken te verlopen. Hierdoor kon voor het narekenen van de meting alleen de verandering van de stijghoogte in de tijd worden gebruikt, en niet de absolute waarde of het niveau ten opzichte van NAP. Omdat dit directe invloed heeft op de kwaliteit van de voorspelling is dit een les voor de toekomst. Bij eventuele volgende metingen moet de nulpuntscorrectie van de waterspanningsmeters voor en na de meting ter plaatse bepaald worden.
- in alle berekeningen liggen de freatische lijn en de stijghoogtes van alle drie de waterspanningsmeters op vrijwel gelijke hoogte. Uit het verloop van de stijghoogte over de zetting kan alleen worden geconcludeerd, dat de lek lengte klein is.
- uitgebreide berekeningen aan een constructie met een korte lektijd zijn weinig zinvol. De reactie wordt vrijwel geheel bepaald door de opgelegde golf randvoorwaarde. Een variatie in doorlatendheden van de bekleding en de filterlaag met een factor 10 of 50 heeft veel minder invloed op de ligging van de freatische lijn. De natuurmeting bij storm is in dat geval niet de aangewezen methode om de freatische lijn nauwkeurig genoeg te bepalen.

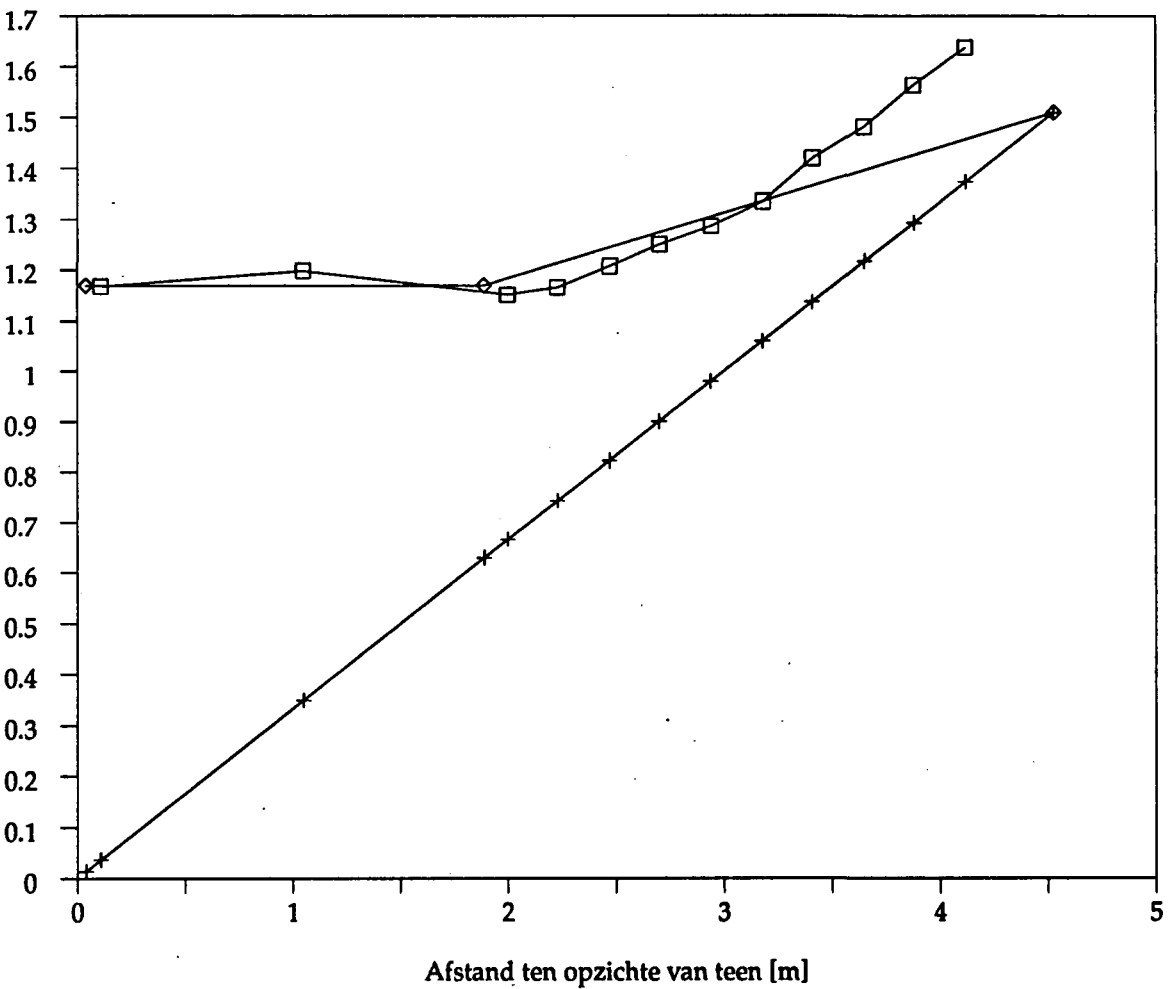
bladnummer : - 11 -  
ons kenmerk: CO-341960/11  
datum : mei 1993

#### REFERENTIES

- [1] Bundeling kennis natuurmetingen. Grondmechanica Delft, CO-341960/6. Augustus 1993.
- [2] Rapport betreffende natuurmetingen op de Afsluitdijk ten behoeve van steenzetonderzoek. Basaltonzuilen voorjaar 1991. Fugro b.v., M-0067. Oktober 1991.
- [3] Lang-periodieke golven en variërende doorlatendheid in STEENZET/1+. Grondmechanica Delft, CO-335150/7. November 1992.



**BIJLAGEN**



stijghoogte, resp. hoogte [m+NAP]

□ phi DRO's

+ bovenkant talud

◇ benadering



**GRONDMECHANICA  
DELFT**

Postbus 69, 2600 AB Delft Nederland  
Telefoon (015) 69 35 00

Telefax (015) 61 08 21  
Telex 38234 soil nl

Getijde en treatische lijn Afsluitdijk

Golfrandvoorwaarde, gemeten en benaderd

datum  
April 1993

CO-341960

BIJL. 1

get.  
Std

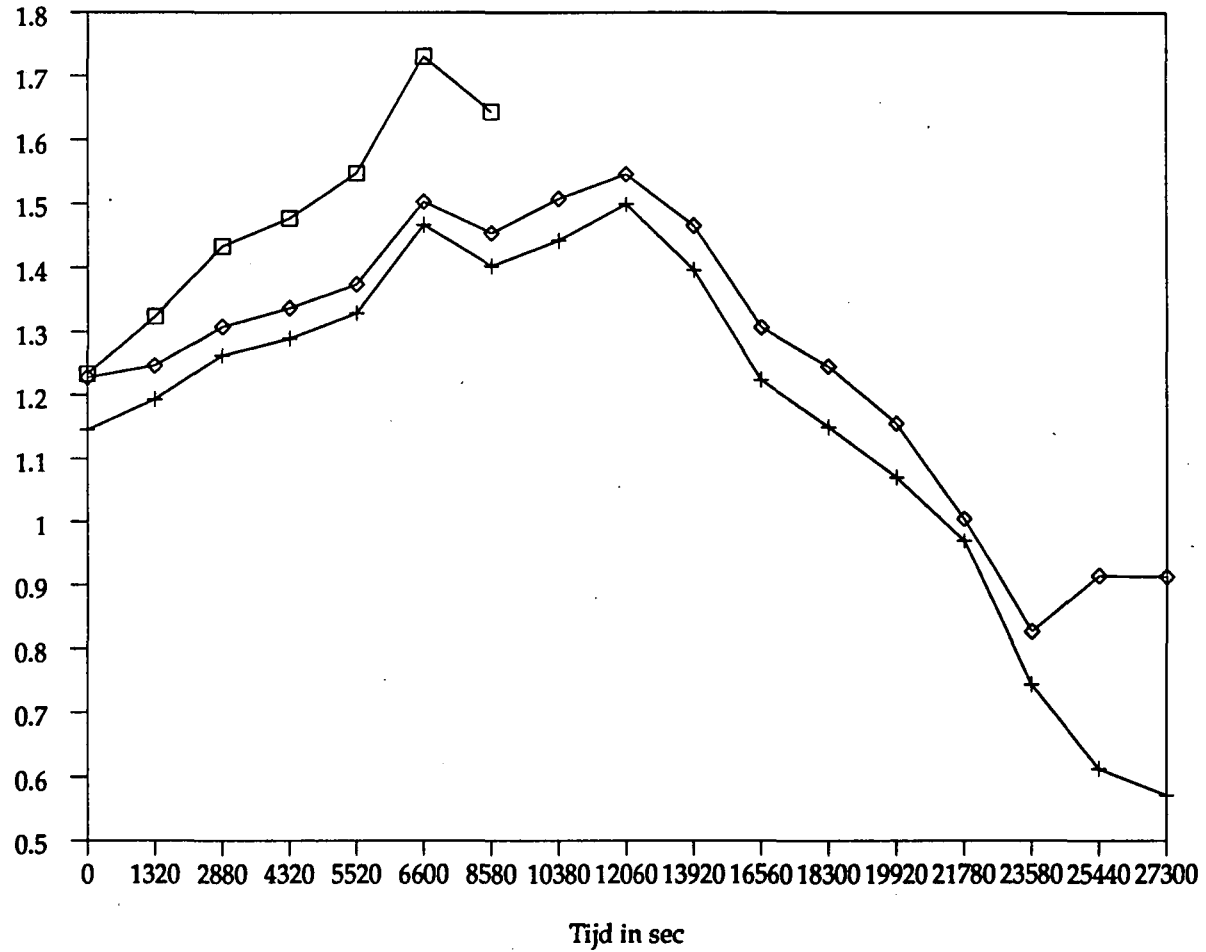
gez.

form.  
A  
4

# Stijghoogtes

ongecorrigeerd voor nulafwijking

Stijghoogte in m + NAP



□ WSM op NAP + 0.10 m

◇ WSM op NAP + 0.84 m

+ WSM op NAP + 0.69 m



**GRONDMEECHANICA  
DELFT**

Postbus 69, 2600 AB Delft Nederland  
Telefoon (015) 69 35 00

Telefax (015) 61 08 21  
Telex 38234 soll nl

Getijde en freatische lijn Afsluiddijk

datum  
April 1993

CO-341960

BIL. 2

get.  
Std

gez.

form.  
A  
4

Gemeten stijghoogtes in de filterlaag (ongecorrigeerd)

Getijcurve

Getij en treatische lijn Afsluidijk

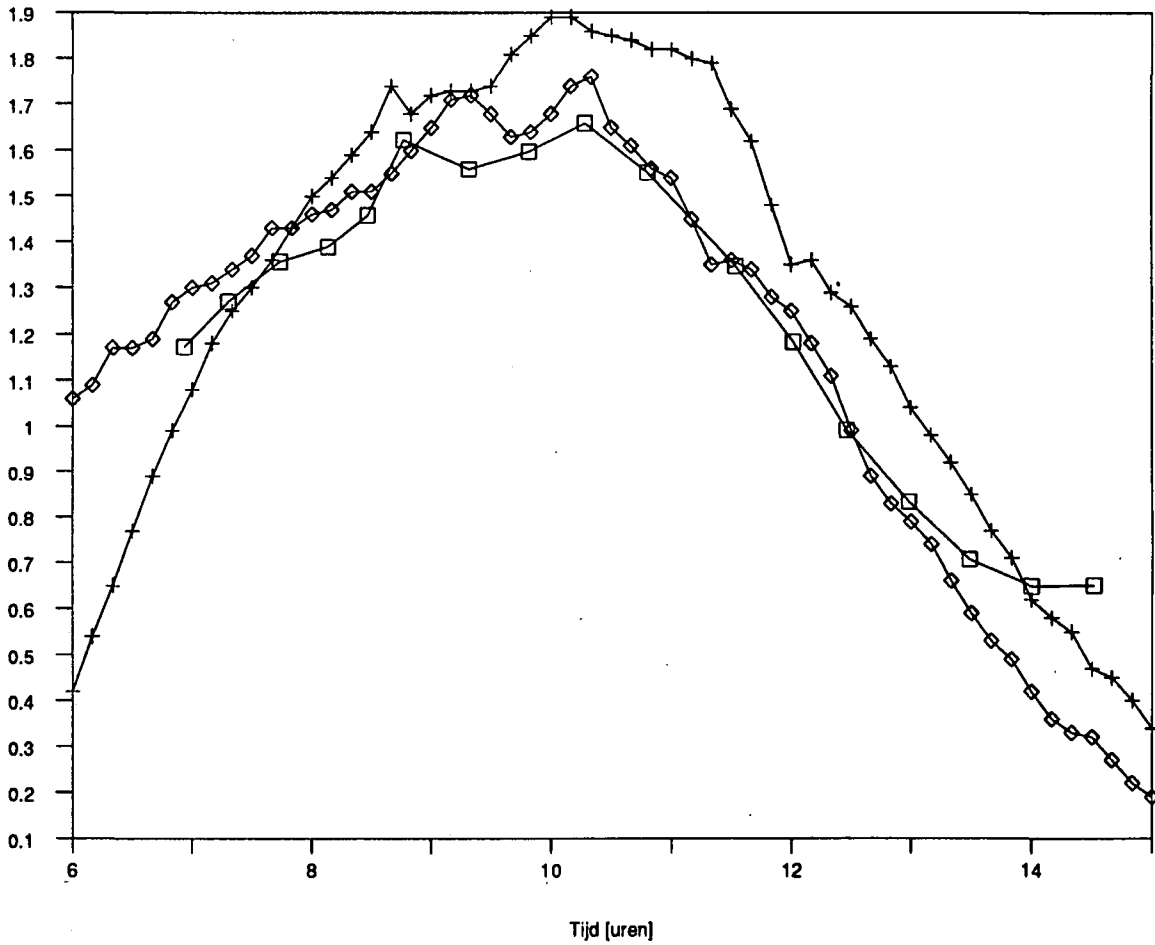


**GRONDMEECHANICA  
DELFT**

Postbus 69, 2600 AB Delft Nederland  
Telefoon (015) 69 35 00

Telefax (015) 61 08 21  
Telex 38234 soil nl

[NAP + m] [tij]



□ getij uit meting

◇ getij Den Oever

+ getij Kornwerderzand

datum  
Oct. 1993

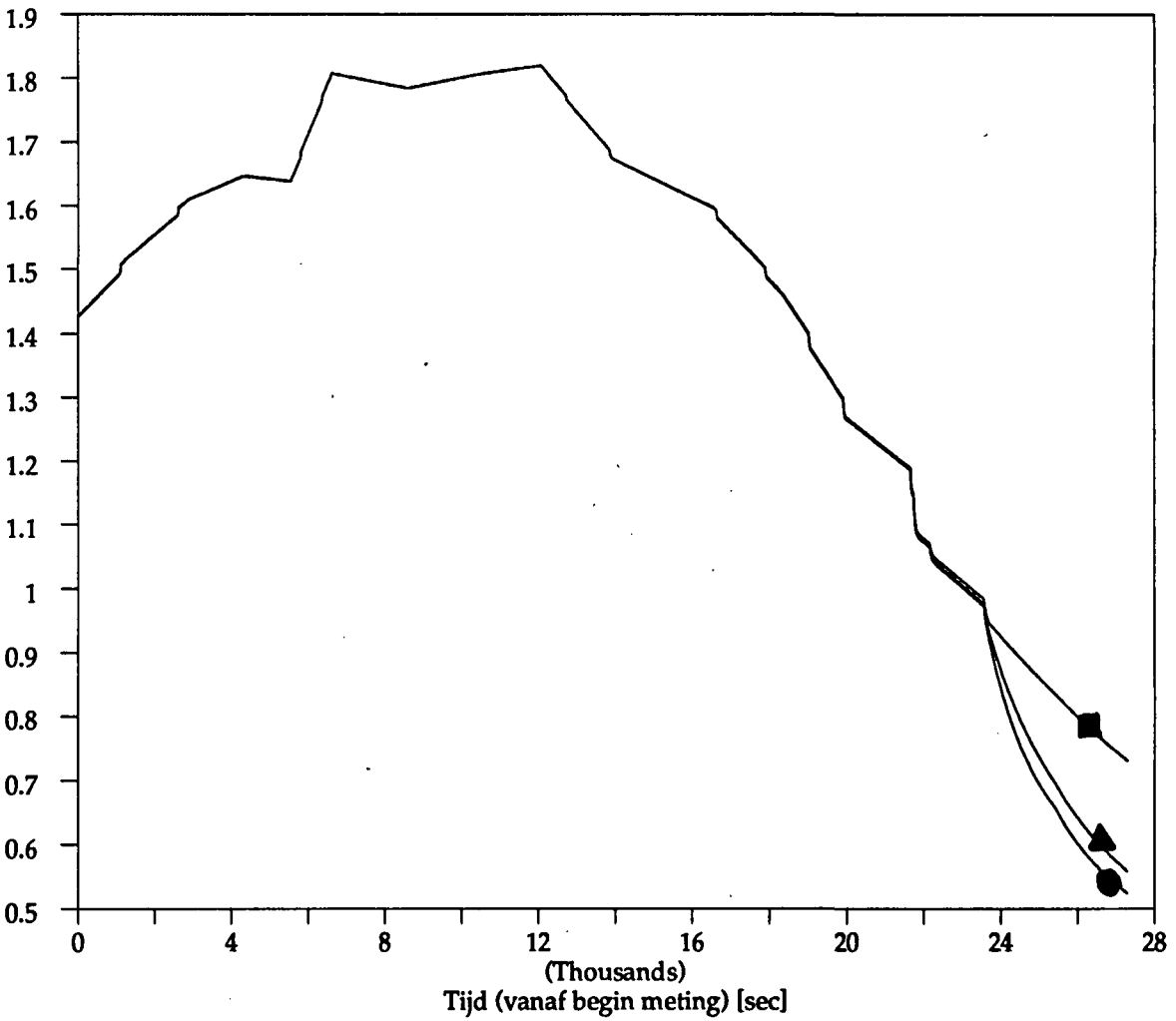
CO-341960

BIJL. 3

get.  
Sid

gez.

form.  
A  
4



Stijghoogte [m+NAP]



**GRONDMEECHANICA  
DELFT**

Postbus 69, 2600 AB Delft, Nederland  
Telefoon (015) 69 35 00

Telex (015) 61 08 21  
Telex 38234 scil nl

datum  
**April 1993**

get.  
**Sid**

Getijde en treatische lijn Afsluitdijk  
Freatische lijn, berekend

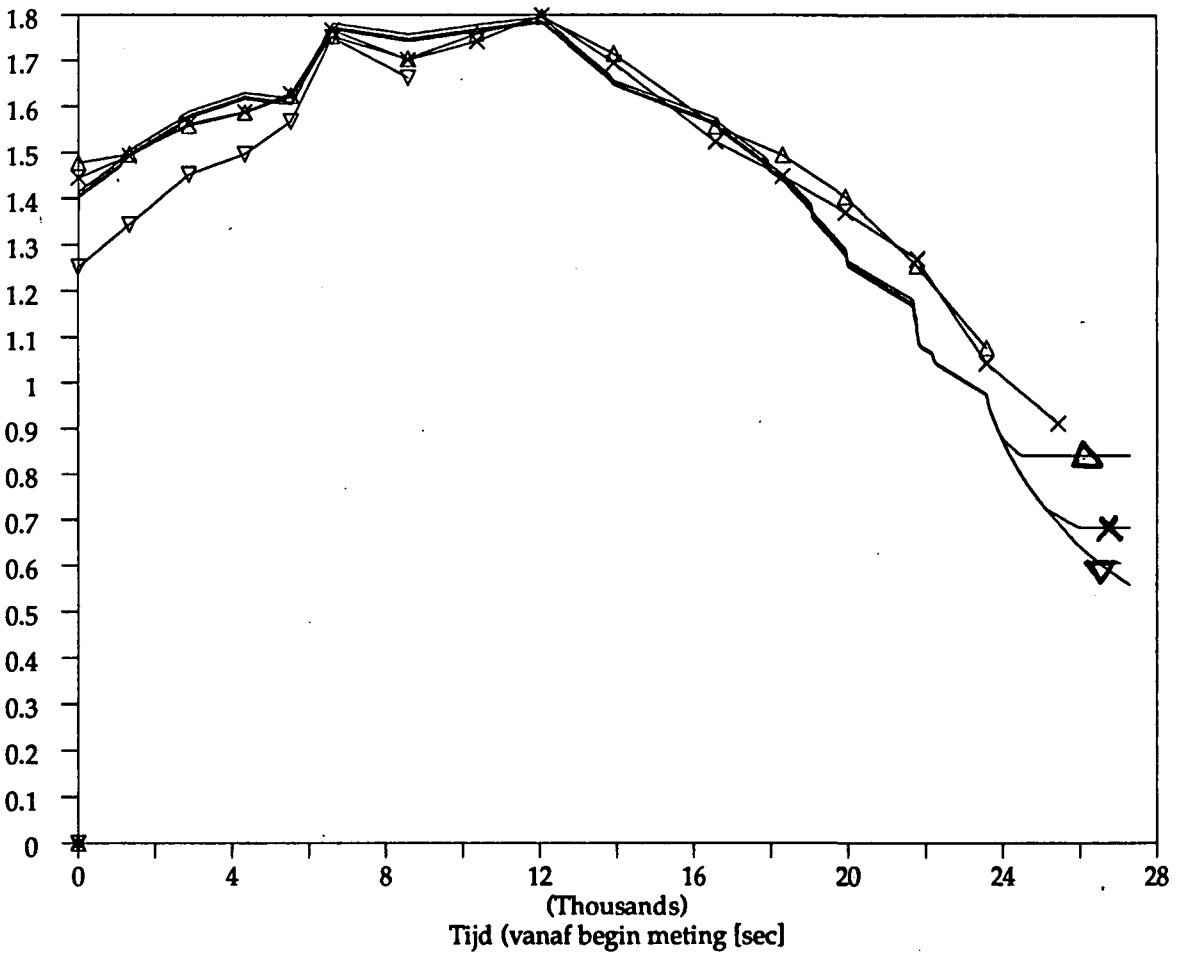
CO-341960

gez.

Geval 1 ■ Geval 2 ▲ Geval 3 ●

Bijl. 4

form.  
A/4



Stijghoogte [m+NAP]

- ▲ WSM 0.84 m,ber.
- × WSM 0.69 m,ber.
- ▽ WSM 0.10 m,ber.
- △ WSM 0.84 m,gem.
- × WSM 0.69 m,gem.
- ∇ WSM 0.10 m,gem.



**GRONDMECHANICA  
DELFT**

Postbus 69, 2600 AB Delft Nederland  
Telefoon (015) 68 35 00

Telefax (015) 61 08 21  
Telex 38234 scil nl

datum  
**April 1993**

get.  
Std

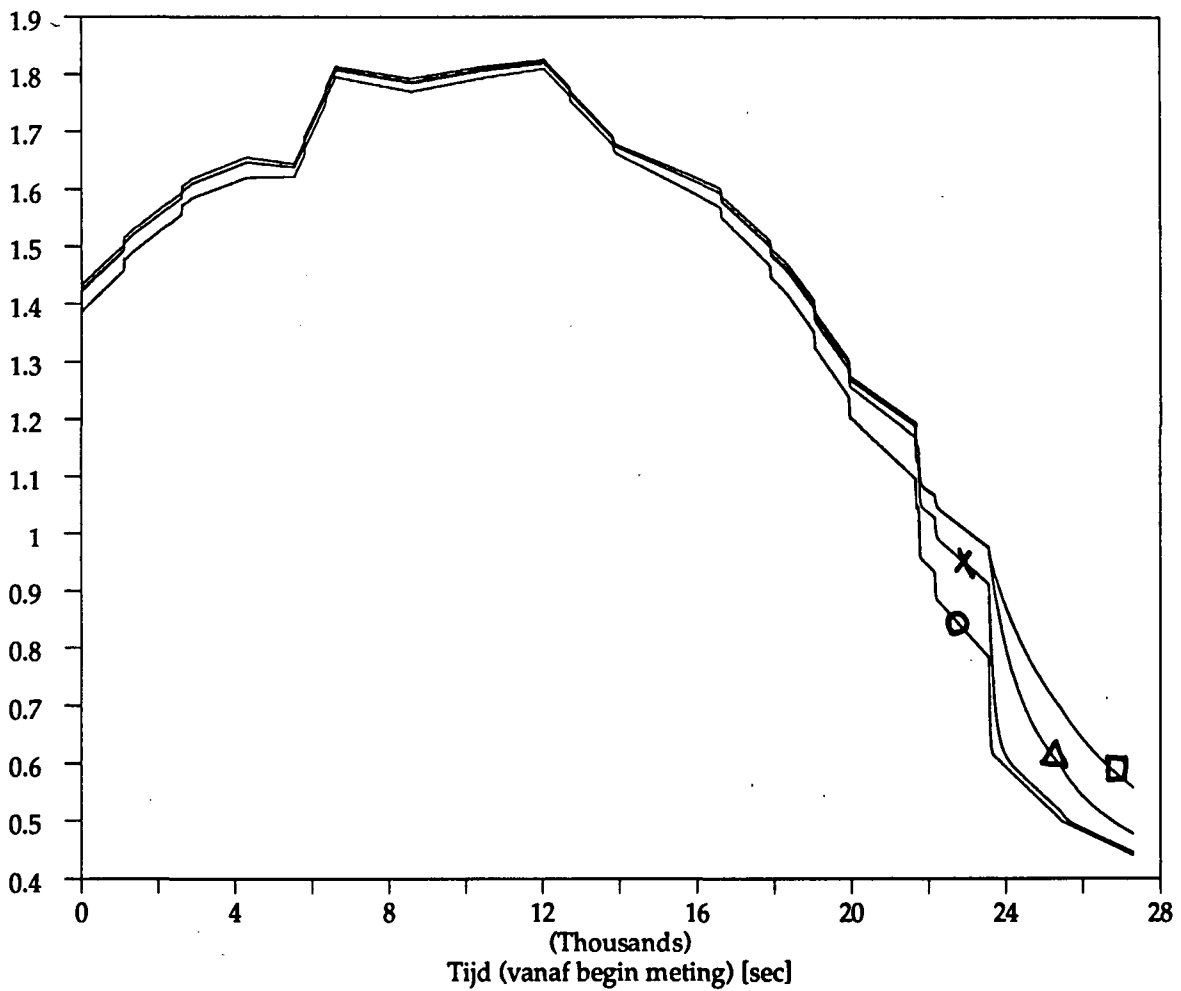
CO-341960

gez.

Getijde en freatische lijn Afsluitdijk  
Stijghoogtes in de filterlaag  
Geval 2, berekende en gemeten waarden

BIJL. 5

form.  
A  
4



□ A = 1

△ A = 10

× A = 100

○ A = 1000



**GRONDMECHANICA  
DELFT**

Postbus 69, 2600 AB Delft, Nederland  
Telefoon (015) 69 35 00

Telefax (015) 61 08 21  
Telex 38234 soil nl

Getijde en freatische lijn Afsluiddijk  
Freatische lijn, berekend  
Doorlatendheid teen resp. A=1 A=10 A=100 A=1000

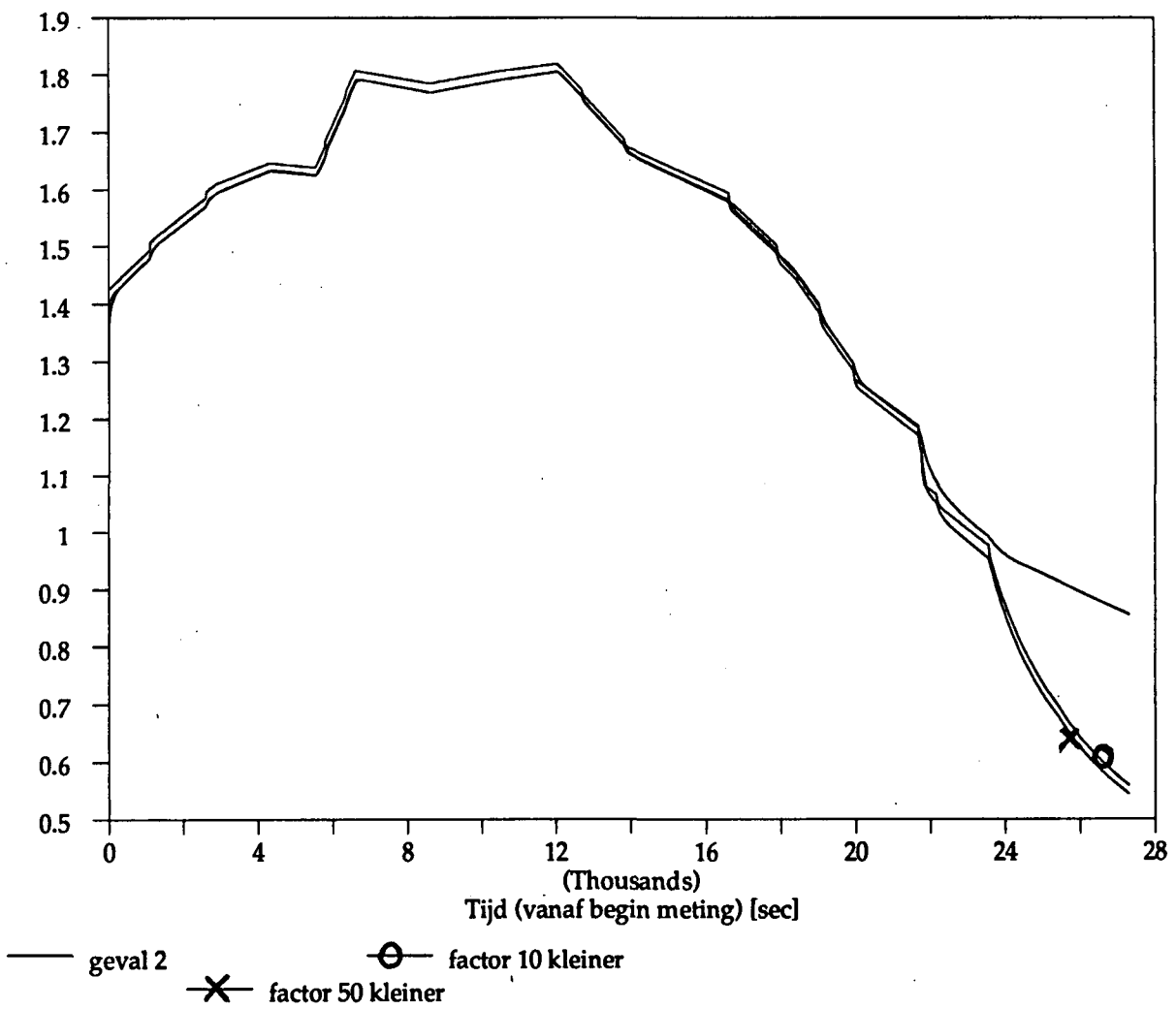
datum  
April 1993

CO-341960

BIJL. 6

get.  
Std

form.  
A  
4



Stijghoogte [m+NAP]



**GRONDMECHANICA  
DELFT**

Postbus 69, 2600 AB Delft Nederland  
Telefoon (015) 69 35 00

Telefax (015) 61 08 21  
Telefax 38234 soil.nl

Getijde en treatische lijn Afsluiddijk  
Freatische lijn, berekend  
Geval 2, doorlatendheid factor 10 en factor 50 kleiner

datum	April 1993	get.	Sid
CO-341960		gez.	
BIJL. 7		form.	A/4



APPENDIX C:

Getij en freatische lijn Lauwersmeerdam

CO-341960/14  
augustus 1993

OPEN TALUDBEKLEDINGEN  
GETIJ EN FREATISCHE LIJN LAUWERSMEERDAM

CO-341960/16  
october 1993

Opgesteld in opdracht van:  
Rijkswaterstaat  
Dienst Weg- en Waterbouwkunde

AFDELING GRONDCONSTRUCTIES  
projectleider: ir. T. Stoutjesdijk  
projectbegeleider: ir. A. Bezuijen  
afdelingshoofd: ir. J.A. van Twillert

INHOUD:		blz.:
1.	INLEIDING	1
2.	RESULTATEN VAN DE METING	2
2.1	Inleiding	2
2.2	Locatie en meetmethode	2
2.3	Resultaten	3
2.4	Doorlatendheden	3
2.5	Peilbuisonderzoek	4
3.	BEREKENINGEN EN ANALYSE	6
3.1	Inleiding	6
3.2	Geometrie	6
3.3	Fysische eigenschappen	6
3.4	Golfrandvoorwaarde	6
3.5	Locatie A, meting 07.07.1992	7
3.6	Locatie B, meting 15.07.1992	8
3.7	Leklengte	8
4.	CONCLUSIES	11
	REFERENTIES	12
	Bijlagen	

Bladnummer : - 1 -  
Ons kenmerk: CO-341960/16  
Datum : october 1993

## 1. INLEIDING

In juli 1992 is een veldonderzoek aan de taludbekleding van de Lauwersmeerdam uitgevoerd door Fugro b.v [lit. 1]. Uitgevoerd zijn doorlatendheidsmetingen, infiltratieproeven en metingen van de stijghoogte in de filterlaag als functie van de buitenwaterstand. Dit laatste aspect is het onderwerp van dit rapport.

Uit de meting van de stijghoogte in de filterlaag kan de ligging van de freatische lijn worden bepaald. Het is van belang om na te gaan of deze freatische lijn de buitenwaterstand volgt, dan wel daarop achterloopt in amplitude en fase. Als de buitenwaterstand niet wordt gevolgd, dan ontstaan er verschillen over de toplaag die van belang kunnen zijn bij het beoordelen van de stabiliteit van de zetting.

De opbouw van dit rapport kan kort worden samengevat in drie punten: een korte weergave van hetgeen gemeten is (hoofdstuk 2), vervolgens een verslag van de resultaten van analyse en berekeningen (hoofdstuk 3) en tot slot de conclusies die hieruit getrokken kunnen worden (hoofdstuk 4).

## 2. RESULTATEN VAN DE METINGEN

### 2.1 Inleiding

In dit hoofdstuk worden de meetresultaten kort weergegeven. Voor een uitgebreider verslag wordt verwezen naar de betreffende literatuur (lit. 1, 2 en 3). In dit rapport zijn slechts de onderdelen belicht die voor dit onderzoek van belang zijn.

In eerste instantie worden de meetlocatie en meetmethode besproken. De meetresultaten worden gepresenteerd en voorbesproken. In het volgende hoofdstuk vindt nadere analyse van deze gegevens plaats.

### 2.2 Locatie en meetmethode

De plaats van de metingen is aangegeven in bijlage 1. De locatie bevindt zich op het meest noordelijke punt van de Lauwersmeerdam. In eerdere onderzoeken (DWW, 1987 en GD, 1990, lit. 2 en 3) waren de locaties meer westelijk gelegen. Op deze locaties is een ondiep voorland aanwezig, en de oriëntatie van de dijk is noord-west. Op de locatie die nu gekozen is voor de getij metingen ligt de vaargeul dichter bij de dijk. De dijk is op het noorden georiënteerd. Dit verschil in oriëntatie en voorland kan verschillen in eigenschappen opleveren. Vandaar dat voor de gegevens omtrent de eigenschappen van de dijk vooral het laatste onderzoek in de beschouwing is betrokken. Van de eerdere onderzoeken van DWW en GD wordt een kort resumé gegeven, vooral ook om te kunnen zien of er inderdaad verschillen zijn. De geometrie is weergegeven in bijlage 2.

Op 7 juli 1992 is gemeten op locatie A en op 15 juli 1992 op locatie B. De locaties bevinden zich circa 15 meter uit elkaar. Ten behoeve van de meting van de stijghoogte in de filterlaag werden op iedere locatie 8 gaten in de toplaag geboord. In ieder gat werd een waterspanningsmeter in de filterlaag geplaatst, waarna de gaten met PUR-schuim werden afgedicht. De plaatshoogte van de meters is gegeven in tabel 2.1.

Meter	Locatie A [m + NAP]	Locatie B [m +NAP]
1	-0.37	-0.54
2	-0.16	-0.39
3	-0.10	-0.30
4	0.09	-0.14
5	0.11	-0.04
6	0.22	0.12
7	0.44	0.20
8	-0.50	0.31

Tabel 2.1. Plaathoogte van waterspanningsmeters

Een meting begint omstreeks laagwater. Vervolgens wordt met een zekere frequentie een meting verricht. Bij locatie A werd steeds het gemiddelde van 1 minuut meten genomen, op locatie B

Bladnummer : - 3 -  
Ons kenmerk: CO-341960/16  
Datum : oktober 1993

werd steeds het gemiddelde van een paar seconden genomen. In de praktijk bleek de variatie in het signaal zo klein dat dit weinig verschil maakte.

### 2.3 Resultaten

De resultaten van de twee metingen worden gegeven in bijlagen 3 tot en met 6. Weergegeven is het verloop van de stijghoogte in de tijd van de acht waterspanningsmeters en van het getij. De metingen zijn al gecorrigeerd voor nulpuntsafwijking en plaatshoogte, zodat direct een stijghoogte in meters ten opzichte van NAP wordt gegeven.

Enkele waterspanningsmeters geven onverwachte resultaten. Dit zijn met name waterspanningsmeter 8 bij de meting op locatie A en meters 6 en 8 bij de meting op locatie B. Bij de meting op locatie B is een korte stroomstoring opgetreden. Hierdoor ontbreekt een zeer beperkt deel van de gegevens van de waterspanningsmeters.

Een eerste blik op de resultaten leert, dat de lektijd vermoedelijk vrij groot is. Dit kan worden afgeleid uit het feit dat een aantal meters gedurende het getij geen uitslag geven en dus kennelijk niet onder water komen. Deze meters liggen 0,5 tot 1 meter onder het hoogwaterniveau. Er is dus sprake van een groot verschil in amplitude tussen freatische lijn en getij.

### 2.4 Doorlatendheden

De doorlatendheden van de constructie kunnen op diverse manieren worden geschat. Ook de eerdere onderzoeken op de Lauwersmeerdam geven hier informatie over. De bevindingen worden hieronder kort geresumeerd.

Het peilbuisonderzoek, dat in 1982 en 1983 door het voormalige COW (Centrum voor Onderzoek Waterkeringen) werd verricht (lit. DWW, 1987), levert gegevens op door korrelverdelingen van het materiaal, door doorlatendheidsmetingen in het laboratorium en van directe metingen van de doorlatendheid met behulp van een infiltratiebak op het talud.

Van de laag mijnsteen is 1 korrelverdeling bepaald. De  $D_{15}$  is ongeveer 3 mm, de  $D_{50}$  ongeveer 20 mm. Er is tevens een monster genomen van het zand onder de mijnsteen (het basismateriaal). Dit is zand met een  $D_{15}$  van 110  $\mu\text{m}$ . Het materiaal onder de blokken bleek te bestaan uit grind met een percentage zand van 25 à 30 procent. Dit betekent dat de doorlatendheid van het mengsel voor een groot deel bepaald wordt door het zand.

Er zijn op de monsters doorlatendheidsproeven gedaan in het laboratorium. Daarnaast zijn doorlatendheidsproeven gedaan door een open bak op de verschillende lagen te zetten en deze te vullen met water. Vervolgens werd gemeten hoeveel water door de bak heen in de onderlagen infiltreerde.

In 1990 is de Lauwersmeerdam opnieuw onderzocht (GD, 1990), ditmaal ten behoeve van een onderzoek naar de vertering van mijnsteen. De toplaag werd gelicht en er werden monsters genomen van grindlaag en mijnsteen. Van de monsters werden korrelverdelingen gemaakt en er werden doorlatendheidsproeven in het laboratorium gedaan. Opmerkelijk was, dat er in het grind soms meer dan 50 % zand werd aangetroffen.

In 1992 zijn op de toplaag opnieuw in-situ metingen van de doorlatendheid verricht. Er zijn zeven monsters van de grindlaag genomen, waarvan de korrelverdeling is bepaald. Hieruit blijkt, dat gemiddeld 20 tot 25 % van de monsters uit zand bestaat. De  $D_{15}$  kan sterk variëren, maar voor zes van de zeven onderzochte monsters is de  $D_{15}$  ongeveer 0,2 mm. De mijnsteen is niet onderzocht.

In tabel 2.2 zijn alle onderzoeksresultaten samengevat. De doorlatendheden zijn uitgedrukt in mm/s. De doorlatendheid, zoals deze volgt uit de korrelverdeling is bepaald met behulp van de

formules van den Adel, zoals deze in onder andere de Samenvatting van de onderzoeksresultaten 1980-1988 [lit. 4.] zijn weergegeven.

Onderzoek	Laag	Volgens korrelverdeling	Volgens laboratoriumproef	Volgens in-situ proef
DWW, 1987	koperslakblokken	-	-	0,01
(COW, 1982)	grindlaag	0,02 à 0,1	0,02 à 0,1	0,05 à 0,08
	mijnsteen	10 à 20	-	0,6
	basis	0,1	0,1	-
GD, 1990	grindlaag	0,03 à 0,09	0,04 à 0,06	-
	mijnsteen	10 à 20	0,5 à 2	-
FUGRO, 1992	koperslakblokken	-	-	0,06 à 0,08
	grindlaag	0,06 à 30	-	-

Tabel 2.2. Doorlatendheden in mm/s volgens verschillende onderzoeken

De in-situ meting van de toplaagdoorlatendheid van 1992 laat zien dat de toplaag een factor 5 à 10 doorlatender is dan de meting uit 1982/83. Dit kan kloppen, aangezien er in het ene geval een voorland voor de dijk ligt en in het andere geval niet. Het verschil kan ook te wijten zijn aan een probleem met de afdichting van de bakken. In [lit. 1] wordt aangegeven, dat moeite is ondervonden met het afdichten. Het is dan mogelijk dat de gevonden doorlatendheid enigszins te groot is.

De grindlaag is meestendeels ingezand. Het is niet duidelijk waardoor er verschillende percentages zand in de laag worden aangetroffen. De in-situ metingen en laboratoriumproeven laten zien, dat de doorlatendheid van het mengsel zand en grind voornamelijk door het zand wordt bepaald.

De laag mijnsteen heeft op basis van de korrelverdelingen een grote doorlatendheid. De theorie blijkt echter niet op te gaan voor materiaal met duidelijke gelaagdheid zoals mijnsteen. Bovendien heeft mijnsteen onder water enigszins 'papperige' eigenschappen. In-situ metingen en laboratoriumproeven geven een duidelijk lagere doorlatendheid dan op basis van de korrelverdeling verwacht zou worden.

## 2.5 Peilbuisonderzoek

In het peilbuisonderzoek Lauwersmeerdam dat is uitgevoerd in 1982/1983 en gerapporteerd in (DWW, 1987) is met behulp van peilbuizen het verloop van de stijghoogte in de dam gemeten als functie van het getij. Dit kan op voorhand een belangrijke indicatie geven of er al dan niet verwacht moet worden, dat het basismateriaal een belangrijke rol speelt in het gehele verhaal. Er waren peilbuizen geplaatst in het voorland, in de mijnsteenlaag en op diverse afstanden in het zandlichaam. De respons kan worden uitgedrukt in het percentage van de getijamplitude dat de peilbuizen registreren. De amplitude van de getijbeweging wordt gesteld op 100 %. In het voorland is deze amplitude gedempt tot 40 % van het getij. In de laag mijnsteen wordt een

Bladnummer : - 5 -  
Ons kenmerk: CO-341960/16  
Datum : oktober 1993

amplitude van 15 % gevonden. Op een afstand van 7 meter wordt in het basismateriaal nog steeds een amplitude van 12,5 % gevonden. Dit is ten opzichte van de mijnsteenlaag nauwelijks afgenomen. Op een afstand van 19 meter is de amplitude nog 6 % van de getijamplitude. De afname van de amplitude met de afstand tot de teen is gegeven in bijlage 7. Hierbij liggen de eerste twee punten op het voorland, het derde punt in de mijnsteenlaag en de rest op toenemende afstand in het basismateriaal. De gegevens zijn in tabel 2.3 weergegeven.

Zeer opvallend is het gemeten faseverschil met het getij. In de mijnsteenlaag is deze groter dan bij de dichtst bij gelegen peilbuizen in het basismateriaal: 1 uur ten opzichte van 45 minuten. Ook dit is in tekening weergegeven, zie tabel 2.3 en bijlage 8.

Peilbuis Nr.	Afstand t.o.v teen [m]	Respons vloed [%]	Respons eb [%]	Vertraging vloed [uur]	Vertraging eb [uur]
1	-4,4	42	42	0	0
2/3	-1,4	26	36	0	0
4	0,9	13	14	1	1,1
6/7/8	8,0	11	13	0,75	0,6
9/10	13,9	6	10	0,75	0,75
11/12	19,6	5	7	1,4	0,8
13/14/15	60,0	4	5	1,5	1,0

Tabel 2.3. Amplitude en faseverschil in dijk ten opzichte van getij

Uit de beide bijlagen is een opvallend feit, dat door de punten een lijn met een vloeiend verloop kan worden getrokken, maar dat het punt in de laag mijnsteen dan een te kleine amplitude heeft en een te groot faseverschil. Dit lijkt erop, alsof het gehele systeem er op is afgestemd, dat de dijk gevuld en geledigd wordt door watertransport door de zandlaag. De laag mijnsteen is aan de bovenkant afgesloten met een relatief ondoorlatende laag. Het water dat in de laag mijnsteen komt wordt dan aan de onderzijde toegevoerd. Als dit mechanisme overeenstemt met de werkelijkheid, dan kan de bijdrage van het basismateriaal zelfs dominant zijn. Het heeft dan geen zin volgens de traditionele methode een lektijd te berekenen.



### 3. BEREKENINGEN EN ANALYSE

#### 3.1 Inleiding

Om met de STEENZET-versie voor lang periodieke golven te kunnen rekenen moeten een aantal gegevens bekend zijn:

- geometrische eigenschappen
- fysische eigenschappen
- golfrandvoorwaarde

Deze zullen eerst worden behandeld.

Vervolgens wordt voor de beide metingen (7 juli en 15 juli 1992) enkele berekeningen gemaakt. Op basis hiervan wordt afgeschat of de berekeningen zinvol zijn, of dat het basismateriaal een dusdanig grote rol speelt, dat de schematisatie niet meer klopt.

#### 3.2 Geometrische eigenschappen

Een indruk van de geometrie kan worden verkregen uit de figuur in bijlage 2. Van de teen op circa NAP - 0,65 m tot circa NAP + 1,62 m bestaat de toplaag uit koperslakblokken met afmetingen van 0,25 m (dikte), 0,33 m (breedte) en 0,20 m (lengte). De spleten tussen de blokken variëren van circa 2 mm tot 10 mm breed, en op het oog werd vastgesteld dat ze ingezand waren. De taludhelling van dit gedeelte is 1 : 3,5. Direct onder de blokken bevindt zich een laag grind van circa 8 cm dik. Het grind heeft een percentage zand dat varieert van 2 % tot 31 %. Onder het grind bevindt zich een laag mijnsteen van 1 meter dik. Het basismateriaal van de dijk is zand.

#### 3.3 Fysische eigenschappen

Met fysische eigenschappen wordt hier vooral gerefereerd aan doorlatendheden. In totaal is er sprake van 5 doorlatendheden, waarvan er vier redelijk bekend zijn. De enige doorlatendheid die niet is te bepalen is de doorlatendheid van de teenconstructie. In eerste instantie is deze ondoorlatend aangenomen. Van de doorlatendheden van toplaag, grind, mijnsteen en basismateriaal kunnen goede schattingen worden gegeven. Deze zijn weergegeven in tabel 3.1.

Omschrijving	Doorlatendheid [m/s]
koperslakblokken	$5 \cdot 10^{-5}$
grind	$1 \cdot 10^{-4}$ à $2 \cdot 10^{-5}$
mijnsteen	$2 \cdot 10^{-3}$ à $5 \cdot 10^{-4}$
basis (zand)	$1 \cdot 10^{-4}$

Tabel 3.1. Doorlatendheden voor berekeningen en analyse

#### 3.4 Golfrandvoorwaarde

Rond de twee perioden dat de stijghoogtes in het filter werden bepaald is ook het getij gemeten (zie bijlagen 9 en 10). Omdat bekend is dat STEENZET, met name bij lage doorlatendheden,

Bladnummer : - 7 -

Ons kenmerk: CO-341960/16

Datum : oktober 1993

'inslingereffecten' vertoond, is het nodig ten minste twee getijden door te rekenen. Het eerste getij wordt gebruikt om een goed beginpunt voor de freatische lijn te vinden, en het tweede getij wordt gebruikt om de correcte stijghoogtes in het filter te berekenen. Bij de eerste meting (07.07.1992) is, bij gebrek aan gegevens van het voorgaande getij, twee maal hetzelfde getij achter elkaar gezet als golftrandvoorwaarde. Bij de tweede meting (15.07.1992) was dit niet nodig: in dat geval is een volledig getij voor de eigenlijke meting bekend.

Bij het opstellen van de golftrandvoorwaarde is verondersteld, dat het windstil is geweest, met andere woorden: de waterspiegel is vlak en er zijn geen golven. Er is geen invloed van golfoploop.

### 3.5 Locatie A, meting 07.07.1992

Het resultaat van de meting is te zien in bijlagen 3 en 4.

Ten behoeve van het narekenen van de meting met STEENZET (getijversie) zijn twee series berekeningen gedaan. In eerste instantie is de doorlatendheid van de teen op nul gesteld. In eerste instantie is aangenomen, dat uitvullaag en filter kunnen worden samengesteld tot 1 laag, met een dikte van 1,08 meter. De doorlatendheid, gemiddeld over de dikte van deze laag, kan tussen  $4,6 \cdot 10^{-4}$  m/sec en  $1,9 \cdot 10^{-3}$  m/sec liggen. Voor deze twee waarden is vervolgens een STEENZET-som gemaakt. Het resultaat is gegeven in bijlage 11. In beide gevallen reageert de freatische lijn geheel anders dan is gemeten. Uit de meetresultaten kan worden afgelezen, dat de freatische lijn vermoedelijk nauwelijks boven het NAP-niveau uitkomt. In de berekeningsgevallen komt het niveau van de freatische lijn hier ongeveer een meter bovenuit. Vervolgens zijn nog twee pogingen gedaan dit resultaat te verbeteren. Eerst is aangenomen, dat de filterdoorlatendheid een factor 10 lager ligt dan de meest pessimistische schatting. Het resultaat van deze berekening is opgenomen in bijlage 12. Door de verminderde filterdoorlatendheid blijkt weliswaar de amplitude van de beweging van de freatische lijn te zijn afgenomen, echter het gemiddelde niveau ligt zo'n 75 cm te hoog. Dit wordt veroorzaakt door het verschijnsel, dat bij een redelijk doorlatende toplaag het filter gemakkelijk vol water stroomt, terwijl als de filterlaag redelijk ondoorlatend is, het leegstromen langzamer gaat. Het gemiddelde niveau stijgt hierdoor. Om het gemiddelde niveau te laten zakken is een berekening gemaakt waarbij de doorlatendheid van de teen is vergroot. De doorlatendheid van de onderste spleet is een factor 1000 maal zo groot gekozen als de doorlatendheid van de overige spleten. De invloed op het resultaat is nihil.

Het blijkt derhalve niet mogelijk met de gebruikte schematisering de werkelijkheid te benaderen. Hieruit volgt onvermijdelijk de conclusie, dat in dit geval de schematisatie niet goed is. Er is kennelijk iets anders aan de hand. In het voorgaande hoofdstuk is aangegeven, dat het basismateriaal een rol zou kunnen spelen. Als dit zo is, dan klopt het inderdaad, dat dit niet eenvoudig benaderd kan worden door alleen de toplaag en de filterlaag in beschouwing te nemen. In feite moet dan de uitwisseling van water tussen toplaag, filterlaag en basismateriaal in beschouwing worden genomen, met inbegrip van het freatisch niveau in het gehele dijklichaam.

Om deze hypothese te toetsen is een fictieve situatie geconstrueerd. Aangenomen is, dat de freatische lijn in de filterlaag niet verder kan stijgen dan het freatisch niveau in het basismateriaal direct grenzend aan het filter. Zou dit wel gebeuren, dan ontstaat er een verhang en gaat er water in en uit het filter stromen. Omdat in dit geval niet alleen het filter moet worden gevuld met water, maar ook een deel van het dijklichaam, wordt het filter steeds dikker gemaakt. Dit betekent, dat de invloed van het basismateriaal steeds toeneemt. Als de hypothese klopt, moet de werkelijkheid steeds dichter benaderd worden. Het filter krijgt een doorlatendheid die gelijk is aan die van het basismateriaal. Het basismateriaal is zand met een D50 van circa 150  $\mu\text{m}$  en een D15 van circa 100  $\mu\text{m}$ . De doorlatendheid is  $5 \cdot 10^{-5}$  m/sec. De dikte van de filterlaag is respectievelijk 1,08 m (het basisgeval), 5,08 m, 10,08 m en 25,08 m. Als de dikte van de uitvullaag, de filterlaag en de aangenomen dikte van de zandlaag respectievelijk worden uitgedrukt als  $b_u$ ,  $b_f$  en  $b_z$ , en de respectievelijke doorlatendheden als  $k_u$ ,  $k_f$  en  $k_z$ , dan kunnen de dikte en de doorlatendheid voor de berekening worden afgeleid uit de volgende formules:

$$k_{\text{gem}} = \frac{b_u \cdot k_u + b_f \cdot k_f + b_z \cdot k_z}{b_u + b_f + b_z}$$

$$b = b_u + b_f + b_z$$

In bijlage 13 zijn de resultaten te zien. Het blijkt, dat de resultaten dichter bij de gemeten situatie komen naarmate het filter dikker wordt gekozen. Toch is er nog belangrijke verschil tussen meting en berekening. Het gemiddelde niveau van de freatische lijn is volgens de berekening nog steeds hoger, dan volgens de meting. Dit is verklaarbaar, gezien de schematisatie. In de schematisatie is aangenomen, dat al het water dat door de toplaag naar binnen dringt zonder tijdsverlies over de volle breedte van het filter verspreid wordt. Dit is een ongeldige aanname, aangezien het, zelfs bij een verhang van 1 bij de gegeven doorlatendheid 5 uur duurt om 1 meter af te leggen. Er is sprake van twee-dimensionale stroming. Freatische berging speelt een belangrijke rol. Vanwege deze berging is ook het voorgaande getij nog van belang voor hetgeen berekend wordt. Van de meting op 7 juli 1992 is dit voorgaande getij niet bekend. Van de meting op 15 juli 1992 wel. Een tweede reden, waarom de freatische lijn volgens de berekening te hoog ligt, is dat volgens het programma het water dat het systeem verlaat, door de toplaag weg moet stromen. Deze toplaag is niet zeer doorlatend en heeft een beperkt doorstroomoppervlak. In werkelijkheid zal ook water via het basismateriaal wegstromen. Hierdoor komt de gemiddelde ligging van de freatische lijn lager te liggen.

### 3.6 Locatie B, meting 15.07.1992

In bijlagen 5 en 6 is het resultaat van de tweede meting te zien. Opvallend aan met name de figuur in 5 is, dat de meters bij afgaand tij droog lijken te vallen. Dit is gezichtsbedrog. De freatische lijn bevindt zich nog steeds boven het niveau van de meters. De waterspanningsmeters geven een uitlezing te zien die niet gelijk is aan nul. Aanvankelijk volgen de meters snel het afgaan van het getij. Dan volgt er een scherpe knik in de krommen. Hiervoor is geen verklaring gevonden.

Ook in dit geval zijn berekeningen uitgevoerd voor het basisgeval, te weten een geïsoleerd systeem van toplaag en filterlaag. Deze zijn aangevuld met berekeningen waarin de filterlaagdikte toeneemt en waarin de doorlatendheid van het filter de doorlatendheid van het basismateriaal benadert. Het resultaat bevestigt de bevindingen van de meting op locatie A. Geconcludeerd moet worden dat het basismateriaal een niet te verwaarlozen rol speelt.

### 3.7 Leklengte

Uit het verloop van de stijghoogte over de hoogte kan een schatting worden gemaakt van de leklengte. Een (relatief) grote verandering van stijghoogte over een (relatief) korte afstand komt overeen met een korte leklengte. Het stelsel wordt beschreven met de formule:

$$\frac{d^2\phi}{dx^2} = \frac{\phi - \phi'}{\Lambda^2}$$

met:  $\phi$  = stijghoogte in filterlaag  
 $\phi'$  = stijghoogte op de toplaag  
 $x$  = horizontale afstand langs het talud

Bladnummer : - 9 -

Ons kenmerk: CO-341960/16

Datum : oktober 1993

$\Lambda$  = leklengte

De randvoorwaarden zijn, dat in punt  $x = 0$  geldt dat de stijghoogte gelijk is aan de freatische lijn en dat voor  $x = \infty$  de stijghoogte gelijk is aan de stijghoogte op de toplaag. De oplossing kan nu geschreven worden als:

$$\phi(x) = (\phi_f - \phi') \exp(-x/\Lambda) + \phi'$$

waarin  $\phi_f$  de stijghoogte in de filterlaag voorstelt.

Met behulp van deze vergelijking is de stijghoogte in de filterlaag benaderd. Deze bepaling geldt uiteraard alleen voor een gesloten systeem, dit wil zeggen een systeem waarin de toevoer van water door teen en basismateriaal verwaarloosd mag worden. Vervolgens is het steilste deel van de curve gefit, omdat dit een maat is voor het vermogen van de zetting om zich aan te passen aan een verandering in stijghoogte. In bijlagen 14 en 15 zijn de gemeten stijghoogtes gegeven.

Het lijkt dat voor locatie A de beste benadering wordt gevonden voor een leklengte van 0,15 m en voor locatie B voor een leklengte van 0,41 m. Indien echter de bovenkant van de zetting, onderkant van de zetting en de ligging van de freatische lijn worden ingetekend zijn er enkele zaken die niet kloppen. Ten eerste is het verwachte verloop van de stijghoogte in de filterlaag. In de bijlagen is aangegeven hoe het verloop (voor een willekeurige leklengte) ongeveer er uit zou moeten zien. De meting geeft een duidelijk ander verloop. Als wordt uitgegaan van het verwachte verloop wordt een aanzienlijk grotere leklengte gevonden. De verklaring voor het gemeten verloop kan zijn, dat er water uit de uitvullaag naar de mijnsteenlaag stroomt. Hierdoor is de stijghoogte in de uitvullaag minder dan verwacht.

Een tweede punt, dat moeilijk is te verklaren, is dat de punten hoog op het talud, waar geen stijghoogte wordt gemeten, blijken samen te vallen met de bovenkant van de zetting. Vermoedelijk is de correctie voor plaatshoogte niet goed. Op locatie A ten slotte is het laagste punt (waterspanningsmeter 8) onwaarschijnlijk. Ook in bijlage 3 blijkt deze meter onverwacht lage waarden te geven. Hiervoor is geen verklaring gevonden.

Nu wordt gekeken naar de waarden van de leklengte zoals deze theoretisch volgt uit de waarden voor de doorlatendheid, zoals gegeven in tabel 3.1. Hierbij is verondersteld, dat de uitvullaag en de filterlaag van mijnsteen kunnen worden samengesteld tot 1 laag met 1 gemiddelde doorlatendheid. Dit resulteert in een filterlaagdikte van 1,08 m met een gemiddelde doorlatendheid van maximaal  $1,9 \cdot 10^{-3}$  m/s en minimaal  $4,6 \cdot 10^{-4}$ . De toplaag is 0,25 m dik en heeft een doorlatendheid van  $5 \cdot 10^{-5}$  m/s. De leklengte ligt met deze getallen tussen 1,58 m en 3,20 m.

Een tweede redenering is die waarbij, gezien de duidelijk grotere doorlatendheid van de mijnsteenlaag, de uitvullaag van ingezand grind als onderdeel van de toplaag wordt opgevat. De doorlatendheden van toplaag en grindlaag liggen inderdaad in dezelfde orde van grootte. Aangenomen wordt nu, dat de toplaag een doorlatendheid heeft van  $5 \cdot 10^{-5}$  m/s en 33 cm dik is. De filterlaag is 1 m dik en heeft een doorlatendheid tussen  $2 \cdot 10^{-3}$  m/s en  $5 \cdot 10^{-4}$  m/s. De aldus berekende leklengte ligt tussen 3,63 m en 1,82 m. De leklengte wordt groter.

In beide gevallen is de leklengte groter dan de minimale waarde zoals deze volgt uit de metingen. Als de veronderstelling klopt, dat basismateriaal en teenconstructie relatief doorlatend zijn, en in belangrijke mate bijdragen aan de waterhuishouding in het filter kan een alternatieve redenering worden opgezet.

Stel dat de doorlatendheid van het basismateriaal en de teenconstructie niet verwaarloosbaar zijn ten opzichte van de doorlatendheid van de toplaag. Dan moet rekening gehouden worden met het feit, dat de effectieve doorlatendheid van de constructie groter is dan alleen de toplaagdoorlatendheid. Bovendien is het doorstroomoppervlak ook groter dan wanneer alleen water door de toplaag wordt toegevoerd. Als de som van watertoevoer door toplaag, teenconstructie en basismateriaal

Bladnummer : - 10 -  
Ons kenmerk: CO-341960/16  
Datum : october 1993

wordt uitgedrukt in alleen een toplaagdoorlatendheid, aangezien alleen deze grootheid in de formule voor de leklengte wordt meegenomen, dan is er sprake van een fictieve toplaagdoorlatendheid ter grootte van:

$$k_{\text{toplaag, fictief}} = \frac{k_{\text{toplaag}} \cdot A_{\text{toplaag}} + k_{\text{teen}} \cdot A_{\text{teen}} + k_{\text{basis}} \cdot A_{\text{basis}}}{A_{\text{toplaag}} + A_{\text{teen}} + A_{\text{basis}}}$$

Als aangenomen wordt dat het doorstroomoppervlak van teen plus basismateriaal ongeveer even groot is als het doorstroomoppervlak van de toplaag, de doorlatendheid van teen en basis  $1 \cdot 10^{-4}$  m/s is en de doorlatendheid van de toplaag  $5 \cdot 10^{-5}$  m/s, dan wordt de (fictieve) toplaagdoorlatendheid gelijk aan  $1,5 \cdot 10^{-4}$  m/s. Omdat het doorstroomoppervlak twee maal zo groot is dan alleen het doorstroomoppervlak van de toplaag (het filter wordt van twee kanten gevuld) wordt de effectieve filterbreedte teruggebracht tot de helft. Deze redenering resulteert in leklengtes tussen 1,29 m en 0,35 m. Uit de drie gegeven redeneringen lijkt de laatste het meest waarschijnlijke.

#### 4. CONCLUSIES

De meting van getij en freatische lijn te Lauwersoog kan niet succesvol worden nagerekend. Wel kan worden aangetoond, dat de reden hiervoor is, dat het basismateriaal een grote rol speelt in het geheel.

Het gebruik van termen als lektijd en leklengte om aan te geven hoe een constructie reageert is niet meer correct. Deze termen hebben betrekking op een gesloten systeem van toplaag en filterlaag. Dat is in dit geval geen goede benadering.

Het alternatief is om de stroming door het basismateriaal mee te modelleren. De bestaande modellen zijn hier niet op berekend. Een grove benadering, door het filter heel dik te kiezen en de doorlatendheid van zand toe te passen, geeft wel een idee wat er gebeurt, maar geen kwantitatief correcte resultaten.

Het lijkt dienstig om bij het gebruik van leklengte en lektijd een fysisch begrip te hebben van hetgeen zich afspeelt. De meting van getij en freatische lijn blijkt in dit geval gedomineerd te worden door de doorlatendheid van het basismateriaal. De gemeten leklengte kan alleen worden benaderd door aan het basismateriaal een rol toe te kennen.

De bepaalde leklengte is niet zonder meer van toepassing op de reactie van de zetting op korte golven. Ook bij het uitwerken van de resultaten van de infiltratieproef zal voor het berekenen van de leklengte en de lektijd een evenwicht gevonden moeten worden tussen de hoeveelheid water die de uitvullaag instroomt via de infiltratiebak, en de hoeveelheid water die de uitvullaag verlaat via toplaag en filterlaag. Aangezien de waterspanningsmeters in de uitvullaag zijn aangebracht wordt het verloop over de hoogte en in de tijd van de waterspanning in de uitvullaag gemeten. Deze waterspanningen kunnen worden beïnvloed door stroming tussen filterlaag en uitvullaag en wellicht ook door stroming tussen filterlaag en basismateriaal. Het is goed dit vooraf vast te stellen.

De resultaten van de getijmeting verlopen in overeenstemming met het volgende scenario:

- Veronderstel eerst dat waterstand buiten de constructie en in de constructie gelijk zijn.
- Vervolgens stijgt de buitenwaterstand. In het geval, dat alleen de filterlaag en de uitvullaag gevuld hoeven te worden, is de toplaag voldoende doorlatend om een bijna even grote stijging in de filterlaag te genereren, die met slechts een beperkte vertraging de buitenwaterstand volgt. Het niveau van de freatische lijn in het basismateriaal zal ook stijgen, omdat er een doorgaande verbinding is met het voorland. Dit stijgen van de freatische lijn in het basismateriaal gaat echter langzamer, omdat het basismateriaal beperkt doorlatend is en het oppervlak dat gevuld moet worden zich uitstrekt over een groot deel van het dijklichaam.
- Het niveau van de freatische lijn in het filter kan in principe sneller stijgen, dan dat van het basismateriaal. Er ontstaat een verhang tussen filter en basismateriaal. Er stroomt water uit het filter richting basismateriaal. Hierdoor wordt de stijging van de freatische lijn in het filter sterk afgeremd. Het niveau blijft laag, en de variatie in freatische lijn in het filter kan niet veel groter worden dan die van het basismateriaal.

Uit de peilbuiswaarnemingen (lit. 2) blijkt zelfs dat de amplitude van de waterbeweging in de filterlaag kleiner is dan die in het basismateriaal. Dit is alleen mogelijk als op die locatie de toplaag minder doorlatend is dan het basismateriaal.

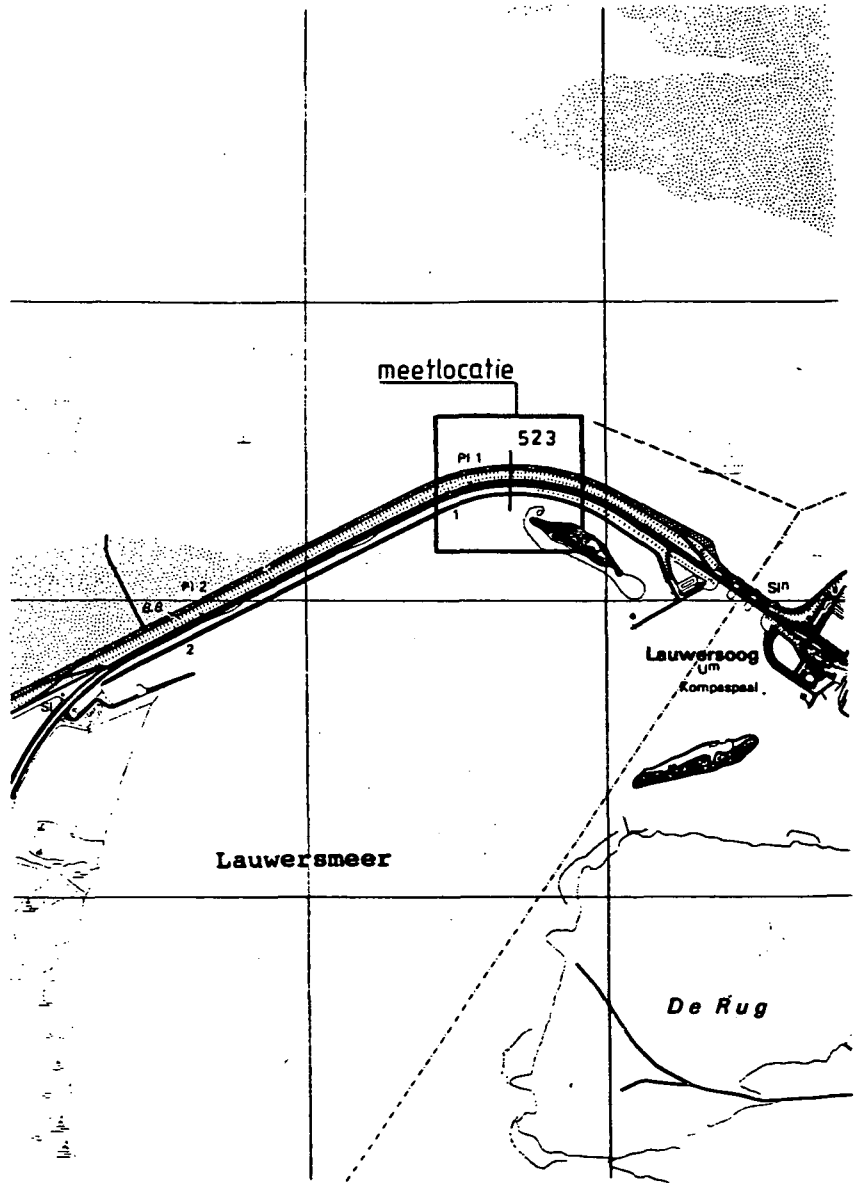
Bladnummer : - 12 -  
Ons kenmerk: CO-341960/16  
Datum : oktober 1993

#### REFERENTIES

1. Rapport betreffende natuurmetingen op de Lauwersmeerdam ten behoeve van steenzetonderzoek. Fugro b.v. M-0078, Januari 1993.
2. Peilbuisonderzoek Lauwersmeerdam. Rijkswaterstaat, Dienst Weg- en Waterbouwkunde. Notanr. WBA-N-87.026. Juli 1987.
3. Veroudering van steenzettingen. Grondmechanica Delft. CO-316860/3. Maart 1991.
4. Taludbekledingen van gezette steen. Samenvatting onderzoeksresultaten 1980-1988. Deel XXIV.

**BIJLAGEN**





**GRONDMECHANICA  
DELFT**

Postbus 69, 2600 AB Delft Nederland  
Telefoon (015) 69 35 00

Telefax (015) 61 06 21  
Telex 38234 soil nl

datum  
**10-08-93**

get.  
Std

Meetlocatie  
(Bron: Fugro-rapport, bijlage M-0078-1)

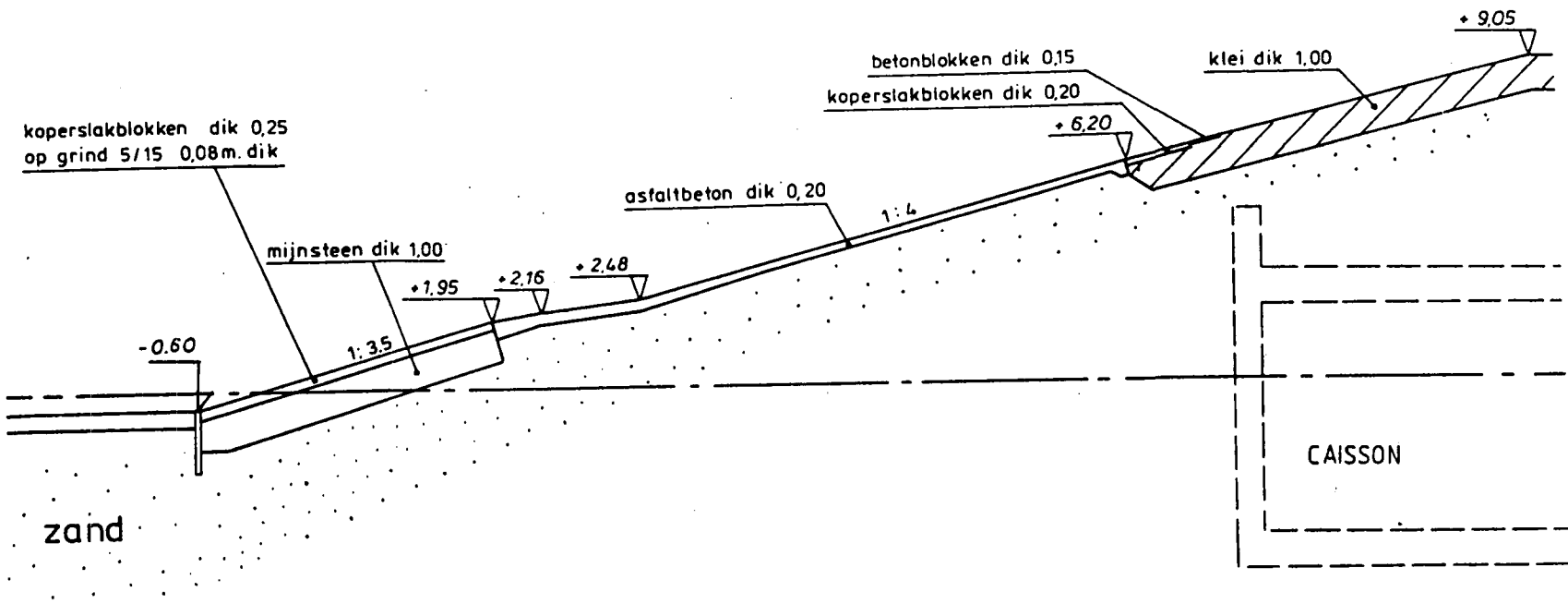
CO-341960

gez.

Lauwersmeerdam

BIJL. 1

form.  
A / 4



**GRONDMECHANICA  
DELFT**

Postbus 69, 2600 AB Delft, Nederland  
Telefoon (015) 69 35 00

Telefax (015) 61 08 21  
Telex 38294 scil nl

Geometrie

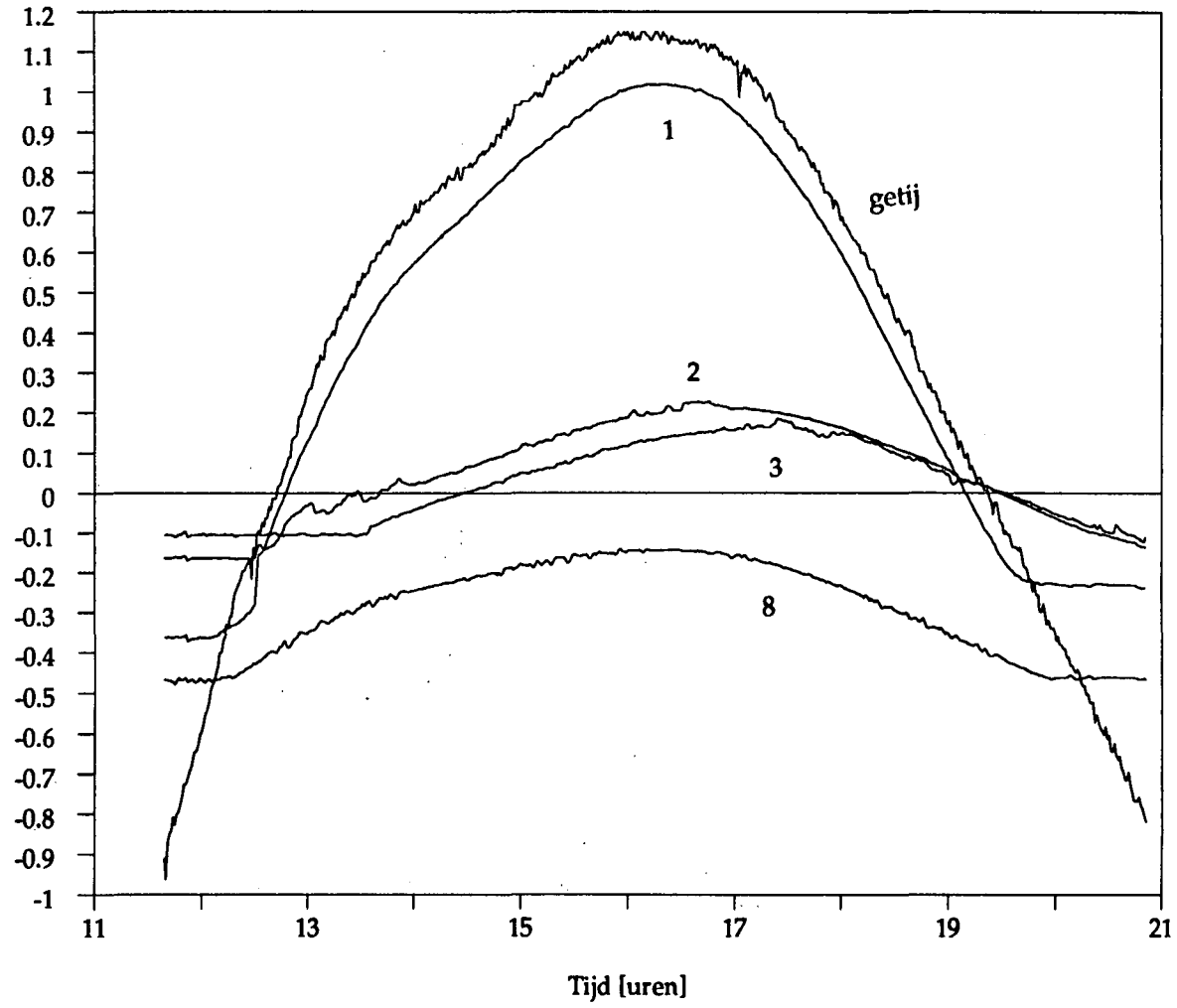
(bron: Fugro-rapport, bijlage M-0078-3

Lauwersmeerdam

datum	10-08-93	gez.	Svd
CO-341960		form.	A/4
BIJL. 2			

# Getijmeting Lauwersoog 07.07.92

Wsm 1,2,3,8



stijghoogte [m++NAP]



**GRONDMEECHANICA  
DELFT**

Postbus 69, 2600 AB Delft Nederland  
Telefoon (015) 69 35 00

Telefax (015) 61 08 21  
Telex 36234 scil nl

datum  
**10-08-93**

get.  
Sid

Resultaat meting locatie A

CO-341960

gez.

Getij en WSM 8,1,2,3

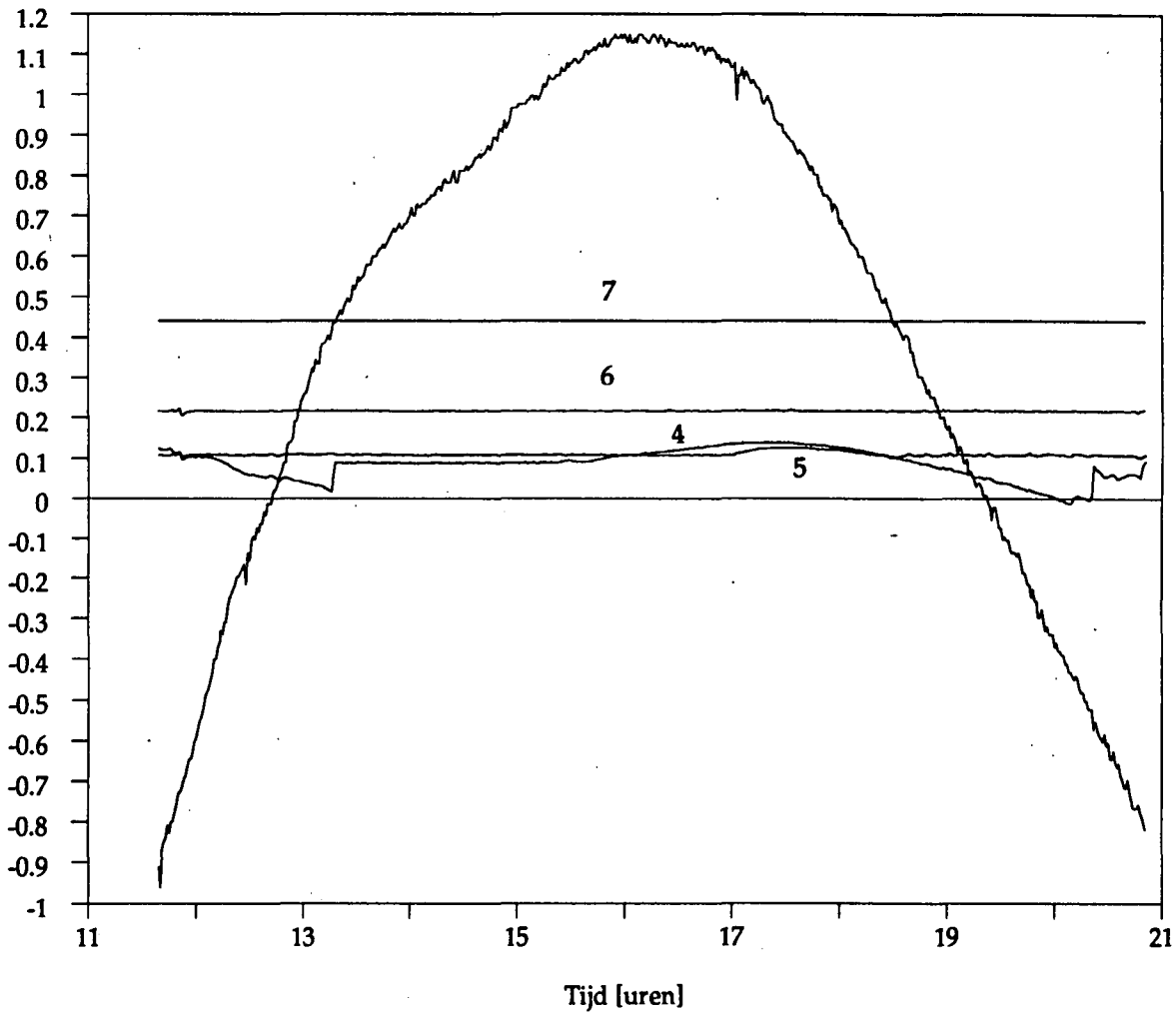
Lauwersmeerdam

BIJL. 3

form.  
A / 4

# Getijmeting Lauwersoog 07.07.92

Wsm 4,5,6,7



[stijg]hoogte [m] NAP



**GRONDMECHANICA  
DELFT**

Postbus 69, 2600 AB Delft Nederland  
Telefoon (015) 69 35 00

Telefax (015) 61 06 21  
Telex 38234 soil nl

datum  
**10-08-93**

get.  
**Sd**

**CO-341960**

gez.

B.J.L. **4**

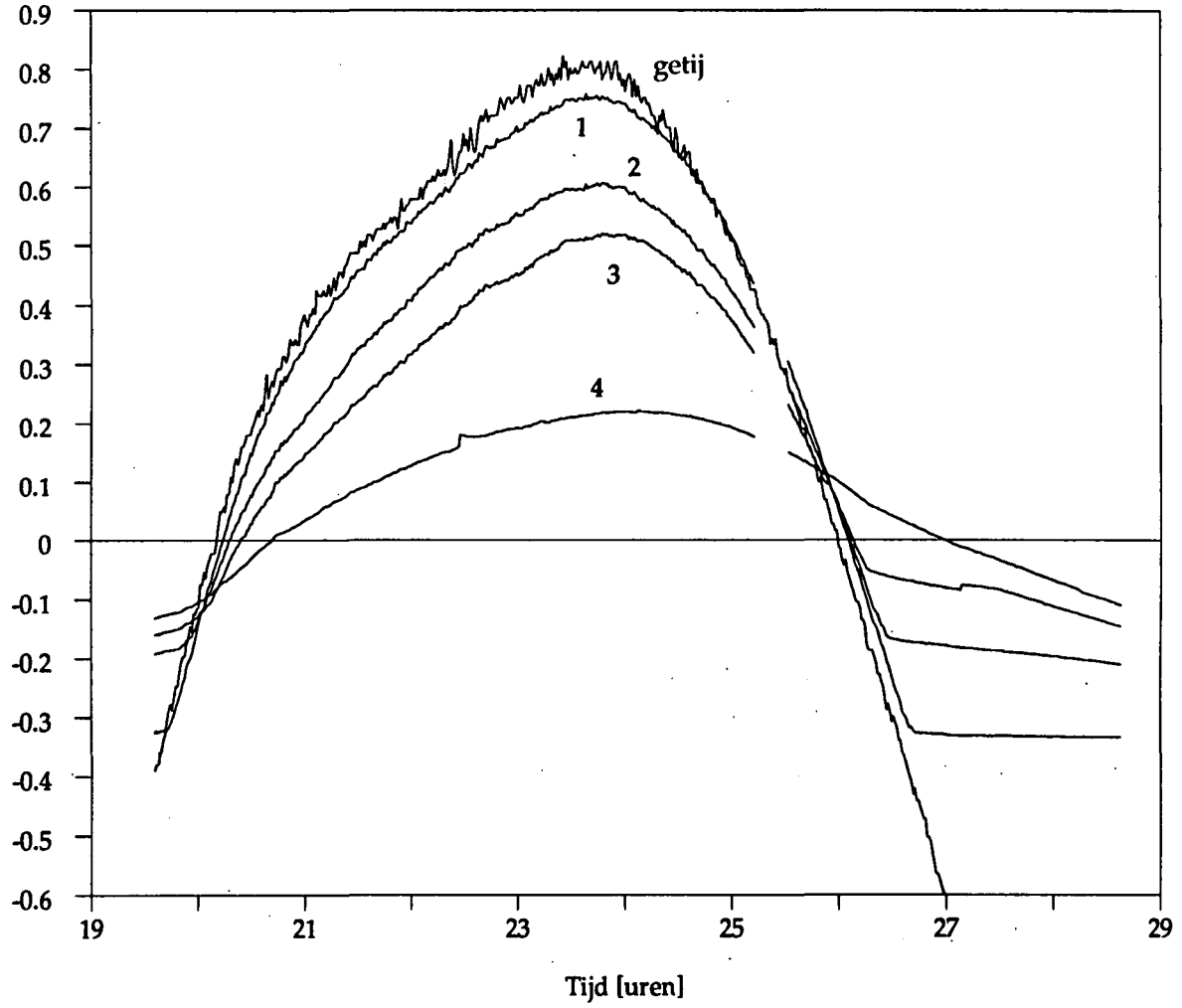
form.  
**A/4**

Resultaat meting locatie A  
Getij en WSM 4,5,6,7

Lauwersmeerdam

# Getijmeting Lauwersoog 15.07.92

Wsm 1,2,3,4



Stijghoogte [m+NAP]



**GRONDMEECHANICA  
DELFT**

Postbus 69, 2600 AB Delft Nederland  
Telefoon (015) 69 95 00

Telefax (015) 61 08 21  
Telex 38234 scil nl

datum  
10-08-93

get.  
Std

CO-341960

gez.

BIJL. 5

form.  
A  
4

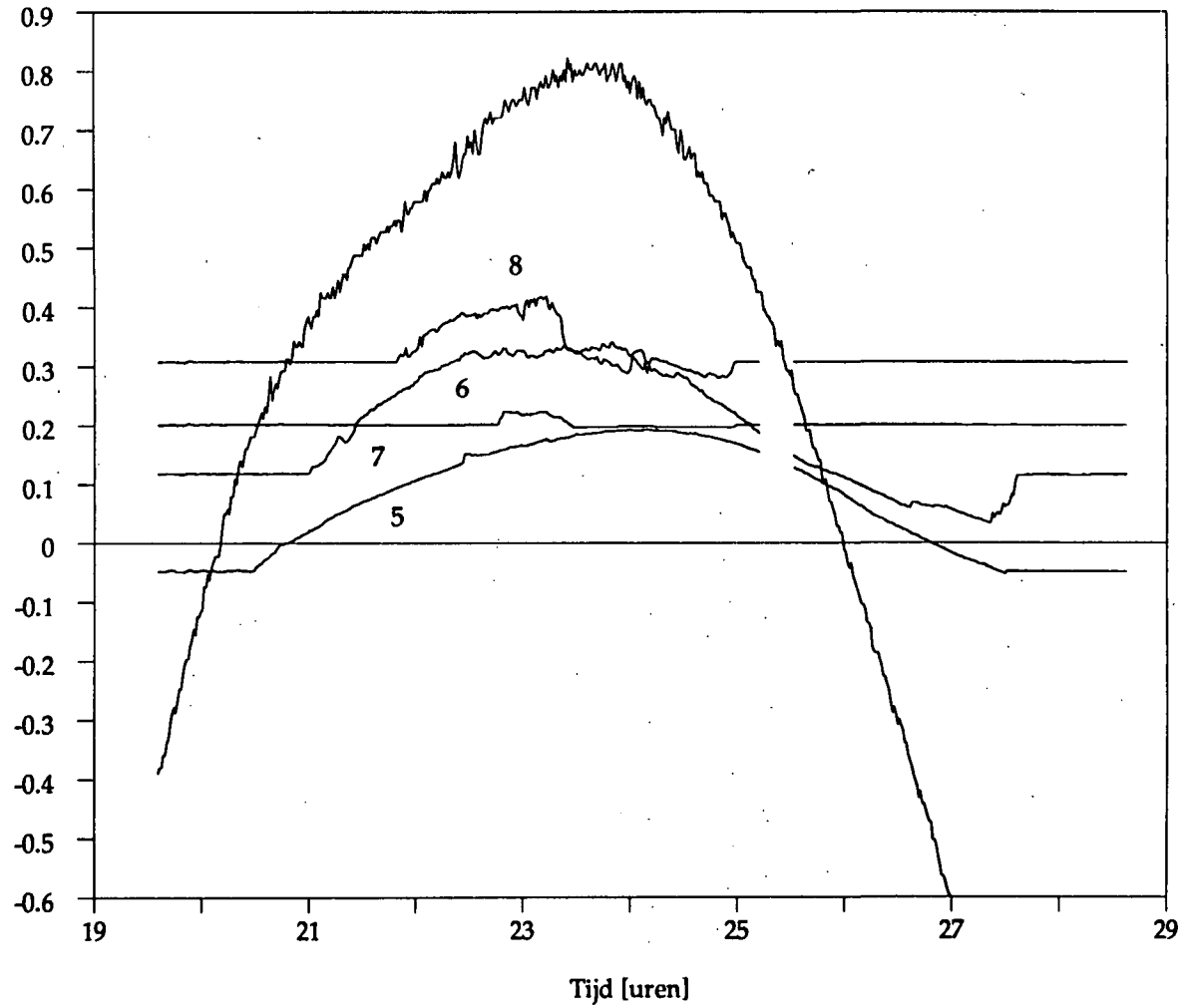
Resultaat meting locatie B  
Getij en WSM 1,2,3,4

Lauwersmeerdam

# Getijmeting Lauwersoog 15.07.92

Wsm 5,6,7,8

Stijghoogte [m+NAP]



**GRONDMECHANICA  
DELFT**

Postbus 69, 2600 AB Delft Nederland  
Telefoon (015) 69 35 00

Telefax (015) 61 08 21  
Telex 38234 soil nl

Resultaat meting locatie B  
Getij en WSM 5,6,7,8  
Lauwersmeerdam

datum  
10-08-93

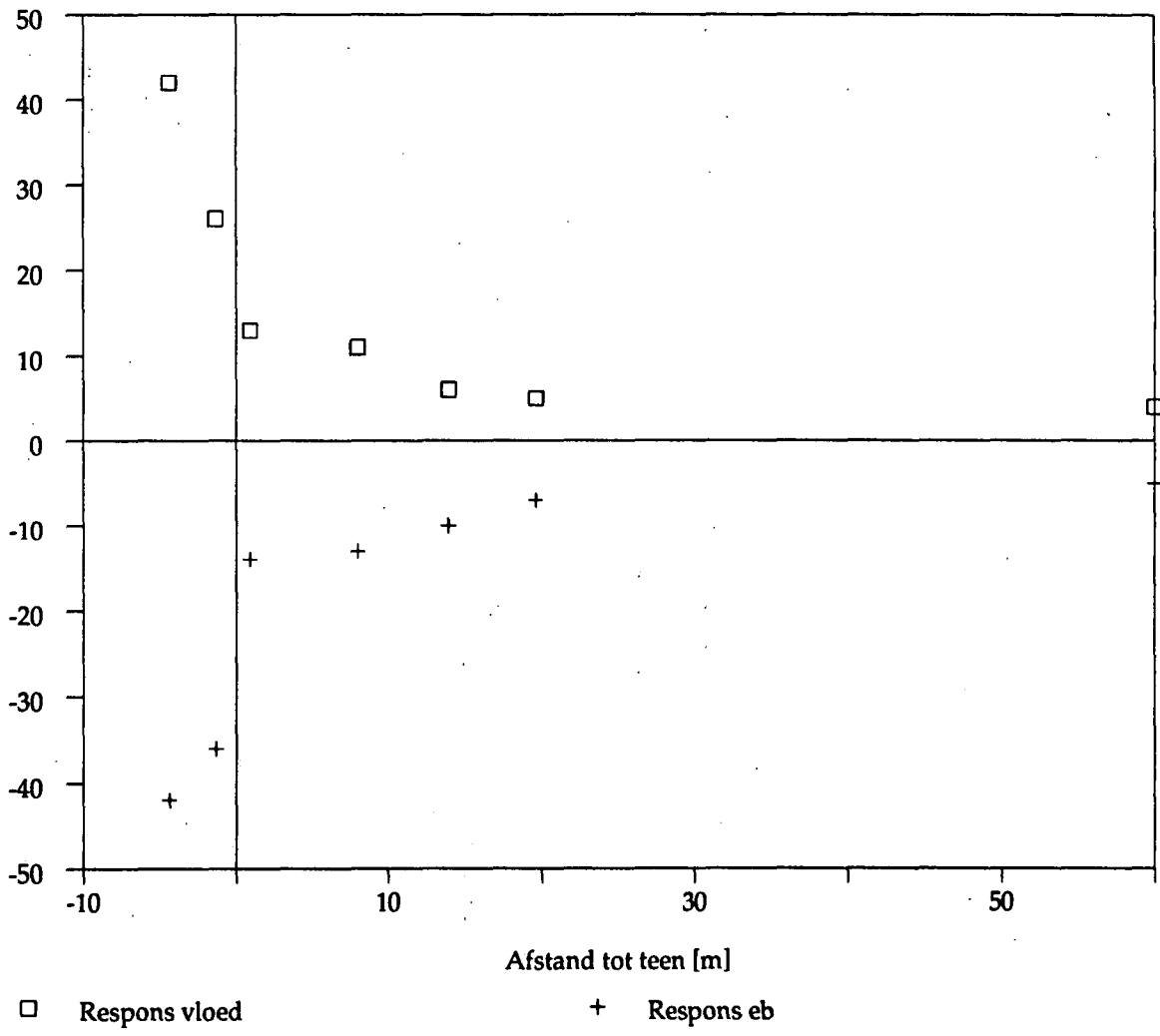
CO-341960

BIJL. 6

get.  
SWI

gez.

form.  
A  
4



Respons amplitude t.o.v. getij [%]



**GRONDMEECHANICA  
DELFT**

Postbus 69, 2600 AB Delft Nederland  
Telefoon (015) 69 35 00

Telefax (015) 61 08 21  
Telex 36234 scil rl

datum  
10-08-93

get.  
Stl

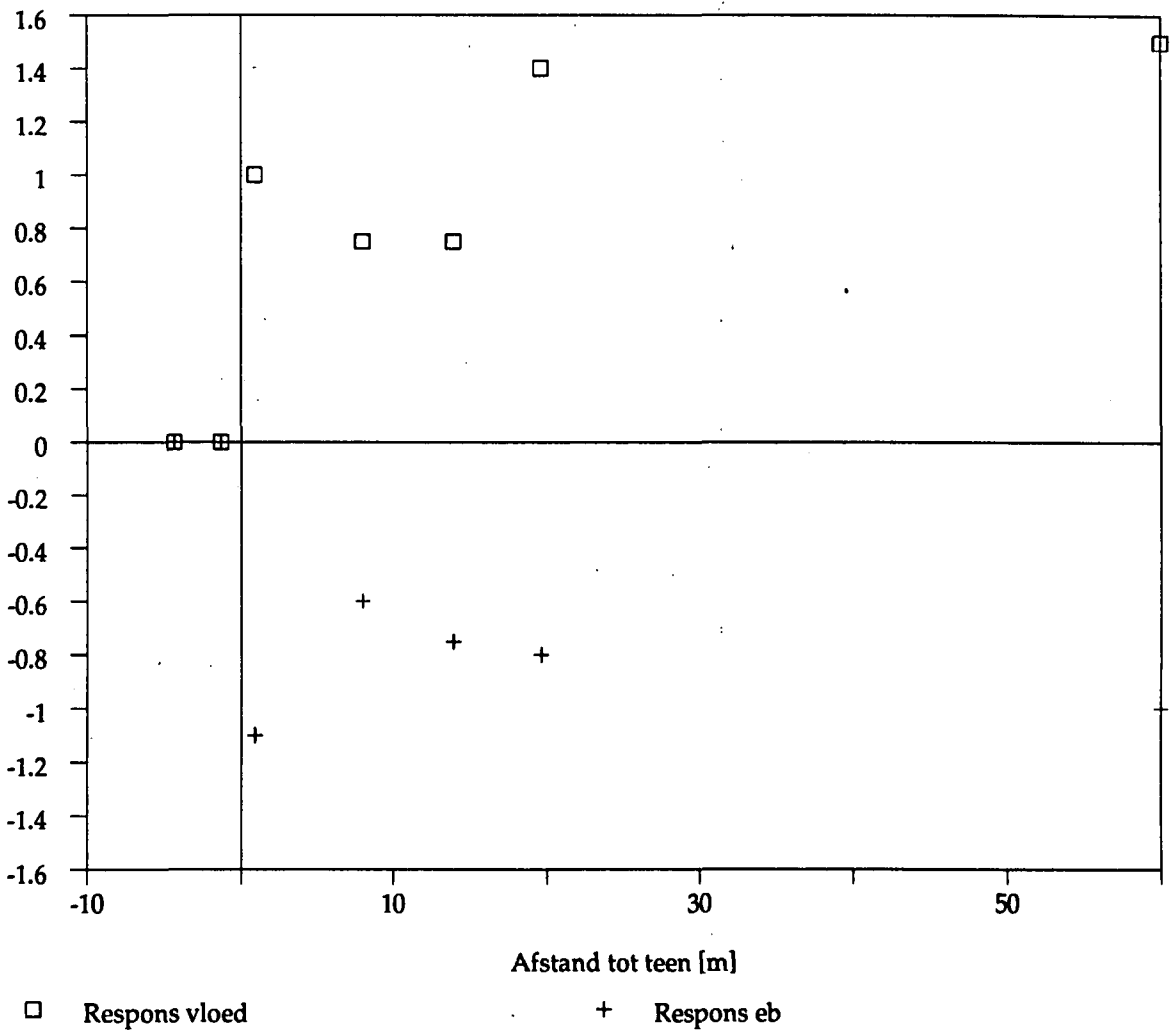
CO-341960

gez.

Peilbuisonderzoek  
Respons in dijkllichaam op getij: amplitude  
Lauwersmeerdam

BIJL. 7

form.  
A  
4



Vertraging t.o.v. getij [%]



**GRONDMEECHANICA  
DELFT**

Postbus 69, 2600 AB Delft Nederland  
Telefoon (015) 69 35 00

Telefax (015) 61 08 21  
Teleex 38234 soil nl

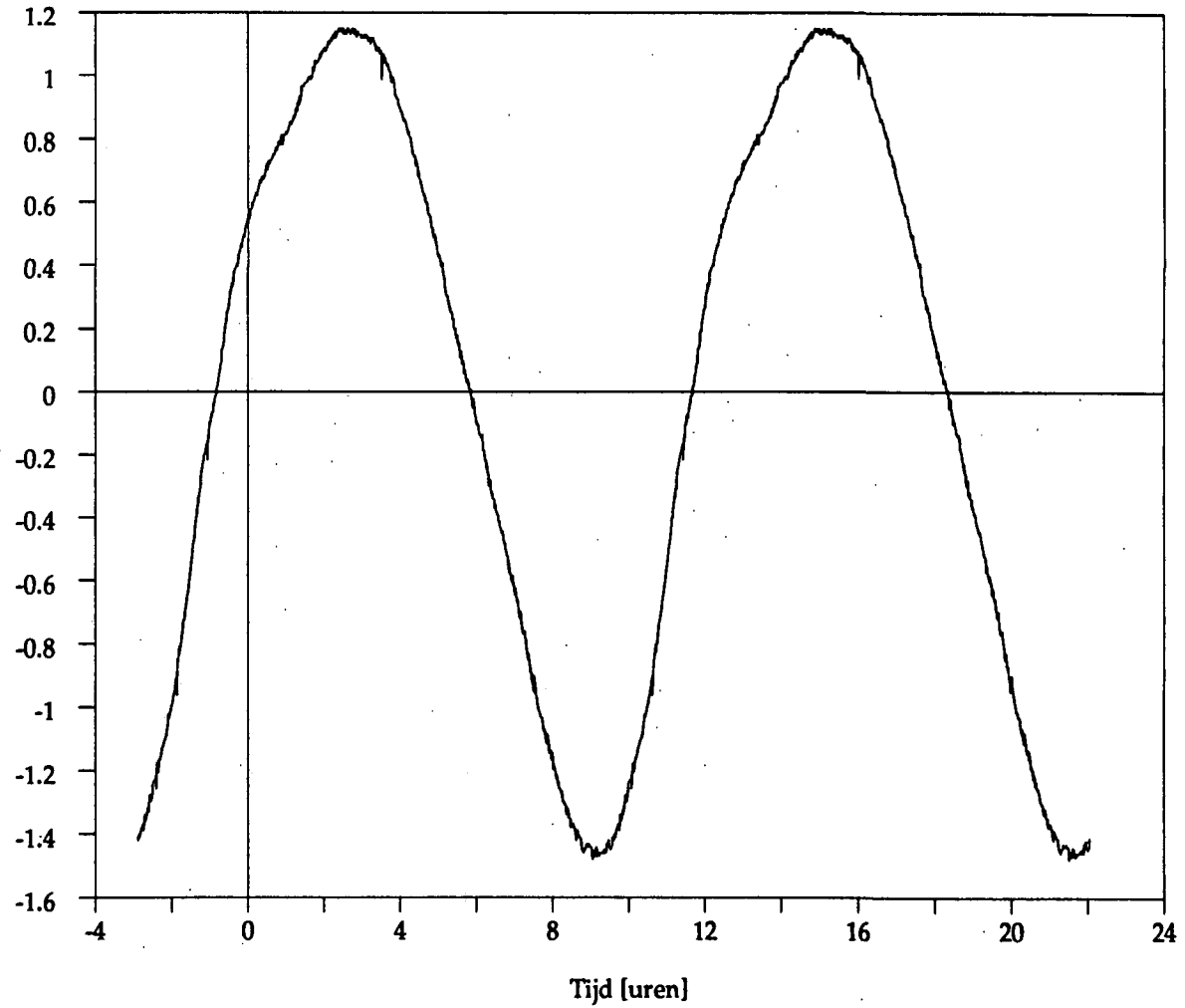
Peilbuisonderzoek  
Respons in dijklichaam op getij: faseverschil  
Lauwersmeerdam

get. Std	datum 10-08-93	CO-341960	BIJL. 8
gez.			form. A 4



# Getij 07.07.92

Geconstrueerd Lauwersoog locatie A



Getij [m+NAP]



**GRONDMECHANICA  
DELFT**

Postbus 69, 2600 AB Delft Nederland  
Telefoon (015) 69 35 00

Telefax (015) 61 08 21  
Telex 38234 soil nl

10-08-93 datum

CO-341960

BIJL. 9

get.  
Std

gez.

form.  
A  
4

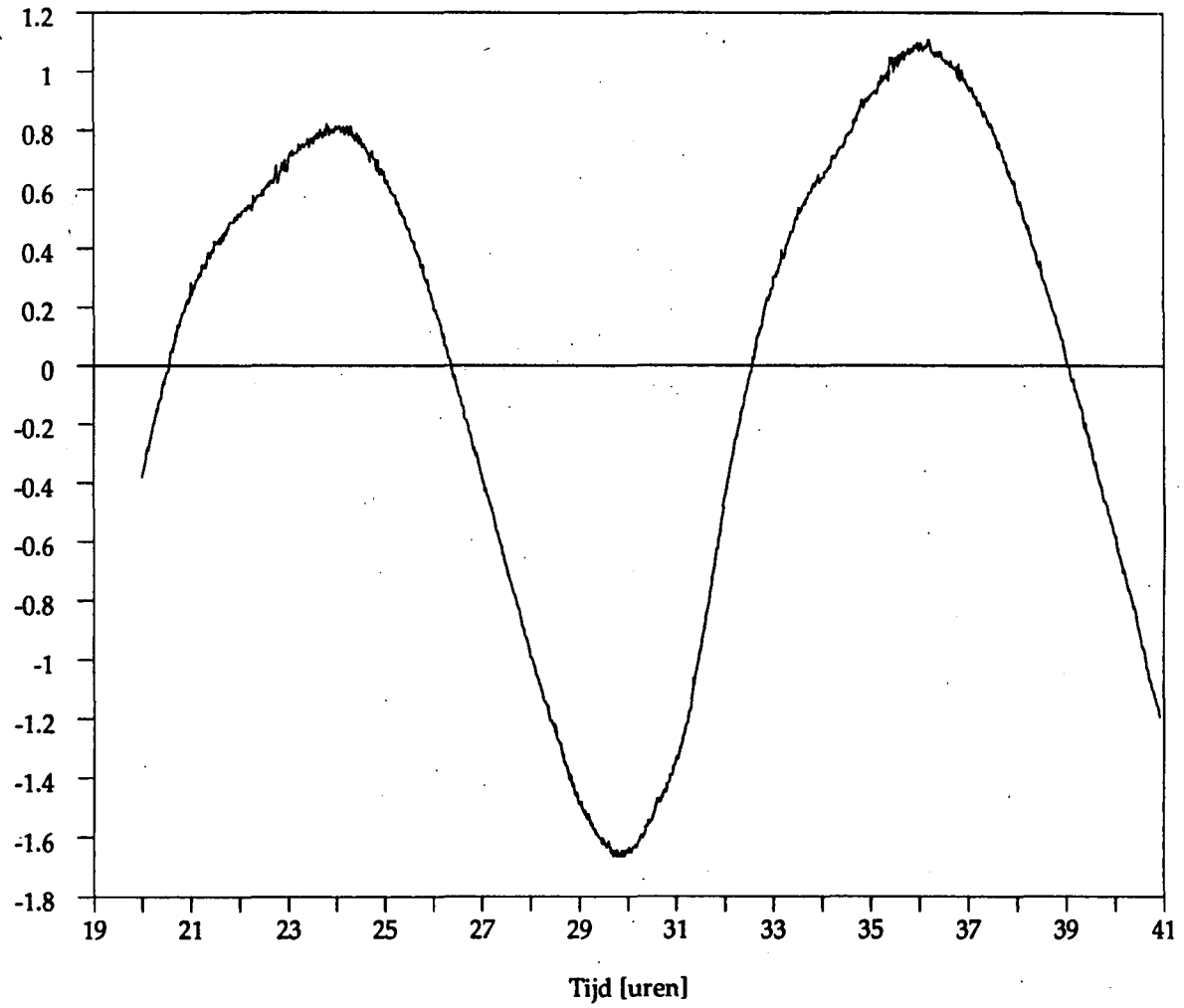
Getijdemeting

Locatie A, 07.07.1992

Lauwersmeerdam

# Getij 15.07.92/16.07.92

Gemeten Lauwersoog locatie B



Getij [m+NAP]



**GRONDMEECHANICA  
DELFT**

Postbus 69, 2600 AB Delft Nederland  
Telefoon (015) 69 35 00

Telefax (015) 61 08 21  
Telex 38234 soil nl

datum  
10-08-93

CO-341960

BIJL. 10

get.  
Svd

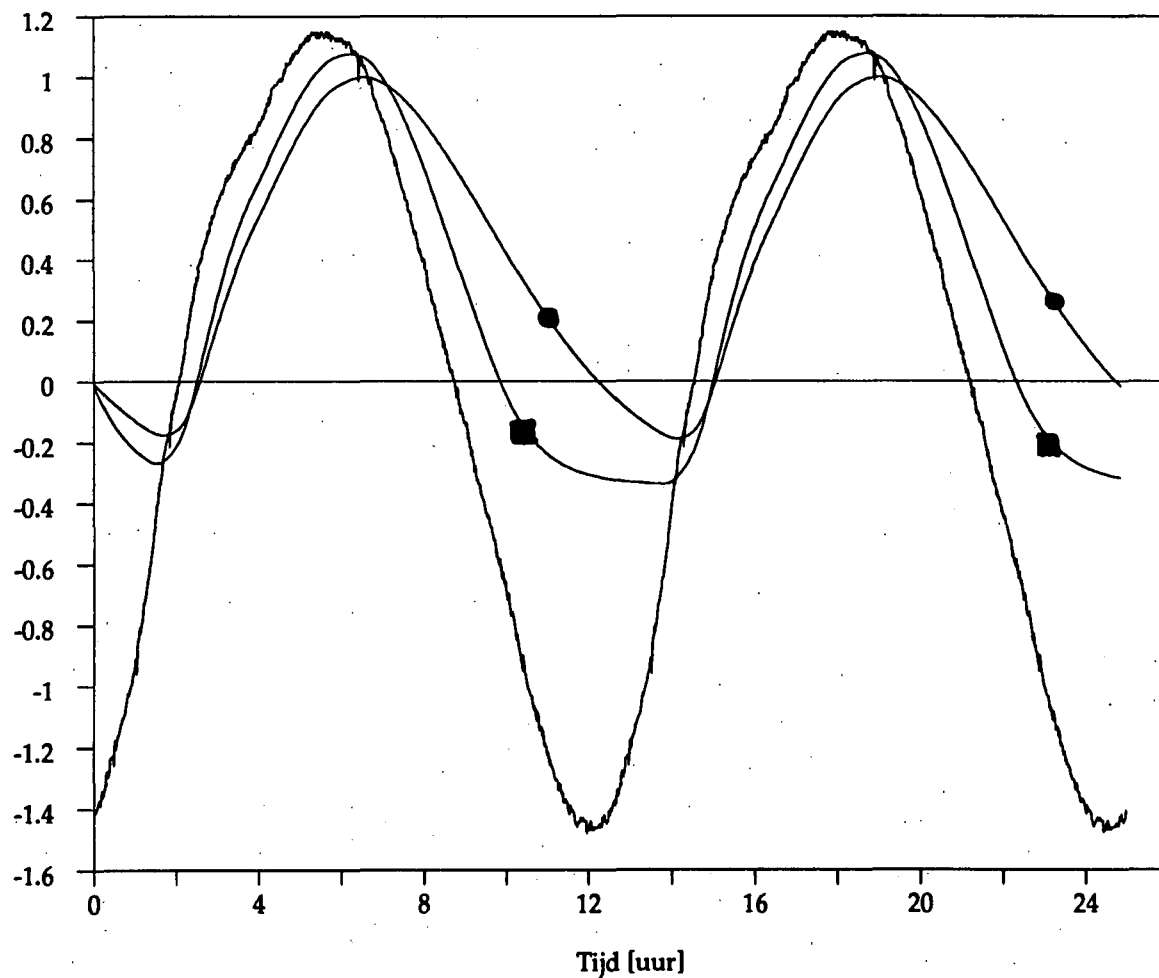
form.  
A  
4

Getijdemeting

Locatie B, 15.07.1992

Lauwersmeerdam

# Getij en freatische lijn



Getij en freatische lijn [m + NAP]

— Getij

-■- k = 1.9E-3 m/s

-●- k = 4.6E-4 m/s



**GRONDMEECHANICA  
DELFT**

Postbus 89, 2600 AB Delft, Nederland  
Telefoon (015) 89 35 00

Telefax (015) 61 08 21  
Telex 38234 soil nl

Narekenen meting locatie A  
bij verwachte doorlatendheid van filter  
Lauwersmeerdam

10-08-93 datum

CO-341960

B.J.L. 11

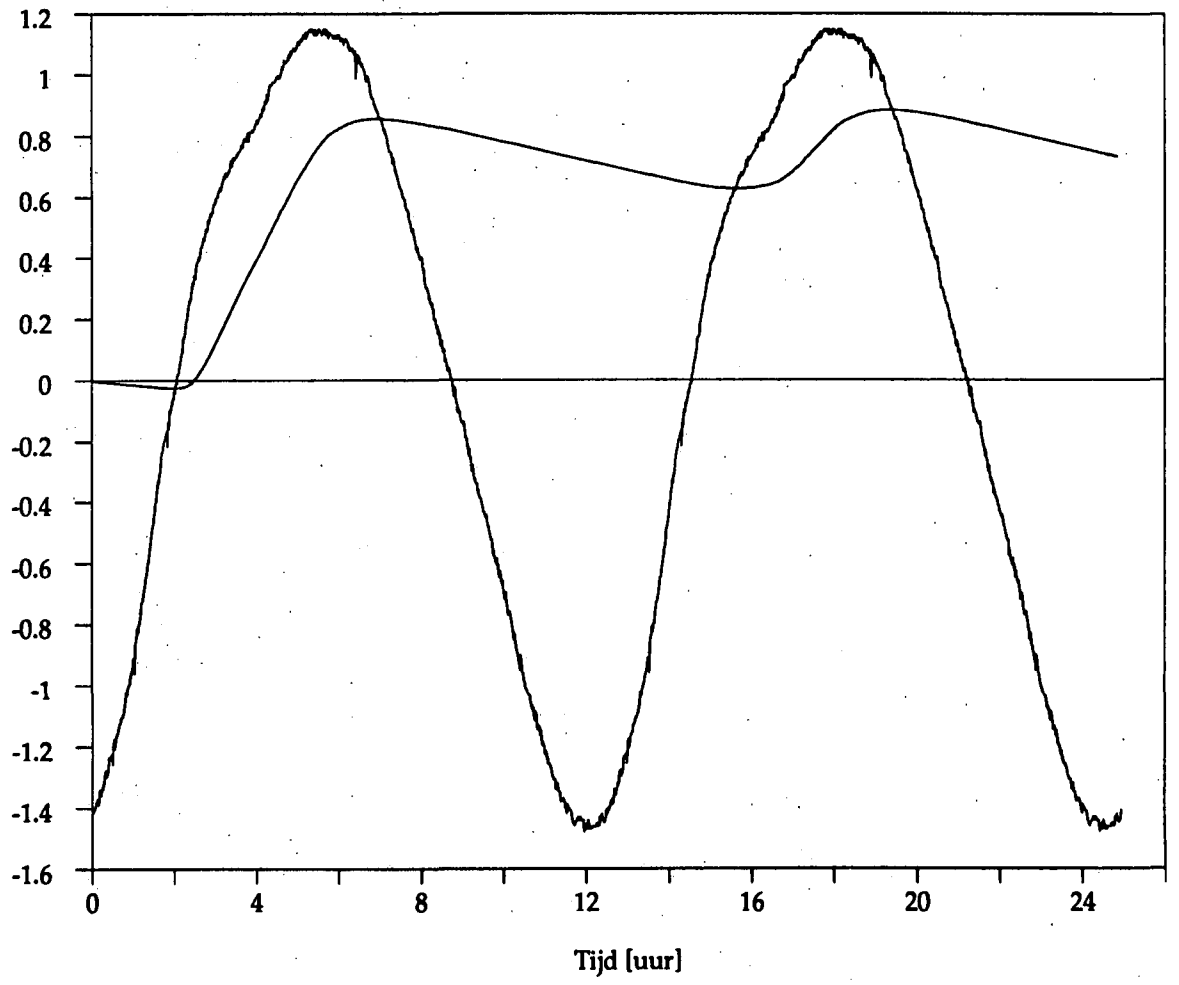
get. Std

gez.

form. A/4

# Getij en freatische lijn

$k = 5E-5 \text{ m/s}$



Getij en freatische lijn [m + NAP]

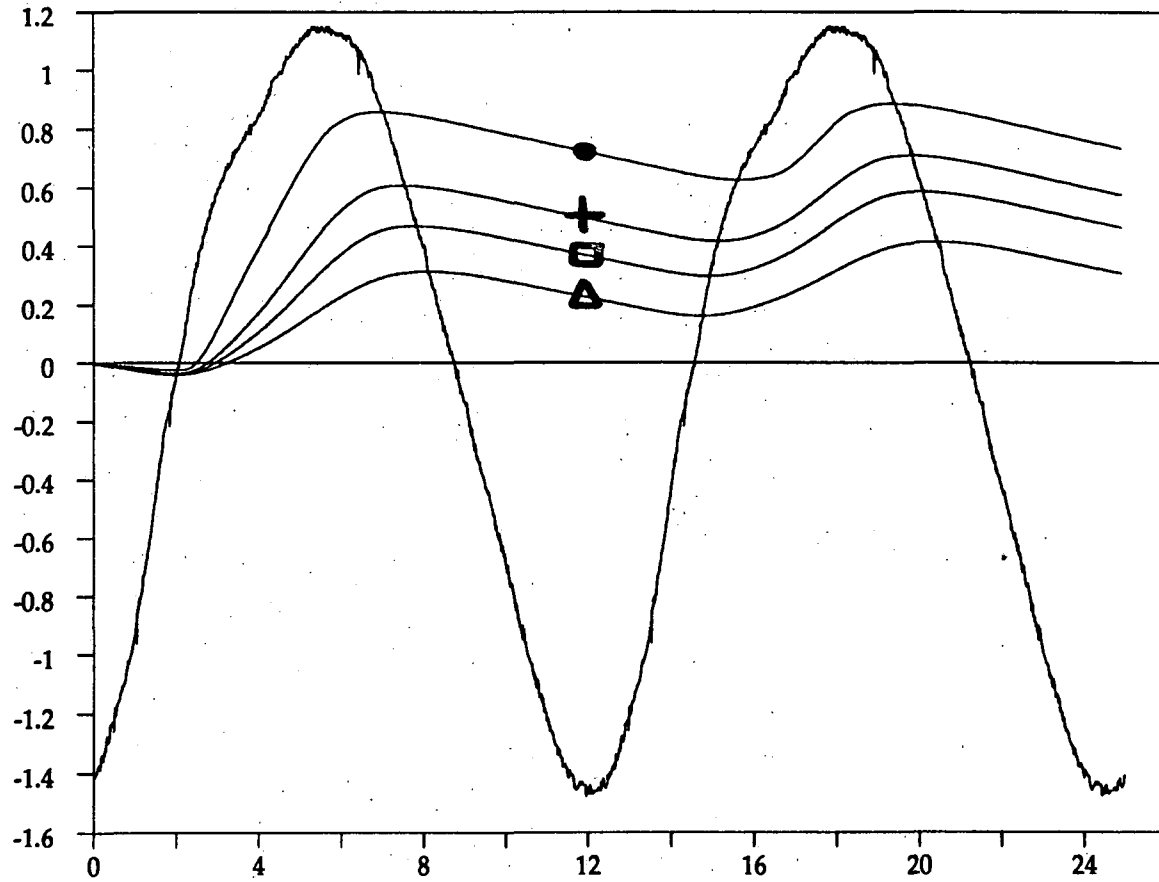
**GRONDMEECHANICA**  
**DELFT**  
 Postbus 69, 2600 AB Delft, Nederland  
 Telefoon (015) 69 35 00  
 Telefax (015) 61 08 21  
 Telex 38234 scil nl

Narekenen meting locatie A  
 Extreem lage filterdoorlatendheid  
 Lauwersmeerdam

datum	10-08-93	get.	Sid
CO-341960		gez.	
BIJL. 12		form.	A/4

# Getij en freatische lijn

$k = 5E-5$  m/s, dikte filter varieert



Getij en freatische lijn [m + NAP]

— Getij
● b = 1,08 m
+ b = 5,08 m  
□ b = 10,08 m
△ b = 25,08 m



**GRONDMECHANICA  
DELFT**

Postbus 69.2600 AB Delft Nederland  
Telefoon (015) 69.35.00

Telefax (015) 61.08.21  
Telex 98234 soil nl

Narekenen meting locatie A  
Invoerd basismateriaal

Lauwersmeerdam

datum	10-08-93	get.	Sid
CO-341960		gez.	
BJL. 13		form.	A/4

Lauwersmeerdam

Locatie A

Leklengetebepaling



GRONDMEECHANICA  
DELFT

Postbus 69, 2600 AB Delft Nederland  
Telefoon (015) 69 35 00

Telefax (015) 61 08 21  
Telex 38234 soll nl

BIJL. 14

CO-341960

A/4

form.

gez.

datum  
26-10-93

get.  
Sid

Stijghoogte, getij en freat. lijn [m+NAP]

