



Opdrachtgever:

Rijkswaterstaat

Dienst Weg- en Waterbouwkunde, TAW-A2

Open Taludbekledingen

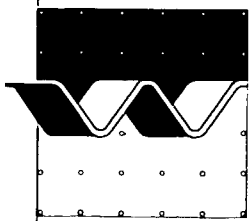
Stabiliteit van blokken op klei

Analyse van Deltagootonderzoek, A2.95.97

December 1995



**GRONDMECHANICA
DELFT**



Open Taludbekledingen

Stabiliteit van blokken op klei

1. Rapport nr. A2-95-97	2. Serie nr. TAW-A2	3. Ontvanger catalogus nummer	
4. Titel en sub-titel Open taludbekledingen Stabiliteit van blokken op klei Analyse van Deltagootmetingen		5. Datum rapport December 1995	
		6. Kode uitvoerende organisatie H1770 / H1550 / H2500	
7. Schrijvers WL : M. Klein Breteler, G.M. Smith en J.P. de Waal DWW: B.P. Rigter		8. Nr. rapport uitvoerende organisatie	
9. Naam en adres opdrachtnemer Waterloopkundig Laboratorium Voorsterweg 28, Marknesse Postbus 152 8300 AD Emmeloord		10. Projektnaam TAWA*STEENZ	
		11. Kontraktnummer DWW-807 en 3100/2061	
12. Naam en adres opdrachtgever Rijkswaterstaat Dienst Weg- en Waterbouwkunde Postbus 5044 2600 GA Delft		13. Type rapport	
		14. Kode andere opdrachtgever	
15. Opmerkingen			
16. Referaat Het onderhavige verslag geeft een diepgaande analyse van de metingen in Deltagoot met blokken op klei. De analyse van de gemeten blokbeweging en stijghoogtes op en onder de toplaag heeft geleid tot kwantificering van de leklengte van de constructie. Deze blijkt goed overeen te komen met de berekende leklengte op basis van formules voor steenzettingen op geulen. Het is gebleken dat de traagheid van het water in de geulen geen significante invloed heeft op de stabiliteit. Tot slot is er een concreet advies gegeven voor het bepalen de stabiliteit van zettingen op klei in de praktijk voor het geval dat er enige beginnende geulvorming onder de zetting is ontstaan.			
17. Trefwoorden Gezette steen, Dijkbekleding, steenzetting, klei, leklengte, geulen		18. Distributie systeem	
19. Classificatie Vrij toegankelijk	20. Classificatie deze pagina	21. Aantal blz.	22. Prijs

Inhoud

- Sectie 1** **Samenvatting van onderzoeksresultaten**
- Sectie 2** **Stabiliteit van talusbekleding met blokken op klei**
Eerste fase van analyse van Deltagootmetingen
- Sectie 3** **Stabiliteit van talusbekleding met blokken op klei**
Tweede fase van analyse van Deltagootmetingen
- Sectie 4** **De invloed van geulen op de stabiliteit van steenzettingen**
- Sectie 5** **De invloed van de traagheid van het water in de geulen**

Sectie 1

Samenvatting van onderzoeksresultaten

1 Inleiding

De afgelopen decennia was de algemene opvatting dat een steenzetting op een kleilaag een hoge stabiliteit zou hebben. Daarom zijn er met name in Zeeland vele kilometers dijk bekleed met een dergelijke constructie. Helaas bleek in de praktijk dat erosie van het klei-oppervlak na enige jaren leidt tot geulen. Deze geulen zijn doorgaans orde een decimeter breed en een aantal centimeters diep, maar kunnen lokaal wel een meter diep zijn.

Ze vormen een ernstige bedreiging voor de stabiliteit van de bekleding.



Foto Geulvorming in klei-oppervlak onder steenzetting

Eind 1991 is een grootschalig modelonderzoek gestart in de Deltagoot van het Waterloopkundig Laboratorium (WL) om deze geulerosie en de consequenties hiervan op de stabiliteit van de toplaag te onderzoeken. Een meetverslag van dat modelonderzoek is gemaakt door Wouters (1993).

In het voorliggende verslag is een diepgaande analyse op basis van de metingen gegeven van de stabiliteit van de steenzetting. Hiervoor is de verschuldruk over de zetting en de beweging van afzonderlijke blokken geanalyseerd.

Het onderzoek is uitgevoerd in opdracht van de Dienst Weg- en Waterbouwkunde (DWW) en begeleid door de Technische Adviescommissie voor de Waterkeringen (TAW-A2).

Dit verslag is samengesteld door ir M. Klein Breteler van WL op basis van bijdragen van ir G.M. Smith en ir J.P. de Waal van WL en ir B.P. Rigter van de DWW.

Het verslag bestaat uit een eerste sectie met een samenvatting van de onderzoeksresultaten en vervolgens twee secties waarin de twee fases van de analyse is beschreven. In de eerste fase is een algemene analyse gegeven, terwijl in de tweede fase het probleem van de traagheid van het in de geulen bewegende water nader is belicht. Tot slot zijn er twee secties opgenomen met theorieën betreffende de stabiliteit van zettingen op een geulenpatroon.

Het model in de Deltagoot was opgebouwd uit een kleilaag van ongeveer 80 cm dik op een talud van 1:4 (zie Figuur 1 van Sectie 2). De klei was afgewerkt met rulle klei tot een glad oppervlak waarop de blokken van 50 x 50 x 15 cm³ zijn geplaatst.

Er zijn drie proevenseries (X, Y en Z) uitgevoerd met regelmatige golven. In elke serie is de invloed van een afzonderlijke ondergrond op de stabiliteit van de zetting onderzocht (zie tabel). Voor serie X bevonden de blokken zich op een talud van twee soorten klei, waarin zowel natuurlijke als kunstmatige geulen aanwezig waren. Voor de series Y en Z bevonden de blokken zich op zand met een geotextiel, Enka-Drain of direct op klei. Enka-Drain is een materiaal bestaande uit een drainagelaag met een hoge doorlatendheid, aan beide zijden voorzien van een non-woven geotextiel. De drie lagen zijn met elkaar verbonden over het gehele oppervlak.

	Hal-zijde (L)		Meetcabine-zijde (R)	
	Linker deel (Ll)	Rechter deel (Lr)	Linker deel (Rl)	Rechter deel (Rr)
Serie X	Natuurlijke geulen	Natuurlijke geulen	Rechthoekige geulen	Ronde geulen
Serie Y	geulen hersteld met zand en geotextiel	geulen hersteld met zand en geotextiel	Enka-drain op glad klei-oppervlak	Enka-Drain op glad klei-oppervlak
Serie Z	opnieuw hersteld met zand en geotextiel	opnieuw hersteld met zand en geotextiel	Klei zonder geulen	Klei zonder geulen

Tabel Opbouw ondergrond tijdens proevenseries X, Y en Z (zie ook Figuur 3 van Sectie 2)

De steenzetting bestond uit koud tegen elkaar geplaatste betonblokken. Van die blokken waren er 32 voorzien van een drukopnemer op de bovenzijde en 12 van deze 32 blokken hadden bovendien een drukopnemer aan de onderzijde (zie Figuur 2 van Sectie 2). Acht van deze 12 blokken waren iets kleiner gemaakt dan de anderen zodat ze vrij konden bewegen. Deze 8 blokken waren elk voorzien van een verticale verplaatsingsopnemer. De andere blokken waren aan elkaar gekoppeld door middel van een stalen rooster om verticale verplaatsingen te voorkomen.

2 Conclusies

Begin van beweging van losse blokken

De analyse in Sectie 2 laat zien dat in de meeste gevallen een los blok begint te bewegen op het moment dat de golf zich maximaal heeft teruggetrokken en er een steil drukfront zich op het talud bevindt, dus vlak vóór de golfklap. In sommige gevallen begint het blok echter pas te bewegen tijdens de golfklap. In die gevallen was er een lage druk op het talud tussen het drukfront en de golfklap.

Er is geen relatie gevonden tussen het moment van begin van bewegen van een blok en de aard of geometrie van de ondergrond.

Het stijghoogteverschil bij begin van beweging was van geval tot geval zeer verschillend. Hoewel het stijghoogteverschil bij potentiële instabiliteit (stijghoogteverschil in evenwicht met eigen gewicht onder water) steeds 0,18 m was, bleek het stijghoogteverschil bij begin van beweging te variëren tussen -0,4 m (naar beneden gericht belasting bij beginnende opwaartse beweging) en +0,7 m.

Het grote opwaartse stijghoogteverschil zou een gevolg kunnen zijn van onbedoelde wrijving van de losse blokken. Het negatieve stijghoogteverschil is echter ook na heranalyse in Sectie 3 niet volledig opgehelderd.

Er zijn een aantal mogelijkheden geopperd: Het is mogelijk dat de gemiddelde druk op of onder een blok sterk afwijkt van de lokale door de drukopnemers gemeten druk. Juist de druk onder het blok kan van plaats tot plaats erg variëren gezien het feit dat er niet overal onder het blok geulen zijn.

Ook is het mogelijk dat het vaste blok naast het geïnstrumenteerde losse blok, ten opzichte waarvan de bewegingen zijn geregistreerd, toch ook bewogen heeft.

Wellicht moet er niet gelet worden op minimale bewegingen in de orde grootte van 1 à 2 mm. De eerste paar millimeter opwaartse beweging vindt soms plaats tijdens een neerwaarts stijghoogteverschil, terwijl de wat duidelijkere beweging (van meer dan 5 mm) plaatsvindt tijdens een duidelijke opwaarts stijghoogteverschil van 0,3 tot 0,5 m.

Leklengte

De leklengte, Λ , is een bepalende constructie-eigenschap voor de grootte van het stijghoogteverschil over de toplaag (interne belasting) bij een gegeven stijghoogteverloop op de zetting (externe belasting).

Op basis van de gemeten stijghoogtes zijn leklengtes afgeleid voor de proefseries X en Y. Bij de serie Z was dat niet mogelijk. De analyse heeft in Sectie 2 geresulteerd in een 'gemeten' leklengte tussen 0,4 m en 0,9 m. Er is geen relatie geconstateerd tussen de grootte van de leklengte en de aard of geometrie van de ondergrond.

Uitgaande van een geulenpatroon met geulen van 5 tot 15 mm kan de leklengte ook uit de constructie-eigenschappen berekend worden op basis van formules uit Deel XVIII (WL 1990). Hieruit volgt een leklengte tussen 0,5 en 1,0 m. Gezien deze goede overeenstemming met de gemeten leklengtes kan geconcludeerd kan worden dat de formules voor de leklengte goed toepasbaar zijn op de onderzochte constructies.

De exacte grootte van de lek lengte is niet in alle gevallen te bepalen. De lek lengte lijkt soms in één golfperiode van grootte te veranderen, hetgeen volgens de theorie niet zou kunnen. Wellicht hangt dit samen met het eventuele oplichten van de gehele bekleding tijdens een opwaartse verschildruk.

Maar het kan ook zijn dat bij bewegende blokken er spleten dicht of open gaan staan gedurende de tienden van een seconde waarin de verschillende lek lengtes zijn bepaald.

Verder is in Sectie 2 en 5 gesuggereerd dat de traagheid van het water in de geulen een invloed heeft, waarmee in de bepaling van de lek lengte geen rekening is gehouden. Nadere analyse in Sectie 3 geeft aan dat deze hypothese niet juist is.

Nu de waarde van de lek lengte voor blokken op klei met geulen gekwantificeerd is, kan het analytische model voor het bepalen van de stabiliteit van de toplaag toegepast worden. Bij de keuze van de aan te houden lek lengte in het analytische model moet echter rekening gegeven worden met:

- het analytisch model leidt bij kleine lek lengtes tot overschatting van de stabiliteit, omdat de golfklap buiten beschouwing blijft;
- de gemeten lek lengte varieerde nogal (tussen 0,4 en 0,9 m), terwijl geen relatie met de geulgeometrie of toplaageigenschappen kon worden gelegd;
- de metingen zijn uitgevoerd op klei met enige beginnende geulvorming. In de praktijk zijn geulen en holten ontdekt van vele decimeters diep en ondermijningen van vele m².

Op basis van de metingen en de gegeven overwegingen wordt voorlopig geadviseerd om een lek lengte van ca 1,0 m aan te houden bij berekeningen met het analytische model, gegeven een toplaag van blokken van 50 x 50 cm² op een kleilaag met enige beginnende geulvorming.

Golfhoogte bij begin van schade

Alle proeven met een kleine maar duidelijke blokbeweging zijn weergegeven in Figuur 1. In deze figuur zijn de volgende parameters gebruikt:

H_s	=	significante golfhoogte bij de teen van de dijk	(m)
D	=	dikte van de toplaag	(m)
Δ	=	relatieve volumieke massa van toplaag	(-)
		$= (\rho_b - \rho) / \rho$	
ρ_b	=	volumieke massa van beton	(kg/m ³)
ρ	=	volumieke massa van water	(kg/m ³)
ξ_{op}	=	brekerparameter	(-)
		$= \tan \alpha \sqrt{H_s / (1,56 \cdot T_p^2)}$	
α	=	taludhelling	(°)
T_p	=	golfperiode bij de piek van het spectrum	(s)

De proeven met regelmatige golven zijn naar onregelmatige golven omgerekend door de $H/\Delta D$ waarde met 0,85 te vermenigvuldigen (Klein Breteler, 1994).

In de figuur is te zien dat de blokken op goede klei zonder geulen (serie ZR en Oesterdam) er positief uitspringen. De stabiliteit is van serie ZR bijvoorbeeld 20 à 25% hoger dan het gemiddelde van alle andere proeven.

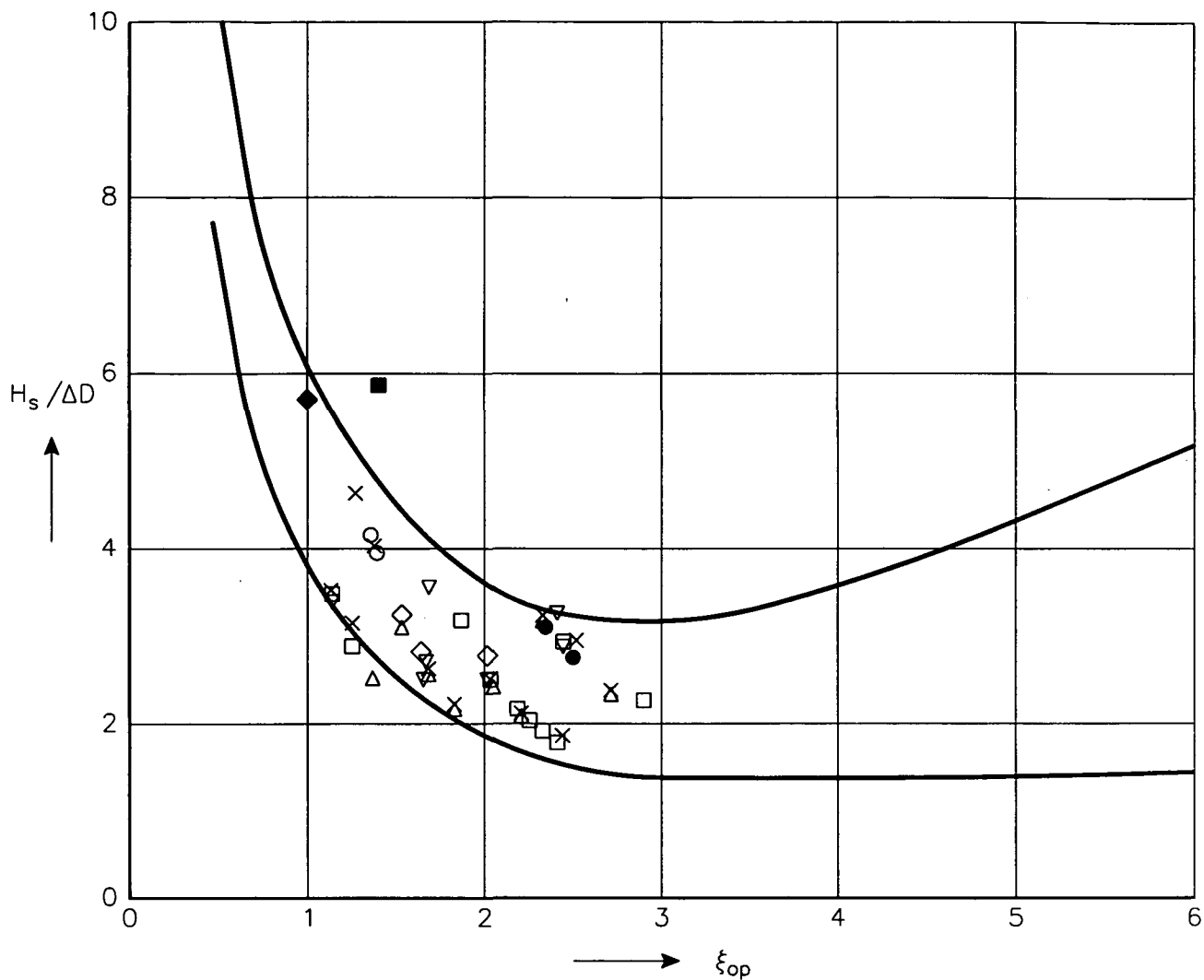
De met zand en geotextiel gerepareerde constructie (serie ZL) blijkt in deze figuur gemiddeld te scoren. Dit betekent dat de stabiliteit niet beter is dan een zetting op klei met geulen. Desondanks kan dit een geschikte reparatiemethode zijn, omdat de verdere groei van de geulen wellicht gestopt wordt.

De stabiliteit kan ook berekend worden met het analytische model, gegeven de grootte van de lek lengte: $\Lambda = 1,0$ m. Enig rekenwerk levert voor een top laagdikte $D = 0,15$ m en relatieve volumieke massa $\Delta = 1,23$ een $H_s/\Delta D$ op die vrijwel precies samenvalt met de onderste lijn in Figuur 1.

Voor andere waarden van D en Δ kan de stabiliteit bepaald worden met Figuur 2 (de lek lengte is steeds $\Lambda = 1$ m bij enige beginnende geulvorming).

Referenties

- Klein Breteler, 1994. Taludbekledingen van gezette steen, vernieuwd black-box model, Deel D, A2.94.26, Waterloopkundig Laboratorium, verslag H1770.
- wL, 1990. Taludbekledingen van gezette steen, Doorlatendheid van toplaag en filter en berekening van lek lengte M1795 deel XVIII.
- Wouters, J., 1993. Reststerkte van dijkbekledingen Stabiliteit van steenzetting en klei-onderlaag Deel III, meet-verslag Deltagootonderzoek. Waterloopkundig Laboratorium, verslag H195.



× serie XL: blokken op klei met natuurlijke geulen

□ serie YL: blokken op geotextiel op zandlaagje op klei

◇ serie ZL: blokken op geotextiel op zandlaagje op klei

△ serie XR: blokken op goed verdichte klei met kunstmatige geulen

▽ serie YR: blokken op dik geotextiel op goed verdichte klei *enkele drain.*

● serie ZR: blokken op goed verdichte klei

○ serie A: blokken op klei met natuurlijke geulen

■ ◆ serie v: talud met berm (Oesterdam)

× ○ □ ◇ △ ▽ ■ regelmatige golven

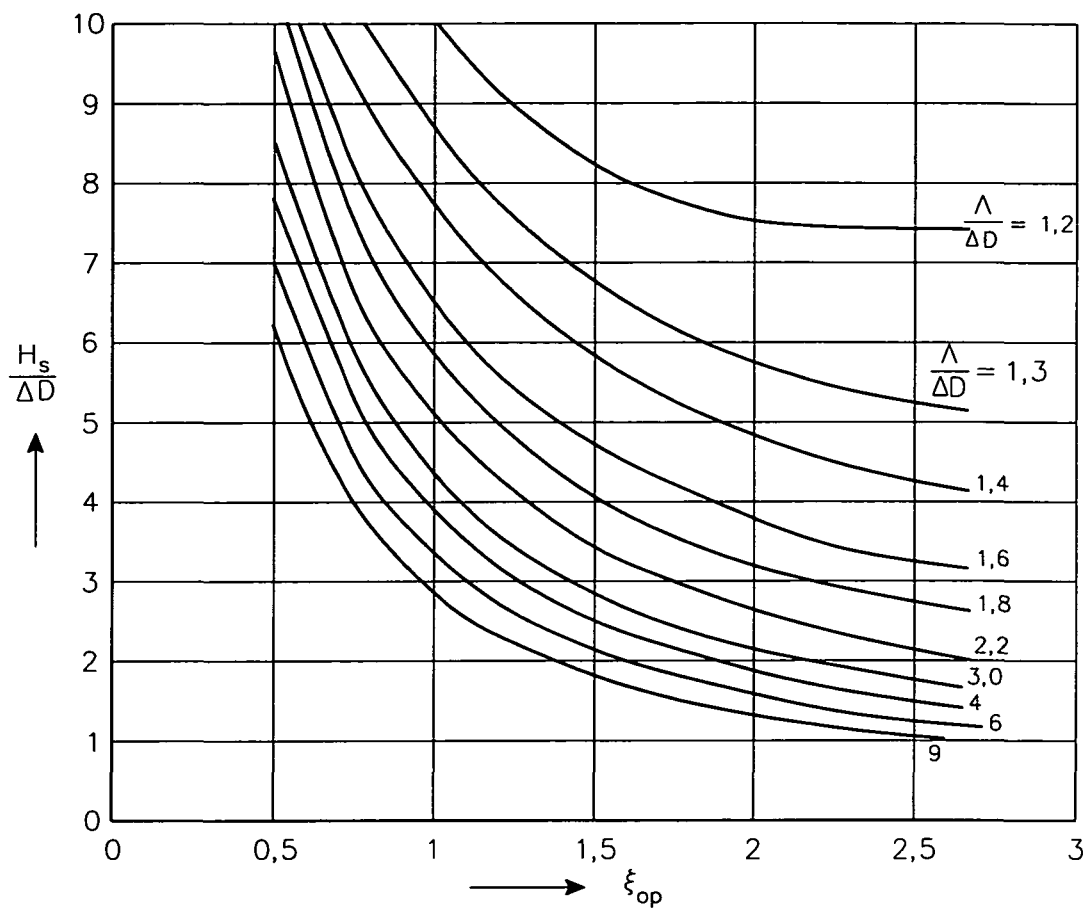
○ ◆ onregelmatige golven

STABILITEIT VAN STEENZETTING OP GOEDE KLEI

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

H 1770

FIG. 1



STABILITEIT VOLGENS ANALYTISCH MODEL

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

H 1770

FIG. 2

Sectie 2

Stabiliteit van talusbekleding met blokken op klei

Eerste fase van analyse van Deltagootmetingen

$$\frac{1}{1,24 \cdot 0,15}$$

$$\begin{array}{r} 124 \\ 62 \\ \hline 1,06 \end{array}$$

1: 0,2 = 5

Inhoud

Lijst van tabellen
Lijst van figuren
Lijst van symbolen

	blz.
1 Inleiding	1
1.1 Algemene projectbeschrijving	1
1.2 Samenvatting	1
1.3 Conclusies	2
2 Beschrijving van de opzet van het fysisch modelonderzoek	5
3 Uitwerking van de meetgegevens	7
3.1 Selectie van de te analyseren proeven	7
3.2 Bepaling van het maatgevende tijdstip	9
3.3 Golfparameters bij geselecteerde tijdstippen	12
3.4 Verschildrukken bij geselecteerde tijdstippen	12
3.5 Bepaling van de leklengte	13
4 Berekening van de leklengte	17
4.1 Stabiliteit van de toplaag	17
4.2 Relatie tussen het stijghoogteverloop op en onder de zetting en de leklengte	17
4.3 Relatie tussen leklengte en geulgeometrie	18
4.4 Vergelijking van de berekende en gemeten leklengtes en geuldieptes	21
4.5 Conclusie	24
5 Analyse van serie Z	25

Referenties

Tabellen

Figuren

- Bijlage I : Programma ter bepaling van leklengte uit stijghoogtemetingen (FIT_LEKL)**
Bijlage II : Aantekeningen betreffende het bepalen van de mechanismen en de leklengtes van de geselecteerde proeven
Bijlage III : Berekeningen van de leklengtes
Bijlage IV : Resultaten metingen doorlatendheid van Enka-Drain

Lijst van tabellen

- | | | |
|---|--|------------|
| 1 | Uitgevoerde proeven en bepaalde verplaatsingswaarden | Serie X |
| 2 | Uitgevoerde proeven en bepaalde verplaatsingswaarden | Serie Y |
| 3 | Uitgevoerde proeven en bepaalde verplaatsingswaarden | Serie Z |
| 4 | Geselecteerde proeven en geometrieën | Series X,Y |
| 5 | Frontparameters, mechanismen en leklengtes | Serie X |
| 6 | Frontparameters, mechanismen en leklengtes | Serie Y |
| 7 | Meetresultaten van Wouters (1993) [1] voor zover er blokbeweging van 0,5 à 1,0 cm optrad | |

Lijst van figuren

1	Basistalud (zonder steenzetting)	
2	Nummering drukopnemers en verplaatsingsopnemers	
3a	Modelopstelling proevenserie X	
3b	Modelopstelling proevenseries Y en Z	
4	Voorbeeld verplaatsingsregistratie	
5	$H/\Delta D - \xi$ plots met bijbehorende proefnummers	Serie X
6	$H/\Delta D - \xi$ plots - linker goothelft	Serie X
7	$H/\Delta D - \xi$ plots - rechter goothelft	Serie X
8	$H/\Delta D - \xi$ plots met bijbehorende proefnummers	Serie Y
9	$H/\Delta D - \xi$ plots - linker goothelft	Serie Y
10	$H/\Delta D - \xi$ plots - rechter goothelft	Serie Y
11	Mechanismen bij het begin van verplaatsing	Series X,Y
12a	Verschildruk- en verplaatsingsregistraties	Proef X08
12b	Stijghoogteverloop op het talud	Proef X08
13a	Verschildruk- en verplaatsingsregistraties	Proef X03
13b	Stijghoogteverloop op het talud	Proef X03
14a	Verschildruk- en verplaatsingsregistraties	Proef X09
14b	Stijghoogteverloop op het talud	Proef X09
15a	Verschildruk- en verplaatsingsregistraties	Proef Y24
15b	Stijghoogteverloop op het talud	Proef Y24
16a	Verschildruk- en verplaatsingsregistraties	Proef X120
16b	Stijghoogteverloop op het talud	Proef X120
17	Frontparameters, ϕ_b, z_s	Series X,Y
18	Fronthoeken, θ	Series X,Y
19	Verschildrukken bij begin van beweging	Series X,Y
20	Drukken op en onder meetblok 5	Proef Y16
21a,b	FIT_LEKL Output	Proef Y16
22	Drukken op en onder meetblok 8	Proef X23
23	Leklengtes tegen proefverloop	Series X,Y
24	Leklengtes tegen de brekerparameter	Series X,Y
25	Berekende leklengtes als functie van s/d en D/d	
26	Berekende leklengtes met Enka-Drain	
27	Blokverplaatsingsregistratie	Proef Z10
28	Gemeten golfdruk en berekende en gemeten waterspanningen en verschildrukken voor P032	
29	Stabiliteit van steenzetting op goede klei	

Lijst van symbolen

A_b	blokoppervlakte	(m ²)
A_{ro}	relatief open oppervlakte	(-)
a	laminaire weerstandscoefficiënt van het filter	(s/m)
a_g	laminaire weerstandscoefficiënt van het geotextiel	(s/m)
a'	laminaire weerstandscoefficiënt van de toplaag	(s/m)
b	turbulente weerstandscoefficiënt van het filter	(s ² /m ²)
b_g	turbulente weerstandscoefficiënt van het geotextiel	(s ² /m ²)
b'	turbulente weerstandscoefficiënt van de toplaag	(s ² /m ²)
B	blokbreedte (langs het talud)	(m)
C	Chézy coëfficiënt van het filter	(m ^{1/2} /s)
C'	Chézy coëfficiënt van de toplaag	(m ^{1/2} /s)
d	geuldiepte	(m)
d_s	schadediepte, gemeten t.o.v. SWL	(m)
D	blokdikte	(m)
g	versnelling door de zwaartekracht	(m/s ²)
H	golfhoogte	(m)
h	waterstand	(m)
i	verhang	(-)
k	gelineariseerde doorlatendheid van het filter	(m/s)
k'	gelineariseerde doorlatendheid van de toplaag	(m/s)
k_{nik}	Nikuradse ruwheid	(m)
L	bloklengte (in de richting van de dijkas)	(m)
R	hydraulische straal	(m)
r_{min}	afstand tot waar de radiale aanstroomweerstand wordt meegerekend	(m)
s	spleetbreedte	(m)
t	tijdstip	(s)
T	golfperiode	(s)
T_g	dikte van het geotextiel	(m)
v	snelheid	(m/s)
V	verplaatsing van een blok	(m)
W_b	droge blokgewicht	(kgm/s ²)
W'	onderwater blokgewicht	(kgm/s ²)
x	horizontale plaatscoördinaat, gemeten t.o.v. golfschot	(m)
z	verticale plaatscoördinaat, gemeten t.o.v. SWL	(m)
Δ	relatieve volumieke massa blok = $\rho_b/\rho - 1$	(-)
ΔP	verschilddruk over het meetblok	(Pa)
Λ	leklengte	(m)
ϕ	stijghoogte onder de zetting (in het filter)	(m)
ϕ'	stijghoogte op de zetting (toplaag)	(m)
ϕ_b	hoogte van stijghoogtefront	(m)
ξ	brekerparameter (regelmatige golven)	(-)
Ω	geometrie-parameter = $(B \cdot s + L \cdot s)/BL$, relatieve open oppervlak	(-)
ρ_b	massadichtheid blok	(kg/m ³)
ρ	massadichtheid water	(kg/m ³)
θ	hoek van het golffront, tov. de horizontaal	(°)
ν	viscositeit van het water	(m ² /s)

1 Inleiding

1.1 Algemeen projectbeschrijving

In opdracht van de Dienst Weg- en Waterbouwkunde (DWW) van Rijkswaterstaat (RWS) heeft het Waterloopkundig Laboratorium (WL) een modelonderzoek in de Deltagoot uitgevoerd naar de stabiliteit van een steenzetting, bestaande uit blokken op een kleilaag. Het onderzoek vond plaats in het kader van het onderzoek naar de stabiliteit van taludbekledingen van gezette steen van projectgroep A2 van de Technische Adviescommissie voor de Waterke-ringen (TAW).

Gedacht werd dat de stabiliteit van de steenzetting beïnvloed zou worden door de conditie van het kleioppervlak onder de blokken; in het bijzonder het wel of niet aanwezig zijn van erosiegeulen of gaten. Deze conditie bepaalt in feite de waterdoorlatendheid van de ruimte onder de blokken.

In het algemeen is de doorlatendheid van de spleten tussen de blokken en de laag direct onder de blokken van groot belang voor de stabiliteit van de steenzetting omdat deze doorlatendheidskenmerken de relatie bepalen tussen de drukverdeling op het talud en de drukverdeling onder de blokken. De doorlatendheidskenmerken worden samengevoegd in de lek lengteparameter (Λ), waarmee de relatie tussen de genoemde drukverdelingen volledig beschreven kan worden.

Het doel van het onderhavige onderzoek is het bepalen van de invloed van verschillende soorten ondergrond - met een kleilaag als uitgangspunt - op de lek lengteparameter en de stabiliteit van de steenzetting.

Het onderzoek is uitgevoerd en gerapporteerd door G.M. Smith M.Sc en ir J.P. de Waal onder leiding van ir M. Klein Breteler. De werkzaamheden zijn inhoudelijk begeleid door de TAW-A2.

1.2 Samenvatting

De stabiliteit van een steenzetting, bestaande uit losliggende betonblokken op een 1:4 talud (Figuren 1, 2 en 3) is onderzocht in de Deltagoot van WL. Het onderzoek is in detail omschreven door Wouters (1993).

Drie proevenseries (X, Y en Z) zijn uitgevoerd met regelmatige golven. In elke serie is de invloed van een afzonderlijke ondergrond op de stabiliteit van de zetting onderzocht. Voor serie X bevonden de blokken zich op een talud van twee soorten klei, waarin zowel natuurlijke als kunstmatige geulen aanwezig waren. Voor de series Y en Z bevonden de blokken zich op ondergronden van zowel zand als Enka-Drain. Enka-Drain is een materiaal bestaande uit een drainagelaag met een hoge doorlatendheid, aan beide zijden voorzien van een non-woven geotextiel. De drie lagen zijn met elkaar verbonden over het gehele oppervlak.

De steenzetting bestond uit koud tegen elkaar geplaatste betonblokken van 0,50 m x 0,50 m x 0,15 m. Van die blokken waren er 32 voorzien van een drukopnemer op de bovenzijde en 12 van deze 32 blokken hadden bovendien een drukopnemer aan de onderzijde. Acht van deze 12 blokken waren iets kleiner gemaakt dan de anderen zodat ze vrij konden bewegen. Deze 8 blokken waren elk voorzien van een verticale verplaatsingsopnemer (Figuur 2). De andere

blokken waren aan elkaar gekoppeld door middel van een stalen rooster om verticale verplaatsingen te voorkomen.

Bij de analyse is gekeken naar de verschildrukken over de losse blokken en wanneer de blokken begonnen te bewegen. De combinatie van het tijdstip en de bloklocatie bij het begin van beweging wordt hierin beschreven als het *bepalende mechanisme* van het optreden van blokbeweging. Op basis van deze metingen zijn de leklengtes bepaald voor de constructie, waarbij onderscheid is gemaakt tussen de verschillende soorten ondergronden.

1.3 Conclusies

Bepalende mechanismen

In de meeste gevallen is het golffront het bepalende mechanisme voor het begin van blokbeweging. Dit mechanisme houdt in dat zich in de periode tot de golfklap een steil drukfront instelt met een erg lage druk op het talud vlak voor het front. Op deze plaats met lage druk en op het tijdstip vlak voor de golfklap is de opwaartse belasting op de blokken het grootst. In een aantal gevallen is een ander mechanisme bepalend. Het blijkt dat tijdens een golfklap gedurende korte tijd sprake kan zijn van een combinatie van een front en een klap op het talud. Ter plaatse van de lage druk tussen het front en de klap is de opwaartse belasting in deze gevallen het grootst.

Er is geen relatie gevonden tussen het bepalende mechanisme en de verschillende ondergronden.

Stijghoogteverschil of verschildruk bij het begin van beweging

De belasting op een afzonderlijk blok in de toplaag bestaat uit een waterdruk op het blok en een soms hogere druk eronder. Deze belasting is in dit verslag weergegeven met de volgende parameters:

- stijghoogte op het talud: ϕ'
- stijghoogte onder de blokken: ϕ
- stijghoogteverschil: $\phi_v = \phi - \phi'$
- golfdruk op het talud ten opzichte van druk bij stil water: p'
- golfdruk onder de blokken ten opzichte van druk bij stil water: p
- verschildruk: $p_v = p - p'$

De stijghoogte is als volgt gedefinieerd:

$$\phi = \frac{p}{\rho g}$$

met:

ϕ	= stijghoogte	(m)
p	= golfdruk ten opzichte van druk zonder golven	(Pa)
ρ	= volumieke massa van water	(kg/m ³)
g	= versnelling van zwaartekracht	(m/s ²)

We zien in deze definitie dat de druk is gemeten ten opzichte van de druk op die locatie bij stil water, dus zonder golven. De verschildruk is daardoor de aandrijvende kracht om een blok op te lichten. Als de verschildruk nul is, is er geen aandrijvende kracht. Een verschildruk van 1 kPa komt overeen met een stijghoogteverschil van 0,1 m.

Op basis van het eigen gewicht van de blokken is de theoretisch benodigde verschildruk om een blok omhoog te drukken:

$$p_v = \rho g \Delta D \cos \alpha$$

met:

Δ	=	relatieve volumieke massa van betonblok	(-)
		= $(\rho_b - \rho) / \rho$	
ρ_b	=	volumieke massa van beton	(kg/m ³)
D	=	dikte van toplaag	(m)
α	=	taludhelling	(°)

In het onderhavige onderzoek is $\Delta = 1,22$ à $1,24$ en wordt $p_v = 1,79$ kPa (stijghoogteverschil: 0,179), tot maximaal 3 kPa voor het theoretische geval dat het blok geheel boven water ligt. Door wrijving van de blokken onderling kan het benodigde stijghoogteverschil voor oplichten natuurlijk nog hoger worden.

De gemeten verschildruk bij het gemeten begin van blokbeweging blijkt echter te variëren tussen -4 en +7 kPa (-0,4 en +0,7 mwk). Soms geeft het instrument dat verplaatsingen moet registreren aan dat het blok omhoog begint te bewegen terwijl volgens de drukopnemers er een kracht naar beneden zou moeten werken.

Er is geen systematische trend of verklaring gevonden in de metingen. Het is mogelijk dat de gemiddelde druk op of onder een blok sterk afwijkt van de lokale door de drukopnemers gemeten druk. Juist de druk onder het blok kan van plaats tot plaats erg variëren gezien het feit dat er niet overal onder het blok geulen zijn.

Ook is het mogelijk dat het vaste blok naast het geïnstrumenteerde losse blok, ten opzichte waarvan de bewegingen zijn geregistreerd, toch ook bewogen heeft.

Wellicht moet er niet gelet worden op minimale bewegingen in de orde grootte van 1 à 2 mm, zoals te zien is in Figuur 15a. De eerste paar millimeter opwaartse beweging vindt plaats tijdens een neerwaartse verschildruk. De wat duidelijkere beweging, van meer dan 5 mm, vindt plaats tijdens een duidelijke opwaartse verschildruk van 3 tot 5 kPa (0,3 tot 0,5 mwk).

Leklengtes

De grootte van de afgeleide leklengtes varieert tussen 0,4 en 0,9 m. Er is geen direct verband tussen de vorm of grootte van de geulen onder de blokken en de leklengte gevonden. De exacte grootte van de leklengte is niet in alle gevallen te bepalen. De leklengte lijkt soms in één golfperiode van grootte te veranderen. Wellicht hangt dit samen met het eventuele oplichten van de gehele bekleding tijdens een opwaartse verschildruk. Maar het kan ook een gevolg zijn van de traagheid van het water in de geulen, waarmee in de bepaling van de leklengte geen rekening is gehouden.

Verder is het denkbaar dat bij bewegende blokken er spleten dicht of open gaan staan gedurende de tienden van een seconde waarin de verschillende leklengtes zijn bepaald.

De gemeten leklengtes komen echter goed overeen met berekende leklengtes, als de berekeningen gebaseerd worden op de formules uit Deel XVIII (WL, 1990) voor blokken op open geulenpatroon. Voor blokken op Enka-Drain komen de berekende leklengtes overeen met de ondergrens van de gemeten waarden (ca. 0,4 m).

De leklengtes die in dit onderzoek naar voren zijn gekomen, in combinatie met de geringe stromingsweerstand in geulen, doet vermoeden dat de traditionele stabiliteitsberekeningen met een vaste leklengte voor de hele constructie wellicht te eenvoudig is voor blokken op klei met geulen. Door de kleine leklengte zouden ook golfklappen van belang kunnen zijn (dit is stabiliteit verlagend t.o.v. de traditionele beschouwing) en door de traagheid van het water in de geulen zouden de verschildrukken kleiner kunnen zijn (dit is stabiliteit verhogend t.o.v. de traditionele beschouwing).

Voorlopig moet daarom geadviseerd worden, als men de stabiliteit van blokken op klei met enige beginnende geulvorming zou willen berekenen, een vrij grote leklengte ten opzichte van de metingen te kiezen: $\Lambda \approx 1$ m.

Bijzondere drukfluctuaties

Er zijn opmerkelijke drukfluctuaties gemeten, zoals het plotseling snel toenemen van de druk onder de blokken, onverwachte nulpuntsverschuivingen en het op en neer fluctueren van de druk onder de blokken (zie Figuur 20). Deze fluctuaties zijn niet eerder vastgesteld. Ook niet tijdens het kleinschalig onderzoek uit Deel XIV (WL, 1985), dat toen is uitgevoerd met vrij grove filterlagen (zie Figuur 28).

Mogelijk heeft de klei-ondergrond hiermee te maken. Hierbij kan men denken aan het feit dat een brokstuk klei heel ondoorlatend kan zijn. Bij een snelle belastingswisseling van een betonblok boven op een dergelijk ondoorlatend materiaal is het mogelijk dat de drukopnemer totaalspanningen weergeeft in plaats van waterdrukken.

Ook zullen kleine bewegingen van de zetting ten opzichte van de ondergrond lokaal bezwijken van de ondergrond veroorzaken en zo waterspanningen creëren.

Bij bewegingen van de blokken op de relatief slappe klei zal de druk ook uitdempen, waarbij steeds de klei wat wordt ingeduwd. Dit is een mogelijke verklaring voor de drukpiek en het daarna min of meer 'uitslingeren' van de waterspanning.

Op grond van de beschikbare gegevens is helaas geen keuze mogelijk uit alle gesuggereerde verklaringen.

Golfhoogte bij begin van schade

Alle proeven met een kleine maar duidelijke blokbeweging zijn opgesomd in Tabel 7 en zijn weergegeven in Figuur 29. De proeven met regelmatige golven zijn naar onregelmatige golven omgerekend door de $H_s/\Delta D$ waarde met 0,85 te vermenigvuldigen (Klein Breteler, 1994).

In de figuur is te zien dat de blokken op goede klei zonder geulen (serie ZR en Oesterdam) er positief uitspringen. De stabiliteit is van serie ZR bijvoorbeeld 20 à 25% hoger dan het gemiddelde van alle andere proeven.

De met zand en geotextiel gerepareerde constructie (serie ZL) blijkt in deze figuur gemiddeld te scoren. Dit betekent dat de stabiliteit niet beter is dan een zetting op klei met geulen. Desondanks kan dit een geschikte reparatiemethode zijn, omdat de verdere groei van de geulen wellicht gestopt wordt.

2 Beschrijving van de opzet van het fysisch modelonderzoek

Het modelonderzoek is uitgevoerd in de Deltagoot van WL, locatie De Voorst. Alle proeven zijn uitgevoerd met een taludhelling 1:4. Het talud bestond uit een 0,15 m dikke asfaltlaag vanaf hoogte 0,0 m tot 2,0 m en vanaf 6,5 tot 8,5 m ten opzichte van de gootbodem (zie Figuur 1). De meetsectie van het talud bevond zich tussen 2,0 en 6,5 m boven de gootbodem. In de meetsectie was de zandkern afgedekt met een non-woven geotextiel en een ca. 0,1 m dikke uitvullaag. Daarop was een ca. 0,9 m dikke kleilaag aangebracht. De blokken zijn direct op deze kleilaag gezet.

Meerdere onderzoeken zijn uitgevoerd op dit talud. Een gedetailleerde beschrijving van die proeven is gegeven in (Wouters, 1993). Het onderhavige verslag omvat de analyse van metingen uit de proevenseries X, Y en Z; onderzoeken naar de stabiliteit van betonblokken, zonder ruwheid, geplaatst op verschillende geulgeometrieën.

De steenzetting bestond uit koud tegen elkaar geplaatste betonblokken van 0,50 m x 0,50 m x 0,15 m. Van die blokken waren er 32 voorzien van een drukopnemer op de bovenzijde en 12 van deze 32 blokken hadden bovendien een drukopnemer aan de onderzijde. Enkele blokken waren iets kleiner gemaakt dan de anderen (0,495 m x 0,495 m x 0,15 m) zodat ze los hebben gezeten en verwijderd konden worden voor inspecties van de kleilaag. Genoemde afmetingen hebben geleid tot een spleet van ca. 5 mm breed rond deze blokken. Acht van deze "losse" blokken, voorzien van drukopnemers op de boven- en onderzijde, zijn bovendien elk geïnstrumenteerd met een verticale verplaatsingsopnemer. De overige blokken zijn onderling vastgezet met behulp van stalen roosters, zodat ze niet zouden kunnen bewegen. De meetopstelling is in Figuur 2 weergegeven. De ondergronden tijdens proeven-serie X zijn in Figuur 3a weergegeven en de ondergronden voor de proevenseries Y en Z in Figuur 3b. De volumieke massa van de 8 losse blokken was inclusief instrumentatie 2223 tot 2370 kg/m³ ($\Delta = 1,22$ à $1,24$).

Het basistalud bestond uit twee soorten klei: de zogenoemde Perkpolderklei aan de halzijde (linker goothelft) en Kruiningenklei aan de meetcabinezijde (rechter goothelft) van de goot. De proeven van serie X zijn uitgevoerd met ondergronden met diverse soorten geulen. Op de linker goothelft werd geen initiële geul aangebracht, terwijl 0,02 m diepe gaten (ronde en rechthoekige vorm) werden gemaakt in de klei aan de rechterkant van de goot (zie Figuur 3a). Proevenseries Y en Z zijn uitgevoerd met blokken op een zandlaag in de linker goothelft, in de rechtergoothelft werden blokken op ENKA-drain (Serie Y) en klei (Serie Z) toegepast. Deze proevenopstelling is in onderstaande Tabel 2.1 weergegeven.

In dit verslag wordt onderscheid gemaakt tussen de linker en rechter goothelften door gebruik van de hoofdletters L en R, respectievelijk. Verder wordt onderscheid gemaakt tussen de het linker en rechter deel van elke goothelft. Voor dit laatste onderscheid wordt gebruik gemaakt van de kleine letters l en r. Het linker deel van de rechter goothelft wordt derhalve aangeduid met Rl.

	Hal-zijde (L)		Meetcabine-zijde (R)	
	Linker deel (Ll)	Rechter deel (Lr)	Linker deel (Rl)	Rechter deel (Rr)
Serie X	Natuurlijke geulen	Natuurlijke geulen	Rechthoekige geulen	Ronde geulen
Serie Y	geulen hersteld met zand en geotextiel	geulen hersteld met zand en geotextiel	Enka-drain op glad klei-oppervlak	Enka-Drain op glad klei-oppervlak
Serie Z	opnieuw hersteld met zand en geotextiel	opnieuw hersteld met zand en geotextiel	Klei zonder geulen	Klei zonder geulen

Tabel 2.1 Opstelling ondergronden tijdens proevenseries X, Y en Z.

In elke proevenserie is elke golfconditie bij twee verschillende waterstanden toegepast.

3 Uitwerking van de meetgegevens

3.1 Selectie van de te analyseren proeven

De analyse van de meetgegevens wordt per type ondergrond gericht op de registratie van meetblokken die zich op de plaats met de grootste belasting bevonden. In de reeks verschillende golfcondities wordt per type ondergrond de aandacht gericht op de condities die juist het begin van blokbeweging veroorzaken. Van de geselecteerde registraties wordt steeds slechts één representatieve golfperiode bestudeerd. De selectie is uitgevoerd op basis van de verplaatsingsmetingen. De verplaatsingsmetingen hebben daartoe een korte voorbereiding ondergaan.

Vorbewerking

Bij iedere proef is voor alle acht afzonderlijke verplaatsingsopnemers over het gehele tijdsinterval ($0 \text{ s} \leq t \leq 300 \text{ s}$, waarin t het tijdstip in de proef is) het meetsignaal grafisch weergegeven (zie het voorbeeld in Figuur 4). Bij iedere proef is uit de grafische weergave van de gemeten verplaatsing voor iedere verplaatsingsopnemer visueel een karakteristieke waarde van de verplaatsing bepaald. Tabellen 1, 2 en 3 geven de grootte van de verplaatsingen voor alle proeven in de respectievelijke proevenseries X, Y en Z.

In het meetverslag is in deze voorbereiding de absolute waarde van de verplaatsing gebruikt. Voor deze benadering was alleen het fysisch mechanisme van de blokbeweging van belang; het feit dat een blok omhoog of omlaag bewoog was niet van belang. In het onderstaande wordt toegelicht waarom in de huidige voorbereiding niet de absolute waarde van de verplaatsing wordt genomen.

In een groot aantal gevallen was er sprake van een periodieke negatieve verplaatsing. Het meetblok scheen bij iedere golf gedurende korte tijd het talud ingedrukt te worden en vervolgens weer in de normale positie terug te keren. Een fysische verklaring voor een dergelijke beweging van het meetblok is niet te geven. De meest waarschijnlijke verklaring voor dit meetresultaat is dan ook dat het referentieblok (waarop de verplaatsingsopnemer van het meetblok bevestigd was) door de periodieke opwaartse verschuldruk is opgedrukt en door de zwaartekracht steeds weer is teruggezakt naar de normale positie.

Als een referentieblok niet muurvast bleef zitten tijdens de proeven, zijn de verplaatsingsmetingen in feite niet zuiver meer. Het is bijvoorbeeld mogelijk dat beide blokken hebben bewogen terwijl er geen verplaatsing geregistreerd werd. We nemen in het vervolg van de analyse echter aan dat steeds slechts één van de twee blokken bewogen heeft: bij een periodieke positieve verplaatsing heeft het meetblok bewogen en bij een periodieke negatieve verplaatsing het referentieblok.

Het referentieblok is niet voorzien van drukopnemers aan de boven- en onderzijde. Daarom is het niet mogelijk om de gemeten beweging van het referentieblok (een negatieve verplaatsing) te relateren aan de verschuldruk over dit blok. Bij negatieve blokbeweging kunnen alleen het tijdstip van begin van beweging (en dus het bepalende mechanisme) en de grootte van de blokbeweging vastgesteld worden. Deze aspecten waren voldoende voor de voorlopige analyse in het meetverslag en de presentatie van de gemeten blokbeweging in het meetverslag

is derhalve correct en zinvol. Voor de nadere analyse in het onderhavige verslag is de koppeling tussen de verschildruk en de blokbeweging echter essentieel. Daarom is in de voorbereiding nu niet de absolute waarde van de verplaatsing genomen. In het vervolg van de analyse worden uitsluitend meetblokken beschouwd met duidelijk herkenbare, periodieke, positieve verplaatsingen.

Bij de nu volgende toelichting op de selectieprocedure moet in het oog gehouden worden dat de procedure voor ieder type ondergrond afzonderlijk is uitgevoerd.

Selectie van één meetblok per golfconditie

De verplaatsingsopnemers bevonden zich op twee niveaus op het talud. Omdat iedere golfconditie bij twee waterstanden is toegepast, is de verplaatsing bij iedere golfconditie in feite op vier niveaus ten opzichte van SWL gemeten. Van deze verplaatsingsmetingen is de registratie met de grootste verplaatsing het meest interessant omdat de betreffende verplaatsingsopnemer het dichtst bij de plaats met de maximale belasting onder de gegeven golfconditie moet hebben gezeten. Daarom is voor elke golfconditie het meetblok waar de grootste beweging optreedt geselecteerd.

De geselecteerde meetblokken zijn in Tabel 4 gerangschikt per golfperiode. Zowel de respectievelijke geulgeometrieën als de betreffende verplaatsingsopnemer (VPL) zijn in de tabel vermeld.

De geselecteerde proeven kunnen worden uitgezet in een $H/\Delta D - \xi$ grafiek. Hierbij is:

H	= de golfhoogte	(m)
Δ	= de relatieve volumieke massa van de blokken ($\Delta = 1,22$ à $1,24$)	(-)
D	= de blokdikte	(m)
ξ	= de brekerparameter	(-)

De parameter $H/\Delta D$ langs de verticale as geeft een indicatie van de verhouding van de belasting tot de sterkte van de bekleding. De brekerparameter ξ geeft een speciale vorm van de verhouding van de taludsteilheid tot de golfsteilheid, waarmee het brekertype kan worden beschreven. De grootte van de gemeten verplaatsing kan bij de punten in de grafiek worden aangegeven. In het algemeen zal in dergelijke figuren de verplaatsing toenemen voor toenemende $H/\Delta D$, en afnemen voor toenemende ξ .

In het meetverslag zijn dergelijke grafieken reeds gegeven (Wouters, 1993, Figuren 19 t/m 22). Daarbij zijn de volgende conclusies getrokken:

- ronde initiële gaten blijken geen negatief effect te hebben op de stabiliteit, gekarakteriseerd door de $H/\Delta D$ waarde bij het begin van blokbeweging, van de steenzetting. Dit, in tegenstelling tot langwerpige gaten en natuurlijke geulen.
- $H/\Delta D$ waarden bij het begin van blokbeweging zijn globaal 3,5 voor blokken zonder geulen eronder en voor ronde initiële gaten; en globaal 2,5 voor blokken op natuurlijke geulen en op rechthoekige initiële gaten.

Door het verschil in de voorbereiding zijn in de onderhavige studie andere proeven geselecteerd dan voor de analyse in het meetverslag. De nieuwe $H/\Delta D - \xi$ figuren zijn gegeven

in Figuur 5 tot en met 10. Figuur 5 geeft de $H/\Delta D - \xi$ plots voor Serie X weer, waarbij ieder proefnummer vermeld is. Figuren 6 en 7 geven dezelfde plots met onderscheid tussen de verschillende ondergronden, respectievelijk (Ll, Lr) en (Rl, Rr). Figuur 8 geeft de $H/\Delta D - \xi$ plots voor Serie Y weer, met ieder proefnummer. Figuren 9 en 10 geven dezelfde plots; alleen is nu onderscheid gemaakt tussen de verschillende ondergronden (Ll, Lr) en (Rl, Rr).

Uit Figuren 6, 7, 9 en 10 blijkt dat de $H/\Delta D - \xi$ waarden bij het begin van beweging ongeveer 3,0 zijn voor blokken zonder initiële geulen eronder (Ll, Lr) en 3,5 voor ronde initiële gaten (Rr). Dit stemt nog redelijk overeen met de resultaten in het meetverslag van Wouters (1993). Voor blokken met rechthoekige gaten eronder (Rl) zijn de $H/\Delta D - \xi$ waarden bij het begin van beweging echter van orde 3,0, iets hoger dan de in het meetverslag gepresenteerde waarden van 2,5. Het onderscheid tussen de verschillende ondergronden is nu minder duidelijk dan in het meetverslag.

Selectie van golfcondities

Uit de geselecteerde meetblokken wordt per waarde van de golfperiode de proef met een kleine mate van beweging gekozen. Relevant voor deze analyse is de overgang van "niet of nauwelijks verplaatsing" (0 à 5 mm) naar "kleine verplaatsing" (5 à 10 mm). Alleen als de beweging zeer beperkt is kan men aannemen dat het bepalende mechanisme voor het begin van bewegen goed is te onderscheiden. Bij grote mate van beweging kunnen namelijk meerdere mechanismen tezamen een rol gespeeld hebben. Anderzijds moet ook een ondergrens aan de beweging gesteld worden omdat het begin en het verloop van de beweging goed te onderscheiden moet zijn. Daarom zijn alleen proeven gekozen die een verplaatsing van minstens +5 mm hebben.

Selectie van een tijdsinterval

Van de geselecteerde registraties is één karakteristieke periode geselecteerd ten behoeve van nadere analyse. In een voorselectie is steeds een tijdsinterval van 15 s gekozen. De criteria voor de selectie van het tijdsinterval van 15 s uit iedere proef zijn als volgt:

- de maximale waarden moeten redelijk overeenkomen met de visueel bepaalde karakteristieke waarden,
- de verschillen tussen de opeenvolgende golfperiodes moeten zo klein mogelijk zijn, vooral wat betreft de piekwaarden van de verplaatsing.

Uit het gekozen tijdsinterval van 15 s van elke geselecteerde proef is steeds één golf geselecteerd voor verdere analyse. De geselecteerde proeven, ondergronden en tijdsintervallen zijn in Tabel 4 vermeld.

3.2 Bepaling van het maatgevende tijdstip

In de geselecteerde representatieve golfperiode is het tijdstip van het begin van blokbeweging vastgesteld. Op dat tijdstip is het stijghoogteverloop op het talud bekeken om het mechanisme vast te stellen dat het begin van beweging veroorzaakt. Er zijn nu vier mogelijkheden: zie onderstaande tabel.

Mechanisme	Tijdstip	Plaats
1	vlak voor de golfklap	voor het golffront
2	tijdens de golfklap	tussen het golffront en de golfklap
3	tijdens de golfklap	onder de golfklap
4	anders	anders

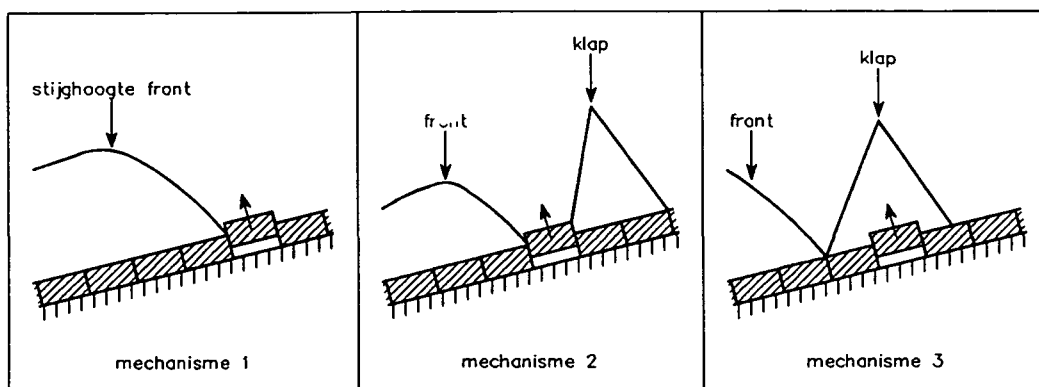
Tabel 3.1 Definitie mechanismen bij het begin van blokbeweging

Het moment van de golfklap is steeds vastgesteld aan de hand van de gemeten druk op het talud.

De druk op het talud is gedefinieerd als de golfdruk ten opzichte van de druk bij stil water, zonder golven. Dit betekent dat de druk ook negatief kan worden. De zo gedefinieerde druk kan gezien worden als een stijghoogte, uitgedrukt in Pa.

De theorie achter het analytische model (het leklengte-concept) gaat er vanuit dat mechanisme 1 bepalend is voor het begin van blokbeweging. Echter, in de huidige meetgegevens is soms mechanisme 2 of 3 bepalend voor het begin van beweging (zie Tabellen 5 en 6). Dat de grootste opwaartse verschildruk soms tussen het golffront en de golfklap optreedt is wel te begrijpen. Een opwaartse beweging van een blok onder de golfklap (grootste neerwaartse druk) is fysisch moeilijker te verklaren, maar blijkt toch een aantal keren in de meetgegevens voor te komen. In dit geval moet in detail gekeken worden naar de verschildrukken.

Figuur 11 geeft voor elke geselecteerde proef en tijdstip de bijbehorende mechanismen weer voor de series X en Y. Bijlage II bestaat uit tabellen voorzien met commentaar betreffende het bepalen van de mechanismen van de geselecteerde proeven. Voorbeelden van de mechanismen 1, 2 en 3 zijn hieronder gegeven.



Figuur 3.1 Mechanismen voor het begin van beweging

Mechanisme 1

Een duidelijk voorbeeld van mechanisme 1 is bij proef X08 (VPL 5) te zien. Het meetblok begint te bewegen op $t = 136,88$ s (Figuur 12a). Tussen 136,00 en 136,88 s neemt de verschildruk toe, tot ca. 5 kPa (ca. 0,5 mwk) voordat de verplaatsing begint. Als het blok omhoog gaat neemt de verschildruk tijdelijk af maar kort daarna neemt die weer toe, tot een maximale waarde van ca. 7,5 kPa. Er is een duidelijk golffront te zien in Fig 12b gedurende de periode tussen $t = 136,68$ en 136,88 s. Op $t = 136,84$ s zien we echter wel dat de stijghoogte kleiner dan de plaatshoogte wordt, hetgeen moeilijk te verklaren is. Het meetblok wordt aangegeven door een pijltje.

Mechanisme 2

Een voorbeeld van het optreden van mechanisme 2 (opwaartse beweging tussen het golffront en de golfklap) is bij proef X03 goed te zien (Figuur 13). Het blok begint omhoog te bewegen op $t = 226,08$ s. Voor die tijd is de verschildruk geleidelijk toegenomen tot ca. 3 kPa (0,3 mwk). Wanneer het blok omhoog gaat neemt deze verschildruk sterk af terwijl de flinke positieve verplaatsing zich voortzet. Het meetblok wordt met een pijltje aangegeven. Daar is duidelijk te zien, dat het meetblok zich precies in het lage-druk-gebied tussen het front en de klap bevindt. Bovendien verandert de locatie van dit lage-druk-gebied niet in de tijd. De drukpiek op het talud vindt plaats op het tijdstip 226,04 s, dat is dus de golfklap, terwijl de grootste neerwaartse verschildruk veel later plaatsvindt, namelijk op 226,84 s. Hier is overigens de verschildruk duidelijk beïnvloed door de blokbeweging. Tijdens de opwaartse beweging is de verschildruk veel kleiner en tijdens neerwaartse beweging veel groter dan bij een niet bewegend blok het geval zou zijn.

Mechanisme 3

Voorbeelden van het optreden van mechanisme 3 (opwaartse beweging begint onder de golfklap) zijn te zien bij proeven X09 (RI) en Y24 (LI). In de gepresenteerde Figuren 14 en 15 is de druk gegeven ten opzichte van de druk zonder golven, ofwel gerelateerd aan het stilwaterniveau. De opwaartse verschildruk (DRO 26-27) bij proef X09 bouwt zich geleidelijk op tussen 183,00 en 184,96 s, waarin het verplaatsingsignaal (VPL 7) iets afneemt (Figuur 14a). Deze afname blijft echter klein (ca. 2 mm) en is niet verder in beschouwing genomen. De golfklap op het talud vindt plaats tussen 185,08 en 185,24 s. Tussen 185,00 en 185,12 s treedt er een grote neerwaarts gerichte verschildruk op (ca. -10 kPa; 1,0 mwk) terwijl het blok nauwelijks beweegt omdat het al op de bodem zit). Daarna is de verschildruk weer positief (opwaartse richting) en het blok beweegt omhoog. Dus begint de positieve beweging onder de golfklap pas na het moment van de sterkste neerwaartse druk terwijl de opwaarts gerichte verschildruk slechts 0,5 kPa (0,05 mwk) was.

Bij proef Y24 verloopt het verschijnsel anders, zie Figuur 15a. Tussen 120,00 en 121,20 s stijgt de verschildruk (DRO 22-23) tot +4 kPa (0,4 mwk), terwijl het meetblok niet eens beweegt. Tussen 121,20 en 121,40 s treedt er een neerwaartse verschildruk (-3 kPa, 0,3 mwk) op en het meetblok beweegt omhoog gedurende deze periode. Tussen 121,40 en 121,72 s is de verschildruk weer positief. Opmerkelijk in dit geval is dat de sterkste golfklap op het talud plaats vindt tussen 121,12 en 121,16 s, dus voordat de negatieve verschildruk optreedt. Dit betekent dat tijdens de golfklap de drukken op en onder het blok van dezelfde orde van grootte zijn. Na de klap wordt de negatieve druk onder het blok kleiner dan de druk

erop dit leidt tot een netto negatieve verschuldruk. Waarom het blok op dat moment omhoog beweegt is niet te verklaren uit deze metingen.

Wellicht moet er niet gelet worden op minimale bewegingen in de orde grootte van 1 à 2 mm. De wat duidelijkere beweging, van meer dan 5 mm, vindt plaats tijdens een duidelijke opwaartse verschuldruk van 3 tot 5 kPa (0,3 tot 0,5 mwk).

Mechanisme 4

Bij dit mechanisme horen alle situaties die niet onder mechanismen 1, 2 of 3 vallen. Van de geselecteerde proeven was er maar één zo'n proef, X120 (RI). Deze situatie is eigenlijk vergelijkbaar met Mechanisme 1, omdat er vóór de golfklap ook een groot drukverschil kan ontstaan over de blokken (zie Figuur 16b; het meetblok wordt aangegeven met een pijltje). Op dat tijdstip is de verschuldruk slechts 1,3 kPa (0,1 mwk) over het meetblok waarop VPL 7 was gemonteerd (zie Figuur 16a). Op dat tijdstip is de verschuldruk kleiner dan verwacht bij het begin van beweging (zie Sectie 3.4 voor de verklaring hiervan), hoewel even later (op 229.04 s) de verschuldruk is toegenomen tot 4 kPa (0,4 mwk) en de verplaatsing dan ook nog steeds toeneemt.

3.3 Golf frontparameters bij geselecteerde tijdstippen

Van de geselecteerde proeven zijn de frontparameters uitgewerkt op de te analyseren tijdstippen. Deze parameters zijn in het bijzonder de fronthoek (θ), gemeten in graden ten opzichte van de horizontaal, de fronthoogte ϕ_b , gemeten in m ten opzichte van het punt waar het front op het talud aansluit en de schadepdiepte d_s , de hoogte waar het golf front op het talud aansluit, gemeten in m ten opzichte van de stilwaterlijn. Deze parameters zijn in de Tabellen 5 en 6 vermeld respectievelijk voor de proevenseries X en Y. De dimensieloze schadepdieptes en fronthoogtes voor de Series X en Y, zijn uitgezet tegen de brekerparameter in Figuur 17. De fronthoeken voor de Series X en Y zijn in Figuur 18 gegeven. In de grafieken zijn ook de berekende lijnen getekend voor deze parameters. De formules daarvan zijn in (Bezuijen e.a., 1990, Sectie 3.2.3) te vinden.

3.4 Verschuldrukken bij geselecteerde tijdstippen

Afgezien van effecten van wrijving en traagheid kan de benodigde (gemiddelde) verschuldruk om een los blok omhoog te verplaatsen worden geschat als het eigen gewicht van een blok gedeeld door het oppervlakte van het blok. Voor een blok dat boven water ligt is deze verschuldruk gegeven door (verschil tussen golfdruk onder en op het blok, beide uitgedrukt in Pa ten opzichte van de druk bij stil water):

$$\rho g (\phi - \phi') = \frac{W_b}{A_b} \cos \alpha \quad (1)$$

Hierin is:

$$\begin{aligned} W_b &= \text{het blokgewicht} && (\text{N}) \\ A_b &= \text{de blokkoppervlakte} && (\text{m}^2) \\ \alpha &= \text{de taludhelling} && (^\circ) \end{aligned}$$

ϕ	= de stijghoogte onder de zetting	(m)
ϕ'	= de stijghoogte op de zetting	(m)
ρ	= de massadichtheid van water	(kg/m ³)
g	= de zwaartekrachtversnelling	(m/s ²)

Elk blok had een massa van ca. 83 kg en een oppervlakte van ca. 0,25 m² ($\rho_b \approx 2300$ kg/m³). Dus is er een opwaartse verschuldruk van ca. 3,2 kPa (0,3 mwk) nodig om een boven water liggend blok omhoog te verplaatsen.

Als het blok onder water ligt, wordt zijn gewicht relatief lager door de opdrijvende kracht van het water. Het onderwater blokgewicht (W'_b) wordt dan beschreven door

$$W'_b = (\rho_b - \rho) \cdot (DLB)g \quad (2)$$

Hierin is:

ρ_b	= de massadichtheid van de blokken	(kg/m ³)
D	= de blokdikte	(m)
L	= de bloklengte	(m)
B	= de blokbreedte	(m)

De soortelijke massa van de losliggende blokken was ca. 2230 kg/m³. Met gebruik van dit gewicht in formule (1) is een opwaartse verschuldruk van ca. 1,79 kPa (0,18 mwk) nodig om het blok omhoog te verplaatsen.

In (Andere Systemen, 1992, § 4.2 en Figuur 2) is de maximale berekende verschuldruk weergegeven als functie van de leklengte voor één specifieke constructie en golfconditie. Daaruit blijkt dat voor leklengtes kleiner dan 0,8 m de golfklap maatgevend is voor de maximale verschuldruk, terwijl voor grotere leklengtes het golffront maatgevend is.

Verder is gekeken naar de gemeten optredende verschuldrukken die optraden als een blok begon te bewegen. Deze waarden zijn in Tabellen 5 en 6 vermeld en ook in Figuur 19 weergegeven. Daarin is te zien dat er geen duidelijke trend te herkennen is. In de meeste gevallen is de verschuldruk bij het begin van beweging ruim 2 à 3 kPa, maar extreem hoge drukken (tot ca. 7 kPa) en zelfs negatieve verschuldrukken (tot -4 kPa) zijn ook wel geconstateerd. Het is mogelijk dat de gemiddelde druk op of onder een blok sterk afwijkt van de lokale door de drukopnemers gemeten druk. Ook is het mogelijk dat het vaste blok naast het geïnstrumenteerde losse blok, ten opzichte waarvan de bewegingen zijn geregistreerd, toch ook bewogen heeft.

3.5 Bepaling van de leklengte

In het algemeen is de doorlatendheid van de spleten tussen de blokken en de constructie laag direct onder de blokken van groot belang voor de stabiliteit van de steenzetting. Deze doorlatendheidskenmerken bepalen namelijk de relatie tussen de drukverdeling op het talud en de drukverdeling onder de blokken. De doorlatendheidskenmerken worden samengevoegd in de leklengteparameter (Λ), waarmee de relatie tussen de genoemde drukverdelingen volledig beschreven kan worden. In deze paragraaf wordt onderzocht welke relatie er bestaat tussen de leklengte en de verschillende soorten ondergrond in de meetgegevens.

De leklengte van een constructie kan niet direct worden gemeten. Deze moet worden berekend op basis van stijghoogtemetingen op en onder de toplaag van de zetting. Gemeten zijn de drukken op het talud op 11 niveaus en de drukken onder de toplaag op 3 niveaus, per ondergrond. Met de op het talud gemeten stijghoogtes en verschillende geschatte waarden van de leklengte als invoerparameters zijn de analytische formules (die in Hoofdstuk 4 beschreven worden) gebruikt om de stijghoogtes onder de zetting te berekenen. De met elke ingevoerde leklengte berekende stijghoogtes onder de toplaag zijn vergeleken met de drie gemeten waarden. De stijghoogtelijn die het beste past bij de gemeten waarden geeft dus de "best-fit" leklengte aan. Teneinde het gebruik van de formules te vereenvoudigen is het programma FIT_LEKL gemaakt. Het programma FIT_LEKL is, samen met voorbeelden van de invoer en uitvoer bestanden in Bijlage I bijgevoegd.

Voor het op deze manier bepalen van de leklengtes is moet aan de volgende voorwaarden worden voldaan:

- 1 Het stijghoogteverloop op het talud mag niet te grillig zijn, anders is de aanname van een lineair verloop tussen de meetpunten te onnauwkeurig.
- 2 De blokken mogen niet bewegen, omdat dit de gemeten druk beïnvloedt.
- 3 Er moeten grote gradiënten in het stijghoogteverloop zijn, anders is het verschil tussen de druk op het talud en onder de zetting te klein om een leklengte op te baseren.

De combinatie van voorwaarde 1 en 3 impliceert dat het best gekeken kan worden naar tijdstippen een hoog steil golffront op het talud.

Zelfs onder een golffront kan de leklengte variëren in de tijd en kan het soms onmogelijk zijn deze te bepalen. Er is aangenomen dat de stijghoogte onder de zetting altijd kleiner is dan de maximale stijghoogte op het talud. Sommige metingen komen echter niet overeen met deze aanname. Een voorbeeld hiervan is proef Y16 (L1). Figuur 20 geeft de drukken die bij deze proef optreden op en onder het meetblok met VPL 5 (DRO22 en DRO23). Het blok beweegt op het tijdstip 84,44 s. Het programma FIT_LEKL is gebruikt om de leklengtes te bepalen op een aantal tijdstippen liggend tussen 84,00 en 84,40 s (zie Figuur 21 a,b). Die gevonden leklengtes zijn als volgt:

t (s)	84,00	84,08	84,16	84,24	84,32	84,36	84,40
Λ (m)	ca. 0,6	0,7	0,5	0,5	ca. 0,7	0,9	ntb*

* ntb = niet te bepalen

Tabel 3.2 Proef Y16 leklengtes (Linker goothelft links; met zand en geotextiel herstelde ondergrond)

Afhankelijk van het tijdstip, dus het stijghoogteverloop op en onder de zetting, varieert de leklengte tussen 0,5 m en 0,9 m. De in Tabel 6 vermelde waarde van de leklengte van deze proef is 0,7 m. Bij 84,40 s is de stijghoogte onder de zetting echter hoger dan die daarop. Dus kan de leklengte niet op deze wijze bepaald worden (Figuur 21b).

In Bijlage II zijn aantekeningen opgenomen betreffende het bepalen van de leklengtes van de geselecteerde proeven.

In sommige gevallen trad er een nulpuntsverschuiving op in de registratie van een drukopnemer. Deze leiden tot grote verschillen tussen de stijghoogtemetingen op en onder de zetting. Ten einde een leklengte te kunnen bepalen is de grootte van de verschuiving geschat waarna deze werd afgetrokken van de betreffende meetwaarden. De schatting van de verschuiving is gemaakt onder de aanname dat de stijghoogtes op en onder de zetting gelijk moeten zijn in het tijdsinterval tussen de drukpieken. Figuur 22 geeft een voorbeeld hiervan voor proef X23, DRO's 28 en 29 (ondergrond van klei met ronde geulen). Rond de tijdstippen 115,0 s, 224,5 s en 228,0 s is het verschil ca. 7 kPa (0,7 mwk). Wanneer een correctie gemaakt is voor het bepalen van de leklengtes is deze vermeld in de aantekeningen in Bijlage II.

In deze analyse zijn de leklengtes bepaald meestal op basis van slechts één tijdstip. Er moet dus vanuit worden gegaan dat de werkelijke leklengtes enigszins kunnen afwijken van de vermelde waarden. De leklengtes zijn vermeld in Tabel 4 (voor serie X) en Tabel 5 (voor serie Y).

Er is geen sprake van een duidelijk onderscheid tussen de leklengtes voor de verschillende soorten ondergrond. De spreiding in de gevonden waarden is voor iedere soort ondergrond groot en het bereik van de waarden is vrijwel volledig overlappend.

Het is mogelijk dat er sprake is geweest van voortschrijdende erosie tijdens proevenseries. Zo is in de linker goothelft bij serie X ca. 0,02 m erosie opgetreden (Wouters, 1993, Foto-bladen 3 en 7). Een dergelijke erosie zou kunnen leiden tot een verandering van de leklengte in de tijd. In Figuur 23 zijn daarom de leklengtes uitgezet tegen de proefvolgorde voor de Series X en Y. In de figuur is echter geen duidelijke verandering in de leklengte te constateren in de loop van het proevenprogramma.

Tevens is onderzocht of de gevonden leklengte samenhangt met het brekertype van de golven. In Figuur 24 zijn daartoe de leklengtes uitgezet tegen de brekerparameter. Daar is er ook geen trend gevonden tussen de leklengte en de golfcondities.

Conclusies

De grootte van de afgeleide leklengtes varieert tussen 0,4 en 0,9 m. Er is geen direct verband tussen de vorm of grootte van de geulen onder de blokken en de leklengte gevonden. De exacte grootte van de leklengte is niet in alle gevallen te bepalen. De leklengte lijkt soms in één golfperiode van grootte te veranderen. Wellicht hangt dit samen met het eventuele oplichten van de gehele bekleding tijdens een opwaartse verschilddruk.

4 Berekening van de lek lengte

4.1 Stabiliteit van de toplaag

Het gedrag van een constructie onder een golfaanval kan bepaald worden door middel van de lek lengteparameter (Λ). Deze parameter is bepalend voor de relatie tussen de drukverdeling op de zetting en de drukverdeling eronder. Een kleine lek lengte komt overeen met een ten opzichte van de toplaag relatief grote stromingsweerstand in het filter. Door de relatief grote doorlatendheid van de toplaag zal het stijghoogteverschil over de blokken klein zijn. Er zijn nauwelijks naar buiten gerichte stijghoogteverschillen te verwachten ten gevolge van het achterblijven van de freatische lijn tijdens golf terugloop. Een grote lek lengte betekent een klein verhang in het filter en dus grote stijghoogteverschillen over de blokken van de toplaag.

De stabiliteit van de toplaag en eventuele belastingen in het filter kunnen worden berekend door gebruik te maken van verschillende methoden zie (CUR, 1992) voor een gedetailleerde beschrijving. Hieronder vallen de analytische methode en de numerieke modellen STEENZET 1 en STEENZET 2. De stabiliteit van een constructie van blokken op klei kan echter niet zonder meer met de bestaande rekentechnieken bepaald worden. Dit is enerzijds omdat er geen filter aanwezig is, waardoor het analytische model en STEENZET 1 niet toepasbaar zijn. Anderzijds is de stroming in de klei niet de oorzaak van instabiliteit, waardoor ook STEENZET 2 niet toepasbaar is.

Bij nadere beschouwing van het kleioppervlak nadat de constructie zwaar was aangevallen door golven, is vastgesteld dat er een aanzienlijke erosie van het kleioppervlak kan zijn ontstaan in de vorm van al dan niet doorlopende kanaaltjes. Vooral als deze kanaaltjes over een grote lengte doorlopen (denk aan enkele meters), is er sprake van een watertransport onder de toplaag zoals ook bij blokken op een filter. Net als bij blokken op een filter zal dan de stabiliteit bedreigd worden doordat de hoge druk op het talud ter plaatse van de aankomende golf onder de toplaag wordt doorgegeven naar de blokken ter plaatse van het golf teruglooppunt. Bij blokken op klei wordt de druk doorgegeven via de kanaaltjes, terwijl dit bij blokken op een filter door de filterlaag gebeurt.

Dit betekent dat het bezwijkmechanisme van blokken op klei goed te vergelijken is met die van blokken op een filterlaag. In de volgende sectie wordt dit verder uitgewerkt door het analytische model toepasbaar te maken op dergelijke constructies.

4.2 Relatie tussen het stijghoogteverloop op en onder de zetting en de lek lengte

De algemene differentiaalvergelijking voor de stijghoogte in het filter, inclusief de invloed van de traagheid van het water in de ondergrond (geulen), is door Rigter (1992) afgeleid:

$$\frac{d^2\phi}{dy^2} = \frac{k}{g} \frac{1}{\Lambda^2} \frac{d}{dt}(\phi - \phi') + \frac{1}{\Lambda^2}(\phi - \phi') \quad (3)$$

Hierin is:

k	= de doorlatendheid van het filter	(m/s)
ϕ'	= de stijghoogte op de zetting	(m)
ϕ	= de stijghoogte onder de zetting	(m)
y	= de plaatscoördinaat langs het talud	(m)
Λ	= de leklengte van de constructie	(m)

Als wordt aangenomen dat de situatie quasi-stationair is (de traagheidsterm in het rechterlid wordt verwaarloosd) dan geldt:

$$\frac{d^2\phi}{dy^2} = \frac{1}{\Lambda^2}(\phi - \phi') \quad (4)$$

Als de traagheidsterm niet verwaarloosbaar is kan dit tot gevolg hebben dat de leklengte die gevonden wordt op basis van de aanname van een quasi-stationaire situatie, varieert in de tijd. De traagheid van het water leidt doorgaans tot een verkleining van de maximale verschil-druk (Rigter, 1993).

4.3 Relatie tussen leklengte en geulgeometrie

De leklengte wordt gedefinieerd als:

$$\Lambda = \sqrt{dD \frac{k}{k'}} \quad (5)$$

Hierin is:

d	= de geuldiepte	(m)
D	= de blokdikte	(m)
k'	= de doorlatendheid van de toplaag	(m/s)
k	= de doorlatendheid van de geul	(m/s)

De dikte van de filterlaag is dus nu vervangen door de geuldiepte. In het volgende worden de doorlatendheidsrelaties gedefinieerd:

Doorlatendheid van de geulen

De geulgeometrie komt tot uitdrukking in de doorlatendheidscoëfficiënt van de geulen (het "filter") k .

Aannemende dat er turbulente stroming in de geulen optreedt, dan geldt de formule van Chézy:

$$v = C\sqrt{Ri} \quad (6)$$

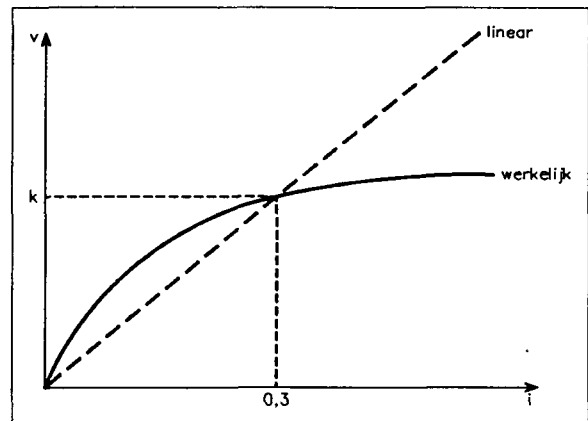
Hierin is:

v	= de snelheid in de geul	(m/s)
C	= de Chézy-parameter voor de geul	(m ^{1/2} /s)
R	= de hydraulische straal van de geul	(m)
i	= het verhang in de geul	(-)

De doorlatendheid van de geulen in de lek lengteformule wordt echter beschreven door de lineaire relatie:

$$v = ki \quad (7)$$

Vergelijking (7) is dus een linearisatie van vergelijking (6). Volgens (Deel XVII-I, 1990, Sectie 1) moet de linearisatie overeenkomen met de werkelijkheid voor $i = 0,0$ en $i = 0,3$, zie de figuur hiernaast. Daaruit volgt:



$$k = C \sqrt{\frac{R}{0,3}} \quad (8)$$

Voor de Chézy parameter geldt bij turbulente stroming:

$$C = 18 \log\left(\frac{12R}{k_{nik}}\right) \quad (9)$$

Hierin is:

k_{nik} de ruwheid volgens Nikuradse (m)

De geulbreedte is verondersteld van dezelfde orde te zijn als de blokbreedte, veel groter dus dan de geuldiepte. De blokken zweven als het ware op een laagje water. Voor de hydraulische straal van de geulen met diepte d onder een blok met breedte B geldt:

$$R = \frac{1}{2}d \quad \text{mits} \quad d < B \quad (10)$$

Hieruit volgt de doorlatendheid van het filter:

$$k = \sqrt{\frac{d}{0,6}} 18 \log\left(\frac{6d}{k_{nik}}\right) \quad (11)$$

Als $d = 0,01$ m en $k_{nik} = 0,002$ m dan levert dit een doorlatendheid $k = 3,4$ m/s. Bij zo'n hoge doorlatendheid is de stroming vrijwel altijd turbulent, zodat het terecht is dat de Chézy-formule is gebruikt.

Doorlatendheid van de toplaag

Stroming door de spleten van de toplaag kan worden beschreven door de Forchheimer relatie:

$$i' = a'v + b'(v)^2 \quad (12)$$

Hierin is:

$$\begin{aligned} a' &= \text{de lineaire weerstandscoefficiënt van de toplaag} && (\text{s/m}) \\ b' &= \text{de kwadratische weerstandscoefficiënt van de toplaag} && (\text{s}^2/\text{m}^2) \\ i' &= \text{het verhang over de toplaag} && (-) \end{aligned}$$

De effecten van de in- en uitstroomweerstand zijn in de b' term opgenomen (Deel XVIII, 1990, Sectie 5 blz 9).

Bij laminaire stroming ($Re' < 2000$) geldt: (Deel XVIII, 1990, Sectie 5 blz 45)

$$\begin{aligned} a' &= \frac{12v}{gs^2\Omega} \\ b' &= \frac{0,7}{gD\Omega^2} \end{aligned} \quad (13)$$

Bij turbulente stroming ($Re' > 2000$):

$$\begin{aligned} a' &= 0 \\ b' &= \frac{2}{sC_s^2\Omega^2} + \frac{0,7}{gD\Omega^2} \end{aligned} \quad (14)$$

Hierin is:

$$\begin{aligned} \Omega &= \text{het relatief open oppervlakte} \quad \Omega = (Bs + Ls) / BL && (\text{m}) \\ C_s &= \text{de Chézy coefficiënt in de spleten} \quad C_s = 18 \log \left(\frac{6s}{k_{nik}} \right) && (\text{m}^{1/2}/\text{s}) \\ B &= \text{de blokbreedte} && (\text{m}) \\ L &= \text{de bloklengte} && (\text{m}) \\ s &= \text{de spleetbreedte} && (\text{m}) \end{aligned}$$

Net zoals voor de geulen wordt de doorlatendheid van de toplaag beschreven als een linearisatie van vergelijking (12). Voor de toplaag moet deze linearisatie echter overeenkomen met de werkelijkheid voor $i = 0,0$ en $i = 1,0$ (Deel XVIII, 1990, Sectie 5 blz 27). Dit wordt gerealiseerd als

$$k' = \frac{-a' + \sqrt{(a')^2 + 4b'}}{2b'} \quad (15)$$

Het Reynoldsgetal van de toplaag wordt gegeven door:

$$Re' = \frac{vs}{\nu \Omega} \quad (16)$$

Hiermee kan gecontroleerd worden of de stroming inderdaad laminair of turbulent is.

Rekenvoorbeeld:

basisgegevens:

$$\begin{aligned} s &= 3 \text{ mm} \\ k_{nik} &= 0,5 \text{ mm} \\ B = L &= 0,5 \text{ m} \\ D &= 0,15 \text{ m} \end{aligned}$$

berekeningen:

$$\begin{aligned} C_s &= 18 \log \left(\frac{6 \cdot 0,003}{0,0005} \right) = 28 \\ \Omega &= (0,5 \cdot 0,003 + 0,5 \cdot 0,003) / 0,5^2 = 0,012 \\ b' &= 9212 \text{ (turbulent)} \\ k' &= 0,010 \text{ m/s} \\ \nu &= k' \cdot i' = 0,01 \text{ m/s bij } i' = 1 \\ Re' &= 2171 \Rightarrow \text{inderdaad net turbulent} \end{aligned}$$

De overgang van laminaire naar turbulente stroming in de spleten is bij $s \approx 3 \text{ mm}$ te verwachten (bij bovenstaande situatie).

Leklengte

De leklengte kan berekend worden nu de doorlatenheid van de ondergrond (geulen) en de toplaag bekend zijn. Voor het bovenstaande rekenvoorbeeld wordt dit:

$$\Lambda = \sqrt{\frac{Ddk}{k'}} = \sqrt{\frac{0,15 \cdot 0,01 \cdot 3,4}{0,010}} = 0,70 \text{ m}$$

4.4 Vergelijking van de berekende en gemeten leklengtes en geuldieptes

In Bijlage III zijn de resultaten van de berekeningen met de bovengenoemde vergelijkingen vermeld. De berekeningen zijn uitgevoerd met vier spleetbreedtes ($s = 1 \text{ mm}$, 2 mm , 3 mm en 5 mm) en vier geuldieptes ($d = 5 \text{ mm}$, 8 mm , 10 mm en 15 mm). Figuur 25 geeft de berekende leklengtes weer als functie van de verhouding spleetbreedte-geuldiepte s/d .

In de modelopstelling waren de meeste spleetbreedtes zeer klein doordat de blokken "koud" tegen elkaar waren geplaatst. Alleen rond de iets kleinere "losse" blokken was de spleetbreedte ongeveer 5 mm . De "gemiddelde" spleetbreedte over een oppervlakte van enkele

vierkante meters rondom het meetblok is op ca. 3 mm geschat. De maximale geuldieptes waren ca. 20 mm; dus een schatting van de gemiddelde geuldiepte, over dezelfde oppervlakte, moet minder dan 20 mm zijn. Voor de berekeningen wordt deze diepte gelijk aan 10 mm aangenomen. Waarden van s/d zijn dus orde $3/10 = 0,3$. Uit Figuur 25 blijkt dat voor s/d tussen 0,2 en 0,4 de leklengte varieert van ca. 0,5 m tot 1,0 m.

De berekeningen zijn in goede overeenstemming met de uit de meetgegevens bepaalde leklengtes voor alle ondergronden in de proefseries X en Y. Tijdens de berekeningen is gebleken dat de overgang van laminaire tot turbulente stroming in de spleten plaatsvindt bij een spleetbreedte van ca. 3 mm. Met kleinere spleetbreedtes zijn de Reynoldsgetallen altijd onder de 2000 en bij grotere geuldieptes zijn ze allemaal boven de 2000, ongeacht welke vergelijkingen (laminair of turbulent) gebruikt zijn.

De berekende leklengte ligt in de range van gemeten waarden (0,4 tot 0,9 m) als in de berekeningen een geuldiepte van 5 à 15 mm wordt aangenomen, zie Figuur 25. Gezien het feit dat dit acceptabele waarden zijn, wordt geconcludeerd dat de hierboven beschreven rekenmethode geschikt is om de leklengte van blokken op klei met geulen te bepalen.

Effect van de ENKA-DRAIN

Tijdens proevenserie Y was de kleilaag op de rechter goothelft (meetcabinezijde) afgedekt met een laag Enka-Drain, type TP. Enka-Drain is een materiaal bestaande uit een drainagelaag met een hoge doorlatendheid, aan beide zijden voorzien van een polyester geotextiel met veel geringere doorlatendheid. De drie lagen zijn met elkaar verbonden over het gehele oppervlak. De doorlatendheid van het filter onder de blokken wordt nu bepaald door de doorlatendheids-eigenschappen van de Enka-Drain.

Een doorlatendheidsproef op de Enka-Drain is door WL uitgevoerd. Op basis van deze metingen blijkt dat $k \approx 0,4$ m/s (gelineariseerd bij een verhang van 0,3; zie Bijlage IV). Dit is het deel waardoor het water onder de zetting stroomt en is in de leklengteformules gebruikt als de filterdoorlatendheid, k .

De formules voor de toplaagdoorlatendheid moeten aangepast worden, om rekening te houden met het nieuwe filter (de kern van de Enka-Drain) en het geotextiel van de Enka-Drain. De volledige formules voor de Forchheimer coëfficiënten voor de toplaagdoorlatendheid zijn in Deel XVIII (WL, 1990, Sectie 5, b/z 54) te vinden. Ze luiden als volgt:

$$a' = \frac{12\nu}{gs^2\Omega} + \frac{sa}{\pi D\Omega} \cdot \ln\left(\frac{s}{\Omega \pi e r_{\min}}\right) + \frac{a_g T_g}{D\Omega}$$

$$b' = \frac{1}{2gD\Omega^2} \cdot \left(\left(\frac{1}{n} - 1 \right)^2 + 1 \right) + \frac{sb}{\pi D\Omega} \cdot \left(\frac{s}{\pi \Omega r_{\min}} - 2 \right) + \frac{b_g T_g}{D\Omega^2} \quad (17)$$

Hierin is:

$$r_{\min} = \text{afstand tot waar de radiale aanstroomweerstand wordt meegerekend } r_{\min} = 0,4 \text{ s} \quad (\text{m})$$

$$\nu = \text{viscositeit van water} \quad (\text{m}^2/\text{s})$$

a	= de lineaire weerstandscoefficiënt van het filter, dat wil zeggen de Enka-Drain kern	(s/m)
b	= de kwadratische weerstandscoefficiënt van het filter, dat wil zeggen de Enka-Drain kern	(s ² /m ²)
a_g	= de lineaire weerstandscoefficiënt van het geotextiel	(s/m)
b_g	= de kwadratische weerstandscoefficiënt van het geotextiel	(s ² /m ²)
e	= grondtal van natuurlijke logaritme	(-)
T_g	= dikte van het geotextiel	(m)
n	= porositeit van het filter ($n = 1$ in dit geval)	(-)

Uit de metingen van de doorlatendheid van de Enka-drain blijkt:

$$\begin{aligned}
 k &= 0,4 \text{ mm/s} \\
 a &= 0 \\
 b &= 21 \text{ s}^2/\text{m}^2 \\
 a_g T_g &= 0,16 \text{ s} \\
 b_g T_g &= 1,1 \text{ s}^2/\text{m}
 \end{aligned}$$

Voor een spleetbreedte van 3 mm wordt met bovenstaande formules een toplaagdoorlatendheid van 3,4 mm/s berekend (bij $s = 2$ mm volgt $k' = 2,2$ mm/s). De bijbehorende leklengte is:

$$\Lambda = \sqrt{\frac{bDk}{k'}} = \sqrt{\frac{0,01 \cdot 0,15 \cdot 0,4}{0,0034}} = 0,42 \text{ m}$$

Deze leklengte komt overeen met de ondergrens van de uit de metingen bepaalde leklengtes. Dit komt door het feit dat de doorlatendheid van de Enka-Drain aanzienlijk lager is dan die van een open geul. Het is echter niet duidelijk waarom geen duidelijk verschil te zien is tussen de leklengtes bepaald uit proefmetingen van de blokken direct op klei en die op de Enka-Drain.

In Figuur 26 zijn resultaten gegeven van leklengteberekeningen met diverse spleetbreedten en een geuldiepte van 10 mm, die gelijk is aan de dikte van de Enka-Drain. De berekende leklengtes hiervoor zijn van de orde 0,4 m voor een spleetbreedte van 3 mm ($s/D = 0,3$).

Deze resultaten kunnen ook worden vergeleken met de bevindingen in (Andere systemen, 1992). In dat verslag staat een figuur (Figuur 9) waarin verschillende soorten constructies zijn gekarakteriseerd op basis van de parameters d/D en k/k' . De categorie "Blokken op klei" valt in het gebied:

$$\begin{aligned}
 10^2 &< \frac{k}{k'} < 2 \cdot 10^3 \quad \text{en} \\
 10^{-2} &< \frac{d}{D} < 2 \cdot 10^{-2}
 \end{aligned}
 \tag{18}$$

Bij een blokdikte van 0,15 m hoort nu een leklengte van 0,15 m à 0,95 m. Dit komt goed overeen met de bovenvermelde gemeten en berekende leklengtes, voor zowel de blokken op klei als op Enka-Drain.

4.5 Conclusie

Voor de bij proevenseries X en Y gehanteerde randvoorwaarden komen de berekende en gemeten lek lengte waarden goed met elkaar overeen. De gemeten lek lengtes zijn 0,4 m à 0,9 m, ongeacht de soort ondergrond of toegepaste geulgeometrie.

Voor geuldieptes tussen $d = 5$ mm en 15 mm is de stroming door de spleten tussen de blokken laminair als s/d kleiner is dan ca. 0,3 en is turbulent als s/d groter dan 0,3 is. De berekende lek lengte ligt in de range van gemeten waarden (0,4 tot 0,9 m) als in de berekeningen een geuldiepte van 5 à 15 mm wordt aangenomen. Gezien het feit dat dit acceptabele waarden zijn, wordt geconcludeerd dat de hierboven beschreven rekenmethode geschikt is om de lek lengte van blokken op klei met geulen te bepalen.

De berekende lek lengte met Enka-drain komt voor spleten van 3 mm tussen de blokken op 0,4 m. Dit is op de ondergrens van de gemeten range en derhalve een vrij lage waarde.

5 Analyse van serie Z

Bij de Z serie zijn de stalen strippen weggelaten, die bij de vorige proevenseries de niet-losse blokken verbonden om uitlichten te voorkomen. Hierdoor konden ook de referentieblokken vrij bewegen.

Als het referentieblok en het meetblok synchroon bewegen wordt een verplaatsing gelijk aan nul geregistreerd. Uit de registratie is derhalve geen uitsluitsel meer te verkrijgen of het meetblok heeft bewogen of niet. Omdat de gemeten drukken op en onder het meetblok worden beïnvloed door een eventuele beweging van het blok, zijn ook de drukregistraties in deze proevenserie niet betrouwbaar meer.

De leklengte van de constructie kan alleen goed bepaald worden op tijdstippen met een relatief grote belasting op de zetting. Omdat met name op dergelijke tijdstippen de drukregistraties niet betrouwbaar zijn, is besloten voor deze proevenserie de leklengte niet te bepalen.

Begin van schade

Enkele globale resultaten van proeven met een duidelijke, doch kleine, blokbeweging zijn gegeven in onderstaande tabel:

Proef	h [m]	T [s]	H [m]	V [cm]	ξ_0 [-]	Δ [-]	H/ Δ [-]
ZL 6	4.88	5.0	0.60	0.7	2.02	1.22	3.27
ZL 1	4.78	4.1	0.61	0.7	1.64	1.22	3.33
ZL 2	4.78	4.1	0.70	0.7	1.53	1.22	3.82
ZL 10	5.23	6.5	0.66	0.7	2.50	1.36	3.24
ZL 9	5.23	6.5	0.75	0.7	2.34	1.37	3.65

Serie ZL = blokken op geotextiel op zandlaagje op klei

Serie ZR = blokken op goed verdichte klei

h = waterstand boven gootbodem (m); V = blokverplaatsing (m)

Tabel Meetresultaten van proeven met begin van beweging (blokbeweging van 0,5 à 1,0 cm)

Deze proeven zijn gebruikt om het black-box model aan te vullen (Klein Breteler, 1994). In Figuur 29 zijn deze en overige uit de literatuur bekende metingen in een $H_s/\Delta - \xi_{op}$ figuur gezet. De proeven met regelmatige golven (zoals serie Z) zijn naar onregelmatige golven omgerekend door de H_s/Δ waarde met 0,85 te vermenigvuldigen.

In de figuur is te zien dat de blokken op goede klei (serie ZR, weinig of geen geulen) er positief uitspringen. De stabiliteit is 20 à 25% hoger dan het gemiddelde van alle andere proeven.

De met zand en geotextiel gerepareerde constructie (serie ZL) blijkt in deze figuur gemiddeld te scoren. Dit betekent dat de stabiliteit niet beter is dan een zetting op klei met geulen. Desondanks kan dit een geschikte reparatiemethode zijn, omdat de verdere groei van de geulen wellicht gestopt wordt.

Bezwijken

Proef Z10 is interessant omdat daar twee losse blokken, geplaatst op het geotextiel op zand, uit de zetting waren gelicht. Een van de uitgelichte blokken was het meetblok waarop verplaatsingsopnemer 6 en drukopnemers 24 en 25 waren bevestigd.

In het meetverslag (Wouters, 1992) werd gesuggereerd dat de uitgelichte blokken vrij geleidelijk uit de zetting werden gedrukt doordat er onder de blokken een ophoping van zand was ontstaan. Deze suggestie was gebaseerd op een inspectie van de open plek in het talud na beëindiging van de proef (na 180 s).

De verplaatsingsregistratie (Figuur 27) toont echter een vrij plotselinge zeer extreme waarde van de verplaatsing na ongeveer 30 s. Hoewel uit het vervolg van de registratie niet eenduidig is vast te stellen of op dit tijdstip het blok reeds volledig uit de zetting is verdwenen, is deze extreme verplaatsing zonder meer als schade te interpreteren.

De opwaartse verschildruk over het meetblok bereikt periodiek een piekwaarde van 4 à 5 kPa. Dit is ruim voldoende om het eigen gewicht van het blok te overwinnen. Als verklaring voor het optreden van de schade na ongeveer 30 s moet worden aangenomen dat tijdens de voorafgaande blokbewegingen verschijnselen als wrijving en kanteling van het blok een extreme verplaatsing hebben verhinderd. Als resultaat van de optredende beperkte bewegingen is het blok steeds enigszins van positie veranderd. Na 30 s is het blok vrij toevallig in een positie gekomen waarbij de eerstvolgende beweging (vrijwel) niet meer is gehinderd.

Referenties

- CUR/TAW, 1992. Handboek voor dimensionering van gezette talusbekledingen. Rapport 155, CUR, Gouda.
- Andere Systemen, 1992. volledige titel: Talusbekledingen van gezette steen, Toepassing kennis op andere systemen Oriënterende bureaustudie N603, Waterloopkundig Laboratorium verslag H195.
- Bezuijen, A., A.M. Burger en M. Klein Breteler (1990). Talusbekleding van Gezette Steen - Samenvatting van onderzoeksresultaten 1980-1988. Rijkswaterstaat/Dienst Weg- en Waterbouwkunde uitgave M1795/H195 Deel XIX, Delft.
- Klein Breteler, 1994. Talusbekledingen van gezette steen, vernieuwd black-box model, Deel D, A2.94.26, Waterloopkundig Laboratorium, verslag H1770
- Rigter, B.P., 1992. Invloed van geulen op de stabiliteit van steenzettingen, TAW-A2 notitie N602 van 9 april 1992, Dienst Weg- en Waterbouwkunde, Rijkswaterstaat.
- Rigter, B.P., 1993. Invloed van de traagheidsterm, TAW notitie A2.93.58 van 7 september 1993, Dienst Weg- en Waterbouwkunde, Rijkswaterstaat.
- WL, 1985. Talusbekledingen van gezette steen, Stabiliteit van enkele typen talusbekledingen bij diverse golfomstandigheden, Waterloopkundig Laboratorium, verslag M1795 deel XIV CO 272560
- WL, 1990. volledige titel: Talusbekledingen van gezette steen, Doorlatendheid van toplaag en filter en berekening van leklengte, Waterloopkundig Laboratorium, verslag M1795 deel XVIII.
- Wouters, J., 1993. Reststerkte van dijkbekledingen Stabiliteit van steenzetting en klei-onderlaag Deel III, meetverslag Deltagootonderzoek. Waterloopkundig Laboratorium, verslag H195.

Proef	h (m)	T (s)	H (m)	Vpl 1 (cm)	Vpl 2 (cm)	Vpl 3 (cm)	Vpl 4 (cm)	Vpl 5 (cm)	Vpl 6 (cm)	Vpl 7 (cm)	Vpl 8 (cm)
X21	4,68	3,30	0,59	0,0	-0,4	-1,4	0,3	-0,2	0,3	-0,5	-0,3
X22	4,68	3,30	0,68	0,8	0,7	-1,4	0,2	-0,4	0,3	-0,3	-0,4
X23	4,68	3,30	0,82	1,6	1,0	2,2	0,8	-0,6	-	-0,4	-0,8
X24	4,68	3,30	0,99	2,2	2,8	2,7	1,4	-0,7	-0,2	-0,4	-0,7
X01	4,78	4,10	0,51	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	-0,3	0,0
X02	4,78	4,10	0,60	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	-0,4	0,0
X03	4,78	4,10	0,74	0,0	0,0	1,6	0,0	0,0	0,0	-0,3	0,3
X04	4,78	4,10	0,87	0,6	0,0	2,4	0,0	-0,5	0,0	0,4	0,3
X05	4,78	4,10	1,03	2,1	1,6	2,6	1,6	-0,9	0,0	-0,4	0,3
X29	4,88	5,00	0,41	0,0	0,0	-0,3	-0,3	0,0	-0,3	-0,3	0,0
X30	4,88	5,00	0,50	0,0	0,3	-0,7	-0,4	-0,3	-0,6	-0,3	0,3
X31	4,88	5,00	0,59	0,0	0,7	-1,0	-0,4	-0,5	-0,7	-0,4	0,3
X32	4,88	5,00	0,71	0,8	1,2	-1,0	-0,6	-0,8	-0,8	-0,4	-0,3
X33	4,88	5,00	0,85	2,8	2,6	-1,4	0,8	-0,9	-0,6	0,5	-0,6
X14	4,78	6,50	0,31	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
X15	4,78	6,50	0,36	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
X16	4,78	6,50	0,45	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	-0,1	0,0
X17	4,98	6,50	0,54	0,0	0,0	-0,3	0,3	-0,4	0,0	-0,3	0,3
X18	4,98	6,50	0,65	0,3	0,5	-0,5	0,3	-0,6	0,0	0,2	0,3
X118	4,98	6,50	0,76	0,5	0,9	-0,5	0,4	-0,7	0,2	0,3	-0,4
X25	4,81	3,30	0,57	0,0	0,2	-0,2	0,0	0,3	1,2	0,6	-0,3
X26	4,81	3,30	0,68	0,0	0,3	-0,6	-0,2	-0,3	1,4	1,1	0,3
X27	4,81	3,30	0,83	0,0	0,4	-1,7	-0,5	-0,4	0,7	0,8	0,4
X28	4,81	3,30	0,96	0,4	-1,1	2,0	-0,6	-0,6	-	0,8	-0,4
X06	4,91	4,10	0,49	0,0	0,0	0,0	0,0	-0,6	0,0	-0,6	0,4
X07	4,91	4,10	0,58	0,0	0,0	0,0	0,0	-0,7	0,2	0,6	0,4
X08	4,91	4,10	0,70	0,0	0,0	-0,8	0,2	1,4	0,4	0,9	0,3
X09	4,91	4,10	0,84	0,0	-0,5	-1,8	0,2	1,6	0,7	1,6	0,3
X10	4,91	4,10	1,02	0,0	-0,5	-1,8	-0,4	-0,6	0,3	1,2	0,4
X34	5,01	5,00	0,41	0,0	0,0	0,0	0,0	-0,6	-0,3	-0,3	0,3
X35	5,01	5,00	0,50	0,0	0,0	0,0	0,0	1,0	0,3	-0,4	0,3
X36	5,01	5,00	0,58	0,0	0,0	-0,6	0,3	-1,3	-1,1	-0,4	0,3
X37	5,01	5,00	0,70	0,0	0,3	-1,4	0,4	-1,0	-1,4	1,2	0,5
X38	5,01	5,00	0,84	0,0	-0,9	-1,7	-1,0	-1,0	1,6	1,6	-0,4
X11	4,91	6,50	0,28	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
X12	4,91	6,50	0,38	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
X13	4,91	6,50	0,45	0,0	0,0	0,0	0,1	-0,1	0,0	-0,2	0,0
X19	5,11	6,50	0,56	0,0	0,6	-0,6	-0,4	-0,3	-0,6	-0,3	-0,2
X20	5,11	6,50	0,66	0,6	1,0	-0,4	-0,4	-0,6	-0,4	-0,4	-0,3
X120	5,11	6,50	0,76	0,7	1,3	-0,8	-0,6	-0,7	-0,7	0,6	0,4
X113	4,98	6,50	0,46	0,0	0,0	0,0	-0,2	-0,2	0,0	-0,3	0,2

Tabel 1 Uitgevoerde proeven en bepaalde verplaatsingswaarden, Serie-X

Proef	h	T	H	Vpl 1	Vpl 2	Vpl 3	Vpl 4	Vpl 5	Vpl 6	Vpl 7	Vpl 8
	(m)	(s)	(m)	(cm)	(cm)	(cm)	(cm)	(cm)	(cm)	(cm)	(cm)
Y06	4,78	3,30	0,58	0,0	0,0	0,0	0,0	-0,3	-0,4	-0,4	-0,3
Y07	4,78	3,30	0,68	0,0	0,0	-0,3	-0,3	-0,5	-0,6	0,3	-0,3
Y08	4,78	3,30	0,82	0,4	0,2	-0,3	-0,6	-0,3	-0,6	0,4	-0,3
Y09	4,78	3,30	0,97	0,6	2,0	1,4	-0,6	0,6	-0,6	0,4	0,3
Y36	4,68	3,30	0,57	0,4	0,2	0,0	0,0	-0,3	-0,5	0,4	-0,2
Y37	4,68	3,30	0,67	0,5	1,2	0,2	0,3	-0,4	-0,5	0,4	-0,3
Y38	4,68	3,30	0,81	1,2	2,0	2,1	0,8	-0,5	-0,5	0,5	-0,3
Y39	4,68	3,30	0,98	2,0	2,3	2,2	2,0	-0,7	-0,6	0,4	-0,3
Y01	4,78	4,10	0,50	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,4	0,3
Y02	4,78	4,10	0,60	0,0	0,3	0,6	-0,3	0,0	0,0	-0,3	0,4
Y03	4,78	4,10	0,72	0,0	0,5	1,7	1,0	-0,4	-0,2	0,5	0,4
Y04	4,78	4,10	0,85	0,4	1,6	2,2	1,6	-0,8	0,0	0,5	0,4
Y05	4,78	4,10	1,04	2,5	3,5	2,6	2,5	-0,7	0,5	-0,5	0,3
Y15	4,91	4,10	0,50	0,0	0,0	0,0	0,0	-0,4	-0,5	0,4	0,2
Y16	4,91	4,10	0,59	0,0	-0,2	0,0	0,0	1,0	-0,7	0,6	0,8
Y17	4,91	4,10	0,71	0,0	-0,2	0,2	0,0	1,1	-0,5	0,8	1,0
Y18	4,91	4,10	0,84	-0,3	-0,6	0,2	-0,3	1,1	-0,5	1,0	1,1
Y19	4,91	4,10	1,03	-0,5	-0,5	-0,5	-0,6	1,1	-0,4	1,2	1,0
Y10	4,88	5,00	0,45	0,0	-0,8	0,0	0,0	-0,5	0,3	-0,3	0,2
Y11	4,88	5,00	0,51	0,0	-0,7	0,0	0,2	-0,5	-0,7	0,4	0,3
Y12	4,88	5,00	0,60	0,0	1,0	0,7	0,6	-0,6	-0,7	0,6	0,5
Y13	4,88	5,00	0,70	0,8	1,7	1,5	0,9	-0,7	-0,8	0,6	0,4
Y14	4,88	5,00	0,85	-	2,2	2,0	1,7	-0,6	-1,1	0,6	0,7
Y21	5,01	5,00	0,42	0,0	0,0	0,0	0,0	0,4	-0,6	-0,3	0,0
Y22	5,01	5,00	0,48	0,0	-0,1	0,0	0,0	0,3	-0,9	-0,4	0,3
Y23	5,01	5,00	0,59	0,0	-0,6	0,2	0,1	-0,5	-0,8	0,5	0,4
Y24	5,01	5,00	0,70	-0,2	-0,5	-0,2	-0,5	0,8	-0,8	1,0	0,4
Y25	5,01	5,00	0,86	-0,5	-0,5	-0,4	-0,8	1,2	-0,9	0,6	0,7
Y26	5,01	6,50	0,49	0,7	-0,4	0,0	0,1	-0,1	-0,2	-0,3	0,0
Y27	5,01	6,50	0,58	0,3	-0,4	0,0	0,4	-0,2	-0,4	-0,3	0,2
Y28	5,13	6,50	0,51	-0,2	-0,4	0,0	-0,2	0,4	-0,3	-0,4	-0,2
Y29	5,13	6,50	0,59	-0,1	-0,5	0,3	-0,2	0,4	-0,5	-0,3	0,3
Y30	5,22	6,50	0,69	-0,3	-0,8	0,6	-0,4	0,6	-0,8	-0,4	0,4
Y31	5,22	6,50	0,84	1,2	-0,8	1,0	1,0	0,7	-1,0	0,7	0,6
Y32	5,22	6,50	1,01	1,2	3,0	2,0	2,0	-0,6	-1,5	0,8	0,4
Y33	5,35	6,50	0,71	0,0	-0,3	0,0	-0,2	-0,7	-1,0	-0,4	0,6
Y34	5,35	6,50	0,84	-0,3	-0,7	0,3	-0,4	-1,0	-1,3	1,2	0,9
Y35	5,35	6,50	1,00	-0,6	-1,0	-0,7	-0,9	1,0	1,3	1,5	-0,7

Tabel 2 Uitgevoerde proeven en bepaalde verplaatsingswaarden, Serie-Y

Proef	h (m)	T (s)	H (m)	Ll	Lr	Rl	Rr	Ll	Lr	Rl	Rr
				Vpl 1 (cm)	Vpl 2 (cm)	Vpl 3 (cm)	Vpl 4 (cm)	Vpl 5 (cm)	Vpl 6 (cm)	Vpl 7 (cm)	Vpl 8 (cm)
Z01	4,78	4,10	0,61	0,70	0,00	0,00	0,30	-0,50	0,00	-0,30	-0,30
Z02	4,78	4,10	0,70	0,70	0,00	0,00	0,30	-0,60	0,00	0,30	-0,20
Z05	4,88	5,00	0,52	-0,50	0,00	0,00	-0,30	-0,50	0,00	-0,40	0,30
Z06	4,88	5,00	0,60	0,70	0,00	0,30	0,40	-0,60	0,00	0,50	0,40
Z07	4,88	5,00	0,71	0,90	1,30	1,00	0,90	-0,70	0,00	0,50	0,50
Z09	5,23	6,50	0,75	1,20	-0,70	0,50	0,60	-1,00	0,30	0,40	-0,30
Z10	5,23	6,50	0,66	-0,50	5,00	0,60	0,50	-1,00	5,00	0,60	0,30

Tabel 3 Uitgevoerde proeven en verplaatsingswaarden, Serie Z

Serie X					Serie Y					
Proef	T (s)	Geulgeometrie + VPL nummer				Proef	Geulgeometrie + VPL nummer			
		Ll	Lr	Rl	Rr		Ll	Lr	Rl	Rr
X22	3,3	1				Y09			3	
X23		1			4	Y36	1			
X24						Y37	1	2		
X25				6	7	Y38			7	
X26					7					
X03	4,1				3	Y03			3	
X05			2		4	Y16	5		7	8
X07					7					
X08		5								
X09				6						
X31	5,0		2			Y12		2	3	4
X32		1	2			Y24	5			
X33					4					
X37					7	8				
X19	6,5		2			Y26	1			
X20		1	2			Y30			3	
X120		1		7		Y32		2		
						Y33				8

Tabel 4 Geselecteerde proeven en geometrieën

Proef	T (s)	H (m)	WS (m)	Geom	VPL	t_{begin} (s)	Mech	t_{analyse} (s)	ΔP (kPa)	θ ($^{\circ}$)	ϕ_b (m)	d_s (m)	Λ (m)
X03	4,1	0,74	4,78	Rl	3	226,08	2	225,80	1,5	67	0,84	-0,48	0,7
X05	4,1	1,03	4,78	Lr	2	84,28	2	84,04	7,0	64	0,95	-0,50	0,7
X05	4,1	1,03	4,78	Rr	4	108,72	1	108,68	2,5	75	1,02	-0,56	0,4
X07	4,1	0,58	4,91	Rl	7	243,36	1	243,36	3,0	72	0,70	-0,43	0,5
X08	4,1	0,70	4,91	Ll	5	136,88	1	136,84	4,2	72	0,80	-0,44	0,4
X09	4,1	0,84	4,91	Lr	6	184,84	1	184,84	1,0	65	0,88	-0,49	0,5
X09	4,1	0,84	4,91	Rl	7	185,12	3	184,96	-0,1	68	0,84	-0,48	0,3
X37	5,0	0,70	5,01	Rl	7	117,00	1	117,00	2,0	63	0,94	-0,57	0,6
X37	5,0	0,70	5,01	Rr	8	277,08	1	277,00	-2,0	65	0,96	-0,59	0,5
X19	6,5	0,56	5,11	Lr	2	109,88	1	109,88	2,5	63	1,21	-0,80	0,7
X20	6,5	0,66	5,11	Ll	1	218,44	3	218,28	6,0	67	1,25	-0,81	0,9
X20	6,5	0,66	5,11	Lr	2	75,00	1	75,00	2,6	60	1,22	-0,80	0,7
X120	6,5	0,76	5,11	Ll	1	7,64	1	7,60	3,0	63	1,32	-0,81	0,9
X120	6,5	0,76	5,11	Rl	7	228,92	4	228,68	0,6	57	1,16	-0,69	0,6
X31	5,0	0,59	4,88	Lr	2	121,68	1	121,68	1,8	62	0,88	-0,53	0,8
X32	5,0	0,71	4,88	Ll	1	233,04	2	232,96	3,2	65	0,93	-0,57	0,8
X32	5,0	0,71	4,88	Lr	2	53,08	2	52,92	2,3	64	0,96	-0,57	0,7
X33	5,0	0,85	4,88	Rr	4	270,48	2	270,20	5,5	62	1,02	-0,57	0,8
X25	3,3	0,57	4,81	Lr	6	194,16	1	193,80	-0,5	63	0,64	-0,37	0,5
X22	3,3	0,68	4,68	Ll	1	117,92	1	117,92	4,0	73	0,67	-0,36	NTB
X23	3,3	0,82	4,68	Ll	1	222,68	2	222,52	6,0	68	0,73	-0,40	0,9
X23	3,3	0,82	4,68	Rr	4	219,48	2	219,20	2,5	60	0,70	-0,37	0,3
X24	3,3	0,99	4,68	Rr	4	224,92	2	224,68	6,0	68	0,78	-0,45	0,5

WS = Waterstand (m) t.o.v. de gootbodem
 Mech = Mechanisme bij begin van beweging
 Geom = Geulgeometrie
 NTB = Niet te bepalen
 VPL = Verplaatsingsopnemer (zie Figuur 2)
 ΔP = verschuldruk over het meetblok
 θ = fronthoek
 ϕ_b = fronthoogte
 d_s = schadenediepte
 Λ = leklengte

Tabel 5 Frontparameters, mechanismen en leklengtes, Serie X

Proef	T (s)	H (m)	WS (m)	Geom	VPL	t_{begin} (s)	Mech	t_{analyse} (s)	ΔP (kPa)	θ (°)	ϕ_b (m)	d_s (m)	Λ (m)
Y03	4,10	0,72	4,78	Lr	2	179,96	2	179,92	1,90	76	0,81	-0,48	0,5
Y03	4,10	0,72	4,78	Rl	3	204,52	2	204,32	1,60	59	0,80	-0,43	0,7
Y09	3,30	0,97	4,78	Rl	3	97,08	2	96,92	3,80	NTB	NTB	NTB	NTB
Y12	5,00	0,60	4,88	Lr	2	62,88	1	62,88	1,50	79	0,70	-0,35	0,7
Y12	5,00	0,60	4,88	Rl	3	62,80	NTB	-	2,30	NTB	NTB	NTB	NTB
Y12	5,00	0,60	4,88	Rr	4	162,72	1	162,72	1,50	57	0,82	-0,47	0,8
Y16	4,10	0,59	4,91	Ll	5	84,44	1	84,48	5,40	76	0,68	-0,37	0,7
Y16	4,10	0,59	4,91	Rl	7	84,32	NTB	-	-1,9	NTB	NTB	NTB	NTB
Y16	4,10	0,59	4,91	Rr	8	84,36	1	84,36	1,80	65	0,69	-0,37	0,5
Y24	5,00	0,70	5,01	Ll	5	121,24	3	121,00	-3,8	57	0,90	-0,52	0,5
Y26	6,50	0,49	5,01	Ll	1	107,76	1	107,76	1,8	56	1,08	-0,59	0,9
Y30	6,50	0,69	5,22	Rl	3	8,48	NTB	-	1,20	NTB	NTB	NTB	NTB
Y32	6,50	1,01	5,22	Lr	2	53,00	1	53,00	0,80	64	1,42	-0,88	0,7
Y33	6,50	0,71	5,35	Rr	8	210,96	1	210,96	1,80	59	1,30	-0,77	0,7
Y36	3,30	0,57	4,68	Ll	1	83,44	1	83,44	2,30	60	0,60	-0,36	0,8
Y37	3,30	0,67	4,68	Ll	1	103,32	1	103,32	2,40	65	0,65	-0,36	0,8
Y37	3,30	0,67	4,68	Lr	2	103,48	1	103,36	1,0	65	0,67	-0,35	0,8
Y38	3,30	0,81	4,68	Rl	7	-	NTB	-		NTB	NTB	NTB	NTB
Y38	3,30	0,81	4,68	Rr	4	167,68	2	167,60	2,00	65	0,69	-0,35	0,5

WS = Waterstand (m) tov. de gootbodem
 Mech = Mechanisme bij begin van beweging
 Geom = Geulgeometrie
 NTB = Niet te bepalen
 VPL = Verplaatsingsopnemer (zie Figuur 2)
 ΔP = verschuldruk over het meetblok
 θ = fronthoek
 ϕ_b = fronthoogte
 d_s = schadediepte
 Λ = leklengte

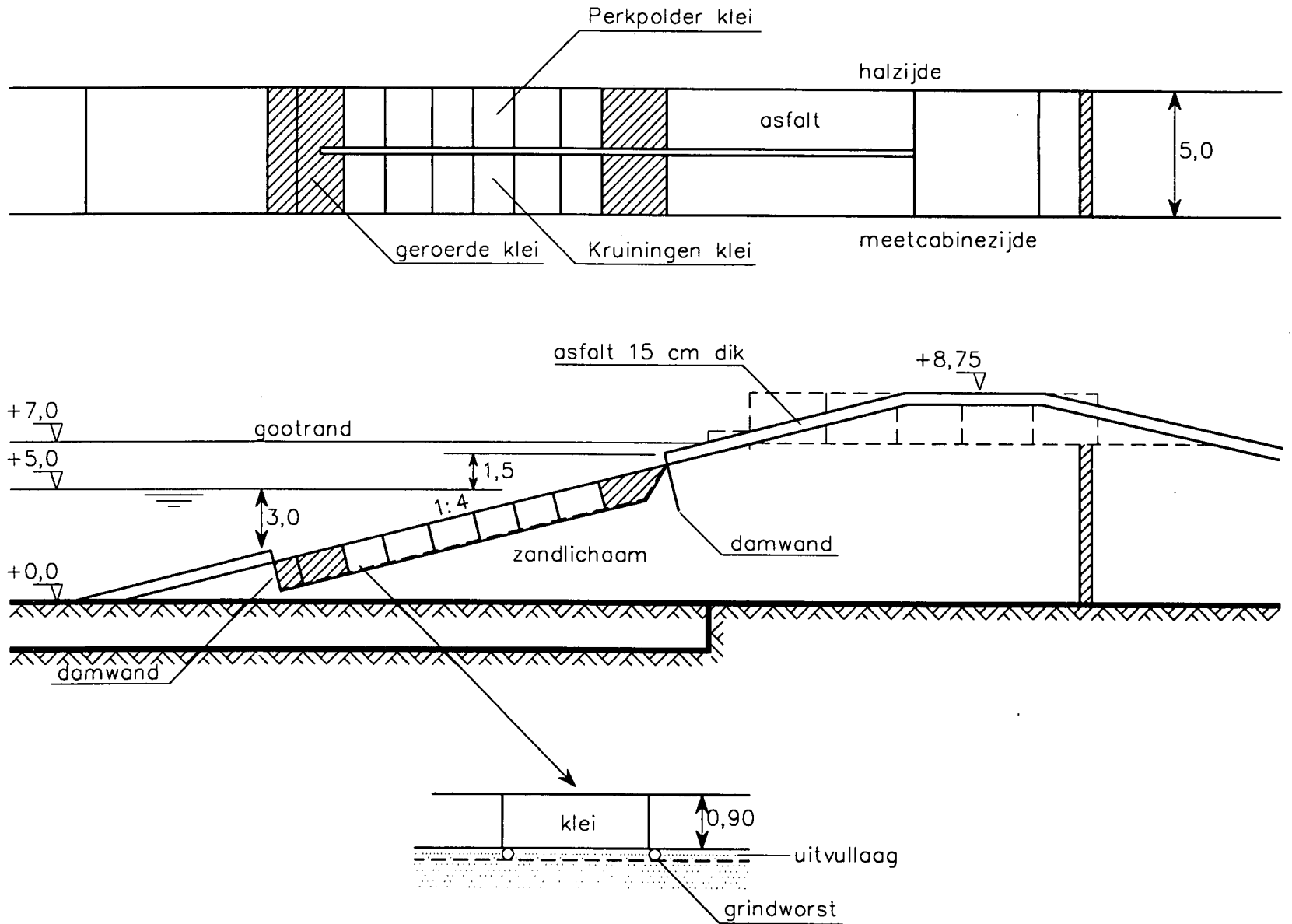
Tabel 6 Frontparameters, mechanismen en leklengtes; Serie Y

proef	h [m]	Tp [s]	Hs [m]	V [cm]	ξ_{op} [-]	Δ [-]	Hs/ ΔD [-]
A03	5.00	3.9	0.81	schade	1.35	1,38	3.91
A03h	5.00	3.9	0.77	schade	1.39	1,38	3.72

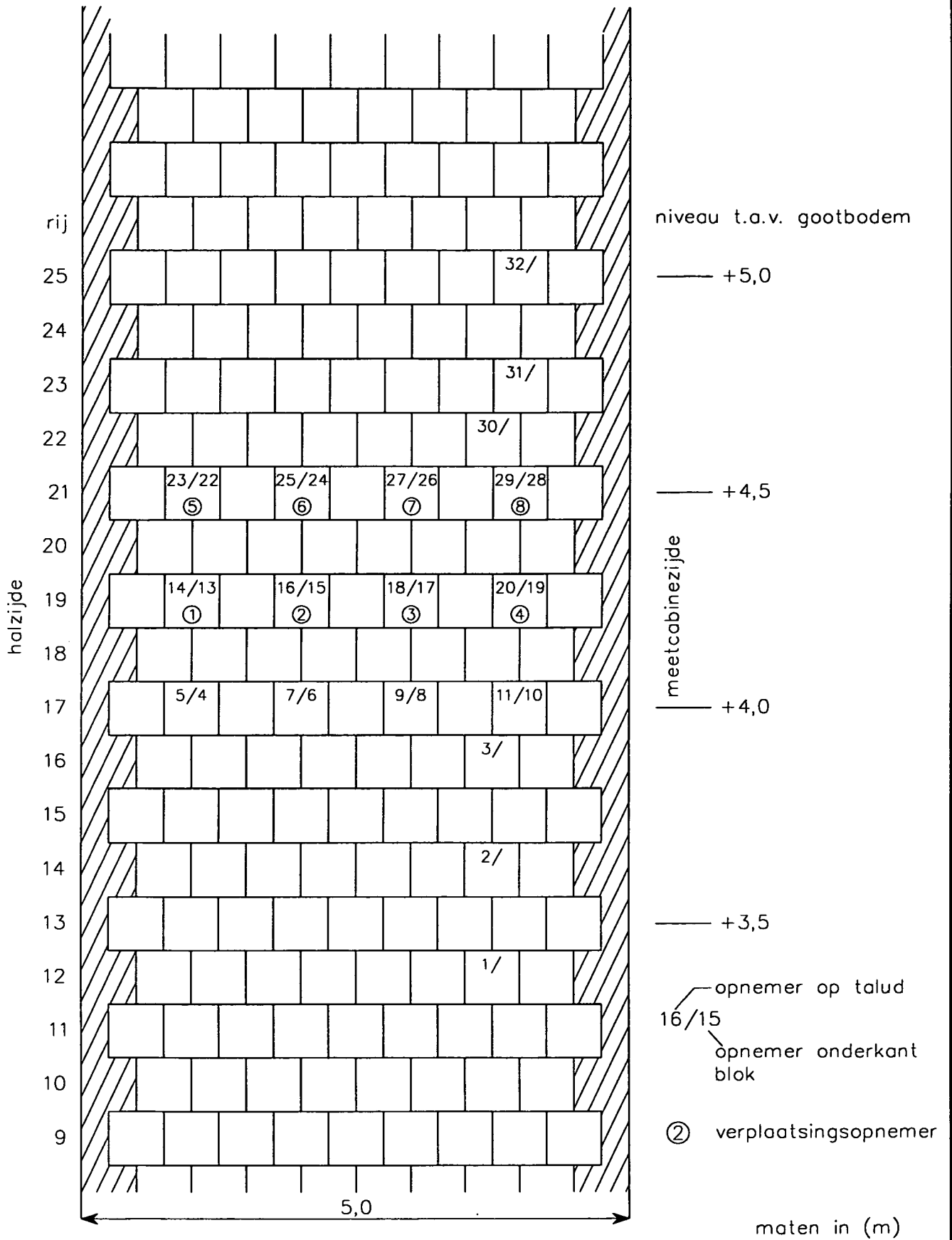
proef	h [m]	T [s]	H [m]	V [cm]	ξ_o [-]	Δ [-]	H/ ΔD [-]
XL 34	5.01	5.0	0.41	0.6	2.44	1.25	2.19
XL 30	4.88	5.0	0.50	0.6	2.21	1.33	2.50
XL 6	4.91	4.1	0.49	0.6	1.83	1.25	2.62
XL 19	5.11	6.5	0.56	0.6	2.71	1.33	2.81
XL 31	4.88	5.0	0.59	0.7	2.03	1.33	2.96
XL 7	4.91	4.1	0.58	0.7	1.68	1.25	3.10
XL 18	4.98	6.5	0.65	0.6	2.52	1.25	3.48
XL 22	4.68	3.3	0.68	0.8	1.25	1.22	3.71
XL 118	4.98	6.5	0.76	0.9	2.33	1.33	3.81
XL 27	4.81	3.3	0.83	0.7	1.13	1.33	4.15
XL 4	4.78	4.1	0.87	0.6	1.37	1.22	4.74
XL 10	4.91	4.1	1.02	0.6	1.27	1.25	5.45
YL 21	5.01	5.0	0.42	0.6	2.41	1.33	2.10
YL 10	4.88	5.0	0.45	0.8	2.33	1.33	2.26
YL 22	5.01	5.0	0.48	0.9	2.25	1.33	2.40
YL 11	4.88	5.0	0.51	0.7	2.19	1.33	2.56
YL 26	5.01	6.5	0.49	0.7	2.90	1.22	2.67
YL 23	5.01	5.0	0.59	0.8	2.03	1.33	2.95
YL 7	4.78	3.3	0.68	0.6	1.25	1.33	3.40
YL 30	5.22	6.5	0.69	0.8	2.44	1.33	3.46
YL 24	5.01	5.0	0.70	0.8	1.87	1.25	3.74
YL 8	4.78	3.3	0.82	0.6	1.14	1.33	4.10
ZL 6	4.88	5.0	0.60	0.7	2.02	1.22	3.27
ZL 1	4.78	4.1	0.61	0.7	1.64	1.22	3.33
ZL 2	4.78	4.1	0.70	0.7	1.53	1.22	3.82
XR 30	4.88	5.0	0.50	0.7	2.21	1.36	2.46
XR 6	4.91	4.1	0.49	0.6	1.83	1.28	2.55
XR 19	5.11	6.5	0.56	0.6	2.71	1.36	2.75
XR 36	5.01	5.0	0.58	0.6	2.05	1.36	2.85
XR 25	4.81	3.3	0.57	0.6	1.36	1.28	2.97
XR 7	4.91	4.1	0.58	0.6	1.68	1.28	3.02
XR 8	4.91	4.1	0.70	0.9	1.53	1.28	3.65
XR 120	5.11	6.5	0.76	0.8	2.33	1.36	3.74
YR 2	4.78	4.1	0.60	0.6	1.65	1.36	2.95
YR 12	4.88	5.0	0.60	0.7	2.02	1.36	2.95
YR 16	4.91	4.1	0.59	0.8	1.67	1.23	3.19
YR 30	5.22	6.5	0.69	0.6	2.44	1.36	3.39
YR 33	5.35	6.5	0.71	0.6	2.41	1.23	3.84
YR 8	4.78	3.3	0.82	0.6	1.14	1.37	3.99
YR 25	5.01	5.0	0.86	0.8	1.68	1.37	4.18
ZR 10	5.23	6.5	0.66	0.6	2.50	1.36	3.24
ZR 9	5.23	6.5	0.75	0.6	2.34	1.37	3.65

Serie A = blokken op klei met natuurlijke geulen en onreg. golven
 Serie XL = blokken op klei met natuurlijke geulen en reg. golven
 Serie YL = blokken op geotextiel op zandlaagje op klei
 Serie ZL = blokken op geotextiel op zandlaagje op klei
 Serie XR = blokken op goed verdichte klei met kunstmatige geulen
 Serie YR = blokken op dik geotextiel op goed verdichte klei
 Serie ZR = blokken op goed verdichte klei

Tabel 7 Meetresultaten van Wouters (1993) [1] voor zover er blokbeweging van 0,5 à 1,0 cm optrad



maten in (m)

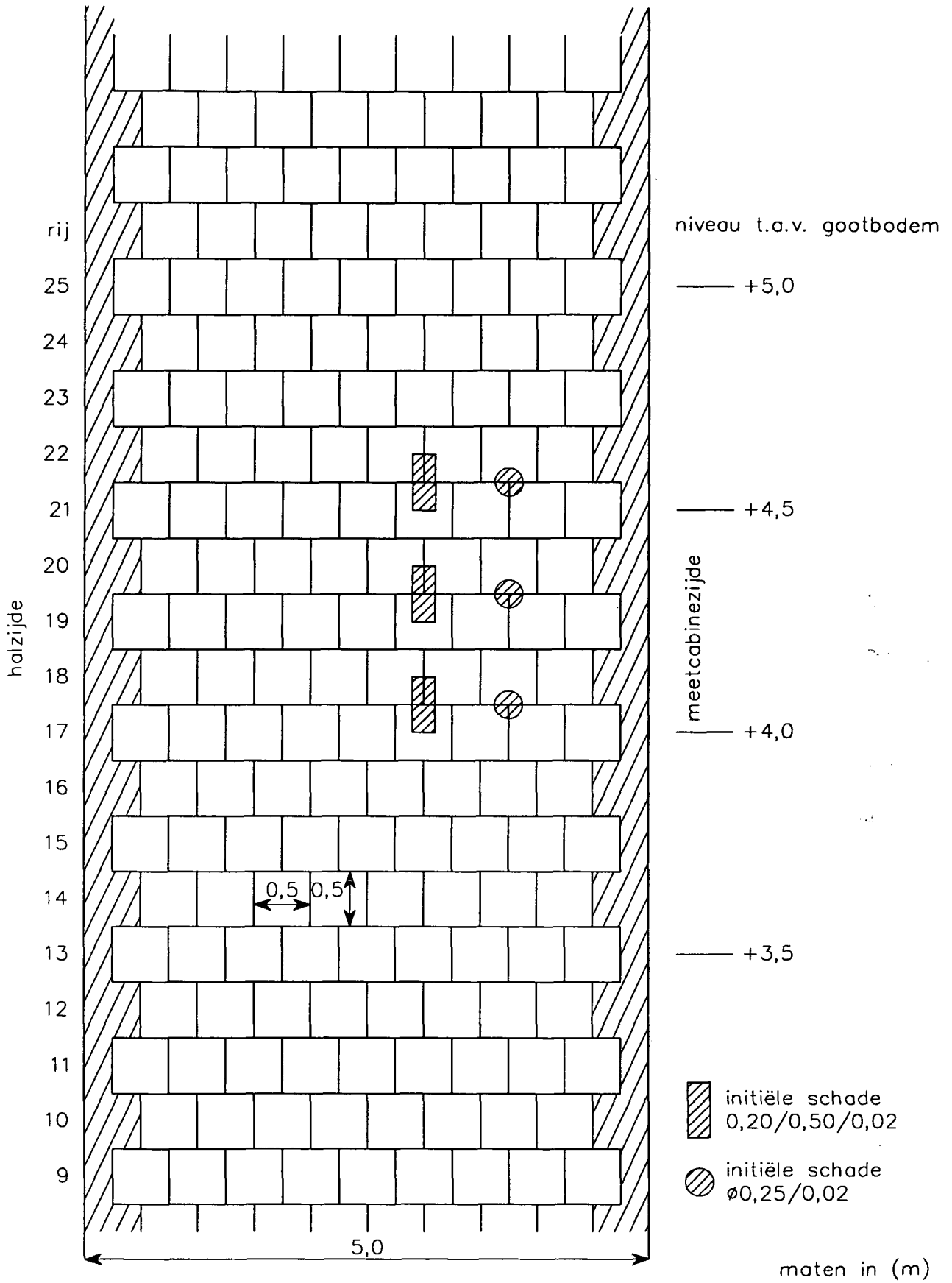


NUMMERING DRUKOPNEMERS EN
VERPLAATSINGSOPNEMERS

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

H 1550

FIG. 2

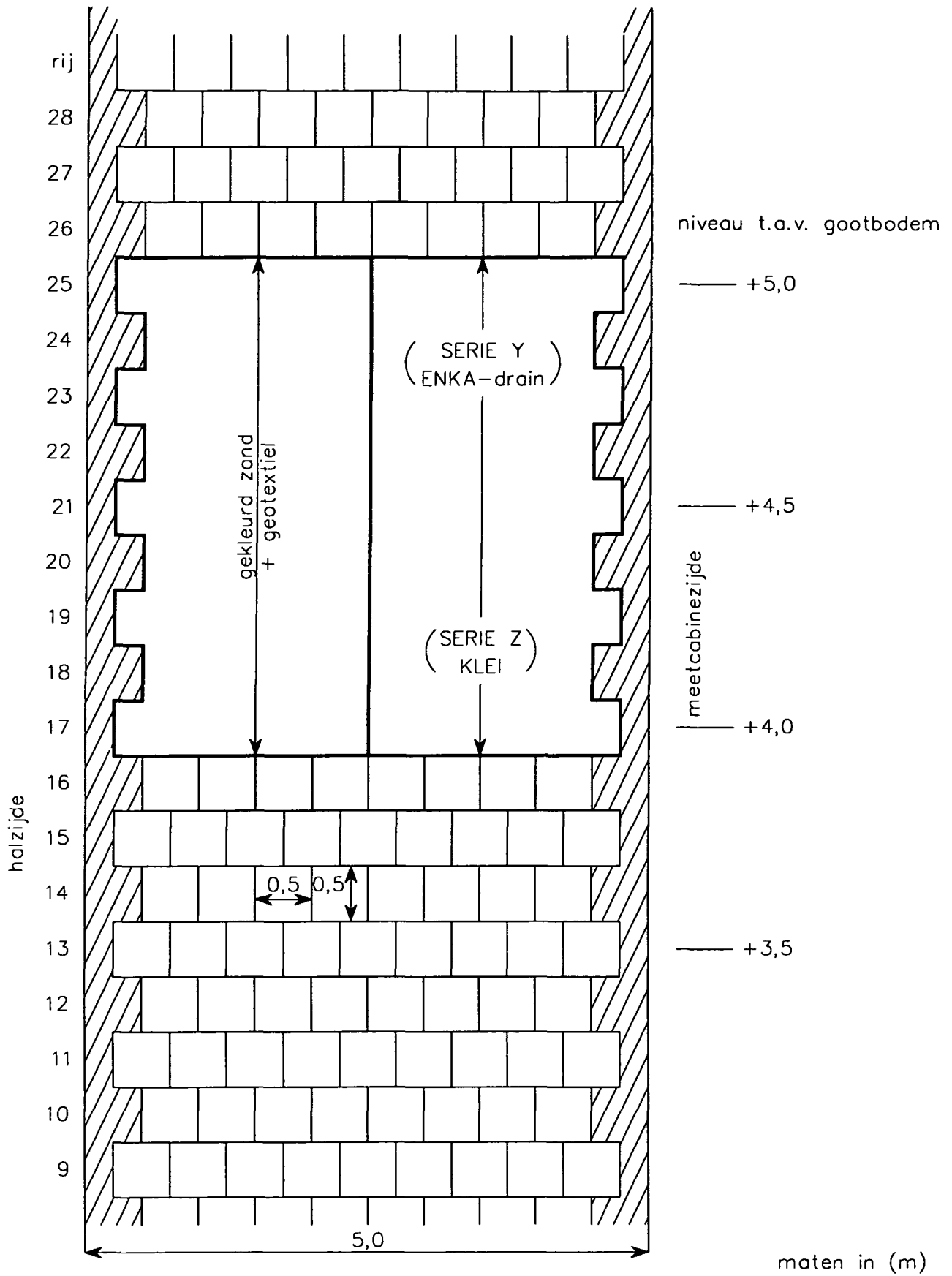


MODELOPSTELLING PROEVENSERIE X

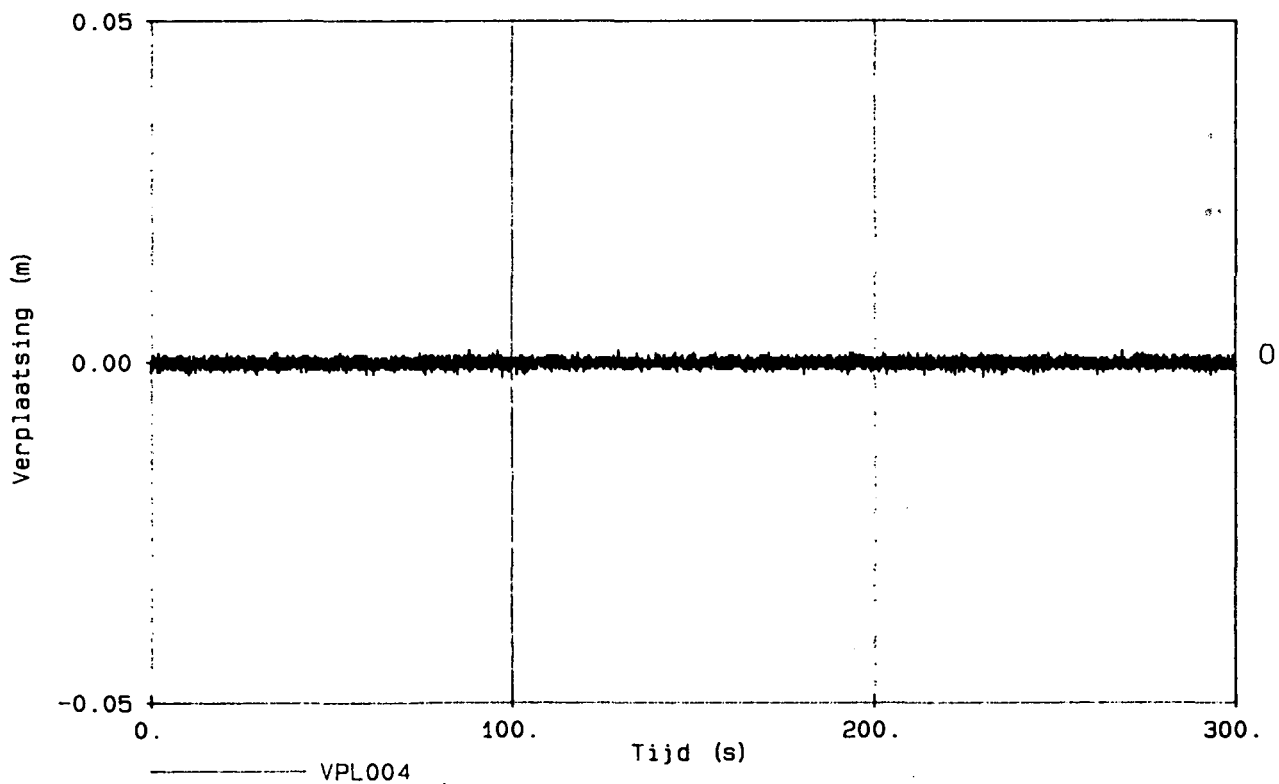
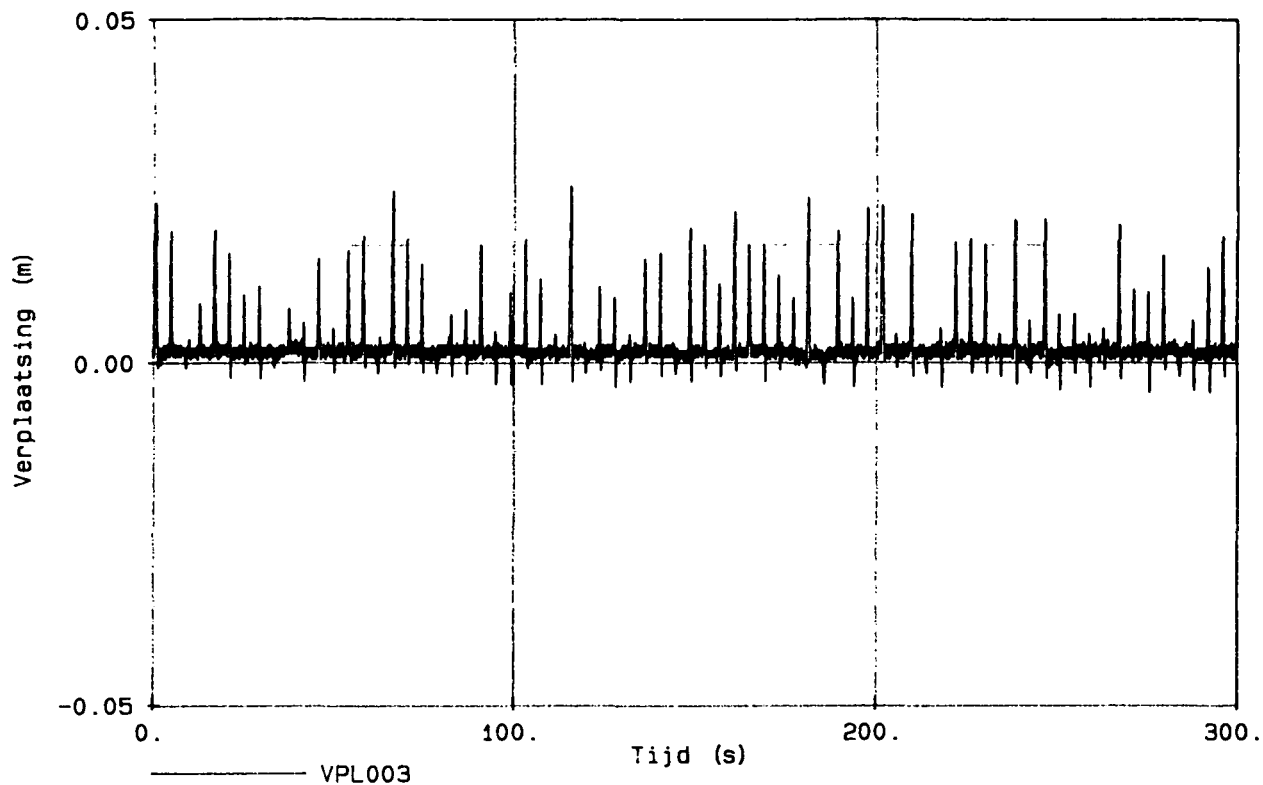
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

H 1550

FIG. 3a



MODELOPSTELLING PROEVENSERIES Y EN Z

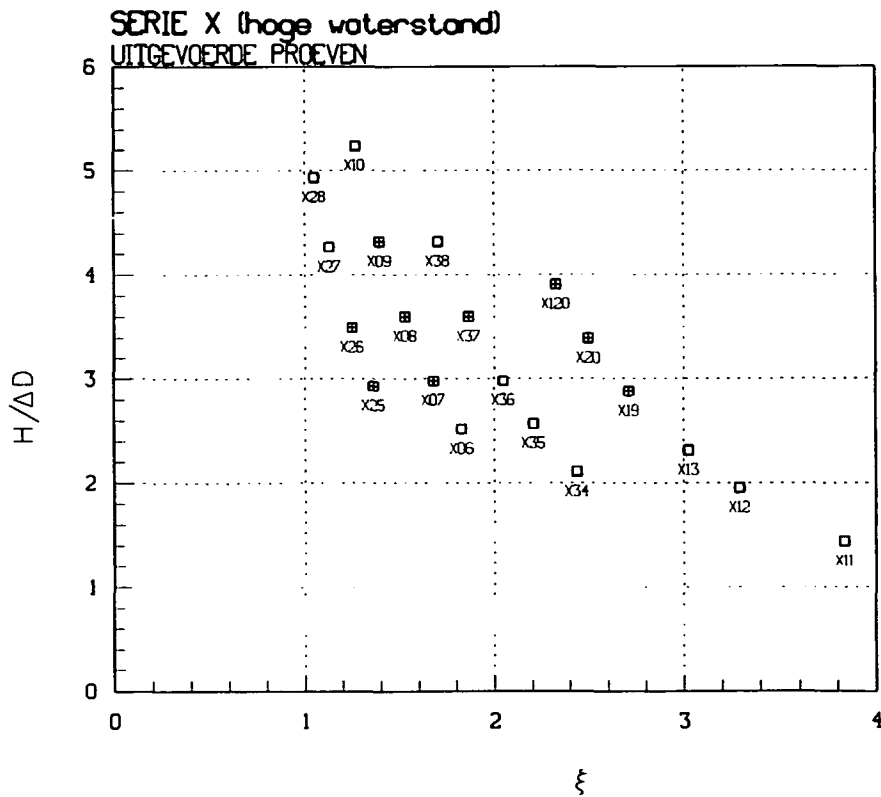
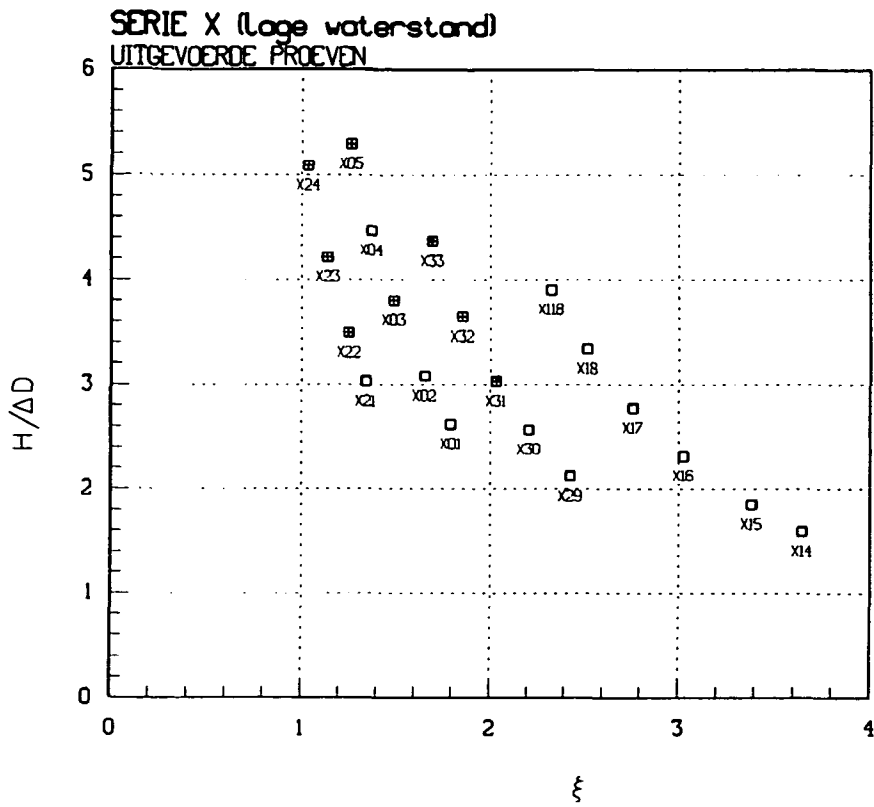


VOORBEELD VERPLAATSINGSREGISTRATIE

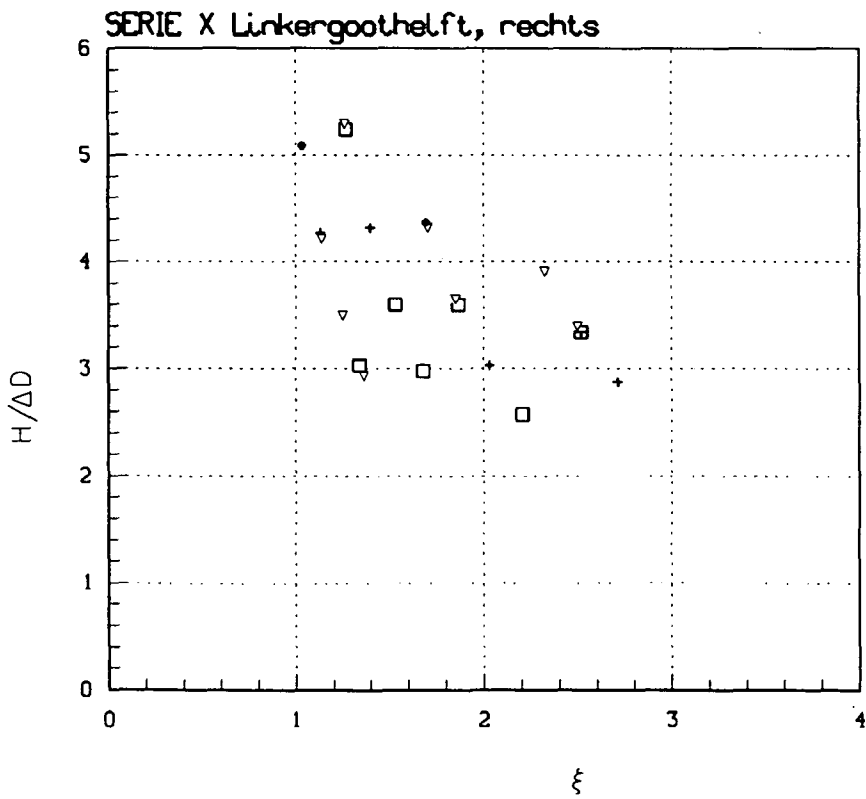
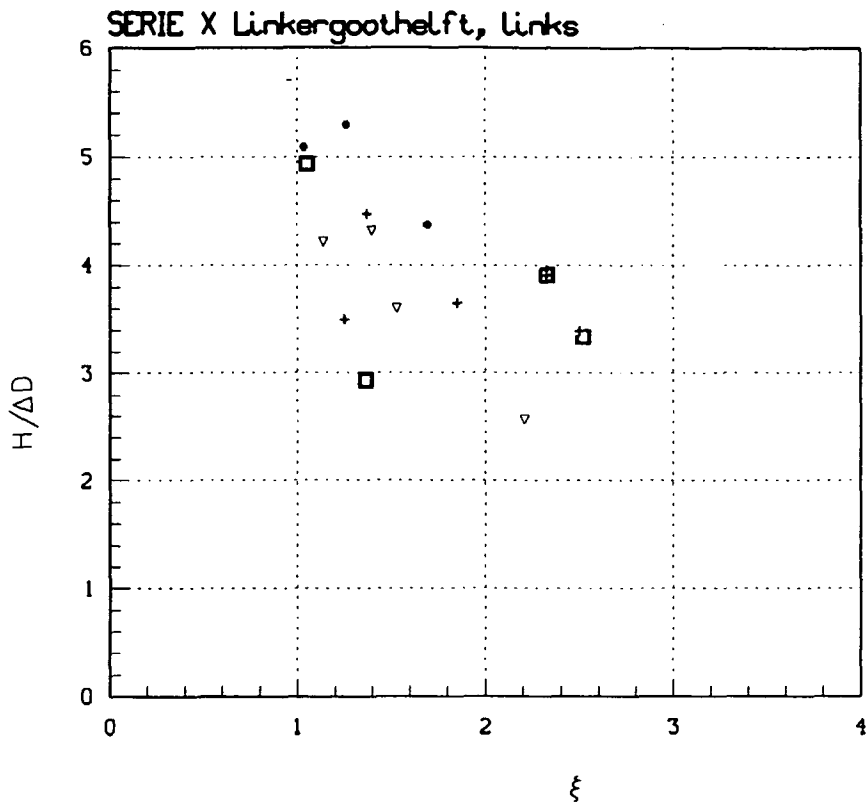
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

H 1550

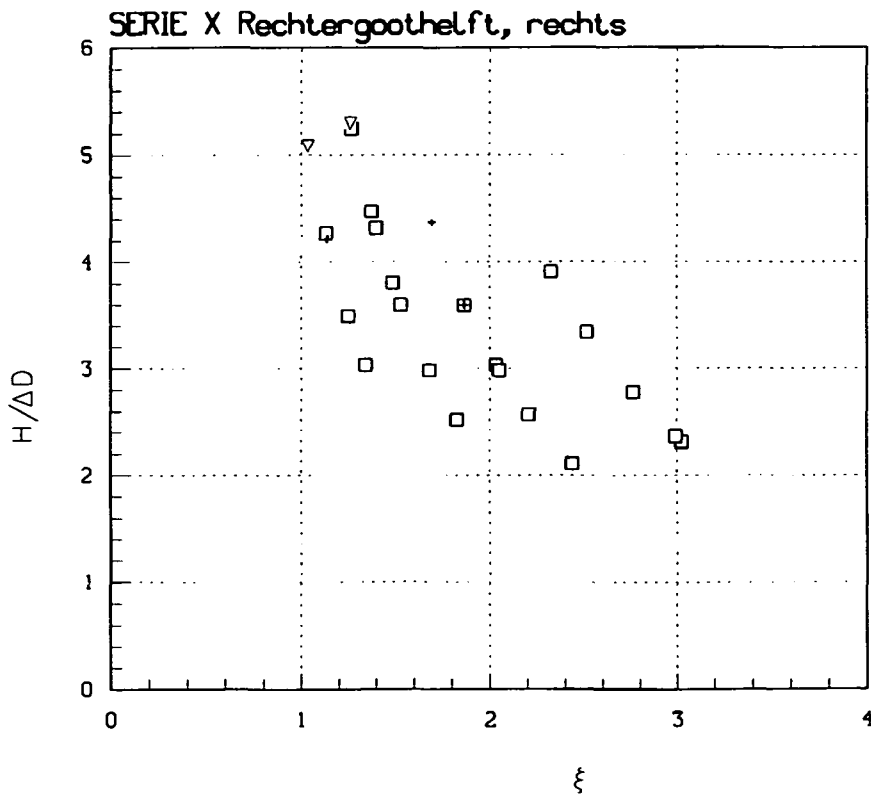
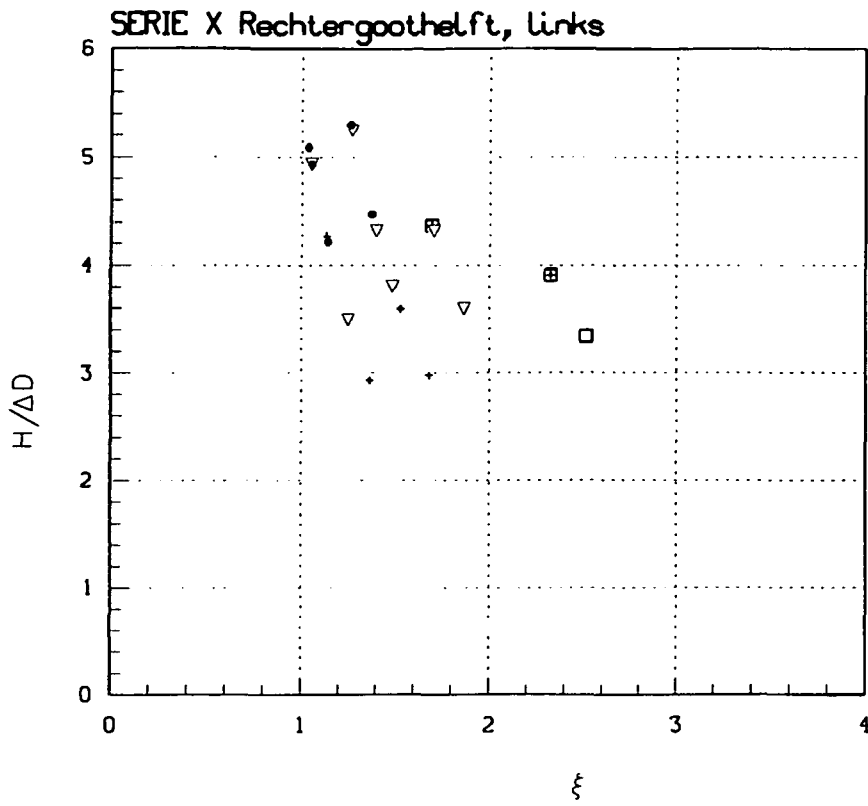
FIG. 4



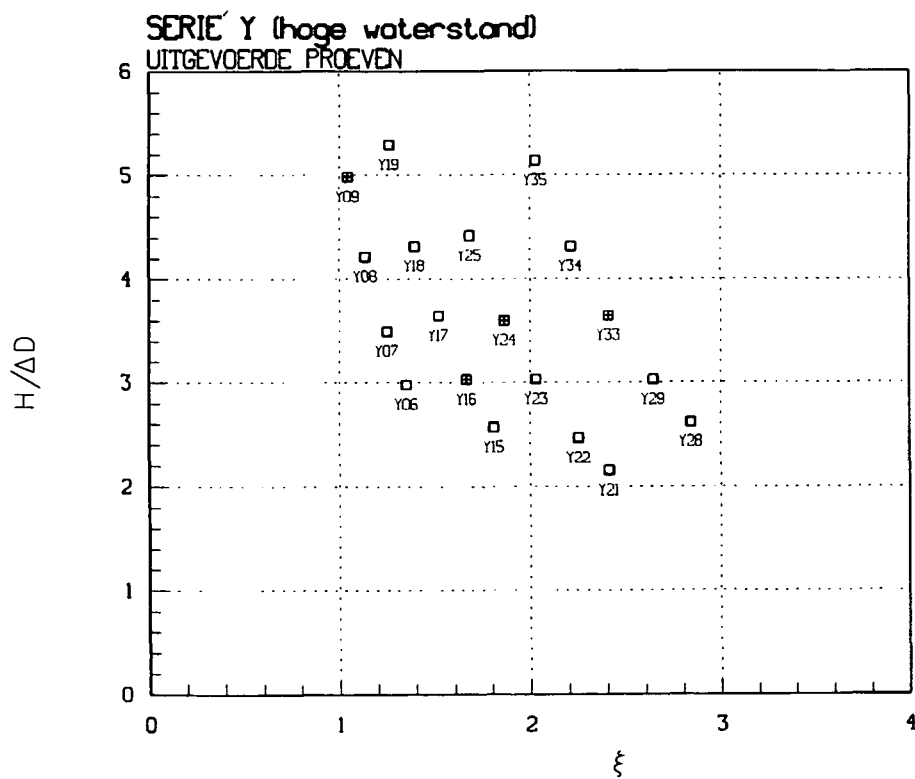
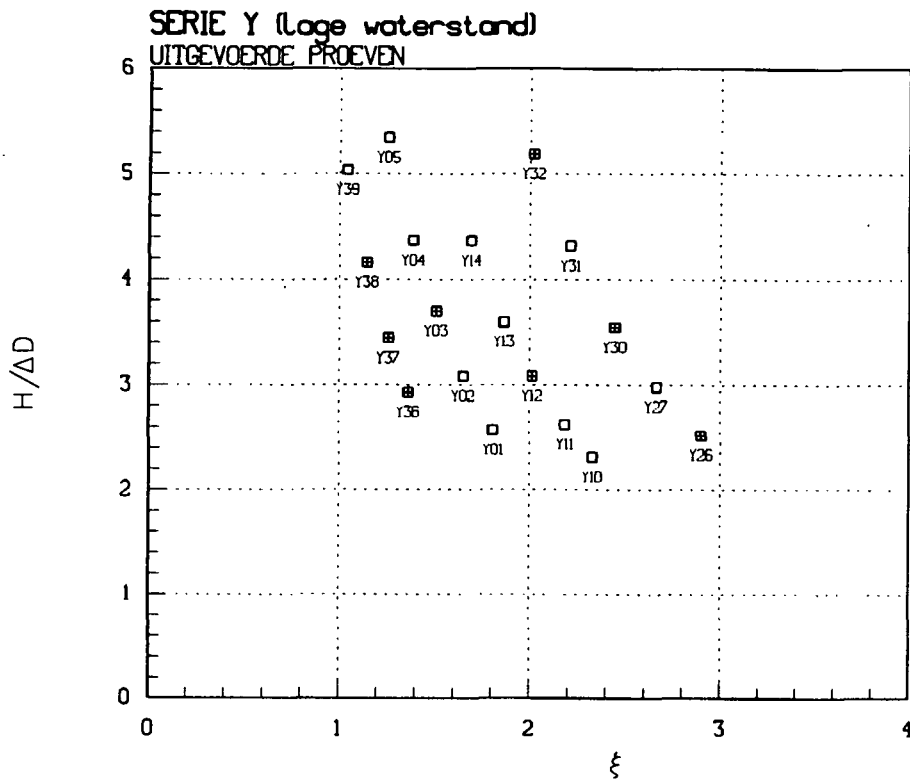
H/ΔD - ξ PLOTS MET BIJBEHORENDE
PROEFNUMMERS (SERIE X)



H/ΔD ξ - PLOTS LINKERGOOTHELFT (SERIE X)

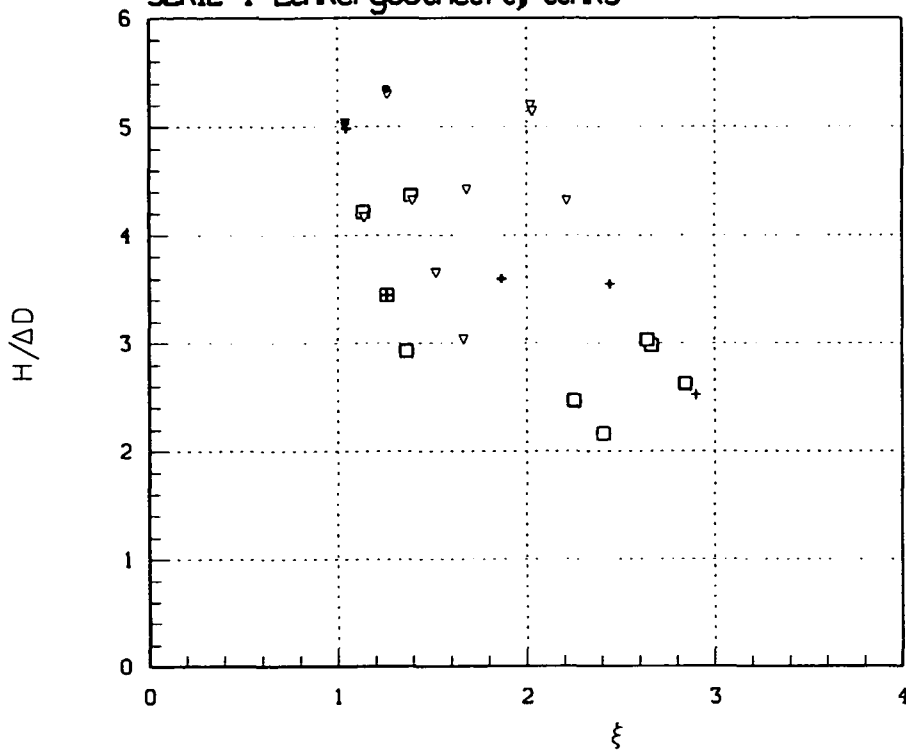


H/ΔD ξ - PLOTS RECHTERGOOTHELF (SERIE X)

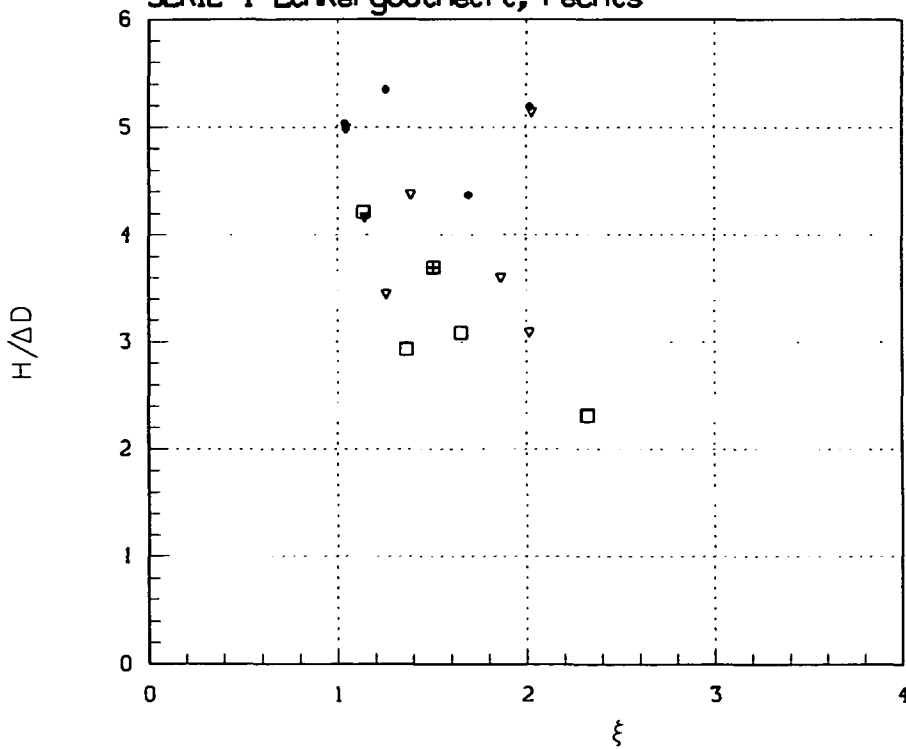


H/ΔD - ξ PLOTS MET BIJBEHORENDE
PROEFNUMMERS (SERIE Y)

SERIE Y Linkergoothelft, links

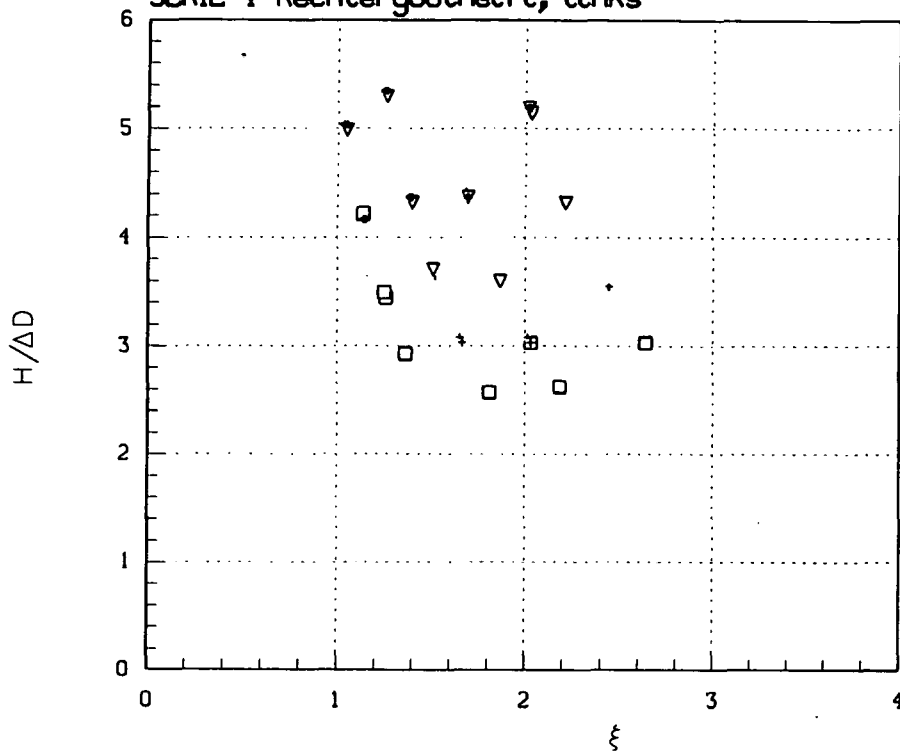


SERIE Y Linkergoothelft, rechts



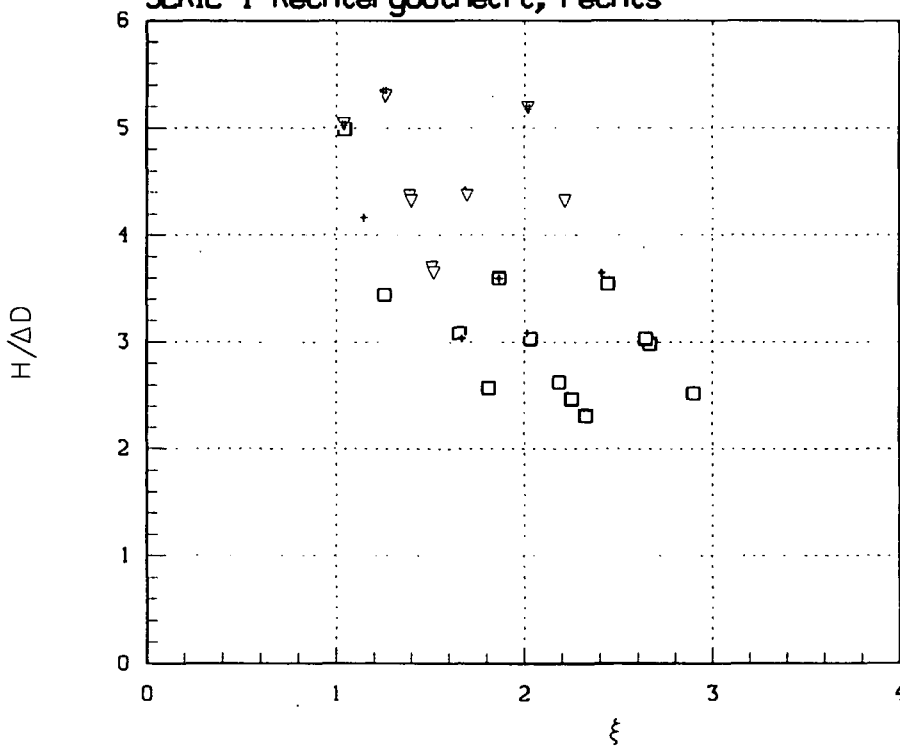
$H/\Delta D$ ξ - PLOTS LINKERGOOTHEFT (SERIE Y)

SERIE Y Rechtergoothelft, Links



VERPLAATSING	
□	0
+	5
▽	10
•	> 20

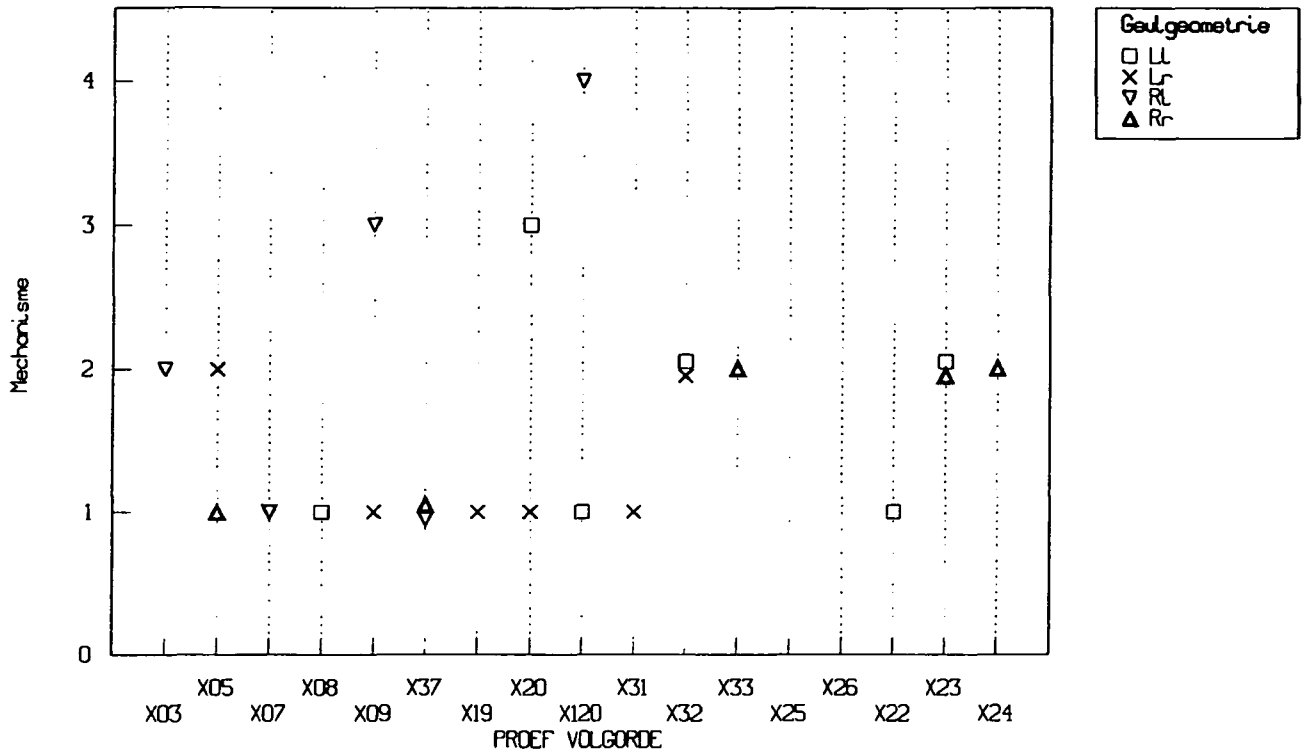
SERIE Y Rechtergoothelft, rechts



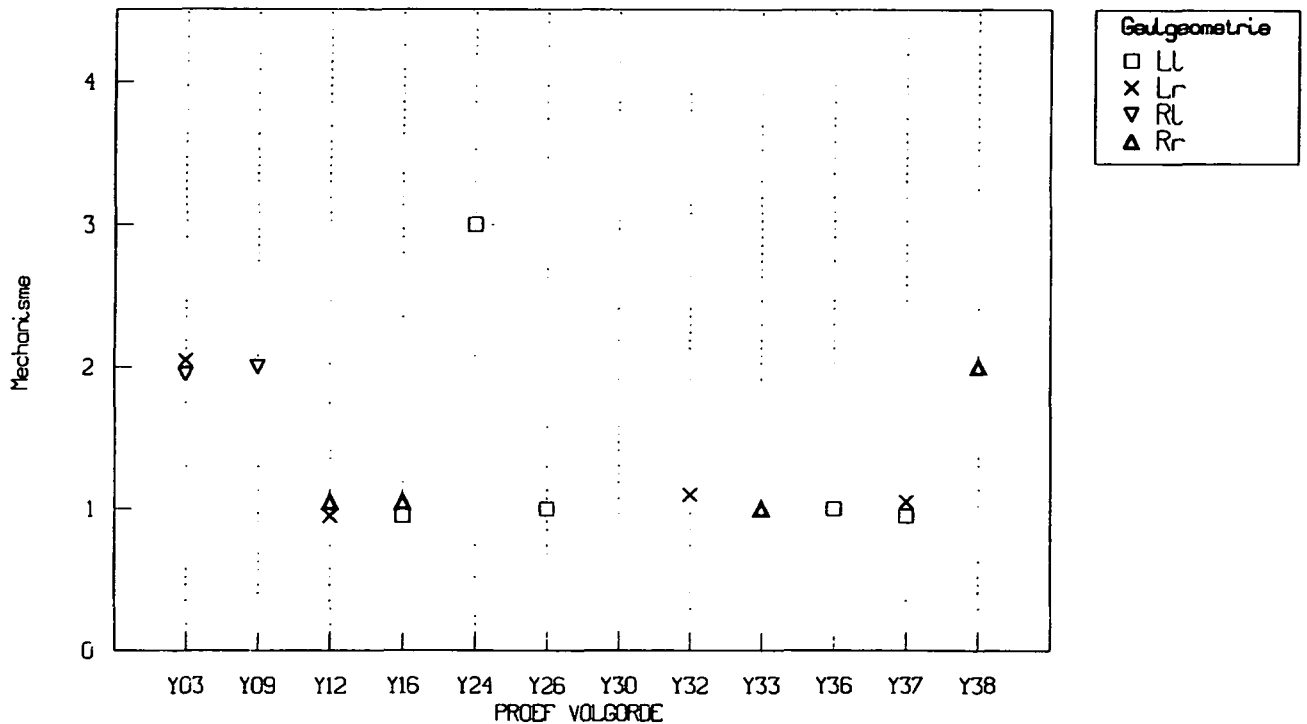
VERPLAATSING	
□	0
+	5
▽	10
•	> 20

H/ΔD ξ - PLOTS RECHTERGOOTHEFT (SERIE Y)

Mechanismen bij het begin van verplaatsing SERIE X



Mechanismen bij het begin van verplaatsing SERIE Y



Mechanismen: Beweging begint:
 1 - voor het golf-front; 2 - tussen het front en de klap
 3 - onder de golfklap; 4 - onder moment

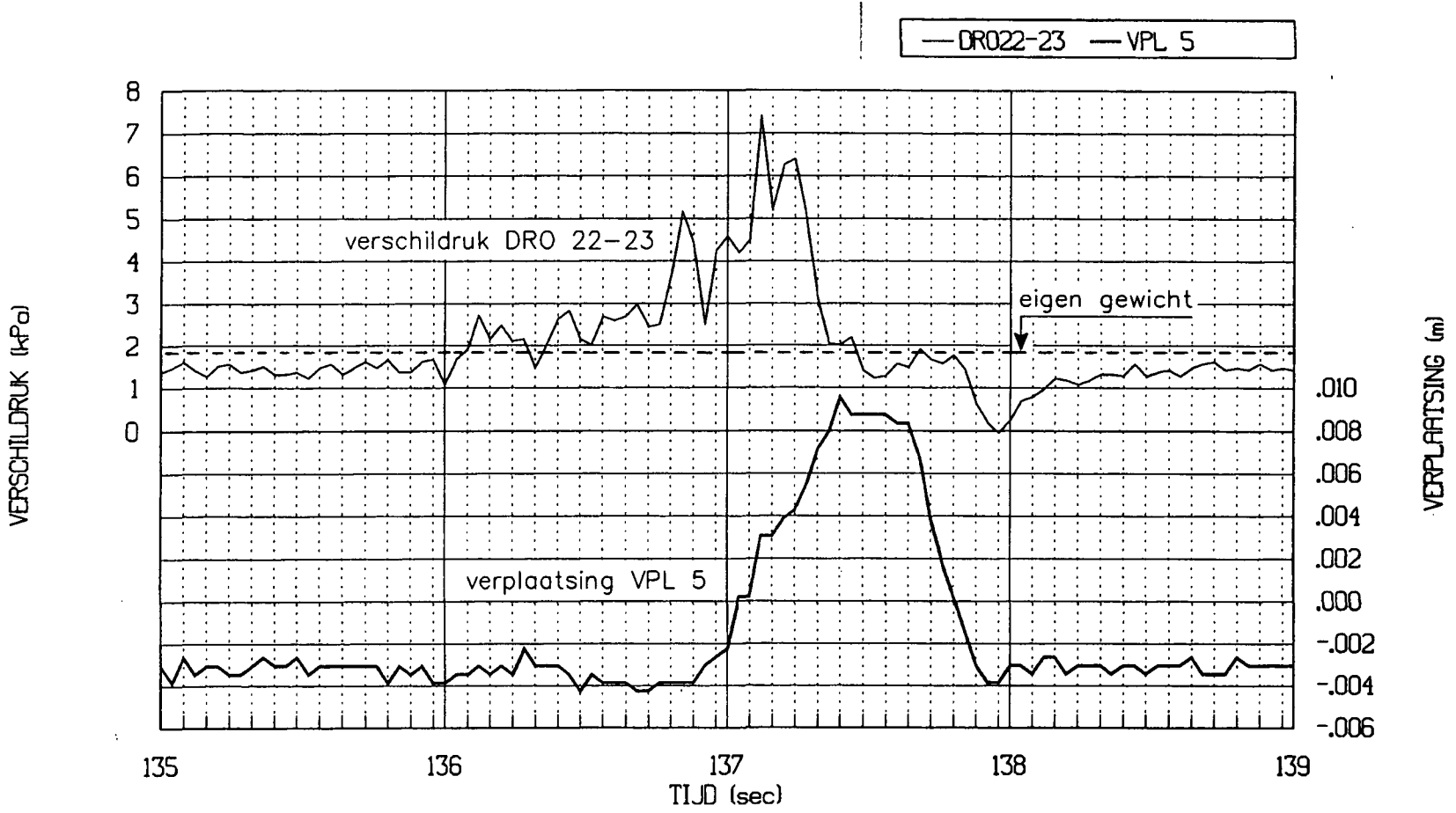
MECHANISMEN BIJ HET BEGIN VAN
VERPLAATSING (SERIES X, Y)

VERSCHILDRIJK - EN VERPLAATSINGSREGISTRATIES
PROEF X08

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

H 1550

FIG. 12a

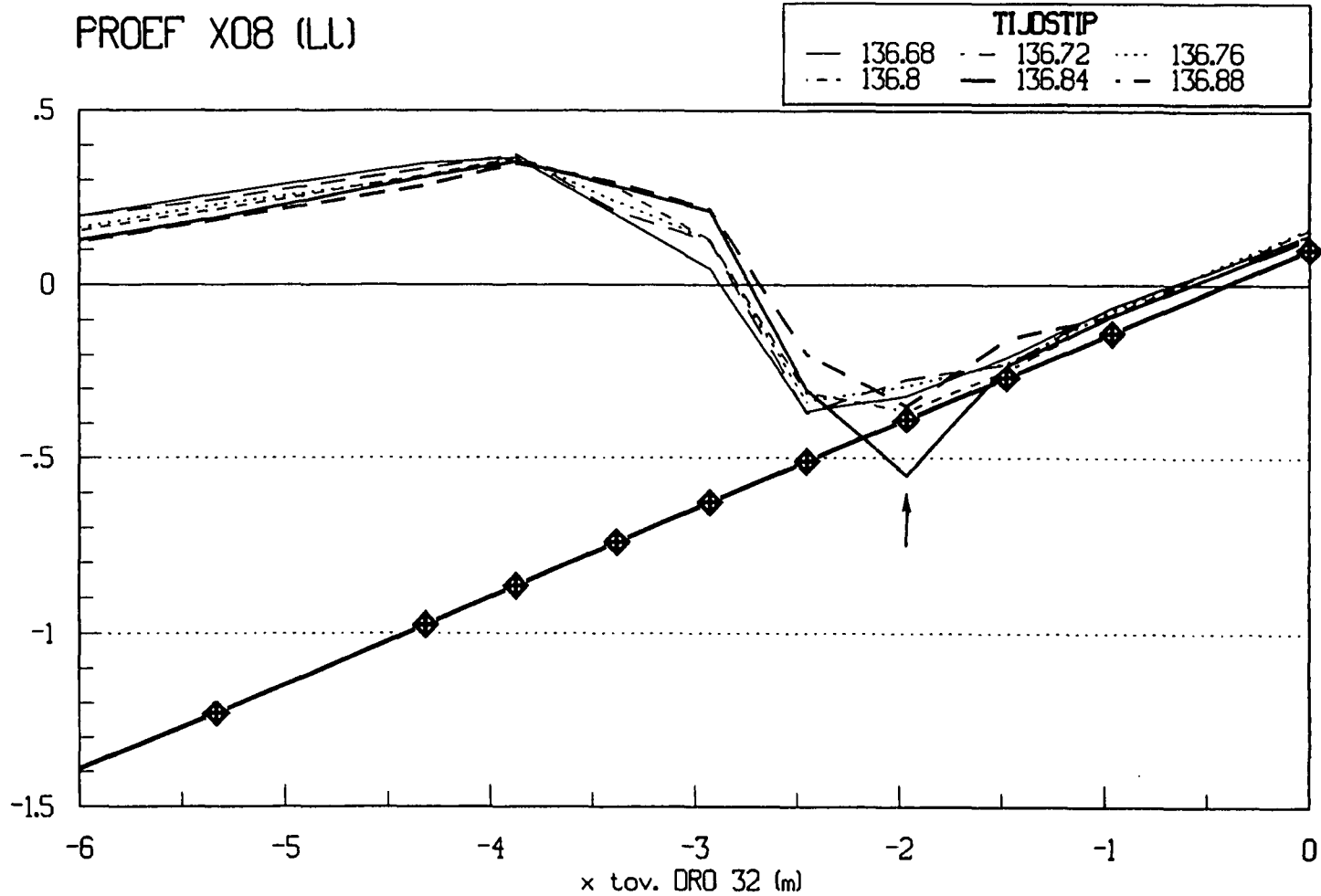


STIJGHOOGTEVERLOOP OP HET TALUD
 PROEF X08
 WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

H 1550

FIG. 12b

STIJGHOOGTE tov S.M. (m)

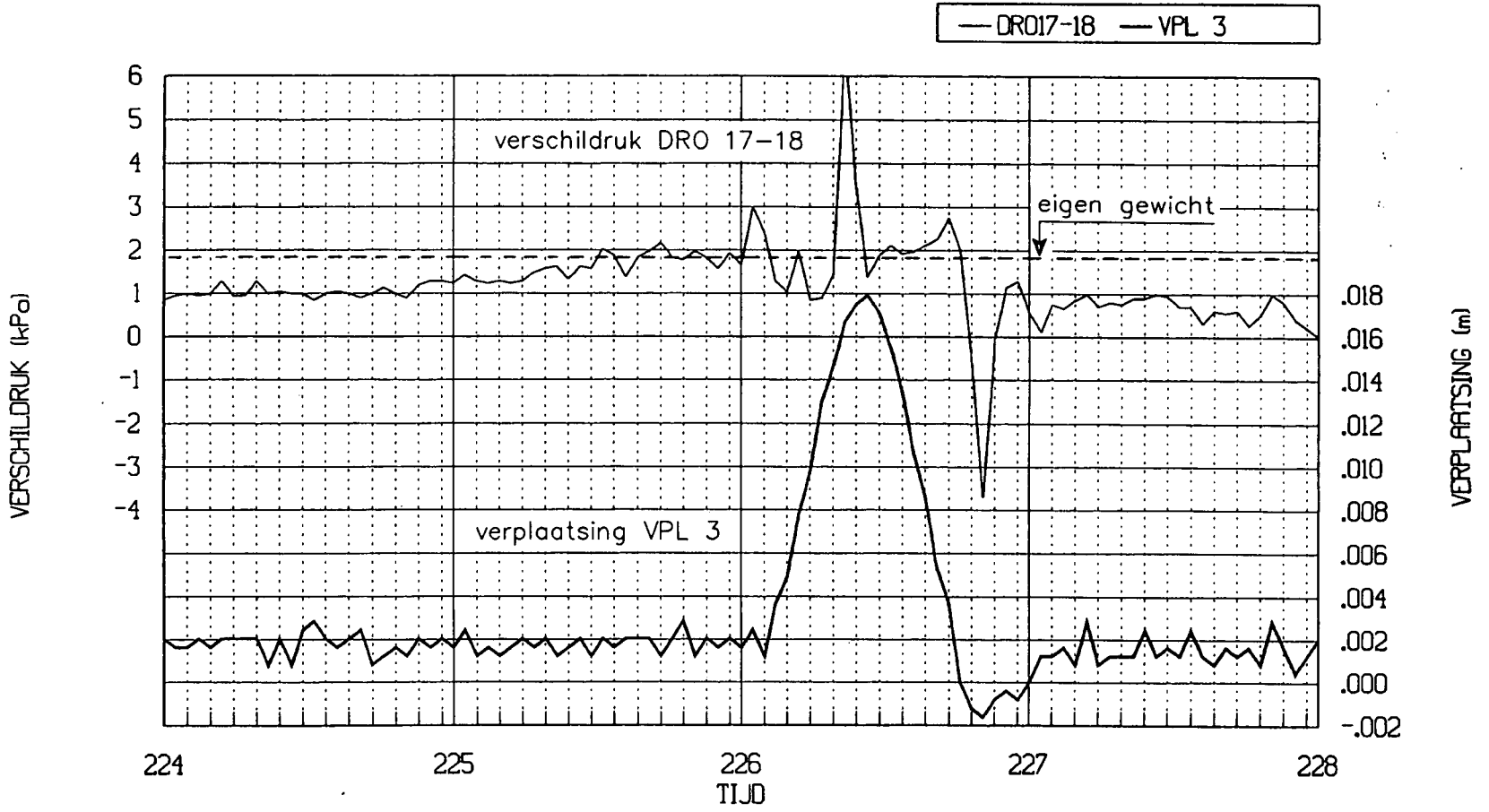


VERSCHILDRIJK - EN VERPLAATSINGSREGISTRATIES
PROEF X03

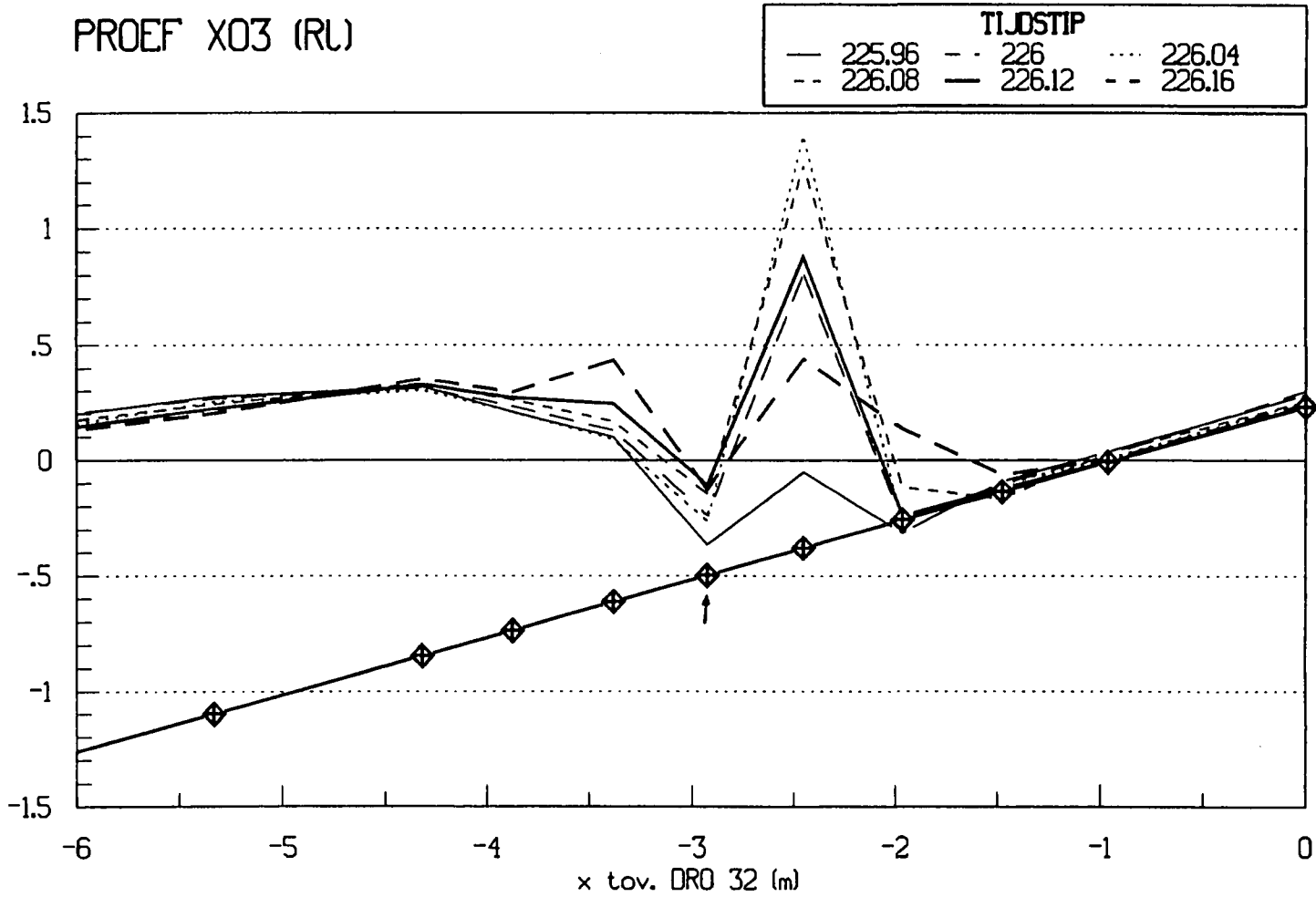
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

H 1550

FIG. 130



STIJGHOOGTE tov SML (m)

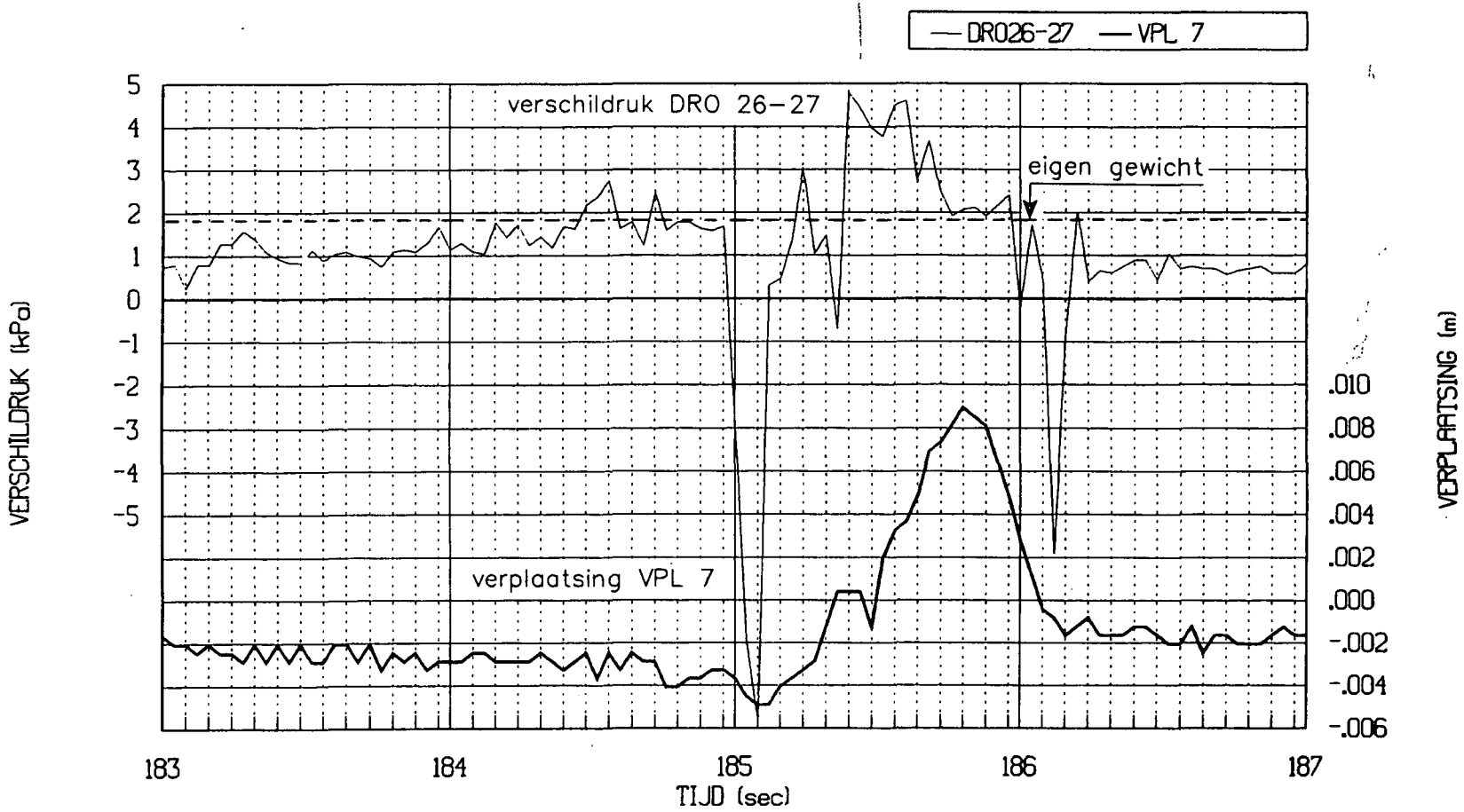


VERSCHILDRIJK - EN VERPLAATSINGSREGISTRATIES
PROEF X09

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

H 1550

FIG. 140

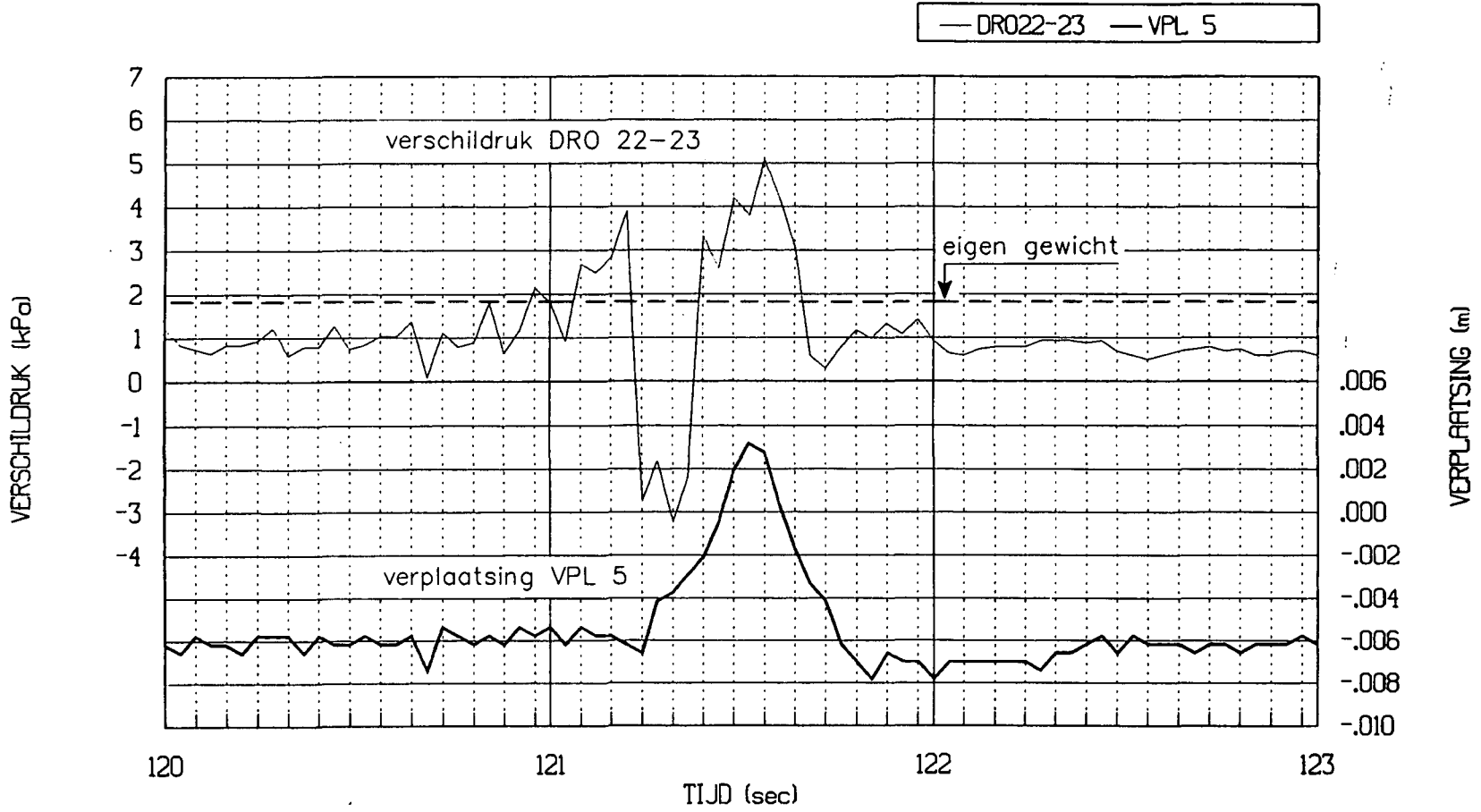


VERSCHILDRIJK - EN VERPLAATSINGSREGISTRATIES
PROEF Y24

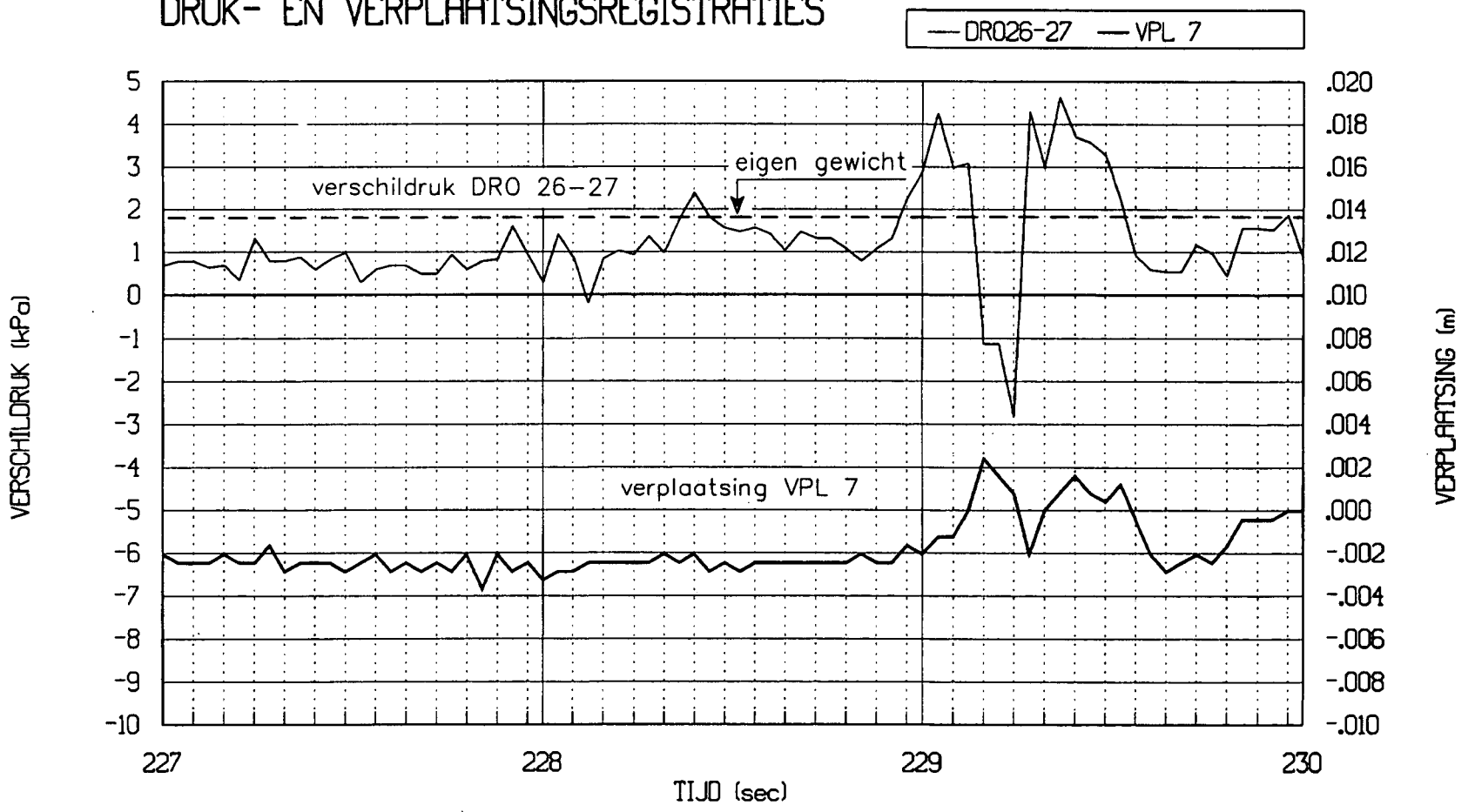
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

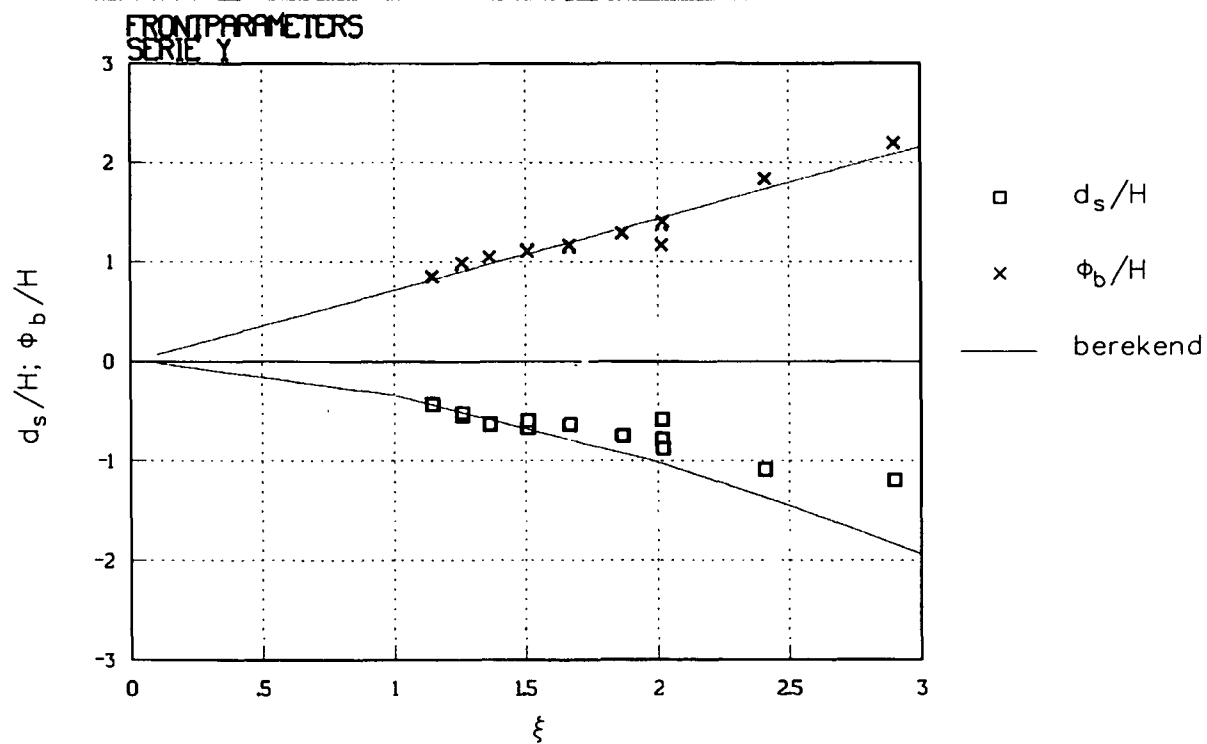
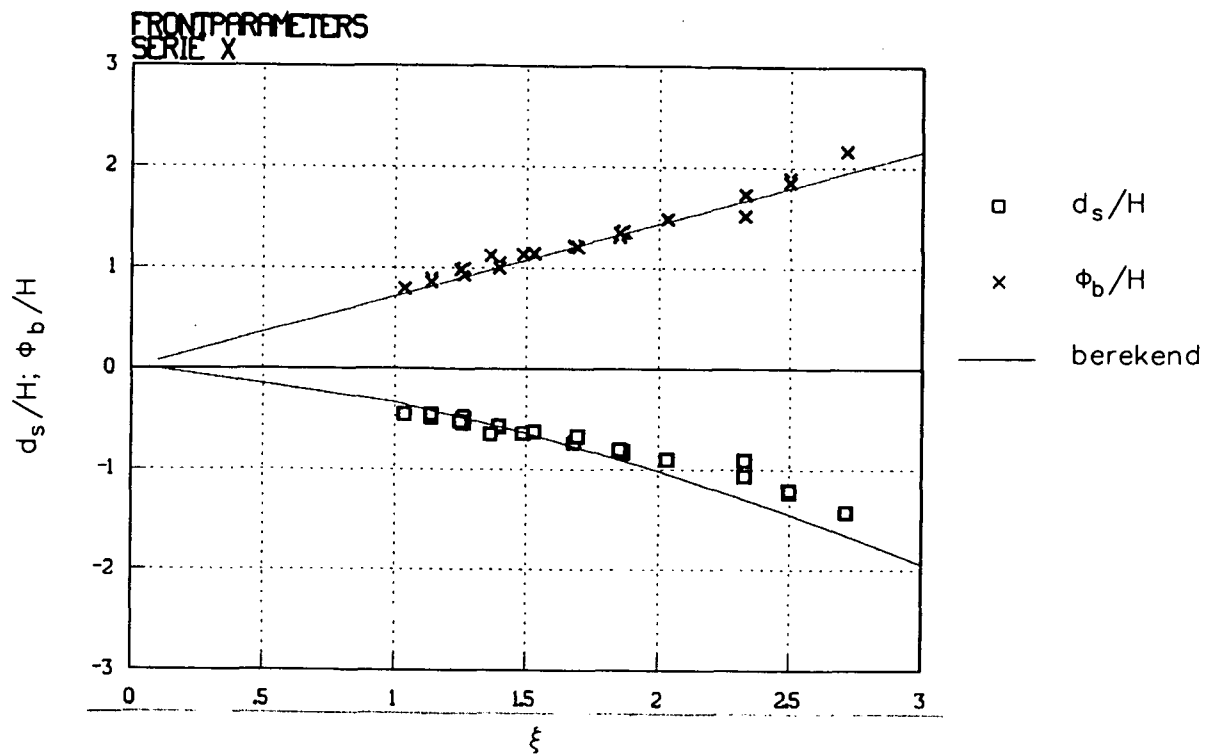
H 1550

FIG. 15a

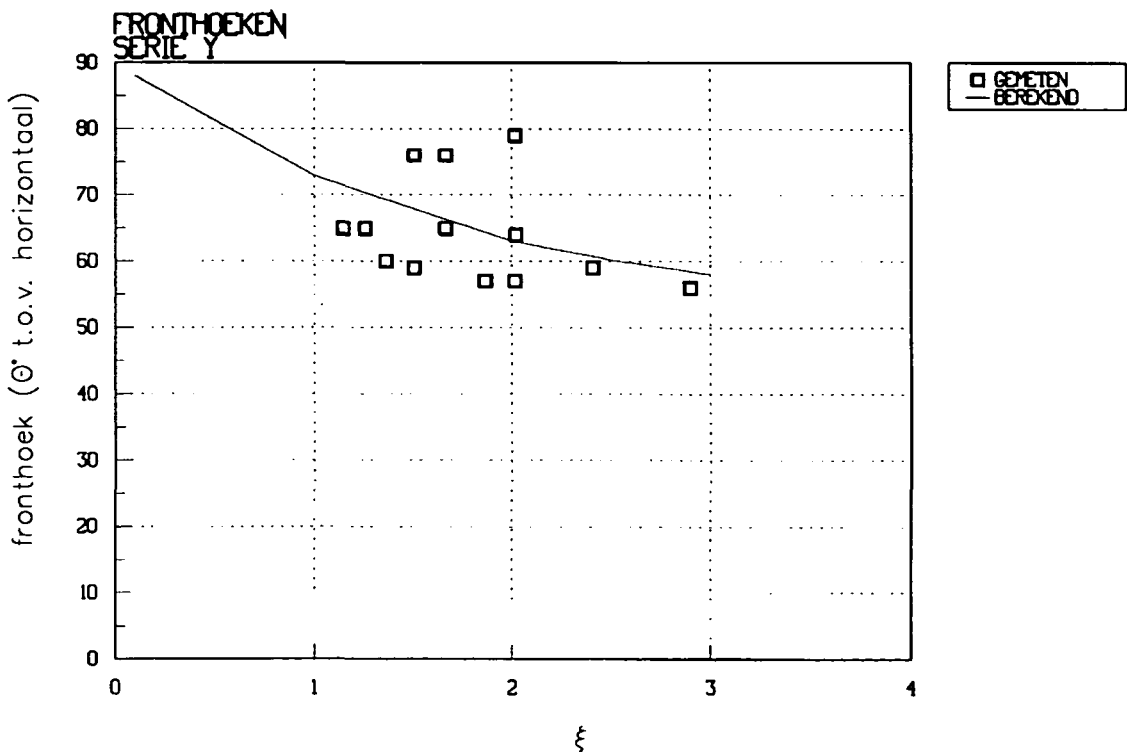
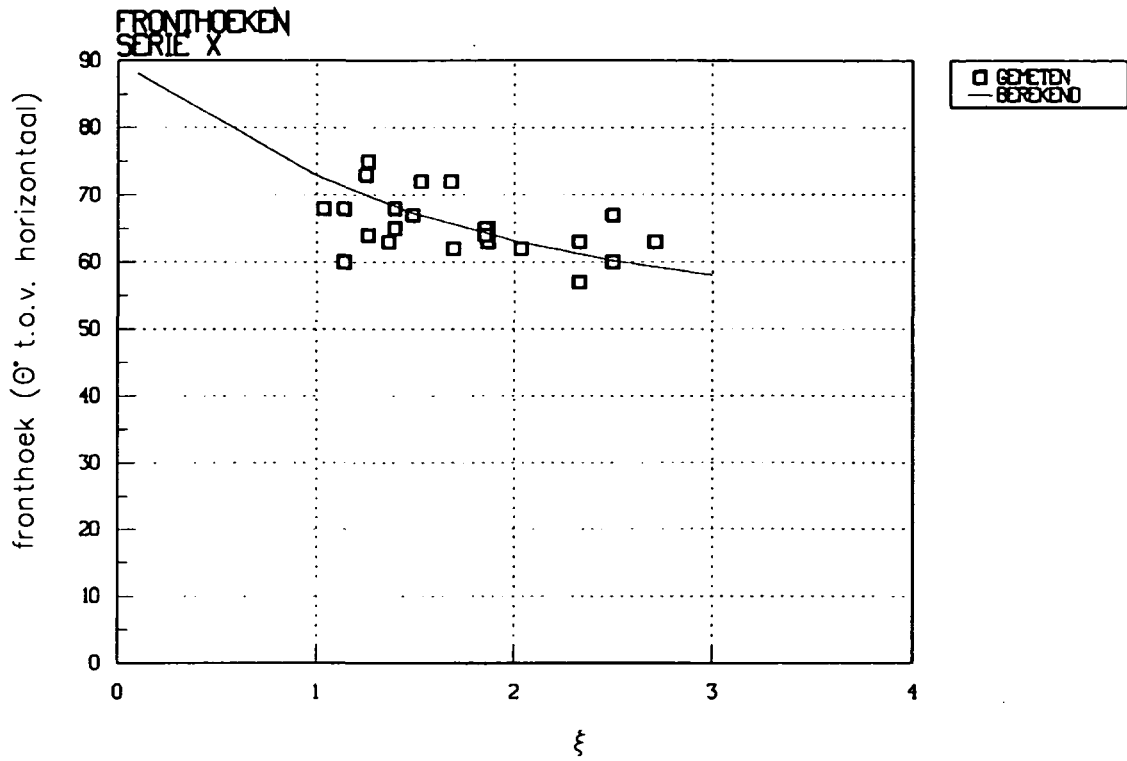


PROEF X120B DRUK- EN VERPLAATSINGSREGISTRATIES

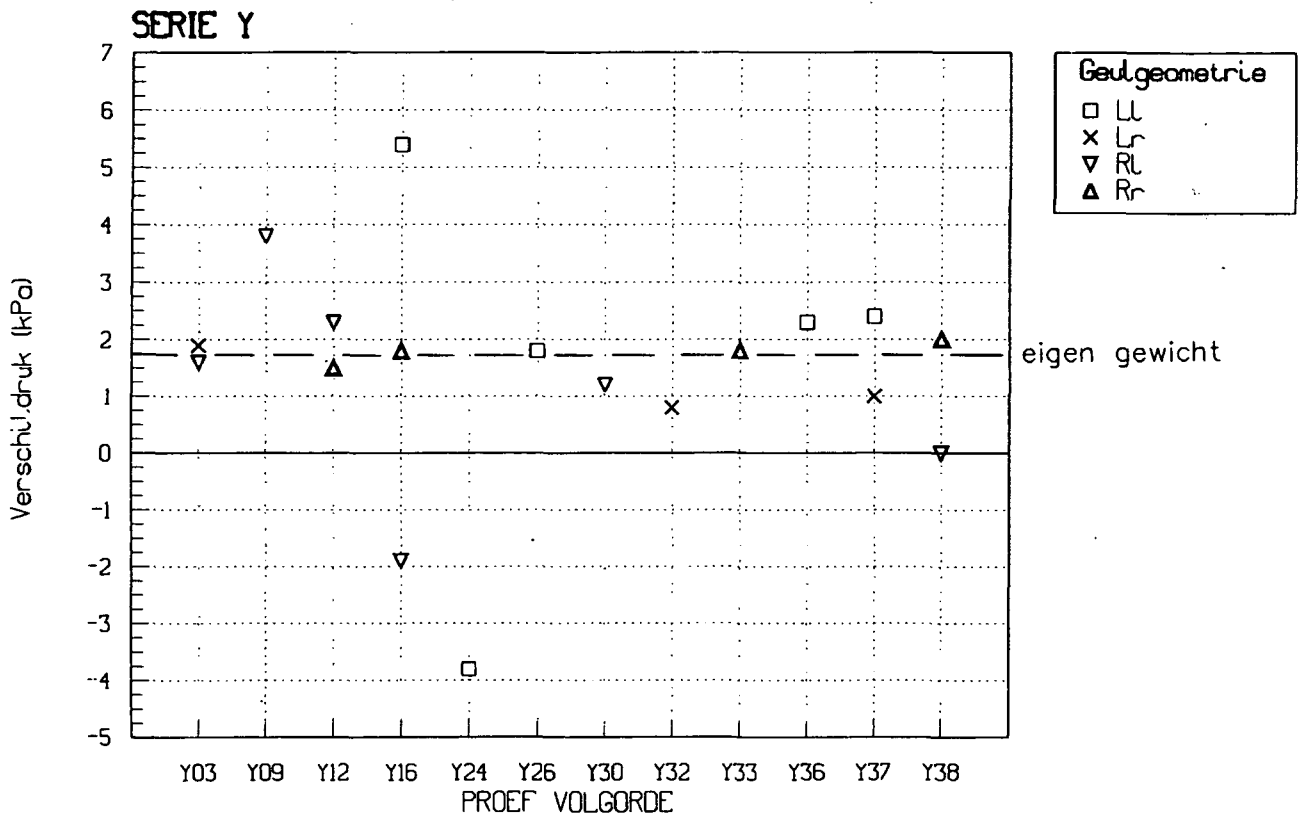
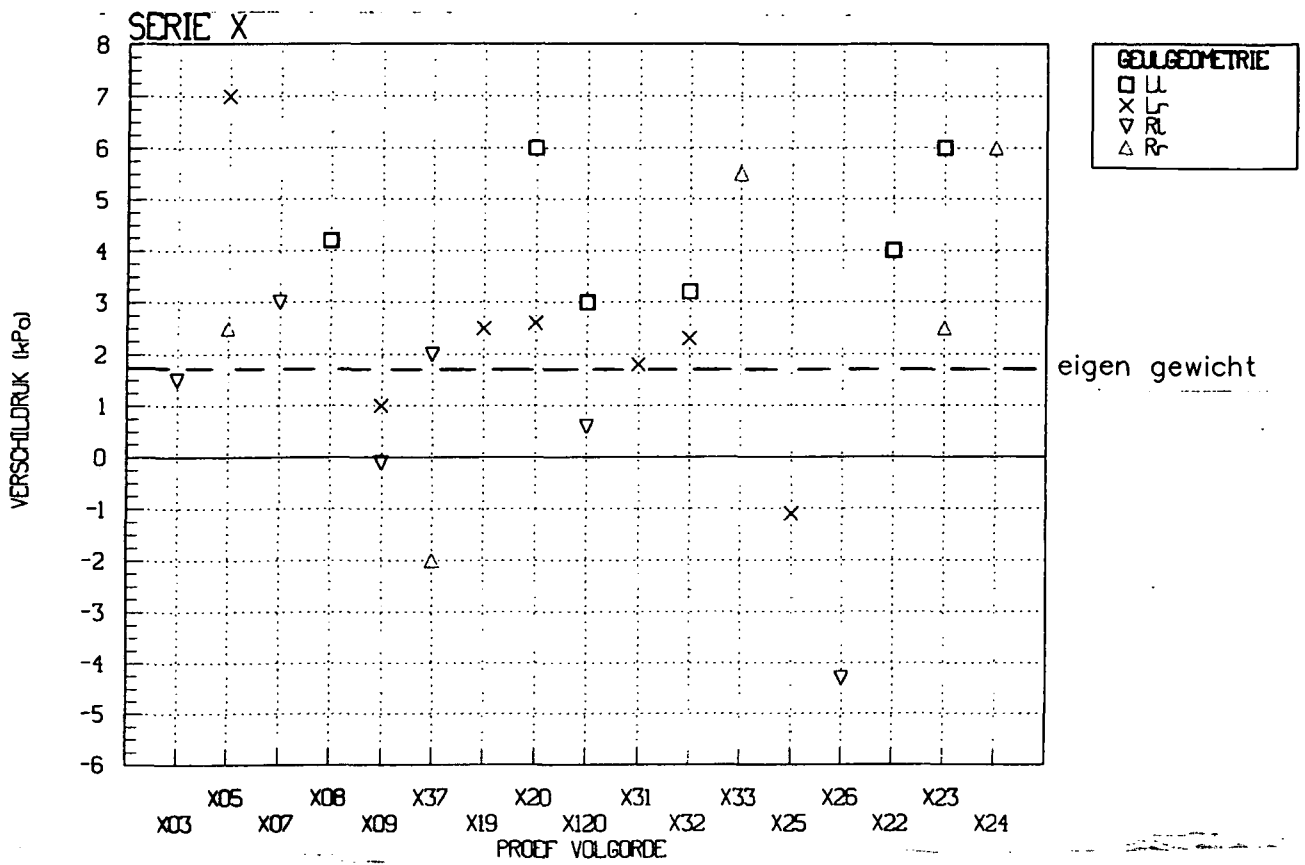




FRONTPARAMETERS ϕ_b EN d_s

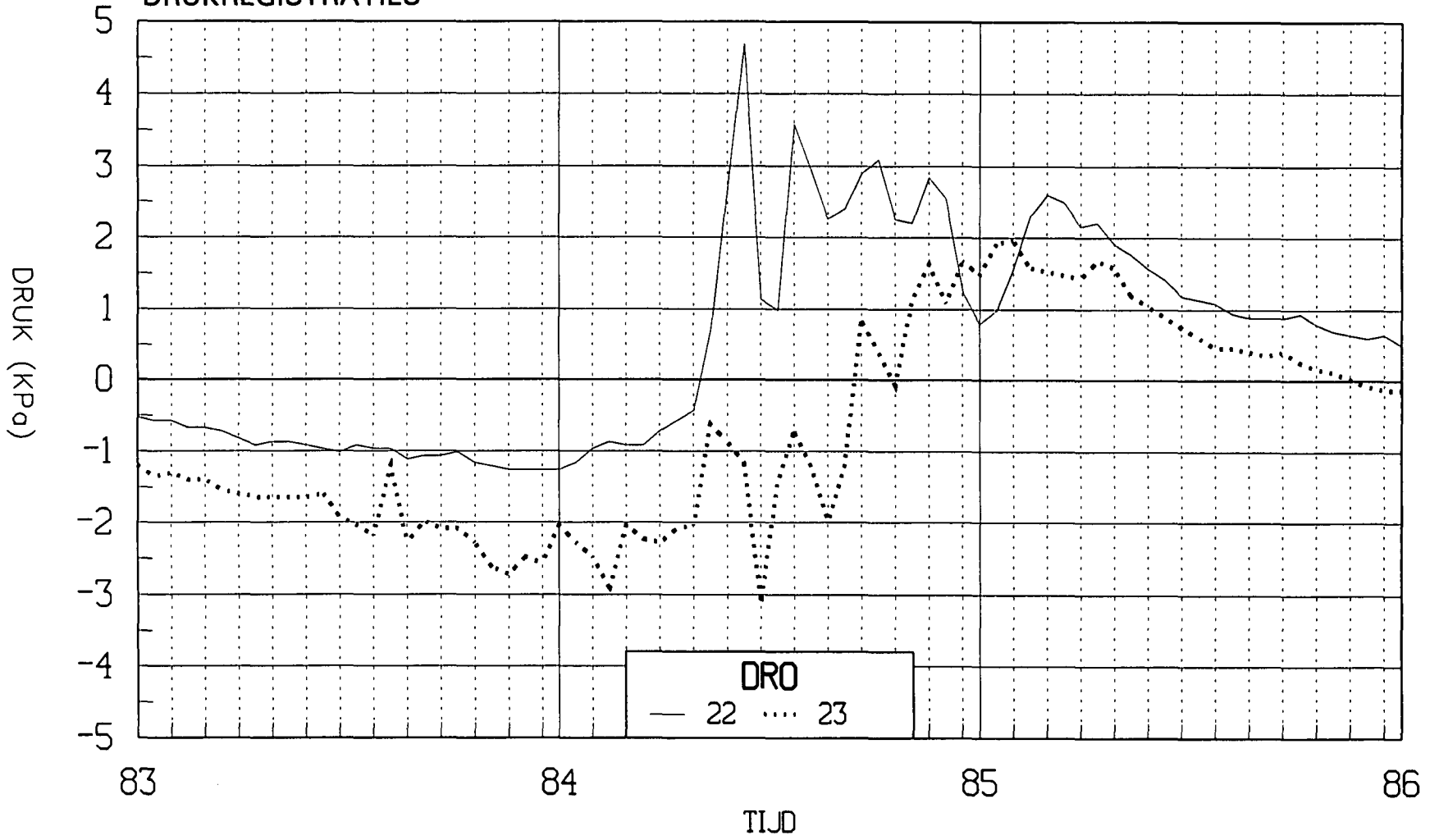


FRONTHOEKEN, θ



VERSCHILDRIJKEN BIJ BEGIN VAN BEWEGING
SERIES X, Y

PROEF Y16
DRUKREGISTRATIES

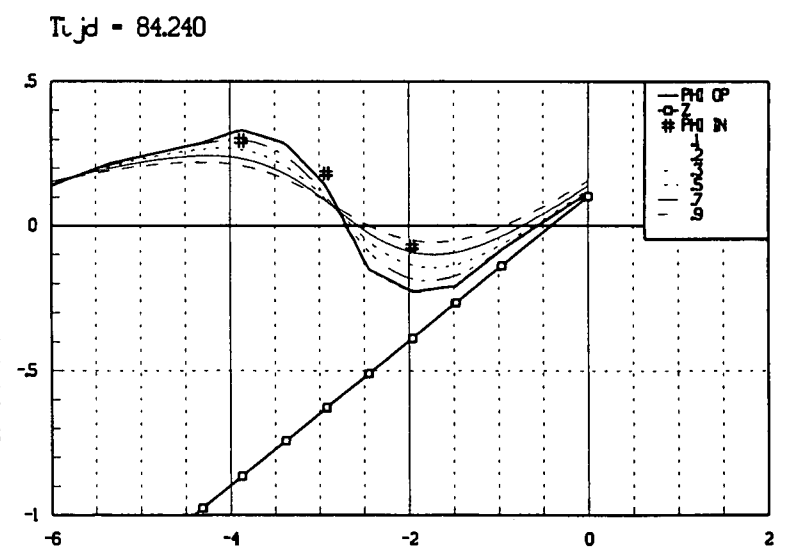
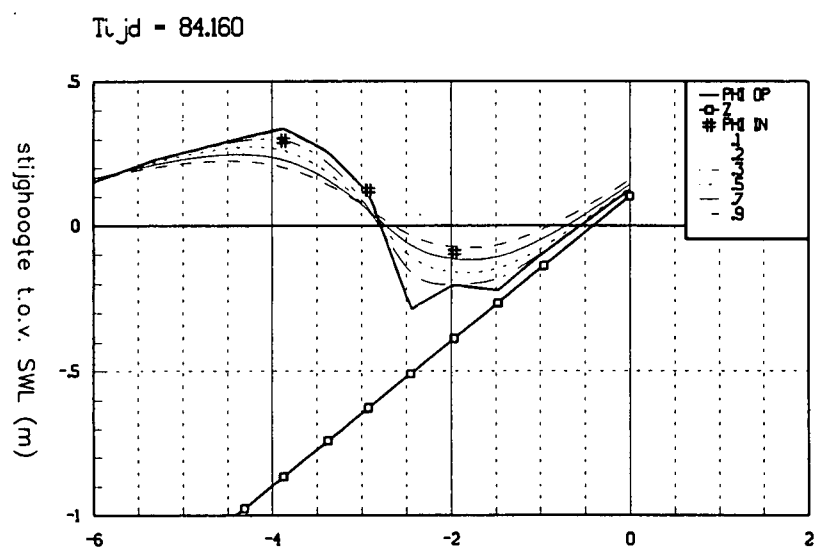
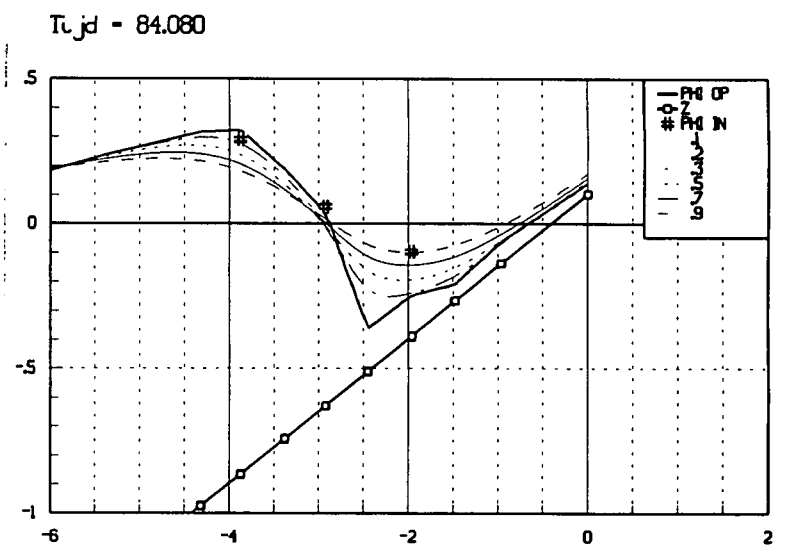
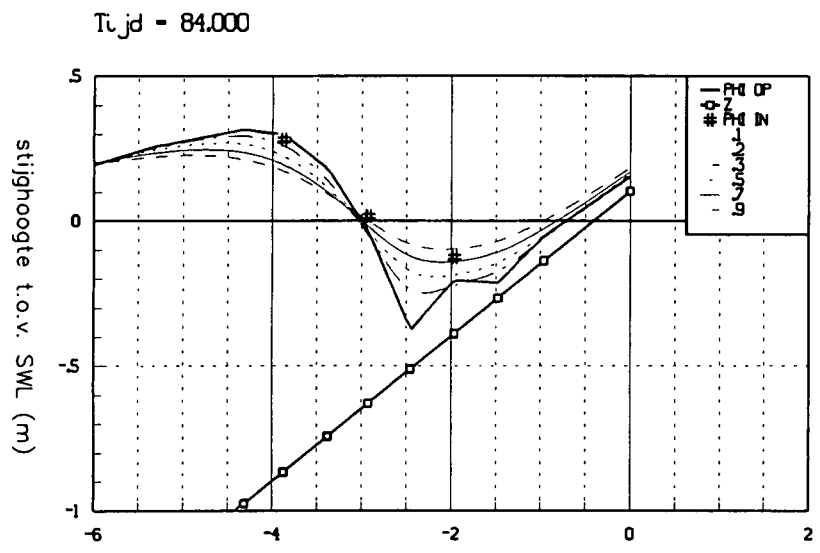


DRUKKEN OP EN ONDER MEETBLOK 5
PROEF Y16

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

H 1550

FIG. 20



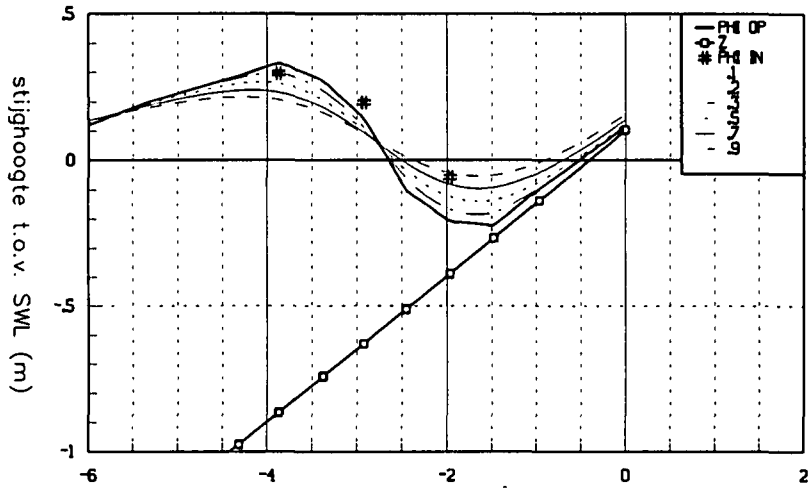
X t.o.v. DRO 32 (m)

X t.o.v. DRO 32 (m)

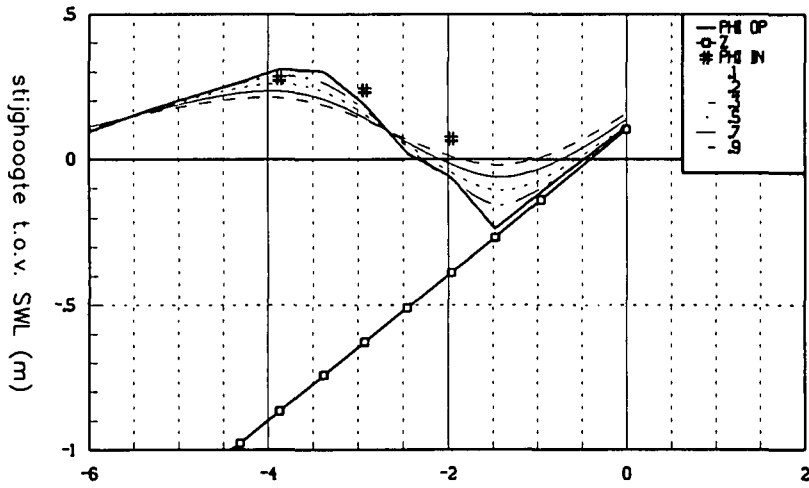
gemeten stijghoogte:
 —○— talud — op talud
 # onder toplaag

berekende stijghoogte onder toplaag:
 - - - $\Lambda = 0,3$ m — $\Lambda = 0,7$ m
 $\Lambda = 0,5$ m - - - - $\Lambda = 0,9$ m

Tijd = 84.280



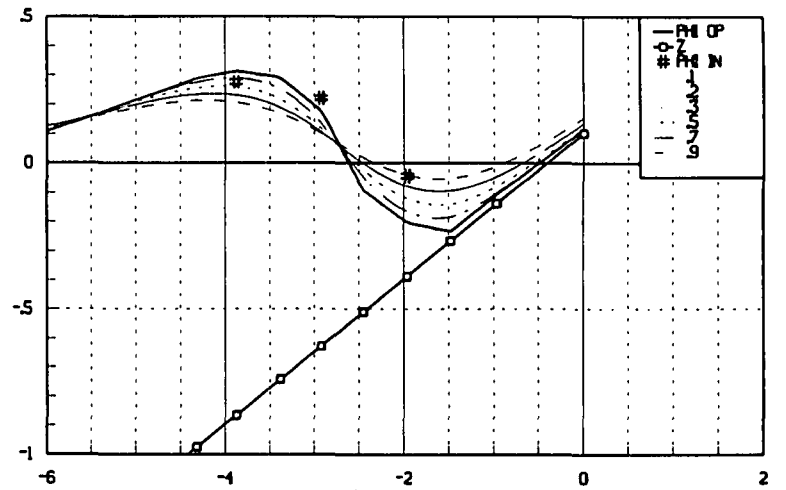
Tijd = 84.360



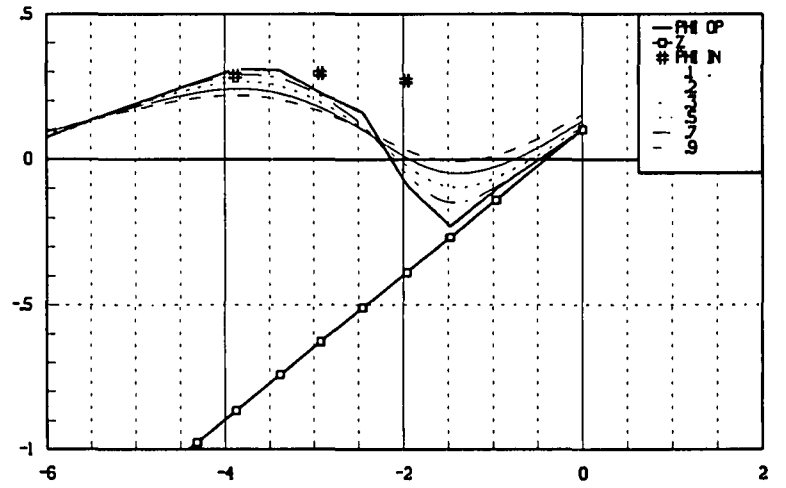
X to.v. DRO 32 (m)

gemeten stijghoogte:
 —○— talud — op talud
 * onder toplaag

Tijd = 84.320



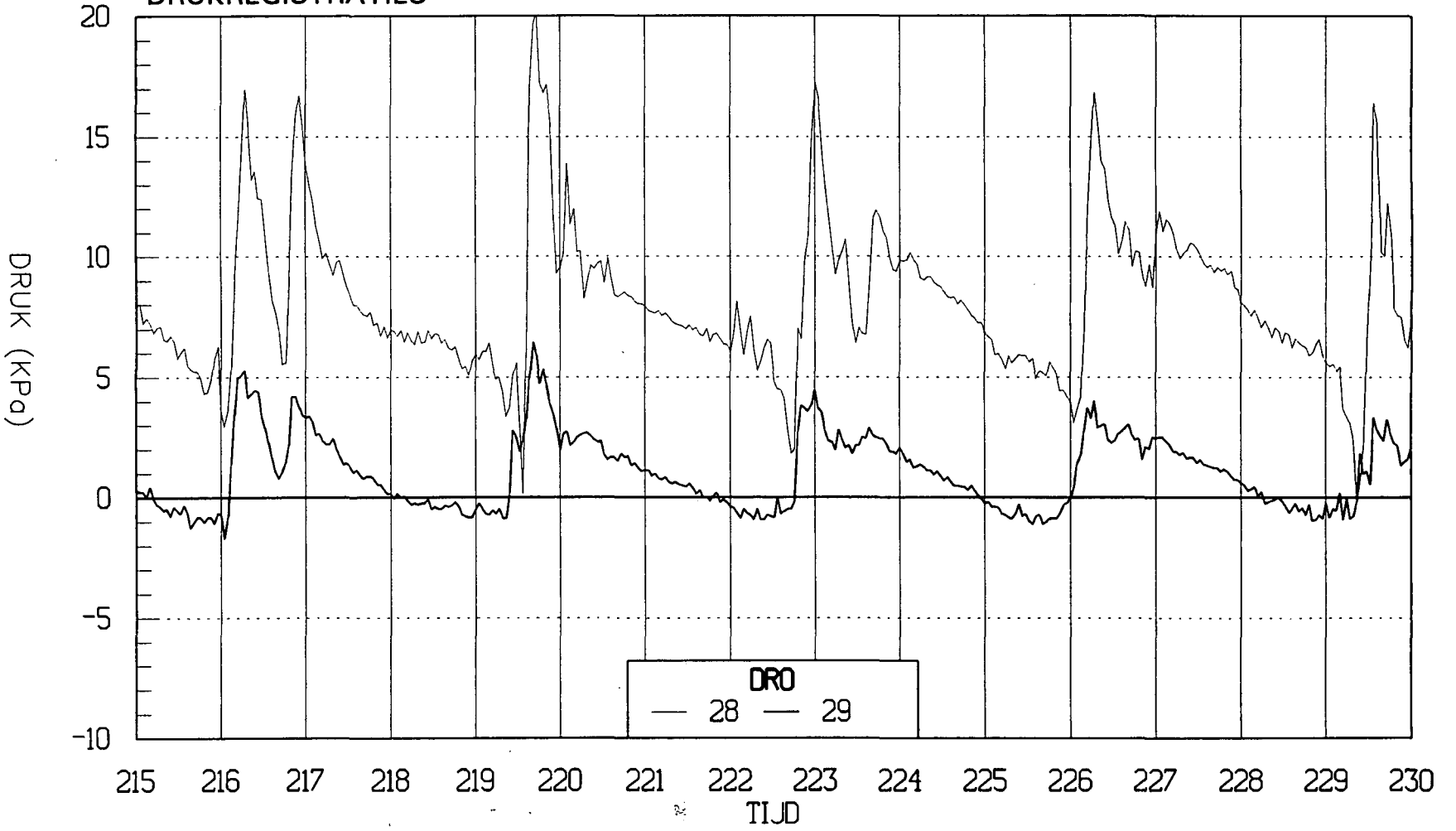
Tijd = 84.400



X to.v. DRO 32 (m)

berekende stijghoogte onder toplaag:
 - - - $\Lambda = 0,3$ m — $\Lambda = 0,7$ m
 $\Lambda = 0,5$ m - - - $\Lambda = 0,9$ m

PROEF X23
DRUKREGISTRATIES



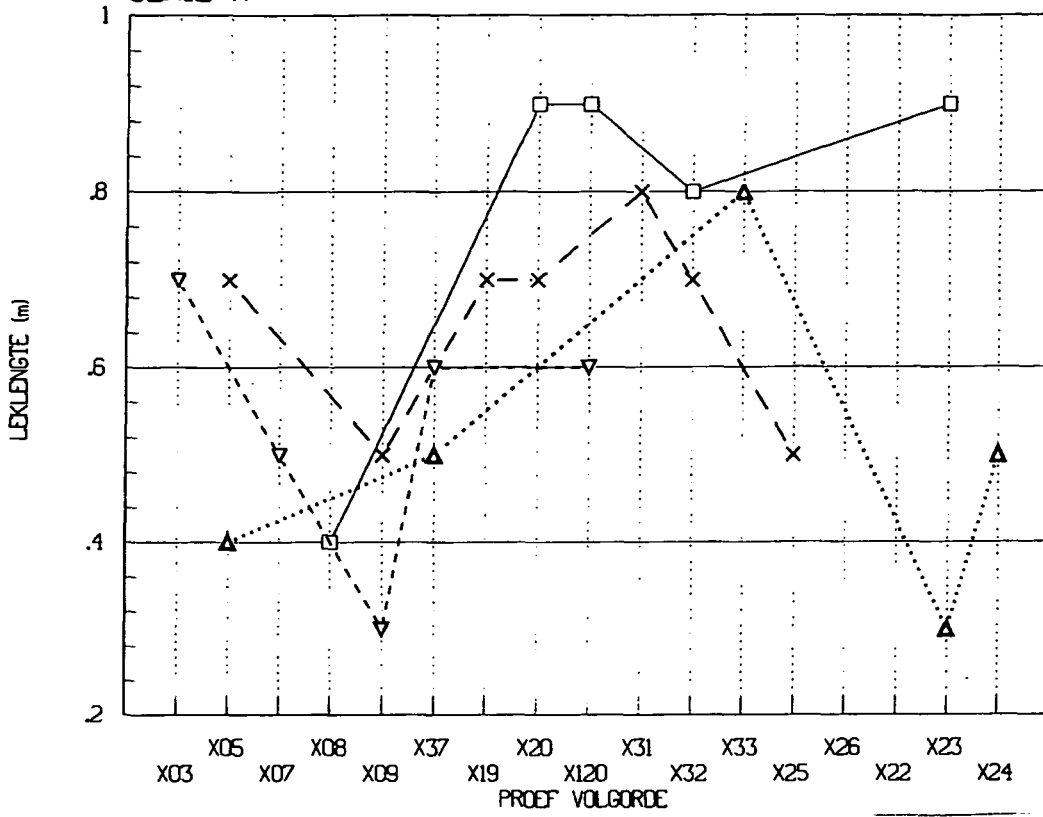
DRUKKEN OP EN ONDER MEETBLOK 8
PROEF X23

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

H 1550

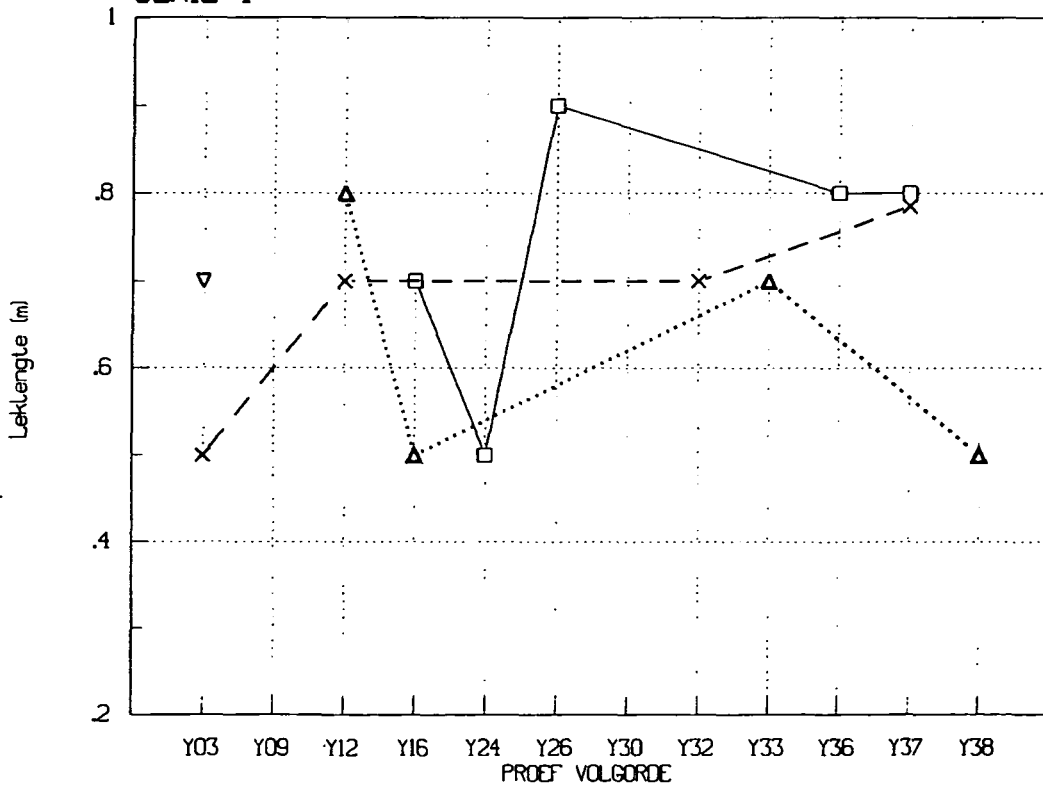
FIG. 22

Leklengtes
SERIE X



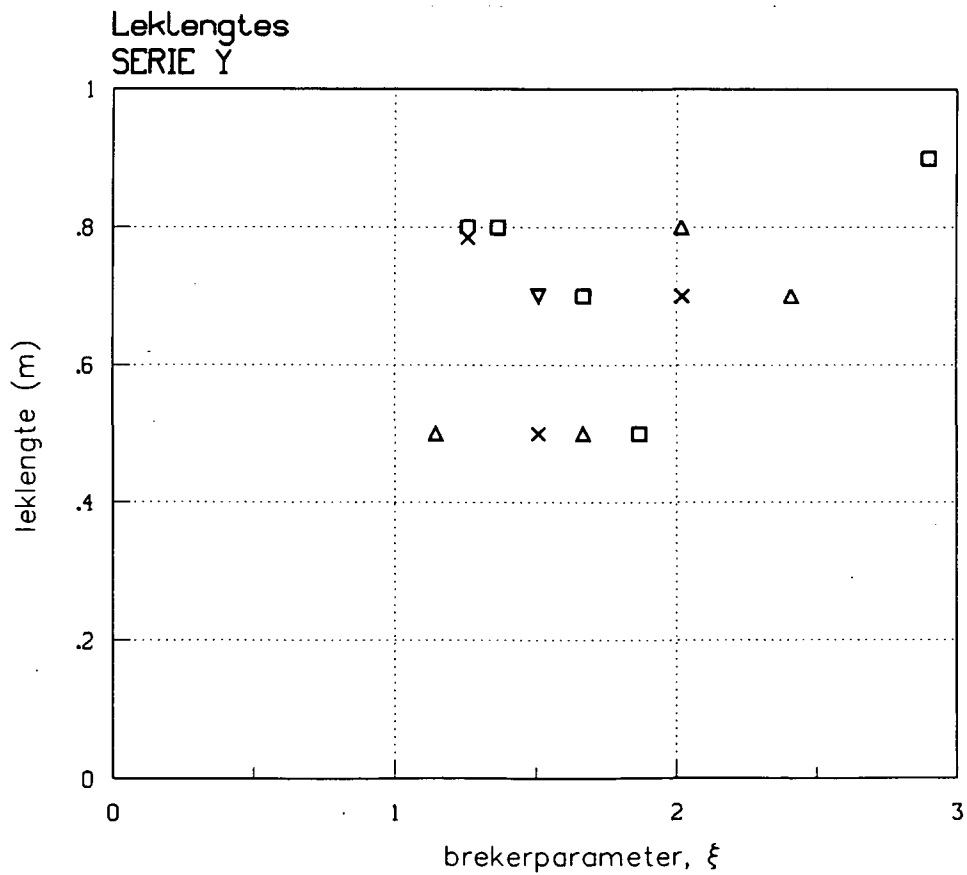
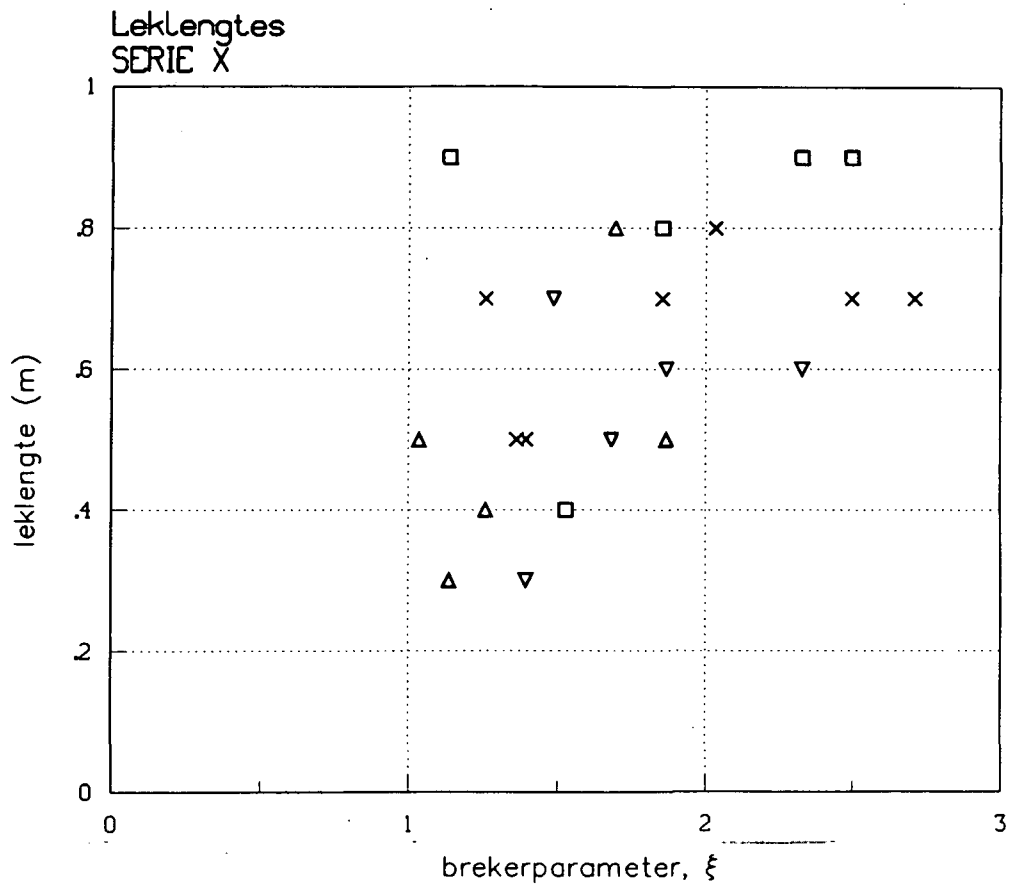
Gaugesmetrie
 □ L
 × Lr
 ▽ Rr
 ▲ R

Leklengtes
SERIE Y

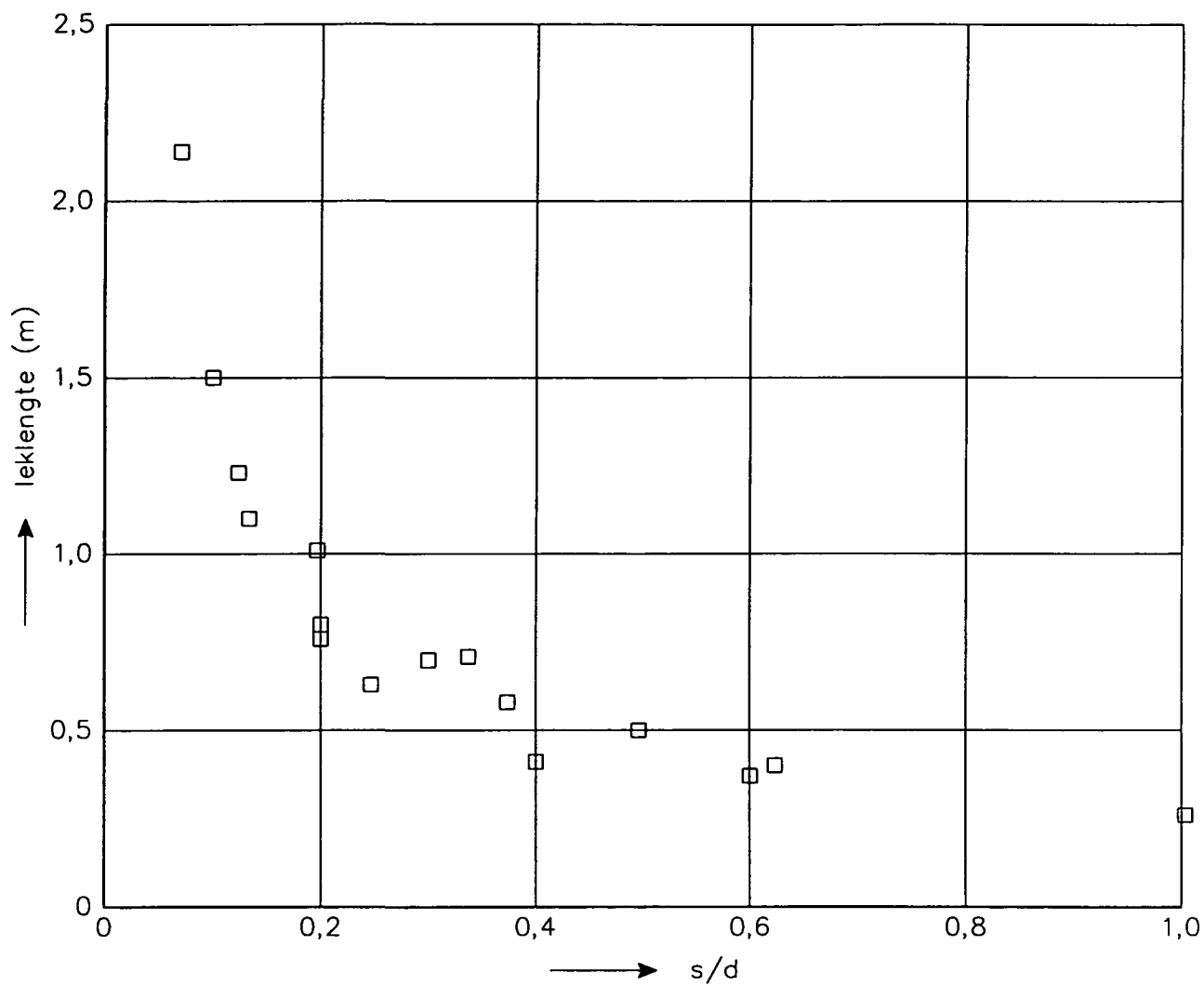


Gaugesmetrie
 □ L
 × Lr
 ▽ Rr
 ▲ R

LEKLINGTES TEGEN PROEFVERLOOP



LEKLENGTES TEGEN DE BREKERPARAMETER



BEREKENDE LEKLENGTE ALS FUNCTIE VAN
SPLEETBREEDTE-GEULDIEPTE VERHOUDING

ZIE BIJLAGE III

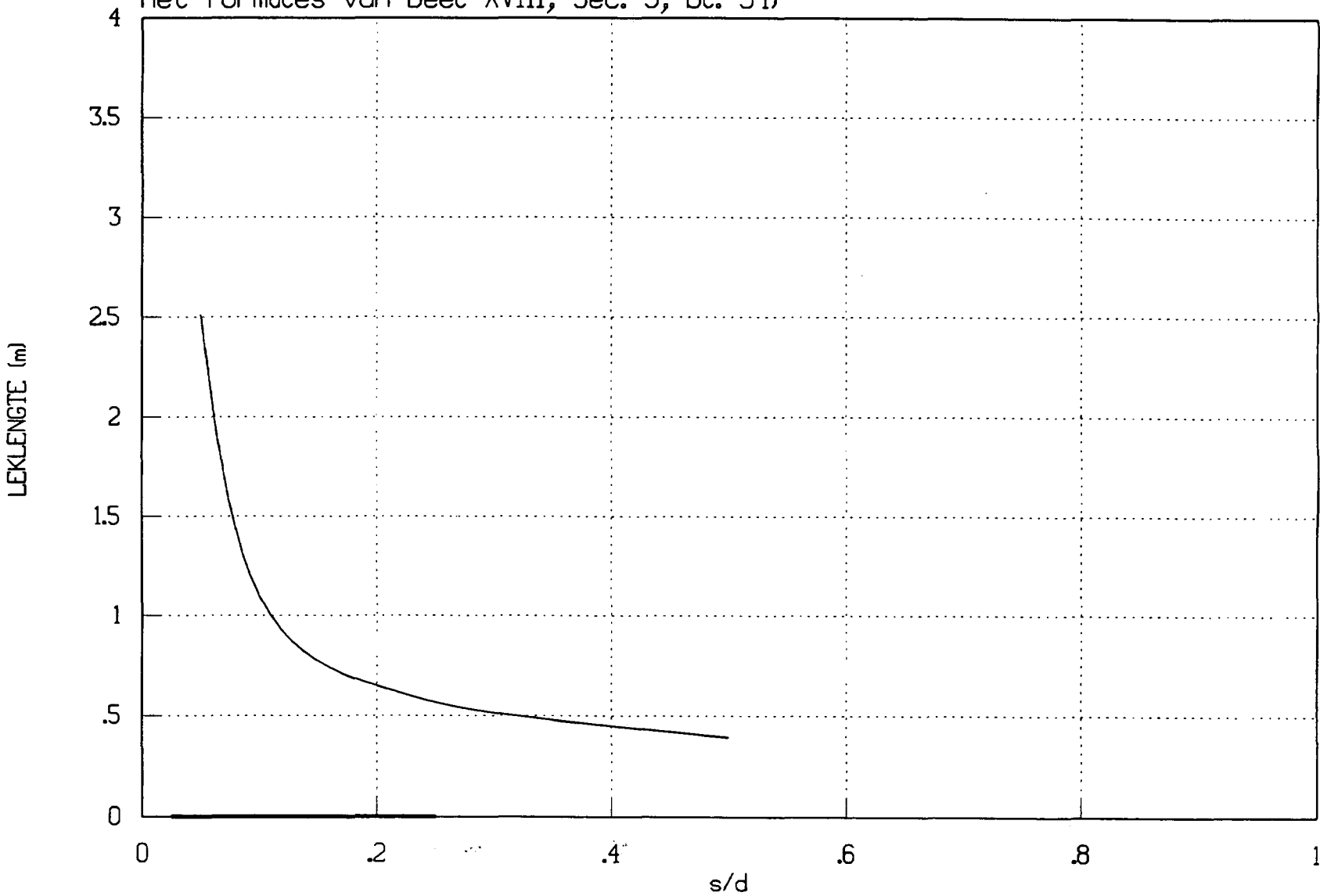
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

H 1550

FIG. 25

Berekende Leklengtes voor ENKA-DRAIN

Met formules van Deel XVIII, Sec. 5, bl. 54)



BEREKENDE LEKLENGTES MET ENKA-DRAIN

DELFT HYDRAULICS

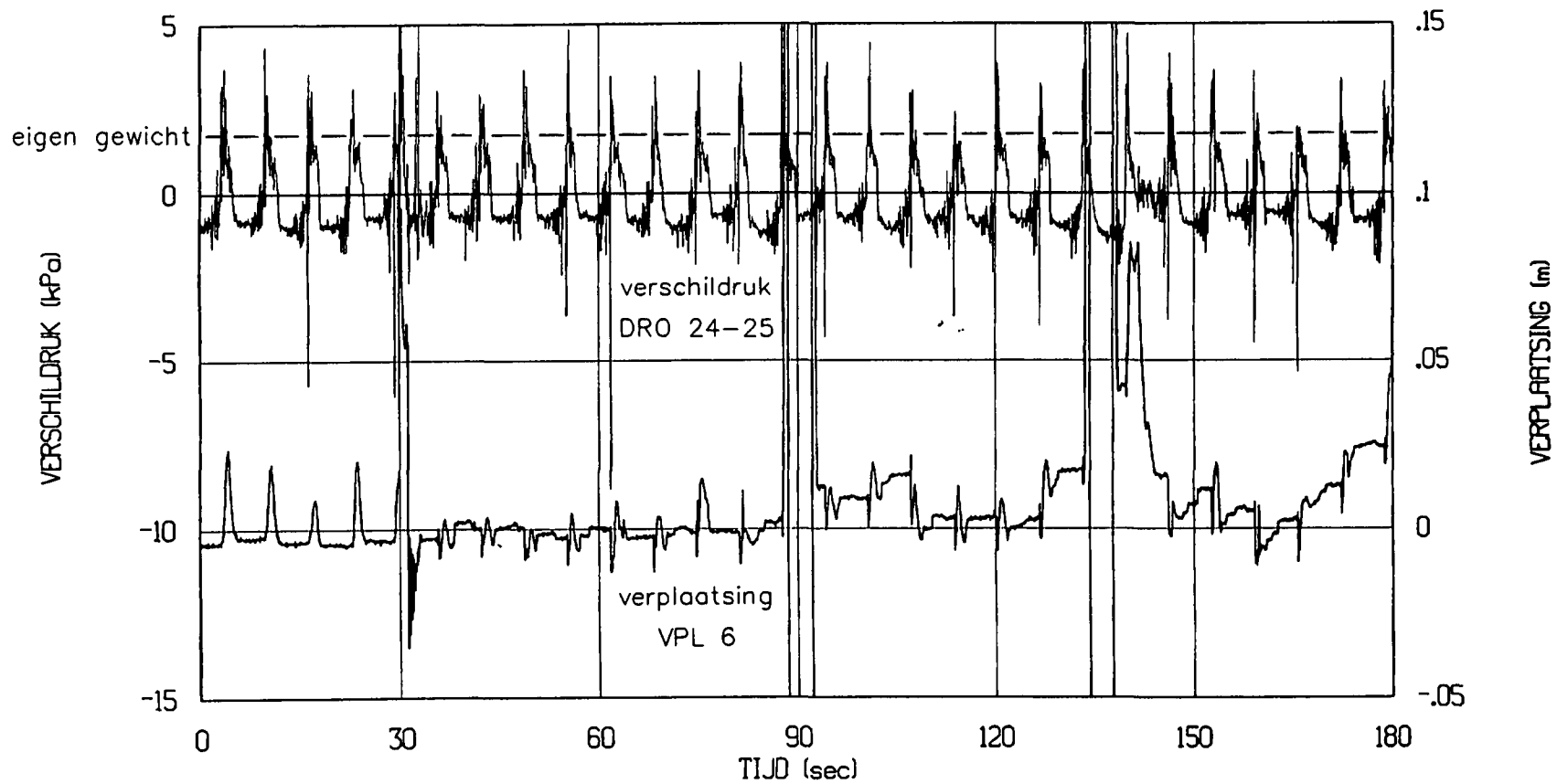
H 1550

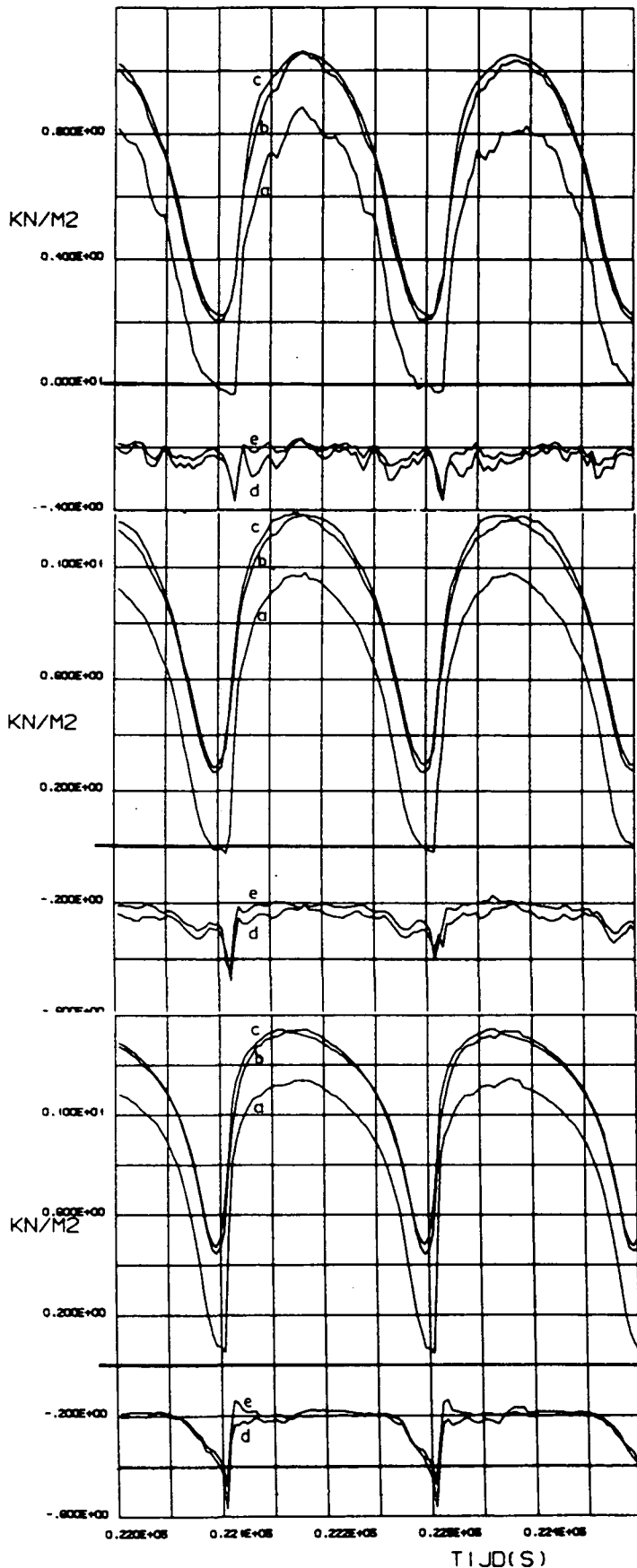
FIG. 26

BLOKVERPLAATSING PROEF Z10

DRUK- EN VERPLAATSINGSREGISTRATIES

— DRO24-25 — VPL 6





RIJ 31

RIJ 33

RIJ 35

$$k = 2,66 \cdot 10^{-2} \text{ m/s}$$

$$k' = 3,0 \cdot 10^{-3} \text{ m/s}$$

$$\alpha = 1:3$$

$$D = 0,02 \text{ m}$$

$$b = 0,025 \text{ m}$$

$$n = 0,40$$

a = de gemeten golfdruk

b = de berekende waterspanning

c = de gemeten waterspanning

d = de gemeten verschildruk

e = de berekende verschildruk

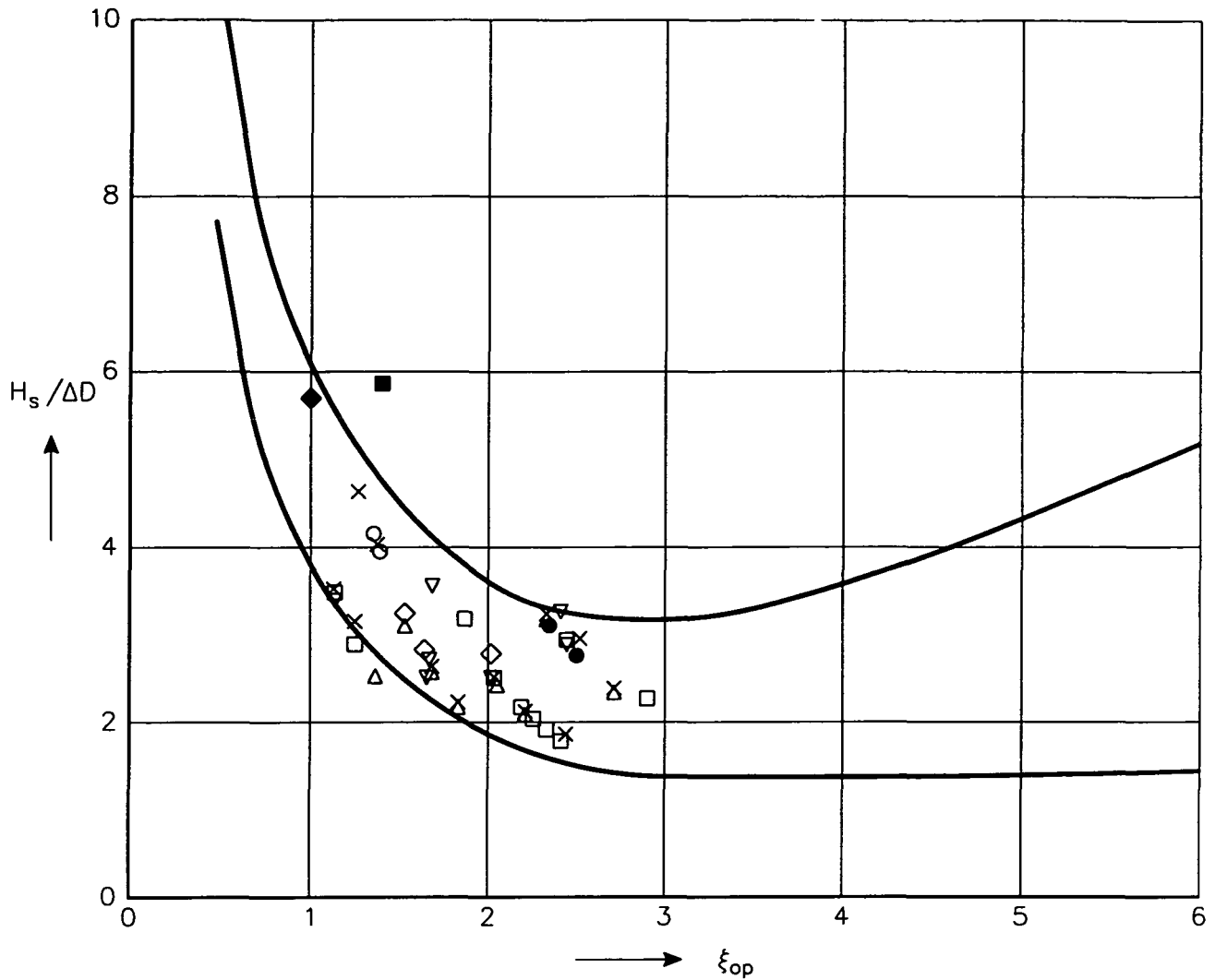
GEMETEN GOLFDRIJK EN BEREKENE EN GEMETEN
WATERSPANNINGEN EN VERSCHILDRIJKEN VOOR P032

P032

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

H 1550

FIG. 28



- × serie XL: blokken op klei met natuurlijke geulen
- serie YL: blokken op geotextiel op zandlaagje op klei
- ◇ serie ZL: blokken op geotextiel op zandlaagje op klei
- △ serie XR: blokken op goed verdichte klei met kunstmatige geulen
- ▽ serie YR: blokken op dik geotextiel op goed verdichte klei
- serie ZR: blokken op goed verdichte klei
- serie A: blokken op klei met natuurlijke geulen
- ◆ serie v: talud met berm (Oesterdam)
- × ○ □ ◇ △ ▽ ■ regelmatige golven
- ◆ onregelmatige golven

STABILITEIT VAN STEENZETTING OP GOEDE KLEI

Bijlage I

**Programma ter bepaling van leklengte
uit stijghoogtemetingen (FIT_LEKL)**

Programma ter bepaling van leklengte uit stijghoogtemetingen

fit_lekl.For

Het programma FIT_LEKL is bedoeld om voor een specifiek tijdstip uit een aantal gemeten stijghoogtes op het talud en één of meer gemeten stijghoogtes onder de toplaag de leklengte te bepalen. In feite berekend het programma het stijghoogteverloop onder de toplaag op basis van de gemeten stijghoogtes op het talud en een gekozen waarde van de leklengte. De leklengte is iteratief te bepalen door de ingevoerde leklengte zo te veranderen dat de gemeten en berekende stijghoogte onder de toplaag gelijk worden.

De benodigde invoerbestanden voor FIT_LEKL zijn de stuurfile FIT_LEKL.INP en het bestand met de meetgegevens in ASCII format voor het al uitgekozen 15 s tijdsinterval voor elke geselecteerde proef. Deze ASCII bestanden zijn als volgt genoemd:

Snnn.PRN

waarin S = proefserie (X, Y of Z) en nnn het proefnummer. Het format van de databestanden is als volgt:

Regel Inhoud

1	blanco
2-41	instrumentenummers in de volgorde waarin ze naar het bestand geschreven worden
42-416	meetgegevens: per regel als volgt: tijdstip 1, DRO01, DRO02, ..., DRO32, VPL1, ..., VPL8 tijdstip 2, DRO01, DRO02, ..., DRO32, VPL1, ..., VPL8 . . tijdstip 375, DRO01, DRO02, ..., DRO32, VPL1, ..., VPL8

De outputfile heet FIT_LEKL.OUT en heeft als inhoud de op het talud gemeten stijghoogtes, de drie onder de toplaag gemeten stijghoogtes en de berekende stijghoogtes voor elke ingevoerde leklengtewaarde. Om deze gegevens grafisch weer te geven is FIT_LEKL.OUT geïmporteerd in een spreadsheet (bijvoorbeeld SuperCalc, FIT_LEKL.CAL) waarmee een plot gemaakt kan worden.

Voorbeelden van FIT_LEKL.INP en FIT_LEKL.OUT volgen hieronder.

Op de volgende pagina's wordt ingegaan op de theoretische achtergrond van het programma.

Benadering van het stijghoogteverloop in het filter bij gegeven punten van de stijghoogte op het talud

Differentiaalvergelijking:

$$\frac{d^2\varphi_f}{dy^2} - \frac{\varphi_f}{\Lambda^2} = -\frac{\varphi_t}{\Lambda^2}$$

Er wordt gebruik gemaakt van het feit dat de som van de oplossingen bij afzonderlijke belastingen gelijk is aan de oplossing van de som van de belastingen tezamen. Als de belasting (stijghoogte op de zetting) op n punten bekend is, wordt de belasting opgedeeld in n deelbelastingen. Dit kan vrij eenvoudig als tussen twee opeenvolgende meetpunten een lineair stijghoogteverloop lineair wordt aangenomen. Er blijkt sprake te zijn van drie types deelbelastingen: een voor de linkerrand, een voor de rechterrand en een voor alle tussenliggende punten. Er zijn daarom ook slechts drie types deeloplossingen. De totale oplossing wordt samengesteld uit de n deeloplossingen.

Totale oplossing voor het stijghoogteverloop:

$$\varphi_r(y) = \sum_{i=1}^n \varphi_{ir}(y)$$

$$\varphi_f(y) = \sum_{i=1}^n \varphi_{if}(y)$$

Stijghoogteverloop op de zetting:

A $i = 1$

j Voor: geldt:

1 - -

2 $y < y_i$ $\varphi_{r,i}(y) = \varphi_{r,i} + (y - y_i)r_1$

3 $y > y_i$ $\varphi_{r,i}(y) = \varphi_{r,i} \left(1 - \frac{y - y_i}{y_{i+1} - y_i}\right)$

4 $y > y_{i+1}$ $\varphi_{r,i}(y) = 0$

B $1 < i < n$

j Voor: geldt:

1 $y < y_{i-1}$ $\varphi_{r,i}(y) = 0$

2 $y_{i-1} \leq y \leq y_i$ $\varphi_{r,i}(y) = \varphi_{r,i} \left(1 - \frac{y_i - y}{y_i - y_{i-1}}\right)$

3 $y_i \leq y \leq y_{i+1}$ $\varphi_{r,i}(y) = \varphi_{r,i} \left(1 - \frac{y - y_i}{y_{i+1} - y_i}\right)$

4 $y > y_{i+1}$ $\varphi_{r,i}(y) = 0$

$$C \quad i = n$$

j Voor: geldt:

$$1 \quad y < y_{i-1} \quad \varphi_{i,j}(y) = 0$$

$$2 \quad y < y_i \quad \varphi_{i,j}(y) = \varphi_{i,i} \left(1 - \frac{y_i - y}{y_i - y_{i-1}} \right)$$

$$3 \quad y > y_i \quad \varphi_{i,j}(y) = \varphi_{i,i} + (y - y_i)r_n$$

$$4 \quad - \quad -$$

Deeloplossingen:

Voor deelinterval j van de belasting bij punt i is de algemene vorm van de deeloplossing als volgt:

$$\varphi_{j,i}(y) = \varphi_{i,i}(y) + A_{j,i} \exp(y/\Lambda) + B_{j,i} \exp(-y/\Lambda)$$

Voer nu de volgende parameters in:

$$p_i = \exp(y_i/\Lambda) \quad (p_0 = 1 ; p_{n+1} = 1)$$

$$V_i = \frac{1}{y_{i+1} - y_i} \quad (V_0 = 0 ; V_n = 0)$$

$$Q_i = \frac{1}{2} \Lambda \varphi_{i,i}$$

Het uitwerken van de rand- en overgangsvoorwaarden bij deelbelasting i resulteert in de volgende constanten:

$$A \quad i = 1$$

$$A_{1,i} = \text{niet gedefinieerd}$$

$$A_{2,i} = Q_i * (- V_i/p_i + V_i/p_{i+1}) - 1/2 \Delta r_i / p_i$$

$$A_{3,i} = Q_i * (\quad + V_i/p_{i+1})$$

$$A_{4,i} = 0$$

$$B_{1,i} = \text{niet gedefinieerd}$$

$$B_{2,i} = 0$$

$$B_{3,i} = Q_i * (- V_i/p_i \quad) - 1/2 \Delta r_i / p_i$$

$$B_{4,i} = Q_i * (- V_i/p_i + V_i/p_{i+1}) - 1/2 \Delta r_i / p_i$$

$$B \quad 1 < i < n$$

$$A_{1,i} = Q_i * (V_{i-1}/p_{i-1} - V_{i-1}/p_i - V_i/p_i + V_i/p_{i+1})$$

$$A_{2,i} = Q_i * (\quad - V_{i-1}/p_i - V_i/p_i + V_i/p_{i+1})$$

$$A_{3,i} = Q_i * (\quad + V_i/p_{i+1})$$

$$A_{4,i} = 0$$

$$B_{1,i} = 0$$

$$B_{2,i} = Q_i * (V_{i-1} / p_{i-1} \quad)$$

$$B_{3,i} = Q_i * (V_{i-1} / p_{i-1} - V_{i-1} / p_i - V_i / p_i \quad)$$

$$B_{4,i} = Q_i * (V_{i-1} / p_{i-1} - V_{i-1} / p_i - V_i / p_i + V_i / p_{i+1})$$

$$C \quad i = n$$

$$A_{1,i} = Q_i * (+ V_{i-1}/p_{i-1} - V_{i-1}/p_i) + 1/2 \Delta r_i / p_i$$

$$A_{2,i} = Q_i * (\quad - V_{i-1}/p_i) + 1/2 \Delta r_i / p_i$$

$$A_{3,i} = 0$$

$$A_{4,i} = \text{niet gedefinieerd}$$

$$B_{1,i} = 0$$

$$B_{2,i} = Q_i * (+ V_{i-1}/p_{i-1} \quad)$$

$$B_{3,i} = Q_i * (+ V_{i-1}/p_{i-1} - V_{i-1}/p_i) + 1/2 \Delta r_i / p_i$$

$$B_{4,i} = \text{niet gedefinieerd}$$

Totale oplossing:

De totale oplossing luidt nu als volgt:

Voor $y_i \leq y \leq y_{i+1}$ geldt:

$$\varphi_f(y) = \varphi_t(y) + AA_i \exp(y/\Lambda) + BB_i \exp(-y/\Lambda)$$

$$AA_i = \sum_{j=1}^{i-1} A_{4,j} + A_{3,i} + A_{2,i+1} + \sum_{j=i+2}^n A_{1,j}$$

$$BB_i = \sum_{j=1}^{i-1} B_{4,j} + B_{3,i} + B_{2,i+1} + \sum_{j=i+2}^n B_{1,j}$$

$$\varphi_t(y) = \varphi_{t,i} + \frac{\varphi_{t,i+1} - \varphi_{t,i}}{y_{i+1} - y_i} (y - y_i)$$

Bijlage II

**Aantekeningen betreffende het bepalen van de mechanismen
en de leklengtes van de geselecteerde proeven**

Proef (VPL)	Begintijd Verplaatsing	Mechanisme bij begin verplaatsing	te analyseren tijdstip	commentaar
X03 Rl (3)	226,08	2	225,80	duidelijk
X05 Lr (2)	84,28	2	84,04	duidelijk
X05 Rr (4)	108,72	1	108,68	net voor de klap (108,76)
X07 Rl (7)	243,36	1	243,36	duidelijk
X08 Ll (5)	136,84	1	136,84	duidelijk
X09 Lr (6)	184,84	1	184,84	duidelijk
X09 Rl (7)	185,12	3	184,96	duidelijk
X37 Rl (7)	117,00	1	117,00	net voor de klap
X37 Rr (8)	277,08	1	277,00	rommelig front/klap: front breekt voor klap aankomt
X19 Lr (2)	109,88	1	109,88	duidelijk, lang voor de klap
X20 Ll (1)	218,44	3	218,28	rommelig! front breekt
X20 Lr (2)	75,00	1	75,00	duidelijk, "stap" in het front bij DRO 12
X120 Ll (1)	7,64	1	7,60	rommelig front
X120 Rl (7)	228,92	4	228,68	klap valt op VPL 3, niet VPL 7 !
X31 Lr (2)	121,68	1	121,68	duidelijk
X32 Ll (1)	233,04	2	232,96	duidelijk (er is een "stapje" in het front)
X32 Lr (2)	53,08	2	52,92	duidelijk
X32 Lr (2)	57,92	1	57,92	duidelijk
X33 Rr (4)	270,48	2	270,20	duidelijk (klein stapje in het front)
X25 Lr (6)	194,16	ntb	193,80	front begint te breken, geen echte klap
X26 Rl (7)	230,80	ntb	-	DRO 27 kapot
X22 Ll (1)	117,92	1	117,92	duidelijk
X23 Ll (1)	222,68	2	222,52	duidelijk
X23 Rr (4)	219,48	2	219,20	duidelijk
X24 Rr (4)	224,92	2	224,68	duidelijk

- Mechanismen:
1. Begin verplaatsing voor het golffront
 2. Begin verplaatsing tussen het golffront en de golfklap
 3. Begin verplaatsing onder de golfklap
 4. Begin verplaatsing na de golfklap

Proef	Tijdstip	Leklengte	commentaar:
X03 Rl	225,80	ca. 0,7	redelijke fit - DRO 26 te hoog
X05 Lr	84,04	0,7	zeer goed
X05 Rr	108,68	ca. 0,4	slechte fit bij DRO 28
X07 Rl	243,36	ca. 0,5	redelijke fit
X08 Ll	136,84	ca. 0,4	slechte fit DRO 22
X09 Lr	184,84	ntb 0,5	DRO 24 heel hoog met 5 kPa van DRO 24 afgetrokken (nulpuntverschuiving)
X09 Rl	184,96	ca. 0,3	slechte fit bij DRO 26
X37 Rl	117,00	ca. 0,6	redelijke fit
X37 Rr	277,00 277,04	ntb ca. 0,5	$\phi_{in} > \phi_{op}$ overall redelijke fit
X19 Lr	109,88	ca. 0,7	slechte fit bij DRO 6
X20 Ll	218,28	0,9	redelijke fit
X20 Lr	75,00	0,7	redelijke fit
X120 Ll	7,60	0,9	redelijke fit
X120 Rl	228,68	0,6	zeer goed
X31 Lr	121,68	0,8	goed
X32 Ll	232,96	0,8	goed
X32 Lr	52,92 57,92	ntb ntb 0,7	DRO 24 te hoog te corrigeren dmv nulpuntversch. correctie DRO 24 te hoog te corrigeren dmv nulpuntversch. correctie redelijke fit met een -1,5 kPa correctie aan DRO 24
X33 Rr	270,20	ntb 0,8	DRO 28 te hoog goede fit met -13 kPa correctie aan DRO 28
X25 Lr	193,80	0,5	goed
X26 Rl	-	-	DRO 27 kapot
X22 Ll	117,92	ntb	$\phi_{in}(6 \& 8) > \phi_{op}$
X23 Ll	222,52	ntb 0,9	DRO 22 te hoog met -1 kPa correctie aan DRO 22 (slechte fit bij DRO 4)
X23 Rr	219,20	ntb 0,3	DRO 28 veel te hoog goede fit met -6,5 kPa correctie aan DRO 28
X24 Rr	224,68	ntb 0,5	DRO 28 veel te hoog goede fit met -5 kPa correctie aan DRO 28

Proef (VPL)	Begintijd Verplaatsing	Mechanisme bij begin verplaatsing	te analyseren tijdstip	commentaar
Y03 Lr (2)	179,96	2	179,92	duidelijk
Y03 RI (3)	204,52	2	204,32	mech. duidelijk; front rommelig
Y09 RI (3)	97,08	2	96,92	duidelijk
Y12 Lr (2)	62,88	1	62,88	schadediepte ligt bij VPL 6 - daling in VPL 2 signaal
Y12 RI (3)	62,80	ntb	-	DRO 27 kapot
Y12 Rr (4)	162,72	1	162,72	schadediepte ligt bij VPL 8; VPL 4 geeft slecht signaal
Y16 LI (5)	84,44	1	84,48	schadediepte ligt hoger - daling in VPL 5 signaal
Y16 RI (7)	84,32	ntb	-	DRO 27 kapot
Y16 Rr (8)	84,36	1	84,36	duidelijk; klein VPL 8 signaal
Y24 LI (5)	121,24	3	121,00	duidelijk
Y26 LI (1)	107,76	1	107,76	duidelijk
Y30 RI (3)	8,48	ntb	-	DRO 27 kapot
Y32 Lr (2)	53,00	1	53,00	mech. duidelijk; daling in VPL 2 signaal
Y33 Rr (8)	210,96	1	210,96	mech. duidelijk; schadediepte ligt hoger
Y36 LI (1)	83,44	1	83,44	duidelijk
Y37 LI (1)	103,32	1	103,32	duidelijk
Y37 Lr (2)	103,48	1	103,36	mech. duidelijk; schadediepte ligt hoger
Y38 RI (7)		ntb	-	DRO 27 kapot
Y38 Rr (4)	167,68	2	167,60	duidelijk

- Mechanismen:
1. Begin verplaatsing voor het golffront
 2. Begin verplaatsing tussen het golffront en de golfklap
 3. Begin verplaatsing onder de golfklap
 4. Begin verplaatsing na de golfklap

Proef	Tijdstip	Leklengte	commentaar
Y03 Lr	179,92	0,5	redelijke fit met een -1,0 kPa correctie aan DRO 24
Y03 Ri	204,32	0,7	redelijke fit (rommelig front)
Y09 Ri	96,92	ntb	DRO 27 kapot
Y12 Lr	62,88 62,60	ntb 0,7	$\phi(\text{in}) > \phi(\text{op})$ goed
Y12 Ri	-	ntb	DRO 27 kapot
Y12b Rr	162,72	0,8	goed
Y16 Li	84,48 84,28	ntb 0,7	$\phi(\text{in}) > \phi(\text{op})$
Y16 Ri	-	ntb	DRO 27 kapot
Y16 Rr	84,36	0,5	redelijke fit: DRO 19 iets te hoog
Y24 Li	121,00	0,5	goede fit
Y26 Li	107,76	0,9	goede fit
Y30 Ri	-	ntb	DRO 27 kapot
Y32 Lr	53,00	0,7	redelijke fit met -2,8 kPa correctie aan DRO 15
Y33 Rr	210,96	0,7	goed
Y36 Li	83,44	0,8	redelijke fit: DRO 4 ligt te hoog
Y37 Li	103,32	0,8	redelijke fit: DRO 4 ligt te hoog
Y37 Lr	103,36	0,8	redelijke fit: DRO 6 ligt te hoog
Y38 Ri	-	ntb	DRO 27 kapot
Y38 Rr	167,60	0,5	redelijke fit: DRO 10 ligt iets te hoog

Bijlage III

Berekeningen van de leklengtes voor blokken op geulen

Berekeningen van de leklengtes voor blokken op geulen

In onderstaande tabellen zijn berekende toplaagdoorlatendheden, geuldoorlatendheden en leklengtes weergegeven die zijn berekend met de formules uit paragraaf 4.3. De volgende waarden zijn gebruikt voor de diverse variabelen:

Blokdikte: $D = 0,15 \text{ m}$

Blokmaten: $B = L = 0,50 \text{ m}$

Ruwheid van geulwanden onder de blokken: $k_{\text{nik}} = 2 \text{ mm}$

Ruwheid van spleetwanden tussen de blokken: $k_{\text{nik}} = 0,5 \text{ mm}$

Viscositeit van het water: $\nu = 1,2 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$

Spleetbreedte	Toplaagdoorlatendheid
$s = 1 \text{ mm}$	$k' = 2 \text{ mm/s}$
$s = 2 \text{ mm}$	$k' = 9 \text{ mm/s}$
$s = 3 \text{ mm}$	$k' = 10 \text{ mm/s}$
$s = 5 \text{ mm}$	$k' = 21 \text{ mm/s}$

Tabel 1 Toplaagdoorlatendheid (k')

Geuldiepte	Geuldoorlatendheid
$d = 5 \text{ mm}$	$k = 1,93 \text{ m/s}$
$d = 8 \text{ mm}$	$k = 2,87 \text{ m/s}$
$d = 10 \text{ mm}$	$k = 3,43 \text{ m/s}$
$d = 15 \text{ mm}$	$k = 4,71 \text{ m/s}$

Tabel 2 Geuldoorlatendheid (k)

	$d = 5 \text{ mm}$	$d = 8 \text{ mm}$	$d = 10 \text{ mm}$	$d = 15 \text{ mm}$
$s = 1 \text{ mm}$	$\Lambda = 0,80 \text{ m}$	$\Lambda = 1,22 \text{ m}$	$\Lambda = 1,50 \text{ m}$	$\Lambda = 2,15 \text{ m}$
$s = 2 \text{ mm}$	$\Lambda = 0,40 \text{ m}$	$\Lambda = 0,62 \text{ m}$	$\Lambda = 0,76 \text{ m}$	$\Lambda = 1,09 \text{ m}$
$s = 3 \text{ mm}$	$\Lambda = 0,37 \text{ m}$	$\Lambda = 0,58 \text{ m}$	$\Lambda = 0,70 \text{ m}$	$\Lambda = 1,01 \text{ m}$
$s = 5 \text{ mm}$	$\Lambda = 0,26 \text{ m}$	$\Lambda = 0,40 \text{ m}$	$\Lambda = 0,49 \text{ m}$	$\Lambda = 0,70 \text{ m}$

Tabel 3 Leklengte (Λ) bij gegeven waarde van de spleetbreedte (s) en geuldiepte (d)

Deze leklengtes zijn grafisch weergegeven in Figuur 25.

Bijlage IV

Resultaten metingen doorlatendheid van Enka-Drain

Resultaten metingen doorlatendheid van Enka-Drain

Enka-drain bestaat uit een dikke laag kernmateriaal met erop en eronder een geotextiel. De kern heeft een dikte van ongeveer 9,5 mm en is zeer open en doorlatend. De geotextielen die aan weerszijde aan de kern vastzitten zijn dun (0,2 à 0,3 mm) en veel minder doorlatend dan de kern.

De doorlatendheid van de hele Enka-drain bij stroming haaks op het oppervlak wordt volledig gedomineerd door de doorlatendheden van de dunne geotextielen op en onder de kern. De doorlatendheid van de hele Enka-drain bij stroming in het vlak ervan, wordt volledig bepaald door de doorlatendheid van de kern. Door dit grote verschil zijn er verschillende proeven uitgevoerd ter bepaling van de doorlatendheid.

Allereerst zijn er op twee monsters van de gehele Enka-drain proeven gedaan (test 1 en 2). Vervolgens zijn er twee proeven gedaan met een monster van het kernmateriaal (test 3 en 4). Tot slot is een proef gedaan met twee lagen kernmateriaal op elkaar (test 5), omdat de doorlatendheid zo groot was dat er in de testopstelling nauwelijks meetbare vervallen over het monster optraden.

Tijdens alle proeven was het oppervlak van het monster 19,6 cm² en was de stroming haaks op het vlak van het monster. De watertemperatuur was 15,8°C. De resultaten zijn omgerekend naar 10°C door de verhangen te vermenigvuldigen met 1,174.

De resultaten zijn weergegeven in de tabellen. Alle metingen waarbij het verval over het monster kleiner dan 0,2 mm was, zijn weggelaten. De resultaten zijn ook weergegeven in Figuur 1.

Het blijkt dat de gelineariseerde doorlatendheid (bij $i = 0,3$) van de kern van de Enka-drain volgens de metingen ongeveer 400 mm/s is. De gelineariseerde doorlatendheid van de hele Enka-drain is ongeveer 21 mm/s.

De doorlatendheid van het geotextiel op de kern kan ook uit de metingen bepaald worden. Tijdens de metingen met de gehele Enka-drain is het verval over twee geotextielen gemeten, aangezien het verval over de kern verwaarloosbaar is. Enig rekenwerk resulteert in het volgende:

$$\begin{aligned} a_g T_g &= 0,16 \text{ s} \\ b_g T_g &= 1,1 \text{ s}^2/\text{m} \end{aligned}$$

met:

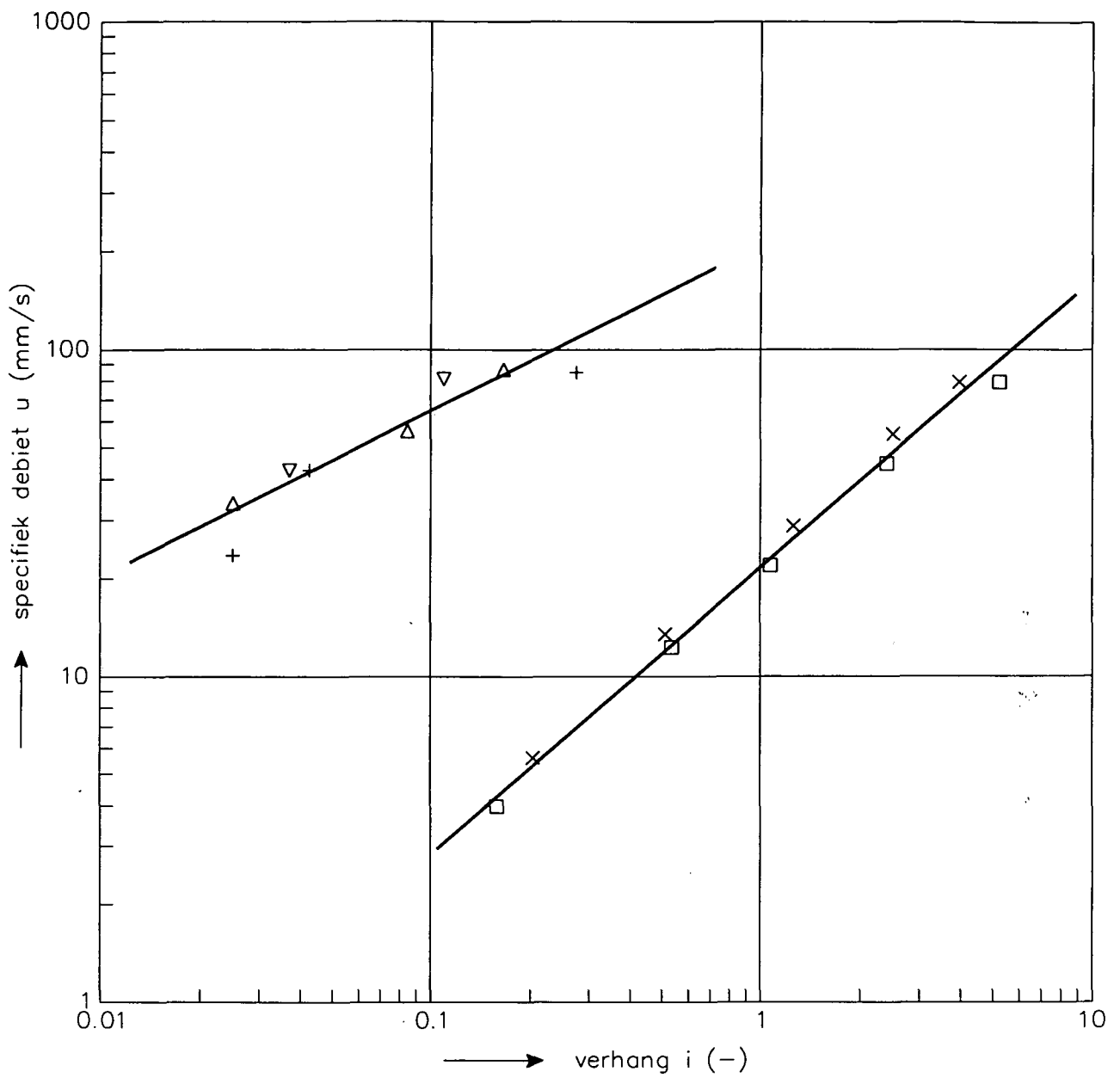
$$\begin{aligned} a_g &= \text{lineaire weerstandsterm uit Forchheimer relatie} && (\text{s/m}) \\ b_g &= \text{kwadratische weerstandsterm uit Forchheimer relatie} && (\text{s}^2/\text{m}^2) \\ T_g &= \text{dikte van geotextiel} && (\text{m}) \end{aligned}$$

Test	Dikte monster (mm)	Stijghoogteverschil (mm)	Verhang (-)	Specifiek debiet (mm/s)
1	9.95	1.4	.17	4.00
		4.5	.53	12.30
		8.9	1.05	22.40
		20.4	2.41	44.40
		44.8	5.29	80.20
2	10.02	1.8	.21	5.70
		4.5	.53	13.60
		10.7	1.25	29.20
		22.3	2.61	54.70
		34.7	4.07	79.50

Tabel 1 Doorlatendheidsmetingen op gehele Enka-drain

Test	Dikte monster (mm)	Stijghoogteverschil (mm)	Verhang (-)	Specifiek debiet (mm/s)
3	9.42	.3	.04	42.80
		.9	.11	81.50
4	9.55	.2	.02	34.20
		.7	.09	55.50
		1.4	.17	86.80
5	18.97	.4	.02	23.80
		.7	.04	42.70
		4.5	.28	86.60

Tabel 2 Resultaten van doorlatendheidsmetingen op kern van Enkadrain (proef 5: dubbele laag kernmateriaal)



- testnummer:
- 1: compleet
 - × 2: compleet
 - ▽ 3: kern, enkel
 - △ 4: kern, enkel
 - + 5: kern, dubbel

DOORLATENDHEIDSMETINGEN ENKA-DRAIN

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

H 1550

FIG. IV.1

Sectie 3

Stabiliteit van taludbekleding met blokken op klei

Tweede fase van analyse van Deltagootmetingen

Inhoud

Lijst van tabellen

Lijst van figuren

Lijst van symbolen

	blz.
1 Rapportsamenvatting	1
1.1 Inleiding en doelstelling	1
1.2 Samenvatting en conclusies	2
2 Invloed toevalligheden	3
2.1 Selectie van data	3
2.2 Analyse toevalligheden in geselecteerde data	3
2.3 Heranalyse van fysica in de geselecteerde data	4
2.4 Conclusies	6
3 Invloed traagheid	7
3.1 Inleiding	7
3.2 Kwalitatieve beschouwing en plan van aanpak	7
3.3 Oplossing van de volledige d.v.	9
3.4 Vergelijking tussen gemeten en berekende stijghoogteverschillen	11
3.5 Faseverschil tussen stijghoogteverloop op en onder zetting	12
3.6 Conclusies	13

Referenties

Tabellen

Figuren

Lijst van tabellen

- 1 Geselecteerde tijdsintervallen met de resultaten van de eerste analyse
- 2 Resultaten van de quasi-statische analyse
- 3 Mogelijke correcties in m waterkolom voor drukopnemers onder de blokken
- 4 Locatie en tijdsinterval van analyse traagheidseffect

Lijst van figuren

- 1 Proef X03, ruwe meetsignalen t.p.v. VPL3
- 2 Proef X03, bewerkte meetsignalen t.p.v. VPL3
- 3 Proef X03, periodieke stijghoogtes vanaf $t = 221,80$ s
- 4 Proef X09, periodieke stijghoogtes vanaf $t = 176,72$ s
- 5 Proef X37, periodieke stijghoogtes vanaf $t = 106,96$ s
- 6 Proef X03, voorbeeld bepaling leklengten op $t = 221,80$ s
- 7 Proef X09, voorbeeld bepaling leklengten op $t = 176,72$ s
- 8 Proef X37, voorbeeld bepaling leklengten op $t = 106,96$ s
- 9 Proef X37, stijghoogte op de zetting voor, tijdens en na de primaire golfklap
- 10 Proef X03, stijghoogteverschil volgens meting, quasi-statische berekening en volledige berekening
- 11 Proef X09, stijghoogteverschil volgens meting, quasi-statische berekening en volledige berekening
- 12 Proef X37, stijghoogteverschil volgens meting, quasi-statische berekening en volledige berekening

Lijst van symbolen

D	=	dikte van de blokken	[m]
d_f	=	dikte van het filter onder de blokken	[m]
g	=	versnelling van de zwaartekracht	[m/s ²]
k_f	=	doorlatendheid van het filter onder de blokken	[m/s]
k_t	=	doorlatendheid van de toplaag	[m/s]
n	=	porositeit van het filter onder de blokken	[-]
t	=	tijd	[s]
y	=	coördinaat langs het talud	[m]
φ_f	=	stijghoogte in het filter onder de blokken	[m]
φ_t	=	stijghoogte op de zetting	[m]
Λ	=	leklengte	[m]

1 Rapportsumenvatting

1.1 Inleiding en doelstelling

De eerste fase van de analyse van de gemeten drukken en verplaatsingen bij blokken op klei heeft geleid tot een aantal vragen die praktijkgerichte conclusies in de weg stonden (zie Sectie 2). Dit is veroorzaakt door het feit dat de meetsignalen in veel gevallen niet in overeenstemming zijn met de beschikbare theorieën, die voor blokken op een filter vaak wél goed toepasbaar zijn gebleken.

De volgende waarnemingen konden niet verklaard worden:

- In veel gevallen was het niet goed mogelijk de waarde voor de leklengte zó te kiezen dat de drie gemeten stijghoogten onder de blokken goed overeenstemden met het quasi-statisch berekende stijghoogteverloop onder de blokken (op basis van de elf gemeten stijghoogten op het talud).
- Er werd geen duidelijk verschil in de "best-fit"-leklengte van de verschillende geulgeometrieën gevonden.
- Het begin van blokbeweging trad in veel gevallen pas op tijdens een golfklap.
- In een aantal gevallen werd tijdens een golfklap een begin van blokbeweging gemeten terwijl het gemeten stijghoogteverschil over het betreffende meetblok negatief was.

De volgende hypothesen kunnen worden opgesteld om deze waarnemingen alsnog te verklaren:

Hypothese 1

Er is sprake van significante toevalligheden in de meetsignalen; een analysemethode die zich richt op slechts één tijdstip per proef, levert dan geen consistente resultaten.

Hypothese 2

Traagheidseffecten van de waterbeweging onder de blokken zijn bij dit constructietype van invloed op het verloop van de stijghoogte onder de blokken (en daarmee op de blokbeweging). De quasi-statische berekening van de stijghoogten onder de blokken is daarom niet goed bruikbaar, zodat ook de leklengte niet met deze rekenmethode bepaald kan worden.

Het doel van deze aanvullende analyse is na te gaan of één van bovengenoemde hypothesen juist is.

De invloed van toevalligheden werd onderzocht door eerst op grond van strenge criteria tijdsintervallen met meetgegevens te selecteren. Vervolgens werden de geselecteerde meetgegevens met middelingsprocedures bewerkt om eventueel nog aanwezige toevalligheden in de signalen te reduceren. Ten slotte werd bepaald of de analysemethode met de bewerkte signalen wezenlijk betere resultaten opleverde dan met de onbewerkte signalen.

De invloed van de traagheid van het water werd gekwantificeerd door de volledige differentiaalvergelijking numeriek op te lossen met de gemeten drukken op het talud als bronterm. Op de meetlocatie waar blokbeweging optrad, werd het verloop van het stijghoogteverschil in de tijd bestudeerd. Onderzocht werd of het in rekening brengen van de traagheidsterm een betere overeenstemming tussen de meetgegevens en de oplossing van de d.v. kon opleveren.

1.2 Samenvatting en conclusies

Toevalligheden in de meetsignalen van de drukopnemers zorgen ervoor dat de werkelijke stijghoogten op en vooral onder de zetting niet exact aan te geven zijn. Wel kan een bandbreedte aangegeven worden waarbinnen de stijghoogten zeer waarschijnlijk liggen. De bandbreedte voor het stijghoogteverschil is ongeveer 10 cm voor onbewerkte (maar zorgvuldig geselecteerde) signalen en ongeveer 5 cm voor bewerkte meetsignalen. Deze grootte van de bandbreedte is zeker van invloed op de mate van nauwkeurigheid waarmee de leklengte bepaald kan worden.

Echter, de afstand tussen de band en de verwachte waarden blijkt in veel gevallen nog te groot. Het bestaan van de bandbreedte waarbinnen de meetgegevens liggen levert derhalve geen afdoende verklaring voor de problemen met het bepalen van de leklengte.

Er kan sprake zijn van een tijdelijke nulpuntsverschuiving in de druksignalen. Correctie voor deze nulpuntsverschuiving blijkt echter in de onderzochte gevallen vaker een negatieve dan een positieve uitwerking te hebben op de ligging van de band ten opzichte van de verwachte lijn.

Traagheidseffecten van de waterbeweging onder de blokken hebben ook bij dit constructietype slechts geringe invloed op het verloop van de stijghoogte onder de blokken.

In het algemeen veroorzaakt de traagheidsterm een meer gedempt en enigszins vertraagd verloop van het stijghoogteverschil in de tijd (op een vaste locatie). Dit impliceert dat in de meeste gevallen het maximale stijghoogteverschil volgens de volledige oplossing kleiner is dan volgens de quasi-stationaire oplossing. Echter, op enige afstand van een locatie waar snelle drukfluctuaties optreden, kan het maximale stijghoogteverschil volgens de volledige oplossing groter zijn dan volgens de quasi-stationaire oplossing. Dit is vooral van belang bij een locatie tussen het golffront en de golfklap.

De conclusies luiden als volgt:

- 1 Er is sprake van significante toevalligheden in de meetsignalen, maar deze toevalligheden kunnen de discrepantie tussen de meetresultaten en de theoretische verwachtingen niet afdoende verklaren.
- 2 Het verschil tussen het gemeten stijghoogteverschil en het quasi-statisch berekende stijghoogteverschil kan niet worden toegeschreven aan het verwaarlozen van de traagheidsterm in de differentiaalvergelijking.

2 Invloed toevalligheden

2.1 Selectie van data

We bestuderen de invloed van toevalligheden door de analyse voor verschillende tijdstippen te herhalen bij meetsignalen waarin de invloed van toevalligheden zo goed mogelijk is uitgesloten. De resultaten van de analyse worden vervolgens vergeleken met die van de eerste analyse. De volgende activiteiten worden hierbij onderscheiden:

- Het tijdstip van het begin van beweging van elke golf in het geselecteerde tijdsinterval wordt vastgesteld om te controleren of het mechanisme en drukverschil bij het begin van blokbeweging constant blijft.
- De ruwe meetsignalen worden ensemble-gemiddeld. Met deze nieuwe signalen wordt opnieuw geprobeerd de leklengte van de constructie te bepalen.
- De ruwe meetsignalen worden gladgestreken door een voortschrijdend gemiddelde te nemen. Met deze nieuwe signalen wordt ook weer geprobeerd de leklengte van de constructie te bepalen.

We beperken ons tot series van drie opeenvolgende golven uit drie verschillende proeven. De drie proeven zijn gekozen uit de selectie die reeds vóór de eerste analyse is gemaakt. Hiermee worden bijvoorbeeld de effecten van bewegende referentieblokken vermeden. De serie van drie opeenvolgende golven is per proef zó gekozen dat de gemeten verschildrukken en verplaatsingen zo veel mogelijk periodiek zijn. De selectie is beperkt tot drie opeenvolgende golven omdat langere series golven zonder grote variaties (zoals tijdelijke nulpuntsverschuivingen) in de druk- en verplaatsingssignalen zelden voorkomen.

De selectie van de proeven en de tijdsintervallen is gegeven in Tabel 1. De geulgeometrie is voor alle drie de proeven gelijk en we zouden dan ook één waarde van de leklengte als analyse-resultaat verwachten. Echter, uit de eerste analyse blijkt dat bij iedere proef een andere leklengte en bovendien een ander mechanisme en een andere verschildruk bij begin van beweging is gevonden.

2.2 Analyse toevalligheden in geselecteerde data

In deze sectie bezien we de grootte van de toevalligheden in de meetsignalen en bepalen we in hoeverre de toevalligheden met behulp van middelingsprocedures kunnen worden gereduceerd. De ensemblemiddeling is uitgevoerd over de drie geselecteerde golven. De voortschrijdende middeling is uitgevoerd over een tijdvenster van 0,20 s.

Invloed bij één meetsignaal (stijghoogteverschil) in de tijd

In Figuur 1 is het stijghoogteverschil van DRO 17 en 18 weergegeven. Het tijdinterval waarbinnen de leklengte gefit zou kunnen worden loopt van 220,00 tot ongeveer 221,90 s. Tot $t = 221,80$ s ligt het verloop van het onbewerkte stijghoogteverschil binnen een bandbreedte van ongeveer 10 cm. Het ensemble-gemiddelde stijghoogteverschil begeeft zich in een band-

breedte van ongeveer 5 cm, net als het voortschrijdend gemiddelde stijghoogteverschil. Tussen $t = 221,80$ s en $t = 221,90$ s is de variatie in de verschildruk groter, hoewel dan nog geen sprake is van een golfklap of blokbeweging.

Invloed bij serie stijghoogten op één tijdstip

In Figuren 2, 3 en 4 zijn voor de verschillende proeven de gemeten stijghoogten op de zetting en onder de blokken weergegeven met steeds precies een golfperiode tussen de geselecteerde tijdstippen. De bandbreedte van de stijghoogte op de zetting is maximaal 15 cm en die onder de blokken is maximaal 10 cm.

Conclusie:

De grootte van de toevallige variatie in de stijghoogte is zeker van invloed op de mate van nauwkeurigheid waarmee de lek lengte bepaald kan worden. Dit geldt ook nog nadat de toevaligheden gereduceerd zijn met behulp van middelingsprocedures.

2.3 Heranalyse van fysica in geselecteerde data

De heranalyse van de fysica in de geselecteerde data richt zich op de volgende twee aspecten:

- a de mate van zekerheid waarmee het mechanisme kan worden bepaald dat bij begin van beweging hoort (het type stijghoogteverloop op de zetting en de locatie van het bewegende meetblok daarin);
- b de mate van zekerheid waarmee de lek lengte van de constructie kan worden bepaald op basis van de gemeten stijghoogten op de zetting en onder de blokken.

Voor dit laatste worden met verschillende lek lengten de stijghoogten onder de blokken berekend en vergeleken met gemeten waarden. Dit wordt gedaan voor verschillende tijdstippen, echter steeds vóórdat de golfklap plaatsvindt en/of blokbeweging optreedt.

De resultaten van de heranalyse zijn samengevat in Tabel 2. Hierin is voor verschillende tijdstippen de optimale waarde van de lek lengte aangegeven voor de drie meetlocaties langs het talud. Voorbeelden van deze fit-procedure zijn gegeven in Figuren 6, 7 en 8. In het ideale geval is de optimale waarde van de lek lengte onafhankelijk van de locatie en het tijdstip (en de proef). Dit blijkt echter geenszins het geval. Uit de resultaten in Tabel 2 blijkt dat het niet mogelijk is om één waarde van de lek lengte te vinden waarbij de gemeten en berekende waarde van de stijghoogte onder de blokken met elkaar overeenkomen. Zelfs op één tijdstip is dit niet mogelijk; minstens één van de drie gemeten waarden ligt ver buiten het bereik van verwachte waarden.

Hieronder wordt nader ingegaan op de resultaten van de heranalyse per proef.

Proef X03

Bij proef X03 bestaat geen onduidelijkheid over het tijdstip van begin van beweging en het mechanisme is duidelijk dat van een positie tussen het golf front en de golfklap. Figuur 6 toont de ligging van de metingen ten opzichte van de berekende lijnen op tijdstip $t = 221,80$ s. De gemeten stijghoogten onder de blokken liggen boven de berekende waarden voor alle

leklengten tussen 0,1 tot 0,9 m. Op basis van het tweede en derde meetpunt wordt de leklengte geschat op 1 m. De resultaten bij andere tijdstippen zijn gegeven in Tabel 2.

Proef X09

In proef X09 is duidelijk sprake van mechanisme 3: het meetblok begint te bewegen op het moment dat de golfklap er precies bovenop valt. Dit verschijnsel kan niet aan toevalligheden worden toegeschreven en blijft dan ook vreemd.

Proef X37

Het vaststellen van het tijdstip van begin van beweging is in deze proef een probleem. Zie Figuur 9 voor het stijghoogteverloop op de zetting op drie verschillende karakteristieke tijdstippen. Tijdens het golffront, net voordat de golfklap optreedt, begint het meetblok te schokken ($t = 106,96$ s). De primaire golfklap komt precies op het meetblok terecht ($t = 107,00$ s). Ongeveer 0,5 s na deze primaire golfklap gaat het blok pas echt opwaarts bewegen ($t = 107,48$). Op dit derde tijdstip valt een secundaire klap op het talud, op een iets hogere locatie. Het meetblok bevindt zich op dat moment tussen deze secundaire klap en het restant van het golffront. Dit zou overeenkomen met mechanisme 2. Als echter het tijdstip van begin van het schokken van het blok wordt gekozen, zoals in de eerste analyse is gedaan, dan is het mechanisme het golffront, oftewel mechanisme 1. De enigszins vreemde relatie tussen de belasting op de zetting en het tijdstip van begin van beweging herhaalt zich, en kan daarom niet aan de invloed van toevalligheden worden toegeschreven.

Op het eerste tijdstip ($t = 106,96$ s) is de stijghoogte onder het meetblok vergeleken met berekende waarden voor verschillende leklengten, zie Figuur 8. (Zie Tabel 2 voor de resultaten op andere tijdstippen). De gemeten stijghoogte onder het meetblok ligt bij alle waarden van de leklengte onder de berekende waarde. Het probleem dat geen goede leklengte bepaald kan worden, kan in deze proef kennelijk niet aan de invloed van toevalligheden in de meetsignalen worden toegeschreven.

In het voorgaande is de aandacht gericht op de invloed van toevalligheden in de meetsignalen. Er kan echter ook sprake zijn geweest van nulpuntverschuivingen in de druksignalen, waardoor het kiezen van een leklengte wordt bemoeilijkt.

Inderdaad is bij alle proeven geconstateerd dat tijdens de rustige perioden tussen de golfklappen er een aanhoudend positief (opwaarts) drukverschil aanwezig is over alle meetblokken. In deze perioden verwacht men echter géén of slechts een gering stijghoogteverschil. Het waargenomen verschil kan het gevolg zijn van een nul-puntverschuiving in het signaal van de drukopnemers. Om deze verschuiving te corrigeren moet van het druksignaal een constante waarde worden afgetrokken. Deze waarden zijn geschat en in Tabel 3 samengevat. Het is nu de vraag of correctie voor deze nul-puntverschuiving het bepalen van de leklengte vergemakkelijkt.

Bij het fitten van de berekende lijnen door de gemeten stijghoogten onder de blokken is onder meer het volgende gebleken:

- Bij proef X03 is de stijghoogte onder het belangrijkste meetblok soms hoger en soms lager dan berekend;

- Bij proef X09 is de stijghoogte onder het belangrijkste meetblok altijd lager dan berekend;
- Bij proef X37 is de stijghoogte onder het belangrijkste meetblok altijd lager dan berekend.

Hieruit volgt dat de in Tabel 3 gesuggereerde correctie voor de nulpuntsverschuiving in de onderzochte gevallen vaker een negatieve dan een positieve uitwerking heeft op de ligging van de metingen ten opzichte van de verwachte lijnen.

2.4 Conclusies

- 1 Door toevalligheden in de meetsignalen kan hooguit een bandbreedte aangegeven worden waarbinnen de gemeten stijghoogten zeer waarschijnlijk liggen. De bandbreedte voor het stijghoogteverschil is ongeveer 10 cm voor onbewerkte (maar zorgvuldig geselecteerde) signalen en ongeveer 5 cm voor bewerkte meetsignalen. Deze grootte van de bandbreedte is zeker van invloed op de mate van nauwkeurigheid waarmee de lek lengte bepaald kan worden.
- 2 De afstand tussen de band van mogelijke meetwaarden en de verwachte waarden blijkt in veel gevallen echter nog te groot. De waargenomen bandbreedte levert herhalve geen afdoende verklaring voor de problemen met het bepalen van de lek lengte.
- 3 Correctie voor mogelijke nulpuntsverschuivingen in de druksignalen blijkt in de onderzochte gevallen vaker een negatieve dan een positieve uitwerking te hebben op de ligging van de band ten opzichte van de verwachte lijn.

3 Invloed traagheid

3.1 Inleiding

De algemene differentiaalvergelijking (d.v.) voor de stijghoogte in het filter is (Rigter 1992):

$$\frac{\partial^2 \varphi_f}{\partial y^2} = \frac{k_f}{ng} \frac{1}{\Lambda^2} \frac{\partial}{\partial t} (\varphi_f - \varphi_t) + \frac{1}{\Lambda^2} (\varphi_f - \varphi_t) \quad (3.1)$$

Hierin is:

φ_f	= stijghoogte in het filter onder de blokken	(m)
φ_t	= stijghoogte op de zetting	(m)
Λ	= leklengte	(m)
k_f	= doorlatendheid van het filter onder de blokken	(m/s)
n	= porositeit van het filter onder de blokken	(-)
g	= versnelling van de zwaartekracht	(m/s ²)
y	= coördinaat langs het talud	(m)
t	= tijd	(s)

De eerste term in het rechterlid bevat (als enige) een tijdaspect en noemen we daarom in dit verband de traagheidsterm. Bij de meeste constructietypes is deze traagheidsterm verwaarloosbaar klein gebleken en werd de zogenoemde quasi-statische oplossing bepaald.

Bij blokken op klei is de traagheidsterm vermoedelijk beduidend groter dan bij de tot nu toe bestudeerde constructietypes. Hierbij wordt uitgegaan van het bestaan van geultjes onder de blokken. Deze geultjes hebben een vergelijkbaar effect als een filter onder de blokken. De porositeit van deze geultjes wordt in het vervolg van dit hoofdstuk eenvoudigweg gelijk aan 1 gesteld, zodat alleen de doorlatendheid van de geultjes als parameter in de d.v. resteert.

In dit hoofdstuk onderzoeken we of het in rekening brengen van de traagheidsterm een betere overeenstemming tussen de meetgegevens en de oplossing van de d.v. kan opleveren.

3.2 Kwalitatieve beschouwing en plan van aanpak

In kwalitatieve zin is de invloed van de traagheidsterm groter naarmate de doorlatendheid van de constructie groter is en het stijghoogteverschil sterker varieert in de tijd.

De invloed van de leklengte (in verhouding tot de afmetingen van de stijghoogtefront en -klap) op de invloed van de traagheidsterm is niet zonder meer uit de d.v. af te lezen. Hierbij dient nog opgemerkt te worden dat de leklengte mede bepaald wordt door de doorlatendheid onder de blokken:

$$\Lambda = \sqrt{d_f D \frac{k_f}{k_t}} \quad (3.2)$$

met:

k_t	=	doorlatendheid van de toplaag	(m/s)
d_f	=	dikte van het filter onder de blokken	(m)
D	=	dikte van de blokken	(m)

Vergroting van deze doorlatendheid betekent derhalve vergroting van de lek lengte.

De traagheidsterm in de d.v. heeft naar verwachting alleen effect tijdens snelle fluctuaties in de stijghoogtes op het talud, zoals tijdens een golfklap. De invloed strekt zich uit over een gebied rond de locatie waar de snelle fluctuaties optreden. De invloed bestaat vermoedelijk uit:

- vertraging (na-ijling),
- demping van het stijghoogteverschil ter plaatse van de grootste drukfluctuaties, en
- versterking van het stijghoogteverschil op enige afstand van de grootste drukfluctuaties.

De mate van invloed van de traagheidsterm is afhankelijk van zowel de plaats als de tijd. Daarom is het niet mogelijk de invloed van de traagheidsterm te simuleren door in de quasi-statische rekenmethode de lek lengte aan te passen.

Het doel in dit verkennende stadium van de studie naar het traagheidseffect, is uitsluitend het verkrijgen van een idee van de trend en de grootte van de invloed. Hiermee kan bepaald worden of het in rekening brengen van de traagheidsterm een betere overeenstemming tussen de meetgegevens en de oplossing van de d.v. kan opleveren. Daarnaast kan meer in het algemeen bepaald worden in hoeverre de traagheidsterm bij deze constructietypes van belang is.

De werkwijze in deze deelstudie is als volgt:

Op de meetlocatie waar blokbeweging is opgetreden bestuderen we het verloop van het stijghoogteverschil in de tijd. We vergelijken het gemeten stijghoogteverschil met de quasi-statisch berekende en de volledig berekende stijghoogteverschillen. Bovendien bezien we de relatie tussen de genoemde stijghoogteverschillen en de gemeten blokbeweging.

Deze werkwijze is betrekkelijk eenvoudig en doelgericht en verdient daarom de voorkeur boven alternatieve werkmethoden.

In dit kader dienen ook twee notities van Rigter vermeld te worden, die als Sectie 4 en 5 in dit rapport zijn opgenomen.

In (Rigter, 1992, Sectie 4) wordt vooral ingegaan op de beweging van de freatische lijn bij slecht doorlatende toplagen op een relatief doorlatende ondergrond (zoals geultjes onder de blokken). Zoals in Conclusie 5 wordt gesteld, zijn de resultaten van deze studie minder geschikt voor constructies met een lek lengte kleiner dan enkele meters. Bovendien wordt in deze conclusie gesteld dat bij dergelijke constructies de invloed van de traagheidsterm waarschijnlijk alleen numeriek bepaald kan worden.

In (Rigter, 1993, Sectie 5) wordt de volledige d.v. (dus inclusief traagheidsterm) analytisch opgelost voor enkele bijzondere gevallen. De resultaten geven enig inzicht in de invloed van de traagheidsterm maar zijn niet direct van toepassing bij brekende golven. Ook hier wordt erop gewezen dat voor dergelijke meer algemene situaties een numerieke oplossing (zoals een sterk verbeterde versie van STEENZET) de enige mogelijkheid is.

In een eerste tussenstap van de onderhavige studie is een schatting gemaakt van de verhouding tussen de twee termen in het rechterlid van (3.1) bij de geselecteerde tijdsintervallen. Hiertoe is de stijghoogte onder de blokken quasi-stationair berekend, waarna het verloop van het stijghoogteverschil in de tijd is bestudeerd. De fluctuatie van deze verhouding tussen de twee termen zijn echter zo groot gebleken dat hieraan geen conclusies konden worden verbonden voor de mate van invloed van de traagheidsterm.

3.3 Oplossing van de volledige d.v.

Als geschreven wordt:

$$\Phi = \varphi_f - \varphi_t \quad (3.3)$$

$$F = \frac{\partial^2 \varphi_t}{\partial y^2} \quad (3.4)$$

dan wordt de d.v. van vergelijking (3.1):

$$\frac{\partial^2 \Phi}{\partial y^2} = \frac{k_f}{g\Lambda^2} \frac{\partial \Phi}{\partial t} + \frac{1}{\Lambda^2} \Phi + F \quad (3.5)$$

$$\frac{\partial \Phi}{\partial t} = \frac{g\Lambda^2}{k_f} \left(\frac{\partial^2 \Phi}{\partial y^2} - \frac{1}{\Lambda^2} \Phi + F \right) \quad (3.6)$$

We definiëren de volgende constanten:

$$C_1 = \frac{g\Lambda^2}{k_f} \quad (3.7)$$

$$C_2 = \frac{g}{k_f} \quad (3.8)$$

Hiermee wordt (3.6):

$$\frac{\partial \Phi}{\partial t} = C_1 \frac{\partial^2 \Phi}{\partial y^2} - C_2 \Phi + C_1 F \quad (3.9)$$

Bronterm, begin- en randvoorwaarden

Voor het oplossen van de d.v. zijn verschillende gegevens noodzakelijk, te weten de bronterm, de beginvoorwaarden en de randvoorwaarden. Hierbij moeten waarden worden toegekend aan de leklengte en de doorlatendheid van de constructie.

De parameter φ_t is door meting bekend op een beperkt aantal (11) non-equidistante punten langs de y-as. Voor het oplossen van de differentiaalvergelijking is echter een continu verloop van φ_t noodzakelijk. We schatten het verloop van φ_t tussen de meetlocaties met behulp van een interpolatiemethode.

De bronterm $C_2 F(y,t)$ bevat de tweede afgeleide van φ_t langs de y-as. Net als φ_t dient deze tweede afgeleide continu langs de y-as te zijn. Dat is bij het gebruik van lineaire interpolatie tussen de meetpunten niet het geval en daarom is lineaire interpolatie in dit geval geen geschikte methode.

Een andere interpolatiemethode voor φ_t is spline-interpolatie. Bij deze methode zijn tevens de eerste en tweede afgeleiden van φ_t continu. (De tweede afgeleide wordt in deze interpolatiemethode geminimaliseerd). Deze methode is reeds als standaard FORTRAN-routine beschikbaar en is daardoor eenvoudig inzetbaar. Om deze redenen gebruiken we deze interpolatietechniek voor het schatten van het verloop van φ_t langs de y-as.

De bemonsteringsfrequentie is 25 Hz. Indien de benodigde tijdstap in de berekening kleiner is dan het bemonsteringsinterval in het meetbestand, gebruiken we lineaire interpolatie tussen de twee omliggende meet-tijdstippen.

Bij het begin van de berekening zal een korte insteltijd (hooguit enkele tienden van een seconde) nodig zijn. Door de berekening ruim vóór het te beschouwen tijdstip met grote belasting te starten, is de juistheid van de beginvoorwaarde niet zo belangrijk. We kiezen daarom de volgende eenvoudige vorm voor de *beginvoorwaarde* voor Φ :

$$\Phi(y,0) = 0 \quad (3.10)$$

Omdat de randen van het meetgebied relatief ver van de interessante meetpunten liggen is fysische juistheid van de op te leggen randvoorwaarden niet zo belangrijk. We kiezen daarom de volgende eenvoudige vorm voor de *randvoorwaarden* voor Φ :

$$\Phi(y_a,t) = \Phi(y_b,t) = 0 \quad (3.11)$$

Discretisatie

We gebruiken de volgende discretisaties:

$$\frac{\partial \Phi}{\partial t}(y_i,t_j) = \frac{\Phi_{i,j+1} - \Phi_{i,j}}{\Delta t} \quad (3.12)$$

$$\frac{\partial^2 \Phi}{\partial y^2}(y_i,t_j) = \frac{\Phi_{i+1,j} - 2\Phi_{i,j} + \Phi_{i-1,j}}{\Delta y^2} \quad (3.13)$$

$$F_{ij} = \frac{\partial^2 \varphi_t}{\partial y^2}(y_i, t_j) = \frac{\varphi_{t_{i+1,j}} - 2\varphi_{t_{ij}} + \varphi_{t_{i-1,j}}}{\Delta y^2} \quad (3.14)$$

Hiermee wordt de d.v. (3.9) gediscrètiseerd tot:

$$\Phi_{i,j+1} = \Phi_{ij} + C_1 \frac{\Delta t}{\Delta y^2} (\Phi_{i+1,j} - 2\Phi_{ij} + \Phi_{i-1,j}) - C_2 \Delta t \Phi_{ij} + C_1 \Delta t F_{ij} \quad (3.15)$$

Voor stabiliteit moet gelden:

$$\Delta t < \frac{2}{\frac{4C_1}{\Delta y^2} + C_2} \quad (3.16)$$

Bovenstaande procedure is in een FORTRAN-programma geïmplementeerd.

3.4 Vergelijking tussen gemeten en berekende stijghoogteverschillen

We gebruiken de onbewerkte meetgegevens bij één golf bij de drie proeven X03, X09 en X37. We bepalen de quasi-statische en de volledige oplossing op basis van de gemeten stijghoogten op het talud en één waarde van de leklengte per proef. De rekenwaarde van de leklengte is gelijkgesteld aan de waarde volgens de eerste analyse (zie Tabel 1).

De doorlatendheid van de laag onder de blokken wordt bepaald door kunstmatige en natuurlijke geultjes in de klei. Een nauwkeurige schatting is niet te geven, maar een doorlatendheid van ongeveer 1 m/s lijkt redelijk. Bij deze doorlatendheid is echter de invloed van de traagheid zo klein (zeker in tijdsintervallen buiten de golfklap) dat verwaarlozing van de term niet van invloed kan zijn geweest op de resultaten van de eerste analyse.

Om de trend van de invloed van de traagheidsterm zichtbaar te maken zijn volledige berekeningen uitgevoerd met een doorlatendheid van 4,0 m/s.

De concrete vergelijking tussen het gemeten verloop van het stijghoogteverschil en de twee berekende verlopen wordt alleen uitgevoerd voor de locatie van het meetblok waar blokbeweging heeft opgetreden. Conclusies over de invloed van de traagheidsterm hebben hierdoor slechts betrekking op deze ene locatie per proef. Bij begin van beweging bevindt de beschouwde locatie zich in proef X03 tussen het golffront en de hoofdklap, en in proef X09 precies onder de hoofdklap. Proef X37 is een bijzonder geval omdat de beschouwde meetlocatie precies onder de hoofdklap ligt, maar na de hoofdklap ligt de meetlocatie tussen een secundair front en een secundaire klap. Pas bij deze tweede situatie treedt duidelijk begin van beweging op.

Tabel 4 geeft de beschouwde tijdsintervallen.

De Figuren 10, 11 en 12 tonen het gemeten, het quasi-statisch berekende en het volledig berekende verloop van het stijghoogteverschil in het gekozen tijdsinterval. Tevens is in de figuren de blokbeweging weergegeven. In deze figuren constateren wij het volgende:

Bij proef X03 neemt het gemeten stijghoogteverschil tot het begin van beweging nauwelijks toe. Dat is fysisch moeilijk te verklaren. Het quasi-statisch berekende stijghoogteverschil heeft een lagere beginwaarde en een hogere maximale waarde bij het begin van beweging en sluit daarom beter aan bij de gemeten verplaatsing. Het volledig berekende stijghoogteverschil heeft een nog hoger maximum, dat iets later optreedt. Het hogere maximum wordt veroorzaakt door versterking als gevolg van de snelle drukfluctuaties in de nabijheid van de meetlocatie (die tussen het golffront en de golfklap ligt). Door het hogere en iets later optredende maximale stijghoogteverschil sluit dit berekende stijghoogteverloop nog het best aan bij de gemeten verplaatsing.

Bij proef X09 en X37 treedt een scherpe dip in het gemeten stijghoogteverschil op, doordat de golfklap precies op de meetlocatie terecht komt. Het gemeten stijghoogteverschil verloopt nogal grillig en is vooral bij proef X09 de meeste tijd hoger dan de verwachte en berekende stijghoogteverschillen. (Hier speelt misschien een tijdelijke nulpuntverschuiving in een druksignaal een rol, hetgeen niet onwaarschijnlijk is gezien de grote watermassa's (inclusief luchtinsluitingen) die op de gevoelige drukopnemers op deze locatie terecht komen).

Het quasi-statisch berekende stijghoogteverschil wijkt tijdens en vlak na de golfklap nogal af van de meting en het berekende maximale stijghoogteverschil is ook kleiner dan de meting. Het volledig berekende stijghoogteverschil is bij beide proeven duidelijk vertraagd en gedempt. Bij proef X09 zijn bij het begin van beweging de gemeten en berekende waarden van het stijghoogteverschil alledrie negatief. Ook met het in rekening brengen van de traagheidsterm in de d.v. kan dit fysisch vreemde verschijnsel dus niet verklaard worden. Bij proef X37 is bij het begin van beweging het gemeten stijghoogteverschil het grootst en het volledig berekende stijghoogteverschil het kleinst. Door de traagheidsterm in rekening te brengen wordt de overeenstemming met de gemeten verplaatsing bij deze proef dus alleen maar minder.

Wij wijzen er nogmaals op dat bovenstaande constatering betrekking hebben op slechts één locatie per proef. De invloed van de traagheidsterm is voor andere locaties bij deze proeven ongetwijfeld anders, maar voor de stabiliteit van de bekleding minder relevant dan de hier behandelde locaties.

3.5 Faseverschil tussen stijghoogteverloop op en onder zetting

Traagheidseffecten zijn in discussies ook naar voren gekomen bij het zoeken naar een verklaring voor het vrij plotseling toenemen van de verschildruk. De traagheidseffecten hebben echter primair als gevolg dat er een faseverschil ontstaat tussen de druk onder de zetting ten opzichte van op de zetting.

In Figuur 20 van Sectie 2 is het verloop van de druk in de tijd te zien. In zo'n figuur zouden ook faseverschuivingen te zien moeten zijn.

Het gaat hier om drukopnemers op $x = -3$ m in Figuur 21b van Sectie 2. Voor deze drukopnemers is de wat onverklaarbare zeer sterke stijging van de stijghoogte geconstateerd tussen $t = 84,36$ s en $84,40$ s.

Wanneer we het verloop van deze drukopnemer in de tijd beschouwen, zoals gegeven in Figuur 20, dan zien we dat deze tussen $t = 83,00$ s en $84,30$ s vrij nauwkeurig de druk op het talud volgt. Dit is ook het geval na $85,20$ s.

Door traagheidseffecten zou er over een langere periode een discrepantie moeten bestaan tussen de druk op de zetting en eronder als gevolg van het uit fase lopen van beide.

Dit blijkt echter niet uit de metingen, waardoor geconcludeerd kan worden dat het vrij plotseling toenemen van de verschilddruk niet met traagheid verklaard kan worden.

3.6 Conclusies

- 1 Traagheidseffecten van de waterbeweging onder de blokken hebben ook bij dit constructietype slechts geringe invloed op het verloop van de stijghoogte onder de blokken.
- 2 In het algemeen veroorzaakt de traagheidsterm een meer gedempt en enigszins vertraagd verloop van het stijghoogteverschil in de tijd (op een vaste locatie). Dit impliceert dat in de meeste gevallen het maximale stijghoogteverschil volgens de volledige oplossing kleiner is dan volgens de quasi-stationaire oplossing. Echter, op enige afstand van een locatie waar snelle drukfluctuaties optreden kan het maximale stijghoogteverschil volgens de volledige oplossing groter zijn dan volgens de quasi-stationaire oplossing. Dit is met name van belang bij een locatie tussen het golffront en de golfklap.

Referenties

- B.P. Rigter. Invloed van geulen op de stabiliteit van steenzettingen. Notitie N602, april 1992. zie Sectie 4.
B.P. Rigter. De invloed van de traagheidsterm. Notitie A2.93.58, september 1993. zie Sectie 5.
G.M. Smit. Open taludbekledingen. Beweging van blokken op klei. Analyse van Deltagootonderzoek, Waterloopkundig Laboratorium. zie Sectie 2

Proef	meetblok	Interval (s)	mech.	Λ (m)	Δp (kPa)
X37 R1	VPL 7	105-125	1	0,6	-2,0
X03 R1	VPL 3	221-231	2	0,7	1,5
X09 R1	VPL 7	175-190	3	0,3	-0,1

Tabel 1 Geselecteerde tijdsintervallen met de resultaten van de eerste analyse

Proef	begin van beweging			Leklengtes (m)			
	tijdstip (s)	ΔP (kPa)	Mechanisme	tijdstip (s)	pos 1	pos 2	pos 3
X37	107,48	+4,29	4	107,48	golfklap		
				106,96	0,4	te laag	0,7
				106,92	0,3	te laag	0,7
				106,88	0,3	te laag	0,8
	112,44	+5,08	4	112,44	golfklap		
				111,96	0	te laag	0,6
				111,92	0	te laag	0,7
				111,88	0,3	te laag	0,6
	117,44	+3,66	4	117,44	golfklap		
				117,00	0,3	te laag	0,9
				116,96	0,4	te laag	0,7
				116,92	0,5	te laag	0,6
X03	221,92	+4,31	2	221,92	golfklap		
				221,88	te hoog	0,9	ca. 1
				221,84	0	0,7	ca. 1
				221,80	0,4	0,6	ca. 1
	226,08	+2,41	2	226,08	golfklap		
				225,88	0,4	0,4	ca. 1
				225,84	0,6	0,4	ca. 1
				225,80	1	0,4	ca. 1
	230,16	+2,36	2	230,16	golfklap		
				230,04	0	0,4	ca. 1
				230,00	0,4	0,4	ca. 1
				229,96	0,7	0,5	> 1
X09	176,92	-0,48	3	176,92	golfklap		
				176,80	te hoog	te laag	0,9
				176,76	0	te laag	0,7
				176,72	0,1	te laag	0,8
	181,04	+0,84	3	181,04	golfklap		
				180,84	te hoog	te laag	0,7
				180,80	0,3	0	0,9
	185,12	+0,30	3	185,12	golfklap		
				184,96	te hoog	te laag	0,7
184,92				te hoog	te laag	0,7	

golfklap: meetpunten zijn niet te fitten door aanwezigheid van een golfklap (grillig stijghoogteverloop)

te laag : meetpunt ligt onder alle berekende stijghoogte waarden

te hoog : meetpunt ligt boven alle berekende stijghoogte waarden

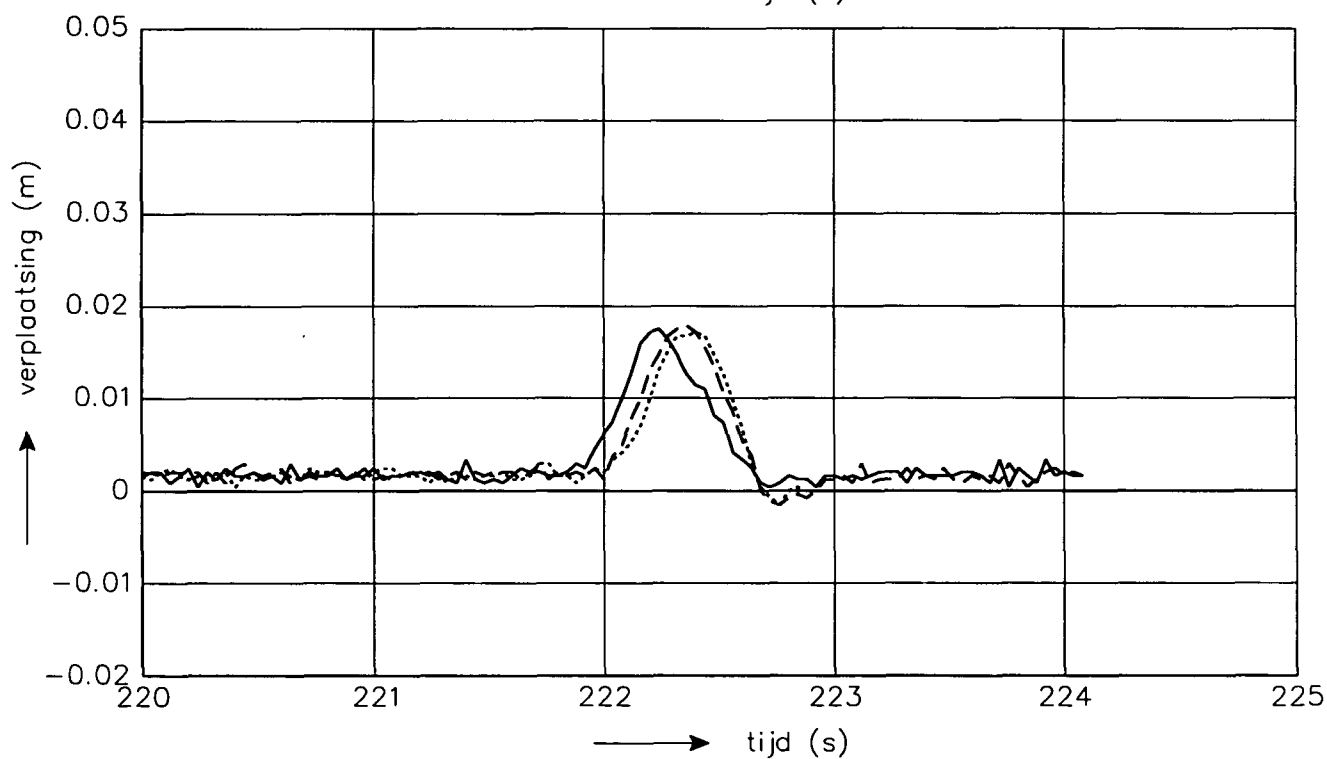
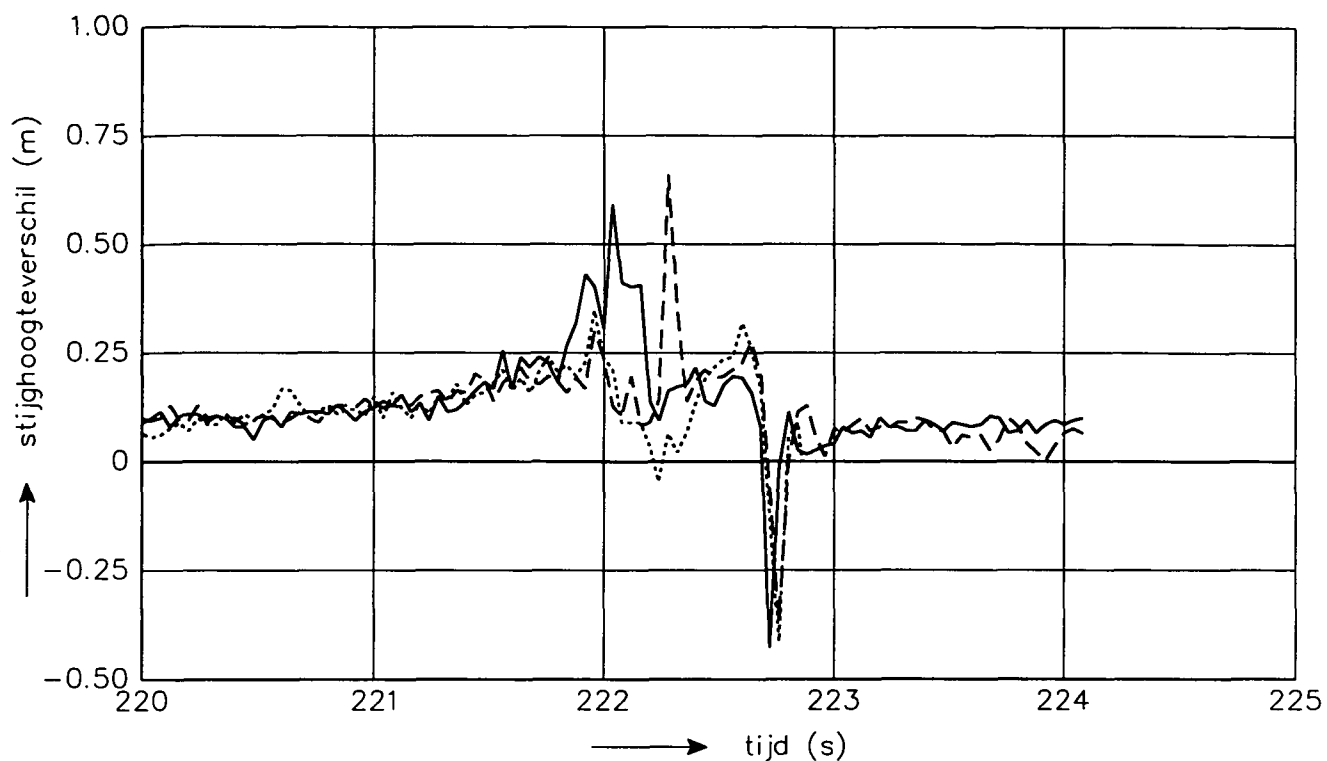
Tabel 2 Resultaten quasi-statische analyse

Proef	DRO 8	DRO 17	DRO 26
	(pos 1)	(pos 2)	(pos 3)
X37	-0,05	-0,06	-0,06
X03	-0,07	-0,10	-0,07
X09	-0,09	-0,08	-0,07

Tabel 3 Mogelijke correcties in m waterkolom voor drukopnemers onder de blokken

Proef	Locatie	Tijdsinterval (s)	Leklengte (m)
X03	VPL 3 (tussen front en klap)	223 - 227	0,7
X09	VPL 7 (onder hoofdklap)	175 - 180	0,3
X37	VPL 7 (onder hoofdklap)	105 - 110	0,6

Tabel 4 Locatie en tijdsinterval van analyse traagheidseffect



- golf 1
- - - golf 2
- golf 3

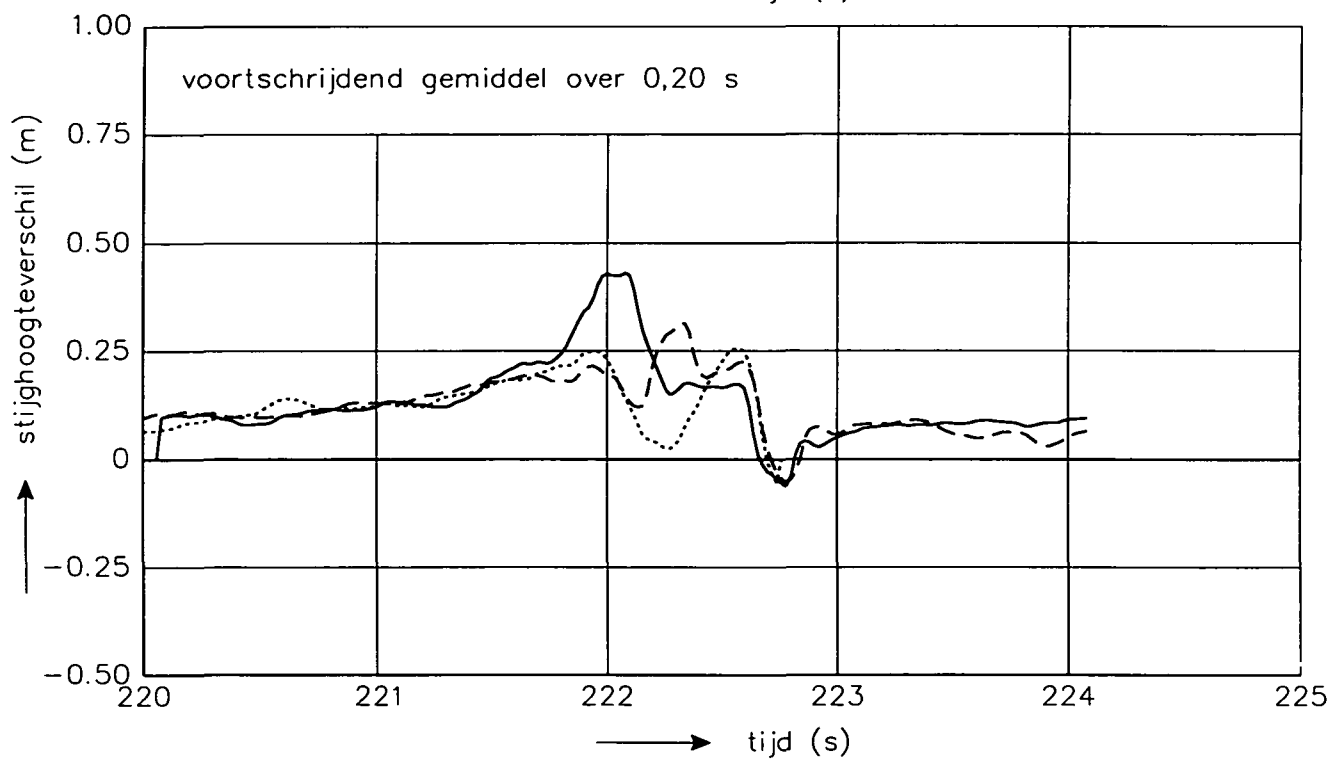
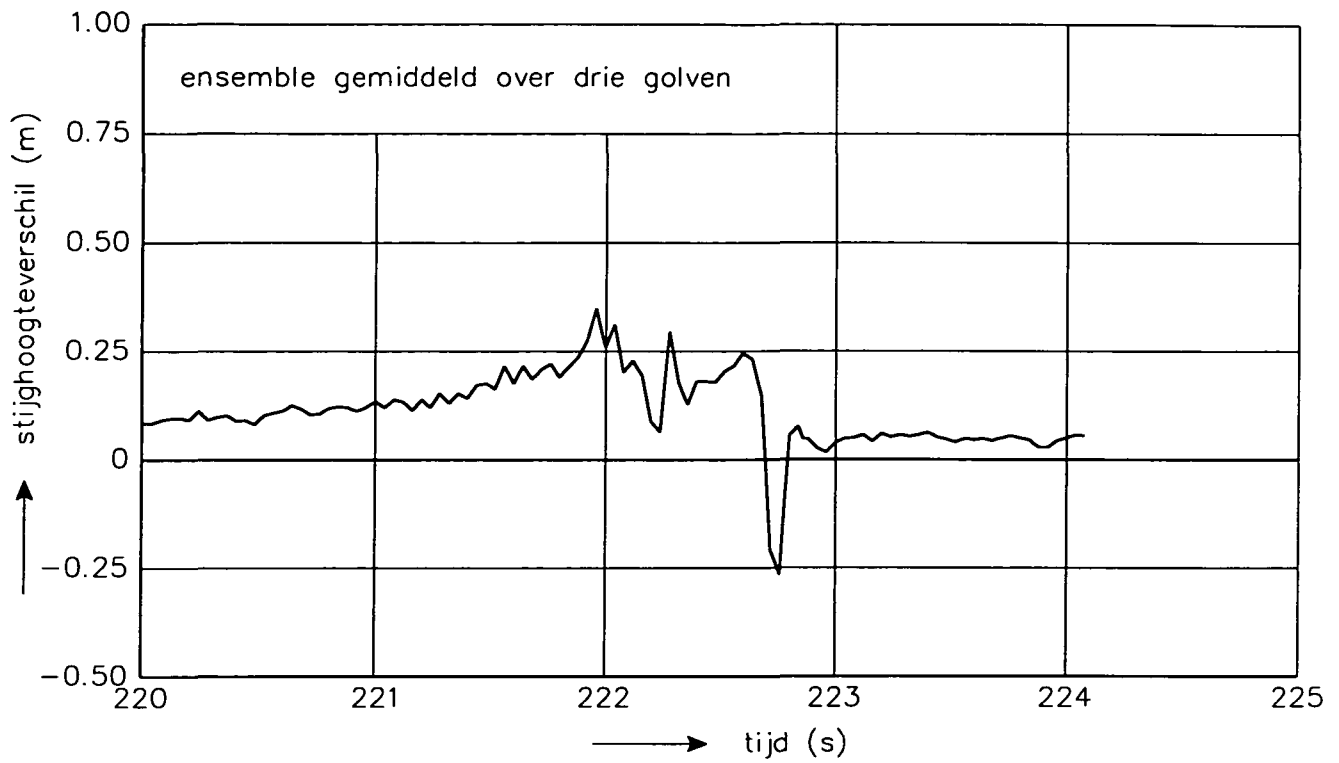
RUWE MEETSIGNALLEN TER PLAATSE VAN VPL3

PROEF X03

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

H 1770

FIG. 1



- golf 1
- - - golf 2
- golf 3

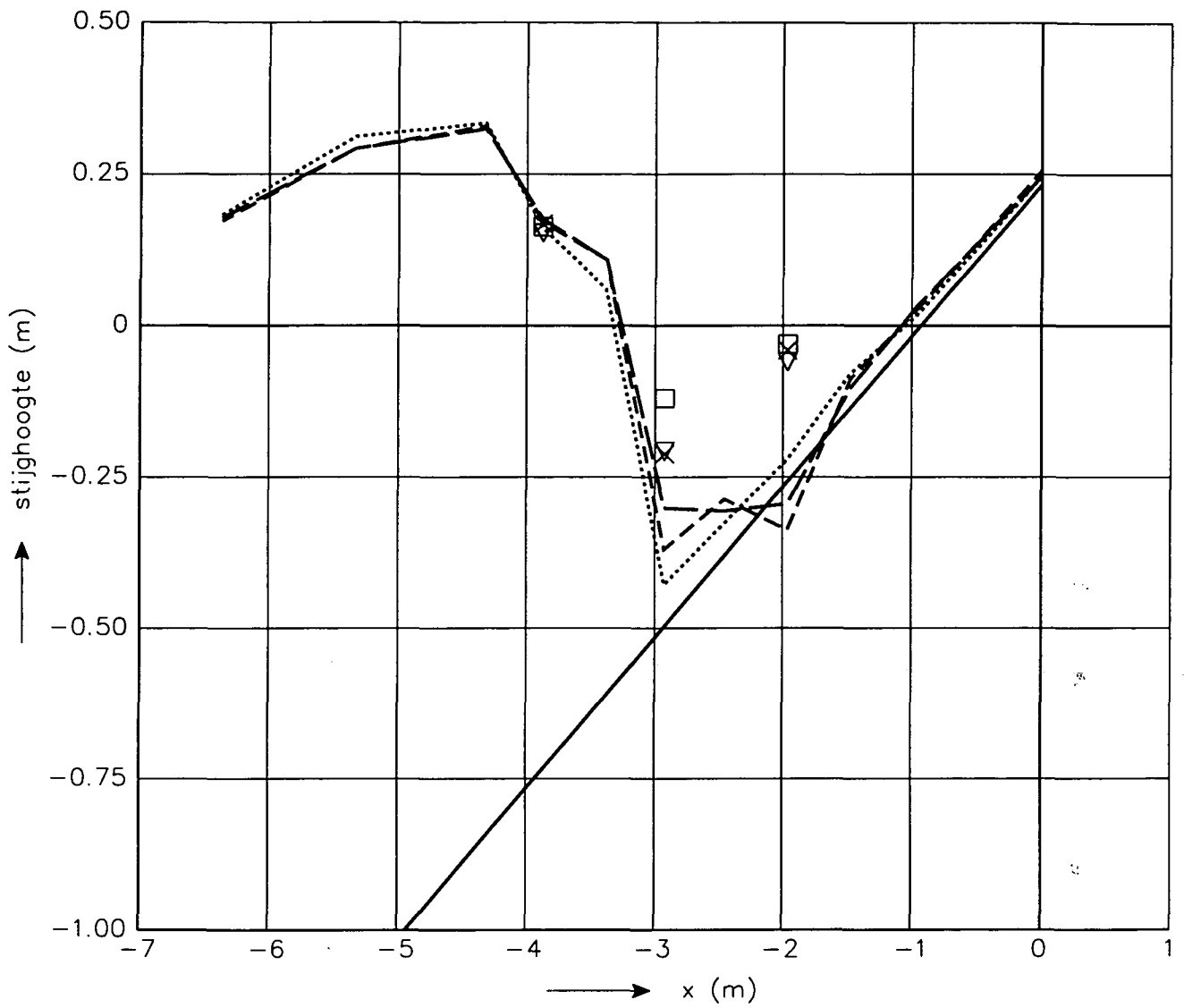
BEWERKTE MEETSIGNALLEN TER PLAATSE VAN VPL3

PROEF X03

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

H 1770

FIG. 2



- z
- - - φ_t golf 1
- · - φ_t golf 2
- φ_t golf 3
- φ_f golf 1
- × φ_f golf 2
- ▽ φ_f golf 3

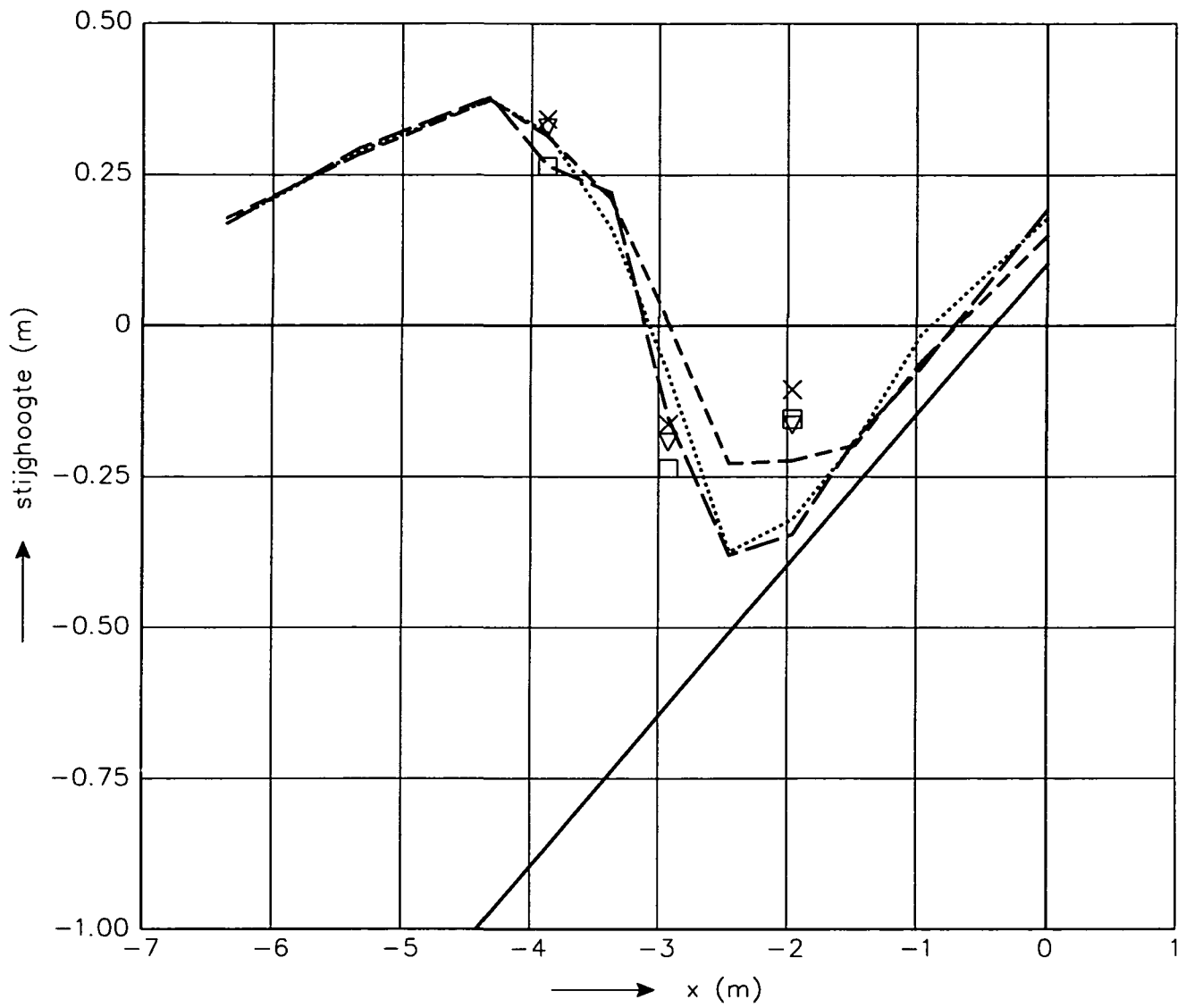
PERIODIEKE STIJGHOOGTES VANAF $t = 221,80$ s

PROEF X03

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

H 1770

FIG. 3



- z
- - - φ_t golf 1
- - - φ_t golf 2
- φ_t golf 3
- φ_f golf 1
- × φ_f golf 2
- ▽ φ_f golf 3

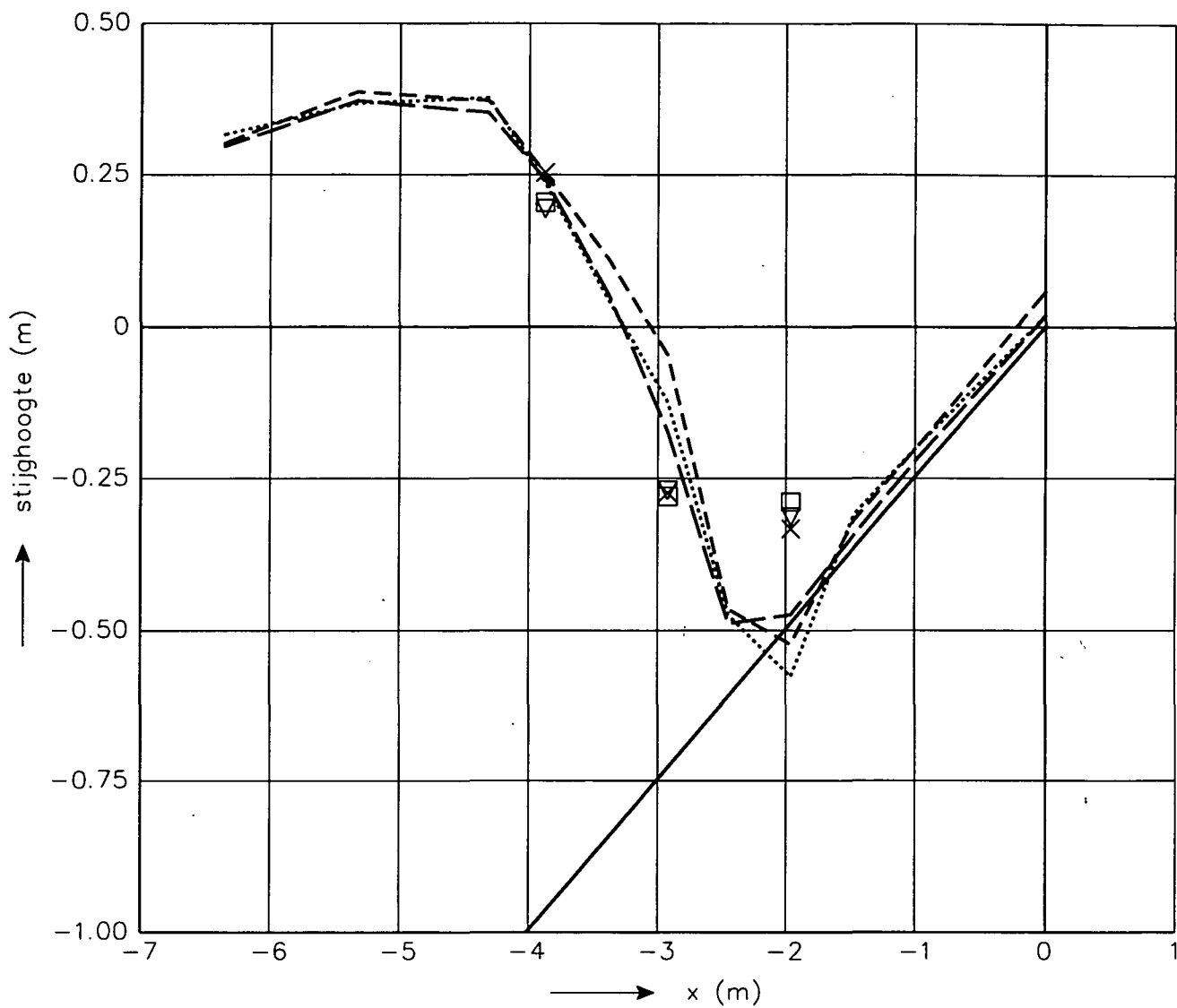
PERIODIEKE STIJGHOOGTES VANAF $t = 176,72$ s

PROEF X09

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

H 1770

FIG. 4



- z
- - - φ_t golf 1
- - - φ_t golf 2
- φ_t golf 3
- φ_f golf 1
- × φ_f golf 2
- ▽ φ_f golf 3

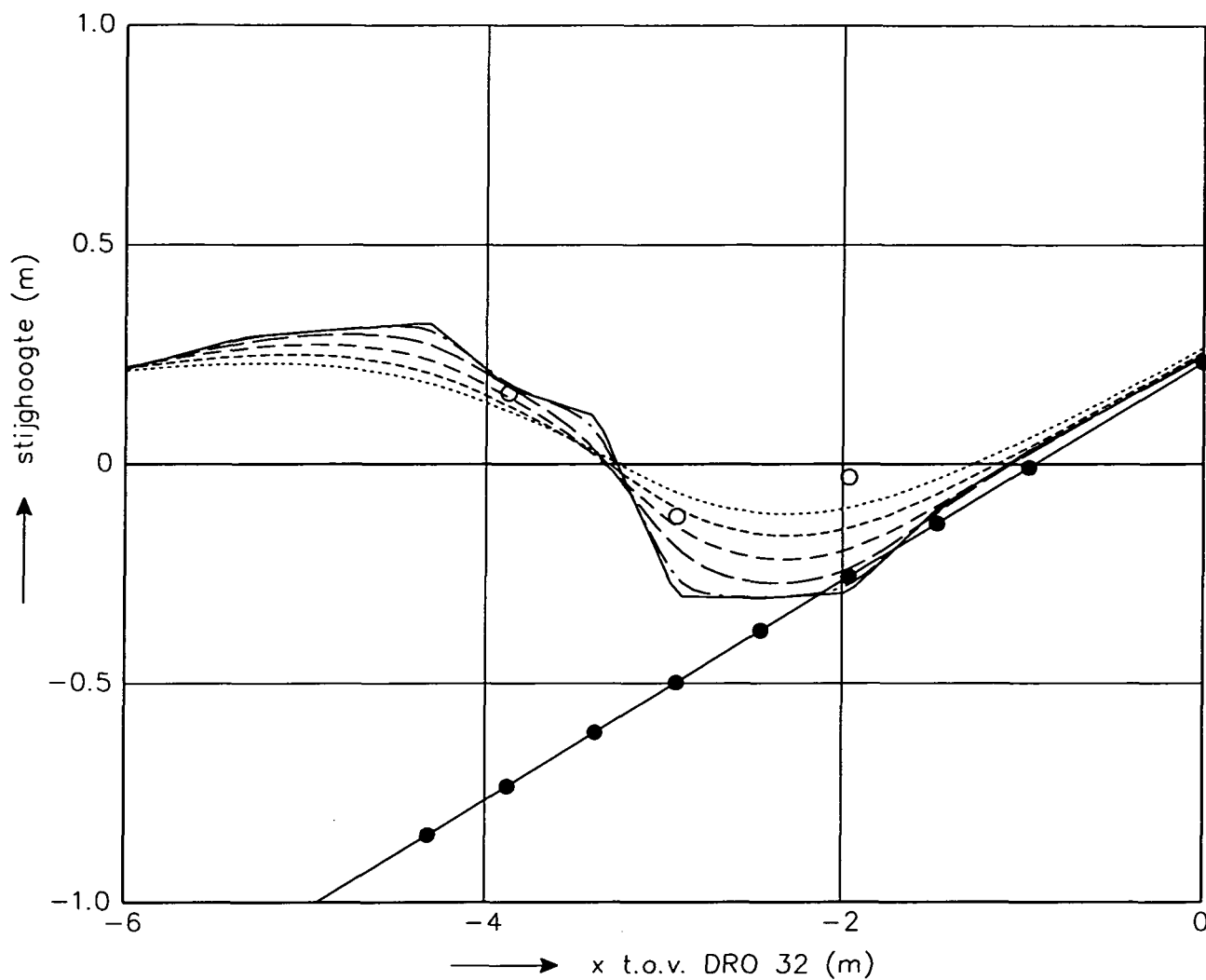
PERIODIEKE STIJGHOOGTES VANAF $t = 106,96$ s

PROEF X37

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

H 1770

FIG. 5



- z
- φ_t
- φ_f
- - - $\Lambda = 0,1$
- - - $\Lambda = 0,3$
- - - $\Lambda = 0,5$
- - - $\Lambda = 0,7$
- $\Lambda = 0,9$

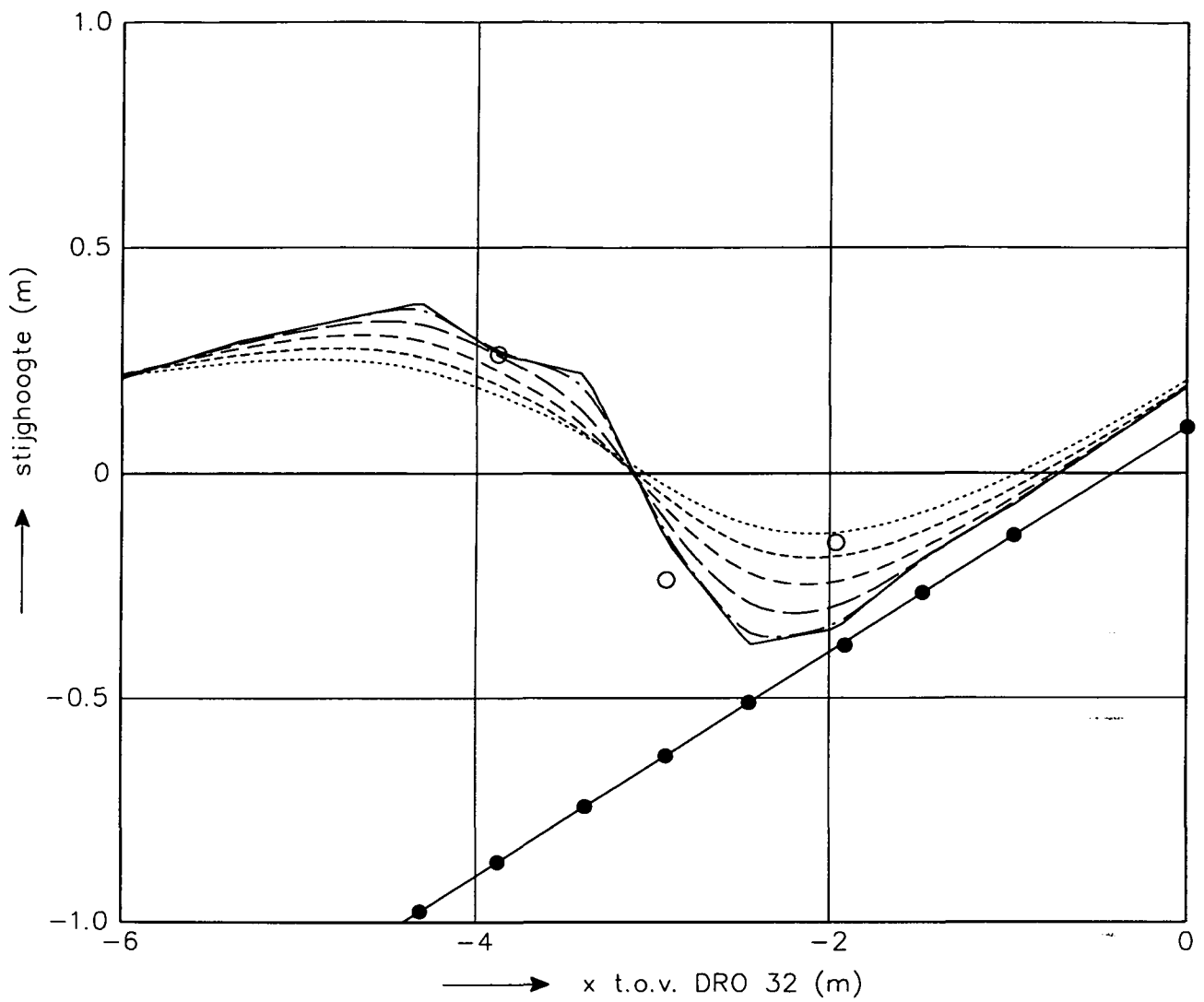
VOORBEELD BEPALING LEKLENGTE OP $t = 221,80$ s

PROEF X03

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

H 1770

FIG. 6



- z
- φ_t
- φ_f
- · - $\Lambda = 0,1$
- - - $\Lambda = 0,3$
- - - $\Lambda = 0,5$
- · - · - $\Lambda = 0,7$
- · · $\Lambda = 0,9$

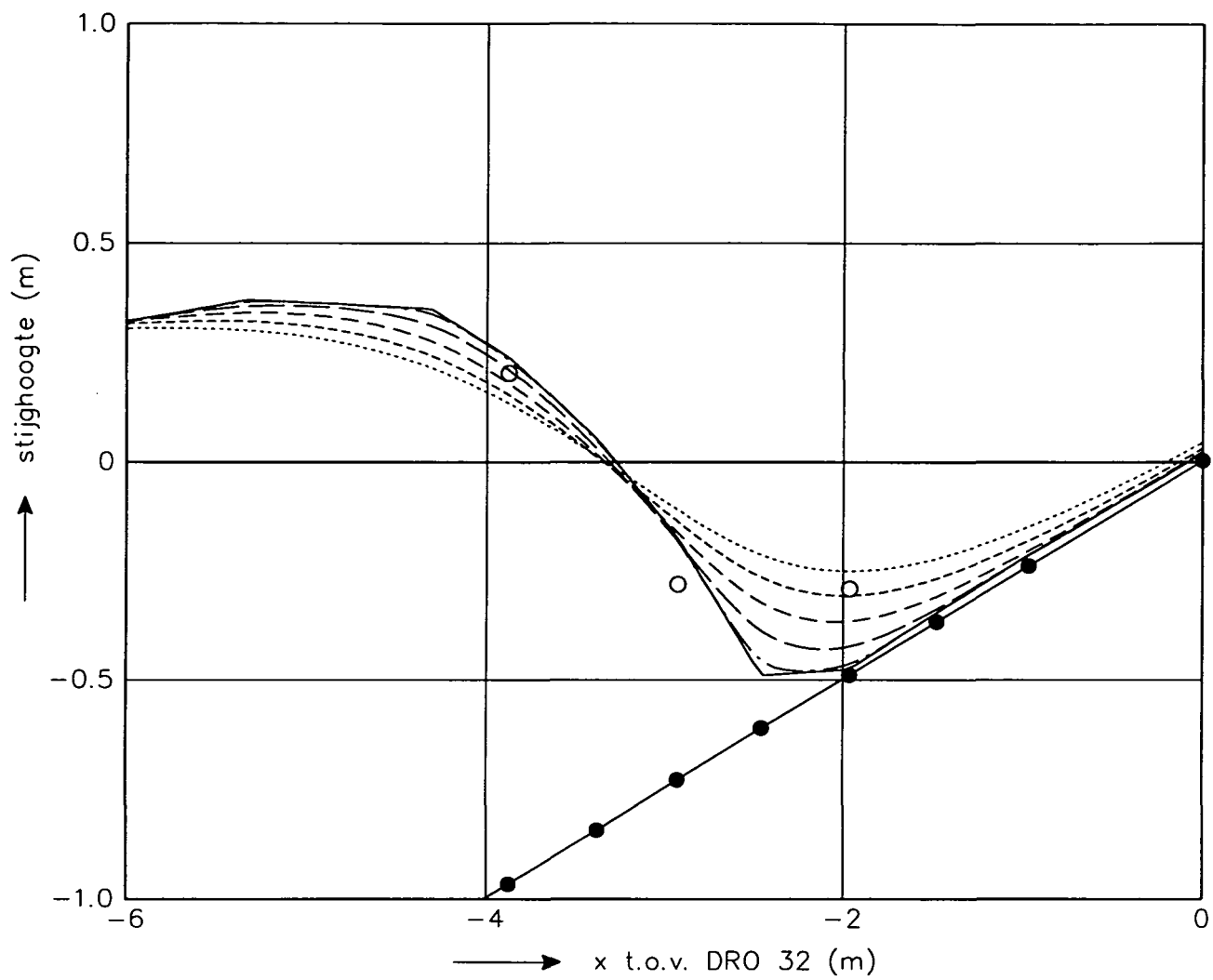
VOORBEELD BEPALING LEKLENGTE OP $t = 176,72$ s

PROEF X09

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

H 1770

FIG. 7



- z
- φ_t
- φ_f
- · - λ = 0,1
- - - λ = 0,3
- - - λ = 0,5
- · - λ = 0,7
- · · λ = 0,9

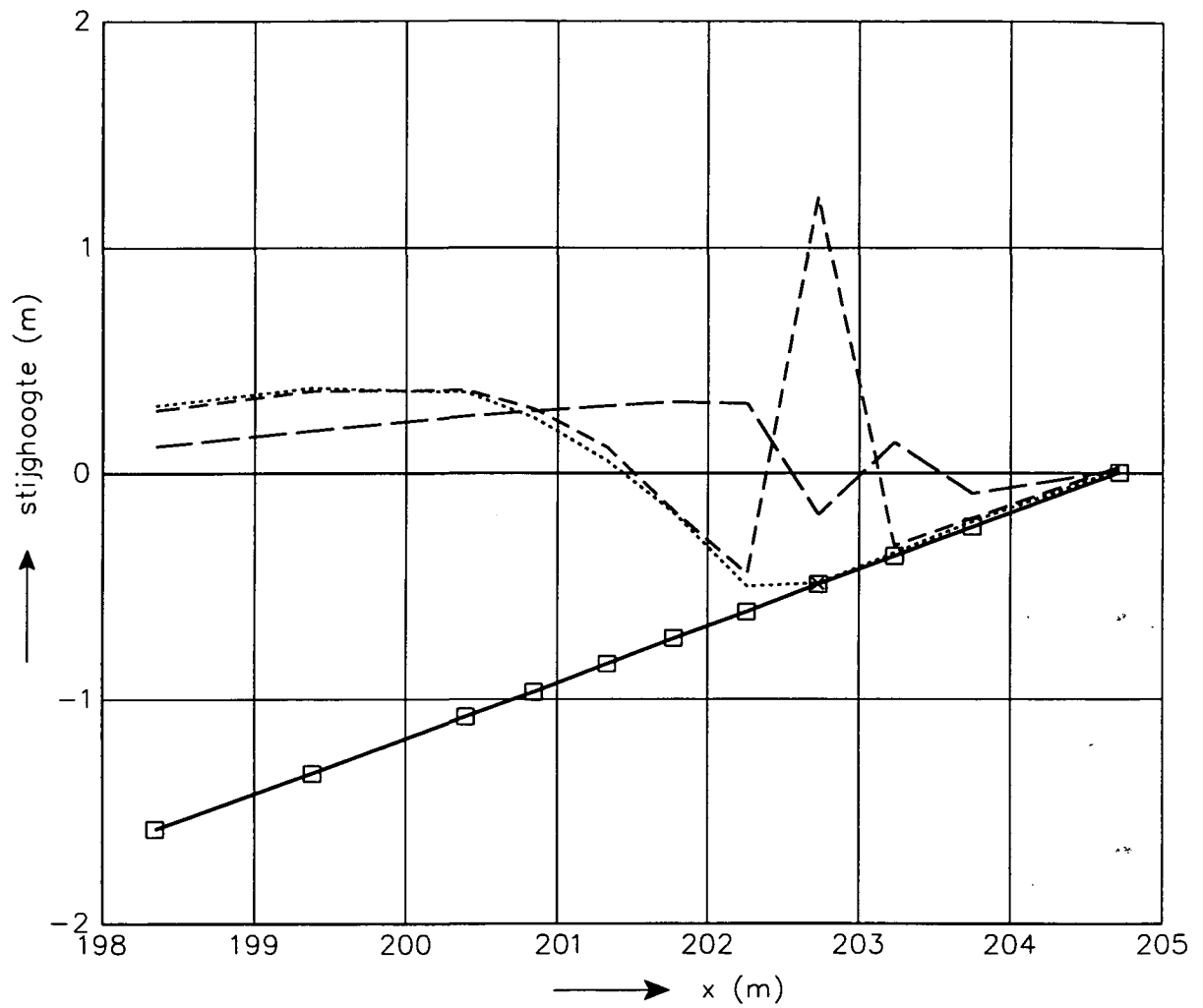
VOORBEELD BEPALING LEKLENGTE OP $t = 106,96$ s

PROEF X37

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

H 1770

FIG. 8



- — — — $t = 107.48$ s
- · - · - $t = 107.00$ s
- $t = 106.96$ s
- □ — dro
- x meetblok

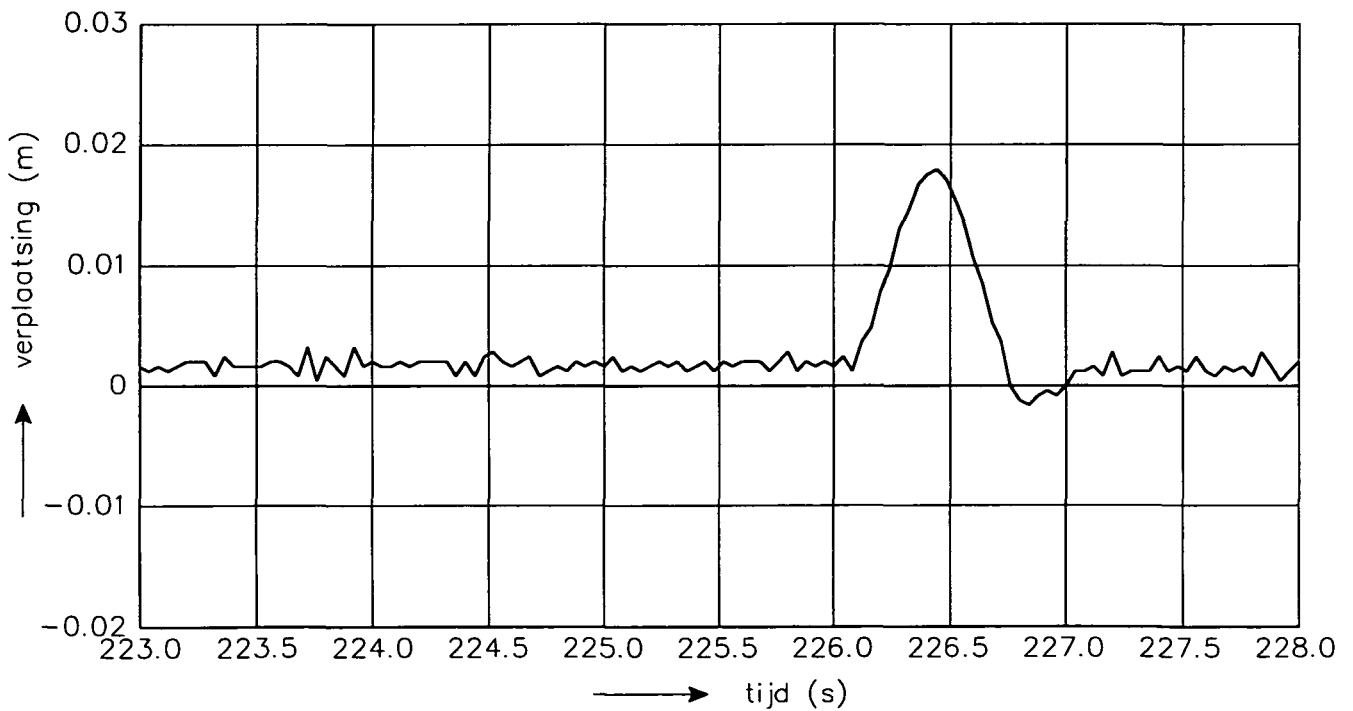
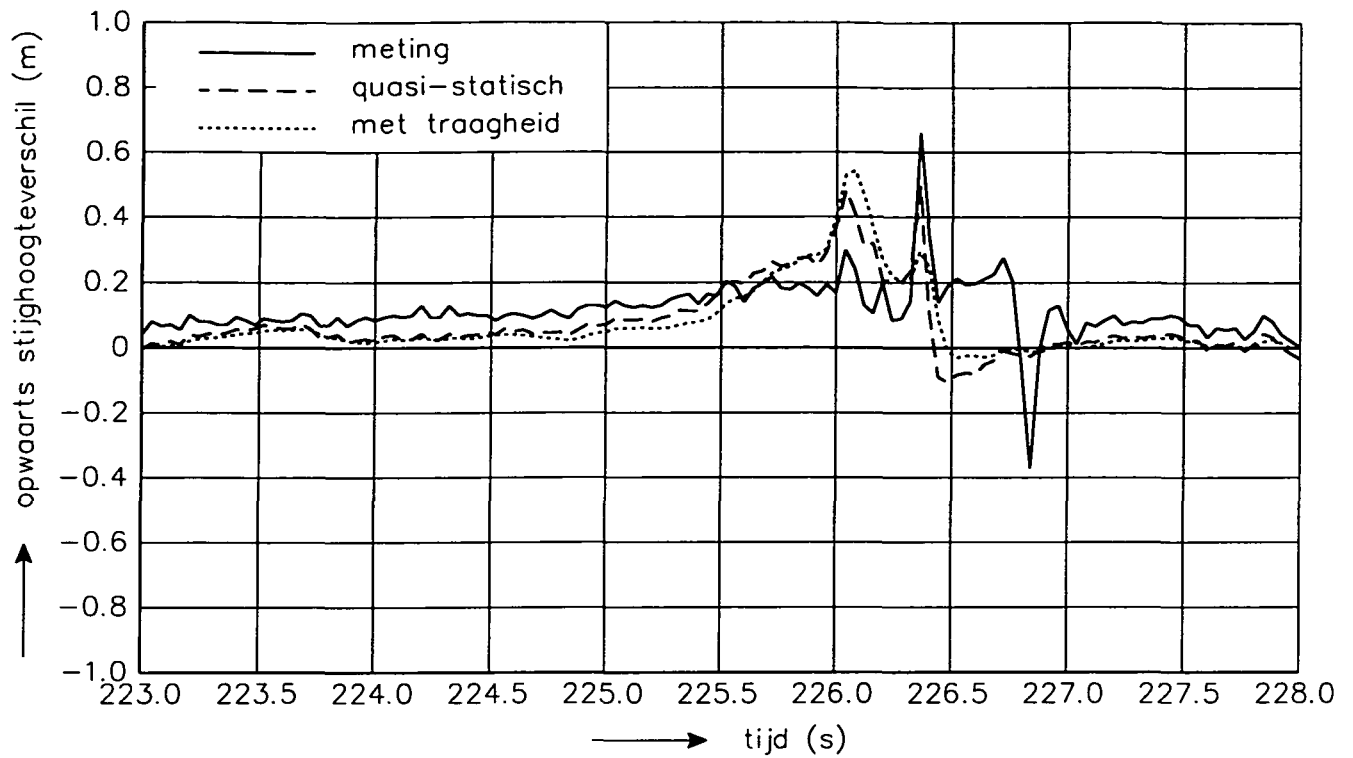
STIJGHOOGTE OP DE ZETTING VOOR, TIJDENS
EN NA DE PRIMAIRE GOLFKLAP

PROEF X37

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

H 1770

FIG. 9



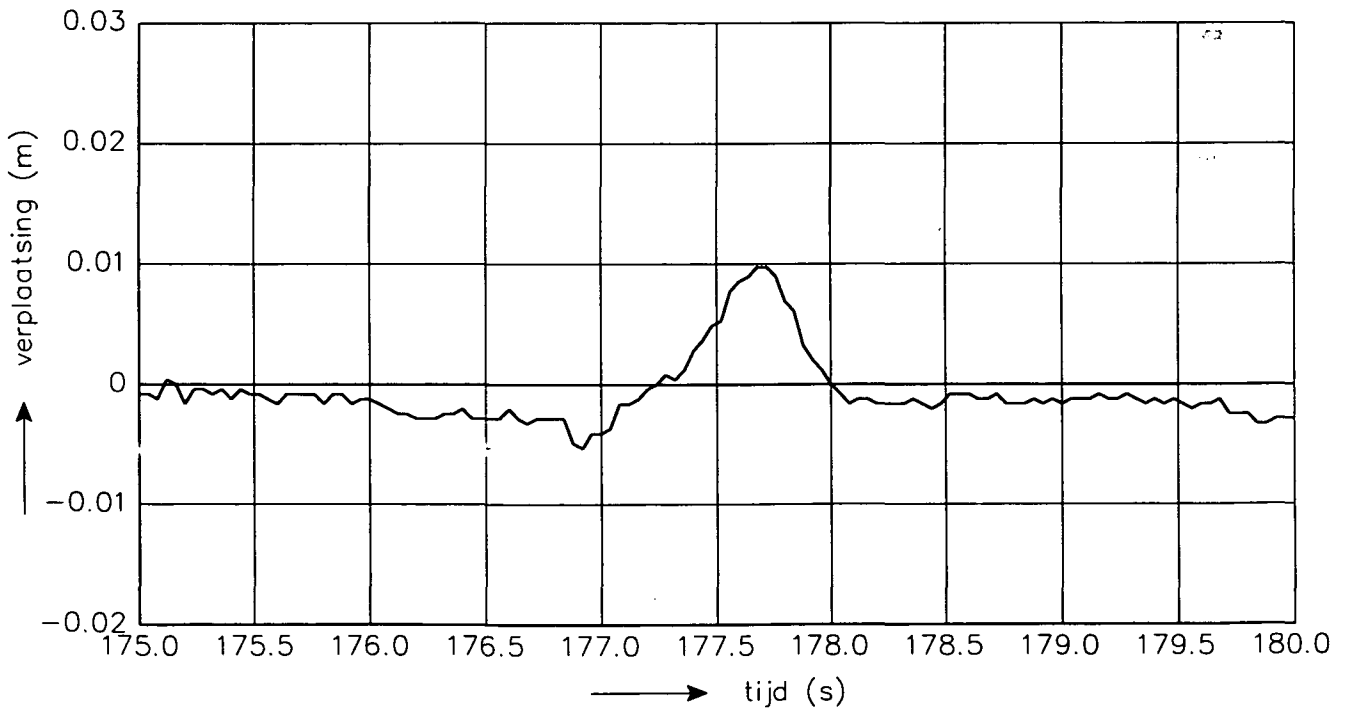
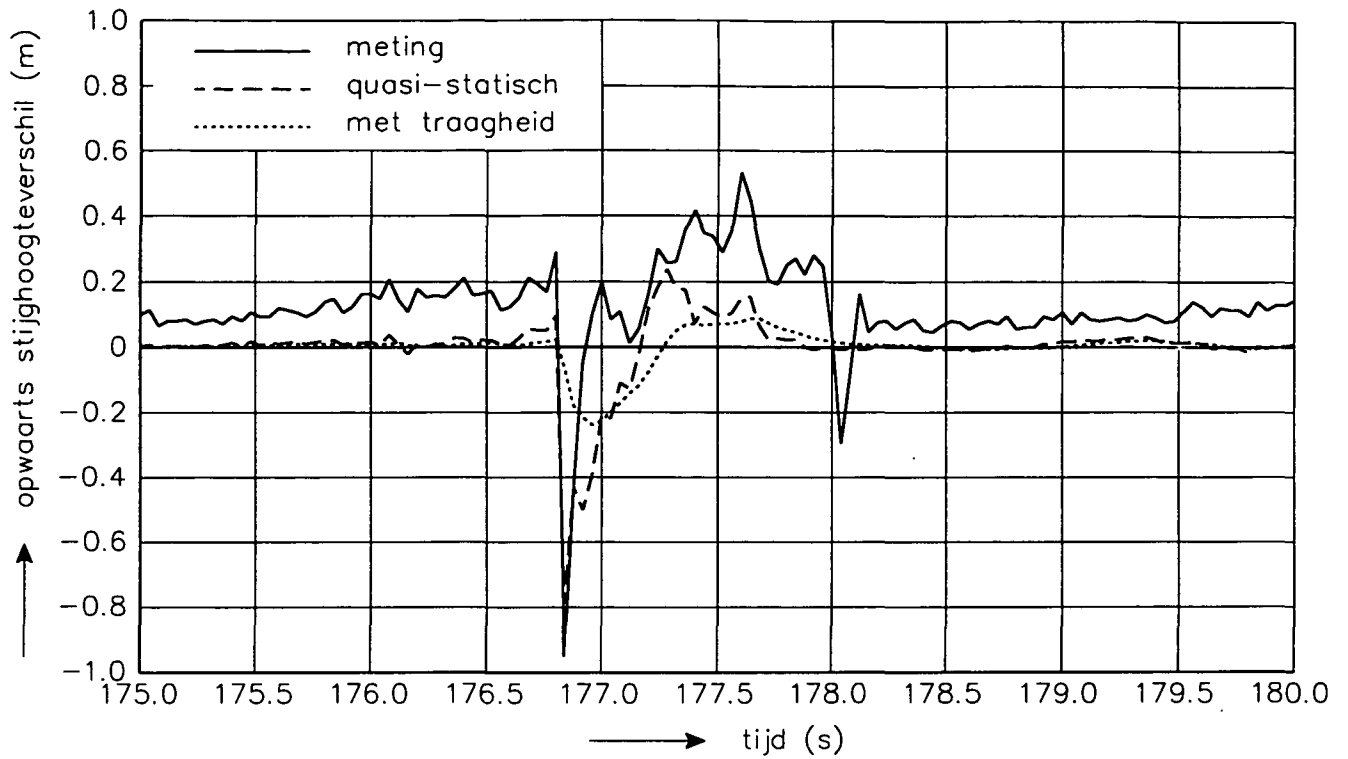
STIJGHOOGTEVERSCHIL VOLGENS METING, QUASI-
 STATISCHE BEREKENING EN VOLLEDIGE BEREKENING

PROEF X03

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

H 1770

FIG. 10



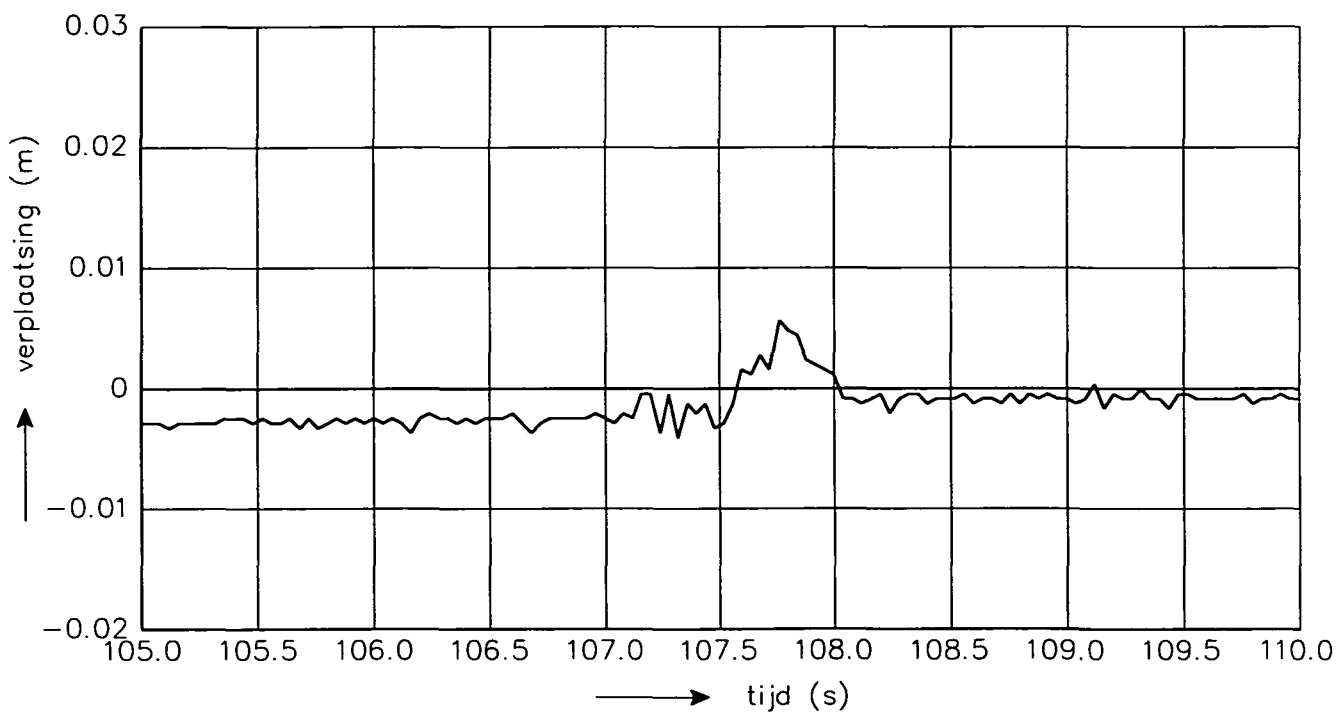
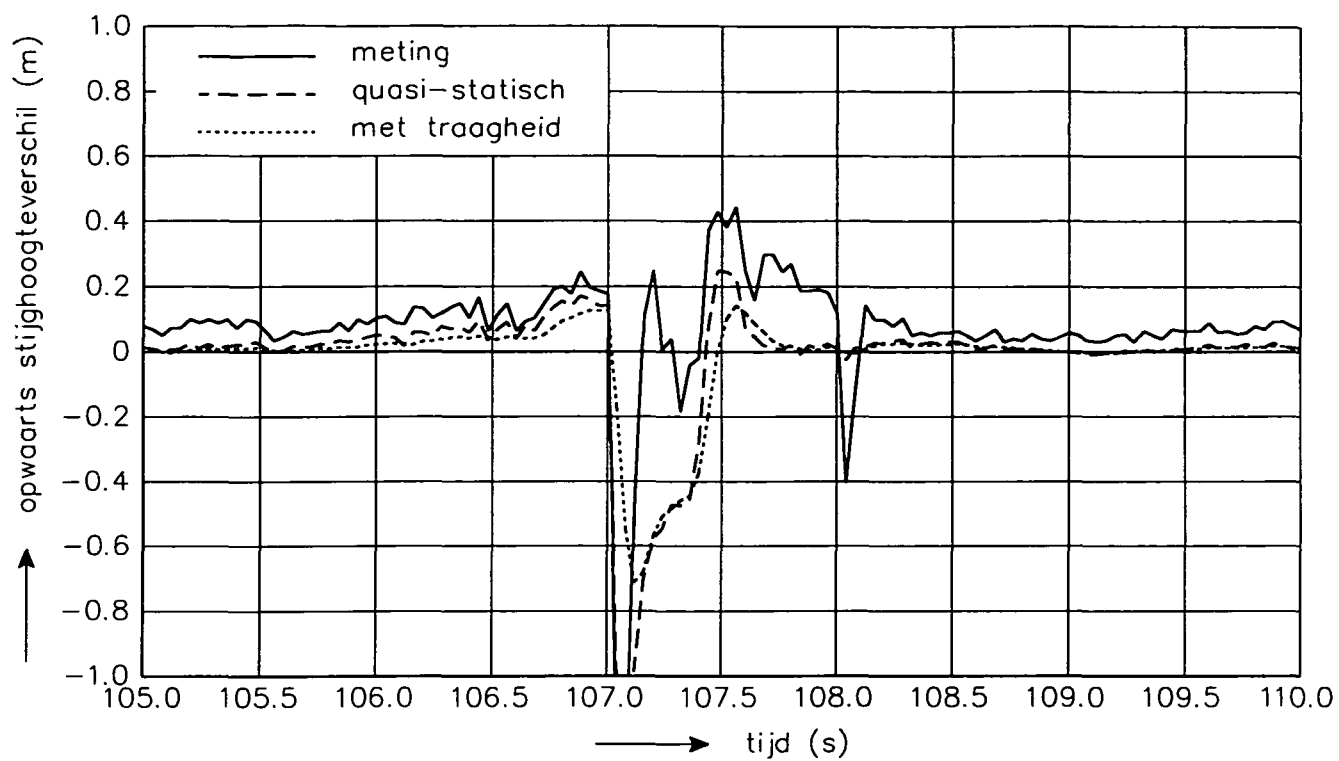
STIJGHOOGTEVERSCHIL VOLGENS METING, QUASI-
STATISCHE BEREKENING EN VOLLEDIGE BEREKENING

PROEF X09

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

H 1770

FIG. 11



STIJGHOOGTEVERSCHIL VOLGENS METING, QUASI-
 STATISCHE BEREKENING EN VOLLEDIGE BEREKENING

PROEF X37

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

H 1770

FIG. 12

Sectie 4

De invloed van geulen op de stabiliteit van steenzettingen



Aan

Leden TAW-A2 (Steenzettingen).

Contactpersoon

ir. B.P. Rigter.

Doorkiesnummer

Datum

9 april 1992

Bijlage(n)

Ons kenmerk

Uw kenmerk

Onderwerp

Invloed van geulen op de stabiliteit van steenzettingen.

I. INLEIDING.

De proeven in de Deltagoot ter bepaling van de stabiliteit van blokken op klei hebben een veel lagere stabiliteit laten zien dan op grond van vroegere proeven werd verwacht. Bij die vroegere proeven werd de klei met optimale vochtigheid aangebracht en verdicht, zodat de klei monolitisch was. Bovendien waren de spleten in de toplaag overal minimaal. Bij de recente proeven is de bovenkant van de klei met de schop afgewerkt met klei, al dan niet verdicht, en afkomstig van andere oppervlakten, zodat die bovenkant niet lang verbonden was met de aangebrachte ca. 0,80 m. dikke kleiplakken. Bovendien waren er veel betonblokken ingebouwd met ca. 5 mm. kleinere lengte- en breedte-afmetingen, teneinde te voorkomen dat een instabiel blok niet zou bewegen als gevolg van inklemming. Dit betekent dat er veel spleten van ca. 5 mm. waren. Bij elke inspectie nadat beproeving tot instabiliteit (beweging van losse blokken) had plaatsgevonden bleek dat er aanzienlijke geulen (een à twee decimeters breed en enkele centimeters diep) waren gevormd.

Uit de praktijk van blokken op klei wordt gemeld dat er onder de blokken dezelfde of nog diepere geulen worden waargenomen en dat bij een beetje storm regelmatig blokken uit zo'n zetting worden gelicht.

Bij dergelijke geulen kan het rekenmodel van Wolsink niet meer van toepassing zijn omdat de doorlatendheid van de geulen onder de blokken zo groot wordt dat de bewegingsvergelijking voor het water niet meer beschreven kan worden met "Darcy". In deze nota wordt aan de hand van drie theoretische situaties

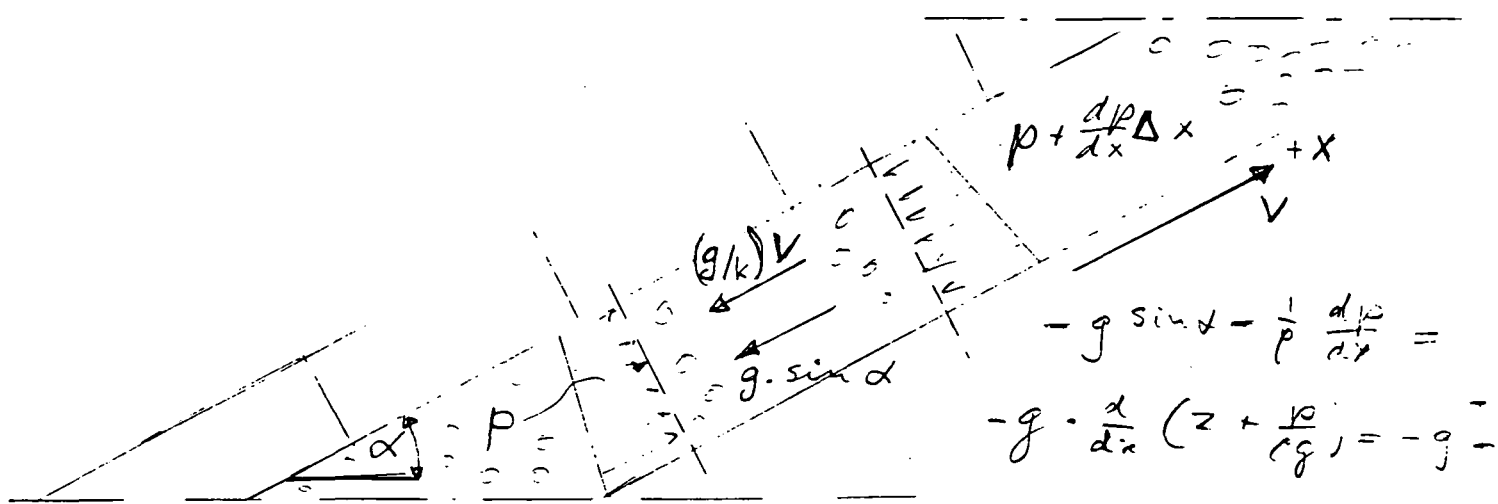
aangetoond dat bij diepe geulen de traagheidsterm in de bewegingsvergelijking van het water niet verwaarloosd mag worden. Deze term veroorzaakt dan opslingeringen, met als gevolg grotere filtersnelheden dan met de stationaire theorie berekend worden, of veroorzaakt grotere versnellingen van blokken die uit de toplaag gedrukt worden, dan met de stationaire theorie kunnen worden berekend.

In hoofdstuk II worden de basisvergelijkingen afgeleid. In de hoofdstukken III, IV en V worden enkele concretere situaties bestudeerd. In hoofdstuk VI staan de conclusies en aanbevelingen.

 -

II. DE BASISVERGELIJKINGEN.

A. De impuls- of bewegingsvergelijking.



Figuur 1: Definitieschets voor de impulsvergelijking.

In Figuur 1 is een steenzetting getekend met een filter onder de toplaag. Als de stroming in het filter evenwijdig loopt met het talud luidt de bewegingsvergelijking:

$$(1) \quad \frac{1}{n} \frac{\delta v}{\delta t} = -gI - \frac{g}{k_f} \cdot v$$

In deze formule stelt het linkerlid de versnelling voor van het water in het filter, de eerste term van het rechterlid is de versnelling (vertraging) als gevolg van de gradiënt van de

stijghoogte en de tweede term de versnelling (vertraging) als gevolg van de stromingsweerstand. Verder geldt:

- v: specifiek debiet van het water in het filter [m/s], positief indien gericht in de positieve x-richting;
- n: poriëngehalte van het filtermateriaal [-];
- g: versnelling van de zwaartekracht [m/s²];
- I: gradiënt van de stijghoogte [-], dus:

$$I = \frac{\delta \varphi}{\delta x}$$

met:

- φ : stijghoogte van het water in het filter;
- k_f : doorlatendheidscoëfficiënt van het filtermateriaal [m/s].

In deze studie is de stromingsweerstand gelineariseerd verondersteld volgens Darcy. Bij grotere stroomsnelheden zal de weerstand kwadratisch toenemen. We veronderstellen dat dit toch verdisconteerd kan worden tot een lineaire weerstand door de coëfficiënt k_f aan te passen (zie hoofdstuk III, paragraaf A).

Tenslotte wordt nog opgemerkt dat de afgeleide naar de tijd in het linkerlid eigenlijk nog aangevuld moet worden met de afgeleide naar x van het impulstransport:

$$\frac{v}{n} \cdot \frac{\delta \left(\frac{v}{n} \right)}{\delta x}$$

Pas dan geeft het linkerlid de juiste uitdrukking voor de versnellings (of traagheids) term. Deze term blijkt echter verwaarloosbaar. (Als er geen water door de toplaag stroomt is deze term in ieder geval gelijk aan 0; bij een zeer doorlatende toplaag en bij een kleine laagdikte van het filter kan deze term overigens nog wel van betekenis zijn.)

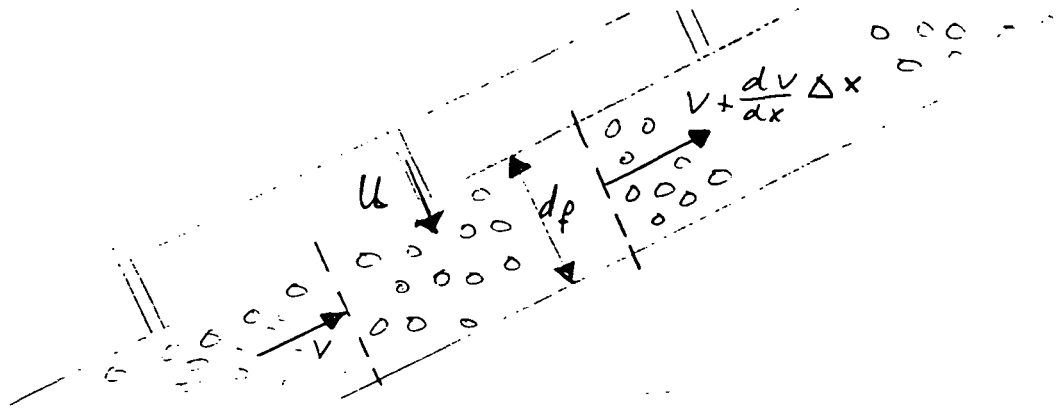
In de theorie van Wolsink voor steenzettingen met granulaire filters is de traagheidsterm (het linkerlid van vergelijking 1 en bovenstaande impulstransportterm) overigens impliciet verwaarloosd. Wolsink gaat namelijk uit van de wet van Darcy, die uit vergelijking (1) ontstaat als de traagheidsterm verwaarloosd wordt:

$$(1') \quad v = -kI$$

Als de doorlatendheid van het filtermateriaal groot wordt kan het zijn dat de weerstandsterm in de bewegingsvergelijking (1) beduidend kleiner wordt dan de stijghoogteterm en dat de traagheidsterm dus niet verwaarloosd mag worden. In deze studie wordt nagegaan wanneer dat het geval kan zijn.

-

B. De continuïteitsvergelijking.



Figuur 2: Definitieschets voor de continuïteitsvergelijking.

In Figuur 2 is een definitieschets ten behoeve van de continuïteitsvergelijking opgenomen. Bij een doorlatende toplaag en een ondoorlatende basis luidt deze:

$$(2) \quad u = d_f \frac{\delta v}{\delta x}$$

waarin:

- u: het specifiek debiet van het water dat door de toplaag naar binnen gaat [m/s];
- d_f: dikte van het filter [m];

Als voor het specifiek debiet u wordt aangenomen dat dit evenredig is met het stijghoogteverval over de toplaag:

$$(a) \quad u = -k_T \frac{\varphi - \varphi_T}{d_T}$$

waarin:

- k_T: doorlatendheidscoëfficiënt van de toplaag [m/s];
- d_T: dikte van de toplaag [m];
- φ: stijghoogte van het water in het filter [m];
- φ_T: stijghoogte van het water op de toplaag [m],

volgt uit vergelijkingen (2) en (a):

$$(b) \quad \frac{\delta v}{\delta x} = -\frac{k_T}{d_f d_T} \cdot (\varphi - \varphi_T)$$

Uit de vergelijkingen (1) en (b) volgt tenslotte:

$$(c) \quad \frac{k_T}{ng d_f d_T} \cdot \frac{\delta(\varphi - \varphi_T)}{\delta t} = \frac{\delta^2 \varphi}{\delta x^2} - \frac{(\varphi - \varphi_T)}{\Lambda^2}$$

waarin :

Λ : de leklengte [m], gedefinieerd door:

$$\Lambda = \sqrt{d_f d_T \cdot \frac{k_f}{k_T}}$$

Stel nu dat φ en φ_T periodieke functies zijn met periode T dan is de waarde van het linkerlid maximaal:

$$\frac{k_f}{ngd_f d_T} \cdot \frac{2\pi (\varphi - \varphi_T)_{\max}}{T}$$

De waarde van de tweede term van het rechterlid is maximaal:

$$\frac{(\varphi - \varphi_T)_{\max}}{\Lambda^2}$$

Hieruit volgt dat het linkerlid verwaarloosd mag worden als

$$(d) \quad T \gg 2\pi \frac{k_f}{ng}$$

Een geul van een paar mm diepte heeft al gauw een k_f van 5 m/s zodat de traagheidsterm verwaarloosd mag worden als $T \gg 3$ s. Dit wil zeggen dat bij windgolven de traagheidsterm niet verwaarloosd mag worden.

Als de geulen nog dieper (k_f nog groter) zijn mag dat ook niet bij deiningsgolven en seiches!

Als het linkerlid wordt verwaarloosd ontstaat de bekende kwasi-stationaire d.v. van Wolsink voor de stijghoogte in het filter.

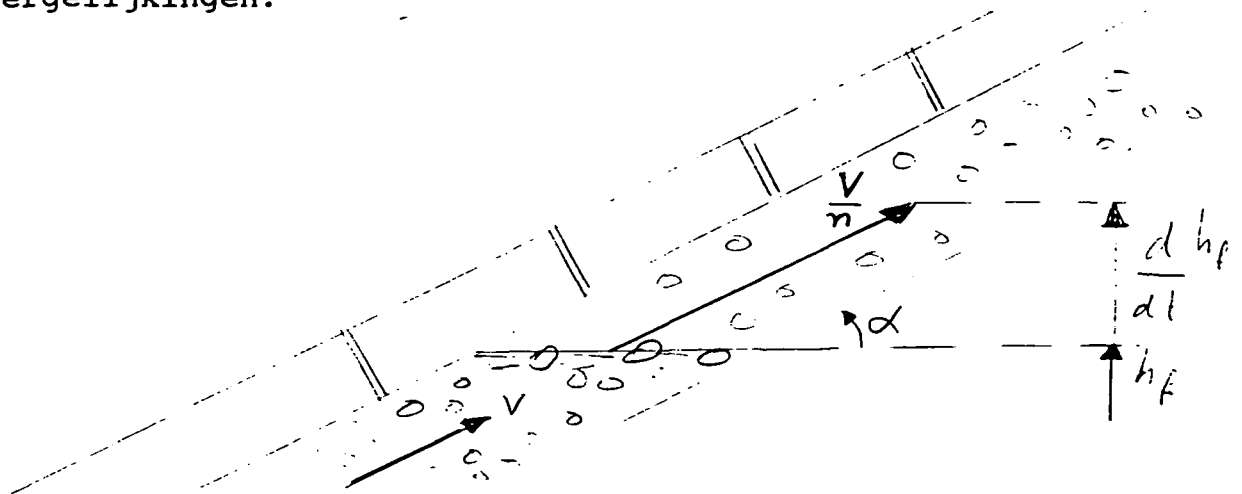
Het probleem van tijdsafhankelijke stroming in goeddoorlatende filterlagen met doorlatende toplagen kan in principe (numeriek) worden opgelost met vergelijking (c). Deze vergelijking leent zich echter minder gemakkelijk voor analytische benaderingen van de problematiek van steenzettingen op taluds. Om de invloed van de traagheidsterm analytisch te onderzoeken zullen we daarom veronderstellen dat de toplaag als water-ondoorlatend mag worden beschouwd, dus $u = 0$. Dit komt overeen met het geval van een oneindig grote leklengte en dus een lineair verloop van de stijghoogte. Een grote leklengte treedt ook op als de doorlatendheid van de filterlaag veel groter is dan die van de toplaag. Iets dergelijks doet zich voor indien er grote geulen in klei onder blokken voorkomen. De geulen gedragen zich dan als een filter met zeer grote doorlatendheid.

Bij deze aanname volgt uit vergelijking (2):

$$(2') \quad \frac{\delta v}{\delta x} = 0 \text{ ofwel } v = v(t)$$

Bij de aanname van een ondoorlatende toplaag is het specifiek debiet v dus onafhankelijk van de plaats.

C. Randvoorwaarde bij freatisch vlak en combinatie van de vergelijkingen.



Figuur 3: Randvoorwaarde freatisch vlak.

Uit eerdere notities is bekend (zie ook Figuur 3) dat de randvoorwaarde bij het freatisch vlak in het filter luidt:

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

waarin:

h_f : de hoogte van het freatisch vlak in het filter.

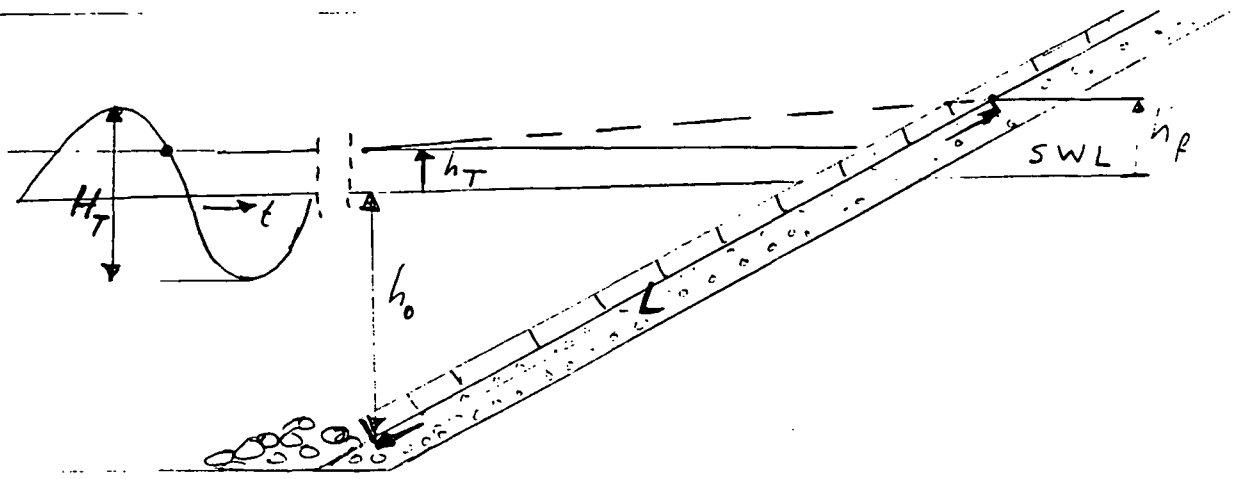
Omdat v bij een als waterondoorlatend beschouwde toplaag onafhankelijk is van de plaats volgt uit vergelijking (1) dat het verhang I ook onafhankelijk is van de plaats en dus alleen afhankelijk is van de tijd, dus (zie Figuur 4):

$$I = \frac{h_f - h_T}{L}$$

waarin:

h_T : de stijghoogte in het filter ter plaatse van zeker punt, bijvoorbeeld de teen van de zetting [m];

L : de afstand tussen freatisch vlak en de "teen", gemeten langs het talud [m].



Figuur 4: Grootte van het verhang.

Stellen we nu :

h_0 : de verticale afstand van de teen tot de gemiddelde waterstand [m]

Dan is:

$$L = \frac{(h_0 + h_f)}{\sin \alpha}, \text{ dus } I = \frac{(h_f - h_T) \cdot \sin \alpha}{(h_0 + h_f)}$$

Na substitutie van deze uitdrukking in vergelijking (1) volgt uit de vergelijkingen (1), (2') en (3) :

$$(4) \quad \frac{(h_0 + h_f)}{g \sin^2 \alpha} \cdot \frac{d^2 h_f}{dt^2} + \frac{n(h_0 + h_f)}{k_f \sin^2 \alpha} \cdot \frac{dh_f}{dt} + h_f = h_T$$

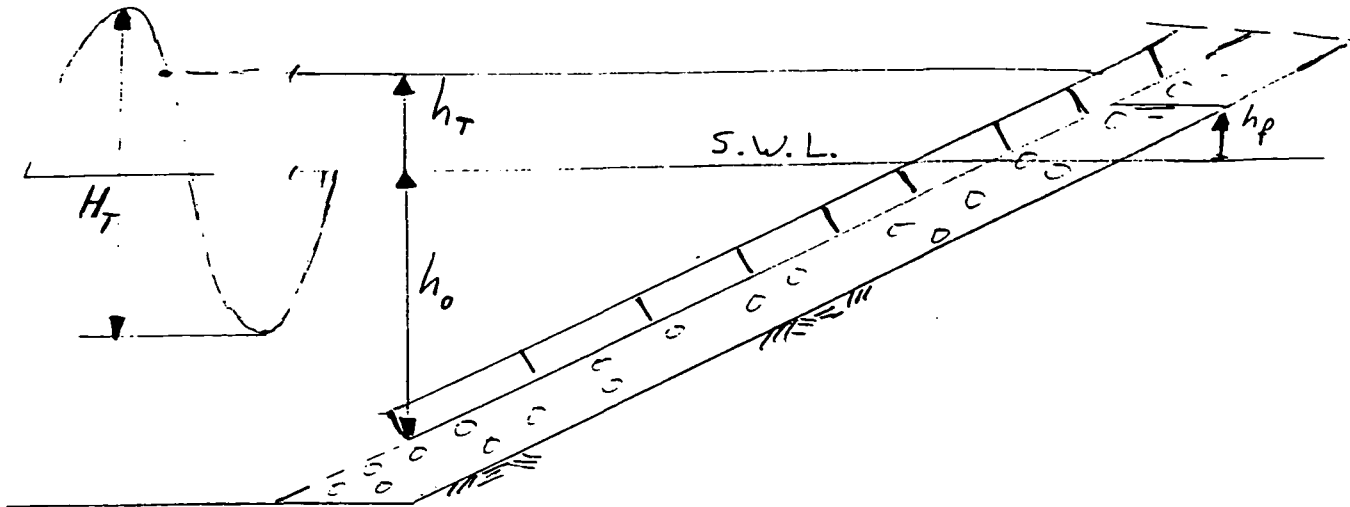
Als de variatie van de stijghoogte boven de teen, h_f , nu gegeven is volgt uit vergelijking (4) de variatie van het freatische vlak van het filter. Om analytische benadering mogelijk te maken zullen een drietal bijzondere situaties worden onderscheiden:

- * een open teenconstructie, waarbij $h_f \ll h_0$;
- * een niet volledig doorlatende teenconstructie met $h_f \ll h_0$;
- * een bewegend blok bij een ondoorlatende teenconstructie.

-

III. OPEN TEEN, $h_r \ll h_0$.

Deze situatie is geschetst in Figuur 5.



Figuur 5: Steenzetting met open teenconstructie.

A. Beweging freatisch vlak.

Als in de coëfficiënten van de eerste twee termen van vergelijking (4) h_r verwaarloosd wordt t.o.v. h_0 , is voor deze vergelijking te schrijven:

$$(5) \quad \left(\frac{T_e}{2\pi}\right)^2 \cdot \frac{d^2 h_f}{dt^2} + \left(\frac{T_w}{2\pi}\right) \cdot \frac{dh_f}{dt} + h_f = h_T$$

waarin:

T_e : de eigen trillingstijd van de constructie [s], gedefinieerd door:

$$(6) \quad T_e = \frac{2\pi}{\sin\alpha} \cdot \sqrt{\frac{h_0}{g}}$$

T_w : de weerstandstijd van de constructie [s], gedefinieerd door:

$$(7) \quad T_w = \frac{2\pi n h_0}{k_f \sin^2\alpha} = \frac{2\pi n L_0}{k_f \sin\alpha}$$

L_0 : de langs het talud gemeten afstand tussen teenconstructie en SWL.

Als nu de stijghoogte bij de teenconstructie sinusvormig in de tijd verloopt, dus:

$$(8) \quad h_T = \frac{1}{2} H_T \cdot \sin\left(2\pi \frac{t}{T}\right)$$

dan verloopt ook de hoogte van het freatische vlak sinusvormig met een faseverschuiving:

$$(9) \quad h_f = A \cdot \sin 2\pi \frac{t}{T} + B \cdot \cos 2\pi \frac{t}{T} = \frac{1}{2} H_f \cdot \sin \frac{2\pi}{T} (t - \tau)$$

waarin:

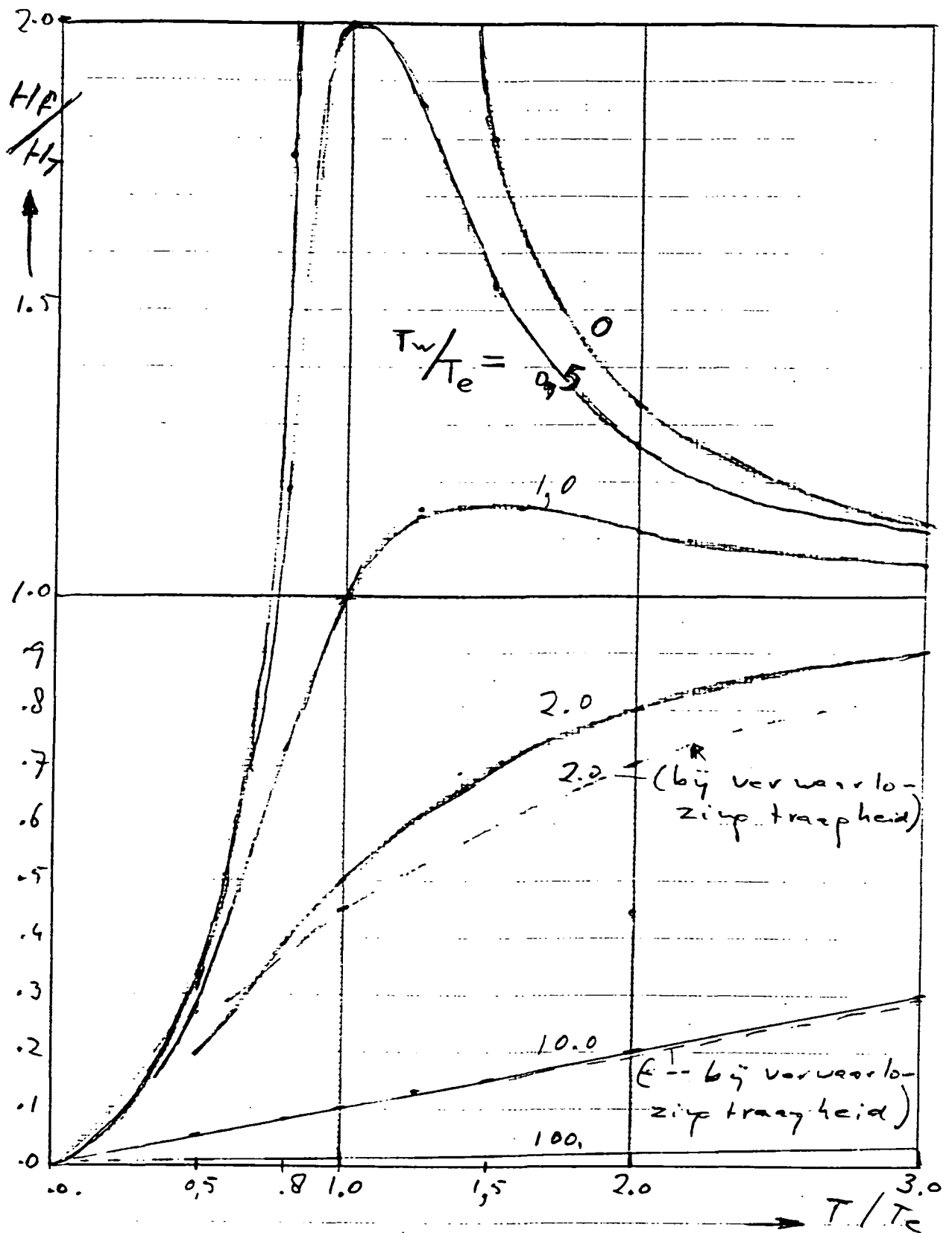
$$\frac{A}{\frac{1}{2} H_T} = \frac{1 - \left(\frac{T_e}{T}\right)^2}{\left[1 - \left(\frac{T_e}{T}\right)^2\right]^2 + \left(\frac{T_w}{T}\right)^2}$$

$$\frac{B}{\frac{1}{2} H_T} = \frac{-\left(\frac{T_w}{T}\right)}{\left[1 - \left(\frac{T_e}{T}\right)^2\right]^2 + \left(\frac{T_w}{T}\right)^2}$$

$$(10) \quad \frac{H_f}{H_T} = \frac{1}{\sqrt{\left[1 - \left(\frac{T_e}{T}\right)^2\right]^2 + \left(\frac{T_e}{T}\right)^2 \left(\frac{T_w}{T_e}\right)^2}}$$

H_T en H_f zijn de respectievelijke verschillen tussen top en dal van de stijghoogte bij de teen en van de plaatshoogte van het freatisch vlak. In Figuur 6 is de grafiek getekend voor de verhouding H_f/H_T als functie van T/T_e bij verschillende waarden van T_w/T_e . Duidelijk is dat bij kleine waarden van T_w/T_e resonantie optreedt als de periode T ongeveer gelijk is aan de eigen trillingstijd van de zetting.

Als de teen 0,25 m. onder SWL ligt en het talud een helling 1:3 heeft is de eigen trillingstijd 3 s. Als de teen 1 m. onder SWL ligt en het talud 1:4 is, is de eigen trillingstijd 8 s. We zien dus dat het heel goed denkbaar is dat water in geulen gaat resoneren onder invloed van windgolven als er een open teenconstructie is tussen de 0,25 en 1 m. onder SWL! Als die teenconstructie lager ligt wordt de eigen trillingstijd



Figuur 6: Verhouding uitslag freetisch vlak uitslag stijghoogte op talud bij teen als functie van T/T_e en T_w/T_e

groter; dan kan resonantie optreden onder invloed van deining. Voorwaarde voor resonantie is (naast een golfbelasting met de juiste periode) dat de waarde van T_w/T_e klein is (<2), anders treedt damping op. Nu volgt uit de definities van T_w en T_e dat:

$$(11) \quad \frac{T_w}{T_e} = \frac{n\sqrt{gh_0}}{k_f \sin \alpha}$$

Om de waarde van k_f voor de geulen te schatten maken we gebruik van de formule van De Chézy voor permanente stroming:

$$v = C\sqrt{RI}$$

die we vergelijken met de in de afleiding gebruikte wet van Darcy (1'), waaruit volgt:

$$k_f = \frac{C^2 R}{v}$$

In deze formules is:

C: de constante van De Chézy [$m^{1/2}/s$]

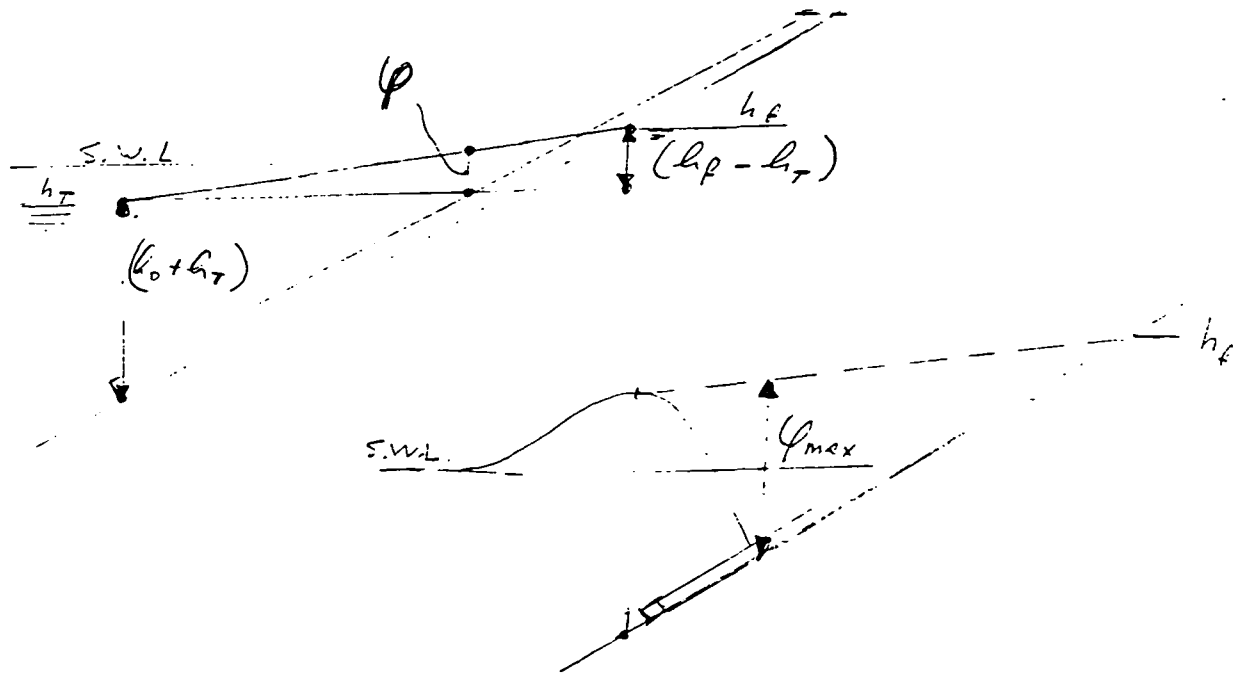
R: de hydraulische straal van de geulen [m]

Voor geulen van 5 à 10 cm. diep zal R een waarde van ca. 0,05 m. hebben en C een waarde van ca. 20 [$m^{1/2}/s$]. Als we een waarde voor de snelheid v nemen van 1 [m/s] volgt voor k_f een waarde van 20 m/s. Bij een ligging van de teen op 1 m. onder SWL en een talud 1:3 volgt dan dat T_w/T_e ca. 0,5 is, dus klein genoeg om voor een behoorlijke opslingering te zorgen. Als de teen ondieper ligt wordt de damping minder, als hij dieper ligt meer. Groter geulen geven minder weerstand, dus groter k_f , dus meer opslingergevaar. Klein Breteler komt in [1] voor geulen van 1 à 3 mm diep tot waarden voor k_f van ca. 2 m/s; bij $h_0 = 1$ m en helling 1:3 volgt dan $T_w/T_e = ca. 5$. Uit Figuur 6 blijkt dat het freatisch vlak bij golven met een periode gelijk aan de eigen trillingstijd (in dit voorbeeld ca. 6 s.) beweegt met een amplitude van 0,2 maal de amplitude van de golf, dus aanzienlijk meer dan in een "echt" filter met waarden voor k_f van 10^{-2} of minder. In zo'n echt filter heeft T_w/T_e waarden van 100 of meer en dan beweegt het freatisch vlak vrijwel niet (onder golfbelasting).

B. Maximale stijghoogteverschillen over toplaag.

In de bekende steenzettheorie treedt het maximale stijghoogteverschil over de toplaag op tijdens het moment van maximale rundown. Bij geulen met een open teenconstructie verloopt de stijghoogte in de geul praktisch lineair tussen de teen en het bewegende freatisch vlak. Als de waterstand boven de toplaag in elk punt gelijk is (horizontale waterspiegel) is het

maximale verschil in stijghoogte (zie Figuur 7):



Figuur 7: Stijghoogteverschillen in verschillende situaties.

$$(12) \quad \varphi = (h_f - h_T) \left[1 - \frac{(h_f - h_T)}{(h_0 + h_T)} \right]$$

Voor grote h_0 ($\gg h_T$) volgt :

$$\varphi = h_f - h_T$$

De waarde van $h_f - h_T$ wordt gevonden met behulp van de formules (8) en (9). Ook deze waarde heeft een sinusvormig verloop in de tijd met de amplitude:

$$(13) \quad (h_f - h_T)_{\max} = \sqrt{\left(\frac{1}{2}H_T - A\right)^2 + B^2}$$

Deze uitdrukking kan niet uitgewerkt worden tot een "mooie" formule.

Als de waterstand lager is dan de teen zijn er geen overdrukken. Voor het algemene geval (niet zulke diepe en niet zulke hoge overgangsconstructies) geldt vergelijking (12). Om het maximale stijghoogteverschil te bepalen bepaalt men eerst het maximum van $(h_f - h_T)$ volgens vergelijking (13) en substitueert

deze waarde vervolgens in vergelijking (12). Dit beeld wordt nog gecompliceerder bij windgolven als we kijken naar de plaats van golffronten ten opzichte van de teen. Zeker bij onregelmatige golven kan het dan voorkomen dat er boven de open teen een grote golfdruk optreedt op het moment dat het freatische vlak nog hoog is als gevolg van opslinging. Dit geval is eveneens geïllustreerd in Figuur 7. Daardoor zal het maximale stijghoogteverschil niet alleen lokaal hoger zijn dan bij een gewone zetting met grote lengte, maar ook boven de plaats van dit maximum bevindt zich een gebied met grotere hoogteverschillen dan bij een normale zetting. De kans op het uitdrukken van meerdere rijen neemt dus toe.

C. Watersnelheden onder de toplaag en invloed traagheidsterm.

De maximale snelheid treedt op als de afgeleide van de snelheid naar de tijd gelijk is aan 0. Uit vergelijking (1) volgt dan:

$$(14) \quad v_{\max} = k_f \cdot I = \text{of} < k_f \cdot \sin \alpha$$

Omdat I maximaal gelijk is aan de sinus van de hellingshoek is v_{\max} hooguit gelijk aan $k_f \cdot \sin \alpha$. Bij gewone filters is de maximale snelheid dus hooguit enkele cms per seconde. Bij grote waarden van k_f (grof filter of geulen) kan die snelheid erg toenemen. Uit de waarden voor k_f die hiervoor als voorbeeld werden gebruikt blijkt dat reeds kleine spleten kunnen leiden tot veel groter filtersnelheden dan in normale filters zonder spleten.

Het voorgaande roept de vraag op wanneer de traagheidsterm in de impulsvergelijking (1) verwaarloosd mag worden en uitgegaan mag worden van Darcy? Dit is als volgt na te gaan. Bij vergelijking van de traagheidsterm met de weerstandsterm uit vergelijking (1) volgt dat traagheidsterm verwaarloosd mag worden als:

$$(15) \quad \left(\frac{\delta v}{\delta t} \right)_{\max} < ng \left(\frac{v_{\max}}{k_f} \right)$$

Omdat bij een sinusvormig verloop in de tijd geldt:

$$\left(\frac{\delta v}{\delta t} \right)_{\max} = v_{\max} \cdot \frac{2\pi}{T}$$

volgt dat de traagheidsterm verwaarloosd mag worden als:

$$T > \left(\frac{2\pi}{n}\right) \cdot \frac{k_f}{g}$$

Als $k_f < 10^{-2}$ [m/s] is dit duidelijk het geval voor alle golven met een periode groter of gelijk aan die van windgolven. Bij geulen met $k_f > 1$ à 20 [m/s] is dit pas het geval als $T > 10$ à 200 s..

Als de traagheidsterm in vergelijking (5) verwaarloosd wordt luidt de oplossing voor de beweging van het freatische vlak (voor de beschouwde constructie) bij een sinusvormig verloop van h_f :

$$h_f = \frac{1}{2} H_f \cdot \sin \frac{2\pi}{T} (t - \tau)$$

maar nu geldt:

$$(16) \quad \frac{H_f}{H_T} = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{T_w}{T}\right)^2}} = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{T_e}{T}\right)^2 \left(\frac{T_w}{T_e}\right)^2}}$$

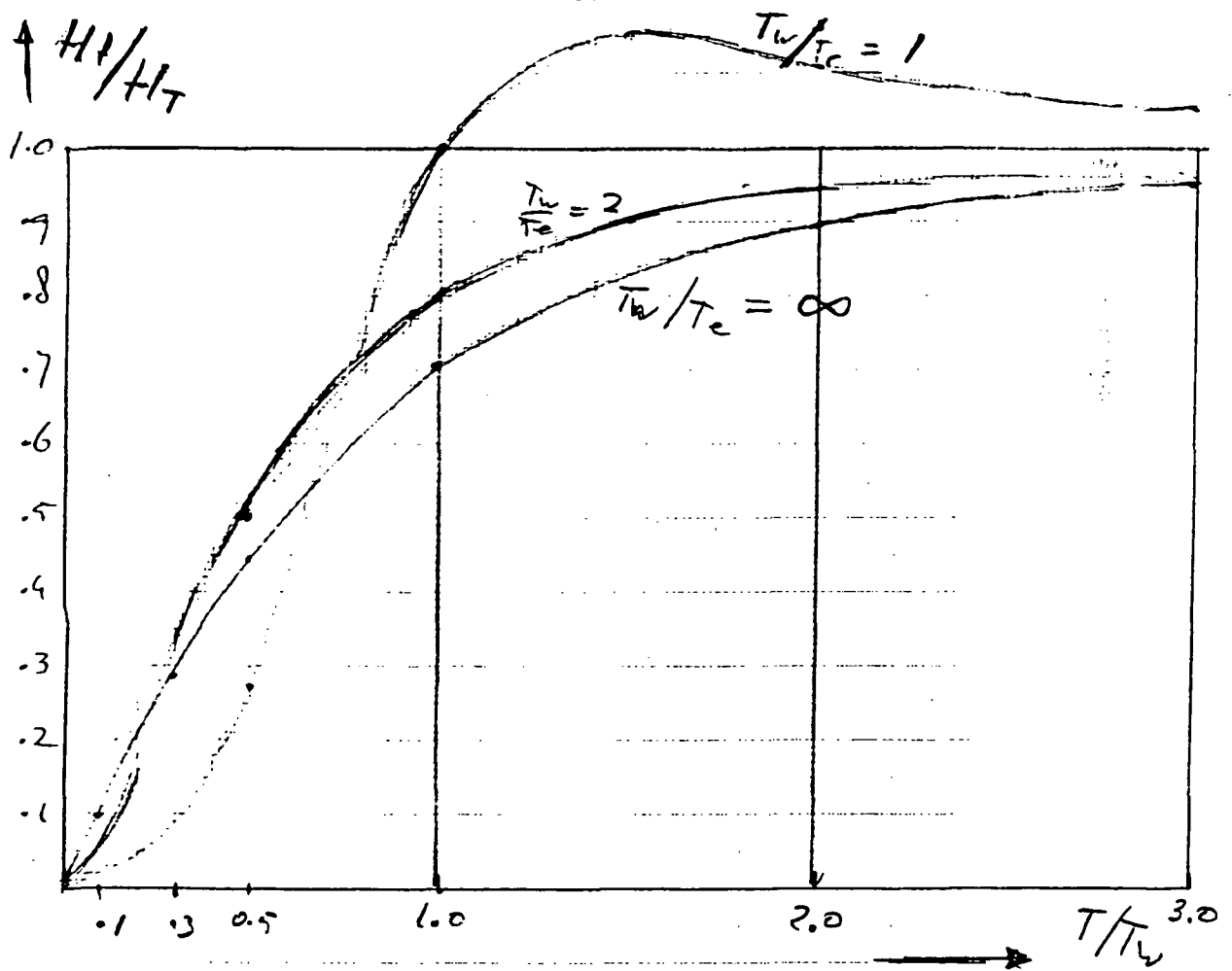
De tweede schrijfwijze biedt de mogelijkheid om de grafieken voor H_f/H_T volgens bovenstaande formule (Figuur 8) te vergelijken met die van Figuur 6. De grafieken vallen pas ongeveer samen voor grote waarden van T_w/T_e , dus bij grote weerstanden (of kleine doorlatendheden).

De eerste schrijfwijze van de laatste formule biedt de mogelijkheid tot vergelijking met de oplossing van het probleem voor langperiodieke golven bij grote lek lengten (en bij een oneindig lang talud) (notitie N 526). In formule (12) van die notitie komt de uitdrukking voor de amplitude van het freatisch vlak overeen met bovenstaande formule. In N 526 staat in plaats van de weerstandstijd T_w de lektijd T_k :

$$T_k = \frac{2\pi n \Lambda}{k_f \sin \alpha} \quad \text{terwijl} \quad T_w = \frac{2\pi n L_0}{k_f \sin \alpha}$$

De resultaten zijn ook vergelijkbaar: bij grote lengten L_0 van het talud is het freatisch vlak bij windgolven praktisch constant, terwijl er bij langperiodieke golven een vermindering van de amplitude en een faseverschuiving optreedt. Uit deze beschouwing blijkt wel dat de effecten van een grote lektijd (N 526) beperkt worden indien er op korte afstand onder de stilwaterlijn een open teenconstructie ligt.

 -



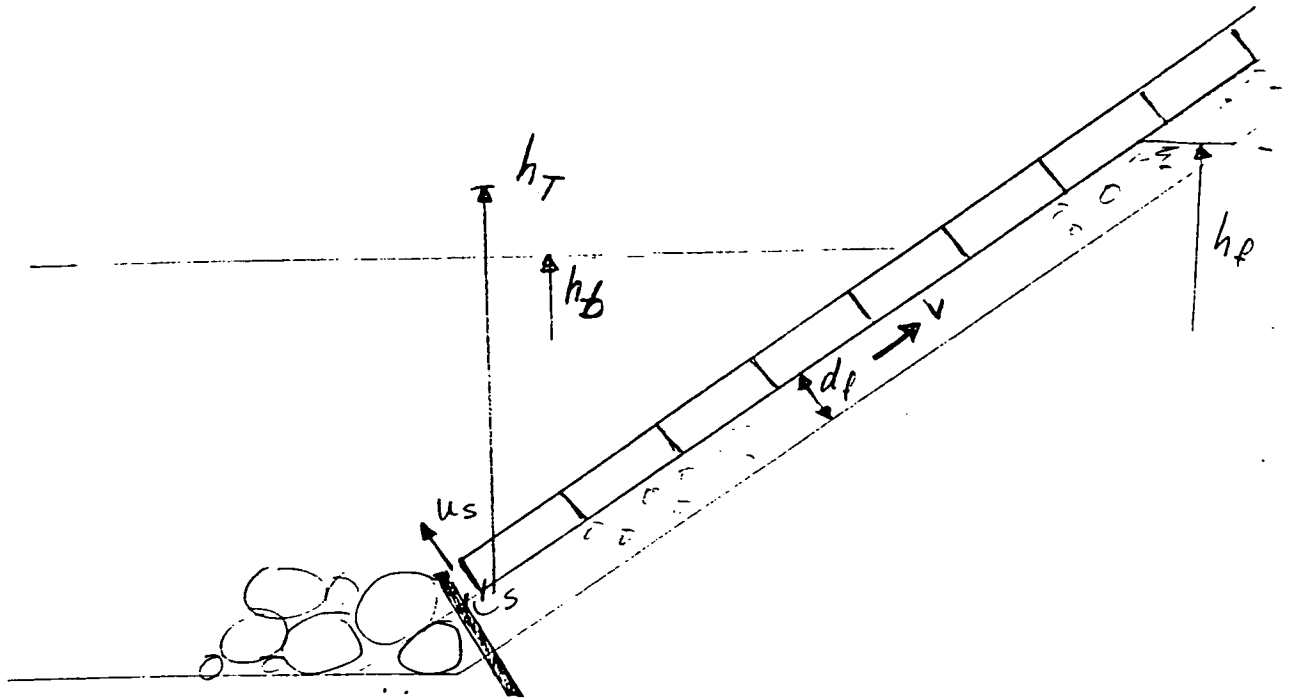
Figuur 8: Verhouding H_1/H_{1T} als functie van T/T_w bij grote waarden van T_w/T_e (> 2)

IV. NIET VOLLEDIG DOORLATENDE TEENCONSTRUCTIE, $h_r \ll h_0$.

Deze constructie is getekend in Figuur 9.

Het niet volledig doorlatend karakter zullen we schematiseren door de teenconstructie te beschouwen als een ondoorlatende damwand terwijl er een pleet is tussen de damwand en de toplaag.

Op de waterbeweging in het filter of in de geulen onder de als ondoorlatend beschouwde toplaag zijn dezelfde vergelijkingen (met name vergelijking (4)) van toepassing als bij een open teenconstructie, indien voor h_r gelezen wordt de stijghoogte van het water in het filter vlak achter de teenconstructie. De stijghoogte van het water op de toplaag vlak achter de teenconstructie zullen we aangeven met h_s .



Figuur 9: Steenzetting met niet volledig doorlatende teenconstructie.

De snelheid van het water in de spleet is nu:

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

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 doorlatendheidscoëfficiënt k_T . Uit deze gelijkstelling volgt:

$$k_s = k_T (B/s)$$

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 of de geul ($v \cdot d_f$). Gelijkstelling van beide debieten en substitutie van de uitdrukking (3) voor v die de snelheid koppelt met de stijgsnelheid van het freatisch vlak levert na uitwerking:

$$(17) \quad h_T = h_b - \frac{nd_f d_T}{sk_s \sin \alpha} \frac{dh_f}{dt}$$

Substitutie in vergelijking (4) levert:

$$(18) \quad \frac{(h_0 + h_f)}{g \sin^2 \alpha} \cdot \frac{d^2 h_f}{dt^2} + \left[\frac{n(h_0 + h_f)}{k_f \sin^2 \alpha} + \frac{nd_f d_T}{sk_s \sin \alpha} \right] \cdot \frac{dh_f}{dt} + h_f = h_b$$

Door nu dezelfde aanname te doen als bij de open teenconstructie ($h_f \ll h_0$) en door als weerstandtijd te definiëren:

$$(19) \quad T_w = \frac{(2\pi n)}{\sin \alpha} \left[\frac{h_0}{k_f \sin \alpha} + \frac{d_f d_T}{sk_s} \right] = \frac{2\pi n}{k_f \sin \alpha} \left[L_0 + \frac{\Lambda_e^2}{B} \right]$$

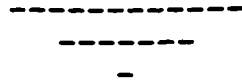
waarin:

Λ_e : de equivalente lek lengte die overeenkomt met dezelfde spleetbreedte als bij de teenconstructie; wordt dezelfde vergelijking (5) gevonden als bij de constructie met open teen, met dien verstande dat nu in het rechterlid staat h_b in plaats van h_T . Omdat in beide gevallen bedoeld wordt de stijghoogte op het talud ter plaatse van de teen is dit onderscheid niet relevant en mogen we bij een sinusvormig verloop in de tijd van deze stijghoogte schrijven:

$$h_b = \frac{1}{2} H_T \cdot \sin\left(\frac{2\pi}{T}\right) t$$

Figuur 6 mag dus gebruikt worden om het effect van een minder open teenconstructie te illustreren, mits voor T_w bovenstaande uitdrukking wordt gebruikt. Het effect van een minder open teenconstructie is dus een vergroting van de weerstandtijd en dus een minder snelle beweging van het freatisch vlak. Ook nu gaat de vergelijking met de lektijd van N 526 op: hoe meer weerstand des te groter is de demping en des te groter wordt dus het gevaar van langperiodieke golven (seiches en getijden). Een en ander leidt tot de weinig verrassende conclusie dat bij een dichte teenconstructie (en een dichte toplaag) het freatisch vlak constant is.

Het gevolg van een minder doorlatende overgangsconstructie is dus dat de waterbeweging (snelheden) in het filter (of de geulen) minder is dan bij een open teenconstructie, maar dat de verschillen in stijghoogten tussen onder- en bovenkant van de toplaag groter zijn.

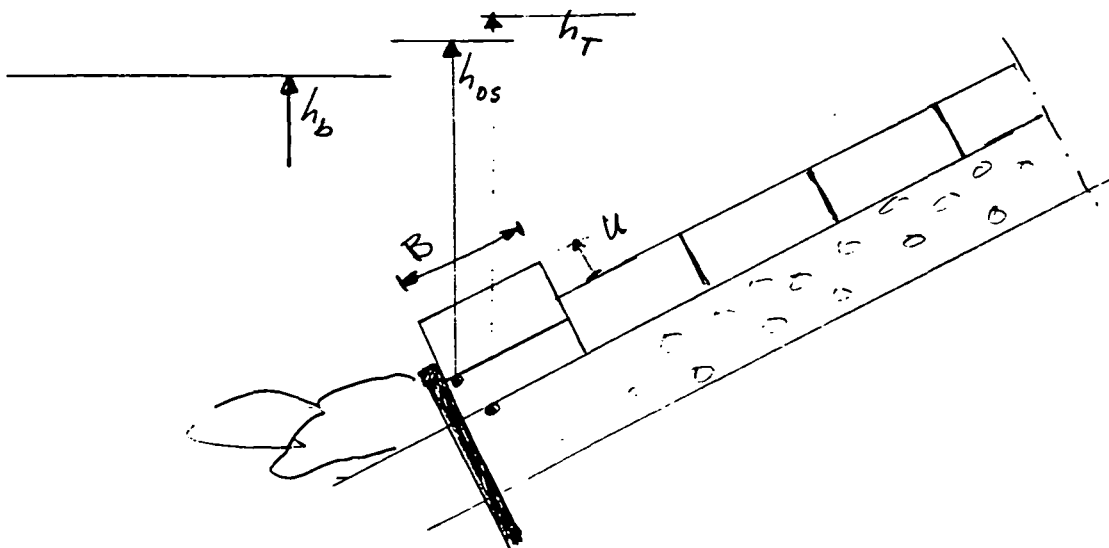


V. BEWEGEND BLOK BIJ ONDOORLATENDE TEENCONSTRUCTIE.

A. Volledige beschrijving.

We beschouwen de situatie waarin na langdurige waterstandsverhoging ondanks de dichte teenconstructie water in het filter (de geulen) is terechtgekomen. Als de buitenwaterstand zakt zal op de onderste blokken bij de teen (of bij de onderkant van de geulen) een hydrostatische waterdruk staan. Dit kan optreden wanneer het filter of de geulen gevuld zijn door infiltratie door de hoger gelegen meer doorlatende gedeelten van de toplaag.

De blokken zullen over het algemeen lang kunnen blijven hangen door gewelfwerking (klemkrachten), maar het is denkbaar dat deze werking onder invloed van golfklappen even ongedaan gemaakt wordt. De blokken waarop de grootste overdrukken werken zullen dan opgelicht worden. Als het filter erg doorlatend is, of als er geulen zijn is de weerstand die het water onder de blokken ondervindt verwaarloosbaar (aanname) en zal de waterdruk lineair verlopen tussen het bewegende blok en het freatisch vlak. Als ook de wrijving in de spleten op de bewegende blokken verwaarloosbaar is, is de blokbeweging te beschrijven indien aangenomen wordt dat de waterdruk boven de toplaag nul blijft.



Figuur 10: Bewegend blok bij dichte teenconstructie.

Uit de bewegingsvergelijking van het bewegende blok (eigenlijk bekijken we een rij blokken) en de definities van stijghoogte wordt afgeleid:

$$(h_{os} - h_b) = \Delta d_T \cdot \cos \alpha + \frac{\rho_s}{\rho_w} \cdot d_T \cdot \left(\frac{u''}{g} \right)$$

Hierin zijn:

h_{os} : stijghoogte van het water aan de onderkant van het bewe-
gende stenen blok;

h_b : stijghoogte van het water aan de bovenkant van het bewe-
gende blok;

Δ : relatief verschil in volumieke massa tussen steen en
water;

ρ_s, ρ_w : volumieke massa van het blok (de steen), van het water;

u : de verplaatsing van het blok uit de toplaag;

u'' : de versnelling van het blok in de richting van u .

In de bewegingsvergelijking is geen rekening gehouden met wrijving die het blok ondervindt, terwijl ook de "toegevoegde massa" is verwaarloosd. Voorts is aangenomen dat de stijghoogte onder de steen over de gehele breedte gelijk gesteld mag worden aan dezelfde waarde h_{os} .

Als de versnelling "0" is ontstaat uit deze bewegingsvergelijking de grensvoorwaarde voor evenwicht bij een gegeven stijghoogteverschil.

Uit de bewegingsvergelijking voor het water tussen de steen en de bovenkant van het filter wordt afgeleid:

$$(h_T - h_{os}) = u \cdot \left(\frac{u''}{g} \right)$$

Combinatie van de bewegingsvergelijking voor het blok met die voor het water levert:

$$(20) \quad (h_{os} - h_b) = \Delta d_T \cdot \cos \alpha + \left[\frac{\rho_s}{\rho_w} \cdot d_T + u \right] \cdot \left(\frac{u''}{g} \right)$$

Tenslotte is er een relatie tussen de beweging van het blok en die van het freatisch vlak (continuïteit):

$$(21) \quad u' \cdot B = -v \cdot d_f = -\frac{n}{\sin \alpha} \cdot \frac{dh_f}{dt} \cdot d_f$$

Door deze relatie nog een keer naar de tijd te differentiëren is het mogelijk de versnelling u'' uit deze relatie te substitueren in de gecombineerde bewegingsvergelijking voor het blok en het water tussen blok en filter (20). Het resultaat is:

$$(22) \quad h_T = h_b + \Delta d_T \cdot \cos \alpha - \left(\frac{\rho_s}{\rho_w} \cdot d_T + u \right) \cdot \frac{n \cdot d_f}{B g \sin \alpha} \cdot \frac{d^2 h_f}{dt^2}$$

Substitutie van deze uitdrukking in de algemene bewegingsvergelijking voor het water in het filter (4) levert tenslotte een differentiaalvergelijking die het verband bepaalt tussen de stijghoogte van het water buiten op het bewegend blok en het freatisch vlak.

Voor onze analyse nemen we aan dat $h_f \ll h_0$ zodat vergelijking (5) geldt. Bovendien nemen we aan dat in vergelijking (22)

$$u < \frac{\rho_s}{\rho_w} d_T$$

en dus verwaarloosbaar is. Als we dan vergelijking (22) substitueren in vergelijking (5) vinden we:

$$(23) \quad \left(\frac{T_e}{2\pi} \right)^2 \cdot \frac{d^2 h_f}{dt^2} + \left(\frac{T_w}{2\pi} \right) \cdot \frac{dh_f}{dt} + h_f = h_b + \Delta d_T \cdot \cos \alpha$$

De definitie voor de eigen trillingstijd luidt nu:

$$(24) \quad T_e = \frac{(2\pi)}{\sin \alpha} \cdot \sqrt{\frac{h_0}{g} \cdot \left[1 + n \cdot \frac{\rho_s}{\rho_w} \cdot \frac{d_T d_f}{B h_0} \cdot \sin \alpha \right]}$$

We zullen nu het geval beschouwen waarbij vòòr $t = 0$ de waterstand h_0 even hoog is als het freatisch vlak h_f en op $t = 0$ een plotselinge verlaging w optreedt die enige tijd duurt (zie Figuur 11). Het referentievlak voor de stijghoogten leggen we op het niveau van het buitenwater voor $t =$ of > 0 .

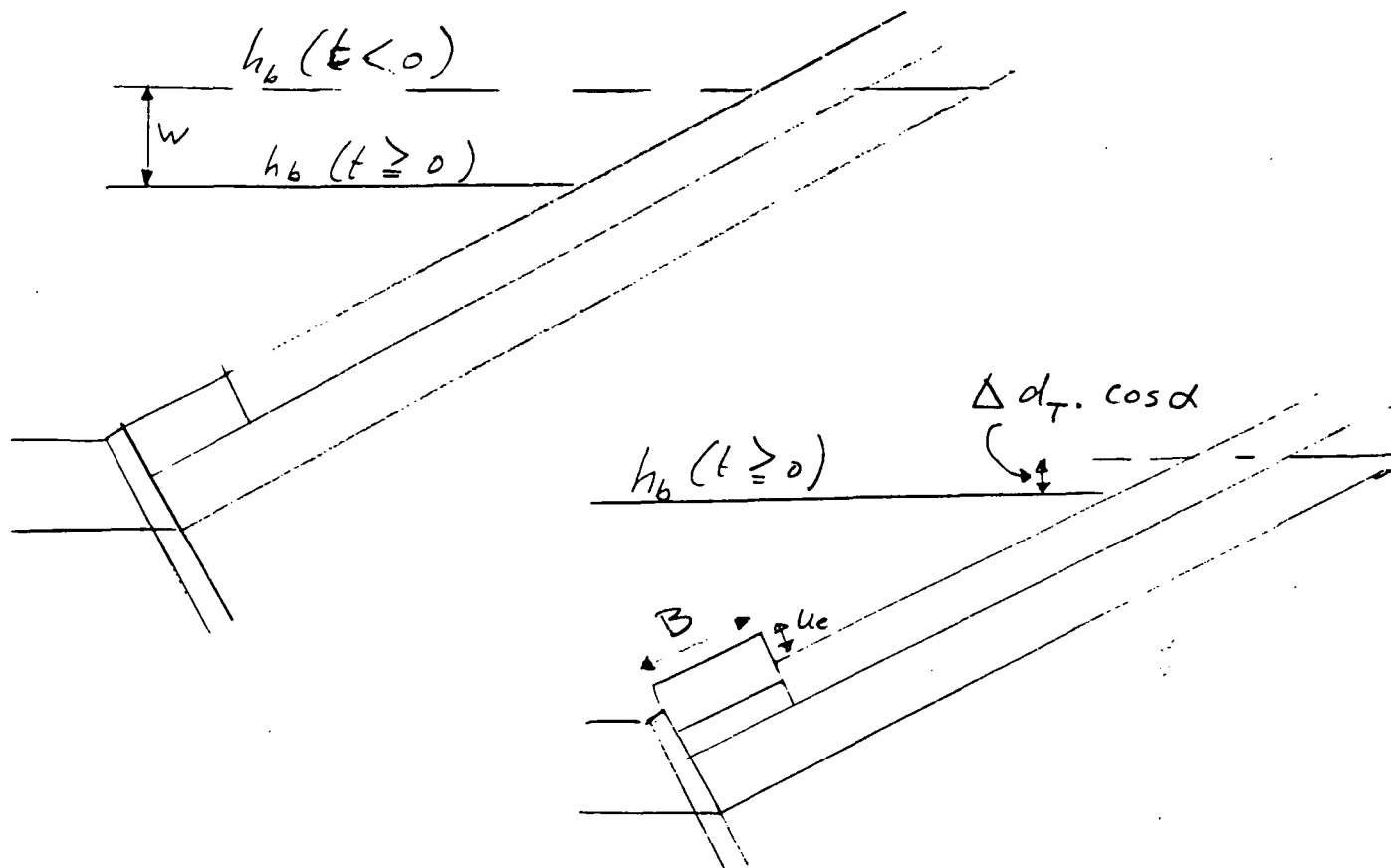
De beginvoorwaarden voor h_f op $t = 0$ zijn dan:

$$h_f(0) = h_b + w$$

$$dh_f/dt_{t=0} = 0$$

De oplossing van de differentiaalvergelijking (23) luidt dan:

$$(25) \quad h_f = h_b + \Delta d_T \cdot \cos \alpha + \frac{(w - \Delta d_T \cdot \cos \alpha)}{s_1 - s_2} \cdot (-s_2 e^{s_1 t} + s_1 e^{s_2 t})$$



Figuur 11: Begin- en evenwichtssituaties.

Substitutie van deze oplossing in vergelijking (21) levert een differentiaal vergelijking in u waarvan de oplossing luidt:

$$(26) \quad \frac{u}{u_e} = 1 + \frac{s_1 s_2}{s_1 - s_2} \left(\frac{1}{s_1} e^{s_1 t} - \frac{1}{s_2} e^{s_2 t} \right)$$

In (25) en (26) zijn:

- h_b : de buitenwaterstand op en na $t = 0$;
- w : de verlaging van de buitenwaterstand op $t = 0$ ten opzichte van de buitenwaterstand voor $t < 0$;
- u_e : de evenwichtsuitwijking van het blok bij een waterstandsverlaging w , waarvoor geldt:

$$(27) \quad u_e = n \cdot (w - \Delta d_T \cdot \cos \alpha) \cdot \frac{d_f}{B \sin \alpha}$$

Verder zijn:

$$s_1 = -\frac{\pi}{T_e} \left[\frac{T_w}{T_e} - \sqrt{\left(\left(\frac{T_w}{T_e}\right)^2 - 4\right)} \right] = -r + q$$

$$s_2 = -\frac{\pi}{T_e} \left[\frac{T_w}{T_e} + \sqrt{\left(\left(\frac{T_w}{T_e}\right)^2 - 4\right)} \right] = -r - q$$

$$r = \frac{\pi}{T_e} \left(\frac{T_w}{T_e} \right)$$

$$q = \frac{\pi}{T_e} \cdot \sqrt{\left(\left(\frac{T_w}{T_e}\right)^2 - 4\right)}$$

Maatgevend voor het karakter van de blokbeweging is of de waarde van T_w/T_e groter of kleiner is dan 2. Als deze waarde groter is dan 2, dus als er veel weerstand is, zijn s_1 en s_2 beide negatief. Uitwerking levert:

$$(28) \quad \frac{u}{u_e} = 1 - e^{-rt} \cdot \left[\frac{r}{q} \cdot \text{sh } qt + \text{ch } qt \right]$$

met

$$\text{sh } qt = \frac{e^{+qt} - e^{-qt}}{2}$$

$$\text{ch } qt = \frac{e^{+qt} + e^{-qt}}{2}$$

De oplossing voor $T_w/T_e = 2$ volgt uit vergelijking (28) door de limiet voor $q \rightarrow 0$ te bepalen:

$$(29) \quad \frac{u}{u_e} = 1 - [1 + rt] \cdot e^{-rt}$$

Als T_w/T_e kleiner is dan 2 is de uitdrukking onder het wortelteken in s_1 en s_2 negatief. Uitwerking levert dan:

$$(30) \quad \frac{u}{u_e} = 1 - e^{-rt} \cdot \left[\frac{r}{q'} \cdot \sin q't + \cos q't \right]$$

met:

$$q' = \frac{\pi}{T_e} \cdot \sqrt{\left[4 - \left(\frac{T_w}{T_e} \right)^2 \right]}$$

De beweging van het blok verloopt nu als een uitdempende trilling. Als er geen weerstand is ($T_w = 0$) resulteert:

$$(31) \quad \frac{u}{u_e} = 1 - \cos 2\pi \frac{t}{T_e}$$

Het blok beweegt dan dus met de eigen frequentie. (Als er de wrijving toeneemt neemt ook de periode toe)

In Figuur 12 zijn enkele grafieken opgenomen waarmee de invloed van de diverse factoren eenvoudig is te zien.

Als voorbeeld beschouwen we een situatie met:

$h_0 = 1$ m., $\sin \alpha = 1/3$, $\rho_s = 2400$ kg/m³, $n = 1$ (geul zonder filter), $d_r = 0,25$ m., $d_f = 0,25$ m., $B = 0,5$ m.. Voor de eigen frequentie (formule 24) wordt gevonden: $T_e = 6$ sec.

De weerstand stellen we verwaarloosbaar: $T_w = 0$ sec.

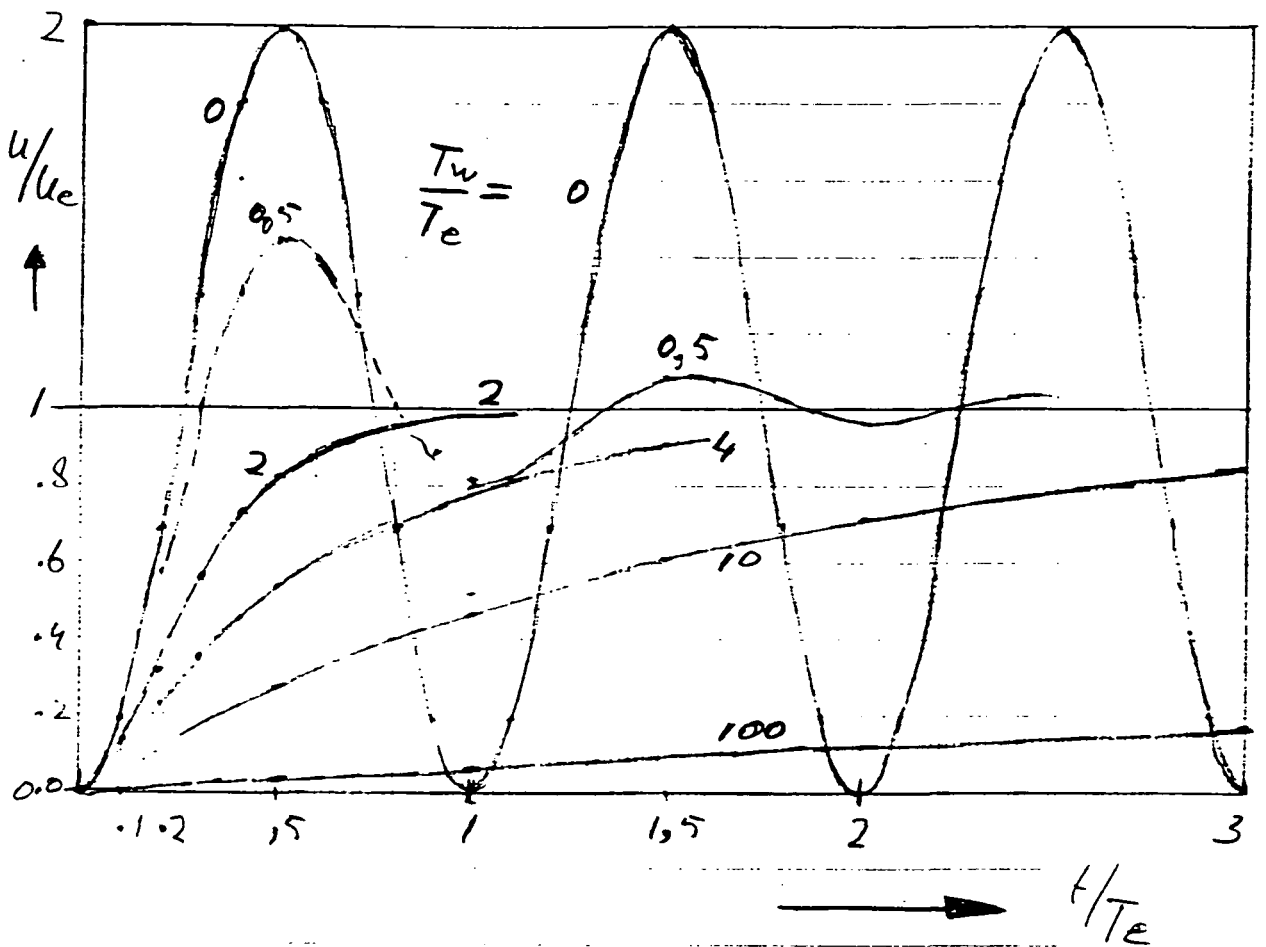
Bij een waterstandsverlaging van $w = 0,5$ m. wordt de evenwichtsuitwijking (formule 27) $u_e = 0,22$ m.

Onderstaand is het verloop van de uitwijking in de tijd in tabelvorm weergegeven:

na x sec. is de uitwijking:

	bij $w = 0,50$ m.	bij $w = 1$ m.
0,1	1 mm	4 mm
0,2	4 mm	16 mm
0,4	2 cm	8 cm
0,8	7 cm	28 cm

Bij een waterstandsverlaging van 1 m is de evenwichtsuitwijking ook 1 m en is het verloop in de tijd 4 keer zo groot!



Figuur 12: Beweging blok in de tijd als
 functie van T_w/T_e .

Dit wordt veroorzaakt doordat de uitwijking pas optreedt (het blok instabiel wordt) bij een waterstandverlaging van meer dan 0,35 m.. Bovendien blijkt uit de formule voor de evenwichts-uitwijking dat deze groter is naarmate de helling van het talud flauwer is. Dit wordt veroorzaakt doordat de hoeveelheid water in twee even diepe geulen tussen twee niveaus groter is bij een flauwe helling dan bij een steile helling. Bij een steile helling is de eigen periode kleiner dan bij een flauwe helling. Het kan dus voordelen hebben om de helling steil te maken.

Uit de gegeven getallenvoorbeelden blijkt dat in het geval van geulen en verwaarloosbare wrijving reeds bij een 15 cm hogere wateroverdruk dan overeenkomt met de stabiliteit van een los blok dit blok reeds binnen een halve seconde meer dan 2 cm verplaatst is.

B. Bij verwaarlozing traagheidsterm.

Het effect van grote weerstand t.o.v. de traagheidsterm is op twee manieren te onderzoeken:

Door vergelijking (28) uit te werken voor grote waarden van T_w/T_e ($\gg 4$) en daarbij te bedenken dat dan:

$$\sqrt{\left[\left(\frac{T_w}{T_e}\right)^2 - 4\right]} = \frac{T_w}{T_e} - 2\frac{T_e}{T_w}$$

of door in vergelijking (23) de traagheidsterm te verwaarlozen.

In beide gevallen is het resultaat:

$$(32) \quad \frac{u}{u_e} = 1 - e^{-2\pi \frac{t}{T_v}}$$

Omdat T_v bij gebruik van granulaire filters (en waterdichte toplaag !) orde van grootte minuten tot uren is, is de beweging van het blok uiterst langzaam.

-

VI CONCLUSIES EN AANBEVELINGEN.

1. Zowel in N 526 als in deze studie blijkt dat bij slecht doorlatende toplagen de stand van het freatisch vlak maatgevend is voor de belasting op de top laag.
In N 526 werd aangetoond dat bij dichte filters en toplagen het freatisch vlak vertraagd reageert op langperiodieke golven (dining, seiches, getijden); in deze studie blijkt dat dit ook het geval kan zijn bij een goed doorlatend filter (geulen) mits de top laag en de teenconstructie slecht doorlatend zijn. Bij een goed doorlatend filter (geul) met een slecht doorlatende top laag maar een open teenconstructie kan het freatisch vlak grote bewegingen maken met de golfperiode en zo ook aanleiding geven tot grote overdrukken.
2. Bij zeer doorlatende filters en geulen kan de beweging van het water in het filter en van het freatische vlak - sterk afhankelijk van de doorlatendheid van de teenconstructie - aanzienlijk intensiever zijn dan bij weinig doorlatende filters. De traagheidsterm mag dan niet verwaarloosd worden. Bepalende constructie-eigenschappen zijn de eigen periode T_c (vergelijking (24)) en de weerstandstijd T_w (vergelijking (19)).
3. Als de doorlatend van de teenconstructie zeer groot is zijn ook de watersnelheden in het filter groot. De kans op grote overdrukken treedt vooral op bij diep liggende overgangconstructies en is bij onregelmatige golven overigens afhankelijk van de toevallige drukhoogte boven de overgangconstructie en toevallige hoogte van het freatische vlak.
4. Bij een slecht doorlatende teenconstructie is de beweging van het water in het goed doorlatende filter of in de geul beperkt. De kans op grote overdrukken nabij de teenconstructie is groot bij wisselingen van de drukhoogte boven de teen. Dan is ook de kans op het plotseling uitdrukken van de onderste rij(en) van de top laag groot. Als dit uitdrukken optreedt gebeurt dit bij zeer doorlatende filters (geulen) snel, waarbij het water in het filter dus grote versnellingen ondergaat.
5. In deze studie is de top laag ondoorlatend verondersteld. Als dat niet mag (dat zal het geval zijn als de lek lengte kleiner is dan de lengte van steenzetting tussen de waterspiegel en de teen) en als ook de traagheidsterm niet mag worden verwaarloosd dan zal de waterbeweging in het filter bepaald moeten worden door (numerieke) oplossing van vergelijking (c) van hoofdstuk II paragraaf B. Hiervoor is net als bij het programma STEENZET kennis van het drukverloop op de top laag naar tijd en plaats nodig. Een dergelijke situatie deed zich waarschijnlijk voor bij het begin van het Scheldebak-onderzoek met als gevolg een snelle erosie van het filtermateriaal.
6. Tot nu toe is steeds verondersteld dat de luchtdruk boven het freatisch vlak gelijk is aan de luchtdruk boven de buitenwaterspiegel. Als de top laag ook slecht doorlatend is voor lucht en de lucht ook niet toe kan treden via de basis van de steenzetting zal dat niet het geval zijn. Er treedt dan een

geheel andere situatie op. Deze situatie deed zich voor bij de meeste proeven in het Scheldebak-onderzoek, omdat geen lucht kon toetreden door de toplaag.

7. Als het water in een geul van beperkte lengte op en neer beweegt kan het tegen de bovenbegrenzing van de geul stoten. Er kan dan een soort waterslag optreden met gedurende korte tijd een grote overdruk. Deze overdrukstoten kunnen de blokken loswrikken.

8. De aanwezigheid van veel grote spleten tijdens de proeven in de Deltagoot (series A, X en Y) hebben de geulvorming versneld en geven daardoor geen goed beeld van de stabiliteit van blokken op klei. Bij de proef zonder die grote spleten (28 februari) bleek de steenzetting dan ook veel stabielere dan verwacht omdat de geulen niet zo snel konden worden gevormd.

9. Op grond van deze studie ligt het voor de hand dat de stabiliteit van blokken op klei bepaald wordt door de aanwezigheid van geulen. Indien we geïnteresseerd zijn in verdere studie van deze afhankelijkheid dan kan dat door modelonderzoek op relatief kleine schaal, waarbij geulpatronen worden aangebracht. De onderhavige studie werpt niet veel licht op de geulvorming zelf, behalve dan dat duidelijker is geworden dat naarmate er meer geulvorming is de waterbeweging in de geulen groter zal zijn en de snelheid van geulvorming dus toe zal nemen.

-

REFERENTIES.

Klein Breteler: Toepassing van analytisch model op constructie blokken op klei (N 355), november 1989.

Rigter: Invloed langperiodieke golven op stijghoogteverschil over toplaag bij grote lek lengte (N 526), augustus 1991.

BIJLAGEN

Op de bijlagen zijn responsiekrommen getekend voor de stand van het freatisch vlak. In iedere tekening is voor de buitenwaterstand is een sinusvormig verloop met amplitude 1 aangenomen.

Voor de tekeningen zijn de volgende karakteristieke gegevens van de constructie aangenomen:

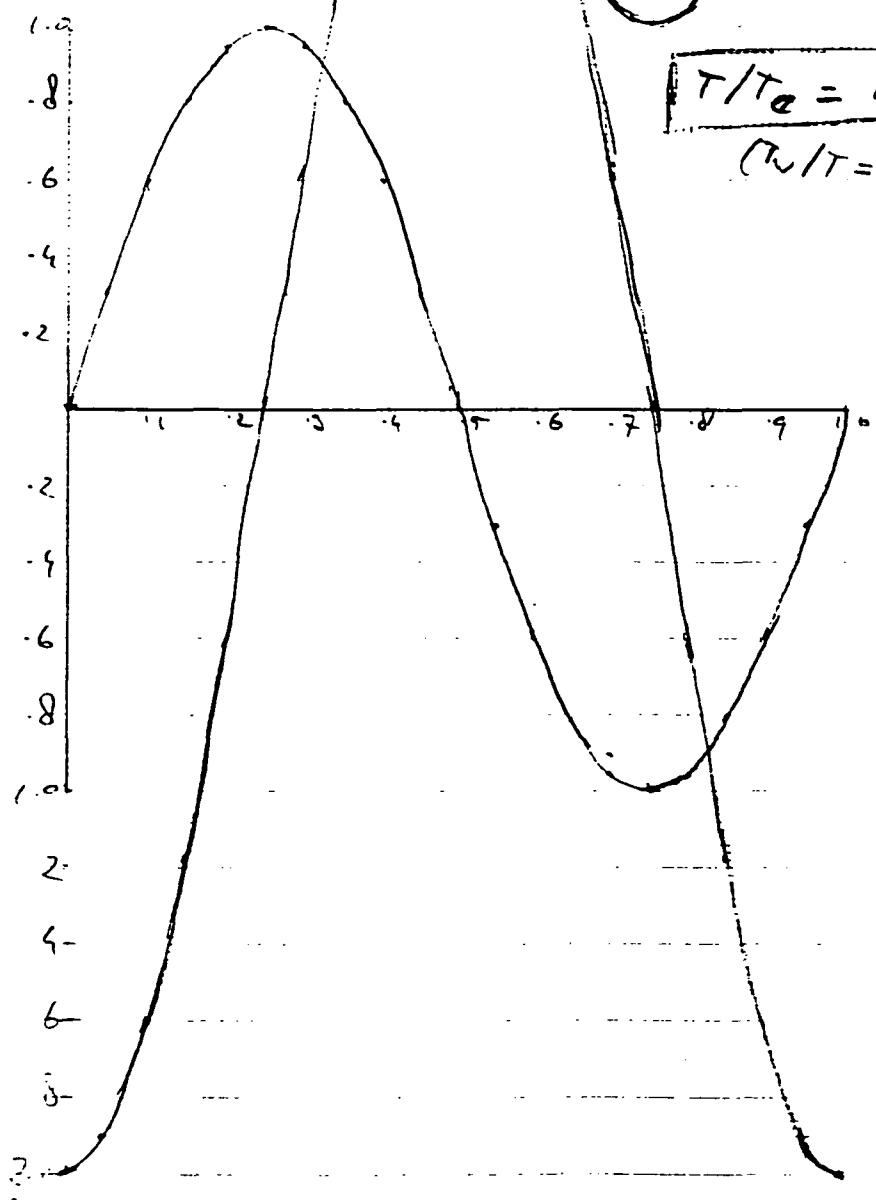
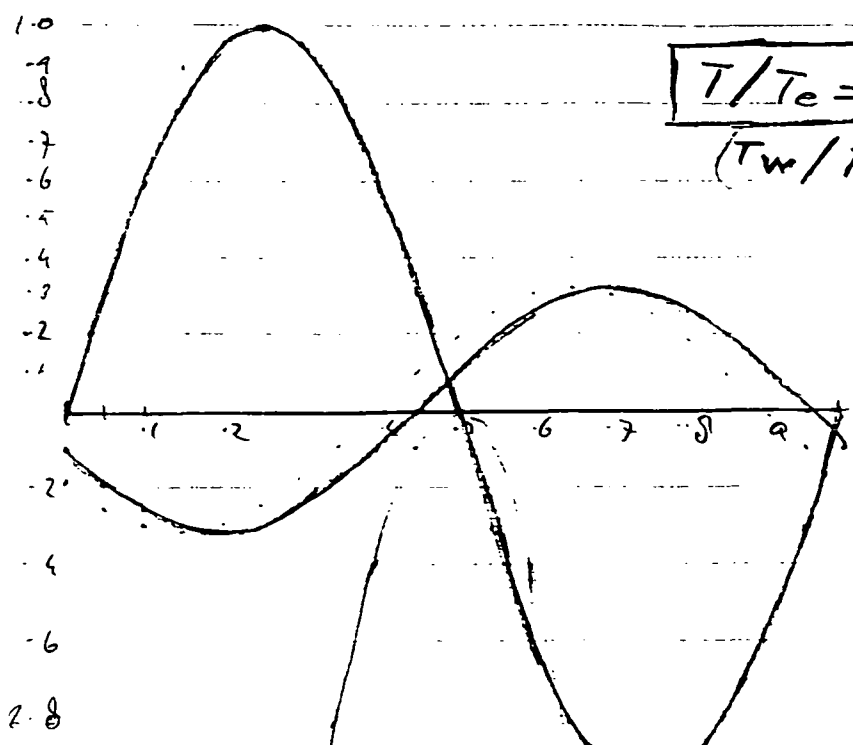
Tekening nr.	T_w/T_e	T/T_e	(T_w/T)
1a	0,5	0,5	1,0
1b		1,0	0,5
2a		2,0	0,25
2b		10,0	0,05
3a	1,0	0,5	2,0
3b		1,0	1,0
4a		2,0	0,5
4b		10,0	0,1
5a	2,0	0,5	4,0
5b		1,0	2,0
6a		2,0	1,0
6b		10,0	0,2
7a	10	0,5	20
7b		1,0	10
8a		2,0	5
8b		10,0	1
9a	∞	∞	1,0
9b	∞	∞	0,5
10	∞	∞	5,0

Omdat de eigen periode van een zetting in de grootte-orde van enkele seconden is, zijn de tekeningen 1 t/m 8 vooral interessant voor golven met een periode van diezelfde grootte-orde.

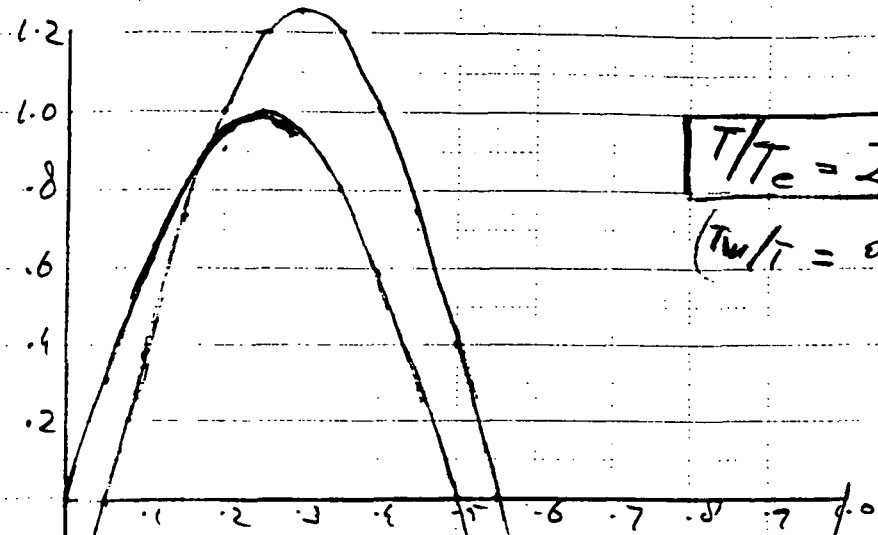
Als T een orde groter is dan T_e (T is dan bijvoorbeeld de periode van deining), wordt het interessant als T_w ook één of meer ordes groter is dan T_e (tekening 8b), omdat dan grote verschillen in de waterstanden optreden. Als T_w veel kleiner is dan de deiningperiode volgt de freatische lijn in het filter de deining (tekeningen 2b, 4b en 6b).

Tekeningen 9 en 10 zijn voorbeelden van de meest voorkomende constructies, waarbij geen geulen voorkomen en het filter redelijk ondoorlatend is, dus waarbij de traagheidseffecten mogen worden verwaarloosd. Als praktisch voorbeeld nemen we de metingen in Colijnsplaat, waar een faseverschuiving van ca. een uur is geconstateerd. Op een getijperiode van 12,5 uur betekent dat een faseverschuiving τ/T van ca. 0,1. Uit tekening 9b blijkt dat dit overeenkomt met een waarde van T_w/T van ca. 0,5, zodat T_w ongeveer 7 uur is. Dat wil dus zeggen 10% van de lektijd, bepaald uit de leklengte. Volgens deze studie kan deze kleine lektijd verklaard worden door een doorlatende teenconstructie aan te nemen.

$T_w/T_e = 0$

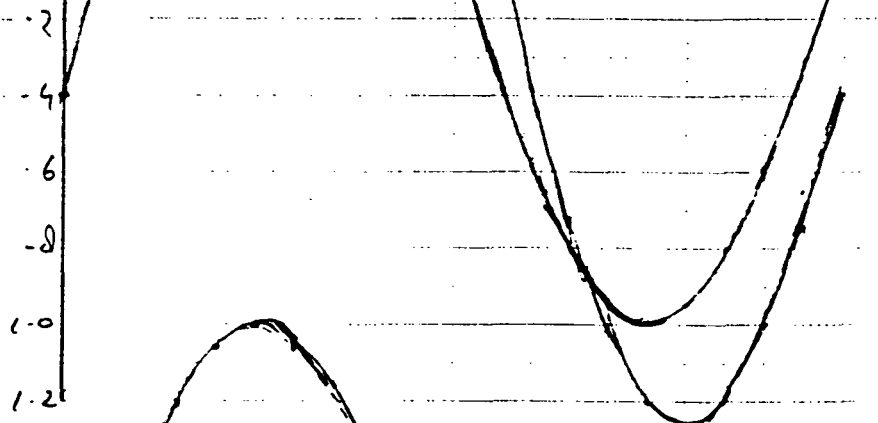


$$T_w/T_e = 0,5$$



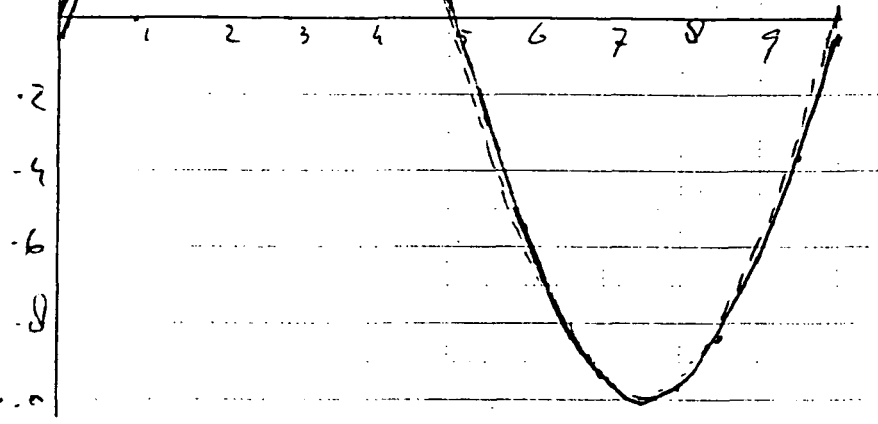
$$T/T_e = 2.0$$

$$(T_w/T = 0,25)$$

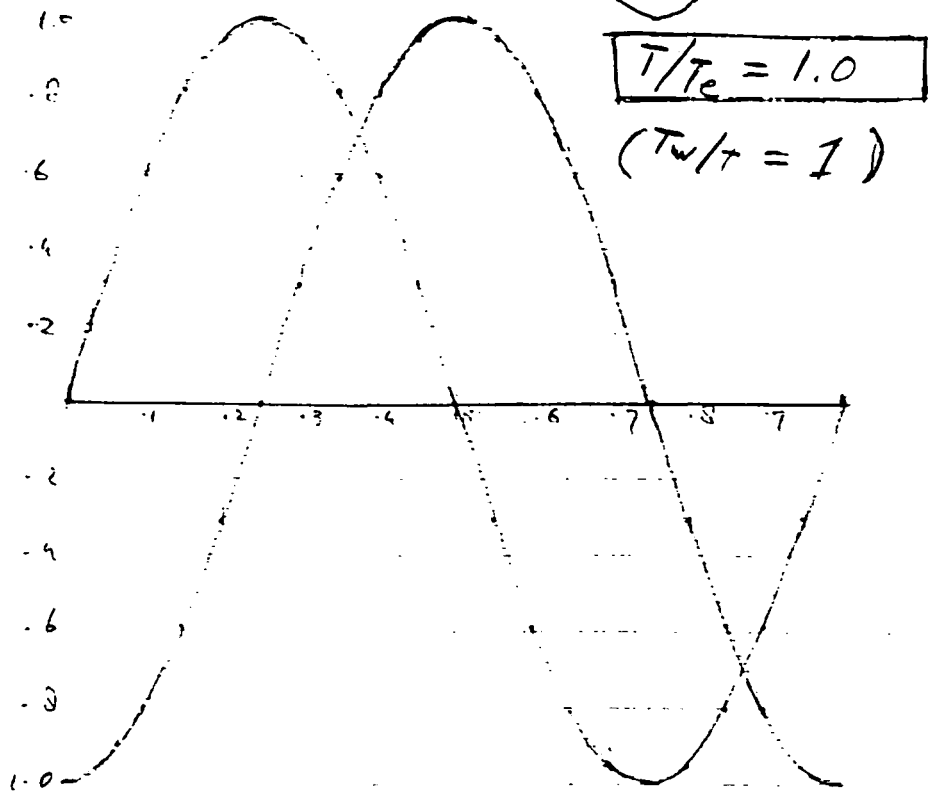
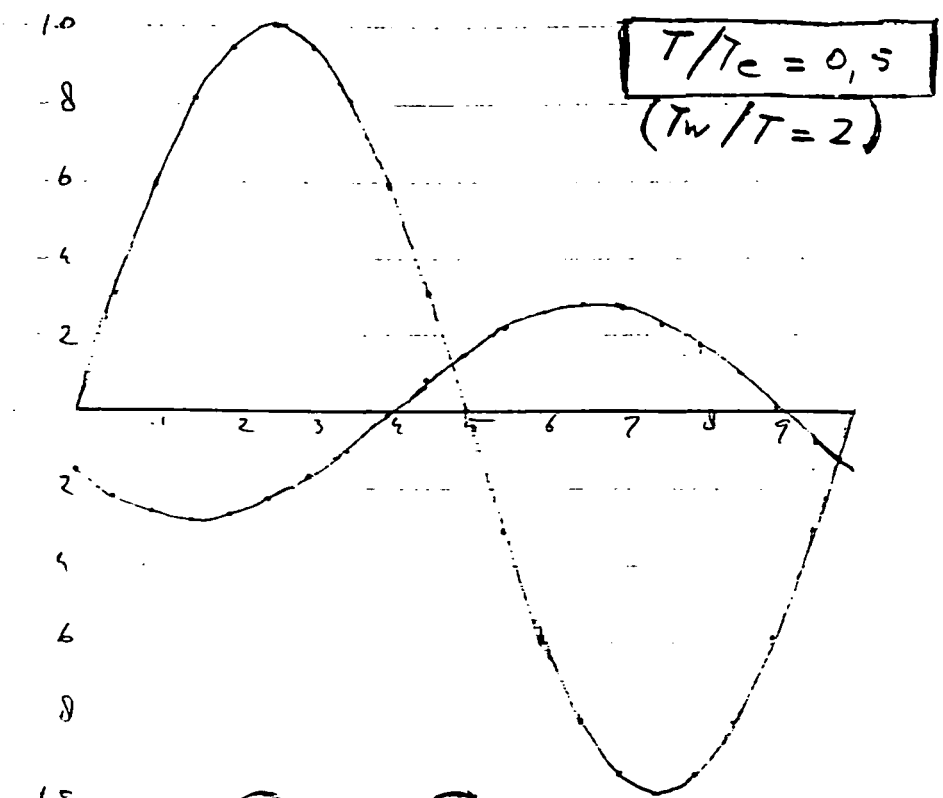


$$T/T_e = 10$$

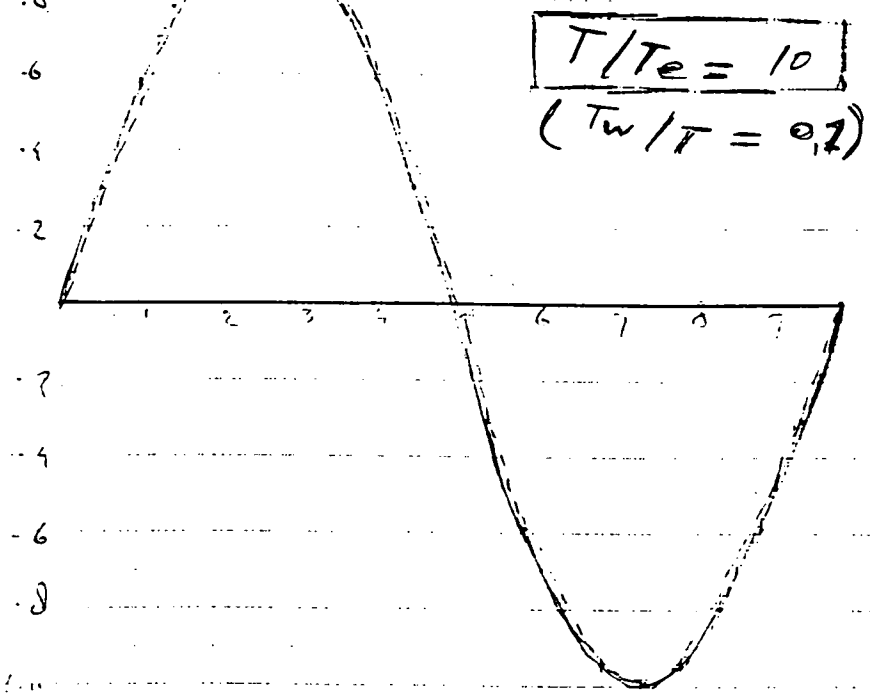
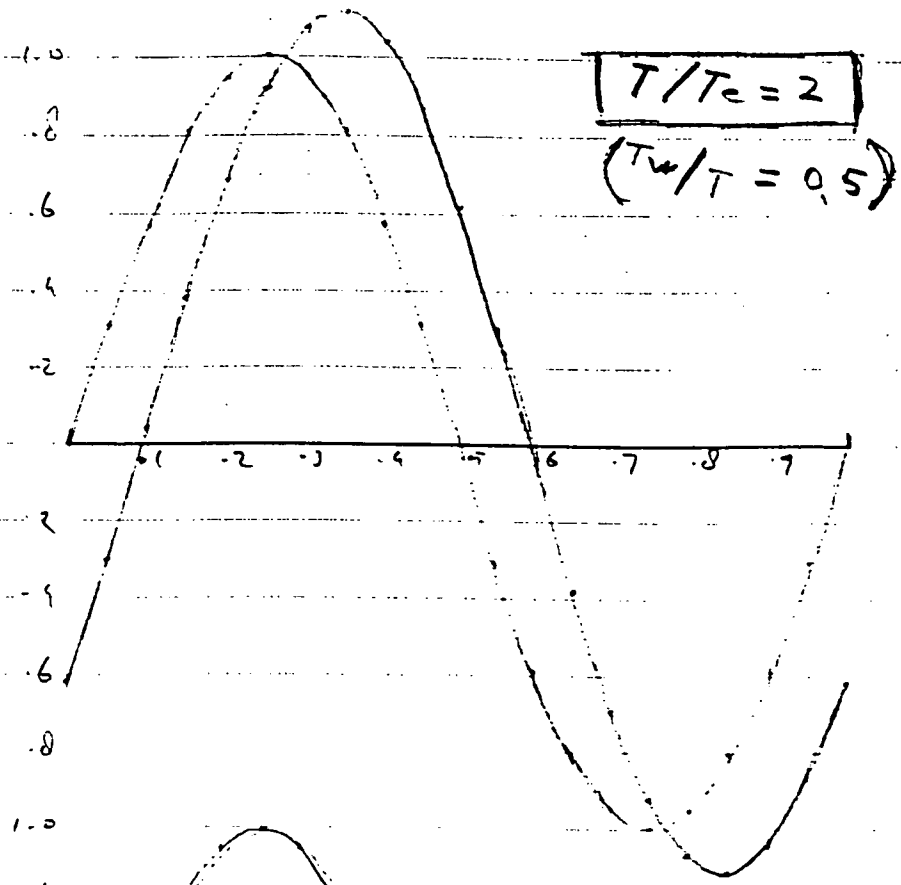
$$(T_w/T = 0,05)$$



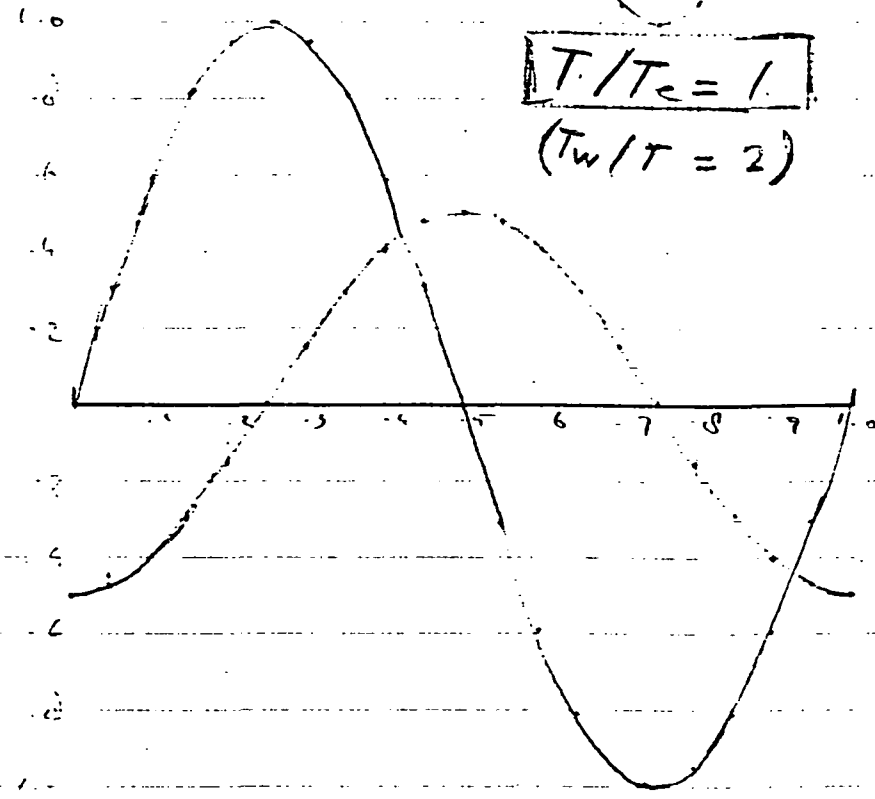
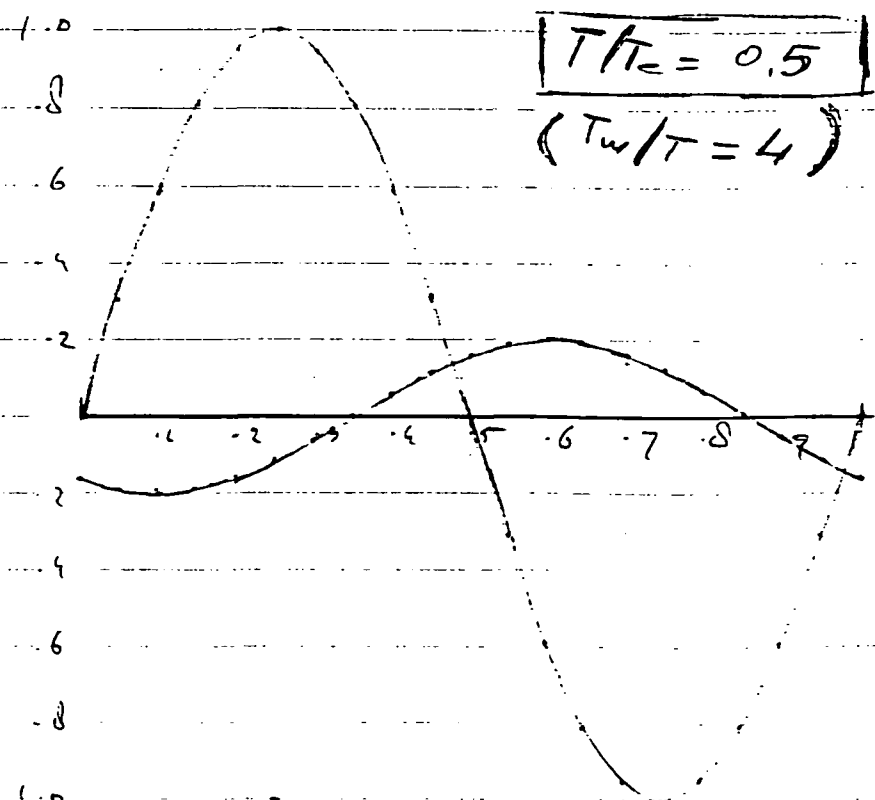
$$T_w/T_e = 1$$



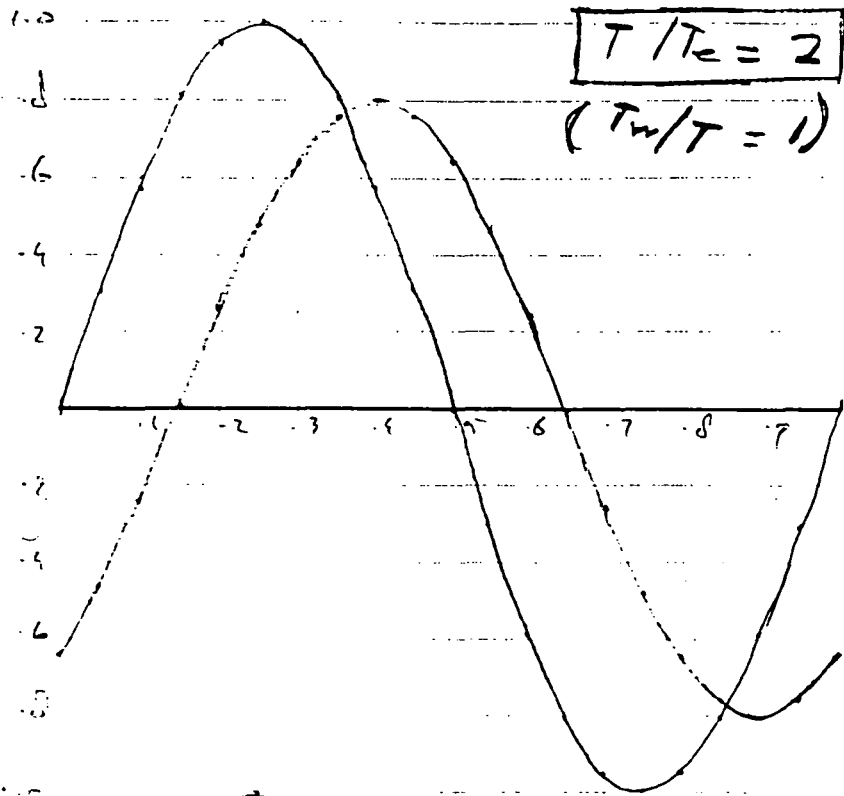
$$T_w/T_e = 1$$



$$T_w/T_c = 2$$

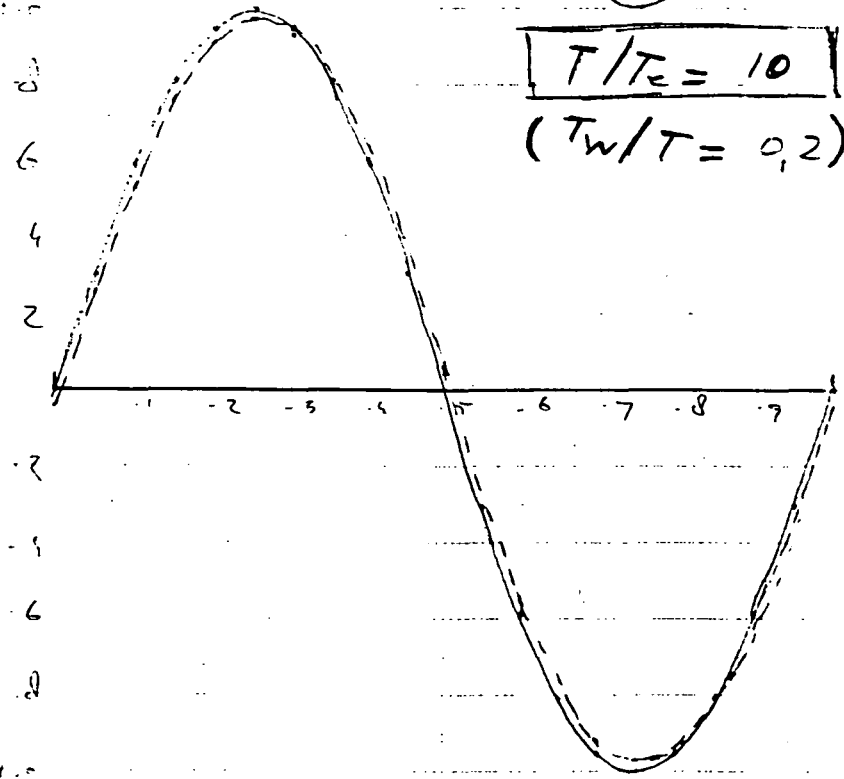


$$T_w/T_c = 2$$



$$T/T_c = 2$$

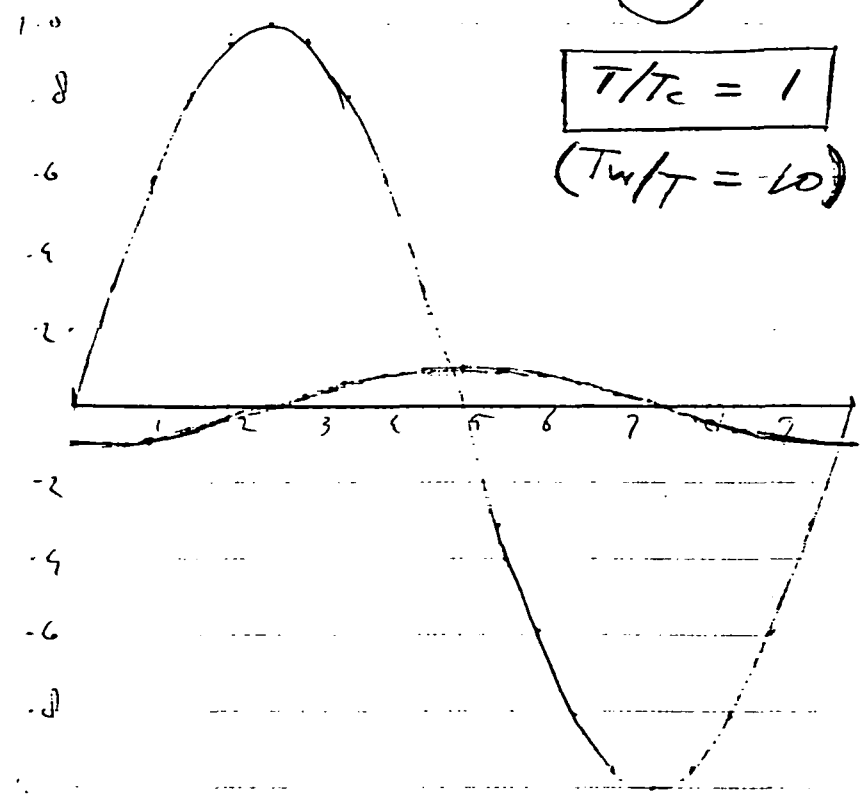
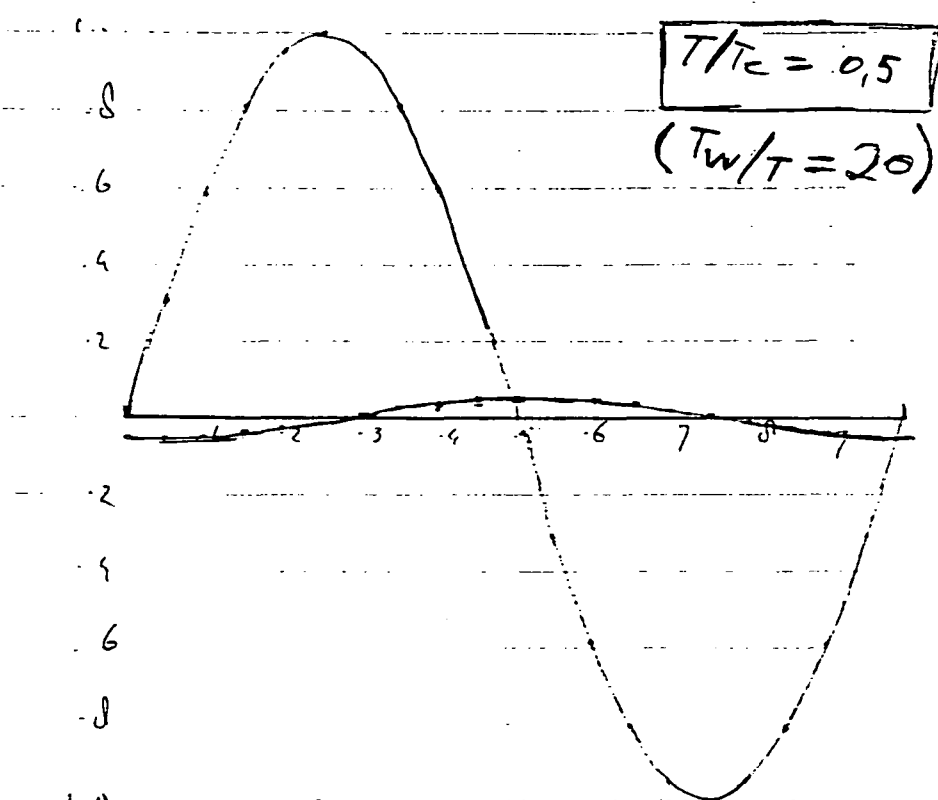
$$(T_w/T = 1)$$



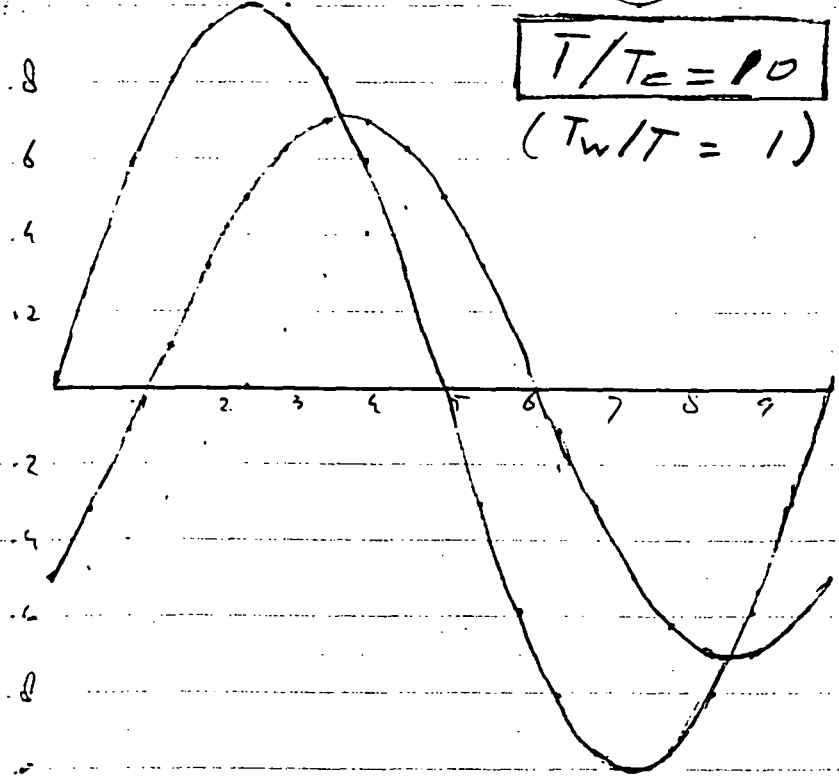
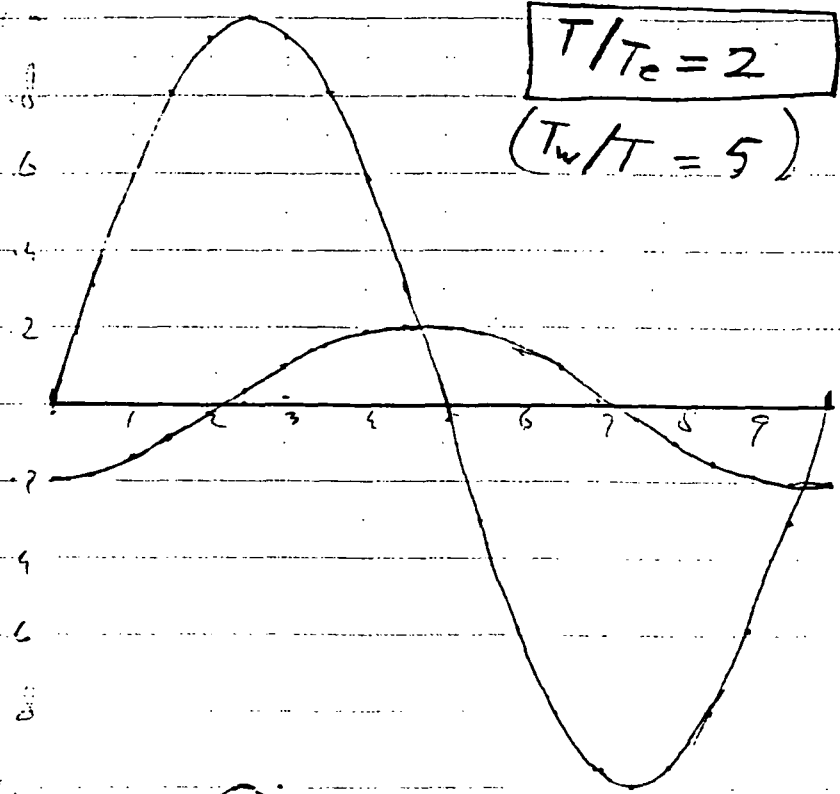
$$T/T_c = 10$$

$$(T_w/T = 0,2)$$

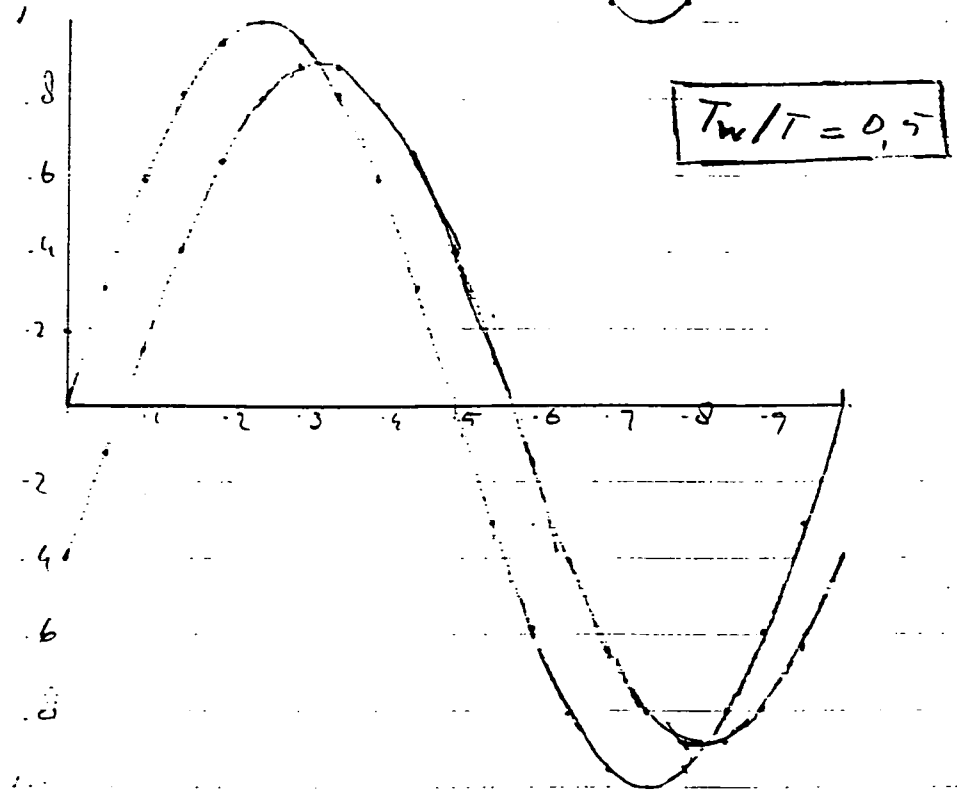
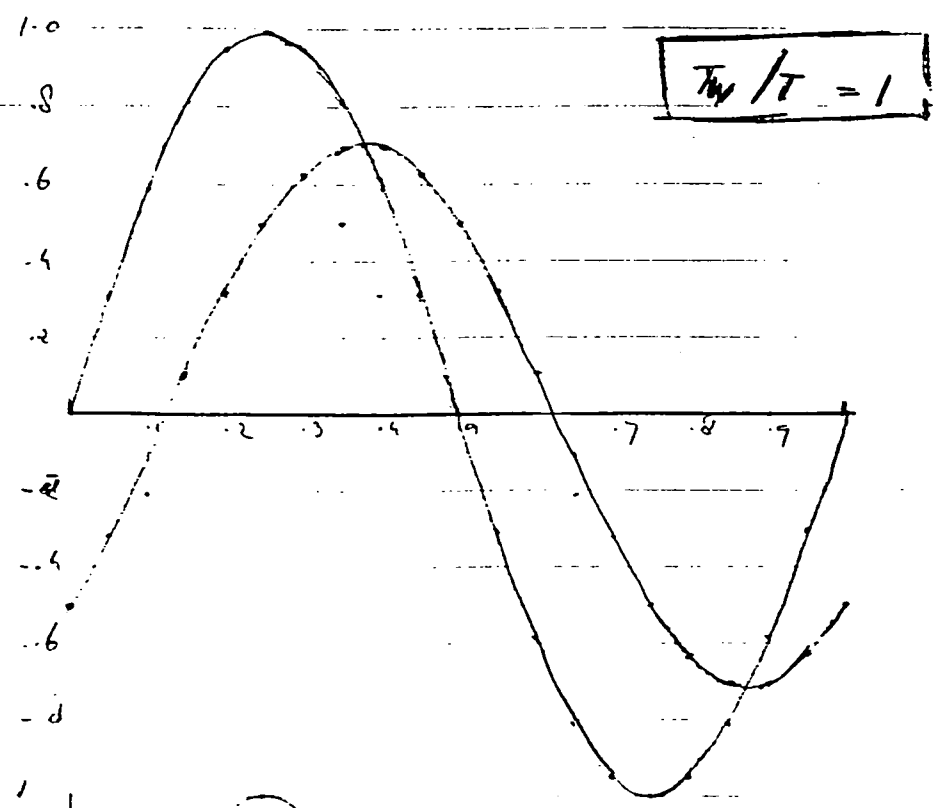
$$T_w/\tau_e = 10$$



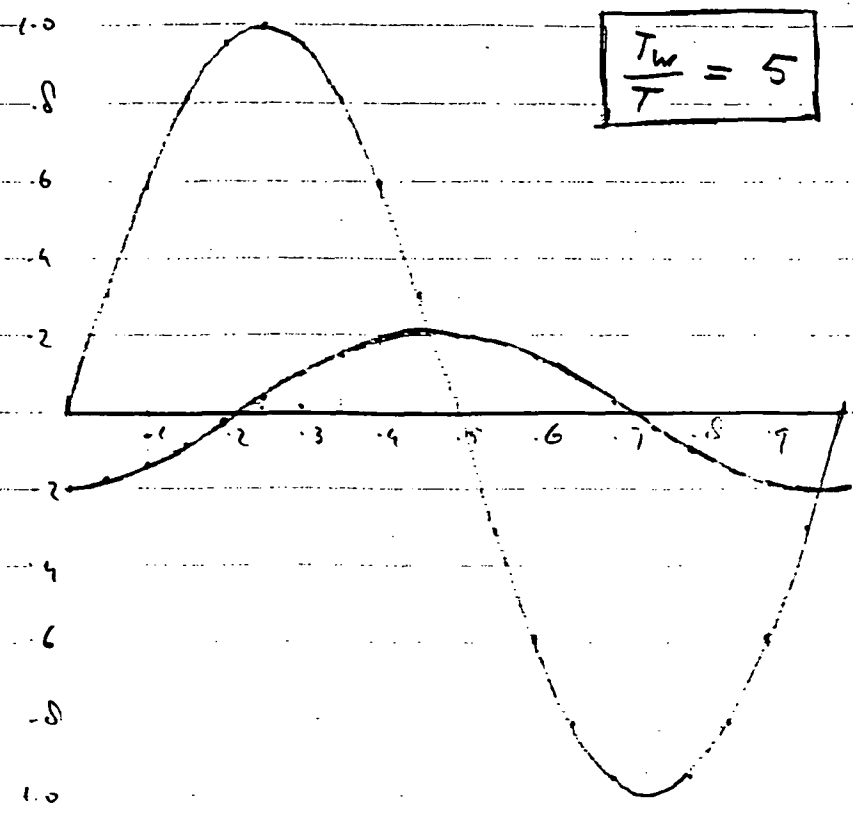
$$T_w/T_c = 10$$



$$T_w/T_c = 0$$



$$T_w/T_c = \infty$$



Sectie 5

Stabiliteit van steenzettingen

De invloed van de traagheid van het water in de geulen



Aan

Leden TAW-A2 (Open Taludbekledingen)

Contactpersoon	Doorkiesnummer
ir.B.P.Rigter.	
Datum	Bijlage(n)
7 september 1993	
Ons kenmerk	Uw kenmerk
Onderwerp	
De invloed van de traagheidsterm.	

=====

I. INLEIDING.

In nota N 602 werd een differentiaalvergelijking afgeleid voor stijghoogteverschillen, waarin rekening werd gehouden met de traagheidsterm. Aangetoond werd dat deze term bij grote geulen onder blokken een belangrijke rol zou kunnen spelen, zeker bij golven met perioden minder dan ca. 3 seconden. Welke rol ze zouden kunnen spelen werd verder geïllustreerd aan de hand van enige situaties van taluds met een dichte toplaag. Het opvallendste was de grote beweging van het water in de geulen en dus van het freatisch vlak, mits het water door een open teenconstructie kon stromen. Een ander voorbeeld gaf aan dat een los blok een grote beweging zou kunnen krijgen bij een plotselinge verlaging van de buitenwaterstand, als er geulen onder een overigens dicht talud aanwezig zouden zijn, een situatie die zich waarschijnlijk nogal eens voordoet.

Er werd niet ingegaan op effecten wanneer de toplaag wel doorlatend is. Een van de redenen is dat een analytische beschrijving van de stijghoogte variaties op het talud gedurende een golfperiode alleen al moeizaam is, laat staan een analytische oplossing van de d.v.. Een sterk verbeterde versie van STEENZET lijkt de enige mogelijkheid. Toch blijkt het mogelijk een aantal bijzondere gevallen op analytische wijze op te lossen en daarmee meer inzicht te krijgen in het effect van de traagheidsterm. De - althans voor mij - verrassende conclusie is dat het effect van de traagheid is dat de drukverschillen (overdrukken) over het algemeen minder worden. Bovendien treden -uiteraard - faseverschuivingen op.

Postadres postbus 5044, 2600 GA Delft
Bezoekadres van der Burghweg 1

Telefoon 015-699111
Telefax 015-611361
Telex 38043

II. EFFECTEN BIJ DIVERSE STIJGHOOGTEREGIMES OP DE TOPLAAG.

II.1 Inleiding:

Als randvoorwaarde beschouwen we een periodiek in plaats en tijd veranderende stijghoogte op de toplaag van een horizontale steenzetting. Voorlopig nemen we aan dat de invloed van randvoorwaarden in het filter - zoals overgangsconstructies - verwaarloosbaar zijn. Eerst zal de uitgebreide basisvergelijking nog eens afgeleid worden. Daarna wordt het belastinggeval van een staande golf onderzocht en tenslotte het belastinggeval van een lopende golf.

II.2 Afleiding van de vergelijkingen:

In N 602 wordt als bewegingsvergelijking afgeleid:

$$(1) \quad \frac{1}{n} \frac{\delta v}{\delta t} = -g \frac{\delta \varphi}{\delta x} - \frac{g}{k_f} \cdot v$$

en als continuïteitsvergelijking:

$$(2) \quad \frac{\delta v}{\delta x} = -\frac{k_T}{d_f d_T} \cdot (\varphi - \varphi_T)$$

Door uit deze twee vergelijkingen de snelheid te elimineren ontstaat de uitgebreide differentiaalvergelijking voor de stijghoogte van het filterwater, waarin een traagheidsterm (de afgeleide naar de tijd) een rol speelt:

$$(3) \quad \frac{1}{\omega_{lek} \cdot \Lambda^2} \cdot \frac{\delta (\varphi - \varphi_T)}{\delta t} = \frac{\delta^2 \varphi}{\delta x^2} - \frac{(\varphi - \varphi_T)}{\Lambda^2}$$

waarin :

Λ : de lek lengte [m], gedefinieerd door:

$$\Lambda = \sqrt{d_f d_T \cdot \frac{k_f}{k_T}}$$

en :

ω_{lek} : de lekfrequentie [s⁻¹], gedefinieerd door:

$$\omega_{lek} = \frac{ng}{k_f}$$

II.3 Staande golf op horizontale steenzetting.

Voor de belasting op de toplaag voeren we eerst een staande golf in:

$$(4) \quad \varphi_T = h + A \cdot \sin(\kappa x) \cdot \sin(\omega t)$$

waarin:

$\kappa = 2 \pi/L$, met L: de golflengte van de staande golf;

$\omega = 2 \pi/T$, met T: de periode van de staande golf.

Voor de stijghoogte in het filter geldt dan:

$$(5) \quad \varphi = h + [B_1 \sin(\omega t) + B_2 \cos(\omega t)] \cdot \sin(\kappa x)$$

met:

$$B_1 = + A \cdot \frac{(1 + \kappa^2 \Lambda^2) + \left(\frac{\omega}{\omega_{lek}}\right)^2}{(1 + \kappa^2 \Lambda^2)^2 + \left(\frac{\omega}{\omega_{lek}}\right)^2}$$

en:

$$B_2 = + A \cdot \frac{\kappa^2 \Lambda^2 \left(\frac{\omega}{\omega_{lek}}\right)}{(1 + \kappa^2 \Lambda^2)^2 + \left(\frac{\omega}{\omega_{lek}}\right)^2}$$

Bij een "normaal" granulair filter is ω_{lek} zeer groot (orde 10 of hoger en ω klein (orde 1), waardoor B_2 verwaarloosbaar wordt t.o.v. B_1 en B_1 overgaat in:

$$B_1 = A \cdot \frac{1}{(1 + \kappa^2 \Lambda^2)}$$

Dit is precies dezelfde uitdrukking als gepresenteerd in notitie N 467 (erosie door turbulentie) als oplossing van de bekende differentiaalvergelijking zonder traagheidsterm.

Bij zeer doorlatende geulen en/of hoge belastingfrequenties neemt het belang van B_2 toe en dus treedt er ook een faseverschuiving op, d.w.z. dat het maximum of minimum van de stijghoogte in het filter (op een bepaalde plaats) later (of eerder) optreedt dan het maximum (minimum) van de belasting op de

toplaag. Voor het maximum verschil in stijghoogte wordt gevonden:

$$(6) \quad (\varphi - \varphi_T)_{\max} = A \cdot \sin(\kappa x) \cdot \frac{\kappa^2 \Lambda^2}{\sqrt{(1 + \kappa^2 \Lambda^2)^2 + \left(\frac{\omega}{\omega_{lek}}\right)^2}}$$

We zien dus dat bij zeer doorlatende filters en/of zeer hoge frequenties het drukverschil minder wordt. Eén en ander is geïllustreerd in Figuur 1 aan de hand van de volgende grafieken voor een open geul ($n=1$) met een k -waarde van 10m/s :

- Een semi-stationaire golf in (langsrichting) op het tijdstip van maximale amplitudes, met de reactie van het filter en daaronder de stijghoogte verschillen.

- Vervolgens dezelfde golf (met een golflengte van $12,6\text{ m.}$), maar nu met een periode van $4,2$ seconde, op het tijdstip van maximale amplitudes. We zien dat de drukvariaties in het filter groter zijn dan bij een semi-stationaire golf. Omdat er een faseverschuiving in de tijd optreedt zijn de verschildrukken minder dan bij de semi-stationaire staande golf.

- Tenslotte worden in Figuur 1 grafieken gegeven van het verloop van de stijghoogten en -verschillen in de tijd (in een bepaalde doorsnede van de zetting ($x=\frac{1}{2}L$)) voor dezelfde staande golf van $4,2\text{ sec.}$ We zien de faseverschuiving: De extrema in het filter treden eerder (!) op dan de extrema op de top-laag, en de extrema van de stijghoogteverschillen treden later op dan de extrema op de toplaag!

Omdat dit resultaat niet op voorhand door mij verwacht werd heb ik het probleem nog op de volgende manier beschouwd:

De filtersnelheid.

Vergelijking (3) blijft een beetje vreemde vergelijking, waarin de betekenis van de verschillende termen wat moeilijk is te duiden. Daarom heb ik in plaats van de snelheid v (eigenlijk het specifiek debiet) te elimineren de stijghoogte in het filter φ geëlimineerd uit de vergelijkingen (1) en (2). Het resultaat is:

$$(7) \quad \frac{\delta v}{\delta t} - \omega_{lek} \cdot \Lambda^2 \cdot \frac{\delta^2 v}{\delta x^2} + \omega_{lek} \cdot v = -ng \cdot \frac{\delta \varphi_T}{\delta x}$$

De eerste term van het linkerlid is te duiden als de traagheidsterm, de tweede geeft de invloed van de toestroming van water uit de toplaag dat ook versneld moet worden, de derde term geeft de invloed van de weerstand. Het rechterlid tenslotte geeft de invloed van het verhang op de toplaag, dat de traagheid en weerstand moet overwinnen.

Bij dezelfde aanname voor de belasting op de toplaag (vergelijking (4)) is als oplossing van vergelijking (7) voor het

specifieke debiet te schrijven:

$$(8) \quad v = [D_1 \cdot \sin(\omega t) + D_2 \cdot \cos(\omega t)] \cdot \cos(\kappa x)$$

met:

$$D_1 = -A \cdot \kappa \cdot k_f \cdot \frac{(1 + \kappa^2 \Lambda^2)}{(1 + \kappa^2 \Lambda^2)^2 + \left(\frac{\omega}{\omega_{lek}}\right)^2}$$

en:

$$D_2 = + A \cdot \kappa \cdot k_f \cdot \frac{\left(\frac{\omega}{\omega_{lek}}\right)}{(1 + \kappa^2 \Lambda^2)^2 + \left(\frac{\omega}{\omega_{lek}}\right)^2}$$

Ook nu dus weer een faseverschuiving. Voor de maximum snelheid wordt gevonden:

$$(9) \quad |v_{\max}| = A \cdot \kappa \cdot k_f \cdot \sin(\kappa x) \cdot \frac{1}{\sqrt{(1 + \kappa^2 \Lambda^2)^2 + \left(\frac{\omega}{\omega_{lek}}\right)^2}}$$

Uit deze uitdrukking is te zien dat voor (zeer) hoge frequenties de snelheid naar nul gaat.

In Figuur 2 is voor dezelfde twee gevallen als in Figuur 1 het snelheidsverloop uitgezet tegen de tijd. Volgens vergelijking (8) treden de maximale snelheden op in $x = n \cdot \pi$. Wij hebben gekozen voor $n = 0$. Uitgezet zijn de snelheden gedeeld door $A \cdot \kappa \cdot k_f$.

We zien (tot onze opluchting) dat de extrema en nuldoorgangen voor het geval met traagheidsinvloed nu inderdaad later optreden dan de extrema en nuldoorgangen van het geval zonder traagheidsinvloed. Dit is geheel volgens de verwachting. Als we vervolgens oplossing (8) substitueren in vergelijking (1) en dan daaruit de uitdrukking voor φ oplossen, vinden we dezelfde oplossing (5) als met de vorige methode.

We zien ook dat de dimensieloze snelheden afnemen bij toenemende traagheidsinvloed. Omdat de invloed van de traagheid vooral optreedt bij grote doorlatendheid van het filter en de dimensieloze snelheid vermenigvuldigd moet worden met de doorlatendheid k_f van het filter, volgt (uiteraard) dat de snelheden toenemen met de doorlatendheid!

We kunnen dus aannemen dat formule (5) en dus ook (6) goede informatie geven. In Figuur (3) is formule (6) voor de maximale stijghoogte-verschillen grafisch weergegeven. Als we het drukverschil, gemeten in een proef met traagheidseffecten zouden interpreteren als een proef waarbij de traagheidseffecten verwaarloosbaar zijn, vinden we dus een kleinere lek lengte dan wanneer we wel rekening houden met traagheidseffecten. Bij hogere frequenties kan de fout aanzienlijk zijn. Een tweede conclusie kan zijn dat bij hogere frequenties de stijghoogteverschillen afnemen. Aangezien golfklappen mathematisch beschreven kunnen worden als een som van verschillende hoge frequenties, mag verwacht worden dat de stijghoogteverschillen bij golfklappen minder groot zullen zijn dan berekend met de quasi-stationaire theorie!

II.4 Lopende golven op horizontale zetting.

Omdat we gezien hebben dat er bij staande golven een faseverschuiving in de tijd optreedt, lijkt het de moeite waard eens te onderzoeken of er ook een faseverschuiving in de plaats zou optreden als er een lopende golf op de toplaag "beweegt". Voor een belasting van een lopende golf is te schrijven:

$$(10) \quad \varphi_T = h + A \cdot \sin(\kappa(x - ct))$$

waarin c : de voortplantingssnelheid van de golf in de richting van de positieve x -as.

De oplossing voor de stijghoogte van het filterwater luidt:

$$(11) \quad \varphi = h + B_1 \cdot \sin(\kappa(x - ct)) + B_2 \cdot \cos(\kappa(x - ct))$$

met:

$$B_1 = A \cdot \frac{(1 + \kappa^2 \Lambda^2) + \left(\frac{\kappa C}{\omega_{lek}}\right)^2}{(1 + \kappa^2 \Lambda^2)^2 + \left(\frac{\kappa C}{\omega_{lek}}\right)^2}$$

en:

$$B_2 = -A \cdot \frac{\kappa^2 \Lambda^2 \left(\frac{\kappa C}{\omega_{lek}}\right)}{(1 + \kappa^2 \Lambda^2)^2 + \left(\frac{\kappa C}{\omega_{lek}}\right)^2}$$

Omdat:

$$c = \frac{L}{T} = \frac{\frac{2\pi}{T}}{\frac{2\pi}{L}} = \frac{\omega}{\kappa}$$

is er een perfecte overeenstemming tussen de formules voor de amplitudes bij staande golven en lopende golven. Omdat we nu een lopende golf beschouwen is er nu niet alleen een faseverschuiving in de tijd tussen de reactie van de stijghoogte in het filter, maar ook van een faseverschuiving in de plaats. In Figuur 4 is dit geïllustreerd aan de hand van de volgende grafieken voor een open geul ($n=1$) met een k -waarde van 10m/s :

- Een semi-stationaire golf in x -richting ($c=0$) met de reactie van het filter en daaronder de stijghoogte verschillen (geen faseverschuiving).
- Vervolgens dezelfde golf (met een golflengte van $12,6\text{ m.}$) met een voortplantingssnelheid van 3 m/s . We zien dat de drukvariatië in het filter groter zijn dan bij een staande golf en dat er een faseverschuiving optreedt. Daardoor zijn de verschillen minder dan bij de staande golf en treedt het maximum stijghoogteverschil niet op dezelfde plaats op als het minimum van de drukgolf!!
- Tenslotte worden in Figuur 2 grafieken gegeven van het verloop van de stijghoogten en -verschillen in de tijd (in een bepaalde doorsnede van de zetting ($x=0$)) voor dezelfde lopende golf. Ook nu zien we een faseverschuiving: De extrema in het filter treden eerder (!) op dan de extrema op de toplaag, en het maximum stijghoogteverschil treedt later op dan de minimum belasting op de toplaag!

Tenslotte kijken we naar de filtersnelheid " v " bij lopende golven. Door substitutie van de uitdrukkingen voor φ en φ_r (vergelijkingen (10) en (11)) in de continuïteitsvergelijking (2) vinden we een uitdrukking voor de afgeleide naar x van v .

Integratie levert:

$$(12) \quad v = E_1 \cdot \sin(\kappa(x - ct)) + E_2 \cdot \cos(\kappa(x - ct))$$

met:

$$E_1 = + A \cdot \kappa \cdot k_f \cdot \frac{\left(\frac{\kappa C}{\omega_{lek}}\right)}{(1 + \kappa^2 \Lambda^2)^2 + \left(\frac{\kappa C}{\omega_{lek}}\right)^2}$$

en:

$$E_2 = - A \cdot \kappa \cdot k_f \cdot \frac{(1 + \kappa^2 \Lambda^2)}{(1 + \kappa^2 \Lambda^2)^2 + \left(\frac{\kappa C}{\omega_{lek}}\right)^2}$$

In Figuur 5 is bovenaan voor $x = 0$ het verloop in de tijd getekend van de stijghoogte op de top laag en daaronder van de filtersnelheid. Onderaan is voor $t = 0$ het verloop in x -richting uitgezet van de stijghoogte op de top laag en van de filtersnelheid. In de laatste figuur is vergelijking mogelijk met de dimensieloze snelheden zoals die optreden bij verwaarlozing van de traagheidsterm. We zien dat de snelheden onder invloed van de traagheid inderdaad vertraagd reageren. Deze grafiek ziet er dus vertrouwenwekkend uit. Volgens de continueïteitsvergelijking (2) moet op de plaatsen waar de filtersnelheid maximaal is, de stijghoogte in het filter gelijk zijn aan de stijghoogte op de top laag. In Figuur 4 kunnen we zien dat dit inderdaad zo is. Er is dus geen reden te twijfelen aan het onverwachte verloop van de stijghoogte in het filter.

III. INVLOED RANDVOORWAARDEN.

De algemene oplossing van de bekende d.v. zonder traagheidseffecten bestaat uit de som van een particuliere oplossing, die afhankelijk is van de vorm van de belasting op de top laag φ_T , en de complementaire functie $A_1 e^{+x/\Lambda} + A_2 e^{-x/\Lambda}$. De complementaire functie voldoet aan de d.v. waarin de belasting op de top laag gelijk wordt gesteld aan 0. Met behulp van deze complementaire functie is het mogelijk de invloed van randvoorwaarden - zoals al dan niet doorlatende overgangsconstructies - in rekening te brengen.

In hoofdstuk II is een tweetal particuliere oplossingen voor de d.v. met traagheidseffecten (vergelijking (3)) onderzocht, respectievelijk voor staande golven en voor lopende golven. Naar analogie van de d.v. zonder traagheidseffecten zoeken we nu dus een complementaire functie die voldoet aan vergelijking (3) waarin $\varphi_T = 0$ is gesteld.:

$$(13) \quad \frac{1}{\omega_{lek} \cdot \Lambda^2} \cdot \frac{\delta \varphi}{\delta t} = \frac{\delta^2 \varphi}{\delta x^2} - \frac{\varphi}{\Lambda^2}$$

Bij het zoeken naar een oplossing merken we op dat in het traagheidsloze geval van een horizontale steenzetting het verloop van de stijghoogte in het filter zich onmiddellijk aanpast aan bijvoorbeeld twee gegeven waterstanden aan de randen van de zetting. Als de traagheidseffecten in rekening gebracht moeten worden moeten dus in het zelfde voorbeeld de stijghoogten aan beide randen gegeven worden als functie van de tijd. Om het "eenvoudig" te houden nemen we aan dat de

stijghoogten aan beide randen sinusvormig in de tijd verlopen met dezelfde frequentie ω .
De oplossing luidt dan:

$$\begin{aligned}
 (14) \quad \varphi = & A_1 \cdot e^{+\frac{ax}{\Lambda}} \left[\cos \frac{bx}{\Lambda} \sin \omega t + /- \sin \frac{bx}{\Lambda} \cos \omega t \right] + \\
 & + A_2 \cdot e^{+\frac{ax}{\Lambda}} \left[\sin \frac{bx}{\Lambda} \sin \omega t + /- \cos \frac{bx}{\Lambda} \cos \omega t \right] + \\
 & + A_3 \cdot e^{-\frac{ax}{\Lambda}} \left[\cos \frac{bx}{\Lambda} \sin \omega t + /- \sin \frac{bx}{\Lambda} \cos \omega t \right] + \\
 & + A_4 \cdot e^{-\frac{ax}{\Lambda}} \left[\sin \frac{bx}{\Lambda} \sin \omega t + /- \cos \frac{bx}{\Lambda} \cos \omega t \right]
 \end{aligned}$$

waarin:

$$a = \frac{\frac{1}{2} \frac{\omega}{\omega_{lek}}}{\sqrt{\frac{1}{2} \left[-1 + \sqrt{1 + \left(\frac{\omega}{\omega_{lek}} \right)^2} \right]}}$$

en

$$b = \sqrt{\frac{1}{2} \left[-1 + \sqrt{1 + \left(\frac{\omega}{\omega_{lek}} \right)^2} \right]}$$

Door de waarden van x voor de randen in te vullen ontstaan twee uitdrukkingen, elk met een sinus en een cosinus in de tijd, waarin de vier onbekenden A_i voorkomen. Omdat de stijghoogten in de randen ook elk als de som van een sinus en een cosinus geschreven worden, zijn er dus vier vergelijkingen in vier onbekenden en is het hele probleem beschreven.

We zien dat de e-machten vermenigvuldigd zijn met de factor a , welke altijd groter is dan 1. Dit betekent dat de invloed van de randen sneller afneemt dan in de berekening zonder traagheid.

De uitdrukkingen tussen blokhaken achter de e-machten in

vergelijking (14) zijn ook te schrijven als de sinus, resp. de cosinus van :

$$\frac{bx}{\Lambda} +/ - \omega t = \frac{b}{\Lambda} (x +/ - \frac{\omega \Lambda}{b} t)$$

Hieruit is de voortplantingssnelheid c van een verstoring af te leiden:

$$(15) \quad c = +/ - \frac{\omega \Lambda}{b}$$

Voor zeer kleine waarden ($\ll 1$) van ω/ω_{lek} , dus bij lage frequenties en slecht doorlatende filters, kan de waarde van b benaderd worden door:

$$b = \sqrt{\frac{1}{2} \left[-1 + \sqrt{1 + \left(\frac{\omega}{\omega_{lek}} \right)^2} \right]} = \sqrt{\frac{1}{2} \left[-1 + \sqrt{\left[1 + \frac{1}{2} \left(\frac{\omega}{\omega_{lek}} \right)^2 \right]^2} \right]} = \frac{1}{2} \frac{\omega}{\omega_{lek}}$$

De voortplantingssnelheid wordt dan:

$$(16) \quad c = 2 \cdot \omega_{lek} \cdot \Lambda = 2 \cdot \frac{ng}{k_f} \cdot \Lambda$$

Met bijvoorbeeld $n = 0,5$, $k_f = 10^{-3}$ m/s en $\Lambda = 0,5$ m volgt dat $c = 5000$ m/s.

Als echter $n = 1$, $k_f = 10$ m/s en $\omega = 1$ ($T = 6$ sec.) is $\omega/\omega_{lek} = 1$. Voor b volgt dan een waarde van ongeveer 0,45. Bij een leklengte van 0,5 m volgt dat $c = 1$ m/s.

Hiermee is duidelijk aangetoond dat als de geultjestheorie voor klei en zand gehanteerd zou worden, de semi-stationaire theorie niet meer opgaat.

Voor zeer kleine waarden ($\ll 1$) van ω/ω_{lek} , dus bij lage frequenties en slecht doorlatende filters, kan de waarde van a benaderd worden door 1. Dit is in te zien door de benadering van b te substitueren in de uitdrukking voor a . In deze gevallen geldt dus de traagheidsloze benadering.

Als echter $n = 1$, $k_f = 10$ m/s en $\omega = 1$ ($T = 6$ sec.) is $\omega/\omega_{lek} = 1$. Voor b volgt dan een waarde van ongeveer 0,45, dus voor a een waarde van 1,1.

In Figuur 6 is het verloop van de stijghoogte in het filter gegeven voor een filter waar in $x = 0$ een sinusvormig verloop van de waterspanning wordt opgelegd. In de positieve x -richting loopt het filter uniform door. Omdat voor $x \rightarrow \infty$ de stijghoogte zal naderen naar 0 moeten A_1 en A_2 van de oplossing (14) nul zijn. Voor de overblijvende termen kunnen we ook

schrijven:

$$\varphi = A_1 e^{-a \frac{x}{\Lambda}} \sin \frac{b}{\Lambda} \left(x - \frac{\Lambda}{b} \omega t \right) + A_2 e^{-a \frac{x}{\Lambda}} \cos \frac{b}{\Lambda} \left(x - \frac{\Lambda}{b} \omega t \right)$$

en door de tijd op te "schuiven" is hiervoor te schrijven:

$$\varphi = -A e^{-a \frac{x}{\Lambda}} \sin \frac{b}{\Lambda} \left(x - \frac{\Lambda}{b} \omega t \right)$$

In de bovenste figuur van Figuur 6 is de laatste oplossing uitgezet voor zeer grote ω_{1ek} en voor $\omega/\omega_{1ek} = 1$. In het eerste geval vinden we de oplossing zoals die ook gevonden wordt met de theorie zonder traagheid. Op elk tijdstip een simpele e-macht, bepaald door de stijghoogte in $x=0$. Voor $\omega/\omega_{1ek} = 1$ is gestippeld aangegeven de grenzen $Ae^{-ax/\Lambda}$. Tussen deze grenzen bewegen zich de stijghoogten in het filter. Deze grenzen wijken nog weinig af van de semi-stationaire oplossing. Met getrokken lijnen zijn de stijghoogten op tijdstippen 0 en $\frac{1}{4}T$ aangegeven. Voor $t = 0$ is de stijghoogte in $x=0$ gelijk aan 0, maar over een aantal keren de lek lengte is de stijghoogte negatief (ongelijk 0); voor $t = \frac{1}{4}T$ is de stijghoogte in $x = 0$ gelijk aan A en voor positieve x nog weer iets kleiner dan $Ae^{-ax/\Lambda}$.

In de onderste figuur van Figuur 6 is hetzelfde gedaan, maar nu voor $\omega/\omega_{1ek} = 5$. De grenzen $Ae^{-ax/\Lambda}$ zijn weer gestippeld. We zien nu heel grote verschillen met de traagheidsvrije theorie. De invloed van de rand wordt minder, de invloed van het golfkarakter wordt groter. De stijghoogten in het filter wijken minder af van de stijghoogten op de top laag.

De bovenste figuur van Figuur 6 is representatief voor "normale" filters, de onderste voor zeer doorlatende filters (geulen). De bovenste figuur is echter ook representatief voor doorlatende filters, mits de frequentie van de randvoorwaarde maar laag is; de onderste figuur is ook representatief voor slecht-doorlatende filters, mits de frequentie maar hoog is. De onderste figuur kan ook beschouwd worden als de reactie van sinusvormige golfklappen (hoge frequentie) in $x = 0$. Hoe korter de klappen des te hoger de frequentie en des te groter is de demping!

IV. CONCLUSIES.

Het blijkt mogelijk exercities uit te voeren met de uitgebreide differentiaalvergelijking voor de stijghoogten in het filter, waarbij de traagheidsterm in rekening is gebracht. Daardoor is het ook mogelijk in te schatten wanneer en wat voor effecten de traagheidsterm heeft.

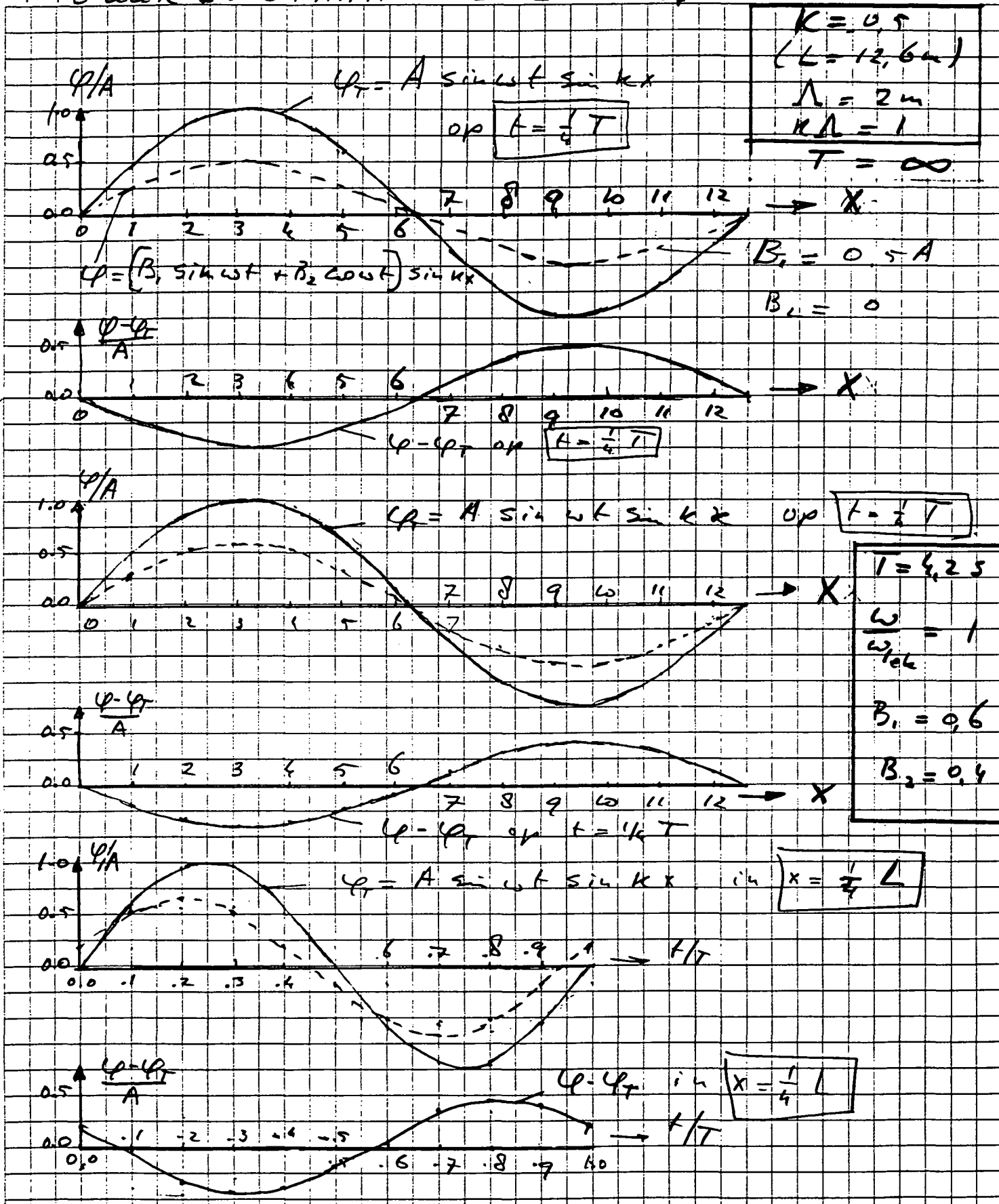
Zeer recent zag ik het werk van Van Gent in het kader van MAST betreffende metingen in de golftunnel van WL ter bepaling van

de traagheidsterm. Hij en anderen (G.Smith o.a.) hebben aangetoond dat de traagheidsterm inderdaad meetbare invloed heeft bij hoge frequenties.

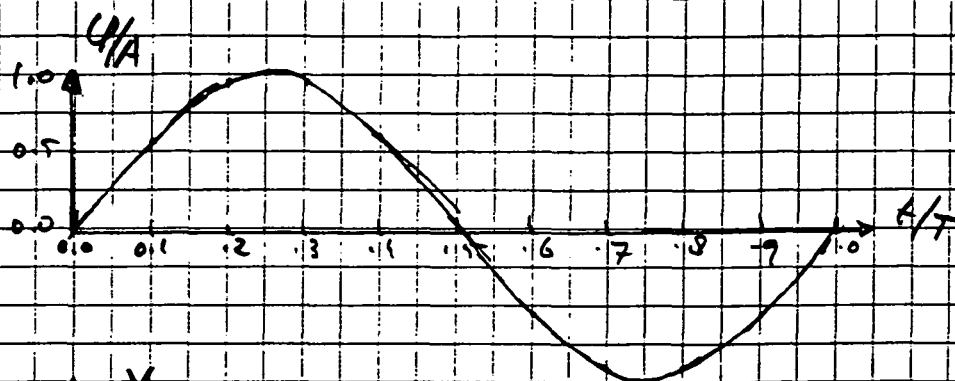
Uit de resultaten van deze nota blijkt dat het effect van de traagheidsterm over het algemeen leidt tot kleiner stijghoogteverschillen tussen topklaag en filter. De maximale stijghoogteverschillen treden niet meer op op tijdstippen waarop de topklaag minimaal belast is, ook in x-richting treden verplaatsingen op.

In deze nota is alleen gekeken naar horizontale steenzettingen. Bij taludbekledingen is de situatie een stuk ingewikkelder. In vorige studies is al aangetoond dat de beweging van de freatische lijn een belangrijke invloed heeft. Alleen in enkele zeer speciale gevallen (zie N 602) is de beweging van de freatische lijn te berekenen. De beschouwingen uit de huidige nota kunnen er hopelijk toe bijdragen in de toekomst numerieke berekeningen te maken voor deze meer ingewikkelde situaties.

FIGURA 1: STANDE GOLF $k_f = 10 \text{ m/s}$



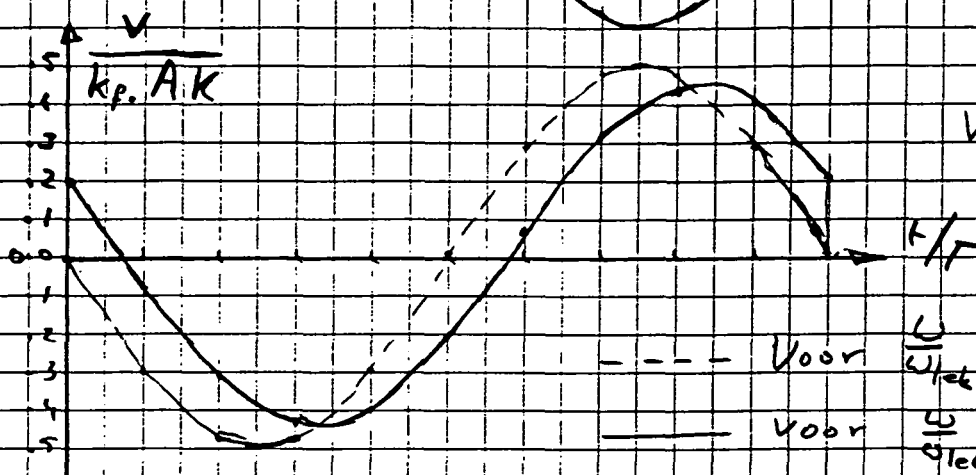
FIGUUR 2: FILTERSMELHEID STAANDE GOLF



$$U_T = A \sin \omega t \sin kx$$

in $x = \frac{1}{4} L$

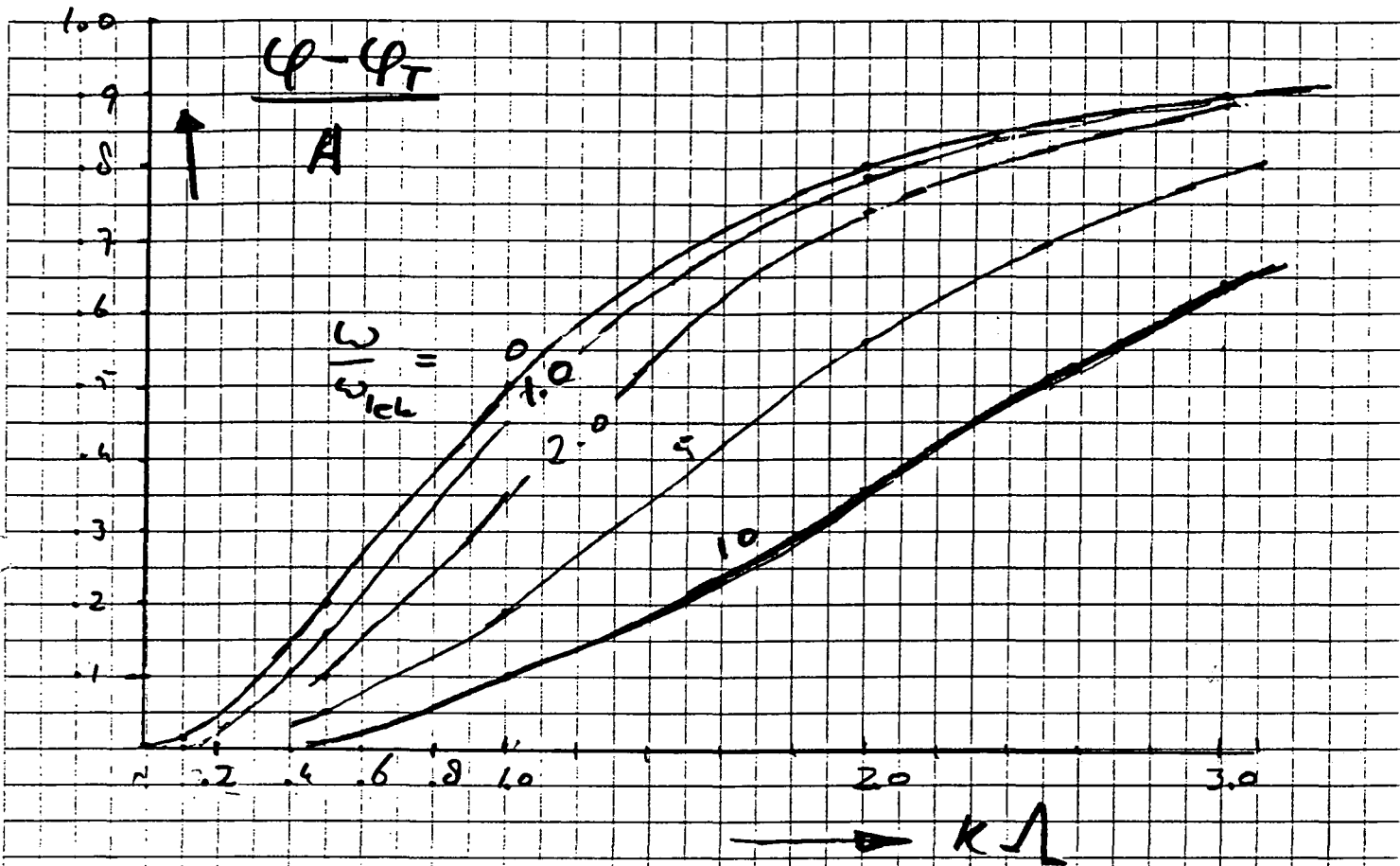
$$kL = 1$$



$$V = [D_1 \sin \omega t + D_2 \cos \omega t] \cdot \cos kx$$

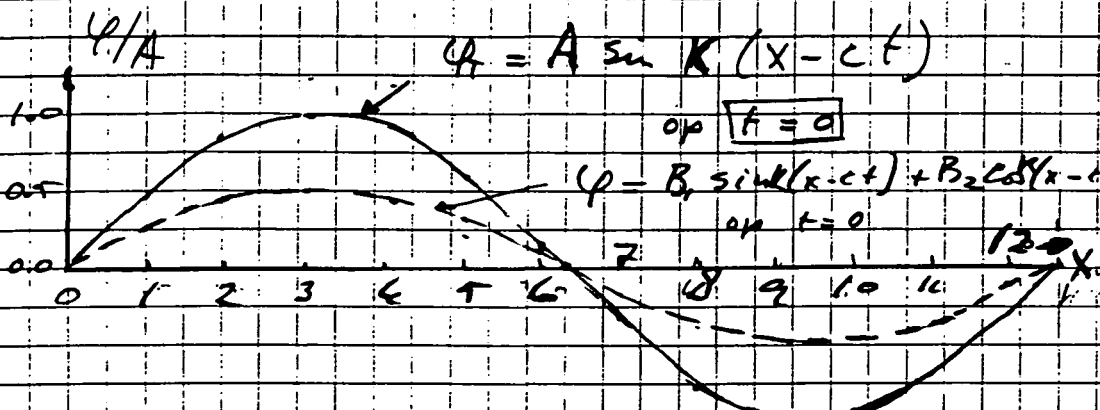
in $x = 0$

--- Voor $\frac{U}{\omega L k} < 1$
 — Voor $\frac{U}{\omega L k} = 1$



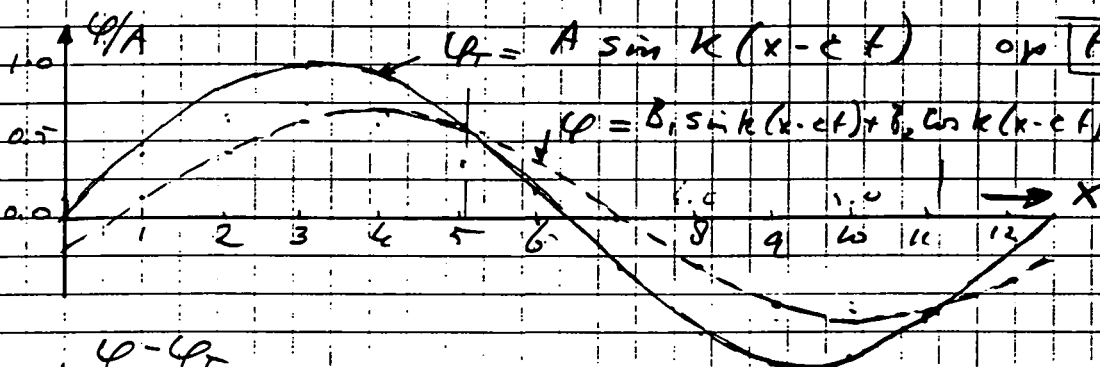
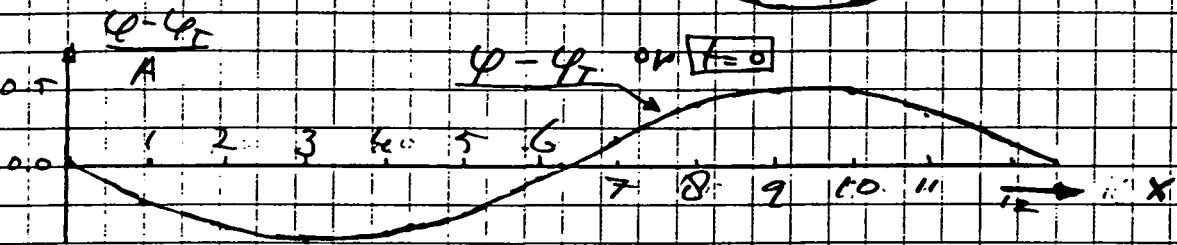
FIGUUR 3: INVLOED $\frac{W}{W_{ick}}$ OP STYGHOOGTE-
VERSCHIL STAANDE GOLV

FIGURA 4: LOPENDE GOLF ($k_p = 10 \text{ m/s}$)

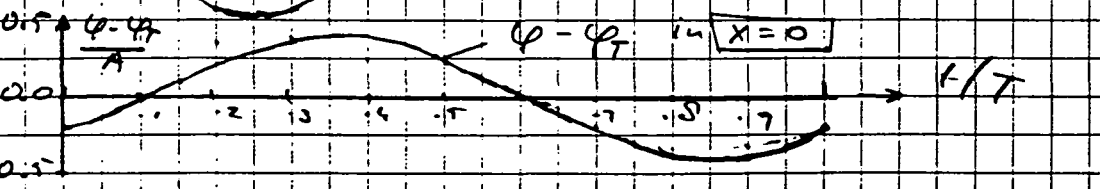
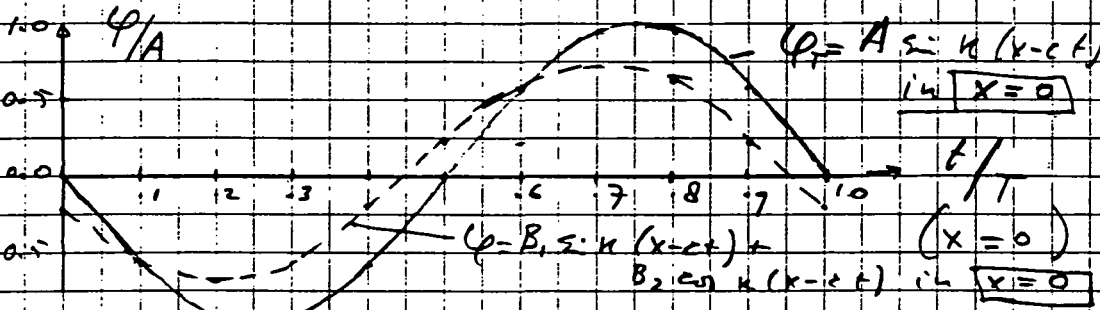
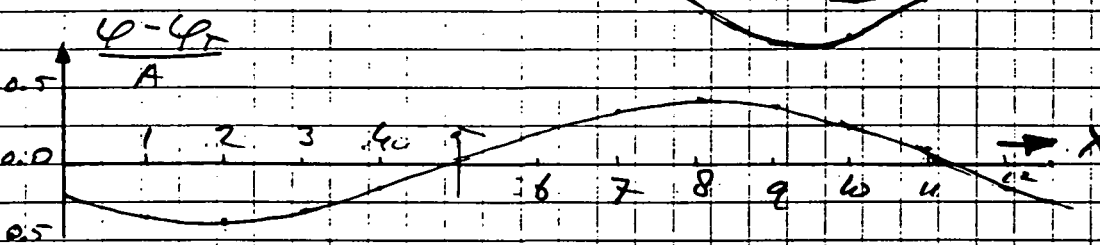


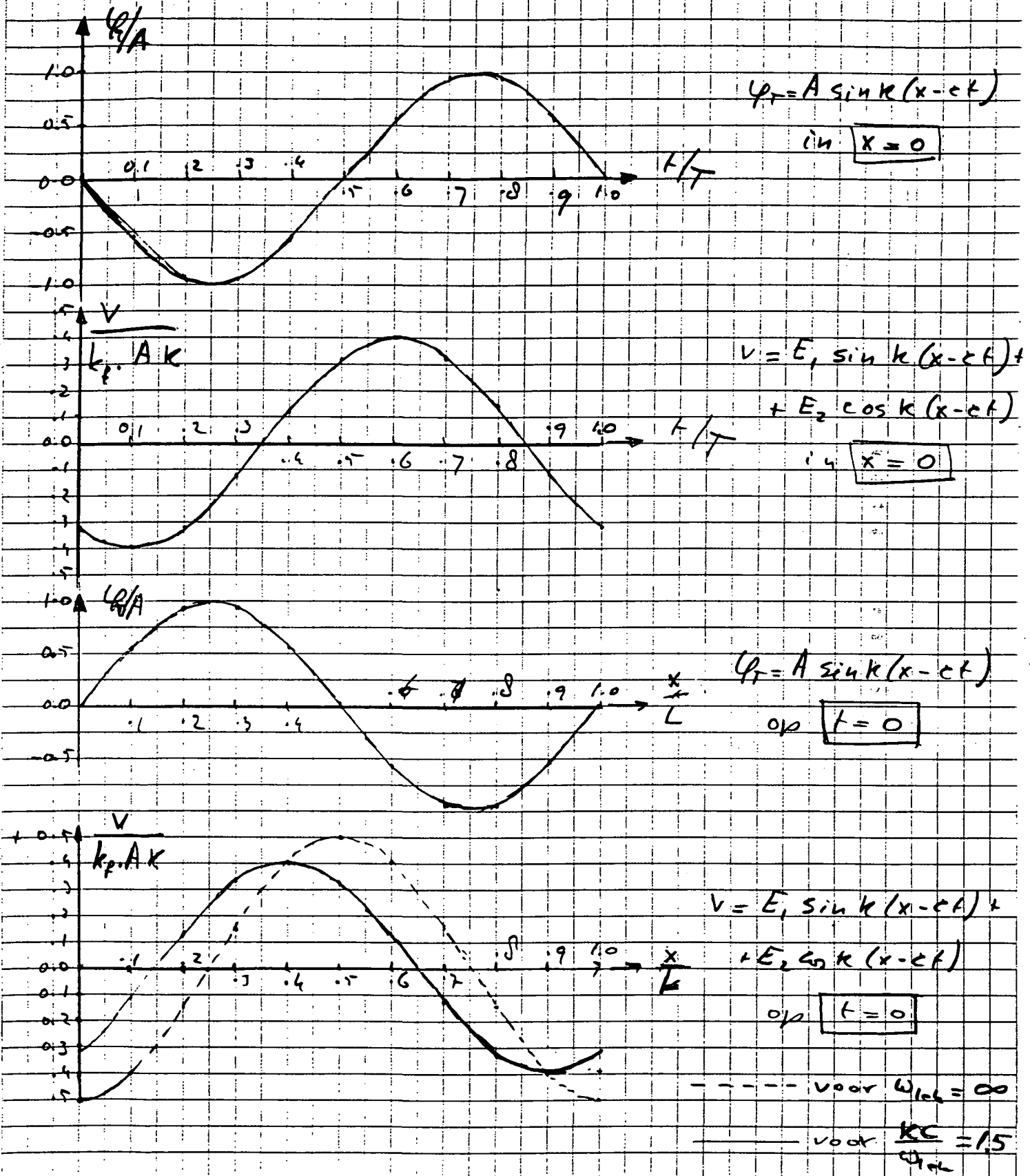
$k = 0,5$
 $(L = 12,6 \text{ m})$
 $\Lambda = 2 \text{ m}$
 $k\Lambda = 1$

$T = \infty$
 $B_1 = 0,5A$
 $B_2 = 0,0A$

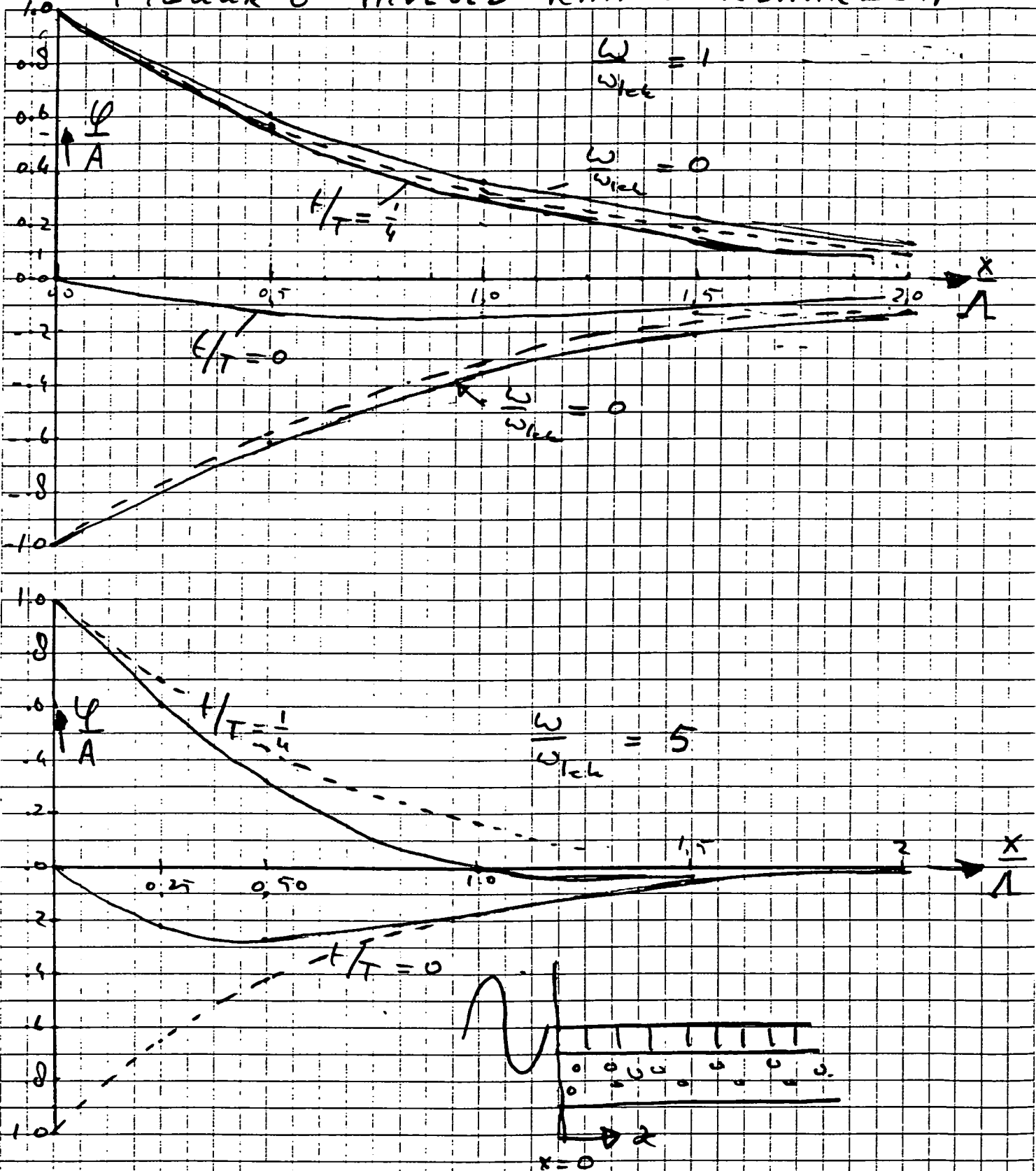


$T = 4,25$
 $c = 3 \text{ m/s}$
 $\omega_{loc} = \frac{10}{10} \text{ s}^{-1}$
 $\frac{k c}{\omega_{loc}} = 1,5$
 $B_1 = 0,68$
 $B_2 = -0,24$



FIGUUR 5: FILTERSMEIHEID LOPEINDE GOLF


FIGUUR 6 INVLOED RANDVOORWAARDEN



• locatie 'De Voorst'

• locatie Delft

locatie Delft
Rotterdamseweg 185
postbus 177
2600 MH Delft
telefoon 015 569353
telefax 015 619674
telex 38176 hydel-nl
e-mail info@wldelft.nl

m.i.v. 10 oktober 1995
telefoon 015 2569353
telefax 015 2619674

locatie 'De Voorst'
Voorsterweg 28, Marknesse
postbus 152
8300 AD Emmeloord
telefoon 05274 2922
telefax 05274 3573
telex 42290 hylvo-nl
e-mail info@wldelft.nl

m.i.v. 10 oktober 1995
telefoon 0527 242922
telefax 0527 243573

