

B I D O C
(bibliotheek en documentatie)



Dienst Weg- en Waterbouwkunde
Postbus 5044, 2600 GA DELFT
Tel. 015 - 2518 363/364

Geavanceerde toets "afschuiving bekleding binnentalud tijdens overslag"

IJsselmeerdijk km 17.5 - km 26.0

Projectnummer
CO-401850/68

Versie
1 Definitief

Opgesteld in opdracht van
**Directoraat-Generaal Rijkswaterstaat
Directie IJsselmeergebied
Postbus 600
8200 AP LELYSTAD**

Rapportnummer
CO-401850/68

Datum
juni 2002

Versie
1 Definitief

Aantal pagina's
66

Type rapport
Studie

Titel / subtitel
Geavanceerde toets "afschuiving bekleding
binnentalud tijdens overslag" / IJsselmeerdijk
km 17.5 - km 26.0

Projectnaam
Toetsen en versterken dijken IJsselmeergebied

Projectleider(s)
dr. C.A. Schoofs
drs. ing. R.R. Schrijver

Projectbegeleider(s)
ir. J.M. van Esch

Overige leden projectteam
ing. J.E.J. Binde
ing. T.A. van Duinen
ing. A.J.M. Peters

Referentie opdrachtgever
DV4157

Verspreiding
RWS 25 exemplaren
GD 12 exemplaren

Samenvatting rapport

Dit rapport beschrijft de geavanceerde toetsing van 'afschuiving van de bekleding van het binnentalud tijdens overslag' van de IJsselmeerdijk voor het dijkvak in het gedeelte tussen km 17,5 tot en met km 26,0. De geavanceerde toets bestaat uit een terrein- en laboratoriumonderzoek, een in-situ verificatieproef en het uitvoeren van een aantal eindige elementen berekeningen.

Het terrein- en laboratoriumonderzoek had als doel het bepalen van de kwaliteit van de kleilaag van de dijk en het in kaart brengen van de sterkte parameters van de dijk. Daarnaast zijn ter plaatse en in het laboratorium proeven uitgevoerd om inzicht te verkrijgen in het infiltratieproces van het water. De verificatieproef bestaat uit een belasting van het binnentalud met een overslag debiet van 1 l/s per strekkende meter gedurende een periode van 12 uur. De proeflocatie is geïnstrumenteerd met waterspanningsmeters. Tevens zijn horizontale deformaties in het talud en verticale deformaties in de tussenberm gemeten. Door middel van het uitvoeren van een aantal eindige elementen berekeningen van de grondwaterstroming gekoppeld met deformatie worden de resultaten van de verificatieproef geëxtrapoleerd naar het gehele toetsvak.

Op basis van de resultaten van de toetsing kan worden geconcludeerd, dat het gehele toetsvak voldoet aan de eisen, die worden gesteld aan dit toetsonderdeel. Het toetsoordeel luidt 'goed'.

22 APR 2003



Versie	Datum	Opgesteld door	Paraaf	Gecontroleerd door	Paraaf
1	juni 2002	dr. C.A. Schoofs		ir. J.M. van Esch	
		drs. ing. R.R. Schrijver			

Inhoudsopgave

1	Inleiding	1
2	Keuze proeflocatie	3
2.1	Beoordelingscriteria	3
2.2	Specialistische beoordeling bekleding en schatting materiaalparameters	4
2.3	Resultaten spreadsheet-berekeningen DWW-model	5
2.4	Conclusie	6
3	Terreinonderzoek	9
3.1	Opzet	9
3.2	Grondboringen	9
3.3	Profielkuilen	10
3.4	Infiltratieproeven (falling head)	10
4	Laboratoriumonderzoek	11
4.1	Uitgevoerde testen	11
4.2	Volume gewichten en watergehaltes	11
4.3	Korrelverdelingen	11
4.4	Doorlatendheden	11
4.5	Simple shear testen	13
4.6	Direct shear testen	13
5	Theorie (on-)verzadigde stroming	15
6	Eén-dimensionale infiltratieberekeningen	19
6.1	Introductie	19
6.2	Numeriek rekenmodel	19
6.3	Conclusie	23
7	Inrichting van de verificatieproef	25
7.1	Uitstroomfaciliteit	25
7.2	Waterspanningsmetingen	25
7.3	Deformatie-metingen	26
7.4	Data-acquisitie	26
8	Resultaten verificatieproef	27
8.1	Visuele waarnemingen	27
8.2	Waterspanningsmetingen	27
8.3	Deformatiemetingen	28
9	Resultaten ijkingberekening	29
9.1	Inleiding	29
9.2	Geometrie, begin- en randvoorwaarden	29
9.3	Hydrologische ijkingberekening	31
9.4	Deformatieberekening	34
9.5	Conclusie	35
10	Resultaten variatieberekeningen	37
10.1	Inleiding	37
10.2	Begin- en randvoorwaarden	37
10.3	Infiltratieberekeningen	39
10.4	Deformatieberekeningen	42
10.5	Conclusie	43
11	Conclusies: samenvatting resultaten en toetsoordeel	45
12	Referenties	47

Bijlage 1	Ligging proefvak
Bijlage 2	Situatieschets
Bijlage 3	Begemannboringen
Bijlage 4	Boorbeschrijvingen handboringen
Bijlage 5	Korrelverdelingsdiagrammen
Bijlage 6	Resultaten onderzoek Alterra
Bijlage 7	Resultaten simple shear testen
Bijlage 8	Resultaten direct shear testen
Bijlage 9	Plaatsingsgegevens tensiometers
Bijlage 10	Plaatsingsgegevens hellingmeters
Bijlage 11	Resultaten waterspanningsmetingen
Bijlage 12	Resultaten horizontale deformatie-metingen
Bijlage 13	Resultaten verticale deformatie-metingen
Bijlage 14	Ingemeten dwarsprofielen

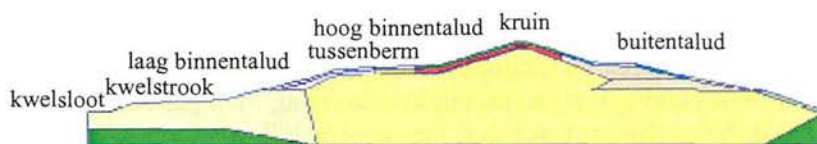
1 Inleiding

Op 26 maart 2002 heeft GeoDelft een plan van aanpak uitgebracht met kenmerk CO-401850/40 voor het uitvoeren van een geavanceerde toetsing van 'afschuiving van de bekleding van het binnentalud tijdens overslag' van de IJsselmeerdijk. De toetsing betreft het dijkvak in het gedeelte tussen km 17,5 tot en met km 26,0. Directoraat-Generaal Rijkswaterstaat, Directie IJsselmeergebied heeft GeoDelft op 2 april 2002 schriftelijk opdracht gegeven om de werkzaamheden conform bovengenoemd plan uit te voeren. De voor u liggende rapportage beschrijft de bevindingen van deze geavanceerde toetsing.

De geavanceerde toets 'Afschuiving van de kleibekleding van het binnentalud tijdens overslag' bestaat uit een viertal onderdelen:

- terrein- en laboratoriumonderzoek
- in-situ verificatieproef
- ijking van een twee-dimensionale eindige elementen model voor de grondwaterstroming en de grondmechanische deformatie aan de resultaten van de verificatieproef
- een set van twee-dimensionale berekeningen van de grondwaterstroming met de maatgevende hoogwatersituatie met overslag, met hieraan gekoppeld het bepalen van de c/ϕ -reductiefactor voor het bepalen van de veiligheid

Voordat de doelen en de samenhang tussen deze verschillende toetsonderdelen worden uiteengezet, volgen enige definities met betrekking tot de naamgeving van de dijk. Een afbeelding van de dijkgeometrie is te zien in Figuur 1.1. Van links naar rechts over de dijk wordt onderscheid gemaakt tussen de kwelsloot, kwelstrook, laag binnentalud, tussenberm, hoog binnentalud, kruin, buitentalud.



Figuur 1.1 Geschematiseerd dwarsprofiel van de IJsselmeerdijk tussen km 17,5 tot km 26,0.

Aan de hand van beschikbare boorgegevens en een inspectie van het binnentalud van bovengenoemd dijkvak, is de grondopbouw van het hoge binnentalud gekarakteriseerd (hoofdstuk 2). Met geschatte parameters voor dit talud worden een aantal eenvoudige berekeningen uitgevoerd, waarmee inzicht wordt verkregen in de sterkte van het binnentalud ten aanzien van afschuiving tijdens overslag. Op grond van de resultaten van deze berekeningen en de lokale omstandigheden wordt de locatie van het proefvak voor het uitvoeren van de verificatieproef vastgesteld.

Alvorens de verificatieproef uit te voeren is een vooronderzoek uitgevoerd (hoofdstukken 3 en 4). Dit betreft een aanvullend terrein- en laboratoriumonderzoek met als doel het bepalen van de kwaliteit van de kleilaag van de dijk en het in kaart brengen van de sterkte parameters van de dijk. Daarnaast zijn ter plaatse en in het laboratorium proeven uitgevoerd om inzicht te verkrijgen in het infiltratieproces van het water. Om het proefvak ongestoord te houden, zijn alle onderzoeken net buiten het proefvak uitgevoerd.

Vervolgens is een aantal één-dimensionale infiltratieberekeningen uitgevoerd (zie hoofdstuk 5 voor de theorie van de grondwaterstromingsberekeningen en hoofdstuk 6 voor een beschrijving van de resultaten van de berekeningen). Met deze berekeningen wordt inzicht verkregen waar en in welke mate waterdrukopbouw in het talud kan optreden tijdens de overslagsituatie. De resultaten worden gebruikt voor het bepalen van de locaties van de tensiometers, waarmee de positieve of negatieve waterdruk in het talud wordt gemeten.

Aansluitend is de verificatieproef uitgevoerd. Gedurende een periode van 12 uur is de dijk over een lengte van 30 m gelijkmatig belast met een overslagdebiet van 1 l/s per strekkende meter. De proeflocatie is geïnstrumenteerd met tensiometers. Tevens zijn horizontale deformaties in het talud en verticale deformaties in de tussenberm gemeten. De inrichting van de verificatieproef is beschreven in hoofdstuk 7, de resultaten van de proef in hoofdstuk 8.

Hoofdstuk 8 beschrijft de resultaten van de ijking van de twee-dimensionale eindige elementen berekening aan de resultaten van de verificatieproef. De ijking betreft zowel de grondwaterdruk als de optredende deformaties.

In hoofdstuk 9 wordt een set met variatieberekeningen uitgevoerd. Het doel van deze berekeningen is de resultaten van de verificatieproef te extrapoleren naar een maatgevend hoogwatersituatie, voor het gehele toetsvak. In de berekeningen is het maatgevende waterstandsverloop tijdens storm op het IJsselmeer als randvoorwaarde opgelegd. Er wordt gevarieerd met de geometrie van het hoge binnentalud en met de verzadigde doorlatendheden van het hoge binnentalud en de tussenberm.

De resultaten van de afzonderlijke onderdelen tezamen leiden tot een uiteindelijk oordeel van het toetsvak ten aanzien van 'Afschuiving binnentalud tijdens overslag'. Dit gebeurt in hoofdstuk 10, waarin tevens de belangrijkste resultaten van de verschillende toetsonderdelen samengevat.

2 Keuze proeflocatie

2.1 Beoordelingscriteria

De resultaten van de specialistische inspectie van het binnentalud samen met de resultaten van de handboringen van de eerste toetsing [rapport 13/99012392.JvV/Koo, d.d. 26 oktober 2000] dienen als basis voor de keuze van de proeflocatie. Tijdens de specialistische inspectie zijn 10 handboringen uitgevoerd tot 1,1 m diepte, verdeeld over het dijkvak en is een profielkuil in de top laag gemaakt (zie paragraaf 2.2). In de eerste toetsing is op iedere 0,5 km een handboring in het binnentalud uitgevoerd.

De keuze van de locatie van de proef 'afschuiving bekleding' van het bovenste deel van het binnentalud van het te toetsen dijkvak km 17,5 t/m 26,0 is bepaald aan de hand van onderstaande criteria (op volgorde van prioriteit):

- minimale dikte top laag ten behoeve van infiltratie
- grootste aandrijvende gewicht ten behoeve van deformatie
- grootste contrast doorlatendheden in top laag
- minimale kwaliteit bekleding (volgens de LTV)
- grootste overslagduur (volgens de LTV) (zie Tabel 2.2)
- grootste hoeveelheid voorhanden resultaten van grondonderzoek uit eerdere toetsing

De eerste twee punten geven een tegengestelde afhankelijkheid tussen de stabiliteit en de diepte van het kritische bezwijkvlak. De resultaten zijn te zien in Tabel 2.1.

Tabel 2.1 Score per locatie op criteria voor keuze van de proeflocatie.

Locatie [km]	Boring-nummer	Dikte top laag [m]	Deklaag zandgehalte > 50%	Klei-kwaliteit [klasse] ^{†)}	Toplaag zandgehalte > 50%	Lokale omstandigheden [*])	Extra grond-onderzoek
17,5	20	1,00	Ja	3	Nee	—	Nee
18,0	23	0,90	Ja	3	Nee	—	Nee
18,5	25	1,20	Ja	3	Nee	—	Nee
19,0	26	1,20	Nee	2 / 3	Nee	—	Nee
19,5	29	1,10	Ja	3	Nee	—	Nee
20,0	31	1,20	Ja	3	Nee	+	Nee
20,5	32	1,40	Ja	3	Nee	+	Nee
21,0	34	1,00	Ja	3	Nee	+	Nee
21,5	35	1,00	Ja	3	Nee	+	Ja
22,0	37	1,15	Ja	3	Nee	+	Nee
22,5	38	1,10	Ja	3	Nee	+	Ja
23,0	40	1,20	Ja	3	Nee	++	Ja
23,5	45	1,10	Nee	2 / 3	Nee	++	Ja
24,0	48	1,70	Ja	3	Nee	++	Nee
24,5	49	1,00	Ja	3	Nee	—	Ja
25,0	51	1,10	Ja	3	Nee	—	Ja
25,5	53	1,10	Ja	3	Nee	—	Nee
26,1	55	0,90	Ja	3	Nee	—	Nee

^{†)}: Kleikwaliteit van de gehele aangetroffen kleidikte zoals in kolom 3 is aangegeven.

^{*}): — slecht, – matig, + redelijk, ++ goed.

Tabel 2.2 Overslagduur volgens LTV voor delen van het te toetsen dijkvak.

Locatie [km]	h kruin [m tov NAP]	T_s [uur]
17,56 – 17,78	5,30	7,3
17,78 – 20,30	5,10	10,0
20,30 – 23,00	5,14	6,3
23,00 – 24,20	5,15	11,6
24,20 – 25,10	4,97	8,0
25,10 – 26,00	4,92	8,8

De verhouding tussen dikte en gewicht van de topklaag wordt in paragraaf 2.3 verder onderzocht door middel van berekeningen met DWW-spreadsheet model. Vanwege de uniformiteit van de taludhelling over het dijkvak (1 : 3,0 tot 1 : 3,1) is deze niet opgenomen in de lijst met criteria.

Randvoorwaarden voor de keuze van de proeflocatie zijn geschikte lokale omstandigheden voor het uitvoeren van de proef. Vanwege de nabijheid van de snelweg A6 valt het dijkvak tussen km 17,5 t/m km 18,2 af. Minder gunstig is verder het deel tussen km 24,0 en 26,0, vanwege de provinciale weg aan de teen van het te toetsen dijkvak. Tenslotte is er bij de keuze gelet op een dijkvak met een ongestoord talud en een gelijkmatig begroeide grasmat.

2.2 Specialistische beoordeling bekleding en schatting materiaalparameters

Voor de beoordeling zijn door een geoloog 8 handboringen uitgevoerd tot 1,1 m diepte, verdeeld over het te toetsen dijkvak. De boringen zijn 2 m onder de kruin gemaakt, vertikaal gemeten. Op één na alle boringen geven een taludbekleding boven een zandkern. In de uitzondering is tot TO – 1,1 m diepte alleen de taludbekleding aangetroffen. Hierbij is TO als talud oppervlak gedefinieerd. Er is op km 22,99 een profielkuil van 0,5 bij 1,0 m gegraven tot een diepte van de leem/zand overgang op TO – 1,0 m. De overgang is scherp. Het eerste vrije water bevindt zich op $y = TO - 0,8$ m.

In de profielkuil kon onderscheid worden gemaakt tussen twee delen, een vast gepakte leem en een leem met een lossere structuur. Verder zijn verticulaire gangen tot op de leem/zand overgang aangetroffen. De specialistische inspectie samen met de resultaten van de handboringen van de eerste toetsing [rapport 13/99012392.JvV/Koo, d.d. 26 oktober 2000] leiden tot de schematisatie die hieronder is weergegeven.

De taludbekleding bestaat zonder uitzondering uit een *deklaag* en een *onderliggende topklaag*. Beide lagen zijn afzonderlijk aangebracht:

- *Deklaag*: tussen $y = TO - 0,0$ m en $y = TO - 0,5$ m: variërend van een sterk siltig zand met kleistukjes tot een sterk siltige klei met zandstukjes (zie Bijlage 3). Deze deklaag heeft een zeer lage cohesie c ($c = 2-5$ kPa, afhankelijk van de beworteling) en een hoek van inwendige wrijving van $\phi = 30^\circ$. De verzadigde doorlatendheid K_s is geschat op $K_s = 1,0 \times 10^{-4}$ m/s.
- *Onderliggende topklaag*: tussen $y = TO - 0,5$ en $y = TO - 0,9$ m tot $y = TO - 1,3$ m: een sterk zandige leem met grindstukjes. De gestructureerdheid en gepaktheid variëren sterk per locatie. Het bovenste deel van dit materiaal is over het algemeen dicht gepakt. De onderste decimeter bleek in sommige boringen los gepakt. De cohesie bedraagt $c = 3 - 10$ kPa, afhankelijk van de vastheid van de pakking. De hoek van inwendige wrijving bedraagt ongeveer $\phi = 30^\circ$. De verzadigde doorlatendheid is geschat op $K_s = 1,0 \times 10^{-5}$ tot $K_s = 5,0 \times 10^{-5}$ m/s, afhankelijk van de gestructureerdheid van het materiaal.

Tussen de onderliggende topklaag en de zandkern bevindt zich in een aantal boringen een soort van overgangsgebied. In dit gebied is het klei in het zand in de loop van de tijd ingedrongen,

wat mogelijk in een lagere doorlatendheid resulteert. De schatting van de verzadigde doorlatendheid is $K_s = 1,0 \times 10^{-5}$ tot $1,0 \times 10^{-6}$ m/s. De cohesie is geschat op $c = 3$ tot 5 kPa en de hoek van inwendige wrijving ϕ op 25° .

Het zand in de kern heeft een hoek van inwendige wrijving van $\phi = 30^\circ$ tot 35° en een cohesie van $c = 0$ kPa. De doorlatendheid wordt geschat op $K_s = 1,0 \times 10^{-4}$ m/s.

2.3 Resultaten spreadsheet-berekeningen DWW-model

Met de schattingen van de doorlatendheid en de gemeten vochtgehalten (rapport Dijkverbetering Flevoland IJsselmeerdijk (Grontmij, rapport 23.1197.1, 2002)) is de infiltratiediepte berekend.

De tijdsduur tot verzadiging van de deklaag is voor de geschatte doorlatendheid van deze laag ($K_s = 1,0 \times 10^{-4}$) minder dan 1 uur.

Uit de handboringen gemaakt in de eerste toetsing blijkt, dat de dikte van de onderliggende toplaag over het toetsvak varieert tussen $0,4$ m en $1,2$ m. Tabel 2.3 geeft een eenvoudige schatting van de benodigde tijdsduur tot volledige verzadiging van deze laag als functie van de dikte van de onderliggende toplaag L , de doorlatendheid K_s en het nog te verzadigen vochtgehalte $\Delta\theta$ van deze laag.

Tabel 2.3 Benodigde tijdsduur tot volledige verzadiging van de onderliggende toplaag.

L [m]	$\Delta\theta$ [-]	K_s [m/s]	t [uur]
0,4	0,03	$1,0 \times 10^{-5}$	0,3
0,4	0,03	$1,0 \times 10^{-6}$	3
0,4	0,10	$1,0 \times 10^{-5}$	1,1
0,4	0,10	$1,0 \times 10^{-6}$	11
1,2	0,03	$1,0 \times 10^{-5}$	0,9
1,2	0,03	$1,0 \times 10^{-6}$	9
1,2	0,10	$1,0 \times 10^{-5}$	3,3
1,2	0,10	$1,0 \times 10^{-6}$	33

Afhankelijk van de effectiviteit van de drainage van de zandkern treedt de volledige verzadiging daadwerkelijk op. De effectiviteit wordt bepaald door de verzadigde doorlatendheid van de leem/zand overgang. Deze doorlatendheid is geschat op $K_s = 2,0 \times 10^{-5}$ m/s, maar kan per locatie variëren.

Met behulp van een spreadsheet rekenmodel, ontwikkeld door Rijkswaterstaat DWW [RWS-DWW, 2000], kan op een eenvoudige manier de kritische infiltratiediepte worden berekend. Het model gaat uit van evenwicht van een talud tijdens overslag. Het model is erg gevoelig voor de cohesie van de toplaag. Verder zijn het volumegewicht van de toplaag, de taludhelling en de hoek van inwendige wrijving de meest belangrijke invoerparameters.

In de berekeningen is gevarieerd met het volumegewicht, de cohesie, de hoek van inwendige wrijving en de taludhelling. De overige invoerparameters zijn constant gehouden en als volgt gedefinieerd. Het volumegewicht van water is gelijk gekozen 1000 kg/m^3 . De hoek tussen de stroomrichting en de vertikaal is gelijk aan -72° (dit betekent dat de stroomrichting parallel aan het talud is). De verticale afmeting van het hoge binnentalud is $3,5$ m en de onderlinge samenhang Δ tussen gronddelen is gelijk aan 0° . Tenslotte is gevarieerd met de verticale diepte van het infiltratiefront: van $0,2$ tot $2,0$ m met stap $0,2$ m.

Tabel 2.4 geeft de resultaten van achttien berekeningen met het spreadsheet model. De eerste acht cases zijn bedoeld om de sterkte van de deklaag in te schatten. Hierbij is gevarieerd met de cohesie (tussen 2 en 5 kPa), de hoek van inwendige wrijving (tussen 20 en 25 graden) en het

volumegegewicht (tussen 1400 en 1600 kg/m³). De berekeningen laten zien dat de kritische infiltratiediepte tussen 0,9 m en meer dan 2,0 m bedraagt. Gezien de dikte van de deklaag van 0,4 m tot 0,5 m lijkt de laag ook in volledig verzadigde toestand voldoende sterkte te hebben.

Tabel 2.4 Kritische infiltratiediepte voor achttien berekeningen met het DWW-spreadsheet model, waarbij gevarieerd is met het natte volumegegewicht, de cohesie van de toplaag, de hoek van inwendige wrijving en de taludhelling.

Case	Volume- gewicht nat γ_{nat} [kg/m ³]	Cohesie c [kPa]	Hoek van inwendige wrijving ϕ [°]	Talud- helling 1 : b [-]	Kritische infiltratiediepte [m – TO]
Case 1	1400	2	20	3	0,9
Case 2	1600	2	20	3	1,0
Case 3	1400	5	20	3	> 2,0
Case 4	1600	5	20	3	> 2,0
Case 5	1400	2	25	3	1,0
Case 6	1600	2	25	3	1,8
Case 7	1400	5	25	3	>2,0
Case 8	1600	5	25	3	>2,0
Case 9	1700	3	25	3	>2,0
Case 10	1900	3	25	3	>2,0
Case 11	1700	5	25	3	>2,0
Case 12	1900	5	25	3	>2,0
Case 13	1700	7	25	3	> 2,0
Case 14	1900	7	25	3	> 2,0
Case 15	1900	7	30	3	> 2,0
Case 16	1900	3	25	2,5	> 2,0
Case 17	1900	3	25	2	1,2
Case 18	1900	7	25	2,5	> 2,0

In cases 9 t/m 18 is gevarieerd met de grondmechanische parameters van de onderliggende toplaag. Hierbij is gevarieerd met de cohesie (tussen 3 en 7 kPa), de hoek van inwendige wrijving (tussen 25 en 30 graden) en het volumegegewicht (tussen 1700 en 1900 kg/m³). Tenslotte is met de taludhelling gevarieerd. De berekeningen laten zien dat de kritische infiltratiediepte met de taludhelling 1 : 3 in alle gevallen meer dan 2,0 m bedraagt. Voor een taludhelling van 1 : 2 heeft de dijk een kritische infiltratiediepte van 1,0 m. Deze diepte komt overeen met de dikte van de onderliggende toplaag. Deze situatie zal slechts optreden indien de helling van de leem/zand overgang significant van de taludhelling afwijkt. In alle andere gevallen geven de resultaten van de eenvoudige berekeningen vertrouwen in de sterkte van het talud tijdens overslagcondities voor de geschatte sterkteparameters.

Een grotere dikte van de onderliggende toplaag resulteert enerzijds in een grotere infiltratieduur en anderzijds in een groter aandrijvend gewicht voor de afschuiving. Vanwege de grote onzekerheid in de verzadigde doorlatendheid (en dus in de benodigde infiltratieduur tot verzadiging) wordt voorgesteld een proeflocatie met een kleine dikte van de toplaag te kiezen. De invloed van de dikte van de toplaag wordt na afloop van de overslagproef onderzocht door deze te variëren in de eindige elementen berekening.

2.4 Conclusie

De specialistische beschouwing van het binnentalud van de IJsselmeerdijk tussen km 17,4 en km 26,0 laat zien, dat het talud is opgebouwd uit twee lagen: een siltige deklaag en een daar onderliggende sterk zandige, sterk siltige onderliggende toplaag. De dijk kern betreft zwak siltig zand. Dit is in overeenstemming met de eerder uitgevoerde handboringen in de eerste toetsing.

Eenvoudige berekeningen met een eerste inschatting van de materiaalparameters van de onderliggende toplaag geven aan, dat het kritische bezwijkvlak zich of op de grens tussen het bovenste en onderste deel van de toplaag op ongeveer 0,5 m diepte, of in de buurt van het grensvlak tussen de lemige toplaag en de zandkern bevindt. Voor het toetsoordeel is de sterkte van de onderliggende toplaag bepalend. Voor de infiltratieproef is het echter ook van belang de sterkte van de bovenste toplaag te bepalen.

Vanwege de kleine dikte van de toplaag, het reeds aanwezige grondonderzoek, de overslagduur, en de gunstige lokale omstandigheden, is besloten nabij km 23,0 de proef uit te voeren. De andere criteria geven geen aanleiding tot een andere keuze. De precieze locatie is: km 22,94 tot km 22,97, waarbij gelet is op de gelijkmatigheid van de begroeide grasmat/ongestoordheid talud. De taludhelling in het proefvak varieert tussen 17,9 en 18,4 graden (1 : 3,1 en 1 : 3,0).

3 Terreinonderzoek

3.1 Opzet

Het terreinonderzoek is zo opgezet, dat het proefgebied waar de verificatieproef wordt uitgevoerd ongestoord blijft. Al het destructieve onderzoek is derhalve net buiten het proefgebied uitgevoerd. Hiertoe is het proefgebied met een breedte van 30 meter in het veld uitgezet.

Door Alterra zijn de waterretentie en waterdoorlatendheidskarakteristieken van het taludmateriaal bepaald. Op 5 april zijn hiervoor een aantal grondmonsters gestoken die in het laboratorium van Alterra zijn beproefd.

Begemannboringen en de handboringen zijn aan beide zijden van het proefgebied uitgevoerd. Deze werkzaamheden hebben op 10 april 2002 plaatsgevonden. In Bijlage 2 is de situatieschets opgenomen waarop de precieze locaties van de boringen staan aangegeven.

Tevens zijn een aantal infiltratieproeven met behulp van een dubbele ring infiltrometer uitgevoerd. Deze werkzaamheden zijn op 24 en 25 april 2002 (voor de uitvoering van de overslagproef) en 15 mei 2002 (na de uitvoering van de overslagproef) uitgevoerd. Van de profielkuilen, waarin op 15 mei 2002 de infiltratieproeven zijn uitgevoerd, is een beschrijving opgenomen.

3.2 Grondboringen

In de kruin en de tussenberm van de dijk zijn in totaal 4 Begemannboringen 66 mm uitgevoerd. In het talud van de dijk zijn 4 handboringen uitgevoerd. Alle boringen zijn doorgezet tot een diepte van TO-3,0 meter en afgedicht met zwelkokers.

Het voordeel van Begemann boringen is, dat de grond bemonsterd wordt, dusdanig dat een zeer geringe verstoring van het monster plaatsvindt. Deze monsters zijn derhalve uitermate geschikt voor de bepaling van geotechnische parameters in het laboratorium. Daarnaast kan een zeer gedetailleerde stratificatie worden gemaakt van de bemonsterde bodemkolom, waarmee voor infiltratie belangrijke laagjes kunnen worden gedetecteerd.

De Begemannboringen zijn in het laboratorium uitgelegd. Een aantal grondmonsters is genomen ten behoeve van beproeving in het laboratorium (zie hoofdstuk 3). Tevens is iedere boring beschreven en gefotografeerd. De resultaten hiervan zijn opgenomen in Bijlage 3.

De handboringen zijn in het veld beschreven. De beschrijvingen van de boringen zijn opgenomen in Bijlage 4.

3.3 Profielkuilen

Na het uitvoeren van de verificatieproef zijn op 15 mei 2 profielkuilen gegraven en beschreven. De profielkuilen zijn gegraven nabij respectievelijk de T3 en T4 (zie Bijlage 2).

Profielkuil 1 (nabij T3)

- 0 - 5 cm zodenlaag, matig kleiig silt, donkerbruin/grijs, zeer veel worteltjes, kruimelig.
- 5 - 15 cm silt, zwak kleiig, matig tot veel wortels, fijn blokkig/kruimelig, veel fijne gangen (diameter 2 mm), regelmatig bentonietspoeling in de gangen (bentoniet is gebruikt als afdichting van de tensiometers), veel schelpmateriaal, donkergrijs.
- 15 - 35 cm silt, bruingrijs, zwak gevlekt, matig fijne wortels, veel fijne gangen, middelblokkig tot prismatisch.
- 35 - 95 cm keileem, keizand in brokken, donkergrijs/lichtgrijs/bruin/bruingrijs, plaatselijk ijzer-mangaan aanrijking op de randen, grove prismatische structuur, dimensie kluiten 10 tot 30 cm, plaatselijk fijne prismatische structuur (donkere kleigere brokken), matig schelpmateriaal, weinig stenen, plaatselijk matig wortels, contact met zand onregelmatig scherp (reliëf van 5 tot 20 cm), wormgangen tot 80 cm ingespoeld met bentonietspoeling, wortelconcentraties langs structuurelementen/wormgangen, wormgangen vormen plaatselijk de kluiten, meeste wormgangen zijn open, geen grote discontinuïteiten in doorlatendheid verwacht op deze proefkuillocatie.

Profielkuil 2 (nabij T4)

- 0 - 8 cm zodenlaag, matig kleiig silt, bruin/grijs, zeer veel worteltjes, kruimelig.
- 8 - 20 cm silt, matig tot zwak kleiig, veel wortels, zwak fijn blokkig, weinig kleine wormgangen, veel schelpmateriaal, donkergrijs.
- 20 - 40 cm silt, zwak kleiig, licht bruingrijs, matig wortels, veel zeer fijne gangen, zacht (silt).
- 40 - 95 cm keileem, brokken, donkergrijs (zeer dicht), lichtgrijs (zeer zandig) rood (klei), plaatselijk ijzer-oxide aanrijking, grove prismatische structuur, weinig schelpmateriaal, weinig stenen, matig wormgangen 3 tot 5 mm, onderste 15 cm zeer los, slecht verdicht vee kleihuiden, contact met zand onregelmatig, veel wormgangen gevuld met wormuitwerpselen, op 80 cm vrij water op structuurelementen.

3.4 Infiltratieproeven (falling head)

De infiltratieproeven zijn uitgevoerd met de dubbele ring infiltrometer. Hierbij wordt een dubbele ring in het talud geplaatst en beiden gevuld met water. Door de dubbele ring wordt zijdelingse wegzijging van het infiltrerende water beperkt. De snelheid, waarmee het water in de binnenste ring zakt, is een maat voor de doorlatendheid van de desbetreffende laag. Gedurende de proef neemt de infiltratiesnelheid af totdat een constante waarde wordt bereikt, die de verzadigde doorlatendheid benadert (door insluiting van luchtbelletjes tijdens infiltratie wordt maximale verzadiging niet volledig bereikt). In Tabel 3.1 zijn de resultaten samengevat.

Tabel 3.1 Resultaten in-situ infiltratieproeven.

Infiltratieproef	Diepte [TO-m]	Infiltratiesnelheid [m/s]
I1	0,60	5×10^{-5}
I2	0,15	7×10^{-5}
I3	0,60	8×10^{-6}
I4	0,15	4×10^{-5}
I5	0,20	8×10^{-6}
I6	0,60	8×10^{-6}

4 Laboratoriumonderzoek

4.1 Uitgevoerde testen

Om inzicht te krijgen in het gedrag van de verschillende bodemlagen zijn de volgende parameters bepaald:

Laag 1: deklaag (TO tot TO - 0,50 m)

- volumegewicht en watergehalte
- verticale verzadigde doorlatendheid
- cohesie en hoek van inwendige wrijving (simple shear test)

Laag 2: leemlaag (TO - 0,5 m tot TO - 1,00 m)

- volumegewicht en watergehalte
- verticale verzadigde doorlatendheid
- cohesie en hoek van inwendige wrijving (simple shear test)

Laag 3: zand (vanaf TO - 1,00 m)

- korrelverdeling
- doorlatendheid vaste pakking

Daarnaast is voor het grensvlak tussen laag 2 en 3 de cohesie en de hoek van inwendige wrijving bepaald (direct shear test).

4.2 Volume gewichten en watergehalten

Van 5 grondmonsters zijn de volumegewichten en watergehalten bepaald. In Tabel 4.1 zijn de uitgevoerde proeven en de verkregen resultaten samengevat.

Tabel 4.1 Volume gewichten en watergehalten.

Grondmonster	Volume gewicht nat [kg/m ³]	Volume gewicht droog [kg/m ³]	Watergehalte [%]
Boring 1 0,10-0,15 m	1,56	1,34	16,0
Boring 1 0,60-0,65 m	2,13	1,89	12,7
Boring 2 0,81-0,86 m	2,08	1,84	13,1
Boring 2 1,06-1,11 m	2,15	1,89	14,0
Boring 3 0,17-0,22 m	1,55	1,30	19,2

4.3 Korrelverdelingen

Van 4 grondmonsters (boring 3 0,22-0,47 m en 0,47-0,82 m, boring 4 1,17-1,22 m en 1,37 - 1,42 m). De korrelverdelingsdiagrammen zijn opgenomen in Bijlage 5.

4.4 Doorlatendheden

Van 4 grondmonsters zijn de doorlatendheden bepaald. In Tabel 4.2 zijn de uitgevoerde proeven en de resultaten samengevat.

Tabel 4.2 Verzadigde doorlatendheden.

Grondmonster	Materiaal	Belasting [kN/m ²]	Poriën gehalte [%]	Doorlatend- heid [m/s]
Boring 1 0,30-0,35 m	zand, sterk siltig	11,2	-	$2,82 \times 10^{-7}$
Boring 1 0,85-0,90 m	leem, sterk zandig	15,4	-	$1,01 \times 10^{-10}$
Boring 4 1,22-1,37 m	zand, zwak siltig	-	34,8	$2,56 \times 10^{-4}$
Boring 4 2,22-2,42 m	zand, zwak siltig	-	36,4	$1,27 \times 10^{-4}$

De bepaalde doorlatendheden van de monsters uit boring 1 (sterk siltig zand en sterk zandig leem) zijn representatief voor de doorlatendheid van het matrix materiaal. Deze waarden zijn van belang voor het bepalen van de duur tot volledige verzadiging van het talud. Ter plaatse zijn de doorlatendheden naar verwachting aanzienlijk groter, ten gevolge van scheurvorming en biologische activiteit. Specialistische schattingen geven waarden aan van 1×10^{-4} m/s voor de deklaag (tot TO – 0,50 meter) en waarden tussen 1×10^{-5} m/s en 5×10^{-5} m/s voor de lemige toplaag.

Tevens kan op basis van de korrelverdeling een grove inschatting worden gemaakt van de doorlatendheid met de onderstaande empirische relatie van Hazen.

$$Ks = 0,0116d_{10}^2$$

waarin:

Ks = verzadigde doorlatendheid (in m/s)
 d_{10} = korreldiameter waarbij sommatie van gewichtsprocenten kleiner dan deze diameter gelijk is aan 10 procent van het totale gewicht (in mm)

Deze relatie is alleen geldig voor zand en derhalve alleen toepasbaar op grondmonsters uit de bodemlaag vanaf circa TO-1,00 m. In Tabel 4.3 zijn de met de relatie van Hazen geschatte doorlatendheden opgenomen. Deze komen goed overeen met de doorlatendheden die in het laboratorium zijn bepaald.

Tabel 4.3 Doorlatendheden berekend uit korrelverdelingen op basis van de vergelijking van Hazen.

Grondmonster	d_{10} [10^{-3} m]	Ks [m/s]
Boring 4 1,17-1,22 m	0,13	2,0E-04
Boring 4 1,37-1,42 m	0,13	2,0E-04

Door Alterra zijn de verzadigde en onverzadigde doorlatendheden, alsmede de relatie tussen vochtgehalte en de (negatieve) waterdruk bepaald. Hiertoe zijn door Alterra drie monsters gestoken in het talud van de dijk, 4 in de siltige deklaag en 4 in de lemige toplaag. De beschrijving van de werkwijze en de resultaten van de laboratoriumproeven zijn opgenomen in Bijlage 6.

In Tabel 4.4 zijn de met de verschillende proeven en met de in-situ meting tijdens de verificatieproef (zie hoofdstuk 8) gevonden verzadigde doorlatendheden samengevat.

Tabel 4.4 Gemiddelde verzadigde doorlatendheid van de deklaag en de onderliggende toplaag met het aantal proefnemingen.

Proefmethode	$K_{s\text{deklaag}}$ ($\times 10^{-5}$ m/s)	aantal metingen	$K_{s\text{toplaag}}$ ($\times 10^{-5}$ m/s)	aantal metingen
Specialistische schatting	10	0	1 tot 5	0
In-situ (debiet regeling)	-	-	2	1
Infiltrometer	4	3	2	3
Lab GeoDelft	0,03	1	0,00001	1
Lab Alterra	35	2	4	2

Op basis van de gegevens wordt een doorlatendheid van de klei deklaag van $K_s = 2 \times 10^{-4}$ m/s genomen, en van de onderliggende toplaag van $K_s = 2 \times 10^{-5}$ m/s. De onverzadigde vochtgehalte en doorlatendheidscurven volgen direct uit middeling van de Alterra gegevens.

4.5 Simple shear testen

Op 3 monsters is een simple shear test uitgevoerd. De testen zijn uitgevoerd bij verticale belastingen van 5, 10 en 15 kN/m². De resultaten zijn opgenomen in Bijlage 8. In Tabel 4.5 zijn de uitgevoerde testen en de verkregen resultaten samengevat.

Tabel 4.5 Resultaten simple shear testen.

grondmonster	materiaal	hoek van inwendige wrijving [°]	cohesie [kN/m ²]
Boring 2 0,25-0,45 m	zand, sterk siltig	28,08	2,96
Boring 2 0,95-1,25 m	leem	39,41	3,01
Boring 3 0,82-1,02 m	leem	53,31	6,04

De simple shear testen op de grondmonsters uit Begemann boring 2 zijn uitgevoerd na verzadiging van het grondmonster. De test op het grondmonster uit Begemann boring 3 is uitgevoerd op monsters met de oorspronkelijke verzadigingsgraad. Dit is mogelijk de verklaring voor het grote verschil in de sterkte parameters tussen de beide testen op leem.

4.6 Direct shear testen

Op 2 monsters is een directe schuifproef uitgevoerd. Een proef is uitgevoerd op het grensvlak keileem-zand bij verticale belastingen van 5, 10 en 20 kN/m². Bij dezelfde belastingen is een test uitgevoerd op het grensvlak zand-keileem. De resultaten zijn opgenomen in Bijlage 8. In Tabel 4.6 zijn de uitgevoerde proeven en de verkregen resultaten samengevat.

Tabel 4.6 Resultaten direct shear testen.

Grondmonster	Grensvlak	hoek van inwendige wrijving [°]	cohesie [kN/m ²]
Boring 1 0,95-1,15 m	keileem-zand	66,70	10,36
	zand-keileem	64,77	9,86

De resultaten laten zien, dat de overgang tussen het keileem en het zand sterker is dan de keileem zelf, als gemeten met de simple-shear proef.

5 Theorie (on-)verzadigde stroming

Stroming in de onverzadigde/verzadigde zone wordt mathematisch beschreven door middel van de zogenaamde Richardsvergelijking [Delft Cluster, 2001a]. Deze vergelijking, die volgt uit de combinatie van de continuïteitsvergelijking voor het water met de empirische relatie voor het stromingsdebiet (de wet van Darcy) voor het water, wordt met de drukhoogte $p(m)$ als primaire variabele geschreven als:

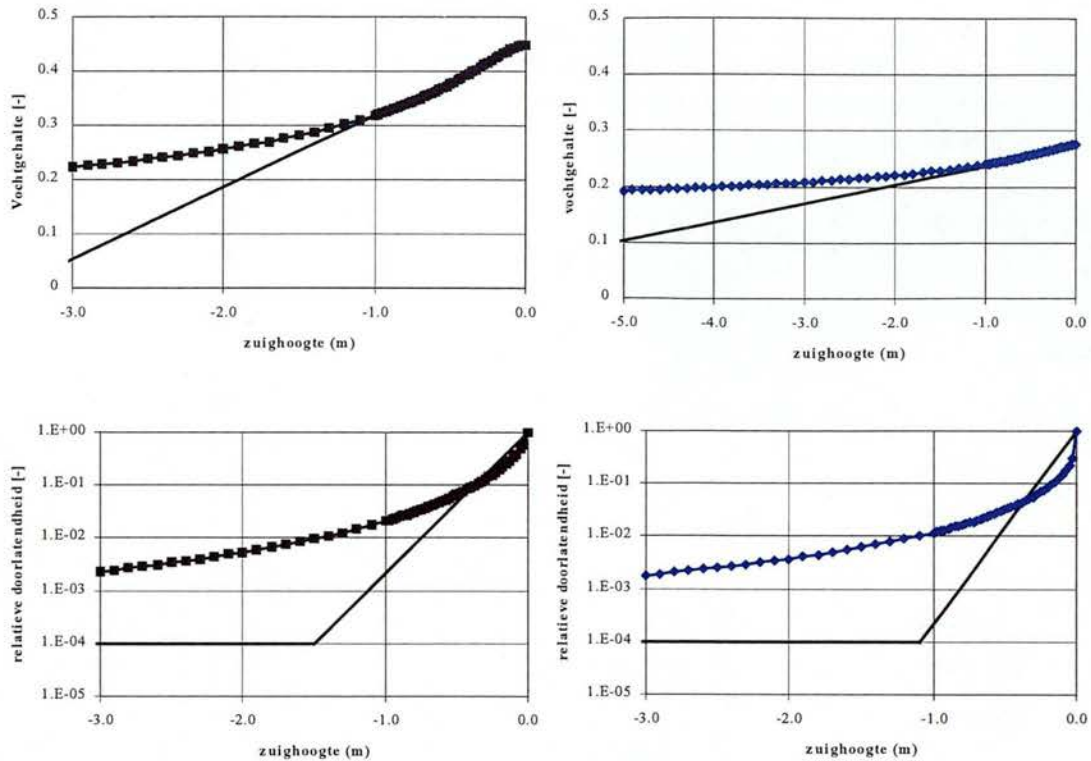
$$\nabla \cdot \left[\mathbf{K} \left(\nabla p - \frac{\rho \mathbf{g}}{\gamma_w} \right) \right] = \left[(m_v + n\beta)S + n \frac{\partial S}{\partial p} \right] \frac{\partial p}{\partial t} \quad (5.1)$$

waarin:

\mathbf{K}	doorlatendheidstensor [m/s]
p	drukhoogte [m]
∇	ruimtelijke afgeleide [1/m]
\mathbf{g}	gravitatie-vector [m/s ²]
ρ	dichtheid van het water [kg/m ³]
m_v	samendrukbaarheid van de korrelmatrix [1/m]
n	porositeit
β	samendrukbaarheid van de vloeistof-lucht mengsel [1/m]
S	effectieve verzadigingsgraad [-]
t	tijd [s]
γ_w	gewicht water [N/m ³]

Conform de vormgeving in Plaxis is de drukhoogte negatief indien het materiaal verzadigd is, en positief in het geval het materiaal onverzadigd is. Verder wordt de plaatshoogte aangegeven met y (NAP+m), met de positieve richting naar boven gekozen. De verzadigde doorlatendheid wordt aangeduid met K_s (m/s).

Voor het oplossen van de Richardsvergelijking dienen zogenaamde materiaalcurven te worden gedefinieerd, relaties tussen de doorlatendheid en het vochtgehalte en de aanwezige (negatieve) druk. Deze relaties, die essentieel zijn en vaak bepalend voor de uitkomst van de berekeningen, zijn voor het dijkmateriaal nog niet goed bekend. Net als het geval is voor natuurlijk afgezette gronden, zijn voor het dijkmateriaal beide relaties hoogstwaarschijnlijk echter sterk niet-lineair. In een pas verschenen rapport wordt beargumenteerd, dat een vereenvoudigde beschrijving leidt tot een adequate beschrijving van de drukopbouw in de dijk onder overslagcondities [Delft Cluster, 2001b]. De vereenvoudigde beschrijving bestaat uit een lineaire relatie tussen het vochtgehalte θ (-) met de positieve drukhoogte en een loglineaire relatie tussen de doorlatendheid K (m/s) en de positieve drukhoogte (zie Figuur 5.1 voor de relaties voor zand en leem).



Figuur 5.1 Vochtgehalte θ [-] en relatieve doorlatendheid $K_r = K/K_s$ [-] als functie van de drukhoogte (in m), voor de klei deklaag (links) en de onderliggende toplaag (rechts). De curven met datapunten (deze punten zijn niet representatief voor de meetpunten) zijn door Alterra gedefinieerd met behulp van het Van Genuchten model (zie Bijlage 6). De gelineariseerde curven zijn afgeleide curven die in de numerieke modellering zijn toegepast.

Bij een drukhoogte van $p < 0$ m wordt de doorlatendheid gelijk gekozen aan de verzadigde doorlatendheid. Vervolgens neemt de doorlatendheid logaritmisch (met kental 10) 4 orden van grootte af tussen $p = 0$ m en de (positieve) drukhoogte p_k (m). Voor drukhoogten groter dan p_k is de doorlatendheid constant:

$$\begin{aligned} K(p) &= K_s & p &\leq 0 \\ K(p) &= K_s 10^{(-4p/p_k)} & 0 \leq p \leq p_k \\ K(p) &= K_s 10^{-4} & p \geq p_k \end{aligned} \quad (5.2)$$

De eerste vormparameter in deze vereenvoudigde beschrijving is de drukhoogte p_k (m). Deze is gedefinieerd als de (positieve) drukhoogte waarbij de conductiviteit 4 orden van grootte is afgenomen.

De relatie tussen het vochtgehalte en de drukhoogte wordt lineair verondersteld. Bij een drukhoogte gelijk aan $p = 0$ m wordt het vochtgehalte gelijk gesteld aan de effectieve porositeit n_e (het verzadigde vochtgehalte minus het restvochtgehalte). De verzadigingsgraad wordt vervolgens geschreven als:

$$\begin{aligned} \theta(p) &= n_e & p &\leq 0 \\ \theta(p) &= n_e (1 - p/p_s) & 0 < p < p_s \\ \theta(p) &= 0 & p &\geq p_s \end{aligned} \quad (5.3)$$

De drukhoogte p_s (m) is de tweede vormparameter in de vereenvoudigde beschrijving. Dit is de (positieve) drukhoogte waarbij het vochtgehalte gelijk aan nul is geworden. In

overeenstemming met relatie (5.3) is de vochtcapaciteit dS/dp (met S [-] de verzadigingsgraad) gedefinieerd als:

$$\begin{aligned} \frac{\partial S}{\partial p} &= 0 & p &\leq 0 \\ \frac{\partial S}{\partial p} &= -1/p_s & 0 < p < p_s \\ \frac{\partial S}{\partial p} &= 0 & p &\geq p_s \end{aligned} \quad (5.4)$$

Het vochtgehalte en de doorlatendheid worden voor negatieve drukhoogten gelijk gekozen aan het verzadigd vochtgehalte en de verzadigde doorlatendheid. De samendrukbaarheid is voor alle materialen verwaarloosbaar klein verondersteld.

Behalve een aantal sets van materiaalparameters zijn geschikte randvoorwaarden en een schatting van de initiële situatie nodig voor de berekening.

6 Eén-dimensionale infiltratieberekeningen

6.1 Introductie

Door middel van het uitvoeren van acht één-dimensionale infiltratieberekeningen (*Run1* t/m *Run8*) met variaties van de verzadigde doorlatendheid en andere fysische materiaalparameters wordt inzicht verkregen in de waterdrukopbouw tijdens de verificatieproef. De resultaten van de berekeningen zijn van belang voor het bepalen van de meest geschikte dieptelocaties van de tensiometers. Hierbij is als criterium de mate van de optredende verandering in de waterdruk tijdens infiltratie gekozen.

6.2 Numeriek rekenmodel

De berekeningen van de (on-)verzadigde stroming zijn uitgevoerd met de grondwaterstromingsmodule GeoFlow van het eindige elementenprogramma Plaxis (voor de theorie, zie het vorige hoofdstuk).

Model

Als één-dimensionale doorsnede van het talud is een smalle verticale kolom genomen. De twee uiterste verticale coördinaten van de kolom zijn $y = \text{TO-0}$ en $y = \text{TO-4 m}$. Er zijn vijf materialen gedefinieerd:

- Sterk zandige klei deklaag
- Lemige onderliggende toplaag (vast gepakt)
- Lemige onderliggende toplaag (los gepakt)
- Zand-leem overgang
- Zand, zwak siltig

De stratificatie en de fysische materiaalparameters voor de eerste berekening *Run1* zijn in Tabel 6.1 gepresenteerd. In de tabel zijn het toegepaste materiaalmodel volgens de Staringreeks voor beschrijving van de onverzadigd materiaalgedrag van de Nederlands ondergrond [Alterra, 2001], de geschatte onverzadigde materiaalparameters p_k en p_s en n volgens het gelineariseerde materiaal model [Delft Cluster 2001b], en de specialistische schattingen van de verzadigde doorlatendheid voor de vijf gebruikte materialen.

Tabel 6.1 De kolomhoogte, het Staringreeksnummer, de geschatte onverzadigde materiaalparameters p_k en p_s en n volgens het gelineariseerde materiaal model, en de specialistische schattingen van de verzadigde doorlatendheid voor de vijf gebruikte materiaaltypen voor de eerste berekening *Run1*.

Materiaal	Hoogte [m-TO]	Staring-reeksnr.	p_k [m]	p_s [m]	n [-]	K_s [m/s]
Klei, (zeer) sterk siltig met zandstukjes	0,0 – 0,5	B7	1,14	4,72	0,40	1×10^{-4}
Leem, sterk zandig met grindstukjes (vast gepakt)	0,5 – 0,9	B6	0,70	4,51	0,40	3×10^{-5}
Leem, sterk zandig met grindstukjes (los gepakt)	0,9 – 1,0	B6	0,70	4,51	0,41	5×10^{-5}
Zand/leem overgang	1,0 – 1,1	B4	3,81	2,36	0,38	5×10^{-5}
Zand, zwak siltig	1,1 – 4,0	B2	0,79	2,32	0,41	1×10^{-4}

Randvoorwaarden en initiële conditie

Als initiële randvoorwaarde is aan de bovenzijde een drukhoogte gelijk aan $p = 1,0$ m aangehouden. De onderzijde heeft initieel een drukhoogte gelijk aan $p = 0,0$ m. De twee verticale zijden zijn ondoorlatend verondersteld.

Vanaf tijdstip $t = 0$ s wordt de drukhoogte aan de bovenzijde op $p = 0,0$ m gesteld. De overige randvoorwaarden blijven onveranderd.

Tijdsintegratie, elementengrid en convergentiecriteria

Door het niet-lineaire karakter van de berekening is het van belang de nauwkeurigheid van de berekening te testen. Hiertoe zijn berekeningen van een bepaalde case (*Run5*) uitgevoerd met verschillende (minimale) tijdstapgrootte, het aantal elementen en de grootte van het afbreekcriterium.

Uit de testberekeningen met verschillende tijdstapgrootte is gebleken, dat de resultaten niet noemenswaardig verschillen wanneer een minimale tijdstap van $\Delta t = 30$ s of $\Delta t = 0,1$ s wordt genomen. Om deze reden is in de berekeningen gekozen voor een variabele tijdstap met een minimum van $\Delta t = 1$ s en een maximum van $\Delta t = 0,5$ dag. De resultaten van de berekening worden ieder uur (in de doorlooptijd) opgeslagen.

Vervolgens is gevarieerd met het aantal elementen. Drie elementenroosters zijn gemaakt: 400 elementen, 752 elementen en 1608 elementen. Het betreffen ongestructureerde roosters. Het verticale drukhoogteverloop na 1 uur doorlooptijd op de drie roosters zijn met elkaar vergeleken. De resultaten wijken niet noemenswaardig af van elkaar. Er is gekozen het middelgrote elementenrooster toe te passen.

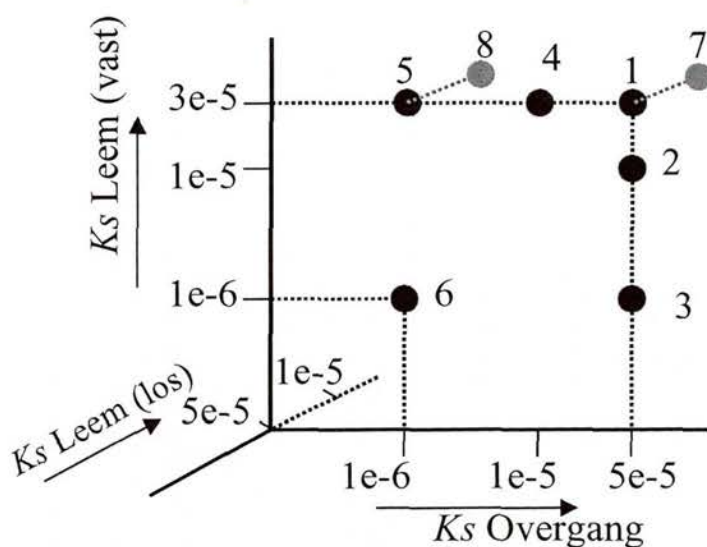
In zowel de stationaire berekening van de initiële situatie als de tijdsafhankelijke berekening stopt de iteratie wanneer de maximale verandering in de oplossingvector tussen twee iteraties minder dan 1 procent bedraagt van het verschil in de oplossingsvector tussen de eerste twee iteraties. Verder worden maximaal 20 iteraties per tijdstap uitgevoerd. Wanneer geen convergentie wordt bereikt, wordt met de laatste iteratie verder gerekend in de volgende tijdstap. Tests met andere afbreekcriteria (0,1 procent en 10 procent) gaven een zelfde verticaal waterdrukverloop.

Toegepaste variaties

Er zijn een achttal variaties van de verzadigde doorlatendheden van drie van de materiaaltypen doorgerekend. Deze variaties zijn per run gegeven in Tabel 6.2 en in een drie-dimensionale grafiek te zien in Figuur 6.2. *Run1* betreft de combinatie van beste schattingen van de specialist. Runs *Run2* en *Run3* hebben een systematisch lagere doorlatendheid van het vastgepakte leem. Runs *Run4* en *Run5* hebben een lagere doorlatendheid van de leem/zand overgang. *Run6* geeft een lagere doorlatendheid van zowel het vastgepakte leem van de onderliggende toplaag als van de leem/zand overgang. Runs *Run7* en *Run8* zijn identiek aan respectievelijk runs *Run1* en *Run5*, maar dan met een lagere doorlatendheid van het losgepakte leem (deze set representeert de afwezigheid van het losgepakte leem).

Tabel 6.2 Verzadigde doorlatendheden (in m/s) voor leem (vast en los gepakt) en de leem/zand overgang.

Run/materiaal	Leem (vast gepakt)	Leem (los gepakt)	Leem/zand overgang
Run1	3×10^{-5}	5×10^{-5}	5×10^{-5}
Run2	1×10^{-5}	5×10^{-5}	5×10^{-5}
Run3	1×10^{-6}	5×10^{-5}	5×10^{-5}
Run4	3×10^{-5}	5×10^{-5}	1×10^{-5}
Run5	3×10^{-5}	5×10^{-5}	1×10^{-6}
Run6	1×10^{-6}	5×10^{-5}	1×10^{-6}
Run7	3×10^{-5}	1×10^{-5}	5×10^{-5}
Run8	3×10^{-5}	1×10^{-5}	1×10^{-6}



Figuur 6.2 Schematische voorstelling van de variaties van de verzadigde doorlatendheden in de één-dimensionale infiltratieberekeningen.

Berekeningsresultaten

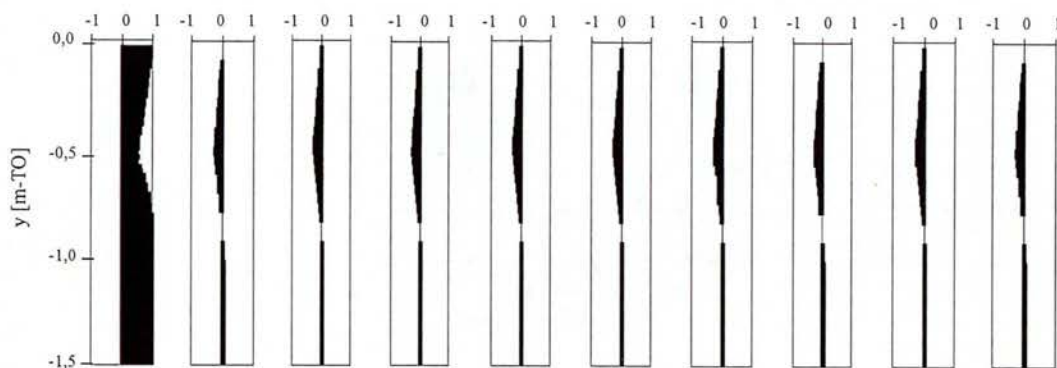
De resultaten zijn onder te verdelen in twee situaties: één waarin geen waterdrukopbouw in de keileem optreedt en één waarin dit wel gebeurt. De twee profielen worden aan de hand van een voorbeeld beschreven. Vervolgens worden de kritische doorlatendheden gegeven waarin de drukopbouw optreedt.

Als eerste is in Figuur 6.3 een profiel te zien, waarin geen maximale overdruk in de onderliggende toplaag optreedt. Dit profiel wordt verkregen in berekeningen *Run1* t/m *Run4*, er is alleen enigszins verschil in de minimale drukhoogte en de duur tot verzadiging van het zand (zie Tabel 6.3). De figuur geeft de in *Run1* berekende waterdruk (in kPa) als functie van de hoogte voor de bovenste 1,5 m voor een aantal tijdstippen en van de stationaire situatie. De eerste kolom geeft de initiële drukhoogte weer. De drukhoogte aan de bovenkant van de deklaag bedraagt $p = 0,98$ m, zoals is opgelegd. Op de siltige klei/keileem overgang op $y = TO-0,5$ m is de drukhoogte minimaal met $p = 0,52$ m.

Tabel 6.3 Minimale drukhoogte (in m) en locatie van optreden voor de één-dimensionale infiltratieberekeningen.

Run/materiaal	p_{\min} (m)	locatie
Run1	-2,5	basis deklaag
Run2	-3,9	basis deklaag
Run3	-3,9	basis deklaag
Run4	-3,9	basis deklaag
Run5	-7,7	basis toplaag
Run6	-7,7	basis toplaag
Run7	-7,7	basis toplaag
Run8	-7,7	basis toplaag

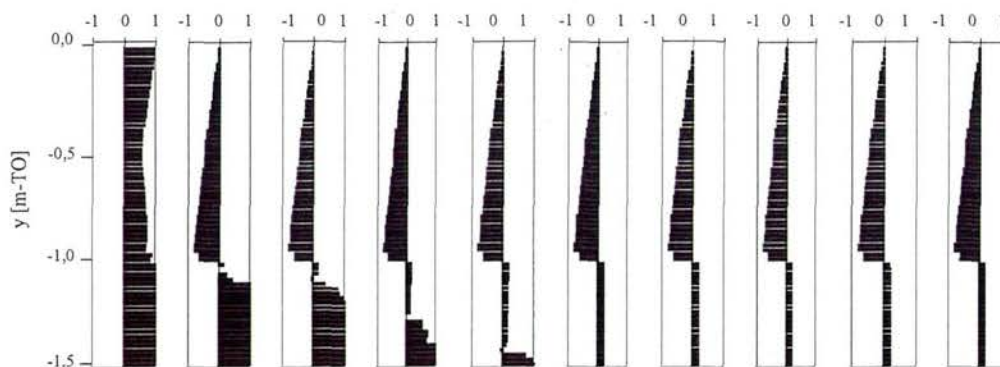
Vrijwel direct na aanvang van de infiltratie passen de waterdrukken in de kolom zich aan. De drukhoogte in de klei deklaag neemt af tot negatieve waarden met een waarde van $p = -0,25$ m. De minimale waarde treedt op aan de basis van de deklaag en is duidelijk niet hydrostatisch (op $y = TO-0,5$ m zou in dat geval de drukhoogte gelijk aan $p = -0,49$ m zijn). De drukhoogte in de onderliggende toplaag neemt af tot $p = 0,0$ m. De drukhoogte in het zand blijft positief, maar verschuift ook richting nuldruk. De drukhoogte blijft gelijk gedurende het verdere verloop van de berekening.



Figuur 6.3 Berekende waterdrukken in kPa als functie van de diepte voor de bovenste 1,5 m voor Run1, op de tijdstippen (van links naar rechts): $t = 0$ uur, $t = 1$ uur, $t = 2$ uur, $t = 3$ uur, $t = 4$ uur, $t = 6$ uur, $t = 8$ uur, $t = 10$ uur, $t = 12$ uur en de stationaire oplossing.

Figuur 6.4 geeft een profiel waarin wel een aanzienlijke waterdrukopbouw in de keileem opbouwt. Dit profiel wordt verkregen in berekeningen Run5 t/m Run8, en er is nauwelijks verschil te bemerken tussen deze vier berekeningen (zie ook Tabel 6.3). De figuur geeft de in Run6 berekende drukhoogte) als functie van de hoogte voor de bovenste 1,5 m voor een aantal tijdstippen en van de stationaire situatie. Een positieve waarde correspondeert wederom met een positieve drukhoogte. De eerste kolom geeft de initiële drukhoogte weer. De drukhoogte aan de bovenkant van de deklaag bedraagt $p = 0,98$ m, zoals is opgelegd. Op de grens van de siltige klei/keileem overgang op $y = TO-0,5$ m is de drukhoogte minimaal met $p = 0,54$ m.

Na aanvang van de infiltratie van bovenaf vanaf $t = 0$ uur treedt snel drukopbouw in de klei deklaag en in de onderliggende toplaag op. Na één uur is de minimale drukhoogte gelijk aan $p = -7,7$ m aan de basis van de keileem deklaag. Deze drukopbouw is gelijk aan 78 procent van de hydrostatische waarde. De drukhoogte in het zand blijft positief, maar door infiltratie verschuift deze geleidelijk richting de nuldruk.



Figuur 6.4 Berekende waterdrukken in kPa als functie van de diepte voor de bovenste 1,5 m voor Run 6, op de tijdstippen (van links naar rechts): $t = 0$ uur, $t = 1$ uur, $t = 2$ uur, $t = 3$ uur, $t = 4$ uur, $t = 6$ uur, $t = 8$ uur, $t = 10$ uur, $t = 12$ uur en de stationaire oplossing.

6.3 Conclusie

In dit hoofdstuk zijn één-dimensionale infiltratieberekeningen uitgevoerd, als representatie van infiltratie in een verticale doorsnede van het dijktafval. De resultaten van de berekeningen zijn onder te verdelen in twee typen drukprofielen. In het geval, dat de doorlatendheid van de keileem/zand overgang groter of gelijk is aan $K_s = 1 \times 10^{-5}$ m/s, treedt er nauwelijks waterdrukopbouw in de onderliggende toplaag op. In deze laag neemt de drukhoogte wel tot nagenoeg hydrostatische waarden af, bij kleinere waarden van de keileem/zand overgang of bij een sterke afname van de doorlatendheid in de onderliggende toplaag. Voorwaarde hierbij is wel dat de onderliggende toplaag een doorlatendheid groter dan $K_s = 1 \times 10^{-5}$ m/s heeft.

Voor het plaatsen van de tensiometers is het van belang de drukhoogte in de deklaag en die aan de basis van de onderliggende toplaag te kunnen monitoren. Met name de laatste is van belang voor de stabiliteit de onderliggende toplaag. Er worden in de buurt van de kruin ook een tweetal opnemers in de zandlaag geplaatst, om zo inzicht te verkrijgen in het verloop van de drukhoogte in deze laag indien het materiaal minder homogeen is dan in deze berekeningen is aangenomen.

7 Inrichting van de verificatieproef

7.1 Uitstroombaciliteit

Op de kruin van de dijk zijn 3 kunststof buizen geplaatst met elk een lengte van 10 meter, welke achter elkaar op de kruin van de dijk zijn geplaatst. Om de circa 10 centimeter is een gat geboord met een doorsnede van circa 15 mm.

De buizen zijn waterpas gesteld op de kruin van de dijk zodat water gelijkmatig uitstroomt. Het benodigde water is opgepompt uit het IJsselmeer. Hiertoe is een pomp buitendijks geplaatst. Een deel van het water stroomt langs het talud, de rest infiltreert in het dijklichaam. In de aanvoerleidingen van de 3 kunststof buizen zijn regelkranen en debietmeters voor instelling en registratie van de hoeveelheid water waarmee het dijktaud wordt belast. Deze werkzaamheden zijn in samenwerking met de firma Haitjema uitgevoerd.

Voorafgaand aan de proef is het talud van vrijdag 3 mei 2002 tot en met maandag 6 mei 2002 beregend met als doel een realistische beginconditie voor de proef te realiseren. Hiertoe zijn sproeiers op de kruin van de dijk geplaatst. De sproeiers zijn gevoed met een debiet van circa 3,0 m³/uur, wat overeenkomt met neerslag van circa 240 mm/dag.

Op 6 mei 2002 is gedurende 45 minuten (vanaf circa 13.10 uur) een testproef uitgevoerd. De testproef geeft een goed resultaat. Het blijkt dat de debieten met een nauwkeurigheid van circa 1 m³ kunnen worden afgesteld en dat alle instrumenten goed werken.

7.2 Waterspanningsmetingen

Om inzicht te krijgen in de waterinfiltratie en drukopbouw in het talud zijn op 2 en 3 mei 2002 12 tensiometers (Type UMS T5, miniatuur pressure transducer tensiometer) geplaatst. Deze instrumenten hebben een bereik van -10,00 tot 8,50 meter waterkolom. De nauwkeurigheid van de tensiometers bedraagt 3 cm waterkolom.

De tensiometers zijn op 5 locaties geplaatst. Voor plaatsing is handmatig een verticaal gat geboord tot de gewenste diepte. Het boorgat is gevuld met circa 20 cm vochtig zand, waarin de tensiometer is geplaatst. Tussen de tensiometers is een waterscheidende laag aangebracht met behulp van kleikorrels. Op de volgende dieptes zijn de tensiometers geplaatst:

- Locatie T1: TO-0,35 meter, TO-0,75 meter en TO-1,40 meter
- Locatie T2: TO-0,35 meter, TO-0,75 meter en TO-1,40 meter
- Locatie T3: TO-0,35 meter en TO-0,75 meter
- Locatie T4: TO-0,35 meter en TO-0,75 meter
- Locatie T5: TO-0,35 meter en TO-0,75 meter

In Bijlage 9 zijn de plaatsingsformulieren van de tensiometers opgenomen.

7.3 Deformatie-metingen

Voor monitoring van horizontale deformaties in de kleibekleding zijn op 22 en 23 april 2002 hellingmeters (Type Boart Longyear Interfels EL-IPI) geplaatst met een bereik van 10 graden. De resolutie van dit meetsysteem bedraagt +/- 0,004 graden. De sensors zijn bevestigd aan stalen buis met een lengte van 2 meter met in het midden van de buis een scharnier. De hellingmeters zijn op 3 locaties geplaatst. Voor plaatsing is handmatig een verticaal gat geboord tot een diepte van 2 meter. De inclinometer is zo afgesteld, dat het scharnier wordt geplaatst op de scheiding tussen de kleibekleding van de dijk en het daar onderliggende zand. In Bijlage 9 zijn de plaatsingsformulieren van de hellingmeters opgenomen.

In de tussenberm van de dijk zijn 5 vaste punten geplaatst, welke gedurende de proef zijn ingemeten met een frequentie van 3 keer per uur. Deze meting is uitgevoerd om opbolling van de tussenberm van de dijk (verticale deformatie) van de kruin te meten. De nauwkeurigheid van deze meting bedraagt circa 0,5 mm.

Tevens zijn vooraf en achteraf 2 dwarsprofielen ingemeten om ook grotere deformaties te kunnen vaststellen. De dwarsprofielen lopen van de kruin van de dijk over het binnentalud tot aan het hek op de tussenberm over de lijnen T1-H1-T3 en T2-H3-T4.

7.4 Data-acquisitie

De tensiometers en de inclinometers zijn aangesloten op een datalogger. Gedurende de praktijk proef zijn de instrumenten gemonitord met een frequentie van 1 meting per minuut. Tijdens de berekening voorafgaand aan de proef zijn de instrumenten gemonitord met een lagere frequentie van 1 meting per 10 minuten.

8 Resultaten verificatieproef

8.1 Visuele waarnemingen

Op dinsdagochtend 7 mei 2002 is de proef om 7.15 uur gestart, waarna de proef tot 19.30 uur is doorgezet. Het overslagdebiet bedraagt 108 m^3 per uur. Dit komt overeen met een belasting van het dijktaalud van 1 l/s per strekkende meter.

Om 7.20 uur begint water over de bermweg te stromen. Op een groot aantal plaatsen komen luchtbellens uit de bermweg. Hierbij wordt geen zand meegevoerd. Vanaf 17.00 uur worden geen luchtbellens meer waargenomen.

Om 8.30 uur wordt een grond meevoerende well waargenomen in de tussenberm van de dijk met een diepte van circa 10 centimeter. Gedurende de proef blijkt de well zich niet uit te breiden.

Om 9.30 uur bereikt het water de aan de A6 evenwijdig lopende kwelsloot.

Om 13.45 uur ontstaan een zestal wellen in de kwelberm. Een aantal wellen zijn grond meevoerend. Om 15.45 raakt bij één van de grondvoerende wellen de grasbekleding los. Het oppervlak wordt gedurende de proef groter en bereikt een maximum van circa $4 \times 4 \text{ m}^2$.

Om 17.00 uur is ter hoogte van kilometer 23.0 een peiling uitgevoerd in de peilbuis nabij de kwelsloot. De stijghoogte bedraagt MV-0.70 meter.

Vanaf 18.30 uur wordt het debiet stapsgewijs gereduceerd. Het debiet waarbij geen stroming over de bermweg waarneembaar is, is het debiet waarbij al het water in de dijk infiltreert. Bij een debiet $20 \text{ m}^3/\text{uur}$ is geen stroming meer waarneembaar. De proef wordt om 19.15 uur beëindigd.

8.2 Waterspanningsmetingen

In de Bijlagen 11.1 tot en met 11.9 zijn de resultaten van de waterspanningsmetingen opgenomen. De grafieken geven het verloop van de waterspanning weer gedurende de berekening voorafgaand aan de verificatieproef, gedurende de verificatieproef en gedurende een periode na de verificatieproef.

Uit de grafieken kunnen de volgende conclusies worden getrokken:

- De berekening heeft geleid tot een conservatieve uitgangssituatie voor de verificatieproef. Het proefvak is namelijk grotendeels verzadigd. Op locatie T1 wordt vlak voor de start van de verificatieproef op TO-0.35 meter (1.07 kPa) en TO-1.40 meter (2.66 kPa) nog een geringe onderdruk gemeten. Dit is ook het geval voor locatie T2 op TO-0.75 meter (0.76 kPa) en TO-1.40 meter (1.75 kPa). Op locatie T5 wordt op TO-0.75 meter een onderdruk van 7.47 kPa gemeten, waarbij nog steeds een afnemende trend waarneembaar is.
- Gedurende de proef is een dalende trend waarneembaar en slaan de positieve zuigspanningen (onderdruk) om in negatieve drukhoogte (overdruk). Alleen de tensiometer op locatie T5 op een diepte TO-0.75 meter registreert gedurende de totale duur van de verificatieproef een onderdruk. Deze registratie wordt als gevolg van een mogelijke verstoring voorafgaande aan de proef niet als representatief gezien. Om deze reden wordt deze registratie bij de calibratie van de modelberekeningen buiten beschouwing gelaten.

- Op een diepte van TO-0.75 wordt onder in het talud (T3 en T4) de sterkste afname in de zuigspanning waargenomen.
- De tensiometers op een diepte van TO-1.40 meter (zandpakket) registreren vanaf 11.00 uur een sterk afnemende zuigspanning. Dit is een aanwijzing dat binnen 4 uur na de start van de proef het infiltrerende water het zandcunet bereikt.
- Na het beëindigen van de verificatieproef nemen de zuigspanningen wederom toe. In de dek- en toplaag duurt het circa 24 uur voordat alle tensiometers constante waarden aangeven. Na 3 à 4 uur worden in het zandpakket stabiele drukken geregistreerd.

In Tabel 8.1 is een overzicht opgenomen van de maximaal gemeten overdrukken (minimale zuigspanningen) die gedurende de verificatieproef zijn geregistreerd.

Tabel 8.1 Minimaal gemeten drukhoogten gemeten tijdens de verificatieproef.

Locatie	Diepte	Minimale drukhoogte [kPa]
1	TO-0.35 m	-1.17
	TO-0.75 m	-3.48
	TO-1.40 m	-5.62
2	TO-0.35 m	-2.18
	TO-0.75 m	-0.82
	TO-1.40 m	-5.20
3	TO-0.35 m	-4.86
	TO-0.75 m	-7.24
4	TO-0.35 m	-5.20
	TO-0.75 m	-4.55
5	TO-0.35 m	-5.83
	TO-0.75 m	-

Uit de minimaal gemeten drukhoogten blijkt dat de zandkern nabij de kruin verzadigd raakt, maar dat de drukhoogte niet hydrostatisch is. Nabij de tussenberm treedt zowel verzadiging als waterdrukopbouw op. Daarom zijn na de proef nabij de tussenberm (locaties T3 en T4) de profielkuilen gegraven. In de bodem zijn echter geen aanwijzingen gevonden dat de drukopbouw verklaard kan worden door de aanwezigheid van een ondoorlatende laag. Dit betekent dat de drukopbouw het resultaat moet zijn van een ander proces. In de grondwaterstromingsberekening in het volgende hoofdstuk wordt een mogelijke oorzaak voor deze drukopbouw gevonden.

8.3 Deformatiemetingen

De resultaten van de horizontale deformatiemetingen (hellingmeters), de verticale deformatiemetingen in de tussenberm van de dijk en de ingemeten dijkprofielen, zijn opgenomen in respectievelijk de Bijlagen 12, 13 en 14.

Uit de grafieken kunnen de volgende conclusies worden getrokken:

- De maximale gemeten horizontale vervorming van het dijkta-lud gemeten door H1, H2 en H3 bedragen respectievelijk circa -2,0 mm, -3,5 mm en 1,5 mm (een positieve uitwijking betekent van het talud af). Het onregelmatig signaal wordt veroorzaakt door de gemeten deformaties, die zo klein zijn dat de hellingmeters de onderkant van het meetbereik registreren.
- De maximale opbolling in de tussenberm van de dijk, bepaald met de handmatige hoogtemetingen, bedraagt circa 2 mm.
- De hoogtes van de dijkprofielen, die voor en na de verificatieproef zijn ingemeten, vertonen nagenoeg geen verschil. Dit komt overeen met de geringe horizontale en verticale deformaties die zijn gemeten tijdens de proef.

9 Resultaten ijkingberekening

9.1 Inleiding

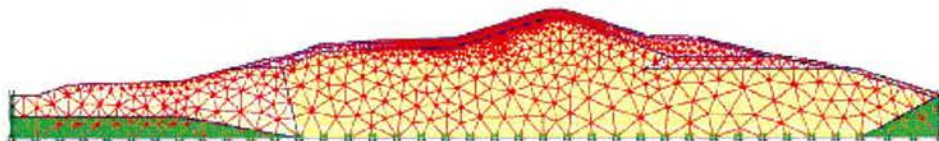
De resultaten van de monitoring van de waterdruk en de vervormingen tijdens de verificatieproef (zie hoofdstuk 8) worden in dit hoofdstuk aangewend, voor de ijking van de twee-dimensionale eindige elementen berekeningen van de grondwaterstroming en deformatie.

9.2 Geometrie, begin- en randvoorwaarden

De berekeningen van de (on-)verzadigde stroming zijn uitgevoerd met de grondwaterstromingsmodule GeoFlow Bèta versie van het eindige elementenprogramma Plaxis. De resultaten van de grondwaterdruk van een berekening met GeoFlow worden in Plaxis Deformatie V8 Bèta gebruikt voor een deformatieberekening.

Geometrie

Als twee-dimensionale geometrie is het dwarsprofiel op locatie km 23,0 m gebruikt, waarbij ook gebruik is gemaakt van de gegevens op de revisietekening. Figuur 9.1 toont de gebruikte geometrie.

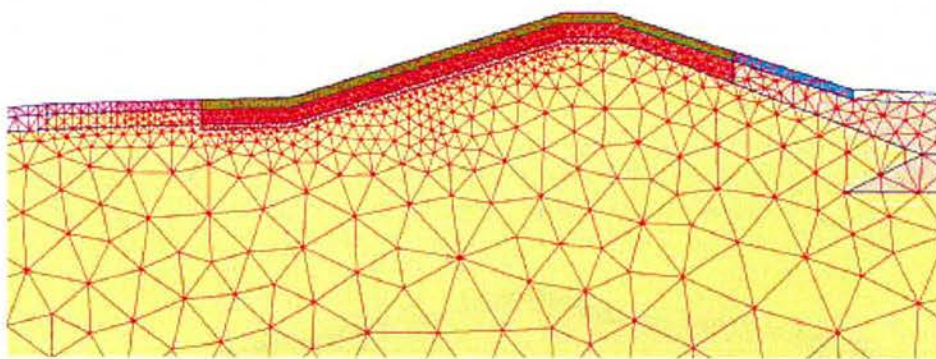


Figuur 9.1 Zes-knoops elementengrid voor de twee-dimensionale deformatieberekening. Voor het grid voor de stromingsberekening is ieder zes-knoops element opgedeeld in vier lineaire elementen.

Er zijn negen materialen gedefinieerd:

- Klei deklaag (boventalud)
- Onderliggende toplaag (boventalud)
- Keileem buitentalud
- Zandkern
- Sliblaag op het cunet bij de overgang naar het meer
- Klei Holocene
- Klei deklaag (boventalud)
- Onderliggende toplaag (boventalud)
- Zandkern (teen)

Figuur 9.2 geeft een close-up van de kruin van de dijk.



Figuur 9.2 Close-up van de kruin van de dijk met de zes-knoops elementengrid zoals toegepast in de twee-dimensionale deformatieberekening.

De onderzijde van de geometrie valt voor het grootste deel samen met de grens tussen het zandcunet en de onderliggende Holocene kleilaag. De drainage van de kwelstrook is gerepresenteerd door de kwelstrook wat dikker te maken. Het IJsselmeer is van het zandcunet gescheiden door een sliblaag met een dikte van 0,5 m.

Hydrologische randvoorwaarden

De randvoorwaarden die gedurende de berekening constant blijven zijn als volgt gedefinieerd. Het meerpeil is constant op $H = \text{NAP} - 0,2$ m gesteld, waarin H de stijghoogte voorstelt. Het slootpeil in de polder is ook constant, op $H = \text{NAP} - 5,0$ m. De onderzijde van de geometrie is ondoorlatend verondersteld. Tevens is een gesloten randvoorwaarde opgelegd op de asfaltweg en de basaltbekleding van het buitentalud.

De randvoorwaarden aan het oppervlak variëren per fase van de berekening, en zijn gegeven in Tabel 9.1. Hierbij wordt opgemerkt dat de initiële fase bestaat uit een stationaire berekening met een neerslag van $q = 0,1$ mm/dag, gevolgd door een tijdsafhankelijke berekening over acht dagen met een neerslag van $q = 5$ mm/dag.

Tabel 9.1 De randvoorwaarde op een oppervlak voor elke fase van de berekening. Een stijghoogte randvoorwaarde wordt aangeduid met H [in m]. Een gecombineerde neerslagrandvoorwaarde met infiltratie tot een maximum drukhoogte van $p = 0,0$ m wordt aangegeven met q [in mm/dag], een drukhoogte met p [in m], en instroom randvoorwaarde met Q [in mm/dag]. Een sijpelrandvoorwaarde wordt aangegeven met de naam Sijpel.

Fase / Locatie	initieel		voor- berekening	proef
	initieel	8 dagen		
Sloot	$H = -5,0$	$H = -5,0$	$H = -5,0$	$H = -5,0$
Kwelstrook	$q = 0,1$	$q = 5$	$q = 5$	Sijpel
Laag binnentalud	$q = 0,1$	$q = 5$	$q = 5$	$Q = 10$
Tussenberm	$q = 0,1$	$q = 5$	$q = 5$	$p = 0,0$
Hoog binnentalud	$q = 0,1$	$q = 5$	$Q = 240$	$p = 0,0$
Kruin/buiten talud	$q = 0,1$	$q = 5$	$q = 5$	$q = 0$
IJsselmeer/ breuksteen	$H = -0,2$	$H = -0,2$	$H = -0,2$	$H = -0,2$

Elementengrid, tijdsintegratie en convergentiecriteria

Het elementengrid is zo gedefinieerd, dat het merendeel van de elementen in het hoge binnentalud zitten. Figuur 9.1 geeft een representatie van het elementen grid. Het betreft het grid met 2451 zes-knoops elementen als gebruikt voor de deformatieberekening. De gemiddelde elementgrootte in het hoge binnentalud is 0,25 m. In de stromingsberekening wordt ieder zes-knoops element in vier lineaire elementjes verdeeld (dit laatste grid is niet afgebeeld).

Er is een variabele tijdstap toegepast met een minimum van $\Delta t_{\min} = 0,0005$ dag en een maximum van $\Delta t_{\max} = 0,5$ dag.

In zowel de stationaire als de tijdsafhankelijke berekening stopt de iteratie wanneer de maximale verandering in de oplossingvector (lees drukhoogte) tussen twee iteraties minder dan 1 procent bedraagt van het verschil in de oplossingsvector tussen de eerste twee iteraties. Verder worden in de stationaire berekening maximaal 50 iteraties uitgevoerd, terwijl het maximum iteraties per tijdstap gelijk aan 10 is in de tijdsafhankelijke berekening. Wanneer geen convergentie wordt bereikt, wordt in de volgende tijdstap de onbalans meegenomen.

9.3 Hydrologische ijkingberekening

De infiltratieberekening heeft een doorlooptijd van ongeveer 5 uur op een 1.47 GHz met 512 Mbyte intern geheugen. De hydrologische materiaalparameters voor de ijkingberekening *IJking* zijn gepresenteerd in Tabel 9.2. In de tabel zijn de (on-)verzadigde materiaalparameters K_s , p_k , n en p_s voor het gelineariseerde materiaal model [Delft Cluster 2001] gedefinieerd voor de negen gebruikte materiaaltypen. Gelineariseerde elastische berging wordt gerepresenteerd met de waarde b [1/m].

Tabel 9.2 De (on-)verzadigde materiaalparameters K_s , p_k , n , en p_s en de elastische berging b volgens het gelineariseerde materiaal model voor de twaalf materiaaltypen, die zijn gebruikt in de stromingsberekening voor de ijking.

Materiaal	K_s [m/dag]	p_k [m]	n [-]	p_s [m]	b [1/m]
Klei deklaag (boventalud)	17,3	1,50	0,40	3,04	0,005
Onderliggende toplaag (boventalud)	1,73	1,10	0,35	6,58	0,005
Keileem (kade)	0,43	1,10	0,35	6,58	0,005
Zandkern	17,3	1,06	0,43	2,37	0,005
Sliblaag	8,64	1,50	0,40	3,00	0,010
Klei Holoceen	0,01	1,20	0,40	6,00	0,005
Asfaltweg	0,01	1,06	0,20	2,37	0,001
Basaltbekleding	2,00	1,06	0,20	2,37	0,001
Klinkerweg	17,3	1,50	0,40	3,04	0,001
Klei deklaag (ondertalud)	17,3	1,50	0,40	3,04	0,005
Onderliggende toplaag (ondertalud)	1,73	1,10	0,35	6,58	0,005
Zandkern (teen)	17,3	1,06	0,43	2,37	0,005

Tabel 9.3 laat de gemeten en berekende drukhoogte ter plaatse van de tensiometers in de verschillende taludlagen zien, voor het tijdstip net na afloop van de verificatieproef.

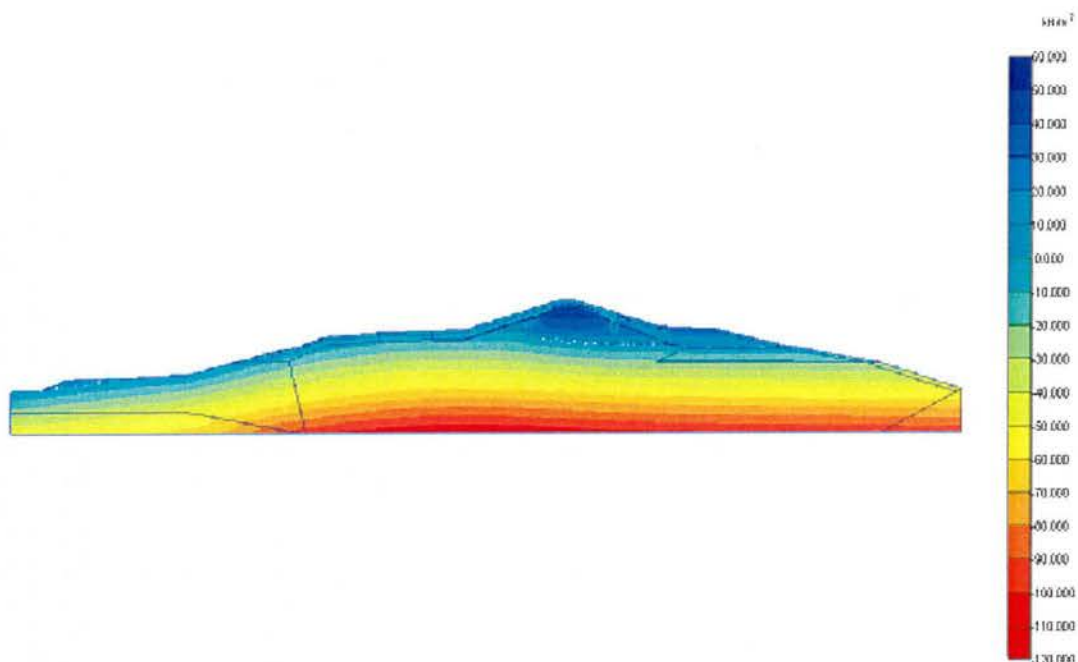
Tabel 9.3 Gemeten en berekende drukhoogten p in meters na afloop van de verificatieproef op de tensiometer locaties.

Locatie opnemer / knooppunt	Diepte [m-TO]	Maximaal gemeten overdruk [kPa]	
		meting	berekening
Klei deklaag (hoog)	-0,40	2,18	3,4
Onderliggende toplaag (hoog)	-0,75	3,48	5,1
Zand (hoog)	-1,30	5,62	<0
Klei deklaag (laag)	-0,40	5,20	3,1
Onderliggende toplaag (laag)	-0,75	7,24	2,7

Gedurende de initiële fase raken de taluds van de dijk door de acht dagen met een neerslag van 5 mm/dag enigszins vochtig.

Tijdens de voorbereiding van de proef loopt de drukhoogte in de klei deklaag op tot positieve (maar minder dan hydrostatische) waarden. De onderliggende toplaag raakt nagenoeg verzadigd, maar de drukhoogte blijft nagenoeg overal positief. Alleen in het knikpunt van tussenberm en hoog binnentalud is de onderliggende toplaag na afloop van de berekening verzadigd. De waterdrukhoogte is 0,17 m. Deze waarde is goed in overeenstemming met de metingen (zie Bijlage 11.5).

Gedurende de 12 uur van overslag raakt het binnentalud net niet verzadigd (zie Figuur 9.2). Tevens neemt de hoogte van de freatische lijn in de loop van de proef toe door aanvulling in de buurt van de tussenberm. De drukhoogte in de klei deklaag neemt toe tot hydrostatische waarden. De onderliggende toplaag raakt nagenoeg verzadigd. Nabij de kruin blijft de drukhoogte in de buurt van de nuldruk, in de buurt van de tussenberm loopt de drukhoogte op tot bijna hydrostatische waarden. De drukopbouw in de buurt van de tussenberm wordt veroorzaakt door het verzadigen van de kern tot een hoogte van ongeveer $y = 0,0 + \text{NAP}$ m. De verzadiging geschiedt met name via infiltratie net boven en in de tussenberm (voor Darcy snelheden, zie Figuur 9.3).

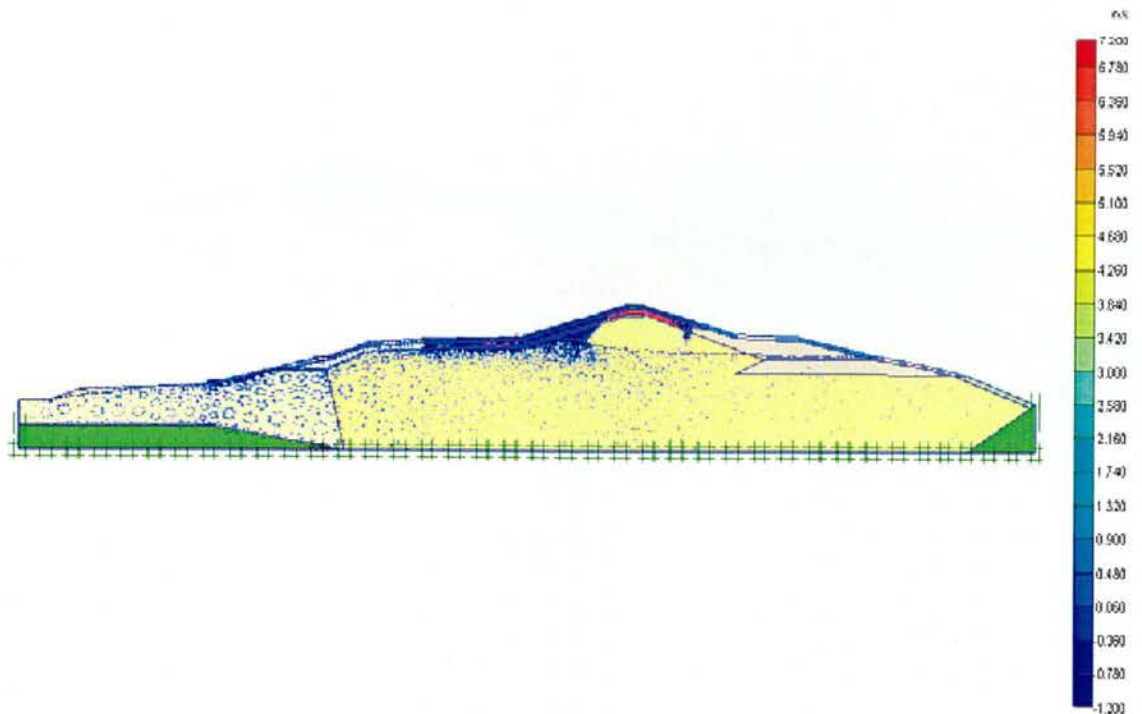


Figuur 9.2 Drukhoogten na afloop van de overslagperiode, IJking.

Of de verzadiging van de kern tot $y = 0$ +NAP m ook tijdens de in-situ proef is opgetreden, valt niet met zekerheid te zeggen. Er zijn wel twee aanwijzingen die overeenkomen met deze situatie. Ten eerste neemt de drukhoogte in de opnemers in de onderliggende toplaag nabij de tussenberm (locaties T3 en T4) tot nagenoeg hydrostatische waarden toe, dit in tegenstelling tot de opnemers nabij de kruin (locaties T1 en T2). Ten tweede is geconstateerd dat na verloop van tijd luchtbellens komende uit de klinkerweg op de tussenberm verdwijnen (zie de paragraaf met visuele waarnemingen in het vorige hoofdstuk).

Het verzadigen van de kern tot de hoogte van de tussenberm is een belangrijk twee dimensionaal proces, dat kan leiden tot een afname van de sterkte van de dijk. Dit proces dient dan ook in ogenschouw te worden genomen in de variatieberekeningen van de hoogwatersituatie, waarbij infiltratie vanuit het IJsselmeer de freatische lijn in de kruin nog verder kan doen stijgen. Kritische parameters voor de verzadiging zijn de doorlatendheid van de sliblaag op de grens tussen zandcunet en het IJsselmeer en de doorlatendheid van de leemlaag in het buitentalud. Met deze parameters is niet gevarieerd. Verder zijn voor de hoeveelheid infiltratie tijdens overslag de (on-)doorlatendheid van de deklaag en onderliggende toplaag in het buitentalud, de kruin, het hoge binnentalud en de tussenberm van belang.

Het water treedt uit net onder in het lage binnentalud. Dit komt overeen met de waarnemingen tijdens de verificatieproef, waar zich op deze locatie na verloop van de proef een zestal zand meevoerende wellen vormden. Tevens werd geconstateerd, dat de grasmat op deze locatie losliet door waterdrukopbouw in het zand net onder deze grasmat.



Figuur 9.3 Darcy snelheden na afloop van de overslagperiode, IJking. Maximale snelheden van 6 m/dag treden op in de deklaag.

De overeenkomsten tussen de resultaten van de hydrologische ijkingberekening en de waarnemingen tijdens de verificatieproef geven voldoende vertrouwen in de hydrologische invoerparameters.

9.4 Deformatieberekening

Voor de berekening van de deformatie van het binnentalud wordt het waterdrukveld uit de ijkingberekening gebruikt. Van dit waterdrukveld worden alleen de positieve drukken genomen, alle negatieve waterdrukken worden tot nul gereduceerd.

IJking van de deformatie bestaat uit het ijken van de volgende punten:

- Er is geen bezwijken van het hoge binnentalud geconstateerd.
- Er treden zeer kleine vervormingen in het hoge binnentalud op van ongeveer 1 tot 3,5 mm, evenwijdig aan het talud.
- Tenslotte is de verticale verplaatsing in de tussenberm van orde grootte 1,5 mm, omhoog.

Tabel 9.4 De sterkteparameters E [kPa], ν [-], c [kPa] en ϕ [°] volgens het Mohr-Coulomb materiaal model en volumegewichten γ_{nat} [kN/m³] en γ_{droog} [kN/m³] voor de twaalf materiaaltypen, die zijn gebruikt in de deformatie ijkingberekening.

Materiaal	E [kPa]	ν [-]	γ_{droog} [kN/m ³]	γ_{nat} [kN/m ³]	c [kPa]	ϕ [°]
Klei deklaag (hoog)	30	0,30	16	18	3,0	28
Onderliggende toplaag (hoog)	100	0,33	18	21	4,5	51
Zandkern	10000	0,30	17	20	0,0	30
Sliblaag	1000	0,30	16	18	10	30
Klinkerweg	500	0,30	16	20	15	50
Keileem (kade)	500	0,33	18	21	3,0	30
Klei Holoceen	1000	0,30	16	18	10	30
Asfaltweg	1000	0,40	20	20	20	60
Basaltbekleding	1000	0,40	18	22	10	40
Klei deklaag (laag)	1000	0,30	16	18	5,0	40
Onderliggende toplaag (laag)	500	0,33	18	21	5,0	40
Zandkern (teen)	10000	0,30	17	20	5,0	40

Met deze parameters zijn de horizontale en verticale vervormingen van het hoge binnentalud berekend. De vervormingen zijn berekend ten opzichte van de vervormingen van de initiële fase. De verticale vervorming in het knikpunt tussen hoog binnentalud en tussenberm is ongeveer 1 mm (omhoog). De vervorming evenwijdig aan het talud is van orde grootte 6 mm, (omhoog).

Tabel 9.5 geeft de met c/ϕ -reductie berekende veiligheidsfactoren voor iedere fase. De overslagsituatie geeft een daling van de veiligheidsfactor met 0,19. De waarden liggen aanzienlijk boven de schadefactor, die gesteld is op 1,16 (voor definitie van deze factor wordt verwezen naar hoofdstuk 10).

Tabel 9.5 Veiligheidsfactor aan het eind van de genoemde fase voor de ijkingberekening voor de deformatie.

IJking	initieel	voorberekening	proef
Veiligheidsfactor	2,10	2,10	1,91

9.5 Conclusie

De ijkingberekening voor de hydrologische situatie geeft een beeld, dat redelijk goed overeenkomt met de meetgegevens van de waterdrukken in en net onder de toplaag van het hoge binnentalud van de IJsselmeerdijk. In de berekening is een verschil te zien tussen infiltratie in de buurt van de tussenberm en nabij de kruin. De oorzaak is de grote hoeveelheid infiltratie in/nabij de tussenberm, waardoor na verloop van tijd verzadiging van het zand optreedt. Een aanwijzing dat in de verificatieproef zelf het infiltratieproces ook deze vorm aanneemt, is het na verloop van tijd verdwijnen van de opkomende luchtbellen in de tussenberm.

De ijkingberekening van de deformatie laat een stabiele situatie zien na afloop van de overslagproef. De minimale veiligheidsfactor is 1,91. De stabiele situatie komt goed overeen met de gemeten deformatie tijdens de proef, die slechts enkele millimeters bedroeg. Dit geeft enigszins vertrouwen in de waarden voor de elasticiteitsmodulus E en de dwarscontractiecoëfficiënt ν van de twee lagen, die het talud opbouwen.

10 Resultaten variatieberekeningen

10.1 Inleiding

Met behulp van de resultaten verkregen uit de ijking van de berekeningen met de verificatieproef op km 23,0 worden in dit hoofdstuk een aantal variatieberekeningen uitgevoerd. Doel van de berekeningen is ten eerste het extrapoleren van de resultaten van de verificatieproef naar een hoogwatersituatie met overslag. Ten tweede worden de resultaten verkregen op km 23,0 geëxtrapoleerd naar het dijkvak km 17,8 t/m km 26,0. In de variatieberekeningen worden de verschillende geometrische omstandigheden gesimuleerd, als gevonden in de handboringen tijdens de eerste toetsing. Tevens wordt gevarieerd met de hydrologische parameters, aangezien deze parameters (met name de verzadigde doorlatendheid) sterk kan variëren over het toetsvak en verder lastig is te bepalen.

Voor de berekeningen met een aantal (lees: de meest ongunstige) hydrologische omstandigheden zijn vervolgens de c/ϕ -reductiefactoren bepaald. Er is geen algemeen geaccepteerde schadefactor, waarmee de berekende c/ϕ -reductiefactoren kunnen worden vergeleken. De berekende c/ϕ -reductiefactoren zijn conform TAW-Leidraad Benedenrivieren getoetst aan de schadefactor voor macrostabiliteit van het binnentalud: 1,16. Het te toetsen mechanisme betreft namelijk een afschuivingmechanisme.

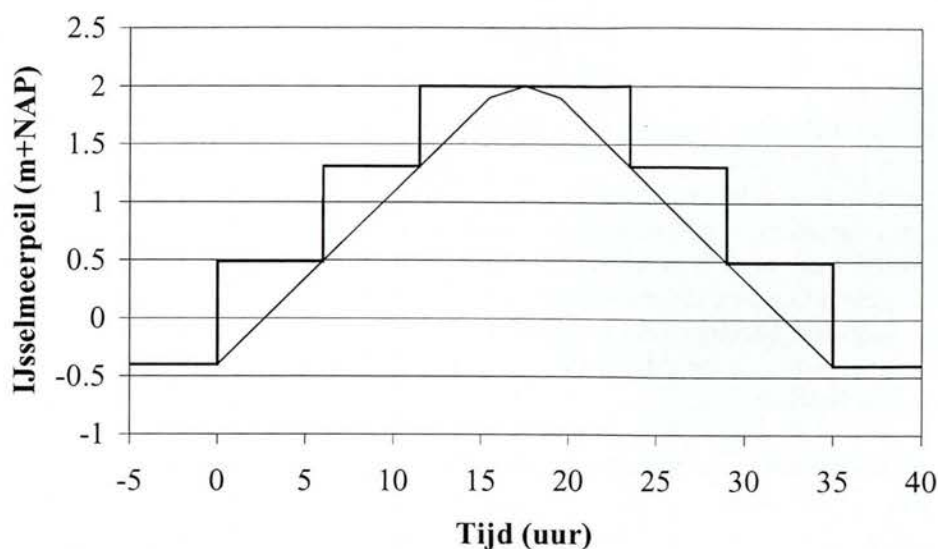
De schadefactor is het rekenkundig product van diverse deelfactoren volgens TAW-Leidraad Benedenrivieren. Deze deelfactoren hebben verband met de dijkkringlengte, de overschrijdingsfrequentie van het dijkkringgebied en het wel of niet samenvallen van het ontwikkelen van een glijvlak in het grondlichaam met Maatgevend Hoog Water.

De conform TAW-Leidraad Benedenrivieren te hanteren dijkkringlengte voor de IJsselmeerdijk bedraagt 35 km, uitgaande van het feit dat de Knardijk en de Roggebotsluis als compartimenteringen zouden kunnen functioneren en vanwege het feit dat Noordelijk Flevoland (IJsselmeer) en Zuidelijk Flevoland (Markermeer) te maken hebben met een verschillende (niet gecorreleerde) bedreiging. De bijbehorende deelfactor $\gamma_{n,L} = 1,02$. De overschrijdingsfrequentie van dijkkringgebied 8 is $1/4000$ jaar⁻¹. De hierbij behorende deelfactor $\gamma_{n,f} = 1,06$. De deelfactor behorend bij het samenvallen van het ontwikkelen van een glijvlak in het grondlichaam met Maatgevend Hoog Water is $\gamma_{n,c} = 1,07$. De deelfactor behorend bij het niet samenvallen van het ontwikkelen van een glijvlak in het grondlichaam met Maatgevend Hoog Water is $\gamma_{n,c} = 1,0$. Bij het beoordelen van de berekeningsresultaten is geen rekening gehouden met de differentiatie van de schadefactoren zoals omschreven in de Handreiking Constructief ontwerpen.

Dit hoofdstuk is als volgt opgebouwd. Als eerste worden de begin- en randvoorwaarden voor de berekening van de hoogwater/overslagsituatie besproken. In paragraaf 10.3 worden de infiltratieberekeningen gegeven, gevolgd door de deformatieberekeningen (paragraaf 10.4). Aan het eind van het hoofdstuk volgt een conclusie met betrekking tot de variatieberekeningen.

10.2 Begin- en randvoorwaarden

Voor de initiële toestand wordt een meerpeil van $H = -0,4$ m aangehouden, terwijl het slootpeil $H = -5,0$ m bedraagt. De neerslag is 0,2 mm/dag in de stationaire berekening. Vervolgens wordt gedurende een maand geïnfiltreerd met de jaargemiddelde neerslag van 2 mm/dag, waarmee een stationaire situatie wordt opgebouwd. De basaltbekleding en asfaltweg worden in deze berekening van de initiële toestand als ondoorlatend beschouwd.



Figuur 10.1 Maximale hydraulische randvoorwaarde IJsselmeerdijk tussen km 17,8 en km 26,0 (gladde curve) en de conservatieve numerieke representatie hiervan (geblokte curve).

Voor de berekening van de overslagsituatie wordt de maximale hydraulische randvoorwaarde opgelegd, die in het toetsvak geldt. Deze randvoorwaarde is te zien in Figuur 10.1, de duur is 35 uur, waarin gedurende 4 uur een maximale hoogte van NAP+1,9 m tot NAP+2,0 m wordt bereikt. Er wordt gedurende de storm een neerslag opgelegd van 10 mm/dag.

In Figuur 10.1 is tevens de model representatie van de waterstandsverhoging tijdens storm afgebeeld. Deze heeft een blokkig karakter, aangezien in het numerieke model alleen fasen met een constante stijghoogte kunnen worden gedefinieerd.

De model waterstandsverhoging is te allen tijde een conservatieve representatie van de actuele hoogwatergolf. Gedurende de 12 uur met het maximale meerpeil van $y = \text{NAP} + 2,0$ m wordt tevens een overslagsituatie opgelegd door de drukhoogte op de grasbekleding van het buitentalud (boven de zeskantige betonzuilen, die op het buitentalud aanwezig zijn tussen de asfaltweg en een hoogte van $y = \text{NAP} + 3,6$ m), kruin, hoog binnentalud en tussenberm op $p = 0$ m te stellen. In het lage binnentalud wordt geïnfiltreerd met 10 mm/dag. De kwelstrook wordt gerepresenteerd door het opleggen van een sijpelrandvoorwaarde.

De berekening is, behalve de initiële fase, opgedeeld in 7 fasen. De fasen staan beschreven in Tabel 10.1.

Tabel 10.1 Karakteristieken voor iedere fase in de variatieberekeningen.

Fase	Tijdsduur [dagen]	IJsselmeerpeil [m+NAP]	Overslag (ja/nee)	Neerslag [mm]
Fase1	30,00	-0,4	Nee	2,0
Fase2	0,25	0,5	Nee	10,0
Fase3	0,23	1,3	Nee	10,0
Fase4	0,50	2,0	Ja	10,0
Fase5	0,23	1,3	Nee	10,0
Fase6	0,25	0,5	Nee	10,0
Fase7	7,00	-0,4	Nee	0,2

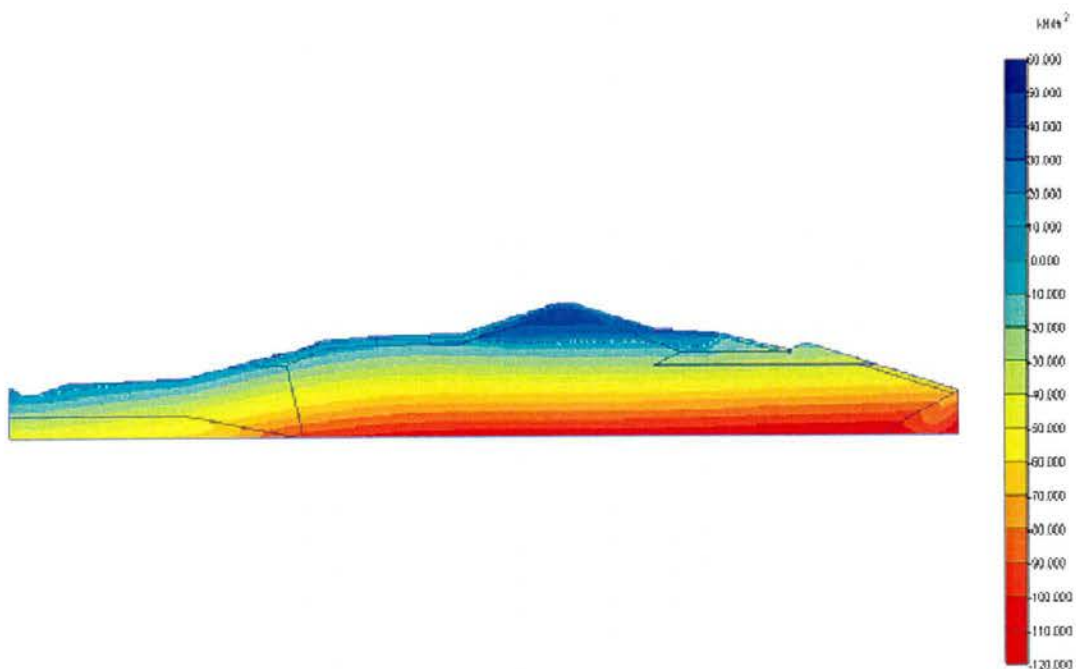
10.3 Infiltratieberekeningen

In Tabel 10.2 zijn de verschillende variaties voor de hydrologische berekeningen op een rij gezet. Er is gevarieerd met de dikte van de onderliggende toplaag en de verzadigde doorlatendheden van de deklaag en de onderliggende toplaag. De laatste variatie betreft de doorlatendheid van de klinkerweg.

Tabel 10.2 Karakteristieken en materiaalparameters voor de variaties in de grondwaterstromingsberekeningen.

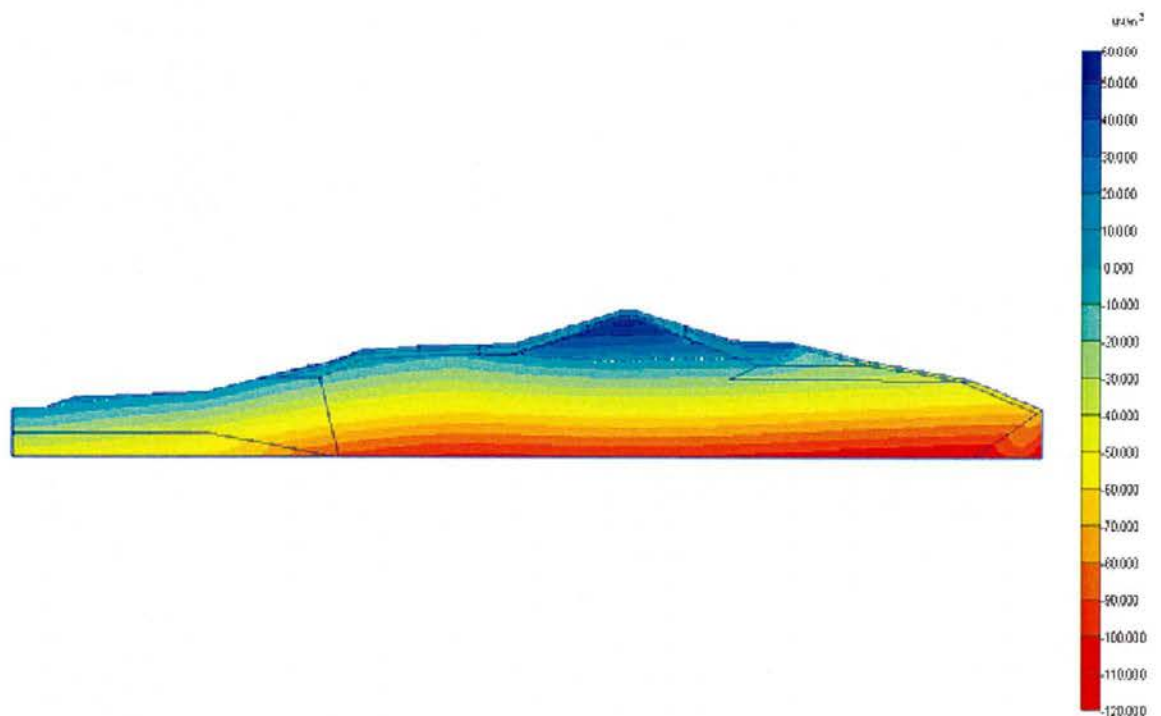
Run	Karakteristiek	Materiaalparameters
Hydro1	standaardberekening	ijkwaarden
Hydro2	dunne onderliggende toplaag (0,4 m)	ijkwaarden
Hydro3	dikke onderliggende toplaag (1,2 m)	ijkwaarden
Hydro4	doorlatende deklaag	$Ks_{deklaag} = 178,3 \text{ m/dag}$
Hydro5	ondoorlatende deklaag	$Ks_{deklaag} = 1,783 \text{ m/dag}$
Hydro6	doorlatende toplaag	$Ks_{toplaag} = 4,32 \text{ m/dag}$
Hydro7	ondoorlatende toplaag	$Ks_{toplaag} = 0,178 \text{ m/dag}$
Hydro8	doorlatende toplaag / ondoorlatende overgang	$Ks_{toplaag} = 4,32 \text{ m/dag}$ / $Ks_{overgang} = 0,864 \text{ m/dag}$
Hydro9	klinkerweg minder doorlatend	$Ks_{weg} = 8,64 \text{ m/dag}$

Variatie Hydro6 heeft een doorlatende onderliggende toplaag. Dit betekent dat het overslag debiet (1 l/s/m) volledig infiltreert in buitentalud, kruin en hoog binnentalud. In de berekening wordt dan ook in de tussenberm en het lage binnentalud geen infiltratiedebiet opgelegd. Figuur 10.2 geeft een overzicht van de drukhoogten voor de run Hydro1. De freatische lijn is in de kruin gestegen tot ongeveer $y = 0 + \text{NAP}$ m. Verder loopt de freatische lijn in het knikpunt tussen de tussenberm en het hoge binnentalud op langs de overgang tussen het leem en het zand het hoge binnentalud. Dit betekent dat in deze buurt de toplaag verzadigd is.

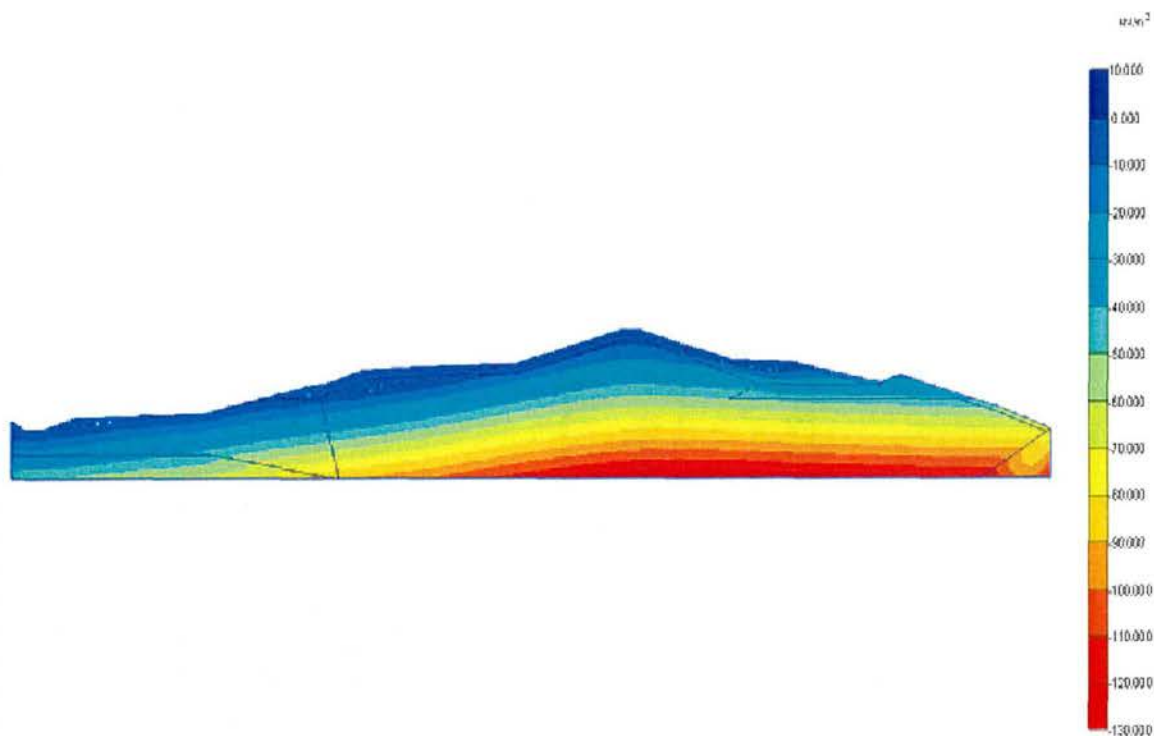


Figuur 10.2 Drukhoogten na afloop van de overslagperiode, run Hydro1.

Tabel 10.3 geeft de berekende drukhoogten op 0,75 m in de onderliggende toplaag op locaties overeenkomend met de meetlocaties T1/T2 (nabij de kruin) en T3/T4 (nabij de tussenberm). In de buurt van de kruin treedt de maximale waterdruk in de klei deklaag op in berekening Hydro7 (zie Figuur 10.3). Dit is niet verwonderlijk, aangezien de doorlatendheid van de onderliggende toplaag aanzienlijk lager is in deze variatie. De maximale waterdruk in de onderliggende toplaag wordt gevonden in berekening Hydro6. Deze berekening kenmerkt zich door het nagenoeg verzadigen van de dijkskern als gevolg van de relatief hoge doorlatendheid van de onderliggende toplaag (zie Figuur 10.4).



Figuur 10.3 Drukhoogten na afloop van de overslagperiode, run Hydro7. Maximale waterdrukken in de klei deklaag.



Figuur 10.4 Drukhoogten na afloop van de overslagperiode, run Hydro6.: volledige verzadiging van de dijkskern.

Tabel 10.3 Berekende drukhoogten aan de basis van de klei deklaag en de onderliggende toplaag, op locaties overeenkomend met de meetlocaties T1/T2 (nabij de kruin) en T3/T4 (nabij de tussenberm).

Run	Nabij berm		Nabij kruin	
	p [m] deklaag	p [m] toplaag	p [m] deklaag	p [m] toplaag
Hydro1	-4,3	-6,0	-1,8	> 0
Hydro2	-3,3	-4,7	-3,6	-7,3
Hydro3	-3,3	-5,5	-3,5	> 0
Hydro4	-3,5	-2,6	-3,5	-6,5
Hydro5	-4,7	>0	> 0	> 0
Hydro6	-4,5	-9,4	-3,8	-6,9
Hydro7	-3,5	-1,0	-4,6	> 0
Hydro8	-4,0	-7,5	-2,8	-4,1
Hydro9	-3,1	-1,1	-3,5	-6,6

De bijna volledige verzadiging van de dijkskern in berekening Hydro6 geeft een situatie met een maximale grondwaterdruk. Verwacht mag worden, dat de grondwaterdruk uit deze berekening de laagste veiligheidsfactor zal geven.

10.4 Deformatieberekeningen

Als materiaalparameters voor de deklaag zijn rekenwaarden toegepast door de waarden voor de cohesie c en voor $\tan \phi$, die volgen uit de simple-shear proeven, te delen door een factor 1,4. Voor de onderliggende toplaag is een zelfde procedure gevolgd voor de rekenkundig gemiddelde waarden komende uit de verzadigde simple-shear proef en uit de simple-shear proef met monsters met een oorspronkelijke verzadigingsgraad. In Tabel 10.4 zijn de invoerparameters voor het Mohr-Coulomb model voor de deklaag en toplaag in de variatieberekeningen gedefinieerd.

Tabel 10.4 Rekenwaarden voor de cohesie en de hoek van inwendige wrijving voor de deklaag en toplaag van het hoge binnentalud, als toegepast in de variatieberekeningen.

Materiaal	c [kPa]	ϕ [°]
Klei deklaag	2	21
Onderliggende toplaag	3	36

Tabel 10.5 geeft de karakteristieke geometrie of waterdrukveld voor de zeven variatieberekeningen waarop een c/ϕ -reductie is uitgevoerd. In Defor4 is het waterdrukveld van Hydro4 genomen. Voor Defor5 bleek het waterdrukveld van Hydro6 maatgevend.

Tabel 10.5 Karakteristieke geometrie/waterdrukveld voor de variatieberekeningen voor deformatie.

Run	Karakteristiek
Defor1	Standaardberekening
Defor2	Dunne onderliggende toplaag (0,4 m)
Defor3	Dikke onderliggende toplaag (1,2 m)
Defor4	Hydro4 of Hydro5 (maximale waterdrukveld)
Defor5	Hydro6 of Hydro7 (maximale waterdrukveld)
Defor6	Hydro8
Defor7	Hydro9

De controle parameters in de c/ϕ -reductie in Plaxis Deformatie V8 Bèta zijn als volgt gekozen. De maximale hoeveelheid stappen is gesteld op 200, terwijl het maximum aantal iteraties per stap gelijk is aan 75. De tolerantie is gesteld op 0,03 en de globale fout op 0,002. De waarde voor de veiligheidsfactor behorende bij het volledig bezwijken (deformatie > 1,0 m) is als maat voor de veiligheidsfactor gesteld.

Tabel 10.6 geeft het verloop van de veiligheidsfactor als functie van de hoogwater fase, van de zeven variaties van de deformatieberekeningen. De variaties in de dikte van de onderliggende toplaag laten zien, dat een minder dikke toplaag een gunstige invloed op de sterkte heeft. Een dikker dan gemiddelde toplaag leidt nauwelijks tot een verschil in de veiligheidsfactor ten opzichte van de standaardberekening. De doorlatendheid van de onderliggende toplaag is wel van grote invloed op de veiligheidsfactor. Een verhoging van een factor 2,5 van de ijkwaarde voor deze parameter (berekening Defor5) leidt tijdens de overslagperiode tot het volledig verzadigen van de dijk tot aan de kruin. Met de rekenwaarde van de onderliggende toplaag geeft deze situatie toch nog tot net voldoende sterkte van het hoge binnentalud. Het verzadigen

van de dijk wordt in mindere mate ook geconstateerd voor de situatie met een doorlatende leemlaag samen met een minder doorlatende overganglaag tussen de leem en de zandkern (Defor6). De veiligheidsfactor neemt in dit geval echter niet tot zeer lage waarden af. Een lagere doorlatendheid van de klinkerweg (Defor7), tenslotte, leidt ook tot een vergelijkbare veiligheidsfactor als in de berekening met de standaard parameterinvoer.

Tabel 10.6 Karakteristieke geometrie/waterdrukveld aan het eind van de genoemde fase voor de zeven variatieberekeningen voor deformatie. In grijs staan de minimale veiligheidsfactoren. Voor de definitie van de fasen, zie Tabel 10.1.

Run	Fase1	Fase2	Fase3	Fase4	Fase5	Fase6	Fase7
Defor1	2,23	2,21	2,21	1,77	2,22	2,19	2,20
Defor2	2,14	2,14	2,14	2,08	2,12	2,12	2,12
Defor3	2,31	2,32	2,43	1,76	2,19	2,22	2,27
Defor4	2,22	2,20	2,18	1,76	2,22	2,22	2,20
Defor5	2,23	2,22	2,22	1,26	2,21	2,19	2,
Defor6	2,25	2,25	2,23	1,81	2,27	2,23	2,23
Defor7	2,22	2,22	2,19	1,83	2,22	2,22	2,22

10.5 Conclusie

De variaties in de geometrie en de verzadigde doorlatendheden van de bekleding van het hoge binnentalud leiden tot aanzienlijke verschillen in het waterdrukveld tijdens de maatgevende overslagsituatie.

De beste schatting van de doorlatendheid geeft een veiligheidsfactor van 1,77. De meeste berekeningen leiden tot vergelijkbare veiligheidsfactoren. Er is een berekening, waarbij de veiligheidsfactor aanzienlijk lager uitvalt. Dit is de situatie dat de doorlatendheid van de onderliggende toplaag (en dus de gehele taludbekleding) hoog is. Dit betreft een extreme situatie, die kan optreden wanneer de onderliggende toplaag op een bepaalde locatie erg zandig is. De grote hoeveelheid infiltratie leidt in dit geval tot een nagenoeg volledige verzadiging van de dijk tijdens afloop van de overslagsituatie.

Met de rekenwaarden voor de sterkteparameters voor de bekleding blijft voor alle variaties de berekende veiligheidsfactor boven de schadefactor van 1,16, die geldig is voor binnenwaartse macrostabiliteit. De minimale veiligheidsfactor treedt op in de situatie waarin de dijk kern volledig is verzadigd als gevolg van een relatief doorlatende toplaag. In de berekeningen zijn een aantal conservatieve aannamen gedaan. Ten eerste is namelijk het maximale hoogwaterpeil tijdens de storm conservatief geschematiseerd in de berekeningen. Ten tweede is er een gemiddeld overslagdebiet opgelegd.

11 Conclusies: samenvatting resultaten en toetsoordeel

Dit rapport beschrijft de resultaten van de geavanceerde toetsing van 'afschuiving van de kleibekleding van het binnentalud tijdens overslag' van de IJsselmeerdijk voor het dijkvak in het gedeelte tussen km 17,5 en km 26,0. De toets is opgebouwd uit veld- en laboratoriumonderzoek, een in-situ verificatieproef voor de overslagsituatie en gekoppelde eindige elementen berekeningen stroming en deformatie.

Als eerste is de proeflocatie bepaald aan de hand van een specialistische inspectie van het binnentalud, eenvoudige berekeningen met het DWW-spreadsheet model voor stabiliteit tijdens overslag en een aantal één-dimensionale stromingsberekeningen. De resultaten van de specialistische inspectie laten zien, dat de taludbekleding van het hoge binnentalud over het algemeen is opgebouwd uit een sterk zandige, sterk siltige klei deklaag en een zandige keileem onderliggende toplaag. De dikte van beide lagen varieert enigszins over het toetsvak, maar beide zijn wel overal aanwezig. De helling van het hoge binnentalud is over de hele lengte van het toetsvak ongeveer 1 : 3, met een taludlengte van 10 m. Vanwege de relatief kleine dikte van de toplaag, het reeds aanwezige grondonderzoek, de overslagduur, en de gunstige lokale omstandigheden wordt besloten de proef te houden in de buurt van km 23,0. De precieze locatie is het dijkvak tussen km 22,94 en km 22,97.

Met het uitgevoerde veld- en laboratoriumonderzoek zijn de hydrologische en grondmechanische eigenschappen van de dek- en toplaag en/of de zandkern bepaald. Op de proeflocatie gelden de volgende waarden. De verzadigde doorlatendheid van de klei deklaag is bepaald op 2×10^{-4} m/s, van de onderliggende toplaag op 2×10^{-5} m/s en van het zand in de kern op 2×10^{-4} m/s. Uit de proefresultaten blijkt dat de klei deklaag een cohesie van 3,0 kPa en een hoek van inwendige wrijving van 28 graden heeft. Sterkteparameters van de keileem onderliggende toplaag zijn: een cohesie van 4,5 kPa en een hoek van inwendige wrijving van 51 graden.

De verificatieproef is op 7 mei 2002 gehouden. De berekening gedurende drie dagen voorafgaande aan de proef heeft ertoe geleid, dat het proefvak bij aanvang van de proef nagenoeg verzadigd was. De deformatiemetingen in het talud en de tussenberm laten er kleine vervormingen van het talud optreden, in de orde van enkele millimeters. In de buurt van de kruin raken de deklaag en onderliggende toplaag weliswaar verzadigd, er treedt nauwelijks waterdrukopbouw op. Nabij de tussenberm treedt in de onderliggende toplaag wel wateroverdruk op gedurende de proef. Tijdens de geologische inspectie van het hoge binnentalud nabij de tussenberm na afloop van de proef is geen ondoorlatende laag aangetroffen. Een dergelijk laag zou namelijk tot een lokale verhoging van de waterdruk kunnen leiden. Verder ontstonden in de kwelstrook een aantal zandmeevoerende wellen. De totale hoeveelheid meegevoerd zand is klein gebleven. Tijdens de overslagsituatie kan wel een opdrukprobleem ontstaan in het lage binnentalud. Dit is een mechanisme waarop in deze geavanceerde toets niet wordt getoetst, het dijkvak is reeds op dit onderdeel goedgekeurd. Dit verschil tussen de hier uitgevoerde stabiliteitsberekeningen en de volgens de LTV gehanteerde toetsnormen kenmerkt de beperkingen, die voor een integrale toetsing van de macrostabiliteit van een (binnen)talud bestaan.

Na afloop van de proef is een gekoppelde eindige elementen berekening gemaakt van de stroming en de deformatie, met als doel de hydrologische en grondmechanische invoerparameters van de berekening te ijken aan de meetresultaten van de verificatieproef. De ijking geeft het verloop van de hydrologische situatie in de tijd. Opvallend is het verzadigen van de dijkskern nabij de tussenberm van de dijk. Er zijn voor dit verzadigingsproces tijdens de proef ook een aantal aanwijzingen gevonden. Tevens stroomt er, net als in de verificatieproef,

water uit de kwelstrook. De waterdrukken in de onderliggende top laag en de klei dek laag komen redelijk goed overeen met de tijdens de verificatieproef gemeten waterdrukken. De berekende vervormingen van het talud zijn in de orde van een paar millimeter. Net na de overslagsituatie is met de beste schatting van de sterkteparameters de veiligheidsfactor van het talud, volgens een c/ϕ -reductie methode bepaald, met 0,19 gedaald tot 1,91 als vergeleken met de initiële situatie.

Vervolgens zijn een aantal variatieberekeningen uitgevoerd met de stromingsmodule van het eindige elementen model Plaxis, waarin de maatgevende hoogwatersituatie als randvoorwaarde is opgelegd. In de berekeningen is gevarieerd met de dikte van de onderliggende top laag, zoals aangetroffen in handboringen in het toetsvak, en met de verzadigde doorlatendheid van de dek laag en de onderliggende top laag. Voor de resultaten met de meest ongunstige waterdruk velden zijn de c/ϕ -reductiefactoren bepaald.

Er is op moment van deze toetsing geen geaccepteerde schadefactor voorhanden, waarmee de c/ϕ -reductiefactoren kunnen worden vergeleken. Vanwege de overeenkomst in het faalmechanisme is afschuiving van de bekleding van het binnentalud hier beoordeeld als onderdeel van de binnenwaartse macrostabiliteit, waarvoor de schadefactor gelijk is aan 1,16.

De beste schatting van de doorlatendheid geeft voor het faalmechanisme van afschuiving van de bekleding van het binnentalud een veiligheidsfactor van 1,77. De meeste berekeningen leiden tot vergelijkbare veiligheidsfactoren. Er is een berekening, waarbij de veiligheidsfactor aanzienlijk lager uitvalt (factor gelijk aan 1,26). Dit is de situatie dat de doorlatendheid van de onderliggende top laag (en dus de gehele taludbekleding) hoog is. Dit betreft een extreme situatie, die kan optreden wanneer de onderliggende top laag op een bepaalde locatie erg zandig is. De grote hoeveelheid infiltratie leidt in dit geval tot bijna volledige verzadiging van de dijk tijdens de overslagsituatie.

Met de rekenwaarden voor de sterkteparameters voor de bekleding blijft voor alle variaties de berekende veiligheidsfactor boven de schadefactor van 1,16, die geldig is voor binnenwaartse macrostabiliteit. De minimale veiligheidsfactor treedt op in de situatie waarin de dijk kern volledig is verzadigd als gevolg van een relatief doorlatende top laag. In de berekeningen zijn een aantal conservatieve aannamen gedaan. Ten eerste is er de maximale hoogwaterpeil tijdens de storm conservatief geschematiseerd in de berekeningen. Ten tweede is er een gemiddeld overslagdebiet opgelegd, terwijl in de praktijk dit als gevolg van de golfoverslag een wisselend debiet zal zijn.

Op basis van de resultaten van de toetsing kan worden geconcludeerd, dat het gehele toetsvak tussen km 17,5 en km 26,0 voldoet aan de eisen, die worden gesteld aan het onderdeel 'afschuiving van de kleibekleding van het binnentalud tijdens overslag'. Volgens de definitieve versie van de LTV 2002, wordt op basis van de resultaten van de geavanceerde toetsing voor dit onderdeel de beoordeling 'goed' gegeven.

12 Referenties

[Alterra, 2001]

Waterretentie- en doorlatendheidskarakteristieken van boven- en ondergronden in Nederland: de Staringreeks, Alterra-rapport 153, Alterra, Wageningen, J. H. M. Wösten, G. J. Veerman, W. J. M. de Groot en J. Stolte, 2001.

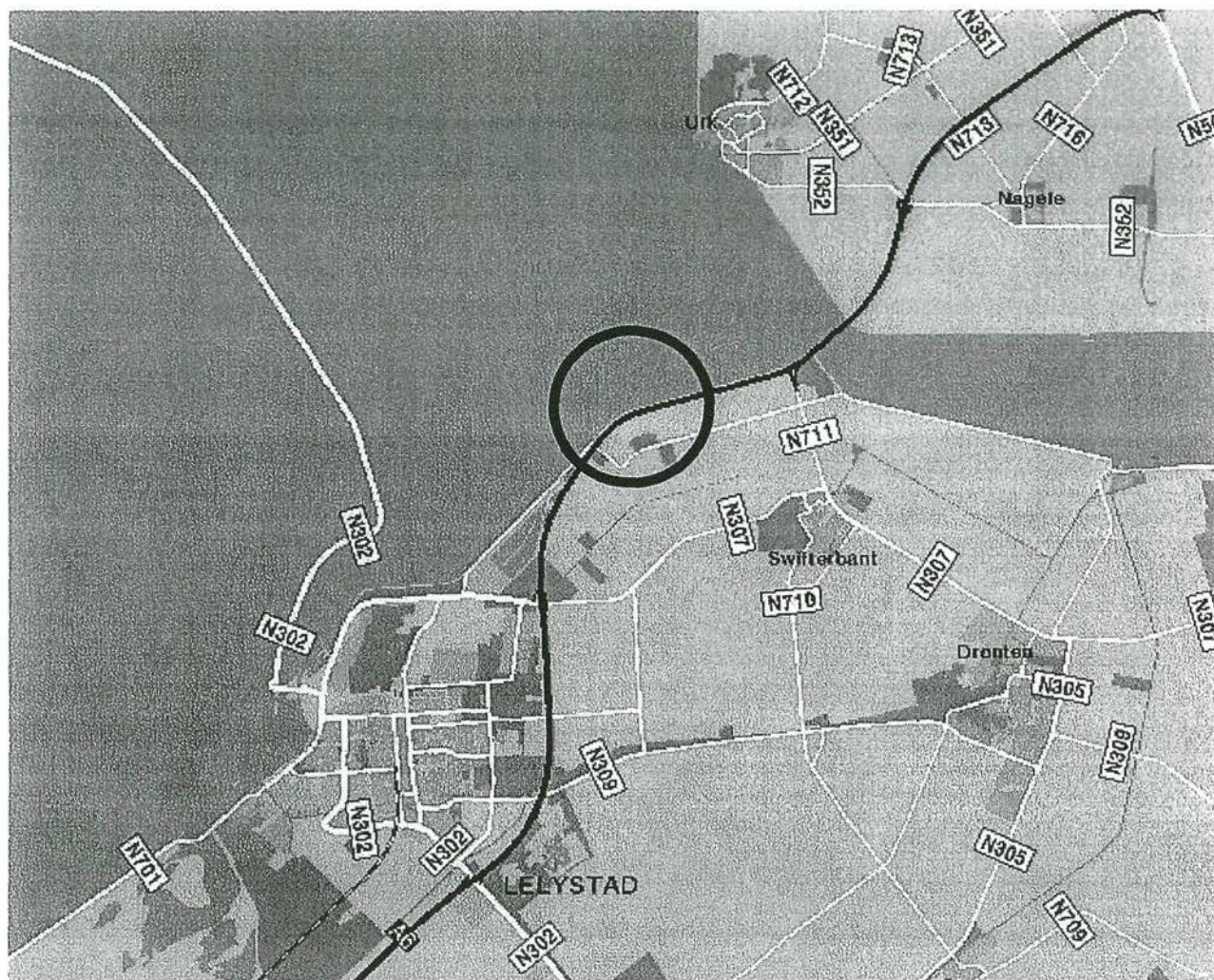
[Delft Cluster, 2001a]

Groundwater Flow Module, GeoPlax, Delft Cluster, rapport 10201/70, J.M. van Esch, 2001.

[Delft Cluster, 2001b]

Materiaalparameters voor ontwerpmodel grondwaterstroming, Delft Cluster, rapport 10201/57, C.A. Schoofs, 2001.

Bijlage 1 Ligging proefvak



Postbus 69, 2600 AB Delft
Nederland

Telefoon (015) 2 69 35 00
Telefax (015) 2 61 08 21

Datum

2002-06-10

Get.

Srv

GEAVANCEERDE TOETS "AFSCHUIVING KLEIBEKLEDING
BINNENTALUD" IJSSELMEERDIJK KM 22.94 - KM 22.97

CO-401850

Form.

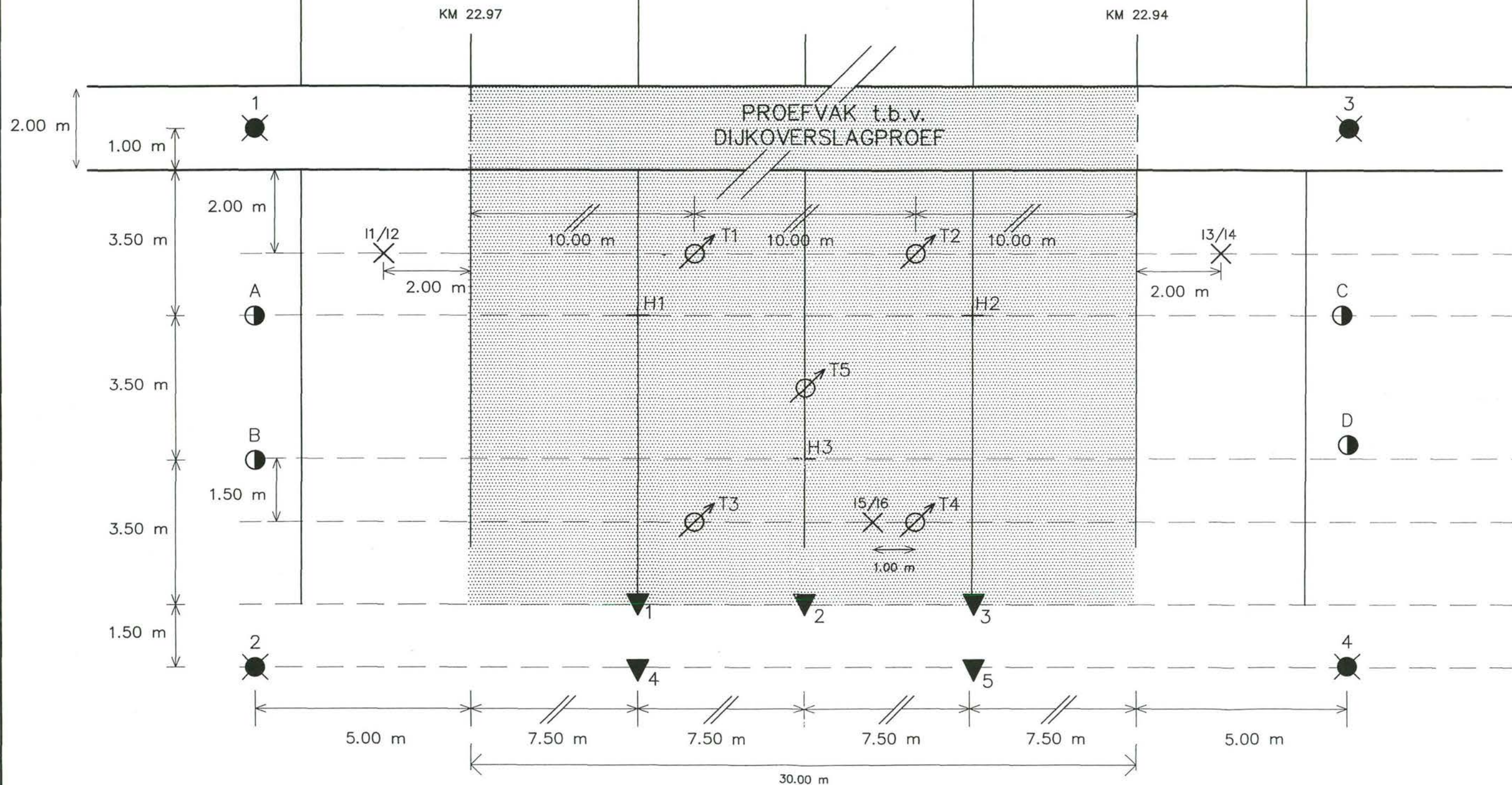
A4

LIGGING PROEFVAK

BIJL. 1

Bijlage 2 Situatieschets

IJsselmeer



Legenda terrein onderzoek:

- Begemannboring 66 mm (tot MV - 3.00 m)
- Handboring (tot MV - 3.00 m)
- ✕ Infiltratieproef
- ⊕ Hellingmeter
- ⊗ Tensiometers
- ▼ Vaste punten t.b.v. waterpassing



Postbus 69, 2600 AB DELFT
Stieltjesweg 2, 2628 CK DELFT

Telefoon (015) 269 35 00
Telefax (015) 261 08 21

Homepage:
www.geodelft.nl

Bestandnaam: b-si-2b .dwg
Afdeling: 323
Gewijzigd: 2002-04-26

datum
2002-04-16

get.
Ros

GEAVANCEERDE TOETS "AFSCHUIVING KLEIBEKLEDING BINNENTALUD"
IJSELMEERDIJK KM 22.94 - KM 22.97

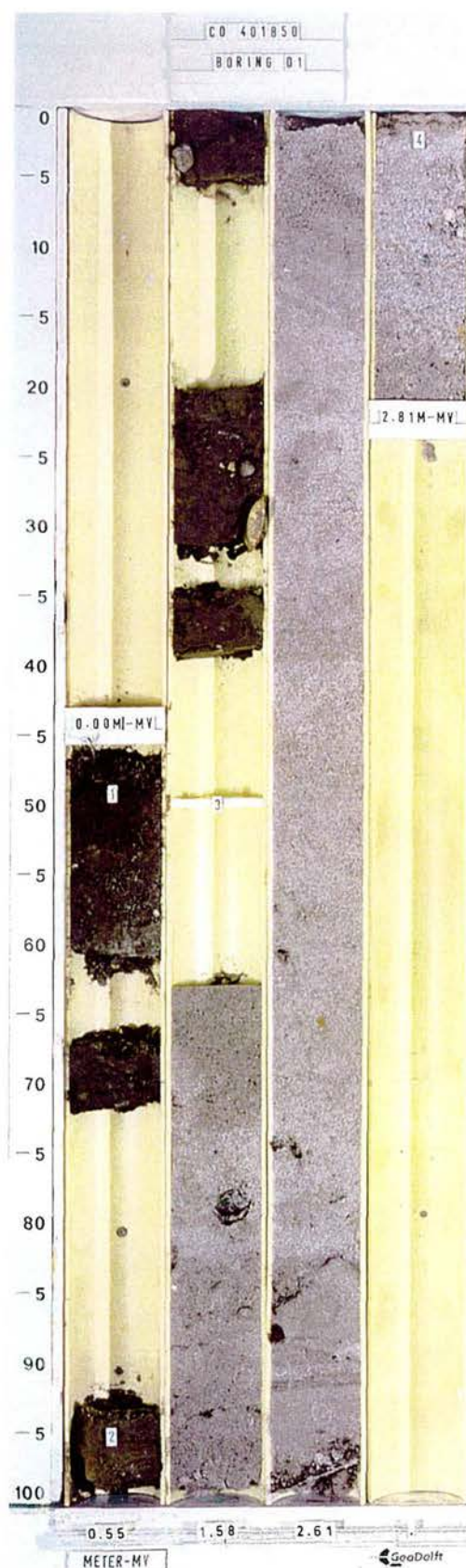
SITUATIESCHETS



CO- 401850

BIJL. 2

form.
A3

Bijlage 3 Begemannboringen



BESCHRIJVING: ZIE GETEKENDE VERSIE VAN BORING		Bestandnaam: b-fo-01 .dwg	Gewijzigd: 2002-04-25	Blad 1/1	Afdeling: 321
	Postbus 69, 2600 AB DELFT	Telefoon (015) 269 35 00	Homepage:	datum	get.
	Stieltjesweg 2, 2628 CK DELFT	Telefax (015) 261 08 21	www.geodelft.nl	2002-04-10	Mar
	DIJKEN IJSSELMEERGEBIED			CO-401850	
FOTO BORING 01 Type: Begemann/Spitsmuisboring 66 mm			BIJL. B1	form.	A4

Diepte t.o.v. MV in m

MV	MONSTER	LAAG	DIEPTE MV-[m]		BESCHRIJVING
			VAN	TOT	
0		1	0.00	-0.50	ZAND, uiterst siltig, zwak humeus Met kleistukjes M = 90 µm
-1		2	-0.50	-1.05	LEEM, sterk zandig Met enkele grindstukjes Met enkele schelpresten (keileem)
-2		3	-1.05	-2.61	ZAND, zwak siltig Met enkele kleistukjes M = 250 µm
		4	-2.61	-2.81	ZAND, zwak siltig Met enkele grindstukjes Met enkele schelpresten M = 350 µm

Geboord tot
MV - 2.81 m

EINDE BORING 01

421290

Sub-320



Postbus 69
2600 AB Delft

Telefoon (015) 269 35 00
Telefax (015) 261 08 21

datum
2002-04-10

get.
LWS

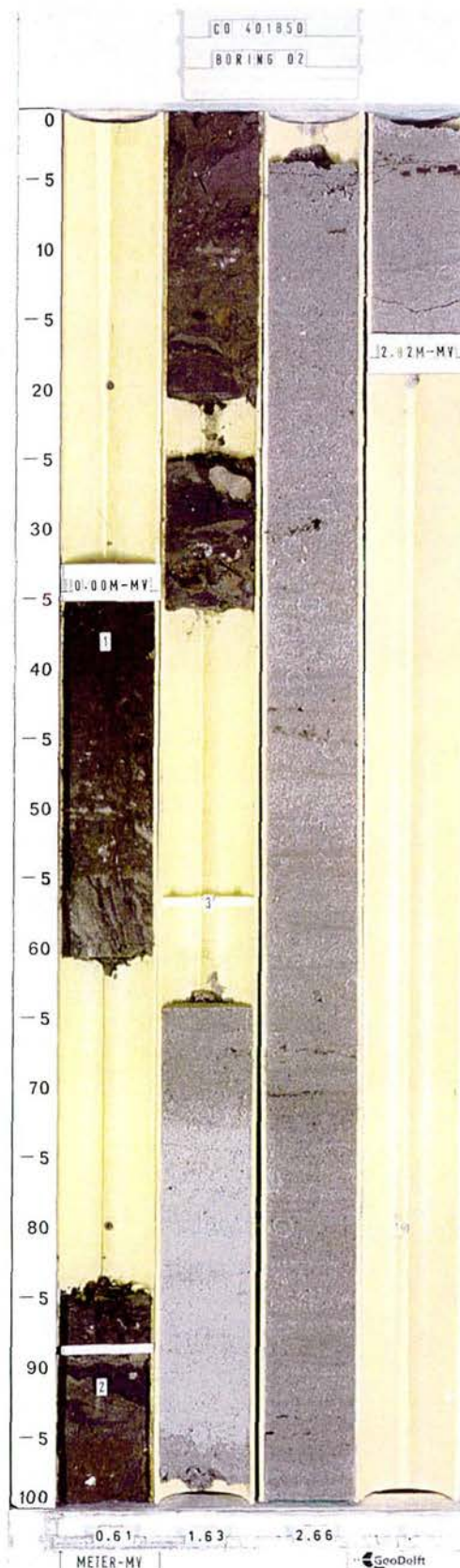
DIJKEN IJSSELMEERGEBIED

gez.
CO-401850

Begemannboring 66 mm 01

form.
BIJL. B1

A4



BESCHRIJVING: ZIE GETEKENDE VERSIE VAN BORING

Bestandnaam: b-fa-02 .dwg

Gewijzigd: 2002-04-25

Blad 1/1

Afdeling: 321



Postbus 69, 2600 AB DELFT
Stieltjesweg 2, 2628 CK DELFT

Telefoon (015) 269 35 00
Telefax (015) 261 08 21

Homepage:
www.geodelft.nl

datum

2002-04-10

get.

Mar

DIJKEN IJSSELMEERGEBIED

CO- 401850

gez.
form.

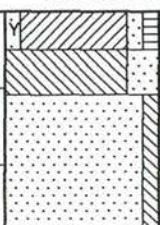
FOTO BORING 02

Type: Begemann/Spitsmuisboring 66 mm

BIJL. B2

A4

Diepte t.o.v. MV in m

			DIEPTE MV-[m]		BESCHRIJVING
			VAN	TOT	
MV	MONSTER	LAAG			
0		1	0.00	-0.50	KLEI, zwak zandig, zwak humeus Met zandstukjes
-1		2	-0.50	-1.09	LEEM, sterk zandig Met enkele grindstukjes
-2		3	-1.09	-2.82	ZAND, zwak siltig Met enkele kleistukjes M = 210 µm
Geboord tot MV - 2.82 m					
EINDE BORING 02					

421291

Sub-320



Postbus 69
2600 AB Delft

Telefoon (015) 269 35 00
Telefax (015) 261 08 21

datum
2002-04-10

get.
LWS

DIJKEN IJSSELMEERGEBIED

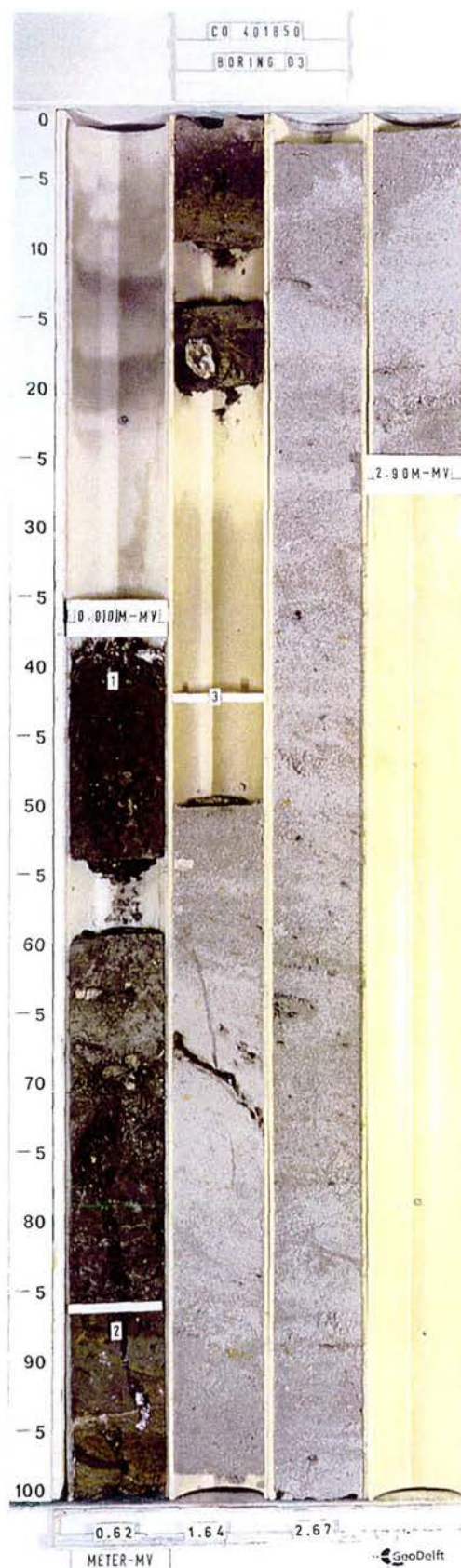
CO-401850


gez.


Begemannboring 66 mm 02

BIJL. B2

form.
A4



BESCHRIJVING: ZIE GETEKENDE VERSIE VAN BORING		Bestandnaam: b-fo-03 .dwg	Gewijzigd: 2002-04-25	Blad 1/1	Afdeling: 321
 Postbus 69, 2600 AB DELFT Stieltjesweg 2, 2628 CK DELFT	Telefoon (015) 269 35 00 Telefax (015) 261 08 21		Homepage: www.geodelft.nl		datum 2002-04-10
	DIJKEN IJSSELMEERGEBIED		CO-401850		get. Mar
	FOTO BORING 03	Type: Begemann/Spitsmuisboring 66 mm	BIJL. B3	gez. form. A4	

Diepte t.o.v. MV in m

MV	MONSTER	LAAG	DIEPTE MV-[m]		BESCHRIJVING
			VAN	TOT	
0		1	0.00	-0.48	KLEI, uiterst siltig, zwak humeus
-1		2			Met zandstukjes Met schelpresten
-2		3	-0.48	-1.05	LEEM, sterk zandig Met enkele grindstukjes (keileem)
		3	-1.05	-2.90	ZAND, zwak siltig Met enkele veenstukjes Met enkele kleistukjes Met enkele schelpresten M = 210 µm

EINDE BORING 03

421292

Sub-320



Postbus 69
2600 AB Delft

Telefoon (015) 269 35 00
Telefax (015) 261 08 21

datum
2002-04-10

get.
LWS

DIJKEN IJSSELMEERGEBIED

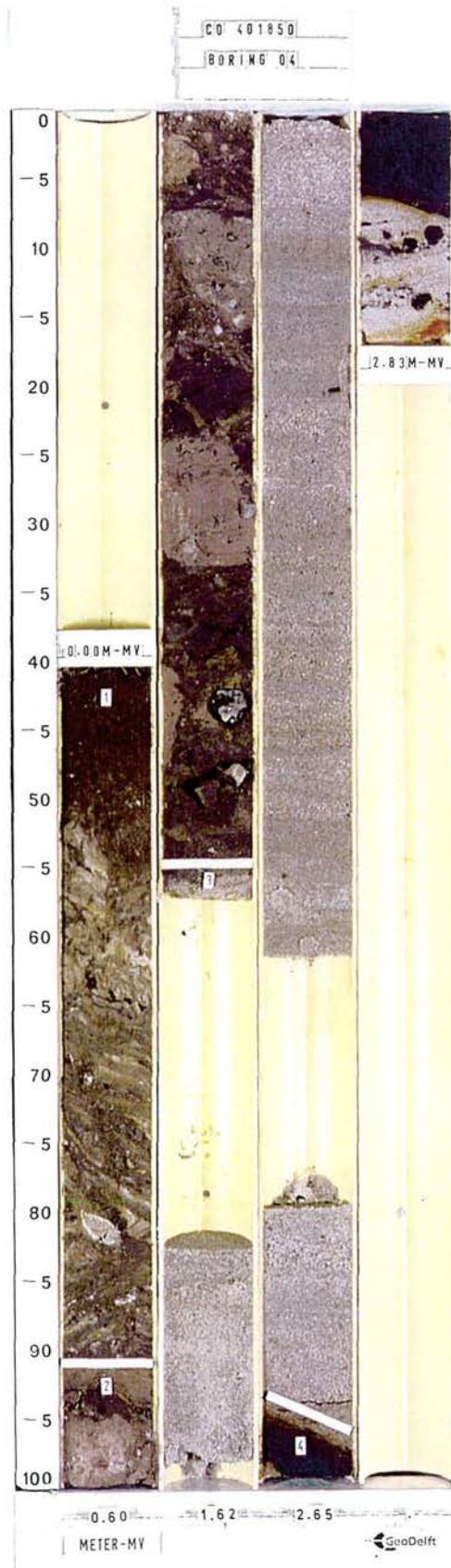
CO-401850

gez.

Begemannboring 66 mm 03

BIJL. B3

form.
A4



BESCHRIJVING: ZIE GETEKENDE VERSIE VAN BORING

Bestandnaam: b-fo-04 .dwg

Gewijzigd: 2002-04-25

Blad 1/1

Afdeling: 321



Postbus 69, 2600 AB DELFT
Stieltjesweg 2, 2628 CK DELFT

Telefoon (015) 269 35 00
Telefax (015) 261 08 21

Homepage:
www.geodelft.nl

datum

2002-04-10

get.

Mar

DIJKEN IJSSELMEERGEBIED

CO-401850

gez.

FOTO BORING 04

Type: Begemann/Spitsmuisboring 66 mm

BIJL. B4

form.

A4

Diepte t.o.v. MV in m

MV	MONSTER	LAAG	DIEPTE MV-[m]		BESCHRIJVING
			VAN	TOT	
0		1	0.00	-0.50	KLEI, uiterst siltig, zwak humeus
-1		2			Met zandstukjes Met enkele schelpresten
-2		3	-0.50	-1.14	LEEM, zwak zandig Met grindstukjes (keileem)
		4	-1.14	-2.55	ZAND, zwak siltig M = 250 µm
		4	-2.55	-2.83	ZAND, zwak siltig Met kleistukjes Kleilaag van MV -2.55 tot MV -2.61 m M = 150 µm

EINDE BORING 04

421293

Sub-320



Postbus 69
2600 AB Delft

Telefoon (015) 269 35 00
Telefax (015) 261 08 21

datum
2002-04-10

get.
LWS

DIJKEN IJSSELMEERGEBIED

CO-401850

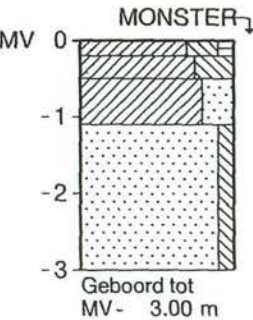
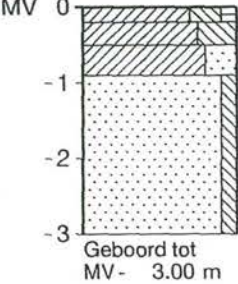
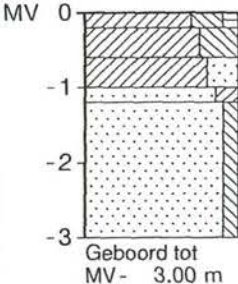
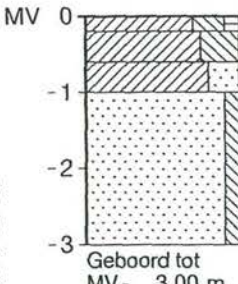

gez.

Begemannboring 66 mm 04

BIJL. B4

form.
A4

Bijlage 4 Boorbeschrijvingen handboringen

		DIEPTE MV-[m]		BESCHRIJVING		
		VAN	TOT			
Diepte t.o.v. MV in m		1				
		2	1	0.00	-0.20	KLEI, sterk siltig, zwak humeus + grasmat
		3	2	-0.20	-0.50	KLEI, uiterst siltig
		3	3	-0.50	-1.10	KLEI, sterk zandig
		4	4	-1.10	-3.00	ZAND, zwak siltig Geel matig grof + enkele schelpjes en enkele grindjes
EINDE BORING A						
Diepte t.o.v. MV in m		1				
		2	1	0.00	-0.20	KLEI, sterk siltig, zwak humeus + grasmat
		3	2	-0.20	-0.50	KLEI, uiterst siltig
		3	3	-0.50	-0.90	KLEI, sterk zandig
		4	4	-0.90	-3.00	ZAND, zwak siltig Geel matig grof + enkele schelpjes en grindjes
EINDE BORING B						
Diepte t.o.v. MV in m		1				
		2	1	0.00	-0.20	KLEI, sterk siltig, zwak humeus + grasmat
		3	2	-0.20	-0.60	KLEI, uiterst siltig
		3	3	-0.60	-1.00	KLEI, sterk zandig
		5	4	-1.00	-1.20	ZAND, kleiig
		5	5	-1.20	-3.00	ZAND, zwak siltig Geel matig grof Enkel schelpje enkele grindjes
EINDE BORING C						
Diepte t.o.v. MV in m		1				
		2	1	0.00	-0.20	KLEI, sterk siltig, zwak humeus + grasmat
		3	2	-0.20	-0.60	KLEI, uiterst siltig
		3	3	-0.60	-1.00	KLEI, sterk zandig
		4	4	-1.00	-3.00	ZAND, zwak siltig Enkel schelpje enkele grindjes Geel zeer grof - matig grof
EINDE BORING D						
421184 421185 421186 421187 Sub-321						
		Postbus 69 2600 AB Delft		Telefoon (015) 269 35 00 Telefax (015) 261 08 21		datum 2002-04-10
DIJKEN IJSSELMEERGEBIED						gez. CO-401850
Handboringen A, B, C en D						form. BIJL. H1 A4

Bijlage 5 Korrelverdelingsdiagrammen

KORRELVERDELINGSDIAGRAM



GRONDMECHANICA
DELFT

Postbus 69
2600 AB Delft

Telefoon (015) 2 69 35 00
Telefax (015) 2 61 08 21

B.J.L.

CO-401850

2002-04-16

datum

A4

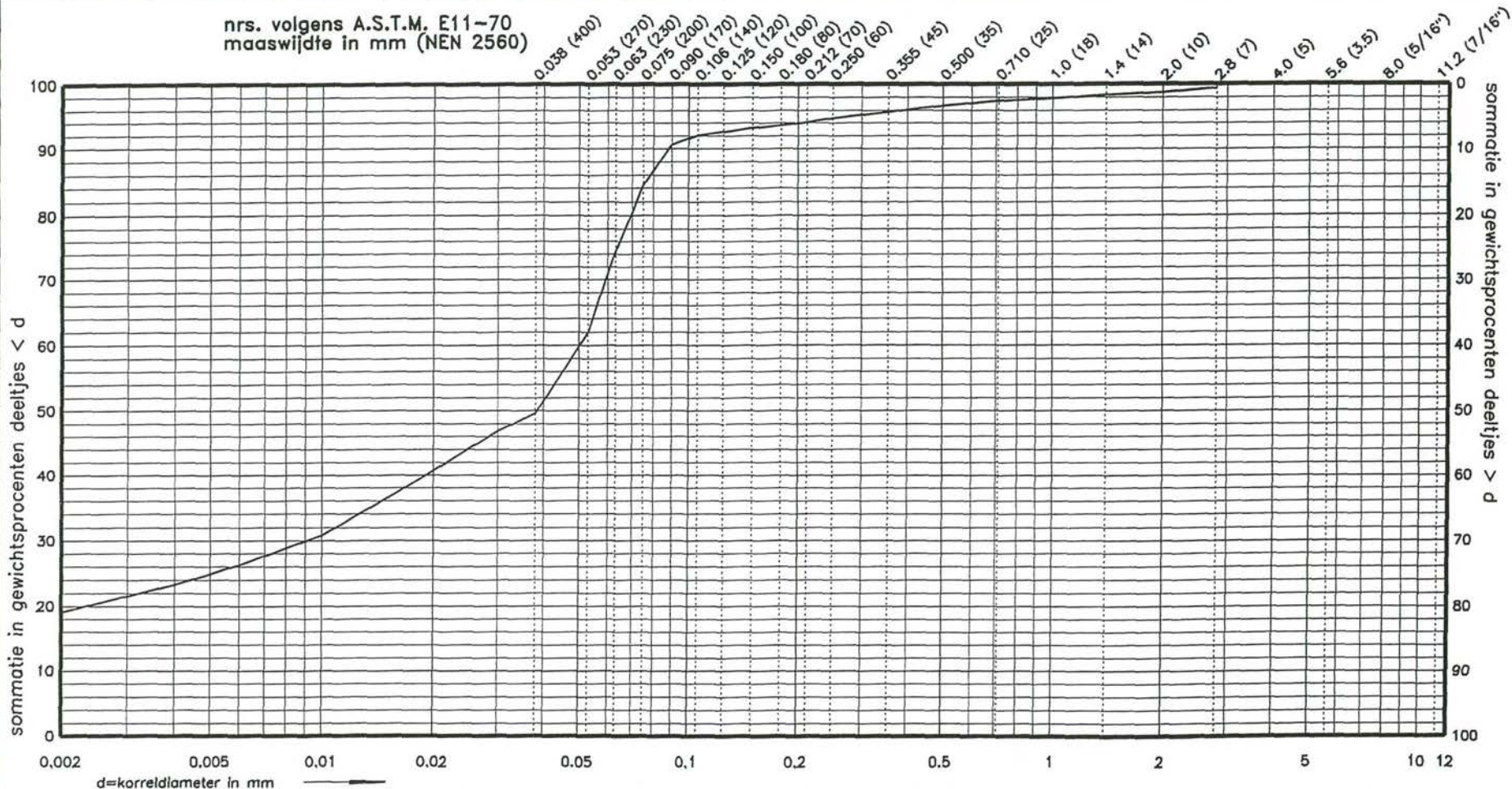
form.

get.

SCHOUW

get.

nrs. volgens A.S.T.M. E11-70
maaswijdte in mm (NEN 2560)



FIJN	MIDDEL	GROF	FIJN	MIDDEL	GROF	FIJN	MIDDEL
SILT			ZAND			GRIND	

BORING	MONSTER	DIEPTE in 0 - m	0 m-MV	0 m-NAP	0 m-BODEM
03	7A	0.22-0.47			

KORRELVERDELINGSDIAGRAM

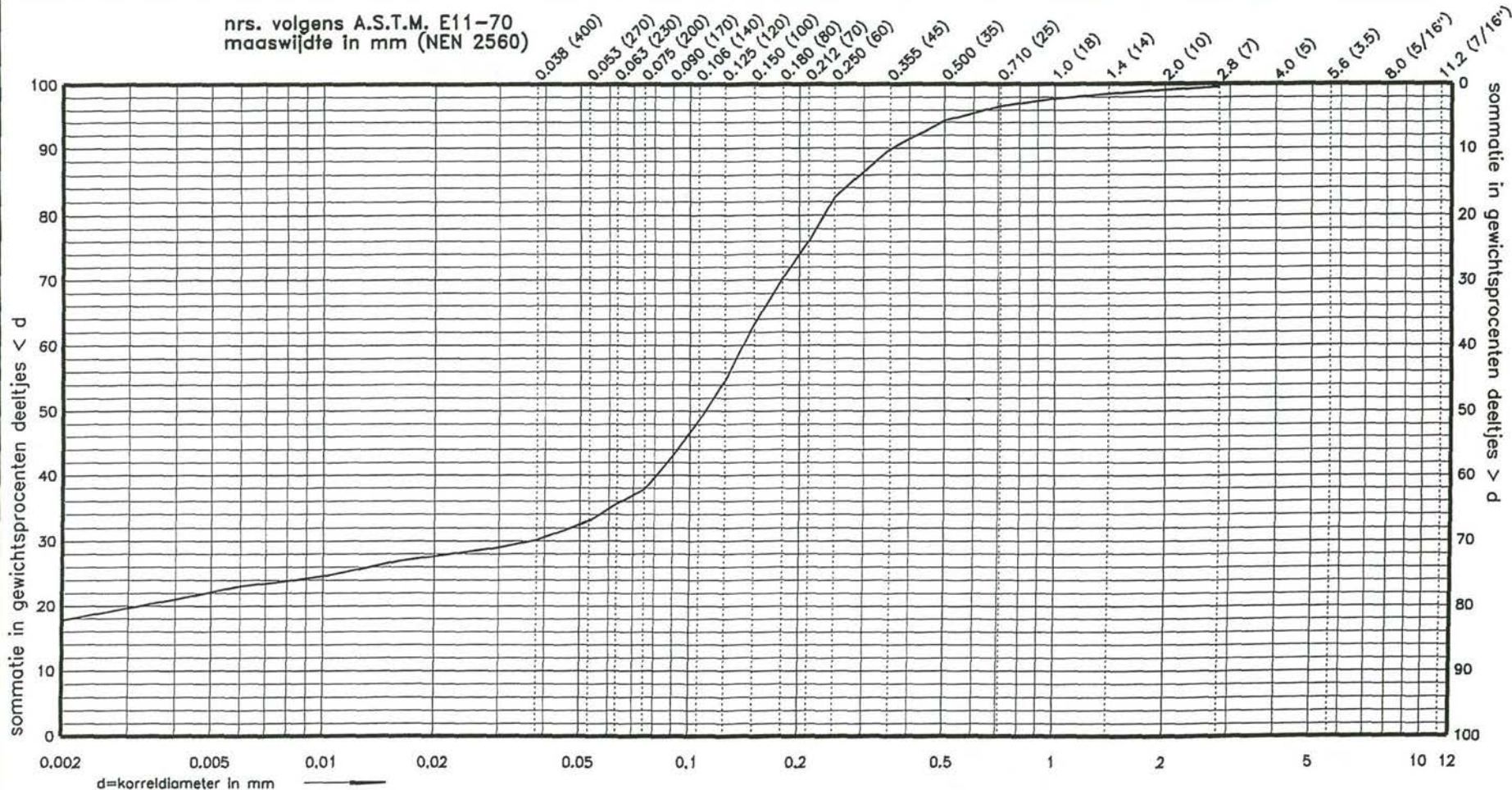


GRONDMECHANICA
DELFT

Postbus 69
2600 AB Delft

Telefoon (015) 2 69 35 00
Telefax (015) 2 61 08 21

nrs. volgens A.S.T.M. E11-70
maaswijdte in mm (NEN 2560)



FIJN	MIDDEL	GROF	FIJN	MIDDEL	GROF	FIJN	MIDDEL
SILT			ZAND			GRIND	

BORING	MONSTER	DIEPTE in 0 - m	0 m - MV	0 m - NAP	0 m - BODEM
03	7B-8	0.47-0.82			

Bijl.	CO-401850	2002-04-16	get. SCHOUW
A4	form.	get.	

KORRELVERDELINGSDIAGRAM



GRONDMECHANICA
DELFT

Postbus 69
2600 AB Delft

Telefoon (015) 2 69 35 00
Telefax (015) 2 61 08 21

BIJL.

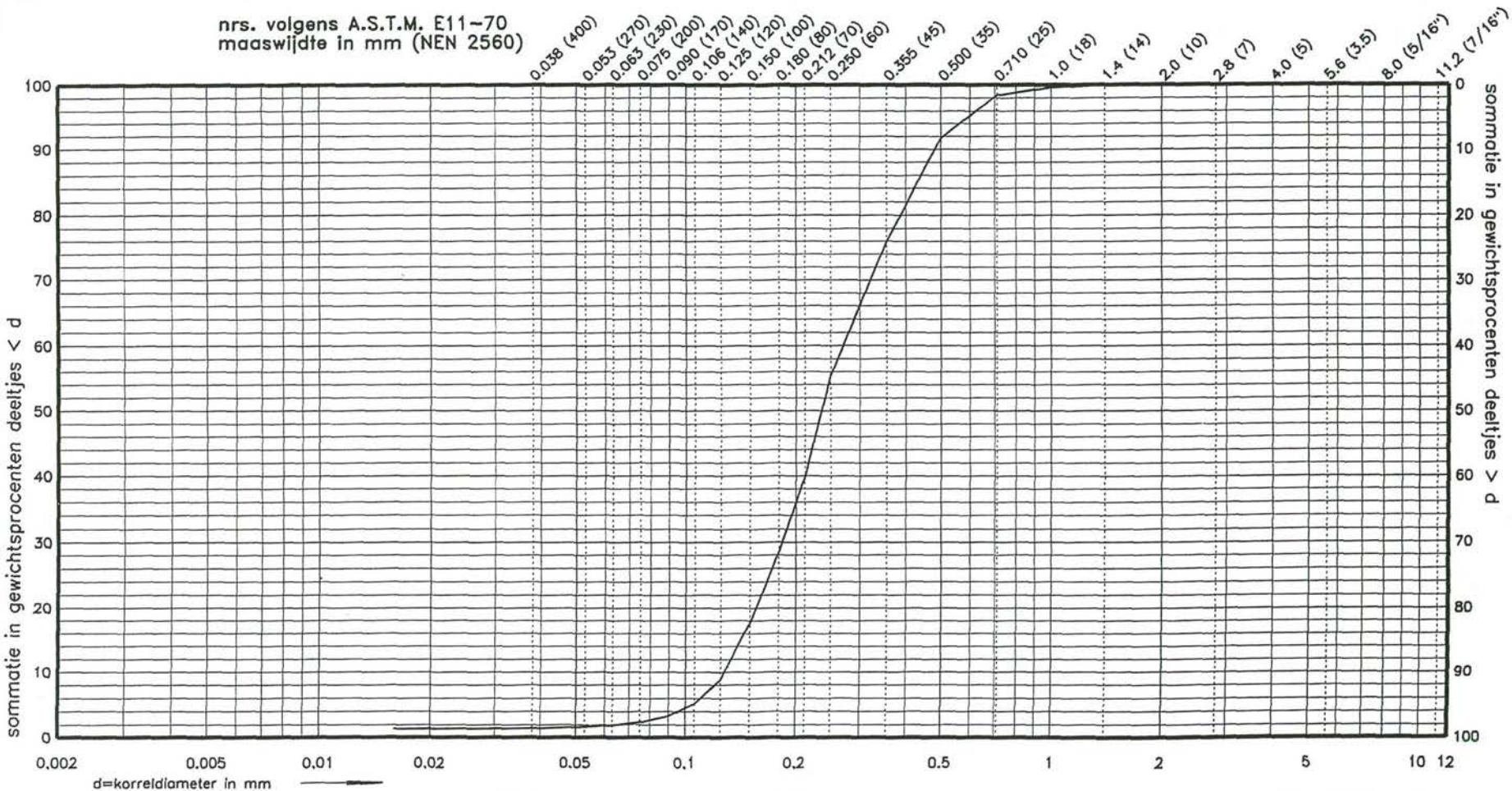
CO-401850

A4

datum
2002-04-16

get.
SCHOUW

nrs. volgens A.S.T.M. E11-70
maaswijdte in mm (NEN 2560)



FIJN	MIDDEL	GROF	FIJN	MIDDEL	GROF	FIJN	MIDDEL
SILT			ZAND			GRIND	

BORING	MONSTER	DIEPTE in 0 -m	0 m-MV	0 m-NAP	0 m-BODEM
04	11A	1.17-1.22			

KORRELVERDELINGSDIAGRAM

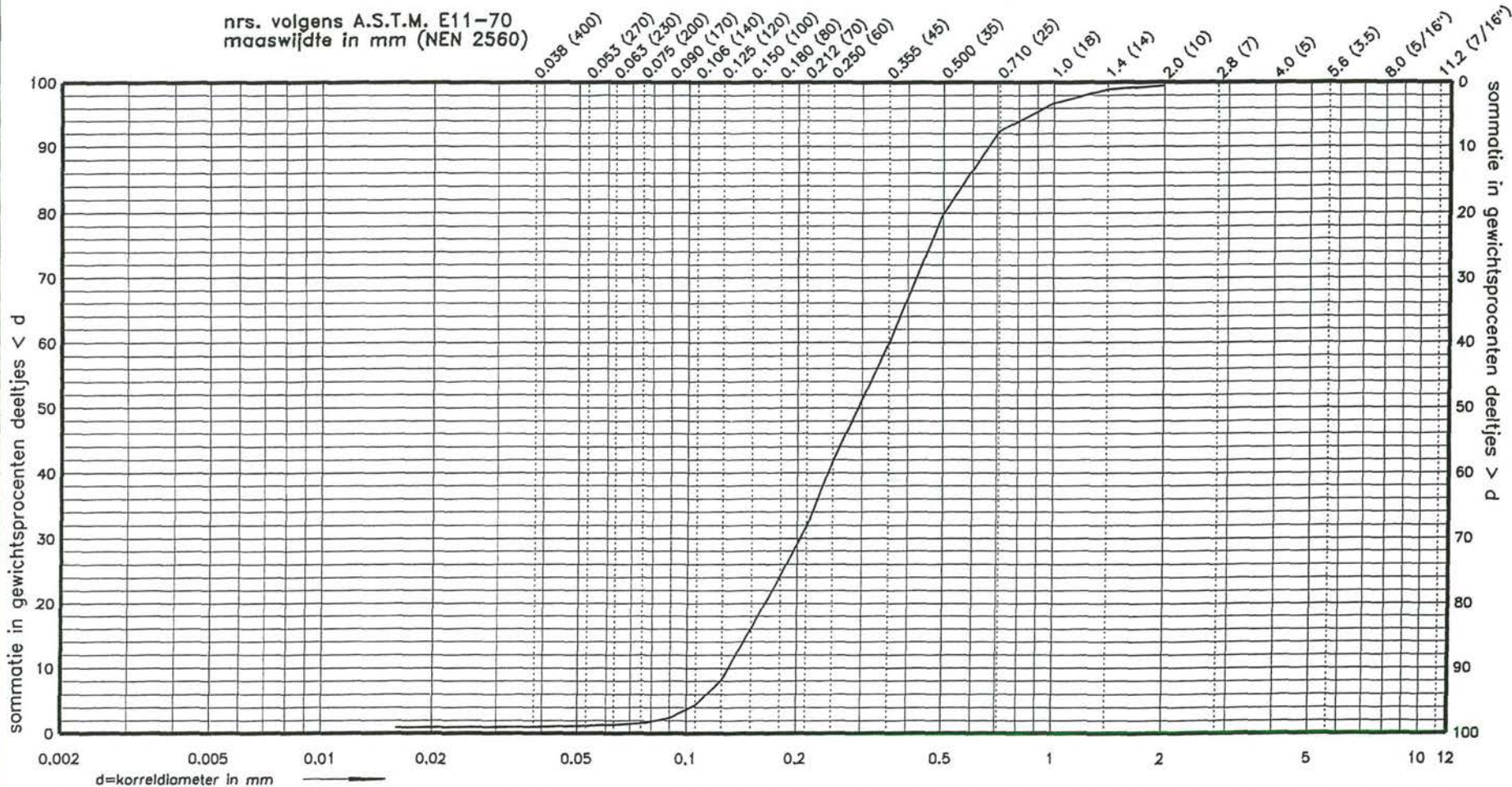


GRONDMECHANICA
DELFT

Postbus 69
2600 AB Delft

Telefoon (015) 2 69 35 00
Telefax (015) 2 61 08 21

nrs. volgens A.S.T.M. E11-70
maaswijdte in mm (NEN 2560)



FIJN	MIDDEL	GROF	FIJN	MIDDEL	GROF	FIJN	MIDDEL
SILT			ZAND			GRIND	

BORING	MONSTER	DIEPTE in 0 -m	0 m-MV	0 m-NAP	0 m-BODEM
04	11B	1.37-1.42			

datum	2002-04-16	gel.	SCHOUIW
CO-401850		form.	9827
BIJL.		A4	

Bijlage 6 Resultaten onderzoek Alterra

Waterretentie en waterdoorlatendheidskarakteristieken van een proefvak op de IJsselmeerdijk

E.W.J. Hummelink en T.C. van Steenbergen

Bodemfysisch laboratorium

Alterra

Research Instituut voor de Groene Ruimte

2 mei, 2002

Monstername

Op de IJsselmeerdijk tussen km 22.97 en 22.94 zijn monsters genomen voor bodemfysische bepalingen. Op 2 locaties, nl. 2 meter onder de kruin en twee meter boven de teen zijn op twee dieptes ringen gestoken. Voor de verdampingsmethode zijn per plek 2 ringen van 8 cm hoogte (666 cm^3) en 1 ring van 10 cm hoogte voor de verzadigde waterdoorlatendheid (2865 cm^3). De bemonstering vond 5 april 2002 plaats.

De monsters hebben de volgende codes

Twee meter onder de kruin van de dijk

1	laag 10-20 cm voor de verzadigde doorlatendheid
fl2_1 en fl2_2	laag 11-19 cm
3	laag 55-65 cm voor de verzadigde doorlatendheid
fl4_1 en fl4_2	laag 56-64

twee meter boven de teen van de dijk

5	laag 10-20 cm voor de verzadigde doorlatendheid
fl6_1 en fl6_2	laag 11-19 cm
7	laag 55-65 cm voor de verzadigde doorlatendheid
fl8_1 en fl8_2	laag 56-64

beschrijving van de gronden

(de gehalten zijn gebaseerd op schattingen)

De gronden vallen onder de kalkhoudende kleigronden. De bovengrond is te typeren als een structuurhoudende, goed bewortelbare, matig humeuze (2,5-5% org.stof) kalkhoudende zware zavel met een zeer grote doorlatendheid.

De ondergrond is door een mengsel van grind, zand, zavel en klei te typeren als een weinig structuurhoudende, slecht bewortelbare, humusarme (0-2,5% org.stof) kleigrond, waarin het lutumgehalte varieert van ongeveer 5-45% lutum en een zeer wisselende korrelgrootteverdeling. Door de genoemde samenstelling ontstaat bij indrogen een zogenaamde "betonstructuur".

Bodemfysische meetmethoden

Waterretentiekarakteristiek en waterdoorlatendheidskarakteristiek volgens de verdampingsmethode ($-0 < h < -800$ cm)

Bij deze methode wordt een onverstoord monster op een balans geplaatst. In het monster worden 4 tensiometers aangebracht om potentiaalverschillen in het monster te meten. Het bodemwater aan de bovenzijde van het monster kan vrij verdampen. Met behulp van de afname van het gewicht van het monster en de meetreeksen van de tensiometers kan simultaan zowel de waterretentiekarakteristiek (desorptiecurve) als de onverzadigde doorlatendheid worden berekend. De bepalingen zijn uitgevoerd volgens NEN 5791, waarin ook een uitgebreide beschrijving van de meetmethode te vinden is.

De meetresultaten van deze meetmethode zijn vervolgens beschreven met de Van Genuchten en Mualem-functies voor de waterretentie en waterdoorlatendheidskarakteristiek, waarbij de gevonden waarden van deze functies zijn gegeven. Bij het optimaliseren van deze parameters is gebruik gemaakt van een wegingsfactor 5 voor de waterretentiekarakteristiek t.o.v. de waterdoorlatendheidskarakteristiek, dat wil dus zeggen dat de retentiekarakteristiek zwaarder wordt meegewogen.

Verzadigde waterdoorlatendheid

Bij deze methode wordt een constante waterhoogte op een onverstoord bodemmonster gehandhaafd en wordt via een vaste uitstroomopening een constant potentiaalverschil over de hoogte van het bodemmonster ingesteld. Uit het debiet en de afmetingen van het monster is de verzadigde doorlatendheid K_s te berekenen. De bepalingen zijn uitgevoerd volgens een aangepaste vorm van NEN 5789, zoals beschreven in De Vos (1997).

Resultaten

Resultaten verdampingsmethode

Tabel 1. Geoptimaliseerde parameters van de Van Genuchten en Mualem-functies zoals bepaald voor de verschillende bodemlagen.

Monster	Volume massa gr/cm ³	Laag (cm)	θ_r	θ_s	α (cm ⁻¹)	n	l	K_s (cm d ⁻¹)
Fl2_2	1377	11-19	0.050	0.440	0.0118	1.552	-1.767	28
Fl4_1	1841	56-64	0.050	0.284	0.0090	1.317	-1.734	5
Fl4_2	1858	56-64	0.001	0.277	0.0096	1.228	-3.035	4
Fl6_1	1377	11-19	0.050	0.445	0.0231	1.499	-2.969	35
Fl6_2	1357	11-19	0.050	0.451	0.0199	1.378	-0.000	405
Fl8_1	1882	56-64	0.050	0.263	0.0096	1.214	-0.367	3
Fl8_2	1861	56-64	0.050	0.282	0.0279	1.161	-3.450	38

Een grafische weergave van de metingen is als bijlage bijgevoegd.

Verzadigde waterdoorlatendheid K_s

De hoge K_s (cm/d) waarden geven aan dat er macro-porïen in de monsters aanwezig zijn die het resultaat van de metingen bepalen. In het algemeen vinden we hogere waarden dan bij de verdampingsmethode. Het is bekend dat bij verzadiging andere porïen aan het watertransport kunnen gaan bijdragen en dat er een sterke toename in doorlatendheid zal zijn bij verzadiging t.o.v. de doorlatendheid nabij verzadiging.

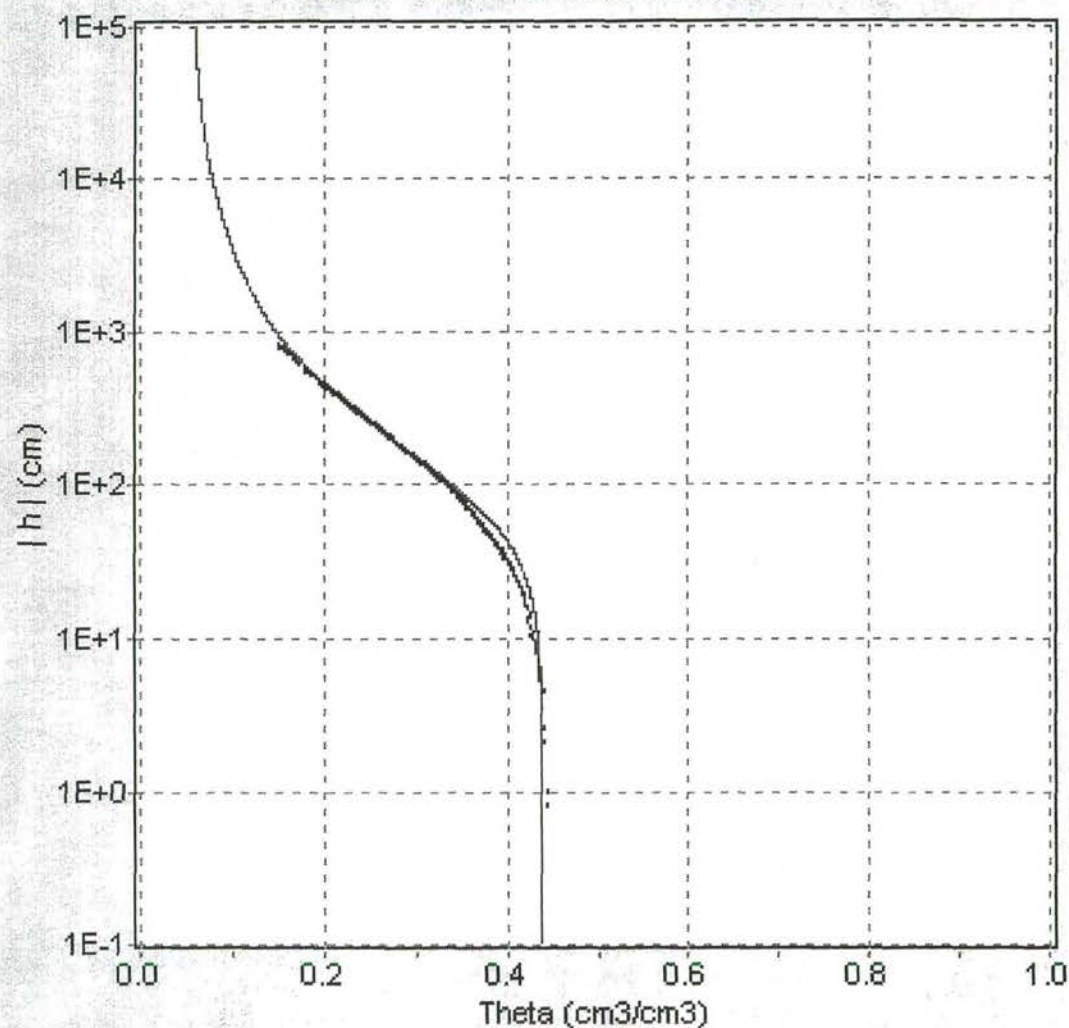
In de monsters zijn wormgaten aanwezig die de doorlatendheid in grote mate beïnvloeden. Na een eerste meting zijn de wormgangen dichtgemaakt en is het monster nogmaals gemeten.

Tabel 2. Verzadigde waterdoorlatendheid K_s ; bepaald volgens de Vos (1997), inclusief het ingestelde stijghoogte(H)-gradient.

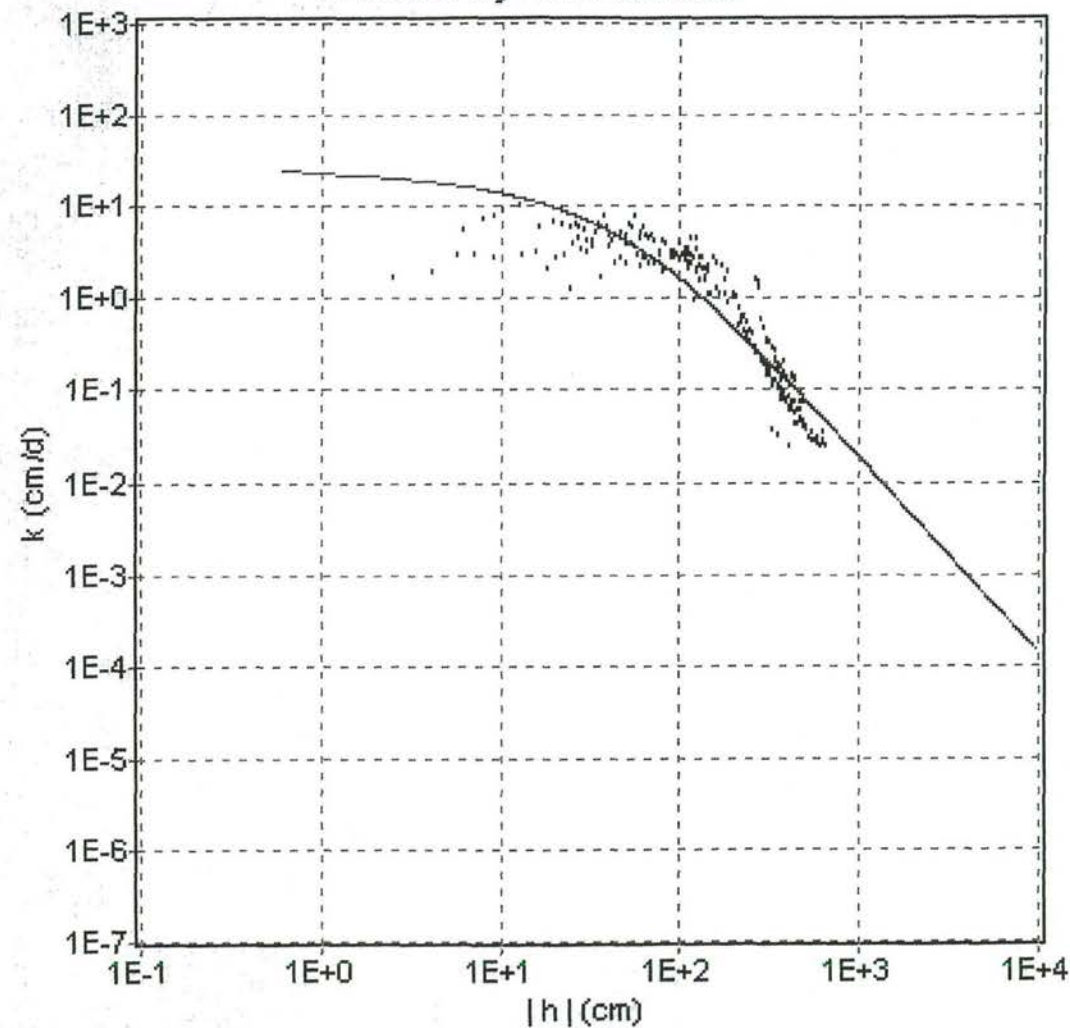
Monster	Laag (cm)	K_s (cm d ⁻¹)	H- gradient
1	10-20	4250	0.06
3	55-65	746	0.07
1*	10-20	51	1.22
3*	55-65	9	1.06
5	10-20	2710	0.095
7	55-65	67	0.045
5*	10-20	1127	0.095
7*	55-65	3	0.95

* tweede meting met dichtgemaakte wormgaten

Water retention characteristic



Conductivity characteristic



EVAP : Experiment FL2-2 from file FL2_2.CPY

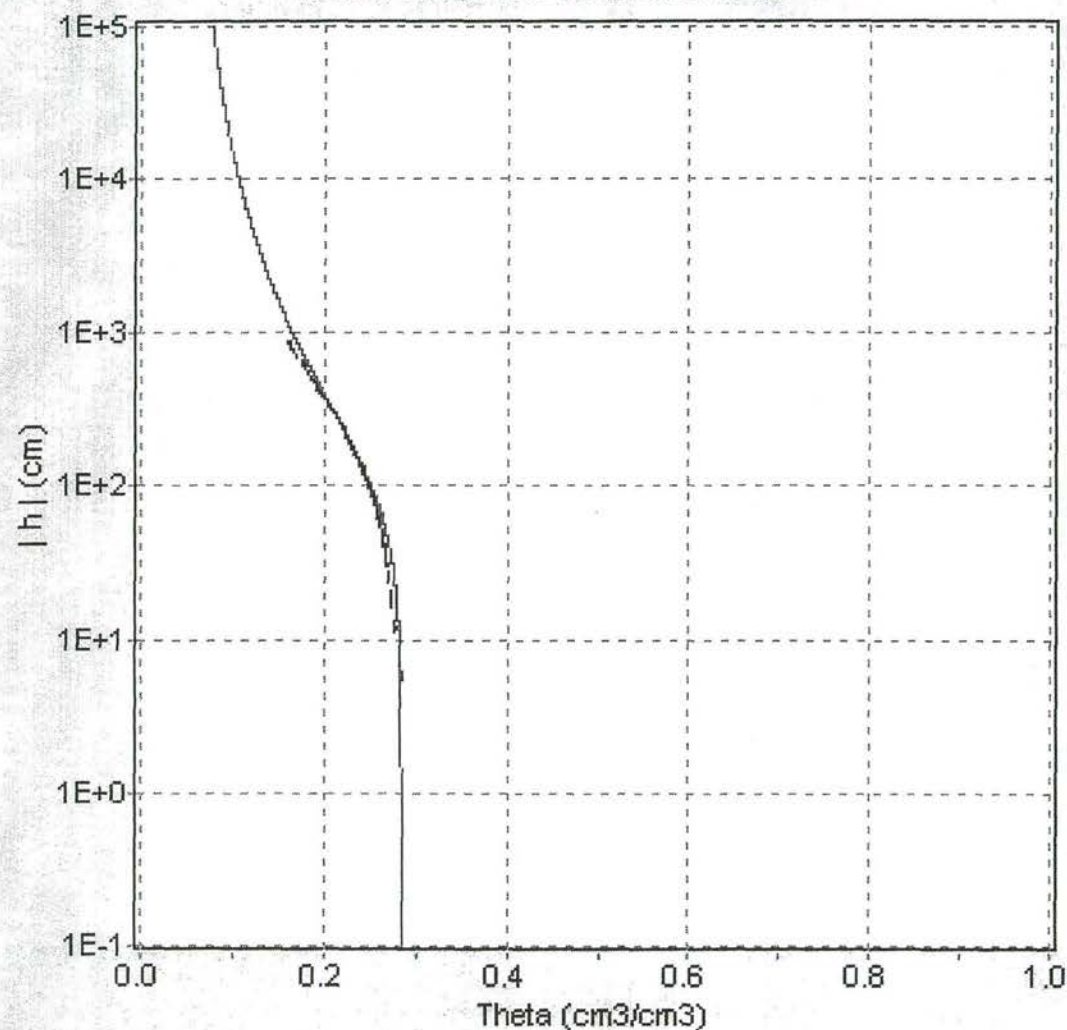
DIM :

Point size:

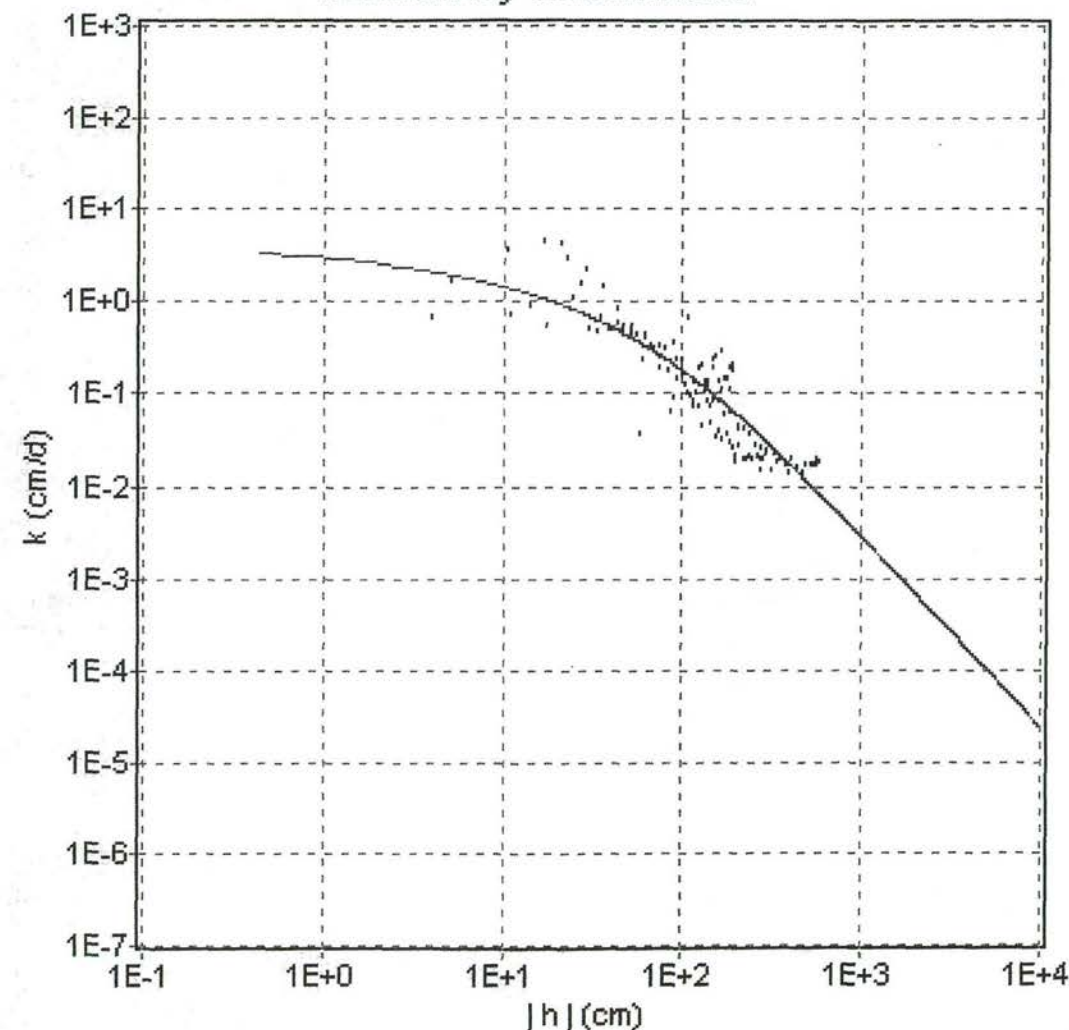
Optimized parameters

Theta-R:	Theta-S:	Alpha:	n:	l:	m:	Ks:
<input type="text" value="0.050"/>	<input type="text" value="0.440"/>	<input type="text" value="0.0118"/>	<input type="text" value="1.552"/>	<input type="text" value="-1.767"/>	<input type="text" value="0.356"/>	<input type="text" value="28.084"/>

Water retention characteristic



Conductivity characteristic



EVAP : Experiment FL4-1 from file FL4_1.CPY

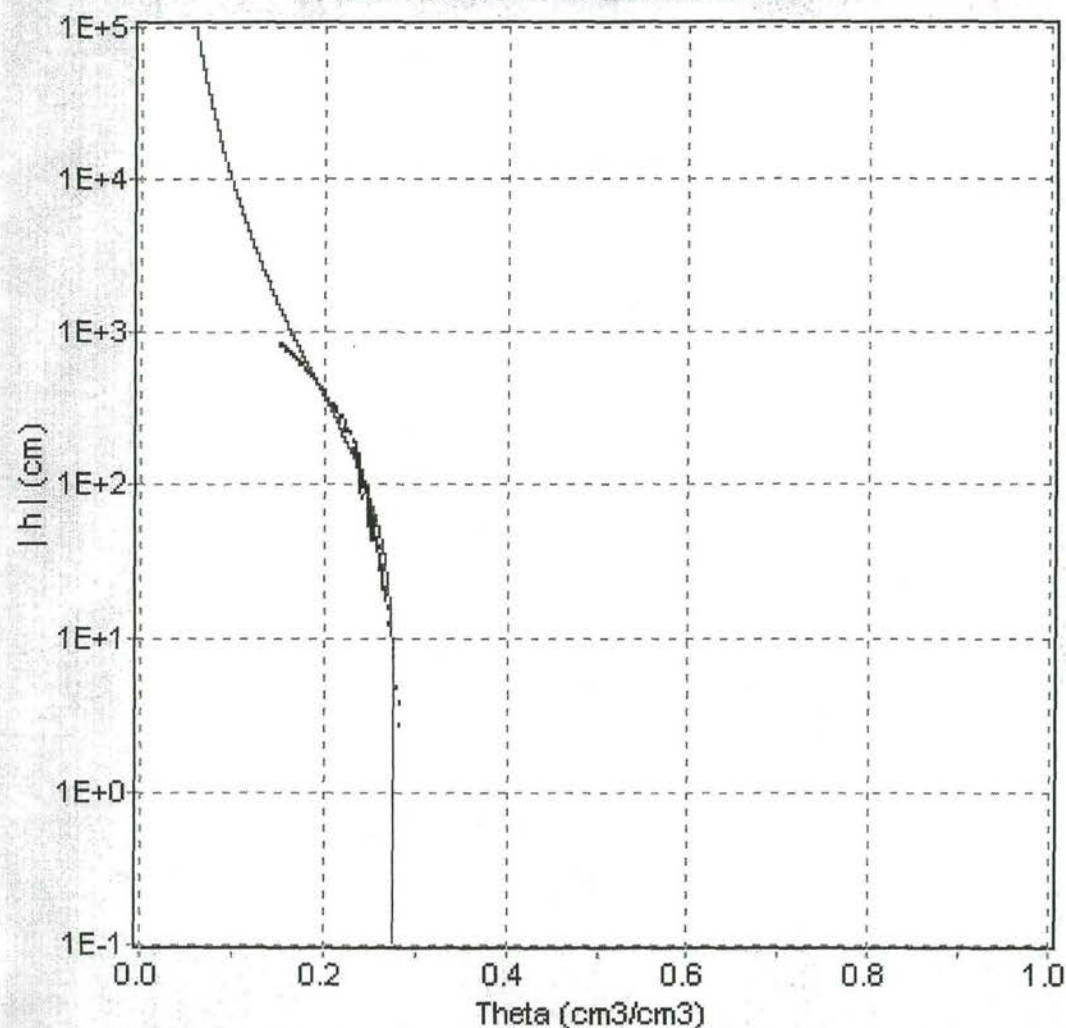
DIM :

Point size:

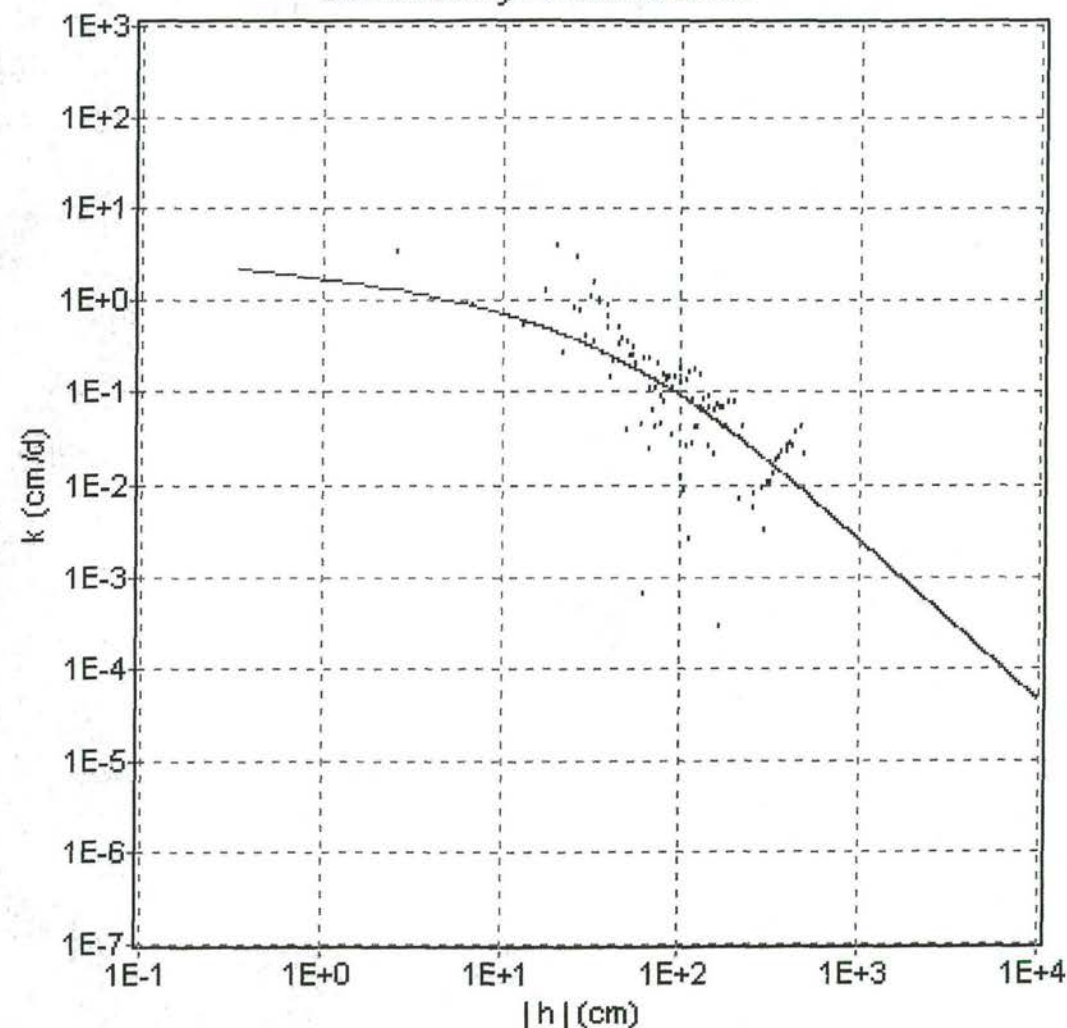
Optimized parameters

Theta-R:	Theta-S:	Alpha:	n:	l:	m:	Ks:
<input type="text" value="0.050"/>	<input type="text" value="0.284"/>	<input type="text" value="0.0090"/>	<input type="text" value="1.317"/>	<input type="text" value="-1.734"/>	<input type="text" value="0.241"/>	<input type="text" value="4.911"/>

Water retention characteristic



Conductivity characteristic



EVAP : Experiment FL4-2 from file FL4_2.CPY

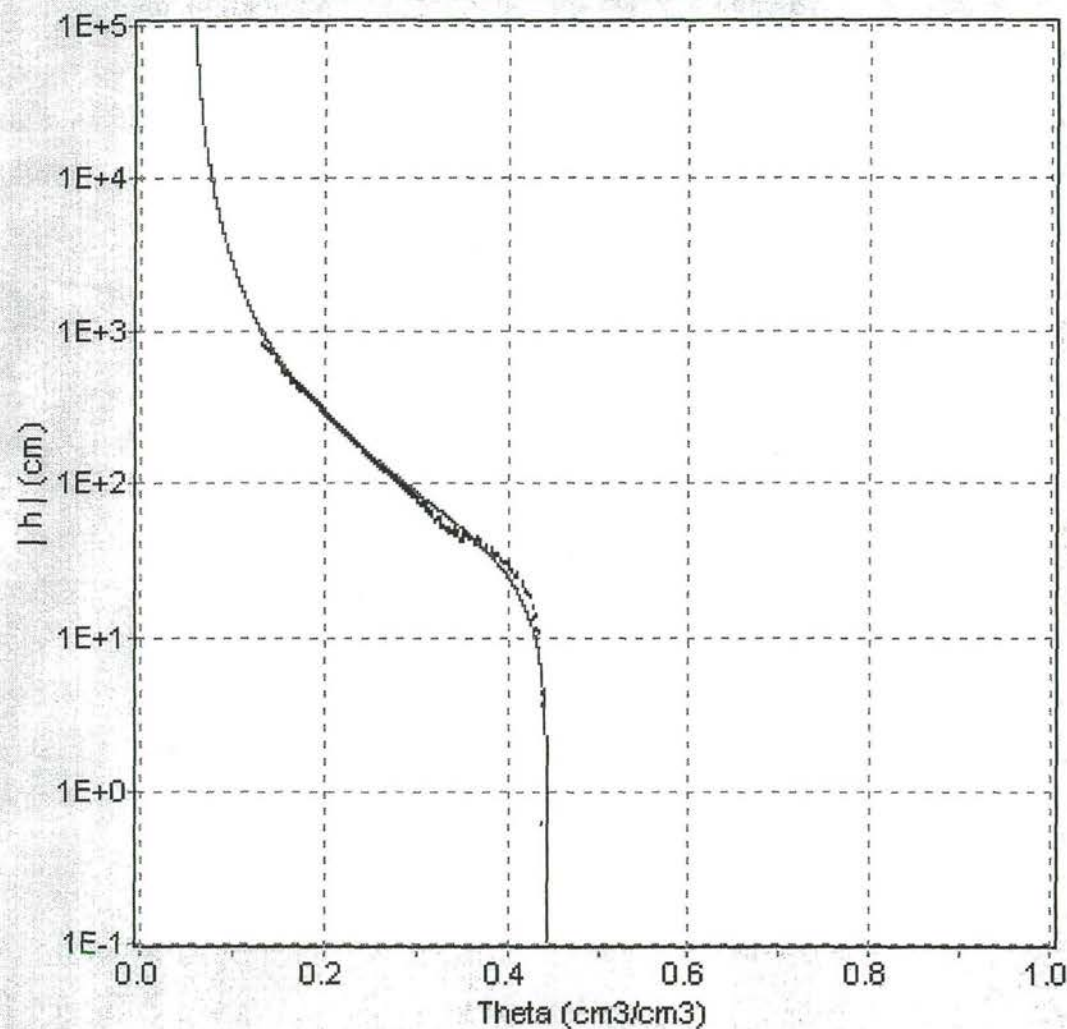
DIM :

Point size:

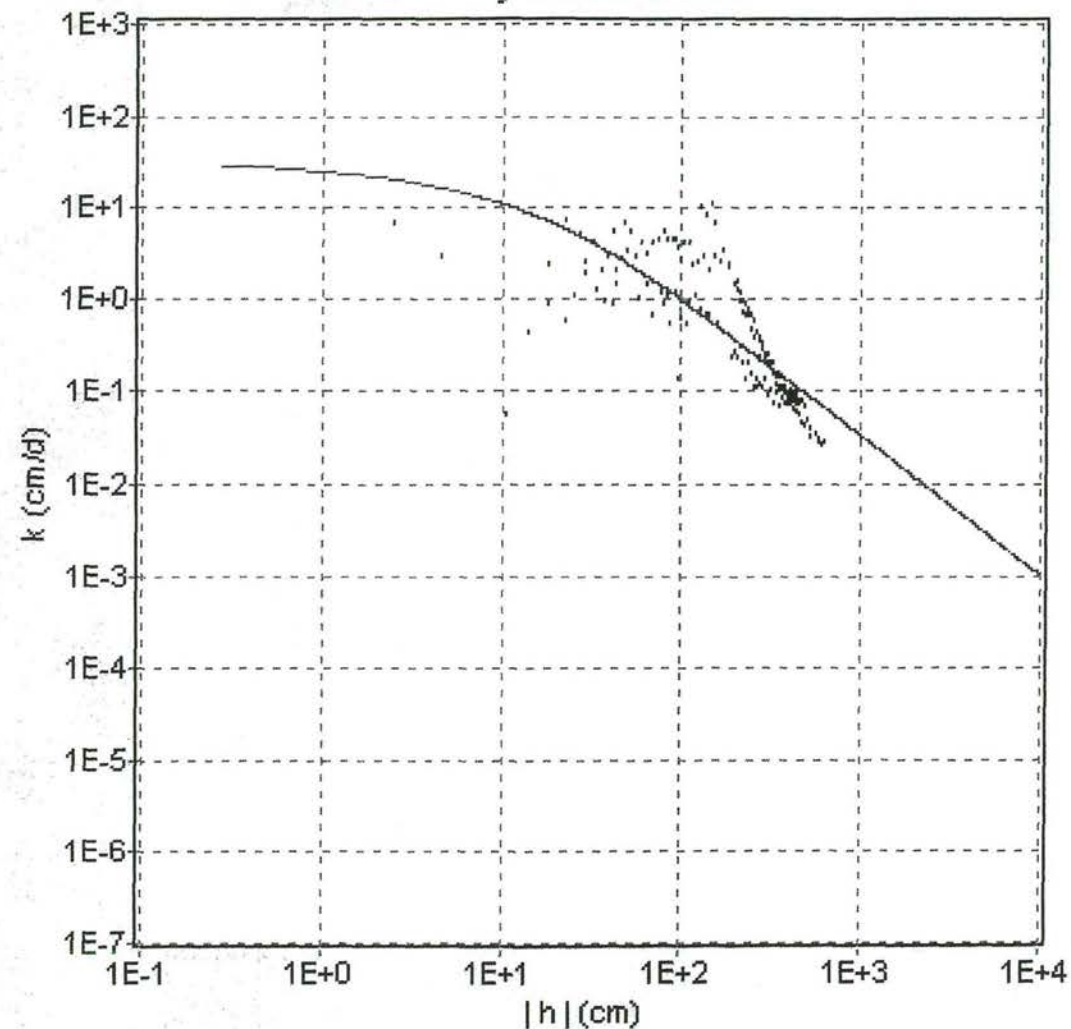
Optimized parameters

Theta-R:	Theta-S:	Alpha:	n:	l:	m:	Ks:
<input type="text" value="0.001"/>	<input type="text" value="0.277"/>	<input type="text" value="0.0096"/>	<input type="text" value="1.228"/>	<input type="text" value="-3.035"/>	<input type="text" value="0.186"/>	<input type="text" value="4.010"/>

Water retention characteristic



Conductivity characteristic



EVAP : Experiment FL6-1 from file FL6_1.CPY

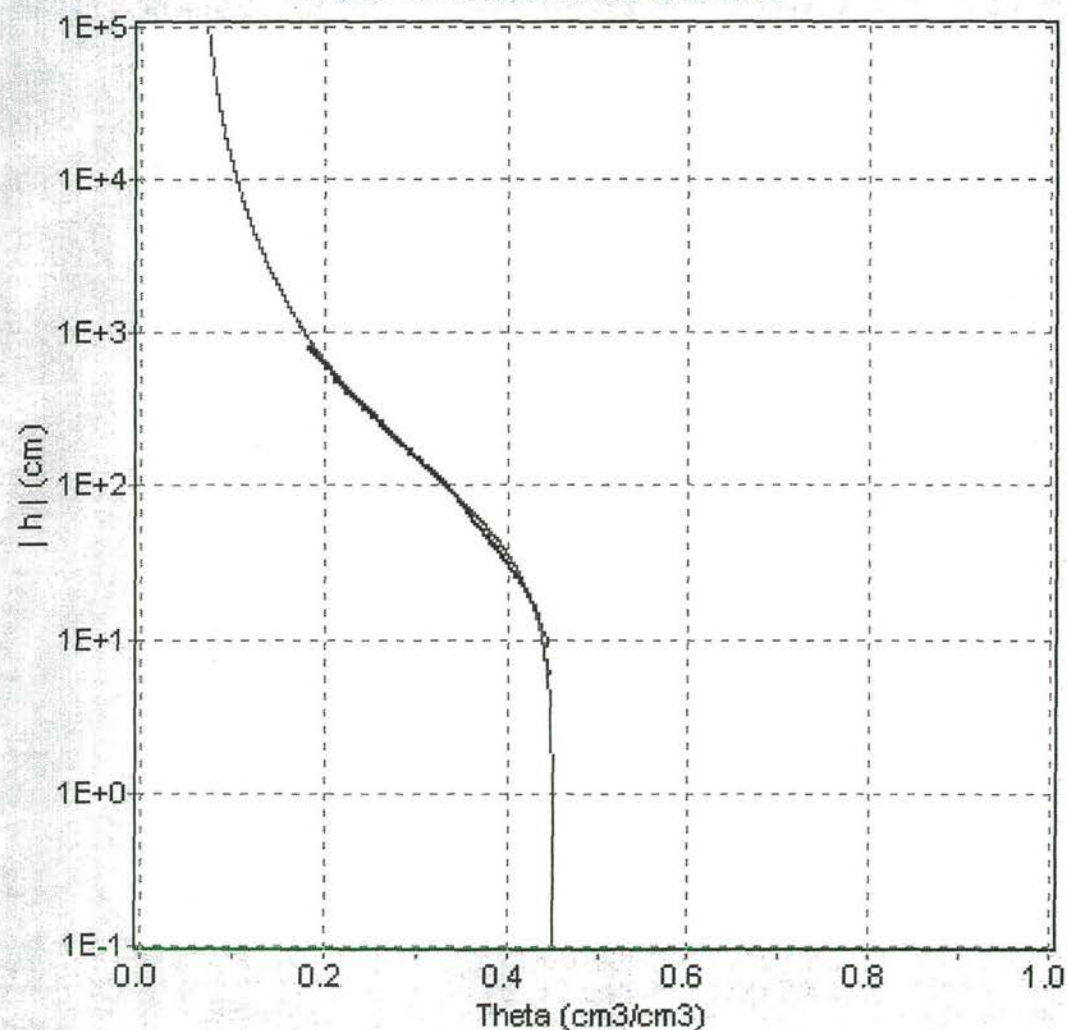
DIM :

Point size:

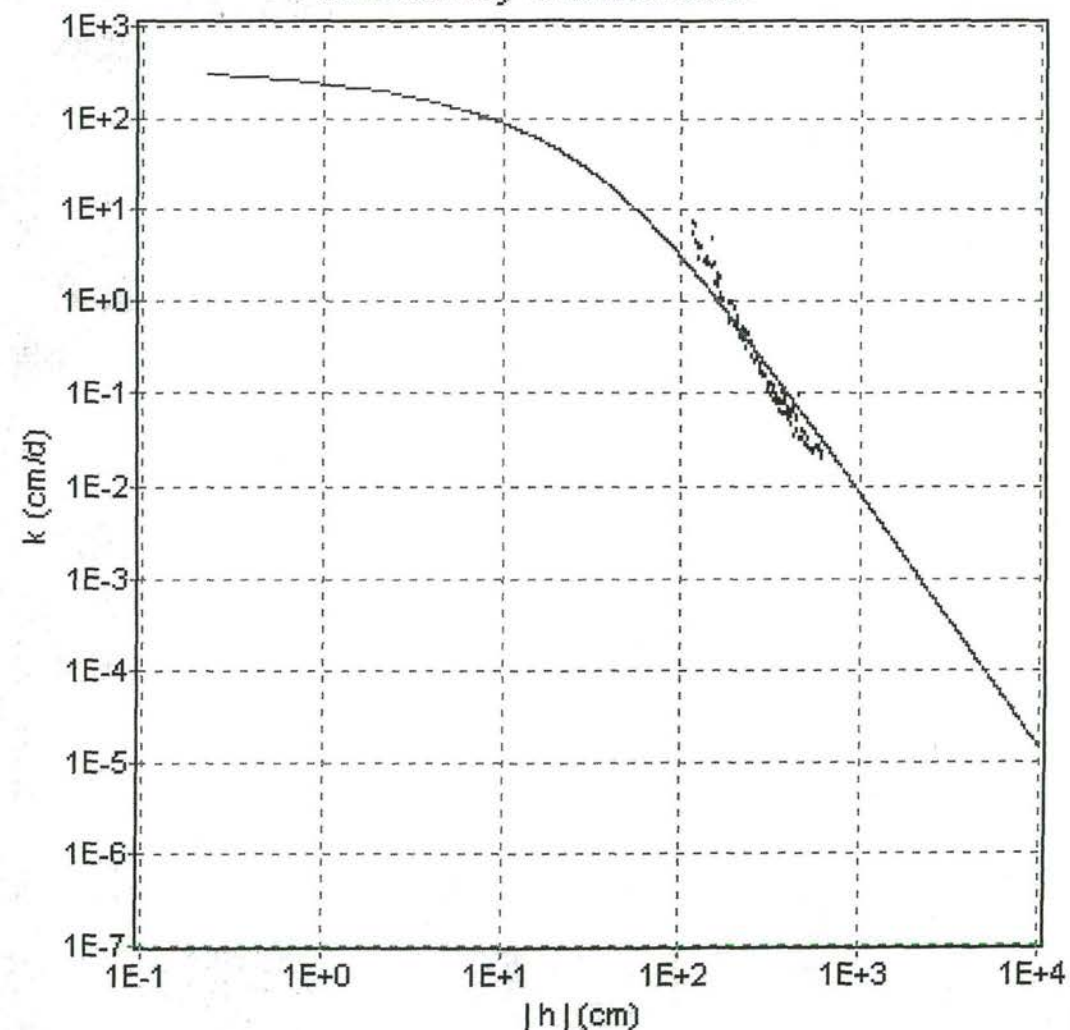
Optimized parameters

Theta-R:	Theta-S:	Alpha:	n:	l:	m:	Ks:
<input type="text" value="0.050"/>	<input type="text" value="0.445"/>	<input type="text" value="0.0231"/>	<input type="text" value="1.499"/>	<input type="text" value="-2.969"/>	<input type="text" value="0.333"/>	<input type="text" value="34.792"/>

Water retention characteristic



Conductivity characteristic



EVAP : Experiment FL6-2 from file FL6_2.CPY

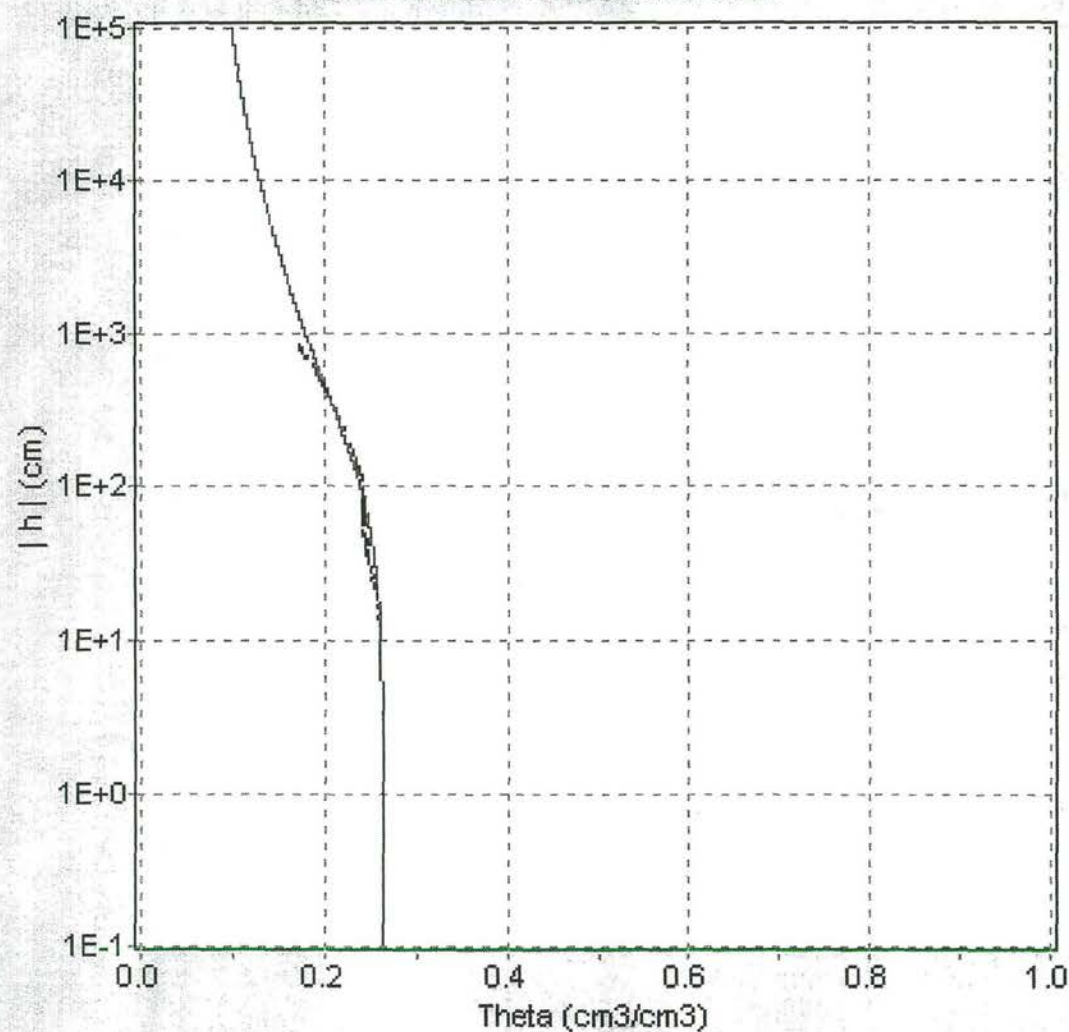
DIM :

Point size:

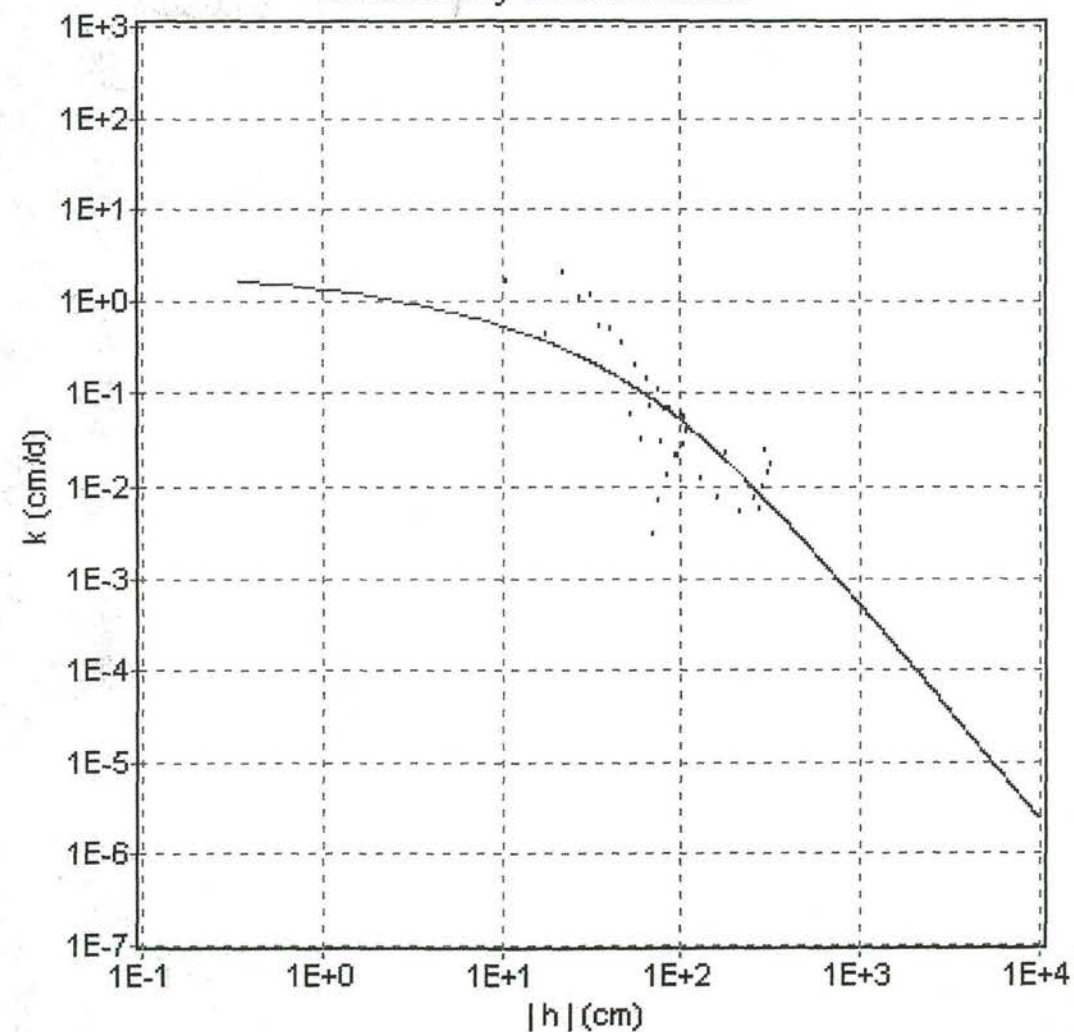
Optimized parameters

Theta-R:	Theta-S:	Alpha:	n:	l:	m:	Ks:
<input type="text" value="0.050"/>	<input type="text" value="0.451"/>	<input type="text" value="0.0199"/>	<input type="text" value="1.378"/>	<input type="text" value="0.000"/>	<input type="text" value="0.274"/>	<input type="text" value="405.105"/>

Water retention characteristic



Conductivity characteristic



EVAP : Experiment FL8-1 from file FL8_1.CPY

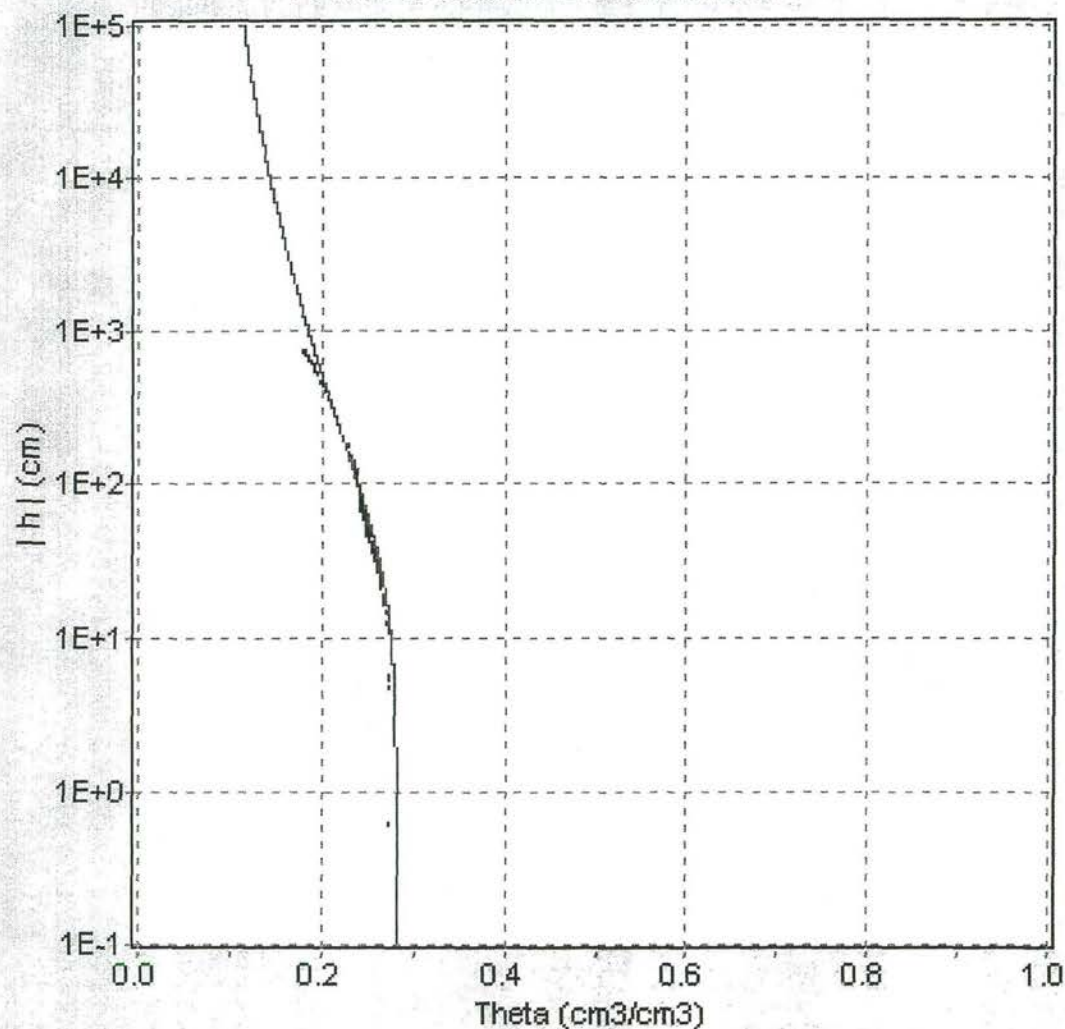
DIM :

Point size:

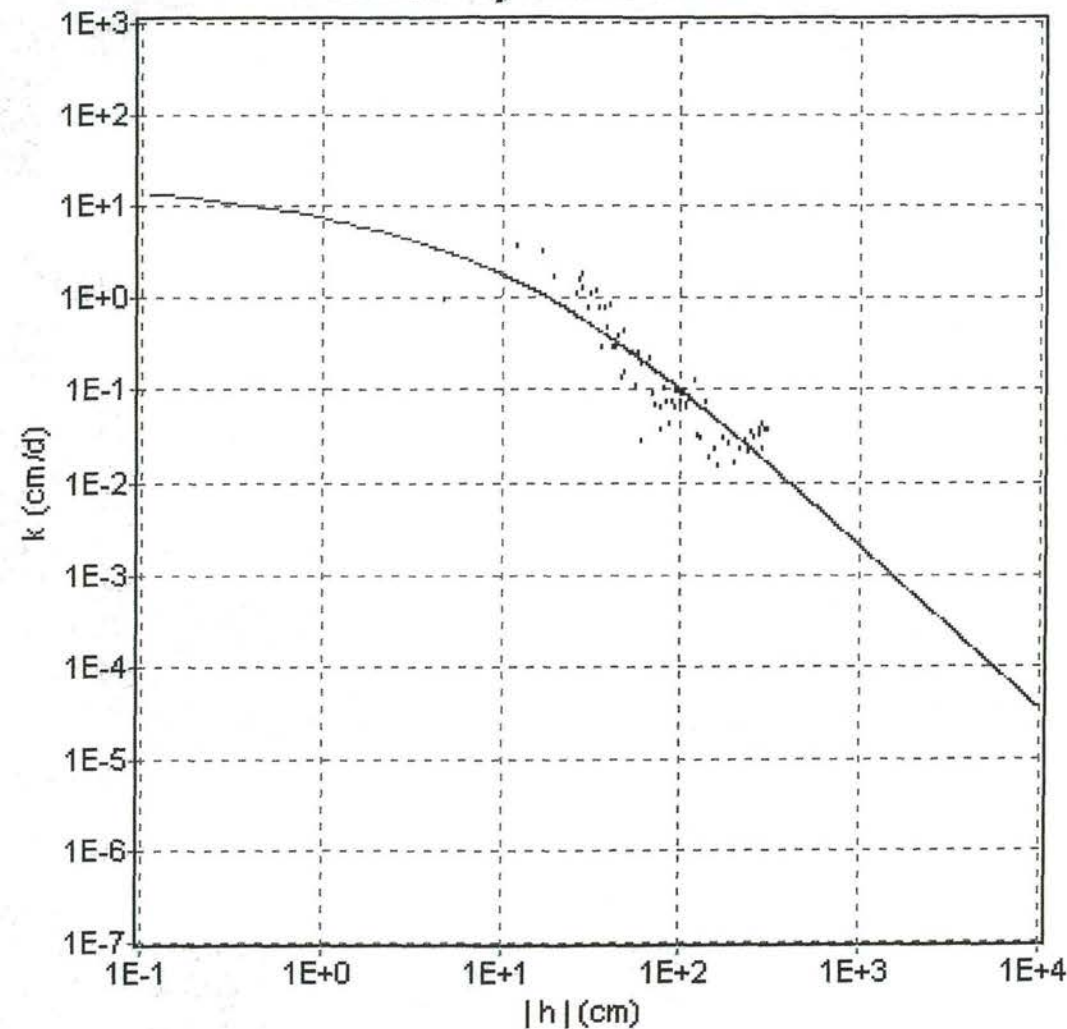
Optimized parameters

Theta-R:	Theta-S:	Alpha:	n:	l:	m:	Ks:
<input type="text" value="0.050"/>	<input type="text" value="0.263"/>	<input type="text" value="0.0096"/>	<input type="text" value="1.214"/>	<input type="text" value="-0.367"/>	<input type="text" value="0.176"/>	<input type="text" value="3.435"/>

Water retention characteristic



Conductivity characteristic



EVAP : Experiment FL8-2 from file FL8_2.CPY

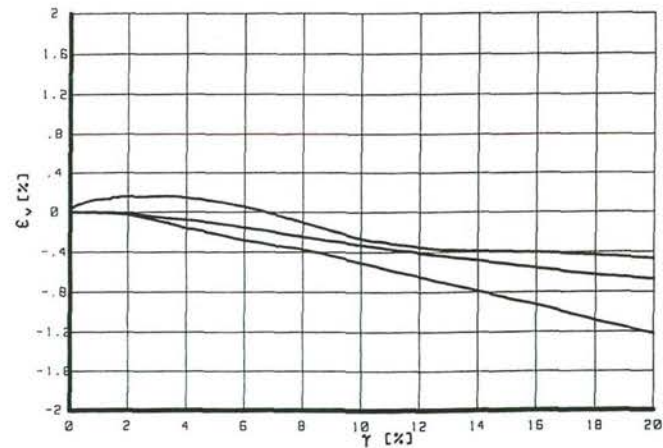
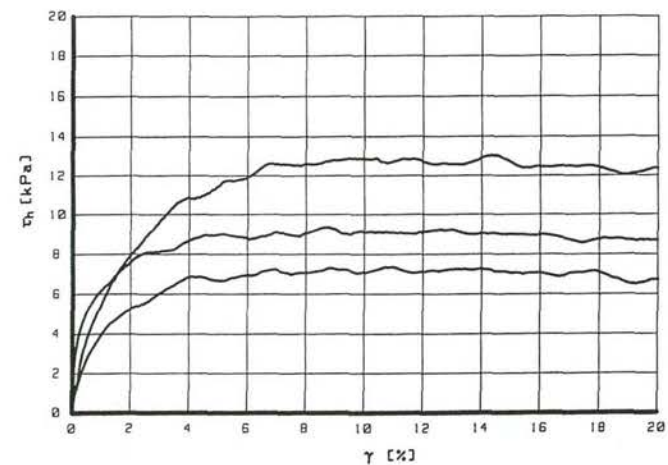
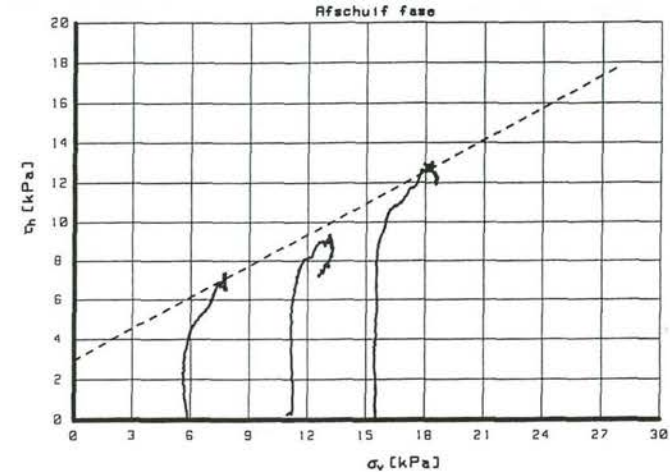
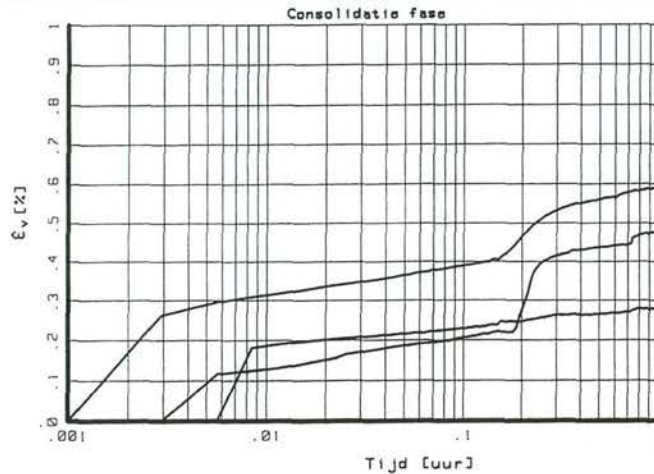
DIM :

Optimized parameters

Point size:

Theta-R:	Theta-S:	Alpha:	n:	l:	m:	Ks:
<input type="text" value="0.050"/>	<input type="text" value="0.282"/>	<input type="text" value="0.0279"/>	<input type="text" value="1.161"/>	<input type="text" value="-3.450"/>	<input type="text" value="0.139"/>	<input type="text" value="37.557"/>

Bijlage 7 Resultaten simple shear testen



Fase	1	2	3
Gegevens			
Sigma V cons. [kPa]	5.00	10.00	15.00
Gew voor cons. [gr]	112.60	110.00	112.70
Diameter [cm]	6.30	6.30	6.30
Waterg. voor cons. [%]	22.57	18.74	24.83
Waterg. na proef [%]	35.61	32.67	33.52
Hoogte voor cons. [cm]	2.20	2.20	2.20
Hoogte voor proef [cm]	2.19	2.19	2.19
Volgew. init [gr/cm ³]	1.64	1.60	1.64
Afschuifsnelh. [mm/u]	1.60	1.60	1.60
Grondsoort	ZAND STERK SILTIG		
Phi [graad]	28.00		
C [kN/m ²]	2.96		



Postbus 60
2600 AB Delft Nederland

Telefoon (015) 269 35 00
Telefax (015) 201 00 21

22 Apr 2002

get.
AS/AVS

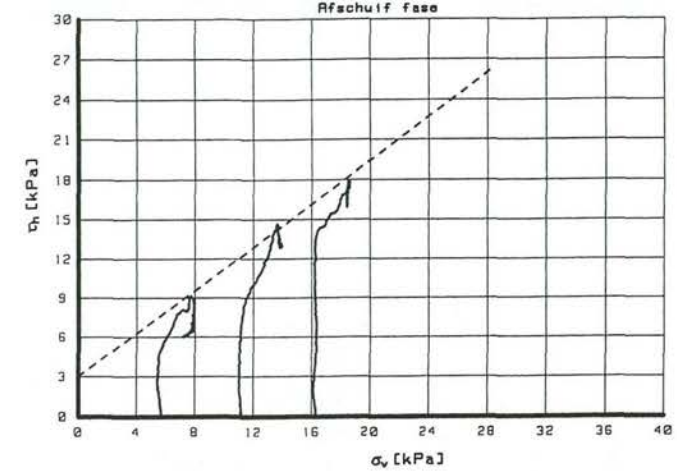
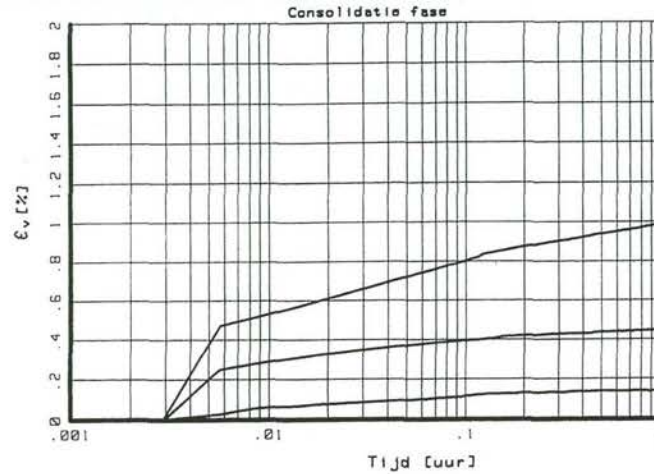
TOETSEN EN VERSTERKEN DIJKEN IJSSSELMEERGEBIED
SIMPLE SHEAR PROEF (SIGMA VERT CONSTANT)
Boring 02 ; Monster 4 ; Diepte 0.25-0.45 m-Mv

CO-401850

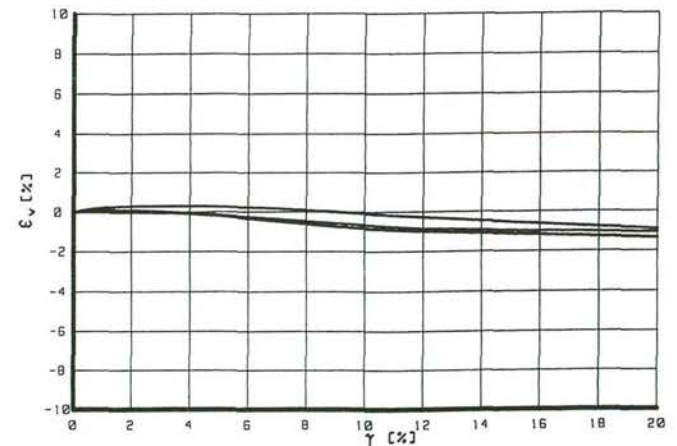
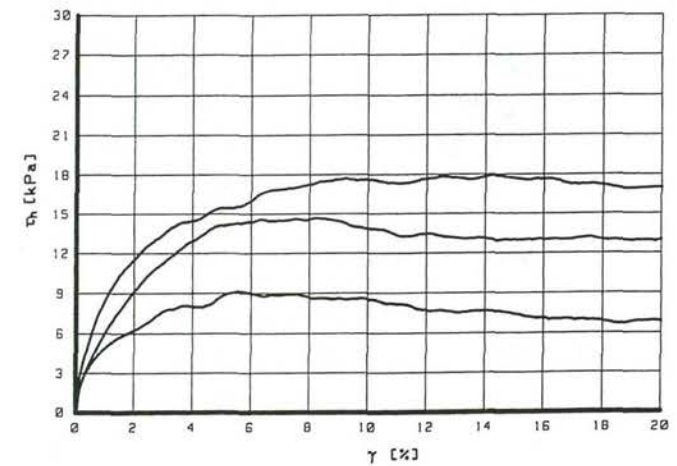
geo.

BIJL: C2

form.
A3



Fase	1	2	3
Gegevens			
Sigma V cons. [kPa]	5.00	10.00	15.00
Gew voor cons. [gr]	144.60	148.70	148.90
Diameter [cm]	6.30	6.30	6.30
Waterg. voor cons. [%]	12.51	12.96	12.43
Waterg. na proef [%]	16.10	15.50	15.23
Hoogte voor cons. [cm]	2.20	2.20	2.20
Hoogte voor proef [cm]	2.20	2.19	2.18
Volgew. init [gr/cm ³]	2.11	2.17	2.17
Afschuifsnelh. [mm/u]	1.60	1.60	1.60
Grondsoort	LEEM		
Phi [graad]	39.41		
C [kN/m ²]	3.01		



Postbus 52
2600 AB Delft Nederland

Telefoon (015) 268 35 00
Telefax (015) 261 00 21

23 Apr 2002

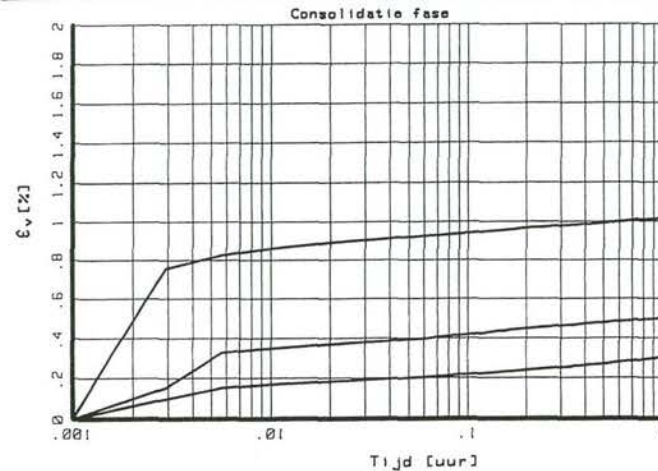
get.
RS/RVS

TOETSEN EN VERSTERKEN DIJKEN IJSSELMEERGEBIED
SIMPLE SHEAR PROEF (SIGMA VERT CONSTANT)
Boring 02 ; Monster 5 ; Diepte 0.95-1.25 m-Mv

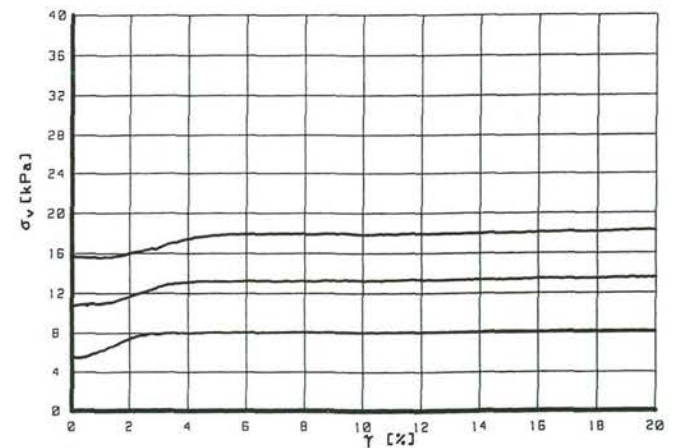
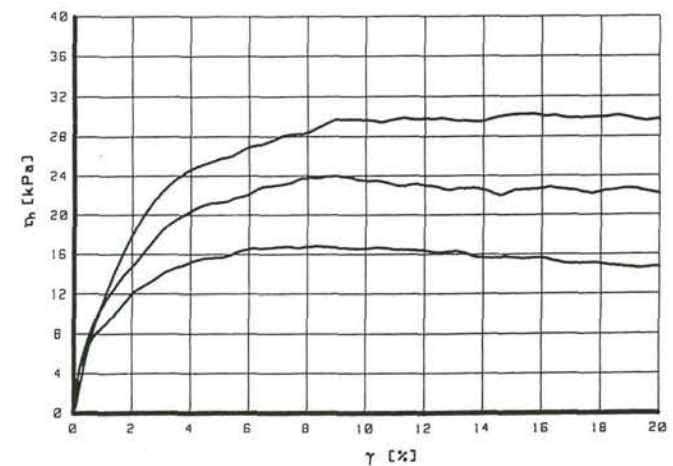
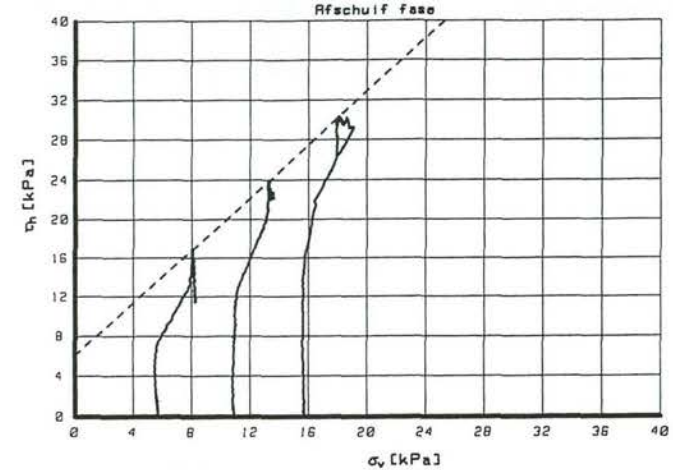
CO-401850

BIJL: C2

geo.
form.
A3



Fase	1	2	3
Gegevens			
Sigma V cons. [kPa]	5.00	10.00	15.00
Gew voor cons. [gr]	140.40	143.00	141.40
Diameter [cm]	6.30	6.30	6.30
Waterg. voor cons. [%]	11.18	11.24	10.97
Waterg. na proef [%]	11.15	10.45	11.02
Hoogte voor cons. [cm]	2.20	2.20	2.20
Hoogte voor proef [cm]	2.19	2.19	2.18
Volgew. init [gr/cm ³]	2.05	2.09	2.06
Afschuifsnelh. [mm/u]	1.60	1.60	1.60
Grondsoort	LEEM		
Phi [graad]	53.31		
C [kN/m ²]	6.04		



Postbus 60
2500 AB Delft Nederland

Telefoon (015) 260 35 00
Telefax (015) 261 00 21

18 Apr 2002

get.
RS/RVS

TOETSEN EN VERSTERKEN DIJKEN IJSSELMEERGEBIED
SIMPLE SHEAR PROEF (SIGMA VERT CONSTANT)
Boring 03 ; Monster 8 ; Diepte 0.82-1.02 m-Mv

CO-401850

geo.

BIJL: C1

form.
A3

Bijlage 8 Resultaten direct shear testen

C H U I F P R O E F
Rond monster

Opdracht nr.: 401850 P.L.: SFS
Monster nr. : 2A
Boring nr. : 01
Diepte : 0.95-1.15-M-MV
Grondsoort : KEILEEM / ZAND
Locatie : -
Laborant : HSD / JT
Datum : 23-04-2002

Monster <A>

Volumieke massa : 2.12 g/cm³
Diameter monster : 65.00 mm
Vertikale belasting : 5.00 kN/m²
Max. hor. belasting : 7.20 kg
Hor. verplaatsing bij max. bel. : 0.98 mm

Oppervlak monster : 3318.31 mm²
Contact oppervlak : 3254.93 mm²
Schuif spanning : 21.70 kN/m²

Monster

Volumieke massa : 2.13 g/cm³
Diameter monster : 65.00 mm
Vertikale belasting : 10.00 kN/m²
Max. hor. belasting : 11.20 kg
Hor. verplaatsing bij max. bel. : 1.30 mm

Oppervlak monster : 3318.31 mm²
Contact oppervlak : 3233.81 mm²
Schuif spanning : 33.98 kN/m²

Monster <C>

Volumieke massa : 2.14 g/cm³
Diameter monster : 65.00 mm
Vertikale belasting : 20.00 kN/m²
Max. hor. belasting : 18.80 kg
Hor. verplaatsing bij max. bel. : 0.98 mm

Oppervlak monster : 3318.31 mm²
Contact oppervlak : 3254.93 mm²
Schuif spanning : 56.66 kN/m²

RESULTATEN :

Interne wrijvings hoek (fi) : 66.70 graden
Cohesie : 10.36 kN/m²

C H U I F P R O E F
Rond monster

Opdracht nr.: 401850 P.L.: SFS
Monster nr. : 2 AA
Boring nr. : 01
Diepte : 0.95-1.15-M-MV
Grondsoort : ZAND / KEILEEM
Locatie : -
Laborant : HSD / JT
Datum : 23-04-2002

Monster <A>

Volumieke massa : 2.12 g/cm³
Diameter monster : 65.00 mm
Vertikale belasting : 5.00 kN/m²
Max. hor. belasting : 7.00 kg
Hor. verplaatsing bij max. bel. : 0.98 mm

Oppervlak monster : 3318.31 mm²
Contact oppervlak : 3254.93 mm²
Schuif spanning : 21.10 kN/m²

Monster

Volumieke massa : 2.13 g/cm³
Diameter monster : 65.00 mm
Vertikale belasting : 10.00 kN/m²
Max. hor. belasting : 10.00 kg
Hor. verplaatsing bij max. bel. : 0.98 mm

Oppervlak monster : 3318.31 mm²
Contact oppervlak : 3254.93 mm²
Schuif spanning : 30.14 kN/m²

Monster <C>

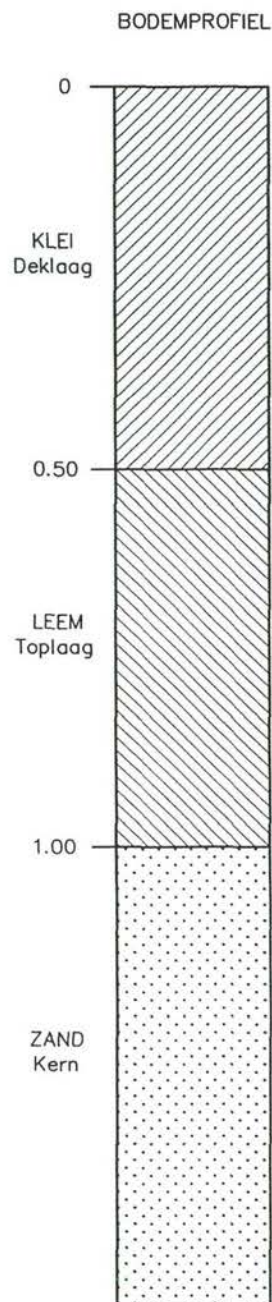
Volumieke massa : 2.14 g/cm³
Diameter monster : 65.00 mm
Vertikale belasting : 20.00 kN/m²
Max. hor. belasting : 17.40 kg
Hor. verplaatsing bij max. bel. : 1.14 mm

Oppervlak monster : 3318.31 mm²
Contact oppervlak : 3244.21 mm²
Schuif spanning : 52.61 kN/m²

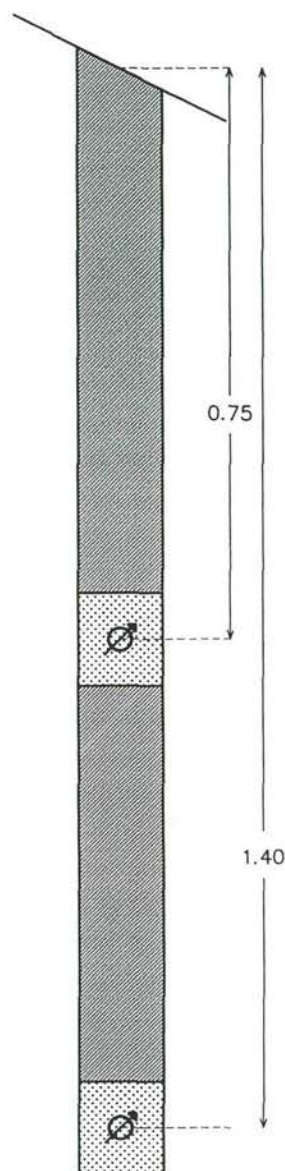
RESULTATEN :

Interne wrijvings hoek (fi) : 64.77 graden
Cohesie : 9.86 kN/m²

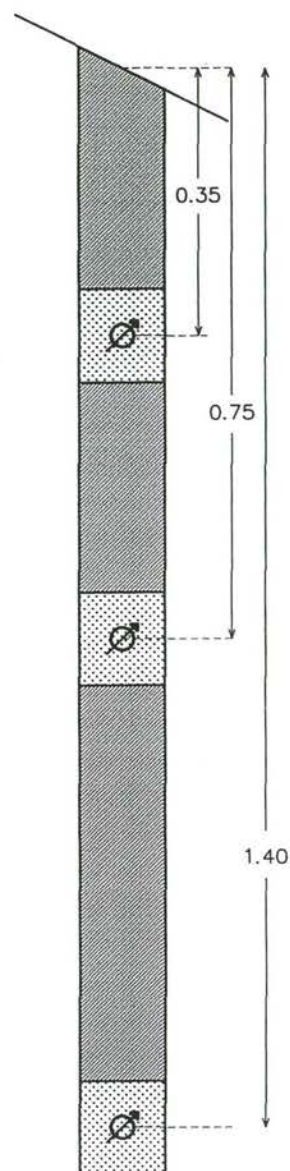
Bijlage 9 Plaatsingsgegevens tensiometers



LOKATIES T3, T4 en T5



LOKATIES T1 en T2



Bestand: b-fig-9 .dwg
Afdeling: 323
Gewijzigd: 2002-06-12



Postbus 69, 2600 AB DELFT
Stieltjesweg 2, 2628 CK DELFT

Telefoon (015) 269 35 00
Telefax (015) 261 08 21

Homepage:
www.geodelft.nl

datum
2002-06-12

get.
Mar

GEAVANCEERDE TOETS "AFSCHUIVING KLEIBEKLEDING BINNENTALUD"
IJSELMEERDIJK KM22.94 - KM 22.97

CO- 401850

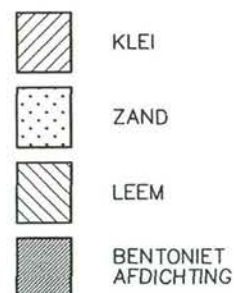
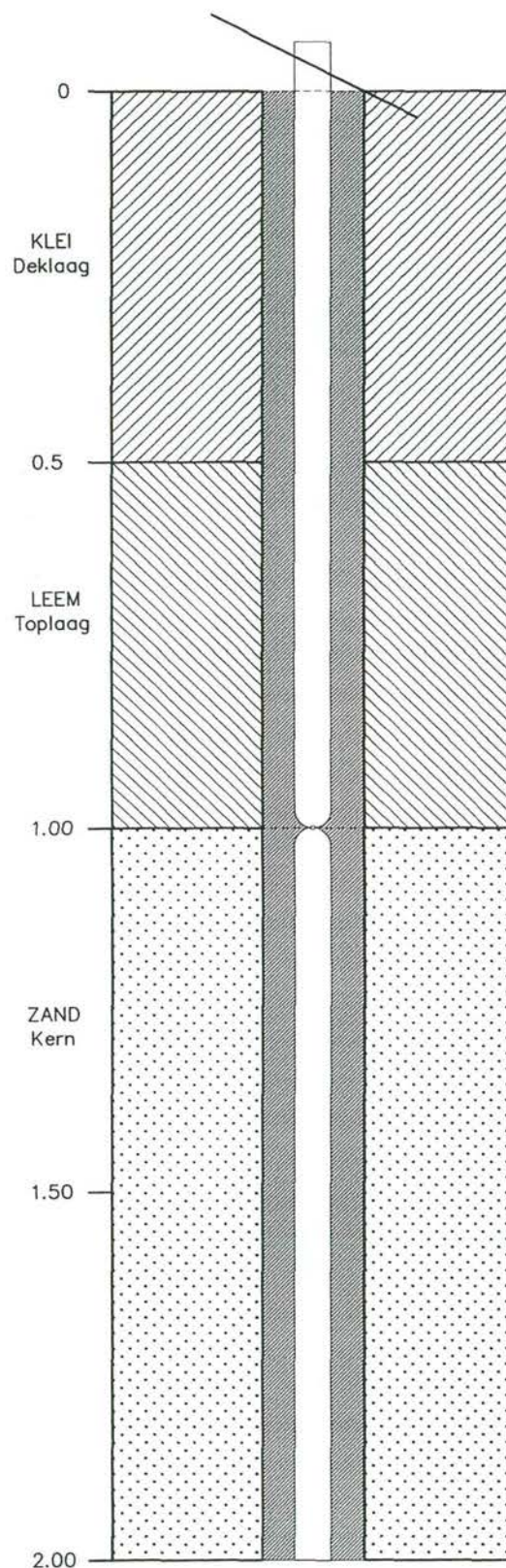
gez.

PLAATSINGSGEGEVENS TENSIOETERS

BIJL. 9

form.
A4

Bijlage 10 Plaatsingsgegevens hellingmeters



Filenaam: b-fig-10 .dwg
 Afdeling: 323
 Gewijzigd: 2002-06-12



Postbus 69, 2600 AB DELFT
 Stieltjesweg 2, 2628 CK DELFT

Telefoon (015) 269 35 00
 Telefax (015) 261 08 21

Homepage:
www.geodelft.nl

datum	get.
2002-06-12	Mar

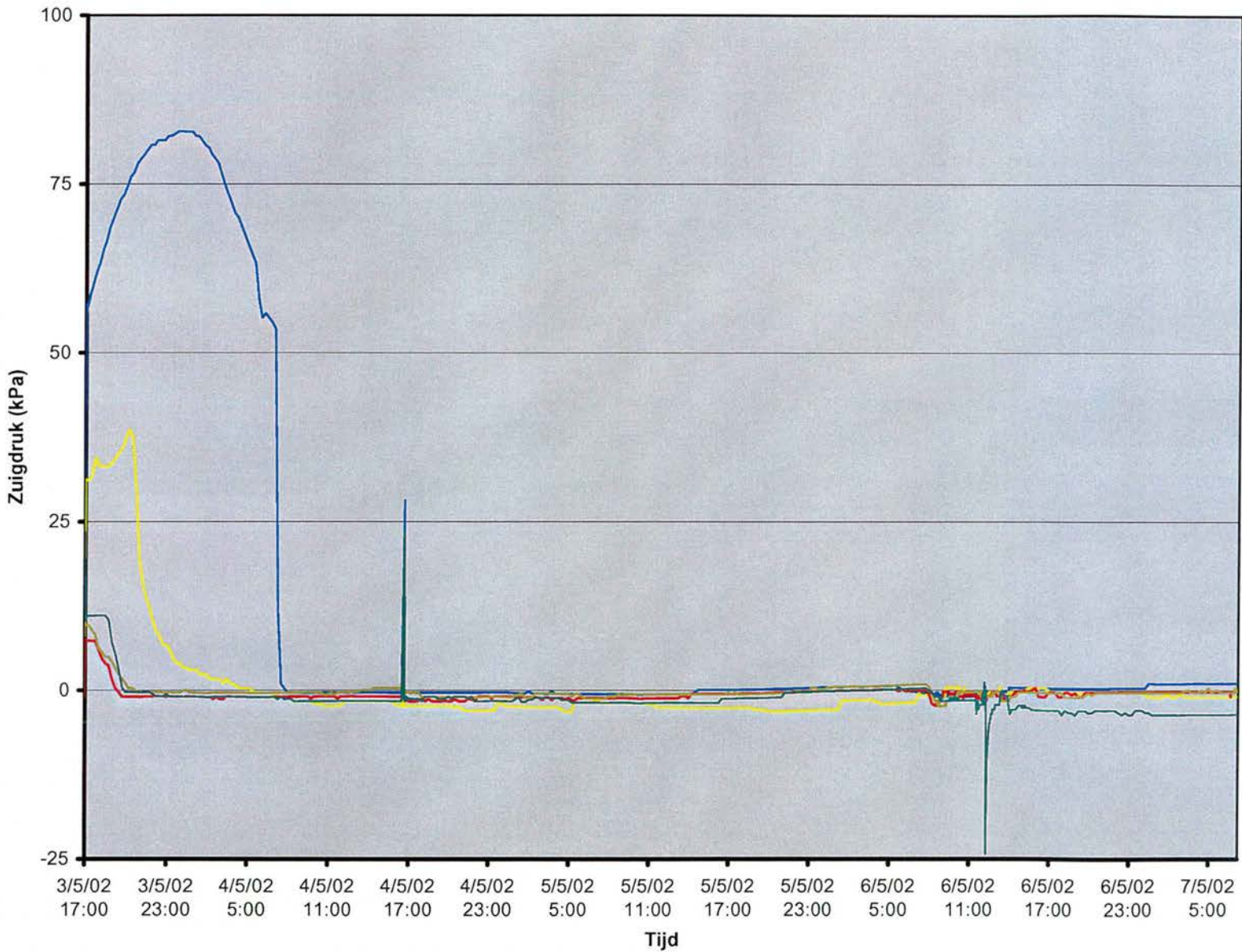
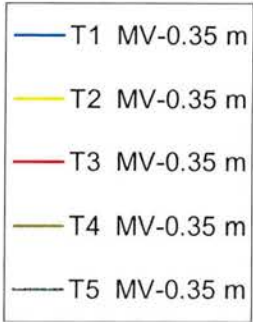
GEAVANCEERDE TOETS "AFSCHUIVING KLEIBEKLEDING BINNENTALUD"
 IJSSELMEERDIJK KM22.94 – KM 22.97

gez.
CO- 401850

PLAATSINGSGEGEVENS HELLINGMETER

form.
BIJL. 10 A4

Bijlage 11 Resultaten waterspanningsmetingen



Stieltjesweg 2, 2628 CK DELFT
Postbus 69, 2600 AB DELFT
Telefoon (015) 269 35 00
Telefax (015) 261 08 21
Homepage: www.geodelft.nl

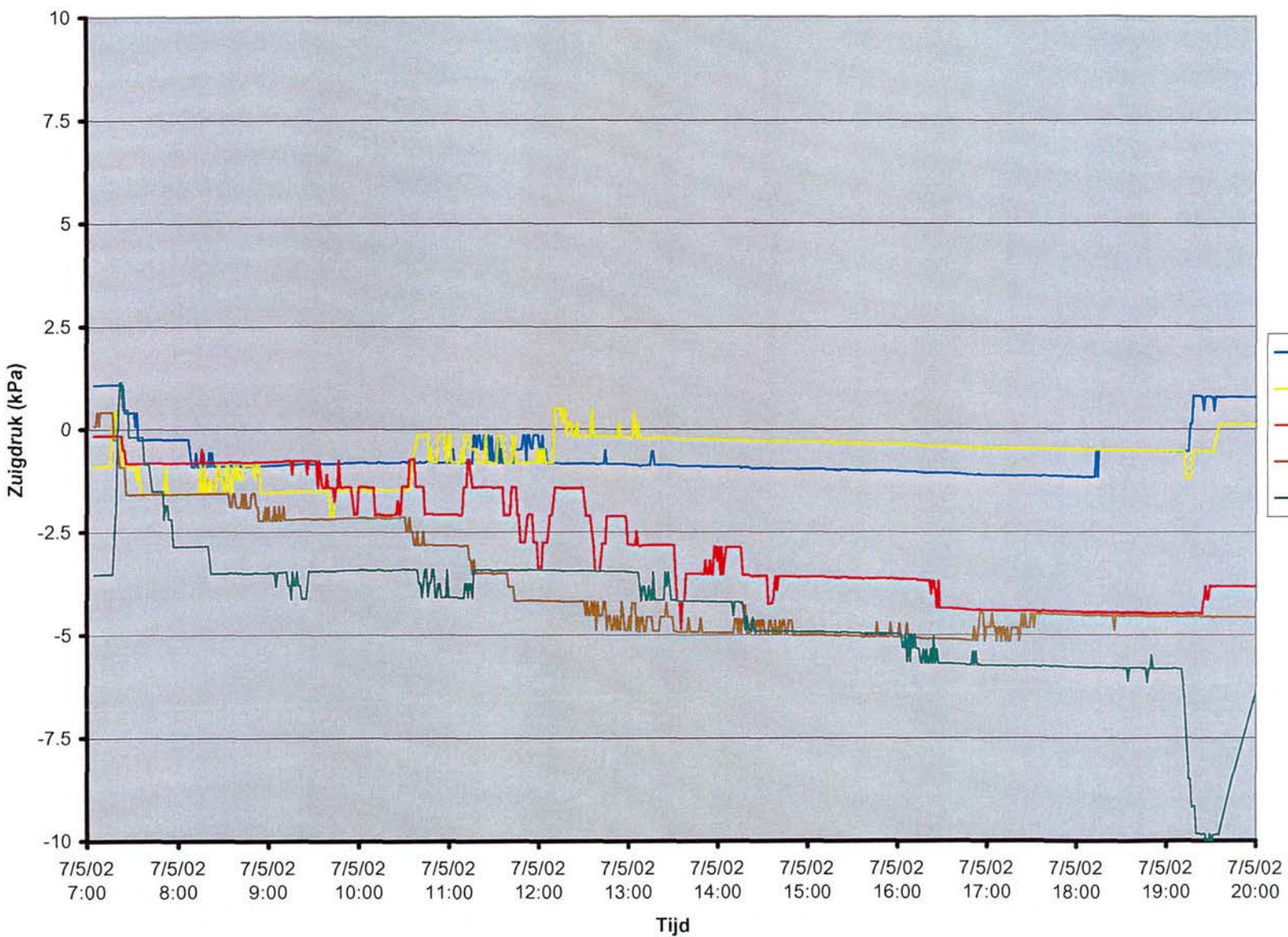
GEAVANCEERDE TOETS "AFSCHUIVING KLEIBEKLEDING
BINNENTALUD" IJSSELMEERDIJK KM 22.94 - KM 22.97

WATERSPANNINGSMETINGEN VOOR PROEF (MV-0.35 METER)

Datum
2002-06-10
get.
Swi

CO - 401850
gez.

BlJL. 11.1
form.
A4



Stilleweg 2, 2628 CK DELFT
Postbus 69, 2600 AB DELFT

Telefoon (0)15 269 35 00
Telefax (0)15 261 08 21

Homepage:
www.geodelft.nl

Datum
2002-06-10

get.
Swi

GEAVANCEERDE TOETS "AFSCHUIVING KLEIBEKLEDING

BINNENTALUD" IJSSELMEERDIJK KM 22.94 - KM 22.97

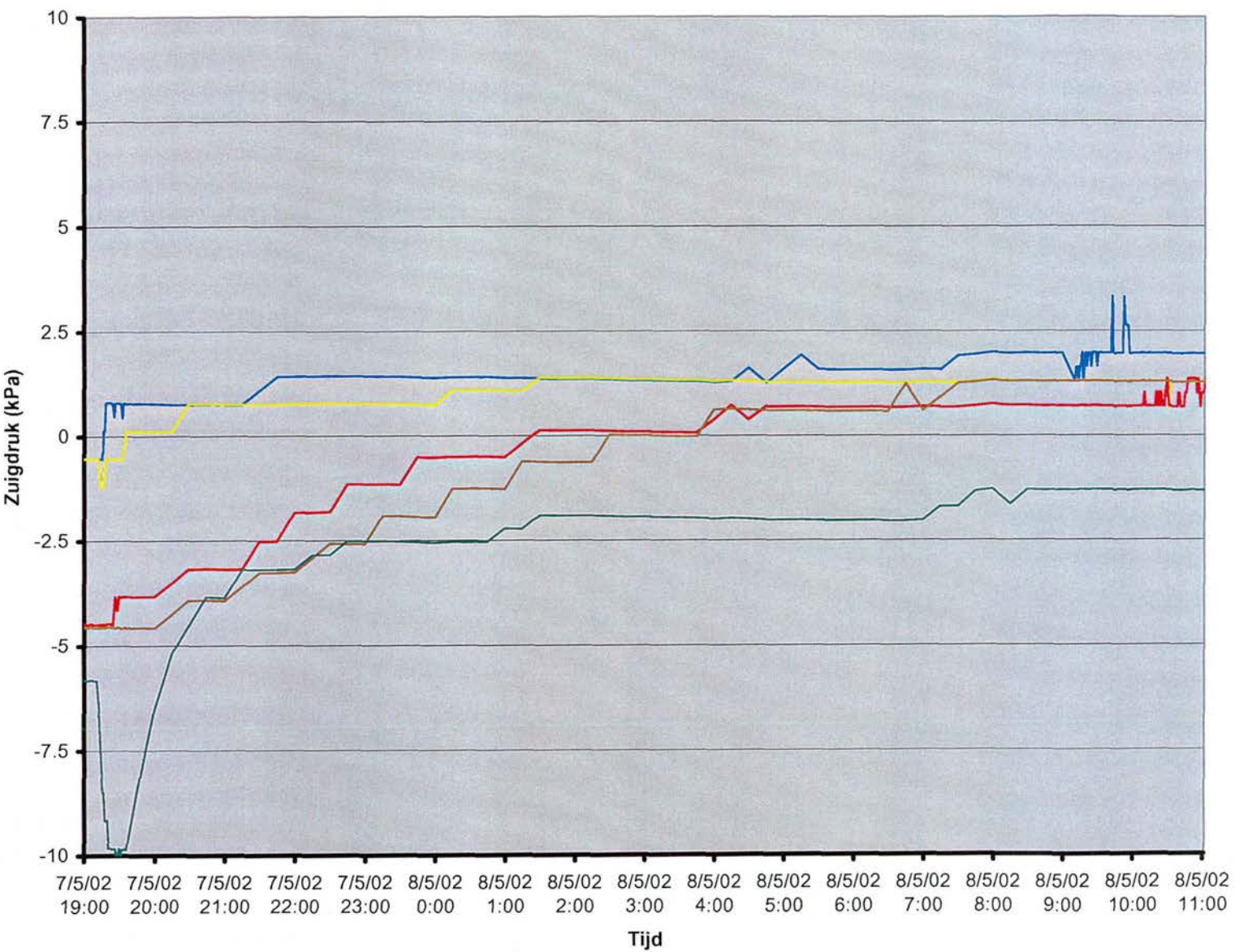
CO - 401850

gez.

WATERSPANNINGSMETINGEN TIJDENS PROEF (MV-0.35 METER)

Blz. 11.2

form.
A4



- T1 MV-0.35 m
- T2 MV-0.35 m
- T3 MV-0.35 m
- T4 MV-0.35 m
- T5 MV-0.35 m



Stillefsweg 2, 2628 CK DELFT
Postbus 69, 2600 AB DELFT
Telefoon (015) 269 35 00
Telefax (015) 261 08 21
Homepage: www.geodelft.nl

Datum
2002-06-10

get.
Swi

GEAVANCEERDE TOETS "AFSCHUIVING KLEIBEKLEDING
BINNENTALUD" IJSSELMEERDIJK KM 22.94 - KM 22.97

CO - 401850

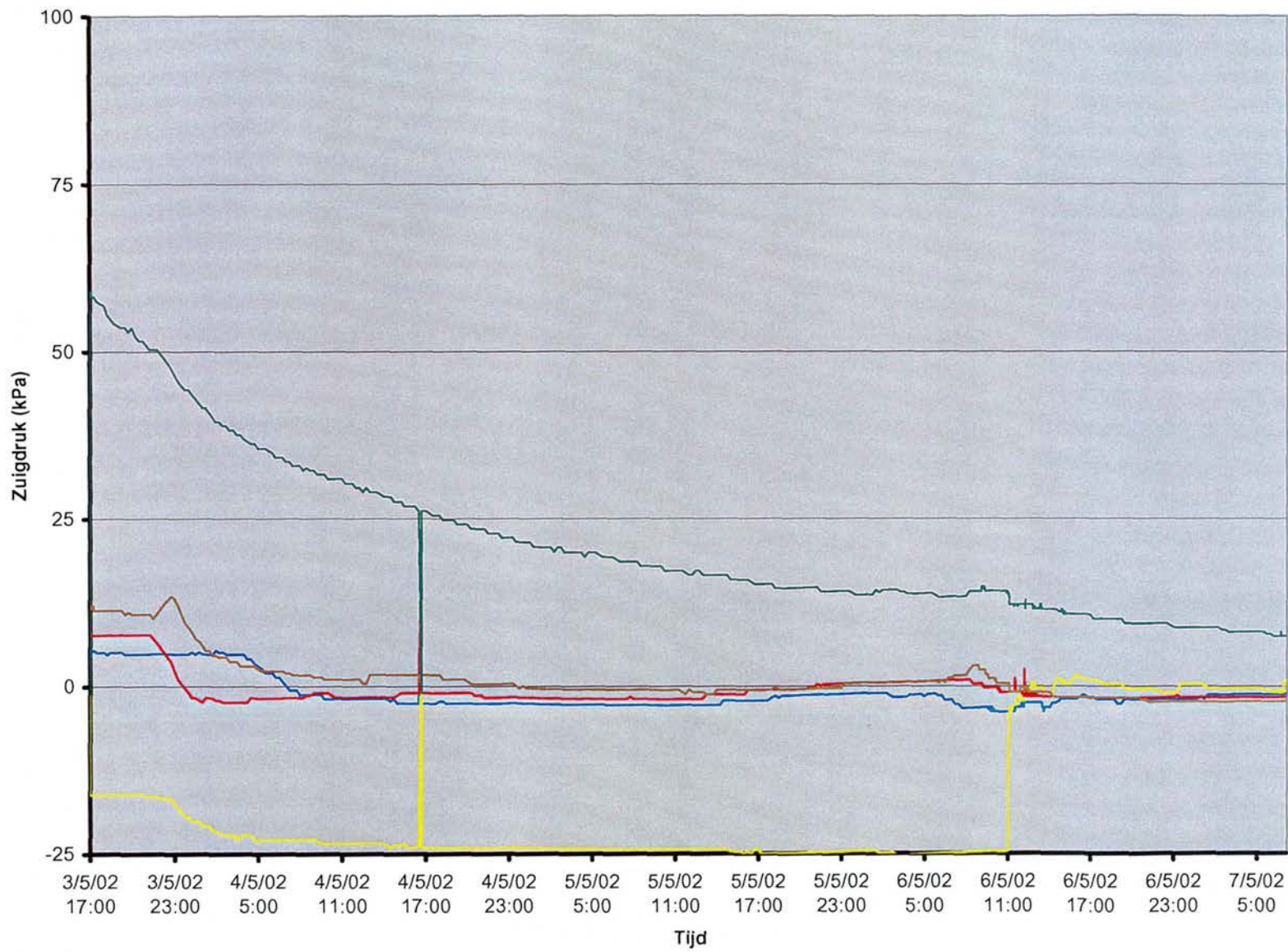
gez.

WATERSPANNINGSMETINGEN NA PROEF (MV-0.35 METER)

BIJL. 11.3

form.
A4

- T1 MV-0.75 m
- T2 MV-0.75 m
- T3 MV-0.75 m
- T4 MV-0.75 m
- T5 MV-0.75 m

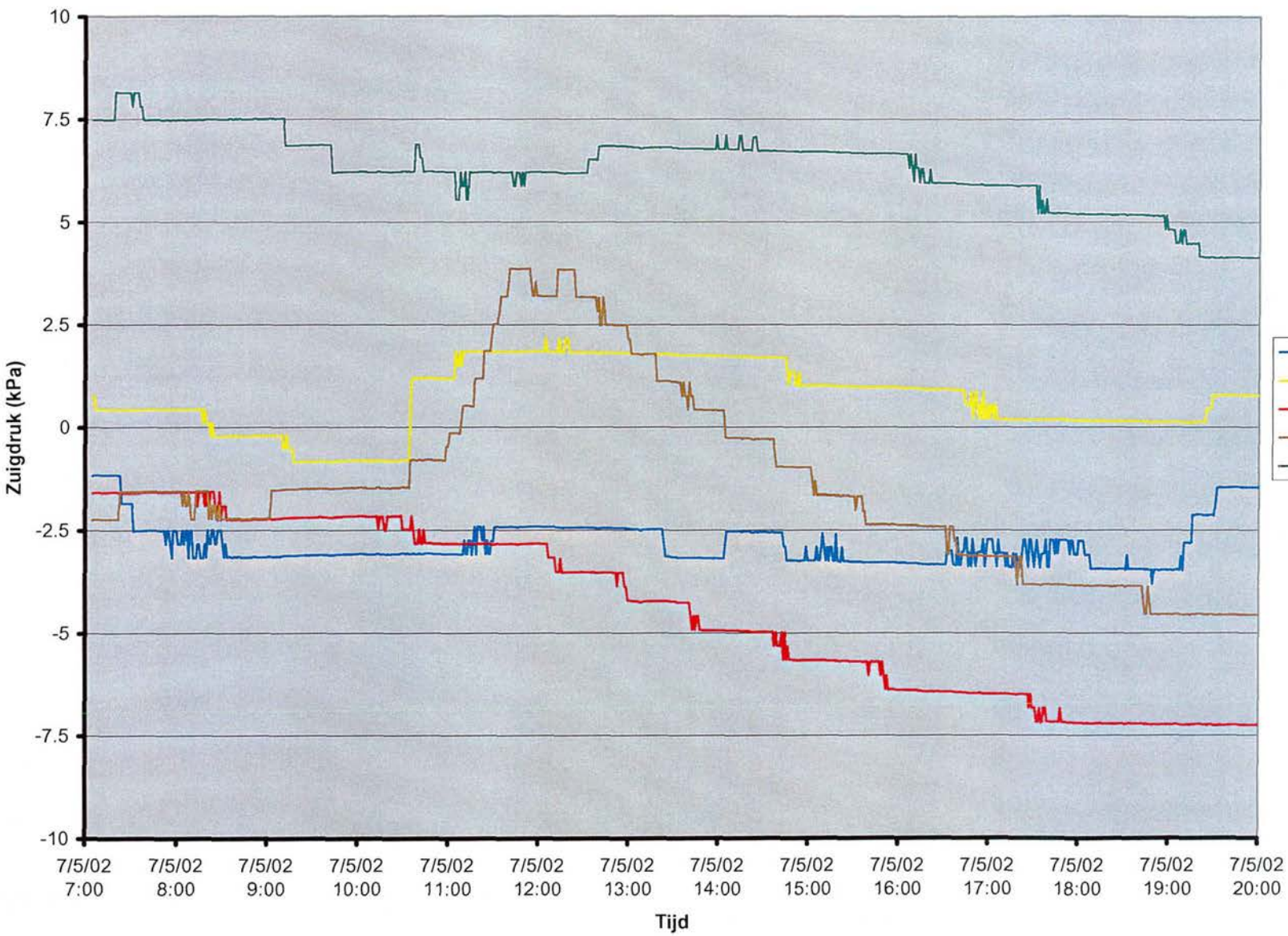


Stiefjesweg 2, 2628 CK DELFT
Postbus 69, 2600 AB DELFT
Telefoon (015) 269 35 00
Telefax (015) 261 08 21
Homepage: www.geodelft.nl

GEAVANCEERDE TOETS "AFSCHUIVING KLEIBEKLEDING
BINNENTALUD" IJSSELMEERDIJK KM 22.94 - KM 22.97
WATERSPANNINGSMETINGEN VOOR PROEF (MV-0.75 METER)

Datum		2002-06-10	get.
CO - 401850			Swi
Bijl. 11.4			
A4			form.

- T1 MV-0.75 m
- T2 MV-0.75 m
- T3 MV-0.75 m
- T4 MV-0.75 m
- T5 MV-0.75 m



Stillefsweg 2, 2628 CK DELFT
Postbus 69, 2600 AB DELFT
Telefoon (015) 269 35 00
Telefax (015) 261 08 21
Homepage: www.geodelft.nl

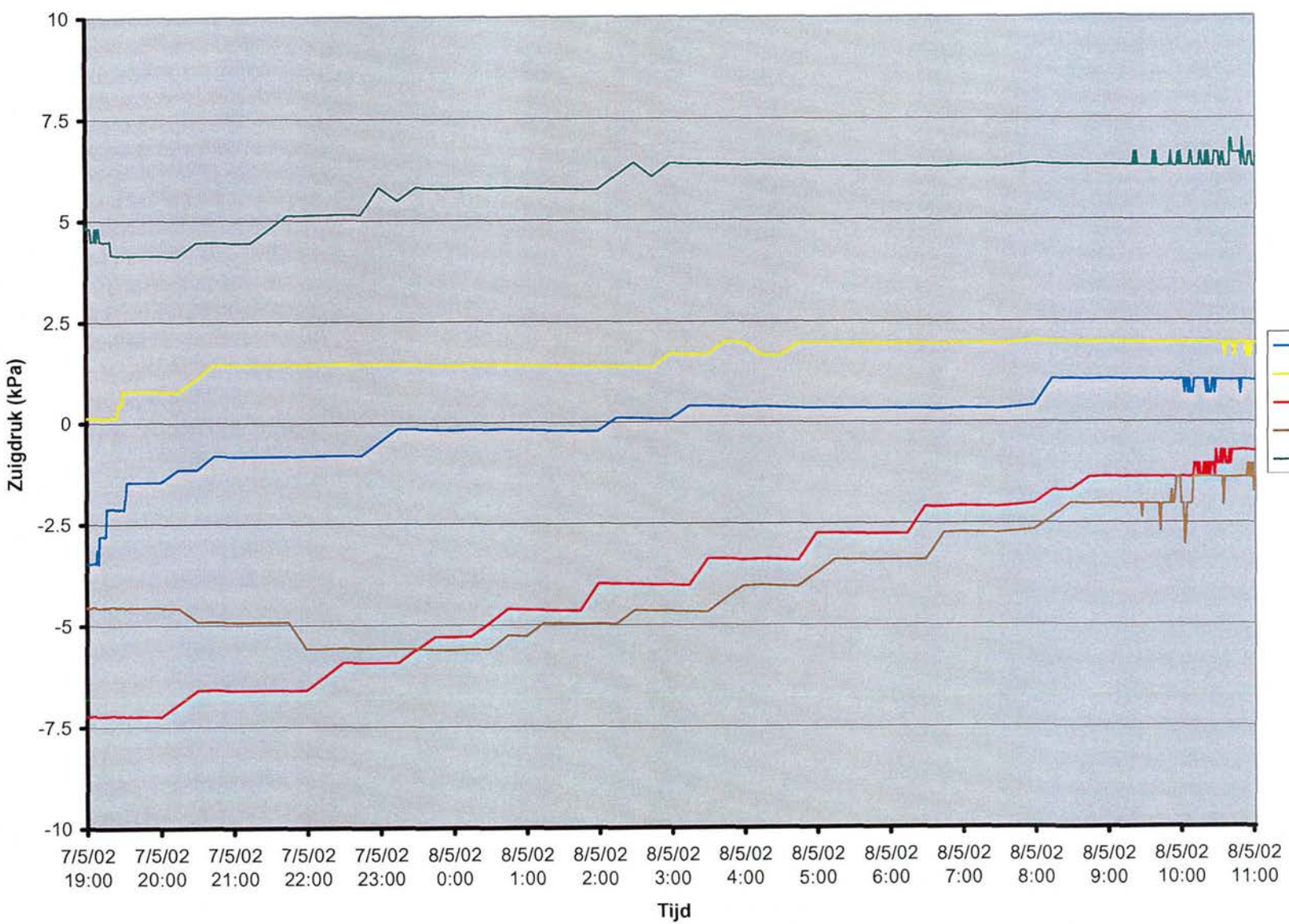
GEAVANCEERDE TOETS "AFSCHUIVING KLEIBEKLEDING
BINNENTALUD" IJSELMEERDIJK KM 22.94 - KM 22.97
WATERSPANNINGSMETINGEN TIJDENS PROEF (MV-0.75 METER)

Datum
2002-06-10
gel.
Swi

CO - 401850

BIJL. 11.5

gel.
A4



Stieljesweg 2, 2628 CK DELFT
Postbus 69, 2600 AB DELFT

Telefoon (015) 269 35 00
Telefax (015) 261 08 21

Homepage:
www.geodelft.nl

Datum:
2002-06-10

get.
Swi

GEAVANCEERDE TOETS "AFSCHUIVING KLEIBEKLEDING
BINNENTALUD" IJSSELMEERDIJK KM 22.94 - KM 22.97

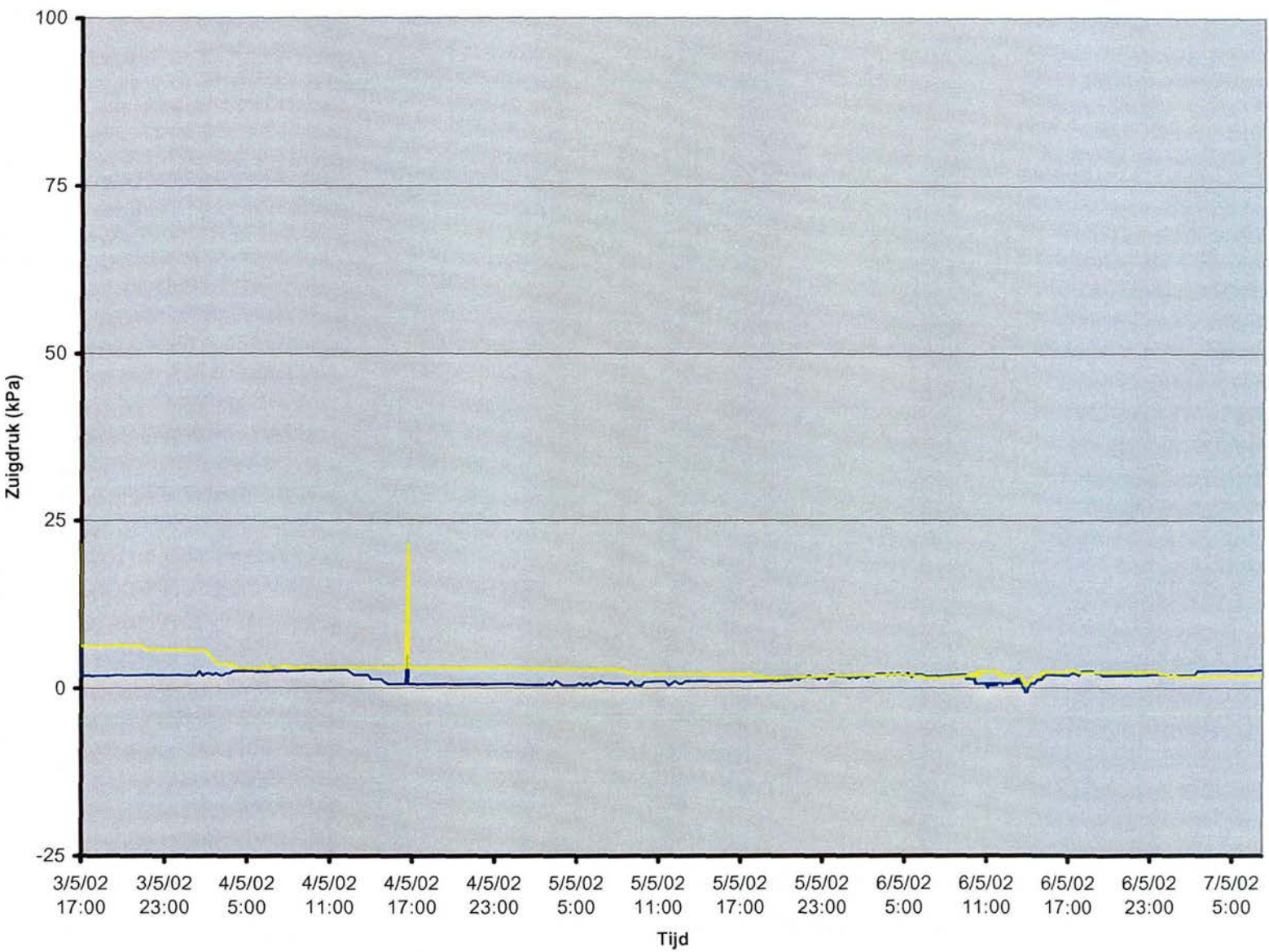
CO - 401850

gez.

WATERSPANNINGSMETINGEN NA PROEF (MV-0.75 METER)

BIJL. 11.6

form.
A4



T1 MV-1.40 m
T2 MV-1.40 m



Stijllesweg 2, 2628 CK DELFT
Postbus 69, 2600 AB DELFT
Telefoon (015) 269 35 00
Telefax (015) 261 08 21
Homepage: www.geodelft.nl

Datum
2002-06-10

get.
Swi

GEAVANCEERDE TOETS "AFSCHUIVING KLEIBEKLEDING
BINNENTALUD" IJSSELMEERDIJK KM 22.94 - KM 22.97

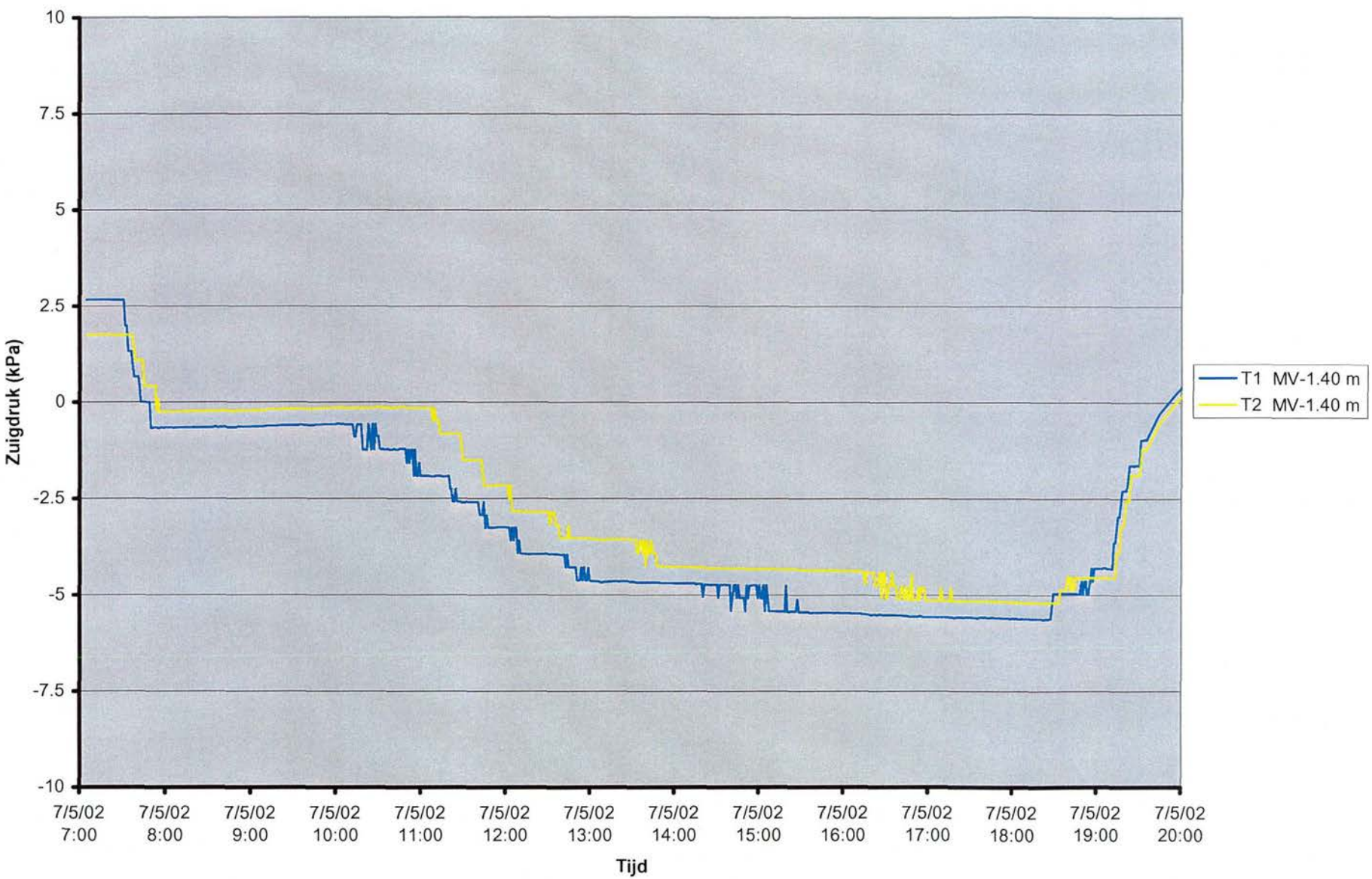
CO - 401850

gez.

WATERSPANNINGSMETINGEN VOOR PROEF (MV-1.40 METER)

BIJL. 11.7

form.
A4



Stieltjesweg 2, 2628 CK DELFT
Postbus 69, 2600 AB DELFT

Telefoon (015) 269 35 00
Telefax (015) 261 08 21

Homepage:
www.geodelft.nl

Datum
2002-06-10

get.
Swi

GEAVANCEERDE TOETS "AFSCHUIVING KLEIBEKLEDING
BINNENTALUD" IJSSELMEERDIJK KM 22.94 - KM 22.97

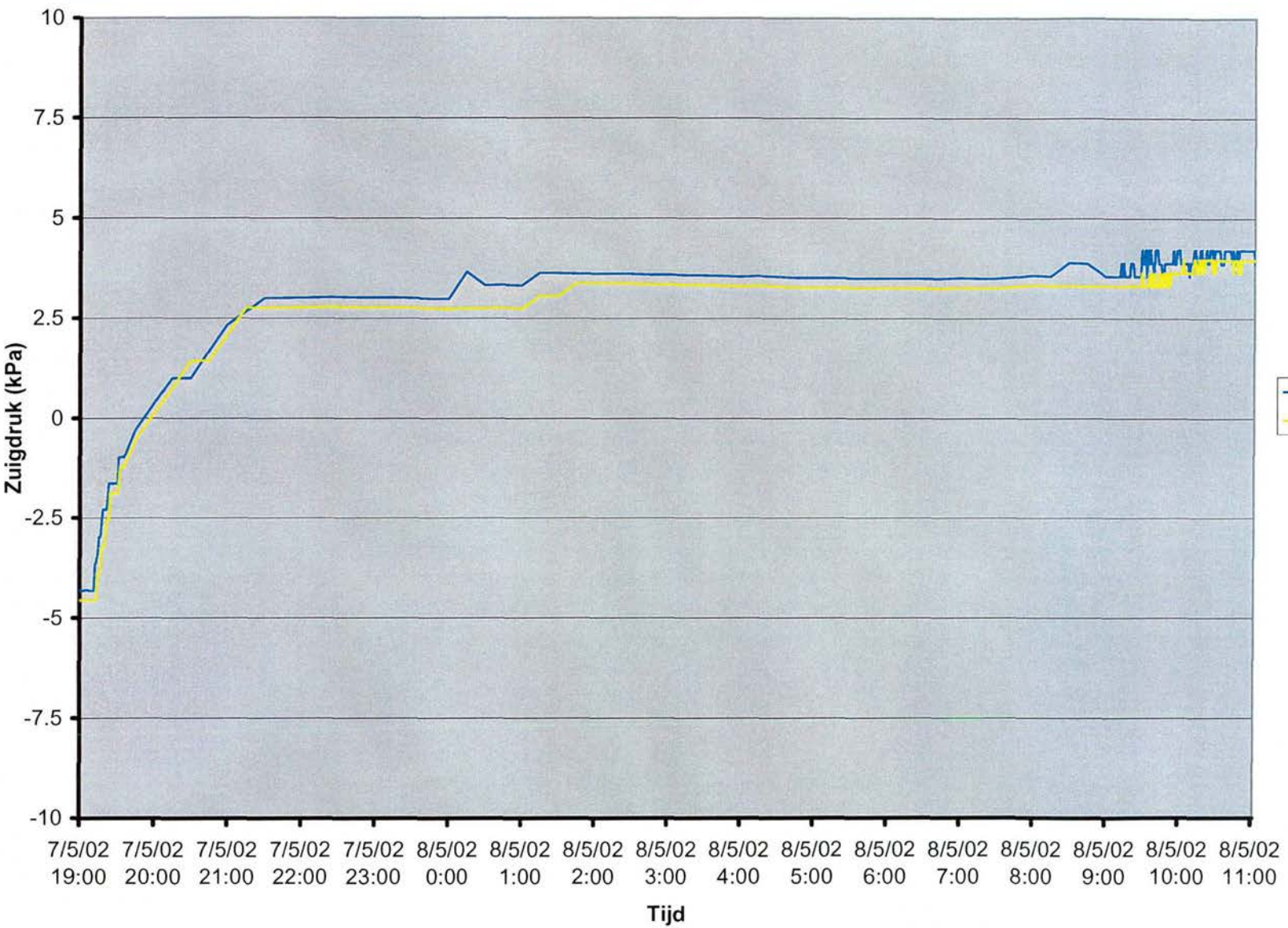
CO - 401850

gez.

WATERSPANNINGSMETINGEN TIJDENS PROEF (MV-1.40 METER)

BIJL. 11.8

form.
A4



Stilleweg 2, 2628 CK DELFT
Postbus 69, 2600 AB DELFT
Telefoon (015) 269 35 00
Telefax (015) 261 08 21
Homepage: www.geodelft.nl

GEAVANCEERDE TOETS "AFSCHUIVING KLEIBEKLEDING
BINNENTALUD" IJSSELMEERDIJK KM 22.94 - KM 22.97

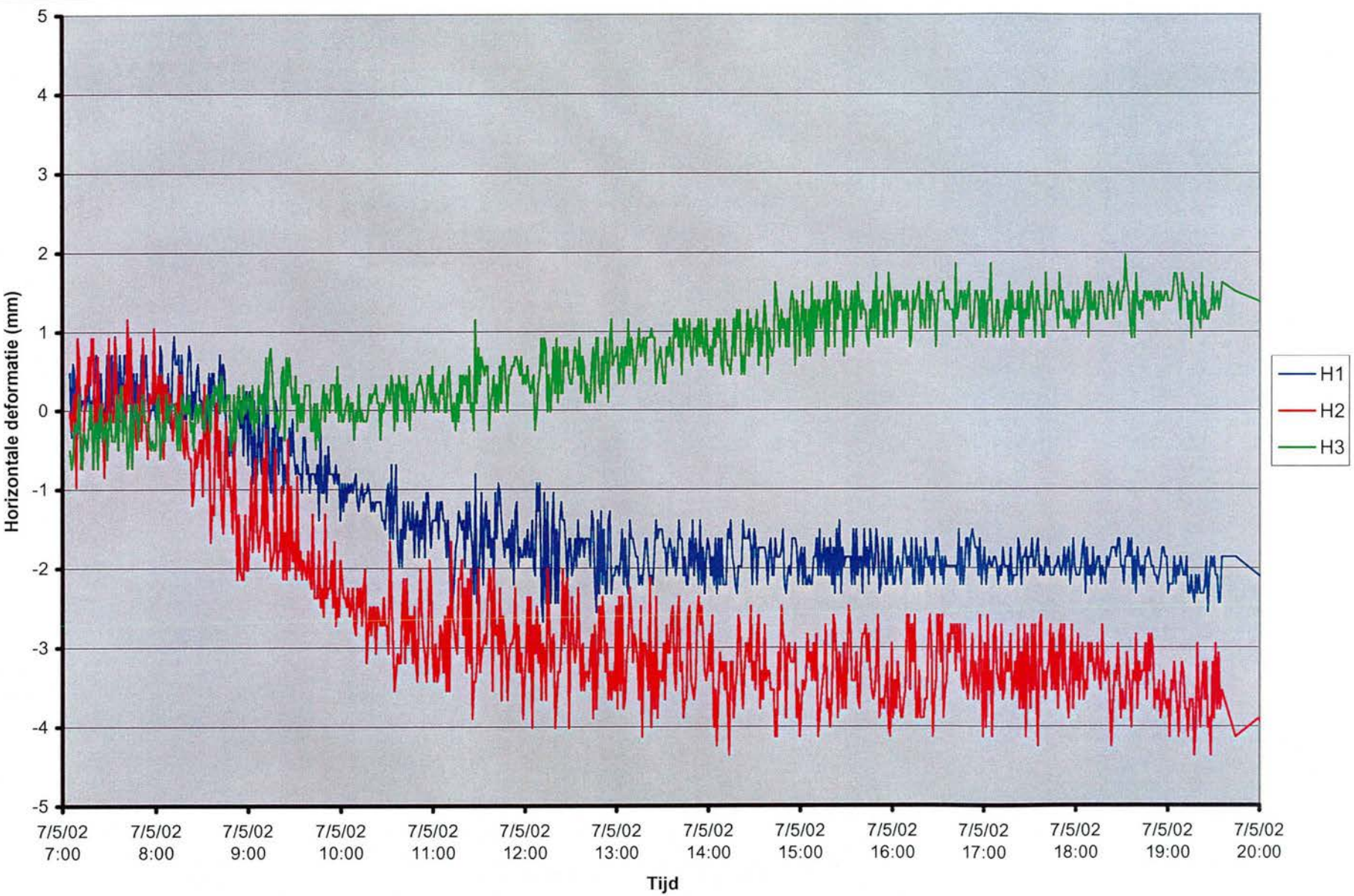
WATERSPANNINGSMETINGEN NA PROEF (MV-1.40 METER)

Datum
2002-06-10
get.
Swi

CO - 401850
gez.

BIJL. 11.9
form.
A4

Bijlage 12 Resultaten horizontale deformatie-metingen



Stillejessweg 2, 2628 CK DELFT
Postbus 69, 2600 AB DELFT

Telefoon (015) 269 35 00
Telefax (015) 261 08 21

Homepage:
www.geodelft.nl

GEAVANCEERDE TOETS "AFSCHUIVING KLEIBEKLEDING
BINNENTALUD" IJSSELMEERDIJK KM 22.94 - KM 22.97

HORIZONTALE DEFORMATIEMETINGEN

Datum
2002-06-10

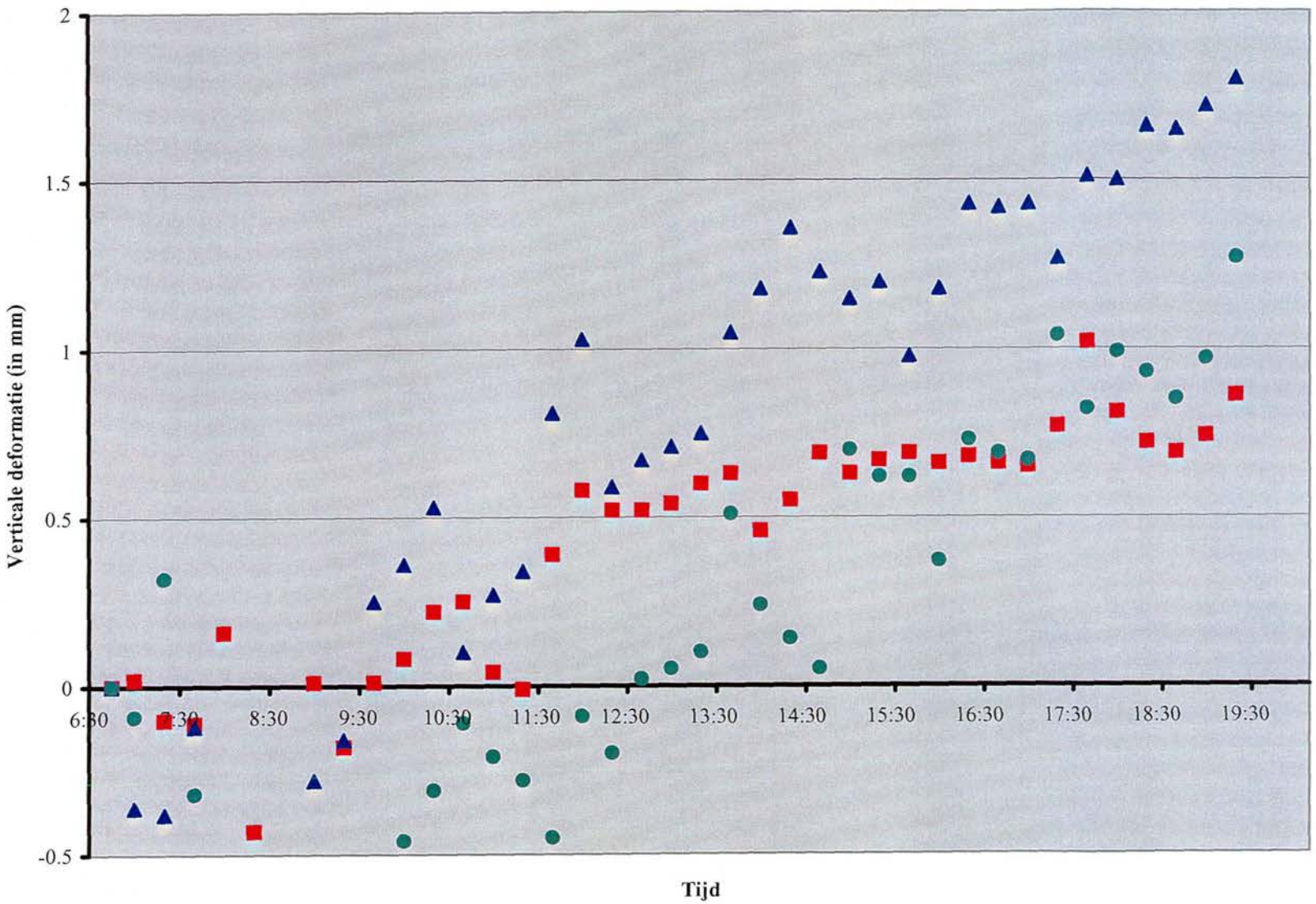
CO - 401850

BIJL. 12

form.
A4

get.
Swi

Bijlage 13 Resultaten verticale deformatie-metingen



Stieltjesweg 2, 2628 CK DELFT
Postbus 69, 2600 AB DELFT
Telefoon (015) 269 35 00
Telefax (015) 261 08 21
Homepage: www.geodelft.nl

GEAVANCEERDE TOETS "AFSCHUIVING KLEIBEKLEDING
BINNENTALUD" IJSSELMEERDIJK KM 22.94 - KM 22.97

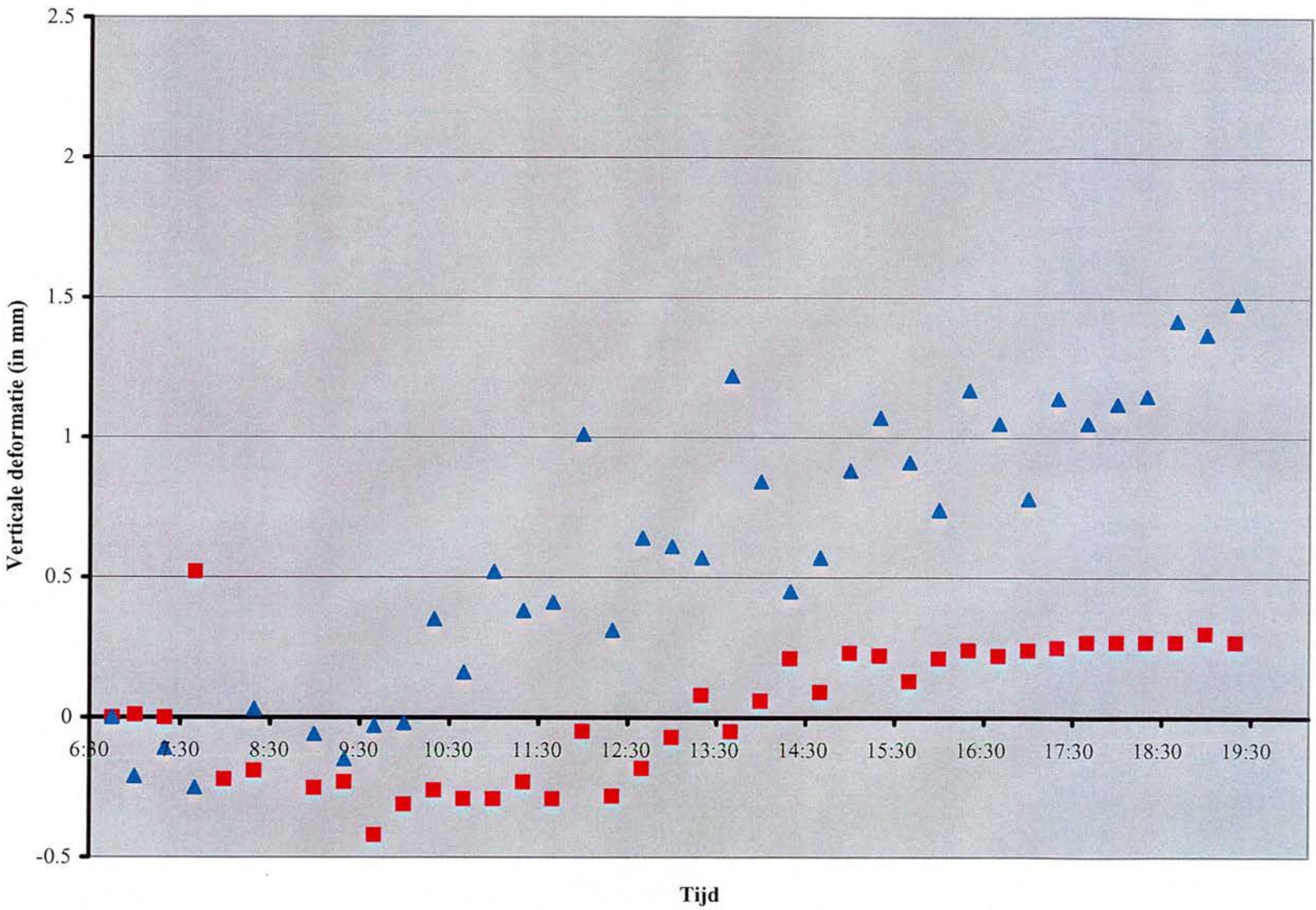
VERTICALE DEFORMATIEMETINGEN

Datum
2002-06-10
get.
Swi

CO - 401850

BIJL. 13.1

form.
A4



Stieltjesweg 2, 2628 CK DELFT
Postbus 69, 2600 AB DELFT

Telefoon (015) 269 35 00
Telefax (015) 261 08 21

Homepage:
www.geodelft.nl

Datum
2002-06-10

gel.
Swi

GEAVANCEERDE TOETS "AFSCHUIVING KLEIBEKLEDING
BINNENTALUD" IJSSELMEERDIJK KM 22.94 - KM 22.97

CO - 401850

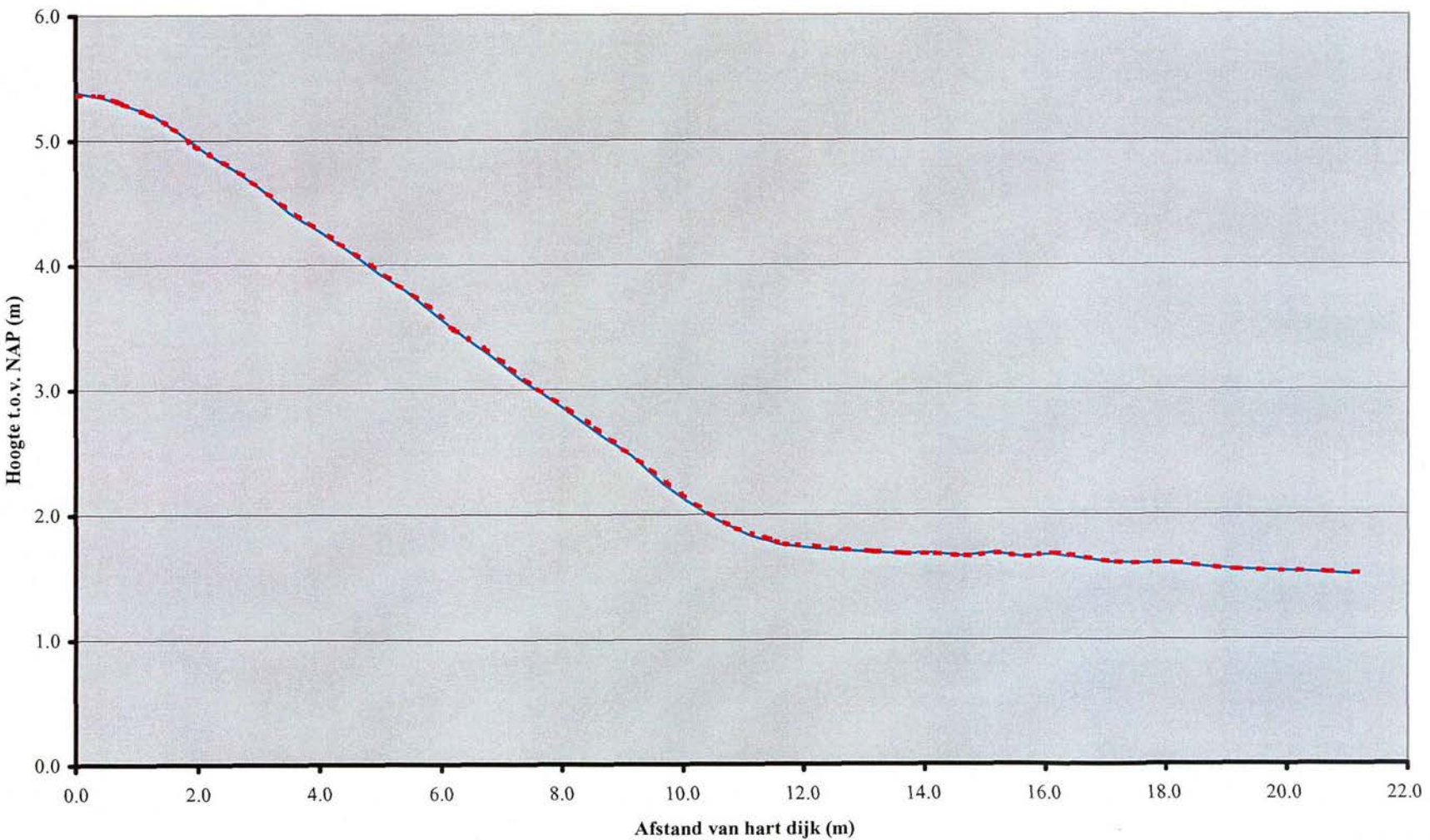
gez.

BIJL. 13.2

form.
A4

VERTICALE DEFORMATIEMETINGEN

Bijlage 14 Ingemeten dwarsprofielen



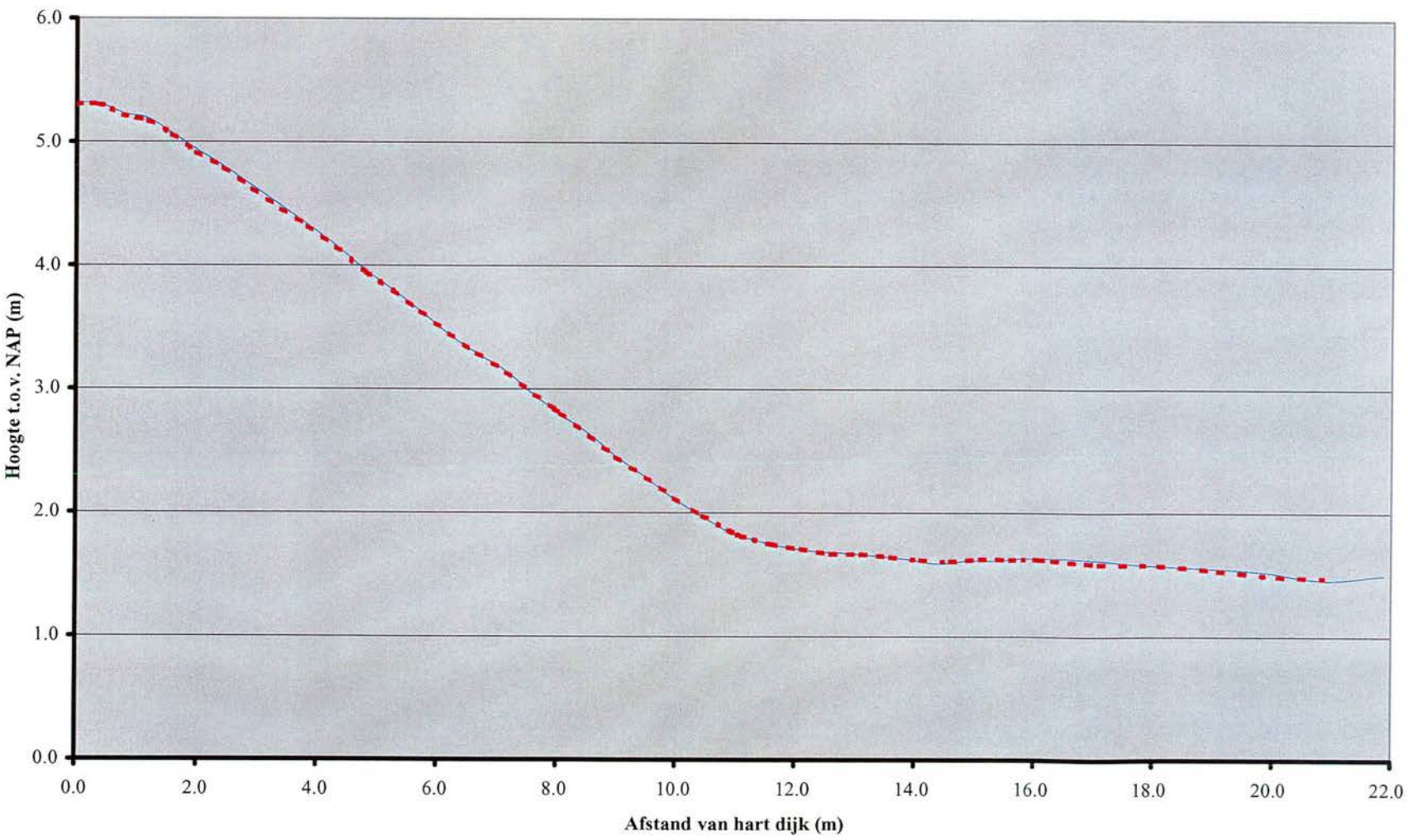
— 3 mei 2002 - - - 8 mei 2002



Stieljesweg 2, 2628 CK DELFT
Postbus 69, 2600 AB DELFT
Telefoon (015) 269 35 00
Telefax (015) 261 08 21
Homepage: www.geodelft.nl

GEAVANCEERDE TOETS "AFSCHUIVING KLEIBEKLEDING
BINNENTALUD" IJSSELMEERDIJK KM 22.94 - KM 22.97
DWARSPROFIEL 1

Datum 2002-06-10		get. Swi
CO - 401850		gez.
BIJL. 14.1		form. A4



— 3 mei 2002 - - - 8 mei 2002



Stieltjesweg 2, 2628 CK DELFT
Postbus 69, 2600 AB DELFT
Telefoon (015) 269 35 00
Telefax (015) 261 08 21
Homepage: www.geodelft.nl

GEAVANCEERDE TOETS "AFSCHUIVING KLEIBEKLEDING BINNENTALUD" IJSSELMEERDIJK KM 22.94 - KM 22.97		Datum 2002-06-10		get. Swi
DWARSPROFIEL 2		CO - 401850	gez.	
		BlJL. 14.2	form.	A4

GeoDelft

Stieltjesweg 2
2628 CK Delft
Postbus 69
2600 AB Delft

Tel (015) 269 35 00
Fax (015) 261 08 21
info@geodelft.nl
www.geodelft.nl