

RIJKSINSTITUUT VOOR VOLKSGEZONDHEID EN MILIEUHYGIENE  
LEIDSCHENDAM

Eindrapport nr. 840388002

DE ANALYSE VAN ZES POMPPROEVEN OP  
KORTE FILTERS, IN DE NUENEN-GROEP  
NABIJ BEST

A. Obdam

maart 1985

Dit onderzoek werd verricht in opdracht en ten laste van het Directoraat  
Generaal voor de Milieuhygiëne,  
Hoofdafdeling Bodem

(Opdrachtbrief nummer 176613 d.d. 27-10-1982)

## Verzendlijst

- 1-3 Directoraat-Generaal voor de Milieuhygiëne, Directie Bodem, Water,  
Stoffen, Hoofdafdeling Bodem
- 4 Secretaris-Generaal van het Ministerie van Welzijn, Volksgezondheid en  
Cultuur
- 5 Plv. Directeur-Generaal van de Milieuhygiëne
- 6 Drs. J. Bisschops RGD-Nuenen
- 7 Ing. J.P. Broertjes RGD-Nuenen
- 8 Dr. S. Jelgersma RGD-Haarlem
- 9 Dr. D.J. Beets RGD-Haarlem
- 10 Drs. W. Dubbelaar RGD-Haarlem
- 11 Dr. J.R. Boersma RU-Utrecht
- 12 Dr. H.J.A. Berendsen RU-Utrecht
- 13 Drs. W. Bleuten RU-Utrecht
- 14 Prof.Dr. J. Terwindt RU-Utrecht
- 15 Ing. J. de Jong RGD-Haarlem
- 16 Ing. J. Lambert Prov. Waterstaat Zeeland
- 17 Dhr. van Straaten Prov. Waterstaat Zuid-Holland
- 18 Drs. van Wijhe
- 19 Ir. B. Sman LGM
- 20 Directie RIVM
- 21 Ing. W.J. Post
- 22 Ir. G.J. Heij
- 23 Ing. G. van Ee
- 24 Ing. A.A.M. Kusse
- 25 Ir. J. Taat
- 26 Ing. A.A. Peeters
- 27 Ir. J.P.G. Loch
- 28 P. Lagas
- 29 Ir. L. Boumans
- 30 P. van Dordrecht
- 31 Mw. H. Mesters
- 32 S. v.d. Berg

33 Ir. H. Thunnissen  
34 Ing. G.P. Beugelink  
35 Dr.Ir. J.W. de Kwaadsteniet  
36 Ir. M.J.H. Pastoors  
37 Ing. Snelting  
38 Ir. C.R. Meinardi  
39 Drs. H.G. v. Waegeningh  
40 Ir. Ir. W. v. Duijvenbooden  
41 Ir. G.J.M. Uffink  
42 Ir. G. Grakist  
43 Drs. K.G. Lamsvelt  
44 Ir. G.A. Bruggeman  
45-46 Auteur  
47-48 Bureau Projecten- en Rapportenregistratie  
49-55 Reserve

Inhoudsopgave:	pagina:
1. Samenvatting en conclusies	9
2. Inleiding	11
3. Het geologisch overzicht	14
4. Technische details	17
5. De algehele geohydrologische situatie-schets	23
6. De resultaten van de pompproeven en de analyse ervan	32
7. Conclusies en aanbevelingen uit de pompproefanalyses	56
8. Literatuur	57
Bijlage: Berekening van de verlaging van de grondwaterstijghoogte in een anisotroop watervoerend pakket, dat zowel aan de onder- als aan de bovenzijde door hydraulische weerstandslagen wordt begrensd, ten gevolge van een continue onttrekking van grondwater aan een puntvormig filter.	

Lijst van figuren:

- fig. 1. De situering van de onderzoekslocatie nabij Best (kaartblad 51B).
- fig. 2. De oriëntering van de boringen in het veld nabij Best.
- fig. 3. Overzicht van de geologische analyse van de bodemverkenning te Best.
- fig. 4. Opzet van de geohydrologische/geohydrochemische verkenning van de onderzoekslocatie te Best.
- fig. 5. Een overzicht van de aardlagen per boring en de hierin gestelde filters.
- fig. 6. Overzicht van de gradiënten van de grondwaterstijghoogte in de omgeving van de onderzoekslocatie, gemiddeld over de periode van 1982-1983 of een deel hiervan.
- fig. 7. Het schema van een pompproef met een kort filter.
- fig. 8. Het tijd-stijghoogteverlagingsverloop in diverse waarnemingsfilters tijdens de pompproef op B2, in het bovenste watervoerende pakket, uitgevoerd op 7 september 1983.
- fig. 9. Het tijd-stijghoogteverlagingsverloop in diverse waarnemingsfilters tijdens de pompproef op B1, in het bovenste watervoerende pakket, uitgevoerd op 12 september 1983.
- fig. 10. Het tijd-stijghoogteverlagingsverloop in diverse waarnemingsfilters tijdens de pompproef op B3, in het middelste watervoerende pakket, uitgevoerd op 9 september 1983.
- fig. 11. Het tijd-stijghoogteverlagingsverloop in diverse waarnemingsfilters tijdens de pompproef op B6, in het onderste watervoerende pakket, uitgevoerd op 8 september 1983.

fig. 12. Het tijd-stijghoogteverlagingsverloop in diverse waarnemingsfilters tijdens de pompproef op B4, in het onderste watervoerende pakket, uitgevoerd op 15 september 1983.

fig. 13. Schutting-profielen van de ondergrond van de proeflokatie, waarin opgenomen de pomp- en waarnemingsfilters.

Lijst van tabellen:

tabel 1: De filterstellingen ten opzichte van de referentie.

tabel 2: Diverse gegevens over de startsituatie van de pompproeven.

tabel 3: Neerslag, gemeten door het KNMI-meetstation Helmond in de periode 4 t/m 16 september 1983.

tabel 4: Grondwaterstanden en -verschillen in diverse peilbuizen rond de proeflokatie ten opzichte van N.A.P.

tabel 5: Onderlinge afstand tussen de peilbuizen in de omgeving van de proeflokatie en de proeflokatie zelf.

tabel 6: Enige gegevens over de "regionale" peilbuizen.

tabel 7: De resultaten van de pompproef op put B2 in het bovenste watervoerende pakket, uitgevoerd op 7 september 1983.

tabel 8: De resultaten van de pompproef op put B5 in het bovenste watervoerende pakket, uitgevoerd op 14 september 1983.

tabel 9: De resultaten van de pompproef op put B1 in het middelste watervoerende pakket, uitgevoerd op 12 september 1983.

tabel 10: De resultaten van de pompproef op put B3 in het middelste watervoerende pakket, uitgevoerd op 9 september 1983.

tabel 11: De resultaten van de pompproef op put B6 in het onderste watervoerende pakket, uitgevoerd op 8 september 1983.

tabel 12: De resultaten van de pompproef op put B4 in het onderste watervoerende pakket, uitgevoerd op 15 september 1983.

tabel 13: De uitdrukking van de horizontale permeabiliteit ( $K_h$ ) en de verticale permeabiliteit ( $K_v$ ) in m/dag,  $m^2$  en Darcy.

## 1. Samenvatting en conclusies

In het kader van het project "variatiies van fysisch-chemische bodemkarakteristieken" is in 1983 een uitgebreide bodem-verkenning uitgevoerd in een gebiedje van 40 x 40 m in de nabijheid van de gemeente Best in Noord-Brabant (zie ook fig. 1. en 2., alsmede lit. 1.).

Een van de doelstellingen van dit onderzoek is het verwerven van gegevens over de permeabiliteit van de ondiepe ondergrond, ter plaatse van de onderzoekslokatie en de ruimtelijke verdeling hiervan.

Hiertoe zijn in 6 van de 12 boringen, die voor de bodem-verkenning op de onderzoekslokatie zijn geplaatst filters op verschillende diepten gesteld. Deze filters zijn waar nodig van kleiafdichtingen voorzien. Twee maten filterbuis zijn gebruikt: 2-duims (2"), voor het waarnemen, zowel als voor het uitvoeren van pompproeven en 1-duims (1"), voor het doen van grondwaterstijghoogte-waarnemingen. Op de 6 2" filters zijn van 7 t/m 15 september 1983 pompproeven van korte duur (ca. 133 minuten) uitgevoerd, waarbij de verlaging van de grondwaterstijghoogte in vooraf geselecteerde filters werd waargenomen. Deze filters werden zo gekozen, dat de verlaging van de grondwaterstijghoogte op kleine en op grote afstand (respectievelijk 1 m en 40 à 50 m) en zowel onder en/of boven het gepompte pakket kon worden waargenomen.

In de genoemde periode werden tevens grondwatermonsters genomen van alle filters, inclusief de in boring C opgestelde mini-filters.

De resultaten zijn als volgt:

1. het bovenste watervoerende pakket, van 2,50 m -m.v. tot 12,50 à 8,80 m -m.v.:

de dikte van het pakket	: 10,00 à 6,30 m
het debiet van de onttrekking	: 3 à 5 m <sup>3</sup> /dag
de weerstand van de bovenste weerstandslaag:	300 dagen
de weerstand van de onderste weerstandslaag:	300 dagen
de waarde van de horizontale permeabiliteit:	1,3 à 1,8 m/dag
de waarde van de verticale permeabiliteit	: 1,1 à 1,8 m/dag

2. het middelste watervoerende pakket, van 12,50 à 12,80 m -m.v. tot 17,00 m -m.v.:

de dikte van het pakket	: 4,50 à 4,20 m
-------------------------	-----------------



het debiet van de onttrekking : 28 à 26 m<sup>3</sup>/dag  
de weerstand van de bovenste weerstandslaag: 300 dagen  
de weerstand van de onderste weerstandslaag: 300 dagen  
de waarde van de horizontale permeabiliteit: 3,7 à 4,75 m/dag  
de waarde van de verticale permeabiliteit : 3,7 à 4,75 m/dag

3. het onderste watervoerende pakket, van 18,70 -m.v. tot 28,70 m -m.v.  
de dikte van het pakket : 10,00 m  
het debiet van de onttrekking : 90 à 94 m<sup>3</sup>/dag  
de weerstand van de bovenste weerstandslaag: 300 dagen  
de weerstand van de onderste weerstandslaag: 200 dagen  
de waarde van de horizontale permeabiliteit: 6,7 à 7,5 m/dag  
de waarde van de verticale permeabiliteit : 6,7 à 7,5 m/dag

Zoals uit bovenstaande blijkt is er een tendens, dat de permeabiliteit met de diepte toeneemt.

Uit een analyse van de reactie van gemeten grondwaterstanden op de proeflokatie op een forse neerslaghoeveelheid tijdens de veldwerkzaamheden lijkt een bergingscapaciteit in de freatische zone van slechts 8% aanwezig te zijn.

Voor aanvullende verslaggeving betreffende het project "Variaties van fysisch-chemische bodemkarakteristieken" wordt verwezen naar de deelrapporten van Van Alphen (RIVM no. 84038801), Meinardi (RIVM no. 84038803), Gerringa en Obdam (RIVM no. 84038804) en Gerringa (RIVM no. 84038805).

## 2. Inleiding

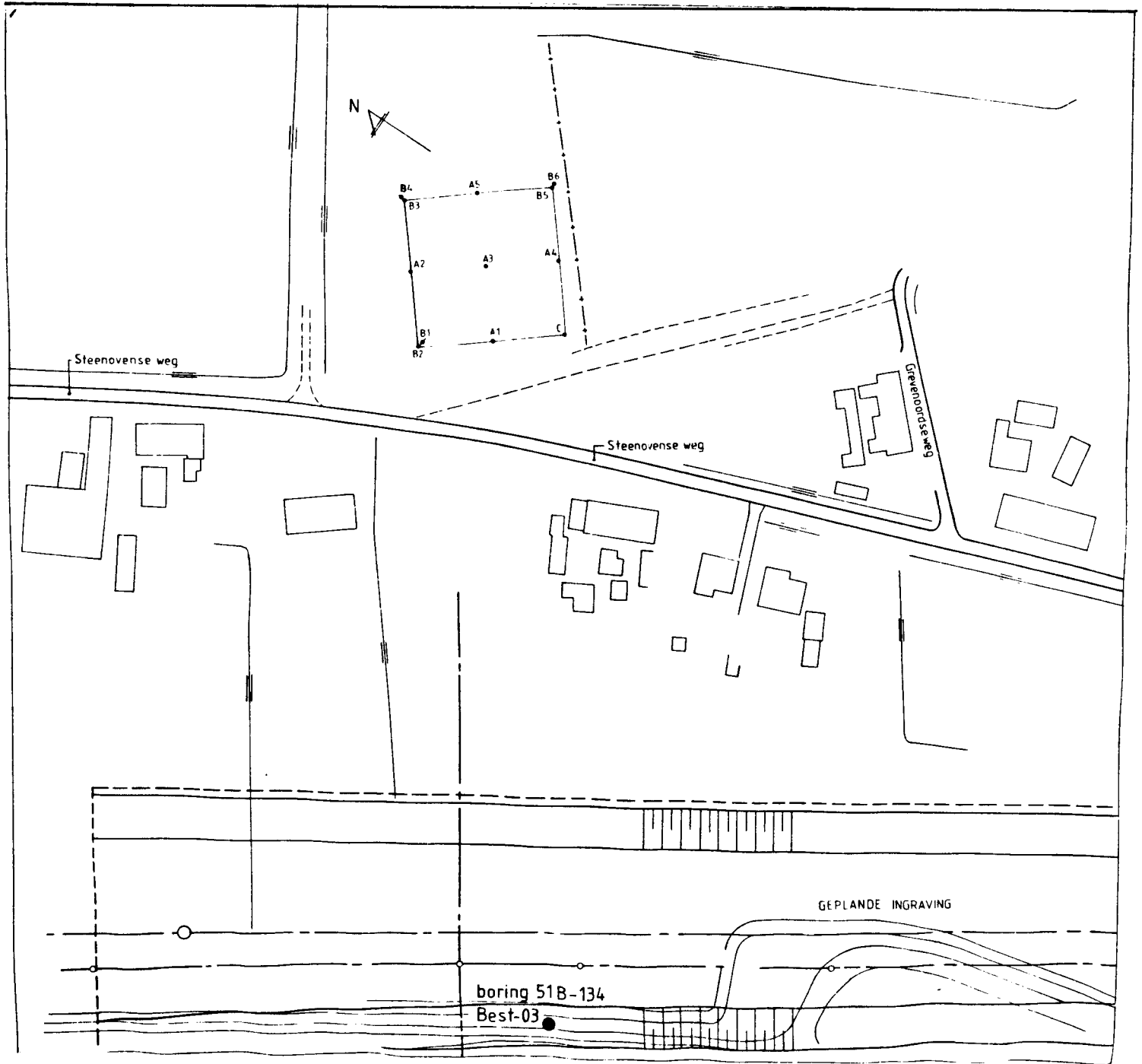
In het kader van het project "Variaties van fysisch-chemische bodemkarakteristieken" is in een gebiedje van 40 x 40 m nabij Best een intensieve bodemverkenning uitgevoerd. Deze bodemverkenning heeft tot doel om de ruimtelijke verdeling van zowel geohydrologische als van fysisch-chemische bodemparameters vast te stellen.

Dit rapport heeft betrekking op de ruimtelijke verdeling van de geohydrologische parameters; met name toegespitst op de permeabiliteit van de ondiepe ondergrond.



Fig. 2.

De oriëntering van de boringen in het veld nabij Best.



### 3. Het geologisch overzicht

De proeflokatie is gelegen nabij Best, in de Grote Slenk.

De boringen zijn verricht in de Nuenen-groep, een pleistocene laageenheid, die ter plaatse van Best reikt van maaiveld tot ca. 30 m -m.v. De sedimentologische interpretatie van de verrichte boringen is ontleend aan het rapport van Van Alphen, 1984:

De voorlopige stratigrafische interpretatie is verricht met medewerking van de Rijks Geologische Dienst. De interpretatie is gebaseerd op een vergelijking voor wat betreft ligging, aard en dikte van de bestudeerde afzettingen met gedateerde afzettingen uit de omgeving van het onderzochte gebied.

De afzettingen van pakket I zijn vermoedelijk van Elsterien-ouderdom (zie fig. 3 voor verwijzingen naar lagen). Ze bestaan onderin uit leemlagen, die naar boven dunner en waarschijnlijk minder uitgestrekt worden en uiteindelijk overgaan in grofzandige fluviatiele afzettingen (rivier-afzettingen) van vermoedelijk vlechtende rivieren. De hierop gelegen afzettingen van pakket II worden gekarakteriseerd door hun organogene ontwikkeling (veel veen en een andere organische stof aanwezig). Ze zijn gevormd onder gematigde tot warme omstandigheden, vermoedelijk in het Holsteinien interglaciaal en/of enkele Saalien interstadialen.

Onder de zich hierna steeds duidelijker manifesterende periglaciale omstandigheden van het Saalien (vergelijkbaar met toendra-omstandigheden) kwamen de hoofdzakelijk lemige afzettingen van pakket III tot stand.

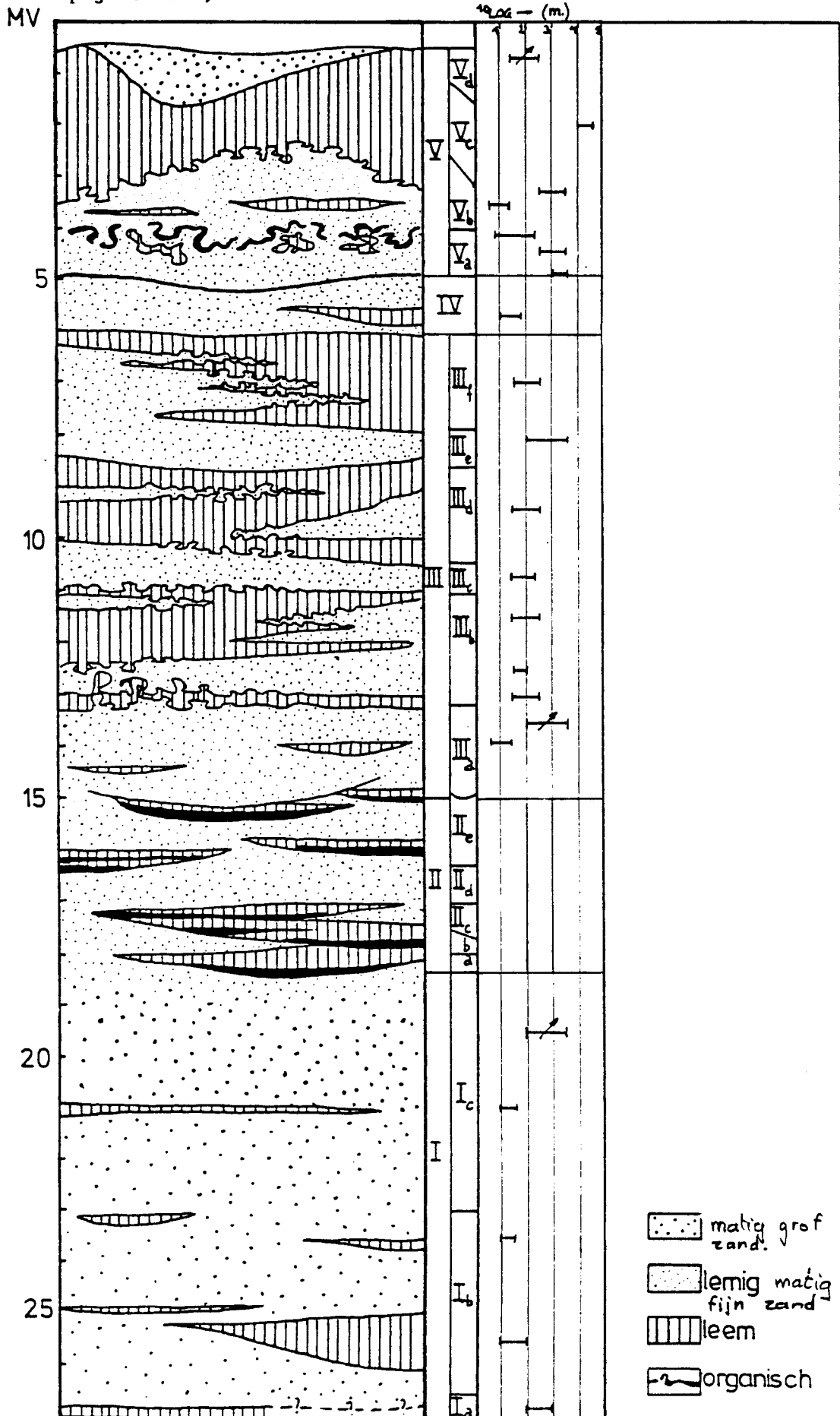
Hierin is laag IIIa zandig en fluviatiel ontwikkeld, terwijl er ten aanzien van de lemen van laag IIIb, -d en IIIf aanwijzingen bestaan voor een lacustriene genese (in een meer ontstaan). Tussen deze lemen in bevinden zich fluviatiele en/of eolische (door de wind getransporteerde) (adhesie-) zanden.

In de lemen komen zandige inschakelingen voor, die toegeschreven worden aan tijdelijke influxen, mogelijk uit verschillende richtingen, in een lacustriene omgeving. Door een klimaatsverbetering, vermoedelijk het Eemien, kon zich in het periglaciale landschap opnieuw voor langere tijd vegetatie vestigen. Hierdoor ontwikkelde zich in de jongste afzettingen van pakket III een podzolachtige bodem (IV). Na deze relatief warme periode traden in het Weichselien voor de laatste keer periglaciale verschijnselen op.

Eerst vormden zich nog enkele koude bodems (Va), die in een later stadium door vorstwerking gedeformeerd werden. In een latere fase kwamen, net als in de periglaciaire fasen van het Saalien weer geremanieerde (omgewerkte) zanden tot afzetting en vormden zich weer uitgestrekte leemlagen. In de onderzochte afzettingen blijken de aangetroffen Weichselien-leem een grotere laterale uitgestrektheid te hebben dan de Saalien-leem.  
Einde citaat.

Fig. 3.

Overzicht van de geologische analyse van de bodemverkenning te Best. In de rechterkolom is een indicatie gegeven van de horizontale uitgebreidheid van de aangetroffen leemlagen (horizontale balkjes) of zandpakketten (balk met een pijl erdoor).



Bovenstaande beschrijving stond echter niet ter beschikking ten tijde van het verrichten van de pompproeven. Voor een voorlopige profiel-opbouw werd daarom uitgegaan van de boringen Best 03 tot 035 van de RGD (zie lit. 1, fig. 5.2. en lit. 3).

Hiervan werd voornamelijk boring Best 03 (51B-134), gelegen op ca. 205 m afstand van de proeflokatie als basis genomen (zie fig. 2.).

De voorlopige profielopbouw is als volgt:

een weerstandslaag van	,80 m -m.v. tot	3,80 m -m.v.
een bovenste watervoerende laag van	3,80 m -m.v. tot	11,70 m -m.v.
een weerstandslaag van	11,70 m -m.v. tot	13,30 m -m.v.
een middelste watervoerende laag van	13,30 m -m.v. tot	16,50 m -m.v.
een weerstandslaag van	16,50 m -m.v. tot	18,40 m -m.v.
een onderste watervoerende laag van	18,40 m -m.v. tot	23,00 m -m.v.
een weerstandslaag van	23,00 m -m.v. tot	? m -m.v.

In figuur 4. is een overzicht van deze profiel-opbouw en de daarin geplaatste filters weergegeven.

#### 4. Technische details

Allereerst zijn er op vooraf bepaalde posities binnen de onderzoekslokatie Ackermann boringen uitgevoerd, waarmee continu gestoken bodemonsters werden verkregen (de lengte van de steekbuizen is 30 cm; de doorsnede is 6 cm). Voor de posities van deze boringen wordt verwezen naar fig. 2 en 4.

Op posities met de code B en C zijn boorgaten gemaakt met een diameter van 22,5 cm. Deze diameter werd aangehouden tot een diepte, die voor het plaatsen van de filters in deze boringen noodzakelijk was.

Per boorgat met de code B zijn vier filters opgesteld:

een 2" filter (inwendige diameter ca. 5 cm), dat o.a. als pompfilter diende en drie 1" filters (ca. 2,5 cm diameter) als waarnemingsfilter. Op de niveaus, waar tijdens het boren klei of leem werd aangetroffen is rond de filters een afdichting met zwel-klei aangebracht; verder werd het boorgat met filtergrind opgevuld.

In grote lijnen is het boorplan van figuur 4. uitgevoerd, dat is opgesteld aan de hand van het voorlopige geologische profiel. Volgens het boorplan werden de lengten van de pompfilters gekozen aan de hand van de indicatieve pakketten-indeling van boring 51B-134; in het algemeen werd hiervoor 10% van de dikte van het te bemonnen pakket aangehouden.



De 1" waarnemingsfilters zijn zo kort mogelijk gekozen (enkele dm); echter niet te kort, om te vermijden, dat een enkel toevallig aanwezig leemlaagje het filter zou kunnen blokkeren. Ook vanwege de benodigde leveringscapaciteit van het filter is een te kleine afmeting hiervan niet gewenst. De pompfilters zijn midden in de (voorlopig aangenomen) pakketten geplaatst; de drie nabije waarnemingsfilters in het zelfde pakket werden op ca. 1 m horizontale afstand van het pompfilter geplaatst, ter hoogte van het pompfilter en op 25% en 75% van de hoogte van het pakket. Zoals bij de analyse van de pompproeven zal worden vermeld is het echter niet mogelijk om van goed gedefinieerde pakketten te spreken. Dit is het gevolg van de aanwezigheid van vele leemlagen, met een verschillende laterale uitgestrektheid.

Het stellen van de filters op de vooraf geplande hoogte was dan ook erg moeilijk, vanwege deze leeminschakelingen, die niet alleen de definiëring van een pakket bemoeilijkte, maar ook de plaatsing van de filters op de geplande hoogte in het pakket soms zinloos maakte.

Voor een overzicht van de uitgevoerde boringen en de geplaatste filters wordt verwezen naar fig. 5 en tabel 1.

#### De pompproeven

De pompproeven zijn uitgevoerd door het onttrekken van grondwater aan 2" pompfilters met behulp van een haalbuis, gekoppeld aan een gemotoriseerde centrifugaalpomp, waarbij het debiet met een watermeter werd gemeten.

De verlagingen van de grondwaterstijghoogte in de waarnemingsfilters zijn met gehulp van drukopnemers opgenomen en vastgelegd door een data-logger van het LBG.

Tijdens een pompproef werden de verlagingen van enkele waarnemingsfilters op semi-logaritmisch papier uitgezet tegen de tijd die was verstreken, gerekend vanaf de start van de onttrekking. Nadat, met name voor de verst gelegen filters een stabilisering van de verlaging van de grondwaterstijghoogte werd geconstateerd werd de onttrekking aan het pompfilter beëindigd. Hierna werd een stopproef uitgevoerd, door het waarnemen van het "omhoogkomen" van de grondwaterstijghoogte in de waarnemingsbuizen tot nagenoeg de oude stijghoogte weer werd bereikt. De periode, die hiervoor nodig was bleek vaak korter te zijn dan de duur van de hieraan voorafgaande pompproef.



Tabel 1. De filterstellingen ten opzichte van de putrand (= maaiveld) van B1. Dit is tevens de laagste putrand.

		cm	cm	cm	cm	m	m ref ↓	cm	cm
bo- ring	fil- ter	baak	boven- kant stijg- buis -putrand	m.v. t.o.v. baak maat	m.v. t.o.v. refe- rentie	filter lengte	filter t.o.v. referentie (B1)	boven- kant stijg- buis-re- ferentie	water- stand t.o.v. referentie
C	C <sub>f1</sub>	163,0	14,5	147,5	(12,5)	0,50	21,47 - 21,97	2	140
	C <sub>f2</sub>	167,0	17,5	"	+13	0,50	27,82 - 28,32	5	135
B1= REF.	2"	177,0	15,5	160,0	0,0	0,40	14,20 - 14,60	16	143
	1	174,0	12,5	=ref.		0,40	5,05 - 5,45	13	142
	2	176,5	15,0			0,40	7,20 - 7,60	15	142
	3	180,0	18,5			0,40	8,60 - 9,00	19	142
B2	2"	171,2	12,0	159,8	(0,2)	0,70	7,15 - 7,85	12	142
	1	168,2	9,0		0,0	0,30	13,35 - 13,65	9	143
	2	172,2	13,0			0,30	14,10 - 14,40	13	143
	3	174,7	15,5			0,30	14,75 - 15,05	15	142
B3	2"	152,3	10,0	143,5	(16,5)	0,35	13,98 - 14,33	-7	147
	1	153,3	11,0		+17	0,40	20,68 - 21,08	-6	143
	2	156,8	14,5			0,40	22,28 - 22,68	-2	145
	3	159,8	17,5			0,40	23,78 - 24,18	1	145
B4	2"	150,0	7,5	142,5	(17,5)	0,75	21,37 - 22,12	-10	144
	1	157,5	15,0		+18	0,30	13,47 - 13,77	-3	145
	2	155,5	13,0			0,30	14,32 - 14,62	-5	146
	2	154,5	12,0			0,30	14,97 - 15,27	-6	146
B5	2"	148,2	7,5	140,7	(19,3)	0,15	9,11 - 9,26	-12	153

Vervolg tabel 1

		cm	cm	cm	cm	m	m ref ↓	cm	cm
bo- ring	fil- ter	baak	bk. stijg- buis- putrand	m.v. baak maat	m.v. referentie	filter lengte	filter t.o.v. referentie (B1)	bk. stijg- buis-re ferentie	waterst. t.o.v. ref.
	1	151,8	10,5		+19	0,40	19,81 - 20,21	-9	152
	2	148,3	8,0			0,40	20,71 - 21,11	-11	152
	3	154,3	13,0			0,40	22,41 - 22,81	-6	159
B6	2"	159,8	11,0	148,8	(11,2)	0,50	22,14 - 22,64	0	152
	1	164,4	15,5		+11	0,40	6,74 - 7,14	4	154
	2	159,4	10,5			0,40	8,24 - 8,64	-1	154
	3	162,4	13,5			0,40	10,14 - 10,54	2	154

N.B.  $C_{f1}$  en  $C_{f2}$  zijn filters van een zelfde boring!

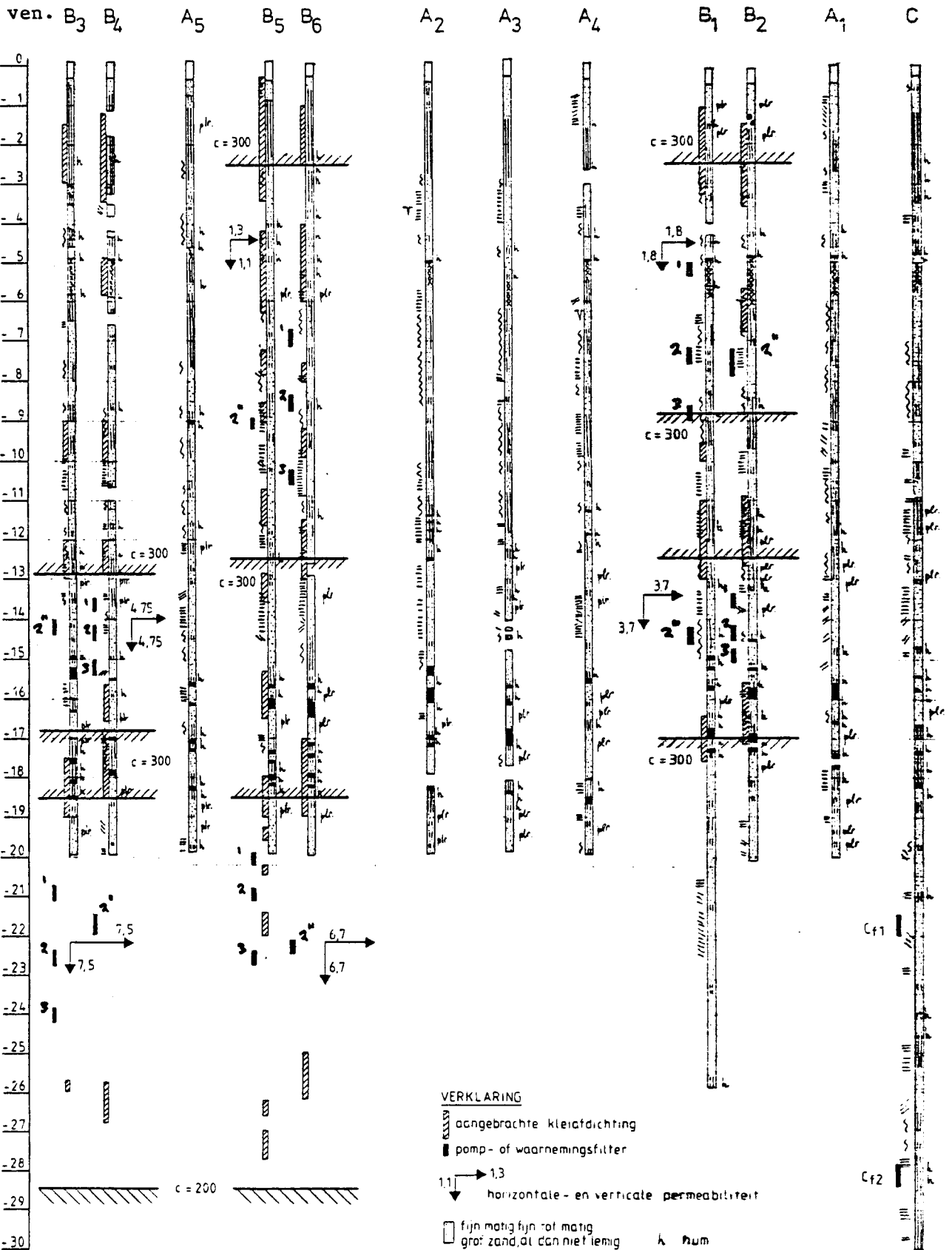
Fig. 5.

Een overzicht van de aardlagen per boring en de hierin gestelde filters.

De pompfilters worden met 2" aangeduid.

De waarnemingsfilters (1") dragen de code 1, 2 of 3.

Schematisch zijn ook de parameter-schattingen van de pompproeven aangege-



VERKLARING

- aangebrachte klefdichting
- pomp- of waarnemingsfilter
- horizontale- en verticale permeabiliteit
- fijn matig fijn tot matig  
grof zand, of dgn niet leemig
- leem en zandige leem
- veen
- paleosol in slecht ge-  
sorteerd m/z
- k num
- plantenresten
- gedeformeerd pakket van  
overwegend zand met wat leem
- horizontaal gelamneerd
- hellend gelamneerd

Dit wordt veroorzaakt door het langer dan strikt noodzakelijk uitvoeren van de pompproeven, om er zeker van te zijn, dat een stationair verlagingsspatroon wordt bereikt.

De duur van de pompproeven varieerde van 82 tot 230 minuten (gemiddeld 133 minuten) en van de stopproeven van 48 tot 116 minuten (gemiddeld 73 minuten). Het debiet varieerde van 3 tot 94 m<sup>3</sup> per uur.

De geconstateerde verlagingen bereikten in de waarnemingsfilters waarden van 0,12 tot 1,31 m en in de bepompte filters waarden tot 6,40 m. Tijdens de pompproeven werden van het opgepompte water monsters genomen voor waterkwaliteitsanalyses en werd de temperatuur bepaald.

##### 5. Algehele geohydrologische situatie-schets

De pompproeven zijn uitgevoerd op een weiland, dat aan drie zijden is omgeven door smalle, ondiepe sloten, waarop het opgepompte water werd geloosd.

Gezien de sterk lemige ondergrond werd voor de kortdurende pompproeven echter geen beïnvloeding van de verlagingen van de grondwaterstijghoogte ten gevolge van voeding van de watervoerende pakketten door de sloten verwacht.

Voor het inventariseren van de grondwaterstand en -beweging is op alle dagen, waarop pompproeven werden gehouden de grondwaterstijghoogte in de 2" filters gemeten. Tabel 2 geeft hier een overzicht van. Uit dit overzicht is voor de proeflokatie niet duidelijk te constateren of er een kwel- dan wel een inzijingssituatie bestaat. Opvallend is, dat na een neerslaghoeveelheid in de periode van 10 t/m 12 september 1983 van 46 mm een grondwaterstijging van gemiddeld 36 cm optreedt, met een vertraging van 3 dagen! (een eventuele verdere stijging van de grondwaterstijghoogte is helaas niet waargenomen). De stijging is berekend voor de stijghoogten van 15 september t.o.v. die van 9 september '83. Deze stijging van de grondwaterstijghoogte wordt waarschijnlijk veroorzaakt door de neerslaghoeveelheid over deze periode.

Op de proeflokatie werd met behulp van een open bak 46 mm neerslag gemeten terwijl te Helmond door het KNMI over dezelfde periode 56,6 mm werd gemeten (zie tabel 3.).

De reactie van de grondwaterstijghoogte op deze neerslaghoeveelheid lijkt te wijzen op een betrekkelijk lage bergingscoëfficiënt voor het freatische grondwater, namelijk 8% !

De regionale grondwaterstroming is met behulp van de gegevens van de jaren 1982 en 1983 onderzocht voor vijf peilbuizen in de omgeving van de proeflokatie te Best.

De gegevens zijn vastgelegd in tabel 4 t/m 6.

Het overzicht van de regionale grondwaterstroming is in fig. 6 weergegeven. Uit deze gegevens kan voorzichtig de conclusie worden getrokken, dat de grondwaterstroming over de bovenste 60 m noordelijk is gericht, waarbij het ondiepe grondwater (tot 5 m -m.v.) een noordwestelijk gerichte component lijkt te bezitten. Voor verdere informatie over de (richting van de) grondwaterstroming wordt verwezen naar het rapport van Meinardi: Samenstelling en stroming van het grondwater op de proeflokatie te Best.

Tabel 2.

Diverse gegevens over de startsituatie van de pompproeven.

1. luchtdruk (bar)

2. neerslag (mm)

3. grondwaterstand t.o.v. referentie (= putrand van B1;  
= m.v. t.p.v. B1)

	diepte filter t.o.v. referentie	20.7 '83	7.9 '83	8.9 '83	9.9 '83	12.9 '83	14.9 '83	15.9 '83	stij- ging 15.9 t.o.v. 9.9
neerslag (mm)			0,3	-	2,6	46	-	-	
luchtdruk (bar)			1016	1006	996	1003	1007	994	
B2 - 2"	7,50	1,42	2,06	2,06	2,06	1,98		1,67	0,39
B5 - 2"	9,19	1,53	2,01	2,01	2,01	1,95	1,70	1,64	0,37
B3 - 2"	14,15	1,47	2,07	2,07	2,07	2,01		1,70	0,37
B1 - 2"	14,20	1,43	2,04	2,03	2,04	1,97		1,68	0,36
C <sub>f1</sub>	21,72	1,40	1,96	1,96	1,95	1,91		1,62	0,33
B4 - 2"	21,75	1,44	2,02	2,01	2,02				
B6 - 2"	22,39	1,52	1,99	1,98	1,98	1,93		1,64	0,34
C <sub>f2</sub>	28,07	1,35	1,93	1,95	1,95	1,90		1,62	0,28



Tabel 3.

Neerslag, gemeten door het KNMI-meetstation Helmond in de periode 4 t/m 16 sept. 1983.

dag in sept. '83	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
neerslag in mm.	6,6	0,2	-	0,2	-	2,5	3,4	1,0	13,2	39,0	2,6

dag in sept. '83	15	16
neerslag in mm.	4,2	2,5

Tabel 4. Grondwaterstanden en -verschillen in diverse peilbuizen rond de proeflokatie t.o.v. NAP.

datum	51B 1-9	51B 10 (B)	51B 1-12	51B 13 (B)	51B 14 (B)	51B 14-13 (m)	51B 14-10 (m)	51B 13-1-12 (m)	51B 112-19 (m)
14-1-'82	11,52		13,14						1,62
28-1	11,46		13,29	14,19	14,11	-0,08		0,90	1,83
15-2	11,63		13,32	14,17	14,16	-0,01		0,85	1,69
1-3	11,51		13,11	13,97	13,96	-0,01		0,86	1,60
15-3	11,70		13,44	14,27	14,18	-0,09		0,83	1,74
30-3	11,55		13,23	14,09	14,06	-0,03		0,86	1,68
14-4	11,47		13,04	13,92	13,91	-0,01		0,88	1,57
26-4	11,35		12,81	13,72	13,73	0,01		0,91	1,46
13-5			12,71	18,57	13,61	0,04		0,86	
27-5	11,22		12,56	13,41	13,51	0,10		0,85	1,34
14-6	11,10		12,41	13,17	13,31	0,14		0,76	1,31
29-6	11,55		12,77	13,37	13,59	0,22		0,60	1,22
14-7	11,35		12,63	13,27	13,41	0,14		0,64	1,28
28-7	10,99		12,29						1,30
14-8	10,79		12,01	13,73	12,88	0,15		1,72	1,22
27-8	10,90		12,47	12,67	12,88	0,21		0,20	1,57
15-9	10,67		11,90	12,49	12,76	0,27		0,59	1,23
28-9	10,73		11,85	12,49	12,71	0,22		0,64	1,12
14-10			12,62	13,10	13,42	0,32		0,48	
27-10			12,72	13,42	13,57	0,15		0,70	
15-11	11,84		12,71	13,37	13,51	0,14		0,66	0,87
29-11	11,70		13,02	13,74	13,83	0,09		0,72	1,32
14-12	11,76		13,25	13,97	14,01	0,04		0,72	1,49
28-12	11,67		13,13	14,01	14,09	0,08		0,88	1,46
13-1-'83	11,73	12,44		14,12	14,31	0,19	1,87		
28-1	11,69	12,41		14,07	14,16	0,09	1,75		
14-2	11,61								
1-3	11,59	12,31		14,13	14,07	-0,06	1,76		
17-3	11,56	12,37		13,97	13,89	-0,08	1,52		
29-3	11,76	12,59		14,19	14,41	0,22	1,82		

Vervolg tabel 4.

datum	51B 1-g	51B 10 (B)	51B 1-12	51B 13 (B)	51B 14 (B)	51B 14-13 (m)	51B 14-10 (m)	51B 13-1-12 (m)	51B 112-19 (m)
14-4	11,74	12,49		14,12	14,30	0,18	1,81		
29-4		12,59		14,18	14,26	0,08	1,67		
16-5	11,75			14,18	14,27	0,09			
26-5	11,78			14,39	14,47	0,08			
14-6	11,56			13,85	14,10	0,25			
29-6	11,33			13,49	13,79	0,30			
14-7	11,02								
28-7	10,86								
16-8	10,60			12,75	13,01	0,26			
29-8	10,36			12,49	12,77	0,28			
14-9	10,86			12,49	12,94	0,45			
29-9	10,90			12,79	13,00	0,21			
13-10				12,69	12,96	0,27			
28-10				12,69	12,91	0,22			
16-11	10,99			12,67	12,88	0,21			
30-11				13,17	13,21	0,04			
14-12	11,51								
29-12	11,60			13,53	13,56	0,03			
17-1-'84				14,03	14,08	0,05			
						$\bar{x}=0,127$ $s=0,124$	$\bar{x}=1,743$ $s=0,117$	$\bar{x}=0,778$ $s=0,270$	$\bar{x}=1,425$ $s=0,235$

Tabel 6.

Enige gegevens over de "regionale" peilbuizen.

Waarnemings- buizen	hoogte meetpunt t.o.v. NAP	bovenkant (bk) en onderkant van het filter t.o.v. NAP	hoogte maaiveld t.o.v. NAP	waarnemings- periode
51B-1-9	12,08	bk tot + 10,08	12,19	<u>'82 + '83</u>
51B-1-12	14,53	+10,53 tot + 9,53	14,62	<u>'82</u>
51B-13 (B)	14,79	bk tot - 1,75	14,79	<u>'82 + '83</u>
51B-14 (B)	15,71	" " - 42,50	15,71	<u>'82 + '83</u>
51B-10	13,31	" " - 49	13,31	begin '83

Tabel 5.

Onderlinge afstand tussen de peilbuizen in de omgeving van de proeflokatie en het hart van de proeflokatie zelf (in m).

	51B 1-9	51B 10	51B 1-12	51B 13	51B 14
51B 1-9					
51B 10	1000				
51B 1-12	1430	1025			
51B 13	2950	3900	3675		
51B 14	2190	2675	1950	2200	
proeflokatie Best	875	1400	1100	2625	1350

Fig. 6.

Overzicht van de gradiënten van de grondwaterstijghoogten in de omgeving van de onderzoekslokatie, gemiddeld over de periode '82 - '83, of een deel daarvan.

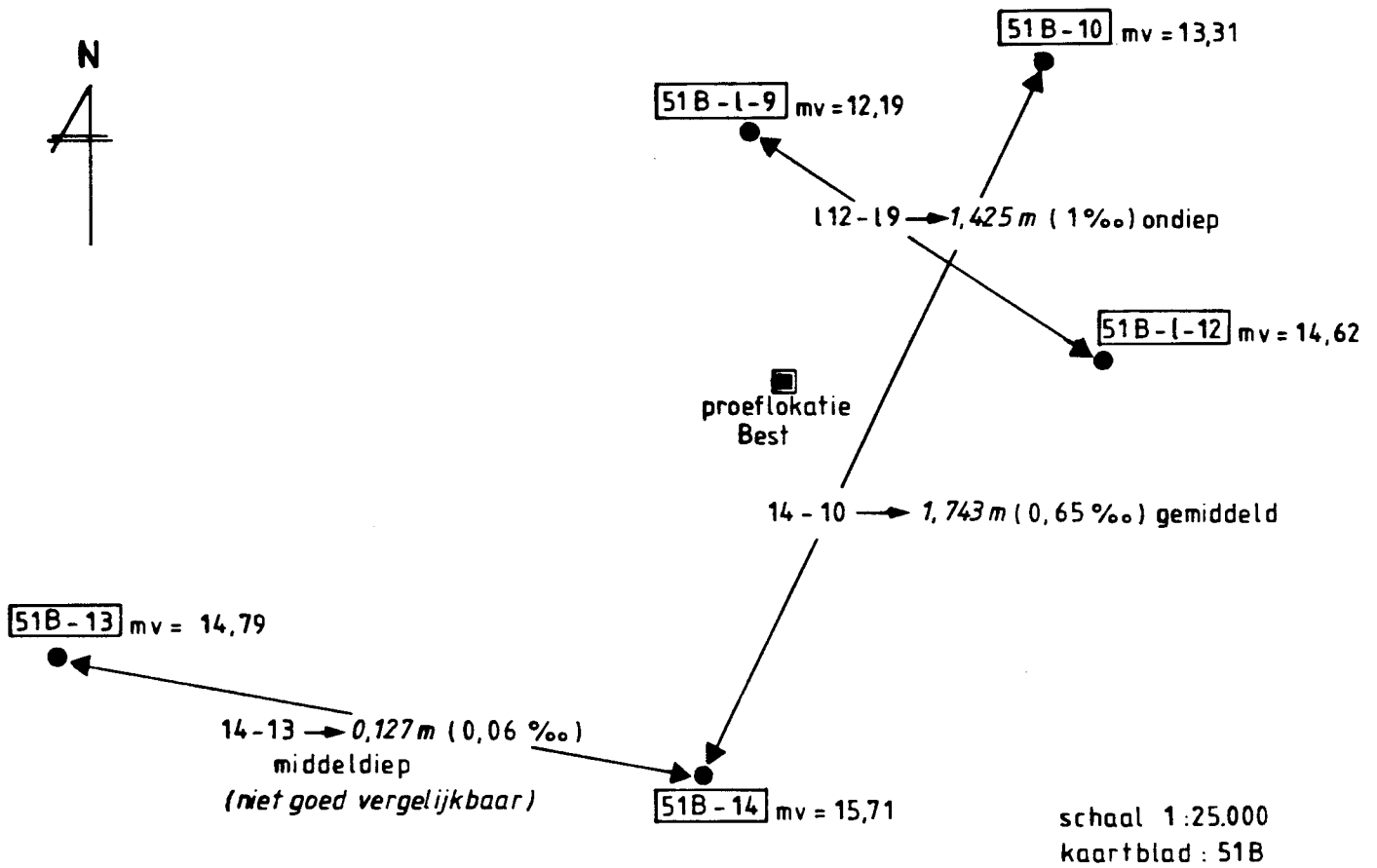
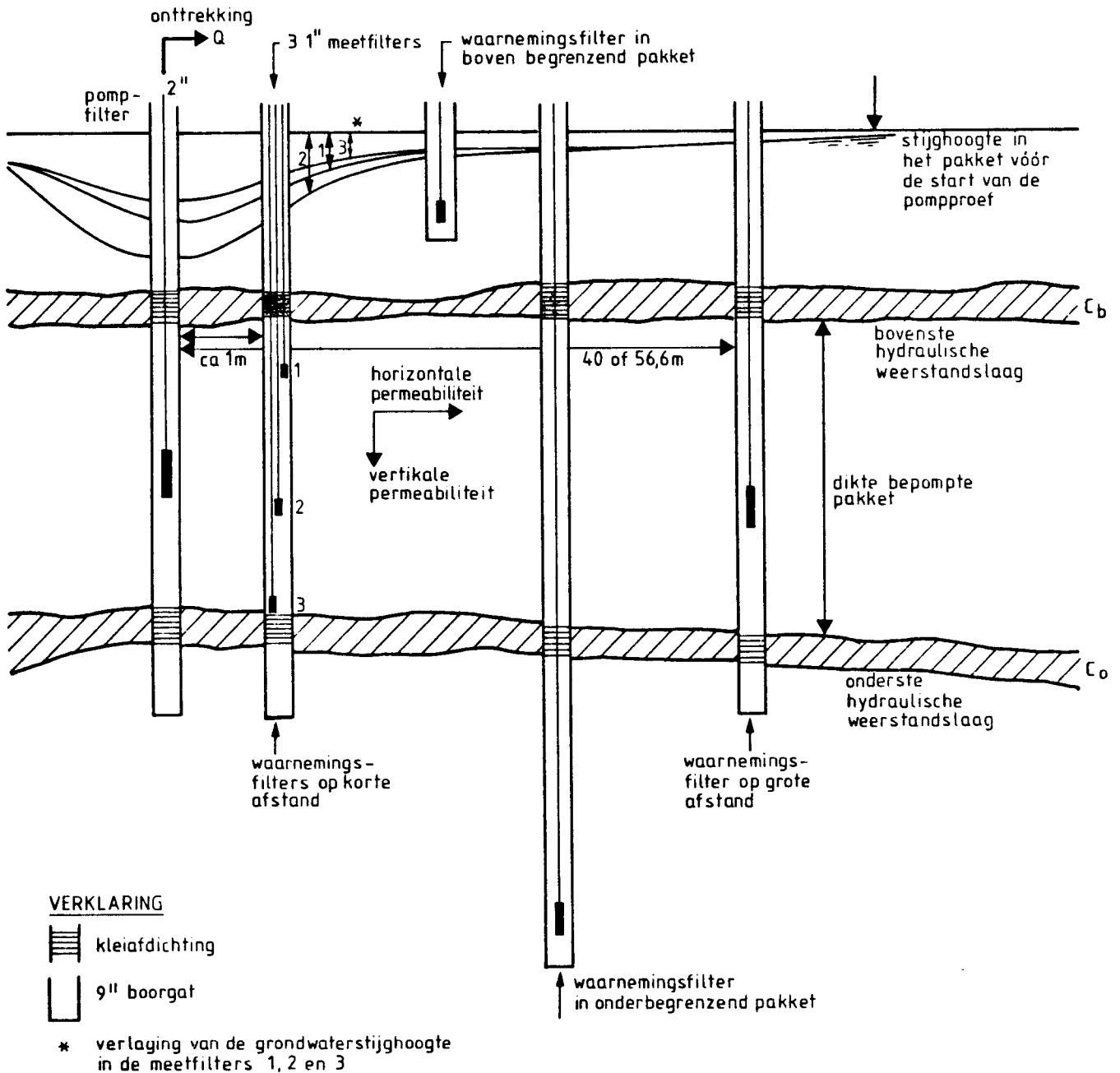


Fig. 7: Het schema voor een pompproef met een kort filter



## 6. De resultaten van de pompproeven en de analyse ervan

Alvorens in te gaan op de resultaten van de pompproeven wordt in fig. 7 het pompproef-schema voor één watervoerend pakket gegeven.

De doelstelling van een pompproef met dit schema is, om behalve het creëren van een gradiënt in de grondwaterstijghoogte in de horizontale richting een gradiënt in de verticale richting te creëren. De interpretatie van de proef kan mogelijk leiden tot een geschatte waarde voor zowel de horizontale als de verticale permeabiliteit van het gepompte pakket. Volgens het schema van fig. 7 zijn behalve de permeabiliteit nog meer parameters onbekend, namelijk de hydraulische weerstand van de aan de onder- en bovenzijde van het pakket grenzende leemlagen en soms de dikte van het pakket. De analyse van de gegevens van de pompproeven is op dit moment alleen mogelijk voor de stijghoogte-verlagingen bij een stationaire stroming van het grondwater naar het gepompte filter. Voor in ieder geval vier van de zes pompproeven wordt aan deze voorwaarde volledig voldaan. Ten behoeve van deze analyse is het RIVM-computerprogramma PUNTPP ontwikkeld en toegepast (zie de bijlage bij dit rapport). Dit programma berekent bij een gegeven parameterset een grondwaterstijghoogte-daling bij een stationaire stroming van grondwater naar een puntvormig pompfilter op een op te geven willekeurige lokatie in de drie-dimensionale ruimte. Ook het pompfilter mag op een willekeurige lokatie zijn geplaatst. Daar het onttrekkingsfilter in vele gevallen niet verwaarloosbaar klein is ten opzichte van de dikte van het gepompte pakket is in geval van de interpretatie van de pompproeven van dit project uitgegaan van de gesommeerde invloed op de grondwaterstijghoogte van drie dicht nabij gelegen puntonttrekkingen, die het aangebrachte filter voor de reken-simulatie moeten vervangen. De optimalisatie van de parameters van het gepompte pakket wordt op een iteratieve wijze verkregen, door voor telkens iets gewijzigde parameters berekeningen uit te voeren, totdat de berekende verlagingen zo goed mogelijk overeen komen met de waargenomen verlagingen. Bij deze optimalisatie wordt behalve van de waargenomen dalingen van de grondwaterstijghoogte tevens uitgegaan van de resultaten van het in het kader van dit project uitgevoerde bodemonderzoek van Van Alphen.

In het navolgende zijn in de vorm van tabellen en grafieken de resultaten van de pompproeven en de analyse hiervan weergegeven. Voor het hiervoor benodigde overzicht van de posities van de pomp- en waarnemingsfilters wordt verwezen naar fig. 4 of 5.

Hoewel slechts één parameter-set per pompproef in de tabellen is weergegeven is dit het resultaat van vaak vele iteratieve berekeningen. Uit statistisch oogpunt is een convergerende iteratieve berekening niet eens mogelijk! Er zijn namelijk per pompproef in het pakket hooguit vier stationaire verlagingen bekend, op basis waarvan de waarden van vier, soms vijf parameters zouden moeten worden geschat. Voor de parameteranalyse was het dan ook noodzakelijk om van additionele gegevens gebruik te maken, zoals de waargenomen verlagingen in het onder- of bovenliggende watervoevende pakket, en de beschikbare geologische analyse van de proeflokatie. Uit het eerste additionele gegeven werd veelal de conclusie getrokken, dat de scheidende hydraulische weerstandslagen tussen de bepompte pakketten een weerstands-waarde van enkele honderden dagen bezitten. Na een zo goed mogelijke schatting van de waarde van de weerstanden van de aan de onder- en bovenzijde grenzende lagen werd voor een bepompt pakket de waarde van de verticale en horizontale permeabiliteit met behulp van het programma PUNTPP op iteratieve wijze geschat. Hierbij werd soms ook de waarde van de dikte van het bepompte pakket eveneens als een variabele in de iteratie-procedure meegenomen.

Enige algemene opmerkingen over de analyse van de pompproeven, die op de proeflokatie te Best zijn gehouden:

1. na vergelijking van waargenomen verlagingen met berekende verlagingen (uitgaand van een homogeen pakket) blijken grote afwijkingen in de verlagingen aanwezig te zijn, waarvoor de lokale aanwezigheid van leemlagen een verklaring kan zijn;
2. de begrenzingen van de bepompte pakketten zijn vaak niet goed te definiëren: de pakketdikte werd als een variabele beschouwd, tenzij er geologische aanwijzingen bestonden voor de waarde van de pakketdikte;
3. gezien het voorgaande waren de op "grote" afstand (maximaal 57 m) van de pompput gemeten verlagingen van belang; waarneming van zulke verlagingen op grote afstand in diverse richtingen blijken ook voor kortdurende pompproeven van groot belang te zijn;



4. voor het in rekening brengen van de leemlagen tussen de pomp- en waarnemingsfilters moet voor sommige pakketten een extreme anisotropie worden aangenomen, wat irreeel lijkt: bijvoorbeeld in geval van de pompproef op B4, in het onderste watervoerende pakket was de ingeschatte horizontale permeabiliteit 7,5 m/d; de verticale permeabiliteit bleek echter slechts  $10(-3)$  m/d te zijn.

Voor dit soort situaties lijkt een pompproefanalyse op basis van een als homogeen aangenomen pakket niet goed bruikbaar; in plaats hiervan zou een computermodel kunnen worden gebruikt, waarin de driedimensionale structuur van het pakket ingevoerd kan worden.

Er zullen dan echter wel veel meer metingen tijdens de pompproeven moeten worden verricht, omdat het aantal te optimaliseren parameters aanzienlijk zal stijgen.

De resultaten van de pompproeven zijn, behalve in figuur 5. eveneens samengevat in figuur 13.

In tabel 13. zijn de pompproefresultaten vertaald in de intrinsieke permeabiliteit, uitgedrukt in de eenheden  $m^2$  en Darcy.

Hiertussen is het verband als volgt:

$$k \text{ (m/d)} = \frac{86\ 400 * g \text{ (= } 9,81 \text{ m/s}^2)}{v \text{ (m}^2/\text{s)}} * K \text{ (m}^2)$$

Hierin is k de permeabiliteit in m/dag;

86 400 het aantal seconden in een dag;

K de intrinsieke permeabiliteit in  $m^2$ ;

v de kinematische viscositeit in  $10(-6) m^2/s$ ;

g de versnelling van de zwaartekracht,  $9,81 m/s^2$ , voor Nederland.

$$\text{Dus: } K = \frac{k * v}{g * 86\ 400}$$

Verder is de relatie tussen de eenheden m/dag, Darcy en  $m^2$  als volgt:

1 Darcy = 0,86 m/dag bij 20 graden Celcius;

1 Darcy =  $1.10(-12) m^2$ ;

1 milliDarcy (mD) =  $1.10(-15) m^2$ .

Met behulp van de uitdrukking van de permeabiliteit in  $m^2$  of Darcy's kunnen de effecten van de dichtheid, het zoutgehalte en de temperatuur van het grondwater ten tijde van de pompproeven in rekening worden gebracht.

Tabel 7.

De resultaten van de pompproef op put B2 in het bovenste watervoerende pakket, uitgevoerd op 7 september 1983.

Geoptimaliseerde parameterwaarden:

$C_b$ (d)	$C_o$ (d)	$K_h$	$K_v$	Q (m <sup>3</sup> /d)	D (m)
300	300	1,8 m/d	1,8 m/d	4,896	6,30
		$2,4 \cdot 10^{-12} \text{m}^2$	$2,4 \cdot 10^{-12} \text{m}^2$	15,24° C	bovenzijde 2,50 m -ref.
		2,5 Darcy	2,5 Darcy		onderzijde 8,80 m -ref.

duur pompproef: 101 min.

duur stopproef: 116 min.

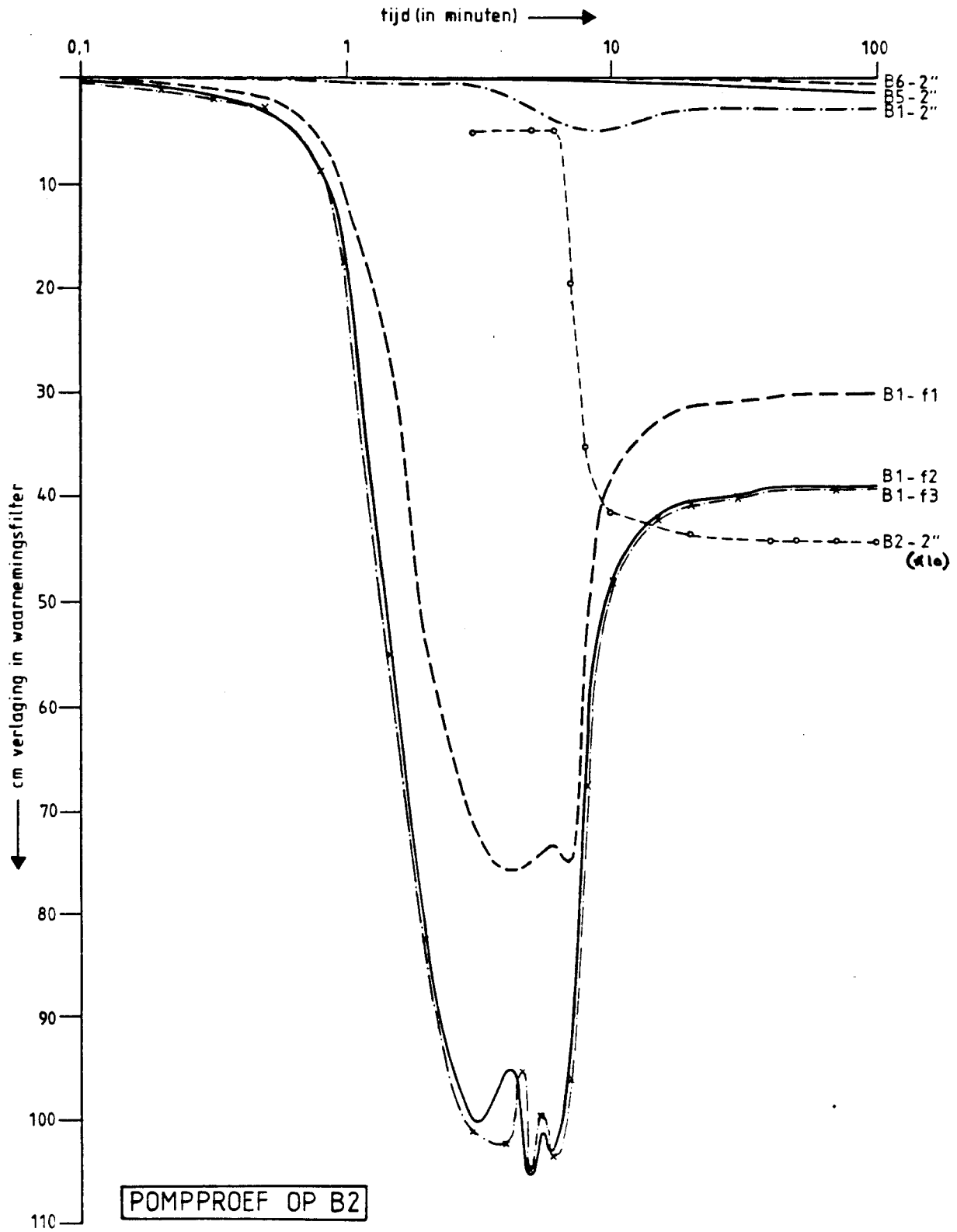
Waargenomen peilbuizen

peilbuis	f <sub>1</sub>	f <sub>2</sub>	f <sub>3</sub>	f <sub>onder</sub>	f <sub>boven</sub>	f <sub>af-stand</sub>	pomp-filter
peilbuis identifi- catie	B1-f1	B1-f2	B1-f3	B1-2"	-	B5-2"	B2-2"
r (m)	1,04	1,04	1,04	1,04	-	56,57	0
z (m - ref)	5,25	7,40	8,80	14,40	-	9,19	7,50
(m - bk)	2,75	4,90	6,30			6,30	5,00
gemeten verlaging (m)	0,278	0,346	0,349	0,052	-	0,021	4,41
berekende verlaging (m)	0,222	0,359	0,345	-	-	0,017	
temperatuur °C	13,8	11,1	11,5	11,4			

Opm. Na 40 minuten is het verlagingenbeeld stationair.

Fig. 8.

Het tijd-stijghoogteverlagingsverloop in diverse waarnemingsfilters tijdens de pompproef op B2, in het bovenste watervoerende pakket, uitgevoerd op 7 september 1983.



Tabel 8.

De resultaten van de pompproef op put B5 in het bovenste watervoerende pakket, uitgevoerd op 14 september 1983

Geoptimaliseerde parameterwaarden:

$C_b$ (d)	$C_o$ (d)	$K_h$	$K_v$	Q (m <sup>3</sup> /d)	D (m)
300	300	1,3 m/d	1,1 m/d	2,98	10
		$1,8 \cdot 10^{-12} \text{m}^2$	$1,5 \cdot 10^{-12} \text{m}^2$	15,24° C	bovenzijde 2,50 m -ref.
		1,8 Darcy	1,5 Darcy		onderzijde 12,50 m -ref.

duur pompproef: 230 min.

duur stopproef: -

Waargenomen peilbuizen

peilbuis	$f_1$	$f_2$	$f_3$	$f_{\text{onder}}$	$f_{\text{boven}}$	$f_{\text{af-stand}}$	pomp-filter
peilbuis identificatie	B6-f1	B6-f2	B6-f3	-	-	-	B5-2"
r (m)	1,10	1,10	1,10	-	-	-	0
z (m - ref)	6,94	8,44	10,34	-	-	-	9,18
(m - bk)	4,44	5,94	7,84		-	-	6,68
gemeten verlaging (m)	0,12	0,20	0,12				
berekende verlaging (m)	0,126	0,20	0,180				
temperatuur °C							

Opm. Tussen het pompfilter en B6-f<sub>3</sub> lijkt een hydraulische weerstand aanwezig te zijn.

Na 10 minuten pompen is het verlagingbeeld stationair. Er is met de hand gepeild; een tijdstijghoogtebeeld ontbreekt daardoor.

Tabel 9.

De resultaten van de pompproef op put B1 in het middelste watervoerende pakket, uitgevoerd op 12 september 1983.

Geoptimaliseerde parameterwaarden:

$C_b$ (d)	$C_o$ (d)	$K_h$	$K_v$	Q (m <sup>3</sup> /d)	D (m)
300	300	3,7 m/d	3,7 m/d	28,22	4,50
		$5,5 \cdot 10^{-12} \text{m}^2$	$5,5 \cdot 10^{-12} \text{m}^2$	11,4° C	bovenzijde 12,50 m -ref.
		5,6 Darcy	5,6 Darcy		onderzijde 17,00 m -ref.

duur pompproef: 123 min.

duur stopproef: 48 min.



Waargenomen peilbuizen

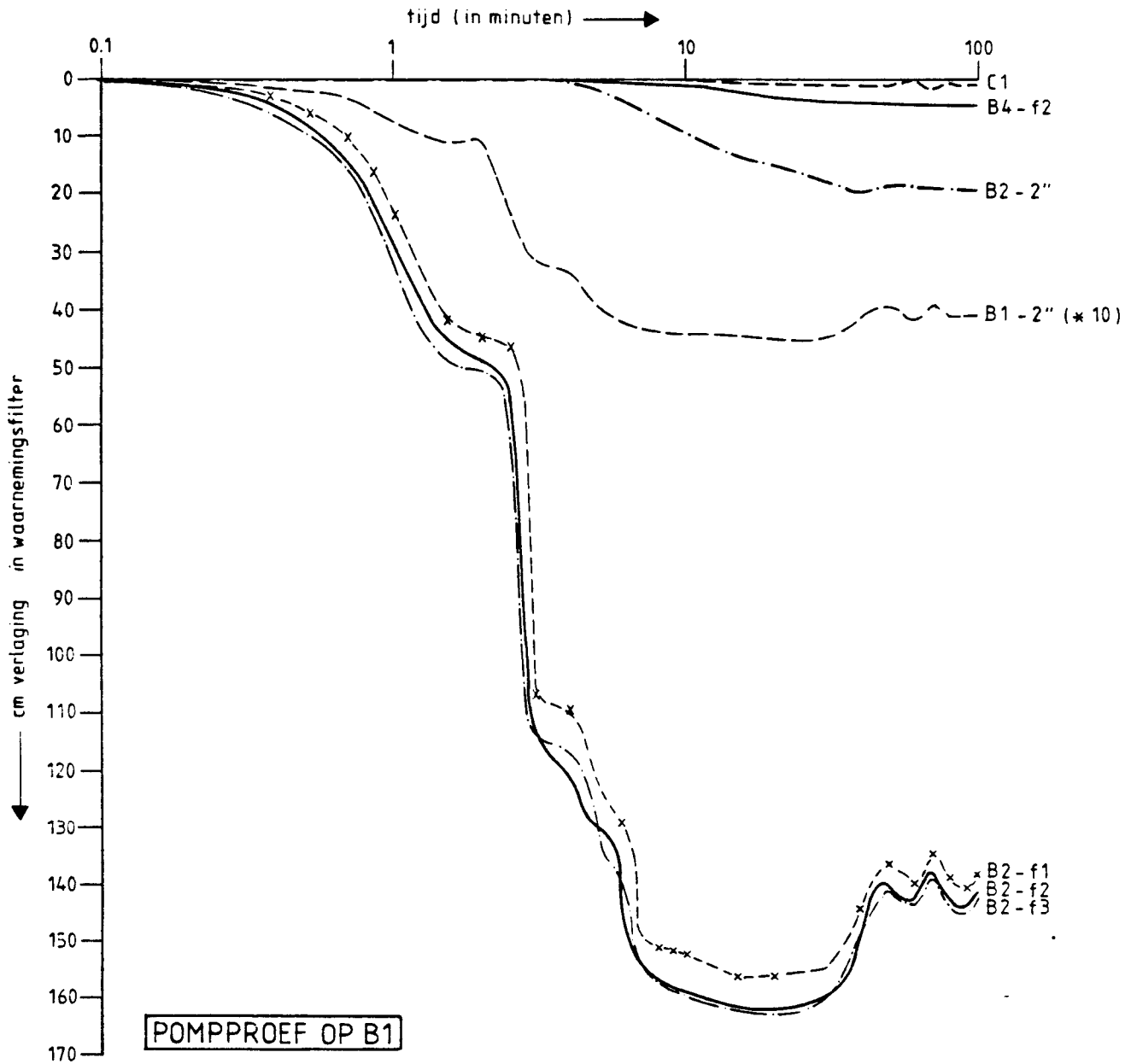
peilbuis	$f_1$	$f_2$	$f_3$	$f_{\text{onder}}$	$f_{\text{boven}}$	$f_{\text{af-stand}}$	pomp-filter
peilbuis identificatie	B2-f1	B2-f2	B2-f3	$C_1$	B2-2"	B4-f2	B1-2"
r (m)	0,97	0,97	0,97	40	0,97	40	0
z (m - ref)	13,50	14,25	14,90	21,72	7,50	14,47	14,40
(m - bk)	1,00	1,75	2,40			2,25	1,90
gemeten verlaging (m)	1,28	1,31	1,31	nihil	0,14	0,042	3,75
berekende verlaging (m)	1,22	1,35	1,30	-	-	0,16	4,41
temperatuur °C	12,6	11,4	10,9				

Opm. zie tevens opmerking bij pompproef op B3 (pg. 40).

Na 40 minuten pompen is het verlagingenbeeld stationair, met een fluctuatie (simultaan) van  $\pm 10$  cm.

Fig. 9.

Het tijdstijghoogteverlagingsverloop in diverse waarnemingsfilters tijdens de pompproef op B1, in het middelste watervoerende pakket, uitgevoerd op 12 september 1983.



Tabel 10.

De resultaten van de pompproef op put B3 in het middelste watervoerende pakket, uitgevoerd op 9 september 1983.

Geoptimaliseerde parameterwaarden:

$C_b$ (d)	$C_o$ (d)	$K_h$	$K_v$	Q (m <sup>3</sup> /d)	D (m)
300	300	4,75 m/d	4,75 m/d	26,21	4,20
		$7,0 \cdot 10^{-12} \text{m}^2$	$7,0 \cdot 10^{-12} \text{m}^2$	12,08° C	bovenzijde 12,80 m -ref.
		7,1 Darcy	7,1 Darcy		onderzijde 17,00 m -ref.

duur pompproef: 82 min.

duur stopproef: 63 min.

Waargenomen peilbuizen

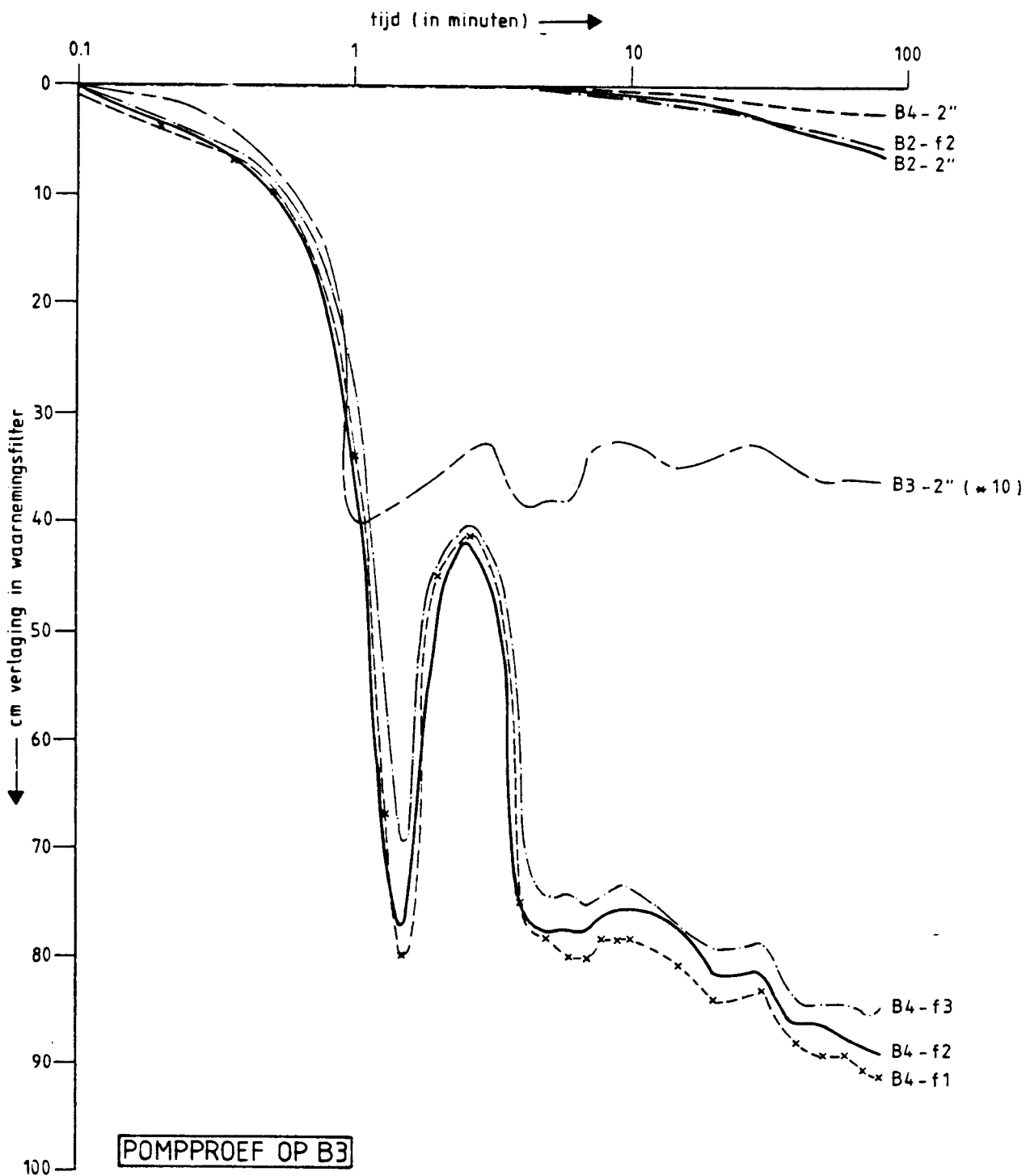
peilbuis	f <sub>1</sub>	f <sub>2</sub>	f <sub>3</sub>	f <sub>onder</sub>	f <sub>boven</sub>	f <sub>af-stand</sub>	pomp-filter
peilbuis identificatie	B4-f1	B4-f2	B4-f3	B4-2"	B2-2"	B2-f2	B3-2"
r (m)	1,16	1,16	1,16	1,16	40	40	0
z (m - ref)	13,62	14,47	15,12	21,75	7,50	14,25	14,15
(m - bk)	0,82	1,67	2,32	-	-	1,45	1,35
gemeten verlaging (m)	0,909	0,891	0,864	0,025	0,061	0,055	3,57
berekende verlaging (m)	0,921	0,907	0,824	-	-	0,133	
temperatuur °C	11,9	11,1	10,9	10,7	14,7	11,4	

Opmerkingen:

- de verlagingen op grotere afstand zijn lager, dan berekend; wellicht wordt dit veroorzaakt door de trend van "minder lemig worden" van het pakket naar het oosten toe, waardoor de verdeling van de toestroming naar de pompputten ongelijk kan zijn (geldt ook voor pompproef op B1);
- het verlagingenbeeld is niet stationair; de verlagingen op het einde van de pompproef zijn voor de analyse gebruikt; de geschatte eindverlaging is + 95 cm.

Fig. 10.

Het tijdstijghoogteverlagingsverloop in diverse waarnemingsfilters tijdens de pompproef op B3, in het middelste watervoerende pakket, uitgevoerd op 9 september 1983.



Tabel 11.

De resultaten van de pompproef op put B6 in het onderste watervoerende pakket, uitgevoerd op 8 september 1983.

Geoptimaliseerde parameterwaarden:

$C_b$ (d)	$C_o$ (d)	$K_h$	$K_v$	Q (m <sup>3</sup> /d)	D (m)
300	300	6,7 m/d	6,7 m/d	90,5	10
		$10,0 \cdot 10^{-12} \text{m}^2$	$10,0 \cdot 10^{-12} \text{m}^2$	$11,50^\circ \text{C}$	bovenzijde 18,70 m -ref.
		10,1 Darcy	10,1 Darcy		onderzijde 28,70 m -ref.

duur pompproef: 98 min.

duur stopproef: 88 min.

Waargenomen peilbuizen

peilbuis	$f_1$	$f_2$	$f_3$	$f_{\text{onder}}$	$f_{\text{boven}}$	$f_{\text{af-stand}}$	pomp-filter
peilbuis identificatie	B5-f1	B5-f2	B5-f3	$C_2$	B3-2"	$C_1$	B6-2"
r (m)	1,18	1,18	1,18	40	40	40	0
z (m - ref)	20,01	20,91	22,61	28,07	14,15	21,72	22,39
(m - bk)	1,31	2,21	3,91			3,02	3,69
gemeten verlaging (m)	0,491	0,498	1,374	0,077	0,062	0,097	4,27
berekende verlaging (m)	0,946	1,084	1,368			0,220	
temperatuur °C	10,9	11,2	11,1		11,9		

Opmerkingen:

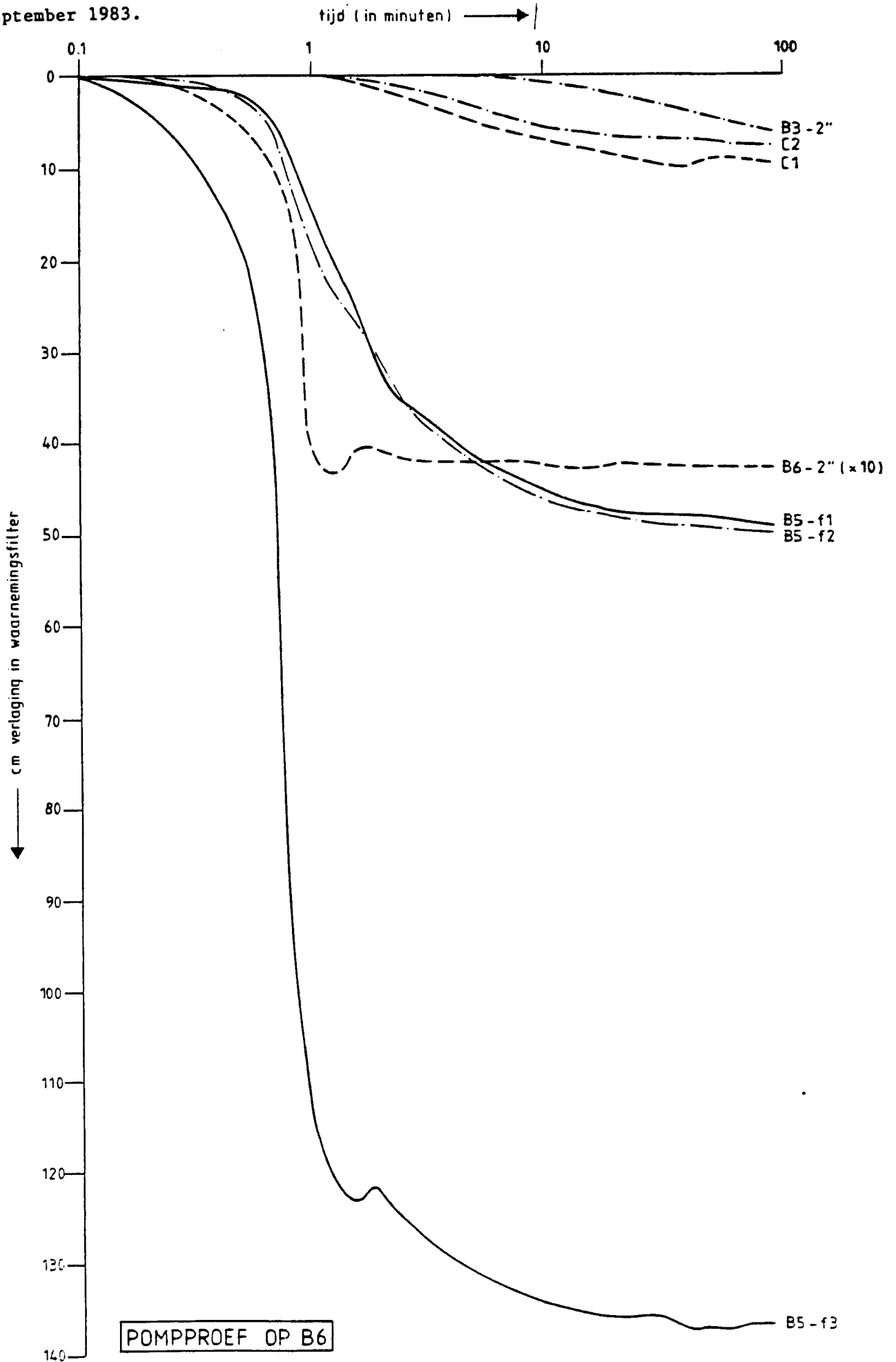
- tussen het pompfilter en  $f_1/f_2$  lijkt een hydraulische weerstandslaag aanwezig te zijn!

Een aanwijzing hiervoor is de aanwezigheid van afdichtingen in B5, boven filter 3;

- de verlagingen zijn op het einde van de pompproef (na  $\pm 100$  min) stationair.

Fig. 11.

Het tijdstijghoogteverlagingsverloop in diverse waarnemingsfilters tijdens de pompproef op B6, in het onderste watervoerende pakket, uitgevoerd op 8 september 1983.





Tabel 12.

De resultaten van de pompproef op put B4 in het onderste watervoerende pakket, uitgevoerd op 15 september 1983.

Geoptimaliseerde parameterwaarden:

$C_b$ (d)	$C_o$ (d)	$K_h$	$K_v$	Q (m <sup>3</sup> /d)	D (m)
300	200	7,5 m/d	7,5 m/d	94,176	10
		$11,2 \cdot 10^{-12} \text{m}^2$	$11,2 \cdot 10^{-12} \text{m}^2$	10,70° C	bovenzijde 18,70 m -ref.
		11,3 Darcy	11,3 Darcy		onderzijde 28,70 m -ref.

duur pompproef: 165 min.

duur stopproef: 49 min.

Waargenomen peilbuizen

peilbuis	$f_1$	$f_2$	$f_3$	$f_{\text{onder}}$	$f_{\text{boven}}$	$f_{\text{af-stand}}$	pomp- filter
peilbuis identificatie	B3-f1	B3-f2	B3-f3	$C_2$	B4-f2	B6-2"	B4-2"
r (m)	1,22	1,22	1,22	56,57	0	40	0
z (m - ref)	20,88	22,48	23,98	28,07	14,47	22,39	21,75
(m - bk)	2,18	3,78	5,28			3,69	3,05
gemeten verlaging (m)	0,705	1,151	0,949	0,053	0,086	0,122	4,80
berekende verlaging (m)	1,174	1,170	0,853			0,214	
temperatuur °C	12,7	10,8	11,6				

Opmerkingen:

- tussen  $f_1$  en het pompfilter is waarschijnlijk een hydraulische weerstandslaag aanwezig!

Deze laag zou op hetzelfde niveau aanwezig kunnen zijn als die, welke bij de analyse van de pompbeurt op B6 aanwezig werd verondersteld;

- de verlagingen zijn na ± 100 minuten pompen stationair.

Fig. 12.

Het tijd-stijghoogteverlagingsverloop in diverse waarnemingsfilters tijdens de pompproef v p B4 in het onderste watervoerende pakket, uitgevoerd op 15 september 1983.

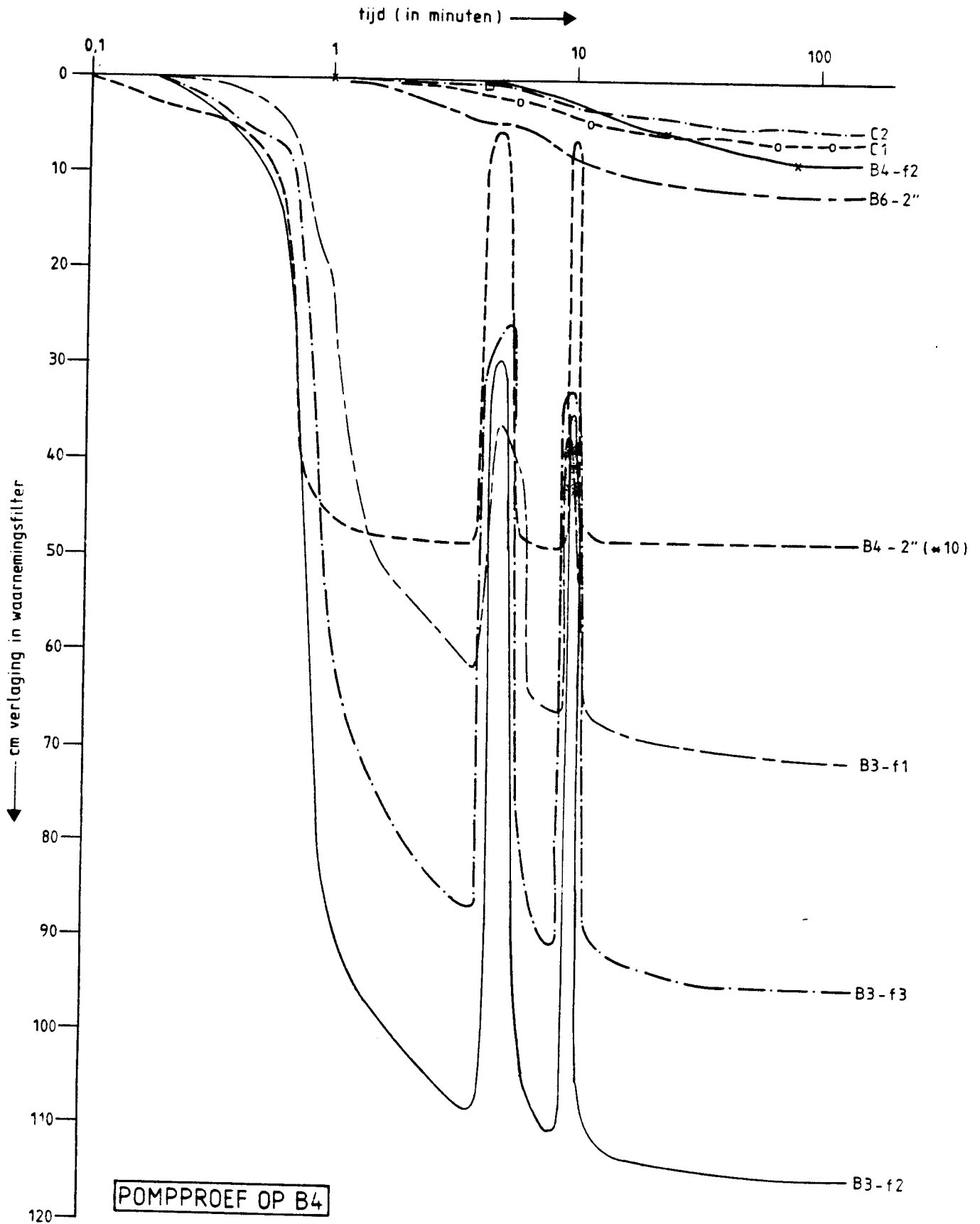
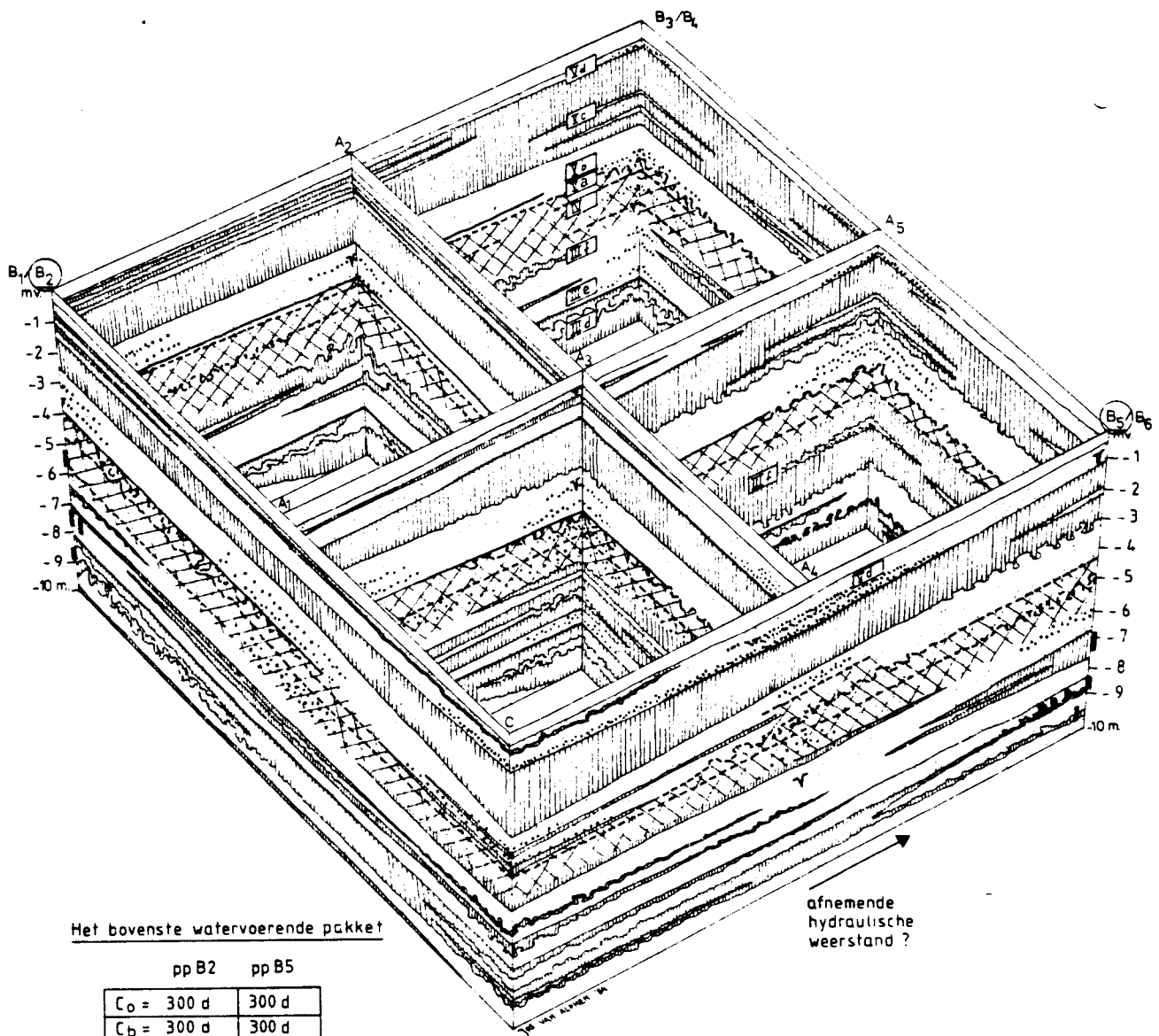


Fig. 13.

Schuttingprofielen van de ondergrond van de proeflokatie, waarin opgenomen de pomp- en waarnemingsfilters.

Per watervoerend pakket wordt een overzicht gegeven van de geoptimaliseerde parameterwaarden.

Het bovenste watervoerende pakket



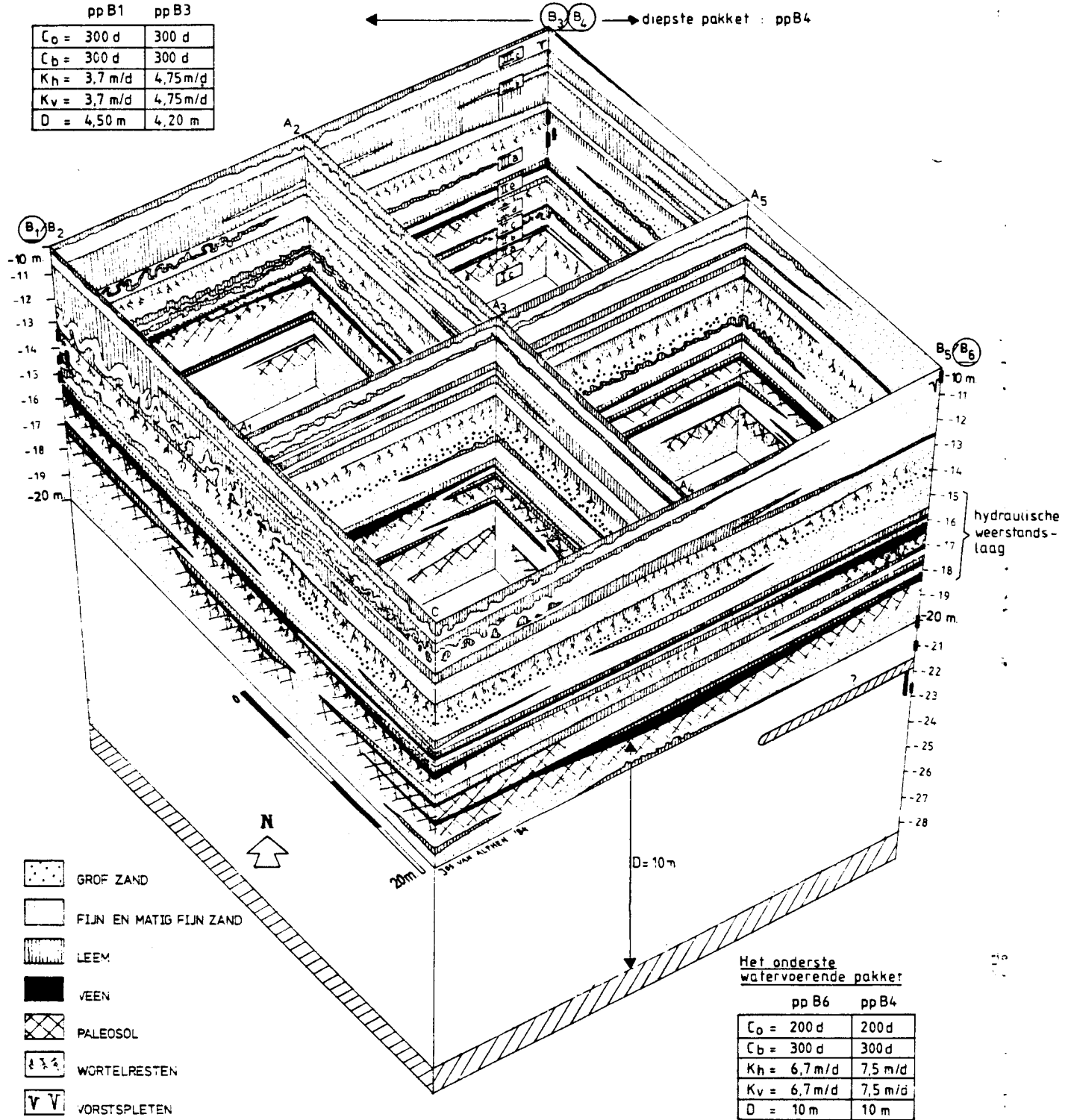
Het bovenste watervoerende pakket

	pp B2	pp B5
$C_0 =$	300 d	300 d
$C_b =$	300 d	300 d
$K_h =$	1,8 m/d	1,3 m/d
$K_v =$	1,8 m/d	1,1 m/d
$D =$	6,30 m	10 m

## Het middelste watervoerende pakket

Het middelste watervoerende pakket

	pp B1	pp B3
$C_o$	300 d	300 d
$C_b$	300 d	300 d
$K_h$	3,7 m/d	4,75 m/d
$K_v$	3,7 m/d	4,75 m/d
$D$	4,50 m	4,20 m



Tabel 13.

De uitdrukking van de horizontale permeabiliteit ( $K_h$ ) en de verticale permeabiliteit ( $K_v$ ) in m/d,  $m^2$  en Darcy.

Put nr.	geleidingsvermogen, $\mu S/cm$ en weerstand in $\Omega m$	$HCO_3^-$ mg/l	temp. $^{\circ}C$	$Cl^-$ mg/l eq.	$\tau * 10^{-5}$ $m^2/s$	$K_h$	$K_v$	eenheid
B5	53/189	282	15,24	-	1,144	1,3	1,1	m/d
						1,76	1,48	$10^{-12} m^2$
						1,78	1,50	Darcy
B2	83/120	346	15,24	-	1,144	1,8	1,8	m/d
						2,43	2,43	$10^{-12} m^2$
						2,46	2,46	Darcy
B3	80/125	258	12,08	-	1,241	4,75	4,75	m/d
						6,95	6,95	$10^{-12} m^2$
						7,05	7,05	Darcy
B1	200/50	436	11,04	60	1,263	3,7	3,7	m/d
						5,50	5,50	$10^{-12} m^2$
						5,59	5,59	Darcy
B6	63/159	305	11,50	-	1,260	6,7	6,7	m/d
						9,96	9,96	$10^{-12} m^2$
						10,09	10,09	Darcy
B4	44/227	228	11,50	-	1,260	7,5	7,5	m/d
						11,15	11,15	$10^{-12} m^2$
						11,30	11,30	Darcy

## 7. Conclusies en aanbevelingen uit de pompproef-analyses

- Er is een aantoonbare toename van de permeabiliteit bij toenemende diepte vanaf het maaiveld.
  
- Met behulp van de gemeten verlagingen is (op één pompproef na) geen conclusie mogelijk ten aanzien van een mogelijke aanwezige anisotropie van de permeabiliteit binnen de gepompte pakketten.  
Hierbij wordt de verstoring van het verlagingspatroon ten gevolge van aanwezige leemlagen in het pakket buiten beschouwing gelaten.  
Diverse mogelijke verklaringen zijn hiervoor mogelijk:
  - a. er is geen anisotropie in de permeabiliteit aanwezig;
  - b. de dikte van het gepompte pakket is te klein voor het creëren van een goed meetbare verticale gradiënt in de grondwaterstijghoogte;
  - c. er treden kortsluitstromen op van grondwater naar het ontrekkingsfilter, langs de stijgbuis hiervan.

Bij het plannen en uitvoeren van "kleine" pompproeven, zoals te Best is uitgevoerd kunnen de volgende aanbevelingen overwogen worden:

- pas het aantal meetfilters aan, aan het aantal te verwerven parameterwaarden; neem zo mogelijk een veelvoud van het aantal parameters;
- voer een bodemverkenning uit ter plaatse van de pompproeflokatie en interpreteer deze op aspecten, die voor de stroming van grondwater van belang zijn, alvorens de pompproeffilters worden geïnstalleerd;
- voor het interpreteren van de pompproefresultaten (met name op anisotropie) is het van groot belang, dat het afdichten van (kleine) klei- of leemlagen binnen, of grenzend aan het watervoerende pakket zorgvuldig geschiedt;
- zoals bij de pompproeven te Best is uitgevoerd is het aan te bevelen om, behalve meetfilters nabij het pompfilter, meetfilters te installeren op relatief grote afstand van de pompput, en in de onder- en boven begrenzende watervoerende pakketten.

## 8. Literatuur

Alphen, J.S.L.J. van, Sedimentologische interpretatie van de afzettingen van de Nuenen-groep nabij Best (RIVM-rapport, 1984).

Gerringa, L. en A. Obdam (1985). Variaties in fysisch-chemische bodemkarakteristieken.  
(RIVM-deelrapport no. 84038804).

Gerringa, L. (1985) Samenvatting en conclusies van het project "Variaties in fysisch-chemische bodemkarakteristieken" (RIVM-deelrapport no. 84038805).

Laboratorium voor Grondmechanica: Resultaten van het grondmechanisch terreinonderzoek, uitgevoerd ten behoeve van Rijksweg 264 te Best (rapport Co - 251340/65, febr. 1982).

Meinardi, C.R. (1985) Samenstelling en stroming van het grondwater op de proeflokatie te Best (RIVM-deelrapport, no. 84038803).

Rijks Geologische Dienst: Geologisch onderzoek ten behoeve van Rijksweg 264; "Ingraving Best".



Bijlage bij het rapport:

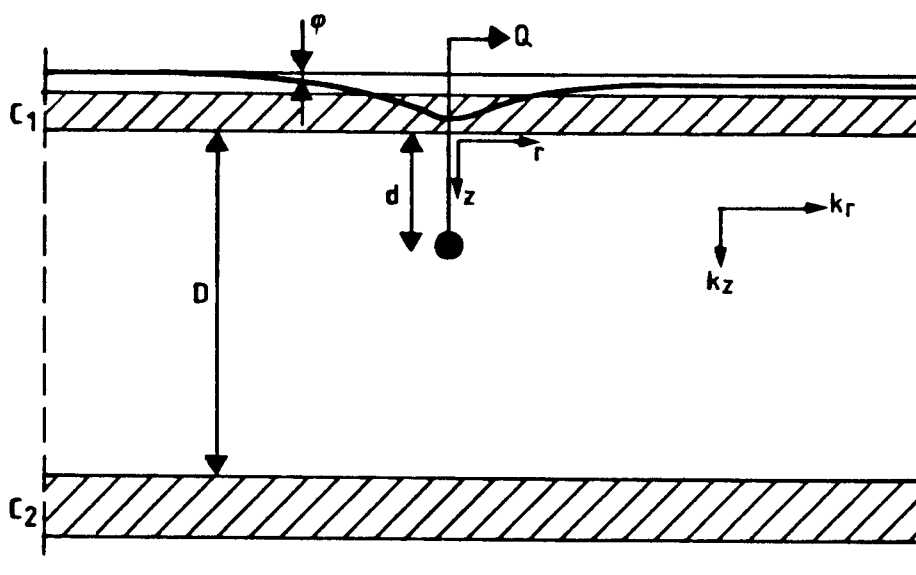
De analyse van zes pompproeven op korte filters in de Nuenen-groep nabij Best.

Berekening van de verlaging van de grondwaterstijghoogte in een homogeen anisotroop watervoerend pakket, dat zowel aan de onder- als aan de bovenzijde door hydraulische weerstandslagen wordt begrensd, ten gevolge van een continue onttrekking van grondwater aan een puntvormig filter.

Rijksinstituut voor Volksgezondheid  
en Milieuhygiëne, het Laboratorium voor  
Bodem- en grondwateronderzoek.

A. Obdam

29 - 11 - 1984



Een geohydrologisch schema van een pompproef met een puntvormig filter in een anisotroop watervoerend pakket, aan de onder- en de bovenzijde begrensd door hydraulische weerstandslagen.

Hierin is:

- Q = het onttrekkingsdebiet van de puntbron. [L<sup>3</sup>.T<sup>-1</sup>]
- φ = de stijghoogte-verlaging op een punt in het watervoerend pakket met de coördinaten r en z. [L]
- r, z = de horizontale en verticale coördinaten in het watervoerende pakket. [L]
- d = de diepte van het puntvormige filter. [L]
- D = de dikte van het watervoerende pakket. [L]
- K<sub>r</sub> = de horizontale en de verticale permeabiliteit van het watervoerende pakket. [L.T<sup>-1</sup>]
- C<sub>1</sub> = de hydraulische weerstandswaarde van de bovenste- en de onderste weerstandslaag. [T]

Voor dit stromingsprobleem geldt de volgende algemene differentiaalvergelijking

$$\frac{\partial^2 \phi}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \phi}{\partial r} \frac{k_z}{k_r} \frac{\partial^2 \phi}{\partial z^2} = 0 \quad (1)$$

Hiervoor gelden de randvoorwaarden:

$$\frac{\partial \phi}{\partial r} = 0, \text{ voor } z = d \text{ en } r = 0;$$

$$\lim_{\rho \rightarrow 0} \rho^2 \frac{\partial \phi}{\partial \rho} = - \frac{Q}{4\pi k_r}, \text{ met } \rho = \sqrt{r^2 + (z-d)^2}$$

$$\phi(\infty, z) = 0$$

$$\frac{\partial \phi(r, 0)}{\partial z} = \frac{a \phi(r, 0)}{k_z C_1}, \quad \frac{\partial \phi(r, D)}{\partial z} = \frac{a \phi(r, D)}{k_z C_2} \text{ met } a = : \sqrt{\frac{k_z}{k_r}}$$

Voorlopig zal in plaats van (1) de volgende vereenvoudigde differentiaalvergelijking worden opgelost:

$$\frac{\partial^2 \phi}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \phi}{\partial r} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial z^2} = 0 \tag{2}$$

Op de oplossing van (2) zal achteraf een transformatie toegepast worden, teneinde de effecten van de anisotropie van het watervoerende pakket in rekening te brengen.

Deze transformatie gaat als volgt in zijn werk:

Reken i.p.v. de isotrope permeabiliteit  $k$  met  $k' = \sqrt{k_r \cdot k_z}$ , het meetkundig gemiddelde van de horizontale- en de verticale permeabiliteit.

Ook kan hiervoor de verhouding worden gebruikt van  $a = \sqrt{\frac{k_z}{k_r}}$ ;  $k' = a k_r$  en  $k' = k_z/a$ .

Verder zullen voor deze transformatie alle verticale maten door  $a$  moeten worden gedeeld.

$$D' \rightarrow D/a$$

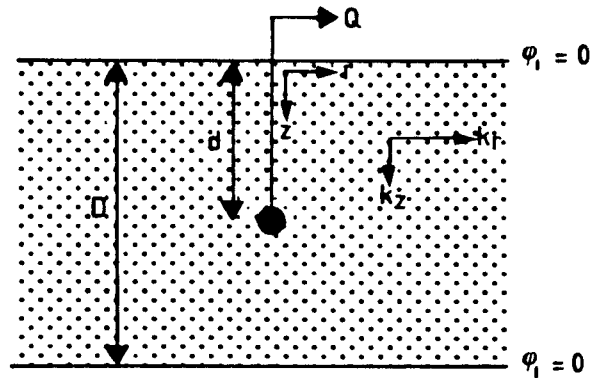
$$d' \rightarrow d/a$$

$$z' \rightarrow z/a$$

De algemene oplossing van (2):

Stel dat de oplossing van (2) is  $\phi = \phi_1 + \phi_2$ .

Hierin is  $\phi_1$  de oplossing van een stromingssituatie met het volgende schema:



In de variabele  $\phi_2$ , wordt de invloed van de hydraulische weerstandslagen weergegeven.

De oplossing voor  $\phi_1$  bij een continue stroming naar een puntbron, nabij twee gelijke potentialen is (met toestemming ontleend aan het werk van Ir. G.A. Bruggeman):

$$\phi_1(r, z) = \frac{Q}{\Pi D k} \sum_{n=1}^{\infty} \sin\left(\frac{n\Pi d}{D}\right) \sin\left(\frac{n\Pi z}{D}\right) K_0\left(\frac{n\Pi r}{D}\right)$$

De oneindige Hankeltransformatie van deze uitdrukking is:  
(zie Churchill, 1972, voor de Hankeltransformatie)

$$\int_0^{\infty} r J_0(\alpha r) \cdot \phi_1(r, z) dr$$

Dit kan worden teruggebracht tot  $F(z) * \int_0^{\infty} r J_0(\alpha r) \cdot K_0\left(\frac{n\Pi r}{D}\right) dr$

Daar  $\int_0^{\infty} t J_0(at) K_0(bt) dt = 1/(a^2 + b^2)$  wordt de Hankel getransformeerde van  $\phi \rightarrow \hat{\phi}_1$ :

$$\hat{\phi}_1(\alpha, z) = \frac{Q}{\Pi D k} \sum_{n=1}^{\infty} \sin\left(\frac{n\Pi d}{D}\right) \sin\left(\frac{n\Pi z}{D}\right) \cdot \frac{1}{\alpha^2 + \left(\frac{n\Pi}{D}\right)^2} = \frac{Q}{2\Pi D k} \sum_{n=1}^{\infty} \left[ \frac{\cos\left\{\frac{n\Pi(d-z)}{D}\right\}}{\left(\frac{n\Pi}{D}\right)^2 + \alpha^2} - \frac{\cos\left\{\frac{n\Pi(d+z)}{D}\right\}}{\left(\frac{n\Pi}{D}\right)^2 + \alpha^2} \right]$$

Nu is (zie Oberhettinger 1.51)

$$\sum_{n=1}^{\infty} \frac{\cos\left\{\frac{n\Pi x}{l}\right\}}{n^2 a^2 + b^2} = \frac{\Pi}{2ab} \frac{\cosh\{(\Pi b/a l)(1-x)\}}{\sinh(\Pi b/a)}$$

met als voorwaarde:  $0 < x < 2l$  dus  $x$  positief!

Zodat:

$$\hat{\phi}(\alpha, z) = \frac{Q}{4\Pi k \cdot \alpha} \cdot \left[ \frac{\cosh(\alpha(D-d+z))}{\sinh(\alpha D)} - \frac{\cosh(\alpha(D-d-z))}{\sinh(\alpha D)} \right]$$

N.B. deze oplossing geldt voor  $z < d$ !

Daar  $\cosh(\alpha) - \cosh(\beta) = -2 \cdot \sinh((\alpha+\beta)/2) \cdot \sinh((\alpha-\beta)/2)$

kan  $\hat{\phi}$  ook geschreven worden als:

$$\hat{\phi}(\alpha, z) = \frac{Q}{2\Pi k \cdot \alpha} \cdot \frac{\sinh(\alpha(D-d)) \sinh(\alpha z)}{\sinh(\alpha D)} \text{ met als voorwaarde: } z < d$$

$$\hat{\phi}(\alpha, z) = \frac{Q}{2\Pi k \cdot \alpha} \frac{\sinh(\alpha(D-z)) \sinh(\alpha d)}{\sinh(\alpha D)} \text{ met als voorwaarde: } d < z < D$$

Merk op dat bovenstaande oplossing van  $\phi_1$  slechts in de Hankelgetransformeerde vorm ter beschikking is!

In het navolgende zal  $\phi_2$  worden opgelost. Hierdoor worden de invloeden van de hydraulische weerstandslagen op de verlaging van de grondwaterstijghoogte in rekening gebracht.

Voor  $\phi_2$  geldt nu: 
$$\frac{\partial^2 \phi_2}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \phi_2}{\partial r} + \frac{\partial^2 \phi_2}{\partial z^2} = 0$$

Hiervoor gelden de volgende randvoorwaarden:

Merk op, dat de randvoorwaarden voornamelijk de flux door de hydraulische weerstandslagen betreffen.

$$\frac{\partial \phi_2}{\partial r} = \frac{\partial \phi}{\partial r} - \frac{\partial \phi_1}{\partial r} \quad (\text{omdat } \phi_2 = \phi - \phi_1)$$

$$\frac{\partial \phi_1}{\partial z}(r, 0) + \frac{\partial \phi_2}{\partial z}(r, 0) = \frac{(\phi_1(r, 0) + \phi_2(r, 0))}{k c_1}$$

$$\frac{\partial \phi_1}{\partial z}(r, D) + \frac{\partial \phi_2}{\partial z}(r, D) = \frac{(-\phi_1(r, D) - \phi_2(r, D))}{k c_2}$$

$$\frac{\partial \phi_2}{\partial z}(r, 0) = \frac{\phi_2(r, 0)}{k c_1} - \frac{\partial \phi_1(r, 0)}{\partial z}$$

$$\frac{\partial \phi_2}{\partial z}(r, D) = -\frac{\phi_2(r, D)}{k c_2} - \frac{\partial \phi_1(r, D)}{\partial z}$$

$$\phi_2(r, z) = 0$$

$$\lim_{\rho \rightarrow 0} \rho^2 \frac{\partial \phi_2}{\partial \rho} = \lim_{\rho \rightarrow 0} \rho^2 \left\{ \frac{\partial \phi}{\partial \rho} - \frac{\partial \phi_1}{\partial \rho} \right\} = \frac{Q}{4\pi k} - \left( -\frac{Q}{4\pi k} \right) = 0$$

zodat  $\frac{\partial \phi_2}{\partial r}(0, z) = 0$ , ook voor  $z = d!$

De oneindige Hankel-transformatie van deze randvoorwaarden voor de differentiaalvergelijking voor  $\phi_2$ , waarbij ook de getransformeerde  $\hat{\phi}_1$  voorkomt levert:

$$\frac{\partial^2 \hat{\phi}_2(\alpha, z)}{\partial z^2} - \alpha^2 \hat{\phi}_2(\alpha, z) = 0$$

$$\frac{\partial \hat{\phi}_2(\alpha, 0)}{\partial z} = \frac{\hat{\phi}_2(\alpha, 0)}{k c_1} - \frac{\partial \hat{\phi}_1(\alpha, 0)}{\partial z}$$

$$\frac{\partial \hat{\phi}_2(\alpha, D)}{\partial z} = - \frac{\hat{\phi}_2(\alpha, D)}{k c_2} - \frac{\partial \hat{\phi}_1(\alpha, D)}{\partial z}$$

Voor  $\hat{\phi}_1$  was de Hankel-transformatie eerder afgeleid:

$$\begin{aligned} \hat{\phi}_1(\alpha, z) &= \frac{Q}{2\pi k \alpha} \frac{\sinh(\alpha(D-d)) \sinh(\alpha z)}{\sinh(\alpha D)} \quad \text{voor } z < d \\ &= \frac{Q}{2\pi k \alpha} \frac{\sinh(\alpha(D-z)) \sinh(\alpha d)}{\sinh(\alpha D)} \quad \text{voor } d < z < D \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \hat{\phi}_1(\alpha, z)}{\partial z} &= \frac{Q}{2\pi k} \frac{\sinh(\alpha(D-d)) \cosh(\alpha z)}{\sinh(\alpha D)} \quad \text{voor } z < d \\ &= - \frac{Q}{2\pi k} \frac{\cosh(\alpha(D-z)) \sinh(\alpha d)}{\sinh(\alpha D)} \quad \text{voor } d < z < D \end{aligned}$$

$$\text{Dus: } \frac{\partial \hat{\phi}_1(\alpha, 0)}{\partial z} = \frac{Q}{2\pi k} \frac{\sinh(\alpha(D-d))}{\sinh(\alpha D)} = q \cdot F(\alpha)$$

$$\frac{\partial \hat{\phi}_1(\alpha, D)}{\partial z} = - \frac{Q}{2\pi k} \frac{\sinh(\alpha d)}{\sinh(\alpha D)} = q \cdot G(\alpha)$$

Noem in het vervolg:  $q = \frac{Q}{4\pi k}$ ;  $F(\alpha) = \frac{2 \sinh(\alpha(D-d))}{\sinh(\alpha D)}$ ;  $G(\alpha) = \frac{-2 \sinh(\alpha d)}{\sinh(\alpha D)}$

Stel de algemene oplossing van de differentiaalvergelijking (2) voor  $\hat{\phi}_2$  is:

$$\hat{\phi}_2(\alpha, z) = A \cdot \sinh(\alpha z) + B \cdot \cosh(\alpha z)$$

$$\text{dan is: } \frac{\partial \hat{\phi}_2(\alpha, z)}{\partial z} = \alpha \cdot A \cdot \cosh(\alpha z) + \alpha \cdot B \cdot \sinh(\alpha z)$$

$$\text{voor } z = 0: \frac{\partial \hat{\phi}_2(\alpha, z)}{\partial z} = \alpha A = \frac{B}{kC_1} - \frac{\partial \hat{\phi}_1(\alpha, z)}{\partial z}$$

$$\text{dus: } A = \frac{B}{\alpha kC_1} - \frac{q}{\alpha} F(\alpha)$$

noem nu verder  $b = 1/(\alpha kC_1)$ ; en  $f = q/\alpha \cdot F(\alpha)$

$$\text{dan is: } A = b \cdot B - f$$

$$\begin{aligned} \text{voor } z = D: \quad \frac{\partial \hat{\phi}_2(\alpha, z)}{\partial z} &= \alpha A \cosh(\alpha D) + \alpha B \sinh(\alpha D) \\ &= \frac{-A \sinh(\alpha D) - B \cosh(\alpha D)}{kC_2} - q G(\alpha) \end{aligned}$$

Invulling hierin van de uitdrukking voor A levert:

$$B = \frac{f \left\{ \alpha + \frac{1}{kC_2} \operatorname{tgh}(\alpha D) \right\} - q G(\alpha) / \cosh(\alpha D)}{\alpha b + \frac{1}{kC_2} + \operatorname{tgh}(\alpha D) \left\{ \alpha + \frac{b}{kC_2} \right\}}$$

De terug-transformatie van  $\hat{\phi}$  is nu:  $\phi(r, z) = \int_0^{\infty} \alpha \hat{\phi}(\alpha, z) J_0(\alpha r) d\alpha$

$$\begin{aligned} \text{met: } \hat{\phi}(\alpha, z) &= \hat{\phi}_1(\alpha, z) + \hat{\phi}_2(\alpha, z) \\ &= q/\alpha \cdot F(\alpha) \cdot \sinh(\alpha z) + A \cdot \sinh(\alpha z) + B \cdot \cosh(\alpha z), \end{aligned}$$

voor  $0 \leq z \leq d$ ;

$$= -q/\alpha \cdot G(\alpha) \cdot \sinh(\alpha(D-z)) + A \cdot \sinh(\alpha z) + B \cdot \cosh(\alpha z)$$

voor  $d \leq z \leq D$ .

In bovenstaande formules zijn de volgende vervangende symbolen opgenomen:



$$q = Q/(4 \cdot \Pi \cdot k); \quad F(\alpha) = 2 \cdot \frac{\sinh(\alpha(D-d))}{\sinh(\alpha D)}$$

$$G(\alpha) = -2 \cdot \frac{\sinh(\alpha d)}{\sinh(\alpha D)}; \quad f = q/\alpha \cdot F(\alpha);$$

$$b = 1/(\alpha \cdot k \cdot c_1); \quad A = b \cdot B - f; \quad B = \frac{f\{\alpha + \operatorname{tgh}(\alpha D)/(kc_2)\} - q G(\alpha)/\cosh(\alpha D)}{\alpha b + 1/(kc_2) + \operatorname{tgh}(\alpha D)\{\alpha + b/(kc_2)\}}$$

Afgezien van het feit, dat deze oplossing nog Hankel moet worden teruggetransformeerd zal deze als volgt voor de anisotropie van de permeabiliteit in het pakket moeten omgezet:

$$D^\downarrow = D/a; \quad d^\downarrow = d/a; \quad z^\downarrow = z/a;$$

$$k^\downarrow = a \cdot k_r \text{ of } k^\downarrow = k_z/a.$$

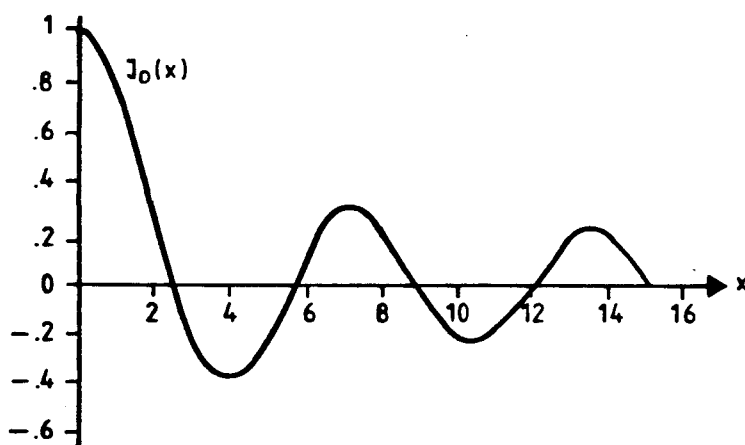
$$\text{Hierin is: } a = \sqrt{\frac{k_z}{k_r}}$$

### De numerieke Hankel-terugtransformatie

De Hankel-terugtransformatie is als volgt gedefinieerd:

$$\phi(r, z) = \int_0^\infty \alpha \cdot \hat{\phi}(\alpha, z) \cdot J_0(\alpha r) d\alpha$$

De hierin voorkomende functie  $J_0(x)$  heeft het volgende verloop met  $x$ :



$J_0(x)$  is hierin een Bessel-functie van de eerste soort, de nulde orde (zie Abramowitz and Stegun voor meer informatie over Bessel-functies). Verder kan worden opgemerkt, dat de nulpuntsafstanden van deze cyclische Bessel-functie asymptotisch naar het getal pi naderen; na tientallen cycli echter is deze waarde pas voldoende nauwkeurig bereikt voor gebruik in een numerieke reken-procedure.

Een bestudering van de terug te transformeren functie leert het volgende:

1. voor kleine  $\alpha$  moet deze functie door een benaderende functie worden vervangen;
2. voor grote  $\alpha$  zullen met name de hyperbolische functie-onderdelen apart moeten worden bewerkt, alvorens de numerieke waarde kan worden berekend.

Voor oplossing van de bovenstaande integraal wordt gebruik gemaakt van een computerprogramma, dat op numerieke wijze een integraal van nul tot oneindig kan berekenen, met als integrand (de te integreren functie) een functie, die bestaat uit een niet-cyclisch, en een cyclisch deel.

Het cyclische deel kan behalve uit een sinus of cosinus ook bestaan uit een Bessel-functie van de eerste soort, van de nulde of de eerste orde ( $J_0$  of  $J_1$ ) of een Bessel-functie van de tweede soort, eveneens van de nulde of de eerste orde ( $Y_0$  of  $Y_1$ ).

Het niet-cyclische deel mag ook bestaan uit een gemodificeerde Bessel-functie van de tweede soort, eveneens van de nulde en de eerste orde ( $K_0$  of  $K_1$ ).

Het programma, BESINT genaamd, staat tevens de aanwezigheid van een asymptoot in de functie-waarden voor  $x \rightarrow 0$  toe.

BESINT werkt voor de cyclische Bessel-functie als volgt:

- in geval van een singulariteit voor waarde nul van de integratievariabele  $\alpha$  wordt de integraal in de nabijheid van nul, in ieder geval binnen de eerste cyclus van de integrand als volgt berekend:  
op numerieke wijze wordt in de rekenprocedure de positie van de waarde van de integrand en de integratie-variabele verwisseld, waarna op

eenvoudige wijze de integraal van de continu dalende (door verwisseling verkregen) nieuwe integrand wordt berekend. Voor de schatting van de restterm na afbreken van de stapsgewijze integratie-procedure wordt gebruik gemaakt van een eenvoudige regel van Meulenbeld en Baart;

- vervolgens, of als eerste stap bij afwezigheid van een singulariteit voor  $\alpha = 0$  wordt voor de eerste 40 cycli van de Bessel-functie de integratie uitgevoerd over de positieve en de negatieve trajecten van de integrand. Hiervoor wordt per traject een procedure gebruikt, die gebaseerd is op de numerieke 8 punts Gauss-procedure. Hiermee kan de uitkomst met een op te geven nauwkeurigheid worden berekend. Deze 40 eerste onderdelen van de uitkomst worden na berekening gesommeerd;
- voor de volgende oneindig vele cycli van de integrand wordt eveneens de integratie per cyclus uitgevoerd op de wijze die hierboven is vermeld. Daar nu echter sprake is van een nagenoeg vaste nulpunts-afstand van de Bessel-functie kan de Euler-transformatie voor cyclische functies worden toegepast (zie verder Bromwich).  
Het toepassen van deze transformatie houdt in, dat voor de berekening van de integraal bij toenemende cyclische termen een differentie van een steeds hogere orde wordt berekend en gebruikt. Deze procedure kan de convergentie van de berekening van een cyclische sommatie aanzienlijk versnellen.

Verificatie van de juistheid van de verlagingsberekening voor een puntproef.

Deze verificatie werd uitgevoerd door een berekening uit te voeren met het RIVM-programma HYDROPAR, dat de stijghoogteverlaging berekent in een wattervoerend pakket, met aan de bovenzijde hiervan een hydraulische weerstandslaag, ten gevolge van een onttrekking aan een zeer kort filter (0,10 m lang).

De in het programma PUNTPP (waarin het programma BESINT is opgenomen) ingevoerde parameters zijn (zie fig. 14 met onderschrift!):

de dikte van het pakket is : 10 m

de weerstand van de bovenste weerstandslaag is: 200 dagen  
de weerstand van de onderste weerstandslaag is:  $1.10^{+2}$  dagen  
de horizontale doorlatendheid is : 4 m/dag  
de verticale doorlatendheid is : 2 m/dag  
de diepteligging van het pompfilter is : 2,05 m  
het debiet van de pompput is :  $24 \text{ m}^3/\text{dag}$

Deze parameters zijn behalve in het programma PUNTPP tevens in aangepaste vorm in het programma HYDROPAR ingevoerd.

Dit laatste programma berekent de stijghoogte-verlaging voor een vergelijkbare stromingssituatie als het eerste programma, met dit verschil, dat er slechts één hydraulische weerstandslaag kan worden "meegenomen" (aan de bovenzijde van het pakket), terwijl het pompfilter een zelf te kiezen lengte mag hebben.

De enige aanpassing in HYDROPAR is het invoeren geweest van een pompfilter van 2,00 tot 2,10 m, vanaf de bovenzijde van het pakket in plaats van een puntvormig filter op 2,05 m diepte.

Een vergelijking van resultaten.

De stijghoogteverlagingen, berekend op punten, met een radiale afstand r tot de pompput en een diepte z zijn:

r (m)	z (m)	$\phi$ -HYDROPAR (m)	$\phi$ -PUNTPP (m)	verschil
1,00	1,00	0,635727	0,63079	0,004937
1,00	2,00	0,894999	0,89830	-0,003301
1,00	6,00	0,301419	0,30120	0,000219
10,00	1,00	0,232416	0,23199	0,000426
10,00	2,00	0,230881	0,23441	-0,003529
10,00	6,00	0,216945	0,21694	<u>0,000005</u>
				-0,000207
		standaardafwijking		
		van het verschil:		0,003088

Gezien deze kleine verschillen kan worden geconcludeerd, dat de berekeningen van het programma PUNTPP betrouwbaar zijn.

Literatuur

Abramowitz, M. and I.A. Stegun, 1970: Handbook of Mathematical Functions.  
Dover Publications Inc. New York.

Bromwich, T.J.I.: An introduction of the theory of infinite series.

Churchill, R.V., 1972: Operational Mathematics. McGraw-Hill Kogakusha,  
Ltd, Tokyo.

Meulenbeld, B. en W.K Baart, 1969: Analyse, deel 2. Technische Uitgeverij  
H. Stam N.V., Culemborg.

Oberhettinger, F., 1973: Fourier Expansions, a collection of formulas.  
Academic Press, New York.