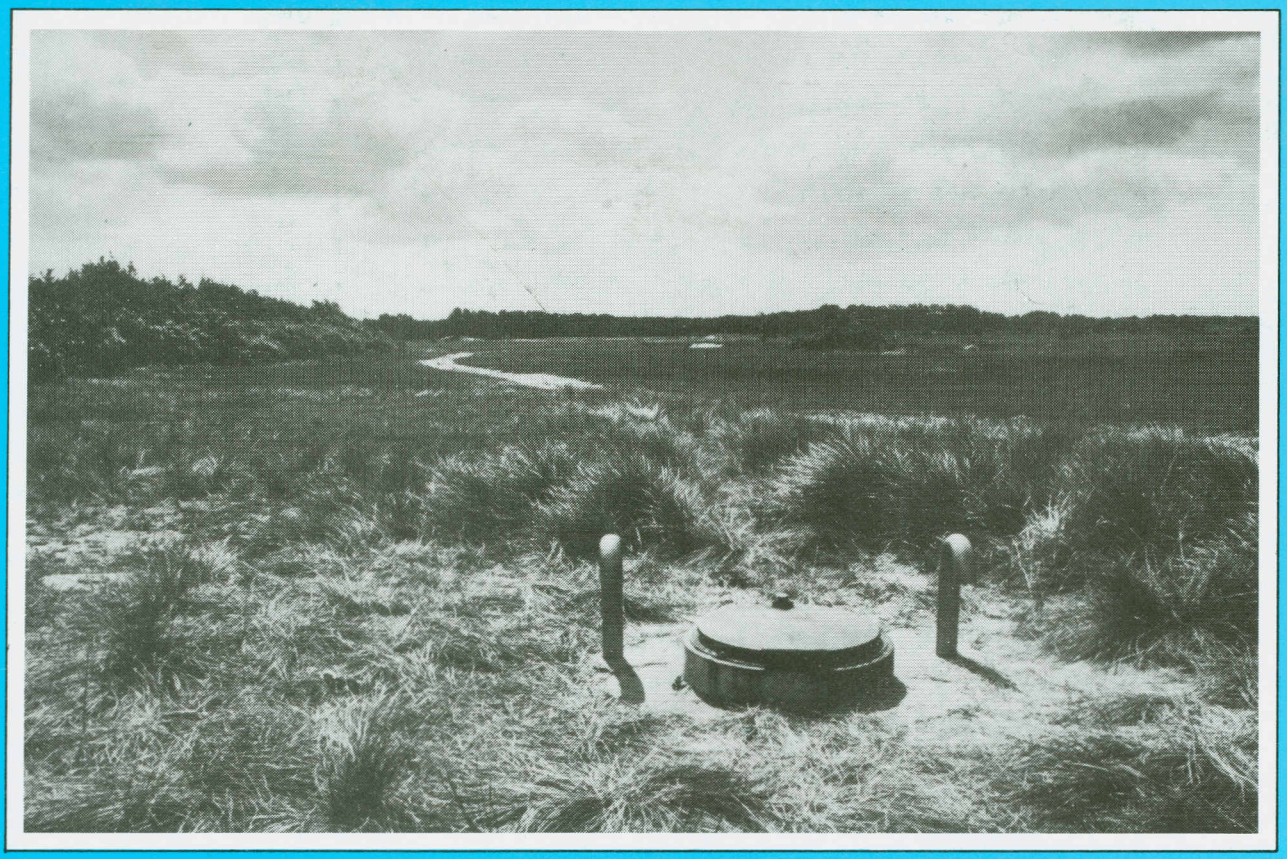
ervaringen met diepinfiltratie



kiwa

keuringsinstituut voor waterleidingartikelen kiwa n.v.

mededeling nr. 79

Mededeling nr. 79

ERVARINGEN MET DIEPINFILTRATIE IN NEDERLAND

De stand van zaken van putinfiltratie; een bundeling van bijdragen van leden van de Werkgroep Persputten en anderen.

onder eindredactie van:
Ir. J.H. Peters

Vakgroep Hydrologie
KIWA N.V.
Nieuwegein
december 1984

Keuringsinstituut voor Waterleidingartikelen KIWA N.V.

Correspondentieadres
Sir Winston Churchill-laan 273
Postbus 70
2280 AB RIJSWIJK
Telefoon (070) 90 27 20
Telex 32480
Postrekening 52 92 95

Speurwerklaboratorium
Groningenhaven 7
Postbus 1072
3430 BB NIEUWEGEIN
Telefoon (03402) 6 08 60

Auteursrechten voorbehouden

VOORWOORD

Diepinfiltratie door middel van putten mag zich in een toenemende belangstelling verheugen. Dankzij de mogelijkheid de grondwaterpotentiaal onder ecologisch verantwoorde omstandigheden te beïnvloeden, biedt diepinfiltratie belangrijke perspectieven. En dat niet alleen voor de drinkwatervoorziening. Ook voor de landbouw (geïntegreerd waterbeheer) en voor de beïnvloeding van ongewenste grondwaterstromingen (zout- of vervuild grondwater) biedt diepinfiltratie mogelijkheden. De vraag is in hoeverre diepinfiltratie als een technisch en financieel aanvaardbare methodiek kan worden ontwikkeld.
Al jaren doen de waterleidingbedrijven proeven op dit gebied. Sinds 1970 zijn deze proeven gebundeld in de Werkgroep Persputten, waarbij in toenemende mate door het KIWA een coördinerende en ondersteunende rol wordt vervuld. Dit heeft in 1982 geleid tot het uitbrengen van een lijvig rapport met betrekking tot de verstoppingsproblemen bij persputten en ervaringen tot 1980 (KIWA-mededeling nrs. 71 en 72).
Sindsdien zijn vele nieuwe proeven tot uitvoering gekomen of in voorbereiding genomen. Bij de ontwikkeling van diepinfiltratie als een systeem voor de drinkwatervoorziening duiken, naast technische problemen samenhangend met een persput, ook veel fundamentele vragen op. Dankzij de gezamenlijke aanpak en in het bijzonder door de coördinerende rol van het KIWA, kon door fundamenteel onderzoek op het gebied van de procestechnologie, kwaliteitsbeheersing en hydrologie, onze kennis over het proces in het algemeen zeer worden verdiept. In het voorliggende rapport wordt daarvan melding gemaakt.
In afwijking van de gang van zaken bij de meeste

andere KIWA-mededelingen ligt de verantwoordelijkheid voor de inhoud van dit rapport niet bij de Werkgroep als collectief, maar bij de auteurs van de hoofdstukken afzonderlijk. Hieruit valt ook de eigen stijl voor de hoofdstukken en zelfs het voorkomen van een engelstalige bijdrage te verklaren.
In de eerste plaats is dank verschuldigd aan de auteurs voor hun verschillende bijdragen. Echter zonder de stimulerende rol van de secretaris der Werkgroep, ir. Peters, zou dit rapport niet op dit tijdstip gereed geweest zijn.
Onderzoek gericht op de ontwikkeling van een nieuwe techniek is veelomvattend en uiterst kostbaar. Vooral moet waardering worden uitgesproken voor de bereidheid van de deelnemende bedrijven om zo lang gezamenlijk zo intensief onderzoek op dit terrein te verrichten. Daaraan is het te danken dat op een efficiënte manier onze kennis op een zeer breed veld kon worden verdiept.
Hoewel veel is bereikt zal ook in de toekomst nog veel onderzoek, in het bijzonder met proefnemingen op technische schaal, moeten worden uitgevoerd. Ik hoop dat ook daarbij de gezamenlijke bestudering kan worden gecontinueerd.

ir. B. Bulten,
voorzitter Werkgroep Persputten.

TEN GELEIDE

Het dikke rapport dat voorligt, is een bundeling van verschillende bijdragen van leden van de KIWA-werkgroep Persputten en enkele anderen die in het diepinfiltratie-onderzoek participeren. De bijdragen betreffen voor een deel plannen en bedrijfsideeën achter de toepassing van infiltratieputten. Ook zijn resultaten van enkele geohydrologische of geohydrochemische studies op het gebied van diepinfiltratie opgenomen. Voor een ander deel echter bestaan de bijdragen uit beschrijvingen en resultaten van experimenten met proefputten. Een overzicht van deze experimenten (inclusief de locaties) en het andere diepinfiltratie-onderzoek in Nederland is beschreven in de eerste bijdrage - de inleiding. De opzet van het totale rapport houdt de verklaring in voor het feit dat - in afwijking van andere KIWA-mededelingen - een "over all-samenvatting" ontbreekt. In de laatste bijdrage is echter getracht enkele hoofdzaken te verzamelen. Ook de technische specificaties van de gebruikte putten zijn hierin opgenomen.

ir. J.H. Peters,
secretaris Werkgroep Persputten.

INHOUD

		Blz.
VOORWOORD		1
(ir. B. Bulten, VEWIN)		
TEN GELEIDE		3
(ir. J.H. Peters, KIWA N.V.)		
ONDERZOEK NAAR ASPECTEN VAN DIEPINFILTRATIE; EEN KORT OVERZICHT		19
(ir. J.H. Peters, KIWA N.V.)		
	Samenvatting	19
1	Inleiding	19
2	Organisatie van het onderzoek	21
3	Persputten in Nederland	22
4	Persputverstopping	28
4.1	MFI	29
4.2	AOC	30
4.3	MLF	30
5	Hydrologie van persputsystemen	32
6	Hoe nu verder?	34
ONTWIKKELING EN TOEPASSING VAN DE MEMBRAAN-FILTRATIE-INDEX EN DE MEELOOPFILTRATIE-INDEX		37
(ir. J.C. Schippers, J. Verdouw, KIWA N.V.)		
	Samenvatting	37
1	Inleiding	37
2	Principe membraanfiltratie-index	39
3	Apparatuur	42
4	Verstopping van persputten	44
5	Toetsing membraanfiltratie-index	46
6	Meting MFI met membraanfilters met poriën groter en kleiner dan 0,45 μm	50
7	Ontwikkeling meeloopfilters en meeloopfiltratie-index	51
8	Verantwoording	58
9	Literatuur	58

		Blz.
DE ROL VAN MICROBIOLOGISCHE PROCESSEN BIJ HET VERSTOPPEN VAN PERSPUTTEN (ing. W.A.M. Hijnen, dr.ir. D. v.d. Kooij, KIWA N.V.)		61
	Samenvatting	61
1	Inleiding	61
2	Microbiologische processen bij persputten	62
3	Afbreekbare verbindingen in het infiltratiewater als bacteriegroei bepalende factor	64
3.1	Opname van afbreekbare stoffen door bacteriën	64
3.2	Het verband tussen de belasting van een filter met de afbreekbare verbindingen en de bacteriebelading van het filtermateriaal	67
3.3	AOC-gehalten van het infiltratiewater	71
4	De biomassa als weerstandsbepalende factor	74
4.1	Bepaling van de biomassa	74
4.2	Het aantal bacteriën in relatie tot de ontstane weerstand	78
4.3	Aanwezigheid van bacteriën in het infiltratiewater	83
4.4	De rol van de temperatuur	84
4.5	Interactie van bacteriën met in het water aanwezige deeltjes en het filtermateriaal	85
5	Conclusies	88
6	Literatuurlijst	89

Blz.

HET INFILTRATIEPROJECT BIJ HET POMPSTATION "HAREN" 93
(ir. J.W. Kieft, Gemeentelijk Waterbedrijf Groningen)

	Samenvatting	93
1	Inleiding en motivering	93
2	Het verstoppingsonderzoek	97
2.1	Uitvoering van de putinfiltratie	98
2.2	Kwaliteit van het infiltratiewater	101
2.3	Metingen voor de verstopping	104
2.4	Regeneratie infiltratieput N 6	106
2.5	Tweede verstoppingsproef	106
2.6	Uitvoering van het onderzoek naar het verstoppingsmateriaal	107
2.7	Evaluatie	110
3	Hydrologische resultaten	115
4	Conclusies	121
5	Literatuur	121

INFILTRATIEPUTTEN OP HET EILAND TEXEL OP KLEINE PRAKTIJKSCHAAL 123
(ir. R.J. Wildschut, Provinciaal Waterleidingbedrijf van Noord-Holland)

	Samenvatting	123
1	Inleiding	124
2	Locatiekeuze van de ondergrondse buffer	126
3	Geohydrologische gesteldheid van het "Bergje"	132
4	Technische uitvoering van het puttenveld "Bergje"	133
4.1	Systeemopzet	133
4.2	Situering van de infiltratie- en waarnemingsputten	135

Blz.

4.3 Technische uitvoering van de putten 140
4.3.1 Infiltratieputten 140
4.3.2 Waarnemingsputten 141
5 Proeven en resultaten 142
5.1 Proefperioden 142
5.2 Onderzoek naar putverstopping 143
5.3 Onderzoek naar grensvlakverplaatsingen van zoet en zout grondwater 144
5.4 Onderzoek naar freatische grondwaterstandsveranderingen 146
5.5 Onderzoek naar macro-dispersieverschijnselen 147

INJECTIEPUTPROEVEN IN HET WATERVLAK NABIJ CASTRICUM 149
(H.M.G. Lebouille, Provinciaal Waterleidingbedrijf van Noord-Holland)
Samenvatting 149
1 Inleiding 150
2 De waterwinning bij het PWN 150
3 Diepinfiltratielocatie 154
3.1 Ruimtelijke oriëntatie 154
3.2 Plaats van de injectiefilters in de diepte 155
4 De proefopzet 156
5 De injectieputten en de drainpanden 158
5.1 Injectieput IP1 158
5.2 Injectieput IP2 161
5.3 Drainpanden 161
6 De metingen 164
6.1 De putweerstand 164
6.2 Weerstand van de drainpanden 164
6.3 Kwaliteitsgegevens 165

Blz.

7	De proefresultaten	166
7.1	IP2	166
7.1.1	Putbelasting	166
7.1.2	De waterkwaliteit	166
7.1.3	De hydraulische putweerstand	168
7.1.4	Verplaatsing zoetwaterfront	172
7.2	IP1	172
7.2.1	De putbelasting	172
7.2.2	De waterkwaliteit	172
7.2.3	De hydraulische putweerstand	172
7.2.4	Chloridegehalten, zoetwaterfront	175
7.3	De drainpanden	177
7.3.1	De plaats van de drains	177
7.3.2	Bedrijfsvoering	177
7.3.3	Bespreking figuren 12 en 13	181

DIEPINFILTRATIE IN DE DUINWATERWINPLAATS VAN GEMEENTEWATERLEIDINGEN 183
(ing. R.A. Schuurmans, ing. J.J. Steinmetz, Gemeentewaterleidingen, Amsterdam)

1	Inleiding	183
1.1	Toepassing diepinfiltratie	184
1.2	Doelstelling tweede persput	186
2	Locatie	187
3	Technische uitvoering proefopstelling	188
3.1	De persput	188
3.2	Geautomatiseerd meet- en regelsysteem	190
3.3	Waarnemingsputten	192
4	Conditioneringssysteem	192
5	Geautomatiseerd meet- en regelsysteem	195
6	Zoutwaterverdringing	196
6.1	Eerste run	196
6.2	Eerste stop	198
6.3	Tweede run	198

		Blz.
7	Verstopping en regeneratie	199
7.1	De weerstand	199
7.2	Verstopping	201
7.3	Regeneratie	202
8	Kwaliteitsparameters	203
9	Kostenaspect	203
10	Conclusies	204
11	Literatuurlijst	204
STAND VAN ZAKEN INFILTRATIEPROEVEN KENNEMERDUINEN (ir. W.F. Konijnenberg, Provinciaal Waterleidingbedrijf van Noord-Holland)		207
	Samenvatting	207
1	Inleiding	208
2	De infiltratieputten	213
2.1	De opbouw van de infiltratieput P_d	213
2.2	De opbouw van de infiltratieput P_c	215
2.3	Bepaling van de putweerstand	215
3	Het langzaam zandfilter	216
3.1	De filterconstructie	216
3.2	Bepaling van de weerstand in het filterbed	217
4	De kwaliteitsparameters van het infiltraat	218
5	De resultaten van de proefnemingen	220
5.1	De noordelijke infiltratieput P_d	220
5.1.1	De putbelasting	220
5.1.2	De waterkwaliteit	221
5.1.3	De hydraulische putweerstand	222
5.2	De zuidelijke infiltratieput P_c	225
5.2.1	De putbelasting	225
5.2.2	De waterkwaliteit	227
5.2.3	De hydraulische putweerstand	229

Blz.

5.3 De elektrische weerstandsmetingen 229
5.4 Het langzaam zandfilter 232
5.4.1 De inloopfase 232
5.4.2 De weerstand van het filterbed 232
5.4.3 Regeneratie van het langzaam zandfilter 232
6 Enkele voorlopige conclusies 235

DIEPINFILTRATIEPROJECT "HERTENWEI" 237
(ir. G.J. Zaadnoordijk, ir. R.A. Visser, N.V. Leidsche Duinwater Maatschappij)
Samenvatting 237
1 Inleiding 237
2 Behoeftedekking 238
3 Diepinfiltratiesysteem "Hertenwei" 239
3.1 Keuze van de locatie 239
3.2 Hoofdlijnen van het systeem 241
3.3 Geohydrologisch overzicht van de winplaats 243
4 Geohydrologisch onderzoek ten behoeve van het diepinfiltratiesysteem "Hertenwei" 244
4.1 Algemeen 244
4.2 Stromingen in het diepe pakket 245
4.3 Modellen 246
5 Literatuurlijst 247

DIEPINFILTRATIE BIJ DE DUINWATERLEIDING 249
(ir. G.S. Huijboom, Duinwaterleiding van 's-Gravenhage)
1 Historische ontwikkeling 249
1.1 Oppervlakte-infiltratie bij de Duinwaterleiding 249
1.2 De proeven met diepinfiltratie 250

Blz.

2 Diepinfiltratie thans 253
3 Nieuwe proefopstelling diepinfiltratie 256
3.1 Doelstellingen 256
3.2 Keuze van de locatie 256
3.3 Beschrijving van de proefopstelling 257
3.4 Onderzoeksparameters 264

Bijlage - Conclusies en aanbevelingen (met betrekking tot de sedimentanalysen) 268

VOORBEREIDINGEN OM TOT INFILTRATIE VAN OEVERGRONDWATER IN EEN AEROOB PAKKET TE KOMEN (drs. J. van der Laan, ir. P. Jonkman, Waterleidingbedrijf Midden-Nederland) 273
Samenvatting 273
1 Inleiding 274
2 Procedures 276
3 Winning oevergrondwater 280
3.1 Plaats van de put 280
3.2 Veranderingen in waterkwaliteit tijdens bodempassage rivieroever 282
4 De zuivering van het oevergrondwater 286
4.1 Resultaten 288
4.2 Aanvullende gegevens 289
5 Opzet infiltratiesysteem te Leersum 290
5.1 Infiltratieput met waarnemingsmogelijkheden 294
6 Enkele ervaringen met de infiltratie 295

Bijlage 1 - Overzicht publiekrechtelijke vergunningen 297
Bijlage 2 - Overzicht privaatrechtelijke overeenkomsten 298

Blz.

EXPERIMENT PUTINFILTRATIE OP GOEREE-OVERFLAKKEE 299
(ir. H.J.L. de Kraa, N.V. Watermaatschappij Zuid-West-Nederland)
1 Huidige situatie 299
2 Toekomstige situatie 302
3 Nevenaspecten 303
3.1 Afvlakking Cl^--gehalte Haringvlietwater 303
3.2 Geohydrologie 303
3.3 Bedrijfsvoering 306

HYDROLOGISCH VOORONDERZOEK TEN BEHOEVE VAN DE KEUZE VAN DE LOCATIE VOOR DIEPINFILTRATIE; EEN VOORBEELD 307
(ir. J.H. Peters, KIWA N.V.)
1 Inleiding 307
2 Voorbeeld 308
3 Situering van de putten 310
4 Stijghoogten 311
5 Stromingen 315
6 Verblijftijden 318
7 Voorraad 319
8 Samenvatting en conclusies 323
9 Literatuur 325

KWALITEITSVERANDERINGEN VAN WATER BIJ DIEPE INFILTRATIE MET PUTTEN 327
(ir. J. van Puffelen, Duinwaterleiding van 's-Gravenhage)
1 Inleiding 327
2 Diepe infiltratie van drinkwater 328
2.1 Algemeen 328
2.2 Haags drinkwater 329

Blz.

2.3 Drinkwater van het pompstation Andijk 332
2.4 Drinkwater van het pompstation Leiduin 332
2.5 Conclusies 334
3 Diepe infiltratie van voorgezuiverd rivierwater in de Haagse duinen 335
3.1 Algemeen 335
3.2 De kwaliteit van het grondwater vóór infiltratie 337
3.3 Kwaliteit van het geïnfiltreerde water 340
3.4 Kwaliteitsveranderingen tijdens bodempassage 346
3.5 Conclusies 349
4 Diepe infiltratie van voorgezuiverd Lekwater in de Amsterdamse duinen 349
5 Voortzetting van het onderzoek 351
6 Verantwoording 355
7 Literatuur 355

VERANDERINGEN IN DE CHEMISCHE SAMENSTELLING VAN DRINKWATER NA PUTINFILTRATIE 357
(ir. C.G.E.M. van Beek, KIWA N.V., ir. J. van Puffelen, Duinwaterleiding van 's-Gravenhage)
1 Inleiding 357
2 Uitvoering van de experimenten 358
2.1 Het drinkwater van de Duinwaterleiding 358
2.2 Geohydrologie en beschrijving van de putten 359
2.3 Geohydrochemie 360
2.4 Programma van infiltratie 361

Blz.

2.5 Monsterneming en analyse 361
3 Resultaten tijdens injectie 362
3.1 Schatting van de reistijden 362
3.2 Bespreking van de resultaten 363
4 Interpretatie 369
5 Slotbeschouwing 377
6 Verantwoording 379
7 Literatuur 379

PUTINFILTRATIE BIJ HOOGOVENS IJMUIDEN 381
(ing. J.P.J. Krabbendam, Hoogovens Groep B.V.)
1 Inleiding 381
2 Zoetwaterbuffer 381
3 Zout grondwater 385
4 Compenserende maatregelen 386
5 Literatuur 387

GEOHYDROLOGICAL COMPENSATORY MEASURES TO PREVENT LAND SUBSIDENCE AS A RESULT OF THE RECLAMATION OF THE MARKERWAARDPOLDER IN THE NETHERLANDS 389
(Public Works Department, Rijkswaterstaat, Directorate of Water Management and Hydraulic research, Northern District and IWACO B.V., Rotterdam)
Abstract 389
1 Introduction 389
2 Geohydrological effects of the reclamation of the Markerwaardpolder 391
2.1 Introduction 391
2.2 Geohydrological schematization 391
2.3 Calculations with the finite element model 392
2.3.1 Description of the model 392

Blz.

2.3.2 Calibration and verification of the model 394
2.3.3 Results of the calculations 396
2.3.4 The speed of piezometric drawdown 397
3 Countermeasures to prevent drawdown of piezometric levels 398
3.1 Introduction 398
3.2 Countermeasures studied 398
3.3 Calculation methods 399
3.4 Results of the calculations 402
4 General conclusions 404
5 References 405

WAT WETEN WE NU VAN DIEPINFILTRATIE? 407
Een poging tot synthese
(ir. J.H. Peters, KIWA N.V.)
1 Inleiding 407
2 Plaatskeuze 409
2.1 De locatie van diepinfiltratie 409
2.2 De locatie van het innamepunt 411
3 Voorzuivering en verstopping 412
4 Transport 423
5 De persput 425
5.1 Dual of single purpose 425
5.2 De boring 427
5.3 Boorgatonderzoek 430
5.4 Constructie van put en putkelder 431
6 Exploitatie 433
6.1 Regeneraties 433
6.2 Bewaking, sturing en bediening 436
7 Overige aspecten 437
7.1 Juridische aspecten 438
7.2 Kostenaspecten 438
7.3 Winning en nazuivering 441

		Blz.
8	Diepinfiltratie heeft proefproject nodig	442
9	Technische specificaties van de huidige proefpersputten in bedrijf bij de Nederlandse waterleidingbedrijven	443
10	Literatuur	445
Appendix A -	Samenstelling Werkgroep Persputten	447
Appendix B -	Samenstelling Taakgroep Filtratie-Index	448
Appendix C -	Samenstelling Werkgroep Hydrologie van Persputsystemen	449

ONDERZOEK NAAR ASPECTEN VAN DIEPINFILTRATIE; EEN KORT OVERZICHT

J.H. Peters, Keuringsinstituut voor Waterleidingartikelen KIWA N.V., Nieuwegein

SAMENVATTING

Het onderzoek zoals dat in opdracht van de Vereniging van Exploitanten van Waterleidingbedrijven in Nederland (VEWIN) en in directe samenwerking met een aantal waterleidingbedrijven en een aantal geïnteresseerde instanties wordt uitgevoerd, heeft tot doel die kennis en inzichten te vergaren die noodzakelijk zijn om persputten op praktijkschaal te kunnen toepassen. In deze bijdrage - een inleiding op het voorliggende rapport - zal worden uiteengezet hoe het onderzoek is georganiseerd en wat de doelstellingen zijn van de deelonderzoeken. Tevens wordt een beeld gegeven van de experimenten (of plannen daartoe) zoals die uitgevoerd worden door Nederlandse waterleidingbedrijven en het KIWA.

1 INLEIDING

Voor een gat dat in de bodem is gemaakt om een vloeistof aan de bodem toe te voegen, bestaat een groot aantal benamingen die vaak al de gebruiksvorm aanduiden. Zo wordt met een retourput een met een bepaald doel onttrokken vloeistof weer teruggeleid in de bodem. Op enkele plaatsen in de wereld worden lozingsputten en injectieputten gebruikt, onder andere voor wat genoemd wordt "de berging" van vloeibaar afval.
De woorden infiltratieput, aanvullingsput en persput (die in dit rapport als elkaars synoniemen wor-

den gebruikt) wijzen in de richting van toepassingen in de openbare watervoorziening; toepassingen waarbij water wordt ingebracht in de poriën in de ondergrond en waarbij het daar aanwezige water wordt verdrongen. In tegenstelling tot wat de naam persput doet vermoeden, is hiervoor geen grote druk noodzakelijk (bij de meeste Nederlandse proefpersputten verdwijnt het water onder vrij verval in de diepte). In verband met verlies van stabiliteit van de ondergrond is infiltreren met grote druk zelfs onmogelijk als de infiltratie op een diepte van slechts enkele tientallen meters plaatsvindt.
Voor wat de watervoorziening betreft, zijn er vele toepassingsmogelijkheden te onderscheiden. Zo kunnen persputten gebruikt worden voor het plaatselijk compenseren van verlagingen van grondwaterstand of stijghoogte, voor het reguleren van stromingen van verontreinigd of zout grondwater, voor de beperking van het intrek- of beschermingsgebied van een grondwaterpompstation en als middel voor de aanvulling (of tijdelijke opslag) van het zoete grondwater (kunstmatige infiltratie). Met persputten kunnen formaties worden bereikt die door relatief dikke en slechtdoorlatende bodemlagen zijn afgeschermd. Persputinfiltratie (ook wel diepinfiltratie genoemd) vormt aldus een alternatief voor de infiltratie van voorgezuiverd oppervlaktewater met behulp van plassen, panden, kanalen of geulen, de zogenaamde open infiltratie. Daarbij komt dat met betrekking tot natuur- en landschapsbehoud diepinfiltratie veelal de voorkeur heeft boven open infiltratie. Diepinfiltratie wordt dan ook gezien als een veelbelovende techniek.
Gestructureerd onderzoek naar de techniek en de mogelijkheden van infiltratie met persputten heeft in Nederland reeds in 1970 een aanvang genomen (daar-

vóór hadden reeds enkele bedrijven afzonderlijke experimenten met persputten uitgevoerd). Dit onderzoek dat in directe samenwerking tussen een aantal waterleidingbedrijven en het KIWA wordt uitgevoerd, heeft tot doel die kennis en inzichten te vergaren die noodzakelijk zijn om persputten op praktijkschaal te kunnen toepassen.

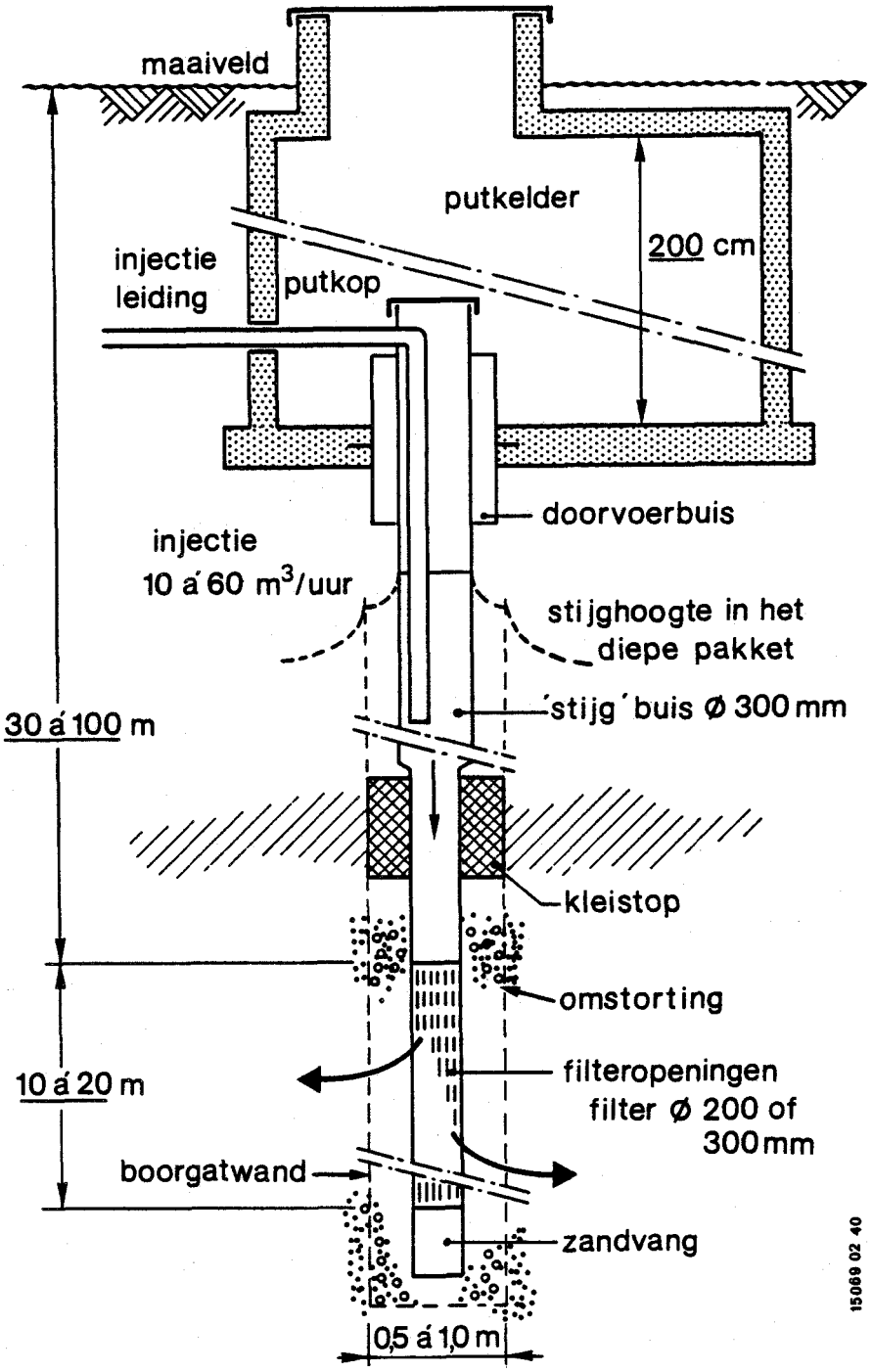
2 ORGANISATIE VAN HET ONDERZOEK

In 1973 is een reeds bestaande werkgroep van in het duingebied werkzame waterleidingbedrijven, de Werkgroep Infiltratie van Rivierwater in de Duinen (WIRDu), in verband met de meer dan regionale betekenis van hun onderzoek omgevormd tot de KIWA-Commissie Infiltratie. Sinds die tijd wordt ook door het KIWA in het kader van het speurwerkprogramma van de VEWIN, onderzoek verricht naar aspecten van kunstmatige infiltratie en met name persputinfiltratie. Onderzoek dat vanaf het begin vooral gericht geweest is op het achterhalen van de oorzaken van persputverstopping en het ontwikkelen van goede regeneratiemethoden, wordt begeleid door de in 1970 onder auspiciën van de toenmalige WIRDu ingestelde Werkgroep Persputten. Uit de talrijke experimenten kon worden geconcludeerd dat het mogelijk is meer of minder ver voorgezuiverd oppervlaktewater te infiltreren. Deze conclusie maakte het urgent ook andere aspecten van persputinfiltratie aandacht te geven. Ter begeleiding van het onderzoek van de puur geohydrologische aspecten is daarom in 1979 de Werkgroep Hydrologie van Persputsystemen geïnstalleerd. Deze Werkgroep houdt zich (eveneens onder auspicien van de Commissie Infiltratie) bezig met de bestudering van de weg die het in de bodem gebrachte water kiest en met de invloeden die een en

ander kan hebben op de omgeving.
Alle bij het persputonderzoek betrokken bedrijven en instituten zijn vermeld in appendices die zijn opgenomen aan het eind van dit rapport. De KIWA-projectleiding van het onderzoek berust bij de Vakgroep Hydrologie. Van de zijde van de Vakgroepen Procestechnologie en Biologie is er een inbreng voor zover het aspecten betreft die te maken hebben met voorzuivering en waterkwaliteit. Deze aspecten komen ook ter sprake in de Taakgroep Filtratie-Index die zich bezighoudt met het verzamelen en interpreteren van kwaliteitsbepalingen aan het voedingwater voor persputten en het testen en verder ontwikkelen van meetmethoden waarmee routinematig het voedingwater voor persputten kan worden gekarakteriseerd. Daarnaast zijn er de werkgroepen "Hygiënische aspecten bij bodempassage" en "Ecologische aspecten van kunstmatige infiltratie" die zich echter niet uitsluitend met persputinfiltratie bezighouden.

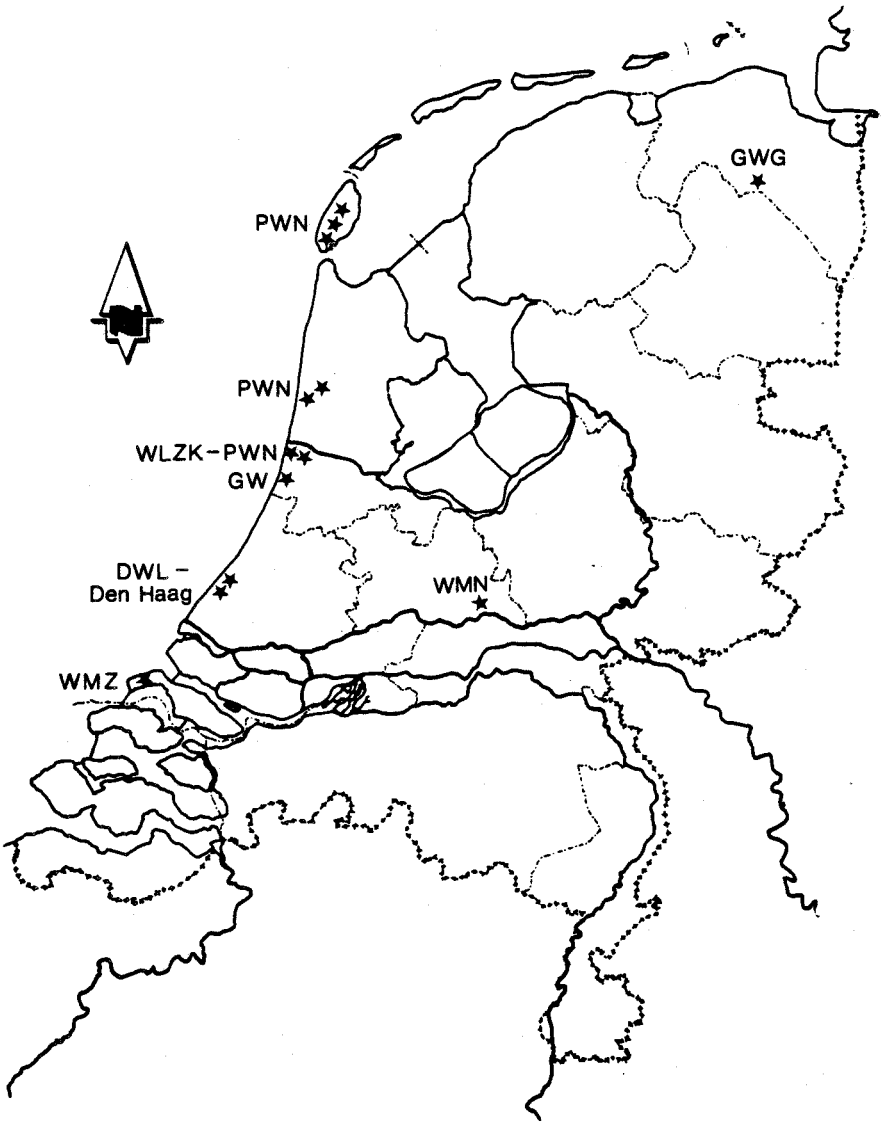
3 PERSPUTTEN IN NEDERLAND

Een persput verschilt voor wat constructie betreft niet of nauwelijks van een winput. In het persputonderzoek - dat in Nederland al in 1956 een aanvang nam toen waterleidingbedrijven enkele oriënterende experimenten uitvoerden - werden soms dan ook als winmiddel geconstrueerde putten als persput gebruikt, zie figuur 1. Mogelijkheden voor regeneratie, sturing en bewaking stellen echter extra eisen voornamelijk aan de afwerking van putkop en -kelder.



Figuur 1 - Doorsnede van de gemiddelde proefpersput

Aangezien bij persputten de snelheid waarmee het water in de bodem treedt erg hoog is vergeleken met de infiltratiesnelheid bij open infiltratie, was het in fijnzandige formaties van oudsher de snelle verstopping van de persputten die hun toepassing in de weg stond. Het leren beheersen van de verstoppingsprocessen en het regenereren van de verstopte putten vormde gedurende lange tijd het zwaartepunt van het onderzoek naar de techniek van putinfiltratie. De experimenten zoals die zijn uitgevoerd door de Nederlandse bedrijfstak en door de Hoogovens Groep B.V. (het voormalige Estel-Hoogovens) in de jaren tot 1980 zijn beschreven in een omvangrijk rapport (KIWA-mededeling 71; Verstopping van Persputten, Olsthoorn, 1982). Hierin worden tal van factoren behandeld, die verstopping van persputten tot gevolg kunnen hebben.
Inmiddels zijn door verschillende waterleidingbedrijven nieuwe experimenten gestart. Alle experimenten (die onder projectleiding van de betreffende bedrijven worden uitgevoerd) zullen in het kort de revue passeren. Vermeldenswaardig is wellicht dat momenteel in Nederland met 13 putten (verspreid over een 7-tal waterleidingbedrijven) wordt geëxperimenteerd (zie figuur 2). Putten die nu reeds in het produktieproces zijn ingeschakeld, hebben veelal een "dual-purpose"-functie. Deze putten worden afwisselend als pers- en winput gebruikt voor de afvlakking van seizoensfluctuaties in de vraag naar drinkwater of in het aanbod van oppervlaktewater (kwalitatief en/of kwantitatief). Dit is een toepassingsmogelijkheid die erg veel belangstelling ondervindt.
In Haren wordt sinds 1979 door het Gemeentelijk Waterbedrijf Groningen een experiment uitgevoerd met het oogmerk te onderzoeken wat de mogelijkheden



Figuur 2 - Een overzicht van de huidige proefpersputten van Nederlandse waterleidingbedrijven; retourputten voor het direct herinjecteren van onttrokken grondwater zijn in dit overzicht niet opgenomen (GWG Gemeentelijk Waterbedrijf Groningen; PWN Provinciaal Waterleidingbedrijf van Noord-Holland; WLZK Waterleidingbedrijf Zuid-Kennemerland; GW Gemeentewaterleidingen, Amsterdam; DWL Duinwaterleiding van 's-Gravenhage; WMN Waterleidingbedrijf Midden-Nederland; WMZ N.V. Watermaatschappij Zuid-West-Nederland)

zijn van seizoensopslag van drinkwater dat is bereid uit een combinatie van grondwater en oppervlaktewater uit de Drentsche Aa. Gebruikt wordt een voormalige winput (Kieft, dit rapport). Het Provinciaal Waterleidingbedrijf van Noord-Holland heeft 7 proefputten in bedrijf waarvan 2 samen met het Waterleidingbedrijf Zuid-Kennemerland. Op het eiland Texel wordt sinds 1978 (met een verdampingsinstallatie die is gekoppeld aan elektriciteitsopwekking) ontzout zeewater geïnfiltreerd met 3 putten. Infiltratie vindt plaats in de winters en onttrekking in de zomers als de vraag naar drinkwater stijgt door het toerisme (Wildschut, dit rapport). In het Watervlak te Castricum worden proeven gedaan met een 2-tal persputten. Bij de ene wordt voedingwater "geconditioneerd" door pandbodempassage. De andere wordt gevoed met WRK-III-water sinds eind 1981 (Lebouille, dit rapport). In de Kennemerduinen zijn sinds 1980 ook persputten in bedrijf. WRK-I en II-water wordt daar direct en na langzaam zandfiltratie geïnfiltreerd (Konijnenberg, dit rapport). In Leiduin, in het duingebied van Gemeentewaterleidingen Amsterdam, wordt sinds begin 1981 water - ook geconditioneerd door een pandbodempassage - geïnfiltreerd (Schuurmans en Steinmetz, dit rapport). Het waterleidingbedrijf Midden-Nederland is in 1983 gestart met de infiltratie van nagezuiverd oeverfiltraat in Leersum (Van der Laan en Jonkman, dit rapport). De Duinwaterleiding van 's-Gravenhage zal starten in de zomer van 1984. In Scheveningen wordt dan gefloteerd water geïnfiltreerd middels een tweetal persputten (Huijboom, dit rapport). De Watermaatschappij Zuid-West-Nederland is voornemens om in de herfst van 1984 de infiltratie te starten in een proefput op het pompstation Ouddorp op het eiland Goeree-Overflakkee (De Kraa, dit rapport).

De plannen zoals die bestaan met betrekking tot een diepinfiltratieproject van de Leidsche Duinwater Maatschappij zijn beschreven (Zaadnoordijk en Visser, dit rapport). Interessant is ook de enige engelstalige bijdrage. Daarin wordt het onderzoek beschreven dat is uitgevoerd onder meer naar de mogelijkheid om met persputten gevolgen, die eventuele inpoldering en drooglegging van een Markerwaard zullen hebben, te voorkomen (Rijkswaterstaat en IWACO, dit rapport).

De plannen zoals die bestaan met betrekking tot diepinfiltratie, de experimenten die daartoe worden uitgevoerd en experimenten waarover nog niet eerder is gerapporteerd, zijn beschreven in de verschillende bijdragen aan dit "Stand-Van-Zaken-Rapport" van de Werkgroep Persputten. Het rapport handelt niet alleen over verstopping. Zo is een 2-tal bijdragen opgenomen die handelen over het geohydrochemische gedrag van het in de bodem gebrachte water (Van Puffelen, dit rapport en Van Beek en Van Puffelen, dit rapport). Een bijdrage over de resultaten van hydrologisch onderzoek maakt tevens deel uit van dit rapport (Peters, dit rapport). Ook andere aspecten die van belang zijn bij ontwerp, bouw en exploitatie van een systeem van pers- en winputten krijgen de aandacht. Dit rapport kan gezien worden als een vervolg op het eerdergenoemde rapport Van Olsthoorn. Het betreft voornamelijk ervaringen die zijn opgedaan in de jaren 1980 tot begin 1984 en die geleid hebben tot verdieping van het inzicht.
De proeven die in het verleden gedaan zijn en die ook nu nog worden uitgevoerd, zijn onderling moeilijk vergelijkbaar, moeilijk onder één noemer te brengen. Zo lopen de kwaliteiten van de voedingwa-

ters voor de afzonderlijke experimenten sterk uiteen; een en ander is afhankelijk van de kwaliteit van het ingenomen water en de mate van voorzuivering. De proeven worden echter ook beïnvloed door de bedrijfstechnische mogelijkheden - en wellicht voorkeuren - en de idee voor toepassing. Wél kunnen we met de proeven onderscheid maken tussen de verschillende verstoppingsoorzaken.

4 PERSPUTVERSTOPPING

Lezing van de bijdragen aan dit rapport zal aantonen dat in Nederland de voorzuivering het meest kritische gedeelte is in de produktiegang van oppervlaktewater tot winning van water dat met persputten kunstmatig wordt geïnfiltreerd. Overal in de wereld worden persputten met wisselend succes toegepast. Op plaatsen waar sprake is van succes wordt dat wellicht veroorzaakt door een verregaande voorzuivering maar meestal doordat in enorm grove formaties wordt geïnjecteerd veelal met secundaire doorlatendheid en porositeit in de vorm van "fissures and fractures". In Nederland daarentegen zijn de "target-aquifers", de pakketten waarin wordt geïnfiltreerd, opgebouwd uit zeer fijnzandige gronden met korreldiameters in de orde van 0,1 tot 0,5 mm en doorlatendheden tot enkele tientallen meters per dag. Onder andere ter plaatse van de boorgatwand, waar grove omstorting overgaat in fijnzandige formatie, wordt dan ook zwevende stof afgevangen met daarbij het aan die deeltjes gebonden organische materiaal, dat voor micro-organismen assimileerbaar is. Aldus resulteert dit in een samenspel van mechanische en biologische factoren. Het is wellicht zo dat bij bacteriegroei gevormd slijm (in stijgbuis, filteropeningen en omstorting) juist

extra zwevende stof afvangt en het verstoppingsproces versnelt.
Persputten verstoppen door tal van oorzaken. Zeer bekend zijn de problemen veroorzaakt doordat juist vóór de infiltratie verschillende watersoorten worden gemengd (kalkafzettingen, ijzerhydroxideneerslag). Het onderzoek naar de kwaliteitsparameters van met persputten te infiltreren water geschiedt momenteel voornamelijk aan de hand van een drietal metingen, bepalingen of experimenten (respectievelijk MFI, AOC en MLF).

4.1 MFI

Allereerst is er de MFI (Membraan Filtratie Index). Dit is een maat voor de hoeveelheid in het water aanwezige colloïden en zwevende stoffen. In deze bepaling wordt gemeten wat de verandering is van de volumestroom die bij een bepaalde temperatuur en onder constante werkdruk stroomt door een gestandaardiseerd membraanfilter met kleine poriën van een bepaalde diameter (Schippers en Verdouw, dit rapport). Als door een zorgvuldige voorzuivering een lage MFI kan worden bereikt, dan kan wellicht een looptijd (de tijd tussen twee regeneraties) van enkele maanden en misschien zelfs jaren worden verwacht. Een en ander is mede afhankelijk van de grofheid van de formatie. Het onderzoek naar de mate waarin MFI een aanwijzing geeft van de snelheid van "mechanische" verstopping, is nog niet voltooid. Het is zeker dan ook nog zo dat een voorzuivering voor persputinfiltratie niet enkel en alleen op een MFI-waarde mag worden afgestemd.

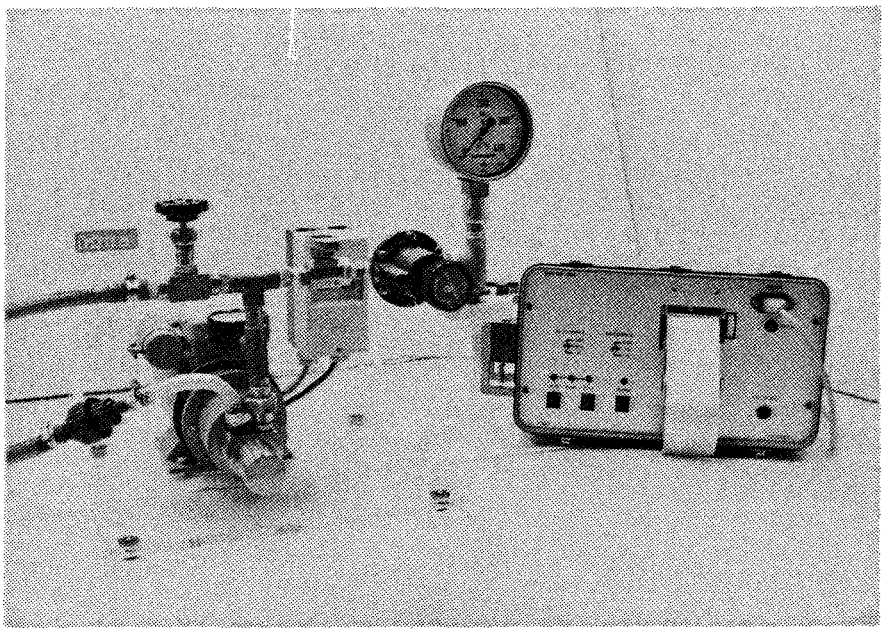


Foto 1 - Het apparaat waarmee de MFI wordt bepaald

4.2 AOC

In een oriënterend stadium is het onderzoek naar de verstopping door biologische factoren (Hijnen en Van der Kooij, dit rapport). Er zijn duidelijke aanwijzingen dat dit inderdaad een rol speelt. Zo neemt vaak de weerstand van een enigszins verstopte persput af indien deze enkele dagen tot weken wordt stopgezet. Ook wordt waargenomen dat het verstoppingsgedrag een directe relatie lijkt te hebben met de temperatuur van het geïnjecteerde water. Momenteel richt het onderzoek zich op de factoren temperatuur en AOC (de concentratie voor micro-organismen assimileerbare organische koolstof). Deze AOC-bepaling is ontwikkeld om een indruk te krijgen van de nagroeipotentie van bacteriën in drinkwater.

4.3 MLF

Voor zowel de technologische als de biologische as-

pecten van het onderzoek van de verstopping van persputten is het boven de grond simuleren van de verstopping in door het KIWA ontwikkelde parallel- of meeloopfilters (MLF) veelbelovend omdat met dergelijke filters op eenvoudige wijze ter plaatse en op voorhand meerdere watersoorten op laboratoriumschaal kunnen worden getest zonder dat hiervoor uitgebreide en kostbare experimenten met echte putten nodig zijn. Bovendien kan hiermee, indien ze parallel aan bestaande persputten worden geplaatst, de ondergrondse gang van zaken - met name in omstorting en op de boorgatwand - worden gecontroleerd. Het is in onderzoek in hoeverre het verstoppingsgedrag van een MLF overeenkomt met dat van een persput en in hoeverre de resultaten vertaling behoeven. Ook is in onderzoek of een relatief kortdurend experiment - waarbij een hogere volumestroom gestuurd wordt door een MLF - waardevol is voor de voorspelling van de op termijn te verwachten putverstopping.

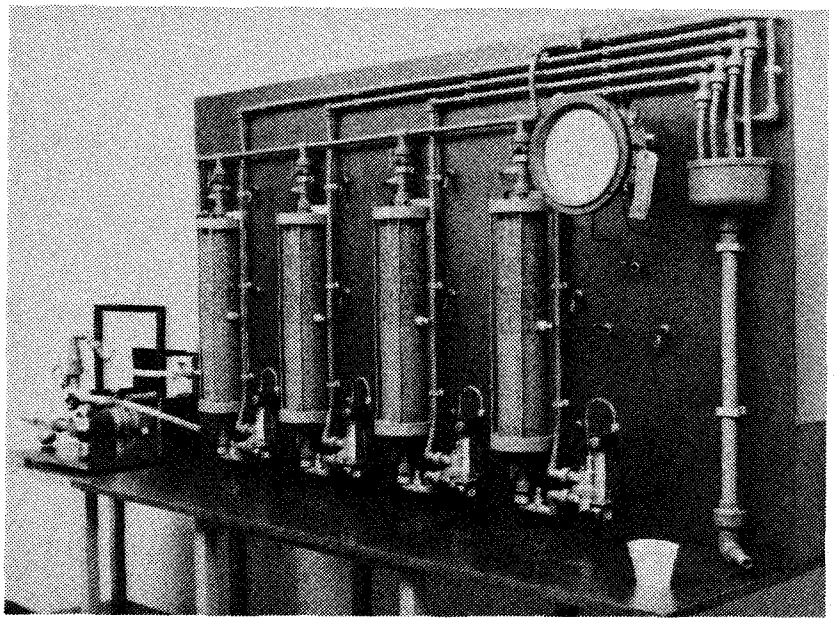


Foto 2 - Een meeloopfilteropstelling waarmee de weerstandsopbouw in omstorting en op de boorgatwand kan worden gesimuleerd

Hiertoe zijn inmiddels door het KIWA meeloopfilters als weergegeven op foto 2 geplaatst parallel aan proefpersputten in Nederland (Schippers en Verdouw, dit rapport).

Het kan worden gesteld dat de voorzuivering onder andere een optimalisatieprobleem is. De kosten van een extra zuivering of filtratiestap kunnen namelijk worden afgewogen tegen problemen in de bedrijfsvoering en kosten van regeneraties. Echter ook kan het zijn dat een bepaalde waterkwaliteit voorwaarde is voor de vergunning of dat om andere - bijvoorbeeld ecologische - redenen getracht wordt regeneratie zoveel mogelijk te voorkomen.
Met verstopping van persputten moet altijd rekening worden gehouden. Zelfs na een vergaande voorzuivering. Onderzoek naar mechanische en chemische regeneratiemethoden maakt dan ook deel uit van het speurwerkproject "Ontwerp- en verstoppingsaspecten van persputten", een project dat deel uitmaakt van het VEWIN-speurwerkprogramma en dat het KIWA uitvoert in directe samenwerking met enkele waterleidingbedrijven.

5 HYDROLOGIE VAN PERSPUTSYSTEMEN

Voordat daadwerkelijk begonnen wordt met het ontwerpen van een systeem van pers- en winputten, zal een keuze gemaakt moeten worden voor de locatie. In een vooronderzoek zal de beoordeling van de hydrologische geschiktheid van uitermate groot belang zijn. De realisatie van een persputsysteem verdient alleen aanbeveling daar waar de ondergrond voor wat betreft hydrologie, geochemie en geologie geen geheimen kent en waar het systeem voldoende bescherming kan worden geboden tegen verontreiniging vanaf

het maaiveld.
Mede door onderzoeksresultaten van de Werkgroep Hydrologie van Persputsystemen is er een versnelling gekomen in de ontwikkeling van rekenmodellen waarmee een nauwkeurig inzicht kan worden verkregen van de ondergrondse stromingen en de invloeden die de exploitatie van het systeem kan hebben op de omgeving. Eén van de conclusies van de genoemde werkgroep is dat het mogelijk is een systeem te bouwen en exploiteren zodat in de omgeving zowel grondwaterstanden als -kwaliteiten niet beïnvloed worden. Binnen het systeem kan deze invloed door het treffen van maatregelen beperkt blijven. Hierover is een aantal rapporten verschenen.
De situering van de pers- en winputten is niet alleen afhankelijk van hydrologische factoren. Wel wordt de minimum afstand tussen pers- en winputten bepaald door minimum verblijftijden (in verband met de hygiënische betrouwbaarheid) en maximum stijghoogteverschillen (in verband met verliezen naar en invloeden in boven- en onderliggende pakketten en in verband met bodemstabiliteit). Naast berekeningen van de stroming zoals die bij persputinfiltratie zal optreden, moeten stijghoogteberekeningen dan ook deel uitmaken van een ontwerp (Peters, dit rapport).
Het onderzoek van de Werkgroep Hydrologie van Persputsystemen is modelmatig in de zin van het ontwikkelen en inventariseren van rekenmodellen voor onder andere de ondergrondse stroming bij persputinfiltratie. De werkelijk optredende stroming is echter uitermate gecompliceerd door meestal niet bekende onregelmatigheden in de ondergrond; een reden waarom bij de praktijkproeven als hiervoor genoemd de weg die het in de ondergrond gebrachte water neemt, wordt bestudeerd.

Persputinfiltratie kan ook geschieden in watervoerende pakketten waarin zich zout of brak water bevindt. Verdringing van dit water schept een mogelijkheid tot opslag van zoet infiltratiewater. Een aantal rekenmethoden voor gelijktijdig optredende stromingen van vloeistoffen met verschillende dichtheden is ontwikkeld. Echter meer nog dan bij de andere aspecten verdient het aanbeveling de modellen met proeven te verifiëren. Een belangrijke vraag waarop een antwoord dient te komen voordat op praktijkschaal voorraadvorming door directe infiltratie in een pakket met zout water zal worden bewerkstelligd, is in hoeverre er sprake zal zijn van de vorming van brak water bij gelijktijdig of afwisselend onttrekken en infiltreren in dezelfde of gescheiden pakketten. Verschijnselen als diffusie en dispersie ten gevolge van onregelmatigheden in de bodemopbouw, spelen hierbij een belangrijke rol. Over het onderzoek naar de mogelijkheid om zoet water te bergen in zoute of sterk brakke pakketten is een rapport verschenen. Een aantal zoet-zout-rekenmodellen en de factoren die terugwinpercentages bepalen, worden hierin in zijn algemeenheid besproken. Een uitgebreider rapport is in voorbereiding.

6 HOE NU VERDER?

Hoe ver is het nu met onze kennis? Gesteld kan worden dat met name op het gebied van voorzuivering en geohydrologie we heel wat verder zijn dan een aantal jaren geleden. Ook kan worden geconcludeerd dat voor bepaalde toepassingen van persputten in wezen nu voldoende hydrologische kennis aanwezig is (Peters, dit rapport).
Momenteel is door waterleidingbedrijven een aantal vergunningen aangevraagd voor infiltratie middels

persputten of waarbij in overweging is gegeven een uitbreiding middels persputten te realiseren. Fundamenteel onderzoek en onderzoek op laboratoriumschaal is in dit stadium niet meer voldoende. Voor een verantwoorde toepassing van persputten in de toekomst is onderzoek op beperkte praktijkschaal onvermijdelijk. Kennis op verschillende vakgebieden kan dan in projectvorm worden ingezet om vergunningonderbouwend onderzoek uit te voeren, een persputsysteem op weliswaar kleine (demonstratieproject-)schaal te ontwerpen en op locatie voorzuiveringsstudies te verrichten met water dat later daadwerkelijk voor persputinfiltratie zal worden gebruikt. Het KIWA participeert dan ook in de opzet en realisatie van een diepinfiltratieproject van het Provinciaal Waterleidingbedrijf van Noord-Holland. Op deze wijze kunnen de resultaten van het tot op heden uitgevoerde persputonderzoek worden toegepast en getoetst en kan verdere kennis worden vergaard.

Nieuwegein, maart 1984

ONTWIKKELING EN TOEPASSING VAN DE MEMBRAANFILTRATIE-INDEX EN DE MEELOOPFILTRATIE-INDEX

J.C. Schippers, J. Verdouw, Keuringsinstituut voor Waterleidingartikelen KIWA N.V., Nieuwegein.

SAMENVATTING

a. De MFI (0,45) geeft een duidelijke indruk omtrent de te verwachten verstoppingssnelheid van een persput ten gevolge van de aanwezigheid van deeltjes.
b. Uit experimenten met meeloopfilters zijn sterke aanwijzingen verkregen, dat bacteriegroei eveneens een belangrijke bijdrage kan leveren aan de verstopping van een persput.
c. De MLFI kan een zeer nuttige aanvulling betekenen op de MFI (0,45) ter voorspelling van de snelheid waarmee een persput zal verstoppen, daar hiermee zowel het effect van deeltjes als van bacteriegroei wordt gemeten.

1 INLEIDING

Het optreden van verstopping is één van de belangrijkste technische problemen bij de toepassing van persputten. Met de oplossing van het verstoppingsvraagstuk is de toepassing van persputten als infiltratiemiddel technisch gezien mogelijk.
Als oorzaken voor het verstoppen van een persput noemt Olsthoorn (1):
a) zwevende deeltjes in het infiltratiewater;
b) bacteriegroei in en nabij de put;
c) luchtbellen in het infiltratiewater;
d) chemische neerslagvorming in het infiltratiewater en de put, bijvoorbeeld ferrihydroxide door

oxidatie van ferro-ionen, bij menging van aeroob en anaeroob water;

e) chemische neerslagvorming in de bodem;
f) zwelling en dispersie van kleideeltjes in de bodem;
g) aantasting van de korrelstructuur van de bodem.

De als eerste genoemde oorzaak, de aanwezigheid van zwevende deeltjes in het infiltratiewater en de hiermee gepaard gaande verstopping, blijken in de praktijk moeilijk controleerbaar en beheersbaar te zijn.
Ook de als tweede vermelde oorzaak, het optreden van bacteriegroei levert in een aantal situaties vermoedelijk een belangrijke bijdrage aan de verstopping. Deze bacteriegroei is beheersbaar, door toepassing van bijvoorbeeld chloor, chlooramine of chloordioxide. Daarbij kunnen echter minder gewenste neveneffecten optreden, zodat deze werkwijze niet zonder bezwaren is.
Om de andere genoemde oorzaken te kunnen elimineren is onderzoek nodig en/of dienen het ontwerp en de bedrijfsvoering van de persputten te worden aangepast.
Om de eerste twee oorzaken (zwevende deeltjes en bacteriegroei) te kunnen wegnemen is het allereerst nodig dat over adequate meetmethoden kan worden beschikt. Deze dienen in staat te zijn de verstoppingspotentie van het infiltratiewater vast te stellen. De meest natuurgetrouwe is die methode waarbij een proefput wordt gebruikt. Deze is echter kostbaar en tijdrovend. Vandaar dat is gezocht naar goedkopere en snellere methoden.
Reeds in 1975 is bij het KIWA gewerkt aan de ontwikkeling van een meeloopfilter met het doel het verstoppingsproces in een proeffilter boven de

grond te simuleren. Praktische problemen verhinderden echter lange tijd de toepassing van deze meeloopfilters en de mogelijk hieruit af te leiden Meeloopfiltratie-Index (MLFI). Parallel aan de ontwikkeling van de MLFI is bij het KIWA de Membraanfiltratie-Index (MFI) ontwikkeld, nadat gebleken was dat noch de troebelingsgraad, noch het aantal meetbare zwevende deeltjes, noch het zwevendstofgehalte, noch bestaande filtratietesten een afdoende maat waren voor de verstoppingspotentie van infiltratiewater (1).
De MFI is tevens toepasbaar voor het voorspellen van de vervuiling van hyperfiltratiemembranen en is in 1978 voor het eerst als routine meting uitgevoerd (2, 3). Het principe van de MFI is gebaseerd op de snelheid waarmee zwevende deeltjes een membraanfilter met bijvoorbeeld poriën van 0,45 μm verstoppen. Het is een parameter voor het schatten van de snelheid waarmee persputten verstoppen en hyperfiltratiemembranen vervuilen.
Voor de bepaling van de groeimogelijkheden voor bacteriën in water is de AOC-bepaling ontwikkeld. Zie voor de mogelijkheden van deze methode (Hijnen, Van der Kooij, dit rapport).

2 PRINCIPE MEMBRAANFILTRATIE-INDEX

De Membraanfiltratie-Index is gebaseerd op het verschijnsel dat bij filtratie van water met daarin zwevende deeltjes, door een membraanfilter met bijvoorbeeld poriën van 0,45 μm een koek of gel optreedt. Dit verschijnsel kan worden beschreven met de volgende betrekking:

$$\frac{1}{A} \cdot \frac{dV}{dt} = \frac{1}{\eta} \cdot \frac{\Delta P}{R_f + R_k}$$

Waarin:

V = filtraat volume

η = viscositeit

ΔP = drukverschil over het filter

R_f = specifieke weerstand van het filter

A = oppervlak membraanfilter

R_k = weerstand van de koek of gel per oppervlakte-eenheid

Voor R_k geldt in elk geval voor de situatie waarin geen samendrukking optreedt.

$$R_k = \frac{V}{A} \cdot I$$

Waarin I een functie is van de aard en hoeveelheid van de afgefiltreerde deeltjes. Voor uniforme en gelijksoortige deeltjes is I in elk geval evenredig met de concentratie.
Na combinatie van de twee genoemde betrekkingen en integratie ontstaat

$$\frac{t}{V} = \frac{\eta . R_f}{\Delta P . A} + \frac{\eta . I . V}{2 \Delta P . A^2}$$

De term

$$\frac{\eta . I}{2 \Delta P . A^2}$$

is gelijk aan tgγ - de helling - en is gedefinieerd als MFI.

indien: ΔP = 200 kPa
temperatuur= 20 °C zodat:
η = η (20 °C)
A = 1,38 10^{-3} m^2 (oppervlak filter diameter 42 mm)

$$\text{Zodat MFI} = \frac{\eta\ (20\ °C)}{\eta} \cdot \frac{\Delta P}{200} \cdot tg\gamma$$

In principe dient de MFI dus onafhankelijk te zijn van de druk waarbij wordt gemeten en recht evenredig te zijn met de concentratie.
In figuur 1 is een filtratie-curve weergegeven van behandeld Rijnwater door een membraanfilter met poriën van 0,45 μm van Millipore, waarin de grootheid t/V is uitgezet tegen V. Deze curve vertoont drie gebieden waarin achtereenvolgens wordt verondersteld, verstoppingsfiltratie, koekfiltratie en koekfiltratie met samendrukking op te treden. Het rechte middenstuk in de curve geeft het gebied aan waarin wordt verondersteld koekfiltratie zonder samendrukking op te treden. De helling van de curve ter plaatse levert na correctie voor druk en temperatuur de MFI.

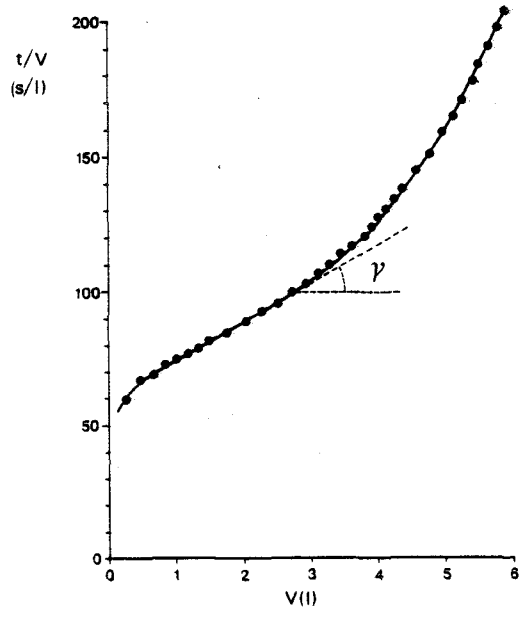


Fig. 1 - Quotient van de filtratietijd (t) en het filtraatvolume (V) als functie van het filtraatvolume voor gezuiverd Rijnwater

De veronderstelling, dat de MFI recht evenredig is met de concentratie van deeltjes van gelijke aard en afmetingen is getoetst met behulp van een colloidale formazine-oplossing. Figuur 2 toont dat deze veronderstelling inderdaad juist is.

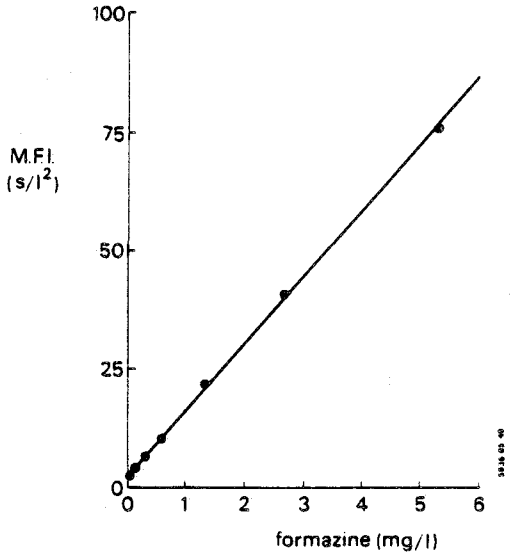


Fig. 2 - Membraanfiltratie-Index (MFI) als functie van de formazine concentratie

3 APPARATUUR

Het meten van de MFI gebeurt met een apparaat bestaande uit:

- een via een magneet aangedreven pomp van roestvaststaal zonder asdoorvoering om de introductie van luchtbelletjes uit te sluiten;
- twee regelafsluiter s, een voor een grove regeling en een voor een fijnregeling;
- een filterhouder. Millipore nummer xx 4304700;
- twee manometers.

In figuur 3 is het principe van het apparaat weergegeven.

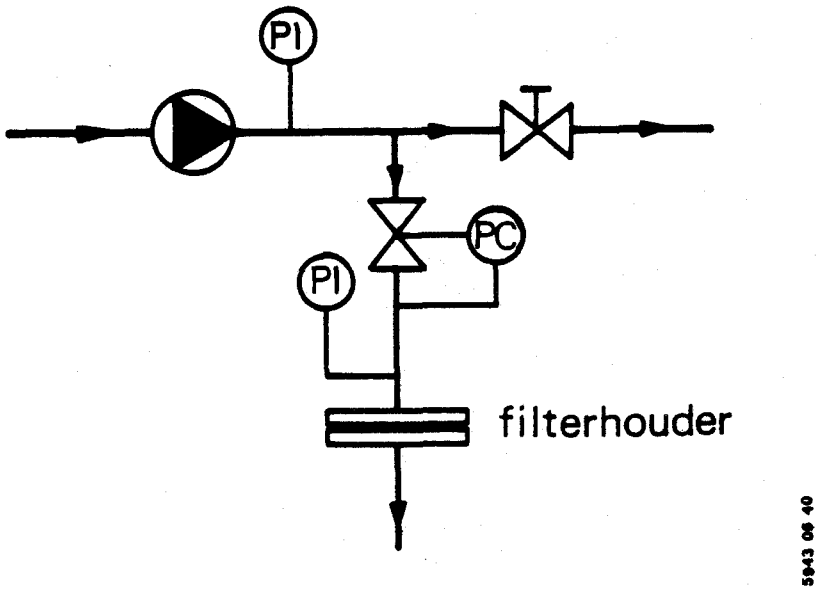


Fig. 3 - Schema meetapparatuur Membraanfiltratie-Index met pomp

De meting van het filtraat volume kan op verschillende wijzen worden uitgevoerd bijvoorbeeld met behulp van:

- een maatcilinder;
- een elektronische balans;
- een brandstofverbruiksmeter (bijvoorbeeld Micro oval) gekoppeld aan een rekeneenheid;
- een vaatje met een volume van bijvoorbeeld 10 ml dat via een hevel na vulling word geledigd. Elke lediging wordt hierbij via geleidbaarheidselektroden met een recorder geregistreerd (DOLF) (4).

In figuur 4 is het door het KIWA ontwikkelde semi-automatische MFI-apparaat weergegeven. Hiertoe vindt de meting van het filtraatvolume plaats met een brandstofverbruiksmeter, terwijl het resultaat met een printer zichtbaar wordt gemaakt.

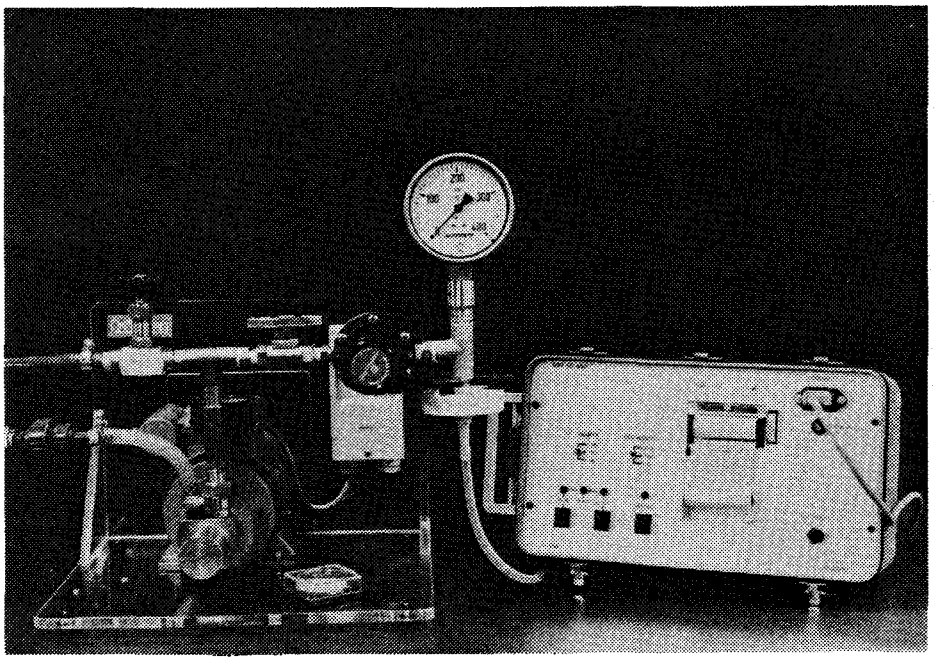


Fig. 4 - Transportabel Semi-automatisch apparaat voor de meting van de MFI

Naast het apparaat dat is voorzien van een pomp wordt ook gebruik gemaakt van een roestvaststalen vat (10 liter) waarin het te filtreren water met lucht of stikstof op druk wordt gebracht.
Voor de berekeningen van de MFI gemeten met membraanfilters met poriën van 0,45 µm wordt de eerste 50 ml filtraat niet bij de berekening betrokken, omdat in het begin van de meting de druk nog niet de juiste waarde heeft. Ter bepaling van het minimum van de helling in de curve t/V tegen V (waaruit de MFI wordt berekend) neemt men het voortschrijdend gemiddelde van 5 opeenvolgende waarnemingen om een redelijke nauwkeurigheid te bereiken.

4 VERSTOPPING VAN PERSPUTTEN

Uitgaande van de veronderstelling dat bij de ver-

stopping van persputten de weerstandstoename ontstaat door koekfiltratie zonder samendrukking, heeft Olsthoorn de verstoppingssnelheid berekend aan de hand van de MFI van het infiltratiewater. Voor een persput gevoed met water met een MFI van 1 s/l^2 en een filtratiesnelheid van 1 m/h op de boorgatwand, vond hij een weerstandstoename van circa 2000 mwk per jaar (20 MPa per jaar) (1).
In de praktijk blijken putten gevoed met water met een MFI van 1 s/l^2 niet of nauwelijks te verstoppen ten gevolge van zwevende deeltjes. Er is echter wel een globaal verband tussen de MFI van het infiltratiewater en de snelheid waarmee een aantal proefputten verstopte. Huisman en Olsthoorn berekenden namelijk voor een aantal van de uitgevoerde experimenten bij Nederlandse waterleidingbedrijven weerstandstoenamen en relateerden deze waarden aan de gemeten MFI (figuur 5).

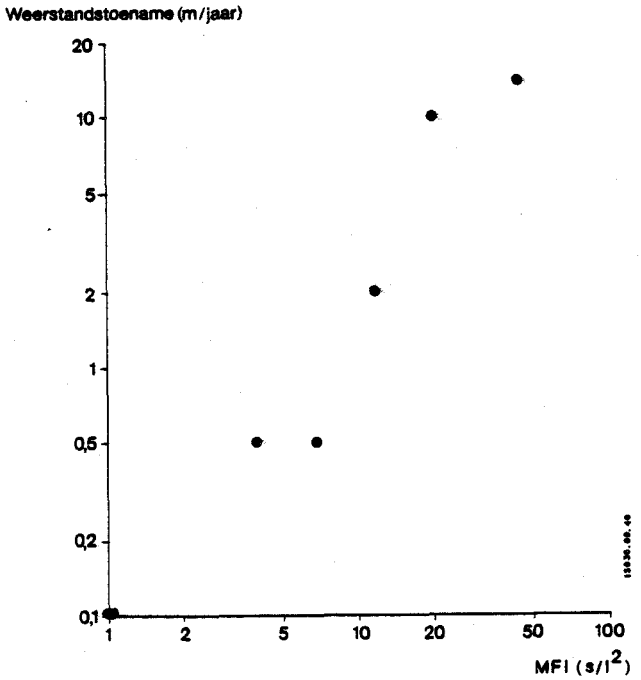


Fig. 5 - Weerstandstoename van persputten in relatie tot de MFI van het infiltratiewater

Bij deze experimenten is het onwaarschijnlijk dat de verstopping een andere oorzaak heeft dan zwevende deeltjes of eventueel een combinatie van zwevende deeltjes en bacteriegroei.
Naarmate de MFI hoger is is ook de verstoppingssnelheid groter, doch deze is veel kleiner dan op grond van het theoretisch model wordt voorspeld.
Deze discrepantie kan verschillende oorzaken hebben zoals:

- de veronderstelling dat de verstopping van een persput wordt veroorzaakt door koekfiltratie van zwevende deeltjes is onjuist;
- de deeltjes die voornamelijk de persput verstoppen zijn groter of kleiner dan die welke verantwoordelijk zijn voor de MFI gemeten met membraanfilters met poriën van 0,45 μm (MFI (0,45));
- er is tussen de MFI van het infiltratiewater en de weerstandstoename van de persput geen direct oorzakelijk verband;
- het principe van de MFI vertoont onvolkomenheden.

De bovenstaande mogelijkheden zijn voor ons mede aanleiding geweest tot:

- het nader toetsen van de MFI-meetmethode met standaardcolloiden;
- het meten van de MFI met membraanfilters met poriën groter en kleiner dan 0,45 μm;
- het praktisch toepasbaar maken van de meeloopfilters met het doel hiermee een Meeloopfiltratie-Index (MLFI) te kunnen ontwikkelen.

We gaan op deze drie punten nader in.

5 TOETSING MEMBRAANFILTRATIE-INDEX

Bij de definitie van de MFI is er van uitgegaan dat

de MFI onafhankelijk is van de toegepaste druk. Het is ook niet waarschijnlijk dat de MFI afhankelijk is van de toegepaste druk. Er bestaat immers een rechtlijnig verband tussen de grootheden t/V en V van formazine oplossingen (een standaard colloïd) terwijl er bovendien een rechtlijnig verband tussen MFI (0,45) en de formazine concentratie is. Desalniettemin is dit uitgangspunt getoetst voor formazine. Bij deze toetsing bleek dat deze drukafhankelijkheid wel bestaat.
In figuur 6 is deze afhankelijkheid weergegeven. Oorzaak daarvan is dat de formazine deeltjes, die de vorm van vlokken hebben, worden samengedrukt (zie figuur 7).
Zeer opmerkelijk hierbij is dat desondanks het rechtlijnig verband tussen t/V en V blijft bestaan (zie figuur 8). Dit effect wordt vrijwel zeker veroorzaakt door een momentane samendrukking van de koek (5).

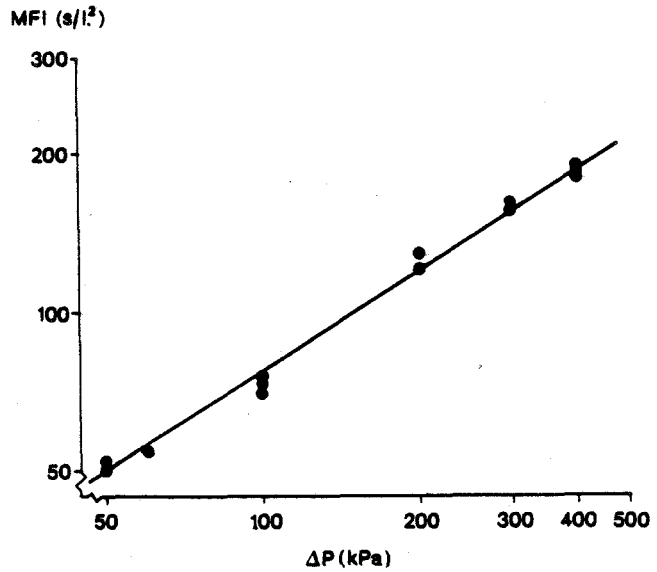


Fig. 6 - MFI (0,45) van een formazine oplossing als functie van de toegepaste druk

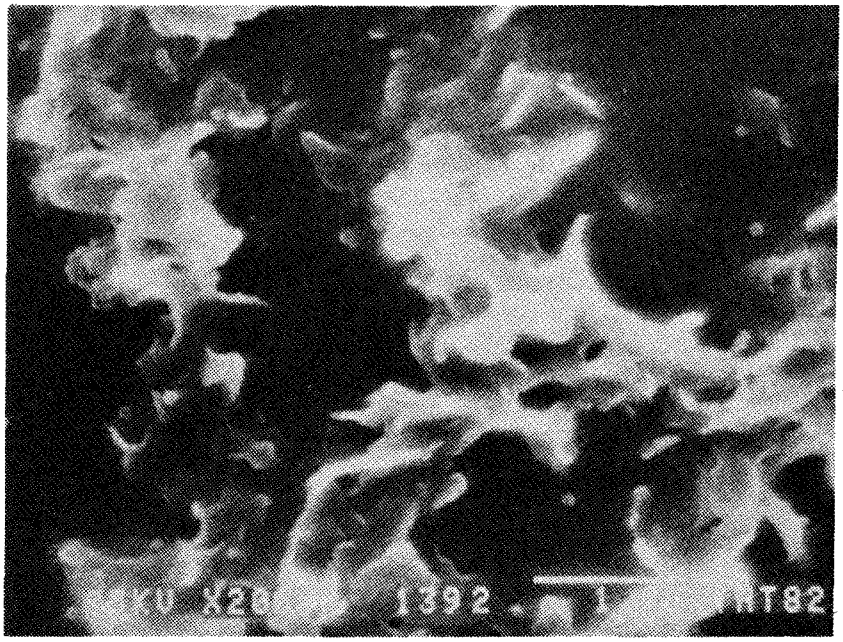


Fig. 7 - Opname van formazinedeeltjes met Raster Electron Microscoop (afdeling Chemische Technologie TH Twente)

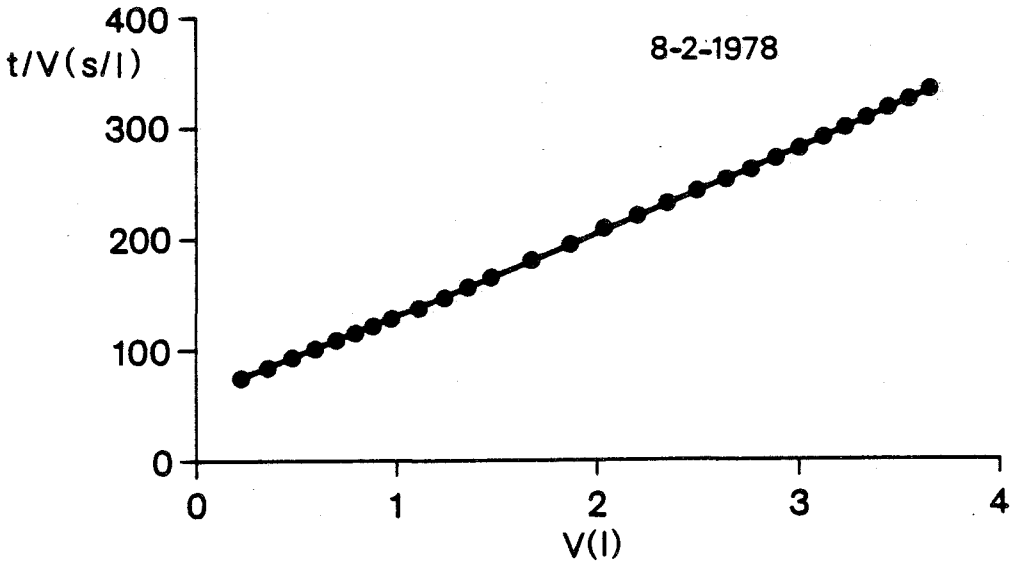


Fig. 8 - Quotient van de filtratietijd (t) en het filtraatvolume (V) als functie van het filtraatvolume voor een formazine oplossing

De MFI van snelfiltraat (van het zuiveringsstation Andijk van het Provinciaal Waterleidingbedrijf van Noord-Holland) vertoont eveneens een drukafhankelijkheid doch deze is kleiner dan die van een formazine oplossing (figuur 9).
Het is dan ook niet aannemelijk dat de geconstateerde discrepantie ligt aan een onvolkomenheid in de MFI.

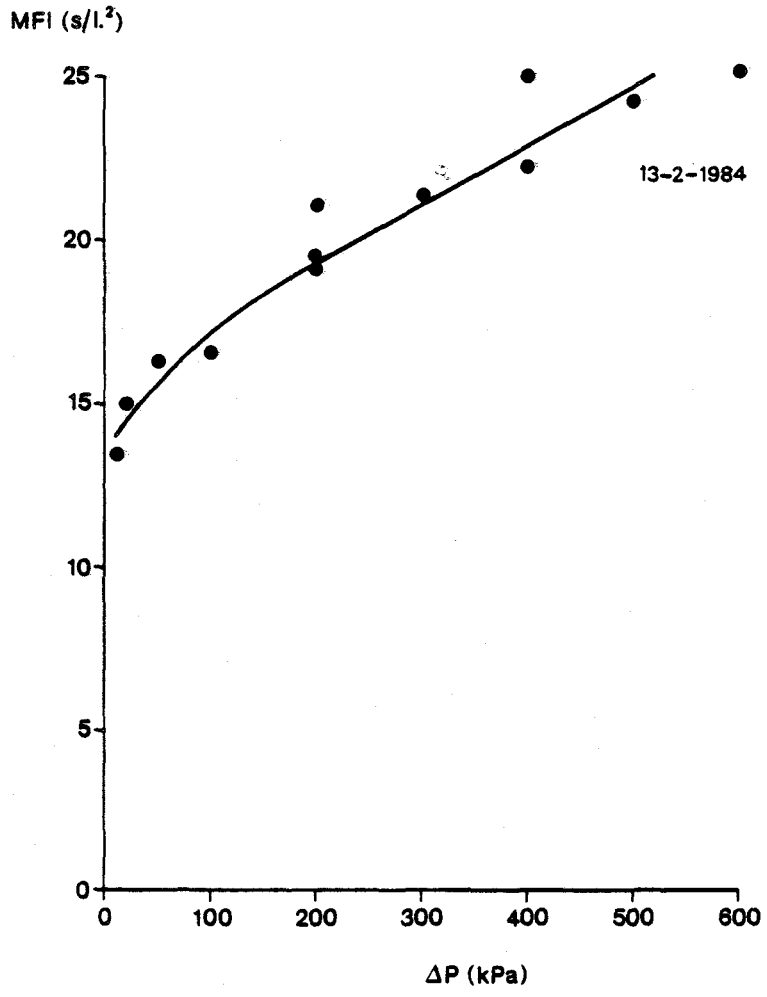


Fig. 9 - MFI (0,45) als functie van de druk van snelfiltraat van het zuiveringsstation Andijk

6 METING MFI MET MEMBRAANFILTERS MET PORIEN GROTER EN KLEINER DAN 0,45 μm

Voor het meten van de MFI met membraanfilters met poriën groter en kleiner dan 0,45 μm is gebruik gemaakt van Nuclepore filters, (Millipore filters met kleine poriën worden sterk samengedrukt)

porie diameter (μm)	MFI (s/l^2)
0,8	4
0,4	60
0,2	200
0,1	1.800
0,05	4.500
0,015	2.000.000

Tabel 1 - Metingen aan snelfiltraat van het zuiveringsstation Andijk

Uit tabel 1 blijkt dat de MFI van het snelfiltraat hoger is naarmate de porie diameter van de gebruikte membraanfilters afneemt. Kennelijk bevat het snelfiltraat een scala van deeltjes met een groot aantal zeer kleine deeltjes.
Om deze verondersteling te toetsen zijn metingen uitgevoerd met een oplossing van Polystyreen Latices (PSL) met een diameter van 0,08 μm bereid volgens Stone-Masui (6).
Uit tabel 2 blijkt dat de MFI van een PSL oplossing (0,08 μm) nauwelijks afhangt van de poriegrootte van de toegepaste membraanfilters. De veronderstelling dat het snelfiltraat van het zuiveringsstation Andijk een scala van deeltjes met een groot aantal kleine deeltjes bevat, is dan ook aannemelijk.

Membraanfilter	porie diameter (μm)	MFI (s/l^2)
N 0,05	0,05	126
N 0,1	0,1	123
N 0,2	0,2	116
N 0,4	0,4	117
N 0,8	0,8	125
M 0,1	0,1	119
M 0,45	0,45	120
WFS 600	-	136
WFA 500	-	134

N = Nuclepore membraanfilter
M = Millipore membraanfilter
WFS= Wafilin ultrafiltratie membraan van polysulfon cut-off proteïne mol gew. 40.000
WFA= Wafilin ultrafiltratie membraan van polyacrylonitrile cut-off proteïne mol gew. 50.000

Tabel 2 - MFI van een oplossing van Polystyreen Latices (d= 0,08 μm)

7 ONTWIKKELING MEELOOPFILTERS EN MEELOOPFILTRATIE-INDEX

Olsthoorn concludeerde uit zijn experimenten dat de verstopping, afhankelijk van de afmetingen en de aard van de zwevende deeltjes, voornamelijk in de omstorting van de put dan wel voornamelijk op de boorgatwand optreedt (1). Voor een routinematig toepassen en meten van een Meeloopfiltratie-Index bleken zijn filters echter nog niet geschikt.
Een groot nadeel van deze meeloopfilters was dat het debiet niet constant kon worden gehouden, zodat

betrekkelijk ingewikkelde bewerkingen van de meetresultaten nodig waren.
Een ander belangrijk nadeel van deze eerste generatie meeloopfilters was het ontstaan van luchtbellen in het filter, bij watertemperaturen lager dan die van de omgeving.
Beide nadelen zijn in de nieuwe meeloopfilters ondervangen door

- het debiet te regelen met een "flow controller";
- een overdruk van 100 kPa te creëeren met een pomp.

Het principe van de Meeloopfiltratie-Index is gebaseerd op het meten van de weerstandstoename van een filterkolom gevuld met zand als functie van de tijd bij een constant debiet. De MLFI kan bijvoorbeeld gedefinieerd worden als de weerstandstoename in kPa per jaar of mwk per jaar. In figuur 10 zijn de resultaten weergegeven van een experiment dat bij respectievelijk 8 °C en 20 °C is uitgevoerd.

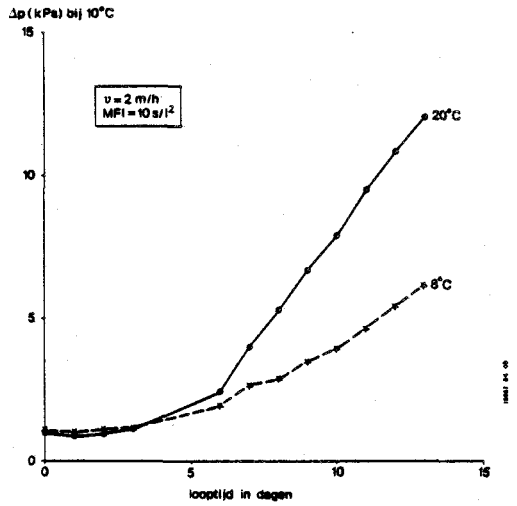


Fig. 10 - Weerstandstoename over meeloopfilters gevoed met snelfiltraat van het zuiveringsstation Andijk van respectievelijk 8 °C en 20 °C

De MLFI gebaseerd op het tweede gedeelte van de curven is bij deze metingen respectievelijk 490 kPa/jaar (49 mwk/jaar) en 250 kPa/ jaar (25 mwk/jaar).
De MLFI lijkt hiermee ontwikkeld. Er resteren echter nog een aantal vragen, zoals:

a. Met welk zand dient het meeloopfilter gevuld te zijn?
   Bij het vermelde experiment is in het filter een laag zand (1,2-2,4 mm) met een hoogte van 6 cm met daaronder 11,5 cm zand (0,3-0,6 mm) aangebracht. De bovenste laag vertegenwoordigt de omstorting en de onderste laag de formatie. Uit praktische overweging kunnen de afmetingen van het fijne zand het beste gelijk gekozen worden aan die van de formatie ter plaatse.
b. Welke laagdikten moeten worden toegepast?
   De laagdikte van de omstorting in een put is 15 à 25 cm, zodat bij de definitieve versie van de meeloopfilters een standaard laagdikte van circa 25 cm wordt aangebracht. Onder deze laag wordt 20 à 25 cm zand aangebracht. Olsthoorn vond dat de weerstandstoename voornamelijk in de eerste centimeters plaatsvindt, zodat deze beperkte laagdikte verantwoord is.
c. Welke filtratiesnelheid dient te worden aangehouden?
   In een persput neemt de filtratiesnelheid van het putfilter in de richting van de boorgatwand af. Het instellen van een dergelijk verloop van de filtratiesnelheid is in een eenvoudige opstelling niet mogelijk vanwege praktische problemen, zoals het optreden van ongelijke waterverdeling en kortsluitstromen. Er is dan ook gekozen voor verticaal opgestelde filters met een constante diameter.

De in te stellen filtratiesnelheid dient gelijk te zijn aan de snelheid bij de intrede van de omstorting of op de boorgatwand. Bij deze filtratiesnelheden vergt de meting van de MLFI ongeveer even veel tijd als een experiment met een persput. Daar er ook behoefte is aan een meting die aanzienlijk korter duurt, zijn in één apparaat 4 filters geplaatst, waarin een filtratiesnelheid van respectievelijk 1, 2, 4 en 8 m/h wordt ingesteld (figuur 11). Hiermee wordt beoogd zowel het proces in de persput te simuleren bij ongeveer gelijke filtratiesnelheid en bij hogere snelheden. Uit het verband tussen de verstoppingssnelheid en de verschillende filtratiesnelheden kan een voorspelling worden afgeleid voor de verstoppingssnelheid van een persput en kan hiermee worden vergeleken.

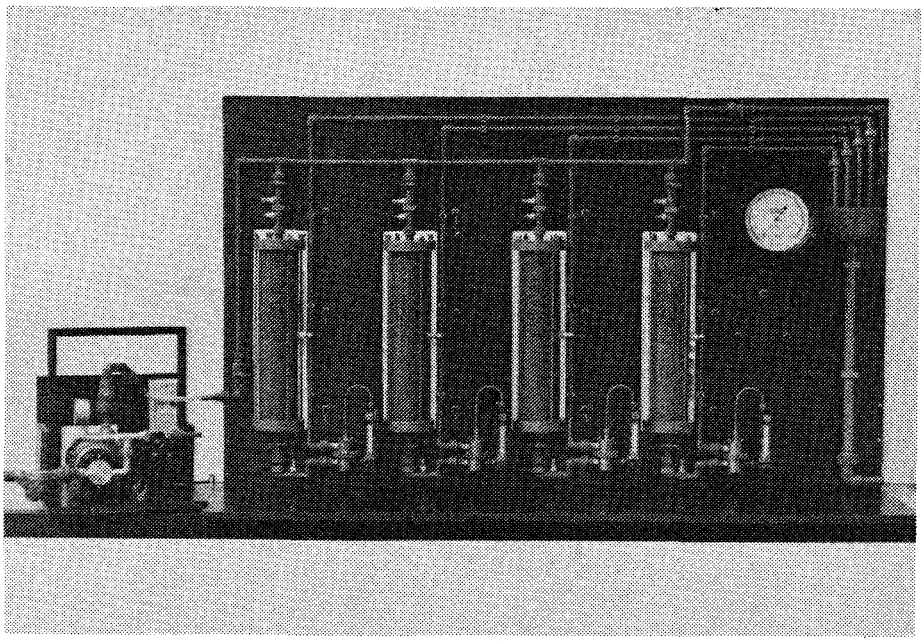


Fig. 11 - Meeloopfilter opstelling

d. Welke filtratiemechanismen treden op?
Indien de aanwezige deeltjes in het water betrekkelijk groot zijn dan zal hiervan een groot deel in de omstorting worden afgevangen. Zijn de deeltjes klein, dan wordt slechts een beperkt deel hiervan gedurende een beperkte tijd afgevangen, waarna de formatie deze deeltjes gaat afvangen. Hierbij treedt een vorm van dieptefiltratie op over een beperkte diepte, welke "koekfiltratie" wordt genoemd. Deze benaming is echter onjuist, daar bij zuivere koekfiltratie de deeltjes zich uitsluitend op het filter verzamelen.
Bij een persput en een meeloopfilter kunnen verschillende vormen van filtratie zich voordoen, te weten:
in de omstorting
- dieptefiltratie en doorslag van deeltjes;
- dieptefiltratie over een beperkte afstand (enkele centimeters).

in de formatie
- dieptefiltratie;
- dieptefiltratie over een beperkte afstand.

Deze processen kunnen achtereenvolgens in elkaar overgaan, afhankelijk van de aard en afmetingen van de deeltjes in het water.
Uit de filtratietheoriën volgt dat de weerstandstoename in een filterlaag na een aanloopfase evenredig is met de hoeveelheid afgevangen gefiltreerd materiaal en dus evenredig met de hoeveelheid gefiltreerd water, terwijl de weerstand evenredig is met het debiet. Dit betekent dat afgezien van de aanloopfase(n) de weerstandstoename over een filterlaag evenredig is met het quadraat van de hoeveelheid gefiltreerd

water.
Indien deze veronderstelling juist is, dan verhouden de weerstandstoenamen in de filters met respectievelijk 1, 2, 4 en 8 m/h filtratiesnelheid zich als 1:4:16:64.
Er is echter bekend dat bij hogere snelheden de afstand waarover dieptefiltratie optreedt toeneemt, zodat wordt verwacht dat lagere verhoudingsgetallen zullen worden gevonden.

e. In welke mate draagt de groei van bacteriën bij tot de weerstandstoename?
Om tot maatregelen te komen, welke putverstopping voorkomen, is het nodig een indruk te hebben van de bijdrage die bacteriegroei hieraan levert. Met dit doel zijn twee experimenten uitgevoerd met meeloopfilters, te weten:
- Twee meeloopfilters gevoed met snelfiltraat van het zuiveringsstation Andijk van het PWN met een filtratiesnelheid van 2 m/h. De temperatuur van het voedingwater van één van de meeloopfilters is verhoogd van 8 °C tot 20 °C.
- Hierna zijn de twee meeloopfilters van een nieuwe vulling voorzien en gevoed met respectievelijk snelfiltraat en snelfiltraat waaraan 1 mg/l vrij chloor is toegevoegd.

In figuur 10 en 12 zijn de resultaten van deze experimenten weergegeven. Uit deze grafieken blijkt dat de weerstandstoename (gecorrigeerd voor het verschil in viscositeit) bij hogere temperaturen groter is en dat bij het water waaraan 1 mg/l vrij chloor is toegevoegd, de weerstandstoename lager is dan bij het meeloopfilter waarbij dit niet het geval was.

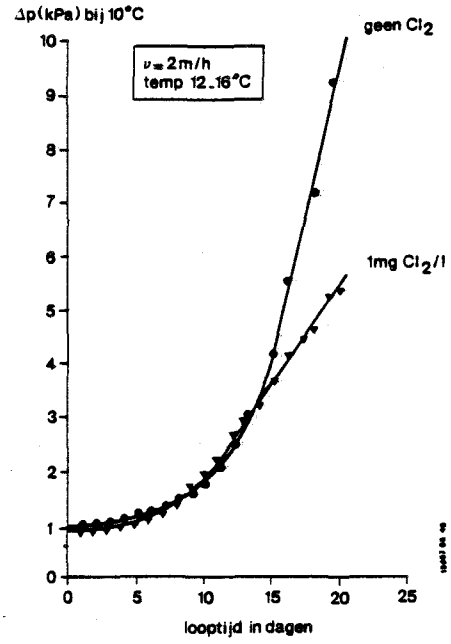


Fig. 12 - Weerstandstoename over meeloopfilters gevoed met snelfiltraat van het zuiveringsstation Andijk, met en zonder toevoeging van chloor

Deze resultaten leveren sterke aanwijzingen dat bacteriegroei een belangrijke bijdrage zou kunnen leveren aan de verstopping. Een sluitend bewijs is het echter niet, daar het karakter van de deeltjes onder invloed van een hogere temperatuur of chloor kan wijzigen en respectievelijk een hogere en lagere specifieke weerstand krijgen. Wat echter wel vast staat is dat in de eerste centimeters van de formatielaag grotere aantallen bacteriën (vastgesteld met behulp van de koloniegetalbepaling) aanwezig zijn per volume eenheid dan in de dieper gelegen lagen van het filter (figuur 13).
Ten gevolge van de beperkingen van de koloniegetalbepalingen hebben de vastgestelde aantallen bacteriën echter alleen een relatieve waarde.

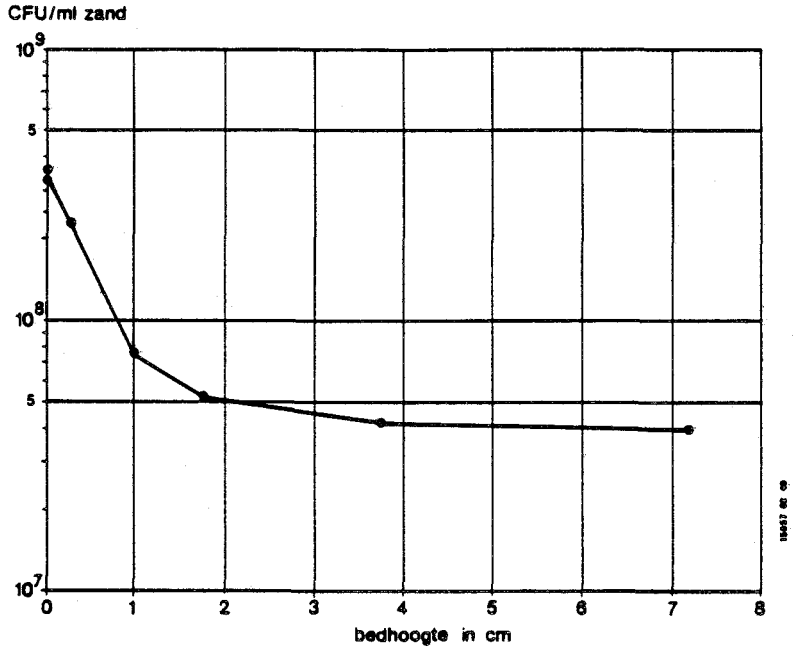


Fig. 13 - Aantal bacteriën per ml zand als functie van de bedhoogte in een meeloopfilter

8 VERANTWOORDING

Het beschreven onderzoek is gerealiseerd dankzij de bijdragen van verschillende zijden. Zo is een deel van het werk aan de MFI uitgevoerd door ir. J.H. Hanemaayer en R. Gerard in het kader van de samenwerking met de afdeling Chemische Technologie van de TH Twente. Aan de ontwikkeling van de meeloopfilters hebben H.C. Folmer (PWN), ing. A. Kostense en A.F. van Dam (KIWA N.V.) een zeer wezenlijke bijdrage geleverd.

9 LITERATUUR

1. T.N. Olsthoorn. Verstopping van persputten. KIWA Mededeling nr. 72 (1982).
2. J.C. Schippers, C.A. Bom and J. Verdouw. Five years experience with a reverse osmosis plant

for the treatment of river Rhine water. Sixth International Symposium on Fresh Water from the Sea 3 (1978) 363.

3. J. C. Schippers en J. Verdouw. De Membraanfiltratie-index als kenmerk voor de filtreerbaarheid van water. H_2O 12, (1979), p. 104-109.
4. J.G. Wijmans. Permeaat flux als functie van de druk bij ultrafiltratie. Afstudeerverslag Technische Hogeschool Twente Enschede (1980).
5. J.C. Schippers, R. Gerard, C.A. Smolders and J. Verdouw. Resistance to the permeate flux in unstirred microfiltration and ultrafiltration. Part I Colloidal Particle Solutions. To be published in J. Membr Sci.
6. J. Stone-Masui and A. Watillon. J. Coll. Interf. Sci. 520, (1975), 479.

Nieuwegein, augustus 1984

DE ROL VAN MICROBIOLOGISCHE PROCESSEN BIJ HET VERSTOPPEN VAN PERSPUTTEN

W.A.M. Hijnen en D. van der Kooij
KIWA N.V., Nieuwegein

SAMENVATTING

In dit rapport wordt een overzicht gegeven van de huidige kennis over de rol die microbiologische processen spelen bij het verstoppen van persputten. Naast literatuurgegevens is informatie verzameld van praktijksituaties en filtratie-experimenten onder geconditioneerde omstandigheden. Duidelijk blijkt dat het bacteriebestand van filterzand groter is bij een hogere belasting van het zandfilter met afbreekbare organische verbindingen. Uit de verzamelde gegevens over het bacteriebestand in de bovenlaag van zandfilters in relatie tot de gevormde eindweerstand van de zandkolom werd geconcludeerd dat het volume van deze aantallen onvoldoende is om de weerstandsopbouw te verklaren. De beperkingen van de koloniegetalbepalingen als maat voor de biomassa van het filter spelen in dit verband een belangrijke rol. Nader onderzoek met filtratie-experimenten onder geconditioneerde omstandigheden en technieken waarmee de biomassa beter kan worden gekwantificeerd is nodig om vast te stellen in welke mate en onder welke omstandigheden microbiologische processen een rol spelen bij het verstoppen van persputten.

1 INLEIDING

Uit een aantal in de praktijk uitgevoerde experimenten met het kunstmatig infiltreren van water

door middel van persputten blijkt dat de weerstandstoename een belangrijk technisch probleem is. De oorzaken van deze verstopping kunnen zijn: zwevende deeltjes in het water, gasbellen in het water, bacteriegroei in de put, chemische neerslagvorming, dispersie en zwelling van kleideeltjes in de bodem en zetting van de bodem rondom de put. In dit hoofdstuk zal een overzicht worden gegeven van de huidige kennis over de rol van microbiologische processen bij het verstoppingsprobleem.

2 MICROBIOLOGISCHE PROCESSEN BIJ PERSPUTTEN

Uit een aantal in de literatuur beschreven praktijkwaarnemingen en experimenten blijkt duidelijk dat bacteriegroei een belangrijke rol van betekenis kan spelen bij het verstoppen van persputten. Een persput bestaat uit een verticaal in de bodem opgestelde buis met filterspleten. Tussen de filterspleten van de buis en de boorgatwand is een laag grind gestort, de omstorting. Aangenomen kan worden dat de verstopping, veroorzaakt door bacteriën, voornamelijk op zal treden bij de boorgatwand of de filterspleten.
Olsthoorn (1982) maakt melding van een persputexperiment bij het PWN te Castricum. Hier werd infiltratie van water, dat was gefiltreerd door een kaarsfilter met een poriegrootte van 1 µm, vergeleken met de infiltratie van niet-gefiltreerd water. Beide putten verstopten met een zelfde snelheid, terwijl een chloordosering van 4,5 mg Cl_2 per liter aangevoerd water tot gevolg had dat de weerstand nagenoeg volledig verdween. De weerstand was gesitueerd in de omstorting.
Bij persputexperimenten met afvalwater gezuiverd tot drinkwaterkwaliteit, waar infiltratie met en

zonder chloordosering (2 mg/l) werd vergeleken, werd geconstateerd dat de weerstand snel toenam (na circa 2 dagen) in de afwezigheid van chloor (Ehrlich et al, 1973). De weerstand trad op tussen de filterspleten en de omstorting. In het gesuspendeerde materiaal, aanwezig in het teruggewonnen water, kon slijm worden waargenomen. Van dit materiaal was 75 % vluchtig bij 550 °C. Het gesuspendeerde materiaal, aanwezig in het teruggewonnen water na infiltratie van gechloord water, bestond slechts voor 25 % uit verbindingen die bij 550 °C vluchtig zijn. Naast chemische bepalingen werden bacteriologische bepalingen uitgevoerd met het teruggewonnen water. Bij infiltratie van niet chloorhoudend water waren de koloniegetallen, bepaald door membraanfiltratie en incubatie op plate-countagar bij 30 °C, hoger dan bij de aanwezigheid van chloor in het infiltratiewater. Het koloniegetal van het eerste teruggewonnen water na infiltratie zonder chloor was 2×10^5 en met chloor 5×10^3 kolonievormende eenheden per milliliter.

Dat microbiologische processen optreden in een persput blijkt ook uit de weerstandsvermindering na stilstand van een put. Het eerste opgepompte water stinkt na zo'n stilstandsperiode ten gevolge van sulfaatreductie en in de literatuur wordt melding gemaakt van hoge koloniegetallen in dit water (Rebhun en Schwarz, 1968; Eren en Goldsmid, 1970). Rebhun en Schwarz (1968) verklaren de weerstandsafname van een persput na stilstand door de afbraak van een "mat" van organisch materiaal door de aanwezige biomassa. Dit materiaal was aanwezig in het infiltratiewater van het meer Kinnereth en veroorzaakte de weerstandstoename van de infiltratieput. Zelfs na een stagnatie van 10 minuten bij het terugpompen van water uit een persput kunnen de ko-

loniegetallen van het eerste pompwater hoger zijn dan van het water vlak voor de stilstand, ook in dien het water voor de stagnatie een lange periode een laag koloniegetal had. Hierbij zouden twee aspecten een rol spelen, namelijk de pulserende werking bij aanvang van het pompen en hoge bacterieaantallen in de nabijheid van de filterspleten (Vecchioli, 1970).

3 AFBREEKBARE VERBINDINGEN IN HET INFILTRATIEWATER ALS BACTERIEGROEI BEPALENDE FACTOR

3.1 Opname van afbreekbare stoffen door bacteriën

Van grote invloed op de microbiologische processen in een persput is de watersamenstelling van het te infiltreren water. Het water bevat opgeloste en niet-opgeloste stoffen. Wanneer we er gemakshalve van uitgaan dat de niet-opgeloste stoffen worden afgevangen en geen rol spelen bij de optredende bacteriegroei dan blijven de opgeloste anorganische en organische stoffen als groeibepalende factor over. Een opgeloste anorganische verbinding die van belang is, is ammonium (NH_3). Bij een voldoende hoge temperatuur (> 4-6 °C) en de afwezigheid van groeiremmende verbindingen zal er een nitrificerende flora aanwezig zijn. Dit zijn autotrofe organismen. Bacteriën die met name een rol spelen bij dit proces zijn Nitrosomonas en Nitrobacter. Van deze organismen zijn de kinetische factoren van het nitrificatieproces onder meer beschreven door Wong Chong en Loehr (1975). De yield-coëfficiënt of celopbrengst van Nitrosomonas bedraagt 4×10^7 -$1,2 \times 10^8$ cellen per mg geoxideerd N. Deze opbrengstfactor is relatief laag in vergelijking met het aantal cellen dat door de heterotrofe mi-

cro-organismen per mg C kan worden gevormd (zie hieronder).
Het NH_3-gehalte is door de bij de meeste infiltratiewaters toegepaste voorzuivering meestal gering. De jaargemiddelden voor 1983 van twee voor infiltratie toegepaste watertypen zijn 0,04 en 0,2 mg/l.
Van het gehalte aan opgeloste organische stoffen (DOC Dissolved Organic Carbon; mg/l) is een gedeelte niet of moeilijk en een gedeelte gemakkelijk afbreekbaar. Heterotrofe micro-organismen hebben voor hun groei afbreekbare organische verbindingen nodig als energiebron (vorming van CO_2; dissimilatie) en als koolstofbron (vorming van celmateriaal, assimilatie). Voor het meten van het gehalte aan gemakkelijk afbreekbare organische verbindingen is door Van der Kooij (1979) een methode ontwikkeld ten behoeve van het meten van de nagroeipotentie in drinkwater. Dit is de AOC-bepaling (Assimileerbare Organische Koolstof). Het principe berust op het meten van het maximale groeiniveau (CFU/ml; Colony Forming Units) van een bacterie van de soort Pseudomonas fluorescens. De celopbrengst van de teststam (P 17) bedraagt 4,1 x 10^9 cellen per mg acetaat C. Het maximale groeiniveau van de teststam in het te onderzoeken water kan worden omgerekend in mg acetaat-C equivalenten per liter (AOC). De generatietijd of verdubbelingstijd (h) van de teststam is afhankelijk van de concentratie en de afbreekbaarheid van de aanwezige verbindingen. Uit resultaten van een onderzoek met deze methodiek door Van der Kooij et al (1982) bleek dat het AOC-gehalte over het algemeen minder dan 1 % van de DOC (mg/l) van het onderzochte water is.
Bij filtratieprocessen hechten de bacteriën zich aan het zand en nemen de voor hun groei benodigde stoffen uit het water op. Bij deze processen kan

achtereenvolgens onderscheid worden gemaakt in:

1. aanvoer van afbreekbare verbindingen met water naar het zandpakket of het filter;
2. transport van de afbreekbare verbindingen vanuit het water in de poriën naar de bacteriën op het materiaal en
3. de opname van de afbreekbare verbindingen door de bacteriën.

De aanvoer van afbreekbare verbindingen kan worden uitgedrukt in de AOC-belasting (AOC_b) van het filtrerende materiaal. De AOC_b wordt bepaald uit de volgende vergelijking:

$$AOC_b = S_i \times V_o$$

waarin S_i het AOC-gehalte van het influent is (µg C/l), V_o de stroomsnelheid (m/h) en de AOC_b de belasting in mg $C/m^2.h$.

Op het transport van de afbreekbare verbindingen vanuit het water naar de bacteriën heeft het stromingsbeeld in het filtrerend materiaal een belangrijke invloed. Bij de persputten is de stroomsnelheid op de boorgatwand circa 1 m/h, waardoor het stromingsbeeld in het filtrerende materiaal laminair zal zijn. Hierdoor is de diffusie een bepalende factor bij het transport van het substraat naar de gehechte bacteriën. Door Van der Kooij en Hijnen (1983a) is het proces van de verwijdering van organische stoffen door bacteriën uitvoerig beschreven. Gesteld wordt dat de substraatverwijdering ook in een langzaam zandfilter (stroomsnelheid 0,5 m/h) wordt beperkt door diffusie. Een van de uit dit onderzoek getrokken conclusies luidt dat nader onderzoek nodig is om vast te stellen of, en zoja welke relatie bestaat tussen de belasting van filters met

gemakkelijk afbreekbare koolstofverbindingen en de aanwezigheid van hogere organismen en micro-organismen in filters. Dit om nadere beheerscondities te kunnen aangeven voor biologische filters. Dergelijke informatie is ook van belang voor het beheersen van de microbiologische processen in persputten.

3.2 Het verband tussen de belasting van een filter met de afbreekbare verbindingen en de bacteriebelading van het filtermateriaal

Voor het handhaven van een bepaald aantal bacteriën op filtermateriaal is een substraataanvoer nodig die groter of gelijk is aan die hoeveelheid nodig voor de vermeerdering van bacteriën ter compensatie van uitspoeling en consumptie door hogere organismen en de endogene ademhaling van de biomassa. Onder deze omstandigheden is er sprake van een evenwicht (steady-state). Het is duidelijk dat bij een sterk wisselende watersamenstelling geen evenwicht bestaat. Wanneer we er van uitgaan dat de aanwezige biomassa als volume de oorzaak is van een weerstandstoename dan is het van belang de relatie tussen de AOC-belasting van een filter en de hoeveelheid bacteriën te bepalen.
Bij een aantal praktijkfilters en zandfilters onder geconditioneerde omstandigheden in het laboratorium zijn bacteriebepalingen op het filtermateriaal uitgevoerd en gerelateerd aan de gegeven AOC_b-waarden. De resultaten staan vermeld in tabel 1 en figuur 1.

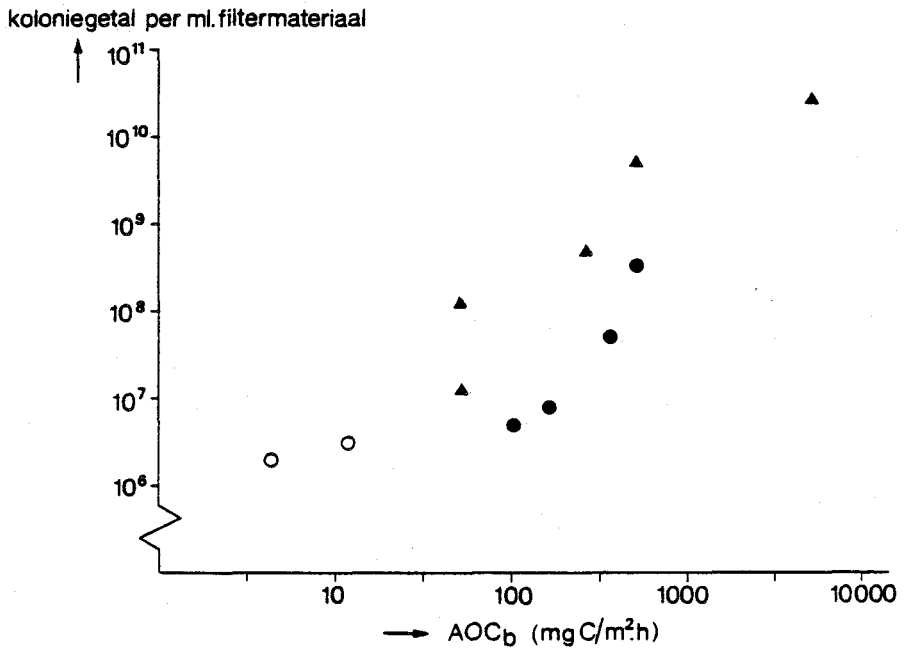
Filter	AOC_b (mg C/m^2.h)	Temperatuur (°C)	Koloniegetal filtermateriaal (CFU/ml)	weerstand (cm WK)
LZF[a]	3,6	17	$1,8 \times 10^6$	-
	10,6	6,5	$3,4 \times 10^6$	-
SF[b]	323,3	16,5	$4,7 \times 10^7$	-
	500	17	$3,3 \times 10^8$[d]	-
	166	17	$8,6 \times 10^6$	-
	99	6,5	$4,8 \times 10^6$	-
ZF[c]	5.000	17-18	$2,8 \times 10^{10}$	64,2
	500	17-18	$5,5 \times 10^9$	67
	250	14-16	$4,5 \times 10^8$	15,2
	250	14-16	$8,0 \times 10^8$	23,4
	50	17-18	$1,4 \times 10^7$[e]	1,0
	50	14-16	$1,2 \times 10^8$[f]	10,0

a. langzame zandfilters
b. snelfilters
c. zandfilters van laboratoriumexperimenten
d. korrelkool van dubbellaagsfilter
e. looptijd 16 dagen
f. looptijd 23 dagen

Tabel 1 - Het koloniegetal van filtermateriaal in relatie tot de AOC-belasting (AOC_b), de gemeten eindweerstand (cm WK) en de watertemperatuur

De bepalingen in de praktijkfilters (LZF en SF) zijn uitgevoerd door een kleine hoeveelheid filtermateriaal te schrapen vanaf het filteroppervlak. De laboratoriumexperimenten zijn uitgevoerd met proeffilters waardoor grondwater werd gefiltreerd met

daaraan toegevoegd acetaat. De filtratiesnelheid was 5 m/h en het zand had een korreldiameter van 0,7 - 0,85 mm. Na een looptijd van enige dagen tot weken werd het koloniegetal bepaald van het zand op diverse diepten van de 10 cm lange zandkolom. Voor het filter dat werd gevoed met het grondwater zonder acetaatdosering werd een AOC_b-waarde van 50 mg acetaat-C eq. per m^2 per h vastgesteld. Uit figuur 1 blijkt duidelijk dat hogere AOC_b-waarden hogere koloniegetallen van het zand bovenin de kolom tot gevolg hebben.



Figuur 1 - De relatie tussen het koloniegetal van het filtermateriaal aan het oppervlak van een filter en de AOC-belasting (AOC_b) voor snelfilters (•), langzame zandfilters (o) en filters van laboratoriumexperimenten (▲)

Bij de laboratoriumexperimenten lijkt er een lineair verband te zijn tussen het koloniegetal van het filtermateriaal en de AOC_b-waarden. De bacteriebeladingen van de praktijkfilters waren verhoudingsgewijs lager dan die van de proeffilters. Aannemelijk is dat er bij snelfilters niet of nauwelijks sprake is van een evenwicht of "steady state". De looptijden zijn meestal kort en er wordt vaak intensief gespoeld waardoor een deel van de biomassa verdwijnt. Dat is mogelijk een oorzaak van de lagere aantallen bacteriën op het filtermateriaal bij snelfilters in relatie tot de AOC_b. Bij de langzame zandfilters kan door een lange looptijd een "steady-state" worden bereikt.

Theoretisch kan worden berekend hoeveel bacteriën op het zand aanwezig zijn bij een bepaalde AOC_b-waarde. Bij een AOC-gehalte van het influent van 1 mg acetaat -C/l en een lineaire filtratiesnelheid van 5 m/h is de AOC_b gelijk aan 5 g acetaat-C/m^2.h. Door Van der Kooij et al (1980) is vastgesteld dat Aeromonas hydrophila voor zijn onderhoudsenergie 0,006 mg glucose per mg droge stof per uur nodig heeft (bij 15 °C). Daar 1 bacteriecel een droge stof gewicht van circa 10^{-10} mg heeft is 0,006 mg glucose C per uur voldoende om 10^{10}-cellen in leven te houden. Indien de bij filters optredende effecten van uitspoeling en consumptie van cellen door hogere organismen buiten beschouwing worden gelaten dan kan worden gesteld dat een aanvoer van 5 g acetaat-C/m^2.h een aantal, dat gelijk is aan $\frac{5.000}{0.006} \times 10^{10} = 8,3 \times 10^{15}$-cellen per m^2; i.e. $8,3 \times 10^{11}$-cellen per cm^2 in leven kan houden. Wanneer deze cellen zich in een zandlaag van 1 cm bovenin het filterbed bevinden, dan bedraagt daarvan het bacteriegehalte: $8,3 \times 10^{11}$-cellen per cm^3. Bij

de laboratoriumexperimenten werd onder de gehanteerde AOC_b-waarde een gehalte van 2,8 x 10^{10} CFU/-ml vastgesteld. Dit is slechts circa 3 % van het berekende aantal. Factoren die een rol kunnen spelen bij het grote verschil tussen de berekende en geconstateerde waarden zijn:

- het rendement van de koloniegetalbepaling is gering; een groot deel van de aanwezige biomassa kan niet worden waargenomen met de koloniegetalbepaling;
- de biomassa bevindt zich niet alleen in de bovenste cm van het filterbed maar ook in de dieper gelegen lagen;
- uitspoeling en consumptie van biomassa door hogere organismen.

Tenslotte is niet duidelijk of de voor Aeromonas hydrophila berekende onderhoudscoëfficiënt overeenkomt met die van bacteriën in filters. Duidelijk is dat nader onderzoek nodig is om de relatie tussen de oppervlaktebelasting van filters (AOC_b) en de bacteriebelading van het filtermateriaal te bepalen.

3.3 AOC-gehalten van het infiltratiewater

Bij een aantal persputexperimenten in Nederland is het AOC-gehalte van het infiltratiewater bepaald (tabel 2). Uit deze AOC-gehalten van de verschillende watertypen kon worden berekend dat de oppervlaktebelasting AOC_b op de boorgatwand (infiltratiesnelheid 0,5 - 2 m/h) varieerde tussen 3 en 40 mg acetaat-C eq per m^2 uur. Deze waarden komen overeen met de AOC_b-waarden van langzame zandfilters (figuur 1). Bij de laboratoriumexperimenten met acetaatdosering aan het influent van zandfil-

Bedrijf/ persput	Datum (1982)	Temperatuur (°C)	Kolonie-getal (CFU/ml)	AOC[e] (µg ac-C eq./l)	Generatietijd[e] (uren)
WWZK:[a]					
PC	31- 3	8,8	$2,5 \times 10^3$	8 ; 8	31 ; 27
	2- 8	21,5	$3,0 \times 10^3$	5 ; 4	52 ; 50
	13-12	-	567	7 ; 9	27 ; 29
PD	31- 3	8,9	$4,0 \times 10^4$	27 ; 9	- ; 14
	2- 8	21,5	$2,0 \times 10^3$	13 ; 6	14 ; 20
	13-12	-	$2,8 \times 10^3$	12 ; 21	15 ; 13
PWN :[b]					
IP_2	31- 3	6,5	$2,8 \times 10^4$	19 ; 12	10 ; 9
	2- 8	19,5	$8,3 \times 10^3$	11 ; 9	11 ; 11
	19- 8	-	-	7 ; 7	34 ; 31
GWA :[c]					
PP_2	31- 3	7,8	873	7 ; 6	25 ; 26
GWG :[d]					
DIP_1	14- 4	-	600	5 ; 6	35 ; 37

[a]WWZK: Werkgroep Watervoorziening Zuid-Kennemerland
[b]PWN : Provinciaal Waterleidingbedrijf van Noord-Holland
[c]GWA : Gemeentewaterleidingen Amsterdam
[d]GWG : Gemeentelijk Waterbedrijf Groningen
e : de AOC-bepaling is in duplo uitgevoerd

Tabel 2 - Resultaten van diverse metingen in het infiltratiewater van experimentele persputten in Nederland

ters (T = 16 °C en V = 5 m/h) bleek dat een AOC_b van 250 mg acetaat $C/m^2.h$ na een looptijd van 23 dagen geen duidelijke verstopping veroorzaakte door bacteriegroei. De resultaten van deze laboratoriumproeven kunnen niet zonder meer vertaald worden naar de bij de persput heersende omstandigheden omdat bij een persput sprake is van zand met een kleinere korreldiameter, de snelheid lager is en er een andere samenstelling van het substraat is. Uit de resultaten van de persputexperimenten van de Werkgroep Watervoorziening Zuid Kennemerland (WWZK) waar twee putten naast elkaar worden vergeleken met en zonder voorfiltratie van het water door een langzaam zandfilter, is gebleken dat bij de put met voorgefiltreerd water (PC) nagenoeg constant kon worden geinfiltreerd. De andere put (PD) moest vooral in het voorjaar bij hogere temperaturen geregenereerd worden. Het AOC-gehalte van dit infiltratiewater is circa een factor 2 hoger en lijkt meer aan schommelingen onderhevig te zijn (tabel 2). Het is niet duidelijk in hoeverre het verschil in AOC-getallen verantwoordelijk is voor de geconstateerde looptijdverschillen van de putten.
Uit het functioneren van de persput van het PWN te Castricum (IP_2) lijkt, evenals bij de putten PC en PD, dat de temperatuur ook een belangrijke rol speelt. Hier neemt bij oplopende temperaturen, in het voorjaar (6,5 tot 16 °C), de weerstand sterk toe. Alhoewel ook het AOC-gehalte van het water gedurende de seizoenswisselingen aan schommelingen onderhevig kan zijn moet er rekening mee worden gehouden, dat meerdere waterkwaliteitsfactoren, die van invloed kunnen zijn op het verstoppingsproces, worden beïnvloed door seizoenswisselingen.

Een belangrijk aspect van het voedselaanbod bij la-

ge concentraties is de mate van afbreekbaarheid van de verbindingen. Zeer gemakkelijk afbreekbare verbindingen als acetaat worden snel opgenomen met als gevolg dat de generatietijd van het organisme kort is. Uit de verschillende generatietijden, die bij overeenkomende AOC-gehalten werden waargenomen, (tabel 2) blijkt dat in sommige gevallen de verbindingen die aan het AOC-gehalte bijdragen sneller worden opgenomen door de teststam dan in andere gevallen. Dergelijke verschillen kunnen ook van invloed zijn op de groei van bacteriën op de boorgatwand.

4 DE BIOMASSA ALS WEERSTANDSBEPALENDE FACTOR

4.1 Bepaling van de biomassa

De biomassa, aanwezig in de bodemmonsters of filtermateriaal, bestaat uit levend en dood celmateriaal en extra-cellulaire uitscheidingsprodukten van bacteriën. Van het bestand aan levende cellen, die organische verbindingen als koolstof- en energiebron benutten, kan een indruk worden gekregen door de cellen van het materiaal los te maken in steriel water. Van deze suspensie kan het koloniegetal worden bepaald op een niet-selectief medium bij een voor de meeste micro-organismen gunstige temperatuur (20 à 30 °C). Dit koloniegetal wordt uitgedrukt in kolonievormende eenheden (CFU) per volume- of gewichtseenheid. Hierbij moet worden bedacht dat het koloniegetal vrijwel altijd lager is dan het werkelijke aantal levende micro-organismen omdat (1) deze vaak in klompjes van meer dan één individu voorkomen die toch één kolonie vormen en (2) sterk aan de in de bodem of het filtermateriaal heersende condities aangepaste micro-organismen zich lang

niet altijd kunnen vermeerderen (i.e. zichtbare kolonies vormen) op een kunstmatige voedingsbodem. Wanneer het koloniegetal van zand wordt bepaald met de voor het onderzoek van drinkwater gebruikelijke standaardmethodes wordt bovendien slechts een (gering) gedeelte van het aantal heterotrofe micro-organismen geteld omdat (1) de platen slechts kort worden bebroed (24 - 72 uren); (2) de substraatconcentratie in het medium hoog is, waardoor de bacteriën onder meer een enorme wisseling in osmotische druk ondergaan en (3) door het mengen van de cellen van het te onderzoeken materiaal met een vloeibaar agarmedium van circa 44 °C (gietplaatprocedure) waardoor een deel van de bacteriën wordt gedood. Het is duidelijk dat met toepassing van de standaardmethoden alleen die micro-organismen worden geteld die de extreme milieuveranderingen kunnen overleven en die zich bovendien zeer snel vermeerderen in de voedingsbodem.
Door Van der Kooij et al (1981b) werd een medium beschreven, dat bij een lange incubatieduur en de toepassing van de strijkplaatprocedure (uitstrijken van monster op voorgedroogde voedingsbodem) een veel hoger koloniegetal van water of zand opleverde dan de bij het onderzoek van drinkwater gebruikelijke glucosegistextract agar.
Bij de reeds eerder vermelde bacterieladingen van filtermateriaal (tabel 1) werden de bacteriën van het zand gescheiden door een hoeveelheid zand in steriel water 3 minuten ultrasoon te behandelen. Van de verkregen bacteriesuspensie werd het koloniegetal bepaald zoals hierboven staat beschreven.
Over het bestand van levende cellen in bodemmonsters of zand kan ook informatie worden verkregen door het gehalte Adenosine-trifosfaat (ATP) per gewichts- of volume-eenheid materiaal te bepalen.

ATP is een universeel in de levende natuur voorkomende verbinding, die zorgt voor de opslag en overdracht van vrije energie.
Elke levende cel bevat een bepaalde hoeveelheid ATP. Kool (1976) berekende uit literatuurgegevens een gemiddelde waarde van 4,7 x 10^{-10} µg ATP per bacteriecel. Uit een aantal door Kool uitgevoerde bepalingen in filters en bodemmonsters bleek dat het hoogste ATP-gehalte per gewichtseenheid materiaal, evenals bij de koloniegetallen in de bovenste cm, werd waargenomen. In twee verschillende zandfilters werd na 1 cm bedlengte 50 en 18 ng ATP per g zand bepaald. Uitgaande van het bovengenoemde gemiddelde ATP-gehalte per cel komt dit overeen met respectievelijk 1 x 10^8 en 4 x 10^7 CFU per g zand. Deze op ATP-basis berekende waarden komen overeen met de in tabel 1 vermelde aantallen. De ATP-bepaling verdient dan ook nadere aandacht om als parameter voor de levende biomassa in filters te worden bestudeerd.
Naast deze indirecte methodieken voor het bepalen van het aantal bacteriën per volume- of gewichtseenheid zand is veel onderzoek gedaan door het materiaal microscopisch te onderzoeken. Na het tellen van het aantal waargenomen cellen per oppervlakteeenheid wordt een geschatte waarde gegeven van het aantal cellen op het zand. Door Beck (1968) wordt in een literatuuroverzicht melding gemaakt van aantallen bacteriën van circa 10^9 - 10^{11} per g grond geschat door microscopische telling. De beladingen gemeten met behulp van koloniegetalbepalingen bedroegen slechts 1 à 10 % van dit aantal. Een zelfde verschil in aantal bacteriën op actieve kool tussen microscopisch en indirect op vast medium bepaalde aantallen werd door Tuschewitziki et al (1983) berekend. Factoren die naast de reeds eerdergenoemde

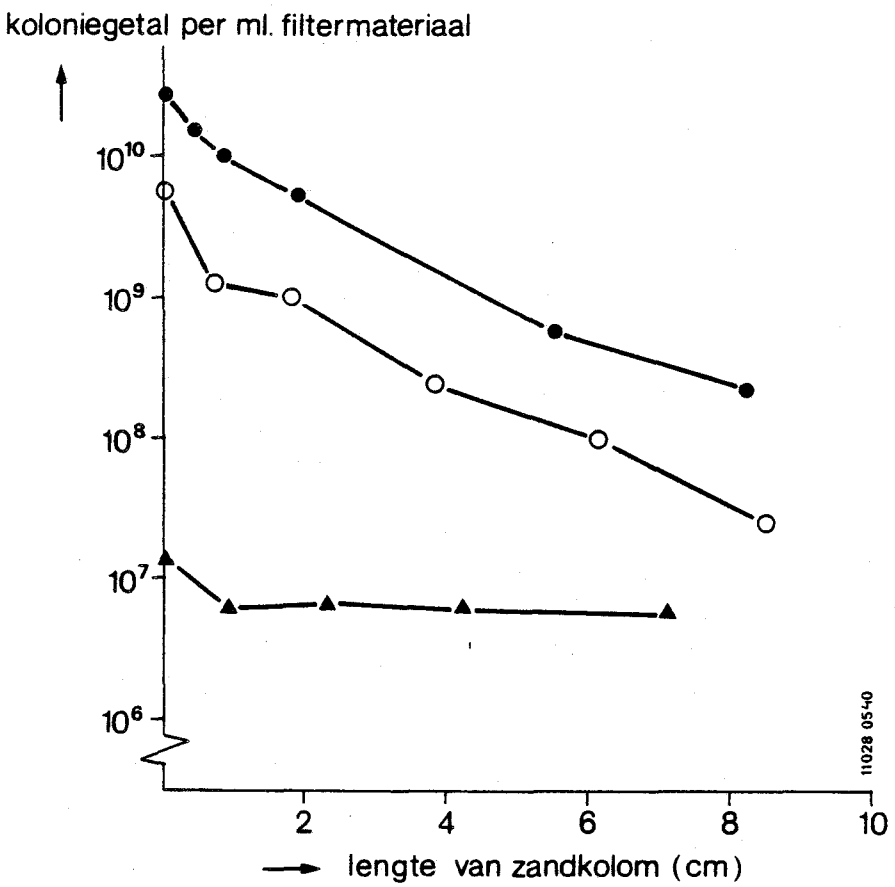
beperkingen van de koloniegetalbepalingen bijdragen aan dit verschil zijn: ook dode cellen worden bij microscopisch onderzoek meegeteld en niet alle bacteriën zijn te scheiden van het zand. Uit onderzoek van bodemmonsters is gebleken dat slechts 27 % van op medium kweekbare bacteriën na uitvoerige toepassing van mengen, centrifugeren en sonificatie van het materiaal kunnen worden losgemaakt (Balkwill et al, 1977).

Bij verstopping van filters door bacteriegroei wordt vaak slijmvorming geconstateerd. Dit materiaal kan bestaan uit het celmateriaal van de aanwezige biomassa (dood of levend), een combinatie van dit materiaal met verwijderde gesuspendeerde deeltjes en/of extra-cellulaire uitscheidingsprodukten van bacteriën. Mitchell en Nevo (1964) onderzochten de verstopping in filters met duinzand waardoor water werd gefiltreerd met een hoog organisch stofgehalte. De verstopping werd voornamelijk veroorzaakt door de vorming van polysacchariden door een bacterie van het geslacht Flavobacterium.
Twee organismen van dit geslacht werden beschreven door Van der Kooij en Hijnen (1981a en 1983b). De conclusie van dit onderzoek was dat de resultaten wezen op het algemeen voorkomen van micro-organismen die zetmeel in een concentratie van 1 μg C/l snel assimileren. Eén van beide organismen bleek zeer gespecialiseerd te zijn in het benutten van een aantal oligo- en polysacchariden en glycerol bij lage concentraties (1 μg C/l). Onbekend is nog de invloed van het gehalte en de samenstelling van de in het infiltratiewater aanwezige organische verbindingen op de vorming van polysacchariden onder de omstandigheden van persputinfiltratie.
Natuurlijke polymeren worden door bacteriën als ex-

tra-cellulaire produkten gevormd en kunnen dienen als bindende polymeren bij het hechtingsmechanisme (Harris and Mitchell, 1973). Deze polymeren kunnen bestaan uit polysacchariden. Duidelijk is dat noch bij de ATP-bepaling, noch bij de bepaling van het aantal levende cellen door middel van de koloniegetalbepaling met slijmvormende cellen rekening kan worden gehouden.

4.2 Het aantal bacteriën in relatie tot de ontstane weerstand

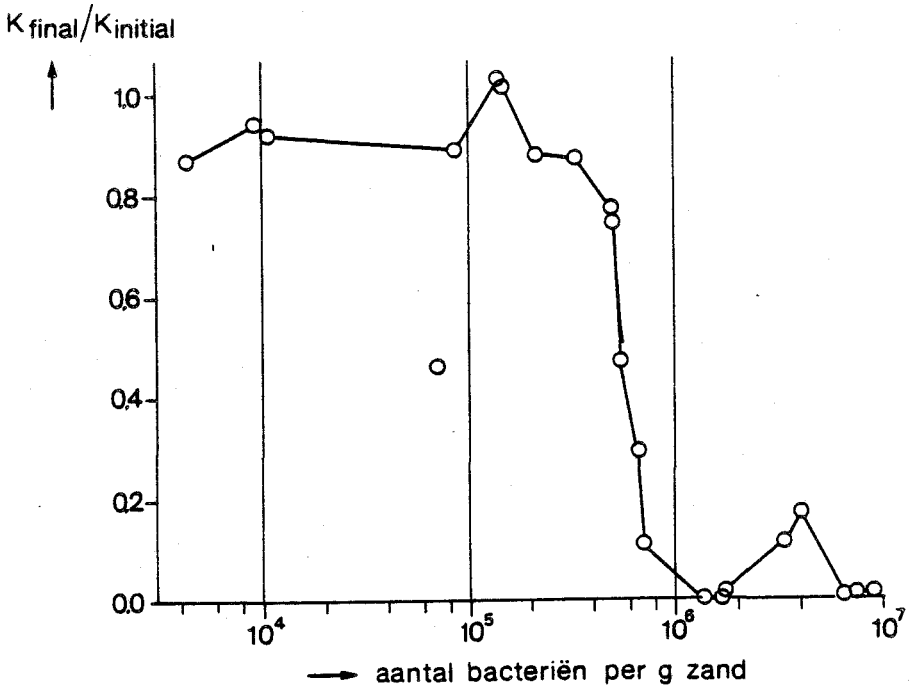
Van wezenlijk belang is de vraag in welke mate bacteriën, aanwezig in een zandpakket, aanleiding kunnen geven tot een weerstandsverhoging. Bij de reeds eerder genoemde laboratoriumexperimenten met een acetaatdosering aan het influent van proeffilters (tabel 1) werd het koloniegetal bepaald op diverse diepten van de 10 cm lange zandkolom. In figuur 2 is het aantal bacteriën per ml zand weergegeven als functie van de hoogte van de zandkolom. Hieruit blijkt duidelijk dat in alle gevallen het aantal bacteriën bovenin de zandkolom het hoogst is en bovendien dat, zoals reeds eerder werd gemeld, de bacteriebelading hoger is naarmate de AOC_b groter is. Bij de filters was de weerstand (cm wk) voornamelijk gesitueerd in de eerste cm.
Bij experimenten uitgevoerd met een zandkolom (korreldiameter 0,2 - 0,3 mm) en gekookt gedemineraliseerd water met een volume stroomdichtheid van 0,6 - 1,3 m/h werd verstopping waargenomen (Gupta and Swartzendruber, 1962). Over de eerste 1,5 cm van de zandkolom nam de volume stroomdichtheid sterk af. Daar bij dezelfde experimenten in aanwezigheid van 0,1 % fenol (toegevoegd als bacteriostatische verbinding) en bij een lage temperatuur



Figuur 2 - De bacteriebelading (koloniegetal/ml) van zand in filters van laboratoriumexperimenten met een AOC-belasting van 5,0 (•), 0,5 (o) en 0,05 (▲) g C per m^2 per h

(1,5 °C) geen weerstandstoename optrad, concludeerden Gupta en Swartzendruber dat de activiteit en de groei van bacteriën de oorzaak waren van de verstopping. De koloniegetallen van het filtermateriaal aan het oppervlak van het filter waren

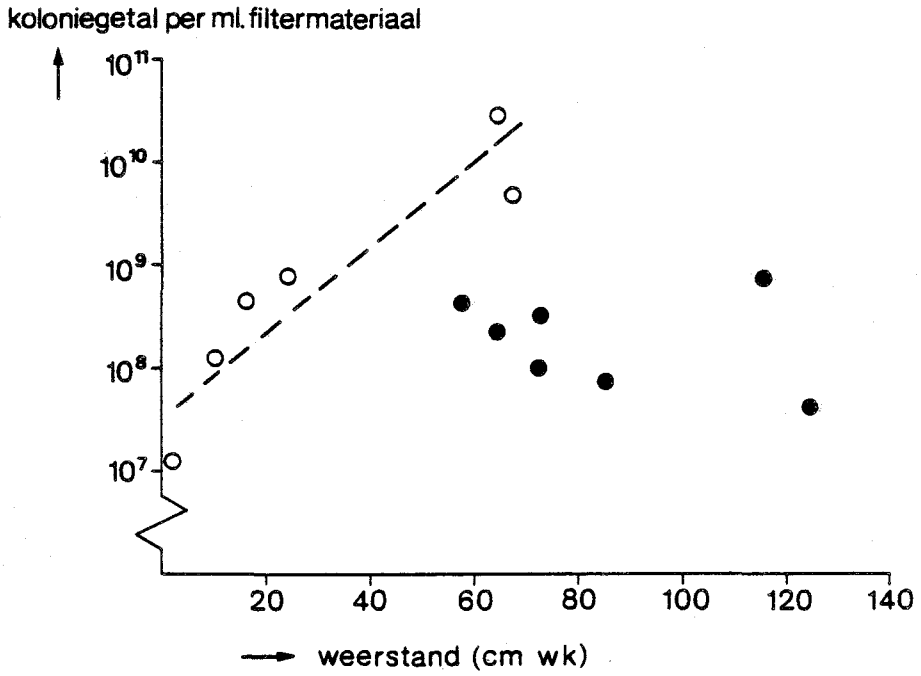
6,6 x 10^6 bij 23 °C en 6,4 x 10^5 per g zand bij 1,5 °C. In dit onderzoek werden de initiële volume stroomdichtheid (K.initial) en de volume stroomdichtheid na beëindiging van het experiment (K.final) bepaald op diverse hoogten van het filter. Het quotiënt van beide waarden (K.final/K.initial) is klein wanneer de stroomsnelheid door weerstandsvorming in de betreffende laag is ver-



Figuur 3 - Relatie tussen de verhouding van de volume stroomdichtheid van een filter aan het begin (K.initial) en het eind (K.final) van een experiment en het aantal bacteriën per g zand (Gupta and Swartzendruber, 1962)

laagd. Deze verhouding uitgezet tegen het koloniegetal van het filtermateriaal in een bepaalde sectie van het filter vertoonde een sterk dalende tendens boven een koloniegetal van 4 x 10^5 per g filtermateriaal (circa 6,4 x 10^5 per ml) (figuur 3).
Bij dit onderzoek kon geen relatie worden gelegd tussen het K.final/K.initial en de aanwezigheid van colloïdaal en oplosbaar silica in het zandfilter.
Gupta en Swartzendruber concludeerden dat een koloniegetal van 4 x 10^5 per g zand (kritische waarde voor het ontstaan van weerstand; figuur 3) slechts 0,00031 % van het totaal beschikbare volume inneemt en als volume dan ook niet bepalend kan zijn voor de verstopping. Duidelijk is dat ook hier de eerdergenoemde beperkingen van de koloniegetalbepalingen voor het vaststellen van de bacteriebelading van het zand gelden. Dat niet de meest optimale bepalingsmethodiek is toegepast blijkt uit het feit dat de bij dit onderzoek bepaalde bacteriebeladingen van het zand minstens een factor 100 lager zijn dan de in figuur 2 weergegeven waarden.

Om de verstoppingspotentie van het te infiltreren water bovengronds te kunnen onderzoeken zijn bij het KIWA zogenaamde meeloopfilters (MLF) ontwikkeld (Schippers en Verdouw, dit rapport). Deze filters werden gevoed met gedeeltelijk voorgezuiverd oppervlaktewater en de weerstandstoename werd onder diverse condities bestudeerd. De aantallen bacteriën op het zand aan het oppervlak van de filters werden gemeten na het bereiken van een bepaalde eindweerstand (cm waterkolom WK). Deze gegevens zijn samen met de resultaten van de laboratoriumexperimenten (tabel 1) weergegeven in figuur 4.
Uit figuur 4 blijkt dat de koloniegetallen in de bovenlaag van het zand bij de laboratoriumexperi-



Figuur 4 - Het verband tussen de gemeten eindweerstand en het koloniegetal in de bovenste laag van meeloopfilters (•) en van zandfilters van laboratoriumexperimenten (o)

menten hoger zijn bij een hogere eindweerstand. De gegevens van de meeloopfilters wijzen echter niet op een relatie tussen koloniegetallen en de eindweerstand. De koloniegetallen van het zand aan het oppervlak van de meeloopfilters bedroegen circa 10^8 CFU/ml zand. De aantallen bepaald in de door bacteriën verstopte laboratoriumfilters waren circa 10^{10} CFU/ml zand.
Bij een porositeit van 40 % heeft 1 cm^3 = 1 ml zand een leegvolume van 0,4 cm^3. Uitgaande van het volu-

me van 1 cel van 0,25 μm^3 heeft een aantal cellen van 10^8 een volume van 0,25 x 10^{-4} cm^3. Dit is slechts 0,00625 % van het beschikbare volume. Echter ook 10^{10}-cellen met een volume van 0,25 x 10^{-2} cm^3 bezetten slechts 0,625 % van het totale volume. Bij deze vergelijking tussen laboratoriumexperimenten en de proeven met de meeloopfilters (MLF) moet wel worden opgemerkt dat een aantal procesomstandigheden duidelijk verschilde. Belangrijk is het verschil in watersamenstelling. Bij de laboratoriumexperimenten werd acetaat aan het water gedoseerd om de verstopping te veroorzaken. Ook was de korreldiameter en de oppervlaktebelasting bij deze proeven respectievelijk 0,7 - 0,85 mm Ø en 5 $m^3/m^2.h$. Het zand van een MLF had een korreldiameter van 0,3 - 0,6 mm Ø en de oppervlaktebelasting was hier 2 $m^3/m^2.h$.

4.3 Aanwezigheid van bacteriën in het infiltratiewater

De koloniegetallen van het geïnfiltreerde water varieerden tussen enkele honderden en enkele tienduizenden per ml (tabel 2). Wanneer een bacterie een volume van 0,25 μm^3 heeft dan is een koloniegetal van 4,0 x 10^4 CFU/ml (PD; 31 -3, tabel 2) gelijk aan een volume van 2 x 10^{-8} m^3 per m^3 water. Een 1 cm dikke laag zand van de boorgatwand met een oppervlakte van 1 m^2 en een porositeit van 40 % heeft een leeg volume van 0,004 m^3. Bij een filtratiesnelheid van 1 m/h op de boorgatwand duurt het $\frac{0,004/1 \times 10^{-8}}{24}$ = 16666,7 dagen voordat het lege volume van deze laag is gevuld met de in het water aanwezige bacteriën bij volledige verwijdering. Gaan we echter uit van een 1 mm dikke laag waar de volledige verwijdering plaatsvindt en een koloniegetal van het water van 10^5 CFU/ml dan duurt dit

± 2 jaar. Uit de bovenstaande berekeningen blijkt vooralsnog dat het koloniegetal van het infiltratiewater geen belangrijke bijdrage kan leveren tot de weerstandsvorming. Ook voor deze koloniegetallen gelden echter de reeds eerder genoemde beperkingen. De aanvoer van draadvormige bacteriën bijvoorbeeld, die niet op de gebruikelijke media te bepalen zijn, kan van grote invloed zijn op de weerstandsvorming.

4.4 De rol van de temperatuur

Bij de groei van bacteriën is de temperatuur van groot belang. Een verhoging van de temperatuur binnen redelijke grenzen leidt in het algemeen tot een versnelde groei. De invloed van de temperatuursverhoging op de groeisnelheid kan voor een bepaald micro-organisme kwantitatief worden weergegeven door de Q_{10}, die wordt gedefinieerd als het quotiënt van de groeisnelheden van het organisme bij twee temperaturen die onderling 10 °C verschillen. Deze Q_{10}-waarde bedraagt bij temperaturen tussen 10 en 35 °C in de regel 1,5 à 2,5. Hoe de Q_{10}-waarde ligt tussen de 0 en 10 °C is niet duidelijk. Wel zal de groeisnelheid van de bacteriën in dit temperatuurstraject laag zijn.
De processen in de infiltratieputten verlopen bij de temperatuur van het voedingswater. Deze temperatuur ligt in de winter in de meeste gevallen beneden de 10 °C. In de zomer zullen de temperaturen variëren tussen 10 - 20 °C. In het voorjaar en het najaar treden de grootste temperatuurswijzigingen op. Zoals al eerder werd vermeld bleek uit praktijkexperimenten dat de temperatuurverhoging in het voorjaar een duidelijk effect had op de weerstandstoename van de infiltratieput. Alhoewel te verwachten valt dat dit onder andere veroorzaakt kan wor-

den door een verandering van de samenstelling van het infiltratiewater, mag ook de invloed van de temperatuur op de biologie in de put niet worden verwaarloosd.
Bij de in 4.2 genoemde meeloopfilterexperimenten werd de temperatuur van het voedingswater van één van de twee filters verhoogd tot 18 - 20 °C. De normale temperatuur van het voedingswater schommelde tussen 4 en 11 °C. Dit temperatuurverschil van circa 10 °C veroorzaakte een snellere weerstandstoename van het "warme" filter. Uit de koloniegetallen van het filtermateriaal kon echter niet de conclusie worden getrokken dat het aantal bacteriën bovenin de zandkolom bepalend was voor dit verschil. In twee van de 3 experimenten was het koloniegetal van het filtermateriaal bij het filter met voedingswater van 18 - 20 °C zelfs lager dan bij het "koude" filter. Ook uit de resultaten van tabel 1 blijkt niet dat een hogere temperatuur van het water een hogere bacteriebelading tot gevolg heeft. Onduidelijk is nog in hoeverre de biologie door deze waarneming als bepalende factor uitgesloten kan worden. Wellicht is niet het aantal, maar de verscheidenheid aan soorten of het verschil in fysiologische omstandigheden bepalend voor de mogelijkheid tot weerstandsvorming.

4.5 Interactie van bacteriën met in water aanwezige deeltjes en het filtermateriaal

Een belangrijke factor ten aanzien van verstopping is het gehalte aan gesuspendeerde of colloïdaal opgeloste deeltjes. Schippers en Verdouw (1979) hebben een methode ontwikkeld om de filtreerbaarheid van water te kunnen bepalen. Het principe van de membraanfiltratie-index (MFI) berust op het optre-

den van gelfiltratie bij filtratie van colloïdhoudend water door een membraanfilter met poriën van 0,45 µm. Deze meting wordt intensief toegepast bij het persputonderzoek. Rebhun en Schwarz maken bij hun persputexperimenten melding over het ontstaan van een "mat" van organisch materiaal door het afvangen van deze deeltjes. Al met al lijkt het aannemelijk dat het verstoppingsproces een complex van factoren kan omvatten. Het afvangen van gesuspendeerd materiaal en biologische activiteiten zullen echter gecombineerd of afzonderlijk van grote invloed zijn.
Ripley en Saleem (1973) voerden proeven uit met kwartszandfilters waardoor gedestilleerd water werd gefiltreerd met een snelheid van 0,5 - 1 m/h. Zij constateerden evenals Gupta en Swartzendruber (1962) een stagnatie in de weerstandsopbouw van een filter bij dosering van fenol in een concentratie van 0,1 % na een looptijd van 9 dagen. De weerstandsopbouw vond plaats in de bovenste centimeters van de kolom. Bij dosering van gesuspendeerde deeltjes in het water en weerstandsopbouw door bacteriegroei bij afwezigheid van fenol was het verstoppingspatroon anders dan het patroon bij verstopping door deeltjes. De weerstandsopbouw ten gevolge van de deeltjes in het water en biologische activiteit, vond meer bovenin plaats, terwijl bij verstopping door in water aanwezig gesuspendeerd materiaal de weerstand meer over de totale kolom optrad. Hier konden de deeltjes dieper in het zandpakket penetreren.
In een onderzoek naar de elektrokinetische processen in langzame zandfilters werd uit resultaten geconcludeerd dat door de activiteit van bacteriën en de gevormde metaboliten de lading aan de invoer van een filter positief werd (Edwards and Monke, 1967).

Bij aanwezigheid van 0,1 % fenol bleef de netto lading van het toegepaste kwartszand negatief. De positief gevormde lading in de toplaag zou kunnen worden verklaard door het hechtingsmechanisme van de bacteriën in een overwegend negatief geladen omgeving. De negatieve lading van de meeste bacteriën kunnen de positief gevormde lading door de aanwezigheid van micro-organismen in het filter gevoed met niet-fenolhoudend water, zoals beschreven door Edwards en Monke, niet verklaren.
De interactie van negatief geladen bacteriën met een vast oppervlak hangt waarschijnlijk af van de eigenschappen van het betreffende oppervlak. Omdat de meeste oppervlakken in de natuur negatief geladen zijn is het onwaarschijnlijk dat elektrostatische processen direct van invloed zijn op de aantrekking van bacteriën tot zulke oppervlakken.
Het hechtingsmechanisme van sommige bacteriën kan worden verklaard door de vorming van hele fijne extra-cellulaire polymeerfybrillen. De meeste biocolloïden, zoals micro-organismen, zijn hydrofiel en kunnen gedestabiliseerd worden door poly-elektrolyten en niet-ionogene polymeren bij het grensvlak tussen vaste en vloeibare fase. Dit kan resulteren in de reductie van de oppervlaktelading van het colloïd, terwijl aggregatie wordt veroorzaakt door de vorming van polymeerbruggen tussen de deeltjes.
Bacteriën kunnen op drie manieren reageren met de in het water aanwezige deeltjes:

1. adsorptie van colloïdaal materiaal op het oppervlak van micro-organismen;
2. wederzijdse adsorptie tussen bacteriën en deeltjes van vergelijkbare grootte, resulterend in een aggregaatvorming;
3. adsorptie van micro-organismen op een oppervlak van grote zanddeeltjes en hun destabiliserende

werking op in het water aanwezige colloïden.

Er zal nader onderzoek nodig zijn om het proces van de interactie tussen bacteriën en deeltjes te kunnen beschrijven en beheerscondities aan te kunnen geven die van invloed zijn op dit proces.

5 CONCLUSIES EN AANBEVELINGEN VOOR VERDER ONDERZOEK

Uit een aantal experimenten met persputten en zandfilters onder geconditioneerde omstandigheden is vast komen te staan dat biologische processen een rol van betekenis kunnen spelen bij het verstoppen van persputten en zandfilters. Echter de verzamelde kennis blijkt nog onvoldoende om eenduidige conclusies te trekken ten aanzien van het verstoppingsproces en de daarmee in verband staande waterkwaliteit. De resultaten wijzen op een verband tussen de AOC-belasting van filtermateriaal en de aanwezige biomassa, maar meer onderzoek onder geconditioneerde omstandigheden is nodig om dit verder te onderbouwen. Ook blijkt uit de resultaten van de experimenten dat de bacteriebelading van de bovenste laag van een zandfilter bepaald door middel van de koloniegetallen niet altijd in direct verband met de ontstane weerstand staat.
Naast het meten van de AOC-belasting van diverse persputsystemen in de praktijk zal er met een meeloopfilteropstelling onder geconditioneerde omstandigheden vastgesteld moeten worden bij welke AOC-belasting er weerstandsvorming ten gevolge van bacteriegroei optreedt. Tevens zal er bij de laatstgenoemde experimenten nagegaan worden welke relatie er bestaat tussen het aantal bacteriën of de biomassa en de ontstane weerstand.
De bepalingsmethodiek van de biomassa staat in dit

verband ter discussie en zal verder ontwikkeld moeten worden. Alternatieven voor de gebruikelijke koloniegetalbepaling op vaste voedingsmedia zijn de bepaling van het ATP-gehalte en mogelijk het totaalgehalte organische koolstof per gewichts- of volume-eenheid materiaal. Van deze methodieken zal vastgesteld moeten worden in hoeverre ze een betere maat zijn voor de aanwezige biomassa. Eveneens zal uit onderzoek moeten blijken of het volume van de biomassa bij de weerstandsverhoging van belang is of de fysiologische omstandigheden.
Uit persputexperimenten in de praktijk blijkt dat ook de temperatuur een rol speelt. In hoeverre dit in verband staat met de veranderde waterkwaliteit door een temperatuursverhoging en/of een hogere bioactiviteit is nog onduidelijk. Het aantal bacteriën in de toplaag van filters, gevoed met water van verschillende temperatuur, is uit de in dit rapport besproken resultaten niet een aanwijzing van belang gebleken.
Aangezien de procesomstandigheden als de volume stroomdichtheid, het type filtermateriaal en de temperatuur van invloed kunnen zijn op de verstopping door bacteriegroei, wordt er aan deze aspecten in de experimenten onder geconditioneerde omstandigheden ook aandacht besteed.
Algemeen kan worden gesteld dat nader onderzoek noodzakelijk is om vast te stellen onder welke omstandigheden bacteriën een rol spelen bij het verstoppen van persputten.

6 LITERATUURLIJST

Balkwill, D.L., Rucinsky, T.E. en Casida, L.E. 1977. Release of micro-organisms from soil with respect to transmission electron microscopy viewing and plate counts. Antonie van Leeuwenhoek, 43: 73-87.

Beck, Th. (1968). Microbiologie des Bodens. Bayerischer Landwirtschaftsverlag, München.

Eren, J. and Goldsmid, Y. 1970. Sanitary significance of coliform bacteria in recharge wells. Artificial groundwater recharge conference, Reading. September 21-24, 1970.

Ehrlich, G.G., Ehlke, Th.A. and Vecchioli, J. 1973. Microbiological aspects of groundwater recharge injection of purified unchlorinated sewage effluent at Bay Park, Long Island, New York. J. Res. U.S. Geol. Survey, 1: p. 341-344.

Edwards, P.M. and Monke, E.J. 1967. Electrokinetic studies of slow sand filtration process. J. Am. Waterworks Assoc., 59: 1310-1319.

Gupta, R.P. and Swartzendruber, D. 1962. Flow associated reduction in the hydraulic conductivity of quartz sand. Soil Sci. Soc. Am. Pro., 26: 5-10.

Harris, R.H. and Mitchell, R. 1973. The role of polymers in microbial aggregation. Ann. Rev. Microbiol. 27: 27-50.

Kool, H.J., 1976. The use of Adenosine Triphosphate (ATP) as an indicator of biological activity and biomass in ecological studies. Hydrobiol. Bull. 3: 145-154.

Mitchell, R. and Nevo, Z. 1964. Effect of bacterial polysaccharide accumulation on infiltration of water through sand. Appl. Microbiol. 12: 219-223.

Olsthoorn, T.N. 1982. Verstopping van persputten. KIWA-mededeling nr. 71.

Rebhun, M. and Schwarz, J. 1968. Clogging and contamination processes in recharge wells. Wat. Res. 4: p. 1207-1217.

Ripley, D.P. and Saleem, Z.A. 1973. Clogging in simulated glacial aquifers due to artificial recharge. Wat. Res. 9: 1047-1057.

Schippers, J.C. en Verdouw, J. 1979. De membraanfiltratie-index als kenmerk voor de filtreerbaarheid van water. H_2O 12: 104-109.

Tuschewitzki, G.J.; Werner, P. und Nott, W. 1983. Biologische Besiedlung und mineralische Ablagerungen auf Filtermaterialien zur Trinkwasserbereitung. GWF-wasser/abwasser; 124 H.11: 521-526.

Vecchiolli, J. 1970. A note on bacterial growth around a recharge well at Bay Park, Long Island, New York. Wat. Res. 6: 1415-1419.

Van der Kooij, D. 1979. Ontwikkeling van een methode om de nagroeimogelijkheid van bacteriën in drinkwater te bepalen. H_2O 12: 164-166.

Van der Kooij, D., Visser, A. and Hijnen, W.A.M. 1980. Growth of Aeromonas hydrophila at low concentrations of substrates added to tap water. Appl. Environ. Microbiol. 39: 198-1204.

Van der Kooij, D. and Hijnen, W.A.M. 1981a. Utilization of low concentrations of starch by a Flavobacterium species isolated from tap water.
Appl. Environ. Microbiol. 45: 804-810.

Van der Kooij, D., Hijnen, W.A.M. en Oranje, J.P. 1981b. Vermeerdering van bacteriën in drinkwater. H_2O 14: 317-322.

Van der Kooij, D.; Visser, A. and Hijnen, W.A.M. 1982. Determining the concentration of easily assimilable organic carbon in drinking water. J. Am. Water Works Assoc. 74: 540-545.

Van der Kooij, D. en Hijnen, W.A.M. 1983a. Verwijdering van organische stoffen door micro-organismen bij filtratie. H_2O 13: 306-311.

Van der Kooij, D. and Hijnen, W.A.M. 1983b. Nutritional versatility of a starch-utilizing Flavobacterium at low substrate concentrations. Appl. Environ. Microbiol. 45: 804-810.

Wong Chong, G.M. and Loehr, R.C., 1975. The kinetics of microbiol. nitrification. Water Res. 9: 1099.

Nieuwegein, juni 1984

HET INFILTRATIEPROJECT BIJ HET POMPSTATION "HAREN"

J.W. Kieft
Gemeentelijk Waterbedrijf Groningen

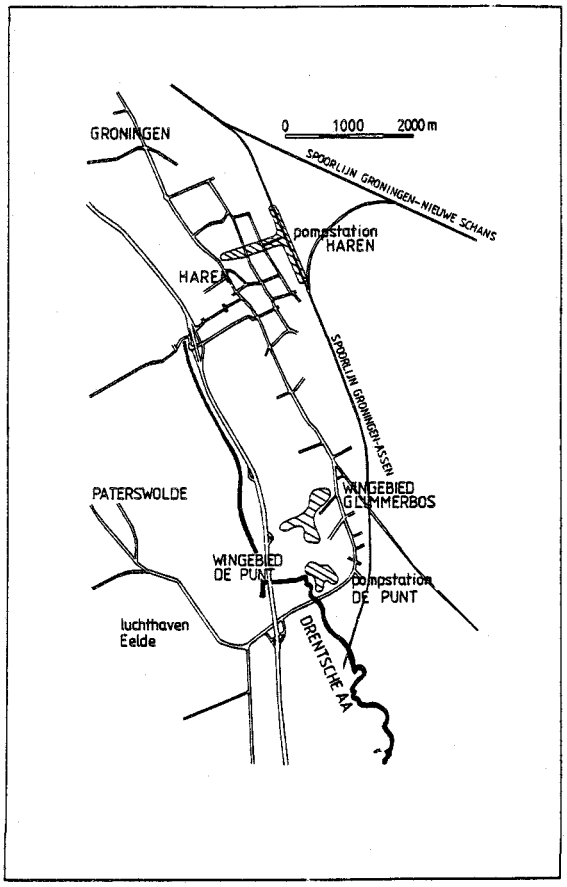
SAMENVATTING

Voor de bereiding van drinkwater wordt door het Gemeentelijk Waterbedrijf Groningen (GWG) gebruik gemaakt van zowel grondwater als oppervlaktewater.
In verband met het afvoerpatroon van de Drentsche Aa is bij een bepaalde potentiële grootte van het drinkwaterverbruik een voorraadvorming nodig. Door een relatief geringe berging en/of een combinatie met een grondwaterwinning kan het oppervlaktewater in belangrijk grotere mate worden ingeschakeld bij de drinkwatervoorziening. Deze berging zou kunnen worden gerealiseerd door in een geschikt watervoerend pakket, met behulp van putten, brak water te verdringen door zoet oppervlaktewater.
In verband met de aanwezigheid van afsluitende potkleilagen boven het watervoerende pakket is pompstation Haren uitgekozen als locatie voor het eerste infiltratieproject. Op grond van het tot nu toe uitgevoerde verstoppingsonderzoek mag worden verwacht dat, bij de betreffende omstandigheden, verstopping geen belemmerende factor zal zijn.
Uit het hydrologisch onderzoek is gebleken dat terugwinning op seizoenbasis van een gedeelte van het geïnfiltreerde water met de bestaande infiltratieput zonder snelle verzilting in principe mogelijk is.

1 INLEIDING EN MOTIVERING

Voor de bereiding van drinkwater wordt door het Gemeentelijk Waterbedrijf Groningen gebruik gemaakt

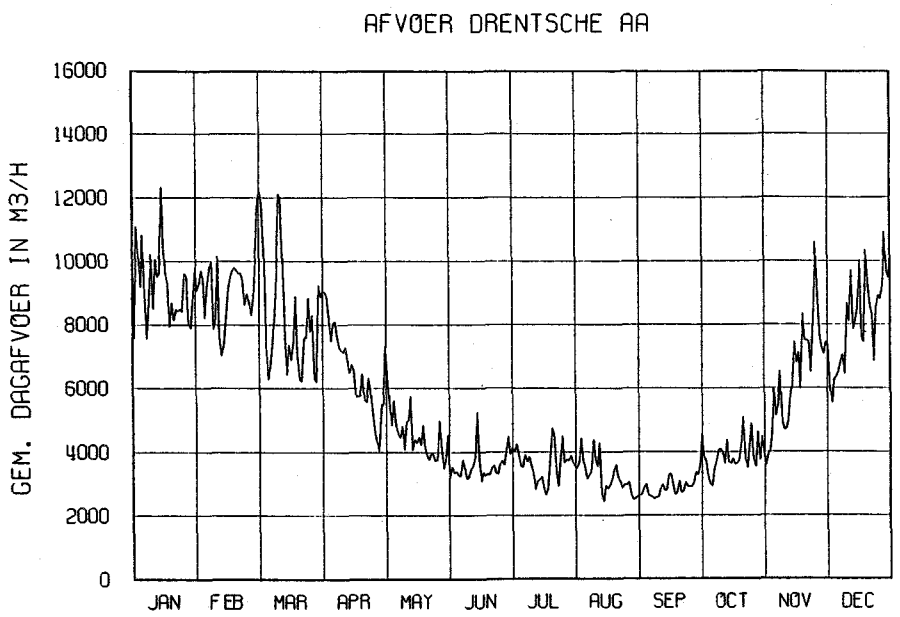
van zowel grondwater ps De Punt (ps = pompstation) en ps Haren met vergunningen van 13 respectievelijk 2 mln m^3/jaar) als oppervlaktewater (huidige onttrekking aan de Drentsche Aa bij het ps De Punt is circa 5 mln m3/jaar). Een topografische oriëntatie wordt gegeven in figuur 1.



Figuur 1 - Topografische oriëntatie

Een waterleidingbedrijf behoort inzicht te hebben in de potentiële winningsmogelijkheden van water in zijn interessegebied. In de regio Groningen-Noord Drenthe wordt de ontwikkeling van een nieuwe grondwaterwinning, in verband met de grote bestaande winningen, de belangen van de landbouw, de natuur en het milieu en een waar mijnenveld van bodemverontreinigingen, steeds moeizamer. Uitbreiding van

de oppervlaktewaterwinning is daarentegen goed mogelijk. De afvoer van de Drentsche Aa, bijvoorbeeld, bedraagt gemiddeld circa 50 mln m^3/jaar. In verband met het afvoerpatroon van de Drentsche Aa (gemiddeld circa 9000 m^3/h in het winterseizoen en circa 2000 m^3/h in het zomerseizoen) zie figuur 2,



Figuur 2 - Afvoer (in m^3/h) per kalenderdag gemiddeld over 1977-1982

is echter bij een bepaalde potentiële grootte van het drinkwaterverbruik een alternatieve bron of een voorraadvorming nodig. Zodoende kan het oppervlaktewater in belangrijk grotere mate bijdragen aan de drinkwatervoorziening. In Noord-Nederland is het planologisch minder gewenst een spaarbekken voor

een bovengrondse voorraadvorming toe te passen. Een substantiële berging in de onverzadigde zone is niet mogelijk omdat er in deze regio nergens gebieden zijn met lage freatische grondwaterstanden.
Een ondergrondse voorraad kan wel (in het winterseizoen) worden gevormd door, in een watervoerend pakket met behulp van putten, brak water te verdringen door gezuiverd oppervlaktewater. In het daarop volgende zomerseizoen moet dan, ter suppletie van een ontoereikende rivierafvoer, zonder snelle verzilting, water aan het betreffende watervoerende pakket, kunnen worden onttrokken.
Een relatief hoge freatische grondwaterspiegel is ongeschikt voor de uitvoering van een putinfiltratie. Omdat door de putinfiltratie de grondwaterstand zal moeten stijgen, is het gebied van het pompstation Haren, waar zich een dikke potkleilaag boven het watervoerend pakket bevindt, uitgekozen als locatie voor het infiltratieproject. Om in de proefperiode de aanleg van een aparte ruwwaterleiding van het ps De Punt naar het ps Haren (lengte circa 6 km) te voorkomen, wordt het drinkwater van het ps De Punt, dat gemiddeld circa 40 % rivierwater bevat, gebruikt om in Haren te worden geïnfiltreerd. In dit verband wordt erop gewezen dat in het infiltratieseizoen de zuiveringsmiddelen en het transportstelsel een overcapaciteit hebben.
Allereerst moet echter, in verband met een mogelijke verstopping van de infiltratieput, worden nagegaan of infiltratie wel mogelijk is. Het daartoe ingestelde verstoppingsonderzoek wordt in paragraaf 2 beschreven. Vervolgens wordt in paragraaf 3 aandacht gegeven aan enkele hydrologische aspecten. In lit. 1, 2 en 3 wordt uitgebreider over het infiltratieproject bij het pompstation Haren gerapporteerd.

2 HET VERSTOPPINGSONDERZOEK

De doelstelling van deze infiltratieproef is onder andere het verstoppingsgedrag van het infiltratiewater in de gebruikte infiltratieput bij bepaalde omstandigheden te leren kennen. Bij dit onderzoek wordt voortdurend gebruik gemaakt van de inzichten en resultaten van het Nederlandse verstoppingsonderzoek dat in KIWA-verband wordt uitgevoerd. Een Een overzicht van de Groningse proefnemingen en van relevante gebeurtenissen wordt hieronder in chronologische volgorde gegeven.

Proef 1

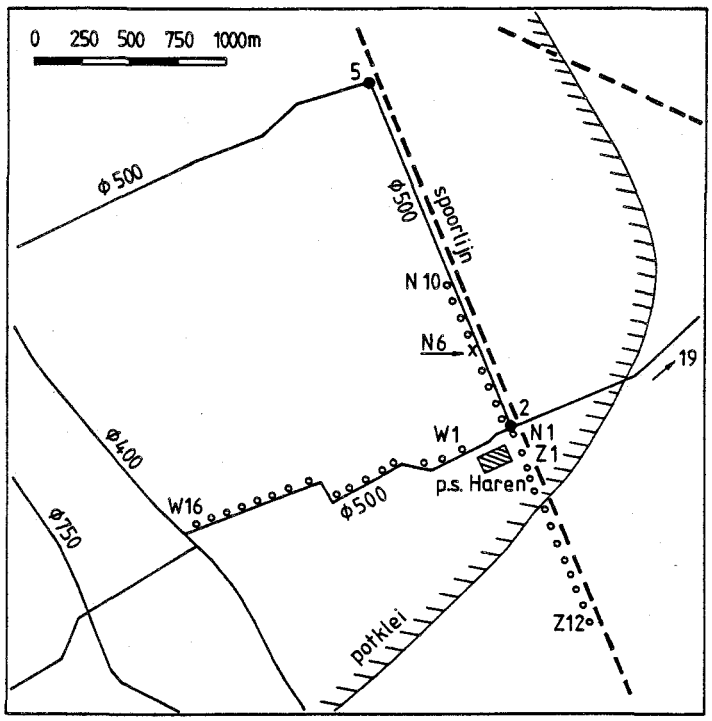
21 september 1979	- start 1e infiltratieproef met circa 20 m^3/h drinkwater van ps De Punt
april/mei 1980	- spuien Ø 1000 Haren-Euvelgunne (2-19) (figuur 3)
10 juli 1980	- leiding Ø 1000 (2-19) in dienst
mei/juli 1981	- werkzaamheden leidingen Europaplein
14 juni 1982	- einde 1e infiltratieproef vanwege verstopping
14 juni 1982	- regeneratie
14 juni/5 juli	- rustperiode

Proef 2

6 juli 1982	- start 2e infiltratieproef met circa 30 m^3/h drinkwater van ps De Punt
8 september 1982	- einde 2e infiltratieproef
8 september 1982	- start terugwinning (30 m^3/h)

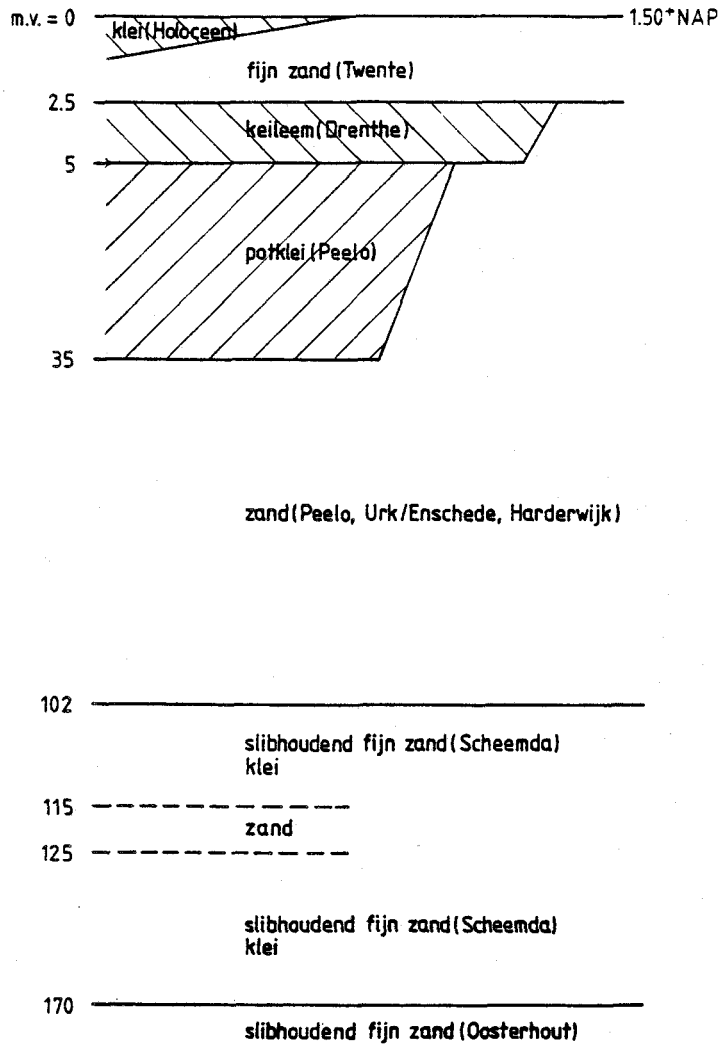
2.1 Uitvoering van de putinfiltratie

Een overzicht van het pompstation Haren wordt gegeven in figuur 3.



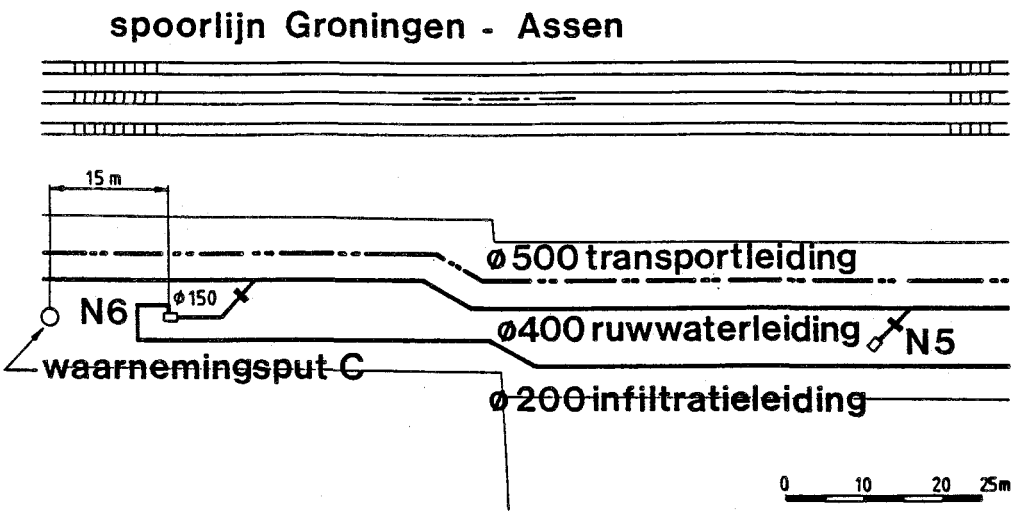
Figuur 3 - Overzicht pompstation Haren

Nadere gegevens omtrent de geologische opbouw van de ondergrond staan vermeld in lit. 4 en lit. 5. Een geohydrologisch schema van de ondergrond van ps Haren is in figuur 4 weergegeven.

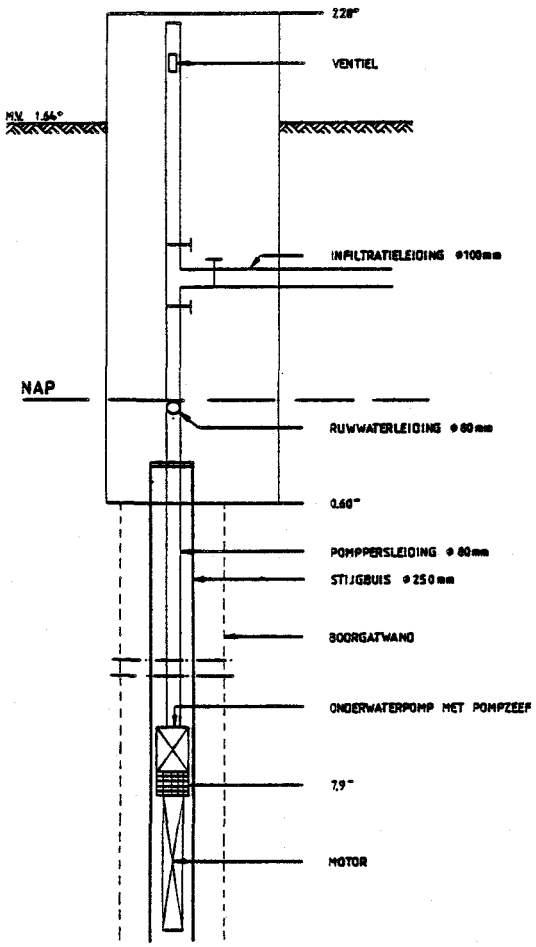


Figuur 4 - Geohydrologisch schema van de ondergrond

In verband met de kosten is voor de infiltratie gebruik gemaakt van de bestaande winningsput N6. Deze put ligt royaal in het potkleigebied en is niet onnodig ver verwijderd van het pompstation (zo kort mogelijke lengte van de leidingen). De situatie van de infiltratieput N6 met zijn aan- en afvoerleidingen is in figuur 5 aangegeven. Een detail van de put is in figuur 6 opgenomen.

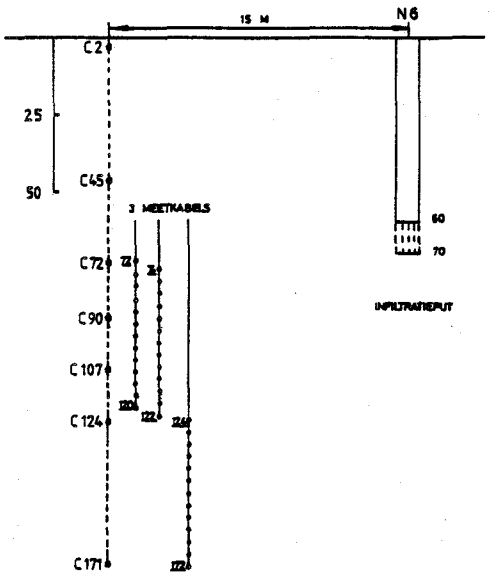


Figuur 5 - Situatie en leidingen infiltratieput



Figuur 6 - Schets verticale doorsnede infiltratie-
put

Voor het uitvoeren van metingen voor de verstopping van de infiltratieput en voor de verbreiding van het infiltratiewater, is op 15 m afstand van N6 een waarnemingsput geplaatst met 7 peilbuizen en met 3 elektrodenkabels (zie figuur 7).



Figuur 7 - Schets infiltratieput en waarnemingsinstallatie

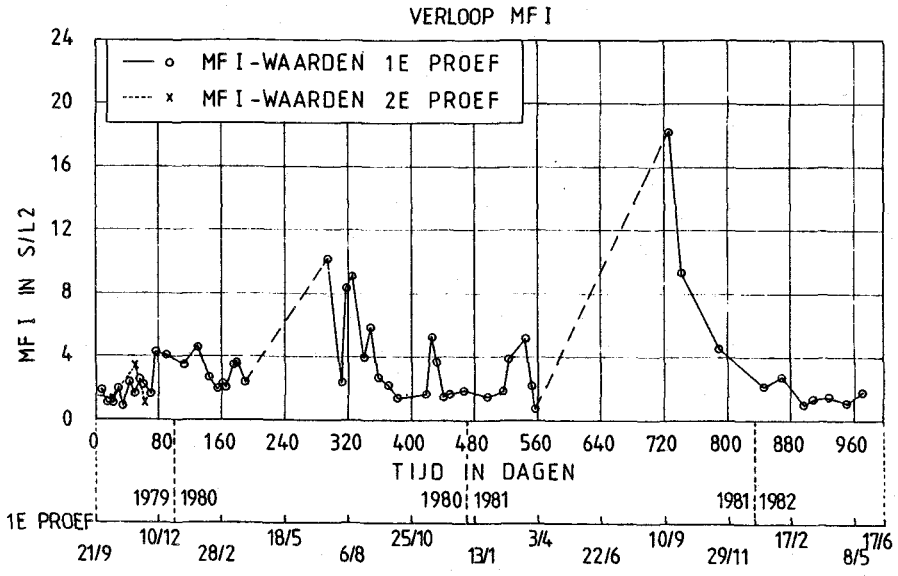
2.2 Kwaliteit van het infiltratiewater

Het infiltratiewater is regelmatig bemonsterd en geanalyseerd. Voor een juiste interpretatie wordt er op geattendeerd dat op 10 juli 1980 de situatie ontstond dat afwisselend water afkomstig van ps De Punt en van ps Haren werd geïnfiltreerd.
De zuivering van het grondwater bestaat in hoofdzaak uit beluchting en snelfiltratie. De zuivering van oppervlaktewater omvat onder andere coagulatie en bezinking, snelfiltratie, beluchting en langzame zandfiltratie. De gemiddelde kwaliteit van het infiltratiewater is aangegeven in tabel 1.

	eerste proef			tweede proef		
	gemid-delde	stand. afw.	aan-tal	gemid-delde	stand. afw.	aan-tal
troebelheid FTE	0,31	0,12	33	0,11	0,01	4
temperatuur °C	10,9	2,6	26	14,1	1,0	4
pH -	7,87	0,11	35	7,97	0,04	5
geleiding mS/m (20 °C)	40,5	4,4	35	38	1,2	5
chloride	45,0	8,2	35	44	6	5
sulfaat	20,8	7,5	34	23,5	3	4
calcium	62,0	4,4	34	64,4	4,2	5
magnesium	5,8	1,3	35	5,96	0,17	5
natrium	24,3	3,8	34	26,2	2,8	5
kalium	2,8	0,5	34	2,3	0,25	5
totale hardheid mmol/l	1,8	0,1	34	1,85	0,10	5
zuurstof	10,4	0,7	29	9,7	0,05	3
waterstofcarbonaat	177	15	35	182	2,5	5
kalkverzadig-index Δ pH	0,01	0,2	12	0,28	0,08	5
nitraat	3,8	1,9	28	3,2	0,4	4
kalium perm. verbr.	8,6	2,6	26	7,1	0,6	2
TOC	3,3	0,7	10	4,1	-	1
ijzer	0,03	0,02	30	0,005	0,005	4
totaal opgeloste zouten	342	25	31	354	9,4	5

Tabel 1 - Gemiddelde kwaliteit infiltratiewater (uitgedrukt in mg/l tenzij anders aangegeven)

De MFI-waarden van het onderhavige infiltratiewater zijn in figuur 8 grafisch weergegeven.



Figuur 8 - Grafiek van MFI-waarden 1e en 2e proef

Hieronder volgen de gemiddelde MFI-waarden van de samenstellende delen van het infiltratiewater.
MFI van gezuiverd oppervlaktewater 1 s/l^2
MFI van gezuiverd grondwater 3 s/l^2
Hieruit blijkt dat infiltratiewater afkomstig uit oppervlaktewater een lage MFI heeft. Dit is een effect van het langzame zandfilter in het (in lit. 1 beschreven) zuiveringsproces.
Indien de putverstopping wordt veroorzaakt door micro-organismen geven bepalingen aan zwevende stof hierover uiteraard geen informatie. Ook het aantal bacteriën in het infiltratiewater is hiervoor nauwelijks belangrijk. De bacteriologische verstopping wordt bepaald door de betreffende voedingsstoffen in het infiltratiewater. Een kwaliteitsgrootheid die informatie geeft over de potentiële groei van micro-organismen is de AOC, assimileerbare organi-

sche koolstof (zie lit. 7). Op 14 april 1982 is voor het infiltratiewater en zijn componenten afzonderlijk de AOC bepaald.

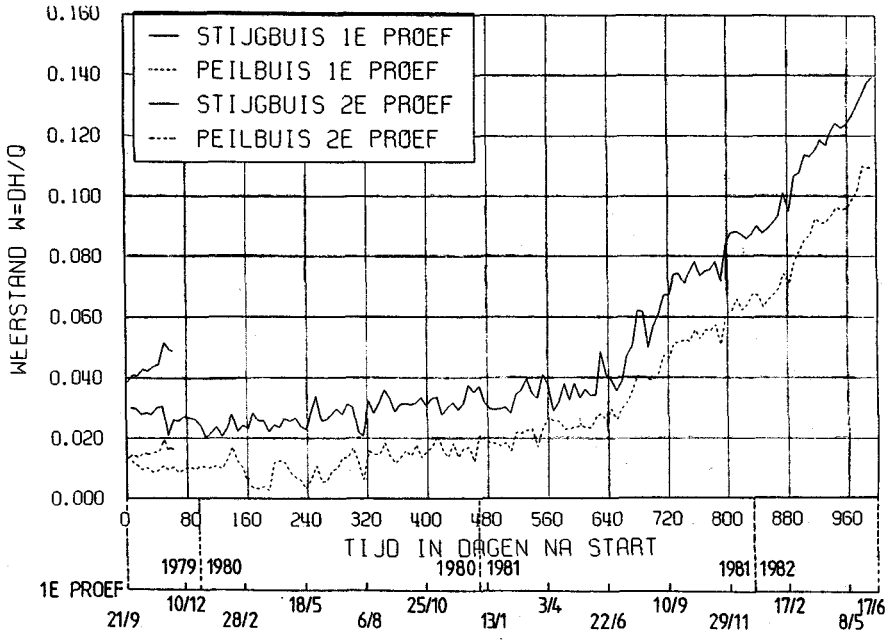
infiltratiewater	6	µg Acetaat C eq/l
oppervlaktewater De Punt	7	µg Acetaat C eq/l
grondwater De Punt	1	µg Acetaat C eq/l
grondwater Haren	0,5	µg Acetaat C eq/l

Dit zijn zodanige lage getallen dat moet worden gesteld dat micro-organismen niet in beduidende mate tot ontwikkeling kunnen komen.

2.3 Metingen voor de verstopping

Om de verstopping van een infiltratieput te bepalen worden voortdurend grondwaterstanden gemeten om de veranderingen ervan te kunnen vastleggen. Veranderingen van grondwaterstanden kunnen echter meerdere oorzaken hebben zoals variaties in luchtdruk, de infiltratievolumestroom, de winning van het grondwater en de temperatuur van het stromende water. Tevens moet rekening worden gehouden met de dichtheid van de vloeistof in de stijgbuis. Deze invloeden moeten om een juist beeld van de verstopping te krijgen worden geëlimineerd.
Als maat voor de verstopping van de onderhavige proef wordt het weerstandsverschil Δh tussen de infiltratieput (N6, peilbuis en stijgbuis) en het waarnemingsfilter (C72, zie figuur 7) gehanteerd. Hierdoor worden de invloeden van de luchtdruk en de winning van grondwater geëlimineerd. De grondwaterstanden van N6 en C72 behoeven niet op dichtheid te worden gecorrigeerd, daar de afwijking van de respectieve dichtheden ten opzichte van zoet water kan worden verwaarloosd. Indien de temperatuur van het

infiltratiewater verandert, zal daardoor de viscositeit van het water veranderen. Het is daarom noodzakelijk de verandering van de viscositeit in rekening te brengen. Hiervoor is de factor (T + 20)/30 toegepast. Zie lit. 6. Deze aldus op temperatuur (viscositeit) gecorrigeerde waterstandsverschillen zijn voor verdere verwerking gebruikt. De variatie in de infiltratievolumestroom kan in rekening worden gebracht door de grootheid weerstand te gebruiken (waterstandsverschil per eenheid van volumestroom) $W = \Delta h/Q$ in $m/(m^3/h)$.
De na de correcties waargenomen veranderingen in W worden geacht het echte effect van de verstopping te zijn. Het verloop van de weerstand W is grafisch weergegeven in figuur 9.



Figuur 9 - Verloop van de weerstand W van de 1e en 2e proef in $m/(m^3/h)$

2.4 Regeneratie infiltratieput N6

Op 14 juni 1982 werd de onderhavige infiltratieput geregenereerd met gebruikmaking van de methode van herhaald pompen en infiltreren (zie lit. 6). Na deze regeneratie bleek het waterstandsverschil Δh = N6-C72 tijdens een nieuwe infiltratieperiode sterk te zijn verminderd vergeleken met de Δh van de infiltratie voor de regeneratie.
Bij het begin van de 1e infiltratieproef bedraagt de weerstand tussen de infiltratieput N6 en de peilbuis C72 W = 0,0301 m/(m^3/h). Aan het einde van deze proef is deze weerstand door het verstoppingsproces opgelopen tot 0,1394 m/(m^3/h). Het verschil tussen deze waarden - de verstopping - bedraagt 0,1093 m/(m^3/h). Deze waarde voor de opgetreden verstopping wordt op 100 % gesteld. Bij het begin van de 2e infiltratieproef bedraagt de weerstand 0,0384 m/(m^3/h). Van de verstopping is dus 0,1010 m/(m^3/h) verwijderd dat is
0,1010/0,1093 x 100 % = 92,4 %.
Direct na de mechanische regeneratie is de weerstand niet voldoende nauwkeurig bepaald vanwege het niet exact bekend zijn van het nieuwe infiltratiedebiet. Hierdoor moest van de gegevens van de 2e infiltratieproef worden gebruik gemaakt. De gevonden waarde is zodoende het resultaat van zowel de mechanische regeneratie als het eventuele effect van de rustperiode. In deze rustperiode kunnen eventuele bacteriën zijn afgestorven en kan organisch materiaal zijn afgebroken.

2.5 Tweede verstoppingsproef

Vanaf 6 juli tot 8 september 1982 werd een nieuwe verstoppingsproef uitgevoerd met een zo groot moge-

lijke volumestroom. Door de gekozen wijze van watertoevoer via de onderwaterpomp bleek de maximale volumestroom slechts circa 28 m^3/h te zijn. Het infiltratiewater was, door enkele leidingtechnische ingrepen en aanpassingen uitsluitend afkomstig van ps De Punt. De gemiddelde kwaliteit van het infiltratiewater is samengevat in tabel 1. In de infiltratieperiode zijn slechts enkele MFI-bepalingen uitgevoerd. In figuur 8 zijn de MFI-waarden van de 2e proef samen met die van de 1e proef grafisch weergegeven. Een bepaling van het Assimileerbaar Organisch Koolstof gehalte AOC is achterwege gebleven. In figuur 9 is het verloop van de weerstand van de 2e proef samen met dat van de 1e proef weergegeven.

2.6 Uitvoering van het onderzoek naar het verstoppingsmateriaal

Het is vaak moeilijk om éénduidig aan te geven wat de oorzaak van een putverstopping is. Het is daarom van groot belang veel gegevens van het verstoppingsmateriaal te verzamelen. Uit de gegevens van de waterstanden blijkt dat de verstopping zich voornamelijk op de overgang van de omstorting en de formatie bevindt. Zie figuur 9.
Tijdens het terugpompen van de infiltratieput op 14 juni 1982 werden van het teruggepompte water een aantal parameters - te weten troebelheid en pH - continu geregistreerd. Verder werd het teruggepompte water op meerdere tijdstippen bemonsterd. Het eerste monster moet op een zodanig moment worden genomen dat informatie wordt verkregen over het verstoppingsmateriaal dat zich op de overgang van omstorting-formatie bevindt. Het eerste monster kan dus pas worden genomen nadat het water in de stijg-

buis en een gedeelte van het water in het filter en de omstorting het monsterpunt is gepasseerd. Uit het verloop van de troebelheid is gebleken dat binnen enkele minuten zich een zeer snelle afname van de troebelheid voordoet. Het eerste monster moet niet te vroeg, maar ook niet te laat worden genomen. Aangezien de opbrengst van de pomp niet nauwkeurig bekend is kunnen bij deze bemonstering gemakkelijk fouten worden gemaakt.
In totaal werden 8 monsters genomen en op fysische, chemische en bacteriologische hoedanigheid onderzocht. Enkele resultaten hiervan staan vermeld in tabel 2.
Daarnaast werden de vaste deeltjes uit een drietal watermonsters door de Technische en Fysische Dienst voor de Landbouw (TFDL) te Wageningen onderworpen aan een röntgen micro-analyse. Een opname met de rasterelektronenmicroscoop is echter achterwege gebleven. Uit het uitgevoerde onderzoek is gebleken dat de monsters weinig vaste deeltjes bevatten. Bij de aanwezige vaste deeltjes wordt Ca aangetroffen en in mindere mate Cl en S. Bij de aanwezigheid van het goed in water oplosbare Cl zal vermoedelijk moeten worden gedacht aan het drogen van het membraanfilter. Waarschijnlijk geldt dit evenzeer voor S (Olsthoorn, R-PP 78-5) en mogelijk ook voor Ca.
Op 8 september 1982 werd de 2e infiltratieproef beeindigd. Tevens werd op die dag met het terugpompen begonnen. Hierbij werden, evenals bij de regeneratie op 14 juni 1982 enkele grootheden continu geregistreerd en werden tevens op meerdere tijdstippen monsters genomen. Enkele resultaten van het fyisch, chemisch, bacteriologisch onderzoek zijn vermeld in tabel 2.
In januari 1983 zijn 2 filters (0,45 μm) met daarop materiaal afkomstig van de bepaling van de hoeveel-

monster		1e proef				2e proef			
		1	2	3	4	A	B	C	D
troebelheid	FTE	0,72	0,22	0,11	0,09	0,35	0,11	0,10	0,08
temperatuur	°C	-	-	14	14	14	14	14	-
pH	-	7,89	7,91	7,89	7,89	8,01	7,99	7,96	7,91
geleiding	mS/m (20 °C)	39	39,5	39	39	36	37	40	39
chloride		51	46	45	42	38	36	39	45
sulfaat		16	8,2	10	14	23	25	26	29
silicium		-	-	-	-	15,4	15,8	16,2	16,4
calcium		65	60	62	64	59	63	58	60
magnesium		6,1	6,1	6,1	6,2	5,6	5,7	5,8	5,7
natrium		25	25	24	23	21	21	21	24
kalium		2,2	2,2	2,1	2,1	2,7	2,5	2,6	2,6
aluminium		-	-	-	-	0,00	0,00	0,00	0,00
totale hardheid		1,92	1,80	1,84	1,92	1,71	1,81	1,69	1,73
zuurstof		8,9	9,0	8,7	8,3	9,8	9,7	9,5	7,1
waterstofcarbonaat		182	184	184	185	175	176	175	173
kalkverzadigingsindex	Δ pH	+ 0,1	+ 0,1	+ 0,2	+ 0,2	-	-	-	-
nitraat		3,2	3,1	4,2	4,2	2,4	2,8	2,7	2,5
kaliumpermanganaatverbruik		10,0	8,8	8,3	8,6	8,0	8,1	8,1	7,6
TOC		3,6	3,2	3,3	3,1	4,4	3,3	3,1	3,2
ijzer		0,04	0,03	0,00	0,00	0,02	0,02	0,01	0,02
gesuspendeerde materie		1,35	0,96	0,27	0,20	1,8	0,18	0,0	0,0
coliforme bacteriën	MPN/100 ml	< 0,23	< 0,23	< 0,23	< 0,23	0,4	< 0,23	< 0,23	< 0,23
koloniegetal 37 °C	ml	2	0	1	0	1	1	0	0
koloniegetal 21 °C	ml	45	10	3	2	15	32	0	0
pseudomonas	N/l	-	-	-	-	0	0	0	4
totaal opgelosten zouten		351	335	337	341	327	332	330	342
ionenbalans	% afw.	+ 1,9	+ 2,4	+ 3,5	+ 4,0	- 1,6	+ 2,7	- 4,3	- 3,5

Tabel 2 - Kwaliteit teruggepompt water 1e en 2e proef (onderzoek naar het verstoppingsmateriaal). Uitgedrukt in mg/l tenzij anders aangegeven. De monsters 1 tot en met 4 werden op 14 juni 1982 genomen (regeneratie na 1e verstoppingsproef) respectievelijk 7, 14, 60 en 180 minuten na start terugpompen. De monsters A tot en met D werden op 8 september 1982 genomen (terugwinning na 2e verstoppingsproef) respectievelijk 4½, 60, 240 en 1440 minuten na start terugpompen.

heid gesuspendeerde materie naar de Technische en Fysische Dienst voor de Landbouw gezonden. De resultaten van de uitgevoerde röntgen micro-analyse zijn opgenomen in tabel 3.

element	gewichtsprocenten	
	monster 0	monster 1
Si	4,8 ± 0,6	19,1 ± 8,9
P	1,5 ± 0,5	1,7 ± 0,3
S	1,1 ± 0,4	2,0 ± 0,2
Ca	3,1 ± 0,4	4,6 ± 0,5
Fe	54,9 ± 1,7	30,6 ± 1,7

Tabel 3 - Resultaten röntgen micro-analyse (monsters van 8 september 1982)

Monster 0 is genomen na circa 1 minuut terugpompen, terwijl monster 1 na circa 4½ minuut terugpompen werd verkregen. De vermelde afwijkingen zijn standaarddeviaties. Voor monster 0 was het aantal meetpunten 5 en voor monster 1 bedroeg dit 3.

2.7 Evaluatie

Vergelijking met het verstoppingsverloop van proef 1 en proef 2 (figuur 9) laat zien dat er aanzienlijke verschillen zijn. Bij beide proeven is het verloop van de weerstand niet gelijkmatig maar vertoont een aantal onregelmatigheden. Het globale verstoppingsverloop van proef 1 is aanvankelijk vrijwel horizontaal en neemt pas later (in het laatste derde deel van de infiltratieperiode) sterk toe. Een dergelijk verschijnsel wordt ook door

Bichara gerapporteerd (lit. 6, 3.26). De 2e proef toont een meer lineair stijgend beeld. Hierdoor zijn beide proeven en hun kengetallen niet zonder meer vergelijkbaar. Verder kan worden opgemerkt dat het begin van de verstopping waarschijnlijk samenvalt met hoge MFI-waarden. Het MFI-apparaat was in de periode van 6 april (563) tot 16 september 1981 (726) defect. In deze periode is echter de verstopping begonnen terwijl op 16 september 1981 de grootste MFI-waarde uit de hele proefperiode is gemeten. Overigens zet de verstopping zich onverminderd door, ook als de MFI weer lagere waarden bereikt.

Zoals uit figuur 9 blijkt, bevindt de verstopping bij de le infiltratieproef, zoals bij de meeste infiltratieputten, zich op de overgang omstortingformatie. Verder blijkt dat de verstopping van de 2e infiltratieproef voor het merendeel in de buurt van de filterspleten is gelocaliseerd. Bij het verkregen MFI-verloop van beide proeven valt op te merken dat voor MFI-waarden die dezelfde orde van grootte hebben het verstoppingsgedrag sterk verschilt.

De gemiddelde verstoppingssnelheid vv van proef 1 kan als volgt worden berekend.

$$vv = \frac{\frac{\Delta h\ (t2)}{Q(t2)} - \frac{\Delta h\ (t1)}{Q(t1)}}{t2 - t1} \cdot Q_{gem} = 0{,}00232 \text{ m per dag}$$

dit is 0,85 m/jr.

De standaard verstoppingsnelheid vv_s bedraagt (zie lit. 6)

$$vv_s = 28\ \left(\frac{2{,}97}{21{,}3} - \frac{0{,}65}{21{,}6}\right) \frac{1.8760.28}{503046} = 1{,}49 \text{ m per jaar}$$

Hiermee is de gemiddelde verstoppingskwaliteit van

het infiltratiewater ten opzichte van de formatie gekarakteriseerd (zie lit. 6).
De gemiddelde verstoppingssnelheid van de 2e infiltratieproef bedraagt:

vv = 0,00445 m per dag dit is 1,62 m/jr.

De standaard-verstoppingsnelheid vv_s bedraagt

$$vv_s = 28 \left(\frac{1,25}{25,6} - \frac{1,01}{26,3}\right) \frac{1.8760.28}{38126} = 1,88 \text{ m per jaar}$$

Aangezien de standaardverstoppingsnelheid een maat is voor de verstoppingskwaliteit van het infiltratiewater ten opzichte van de formatie behoort, bij gelijke waterkwaliteiten, de standaard-verstoppingssnelheid van de le proef gelijk te zijn aan de standaard-verstoppingssnelheid van de 2e proef. De betreffende waarden verschillen echter van elkaar.
Zoals in het begin van deze paragraaf is opgemerkt blijkt alleen al uit het verstoppingsverloop dat de betreffende kengetallen van beide proeven niet vergelijkbaar zijn. Zo bedraagt de standaard-verstoppingssnelheid vv_s van het hellende gedeelte van de le proef (vanaf dagnummer 623 (5 juni 1981) van figuur 9): vv_s = 3,82 m/jr.
Kennelijk is de infiltratievoorgeschiedenis van belang voor de verstoppingsresultaten.
Op grond van het uitgevoerde fysisch, chemisch, bacteriologisch onderzoek naar het verstoppingsmateriaal van de le proef en van de 2e proef (tabel 2) kan het volgende over de oorzaak van de verstopping worden gezegd:

- het verloop van $KMnO_4$ en TOC geeft een relatief geringe daling te zien. Waarschijnlijk mag op grond hiervan organische stof niet als hoofdoorzaak van de verstopping worden gezien;

- voor de kalkverzadigingsindex is weliswaar met een globale methode nog juist een positieve waarde berekend. Er wordt evenwel op grond van ervaring en van een exacte berekening van uitgegaan dat het infiltratiewater nog juist kalkagressief is, zodat kalkafzettingen niet als verstoppingsoorzaak kunnen worden aangemerkt. Het bij de röntgenmicro-analyse aangetroffen Calcium kan mogelijk worden beschouwd als een indampingseffect van het droogproces;
- in de monsters van het teruggepompte water zijn weinig bacteriën aangetoond. In overeenstemming met de lage AOC-waarden van het infiltratiewater (zie paragraaf 2.2) kan derhalve worden gesteld dat bacteriën slechts voor een gering gedeelte aan de verstopping kunnen hebben bijgedragen;
- bij de zuivering van oppervlaktewater wordt aluminium als component van het coagulatiemiddel gebruikt. De monsters van het teruggepompte water zijn op 14 juni niet op aluminium onderzocht. Op grond van bedrijfsgegevens en gezien de resultaten van 8 september (tabel 3) wordt aangenomen dat aluminium bij de verstopping geen rol heeft gespeeld;
- hoewel ijzer in het regeneratie-onderzoek (tabel 2, le proef) niet is aangetoond is het mogelijk dat relatief grotere deeltjes die door een koekfiltratie op de boorgatwand waren gelegen, bij het terugpompen selectief verloren zijn gegaan. Daarom kan het niet worden uitgesloten ijzer toch als een verstoppingsoorzaak te beschouwen. Met het recente onderzoek (röntgen micro-analyse) van het verstoppingsmateriaal van de 2e proef is vooral in monster 0 (tabel 3) relatief veel ijzer aangetroffen. In monster 1 is relatief veel Si aanwezig. Mede in verband met het moment van be-

monsteren kan worden verondersteld dat ijzer in het begin van de omstorting is afgezet, terwijl Si-bevattende deeltjes overwegend van de overgang omstorting/formatie afkomstig zouden kunnen zijn.

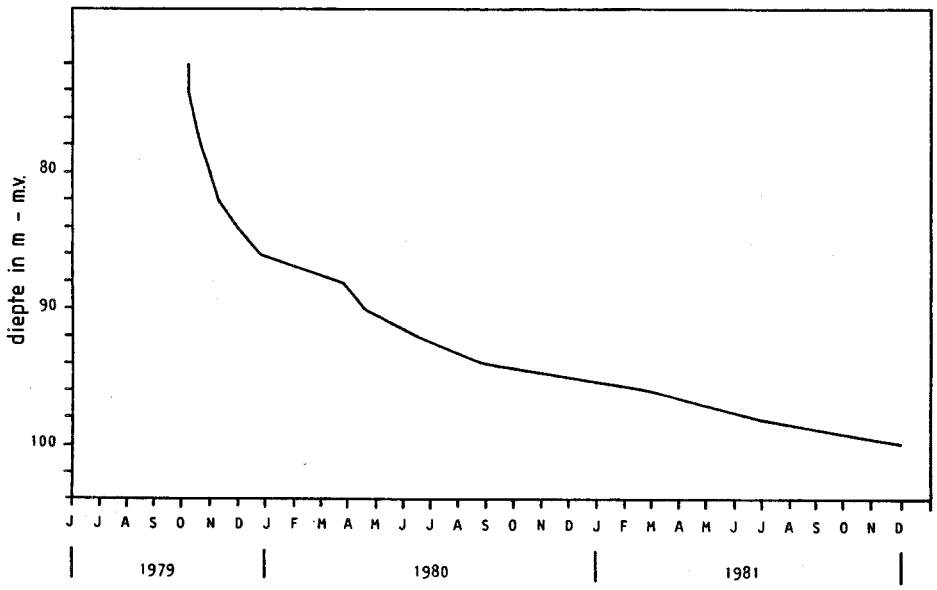
Een aanknopingspunt voor het vinden van de oorzaak van de verstopping kan zijn gelegen in de overweging dat het begin van de verstopping heeft plaatsgevonden in een periode rondom de 650e dag na het begin van de infiltratie, dat is eind juni begin juli 1981. In deze periode zijn vanwege een defect MFI-apparaat geen MFI-waarden bepaald. Bekend is dat in de periode mei tot en met juli 1981 werkzaamheden werden uitgevoerd aan het leidingnet (reconstructie Europaplein). Hierbij zijn enkele malen ten behoeve van spuien grote volumestromen water aan het leidingnet onttrokken, waardoor nabij ps Haren een ander stromingsregime ontstond. Verondersteld wordt dat materiaal dat zich in het leidingnet bevond, in beweging werd gebracht, ook met het infiltratiewater meestroomde en na infiltratie aan de verstopping heeft bijgedragen. Uit het leidingnet genomen monsters gaven inderdaad een verhoogde troebelheid (circa 0,5 FTE) te zien. Bij de samenstelling van deze zwevende deeltjes uit het leidingnet kan in het algemeen worden gedacht aan ijzer (corrosieprodukt en onvolledige grondwaterzuivering) en aan de fijne zandfractie, silt en lutum.
Onder voorbehoud van de korte duur van de 2e infiltratieproef moet worden geconstateerd dat niet van reproduceerbaarheid van de 1e proef kan worden gesproken. Mogelijk kan na een chemische regeneratie wel een reproductie worden gerealiseerd (Olsthoorn, persoonlijke mededeling). De indruk wordt verkregen dat het verschil in verstoppingsgedrag niet te her-

leiden is tot kwaliteitsvariaties van het infiltratiewater. Mogelijk speelt een ander fenomeen een rol. Gedacht wordt aan éénmalige "opvulling" van de poriën van de nabije formatie door slib qua volume of qua lading. Hierdoor zou een vorm van blijvende verstopping ontstaan. In dit verband zouden colloïdale deeltjes wellicht een rol kunnen spelen. Een andere mogelijkheid is, dat er in een bepaalde fase van de proef, eventueel na een storing, het verstoppingsregime is veranderd (Olsthoorn, persoonlijke mededeling).
Het huidige verstoppingsonderzoek gaat uit van een toekomstige bedrijfsvoering met dual purpose putten, dat wil zeggen dat met dezelfde put achtereenvolgens wordt geïnfiltreerd en gewonnen.
Indien in werkelijkheid wordt gekozen voor afzonderlijke putten voor infiltratie en onttrekking dan is het huidige verstoppingsonderzoek ontoereikend.
Het aanvullend onderzoek moet dan zijn gericht op het verstoppingsgedrag bij infiltratie op een andere diepte en bij een andere korrelverdeling van de formatie. Tevens is het gewenst een toekomstige bedrijfsvoeringscyclus bij het aanvullende verstoppingsonderzoek te betrekken.

3 HYDROLOGISCHE RESULTATEN

In de eerste fase van het onderzoek naar de stroming van het infiltratiewater in de ondergrond, heeft het zwaartepunt gelegen op de metingen. In een tweede fase zal worden gepoogd een aantal berekeningsmethoden op het onderhavige stromingsprobleem toe te passen. Omdat de nadruk ligt op de (verticale) verdringing van brak water, wordt in figuur 10 het verloop van het verzoetingsfront gegeven, zoals dit met behulp van een vaste elektro-

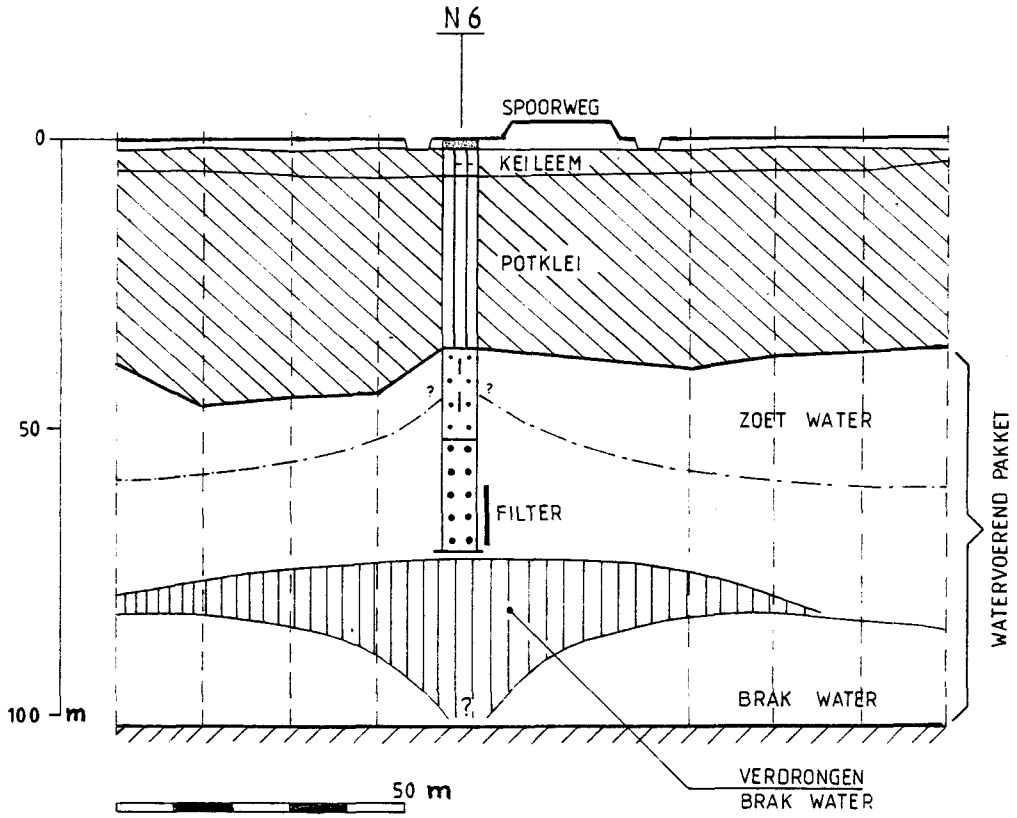
denopstelling (zoutwachter, zie figuur 7) werd geregistreerd. Hieruit blijkt dat het effect van het infiltratiewater tot op de basis van het watervoerende pakket kan worden vastgesteld.



Figuur 10 - Diepte van verzoetingsfront in de waarnemingsput op 15 m van de persput

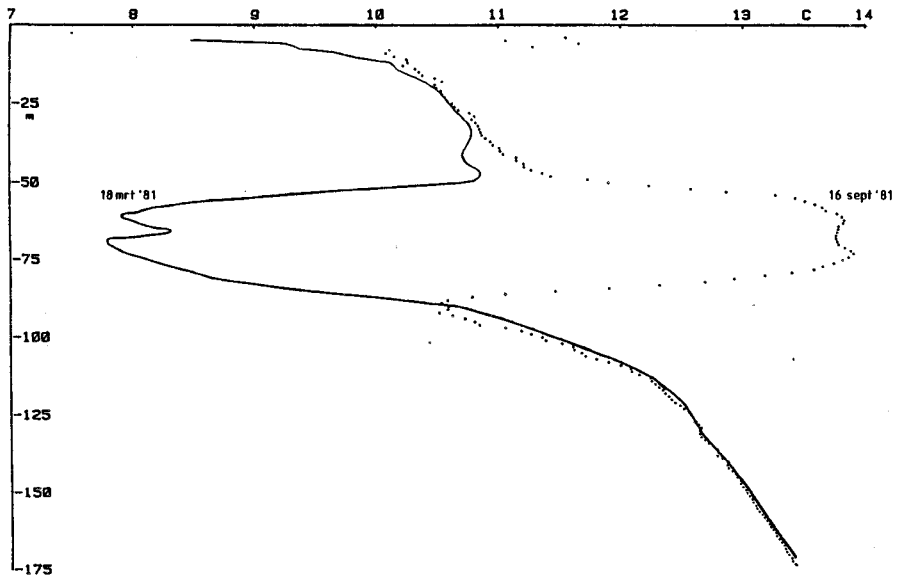
Een andere methode die toegepast is om de verbreiding en het gedrag van het infiltratiewater na te gaan, is het geo-elektrisch onderzoek. Uit dit in lit. 8 beschreven onderzoek blijkt globaal hoe het infiltratiewater zich in de ondergrond heeft verbreid. In lit. 8 wordt opgemerkt dat een kwantitatieve interpretatie van de geo-elektrische metingen nabij de infiltratieput met behulp van de conventionele technieken weinig zinvol is, daar de geo-

elektrisch te onderscheiden lagen nabij de infiltratieput niet horizontaal verlopen. Wel kan globaal worden aangegeven binnen welk gebied de infiltratie van invloed is op de metingen. Figuur 11, die uit genoemd rapport afkomstig is, geeft een indruk van de verbreiding op het tijdstip waarop de metingen werden uitgevoerd (april 1981).



Figuur 11 - De verbreiding van het infiltratiewater volgend uit geo-elektrisch onderzoek

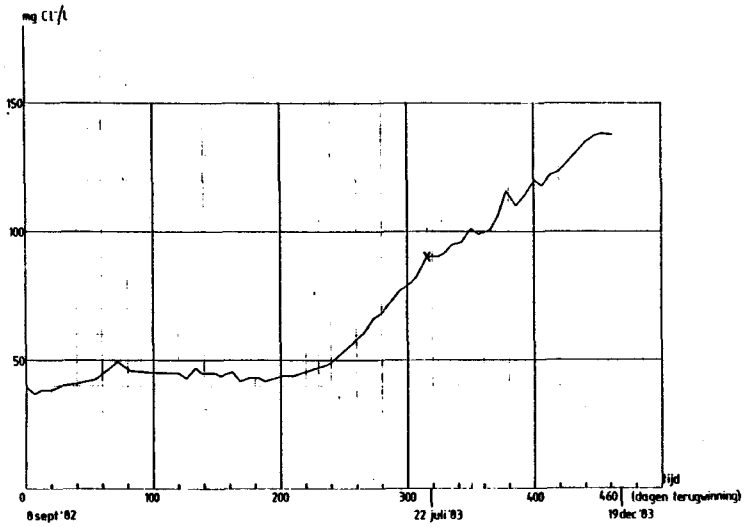
Het ten behoeve van de infiltratieproef uitgevoerd geo-thermisch onderzoek is in lit. 9 beschreven. Figuur 12 is aan dit rapport ontleend. In deze figuur wordt aangegeven dat er in de lagen van circa 55 tot 75 m een preferente stroming optreedt.



Figuur 12 - Resultaten van geo-thermisch onderzoek

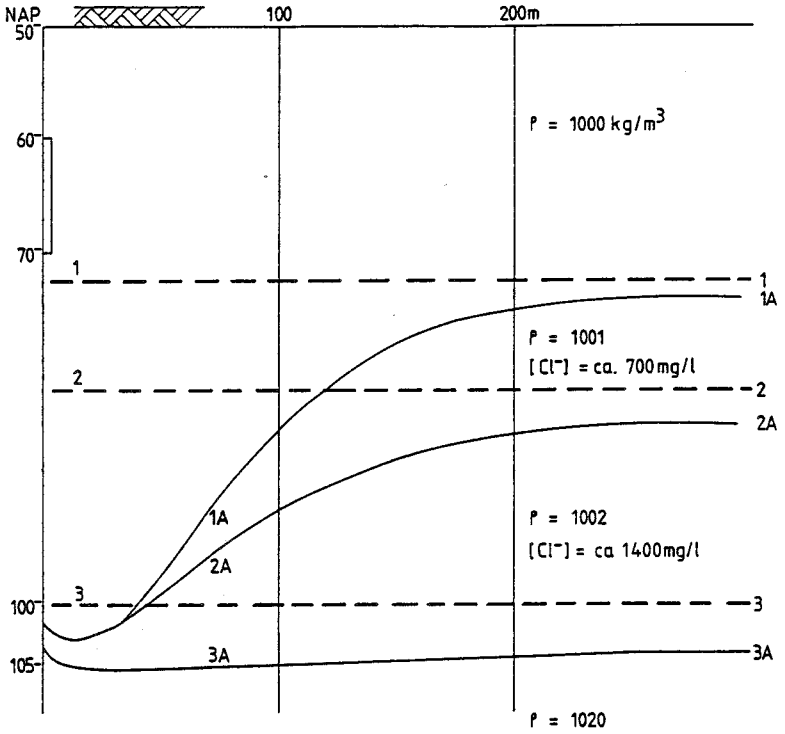
Tijdens de le infiltratieproef die van 21 september 1979 tot 14 juni 1982 plaatsvond, werd 503.000 m^3 water geïnfiltreerd. Gedurende de 2e infiltratieproef, van 8 juli 1982 tot 8 september 1982 werd 38.000 m^3 water geïnfiltreerd. In totaal werd 541.000 m^3 water geïnfiltreerd. Op 8 september 1982 werd met de terugwinproef gestart. Van 8 september 1982 tot 22 juli 1983 werd met de bestaande put N6 continu circa 30 m^3 water per uur aan de bodem onttrokken. In deze periode werd 217.000 m^3 water teruggewonnen. Het verloop van het chloridegehalte van het teruggewonnen water is in figuur 13 weergegeven. Het chloridegehalte bedroeg op 22 juli 1983 90 mg/l. Op 22 juli 1983 werd van een continue winning (168 uur per week) overgegaan op een dis-

continue (circa 100 uur per week). Met deze discontinue winning die tot 19 december 1983 heeft geduurd werd 61.000 m^3 water aan de bodem onttrokken. In totaal werd 278.000 m^3 water teruggewonnen. Bij het einde van de proef was het chloridegehalte tot 137 mg/l opgeklommen (figuur 13).

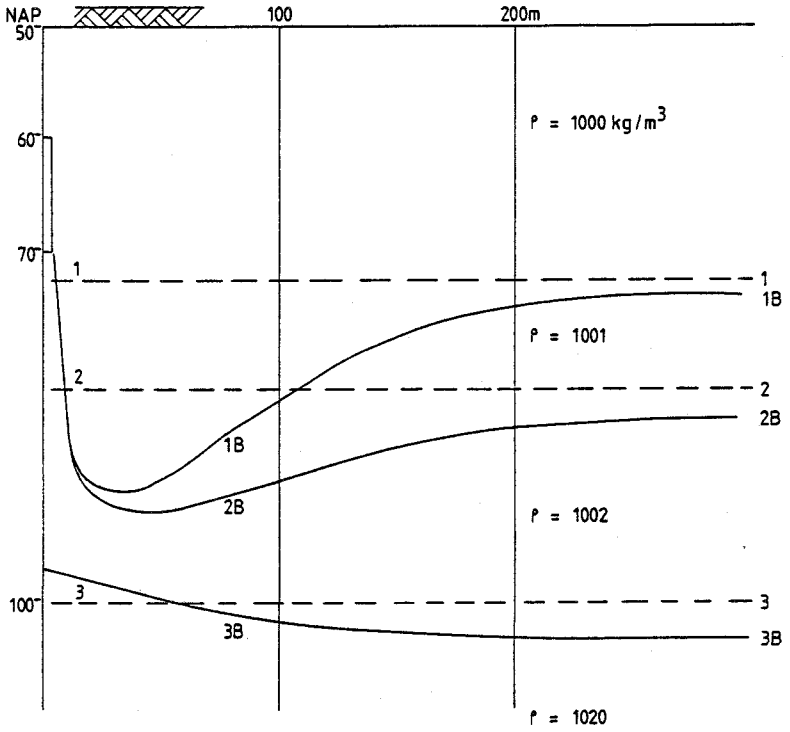


Figuur 13 - Chloridegehalte van het onttrokken grondwater

Hoewel de nadruk voorlopig nog niet op een rekenmatige benadering van het gedrag van het geïnfiltreerde zoete water heeft gelegen, wordt hieronder een eerste indruk van de vergelijking van de metingen met een door ir. J.H. Peters (KIWA) uitgevoerde berekening gegeven. De toegepaste berekeningsmethode heeft betrekking op de radiaal-symmetrische stroming van vloeistoffen met verschillende dichtheden en gescheiden door scherpe grensvlakken in een homogeen en isotroop half oneindig uitgestrekt watervoerend pakket dat aan de bovenzijde wordt afgesloten door een ondoorlatende laag. De wiskundige achtergrond van het rekenprogramma is beschreven in


NAP
50
60
70
100
105
100
200m
ρ = 1000 kg/m3
ρ = 1001
[Cl-] = ca. 700 mg/l
ρ = 1002
[Cl-] = ca 1400 mg/l
ρ = 1020
1
1A
2
2A
3
3A

Figuur 14


NAP
50
60
70
100
100
200m
ρ = 1000 kg/m3
ρ = 1001
ρ = 1002
ρ = 1020
1
1B
2
2B
3
3B

lit. 10. De basis van het watervoerend pakket wordt gemodelleerd door een fictieve vloeistof met een relatief hoge dichtheid ter plaatse van de basis te introduceren. De resultaten van de berekening zijn weergegeven in de figuren 14 en 15 (A: na circa 3 jaar infiltreren; B: na circa 140 dagen onttrekken). Uit de berekening blijkt dat na 140 dagen het le grensvlak en daarmee het enigszins brakke water bij het filter is aangekomen. Dit hoeft niet in tegenspraak te zijn met de resultaten van de metingen aangezien de aankomst van het bovenste grensvlak bij het filter nog geen meetbare verhoging van het chloridegehalte van het opgepompte water hoeft te impliceren. Overigens wordt er op gewezen dat dit een globale berekening betreft vanwege een sterke schematisering van de stromingssituatie (met name de aanname van isotropie) en het gebruik van geschatte invoergegevens, zodat slechts indicatieve resultaten mogen worden verwacht.

4 CONCLUSIES

Op grond van het uitgevoerde verstoppingsonderzoek wordt geconcludeerd dat verstopping geen belemmerende factor zal zijn voor de toepassing van putinfiltratie.
Uit het hydrologisch onderzoek is gebleken dat herwinning, op seizoenbasis, van een gedeelte van het geïnfiltreerde water, met de bestaande infiltratie/winingsput, zonder snelle verzilting in principe mogelijk is.

5 LITERATUUR

1. Kieft, J.W.; Beschrijving van het infiltratieproject op het pompstation Haren.

2. Kieft, J.W.; Resultaten van het verstoppingsonderzoek.

3. Kieft, J.W.; Structurele toepassing van kunstmatige infiltratie voor de drinkwatervoorziening in de regio Noord-Nederland

4. Rijks Geologische Dienst; Inventarisatierapport geologisch onderzoek Groningen

5. Rijks Geologische Dienst; Geologische gesteldheid gebied Haren

6. Olsthoorn, T.N.; Verstopping van persputten. KIWA-mededeling nr. 71

7. Hijnen, W.A.M.; Kooij, D. van der; KIWA-rapport SWI-83.129; Assimilleerbare organische koolstof (AOC) in water voor kunstmatige infiltratie met persputten

8. Csonka, J.; Dienst Grondwaterverkenning TNO. Geo-elektrisch onderzoek Haren, 1982

9. Dalfsen, W. van; Dienst Grondwaterverkenning TNO. Temperatuuronderzoek bij de kunstmatige grondwateraanvulling onder de winplaats Haren, 1983

10. Peters, J.H.; KIWA-rapport SWE-83.007. The movement of fresh water injected in salaquifers, 1983

INFILTRATIEPUTTEN OP HET EILAND TEXEL OP KLEINE PRAKTIJKSCHAAL

R.J. Wildschut
Provinciaal Waterleidingbedrijf van Noord-Holland

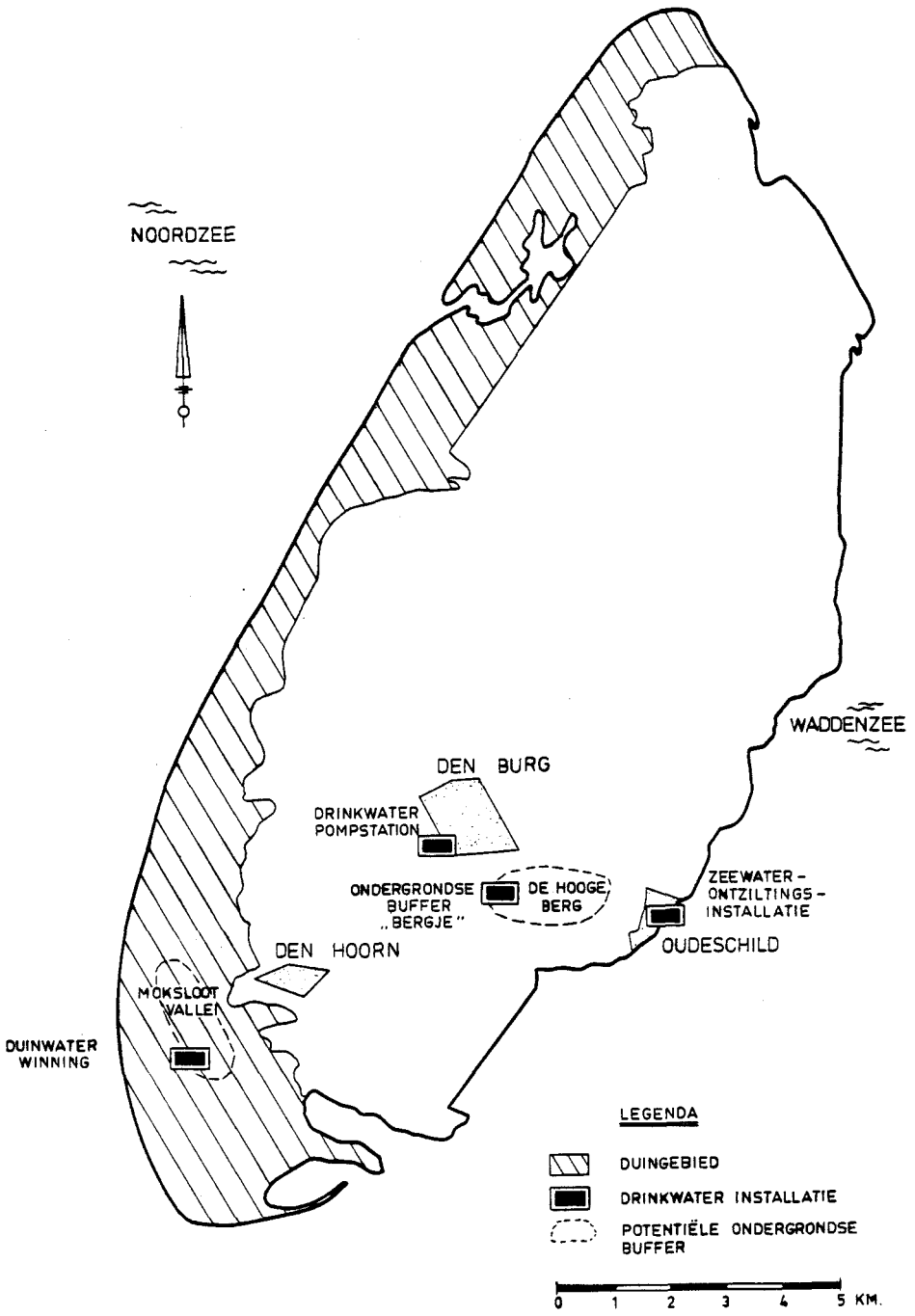
SAMENVATTING

Op het eiland Texel wordt door het Provinciaal Waterleidingbedrijf van Noord-Holland (PWN) een diepeput-infiltratieproject met een jaarcapaciteit van 300.000 m^3 gerealiseerd. Dit project heeft ten doel om seizoenmatig, in de winterperiode, gedestilleerd zeewater in de ondergrond op te slaan, ten einde in het vakantieseizoen aan een kortstondige, grote drinkwaterbehoefte te kunnen voldoen.
Het eiland beschikt over een eigen duinwaterwinning met beperkte jaarcapaciteit en over een oppervlaktewaterwinning door middel van verdamping van zeewater met een capaciteit van circa 125 m^3/h (overeenkomend met circa 1 miljoen m^3/a). Er is geen verbinding met het vasteland.
Het infiltratieproject bevindt zich 1 km ten zuiden van Den Burg ter plaatse van een Pleistocene keileemopduiking. Geïnfiltreerd wordt in een fijnzandig pakket, op een diepte van circa 25 m -NAP.
De infiltratie is aangevangen in 1977, aanvankelijk met één put en sedert eind 1978 met drie putten. Terugwinnen vindt plaats met dezelfde putten. In de eindfase zal het project uit omstreeks 6 putten bestaan.
De ervaringen tot dusver zijn gunstig te noemen. Zowel bij infiltratie van gedestilleerd water als bij terugwinnen blijkt vrijwel geen putverstopping op te treden. Het lopende onderzoek spitst zich toe op de meng- en verdringingsverschijnselen van het

onderliggende brakke en zoute grondwater en op de eventuele beïnvloeding van de freatische grondwaterstanden.

1 INLEIDING

Het Noord-Hollandse eiland Texel heeft een oppervlak van circa 180 km^2 en telt omstreeks 12.500 vaste bewoners. In het vakantieseizoen stijgt het bewonersaantal tot omstreeks 60.000, terwijl in het jaar 2000 een zomerbevolking van ongeveer 65.000 à 70.000 te verwachten valt.
In 1955 stichtte het Provinciaal Waterleidingbedrijf van Noord-Holland op dit eiland een centrale drinkwatervoorziening (figuur 1). In het Zuidwestelijke duingebied werd een freatische duinwaterwinning gebouwd in de Mokslootvallei, welke momenteel uitgegroeid is tot een jaarcapaciteit van 540.000 m^3. Nazuivering en distributie vinden plaats via een nabij Den Burg gelegen filtergebouw annex pompstation.
De zomeronttrekking aan de Mokslootvallei is gelimiteerd tot 3.500 m^3/d, reden waarom in 1972 nabij Oudeschild een zeewaterontziltingsinstallatie met een dagcapaciteit van 3.000 m^3 werd gebouwd. Ook dit destillaat wordt, na conditionering, gedistribueerd via het pompstation Den Burg.
Voor een optimale drinkwaterkwaliteit wordt gestreefd naar een vaste mengverhouding van duinwater en destillaat.
Om ook in de toekomst aan de sterk toenemende drinkwaterbehoefte in de zomerseizoenen te kunnen blijven tegemoetkomen werd in 1977 en 1978 een ondergronds buffersysteem ingericht, gelegen nabij het "Bergje", enkele kilometers ten zuiden van Den Burg. De buffer bestaat uit een infiltratie- en

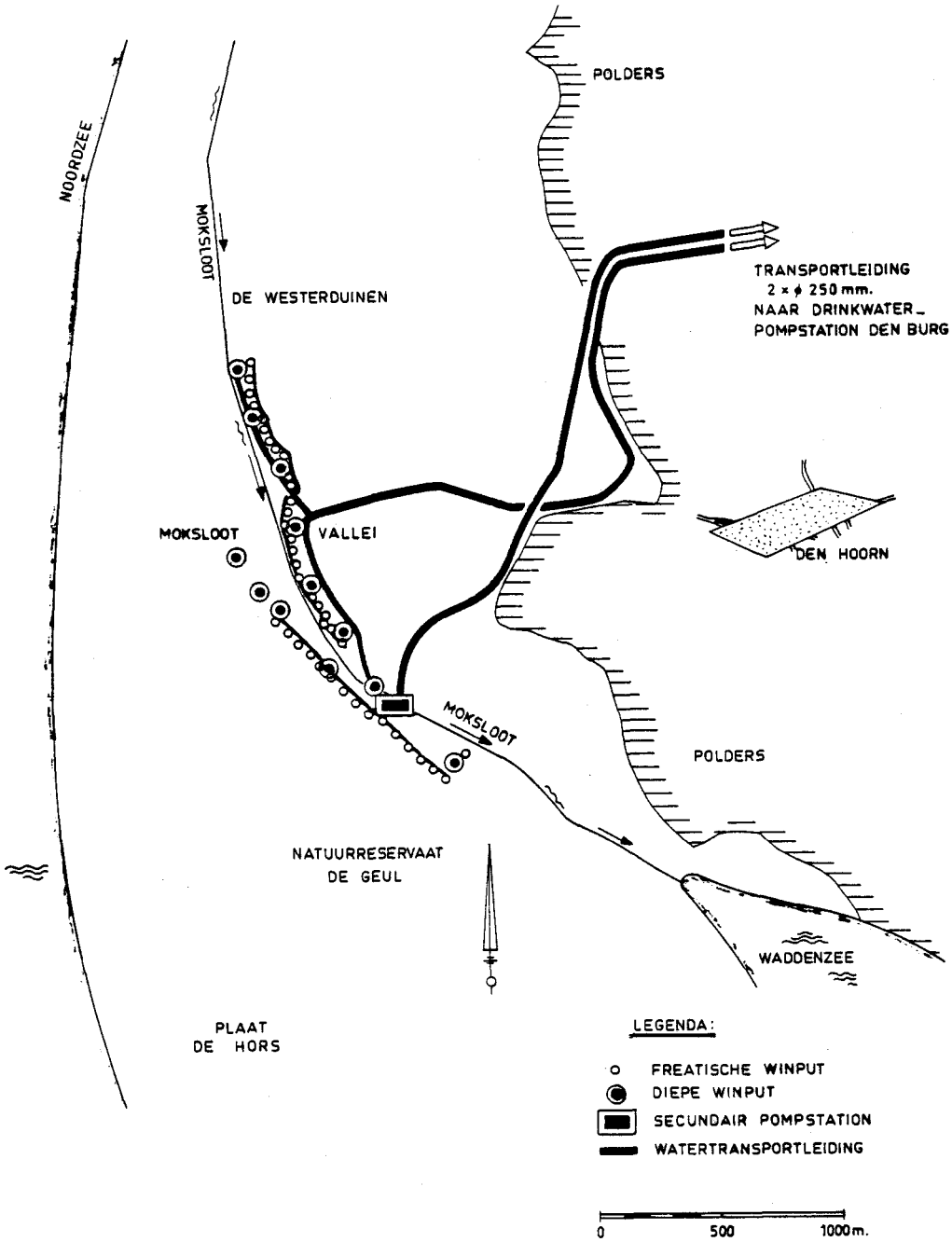


Figuur 1 - Situatie eiland Texel

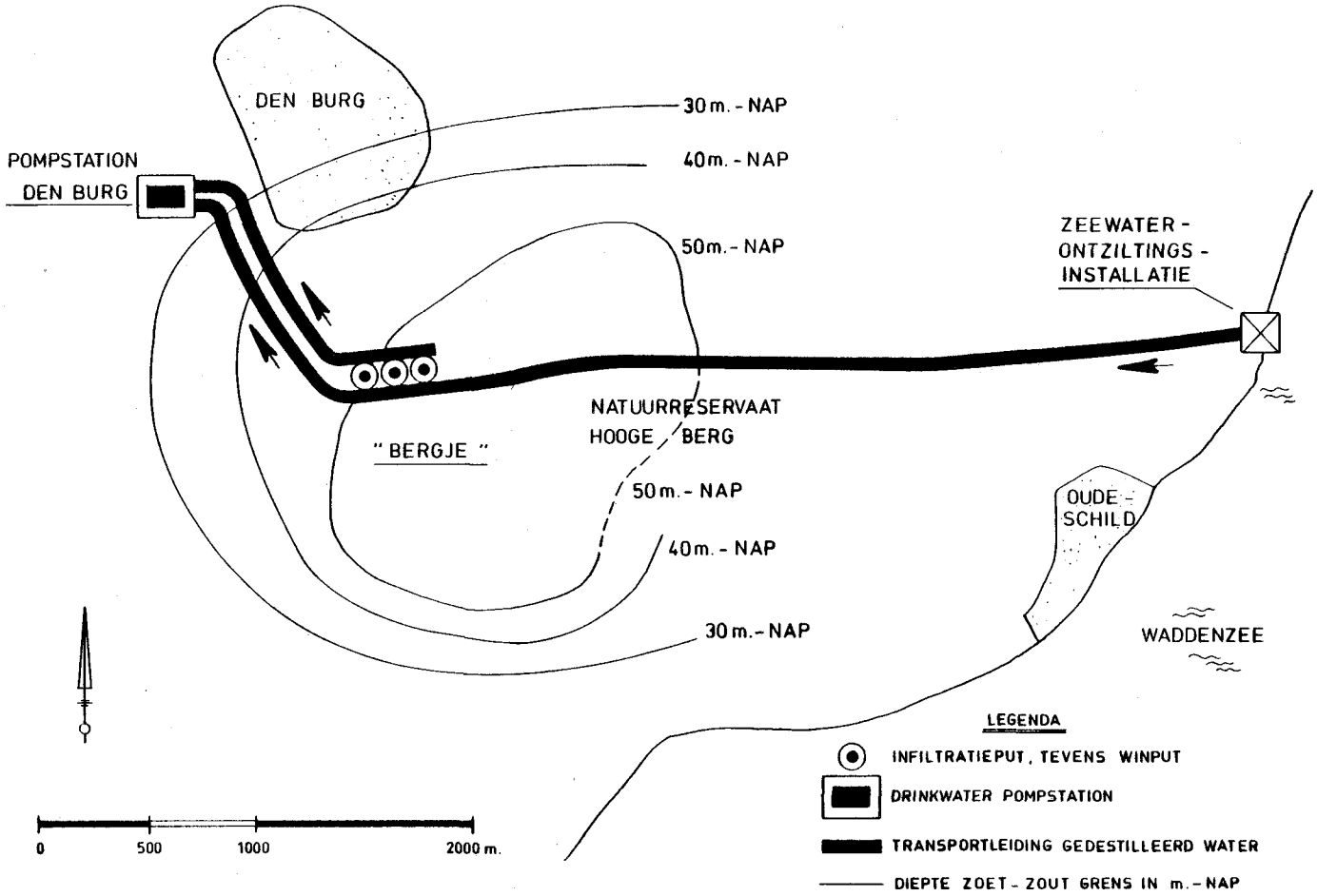
terugwinsysteem in een locale zoetgrondwaterbel. 's Winters wordt deze buffer aangevuld vanuit de ontziltingsinstallatie welke dan overcapaciteit bezit. De opslagcapaciteit van de buffer zal uiteindelijk circa 300.000 m^3 gaan bedragen, terwijl jaarlijks zo'n 200.000 m^3 gedurende de zomermaanden teruggewonnen zal worden.
De ondergrondse buffer wordt verkregen door zoet/zout-grondwatergrensvlakken te verdringen en functioneert nu ruim 5 jaar volgens verwachting.
In het navolgende zal op een aantal aspecten van deze ondergrondse voorraadvorming nader worden ingegaan.

2 LOCATIEKEUZE VAN DE ONDERGRONDSE BUFFER

Voor ondergrondse opslag kwamen op het eiland twee locaties in aanmerking. In de Mokslootvallei zou een dieper gelegen watervoerend pakket gebruikt kunnen worden, waarin zich reeds 12 pompputten voor noodlevering bevinden (figuur 2).
De tweede geschikte locatie voor een buffer bevindt zich onder een lokale keileemopduiking, op circa 1 km ten Zuidoosten van Den Burg (figuur 3).
In de Mokslootvallei reikt de zoetwatervoorraad tot circa 50 m -NAP, terwijl de hydrologische basis zich op omstreeks 240 m -NAP bevindt. Op ongeveer 20 m -NAP wordt in de noordelijke helft van het wingebied een 3 tot 10 m dikke keileemlaag aangetroffen, welke de scheiding vormt tussen het freatische pakket waaruit duinwater gewonnen wordt en het diepe, voor noodlevering bestemde pakket.
Ten zuiden van de lijn West-Oost over Den Hoorn is de keileem geheel afwezig, zodat beide pakketten hier overgaan in één freatisch pakket.
De locatie ten zuidoosten van Den Burg zal verder



Figuur 2 - Mokslootvallei met puttenveld



Figuur 3 - "Bergje" met zoetgrondwatervoorraad

als "Bergje" aangeduid worden. Ook hier bevindt zich een locale zoetgrondwatervoorraad van goede kwaliteit. In de Gouden Eeuw werden op de rede van Texel liggende zeilschepen hieruit van een drinkwatervoorraad voorzien. De zoetwatervoorraad strekt zich momenteel globaal uit vanaf het ten zuiden van Den Burg gelegen gebied Noordhaffel als Westelijke begrenzing, tot het natuurreservaat "De Hooge Berg" als Oostgrens. De zoetwaterbel reikte tot 50 à 55 m -NAP, terwijl de hydrologische basis zich hier op circa 260 m -NAP bevindt.
Beide potentiële locaties boden zowel voor- als nadelen.

- In de Mokslootvallei waren reeds 12 diepe putten aanwezig, welke met eenvoudige aanpassingen geschikt te maken zouden zijn voor periodieke infiltratie en terugwinning. Ook zijn twee transportleidingen naar pompstation Den Burg beschikbaar waarmee gescheiden aan- en afvoer van bufferwater te realiseren is. Bij het "Bergje" daarentegen kruiste alleen de enkele destillaatleiding van Oudeschild naar pompstation Den Burg de bufferlocatie. Deze kon aangeboord worden voor infiltratiewater. Echter zowel putten als afvoerleiding moesten nog gerealiseerd worden.
- Qua bodembescherming zijn rond het "Bergje" planologische maatregelen nodig, terwijl tevens particuliere zoetgrondwateronttrekkingen juridisch belemmerd dienden te worden. De Mokslootvallei daarentegen is eigendom van Staatsbosbeheer, waarmee activiteiten van "derden" bij voorbaat al ingeperkt blijven.
- Uit het oogpunt van leveringszekerheid gezien is de Mokslootvallei erg kwetsbaar omdat zeewaterintrusie tijdens hoge zeestanden niet geheel uit te sluiten is. De kustlijn verplaatst zich voortdu-

rend landinwaarts. Een bijkomend, wellicht positief, aspect is dat door de historische kustafslag zich momenteel veel diep zoetgrondwater onder zee bevindt. Wellicht zou een klein deel van deze zoetwatervoorraad éénmalig winbaar zijn.

- Een aspect van zowel energiekosten als leveringszekerheid is dat het leidingtracé Oudeschild-"Bergje"-Den Burg veel korter is dan het alternatief Oudeschild-Mokslootvallei-Den Burg, namelijk circa 7 km tegenover circa 18,5 km lengte.
- Nabij beide locaties worden beschermde natuurgebieden aangetroffen. Een geringe beïnvloeding van de grondwaterstanden (orde van cm's) zal in en rond de Mokslootvallei zeker optreden. Rond het "Bergje" is hierover nog geen uitsluitsel verkregen. Wellicht blijkt deze invloed verwaarloosbaar klein te zijn.
- Over het terugwinpercentage van het geïnfiltreerde water is eveneens zonder nader onderzoek geen uitspraak mogelijk. Aangenomen moet worden dat dit terugwinpercentage kleiner dan 100 procent zal zijn omdat een zekere brakwatervorming onvermijdelijk is.
- Waterkwaliteitsveranderingen: op beide locaties zal de kwaliteit van het infiltratiewater tijdens buffering weinig veranderen.
- Verstopping van de infiltratieputten in het "Bergje" werd tevoren vrijwel uitgesloten geacht. Infiltratiewateraanvoer naar de Mokslootvallei zal deels door bestaande transportleidingen moeten plaatsvinden, waarbij losgewoelde afzettingen uit de leiding putverstopping kunnen veroorzaken.

Op grond van voornoemde overwegingen werd gekozen voor bufferlocatie "Bergje". Voor een overzicht werden de voor- en nadelen van beide locaties in tabel 1 kort samengevat.

aspect	buffer Mokslootvallei	buffer Bergje
technische voorzieningen	- 12 putten aanwezig - aanvoer aanwezig - afvoer deels aanwezig	- putten nog te bouwen - aanvoer aanwezig - afvoer nog te leggen
economie	- lage nieuwe investeringen - snelle afschrijving (kleiner dan 10 jaar)	- grote investeringen - afschrijving 20 à 30 jaar
juridisch	- bodembeschermd gebied - geen particuliere winningen	- planologische maatregelen nodig voor bodembescherming en winningen door derden
leverings-zekerheid	- zeewaterintrusie denkbaar - lange leidingen nodig - concentratie grondwaterwinmiddelen op één locatie	- grondwaterverontreiniging denkbaar - korte transportafstand - spreiding van grondwaterwinmiddelen over twee locaties
gevolgen voor omgeving	- geringe beïnvloeding van nabijgelegen natuurgebieden is te verwachten	- beïnvloeding van nabijgelegen natuurgebied "De Hooge Berg" niet geheel uitgesloten. Waarschijnlijk verwaarloosbaar. Nader onderzoek nodig.
energetisch	- lange transportweg (18,5 km)	- korte transportweg (7 km)
beheer	- puttenveld niet toegankelijk voor derden - afstand tot pompstation circa 6 km noodzaakt tot uitgebreide signaaloverdracht	- puttenveld publiek toegankelijk - afstand tot pompstation circa 1,5 km vraagt beperkte signaaloverdracht
verstopping infiltratie-putten	- enige verstopping denkbaar	- verstopping vrijwel uitgesloten

Tabel 1 - Overwegingen locatiekeuze buffer Mokslootvallei/Bergje

3 GEOHYDROLOGISCHE GESTELDHEID VAN HET "BERGJE"

Het oppervlak van het gebied Noordhaffel-De Hooge Berg (het "Bergje") wordt gevormd door een gestuwd keileemdek met maaiveldhoogten tussen omstreeks 3 en 15 m +NAP. Deze keileem reikt in het beschouwde gebied tot omstreeks NAP-niveau; op grotere afstand rondom wordt deze keileemlaag aangetroffen op een diepte van 10 - 20 m -NAP. Veelal is de keileem sterk verweerd zodat infiltratie van neerslag kan optreden. De dikte van de laag varieert sterk. Onder meer direct Oostelijk van het beschouwde gebied, nabij natuurreservaat De Hooge Berg ontbreekt de keileem zelfs geheel.
Vanaf NAP tot omstreeks 30 m -NAP komen matig fijne tot matig grove zanden voor; hier vindt de infiltratie en terugwinning plaats.
Tussen 30 en 40 m -NAP en tussen 65 en 75 m -NAP komen locale klei- en leemlagen voor met beperkte hydraulische weerstanden. De zoet/zoutgrens bevindt zich tussen 50 en 55 m -NAP. De hydrologische basis bevindt zich zoals eerder genoemd op circa 260 m -NAP.
Drie pompproeven in het geïnfiltreerde watervoerende pakket tussen NAP en circa 30 m -NAP, uitgevoerd op korte onderlinge afstanden, toonden een sterke variatie van doorlaatvermogens aan. Deze doorlaatvermogens kD varieerden tussen 200 en 900 m^2/d. Voor de hydraulische weerstand van het stelsel boven- en onderliggende klei- en leemlagen tezamen werden waarden gevonden, variërend tussen 35 en 250 dagen. Deze lage waarden werden vooral veroorzaakt omdat de weerstandslagen onder het watervoerend pakket erg licht ontwikkeld zijn. De gemeten spreidingslengten varieerden tussen omstreeks 85 en 500 m.

4 TECHNISCHE UITVOERING VAN HET PUTTENVELD "BERGJE"

4.1 Systeemopzet

Uit het voorgaande bleek al dat het watervoerende pakket onder het "Bergje" tussen omstreeks NAP en 30 m -NAP zich het beste leende voor infiltratie en terugwinnen. Gekozen is om de benodigde infiltratieputten in één lijn op te stellen. Leidingtechnisch biedt dit voordelen. Maar bovenal is het met een lijnopstelling mogelijk om via een overinjectie een eventuele overmaat aan brakwater als het ware "weg te spoelen" in een richting loodrecht op de rij infiltratieputten. Zo'n overinjectie kan plaatsvinden met de bestaande infiltratieputten, of via speciaal nabij de zoet/zoutgrens te plaatsen filters.
Omdat het beoogde infiltratieproject van maximaal 300.000 m^3/a kleinschalig te noemen is, werd de voorkeur gegeven aan terugwinning met dezelfde putten als waarmee geïnfiltreerd werd (zogenaamde "dual-purpose-putten"). Zou tijdens de latere proefnemingen op praktijkschaal blijken dat een overmatige afstroming plaatsvindt dan kunnen in tweede instantie alsnog enkele flankerende terugwinputten bijgeplaatst worden. Een bijkomend voordeel van dual-purpose-putten is dat deze min of meer zelfregenererend zijn tijdens terugwinnen. Echter gezien de zuiverheid van gedestilleerd water werd geen putverstopping van betekenis verwacht. Maatgevend voor het uiteindelijk vereiste aantal putten werd dan ook het terugwindebiet per put beschouwd, dit met het oog op mogelijk "opkegelen" van brakwater. Oriënterende berekeningen wezen uit dat bij een terugwindebiet van slechts 5 à 10 m^3/h per put "opkegelingsverschijnselen" van brakwater

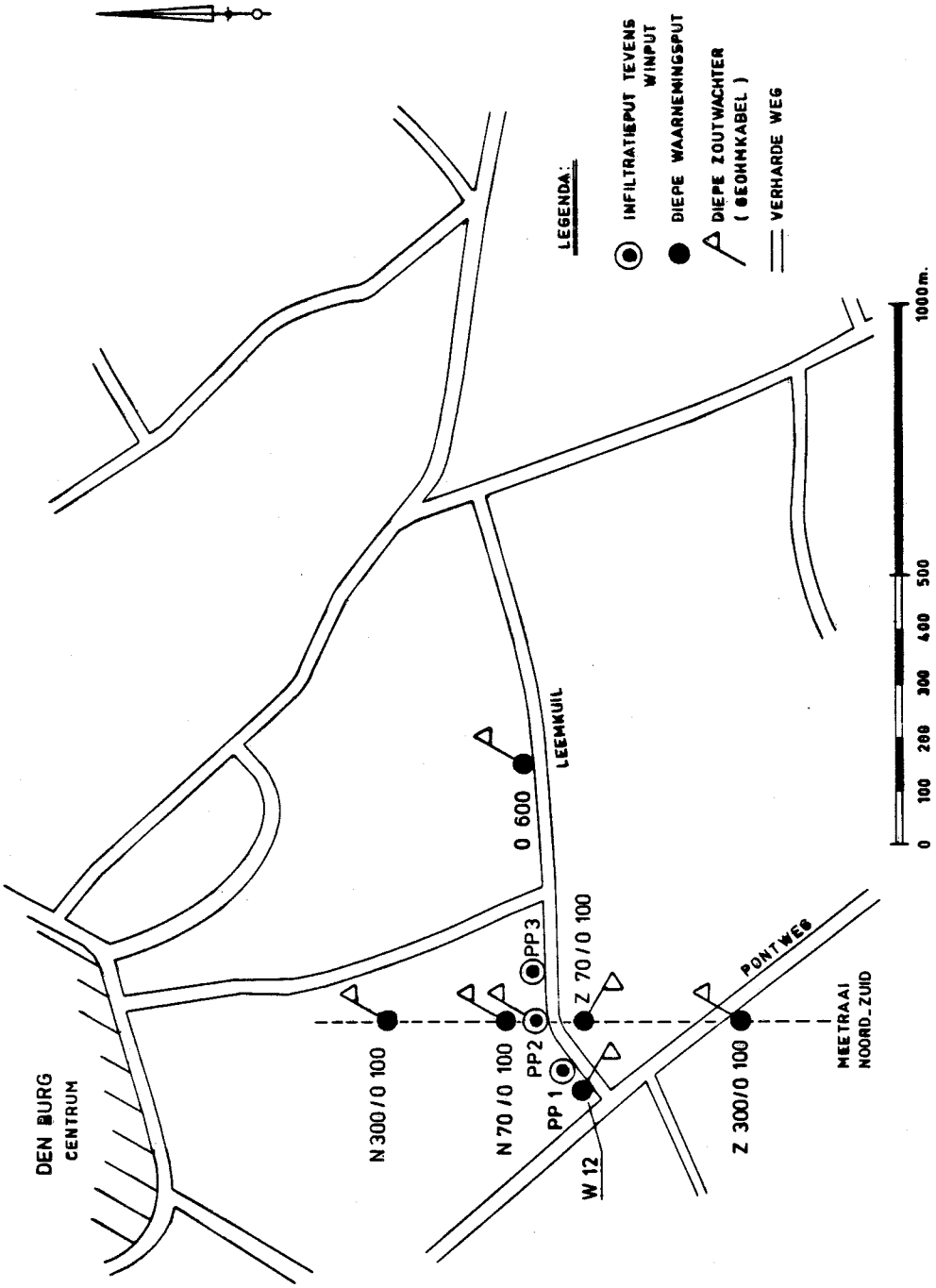
met een chloridegehalte van 1.000 mg/l al denkbaar zijn.
De infiltratieperiode in het winterseizoen beslaat omstreeks zes maanden, terwijl de terugwinning met dezelfde putten in drie maanden en dus met beduidend hogere putbelastingen plaats zal moeten vinden.
Aanvankelijk werd voor een pieklevering uit de buffer van normaliter circa 95 m^3/h dan ook uitgegaan van een dual-purpose-puttenbatterij van minimaal 6 en ten hoogste 20 putten.
De onderlinge afstanden van deze 6 à 20 dual-purpose-putten worden bepaald door de eis dat de verticale bewegingen van de zoet/brak/zoutgrensvlakken zo gelijkmatig mogelijk dienen te zijn.
Een oriënterende berekening wees uit dat een stranglengte van omstreeks 500 m optimaal zal zijn. Dat wil zeggen dat bij 6 dual-purpose-putten een hart-op-hartafstand van 100 m aangehouden dient te worden. Dit komt overeen met 12 putten hart-op-hart 45 m en met 20 putten hart-op-hart 26 m.
Voor de proefnemingen werd uitgegaan van full-scale-putten hart-op-hart 100 m. Na voortgezet onderzoek zou zonodig de puttenrij verdicht kunnen worden tot bijvoorbeeld 50 of 25 m, door er één respectievelijk drie putten tussen te plaatsen.
Zoals genoemd zal de normale totale levering uit de buffer ten hoogste 95 m^3/h bedragen. Omdat op het eiland ook rekening gehouden moet worden met een eventueel kortstondig uitvallen van de waterfabriek, is het noodzakelijk om de produktie uit de buffer gedurende enige dagen te kunnen opvoeren tot omstreeks 220 m^3/h. Gezien het zeer tijdelijke karakter van een dergelijke noodlevering wordt ervan uitgegaan dat deze niet maatgevend is voor het aantal putten.

Uit de proefnemingen is inmiddels gebleken dat een terugwindebiet van omstreeks 15 à 20 m^3/h per put langdurig toelaatbaar is.
Momenteel gaan de gedachten dan ook uit naar een puttensysteem wat in eindfase uit ten hoogste 5 à 7 dual-purpose-putten bestaat.

4.2 Situering van de infiltratie- en waarnemingsputten

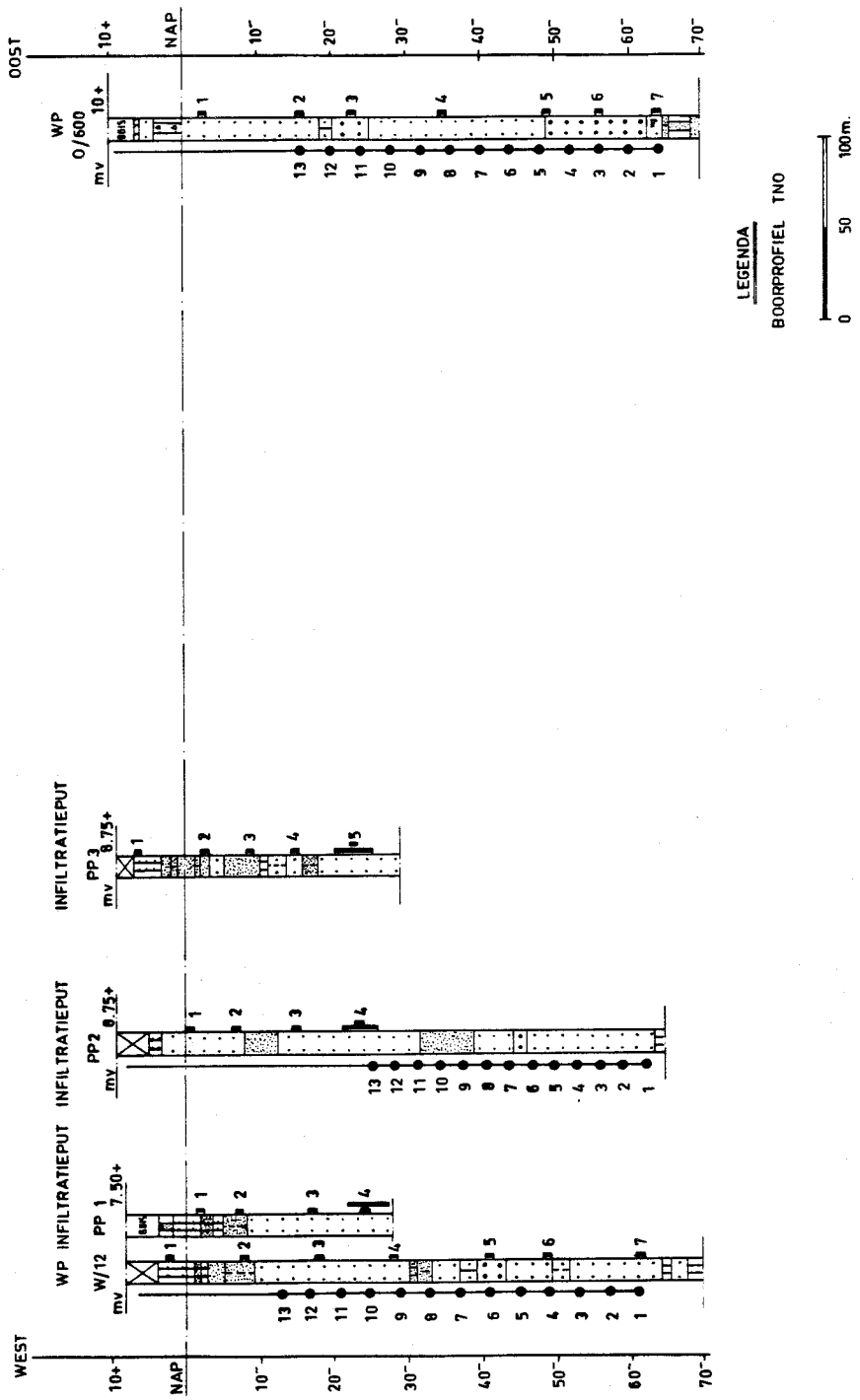
Op figuur 4 markeren 2 waarnemingsputten, de putten W12 en O600, globaal de lijn waarlangs de infiltratieputten opgesteld worden. Beide putten, W12 en O600, bevinden zich in de Noordberm van een West-Oost georiënteerde weg, de "Leemkuil" genaamd. In de Zuidberm van dezelfde weg bevindt zich de destillaatleiding van verdamperinstallatie Oudeschild naar pompstation Den Burg.

Doelbewust ligt de infiltratielocatie ten westen van het centrum van de zoetwaterlens. Dit heeft twee redenen: de voornaamste overweging is dat op de gekozen locatie enkele kleilagen aanwezig zijn welke een gelijkmatige beïnvloeding van de zoet/brak/zoutgrensvlakken mogelijk maken.
Een tweede overweging is dat omstreeks 1500 m Oostelijk zich voornoemd natuurreservaat "De Hooge Berg" bevindt, terwijl bovendien hier plaatselijk de keileem afwezig is. Overigens is ook 2500 m ten Zuiden van de infiltratieputten de keileem afwezig; Zuidelijker gaand ontbreekt deze geheel.
Direct ten Oosten van waarnemingsput W12 werd in 1977 de eerste proefput PP1 gebouwd. Deze bevindt zich 12,5 m hart-op-hart van W12. In 1978 volgden nog twee infiltratieputten, de nummers PP2 en PP3. Alle zijn aangeduid op figuur 4.
Om zowel potentialen als zoet/brak/zoutgrensvlakbe-

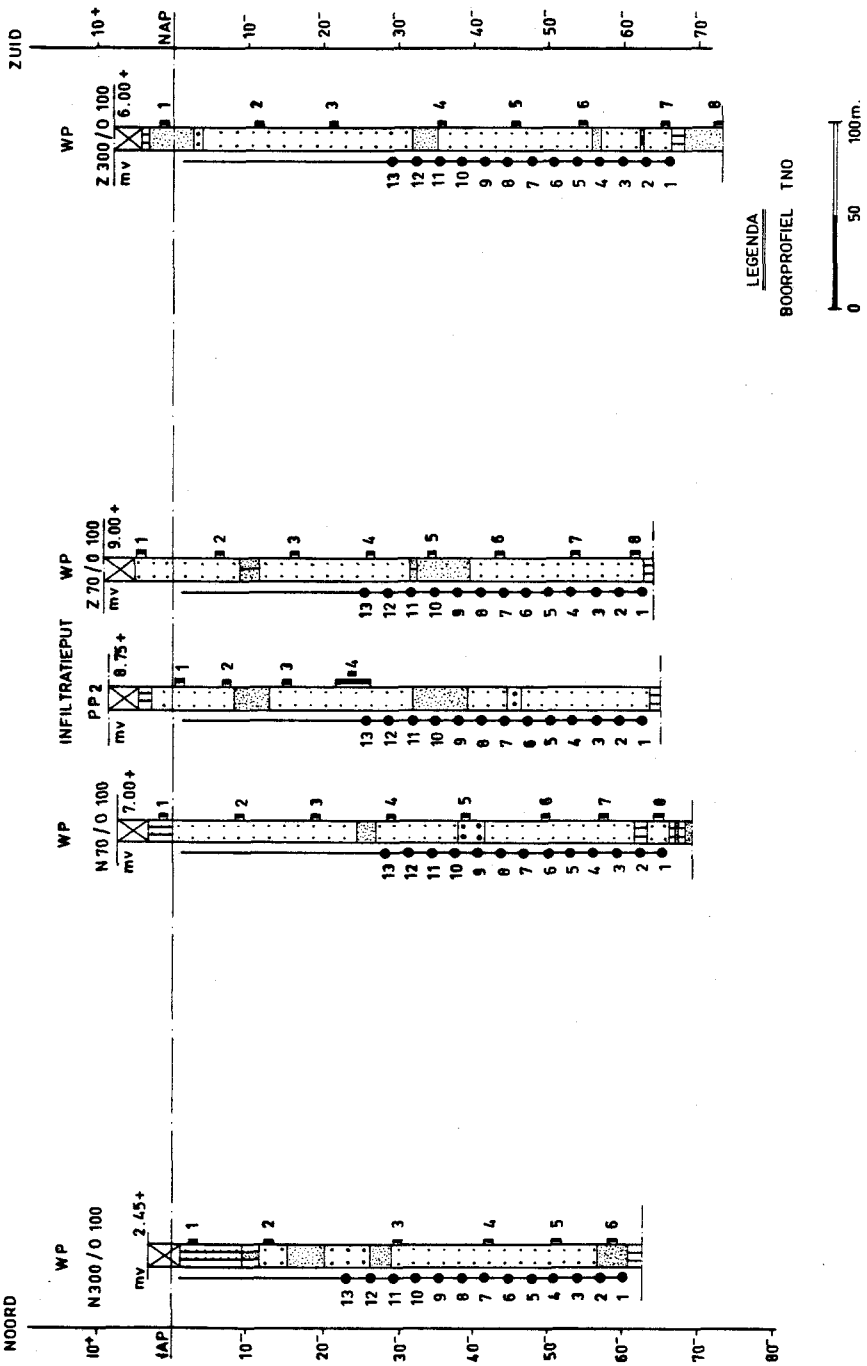


Figuur 4 - Puttenveld "Bergje"

wegingen adequaat te kunnen volgen, werd over de middelste infiltratieput PP2 een noord-zuid gerichte meetraai ingericht, dus globaal volgens de middelloodlijn over de drie infiltratieputten.
Alle putten reiken tot circa 70 m -NAP, dus tot diep in het onderliggende zoute grondwater en zijn voorzien van een geohmkabel. De meetraai bestaat uit twee putten ten noorden van infiltratieput PP2 en twee putten ten zuiden ervan. De afstanden tot PP2 bedragen 70 en 300 m. Van noord naar zuid gaande zijn deze vier waarnemingsputten genummerd respectievelijk N300/0100, N70/0100, Z70/0100 en Z300/0100.
Ook recht onder infiltratieput PP2 kunnen waarnemingen gedaan worden. Hiertoe is tijdens het boren, na het bereiken van de einddiepte voor het infiltratiefilter (circa 30 m -NAP), de boring met de kleinst mogelijke diameter voortgezet tot in het zoute grondwater en werd onder het infiltratiefilter een geohmkabel geïnstalleerd. Veel zorg werd besteed aan een goede afdichting van dit diepe boorgatgedeelte ten einde kortsluiting in de verticaal te voorkomen. Hierover meer in hoofdstuk 4.3.
In totaal werden in en rond het puttenveld dus 8 geohmkabels geïnstalleerd.
Figuur 5 geeft een schematisch doorsnede over de West-Oost gerichte rij van infiltratieputten.
Figuur 6 toont de doorsnede Noord-Zuid over de meetraai.



Figuur 5 - "Bergje" doorsnede West-Oost over de infiltratieputten



Figuur 6 - "Bergje" doorsnede Noord-Zuid over de meetraai

4.3 Technische uitvoering van de putten

4.3.1 Infiltratieputten

Alle infiltratieputten werden gebouwd als luchtliftzuigboring met een boorgatdiameter van 500 mm. Het infiltratiefilter is PVC rond 200 mm met een lengte van 4,8 m. De filtersleuven hebben een wijdte van 1 mm. Voor filtergrind is gekozen de gradatie 1,25 - 1,75 mm. In de grindomstorting van ieder infiltratiefilter werd op halve hoogte van het infiltratiefilter een vooromstort PVC-peilfilter van 1 m lang opgenomen. Ook op hogere niveaus werden, onderling gescheiden door kleistoppen van ten minste 1 m dik, enkele peilfilters aangebracht. In infiltratieput PP1 werd langs en boven het infiltratiefilter een geohmkabel aangebracht van 7 electrodenparen hart-op-hart 2 m.
Onder het infiltratiefilter van PP2 werd, zoals al genoemd, een geohmkabel als "zoutwachterstaart" aangebracht. Deze zoutwachterstaart werd gerealiseerd door onder het niveau van het infiltratiefilter, vanaf circa 30 m -NAP, de boring met de kleinst mogelijke diameter van 250 mm door te zetten tot de einddiepte van circa 65 m -NAP, dat wil zeggen tot circa 10 m beneden de zoet/zoutgrens.
Nadat deze geohmkabel van 13 electrodenparen hart-op-hart 4 m ingehangen was, werd het boorgat van deze zoutwachterstaart weer aangevuld. Tussen elk van de electrodenparen werd een kleistop ter dikte van 1 m aangebracht. De ruimten tussen de kleistoppen, dus ter hoogte van elk der electrodenparen, werden aangevuld met formatiemateriaal, fijn tot middelgrof zand. Deze procedure is tijdrovend en daarmee kostbaar, maar is de beste remedie tegen de dreiging van verticale kortsluitstroming naar het

direct erboven geplaatste infiltratie- tevens terugwinfilter. Heraanvullen met filtergrind in plaats van formatiemateriaal zou beduidend sneller en daarmee goedkoper gewerkt hebben.
Het was onvermijdelijk om enige boorspoelingtoeslag te gebruiken, hoewel het gebruik ervan tot het uiterste beperkt werd. Voor de bouw van infiltratieputten werd door PWN alleen gebruik van limburgiaklei toegestaan. Limburgiaklei bevat geen montmorillonietklei, zodat kleidispersie, dat wil zeggen zwelling en daarmee afname van de doorlatendheid van het formatiemateriaal, uitgesloten is. Kleidispersie was denkbaar omdat bij de infiltratie van gedestilleerd water het zoutgehalte van het poriewater drastisch zal afnemen.
Na het gereedkomen van elke infiltratieput werd deze ontwikkeld door intermitterend schoonpompen met een debiet van circa 50 m^3/h.

4.3.2 Waarnemingsputten

De waarnemingsputten werden eveneens gebouwd als luchtliftzuigboring, nu met een diameter van 400 mm. Voor de bouw van waarnemingsputten werd doelbewust het gebruik van limburgiaklei niet toegestaan en, indien absoluut onvermijdelijk, de toepassing van alleen bentoniet kleispoeling voorgeschreven. Het oogmerk hiervan was om de door de Rijks Geologische Dienst te onderzoeken monsters formatiemateriaal niet te verontreinigen met pollen (stuifmeelkorrels) van vreemde herkomst, zoals bij limburgiaklei denkbaar is. Zoals bekend bestaat bentonietklei uit montmorilloniet. Enige verlaging van de doorlatendheid ten gevolge van kleidispersie bij waarnemingsputten is dan ook niet uitgesloten. Voor een waarnemingsput werd dit van ondergeschikt be-

lang geoordeeld.

5 PROEVEN EN RESULTATEN

5.1 Proefperioden

- Eerste infiltratieproef op put PP1
  Aangevangen werd op 2 maart 1977 met een proefinjectie op infiltratieput PP1. Tevoren was op deze infiltratieput een korte pompproef annex stopproef gehouden. Het infiltratiedebiet werd geleidelijk opgevoerd van 10 m^3/h naar 30 m^3/h.
  Het doel van deze eerste proef was drieledig:
  - nagaan of verstopping van infiltratieput of formatie op zal treden;
  - testen van verdringbaarheid van zoet/zoutgrensvlakken;
  - vervingering (macro-dispersie) van grondwater/infiltratiewater-grensvlakken bepalen.

  Deze eerste proeffase werd afgesloten op 22 september 1977. De proefresultaten worden in de hoofdstukken 5.2 tot en met 5.5 kort behandeld.

- Tweede infiltratieproef op putten PP1, PP2 en PP3
  Deze tweede proeffase werd aangevangen op 29 augustus 1978, direct na het gereedkomen van de infiltratieputten PP2 en PP3 en van de Noord-Zuid georiënteerde meetraai.
  De doelstellingen van deze tweede proef werden:
  - een buffervoorraad op praktijkschaal opbouwen, dat wil zeggen 200.000 à 300.000 m^3 water infiltreren;
  - gedrag van de freatische grondwaterstanden volgen;
  - afname van de putweerstand PP1 volgen.

Vrijwel continu werd, tot het einde van deze proef op 15 april 1979, een debiet van circa 45 m^3/h geïnfiltreerd, gelijkmatig verdeeld over de drie putten. Zie voor de proefresultaten de hoofdstukken 5.2 tot en met 5.5.

- De derde proeffase betrof een produktieproef op de putten PP1, PP2 en PP3
  Hierbij werden, onder zekere restricties, de infiltratie- en terugwinhoeveelheden bepaald door de momentane vraag naar drinkwater en de periodieke overschotten aan gedestilleerd water.
  Inmiddels was een afvoerleiding van het puttenveld "Bergje" naar het pompstation Den Burg gereedgekomen en tevens afstandbediening gerealiseerd. De produktieproef ving in mei 1979 aan en loopt tot op heden (1984).
  De hoofddoelstellingen van de produktieproef zijn:
  - bestudering van brakwatermengverschijnselen over een reeks van jaren;
  - nader onderzoek van de freatische grondwaterstanden;
  - in bedrijfsmatig opzicht ervaring opdoen met het gebruik van een ondergrondse buffer in een drinkwatersysteem.

5.2 Onderzoek naar putverstopping

Tijdens de eerste infiltratieproef op put PP1 traden, geheel tegen de verwachtingen in, toch verstoppingsverschijnselen op. Deze, onregelmatig opgetreden, verstoppingsverschijnselen bleken niet te verwijderen door de put gedurende een aantal uren met een hoog debiet terug te pompen. Zowel de put zelf als de omringende formatie verstopten stoots-

gewijs, waarbij de oorzaak van de verstopping meetbaar in enkele dagen doordrong vanuit de putconstructie zelf naar de omringende formatie. Bron van de verstopping bleek een bij de waterfabriek tussengeschakeld ophardingsfilter te zijn, waarin tijdens het oplossen van kalkbrokken slibbestanddelen uit de kalk vrijkwamen. Deze slibbestanddelen werden tijdens debietswisselingen meegevoerd met het infiltratiewater naar de infiltratieput en drongen tot meters diep in de formatie door. Nadat het ophardingsfilter buitengeschakeld was gedurende de infiltratieperioden, traden tot op heden geen verstoppingsverschijnselen van betekenis meer op. Tijdens de tweede en de derde proeffase namen de weerstanden van put PP1 en de omringende formatie zelfs af door voortgezette infiltratie en later ook door terugwinnen. De later gebouwde putten PP2 en PP3 toonden nooit enig verstoppingsverschijnsel.
Opmerkelijk is dat nadien in put PP1 tijdens de produktieproef (de derde proeffase) een enkele maal een geringe weerstandstoename werd geconstateerd, die veroorzaakt bleek te worden door ijzervlokken uit de verdamperinstallatie, terwijl tegelijkertijd in de beide andere putten geen enkele weerstandstoename te constateren viel. De vermoedelijke reden is dat tijdens de voorgaande proefnemingen op PP1 de poriën van het aangrenzende formatiemateriaal en van de grindomstorting van PP1 blijvend vernauwd zijn, waardoor enige meegevoerde ijzervlok wel in de PP1, maar niet in de nadien gebouwde PP2 en PP3 weerstandstoename veroorzaakte.

5.3 Onderzoek naar grensvlakverplaatsingen van zoet en zout grondwater

Gedurende de eerste infiltratieproef op PP1 werden

de zout/brak/zoutgrensvlakken in de onmiddellijke omgeving van de infiltratieput circa 4 m neerwaarts verdrongen. De waarnemingen werden gedaan in de waarnemingsput W12 op 12,5 m afstand van PP1. Opmerkelijk is dat de dikte van de brakwaterschijf hierbij niet aanwijsbaar toe- of afnam. Tijdens de tweede infiltratieproef met drie infiltratieputten werd het eerder geconstateerde beeld van de verdringing van brak- en zoutwater niet essentieel anders. Recht onder de infiltratieput PP2 werden de zoet/brak/zoutgrensvlakken circa 3 m neerwaarts verdrongen, terwijl ook hier, voor zover na te gaan, de dikte van de brakwaterzone niet toenam. De neerwaartse beweging van deze grensvlakken onder PP1 stabiliseerden zich gedurende de tweede infiltratieperiode. Ook in de meetraai noord-zuid over PP2 werden grensvlakverplaatsingen vastgesteld ten opzichte van de aanvangstoestand in 1978.
Tijdens de tweede infiltratieperiode kwamen de volgende grensvlakverplaatsingen tot stand:

waarnemingsput N300/O100: brakwaterbeweging nihil;
waarnemingsput N70/O100 : brakwaterzone circa 1 m gedaald;
waarnemingsput Z70/O100 : brakwaterzone circa 0,5 m gedaald;
waarnemingsput Z300/O100: brakwaterbeweging nihil.

Bovenstaande gegevens berusten op voorlopige interpretatie. Een gedetailleerde evaluatie van het onderhavige onderzoek dient nog afgerond te worden.

Momenteel, dus in de derde proeffase, is in totaal sedert de start van het infiltratieproject omstreeks 840.000 m^3 geïnfiltreerd en ongeveer 450.000 m^3 hiervan weer teruggewonnen.
Ten opzichte van de start van de infiltratie in 1977-1978 is de neerwaartse verdringing van de

brakwaterschijf in totaal geworden (januari 1984):
waarnemingsput N300/O100: circa 0,5 m;
waarnemingsput N70/O100: circa 1,0 m;
infiltratieput PP1 : circa 5,5 m;
infiltratieput PP2 : circa 3,0 m;
waarnemingsput Z70/O100: circa 1,0 m;
waarnemingsput Z300/O100: circa 0,5 m.

5.4 Onderzoek naar freatische grondwaterstandsveranderingen

In het infiltratiegebied "Bergje", dus ter plaatse van de Pleistocene keileemopduiking, liggen de grondwaterstanden dermate hoog boven het piëzometisch niveau, dat beïnvloeding van de freatische grondwaterstanden hier ter plaatse zeer beperkt zullen blijven.
Op enkele kilometers buiten het infiltratiegebied bevinden zich polders waar de kwel een zeer geringe wijziging zou kunnen ondergaan. Invloed van betekenis kon echter ook hier uitgesloten worden geacht.
Wel zouden grondwaterstandsveranderingen van betekenis kunnen optreden op de overgangszone polderland-keileem, met name in het natuurreservaat "De Hooge Berg", waar lekken in de keileem aangetoond waren.
Om deze effecten af te schatten werden eerst oriënterende analytische stationaire berekeningen op basis van radiaalsymmetrie en spiegeling uitgevoerd. Later werden deze gevolgd door een numeriek stationair model.
De uitkomst was dat in de gevoelige overgangszone tussen polderland en keileem, uitgaande van een (te ongunstige) stationaire benadering, een beïnvloeding van de freatische waterstanden van omstreeks 10 cm tijdens terugwinning in de zomer zou kunnen

optreden. Omdat de beoogde infiltraties en onttrekkingen in werkelijkheid van zeer tijdelijke aard zijn, is te verwachten dat de werkelijke effecten geringer zullen zijn.
Besloten werd om verspreid over het gebied 10 landbouwbuizen bij te plaatsen en een nauwkeurig geconditioneerde infiltratie- en terugwinproef uit te voeren. Uit deze proef kon als conclusie getrokken worden dat zowel infiltratie als terugwinning geen waarneembare effecten op de freatische grondwaterstanden veroorzaakten.

5.5 Onderzoek naar macro-dispersieverschijnselen

Het dispersie-onderzoek was tweeledig. In hoofdstuk 5.3 werd één facet ervan, het onderzoek naar brakwatervorming, beschreven.
Het tweede aandachtspunt is de mate waarin het geïnfiltreerde gedestilleerde water zich vermengt met het natuurlijke grondwater. Dit is van belang voor de nazuivering tot drinkwater van het teruggewonnen infiltratiewater. Om dit te bepalen werden doorslagcurven bepaald van het uit infiltratieput PP1 in waarnemingsput W12 aangekomen infiltratiewater. De metingen werden uitgevoerd met de geohmkabel in W12. Het zoutgehalte van gedestilleerd water is nihil, zodat een extreem contrast werd verkregen.
Uit de metingen werd vastgesteld dat in het geïnfiltreerde pakket, gaand van PP1 naar W12 (op 12,5 m afstand), de verblijftijden globaal een factor 2 uiteenlopen.
Bovendien bleek uit dit onderzoek dat een dicht onder het injectiefilter gelegen kleilens, welke volgens de boorbeschrijvingen slechts zeer licht ontwikkeld was, in hydrologisch opzicht een belangrijke afschermende werking uitoefende. Het uit waarnemingsfilters verkregen potentiaalbeeld bevestigde dit.

Bloemendaal, maart 1984

INJECTIEPUTPROEVEN IN HET WATERVLAK NABIJ CASTRICUM

H.M.G. Lebouille
Provinciaal Waterleidingbedrijf van Noord-Holland

SAMENVATTING

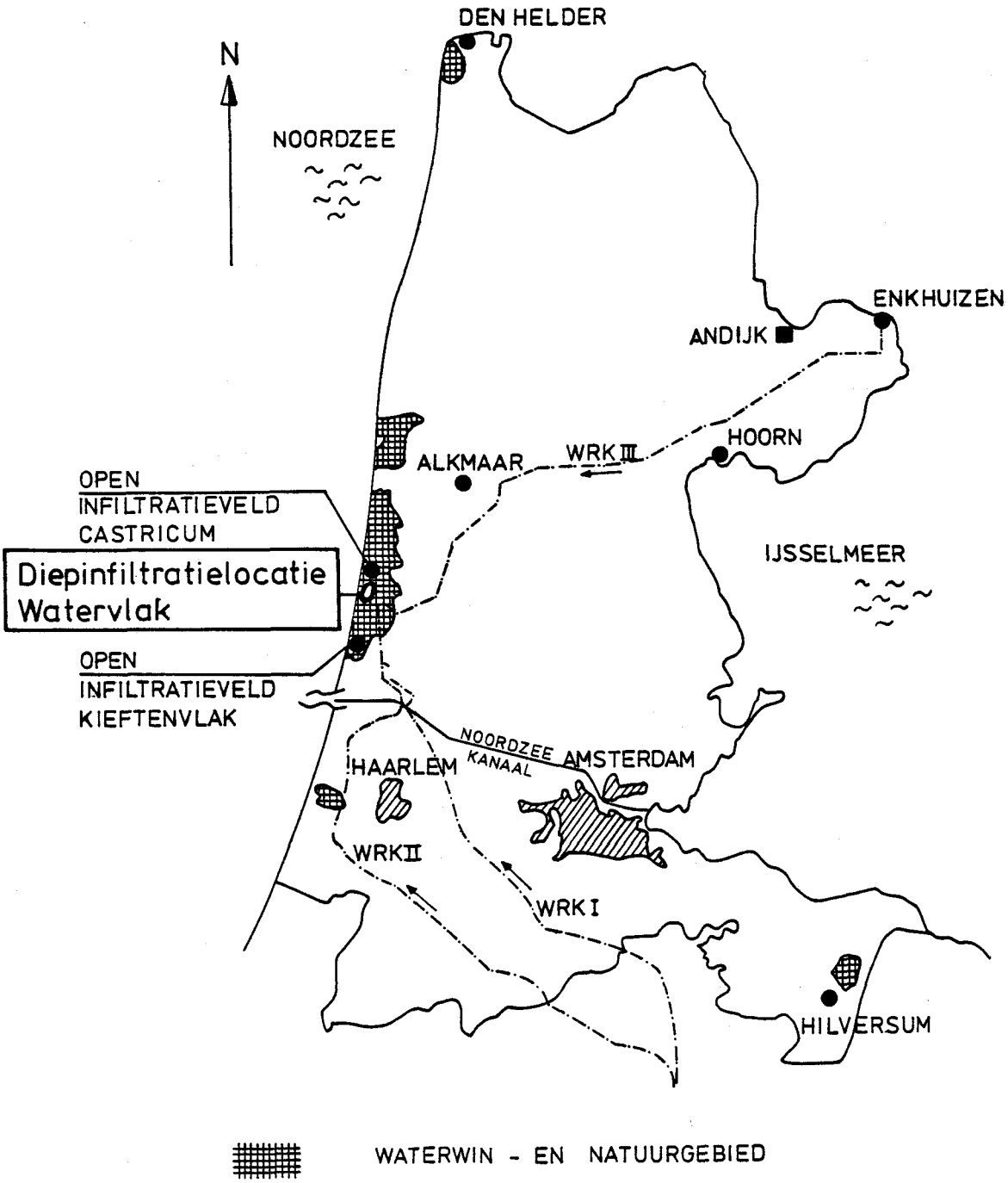
Bij het Provinciaal Waterleidingbedrijf van Noord-Holland (PWN) worden in de proeflocatie Watervlak, gelegen in het Noordhollands Duinreservaat ten zuiden van het open-infiltratiegebied Castricum, injectieproeven uitgevoerd. Daartoe zijn twee putten gemaakt waarvan de filters zijn gesteld in een voor diepe putinfiltratie geschikte laag (tussen circa 50 en circa 100 m -NAP). De putten zijn zodanig geconstrueerd, dat bij een verwachte infiltratiesnelheid van 1 m/uur op de boorgatwand een injectiedebiet van circa 60 m^3/h mogelijk is.
Eén put (IP2) wordt sinds december 1981 gevoed met water dat rechtstreeks afkomstig is van het WRK-III zuiveringsstation te Enkhuizen. De MFI van het aangeboden infiltratiewater is hoog (ordegrootte tussen 10 en 50 s/l^2) en fluctueert sterk. De put verstopt in ernstige mate op de "boorgatwand".
De andere put (IP1) wordt gevoed met WRK I/II-water dat vóór infiltratie een bodempassage van minimaal 30 cm ondergaat in twee daarvoor aangelegde proefpanden. Na een lange inloopperiode van de proefpanden is de infiltratieproef in oktober 1982 gestart. De MFI van het injectiewater is beduidend lager (tussen 5 en 15 s/l^2) dan van IP2. Opvallend is dat bij IP1 de gemeten verstopping niet op de "boorgatwand" (als bij IP2) maar op de "filterwand" optreedt.

1 INLEIDING

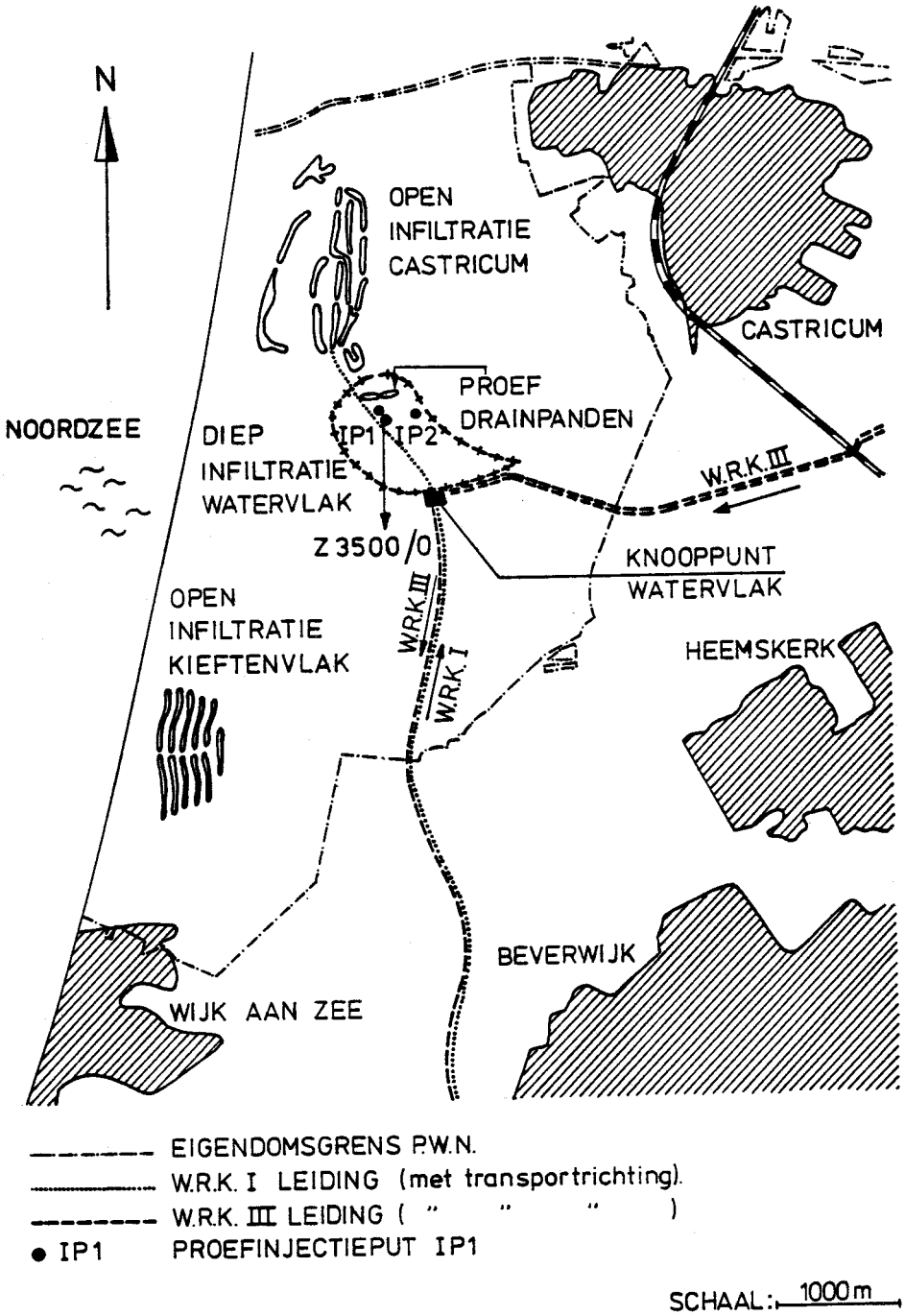
Het Provinciaal Waterleidingbedrijf van Noord-Holland voorziet een groot deel van de provincie Noord-Holland van drinkwater. Ten behoeve van de watervoorziening van het vasteland van de provincie ten noorden van het Noordzeekanaal (PWN-Noord) moet in 1990 de waterwincapaciteit uitgebreid zijn. Substantiële uitbreiding van de bestaande grondwaterwinningen en open infiltratiegebieden lijken uit hoofde van natuurbehoud niet realiseerbaar. Als alternatief onderzoekt het PWN of het mogelijk is de wincapaciteit te vergroten via diepinfiltratie. In het Noorden grenzend aan het bestaande open infiltratiegebied Castricum, ligt het "Watervlak", zie figuur 1. Oriënterend geohydrologisch onderzoek heeft uitgewezen dat dit gebied geschikt is voor diepinfiltratie. In de volgende hoofdstukken zal nader op de lokatiekeuze worden ingegaan.
Waterwintechnisch is er een aantal problemen, welke momenteel nader onderzocht worden. Eén daarvan is het probleem van de injectieputverstopping. Ten behoeve van dat onderzoek zijn in het Watervlak twee proefinjectieputten gebouwd. Eén put (IP1) wordt gevoed door WRK I/II-water, dat een "drainpandpassage" heeft ondergaan. De andere put wordt rechtstreeks, dus zonder extra voorzuivering, gevoed door halffabrikaat, afkomstig van WRK-III te Enkhuizen.

2 DE WATERWINNING BIJ HET PWN

Ten behoeve van de drinkwatervoorziening van PWN-Noord worden verschillende win- en produktiemethoden in onderlinge samenhang gebruikt. De winningen



Figuur 1 - Ligging van de open en diepinfiltratie-locaties van het PWN in de provincie Noord-Holland



Figuur 2 - Locatie proefputten en proefdrainpanden

van grond- en oppervlaktewater vormen de basiscomponenten. Als aanvulling hierop wordt oppervlaktewater geïnfiltreerd.
In het duingebied van Noord-Holland wordt nog slechts een geringe hoeveelheid natuurlijk grondwater gewonnen en op eenvoudige wijze tot drinkwater gezuiverd. In de infiltratiegebieden Castricum en Kieftenvlak (Heemskerk) wordt een belangrijke hoeveelheid voorgezuiverd oppervlaktewater via open panden geinfiltreerd, na bodempassage opgepompt en vervolgens tot drinkwater verwerkt, zie figuur 1.
Aan het IJsselmeer te Andijk wordt oppervlaktewater via verschillende procestrappen direct gezuiverd tot drinkwater.
Bij de systeemkeuze en bedrijfsvoering van de waterwinning staan twee uitgangspunten voorop:

1. de winning dient zodanig te zijn dat de levering van kwalitatief goed drinkwater in voldoende hoeveelheden, zelfs onder extreme omstandigheden, gewaarborgd blijft;
2. de winning van grondwater dient zodanig te zijn dat er een zo gering mogelijke invloed op het natuurlijk milieu is.

Voor het eerste uitgangspunt dient voldaan te worden aan de volgende voorwaarden:

1. er dient een mogelijkheid te zijn om oppervlaktewater te bergen;
2. het winsysteem moet zodanig zijn dat er een kwaliteitsafvlakking optreedt (meer constante kwaliteit).

Het tweede uitgangspunt heeft onder andere de volgende consequenties:

1. de winning van natuurlijk grondwater blijft onder normale omstandigheden beperkt. Hierdoor is

uitbreiding van deze winning ter vergroting van de produktiecapaciteit uitgesloten;

2. om overbodig ruimtebeslag te voorkomen, zijn de bestaande open-infiltratiegebieden compact ontworpen. Hetgeen betekent dat:
   a. de capaciteit niet zonder negatief effect op de drinkwaterkwaliteit opgevoerd kan worden;
   b. de buffervoorraad voor extreme omstandigheden, bij stijging van het waterverbruik, niet toereikend zal zijn.

Recente maatschappelijke ontwikkelingen hebben er toe geleid dat de invloed van de winning op het natuurlijk milieu zwaarder in rekening gebracht wordt dan voorheen en dat uitbreiding van de open-infiltratie in de duinen wellicht onaanvaardbaar is.
Om toch te kunnen voldoen aan de eis met betrekking tot de leveringszekerheid, heeft het PWN besloten onderzoek te verrichten naar de mogelijkheid van infiltratie op grotere diepte.

3 DIEPINFILTRATIELOKATIE

3.1 Ruimtelijke oriëntatie

De plaats voor een diepinfiltratieproject ten Noorden van het Noordzeekanaal wordt primair bepaald door de verdeling van zoet en zout grondwater en de doorlatendheid van de bodem. Als daarbij gevoegd wordt de oriëntatie ten opzichte van de bestaande waterleidinginfrastructuur, blijkt dat het duingebied een geschikte locatie voor zo'n diepinfiltratieproject is.
Op figuur 2 is te zien dat de ruwwatertransportleidingen uit Jutphaas (WRK-I/II) en Enkhuizen (WRK-III) in het transportknooppunt Watervlak onderling

gekoppeld zijn. Vandaaruit kan het ruwe water verdeeld worden over de verschillende afnemers c.q. infiltratiegebieden.
Tussen dit knooppunt en het open infiltratiegebied Castricum ligt het Watervlak. Dit gebied bezit die geohydrologische eigenschappen, die diepinfiltratie mogelijk kunnen maken. Bovendien heeft het gebied de planologische bestemming waterwingebied. Om bovenstaande redenen is het Watervlak uitgekozen om een aantal proefnemingen met diepinfiltratieputten uit te voeren.

3.2 Plaats van de injectiefilters in de diepte

Het diepinfiltratiesysteem, zoals men denkt dat bij het PWN tot ontwikkeling te brengen, bestaat uit een centrale rij injectieputten, aan beide zijden geflankeerd door onttrekkingsputten. De onttrekkings- en injectieputten worden in dezelfde watervoerende laag opgesteld. Om de gedachten te bepalen, kan men zich een ruit voorstellen met op de zijden onttrekkingsputten en op de lange diagonaal de injectieputten. Hoe platter de ruit, hoe geringer de verblijftijd-spreiding. Hoe vierkanter, hoe groter de verblijftijd-spreiding.
De puttenconfiguratie is hierbij van grote invloed op de drukopbouw in de injectieput. De drukopbouw is ook afhankelijk van:

1. het injectie-/onttrekkingsdebiet;
2. de geohydrologische parameters;
3. de mate van verstopping.

Om grondbreuk te voorkomen mag de totale druk een kritische maximale waarde niet overschrijden. In het algemeen kan men stellen, dat hoe dieper een filter wordt geplaatst, hoe groter, grondmechanisch

gezien, de toelaatbare druk is. Echter hoe groter de druk in de aquifer, hoe groter de invloed op de freatische grondwaterstand zal zijn. Om die invloed te dempen, verdient het aanbeveling het filter onder een goed ontwikkelde slechtdoorlatende laag te plaatsen. Met betrekking tot de plaats van "het Watervlak" kan in genoemde context het volgende gesteld worden:

1. tussen een diepte van circa 55 tot circa 95 meter -NAP bevindt zich een goed doorlatende, zoet water bevattende aquifer waarin een overdruk van circa 15 m waterkolom ten opzichte van het grondwaterniveau is toegestaan;
2. tussen circa 40 en circa 50 meter -NAP bevindt zich een stelsel van afzettingen, dat een grote verticale weerstand heeft (de "leemlaag");
3. op circa 95 tot 105 meter -NAP bevindt zich eveneens een stelsel van minder goed doorlatende lagen (de "sliblaag"). De overgang tussen zoet en zout grondwater bevindt zich in of nabij deze "sliblaag"

De beide proefinjectieputten bevinden zich dan ook in het zoet water bevattende pakket tussen de genoemde "leem-" en "sliblaag" in.

4 DE PROEFOPZET

In eerste instantie is aangenomen, dat injectieputverstopping in hoofdzaak veroorzaakt wordt door zwevende deeltjes in het injectiewater. Er zijn twee hoofdwegen om dat probleem te benaderen:

1. er zorg voor dragen dat de voorzuivering van het infiltratiewater zodanig is, dat injectieputverstopping zeer langzaam optreedt (zelden "ontstoppen");

2. het ontwikkelen van een zodanige schoonmaakprocedure, dat verstopping met eenvoudige middelen is op te heffen (frequent "ontstoppen").

Besloten is beide benaderingen te onderzoeken. Daartoe zijn twee proefinjecties uitgevoerd.
Doel van beide proeven is na te gaan hoe de putverstopping zich gedraagt onder verschillende condities.

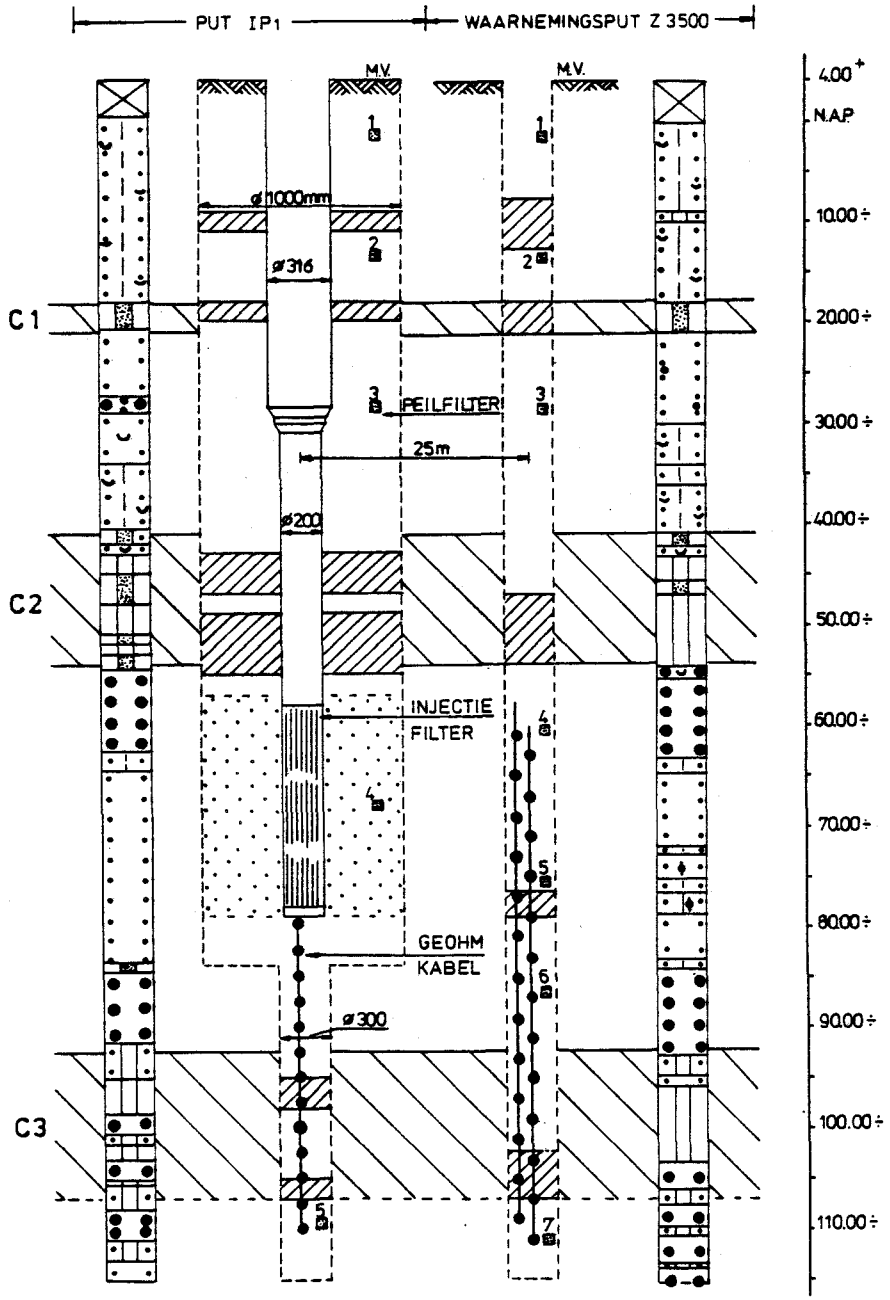
Proef 1: proef met IP1
Uit het bestaande open infiltratiegebied in Castricum wordt, in een speciaal daartoe aangelegd proefpand, water van WRK (Jutphaas) ingelaten. Dat water ondergaat een bodempassage en wordt vervolgens in injectieput 1 geïnfiltreerd. De achterliggende gedachte bij deze proefneming is, dat het wellicht technisch mogelijk is de bestaande panden beter te benutten, dat wil zeggen zonder inperking van de produktiecapaciteit van het bestaande open winsysteem en zonder uitbreiding van het bestaande pandoppervlak, de produktie verhogen. Daartoe zouden de middelste 10 meter van de 30 meter brede panden van drains moeten worden voorzien. Bij een lengte van 5000 meter zou op deze wijze 50.000 m^2 infiltratie-oppervlak beschikbaar kunnen komen.

Proef 2: proef met IP2
Met de proef op IP2 wordt de tweede benadering beproefd. Halffabrikaat uit Enkhuizen (WRK-III) wordt hier rechtstreeks zonder aanvullende zuivering in IP2 geïnjecteerd.

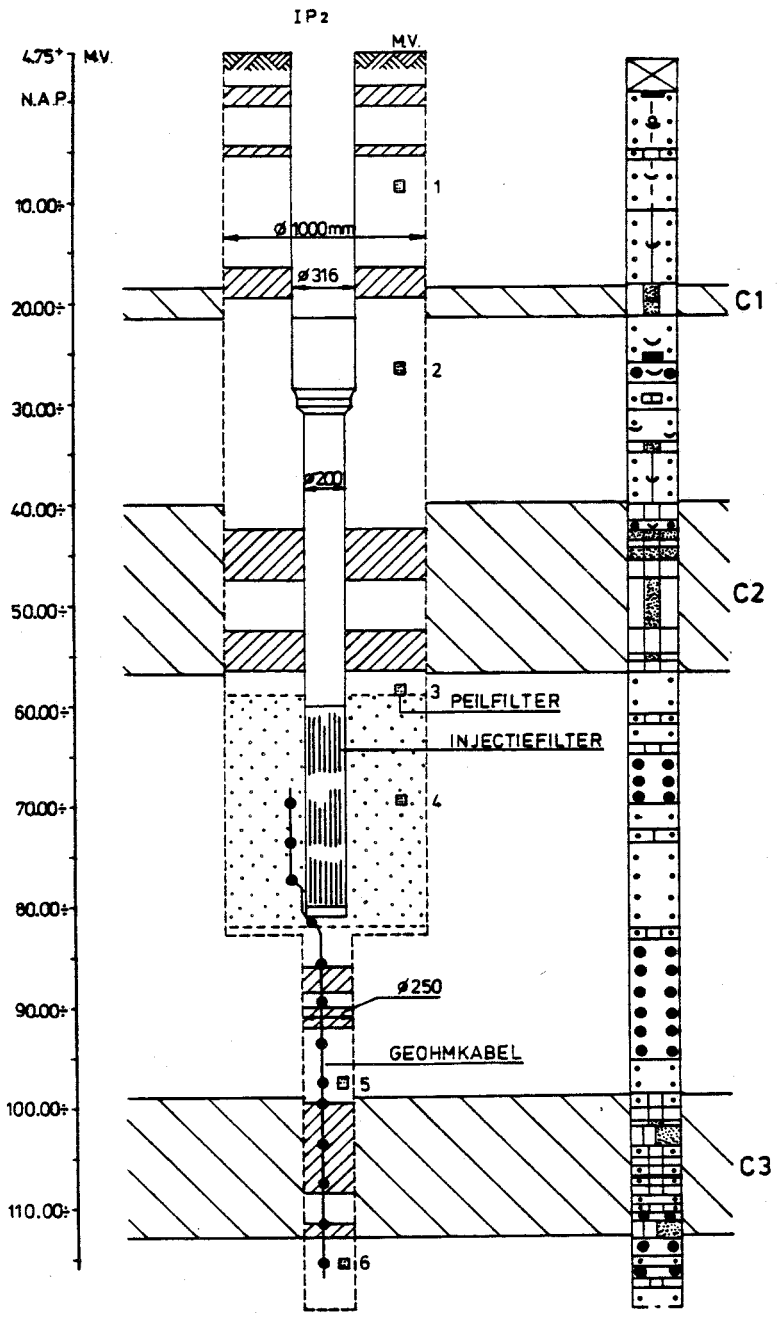
5 DE INJECTIEPUTTEN EN DE DRAINPANDEN

5.1 Injectieput IP1

- Gegevens met betrekking tot de putopbouw en constructie zijn te vinden in figuur 3. Tot een diepte van 84 m -NAP is het boorgat Ø 1000 mm, daaronder tot 115 m -NAP Ø 300 mm. Op zes plaatsen zijn kleistoppen aangebracht. Rond het injectiefilter (Ø 200, 20 m lang, spleetgrootte 1 mm) is filtergrind (sortering 1,2 -1,7 mm) aangebracht. De rest van het boorgat is opgevuld met uitkomende grond.
- Van elkaar gescheiden door ten minste één kleiprop zijn 5 vooromstorte peilfilters aangebracht (lengte 1 m). Verder is het boorgat voorzien van een electrodenkabel met een electrodenpaar, afstand van 2,5 m.
- De putkelder bestaat uit twee prefab betonringen van 1 m hoog en 2 m in diameter. Het geheel is ondergronds gebouwd. De eigenlijke putkop bestaat uit een flens, waaraan een pomp met stijgbuis hangt. De constructie maakt het mogelijk dat onder druk geïnjecteerd kan worden. Door deze stijgbuis wordt het infiltratiewater in de put gebracht. Om gasbelvorming (en daarmee verstopping) te voorkomen hangt in de stijgbuis van de pomp een injectiebuis. Die injectiebuis kan afhankelijk van het gewenste injectiedebiet door een buis met een andere diameter vervangen worden.
- De waarnemingsput op 25 m (Z3500) afstand is voorzien van 7 peilfilters en 2 geohmkabels, zie figuur 3.



Figuur 3 - Putopbouw IP1 en waarnemingsput Z3500 met geohydrologische schematisatie (Boorbeschrijving DGV-TNO)



Figuur 4 - Putopbouw IP2 met geohydrologische schematisatie (Boorbeschrijving DGV-TNO)

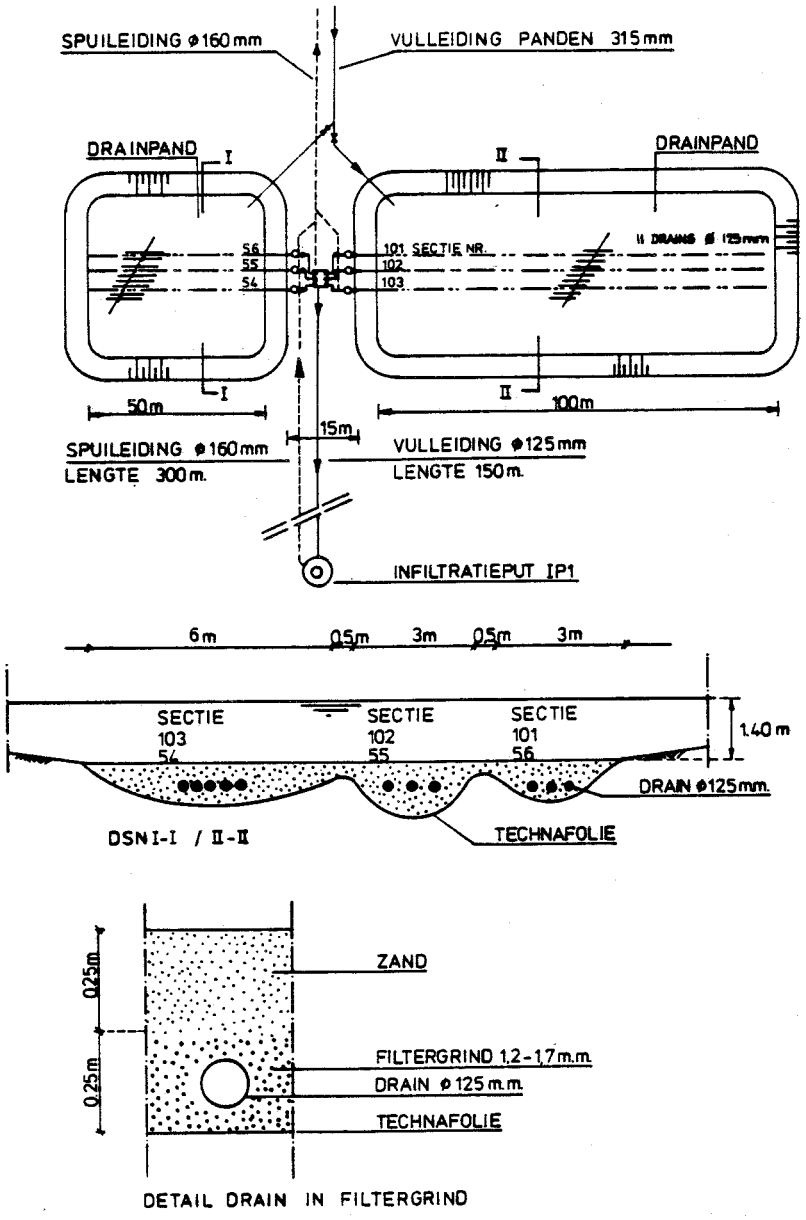
5.2 Infiltratieput IP2

Gegevens met betrekking tot de putopbouw en constructie zijn te vinden in figuur 4. Behoudens enkele kleine detailafwijkingen is de putconstructie in opbouw identiek aan IP1.
Afwijkend is het toegepaste injectiesysteem. Aan de buitenkant van de stijgbuis van de pomp zijn 4 injectiebuizen gemonteerd, elk voorzien van een afsluiter. Elke buis is zodanig gedimensioneerd, dat bij een voordruk van 10 m waterkolom, zonder gasbelvorming, 30 m^3/uur per buis geïnjecteerd kan worden.

5.3 Drainpanden

Gegevens met betrekking tot de drainpandopbouw en constructie zijn te vinden in figuur 5 en foto's 1 en 2.
Ter voorzuivering van het aangeboden water, zijn infiltratiepanden aangelegd. Eén pand met een bodemlengte van 100 m en één met een bodemlengte van 50 m. Op 50 tot 80 cm onder de bodem is een ondoorlatende folie aangebracht. Bovenop dit folie ligt een aantal drains (Ø 125 mm) die ingebed zijn in een bed van filtergrind. De rest is opgevuld met uitkomende grond (duinzand). Uitzondering hierop vormt sectie 56, waarin drains, omwikkeld met een filterkous, direct in het duinzand liggen. Elk pand is verdeeld in 3 secties (2 secties van 3 m breed en 1 sectie van 6 m breed). Per sectie zijn de drains aangesloten op een verzameldrain. Deze verzameldrain mondt uit in één sectieput. Vanuit de sectieput wordt het water opgepompt en naar een verzamelpunt gebracht. Daar wordt het bemeterd en bemonsterd. Afhankelijk van de kwaliteit wordt het dan geïnfiltreerd in IP1 of teruggepompt naar het open infiltratiegebied.

Figuur 5. Overzicht proefdrainpanden



Figuur 5 - Overzicht proefdrainpanden (sectie 56 is uitgerust met een filterkous zonder omstorting)

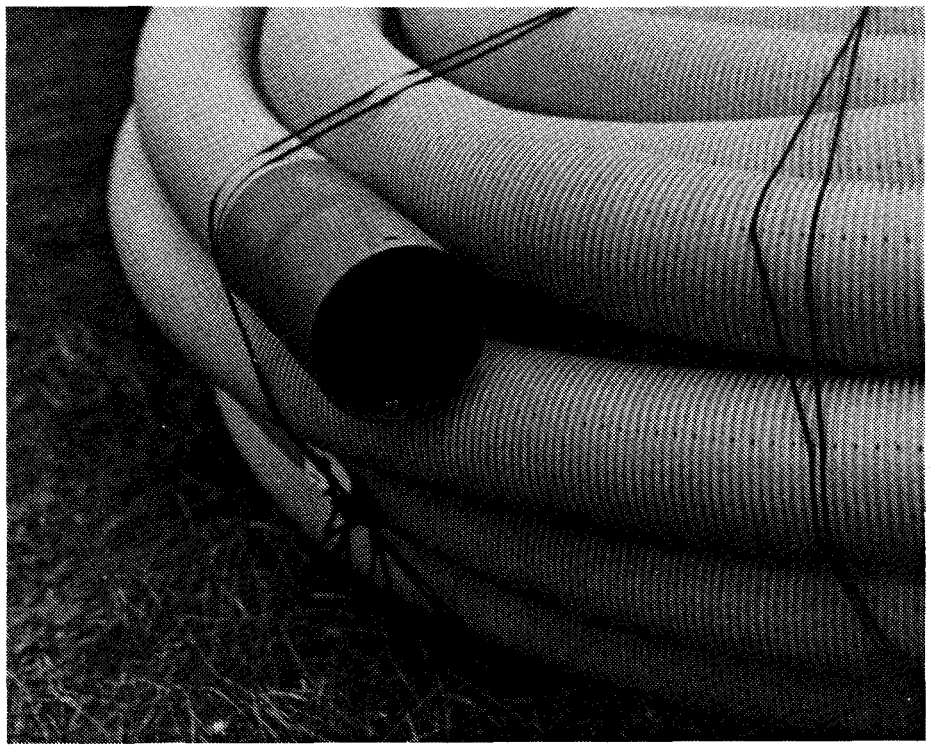


Foto 1 - Een drain

Foto 2 - Het aanstorten met filtergrind

6 DE METINGEN

6.1 De putweerstand

2 maal per week worden de peilen in de peilfilters, het injectiedebiet en de injectiewatertemperatuur gemeten. Met behulp van deze gegevens wordt de specifieke weerstand bij 10 °C berekend (cm/(m^3/h) bij 10 °C). De weerstand op de overgang filter - filtergrind wordt bepaald uit het peilverschil tussen injectiefilter en de omstorting (filter 4).
De weerstand op de overgang filtergrind - aquifer wordt bepaald uit het verschil tussen het peil in de omstorting (filter 4) en:

- voor IP1: het peil in het peilfilter 5 in de waarnemingsput Z3500 op circa 25 m afstand;
- voor IP2: het peil in peilfilter 5 onderin dezelfde put op een diepte van circa 98 m.

Voor de toepassing van de temperatuurcorrectiefactor is steeds uitgegaan van de temperatuur van het injectiewater op het moment van de peilmetingen.

6.2 Weerstand van de drainpanden

2 maal per week wordt het peilverschil tussen de afzonderlijke sectieputten en het peil in het drainpand bepaald. Uit dit peilverschil wordt, na temperatuurcorrectie, de specifieke weerstand berekend (als beschreven in paragraaf 6.1).
Deze weerstand is opgebouwd uit de volgende componenten:

- de intreeweerstand pand - bodem;
- de hydraulische weerstand in de bodem;

- de intreeweerstand de drain in;
- de hydraulische weerstand in de drain.

In een drietal secties (103, 54 en 56) zijn meetopstellingen geplaatst welke dienen om inzicht te verschaffen over de plaats van de weerstandsopbouw. Door vandalisme werden deze meetseries zodanig verstoord dat zij weinig bruikbaar zijn. Vooralsnog wordt ervan uitgegaan, dat de totale weerstandsopbouw op de pandbodem plaatsvindt.
Bij sectie 55 is geconstateerd dat er een kortsluitstroom bestaat tussen pand en drain. Door niet opgehelderde oorzaak is de gronddekking van een gedeelte van de drains verdwenen. De daarop uitgevoerde metingen zijn daarom niet bruikbaar.

6.3 Kwaliteitsgegevens

Naast de in de paragrafen 6.1 en 6.2 aangegeven metingen ten behoeve van de bestudering van de weerstandsopbouw worden er kwaliteitsgegevens verzameld:

- ten behoeve van de bestudering van de verplaatsing van het zoetwaterfront wordt in de putten 1 maal per 2 weken de volgende meting gedaan:
  - de elektrische weerstanden in de zoutwachters;
  - in de filters 3, 4, 5, en 6 van IP2; van IP1 filter 5 en in de waarnemingsput de filters 5 en 7 de temperatuur, de pH, het chloridegehalte en het elektrisch geleidingsvermogen;
- ten behoeve van de bestudering van de invloed van de waterkwaliteit op de injectieputverstopping wordt 1 maal per 2 weken in de panden en in elke afzonderlijke sectie het volgende gemeten:
  - de troebelheid, MFI, temperatuur, pH, zuurstof en het ijzergehalte.

Bij de injectieputten wordt bovendien 2 maal per week de MFI van het injectiewater gemeten. Bij de bespreking van de proefresultaten zullen van deze parameters slechts de MFI en een aantal chloridecijfers betrokken worden.
Opgemerkt moet worden, dat van het infiltratiewater van IP2 uitgebreide analyseresultaten ter beschikking staan. Dat zijn de (standaard)analyses die ten behoeve van de kwaliteitscontrole dagelijks of wekelijks te Enkhuizen uitgevoerd worden.

7 DE PROEFRESULTATEN

7.1 IP2

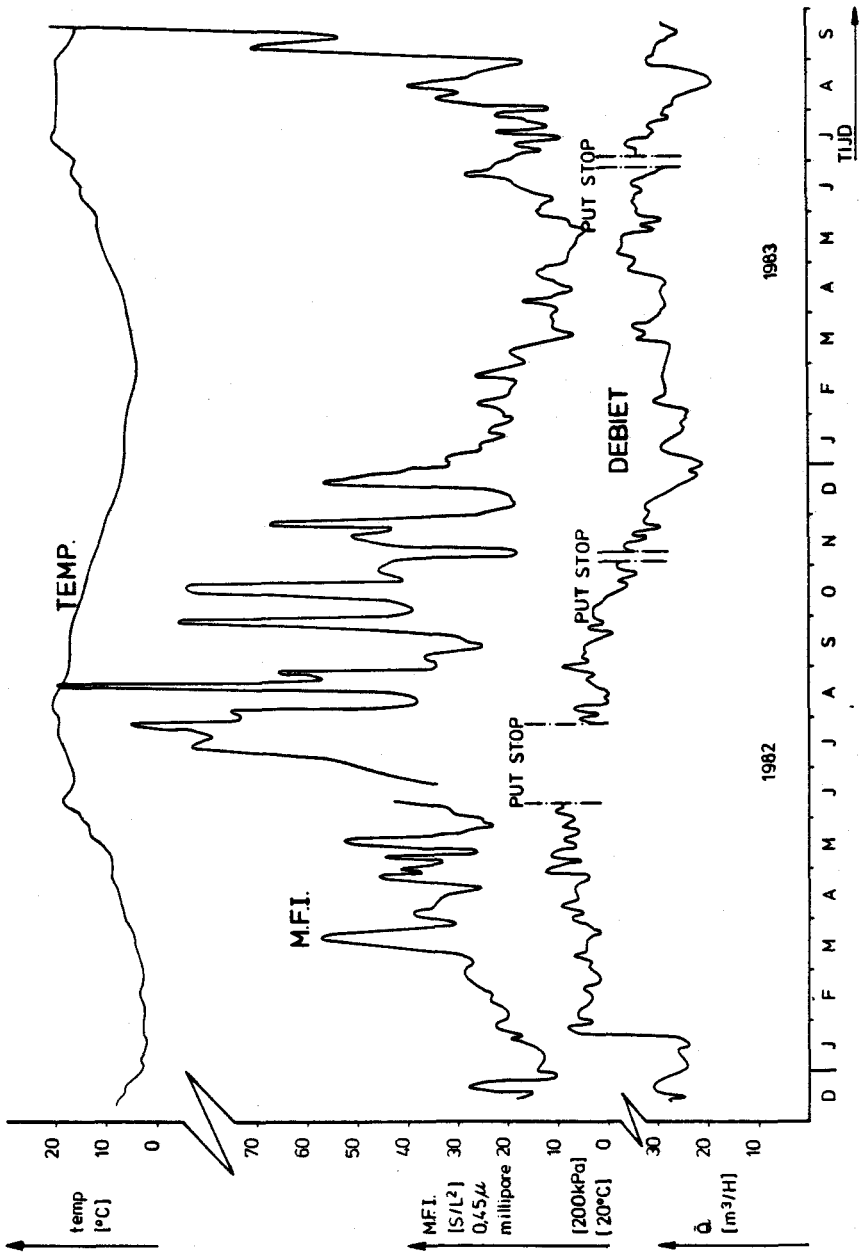
De proef met IP2 startte in december 1981.
De put is zodanig ontworpen dat bij een snelheid van 1 m/h op de boorgatwand een injectiehoeveelheid van 60 m^3/h wordt gehaald. De werkelijke aanvangssnelheid in de aquifer is afhankelijk van de effectieve porositeit (bij 33 % is dat 3 m/h). Deze hoeveelheid is in de praktijk niet gehaald omdat niet voldoende injectiedruk aangelegd kon worden.

7.1.1 Putbelasting

Na een korte inloopperiode werd de injectieproef gestart met een debiet van circa 45 m^3/h. Vanaf eind juli 1982 tot december 1982 moest geleidelijk het debiet verminderd worden tot een vrijwel stabiele hoeveelheid van circa 30 m^3/h. Deze hoeveelheid komt overeen met een injectiesnelheid van circa 0,5 m/h op de boorgatwand, zie figuur 6.

7.1.2 De waterkwaliteit

De MFI van het infiltratiewater is hoog. Deze varieert tussen circa 10 en 140 (s/l^2).



Figuur 6 - Het verloop van temperatuur, MFI en debiet Q in IP2

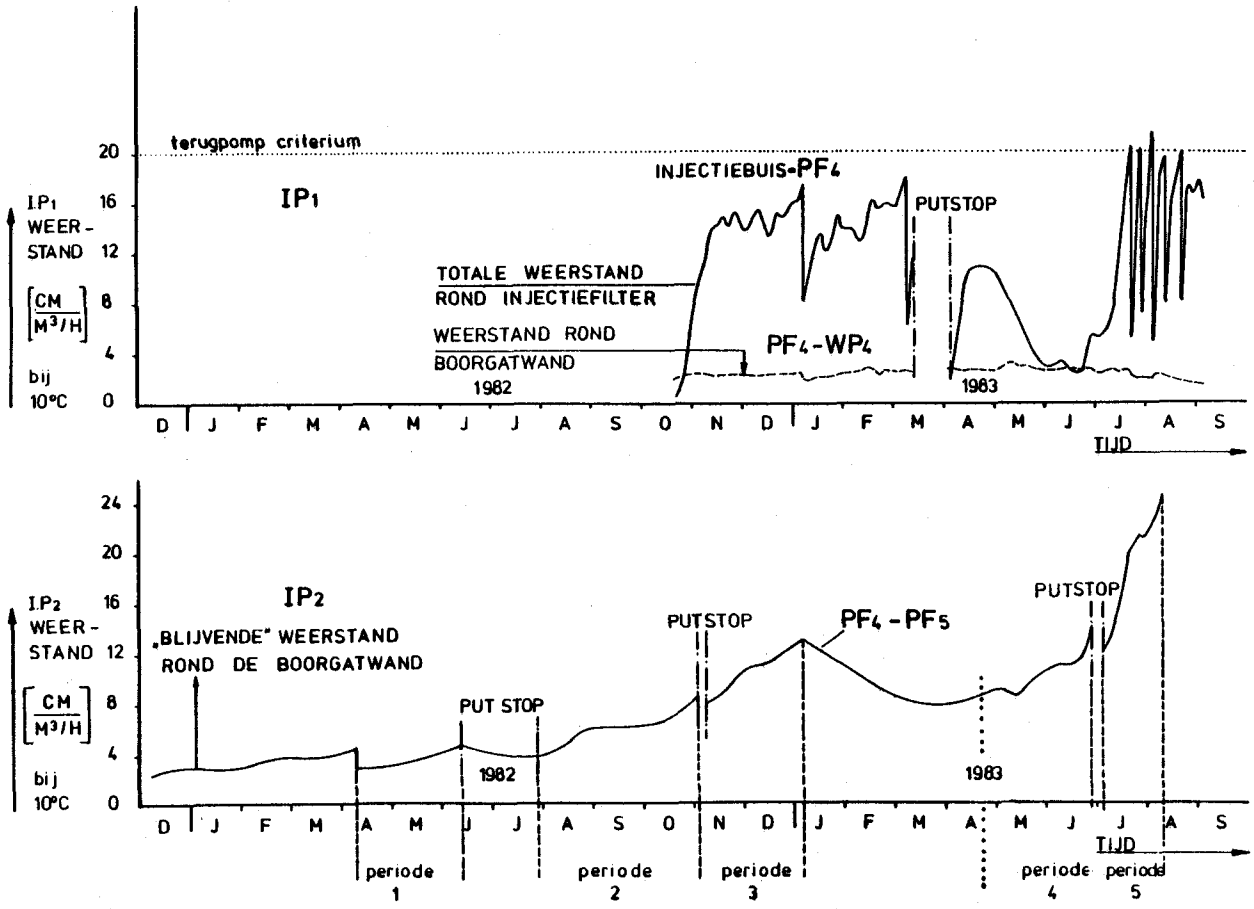
Het lijkt erop dat de waarde van de MFI (0,45 μm) seizoenmatig varieert. Er is een zekere overeenkomst met de eveneens seizoenmatige fluctuatie van de injectiewatertemperatuur.

7.1.3 De hydraulische putweerstand (figuren 7 en 8)

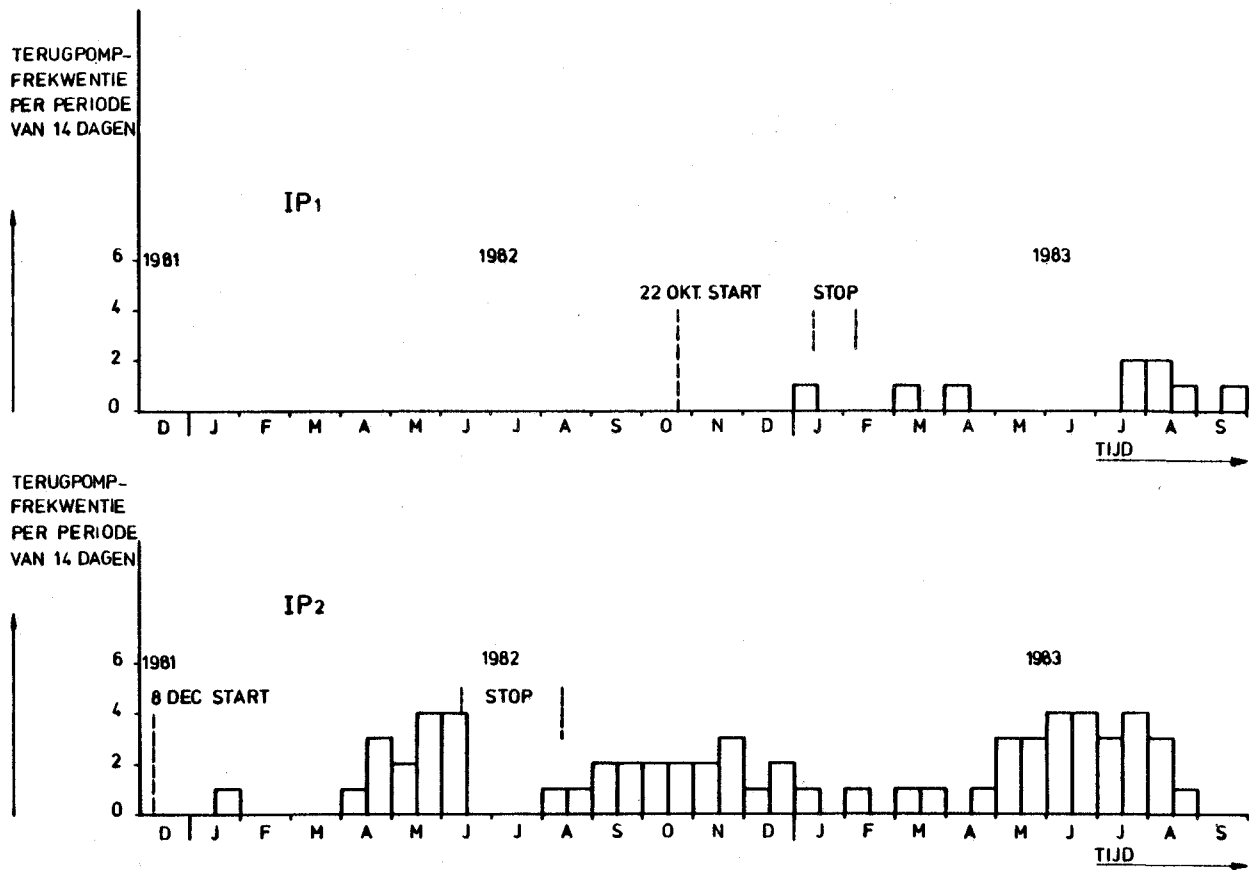
De verstopping van IP2 vindt plaats rond de overgang omstorting - aquifer (boorgatwand).
Deze verstopping blijkt uit twee componenten te zijn opgebouwd:

- een tijdelijke verstopping, die met kortstondig schoonpompen opgeheven kan worden;
- een "blijvende" verstopping die, na schoonpompen met het hier toegepaste schoonpompregime, overblijft.

In figuur 7 is wat betreft IP2 alleen de "blijvende" verstopping weergegeven.
Tijdens de proefneming werd gedurende 3 perioden (zie figuur 6 en 7) de injectie onderbroken. Tijdens deze perioden bleek de weerstand spontaan af te nemen. Eveneens een afname, maar dan gedurende een injectieperiode, is waar te nemen in januari en februari 1983. In deze periode is de temperatuur van het injectiewater op een minimum. Waarschijnlijk wijzen beide waarnemingen op een mogelijke verstoppingsoorzaak door microbiologische activiteit. De resterende verstopping zou dan mogelijk toegeschreven kunnen worden aan een fysisch/chemische verstoppingscomponent.
Duidelijk waarneembaar is een geleidelijke toename van de "blijvende" verstopping. Daarin zijn 5 perioden te onderscheiden (zie figuur 7).
Per periode verschilt de gekozen maximale drukopbouw, die tussen 2 terugpompfasen is toegestaan (y in onderstaande tabel). De karakteristieken van de-



Figuur 7 - Weerstandsverloop in de tijd van respectievelijk IP1 en IP2



Figuur 8 - Terugpompfrequentie van respectievelijk IP1 en IP2 als functie van de tijd

ze perioden staan vermeld in onderstaande tabel.

	Q	MFI	t	$	x	y
periode 1 april/ juni 1982 (8/4-11/6)	43	34	11	1.4	0,03	2.5
periode 2 juli/ oktober 1982 (27/7-29/10)	40	55	18	0.8	0,037	5
periode 3 november/ januari 1983 (4/11-4/1)	26	35	11	1	0,055	7.5
periode 4 april/ juli 1983 (26/4-12/7)	29	18	13	1.5	0,1	10
periode 5 juli/ augustus 1983 (12/7-9/8)	25	18	20	1.5	0,23	vrij > 10

waarin: Q = gemiddeld debiet in m^3/h

MFI = rekenkundig gemiddelde MFI (0,45 µm Millipore bij 200 kPa en 20 °C)

t = gemiddelde temperatuur injectiewater in °C

$ = terugpompfrequentie (aantal malen/ week)

x = toename verstopping in $cm/(m^3/h)/dag$ bij 10 °C (verstoppingssnelheid)

y = toegelaten toename van de tijdelijke verstopping tussen 2 terugpompfasen in $cm/(m^3/h)$ bij 10 °C

Deze tabel laat zien dat de toegelaten toename van de verstopping (y) tussen twee terugpompfasen een zekere relatie kan hebben met de verstoppingssnelheid (x).

7.1.4 Verplaatsing zoetwaterfront

Filter 6 van IP2 is geplaatst onder de sliblaag, filter IP2/5 juist daarboven. Uit de waarnemingen blijkt dat verdringing van zout door zoet water zeer langzaam gaat, zie figuur 9. Opvallend is dat de dalende tendens van het chloride gehalte in IP2/6 ook tijdens de stopperiode (juni, juli 1982) doorgaat.

7.2 IP1

De proef met IP1 is aanvankelijk gestart in maart 1981. Door opstartproblemen met de drainpanden is de proef vanaf juni 1981 onderbroken tot oktober 1982. Alleen de resultaten van de proef ná oktober 1982 worden in de beschouwing over de putverstopping meegenomen.

7.2.1 De putbelasting

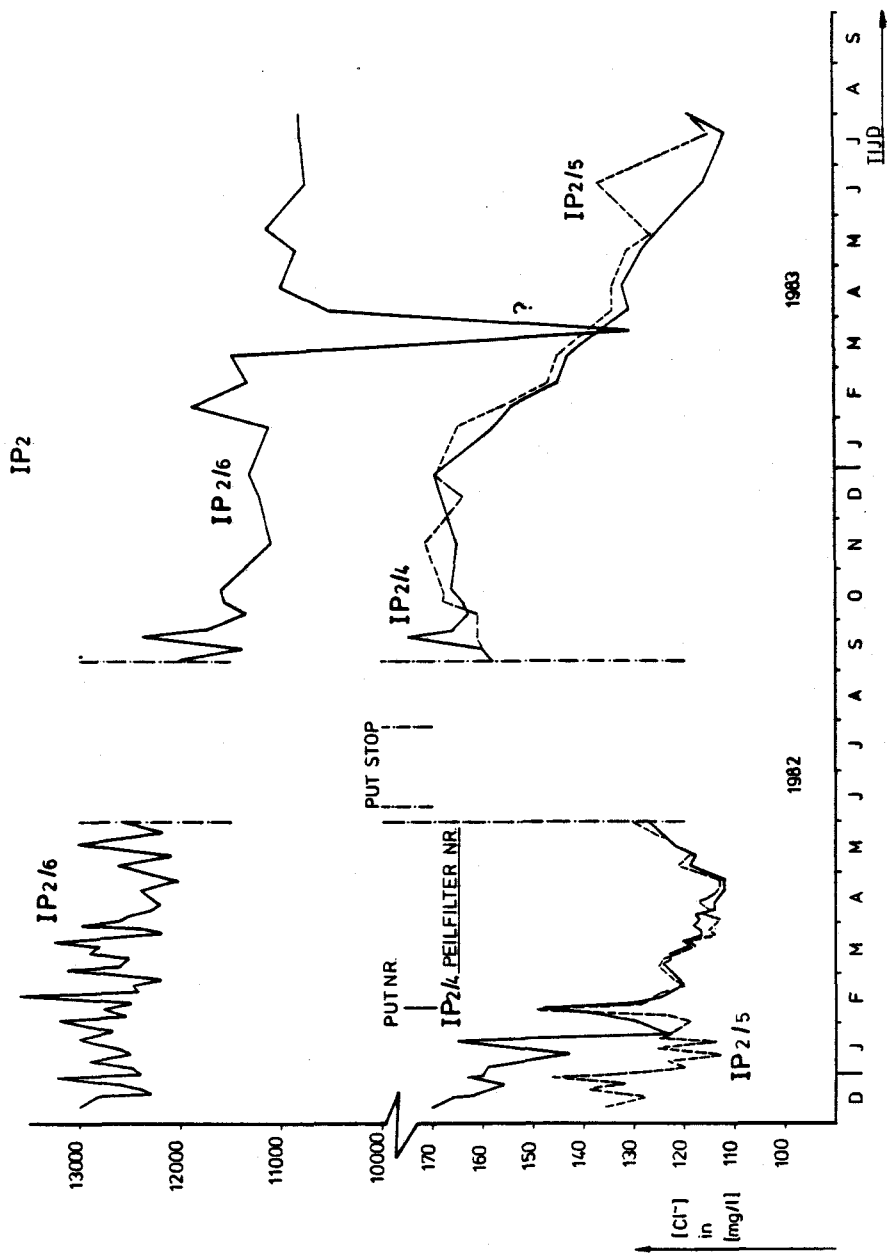
Sinds 22 oktober 1982 wordt circa 30 m^3/h in de put geïnjecteerd. Dat komt overeen met een snelheid op de boorgatwand van circa 0,5 m/h, zie figuur 10.

7.2.2 De waterkwaliteit

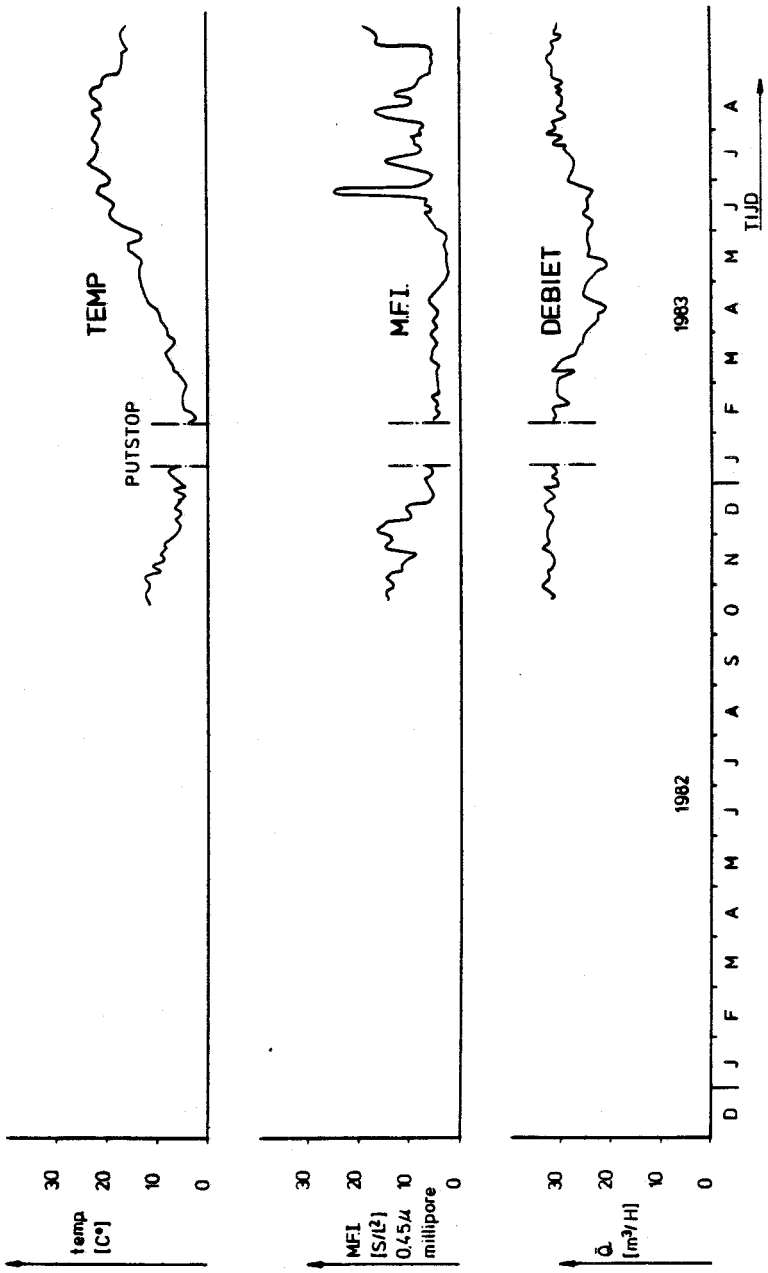
De MFI van het infiltratiewater varieert tussen 5 en 25 s/l^2. Ook hier lijkt het erop dat de MFI seizoenmatig fluctueert.

7.2.3 De hydraulische putweerstand

De weerstandsopbouw vindt in tegenstelling tot IP2 plaats op de overgang filter - filtergrind (injectiebuiswand). Op de boorgatwand zijn nog geen bete-



Figuur 9 - Het chloridegehalte als functie van de tijd in toevoer (IP2/4) en op 2 lager gelegen filters



Figuur 10 - Het verloop van temperatuur, MFI en debiet Q in IP1

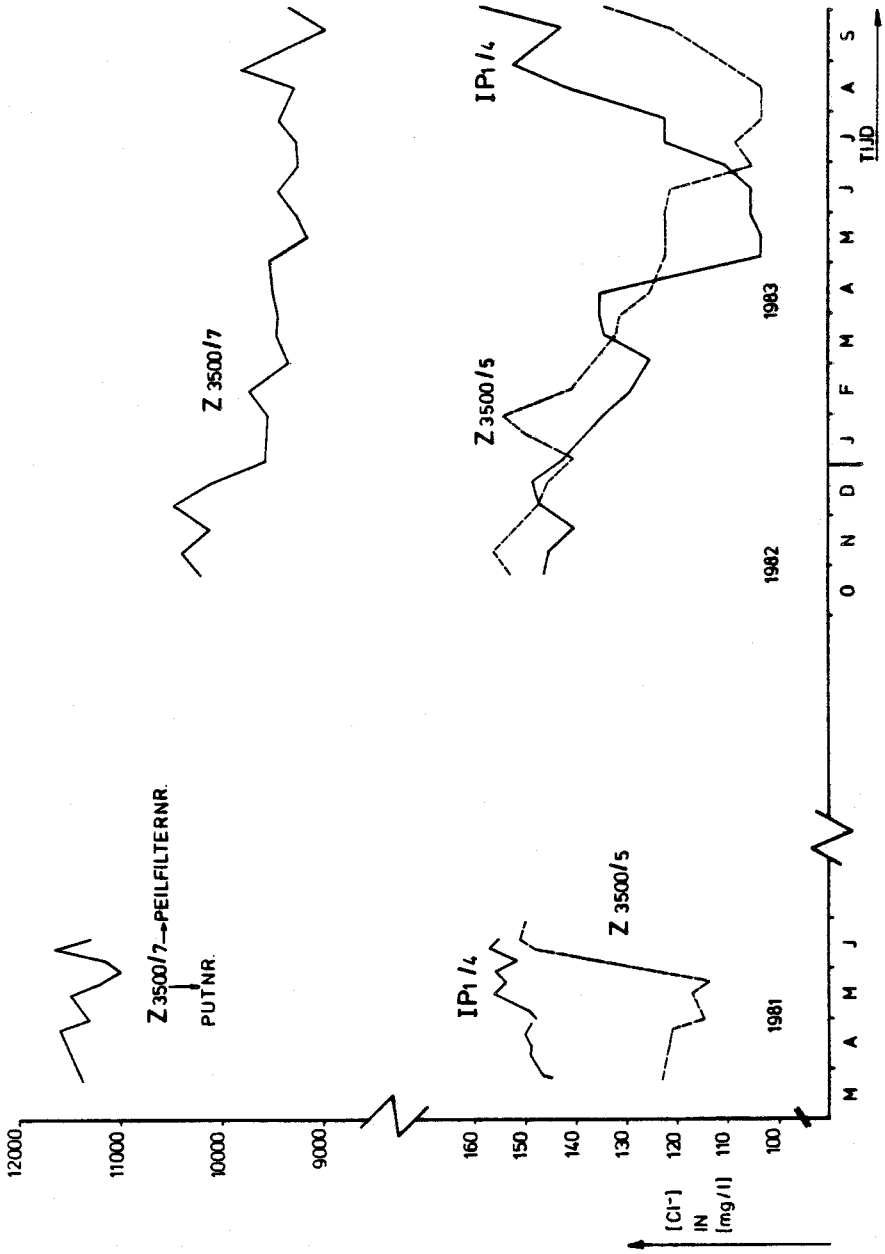
kenisvolle weerstandsveranderingen waargenomen. Ook deze verstopping blijkt uit meerdere componenten te bestaan:

- tijdelijke verstopping, die met terugpompen gereduceerd kan worden;
- "blijvende" verstopping, die niet met terugpompen gereduceerd kan worden. Het is nog niet duidelijk hoe deze zich in de tijd zal gedragen.

Zoals reeds gemeld, is bij IP2 alleen de "blijvende" verstopping op de figuur weergegeven. Omdat bij IP1 relatief weinig metingen van "blijvende" weerstand zijn uitgevoerd is voor deze put de som van de tijdelijke en blijvende verstopping weergegeven. Bij deze proef wordt de toegestane totale verstopping gerelateerd aan de maximaal toelaatbare injectiedruk. Deze is geschat op circa 15 meter waterkolom. Bij een aangenomen minimale temperatuur van 4 °C van het injectiewater en een injectiedebiet van 60 m^3/h is een maximale drukopbouw van 25 cm/(m^3/h) bij 4 °C toegestaan. Omgerekend naar de standaardtemperatuur van 10 °C, betekent dat dat de drukopbouw maximaal 20 cm/(m^3/h) bij 10°C mag bedragen. Bij het bereiken van deze waarde wordt schoongepompt.
Opvallend is, dat gedurende mei, juni 1983 een spontane weerstandafname optrad.

7.2.4 Chloridegehalten, zoetwaterfront

Filter Z3500/7 is geplaatst onder de "sliblaag". Evenals bij IP2 is te zien dat verdringing van de zoet-/zoutgrens een langdurig proces is.
Opvallend is het verschil in chloridegehalten tussen begin 1981 en eind 1982. In deze periode wordt niet geïnfiltreerd en evenals bij IP1/6 gaat ook hier in filter Z3500/7 de chlorideconcentratie omlaag.



Figuur 11 - Het chloridegehalte als functie van de tijd in toevoer (IP1/4) en op twee plaatsen in waarnemingsput

Duidelijk is te zien dat het infiltratiewater in Z3500/5 als een scherp front arriveert (periode maart-juni 1981).

7.3 De drainpanden

7.3.1 De plaats van de drains

- Het hart van alle drains ligt op 37,5 cm onder de pandbodem.
- De secties 103 en 54 bevatten elk 5 drains. Deze liggen midden onder de sectie met een hart-op-hart afstand van 30 cm. In de praktijk betekent dat, dat er 5 drains liggen in een 175 cm breed en 25 cm dik bed van filtergrind.
- De secties 101, 102 en 55 bevatten elk 3 drains. Deze liggen ook onder het midden van de sectie met een hart-op-hartafstand van 50 cm. Ze zijn per drain ingebed in een filtergrindbed van 25 x 25 cm.
- Sectie 56 is gelijk aan 101, 102 en 55. Het filtergrind ontbreekt. Om binnendringen van zand te voorkomen is de drain omwikkeld met een nylon "filterkous".
- In de secties 101, 103, 54 en 56 bedraagt de afstand tussen hartdrain en technofolie 12,5 cm.
- In de secties 102 en 55 bedraagt deze afstand 42,5 cm.

7.3.2 Bedrijfsvoering

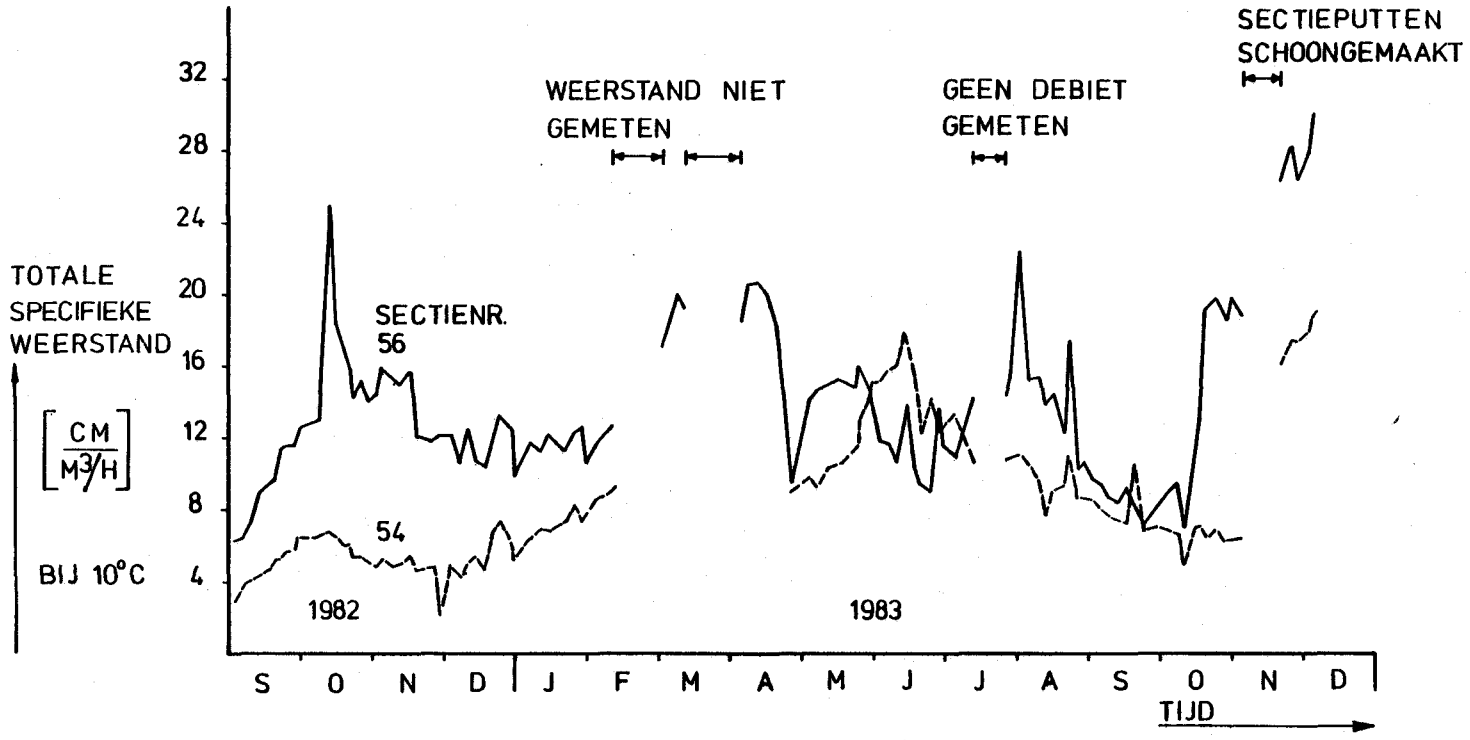
De proeven met de drainpanden hebben zich tot nu toe in hoofdzaak gericht op de vraag of deze pandjes voldoende water konden leveren voor de proef op IP1. Daartoe moet het totaal debiet van de drainpanden 60 m^3/h bedragen (het ontwerp-debiet van IP1).

De hoeveelheid door elke sectie afzonderlijk te

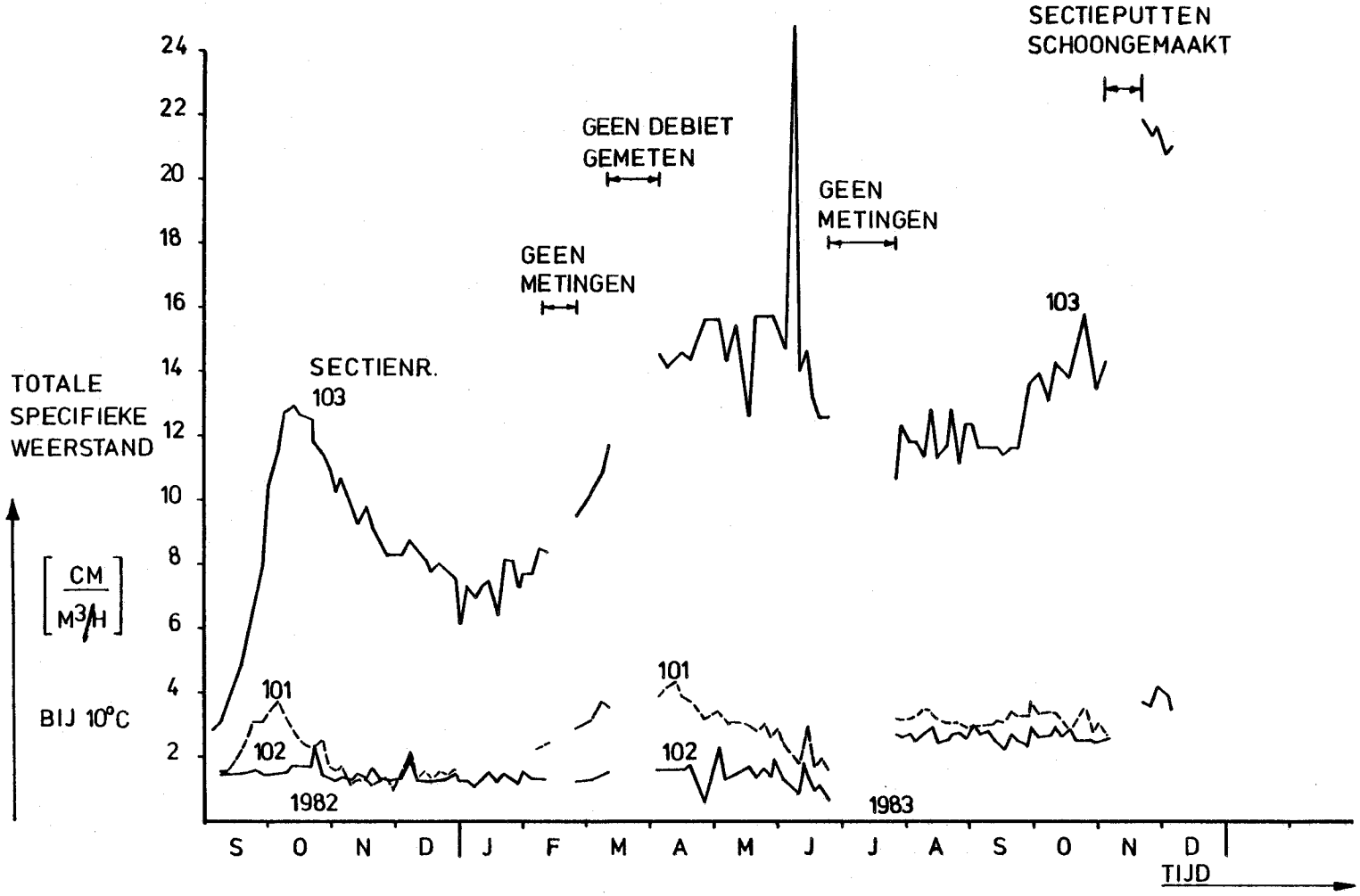
produceren, wordt naar rato van het effectieve sectie-oppervlak verdeeld. Dat effectieve sectie-oppervlak wordt bepaald door het produkt van sectielengte en de breedte van de eronder liggende folie.
Het effectief sectie-oppervlak bedraagt:
- voor sectie 101: 300 m^2
- voor sectie 102: 300 m^2
- voor sectie 103: 600 m^2
- voor sectie 54: 300 m^2
- voor sectie 55: 150 m^2
- voor sectie 56: 150 m^2

Bij een gelijke infiltratiesnelheid op de pandbodem betekent dat, dat de onttrekkingsverhoudingen van de secties als volgt zijn:
103:101:102:54:55:56 = 4:2:2:2:1:1
Door de debieten van de secties op deze verhouding af te stemmen wordt in de praktijk gestreefd naar die gelijke infiltratiesnelheid.
De debieten kunnen gevarieerd worden door het peilverschil tussen pand en sectieput te veranderen. Het maximaal aan te leggen peilverschil is 177,5 cm. Door aan deze constante verhouding van de debieten vast te houden zal de sectieput met de grootste afpomping bepalend zijn voor de totale opbrengst van de drainpanden. Gebleken is, dat dat sectie 103 is. Het totale debiet van het pandjessysteem is min of meer gestabiliseerd rond 30 m^3/h, als volgt verdeeld over de secties:
- sectie 103 : circa 10 m^3/h;
- secties 101, 102 en 54: circa 5 m^3/h;
- secties 55 en 56 : circa 2,5 m^3/h.

Deze debieten komen overeen met een infiltratiesnelheid van 40 cm/dag.
Bij bestudering van de grafieken zal duidelijk op-



Figuur 12 - Totale specifieke weerstand 50 m drain-panden



Figuur 13 - Totale specifieke weerstand 100 m drainpanden

vallen, dat met name de secties 101 en 102 een lage totaalweerstand hebben. Hier kunnen de debieten wellicht verhoogd worden, zodat een hogere infiltratiesnelheid daar niet ondenkbeeldig zal blijken.

7.3.3 Bespreking figuren 12 en 13

- Het valt op, dat in het voor- en najaar een weerstandspiek optreedt.
- Sectie 103 heeft een zeer hoge weerstand, de secties 101 en 102 een lage weerstand en de secties 54 en 56 nemen een tussenpositie in (sectie 55 is om eerder vermelde redenen buiten de bespreking gehouden).
- De secties 54 en 103 zijn identiek, met uitzondering van de lengte, die respectievelijk 50 en 100 meter is.
  Gezien de gelijke pandbodembelasting mag worden verwacht dat de totale specifieke weerstand gelijk is. Dat blijkt niet het geval te zijn.
- Hoewel van de secties 101 en 102 enerzijds en 103 anderzijds slechts verschillen in de breedte van de onderliggende folie en het aantal drains, blijkt er een groot verschil te zijn in de totale specifieke weerstand.

Bloemendaal, mei 1984

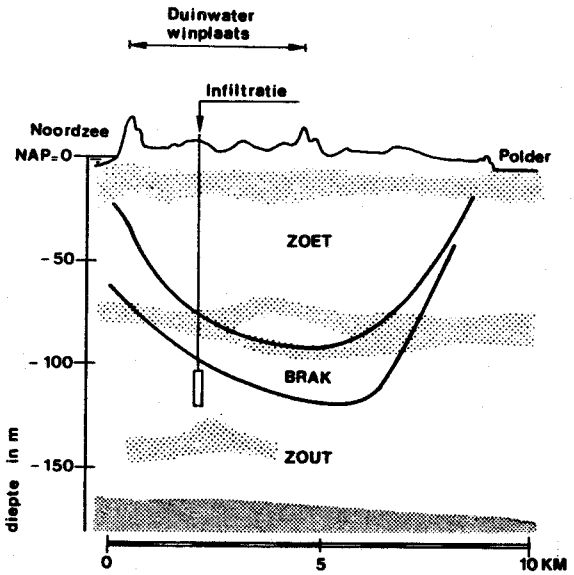
DIEPINFILTRATIE IN DE DUINWATERWINPLAATS VAN GEMEENTEWATERLEIDINGEN

R.A. Schuurmans en J.J. Steinmetz
Gemeentewaterleidingen, Amsterdam

1 INLEIDING

Sinds de renovatie en uitbreiding van het produktiebedrijf Leiduin in de periode 1955-1965 bedraagt de zuiveringscapaciteit 83 miljoen m^3 per jaar. Tegelijkertijd zijn in de duinwaterwinplaats werken uitgevoerd voor een jaarlijkse infiltratie van 70 miljoen m^3 rivierwater dat te Nieuwegein wordt onttrokken. Door menging met 13 miljoen m^3 nuttige neerslag per jaar, zou ook een winning van 83 miljoen m^3 per jaar verzekerd zijn.
In de droge periode 1971-1976 kwam tot uiting dat reeds bij een winning van 70 miljoen m^3 per jaar de kwaliteitsparameter chloride boven het gestelde gehalte van 150 mg/l uitsteeg. De voornaamste oorzaak daarvan was de binnen 20 jaar sterk gewijzigde kwaliteit van het aangevoerde rivierwater. Ook voor andere kwaliteitsparameters gold deze verslechtering, die slechts gedeeltelijk kon worden opgevangen door de inmiddels uitgebreide voorzuivering te Nieuwegein.
Ook kon het beginsel van selectieve inlaat maar in beperkte mate worden toegepast. Selectieve inlaat impliceert het sterk aanspreken van de voorraad in tijden van minder goed rivierwater.
Het toenemende gevaar van calamiteiten op de rivier, en derhalve van het stoppen van de inname, noopte echter tot het te allen tijde op een hoog peil houden van de voorraad, die dus in mindere mate beschikbaar was voor kwaliteitsbeïnvloeding.

Naast kwaliteitsverbetering van het rivierwater dat onder andere met het bijmengen met grondwater te Nieuwegein wordt nagestreefd, diende de oplossing te worden gezocht in vergroting van de voorraad. Vanwege natuurbeheer en landschapsbehoud ontstonden in dezelfde periode bezwaren tegen uitbreidingswerken aan de oppervlakte. De blik werd derhalve gericht op het diepe duin, waaraan tot 1957 reeds grote hoeveelheden water waren onttrokken. Na de aanvang van de oppervlakte-infiltratie werd deze diepe onttrekking beperkt vanwege de sterke verzilting (zie figuur 1).



Figuur 1 - Schematische doorsnede duinwaterwinplaats met de situatie van de diepe infiltratieput

1.1 Toepassing diepinfiltratie

Het opnieuw sterk exploiteren van het diepduin, dat door een weerstandslaag ("de kleilaag") van het bo-

venduin gescheiden is, dient aan twee voorwaarden te voldoen:

a. de waterbalans van het zoete water in het diepduin moet over een beperkte periode in evenwicht zijn;
b. een (tijdelijke) sterke onttrekking aan het diepduin mag geen overmatige kegels van opgetrokken zout en brak water veroorzaken. Hierdoor ontstaat namelijk een groot verlies aan zoet water door menging met zout water.

Aan de eerste voorwaarde kan worden voldaan door kunstmatige voeding met zoet water, met andere woorden: diepinfiltratie. Het optrekken van kegels onder winputten kan sterk worden beperkt indien zich onder de putten een weerstandslaag bevindt die de verticale toestroming vermindert. Deze geohydrologische situatie is in de duinwaterwinplaats aanwezig, de zogenaamde "leemlaag" is op een diepte van circa NAP-70 à 85 m overal in meer of mindere mate aangetroffen.

Daar de leemlaag veelal slecht ontwikkeld is en derhalve een kleine weerstand heeft, is door de vroegere onttrekking van diepwater het brakke en zoute water in veel gebieden reeds tot in de leemlaag opgetrokken. Een hernieuwde sterke onttrekking zal hier dus snel tot verziltingsverschijnselen leiden. Dit kan voorkomen worden door op die plaatsen onder de leemlaag een zoet-watervoorraad aan te leggen.

Daarmee worden drie effecten beoogd:

1. indien de weerstand van de leemlaag gering is zal een groot deel van die voorraad teruggewonnen kunnen worden.
2. De vorming van brakke en zoute kegels wordt onderdrukt en het verlies van zoet water door menging wordt beperkt, omdat door de dempende wer-

king van de weerstandslaag het optrekken van het zoet- zoutfront gelijkmatiger geschiedt.

3. Langs de onderzijde van een zoetwaterzak moet vanwege het dynamische evenwicht noodzakelijkerwijs een hoeveelheid zoet water afstromen. Op de lange termijn zal, door het geïnfiltreerde rivierwater aan de onderzijde aan te brengen, minder oorspronkelijk duinwater afstromen.

Het vorenstaande houdt in dat rivierwater op grote diepte moet worden geïnfiltreerd in een pakket dat met brak en zout water is gevuld.

1.2 Doelstelling tweede proefput

Nadat met een eerste persput op de locatie Leiduin een aantal ervaringen waren opgedaan, werd in 1980 een tweede persput in de duinwaterwinplaats ingericht. De primaire doelstelling was het gedrag van het geïnfiltreerde zoete rivierwater in de zoute omgeving te bestuderen.
Tevens werden een aantal secundaire doelen gesteld. Bij de eerste put was duidelijk gebleken dat het aangevoerde rivierwater spoedig tot verstopping leidde. Regeneratie was redelijk mogelijk, maar het systeem voerde tot een onrustige bedrijfsvoering. Besloten werd derhalve om te trachten door het conditioneren van het rivierwater de infiltratieperiode te verlengen (tweede doelstelling).
Samenhangend daarmee zou een toch optredende verstopping op eenvoudige wijze verwijderd moeten kunnen worden (derde doelstelling). Opgemerkt zij dat veelvuldig terugpompen, met de kans op brakwateropbrengst, moet worden voorkomen omdat dit water moeilijk in de duinwaterwinplaats kan worden geloosd.

Een systeem van persputten zal, in tegenstelling tot een serie winputten, aanzienlijk meer controle en sturing vereisen. Als vierde doelstelling gold derhalve het verkrijgen van ervaring met een geautomatiseerd systeem van gegevensregistratie en sturing. Tenslotte diende de put mogelijkheden te bieden diverse technische onderdelen in de praktijk uit te proberen (vijfde doel).

2 LOCATIE

Een ideale locatie om de primaire doelstelling van de proefneming te realiseren, zou geo-hydrologisch aan de volgende voorwaarden moeten voldoen:

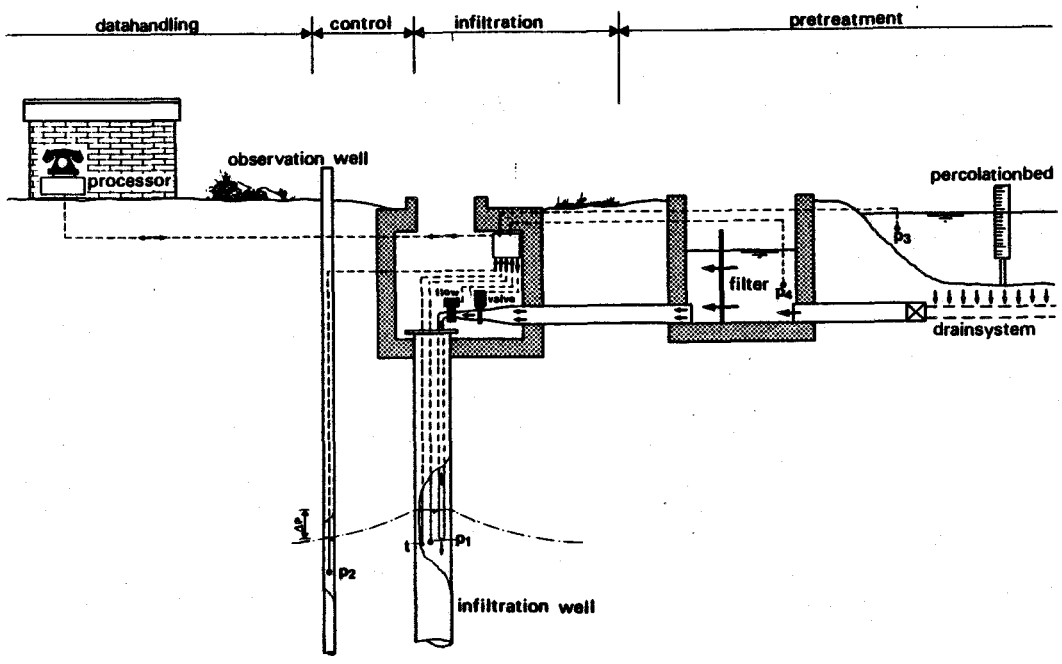
a. de weerstand van de leemlaag moet gering zijn;
b. er mag zich geen brak of zout water boven de leemlaag bevinden;
c. onder de leemlaag bevindt zich alleen zout water;
d. direct onder de leemlaag is het pakket voldoende doorlatend.

Ten einde ook aan de secundaire doelen te beantwoorden, alsmede rekening houdend met een aantal praktische bedrijfsomstandigheden, is de huidige lokatie gekozen waar zich circa 10 m brak water onder de leemlaag bevindt. Om nu toch de primaire doelstelling te realiseren is het infiltratiefilter met de bovenkant ongeveer 15 m onder de leemlaag in het zoute water gesteld.
Het bezwaar hiervan is dat het zoete geïnfiltreerde water nu een grote hoeveelheid brak water tussen filter en leemlaag moet verdringen, hetgeen een lange tijd in beslag neemt. Een zinvolle terugwinproef kan voorlopig dan ook niet worden genomen.

3 TECHNISCHE UITVOERING PROEFOPSTELLING

De gehele proefopstelling bestaat uit 4 hoofdonderdelen (zie figuur 2):

a. de drains voor de conditionering;
b. de persput;
c. de automatisering van de sturing en de gegevensregistratie;
d. de waarnemingsputten.



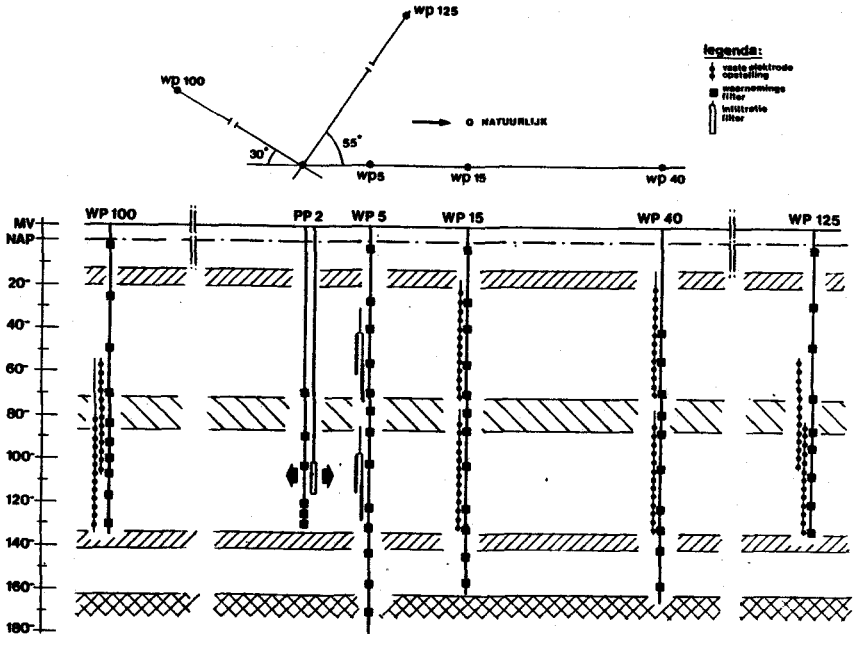
Figuur 2 - Overzicht van het proefproject met drains, infiltratieput, waarnemingsput en geautomatiseerde sturing en gegevensregistratie

Op de drainproeven zal in paragraaf 4 nader worden ingegaan.

3.1 De persput

De persput is ontworpen voor een volumestroom van 30 m^3/h met als ontwerpcriterium een filtersnelheid op de overgang van omstorting naar moedermateriaal

van 1 m/h. Gekozen werd voor de combinatie van een boorgatdiameter van 0,70 m en een filterlengte van 14 m.
Het filter heeft een inwendige diameter van 230 mm, wanddikte 10 mm, spleetwijdte 1 mm en een spleetpercentage van 11 %. De stijgbuis heeft over 90 m dezelfde diameters, de bovenste 20 m is verwijd tot inwendig 290 mm. Het geheel is uitgevoerd in PVC. Als filteromstorting werd grint van 1,2-1,7 mm gebruikt.
Het boorgat werd met de zuigboormethode uitgevoerd. Gebruik werd gemaakt van een afbreekbare boorspoeling en twee spoelwatervijvers. De ene vijver diende voor boortrajecten met klei- en slibhoudende lagen, de andere voor de zandige trajecten. Op die wijze werd getracht zo min mogelijk natuurlijke, fijne slibdelen in de spoeling te krijgen tijdens het boren in het traject waar het filter werd geplaatst. De put is voorzien van 6 peilfilters onder, naast en boven het filter (zie figuur 3).



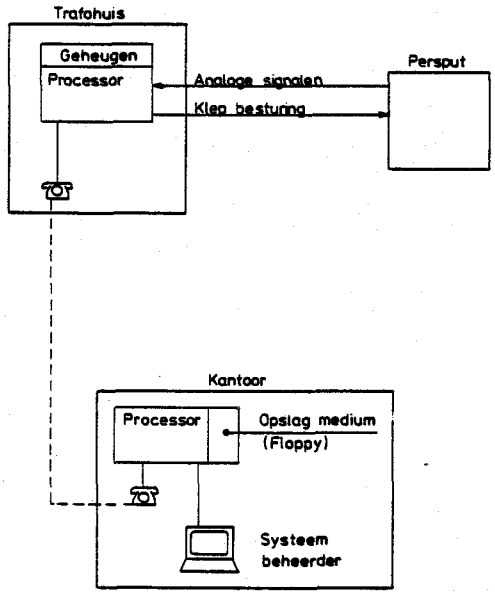
Figuur 3 - Situatie en verticaal overzicht van de middelen voor het waarnemen van de verbreiding van het geïnfiltreerde water

De kopconstructie is ondergebracht in een ruim gedimensioneerde betonnen kelder. Op de PVC-buis van de put is een blindflens met de nodige doorvoeren geplaatst, zodanig dat de put onder druk kan worden gezet. De doorvoeren zijn bestemd voor de injectieleiding (tileen, lang 8 m, diameter inwendig 41 mm), voor de kabel naar de klep onderaan de tileenleiding, voor de opnemers van druk en temperatuur, en een regeneratieleiding.
De laatste leiding werd berekend op een terugpompcapaciteit van circa 80 m^3/h met behulp van de luchtliftmethode. Gezien het streven naar slechts incidentele regeneratie, is dit onderdeel zeer eenvoudig uitgevoerd.
De injectieleiding werd in het ontwerp zodanig gedimensioneerd dat bij maximale volumestroom voldoende weerstand werd opgebouwd om onderdruk in de leiding te voorkomen. Tussen de aanvoerleiding van het geconditioneerde rivierwater en de injectieleiding zijn een automatisch bedienbare vlinderklep en een debietmeter ingebouwd (zie figuur 2).

3.2 Geautomatiseerd meet- en regelsysteem

Ten behoeve van het meet- en regelsysteem worden 6 grootheden geregistreerd, namelijk het debiet en de temperatuur van het te infiltreren water en de gegevens van vier waterspanningsmeters. De laatsten zijn geplaatst in de geul waaruit de drains het water onttrekken, in de verzamelput van het drainwater, in de persput en in een diep peilfilter van een waarnemingsput op 5 m afstand van de persput (zie figuur 2).
In een traforuimte op korte afstand van de persput is een controller opgesteld, die de meetgegevens door middel van een microprocessor opslaat in een

geheugen en tevens verwerkt tot een weerstand van de persput. Bij te hoge weerstand, of te snelle toename, wordt de toevoer automatisch gesloten en een alarmering naar een willekeurig te kiezen telefoontoestel doorgegeven. De controller is hiertoe via een telefoonlijn met het kantoor te Leiduin verbonden (zie figuur 4).



Figuur 4 - Schema van de hoofdelementen van het geautomatiseerde meet- en regelprobleem

Langs deze lijn kan het proces ook gevolgd of gestuurd worden en kan tevens het databestand worden overgebracht naar de centrale processor in het kantoor. Aldaar kunnen deze gegevens worden verwerkt door printen of plotten.
Naast genoemde 6 metingen worden ook nog twee kwaliteitsparameters automatisch vastgelegd, namelijk geleidbaarheid en zuurstofgehalte. Deze gegevens worden op dezelfde wijze naar de centrale processor overgebracht.

3.3 Waarnemingsputten

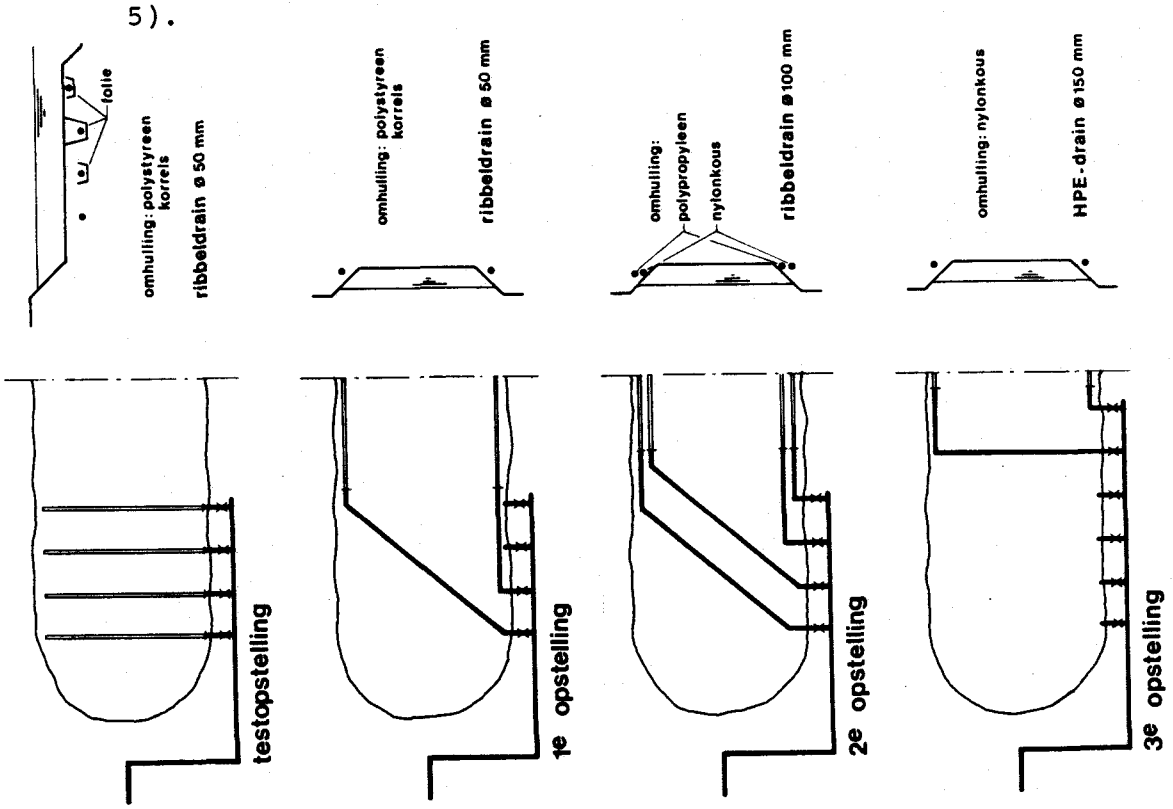
Rond de persput zijn 5 diepe waarnemingsputten aangebracht (zie figuur 3). Drie zijn geplaatst in de richting van de natuurlijke afstroming op 5, 15 en 40 m afstand. De andere twee zijn op afstanden van 100 en 125 m in verschillende richtingen aangebracht om informatie over de radiale symmetrie van de gevormde zoetwaterbel te krijgen.
Alle putten zijn geboord met de zuigboormethode en door TNO zijn geofysische boorgatmetingen verricht. In alle putten zijn één of meer geohmmeetkabels aangebracht, terwijl bovendien in iedere put een groot aantal peilfilters is geplaatst.

4 CONDITIONERINGSSYSTEEM

De proeven met de eerste infiltratieput te Leiduin, die het met drinkwater uitstekend deed, hadden bewezen dat het voorbehandelde rivierwater tot snelle verstopping van de put kon leiden. Metingen van de troebelheid leerden dat deze parameter onvoldoende was om op te sturen, de MFI bood betere vooruitzichten. Gedachtig de lage MFI-waarden van drinkwater, werd aansluiting gezocht bij het systeem van langzame zandfilters.
Mede op grond van de beperkingen voor werken in de duinwaterwinplaats, werd uitgegaan van drains in de bodem van bestaande geulen met rivierwater. Deze mogen niet tot het capaciteitssysteem van de winplaats behoren maar bij het voorraadsysteem. In 1978 werd een serie drainproeven gestart, waarbij als uitgangspunten golden:

1. het bereiken van voldoend lage MFI-waarden;
2. het water mag niet zuurstofloos worden;
3. eenvoudige uitvoering.

Voorwaarde 2 was nodig om uitvlokking van ijzer in het conditioneringssysteem en in de persput te voorkomen. Het zuurstofloos worden van het water in de aquifer levert in het algemeen geen moeilijkheden op.
De proeven werden begonnen met de meest eenvoudige landbouwdrains van geperforeerd plastic en omgeven door een mantel van polystyreen korrels (zie figuur 5).



Figuur 5 - De verschillende opstellingen van de drainproeven voor het conditioneren van het infiltratiewater

Bovendien werden varianten beproefd met een plasticfolie onder de drain om lange stroomlijnen in het zandpakket, en dus zuurstofloosheid, te vermijden. Tevens werden verschillende diepten van de drain uitgeprobeerd. Als resultaat kan worden vermeld dat de eenvoudige drain en het toepassen van de folie onder de drains niet voldoet om de volgen-

de redenen:

- de toegepaste drains hadden een te beperkte diameter (circa 50 mm). Mede door de meestal geribde wand is de wrijvingsweerstand hoog. Derhalve kunnen de drains slechts toegepast worden in korte lengten (20 à 30 m) omdat de transportcapaciteit al snel beperkend wordt.
- De geteste drains waren kwalitatief onvoldoende. Een omhulsel van polystyreenkorrels in een geperforeerde folie bleek slecht zandkorrels tegen te houden. Een nylonkous met mazen van 80 mu voldeed beter.
- Plasticfolie onder de drain had geen merkbare invloed op het zuurstofgehalte, maar beperkte wel de capaciteit, terwijl de MFI hoger was.

Voorts kunnen als conclusies worden genoemd:

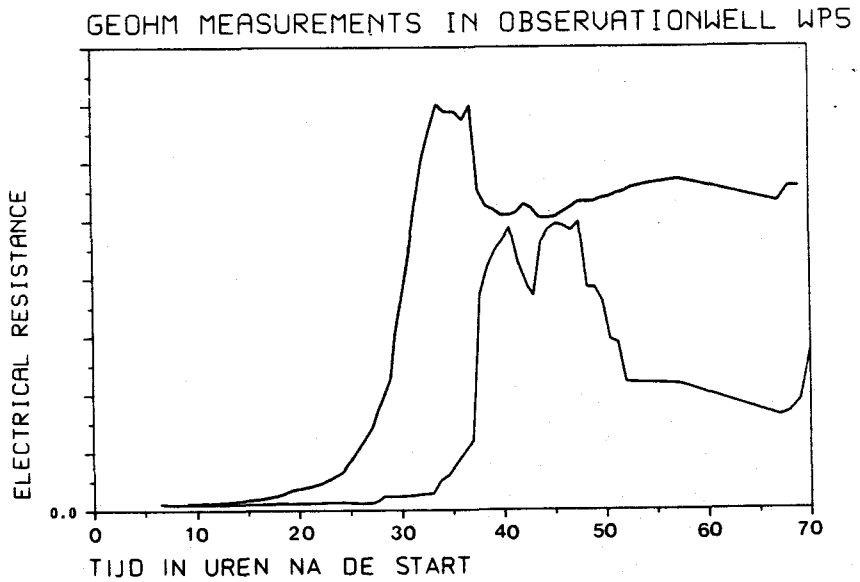
- minimumdiepte van de drains onder de geulbodem is 50 cm vanwege de MFI. Een diepte van 60 cm is als beste ervaren, mede omdat het zuurstofgehalte dan nog voldoende is.
- Overigens is het systeem gevoelig voor wisselingen in het ijzergehalte van het rivierwater. Veranderingen kunnen uitvlokking rond en in de drains veroorzaken.
- Een inloopperiode van een drainsysteem is vereist om voldoende lage MFI-waarden te bereiken. In de zomer kan worden gerekend op minimaal 6 weken, in de winter op 8 weken.
- Drains verhinderen niet dat het geconditioneerde water in de persput aanleiding geeft tot bacteriologische verstoppingen indien de temperatuur daar gunstig voor is (hoger dan circa 10 °C).

Op grond van deze ervaringen is in 1982 een drainsysteem geïnstalleerd dat bestaat uit geperforeerd HPE, omgeven door een laddervrije nylonkous, diameter 150 mm, in 2 lengten van 75 m. Rondom de buis

is schoon zand aangebracht ter dikte van circa 500 mm.
Het systeem haalt gemakkelijk 0,2 $m^3/h.m^1$ bij een stijghoogteverschil van circa 20 à 30 cm tussen geul en einde van de drain. Gedurende één jaar werking is geen opbrengstvermindering geconstateerd.
De MFI-waarde beweegt zich rond de 2 sec/l^2, terwijl het aangevoerde rivierwater een MFI van 10 à 20 s/l^2 heeft.

5 GEAUTOMATISEERD MEET- EN REGELSYSTEEM

Het systeem (zie par. 3.2) heeft in het algemeen uitstekend voldaan en is in opzet tijdens de afgelopen drie jaar dan ook niet gewijzigd. Wel zijn op diverse punten detailveranderingen aangebracht, voornamelijk op het gebied van de gegevensverwerking. Dataverzameling en -transmissie, de signalering en de sturing gaven geen problemen.



Figuur 6 - Gegevensverwerking. In dit geval zijn de gegevens nog manuaal gemeten

Het zwakke punt van het systeem zit duidelijk in de

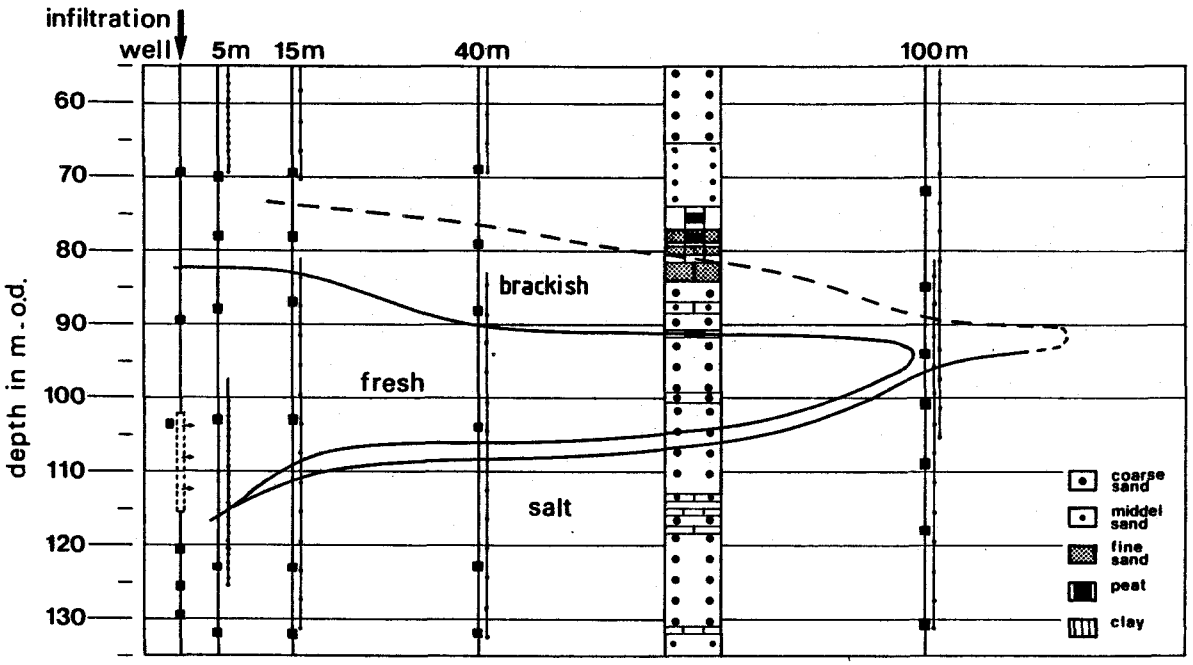
opnemers. De zuurstofelectrode vervuilt snel en geeft dan ook een zeer matige meetreeks te zien. De drukopnemers voor de stijghoogten zijn een aantal malen defect geweest. Tenslotte heeft ook de flowmeter enige tijd afwijkende waarden geproduceerd. De reden daarvan is niet duidelijk maar kan gelegen hebben in het feit dat zich cavitatieverschijnselen in de infiltratieleiding hebben voorgedaan. Hoewel het systeem het laatste halfjaar onberispelijk heeft gefunctioneerd, is mede om deze reden een nieuw ontwerp voor de infiltratieleiding, inclusief vlinderklep en flowmeter, gemaakt. In een volgend stadium zal deze worden ingebouwd.
In figuur 6 is een voorbeeld van de gegevensverwerking te aanschouwen. In figuur 8 is onder andere het weerstandsverloop van de persput getekend, zoals deze automatisch door het systeem wordt gemeten en berekend (zie par. 7.1).

6 ZOUTWATERVERDRINGING

6.1 Eerste run

De infiltratie ving aan op 26 januari 1981 en is onafgebroken voortgezet tot 16 juni 1982, totaal 505 dagen.
Reeds spoedig tekende zich een zoetwaterlens af, die dankzij de vele metingen goed kon worden gevolgd in zowel horizontale als verticale zin (zie figuur 7). De volumestroom bedroeg tamelijk constant 20 m^3/h.
In het begin tekenden zich aanzienlijke brakke zones af, zowel onder, boven als aan de rand van de korte lens. Vanwege het geringe contrast tussen het oorspronkelijke brakke water boven het persputfilter en het geïnfiltreerde water, is aan de boven-

zijde de grens tussen beide watersoorten niet exact te bepalen. Aan de onderzijde ontstond echter al na circa 100 dagen een fraaie scherpe overgang van zoet naar zout, met een brakke zone van slechts 3 à 5 m.



THE EXTENSION OF THE FRESH WATER
DAY 500

Figuur 7 - Verbreiding van het geïnfiltreerde water en de vorming van brak water aan het einde van de eerste run

De brakke neus aan de rand van de zoete lens had aanvankelijk een relatief grote omvang, maar nam na verloop van tijd verhoudingsgewijs minder toe. Deze neus is moeilijk te volgen vanwege de afstand tussen de waarnemingsputten. De benaderende inhoudsberekeningen van de zoetwaterlens bevestigen dat de menging tot brak water in het begin aanzienlijk groter is geweest. Dit effect zal ongetwijfeld versterkt zijn door de ongunstige diepe positie van het persfilter. Uitgedrukt in een percentage van de

geïnfiltreerde hoeveelheid, nam de inhoud van de zoetwaterlens toe van circa 30 naar ruim 80 %. Voorgaande cijfers zijn enigszins aan de voorzichtige kant berekend omdat de vorm van de lens maar betrekkelijk bekend is. Zo is ook de symmetrie van de lens niet zeker, onder andere door verschillen in doorlatendheid en door de natuurlijke afstroming. Het ongeveer gelijktijdig doorkomen van de brakke neus in WP 100 (in noordwestelijke richting) en in WP 125 (in noordoostelijke richting) na circa 11 maanden, samen met een berekende natuurlijke afstroming van omstreeks 10 m per jaar, wijst op een redelijk radiaal symmetrische zoetwaterbel.

6.2 Eerste stop

Op 16 juni 1982 is de infiltratie gestaakt vanwege verstoppingsverschijnselen. De schotel-vormige verdieping van de zoetwaterlens onder de persput werd daarna snel opgevuld met zout water, zodat na circa 2 maanden de lens een zeer vlakke onderkant had gekregen. Onder de persput kwam het zoute water 20 m omhoog, in WP 40 nog ongeveer 5 m. Aan de randen breidde de lens zich enigszins uit gedurende de periode van stilstand, die 190 dagen duurde.

6.3 Tweede run

Op 22 december 1982 ving de tweede run aan. Door een aantal aanpassingen kon de capaciteit verhoogd worden tot ruim 25 m^3/h. Na ongeveer een maand was de toestand van de zoetwaterlens rond de persput weer hersteld in de vorm zoals die aan het einde van de eerste run was. Gedurende een jaar (tot heden) kon de infiltratie onafgebroken worden voortgezet en breidde de lens zich langzaam uit. Duide-

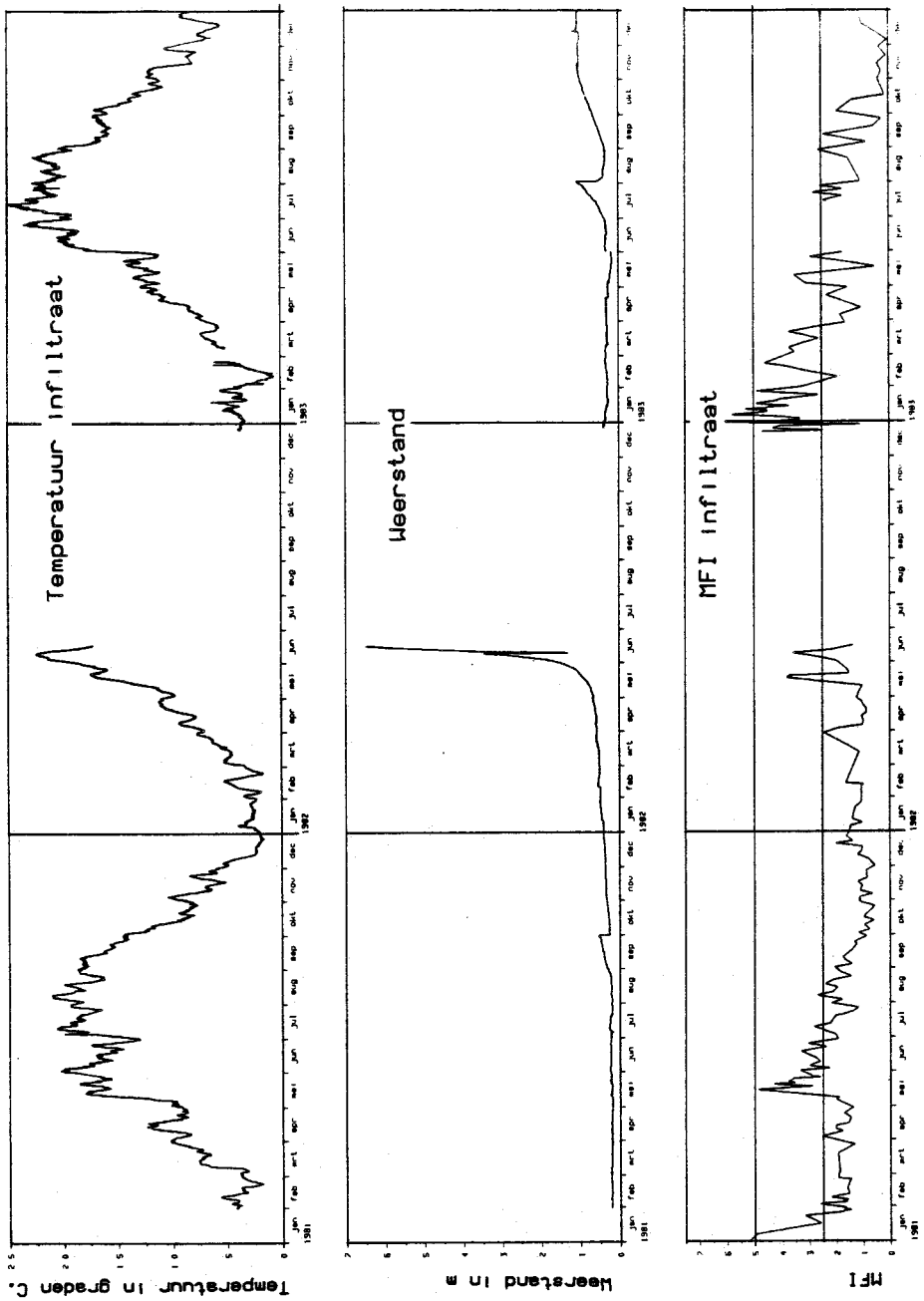
lijke veranderingen kwamen voor in horizontale richting; in verticale richting zijn deze gering.

7 VERSTOPPING EN REGENERATIE

De conditie van de persput wordt voornamelijk beoordeeld aan de hand van de weerstand. Hoe deze grootheid wordt bepaald, zal eerst worden aangegeven.

7.1 De weerstand

De weerstand van de persput wordt in feite uitgedrukt in een stijghoogteverschil tussen de persput en een peilfilter van waarnemingsput WP 5, op een niveau van NAP-90 m en dieper, aangenomen dat zich daar zoet water bevindt. De inhoud van genoemde peilbuis is spoedig na aanvang van de infiltratie vervangen door zoet water. Deze weerstand is een sommatie van de weerstanden van de filterspleten, de omstorting, de overgang naar het moedermateriaal en van ongeveer 4,5 m watervoerend pakket.
De weerstand wordt continue geheel automatisch door de processor berekend (en bewaakt) op grond van 4 metingen, namelijk van waterspanningsmeters in persput en peilbuis, het debiet en de temperatuur.
Ten einde vergelijkbare waarden te verkrijgen wordt gecorrigeerd voor het debiet en de temperatuur, waarvoor standaardwaarden van 20 m^3/h en van 10 °C zijn ingevoerd. De temperatuurscorrectie betekent dat zowel voor dichtheid van het water in de stijgbuizen als voor de viscositeit van het geïnfiltreerde water wordt gecorrigeerd. In figuur 8 zijn de aldus berekende weerstanden uitgetekend.



Figuur 8 - Verloop van enige belangrijke parameters gedurende de periode 1981-1983

2 Verstopping

De weerstand heeft tot april 1982, dus ongeveer 14 maanden, steeds onder de 0,5 m gelegen. Eind september 1981, toen de weerstand opliep, werd gedurende ruim één uur teruggepompt om het schoonpompsysteem te beproeven. In april 1982 begon een toename van de weerstand, met name toen in mei de temperatuur van het infiltratiewater flink boven de 10 °C steeg. Daarna werd op 9 juni een regeneratie door middel van schoonpompen uitgevoerd. Zoals fig. 8 toont heeft dit weinig effect gehad en derhalve is op 16 juni het proces tot stilstand gebracht, toen de gecorrigeerde weerstand bijna 7 m bedroeg.
Gedurende de 190 dagen durende stilstand werd in september 1982 de put geïnspecteerd met een onderwatercamera. Waargenomen werd dat met name in de spleten, maar ook aan de wand van de stijgbuis, veel vlokvorming voorkwam. Deze vlok werd onderzocht, waarbij draadvormige ijzerbacteriën werden aangetoond.
In november 1982 is de put schoongemaakt door:
a. jetting (hogedruk-spuit-reiniging)
b. sectiegewijs schoonpompen van het filter.
Bij de start van de 2e run op 22 december 1982 was de weerstand circa 40 cm en bleef op dat niveau tot juli 1983. Een camera-inspectie in mei 1983 toonde een lichte aangroei in de filterspleten. In juli zette zich weer een toename in, zodat omstreeks 1 augustus de weerstand 1 m bedroeg.
Op dat ogenblik werd een snelle injectie van 20 liter chloorbleekloog aan de waterstroom gegeven, hetgeen de weerstand zeer snel deed afnemen tot het oude niveau. In september trad weer een stijging op, die begin november abrupt tot stilstand kwam, toen de temperatuur van het infiltratiewater onder

de 10 °C daalde. Het bevestigt dat de temperatuur één van de voorwaarden voor de verstopping is, hetgeen duidelijk aangeeft dat de verstopping van bacteriologische aard is.
Een camera-inspectie op 12 december 1983 gaf te zien dat op de stijgbuiswand nog op enkele plaatsen vlokkenaangroei aanwezig was en dat de filterspleten tamelijk dicht zaten met vlok.
In het kader van het AOC-onderzoek van het KIWA werd op 31 maart 1983 een AOC-bepaling gedaan bij deze persput. De uitkomst van 5 à 6 µg Ac-Ceq/l mag als zeer laag worden beschouwd.

7.3 Regeneratie

In de vorige paragraaf zijn 3 typen van regeneratie genoemd. Het schoonpompen in juni 1982, terwijl de bacteriologische verstopping al flink op gang was, blijkt nauwelijks effect te hebben.
De langdurige stilstand, gevolgd door sectiegewijs schoonpompen heeft de weerstand weer op vrijwel het oorspronkelijke niveau gebracht.
De toevoeging van een relatief geringe hoeveelheid chloorbleekloog (20 liter, ± 10 %) heeft een duidelijk effect, maar bleek na een maand een nieuw begin van verstopping niet te hebben voorkomen.
De toepassing van een chemisch regeneratiemiddel roept uiteraard vragen op. In dit geval is er echter vrijwel geen sprake van dat het water ooit teruggewonnen wordt. Doch ook in een operationeel systeem zou de toepassing van chloorbleekloog (of een ander oxydatiemiddel als peroxyde) nauwelijks bezwaren behoeven op te leveren gezien de zeer geringe hoeveelheid en het feit dat terugwinning van dit gechloorde water slechts gedeeltelijk en zeer gespreid in tijd en ruimte kan plaatsvinden.

8 KWALITEITSPARAMETERS

Behalve de reeds genoemde parameters temperatuur, geleidbaarheid en zuurstof, die automatisch worden gemeten, worden nog 9 parameters voor en na het drainsysteem wekelijks bepaald, en wel de troebeling, SI, HCO_3, pH, Ca, E.G.V., Cl, DOC en Fe. De MFI wordt tweemaal per week bepaald, de AOC is slechts incidenteel gemeten.
De MFI-waarde van het geconditioneerde water ligt gedurig onder de 2,5 s/l^2, incidenteel traden verhoogde waarden van maximaal 5 s/l^2 op.
Er zijn geen aanwijzigingen dat hierdoor een verstopping is opgetreden. Ook ten aanzien van de andere parameters zijn dienaangaande nog geen conclusies te trekken.

9 KOSTENASPECT

Er is ten aanzien van het kostenaspect slechts een heel globale indicatie te geven en wel uitsluitend voor de investeringen. De kosten zijn gebaseerd op een persput van circa 100 m diep en met overigens de in paragraaf 3.1 vermelde afmetingen, capaciteit en inrichting. Worden voorts apparatuur voor automatisering, waarnemingsputten, drains en leidingwerk meegeteld, dan bedraagt de investering tussen de f 1,00 en f 1,50 per geïnstalleerde capaciteit van 1 m^3/a, indien zou worden overgegaan tot een operationeel project van ten minste enkele miljoenen m^3 per jaar.
In hoeveel jaren een systeem moet worden afgeschreven is onbekend, doch voorlopig mag 15 jaar wel als maximum worden beschouwd. Rente en afschrijving bedragen dan f 0,13 à f 0,20 per m^3. De totale exploitatiekosten, inclusief aankoop rivierwater, on-

derhoud en benodigde mankracht, komen dan in de orde van f 0,50 per m^3 geïnfiltreerd water. Tegenover deze voorraad staat nu de mogelijkheid om een veelvoud aan m^3 diepduinwater te winnen zonder schade aan de zoetwatervoorraad.

In de filosofie van Gemeentewaterleidingen behoeven geen extra winputten te worden geplaatst, deze zijn op de locaties meestal reeds aanwezig.

10 CONCLUSIES

De mogelijkheid om een persput langdurig te laten werken lijkt realiseerbaar door het water te conditioneren met behulp van drains.
Eenvoudige regeneratiemethoden als toevoeging van chloorbleekloog, dan wel stilstand en schoonpompen, blijken bij slechts incidentele toepassing de put in goede conditie te houden. Via automatisering is een systeem goed bestuurbaar. De kosten moeten vooralsnog hoog worden genoemd.

11 LITERATUURLIJST

1. Technische opbouw van de persput te Leiduin. Mededeling nr. 56 van het KIWA, januari 1978, J.J. Steinmetz.

2. Onderzoek naar diepinfiltratie bij GW. Waterwereld, 34e jaargang nr. 2, december 1981, C. v.d. Akker.

3. Ontwerp van een luchtliftsysteem ten behoeve van het schoonpompen van een persput, praktijkverslag, mei 1980, G. Mesman.

4. Bereiding van injectiewater voor persputten. September 1979, interimrapport, J.J. Steinmetz, C. v.d. Akker, T.N. Olsthoorn.

5. Regenereren van de persput te Leiduin. Intern rapport GW, januari 1979, J.J. Steinmetz.

6. Kleinschalige toepassingen LSI-microprocessoren PT/Procestechniek 38 (1983), nr. 7, Th.C.A.M. Jonker.

7. Experimental investigation on irreversible changes of hydraulic conductivity on the seawater-freshwater interface in coastal aquifers. Water Resources Research, vol. 19, no. 1, page 77-85, February 1983, L.C. Goldenberg, M. Magaritz and S. Mandel.

8. Verstopping van persputten. KIWA-mededeling nr. 71, september 1982, T.N. Olsthoorn.

9. Berekening van de weerstand van de persput. Intern rapport GW, maart 1982, J.W. Kooiman.

10. Assimileerbare organische koolstof (AOC) in water voor kunstmatige infiltratie met persputten. KIWA SWI-83.129, oktober 1983, W.A.M. Hijnen en D. v.d. Kooij.

11. De membraanfiltratie-index als kenmerk voor de filtreerbaarheid van water. H_2O nr. 5/79, maart 1979, J.C. Schippers en J. Verdouw.

12. Temperatuurmetingen bruikbaar bij onderzoek naar verbreiding van infiltratiewater uit persputten. H_2O nr. 4/84, februari 1984, J.H. Peters, W. van Dalfsen, J.J. Steinmetz.

13. Verbreiding Infiltratiewater PP2. Intern rapport GW, mei 1984, J.W. Kooiman.

14. De kartering van zoet, brak en zout grondwater in de duinwaterwinplaats in de periode 1904-1974. Intern rapport GW, september 1974, R.A. Schuurmans.

15. Artificial removal of intruded saline water in a deep aquifer. Proceedings of 7th Salt Water Intrusion Meeting, Uppsala, Sweden, 14-17 September 1981, R.A. Schuurmans en C. v.d. Akker.

16. Diepinfiltratie in de duinwaterwinplaats van Gemeentewaterleidingen. Rapport Gemeentewaterleidingen Amsterdam, mei 1984, J.J. Steinmetz en R.A. Schuurmans.

Leiduin, 31 december 1983

STAND VAN ZAKEN INFILTRATIEPROEVEN KENNEMERDUINEN

W.F. Konijnenberg
Provinciaal Waterleidingbedrijf van Noord-Holland

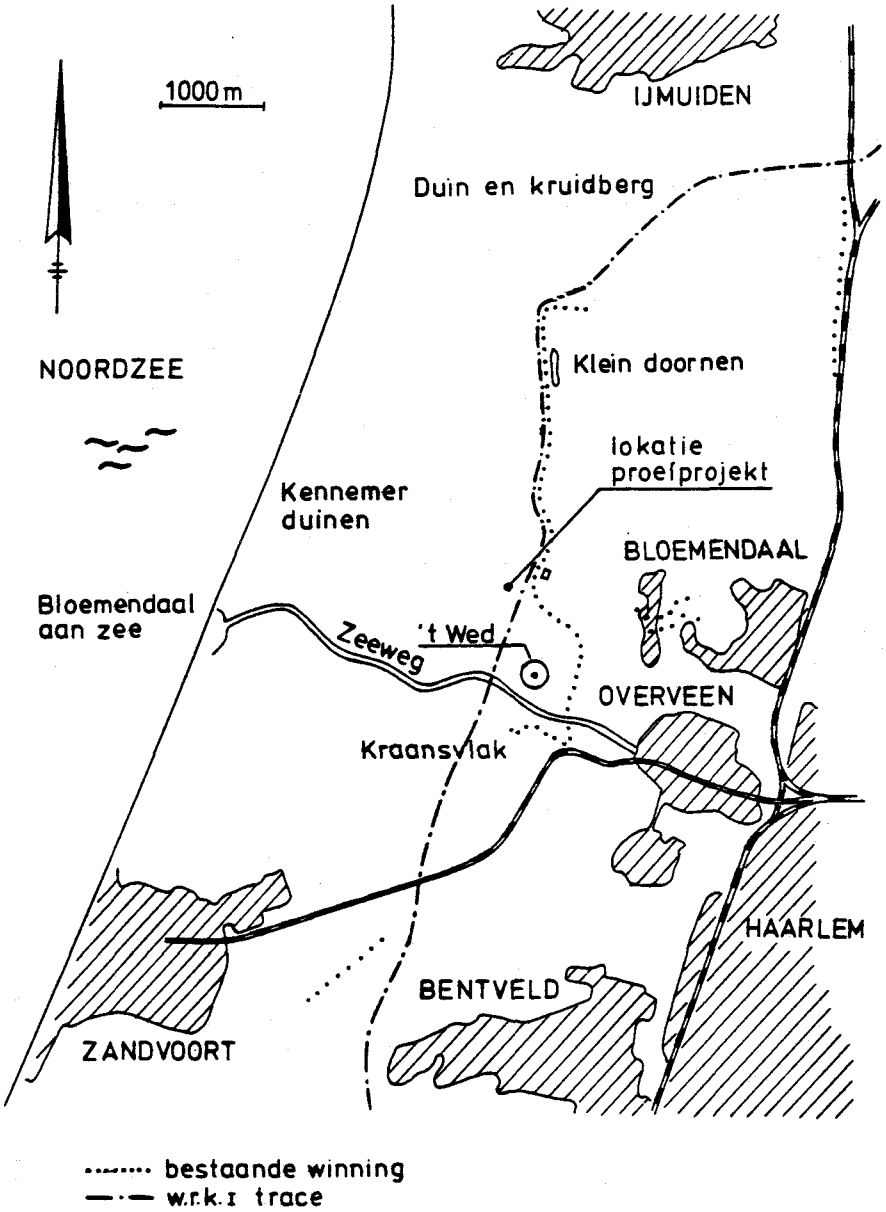
SAMENVATTING

Het Provinciaal Waterleidingbedrijf van Noord-Holland (PWN) zal vóór het eind van deze eeuw de drinkwaterproduktie ten behoeve van het eigen voorzieningsgebied ten zuiden van het Noordzeekanaal i.c. de gemeenten Haarlemmermeer, Aalsmeer, Uithoorn, Bennebroek en Haarlemmerliede, het zogenaamde HAU-gebied, overnemen van Gemeentewaterleidingen van Amsterdam.
Een voor de benodigde winmiddelen geschikte locatie is aanwezig in het zuidelijk deel van de Kennemerduinen nabij Overveen. Om hydrologische en ecologische redenen zal diepe putinfiltratie worden toegepast. De huidige duinwaterwinning van het Waterleidingbedrijf Zuid-Kennemerland (WLZK) zal tegelijkertijd worden gereduceerd.
In juni 1980 is door de Werkgroep Watervoorziening Zuid-Kennemerland (WWZK) in de Kennemerduinen een proefproject op kleine schaal gestart met twee infiltratieputten en een langzaam zandfilter. De put Pd en het langzaam zandfilter krijgen water toegeleverd, dat is voorgezuiverd bij de Watertransportmaatschappij Rijn-Kennemerland (WRK) in Nieuwegein. De put Pc wordt gevoed met filtraat van het langzaam zandfilter.
De verstopping van de noordelijke infiltratieput Pd, welke voornamelijk optreedt rond het injectiefilter, hangt samen met de temperatuur van het infiltratiewater. Dit kan een aanwijzing zijn voor de activiteit van micro-organismen. Ook andere erva-

ringen, zoals weerstandsvermindering bij infiltratiestops en bij putregeneratie met chemicaliën, duiden op een mogelijke bijdrage van microbiologische aard aan het verstoppingsmechanisme. De hoge schoonpompfrequentie in de zomerperiode voorkomt weerstandsopbouw op de boorgatwand. In voor- en najaar neemt deze weerstand echter toe. Tot nu toe is de put slechts eenmaal met chemicalien behandeld. Verband tussen de MFI van het infiltratiewater en putverstopping is bij de put Pd niet aangetoond.
Hoewel het effluent van het langzaam zandfilter in het algemeen van goede kwaliteit (MFI) is, treedt ook weerstandsopbouw op in de zuidelijke infiltratieput Pc. De verstopping, die zich hier uitsluitend manifesteert op de boorgatwand, blijkt eveneens seizoensgebonden te zijn. Met name in de zomermaanden van 1983 was de weerstandsopbouw in de put explosief. Met schoonpompen kon de weerstand echter volledig worden verwijderd.

1 INLEIDING

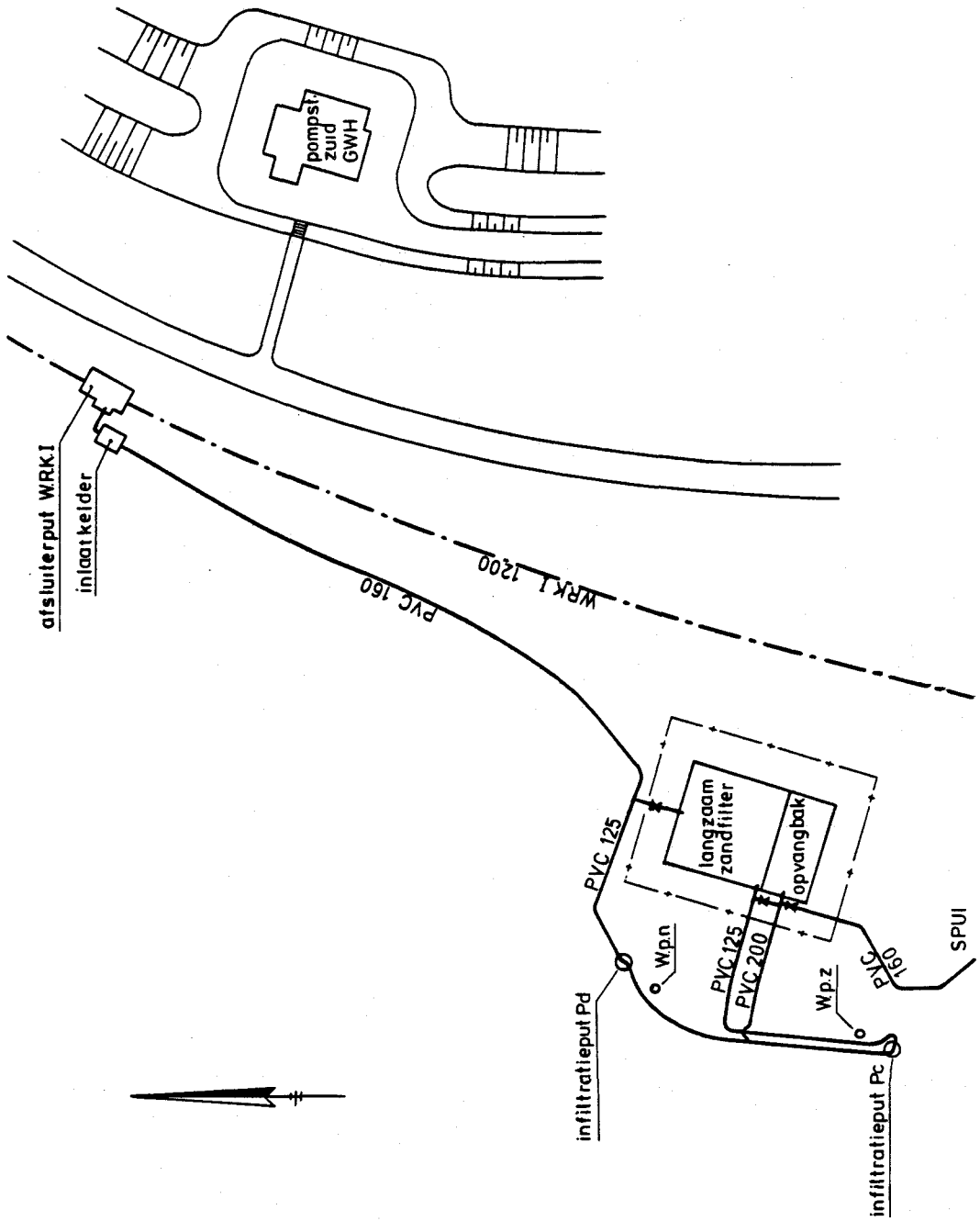
De drinkwaterbehoefte van dat deel van het voorzieningsgebied van het Provinciaal Waterleidingbedrijf van Noord-Holland (PWN) ten zuiden van het Noordzeekanaal dat de gemeenten Aalsmeer, Bennebroek, Haarlemmerliede, Haarlemmermeer en Uithoorn, inclusief enkele omliggende kernen omvat, wordt tot op heden gedekt door toelevering en gros door Gemeentewaterleidingen van Amsterdam (GW). Het ligt echter in de bedoeling van het PWN tegen het begin van de jaren negentig de drinkwaterproduktie ten behoeve van bovengenoemd gebied in eigen hand te nemen.
Een geschikte lokatie voor de hiertoe benodigde winmiddelen is aanwezig in het duingebied van Zuid-Kennemerland, i.c. de Kennemerduinen nabij



Figuur 1 - Locatie proefproject

Overveen.
Uitbreiding van de huidige duinwaterwinning van het Waterleidingbedrijf Zuid-Kennemerland (WLZK) aldaar is om redenen van hydrologische en ecologische aard niet gewenst; veeleer moet een vermindering van de onttrekking worden nagestreefd.
Vergroting van de winning is derhalve slechts toelaatbaar wanneer gelijktijdig kunstmatige grondwateraanvulling plaatsvindt. Gezien het natuurwetenschappelijk belang van het betrokken terrein is gekozen voor toepassing van diepe putinfiltratie; een techniek met aanmerkelijk geringere landschappelijke gevolgen dan oppervlakte-infiltratie door middel van panden of bekkens.

Om ervaring op te doen met de diepe putinfiltratietechniek is door de Werkgroep Watervoorziening Zuid-Kennemerland (WWZK), waarin participeren het WLZK en het PWN, op 3 juni 1980 in de Kennemerduinen een proefproject op beperkte schaal opgestart met twee infiltratieputten en een langzaam zandfilter. Het WLZK is belast met de dagelijkse controle; het PWN verzorgt de begeleiding van de proeven, de verwerking van de meetresultaten en de interpretatie ervan. De ligging van beide infiltratieputten en het langzaam zandfilter is aangegeven op de figuren 1 en 2.



Figuur 2 - Situatieschets infiltratieputten en langzaam zandfilter

De infiltratieputten worden gevoed met bij de Watertransportmaatschappij Rijn-Kennemerland (WRK) in Nieuwegein voorgezuiverd Rijnwater, dat via een 53 km lange transportleiding en een verdeelvijver bij Vogelenzang wordt aangevoerd. Na passage van een vuilkorf, waarmee het grofste vuil wordt afgevangen, wordt het water rechtstreeks in de noordelijke put Pd geïnfiltreerd (d = discontinu, in verband met een hoge terugpompfrequentie). De zuidelijke infiltratieput Pc (c = continu, vanwege minder frequent schoonpompen) wordt gevoed met filtraat afkomstig van het langzaam zandfilter.
Er wordt geïnfiltreerd in het watervoerende pakket tussen 20 m en 70 m -NAP. Uit pompproeven is gebleken dat het doorlaatvermogen van dit pakket circa 1500 m^2/dag bedraagt.
Doel van de proeven is inzicht te verkrijgen in:

1. het verstoppingsmechanisme en de snelheid van weerstandsopbouw in een infiltratieput;
2. de invloed van een extra voorzuivering nabij de putlocatie op de infiltreerbaarheid van het aangevoerde water;
3. de aquifereigenschappen: anisotropie, inhomogeniteit.

In deze bijdrage zal nader op bovengenoemde infiltratieproeven worden ingegaan.

De proefnemingen moeten de ontwerpcriteria opleveren voor een diepe putinfiltratie proefproject op grotere schaal: een pilotplant met een capaciteit van 5,5 miljoen m^3/jaar, te realiseren nabij de vijver 't Wed in de Kennemerduinen. Indien een dergelijke proef op beperkte praktijkschaal zowel in kwantitatief als in kwalitatief opzicht bevredigende resultaten oplevert, zal in het zuidoostelijk gedeelte van de Kennemerduinen tegen het einde van

deze eeuw mogelijk een infiltratie/terugwinproject van grotere capaciteit worden gerealiseerd.

2 DE INFILTRATIEPUTTEN

2.1 De opbouw van infiltratieput Pd

De infiltratieput

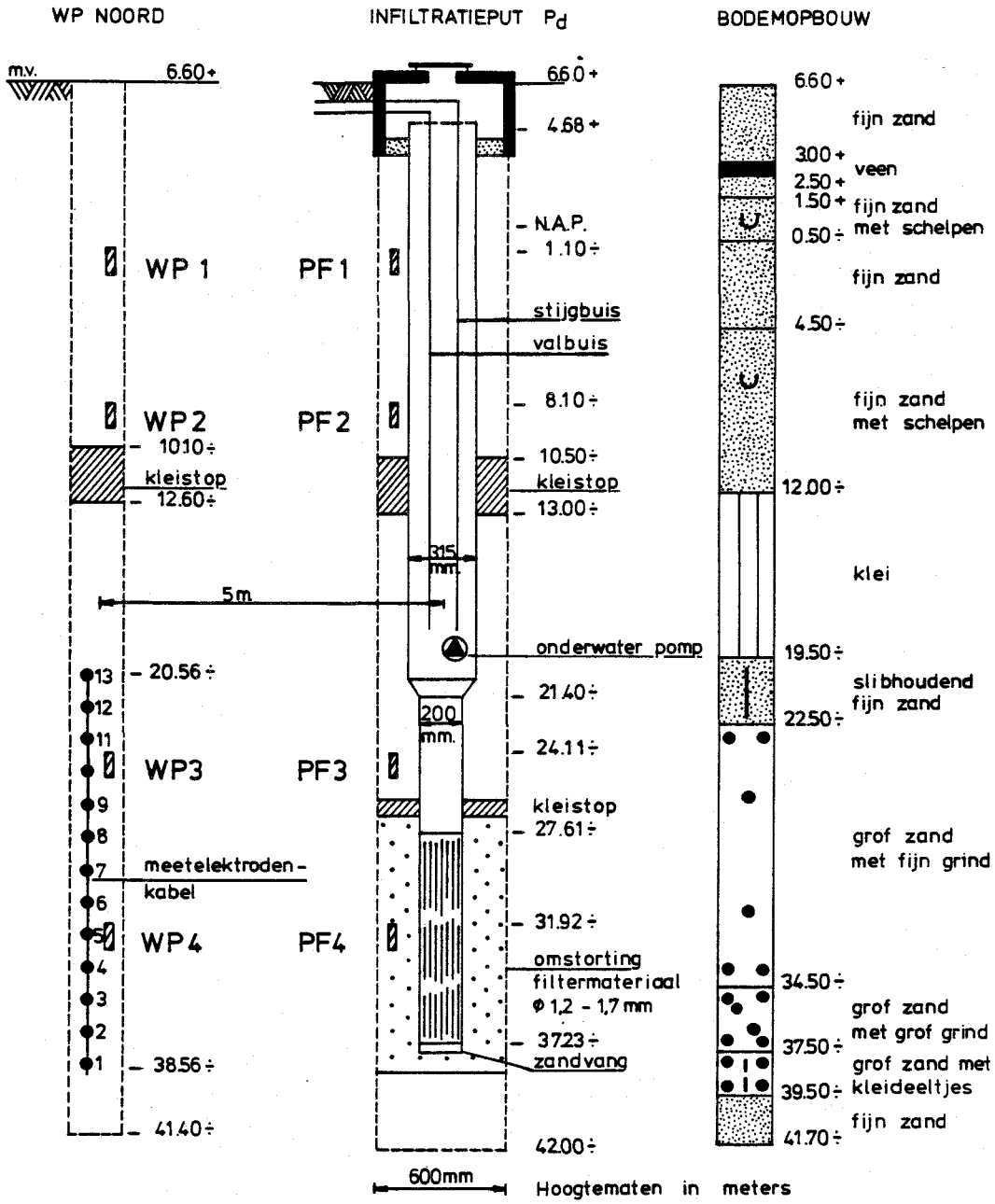
Gegevens met betrekking tot de putconstructie en de bodemopbouw staan vermeld in figuur 3.

Bij de boring is een roterend zuigboorsysteem met luchtlift toegepast. De toeslag van de boorspoeling was van een biologisch afbreekbaar type. De doorboorde weerstandlaag op circa 12 m -NAP is afgedicht met een kleistop. Ook tussen de peilfilters PF3 en PF4 is een kleiafdichting aangebracht; hier wordt later in deze bijdrage dieper op ingegaan.

Het injectiefilter bestaat uit een 9,6 meter lange PVC-buis met een diameter van 200 mm, voorzien van sleuven met een spleetwijdte van 1 mm. De omstorting van het infiltratiefilter is doorgetrokken tot 1 meter boven en 1 meter onder het filter; het omstortingsmateriaal bestaat uit filtergrind (grof zand) met een korreldiameter van 1,2 - 1,7 mm. Het filter is voorzien van een zandvang.

Schoonpompen geschiedt door middel van een onderwaterpomp met een capaciteit van 90 m^3/h. Het opgepompte water wordt afgevoerd via een spuileiding naar een naast het langzaam zandfilter aangebrachte opvangbak (zie figuur 2).

Rond de open putkop is een ondergrondse putkelder gebouwd, samengesteld uit twee betonringen met een diameter van 2 m en met een totale hoogte van eveneens 2 meter. De kelderafdekking bestaat uit een betonplaat.



Figuur 3 - Opbouw infiltratieput, filterstelling en bodemopbouw

De waarnemingsput

Op circa 5 meter afstand van de infiltratieput is een waarnemingsput geplaatst, voorzien van een viertal peilfilters en een meetelektrodenkabel (zie figuur 3). Bij deze put is hetzelfde boorsysteem toegepast als bij de infiltratieput. De meetelektrodenkabel of zoutwachter is een TNO-kabel met 13 elektrodenparen met een hart-op-hartafstand van 1,5 meter. Ook hier is de doorboorde weerstandslaag afgedicht met een kleistop.

2.2 De opbouw van infiltratieput Pc

De constructie van deze infiltratieput is identiek aan die van Pd. In de valbuis is echter geen onderwaterpomp ingehangen gezien de lage schoonpompfrequentie.
Ook de op 5 m afstand aanwezige waarnemingsput is qua uitvoering gelijk aan die bij de noordelijke infiltratieput Pd.

2.3 Bepaling van de putweerstand

Door geregelde peilwaarnemingen in valbuis, peilbuizen van de infiltratieput (BRON respectievelijk PF, zie figuur 3) en peilbuizen van de waarnemingsput (WP, zie figuur 3) kan de weerstandsopbouw in de put nauwkeurig worden gevolgd; vooropgesteld dat het infiltratiedebiet en de watertemperatuur bekend zijn. Peil- en volumestroommetingen vinden gemiddeld 9 maal per maand plaats.
De specifieke weerstand, de weerstand per eenheid infiltratiedebiet, bepaald uit het verschil tussen BRON-peil en het niveau in peilbuis PF4, geeft een indruk van de verstopping die optreedt op het infiltratiefilter en/of in de binnenste lagen van de omstorting.

Verstopping van de boorgatwand en/of de buitenste lagen van de omstorting kan worden vastgesteld door bepaling van de specifieke weerstand tussen:

1. de peilfilters PF4 en WP4;
2. de waarnemingsfilters PF4 en PF3.
   In dit geval is een waarnemingsput niet noodzakelijk voor het volgen van de verstopping. Een probleem, dat zich hierbij echter kan voordoen, is afbrokkeling van de klei-afdichting tussen de peilfilters PF3 en PF4 als gevolg van frequent terugpompen met een groot debiet. Hierdoor zou een kortsluitstroming kunnen ontstaan tussen beide filters, zodat betrouwbare controle van de optredende verstopping niet meer mogelijk is.
   Bij de bespreking van de proefresultaten zal hier nader op worden ingegaan.

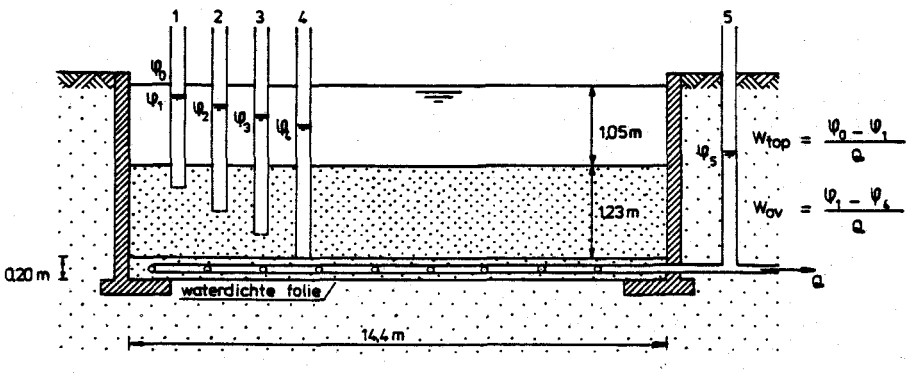
De weerstand, die rechtevenredig is met de viscositeit van het infiltratiewater, wordt in belangrijke mate beïnvloed door de temperatuur van dat water. Alle weerstanden zijn daarom herleid naar een temperatuur van 10 graden Celsius.
Een correctie voor de verandering van de vloeistofdichtheid bij temperatuurverandering is achterwege gelaten. Dit is toelaatbaar gezien de geringe diepte van het persfilter. De dichtheid van het infiltratiewater varieert maximaal 2 à 3 promille.

3 HET LANGZAAM ZANDFILTER

3.1 De filterconstructie

Het filterbed, dat zich bevindt tussen betonnen perronstukken, is aangebracht op de vaste grondslag, die daartoe is bekleed met een waterdichte folie. De oppervlakte van het filter bedraagt circa 212 m^2, de hoogte 2,5 m. Op de bodem bevindt zich

een steunlaag van 20 cm filtergrind (korreldiameter 1,2 - 1,7 mm), waarin 9 harkvormig met elkaar verbonden PVC-drainbuizen met een diameter van 50 mm zijn geplaatst onder een hart-op-hartafstand van 1,5 m.
Deze drains zijn voorzien van een dubbele omhulling van nylonweefsel. Op de steunlaag is een 1,2 m dik pakket ongegloeid duinzand aangebracht met een mediane korreldiameter van 210 micrometer.
Op verschillende niveaus in het filterbed en op de effluentleiding zijn stijgbuizen geplaatst om de weerstandsopbouw over het filter te kunnen volgen (zie figuur 4). Het bovenstaande water wordt op een constant peil gehouden.
Sinds mei 1982 is het langzaam zandfilter afgedekt met een drijvende, lichtremmende folie ter voorkoming van algengroei.



Figuur 4 - Het langzaam zandfilter

3.2 Bepaling van de weerstand in het filterbed

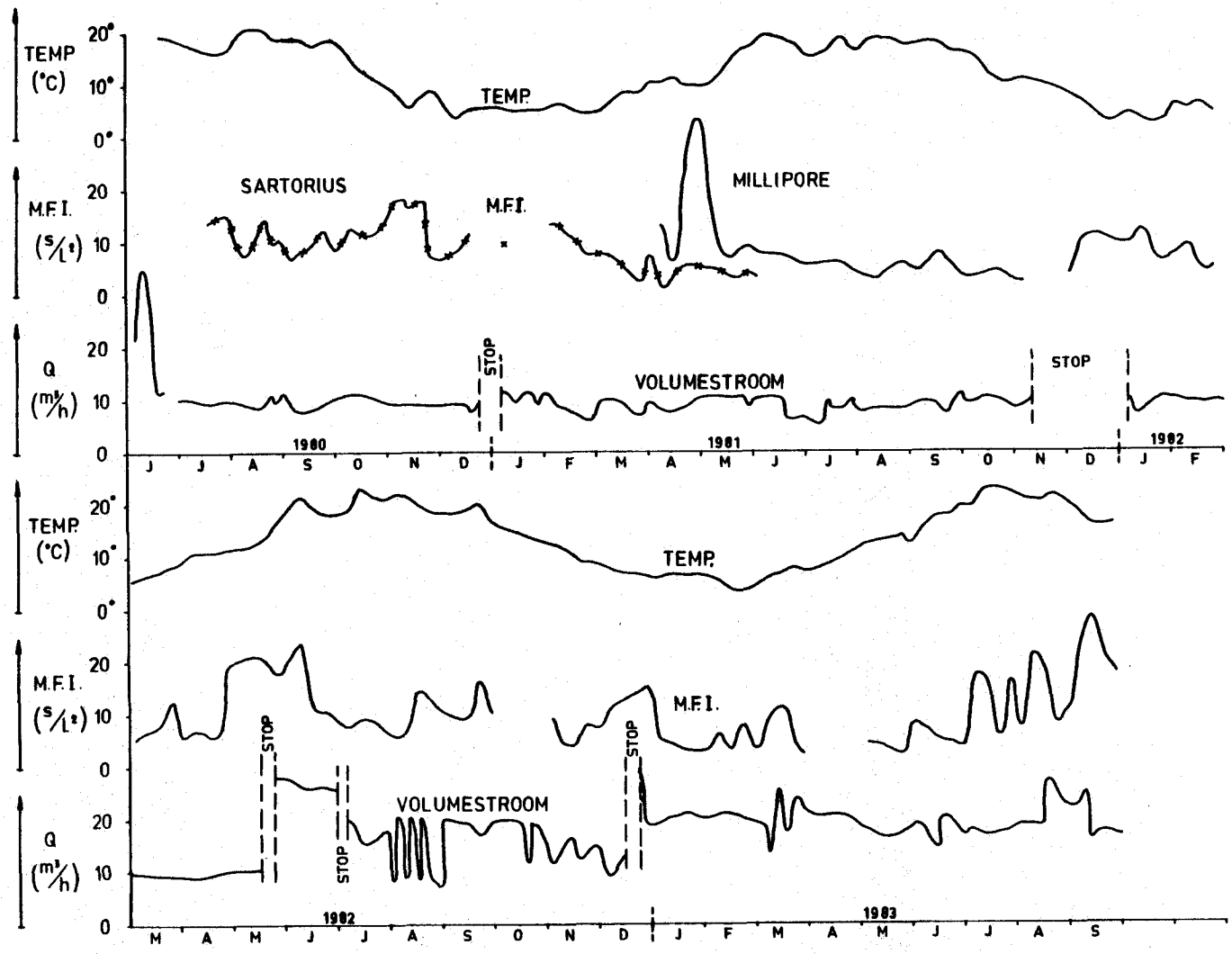
Verwacht mocht worden dat de belangrijkste weerstandsontwikkeling in de top van het filterbed zou optreden. De weerstand van de toplaag, Wtop (zie figuur 4), is daartoe afzonderlijk bepaald en wel

uit het verschil tussen het peil van het bovenstaande water en het niveau in peilbuis 1, per eenheid filterbelasting en herleid naar een temperatuur van 10 graden Celsius.
De weerstand in het overige deel van het filterbed is berekend uit het verschil tussen de niveaus in de peilbuizen 1 en 4.

4 DE KWALITEITSPARAMETERS VAN HET INFILTRAAT

De Membraanfiltratie-index (MFI)

Bij de MFI-bepaling is tot begin april 1981 gebruik gemaakt van membraanfilters van het type Sartorius met een poriegrootte van 0,45 micrometer. Vanaf begin juni 1981 zijn uitsluitend Milliporefilters toegepast, eveneens met een poriediameter van 0,45 micrometer. Tijdens de tussenliggende periode van twee maanden werd met beide membraanfiltertypen wekelijks de kwaliteit van het WKR-I-water bepaald onder vrijwel identieke omstandigheden. De Sartoriusfilters vertoonden minder gevoeligheid voor veranderingen in de waterkwaliteit dan de Milliporefilters (zie figuur 5).
Uit simultane metingen door de WRK, GW en door het WLZK is gebleken dat MFI-bepalingen in hoge mate worden beinvloed door de gebruikte apparatuur en door de wijze van uitvoering.



Figuur 5 - Infiltratieput Pd: Verloop van temperatuur, MFI en volumestroom Q

Troebelheid

In de periode oktober 1980 tot en met maart 1981 werd van het WRK-I-water continu de troebelheid bepaald met een Sigrist-troebelheidsmeter. Troebelheidspieken van langere duur bleken in een aantal gevallen duidelijk samen te vallen met een weerstandstoename in de noordelijke persput Pd.

Chemische parameters

Maandelijks worden monsters genomen van het infiltratiewater in beide putten en van het bodemwater ter plaatse van de waarnemingsfilters WP3 en WP4. Op de chemische analyse van de watermonsters wordt in deze bijdrage niet ingegaan.

5 DE RESULTATEN VAN DE PROEFNEMINGEN

5.1 De noordelijke infiltratieput Pd

5.1.1 De putbelasting (figuur 5)

De noordelijke put, die in juni 1980 in gebruik is genomen, wordt rechtstreeks gevoed met WRK-I-water. De putbelasting is in de beginfase van de proeven laag gehouden met een debiet van 10 m^3/h; dit komt overeen met een (filter)snelheid van circa 0,5 m/h op de boorgatwand. De initiële weerstand op de boorgatwand bedroeg circa 2,5 $cm/m^3/h$.
De in het algemeen hoge schoonpompfrequentie en de handmatige bediening van de onderwaterpomp lieten de eerste jaren geen vergroting van het infiltratiedebiet toe. Eerst nadat de terugpompprocedure was geautomatiseerd kon de volumestroom worden opgevoerd tot circa 20 m^3/h. Schoonpompen geschiedt in het algemeen met een debiet van 60 m^3/h.

De sinds de aanvang van de proeven geïnfiltreerde en teruggepompte hoeveelheden staan vermeld in tabel 1.

periode	hoeveelheid geïnfiltreerd m^3	hoeveelheid teruggepompt m^3	terugpompverlies %	gemiddelde putbelasting (inclusief perioden van stilstand) m^3/h
1980 (vanaf 18/6)	37990	594	1,6	8,0
1981	101230	1642	1,6	11,6
1982	93130	3130	3,4	10,6
1983 (t/m sept.)	138500	1135	0,8	21,1
totaal t/m 9/1983	370850	6501	1,7	12,9

Tabel 1 - Pd: geïnfiltreerde hoeveelheden water

5.1.2 De waterkwaliteit (figuur 5)

De kwaliteit van het aangevoerde water is verre van

constant. De MFI varieerde in de beschouwde periode tussen 2 en 33 s/l^2.
Er is geen duidelijk verband aangetoond tussen MFI en verstopping van de persput.

5.1.3 De hydraulische putweerstand (figuren 6 en 7)

Verstopping manifesteerde zich in de put zowel op het infiltratiefilter en/of in de binnenste lagen van de omstorting (1), als ter hoogte van de boorgatwand (2).

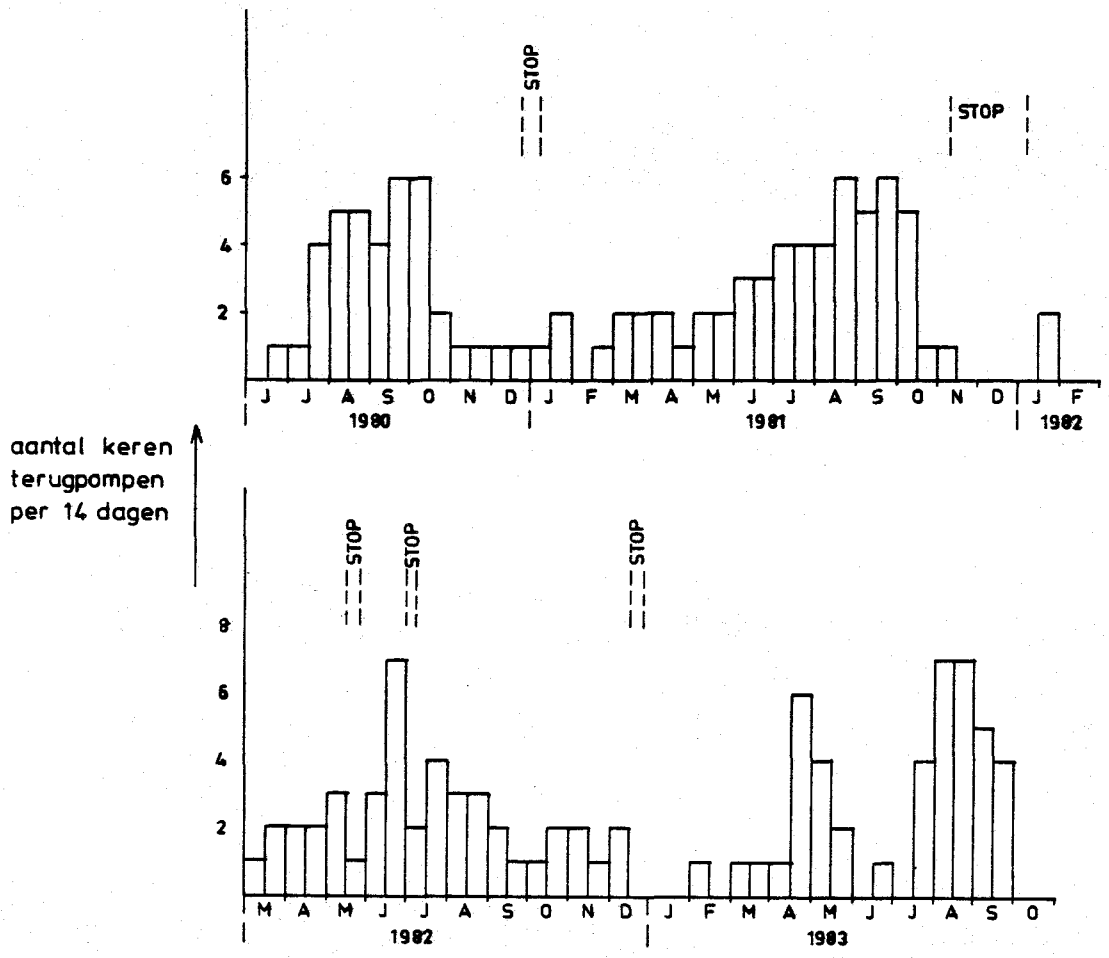
Ad 1. De snelheid van weerstandopbouw rond het filter bepaalt de schoonpompfrequentie. Duidelijk valt het seizoensafhankelijke karakter van deze schoonpompfrequentie en daarmee van de tijdelijke verstopping op (zie figuur 6). Terugpompen verwijdert de verstopping volledig.

Ad 2. De verstopping van de boorgatwand, die veel minder explosief optreedt, blijkt zowel een tijdelijke als een (semi-)permanente component te hebben (zie figuur 7). De hoge terugpompfrequentie in de zomermaanden voorkomt niet alleen verdere weerstandsopbouw maar doet de verstopping ter plaatse van de boorgatwand afnemen. In het voor- en najaar neemt de weerstand sterk toe.

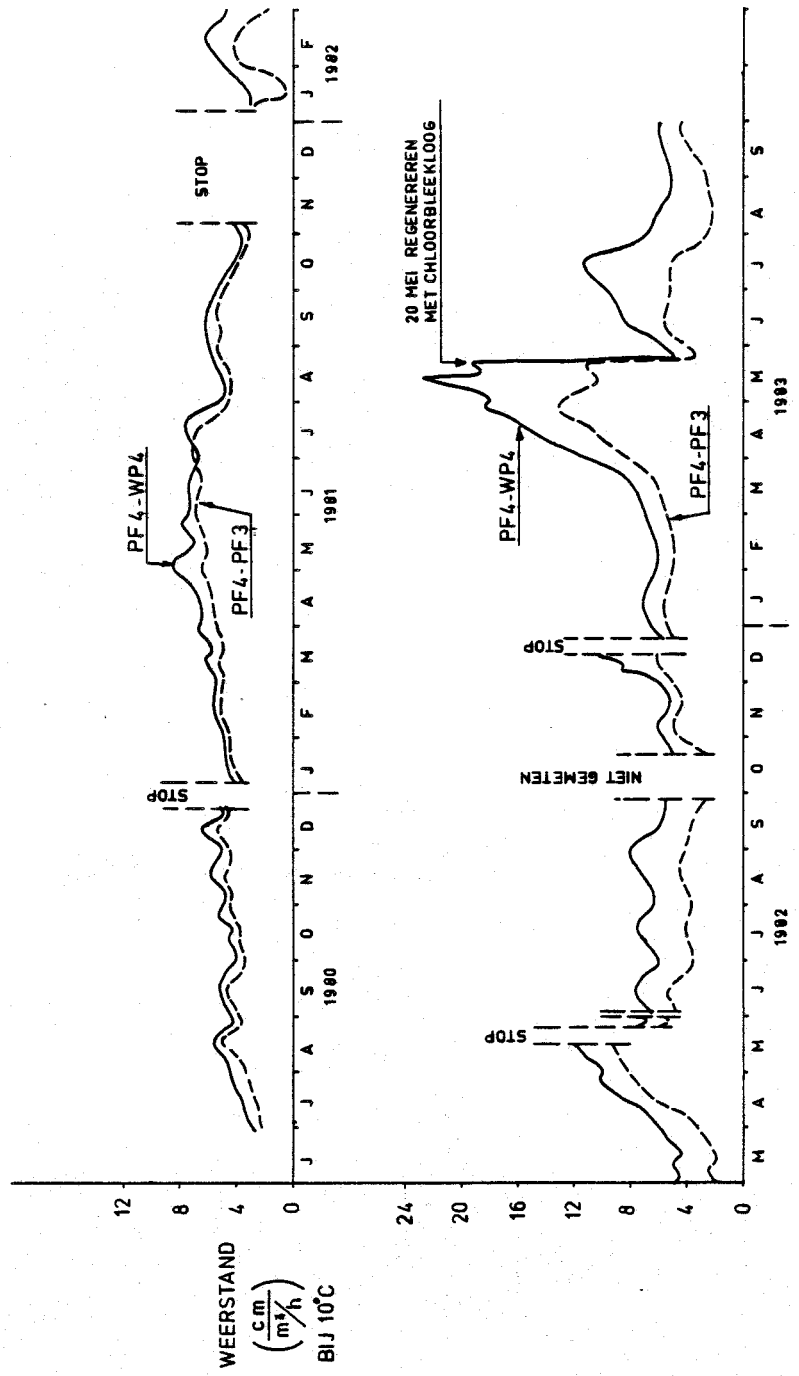
Waarschijnlijk is de verstopping voor een belangrijk deel te wijten aan de groei van micro-organismen. Aanwijzingen hiervoor zijn:

1. de terugpompfrequentie, veroorzaakt door de temperatuursafhankelijke weerstandsopbouw rond het infiltratiefilter (figuur 6);
2. de weerstandsafname in een periode van stilstand

(figuur 7 - in mei 1982 en in mindere mate in december 1982);



Figuur 6 - Terugpompfrequentie van Pd als functie van de tijd



Figuur 7 - Infiltratieput Pd: Weerstandsverloop nabij de boorgatwand

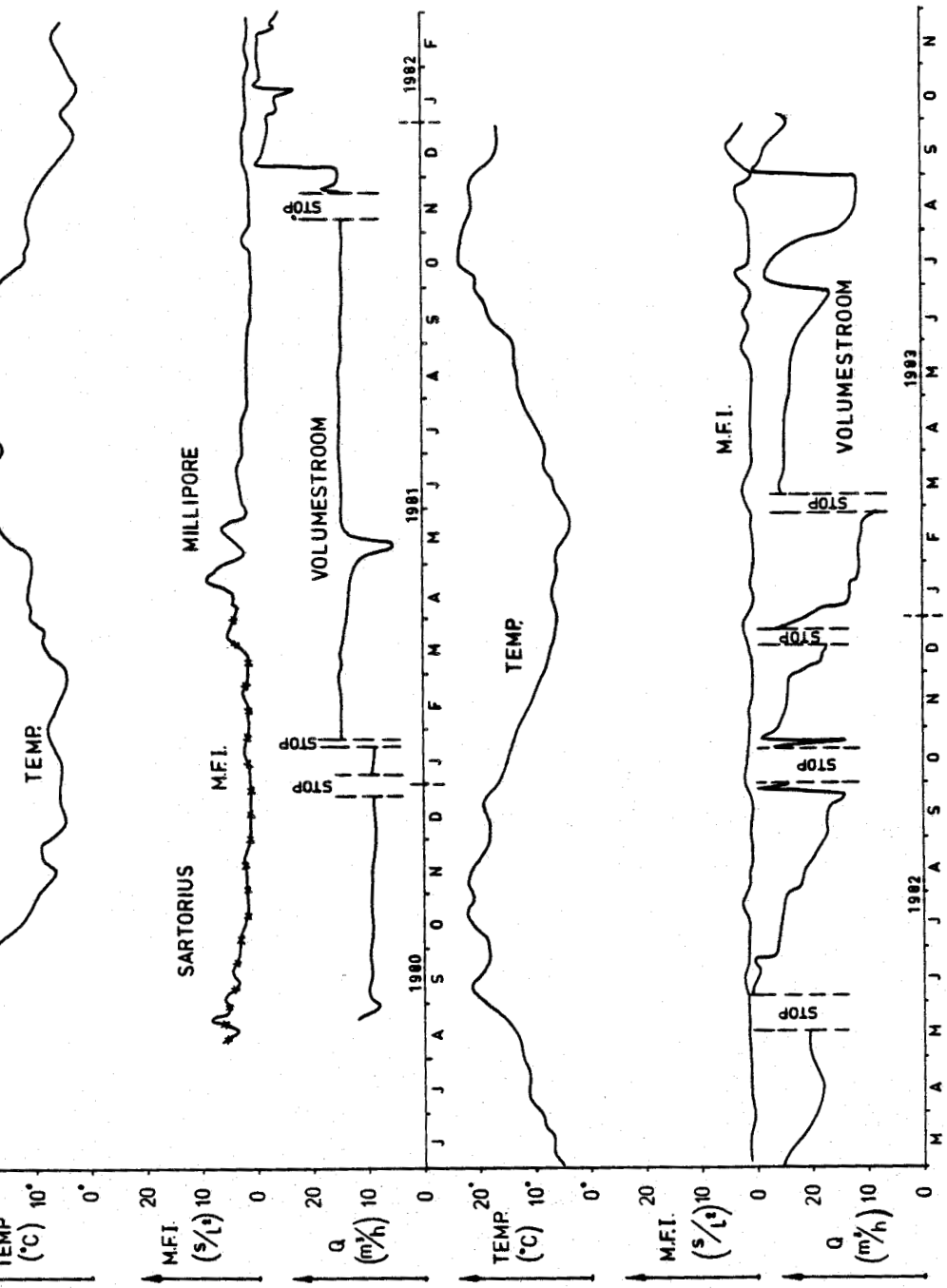
3. de vermindering van de weerstand na een behandeling met chloorbleekloog (figuur 7 - mei 1983). Deze weerstand bleek niet te kunnen worden verwijderd met een aangepaste schoonpompprocedure.

Zoals reeds aangehaald in paragraaf 2.3 kan de weerstand op de boorgatwand eveneens worden bepaald uit vergelijking van de niveaus in de peilbuizen PF3 en PF4. Gevaar voor kortsluitstroming ten gevolge van afbrokkeling van de kleiafdichting tussen beide filters is echter niet denkbeeldig. Dit zou een verklaring kunnen zijn voor het wijken van de weerstandskrommen na december 1981 (zie figuur 7) en van de lage waarden van de weerstand in januari en maart 1982 en in augustus 1983, welke kleiner zijn dan de initiële weerstandswaarde.

5.2 De zuidelijke infiltratieput Pc

5.2.1 De putbelasting (figuur 8)

Deze put, in gebruik sinds 1 september 1980, ontvangt WRK-I-water dat vóór infiltratie een extra zuivering ondergaat via een langzaam zandfilter.
De infiltratie is gestart met een debiet van 10 m^3/h (snelheid ter plaatse van de boorgatwand: 0,5 m/h). De initiele weerstand bedroeg circa 3,5 $cm/m^3/h$. Geleidelijk is de putbelasting opgevoerd tot 25 à 30 m^3/h (snelheid boorgatwand: 1,2 à 1,5 m/h). De weerstandstoename in de bovenste laag van het filterbed van het langzaam zandfilter heeft echter een aanzienlijke reducerende werking op de effluentstroom en daarmee op het infiltratiedebiet van de zuidelijke infiltratieput Pc (zie de figuren 8 en 11). Sinds het begin van de proefnemingen zijn



Figuur 8 - Infiltratieput Pc: Verloop van temperatuur, MFI en volumestroom Q

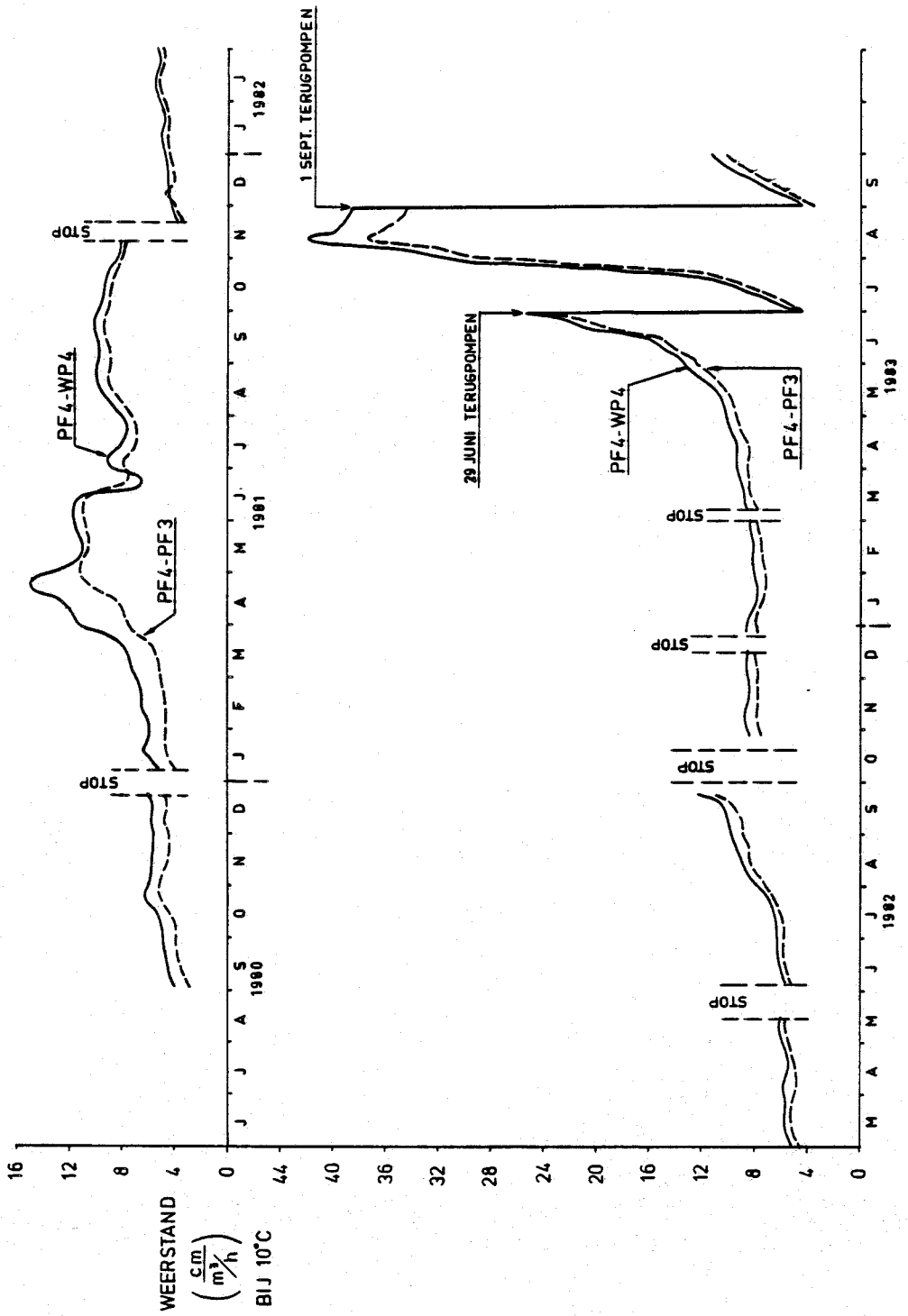
periode	hoeveelheid geïnfiltreerd m^3	hoeveelheid teruggepompt m^3	terugpompverlies %	gemiddelde putbelasting (inclusief perioden van stilstand) m^3/h
1980 (vanaf 1/9)	27230	0	0	8,6
1981	148040	0	0	16,9
1982	172310	0	0	19,7
1983 (t/m sept.)	125650	350	0,3	19,2
totaal t/m 9/1983	473230	350	0,1	17,4

Tabel 2 - Pc: geïnfiltreerde hoeveelheden water

de in tabel 2 vermelde hoeveelheden water geïnfiltreerd en teruggepompt.

5.2.2 De waterkwaliteit (figuur 8)

Het effect van het langzaam zandfilter blijkt onmiskenbaar uit vergelijking van de MFI-waarden van



Figuur 9 - Infiltratieput Pc: Weerstandsverloop nabij de boorgatwand

het influent (WRK-I-water) en het filtraat. Vergelijk de figuren 5 en 8.
Het effluent heeft in het algemeen een vrij constante kwaliteit met een MFI die de laatste jaren de 2 s/l^2 niet te boven gaat.

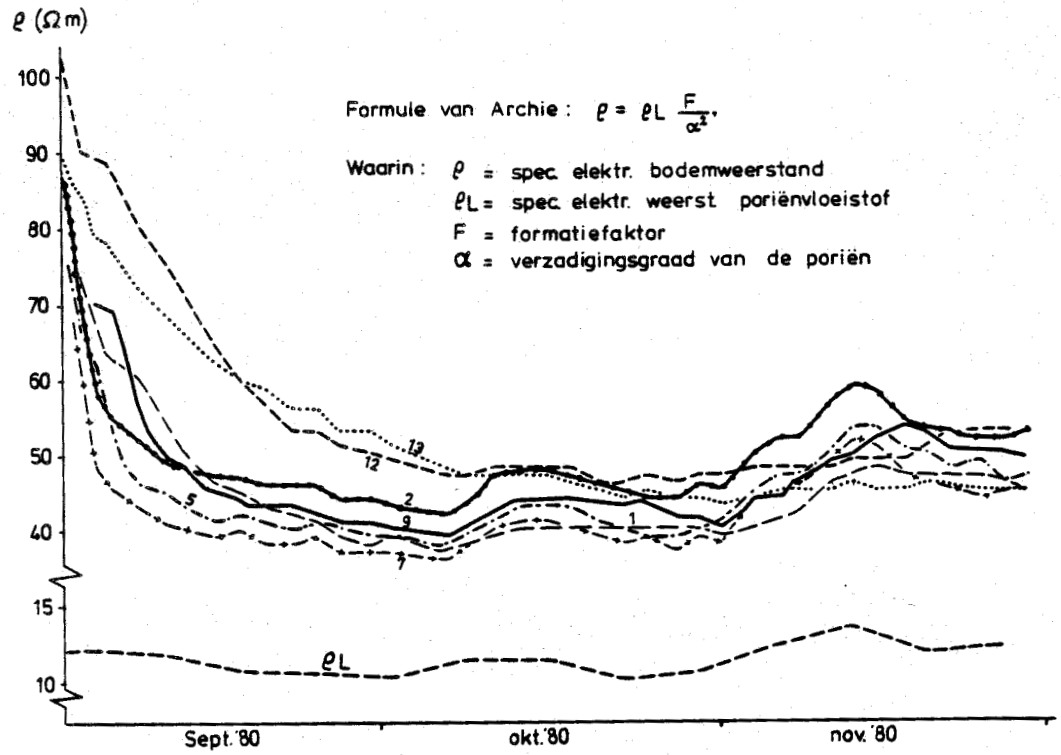
5.2.3 De hydraulische putweerstand (figuur 9)

De weerstandspiek in de periode april/mei 1981 valt samen met een kwaliteitsverslechtering van het aangeboden infiltratiewater (figuur 8). Verstoring van de werking van het langzaam zandfilter is hiervan de oorzaak. Zie paragraaf 5.4.2.
Een weerstandstoename doet zich voornamelijk voor in perioden met een hoge temperatuur. Dit is zeer waarschijnlijk toe te schrijven aan microbiologische activiteit. Een duidelijke aanwijzing hiervoor is de weerstandsafname tijdens de infiltratiestops van november 1981 en oktober 1982.
De extreme verstopping in de zomer van 1983 noodzaakte tweemaal tot het schoonpompen van de put, waartoe speciaal een onderwaterpomp moest worden ingehangen. Het was mogelijk met deze ingreep de weerstand tot de oorspronkelijke waarde te reduceren.
Regeneratie met chemicaliën is tot op heden niet noodzakelijk gebleken.

5.3 De elektrische weerstandsmetingen (figuur 10)

Voor bestudering van de verbreiding van het geïnfiltreerde water in de ondergrond staan de elektrische weerstandsmetingen met vaste elektrodenopstelling in de waarnemingsputten ter beschikking (zie figuur 3). Met de dertien elektrodenparen met een hart-op-hartafstand van 1,5 m kan de kwaliteitsver-

andering van het formatiewater op diverse diepten worden gevolgd.
Uit de gemeten bodemweerstand R(Ω) wordt de specifieke elektrische formatieweerstand ρ(Ωm) berekend



Figuur 10 - Het verloop van de specifieke elektrische formatieweerstand ρ en de specifieke elektrische weerstand van het infiltratiewater ρ_L gedurende de eerste infiltratieperiode ter plaatse van waarnemingsput zuid.
De getallen geven het betreffende elektrodenpaar aan.

volgens: $\rho = 4\pi aR$, waarin a staat voor de elektrodenafstand, i.c. 0,2 m.
Dankzij een continue infiltratie op de zuidelijke put Pc is een redelijk goed beeld verkregen omtrent het inhomogene karakter van de bodem in de nabijheid van het putfilter.
Het verloop van de specifieke elektrische formatieweerstand is voor de eerste drie maanden van infiltratie weergegeven in figuur 10. Tevens is de specifieke elektrische weerstand van het infiltratiewater aangegeven.
Door de intermitterende bedrijfsvoering van de noordelijke put Pd is de interpretatie van de elektrische weerstandsmetingen bij deze put minder betrouwbaar.
Toepassing van de theorie van Archie (zie figuur 10) heeft formatiefactoren opgeleverd als weergegeven in tabel 3. De formatiefactor is een fysische grootheid die samenhangt met de porositeit van het bodemmateriaal.

elektroden-paar	Pc	Pd	elektroden-paar	Pc	Pd
1	3,5	3,8	7	3,7	-
2	4,2	4,2	8	3,4	3,9
3	4,0	4,0	9	3,9	4,2
4	4,2	3,9	10	3,8	3,9
5	3,8	3,9	11	3,5	4,2
6	4,0	4,3	12/13	-	-

Tabel 3 - Formatiefactoren

De elektrodenparen 7 (Pd), 12 en 13 lieten geen betrouwbare interpretatie toe.

5.4 Het langzaam zandfilter

5.4.1 De inloopfase

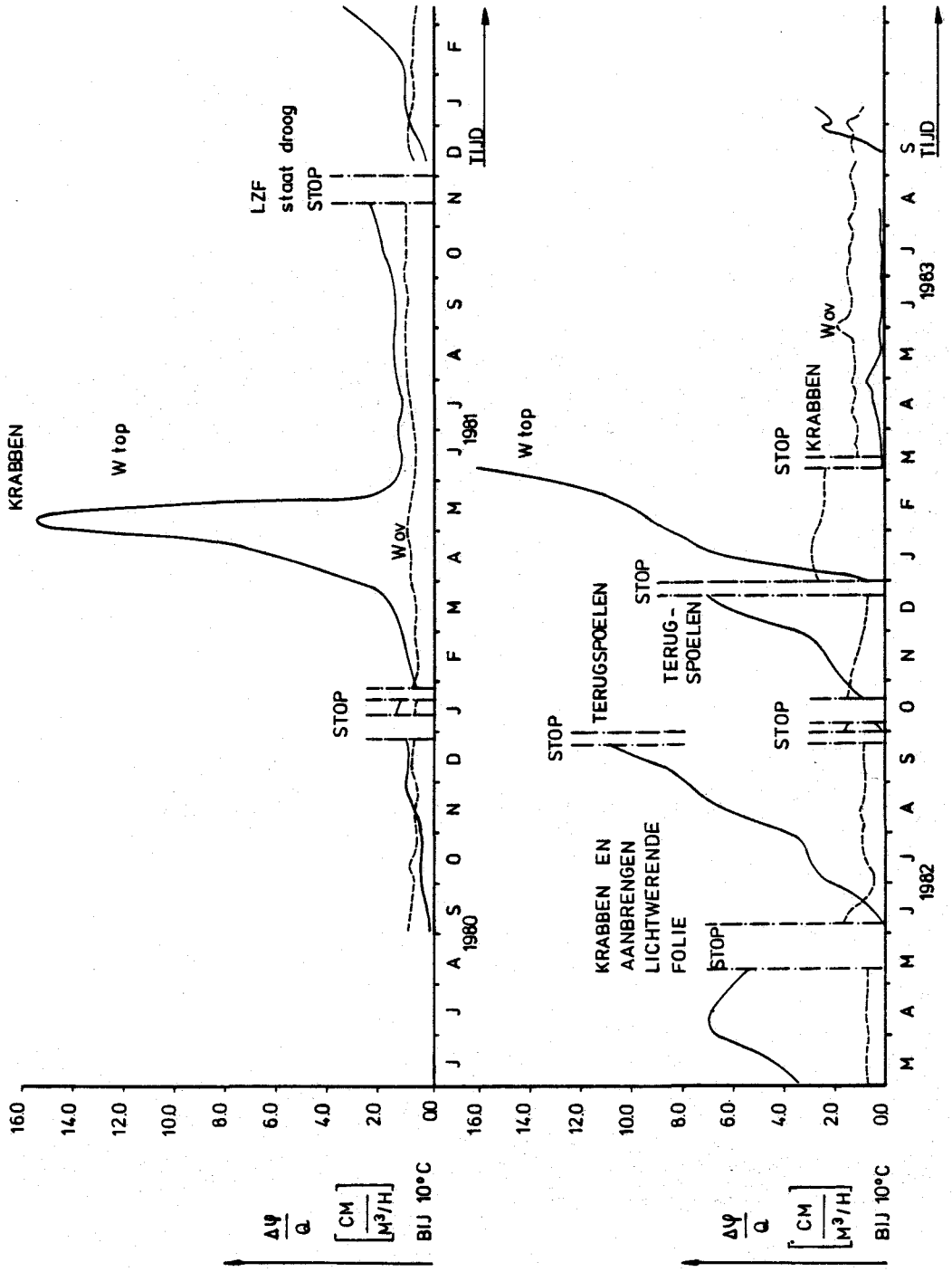
Direct na ingebruikname leverde het langzaam zandfilter als gevolg van uitspoeling van slib- en humusdeeltjes een effluent dat ongeschikt was voor infiltratie. Na een inlooptijd van circa drie maanden was de kwaliteit van het filtraat zodanig verbeterd, dat op 1 september 1980 gestart kon worden met infiltratie op de zuidelijke put Pc.

5.4.2 De weerstand van het filterbed (figuur 11)

De weerstandspiek van april/mei 1981 wordt toegeschreven aan de gevolgen van algengroei. Een dergelijke weerstand veroorzaakt een sterke reductie van de effluentstroom en beïnvloedt de kwaliteit van het filtraat in negatieve zin (zie figuur 8 - MFI). In mei 1982 is het langzaam zandfilter voorzien van een lichtremmende afdekking in de vorm van een drijvende folie.
De steile weerstandsgradiënt na mei 1982 is deels te wijten aan een slechte kwaliteit van het aangevoerde WRK-I-water en deels aan de wijze waarop het langzaam zandfilter is "geregenereerd" (zie paragraaf 5.4.3).
De weerstand van de diepere lagen van het filterbed Wov vertoont een seizoensafhankelijke tendens, maar is in het algemeen geringer dan Wtop.

5.4.3 Regeneratie van het langzaam zandfilter

Tot regeneratie van het filter wordt besloten zodra de weerstand van de toplaag zodanig is toegenomen dat de volumestroom van het effluent sterk is gere-



Figuur 11 - Weerstandsverloop in het langzaam zandfilter

duceerd.

Ter vermindering van de weerstand zijn twee werkwijzen toegepast:

1. verwijdering van de toplaag (1 à 2 cm) van het filterbed door krabben.
   Dit gebeurt handmatig en is zeer arbeidsintensief;
2. terugspoelen met een gering debiet.
   Hoewel deze methode verstoring geeft van het microbiologische milieu in het filterbed, is een versnelde weerstandsopbouw in de infiltratieput Pc na een dergelijke ingreep niet waargenomen (september en december 1982). Een toename van de weerstand is wel geconstateerd in de diepere lagen van het filterbed van het langzaam zandfilter.
   Door omkering van de stroomrichting worden slib- en humusdeeltjes uit de toplaag van het filterbed gemobiliseerd, waardoor de weerstand van die laag vermindert. Deze deeltjes komen in zwevende toestand, maar worden vanwege de geringe stroomsnelheid van het boven het filterbed staande water niet via de overstort afgevoerd.
   Na herstel van de normale bedrijfsvoering slaan de deeltjes opnieuw neer en veroorzaken zodoende een versnelde verstopping van de toplaag. De weerstand van de overige lagen van het filterbed neemt door uitspoeling geleidelijk weer af tot de oorspronkelijke waarde.
   Ondanks het feit dat deze methode vrijwel geen extra mankracht vergt, is afgezien van verdere toepassing, gezien de minder gunstige ervaring hiermee.

6 ENKELE VOORLOPIGE CONCLUSIES

- In tegenstelling tot infiltratie na een additionele voorzuivering door middel van langzaam zandfiltratie (P_c) leidt rechtstreekse infiltratie van WRK-I-water (P_d) met name in de zomerperiode tot een hoge schoonpompfrequentie. Bovendien treedt hierbij soms een hardnekkige vorm van putverstopping op (zie figuur 7 - mei 1983).
  Recente informatie (juli 1984) heeft aangetoond dat zelfs een chloorbleekloogbehandeling van P_d niet tot het gewenste resultaat, i.c. reductie van de putweerstand tot de initiële waarde, heeft geleid.

- De noodzakelijk hoge schoonpompfrequentie van put P_d in de zomermaanden (zie paragraaf 5.1.3) voorkomt verstopping ter hoogte van de boorgatwand in die periode.
  In winter en voorjaar, wanneer de weerstandsopbouw rond het infiltratiefilter zich aanzienlijk minder explosief voordoet en de retourpompfrequentie dientengevolge laag is, neemt de weerstand ter plaatse van de boorgatwand geleidelijk toe. Waarschijnlijk treedt ook enige verstopping in de formatie op, gezien het feit dat (laagfrequent) retourpompen weinig effect heeft.
  Ter ondervanging van dit probleem zou kunnen overwogen worden in winter en voorjaar de schoonpompfrequentie op te voeren.

Bloemendaal, 25 januari 1984

DIEPINFILTRATIEPROJECT "HERTENWEI"

G.J. Zaadnoordijk, R.A. Visser
N.V. Leidsche Duinwater Maatschappij (LDM)

SAMENVATTING

Uitbreiding van de waterwinning is noodzakelijk. Dit kan onder meer met diepinfiltratie. Voor wat betreft het diepinfiltratieproject "Hertenwei" moet worden opgemerkt dat:

- door de gunstige locatie geen schade wordt aangebracht aan de duinen;
- het watervoerend pakket een beperkte dikte heeft waardoor brak water kan worden onttrokken;
- de beweging van brak water voor het ontwerp belangrijker is dan de beweging van zout water en dat
- een praktijkperiode gewenst is.

Voor wat de rekenmethoden betreft kan worden gesteld dat de niet-stationaire stroming van zoet, brak en zout water met de genoemde programmatuur (SNARK, TRIFLO zie (2) en (3)) voor eenvoudige gevallen op een microcomputer gesimuleerd kan worden. Echter niet de invloed van anisotropie en van de gelaagdheid van de aquifer. Aanvullende berekeningen zijn, voor het verkrijgen van een juist beeld van de stroming, noodzakelijk. Hiervoor kan bijvoorbeeld gebruik gemaakt worden van het programma FLOP (zie (1)).

1 INLEIDING

Het bedrijf werd in 1878 opgericht om vanuit de duinwaterwinplaats (± 750 ha tussen Katwijk en het

Wassenaarse Slag) de stad Leiden te voorzien van veilig drinkwater. In 1940 ging men als eerste in Nederland over tot infiltratie van oppervlaktewater, hetwelk werd gewonnen uit de aan de duinen grenzende Boezem van Rijnland. De infiltratiepanden werden in de loop der jaren geleidelijk uitgebreid. Aanvankelijk op vaak grote afstand van de winningsmiddelen; later toen de vraag snel toenam dichterbij. Aldus was het mogelijk met nagenoeg dezelfde winmiddelen te komen van 3 miljoen m^3/jaar naar een produktie van thans ruim 22 miljoen m^3/jaar.
Daarnaast kunnen tussen de oude op grote afstand en de later dichterbij de bestaande winningsmiddelen aangelegde infiltratievijvers nieuwe winmiddelen worden aangelegd. In principe is het mogelijk daardoor een uitbreiding tot 40 miljoen m^3/jaar te realiseren. Vergunning tot het aanleggen van de voor deze capaciteit nodige nieuwe draineerleidingen werd in 1974 aangevraagd. In 1980 werd een vergunning verleend, waarbij de vergunningshoeveelheid slechts werd vergroot van 15 miljoen m^3/jaar tot 25 miljoen m^3/jaar. Als gevolg van ingestelde beroepen en andere procedures kon nog steeds niet met de aanleg van nieuwe drains begonnen worden.
In verband met de prognoses van de waterbehoefte, en de duur van een vergunningsprocedure, werd in 1981 een uitbreiding van de thans toegestane diepwaterwinning ad 1 miljoen m^3/jaar naar 8 miljoen m^3/jaar aangevraagd. Inhaerent hieraan was een infiltratie met persputten omdat een in de ondergrond der duinen aanwezige kleilaag voeding van het diepe water uit de infiltratievijvers belet.

2 BEHOEFTEDEKKING

De laatste prognoses in het kader van het tienja-

renplan geven voor het gebied dat thans door de LDM wordt verzorgd een netto-omzet van rond 24 miljoen in 1985 en van 31 miljoen m^3 in 1995. De netto-produktie in 1995 zou er als volgt kunnen uitzien:

a. winning boven de kleilaag (volgens vergunning)	24 miljoen m^3
b. diepwaterwinning (volgens vergunning)	1 miljoen m^3
c. projekt Hertenwei	6 miljoen m^3.

Er is dan nog een reserve aanwezig van circa 6 % van de jaarproduktie. Het projekt kan dus de behoefte tot circa 1995 dekken.

3 DIEPINFILTRATIESYSTEEM "HERTENWEI"

3.1 Keuze van de locatie

Een belangrijk voordeel van de toepassing van diepinfiltratie is de flexibiliteit die men heeft bij het kiezen van een geschikte locatie.
In de duinen zijn verschillende projekten mogelijk; alle met zeer geringe natuurschade. Het projekt Hertenwei is als eerste gekozen omdat het - nog geheel liggend binnen het beschermde waterwingebied - geheel gesitueerd kon worden binnen in cultuur gebrachte terreinen, zodat de natuurschade nihil is.
Het projekt bestaat uit een reeks persputten, een reeks nieuwe winningsputten, een reeks reeds bestaande diepe putten en eventueel winningsputten aan de kopeinden (zie figuur 1).

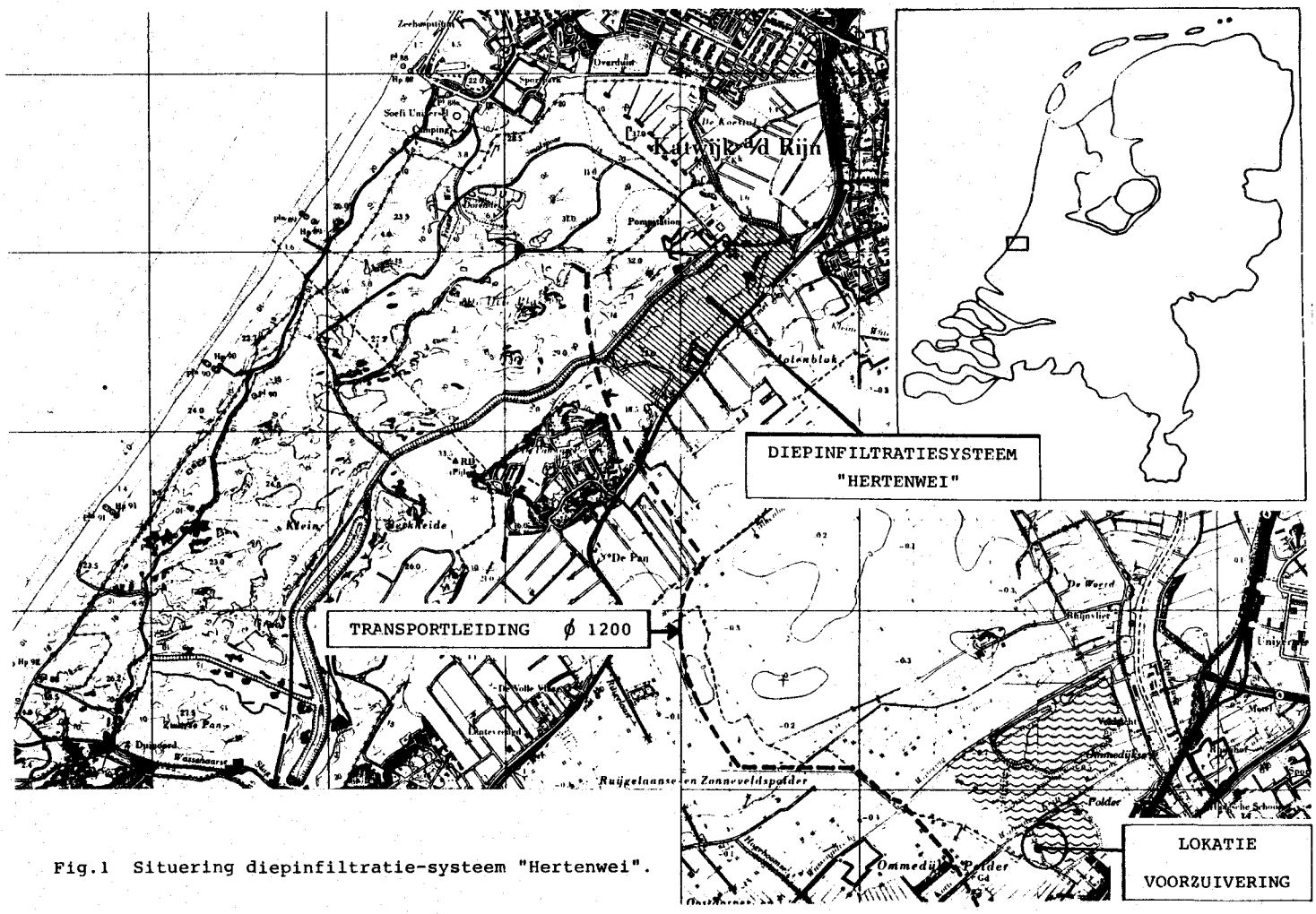
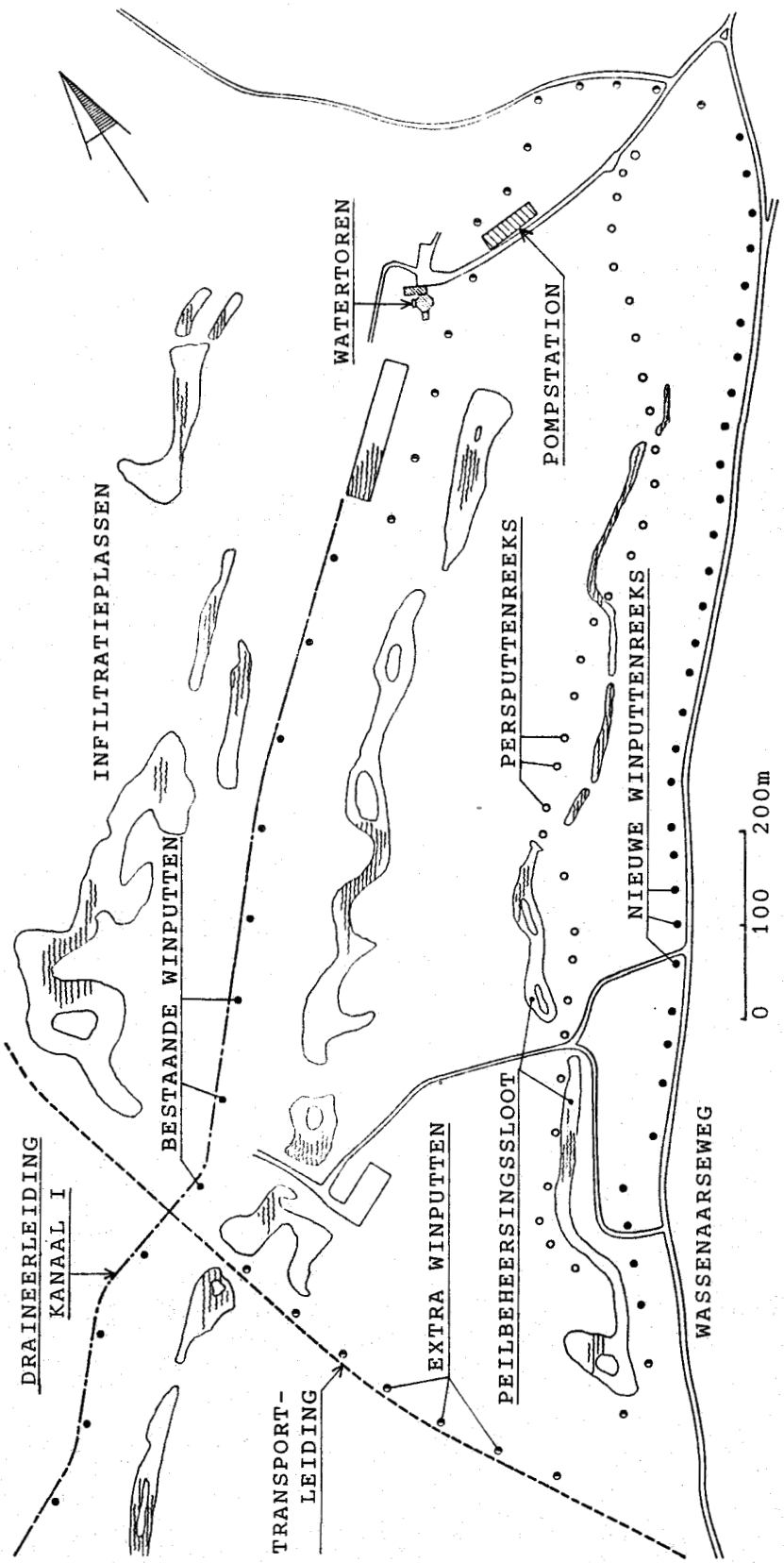


Fig.1 Situering diepinfiltratie-systeem "Hertenwei".

Figuur 1 - Situering diepinfiltratiesysteem "Hertenwei"

3.2 Hoofdlijnen van het systeem

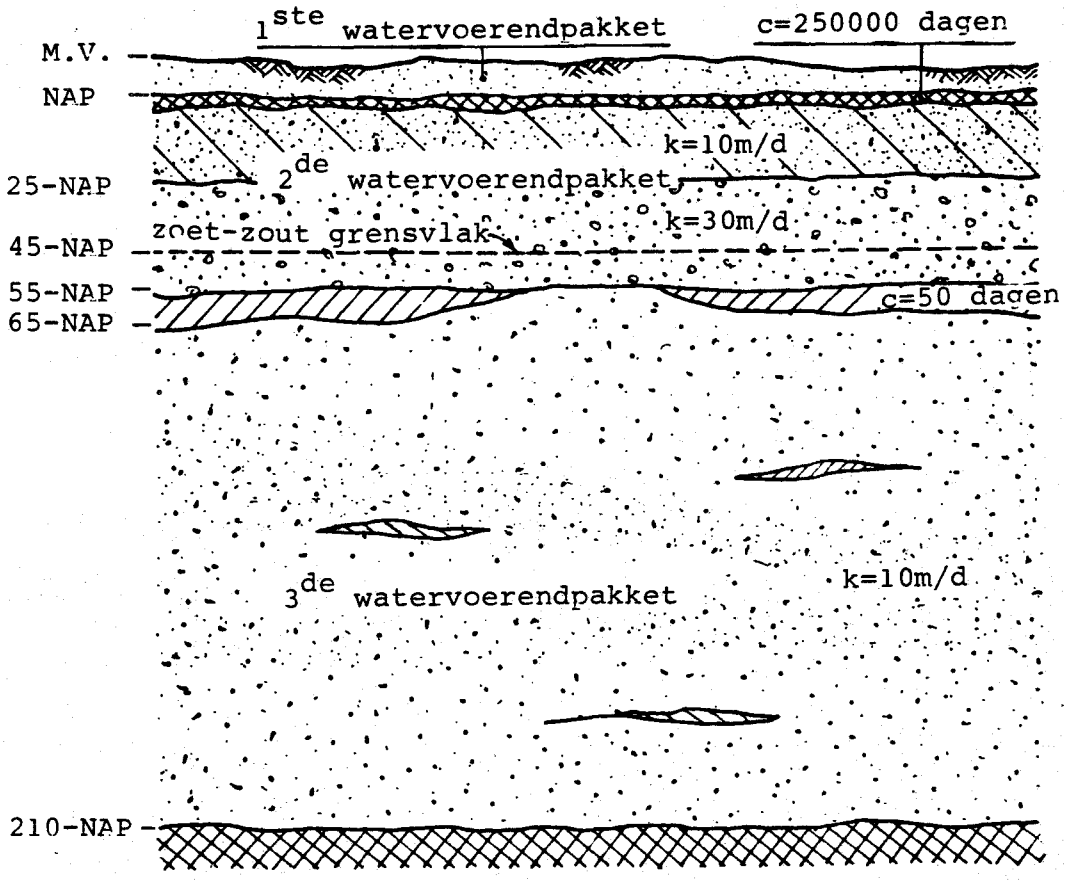
Het te infiltreren water zal worden onttrokken aan een zandwinplas bij Valkenburg, waar het ter plaatse wordt voorgezuiverd (evenals overigens het infiltratiewater, dat in het freatisch pakket via infiltratieplassen wordt geïnfiltreerd). Na transport via een circa 5 km lange leiding wordt het in de bodem gebracht.
Overwogen wordt het water bestemd voor diepinfiltratie in het freatisch pakket extra te preconditioneren, door het eveneens via de infiltratieplassen te infiltreren en op zeer korte afstand (bijvoorbeeld 1 m onder de bodem van de infiltratieplas) weer terug te winnen, voordat het met persputten wordt geïnjecteerd.
Zowel de persputtenreeks als de nieuwe winputtenreeks bestaan uit 32 putten; h.o.h. gemiddeld 40 m. De oude winputten staan h.o.h. 90 m. De afstand van de persputten tot de nieuwe en de oude winputten is 100 respectievelijk 300 m (figuur 2).
Bij infiltratie van 8 miljoen m^3/jaar is het debiet per persput bijna 30 m^3/h, waardoor bij stationaire stroming met een nieuwe winput, circa $^3/_4$ x 30 m^3/h en met een oude winput circa $^9/_4$ * $^1/_4$ x 30 m^3/h wordt onttrokken.
De winputten aan de kopeinden worden gebruikt om het in noordelijke en zuidelijke richting afstromende water te winnen.



Figuur 2 - Plaatsing van pers- en winputten

3.3 Geohydrologisch overzicht van de winplaats

De geohydrologische opbouw kan worden voorgesteld door een systeem opgebouwd uit drie watervoerende lagen. Het freatisch watervoerend pakket (1e watervoerende laag) wordt aan de onderzijde begrensd door een slecht doorlatende rivierkleilaag, iets onder NAP.
Tussen het tweede en derde watervoerende pakket komt op een diepte van 60 m -NAP een scheidende laag voor, die bestaat uit kleiige afzettingen van de formatie van Kedichem. Door erosie zijn in deze formatie geulen ontstaan, waardoor de scheidende laag op verschillende plaatsen een beperkte dikte heeft of zelfs geheel ontbreekt. Door gebrek aan



Figuur 3 - Geohydrologische opbouw van het wingebied

gegevens kunnen de dikte van het tweede watervoerende pakket en de ligging van de tertiaire basis slechts globaal worden aangegeven. Regionaal gezien is de hydraulische weerstand van deze formatie dan ook relatief gering.
In figuur 3 is een overzicht gegeven van de geohydrologische opbouw.

4 GEOHYDROLOGISCH ONDERZOEK TEN BEHOEVE VAN HET DIEPINFILTRATIESYSTEEM "HERTENWEI"

4.1 Algemeen

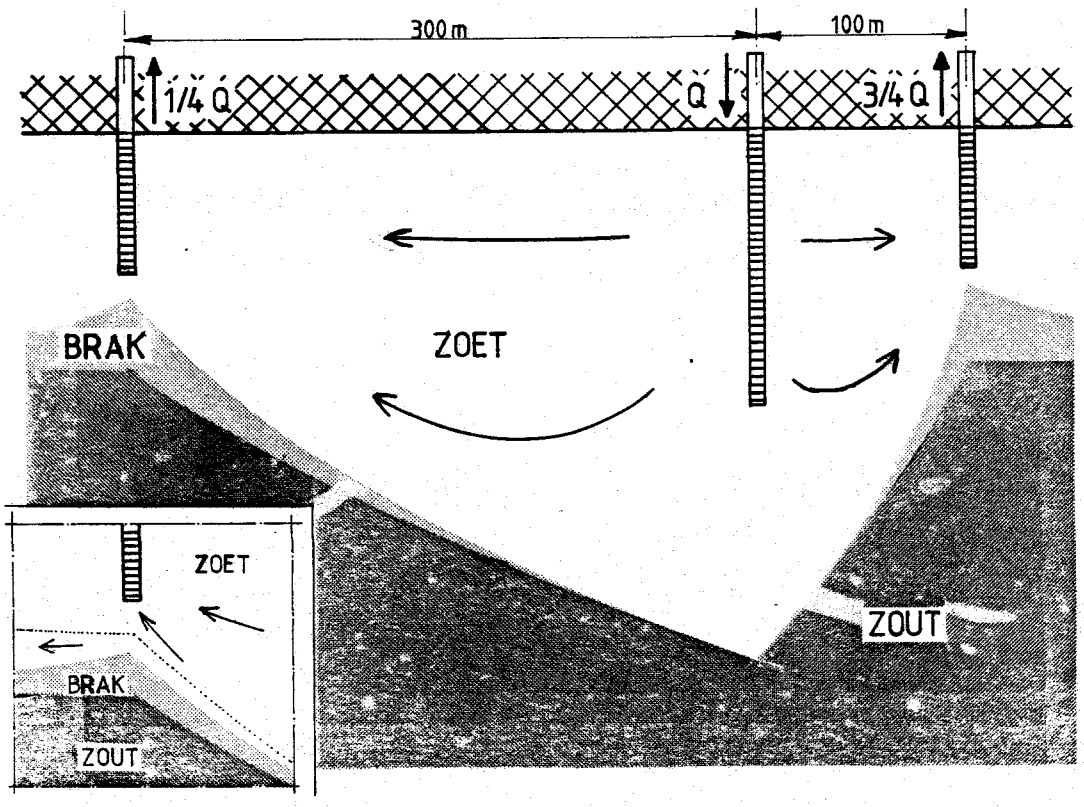
Het 2e watervoerend pakket bestaat uit een minder goed doorlatende laag (5 - 25 m -NAP) en een goed doorlatende laag (25 - 55 m -NAP) waarin de filters geplaatst zullen worden. Door de aanwezigheid van brak en zout water in het diepere deel van deze laag is het onderzoek in eerste instantie gericht op de volgende onderwerpen:
- voorraadvorming van zoet water in het diepe pakket;
- rendement van het systeem.

Het eerste aspect is van belang vanwege de mogelijkheid, dat door een calamiteit het boezemwater gedurende een periode van circa 14 dagen niet geschikt is voor inname. In deze periode wordt water gedistribueerd dat als voorraad aanwezig is.
De beperkte dikte van de "zoete" waterlaag brengt het risico met zich mee dat brak water wordt onttrokken. Dit kan worden verhinderd door meer water te infiltreren dan te onttrekken. Het rendement (dit is het percentage van het geïnfiltreerde water dan kan worden teruggewonnen) neemt echter evenzoveel af.

Hierbij kunnen twee situaties worden onderscheiden. Omdat de capaciteit sprongsgewijs wordt vergroot en de behoefte geleidelijk stijgt bedragen de kosten van extra infiltratie in de aanloopjaren om zout water te verdringen niet meer dan de variabele kosten. In deze situatie is het rendement niet erg belangrijk. Voor de bedrijfssituatie, waarbij het projekt volledig wordt gebruikt is een goed rendement uiteraard wel van belang.

4.2 Stromingen in het diepe pakket

Een schematische voorstelling van de stroming in het diepe pakket gedurende de bedrijfssituatie van de diepinfiltratie is in figuur 4 weergegeven.



Figuur 4 - Stroming van het water ten gevolge van het diepinfiltratiesysteem

De vorming van de zoetwatervoorraad is een traag verlopend proces. Deze nieuwe positie van het grensvlak en daardoor de voorraad, wordt slechts gehandhaafd doordat de persputten voortdurend een overdruk in stand houden. Wordt de infiltratie stopgezet, dan valt de drukverhoging weg en zal het grensvlak een andere positie gaan innemen.
Na een aanloopperiode, waarin de voorraad wordt opgebouwd, zal de bedrijfssituatie bereikt worden. In die situatie bestaat het verlies uit water dat in horizontale richting afstroomt om optrekken van brak water te verhinderen (figuur 4, inzet).

4.3 Modellen

Het onderzoek dat tot nu toe verricht is, bestaat uit het ontwikkelen van programmatuur voor het berekenen van de verplaatsing van het zoet-zout grensvlak, en het geschikt maken van deze programmatuur voor het gebruik op een microcomputer. De programma's zijn gebaseerd op de eindige elementenmethode en kunnen de niet-stationaire stroming van het water simuleren. Het programma SNARK (zie lit. (2)) berekent de verplaatsing van een scherp grensvlak in een homogene afgesloten watervoerende laag. Het programma TRIFLO, een van SNARK afgeleid programma (zie lit. (3)), berekent daarbij tevens de invloed van een brakke zône met een constante dichtheid.
De berekeningen met deze pas ontwikkelde programma's zijn nog in een beginstadium. Daar het met deze programma's nog niet mogelijk is de invloed van anisotropie en inhomogeniteiten op de stroming te berekenen, zal deze invloed met andere rekenmethoden afzonderlijk bepaald moeten worden. De geringe ervaring die bestaat met deze nieuwe techniek, en

de beperkte geohydrologische gegeven van de diepere lagen waarin geïnfiltreerd zal worden, maken het wenselijk, naast het uitvoeren van berekeningen, veel waarnemingen te verrichten in de aanloopperiode.

5 LITERATUURLIJST

(1) Akker, van den C., Gan, J.B.S. en Peters, J.H.
Handleiding bij het gebruik van het computerprogramma FLOP, KIWA-rapport SWE-330, 1981.

(2) Verruyt, A. en Gan, J.B.S.
Niet-stationaire stroming van zoet en zout grondwater met de elementenmethode H_2O (24), p. 542-547, 1983.

(3) Visser, R.A.
De stroming van zoet en zout grondwater in de Katwijkse duinen, oplossingen met behulp van een microcomputer. Afstudeerverslag T.H. Delft Vakgroep Gezondheidstechniek, 1984.

Leiden, september 1984

DIEPINFILTRATIE BIJ DE DUINWATERLEIDING

G.S. Huijboom met medewerking van P.L. Buijinck,
H.G. de Jonge en J. van Puffelen
Duinwaterleiding van 's-Gravenhage

1 HISTORISCHE ONTWIKKELING

1.1 Oppervlakte-infiltratie bij de Duinwaterleiding

De voornaamste reden dat aan het eind van de dertiger jaren reeds plannen werden gemaakt voor kunstmatige aanvulling van het grondwater in het Meyendelse duingebied was het feit dat het bedrijf bij de duinwaterwinning steeds meer problemen kreeg met het aantrekken van brak grondwater. Door de, sedert de oprichting van het duinwaterbedrijf in 1874, sterk toegenomen vraag naar goed en betrouwbaar drinkwater, waren de grenzen van het natuurlijk leveringsvermogen van het duin bereikt en in feite reeds ver overschreden.
In die tijd groeide het inzicht dat het onttrekken van steeds grotere hoeveelheden zoet grondwater uit het duin geen onbeperkte doorgang kon vinden. Hoewel het toenemend zoutgehalte in het gewonnen water de directe aanleiding was voor het bijstellen van de inzichten, was in feite de geringe kennis van het geohydrologische systeem de oorzaak van de toestandsverslechtering. Oppervlakte-infiltratie in het Meyendelse duingebied moest van voorgezuiverd rivierwater een kunstmatig grondwater maken dat in kwaliteit vergelijkbaar was met het vroegere duinwater. In vele opzichten is dit inderdaad gelukt.
Vooral ten aanzien van bacteriën en virussen komt een zodanige specifieke zuivering tot stand dat het gewonnen water ten aanzien van deze parameters de

oorspronkelijke grondwaterkwaliteit benadert.

1.2 De proeven met diepinfiltratie

Na de aanvang van de duininfiltratie in 1955 waren de capaciteits- en brakwaterproblemen vrijwel direct opgelost. De gevolgen van circa 70 jaar interen op de zoetgrondwatervoorraad in de ondiepe en diepe watervoerende zandformaties van het duingebied waren met de komst van de duininfiltratie echter geenszins direct verdwenen. Op een aantal plaatsen in het waterwingebied was de brakwatergrens aanzienlijk omhoog gekomen. Daarom is reeds bij het begin van de duininfiltratie gezocht naar methoden om de grondwatervoorraad in het diepe pakket met zoetwater sneller en gerichter aan te vullen.
Zo werd in 1956 reeds een proefput in bedrijf genomen in de nabijheid van pan 26. Het betrof hier een put met een filterlengte van 25 meter van NAP -20 m tot NAP -45 meter, opgebouwd uit poreuze betonbuizen met een diameter van 30 cm en een wanddikte van 5 cm. De put werd gevoed uit een 100 meter lange draineerleiding bestaande uit poreuze betonbuizen met een diameter van 15 cm en een wanddikte van 3 cm die ongeveer 1 meter onder de bodem van de infiltratieplas was aangelegd. De put was een kort leven beschoren. Na 3 weken bedroeg de weerstand reeds 2 meter en was het debiet teruggelopen van circa 30 m^3/u tot 10 m^3/u. Ook aanvullende proeven bij pan 17.2 gaven hetzelfde beeld van een snelle verstopping.
In interne rapporten werd reeds gewezen op de mogelijkheid dat menging van anaëroob en aëroob water in de draineerleiding uitvlokking van ijzerhydroxiden en groei van ijzerbacteriën tot gevolg had met

een snelle verstopping als resultaat.
Omstreeks 1970 zijn circa 600 zogenaamde zandpalen aangebracht tussen pan 27 en de winning rond pan 27. Deze boringen waren bedoeld om de ter plaatse aanwezige slecht doorlatende lagen te doorboren en zodoende de infiltratie van het freatische grondwater, op een peil van circa NAP +9 meter, naar het diepe pakket te vergroten.
In 1975 werd in de interne Werkgroep Diepe Infiltratie de volgende conclusie ten aanzien van het zandpalenproject getrokken: "zandpalen zijn voor lokale problemen zeker toe te passen tegen aanvaardbare prijs, maar vormen geen universele oplossing voor het diepinfiltratie-vraagstuk vanwege de grove wijze van aanleg, de daardoor veroorzaakte geringe infiltratiecapaciteit en vanwege de beperkte diepte". De extra infiltratie ten gevolge van de aanleg van de 600 zandpalen kon na 5 jaar worden geraamd op 100 à 150 m^3/u.
In 1975 zijn in pan 17 nog eens 125 zandpalen geboord met een diameter van 300 mm en gevuld met omstortingsgrind. De conclusie die werd getrokken ten aanzien van de resultaten van dit zandpalenproject in pan 17 luidde dat (mede) door de uitvoeringsmethode blijvende verstopping van alle zandpalen is opgetreden.
Na dit proefproject heeft men de gedachte om zandpalen toe te passen ter vergroting van de verticale infiltratie naar het diepere pakket ter aanvulling van de zoetgrondwatervoorraad verlaten.
Het probleem van de diepinfiltratie werd tegelijk ook van een andere kant benaderd: "Hoever moet het water worden gezuiverd opdat het geschikt is voor diepinfiltratie met behulp van geboorde putten; en is diepinfiltratie op een dergelijke wijze eigenlijk wel mogelijk?".

Om deze vragen te beantwoorden startte men in maart 1973 een diepinfiltratieproef met de beste kwaliteit water die voorhanden was; drinkwater.
De Drinkwater Infiltratie Put (DIP), die in de directe omgeving van het pompstation te Scheveningen was ingericht, was geboord met een diameter van 0,45 m, had een filter met een diameter van 190 mm en een lengte van 20 meter en heeft gewerkt met infiltratiedebieten van circa 40 en 60 m^3/u. De MFI van het drinkwater varieerde van 1973 tot eind 1980 van 0,2 tot 1,0 s/l^2. Gedurende deze zeven jaar kon geen noemenswaardige verstopping worden geregistreerd. De terugwinning van het geïnfiltreerde water verliep echter niet geheel zonder problemen. In de winningsput vond uitvlokking van ijzer plaats door de menging van zuurstofloos en zuurstofhoudend water. Ook bij onttrekkingsdebieten die aanzienlijk kleiner waren dan het infiltratiedebiet bleef zich ijzer in de put afzetten. Diepinfiltratie zonder verstopping in een geboorde put bleek zeer goed mogelijk maar een ander probleem werd aan de lijst toegevoegd: uitvlokking van ijzer in de onttrekkingsput.
Nu diepinfiltratie zonder verstopping met drinkwater mogelijk bleek werd in de volgende proef minder ver voorgezuiverd water gebruikt.
Het voorgezuiverde rivierwater uit Bergambacht (Lekwater) en later uit Andel (Maaswater) werd in Scheveningen gecoaguleerd. Vlokverwijdering vond plaats met behulp van een vlokkendeken en van dubbele filtratie. Boring en filter waren hetzelfde als bij de DIP. Het infiltratiedebiet bedroeg circa 40 m^3/u.
De mechanische verstopping heeft men in de CIP (Coagulatie Infiltratie Put) uiteindelijk, na introductie van de MFI als maat voor de aanwezigheid van

verstoppende deeltjes, onder de knie gekregen. Daarvoor moest 15 à 25 mg/l driewaardig ijzer worden gedoseerd en een dubbele filtratie worden toegepast om een voldoend lage MFI (< 5 s/l^2) te verkrijgen en 5 mg/l chloor worden gedoseerd om bacteriële verstopping te voorkomen. De CIP heeft gewerkt van 1974 tot 1980.
In het meest recente (vanaf september 1983) proefproject wordt het uit een diepe puttenserie (Kaswetering II) gewonnen water gebruikt voor diepinfiltratie elders. De bedoeling is een lokaal verhoogde brakwatergrens met behulp van diepinfiltratie te verlagen. De proef met deze Kaswetering Infiltratie Put (kortweg KIP) loopt echter te kort om nu al conclusies te trekken. De kwaliteit van het Kaswetering II-water is echter zeer geschikt voor diepinfiltratie; de MFI bedraagt circa 1 s/l^2 en het water is zuurstofloos.

2 DIEPINFILTRATIE THANS

Toepassing van diepinfiltratie is thans actueler dan ooit. Nu de regering grootschalige uitbreidingen van oppervlakte-infiltratie in de duinen op grond van milieu-overwegingen thans minder gewenst acht en de toepassing van diepinfiltratie wil stimuleren, schuift de belangrijkste doelstelling van diepinfiltratie op van voorraadvorming naar aanvullende produktiecapaciteit. Daarmee verdwijnt tegelijk het enigszins vrijblijvende karakter van voorliggende diepinfiltratieproeven.
Binnen enkele jaren zal er een degelijk inzicht moeten zijn in de vele aspecten die een rol spelen bij diepinfiltratie, wil men een eventuele toepassing van diepinfiltratie op grotere schaal kunnen overwegen. Verdere proefnemingen zullen dan ook de

nog openstaande vragen zo goed mogelijk moeten kunnen beantwoorden. De tot nu toe opgedane ervaringen met de diverse diepinfiltratie-proefinstallaties overziend, kan men de volgende conclusies noteren.

1. Mechanische verstopping van de persput is te voorkomen door het te infiltreren water zodanig te behandelen dat voortdurend zowel een lage troebelheid als een lage MFI (lager dan 5 s/l^2) wordt verkregen.

2. Het onbreekt thans nog aan een duidelijk inzicht in de factoren die bepalend zijn voor bacteriële verstopping. AOC-gehalte, kiemgetal, zuurstofgehalte en temperatuur spelen ongetwijfeld een belangrijke rol, maar een duidelijk inzicht in de samenhang van deze en mogelijk andere factoren die bepalend zijn voor het al dan niet optreden van bacteriegroei is thans nog niet verkregen.
   Het toepassen van oxidatiemiddelen om een bacteriële verstopping op te heffen of te voorkomen is een oplossing, zij het dat toepassing van bepaalde oxidatiemiddelen bezwaarlijk zijn in verband met de vorming van schadelijke organische stoffen. Elegant is een dergelijke methode echter allerminst. Nader onderzoek naar procesbepalende factoren met betrekking tot bacteriële verstopping is derhalve nodig.

3. Verstopping van de onttrekkingsput met ijzerhydroxidevlok is waargenomen in de bij de DIP behorende onttrekkingsput (zie Van Beek en Van Puffelen, dit rapport). Het samenkomen van zuurstofhoudend geïnfiltreerd drinkwater en zuurstofloos grondwater uit de omgeving in de omstorting en in het filter van de onttrekkings-

put kan uitvlokking van ijzerhydroxide tot gevolg hebben. Bij de DIP leidde een onttrekkingsdebiet, dat aanmerkelijk kleiner was dan het infiltratiedebiet waardoor aantrekken van grondwater uit de omgeving vrijwel uitgesloten is, echter ook tot uitvlokking. Wellicht dat het samenkomen van nog zuurstofbevattend en reeds zuurstofloos geworden geïnfiltreerd drinkwater eveneens uitvlokking tot gevolg kan hebben. Nader onderzoek op dit punt is daarom nodig.

4. Het is thans nog onvoldoende duidelijk in hoeverre organische microverontreinigingen, bacteriën en virussen bij diepinfiltratie worden verwijderd. Aan de hand van de CIP-proeven heeft men een aantal kwaliteitsveranderingen kunnen vaststellen die optreden bij diepinfiltratie. Door de voortdurende chloring, die nodig was om bacteriële verstopping te voorkomen, kon echter geen uitspraak worden gedaan omtrent de verwijdering van organische microverontreinigingen, bacteriën en virussen. Aanvullend onderzoek ten aanzien van de kwaliteitsverandering van alle voor de drinkwaterbereiding relevante parameters is daarom nodig.

5. Bij de DWL zijn geen diepinfiltratieproeven gedaan waarbij de verandering in de ligging van brak- en zoutwatergrens een wezenlijk deel van de proef uitmaakte. Randvoorwaarden voor het ontwerp en de bedrijfsvoering van diepinfiltratiesystemen zullen via rekenmethoden en uit proefresultaten van andere bedrijven moeten worden verkregen.

3 NIEUWE PROEFOPSTELLING DIEPINFILTRATIE

3.1 Doelstellingen

De doelstellingen van nieuwe diepinfiltratieproefnemingen liggen in het verlengde van de thans nog openstaande vragen ten aanzien van de toepassing van diepinfiltratie. Zij luiden als volgt.

1. Bevestiging van de verwachting dat diepinfiltratie met voldoende ver voorgezuiverd Maaswater mogelijk is zonder noemenswaardige mechanische verstopping.
2. Nader onderzoek naar de factoren die bepalend zijn voor bacteriële verstopping. Dit kan enerzijds gebeuren door analyseren van de proefresultaten, anderzijds mogelijk door gerichte beinvloeding van de waterkwaliteit.
3. Het verzamelen van voldoende informatie over de kwaliteitsveranderingen van het water bij bodempassage, vooral ten aanzien van de hygiënische aspecten (bacteriën, virussen, organische microverontreinigingen, integrale toxiciteit), zodat een vergelijking hiervan tussen diepinfiltratie met putten en oppervlakte-infiltratie mogelijk is.
4. Nader onderzoek naar de factoren die van belang zijn bij de terugwinning van het geïnfiltreerde water, met name ten aanzien van de eventuele vorming van ijzerhydroxidevlok in de onttrekkingsput.

3.2 Keuze van de locatie

Bij de keuze van een geschikte locatie voor diepinfiltratieproeven spelen vele aspecten een rol. Op grond van kosten-, milieu- en vergunningstechnische

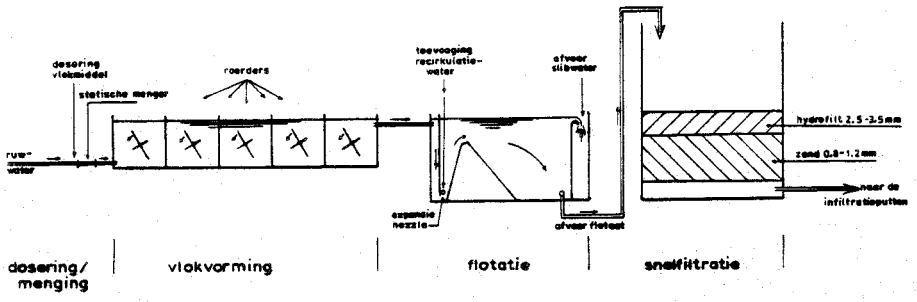
factoren is gekozen voor een locatie op het pompstation te Scheveningen in en achter de oude voorfilters. Het nadeel van deze locatie is dat de geologische opbouw afwijkt van die van het infiltratiegebied.
Er is een oud holocene geulopvulling aanwezig van circa NAP -17 m tot NAP -25 m en de bovenkant van de Kedichemklei bevindt zich hier op circa NAP -42 m. Dit heeft echter anderzijds weer het voordeel dat het pakket waarin wordt geïnfiltreerd, van circa NAP -25 m tot NAP -42 m, geheel zoet is zodat brak- of zoutwater geen verstorende invloed op de proefnemingen kan uitoefenen.
Het grote voordeel van deze locatie is dat voorbehandeld Maaswater, een opstellingsruimte voor de proefinstallatie met toebehoren en afvoermogelijkheden voor het spoelwater aanwezig zijn.

3.3 Beschrijving van de proefopstelling

Op grond van bovengenoemde doelstellingen is gekozen voor de volgende proefopstelling.

1. De grondstof
   Als grondstof voor de diepinfiltratieproef wordt gebruik gemaakt van voorbehandeld Maaswater, zoals dat aankomt in het infiltratiegebied bij Scheveningen.

2. Het voorzuiveringsproces (zie figuur 1)



Figuur 1 - Voorzuiveringsproces FLIP-FLOP-project

Het voorzuiveringsproces bestaat uit coagulatie, flotatie en filtratie. Het vlokmiddel wordt door middel van een statische menger met het ruwe water gemengd. Direct daarna volgt vlokvorming, uitgevoerd in vijf even snel geroerde compartimenten (circa 10 omwentelingen per minuut), gedurende een totale vloktijd van circa 30 minuten. De G-waarde in ieder compartiment bedraagt circa 45 s^{-1}.
Bij de flotatiestap worden kleine luchtbelletjes (d = 40 µm) aan de gevormde vlokjes gehecht. De benodigde luchtbelletjes worden in de flotatiebak zelf gevormd. Dit gebeurt via een speciaal daarvoor ontworpen "nozzle". Via deze "nozzle" wordt een deel van het snelfiltraat (recirculatie circa 6 %), dat onder hogere druk is belucht, weer in de hoofdstroom gebracht.
Door de expansie naar atmosferische druk komen grote aantallen microscopisch kleine luchtbelletjes vrij, die zich deels hechten aan de aanwezige vlokken en deze tot opdrijven brengen.

Het beluchten van het gerecirculeerde snelfiltraat vindt onder hoge druk plaats door middel van ejektie in een gesloten ketel. Aan het wateroppervlak vormen de vlokken met aangehechte luchtbelletjes een dunne slibdrijflaag. De hiervoor benodigde flotatietijd bedraagt, afhankelijk van de watertemperatuur, 6 tot 12 minuten.
De drijflaag wordt afgevoerd door aan het eind van de flotatiebak een kleine hoeveelheid water (circa 2 % van de hoofdstroom) te laten overstorten.
Het door flotatie voor het grootste deel van vlokjes gezuiverde water wordt onder uit de flotatieruimte afgevoerd en door middel van snelfiltratie (v = 7,5 m/u) van het laatste restje vlokmiddel ontdaan. Het filterbed bestaat uit 1,0 meter zand (0,8 - 1,2 mm) met daarop 0,5 m hydrofiet (2,5 - 3,5 mm). De voorzuiveringsinstallatie is afgebeeld op de foto's 1 en 2 en in de figuren 1 en 2.

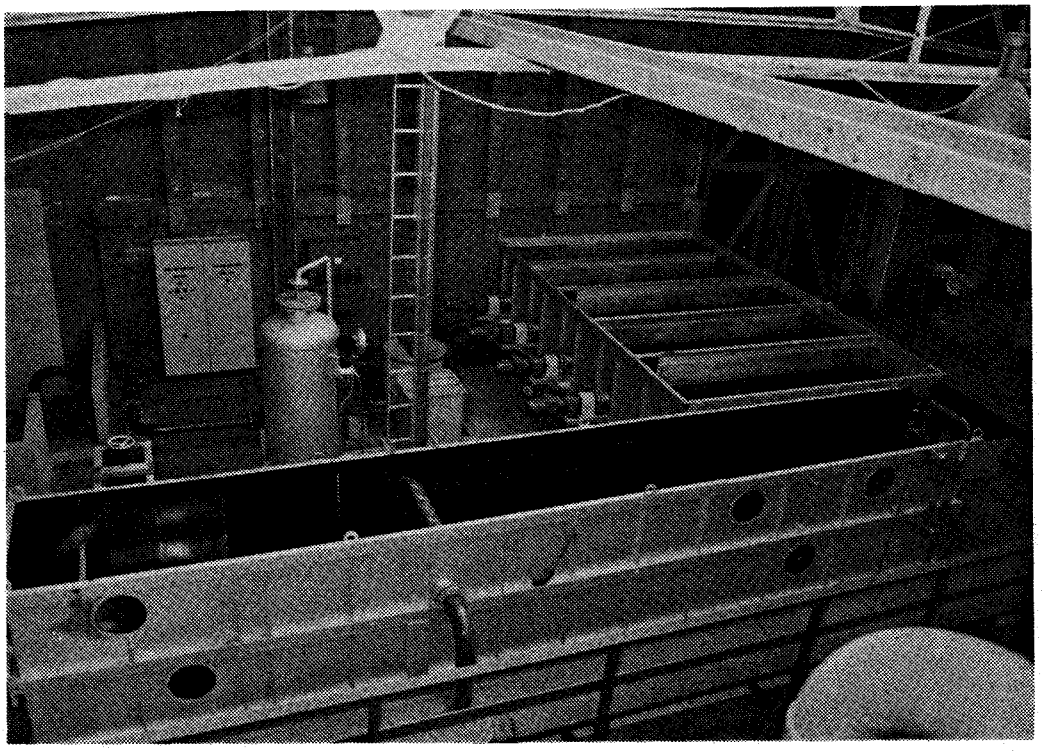


Foto 1 - Coagulatie- en flotatiebak

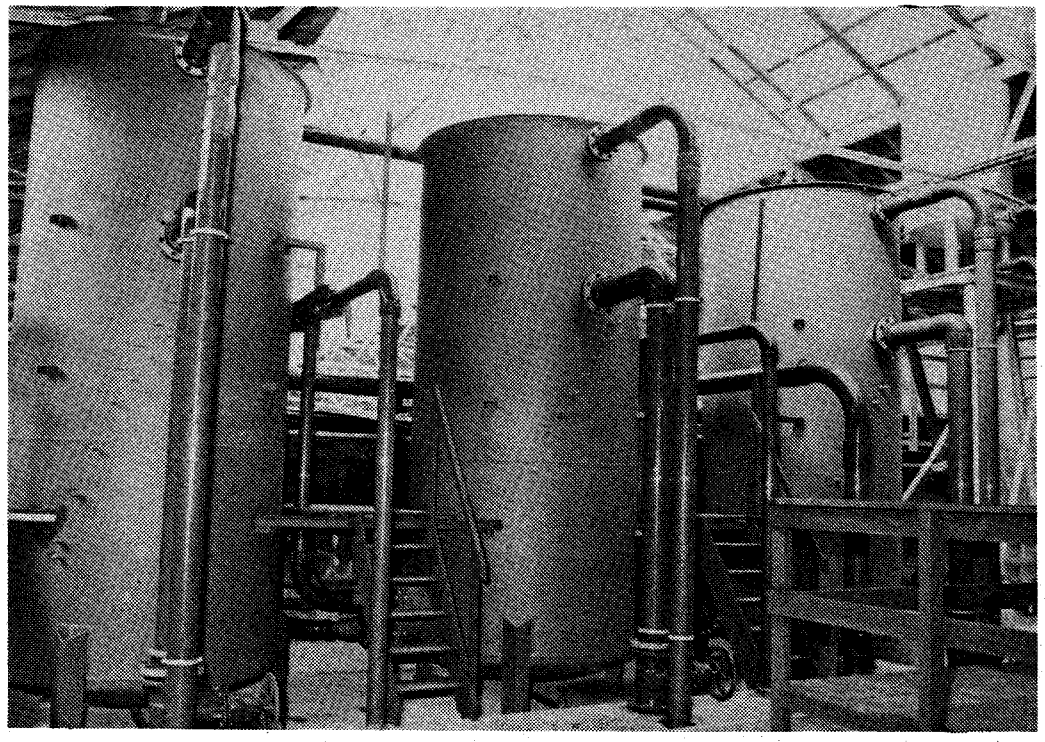


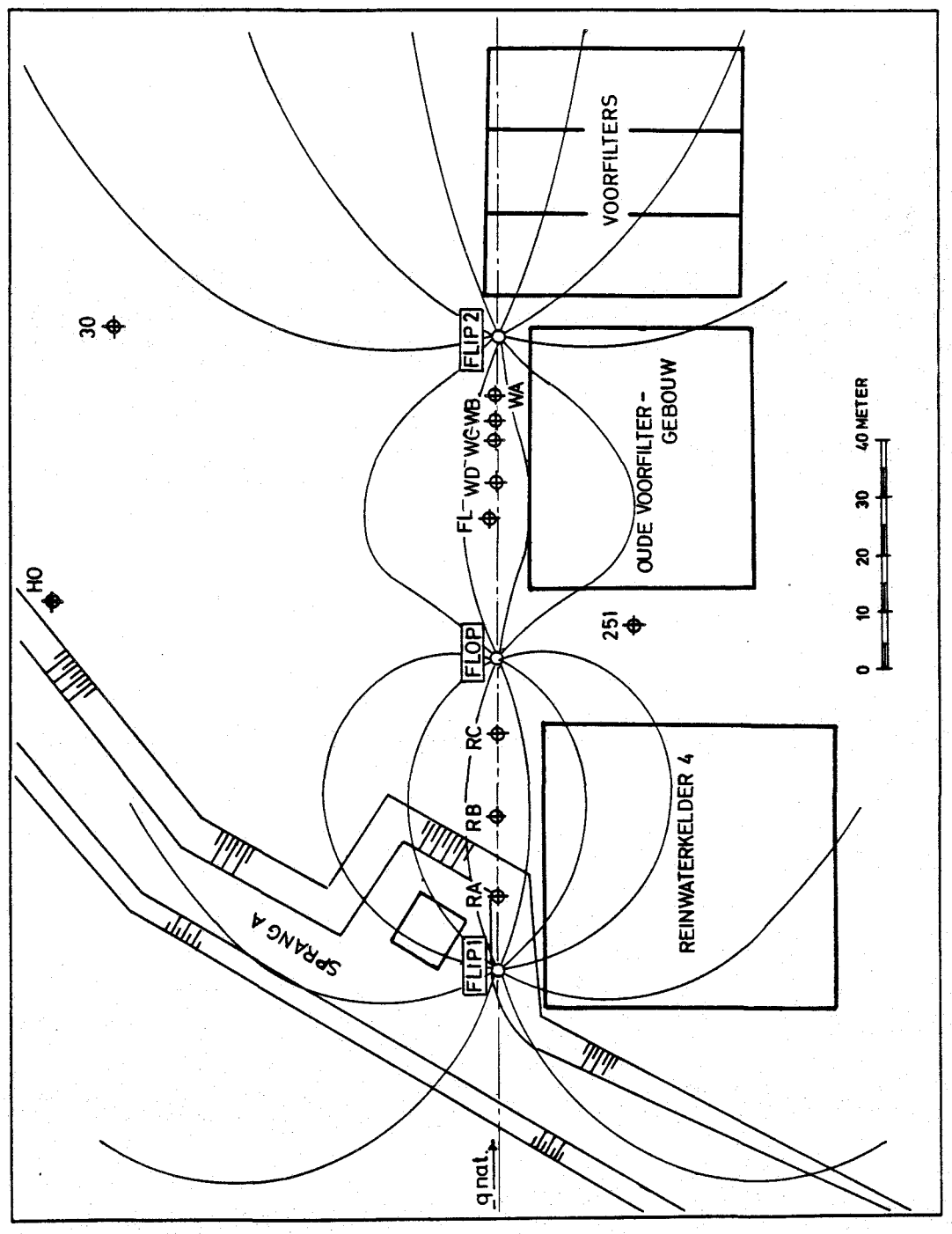
Foto 2 - Snelfilters

3. Putten en waarnemingsposten

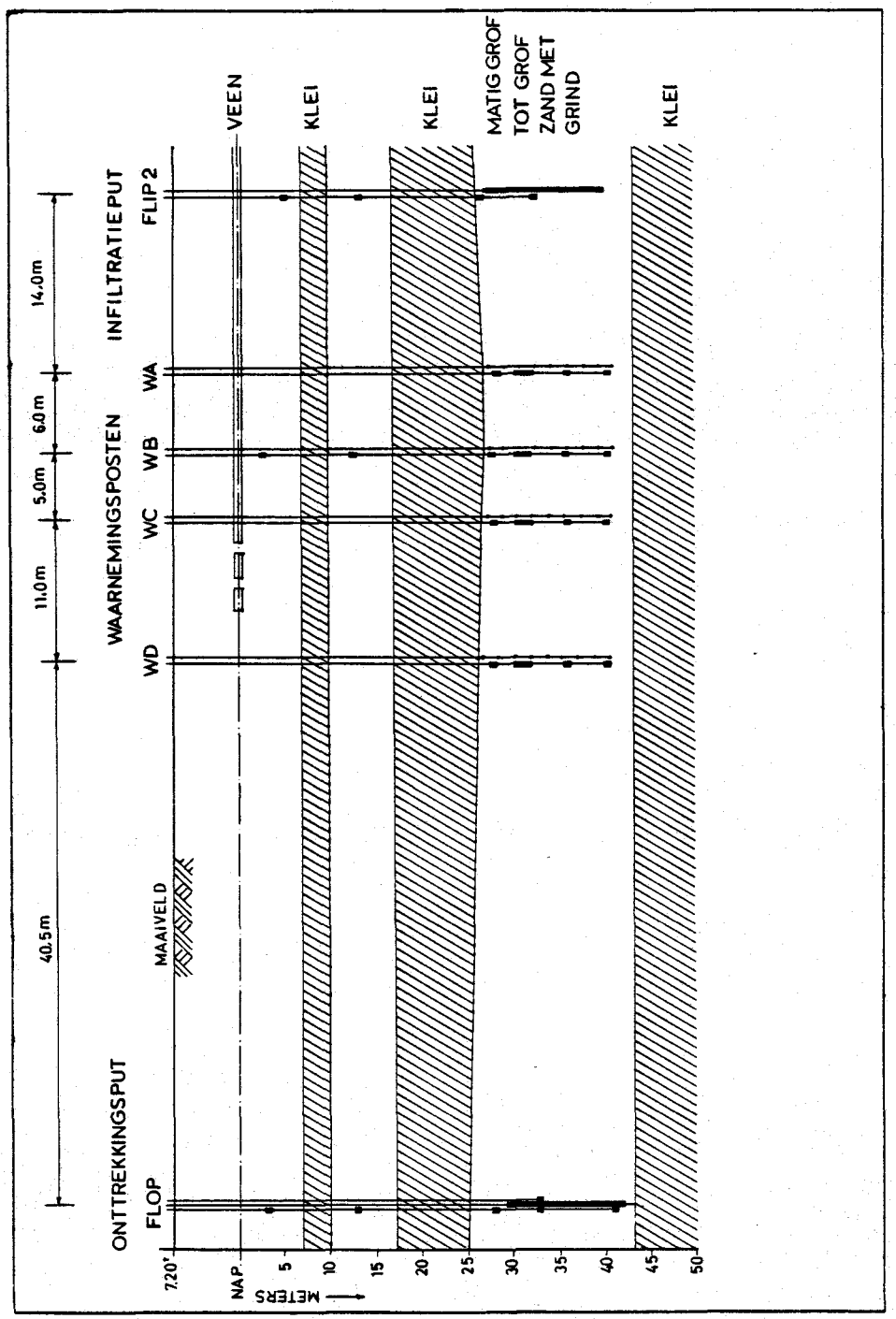
Gekozen is voor een opstelling van 2 infiltratieputten met daartussenin een onttrekkingsput, respectievelijk FLIP 1, FLIP 2 en FLOP. Dit zijn de afkortingen van Flotatie-Infiltratie-Put en Flotatie-Onttrekkings-Put. De eis, dat 90 % van het onttrokken geïnfiltreerde rivierwater een verblijftijd heeft van 3 maanden of meer, is met behulp van een stroombanenprogramma vertaald in een onderlinge afstand tussen de putten (zie figuur 2). De bestudering van de kwaliteitsveranderingen geschiedt door een viertal waarnemingsposten, WA, WB, WC en WD, geplaatst in het traject tussen FLOP en FLIP 2. Zij corresponderen met een theoretisch gemiddelde verblijftijd van respectievelijk 1, 2, 3 en 6 weken. Een en ander heeft geleid tot een opstelling van putten en waarnemingsposten zoals is weergegeven in figuur 3.

Om contaminatie dan wel adsorptie van organische microverontreinigingen in het water te voorkomen is als materiaal voor stijg- en filterbuis van een aantal peilbuizen geen PVC maar koper gebruikt.

Alle boringen zijn uitgevoerd volgens het zuigboorsysteem met luchtlift zonder boorspoeling, uitgezonderd twee van de vier waarnemingsposten. De waarnemingsposten WA en WD zijn gepulst ten einde een aantal ongeroerde steekmonsters te kunnen nemen. De grondmonsters, die zodanig zijn genomen dat toetreding van zuurstof werd voorkomen, zijn geanalyseerd bij de Vrije Universiteit in Amsterdam en de Landbouw Hogeschool in Wageningen door drs. A. Rijsdijk in een werkverband van 3 maanden met de Duinwaterleiding. De conclusies en aanbevelingen van zijn rapport dat


VOORFILTERS
FLIP2
30
WA
WB
WC
WD
FL
OUDE VOORFILTER-
GEBOUW
HO
FLOP
251
RC
RB
RA
FLIP1
SPRANG A
REINWATERKELDER 4
q nat
0
10
20
30
40 METER

Figuur 2



Figuur 3 - De situatie en geologisch profiel FLIP 2 en FLOP

hierover is samengesteld zijn als bijlage bijgevoegd.
Er zal worden geïnfiltreerd in het pakket van circa NAP -25 m tot circa NAP -42 m (zie figuur 3). In elke infiltratieput zal voorlopig 23 m^3/u voorgezuiverd Maaswater worden gebracht en aan de FLOP zal 25 m^3/u worden onttrokken.
In verband met de hoge maaiveldligging (NAP +7,20 m) was het, ter voorkoming van onderdruk in de aanvoerleiding, noodzakelijk een regelklep aan te brengen op circa NAP -3,0 m.
In het project tussen FLOP en FLIP 1 zijn een drietal waarnemingsposten van het RID geplaatst (RA, RB en RC) waarin, naast geohmkabels, minifilters zijn opgenomen. Het accent van het onderzoek dat het RID hieraan zal verrichten komt te liggen op de invloed van inhomogeniteiten in de ondergrond op het transport van de in het grondwater opgeloste stoffen (macrodispersie-onderzoek). Dit onderzoek wordt verricht in opdracht van het Ministerie van VROM.

3.4 Onderzoeksparameters

Het analyse- en meetprogramma kan in de volgende hoofdstukken worden onderverdeeld.

a. Procestechnische analyses en metingen
Naast de procestechnische analyses en metingen die nodig zijn om coagulatie, flotatie en filtratie optimaal te laten functioneren zijn er twee metingen die een directe relatie hebben met de bedrijfsvoering van de infiltratieputten; een troebelheidsmeter met grenswaardebewaking, die bij overschrijding van de ingestelde waarde automatisch de toevoer naar de infiltratieputten afsluit en een semi-automatische dagelijkse MFI-

meting.

b. Metingen in verband met eventuele verstopping van de infiltratie- en onttrekkingsput

Om een eventuele verstopping tijdig te kunnen signaleren zullen circa 3 maal per week de nodige inpeilingen in de infiltratieput zelf, in de omstorting van de put en in een naburige peilbuis, die in de formatie waarin wordt geïnfiltreerd is aangebracht, worden uitgevoerd.

Een dergelijk programma zal - minder frequent - ook worden afgewerkt bij de onttrekkingsput.

c. Analyses en metingen om de gemiddelde reistijden te bepalen

De gemiddelde reistijd van het water van de infiltratieput naar de verschillende peilfilters kan worden bepaald aan de hand van het verschil in chloridegehalte tussen het aangevoerde water en het aanwezige formatiewater. Het chloridegehalte van het aangevoerde Maaswater bedraagt circa 60 à 70 mg/l. Het merendeel van het formatiewater heeft een chloridegehalte van circa 150 mg/l. Het bovenste deel van het pakket waarin zal worden geïnfiltreerd heeft een chloridegehalte van circa 40 mg/l. Deze verschillen zouden juist voldoende zijn om met behulp van geohmkabels door middel van geleidbaarheidsmetingen te registreren. Deze - zeer frequent - uit te voeren geleidbaarheidsmetingen, zullen worden aangevuld met titrimetrische bepalingen van het chloridegehalte, ten einde het passeren van het front van infiltratiewater nauwkeurig te kunnen vaststellen.

Daarnaast zal de verbreiding van het infiltratiewater worden bepaald met behulp van nauwkeurige temperatuurmetingen.

d. Het meten van de kwaliteitsveranderingen van het water bij bodempassage

Dit onderzoek valt uiteen in een aantal onderdelen, te weten:

- bevestiging van de verschijnselen ten aanzien van de macroparameters zoals die bij de DIP en de CIP zijn waargenomen.

  Er zal een maandelijkse bemonstering en analyse worden uitgevoerd van het te infiltreren water, het water uit de vier waarnemingsposten (koperen filters) en van het onttrokken water.

  De te onderzoeken parameters zijn O_2 en temperatuur (in situ te meten met sonde), redoxpotentiaal, NH_4, NO_2, NO_3, SO_4, Ca, Mg, K, Na, F, SiO_2, HCO_3, pH, Fe, Mn, TOC, UV-extinctie, kleur, O-PO_4 en totaal-PO_4.

  In het veld moeten direct na monstername door oppompen pH en HCO_3^- worden gemeten.

  De overige parameters kunnen op het laboratorium worden geanalyseerd;

- onderzoek naar organische microverontreinigingen.

  Het eigen onderzoek kan omvatten de bepalingen voor chloorfenolen en fenolindex, een 20-tal gechloreerde pesticiden, vluchtige aromaten, polycyclische aromaten, vluchtige organochloorverbindingen (inclusief THM's) en eventueel AOCl en AOBr.

  Het uitgebreide onderzoek naar organische microverontreinigingen met GC-MS zal worden uitbesteed bij het KIWA of de WRK. Ook het "Amestest"-onderzoek en het virologisch onderzoek zal elders worden uitgevoerd. Daarbij wordt voorlopig aan minimaal 5 metingen gedacht, waarvan de bemonsteringstijdstippen samenvallen met de bemonsteringen en analysen voor de

macroparameters en voor de bacteriologische parameters;

- het bacteriologisch onderzoek.
  Het betreft de bepaling van het totaal aan bacteriën van de coligroep, de thermotolerante bacteriën van de coligroep, het koloniegetal bij 22 °C en 37 °C en de nagroei gemeten als AOC. Daarbij wordt gedacht aan maandelijkse bemonstering.
  Daarnaast kunnen bijvoorbeeld aanvullende bepalingen worden uitgevoerd voor bijvoorbeeld faecale streptococcen, clostridia, bacteriofagen, denitrificerende bacteriën, sulfaatreducerende bacteriën, NH_4^+-nitrificerende bacterien en NO_2^--nitrificerende bacteriën;
- onderzoek naar de samenstelling van het onttrokken water in verband met eventuele verstopping door ijzerhydroxidevlok. Daarbij zal gebruik worden gemaakt van de gericht in de omstorting geplaatste peilfilters (zie figuur 3). De frequentie van dit onderzoek kan relatief laag zijn omdat het handelt om effecten op de wat langere termijn. Voor dit - bijvoorbeeld maandelijkse - onderzoek komen in aanmerking O_2, temperatuur, Cl^-, NH_4, NO_2^-, NO_3^-, Mn^{2+}, Fe^{2+} en Fe-totaal.

Bijlage - Conclusies en Aanbevelingen (met betrekking tot de sedimentanalysen)

Hoewel de uiteindelijke samenstelling van het, in dit onderzochte pakket, geïnfiltreerde water sterk zal afhangen van factoren als debiet, verblijftijd en vermenging met grondwater, kunnen uit de combinatie van sedimentanalysen en verweringsexperimenten wel enige uitspraken worden gedaan over de consequenties voor het te infiltreren water.
De resultaten van de sedimentanalysen laten een vrij homogeen beeld zien. Zowel horizontaal als verticaal zijn de verschillen van dit pakket gering. Ook de bijmenging van reactieve bestanddelen in deze zandige pakketten lijkt, behalve wat schelpenkalk, ijzer(hydr)oxiden en organisch materiaal betreft, vrij beperkt.
Toch zal geëxtrapoleerd naar het hele pakket de absolute hoeveelheid van een bijmenging, die slechts enkele tientallen ppm's bedraagt, nog aanzienlijk kunnen zijn.
Een van de meest opvallende punten is het grote zuurstofverbruik van deze sedimenten. Bij extrapolatie van de gedane kolomproeven zou men komen op een geschat verbruik van 400 à 600 mg zuurstof/kg-sediment, die een toename zou kunnen opleveren van globaal 600 - 900 mg bicarbonaat en 100 - 150 mg sulfaat per kg-sediment. Het is dan ook te verwachten dat nog geruime tijd na de start van de injectie de aanwezige zuurstof, geheel of gedeeltelijk, uit het infiltratiewater zal verdwijnen. Eveneens is te verwachten dat geoxideerde stikstofverbindingen als nitraat zullen verdwijnen.
Andere in dit onderzoek geconstateerde en in werkelijkheid te verwachten processen zijn een stijging tot 1 à 3 ppm van het ammoniumgehalte ten gevolge

van de afbraak van organische stikstofverbindingen, die in deze sedimenten in voldoende mate voorhanden zijn en een reductie van het in het Maaswater aanwezige sulfaat.
Uit de stijging en de daarop volgende daling van het sulfaatgehalte tijdens de batch-proeven met voorbehandeld Maaswater kunnen voor de werkelijke situatie de volgende voorstellingen worden gemaakt.

1. Rondom de infiltratieput zullen ijzersulfiden oxideren (waarbij zuurstof en eventueel nitraat wordt gebruikt) waardoor de sulfaatconcentratie in het water toeneemt. Gaande naar de winningsput zal vervolgens sulfaatreductie optreden. Aangezien een groot deel van het ontstane sulfide met de in overmaat aanwezige ijzer(hydr)oxiden zal reageren, neemt de totale som van sulfaat en sulfide in de buurt van de winningsput weer af. Aanvankelijk bestaat dus de mogelijkheid van een daling in sulfaatgehalte ten opzichte van het geïnjecteerde Maaswater.
   Naarmate de oxidatiecapaciteit van het organisch materiaal afneemt, neemt de zone waarin de ijzersulfiden worden geoxideerd toe. Hierdoor is na verloop van tijd (afhankelijk van de verblijftijd en het debiet) een stijging van de sulfaatconcentratie te verwachten.
2. Het is echter ook mogelijk dat bij een groot debiet en een korte verblijftijd de oxidatie-effecten kwantitatief groter zijn dan de reductie-effecten, zodat vorming van ijzersulfiden in de buurt van de winningsput de toename ten gevolge van oxidatie bij de persput niet kan compenseren, waardoor er een netto-sulfaattoename plaatsvindt. Voor beide scenario's geldt dat pas na geruime tijd al het in het sediment aanwezige ijzersulfide zal zijn opgelost.

Het gedrag van opgelost ijzer (Fe) en mangaan (Mn), dat nauw samenhangt met de redoxpotentiaal, is niet met zekerheid te voorspellen. Wel gaven de batchproeven vóór het op gang komen van de sulfaatreductie een ijzerconcentratie te zien van 2 à 3 ppm en nadat de reductie al een tijd had plaatsgevonden, waarden van 1 à 2 ppm. Gezien de geruime tijd na aanvang van het reductieproces (meer dan een maand) is het redelijk te veronderstellen dat dit een evenwichtsconcentratie met ijzersulfide zal zijn.
Ook van mangaan kan worden verwacht dat de concentraties in werkelijkheid niet veel zullen afwijken van de vrij constante waarden tijdens dit experiment (0,5 - 1 ppm).
Voor zowel ijzer als mangaan geldt dat beide concentraties zullen dalen bij daling van het zuurstofverbruik (= stijging redoxpotentiaal).
Hoewel uit de bepaling van de kationbezetting bleek dat er voldoende Na^+, K^+ en Mg^{2+} is geadsorbeerd om een flinke concentratieverhoging te veroorzaken, bleek uit de batchproeven dat dit niet (Na en K) of nauwelijks (Mg) het geval was. Hoewel het zeker mogelijk is dat uitwisseling tegen calcium of verwering in deze sedimenten plaatsvindt, zullen deze effecten, wat natrium en kalium betreft ten opzichte van de concentraties reeds aanwezig in het Maaswater, nauwelijks merkbaar zijn. De magnesiumconcentraties kunnen waarden bereiken van 15 - 20 ppm. De SiO_2-concentratie die tijdens de batchproeven vrij snel een evenwicht bereikte zal, naar verwachting, waarden bereiken van rond de 10 ppm. Over het te verwachten fosfaatgehalte valt weinig te zeggen; het is aanwezig in alle onderzochte monsters maar bereikte tijdens de batchproeven maximale

waarden van slechts 0,03 ppm. Calcium, dat tijdens de batchproeven snel een evenwichtswaarde bereikte van circa 100 ppm, zal vanwege de sterke bicarbonaatproduktie vermoedelijk overzadigd zijn ten opzichte van calciumcarbonaat.
Factoren die van organische bestanddelen afhangen, zoals TOC, $KMnO_4$-verbruik en UV-extinctie, stijgen wel ten opzichte van het Maaswater, maar een voorspelling voor de werkelijke waarden is moeilijk te geven.

Aanbevelingen

Zoals al bij de conclusies is opgemerkt zal de werkelijke samenstelling van het gewonnen water sterk afhangen van hydrologische factoren als debiet, verblijftijd en menging met het al aanwezige grondwater.
Een vervolgonderzoek, waarbij deze factoren in aanmerking worden genomen en waarbij tevens wordt gelet op de resultaten van de al eerder gedane diepte-infiltratieprojecten (bijvoorbeeld analyse van de neerslag in verstopte putten, infiltratiewateranalyse en dergelijke) zou zeer nuttig zijn.
Voordat eventueel nieuwe sedimentanalysen worden gedaan van deze relatief "schone" zanden verdient het aanbeveling eerst een onderzoek te doen naar methoden die een lagere onderste-analysegrens hebben dan de hier gebruikte.
Verder is het misschien beter om bj nieuwe batchproeven geen gebruik te maken van PVC-kolommen.
Er zijn namelijk aanwijzingen dat dit materiaal zuurstofdoorlatend is.

Scheveningen, juni 1984

VOORBEREIDINGEN OM TOT INFILTRATIE VAN OEVERGROND-WATER IN EEN AEROOB PAKKET TE KOMEN

J. van der Laan en P. Jonkman
Waterleidingbedrijf Midden-Nederland

SAMENVATTING

Sinds 1974 werkt het Waterleidingbedrijf Midden-Nederland (WMN) met het Rijksinstituut voor Volksgezondheid en Milieuhygiëne (RIVM; het voormalige RID) aan het project Infiltratie van oevergrondwater. Voor wat betreft het WMN was het doel van het onderzoek de watervoorziening op langere termijn; het RID had plannen voor proeven op de Veluwe en had verder behoefte aan een kleinschalig onderzoek op het gebied van oevergrondwaterwinning. Bij het project vallen de volgende fasen te onderscheiden, te weten:

- Winning van oevergrondwater
  De oorspronkelijke locatie nabij Amerongen bleek om hydrologische en ecologische redenen minder geschikt. De winning werd daarom nabij Remmerden gesitueerd.

- Zuivering van oevergrondwater
  Het gewonnen water kan goed gezuiverd worden door droogfiltratie, filtratie over actieve kool en nabeluchting + natfiltratie waarbij een kwaliteit wordt bereikt die voldoet aan de door de provinciale overheid gestelde eisen voor deze infiltratie.

- Infiltratie van het gezuiverde water in aëroob milieu
  Dit onderdeel heeft ervoor gezorgd dat de nodige

tegenwerking werd ondervonden van enkele gemeenten en van de Stichtse Milieufederatie ondanks de voorlichting van de zijde van het WMN.
Een en ander zorgde voor veel tijdverlies waardoor de infiltratie pas in november 1983 kon aanvangen.

Uit het onderzoek blijkt dat er tussen de rivier en de winput (30 meter) een duidelijke kwaliteitsverbetering en afvlakking plaatsvinden. Het gehalte aan zware metalen in het gewonnen water is laag te noemen. Wel neemt het gehalte aan ijzer, mangaan en ammonium toe. De zuivering vertoont veel overeenkomst met die van normaal grondwater zij het dat deze uitgebreid dient te worden met een filtratie over kool om de nog aanwezige organische stoffen zo goed mogelijk te verwijderen. Het gezuiverde water wordt bovenstrooms van de winplaats Leersum in het aërobe watervoerende pakket gebracht. Met behulp van een aantal waarnemingsputten tussen infiltratieput en de winputten kunnen de veranderingen in kwaliteit worden gevolgd.

1 INLEIDING

Bij het opstellen van de regionale basisplannen voor de drinkwatervoorziening van Utrecht aan het einde van de zestiger jaren kwam naar voren, dat de grens van de winbare hoeveelheid grondwater in deze provincie in zicht kwam en dat naar andere mogelijkheden diende te worden omgezien, daar bovenregionale projecten, zoals het infiltratieproject op de Veluwe, niet tijdig genoeg gereed zouden zijn.
Eén van de mogelijkheden om extra grondwater te verkrijgen is het winnen van het zogenaamde oevergrondwater nabij de grote rivieren. De kwaliteits-

fluctuaties van het rivierwater zullen indirect invloed hebben op de kwaliteit van het oevergrondwater. De betrouwbaarheid en veiligheid van een dergelijke winning zullen terdege onderzocht dienen te worden. Voorts blijkt dat in de Utrechtse Heuvelrug de waterstanden in de loop der jaren zodanig gedaald zijn, dat van diverse kanten op maatregelen wordt aangedrongen (in verband met landschapsbescherming en landbouw langs de hogere delen). Een kunstmatige aanvulling van het grondwater lijkt hier een goede oplossing. Voor het WMN is het interessant om na te gaan in hoeverre deze aanvulling mede dienstbaar kan worden gemaakt ten behoeve van de drinkwatervoorziening. Daarnaast had het Rijksinstituut voor Drinkwatervoorziening (RID) al enige tijd belangstelling voor beide vorengenoemde onderwerpen. Het was wenselijk om het onderzoek te starten met een winning op wat kleinere schaal, waardoor de tijdseffecten beter tot uitdrukking komen. Een geschikte situatie voor een dergelijk onderzoek doet zich voor waar de Nederrijn een drainerend karakter heeft, hetgeen bij het meten belangrijke voordelen biedt. Tenslotte werd er destijds enige druk uitgeoefend door de Commissie Veluwe Infiltratie om kennis op te doen betreffende de technische aspecten van infiltratie in aeroob watervoerende pakketten door middel van infiltratieputten. Om vorengenoemde redenen vonden het RID en het WMN elkaar om gezamenlijk de vraagstukken te onderzoeken. Het te winnen oevergrondwater diende te worden gezuiverd tot drinkwaterkwaliteit in verband met de infiltratie in het aerobe pakket. De plaats van de infiltratie nabij de winplaats te Leersum is zodanig gekozen dat het injectiewater volledig wordt teruggewonnen.

Daar het WMN te Leersum slechts een zeer smalle

strook grond rond de putten in eigendom heeft, diende voor elke waarnemingsput, leiding of bouwwerk een vergunning te worden aangevraagd. Het verschil tussen Rijn- en reinwater, dat audiologisch niet valt waar te nemen, heeft mede aan een aantal mogelijk te voorkomen problemen bijgedragen.

2 PROCEDURES

Wij hebben de procedurele kant van de proef enorm onderschat. Dat een in onze ogen kleinschalig experiment zoveel emoties zou oproepen was dan ook niet te bevroeden. Zo werd in het voorjaar van 1974 contact opgenomen met het Gemeentebestuur van Amerongen, onze eerste ingang, daar de winning en een groot deel van de transportleiding in die gemeente zouden liggen. Nu, 10 jaar later, is nog steeds onduidelijk wat toen fout is gegaan. Een eerste gesprek verliep goed. De aard was informatief. Een tweede gesprek was al heel anders van inhoud en verliep moeizamer. Wat in onze ogen een klusje was, waartoe een gemeentebestuur bevoegd en in staat was, werd in het raam van de landelijke politiek getrokken. En deels terecht, gezien de ontwikkelingen rond de Veluwe-infiltratie. En juist het Z.O.-deel van de Heuvelrug en een deel van het Kromme Rijn-gebied stonden op de nominatie om als Nationaal Park c.q. Nationaal Landschap aangewezen te worden.
Een uitgebreide toelichting kon de sfeer niet verbeteren. De geest was uit de fles. Alle mogelijke procedures - eigenlijk en oneigenlijk - werden aangegrepen om het vermeende gevaar van deze milieuvervuiling uit te dragen. Gemeentelijke autonomie werd graag ingeleverd om de beslissingsbevoegdheid bij provincie en nog liever bij het Rijk te leggen.

Want op 29 januari 1975 werd door de Raad van de gemeente Amerongen de volgende motie aangenomen:

- De Raad enzovoorts.
- Spreekt zijn ernstige ongerustheid uit omtrent het proefproject winning en infiltratie van oevergrondwater door het WMN.
- Is van mening dat de Grondwaterwet Waterleidingbedrijven van toepassing is en dat dergelijke plannen met voldoende waarborgen voor wat betreft het milieubeheer en de drinkwaterkwaliteit omkleed moeten worden.
- Besluit deze motie ter kennis te brengen van: Ministerie Volksgezondheid en Milieuhygiëne, Provinciale Staten, Gedeputeerde Staten, Raad Leersum, B. en W. Leersum.
- enzovoorts.

Dit besluit was een soort bezweringsformule na een raadsvergadering waar nogal opwinding ten toon werd gespreid. Het beeld van het WMN, dat rivierwater onder hoge druk de grond in perst was in het vizier gekomen en zou daar blijven.
Een gedeeltelijke verklaring ligt in het gebruik van het woord "persput". Daar moeten we zo gauw mogelijk vanaf. Want dat wekt de suggestie van donder en geweld en enorme verhogingen van de waterspiegel. In onze praktijk gaat het maar om ongeveer 0,70 m verhoging bij 35 m^3/h in een gebied met een straal van circa 10 meter. Maar onderschat ook het bevooroordeeld lezen niet. Zo verklaarde de gemeente Amerongen in 1980 zich tegen het leggen van een leiding, die het oevergrondwater van Rhenen naar Leersum zou moeten brengen, onder verwijzing naar de alom geconstateerde bodemverontreiniging. Daarentegen kapittelt de gemeente Leersum ons bij dezelfde gelegenheid dat uit de overgelegde tekenin-

gen onvoldoende blijkt, dat gezuiverd oevergrondwater wordt geïnfiltreerd.
Namens de toenmalige Minister van V. en M. werd op 5 maart 1975 aan de gemeente geschreven, dat het WMN voor de winning en infiltratie van oevergrondwater een vergunning zou aanvragen als bedoeld in artikel 2 van de Grondwaterwet Waterleidingbedrijven. Reeds op 24 februari 1975 had het WMN zo'n aanvrage ingediend, onder gelijktijdige intrekking van een ontheffingsaanvraag in het kader van de Provinciale Grondwaterverordening.
De infiltratieproef was als compenserende maatregel opgevoerd bij de vergroting van de winning van grondwater op ons pompstation te Leersum.
De Commissie Grondwaterwet Waterleidingbedrijven was echter van mening dat de winning en infiltratie van oevergrondwater niet onder de bepalingen van de wet valt. Onder de huidige grondwaterwet zou ons inziens een dergelijke combinatie gekund hebben, maar daar zou de procedure gestrand zijn op de tijdelijkheid van de infiltratie.
De tijdelijkheid speelde de provincie parten. Want toen we weer terugkwamen bij de provincie met een hernieuwde aanvrage krachtens de grondwaterverordening, werd coördinatie met de eveneens lopende procedure Verordening Bescherming Grondwaterkwaliteit slechts gedeeltelijk toegepast. Zo mag de infiltratie doorgaan vijf jaar na aanvang, terwijl de onttrekking vijf jaar na het van kracht worden van de ontheffing zou moeten eindigen.
Toen na een lange procedure eind 1979 de provincie de gevraagde ontheffingen afgaf, leek er licht aan de horizon te komen. Een door de Stichtse Milieu Federatie aangespannen kroonberoep had geen opschortende werking. Bovendien voegden de aangedragen argumenten geen nieuwe zaken toe. Reeds bij de

behandeling in de Commissie Waterkwaliteitsbeheer van de Provincie Utrecht waren die bezwaren ongegrond verklaard. In beroep geeft de SMF (nogmaals) aan haar angst voor het ongecontroleerd afstromen van het geïnfiltreerde water, waarbij er op wordt gewezen dat drinkwaternormen nog geen ecologische normen behoeven te zijn. Voorts zou de infiltratie een verstoring van de natuurlijke fluctuaties teweeg brengen. Het betreffende beroepschrift is nog niet behandeld.
Toch duurde het nog tot 28 november 1983, voordat met enig officieel vertoon (in aanwezigheid van de burgemeester van Leersum) de infiltratie begon. Het verzamelen van aanlegvergunningen en bouwvergunning, het leggen van de leiding tussen het inmiddels in Remmerden (Rhenen) ontwikkelde winningsproject en het pompstation te Leersum, het kostte allemaal veel tijd.

Als conclusie uit het voorgaande kan worden getrokken:
- dat het verwerven van publiekrechtelijke vergunningen c.q. ontheffingen in landschappelijk waardevolle gebieden geen sinecure is;
- dat schriftelijke voorlichting gepaard moet gaan met mondelinge en zo mogelijk visuele toelichtingen. Toen het project klaar was, en het produkt drinkbaar was, bleek dat voor sommigen een openbaring;
- privaatrechtelijke procedures heel wat minder tijd in beslag nemen dan publiekrechtelijke (zie bijlagen 1 en 2);
- ook hier blijkt, dat coördinatie van procedures, zoals voorgesteld in de Wet Algemene Bepalingen Milieuhygiëne, dringend gewenst is. Teveel instanties op verschillende niveaus hebben een rol

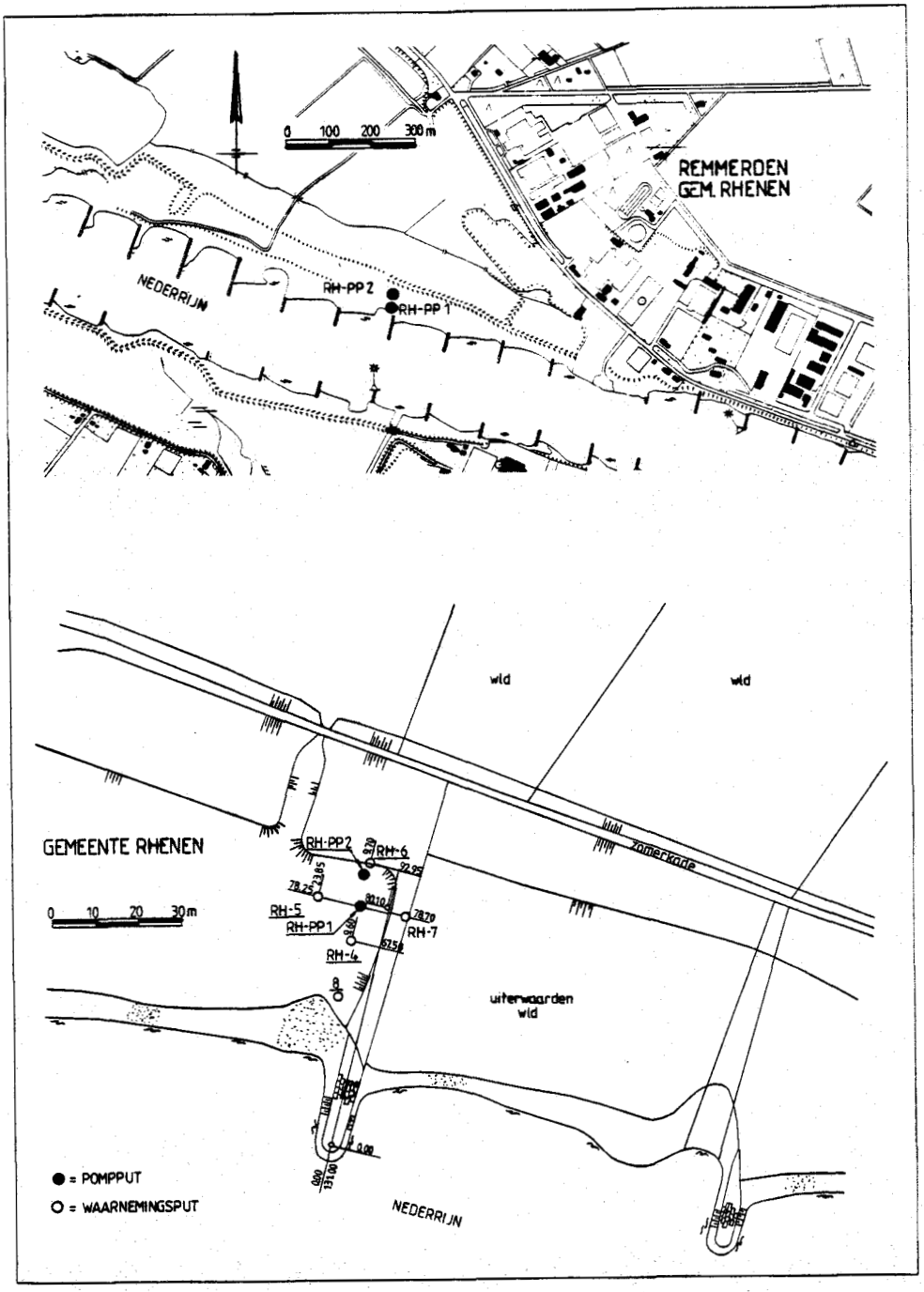
te spelen, waardoor bureaucratie en "op elkaar wachten" in de hand worden gewerkt.

3 WINNING OEVERGRONDWATER

Zoals reeds in hoofdstuk 1 werd aangestipt, zocht het RID naar een plaats waar grondwater afstroomde naar de rivier. Bij het inwerkingstellen van een put nabij de rivier diende de stroomrichting van het grondwater om te keren. Door het plaatsen van een groot aantal meetpunten (minifilters) kan dan op diverse plaatsen in het pakket de verandering in kwaliteit (K_{20} + chloride) worden waargenomen, een en ander ten behoeve van het macrodispersie-onderzoek.

3.1 Plaats van de winput

In eerste instantie werd de locatie nabij de veerstoep te Amerongen bepaald. Bij het analyseren van het grondwater in het eerste watervoerende pakket aldaar kon slechts worden geconstateerd dat het praktisch al voor 100 % rivierwater was. Voor de oevergrondwaterwinning was dit geen bezwaar, doch in verband met het vorengenoemde onderzoek diende naar een andere locatie te worden omgezien. Verder bleek op dit punt geen krachtstroom aanwezig te zijn. Mede met het oog op milieubelangen is toen gekozen voor de locatie nabij Remmerden, waar de uiterwaarden vanwege industriële activiteiten van minder belang worden geacht. Bovendien was hier wel krachtstroom beschikbaar. Hiertegenover stond echter het nadeel van een langere transportleiding naar Leersum. Deze locatie beantwoordt aan de voorwaarden voor beide onderzoeken.
De put werd op circa 30 meter van de rivieroever



Figuur 1 - Pomp- en waarnemingsputten in gemeente Rhenen

(zomerbed) ingericht. Het putfilter reikt van 3,5 - 18,5 meter -mv en wordt op vijf hoogten omgeven door een halve cirkel van 10 minifilters om de veranderingen in waterkwaliteit op diverse plaatsen te kunnen volgen. Verder zijn op wat grotere afstand vier waarnemingsfilters geplaatst, waarvan RH-4 een controlefilter in het diepere pakket heeft.
Bij de oever (RH-8) en bij RH-4 zijn nog een aantal minifilters extra geplaatst, zie figuur 1.
Op 31 mei 1977 is de put in werking gesteld met een volumestroom van 15,3 l/s (55 m^3/h). Het duurde ruim twee weken eer het eerste rivierwater de put bereikte. Voor verdere details van het onderzoek wordt verwezen naar het RID-rapport: HYH 80-9 van ir. C. Maas "Resultaten van onderzoekingen te Bergambacht en te Remmerden".
Helaas bleken bepaalde industriële activiteiten het WMN ook hier parten te spelen en wel in de vorm van een relatief hoog gehalte aan trichlooretheen in het grondwater. Om deze reden en om het aandeel van het toestromende grondwater te reduceren werd een schermput op circa 5 meter afstand ingericht met afvoer naar de rivier. Een en ander betekent, dat voor 100 % van rivierwater afkomstig oevergrondwater tot goed drinkwater gezuiverd dient te worden.

3.2 Veranderingen in waterkwaliteit tijdens bodempassage rivieroever

Via het eerste watervoerende pakket is gedurende eeuwen (zwak) zuurstofhoudend grondwater naar de rivier afgestroomd. Na het omkeren van de grondwaterstroom en het inwerkingstellen van de schermput (RH-p.p.2) werd na enige tijd een redelijk constante kwaliteit oevergrondwater verkregen (zie tabel 1).

FYSISCH-CHEMISCH ONDERZOEK	I	II	III	IV	V
Temperatuur in °C	12,1	11,5	12,5	-	11
Kleur, mg platina per liter	-	-	-	-	3
Geleidingsvermogen in mS m^{-1} bij 20 °C	79	81	80	4,5	12
Waterstofexponent (pH) bepaald	7,6	7,2	7,7	4,0-4,5	6,9
Kaliumpermanganaatverbruik	17	5	3	2,2	1
Chloride (Cl^-)	165	155	155	3,0	14
Nitriet (NO_2^-)	0,30	0,01	<0,01	0,10	<0,01
Nitraat (NO_3^-)	16,0	3,9	8,1	2,5	4
Sulfaat (SO_2^{--})	76	74	74	6	13
Waterstofcarbonaat (HCO_3^-)	160	190	180	2	35
Vrij koolzuur (CO_2)	8	23	7	8	5
Carbonaat (CO_3^{--})	0	0	0	0	0
Fosfaat (PO_4^{---}) ortho.	1,2	0,09	0,06	0,33	0,05
Silicaat (SiO_2)	4	11	11	-	14
Ammonium (NH_4^+)	0,80	1,5	<0,01	2,0	<0,05
IJzer (Fe)	0,35	0,26	0,01	0,13	0,40
Mangaan (Mn)	0,08	0,94	<0,01	0,05	0,02
Zuurstof (O_2)	8,2	1,4	9,4	-	4
Calcium (Ca^{++})	84	87	87	1,2	15,0
Magnesium (Mg^{++})	12,5	11,5	11,5	0,4	2,0
Natrium (Na^+)	85	78	79	1,3	9,0
Kalium (K^+)	6,6	5,4	5,4	1,0	0,8
Totale hardheid mmol/l	2,60	2,66	2,66	0,12	0,42
Totaal fosfaat	1,5	0,14	0,09	-	-
Smaak (35 °C)	-	25	1,3	-	geen
MFI in s/l^2	-	2,4	1,8	-	-

Tabel 1 - Waterkwaliteit project Leersum, gemiddelden 1980 (in mg/l tenzij anders aangegeven; I = rivier; II = pompput 1; III = gezuiverd water; IV = regenwater (1976); V = pompstation Leersum)

Door het verschil in weglengte van de diverse stroombanen naar het putfilter treedt een aanzienlijke afvlakking op. Variaties in het chloridegehalte van het rivierwater (90 - 260 mg/l) worden in het opgepompte water sterk gedempt teruggevonden (155 ± 30 mg/l; deze spreiding is nog groot door schakelingen van p.p. 2).
Voor zover het kaliumpermanganaatverbruik een indicatie geeft, kan geconcludeerd worden, dat het gehalte aan organische stof in het oevergrondwater redelijk constant is en op een veel lager niveau dan in het rivierwater. De biologische processen in de bodem verbruiken de opgeloste zuurstof grotendeels en zelfs het nitraat wordt met 75 % gereduceerd. Wel neemt als gevolg van de min of meer anaerobe omstandigheden vooral het gehalte aan mangaan toe ten opzichte van dat in de rivier, evenals het ammonium- en het silicaatgehalte. De hoeveelheid fosfaat is echter gedecimeerd.
Zwevende stof en de daaraan geadsorbeerde metalen blijven op de rivierbodem achter, terwijl de opgeloste metalen waarschijnlijk al bij het inzijgen in de sliblaag goeddeels worden teruggehouden, waardoor het niveau van de zware metalen in het opgepompte water laag is te noemen (zie tabel 2).

ANORGANISCHE STOFFEN	I	II	III	IV	V
Cadmium (Cd)	1,0	0,1	<0,1	0,6	<0,1
Cobalt (Co)	4	3	3	<1	<1
Chroom (Cr)	17	3	3	<1	<1
Koper (Cu)	30	10	<10	12	<10
Kwik (Hg)	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1
Lood (Pb)	11	1	<1	34[3])	<1
Nikkel (Ni)	12	6	<5	2	<5
Seleen (Se)	0,25	0,25	0,20	-	0,5
Zilver (Ag)	0,8	0,7	0,2	-	<0,1
Zink (An)	90	<10	30[x])	97	<10
Cyanide (CN^-)	-	-	-	-	<5

ORGANISCHE STOFFEN	I	II	III	IV	V
Trichlooretheen (C_2HCl_3)	0,40	1,4[2])	<0,10	-	<0,10
Trichloormethaan ($CHCl_3$)	1,6	0,55	0,25	-	0,50
Tetrachlooretheen (C_2Cl_4)	0,50	0,20	<0,10	-	<0,10
Tetrachloormethaan (CCl_4)	1,0	0,10	<0,10	-	<0,10
1,1,1 trichloorethaan ($C_2H_3Cl_3$)	-	-	-	-	<0,1
Fenolen	-	-	-	-	<1

[x]) Opgelost uit installatie (messing)
[2]) Bodemverontreiniging
[3]) Invloed rijksweg

Tabel 2 - Waterkwaliteit project Leersum, gemiddelden 1980 (in µg/l; I = rivier; II = pompput; III = gezuiverd water; IV = regenwater (1976); V = pompstation Leersum)

Het gehalte aan lood en zink is beduidend lager dan dat van het regenwater dat nabij het pompstation wordt opgevangen. Het op enige afstand van de rivier gewonnen water kan dus beschouwd worden als grondwater, dat verontreinigd is met verschillende organische verbindingen waaronder nog reuk- en smaakstoffen. Van de gemeten organische stoffen zijn de hoeveelheden veelal gering.

4 DE ZUIVERING VAN HET OEVERGRONDWATER

Bij de zuivering van het te Remmerden gewonnen oevergrondwater moest rekening gehouden worden met de hoedanigheid van het ruwe produkt, te weten:
- bacteriologisch redelijk betrouwbaar;
- zuurstofarm, ammonium-, mangaan- en ijzerhoudend;
- organische stoffen, waaronder reuk- en smaakstoffen;
- hoog gehalte aan calcium en waterstofcarbonaat.

Aan het te infiltreren water wordt de eis gesteld, dat het praktisch drinkwaterkwaliteit dient te hebben, waarbij de normwaarden die zijn genoemd in de bijlage van de door Gedeputeerde Staten van Utrecht verleende vergunning (633 MBO 1290 van 24 oktober 1979) niet mogen worden overschreden. Een overweging bij dit laatste punt is, dat het watervoerende pakket te Leersum op dit moment als schoon wordt beoordeeld en het door de proefnemingen niet met aanzienlijke hoeveelheden verontreinigingen mag worden belast.

De zuivering van het oevergrondwater vraagt extra aandacht betreffende de volgende punten:
- het afgeleverde water dient een zodanige kwaliteit te bezitten, dat verstopping van de infil-

tratieput en/of watervoerend pakket door bacteriele groei, zwevende bestanddelen of afzettingen vrijwel achterwege blijft;
- de verwijdering van organische produkten, ammonium en andere zuurstofverbruikende stoffen dient zodanig te zijn, dat het water tijdens de bodempassage zuurstofhoudend blijft en er geen ijzer- en mangaanverbindingen in oplossing gaan;
- de zuiveringsinstallatie dient betrouwbaar te werken.

In verband met het vrij hoge gehalte aan ammonium is als eerste trap een droogfiltratie gedacht, met daarachter een (nat "gesloten") koolfilter voor de verwijdering van een scala aan organische microverontreinigingen. Om een ook qua zuivering zo betrouwbaar mogelijke installatie te verkrijgen, werd als derde trap een nat-filtratie over fijn zand gekozen.
In verband met de lange duur van de eerdergenoemde procedurele kwesties om tot infiltratie te komen, is besloten nabij de put te Remmerden een proefinstallatie te bouwen om de reeds geplande zuiveringstrappen te testen ten einde meer informatie te krijgen voor het definitieve ontwerp. De proefinstallatie draaide geheel automatisch en vroeg alleen aandacht voor wat betreft onderhoud, metingen ter plaatse en bemonstering.
De drie filters waren zodanig bemeten dat hogere filtratiesnelheden in de laatste fase mogelijk waren. Enkele data van de proef- en semi-technische installatie zijn in tabel 3 vermeld.

	Proefinstallatie	Semi-technische installatie
droogfilter		
oppervlak in m^2	0,2	4,9
filtratiesnelheid	2,8 mm/s (10 m/h)	2,2 mm/s (8 m/h)
bedhoogte in m	2	2,5
filtermateriaal (zand)	1,5 - 2,5 mm	1,5 - 2,5 mm
looptijd in uren	circa 20	circa 18
koolfilter		
oppervlak in m^2	0,13	6,1
filtratiesnelheid	1,7 mm/s (6 m/h)	1,7 mm/s (6 m/h)
bedhoogte in m	2,25	2,25 (is nu > 2,3)
koolsoort	ROW 0,8	ROW 0,8 supra
werkelijke contacttijd	8 minuten	8 minuten
looptijd	circa 6 maanden	?
snelfilter		
oppervlak m^2	0,05	4,9
filtratiesnelheid	4,2 mm/s (15 m/h)	2,2 mm/s (8 m/h)
bedhoogte in m	1,60	1,50
filtermateriaal (zand)	0,6 - 1,2 mm	0,6 - 1,2 mm
looptijd	1 week	1 week

Tabel 3 - Gegevens van de proef en semi-technische installatie

4.1 Resultaten

Bij een filtratiesnelheid van 2,8 mm/s (10 m/h) werd het ruwe water na versproeiing in het droogfilter vrijwel volledig ontijzerd, ontmangaand en genitrificeerd. Desondanks bevatte het effluent meer verstoppende deeltjes dan het ruwe water ter plaatse, gemeten aan de MFI die toenam van 1,7 tot 2,2 s/l^2.

Het effluent werd opgevangen in een bak en door middel van een pompje naar de andere filters geleid.
Het koolfilter behoefde dus nog de adsorbeerbare organische stoffen - waaronder reuk- en smaakstoffen - te verwijderen. Als controle op de goede werking werd het effluent hoofdzakelijk getest op MFI, smaak, organochloorverbindingen (chloroform) en het kaliumpermanganaatverbruik. De MFI verbeterde zodanig dat de getalswaarde overeenkwam met die van het ruwe water (1,5 s/l^2). Voor wat betreft de organische stoffen werd chloroform eerder in het effluent aangetroffen dan een minder aangename smaak. Het $KMnO_4$-verbruik in het effluent was laag (< 1 mg/l) bij verse kool en liep langzaam op tot enkele milligrammen.
Het nafilter heeft tot taak onvolkomenheden in de voorgaande zuiveringstrappen op te vangen en het zuurstofgehalte van het water op peil te brengen. Een duidelijke verbetering van de MFI werd waargenomen tot waarden van 1,0 - 1,5 s/l^2 (gemiddelde waarden hoger in verband met lekkage nabij put).
Het gehalte aan zware metalen en aan enkele organische stoffen lag voldoende laag. Er kan na de zuivering van goed drinkwater worden gesproken.

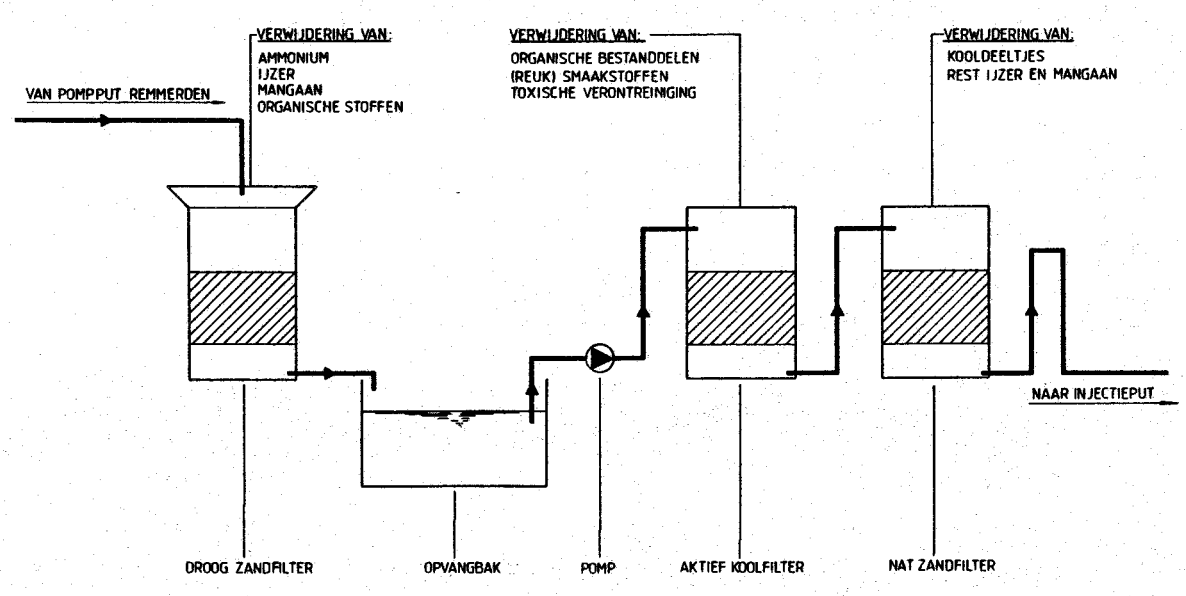
4.2 Aanvullende gegevens

Enkele metingen betreffende het AOC-gehalte gaven lage waarden te zien, zelfs voor het oevergrondwater alszodanig (0,6 - 1,1 µg Ac Ceq/l). De bacteriele hoedanigheid van het behandelde water was over het algemeen goed. Wel was er een invloed merkbaar in geval van hoogwater, waarbij de putkop onder water kwam te staan. Vermoedelijk werd dit veroorzaakt door verstoring van de dekkleilaag bij de

aanleg van putten en leidingen of door een lekkage. De bacteriële verslechtering van het oevergrondwater ging tevens gepaard met hogere MFI-waarden. Naar aanleiding van deze kwaliteitsvermindering is rond de put op circa 0,50 m diepte een kunststoffolie aangebracht om infiltratie van het rivierwater via het maaiveld naar het putfilter te voorkomen. Het mutageniteitsonderzoek (Amestest) betreffende het behandelde water gaf een negatief (= goed) resultaat te zien.

5 OPZET INFILTRATIESYSTEEM TE LEERSUM

Het te Remmerden gewonnen water wordt naar Leersum getransporteerd en aldaar gezuiverd volgens het eerdergenoemde systeem (zie tabel 3 en figuur 2). Vandaar wordt het naar de infiltratieput gepompt. De figuren 3 en 4 geven een indruk van de situatie te Leersum en het verticale profiel met de waarnemingsputten. De verwachting is dat circa drie jaren



Figuur 2 - Zuiveringsschema

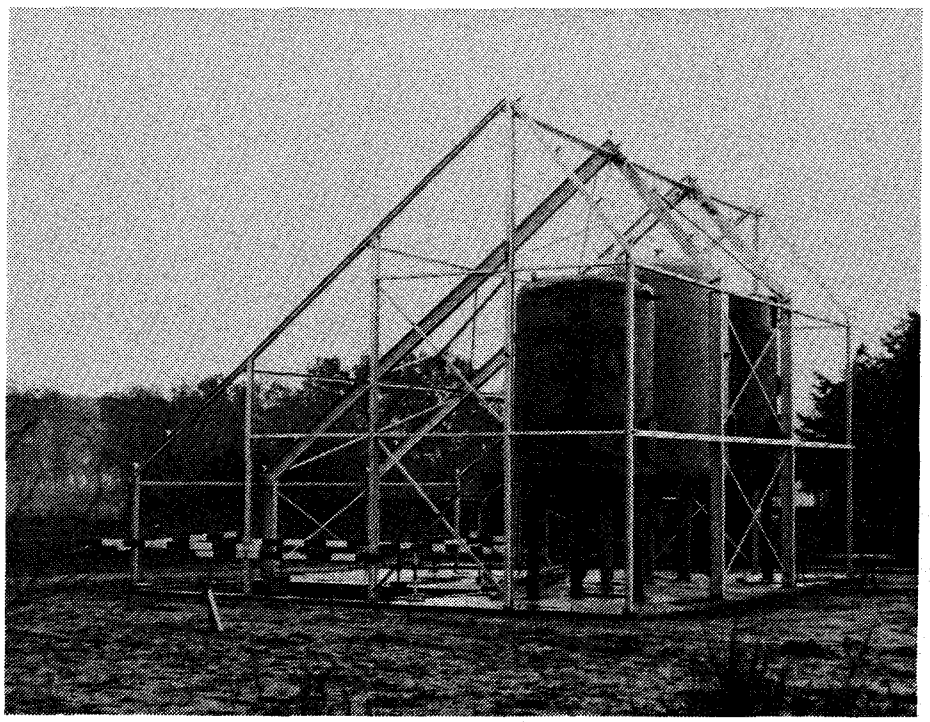
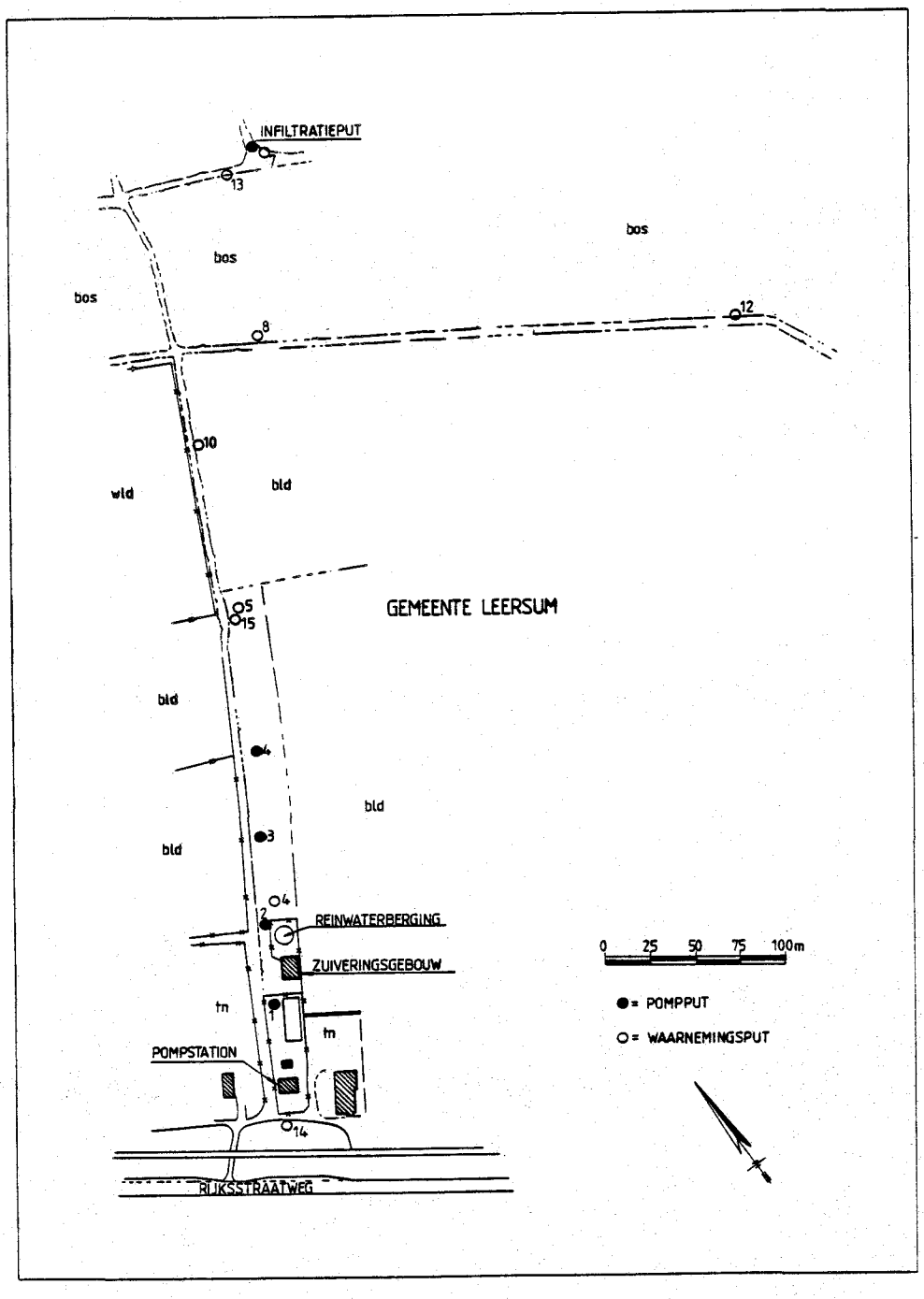
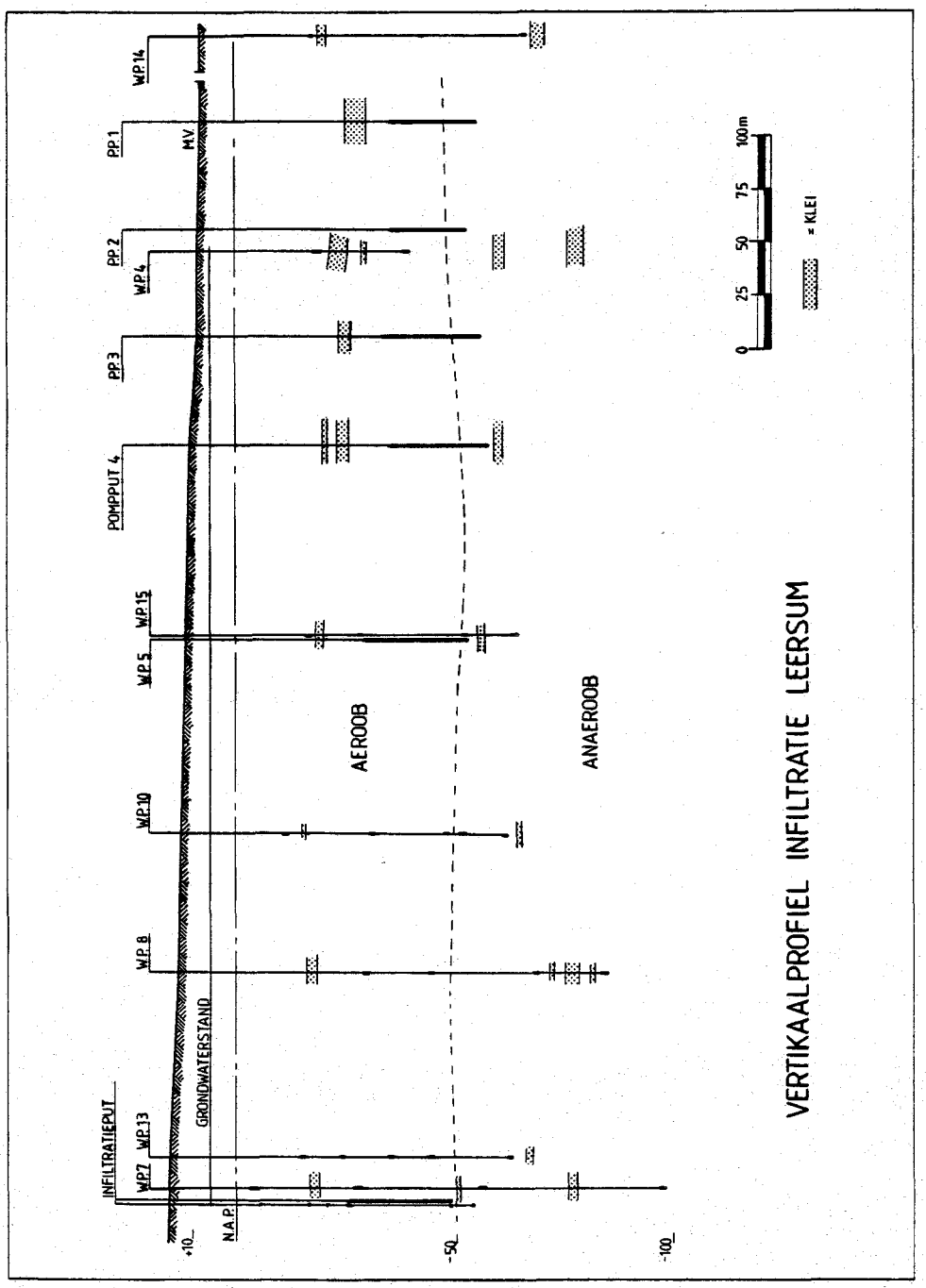


Foto 1 - Zuiveringsinstallatie in aanbouw

na aanvang van de infiltratie het water de winningsmiddelen zal bereiken. De infiltratievolumestroom bedraagt 9,7 l/s (35 m^3/h), de gemiddelde volumestroom van het pompstation is 27,8 l/s (100 m^3/h).
Indien wordt aangenomen dat al het geïnfiltreerde water wordt teruggewonnen, houdt een en ander in dat na verloop van tijd de bijdragen aan grond- en infiltratiewater zich verhouden als 2 : 1.
Het chloridegehalte van het water te Leersum zal dan toenemen van 14 mg/l tot circa 65 mg/l. Voor de hardheid (het water te Leersum is zeer zacht en wordt reeds opgehard) is de te verwachten verandering van 0,5 mmol/l (2,8 °D) naar 1,3 mmol/l (7,3 °D). Ondanks deze veranderingen blijft het kwaliteitsniveau van het gemengde grondwater uitstekend.


INFILTRATIEPUT
7
13
bos
bos
bos
8
12
10
wld
bld
GEMEENTE LEERSUM
5
15
bld
4
bld
3
bld
4
2
REINWATERBERGING
ZUIVERINGSGEBOUW
tn
1
tn
POMPSTATION
14
RIJKSSTRAATWEG
0 25 50 75 100m
● = POMPPUT
○ = WAARNEMINGSPUT

Figuur 3


VERTIKAALPROFIEL INFILTRATIE LEERSUM
INFILTRATIEPUT
WP.7
WP.13
WP.8
WP.10
WP.5
WP.15
POMPPUT 4
PP.3
WP.4
PP.2
PP.1
WP.14
M.V.
GRONDWATERSTAND
N.A.P.
+10
-50
-100
AEROOB
ANAEROOB
0
25
50
75
100m
= KLEI

Figuur 4

5.1 Infiltratieput met waarnemingsmogelijkheden

Het filter van de infiltratieput is gesteld van 25,2 - 48,7 m -NAP in het aerobe deel van het watervoerende pakket. Verder zijn nog een zestal controlefilters aangebracht en wel aan de boven- en onderzijde van het putfilter voor waarneming van een eventuele verstopping. Tussen deze put en de winmiddelen van het pompstation is een aantal waarnemingsputten ingericht die naast enkele filtertjes met een geohm-kabel zijn uitgerust. Verder zijn er bovenstrooms en terzijde van de infiltratieput enkele waarnemingsputten ingericht voor controle van de waterkwaliteit ter plaatse.
De grens tussen aeroob en anaeroob water ligt op circa 50 m -NAP, nabij de winplaats zal deze grens hoger liggen. Van de dunne kleilaagjes die in diverse boringen zijn aangetroffen, is het de vraag of deze op een bepaalde diepte aansluitend zijn, daar het gebied als gestuwd bekend staat (zie figuur 4). In verband met deze problematiek zijn in diverse boringen filtertjes in diepere en minder diepe formaties gesteld om de weg van het te infiltreren water te controleren.
Bij de infiltratie van gezuiverd rioolwater te Hilversum-oost bleek duidelijk dat het infiltraat tot op grote diepte (150 m -NAP) kon worden aangetroffen, weerstandbiedende lagen werden tot die diepte vrijwel niet aangetroffen.
Waarschijnlijk hebben alleen de kleilagen op ongeveer 20 en 75 m -NAP enige betekenis als weerstandbiedende laag. Voor de verschillende waarnemingsputten tussen de infiltratieput en de winputten zijn de afstanden tot de infiltratieput zodanig gekozen dat globaal de volgende reistijden worden verkregen:

Le- 7	1 dag
Le-13	17 dagen
Le- 8	290 dagen
Le-10	600 dagen
Le-15	940 dagen
p.p.-4	1.120 dagen

Bij deze reistijden is uitgegaan van een constante infiltratievolumestroom van 9,7 l/s (35 m^3/h) en een kD-waarde van 2.000 m^2/dag.
De investeringen, die nodig waren om de gehele opzet te verwezenlijken, te weten winning uiterwaard, ruwwaterleiding, filterinstallatie + gebouw, reinwaterkelder, terreinleidingen en de infiltratieput met waarnemingsputten, bedroegen ongeveer f 1.600.000,--.

6 ENKELE ERVARINGEN MET DE INFILTRATIE

Nadat de installaties waren opgeleverd kon met het inwerken van de filters worden begonnen. Afgezien van verschillende technische problemen vergt een inwerkperiode ongeveer 2 maanden, alvorens het water een zodanige kwaliteit bezit dat het geïnfiltreerd kan worden. Hoewel de infiltratie nog maar enkele maanden aan de gang is (vanaf 28 november 1983), zijn een paar punten toch vermeldenswaard. Ten eerste blijken de reistijden tussen put 5 en de waarnemingspunten Le 7 en Le 13 langer te zijn dan was berekend. Een verklaring hiervoor kan zijn dat het infiltratiewater in een wat fijnzandiger formatie meer weerstand ondervindt. De plaatsing van het geringe aantal filtertjes op een mogelijk minder gunstige diepte en de gelaagdheid van de bodem spelen dan een rol. Verder blijkt het gehalte aan lood en vooral zink sterk

toe te nemen wanneer het infiltratiewater doorkomt. Zowel het natuurlijke grondwater als het te infiltreren water bevatten slechts sporen van deze metalen.
Mogelijk spelen uitwisselingsprocessen een rol. Het laatste punt zal nader onderzocht worden.

Utrecht, 28 februari 1984

Bijlage 1

Overzicht publiekrechtelijke vergunningen

	aanvrage	verlening
Provincie		
1. a. Prov. Grondwaterverordening	23-10-74	(24-02-75 ingetrokken)
b. Prov. Grondwaterverordening	03-05-78	24-10-79
2. Prov. Verordening Bescherming Grondwaterkwaliteit	23-10-74	24-10-79
3. "Artikel 19 - Procedure" ten behoeve van bouw installatie te Leersum"		03-08-82
Rijk		
1. Wet Verontreiniging Oppervlaktewater (lozing grondwater Rhenen)	03-02-83	22-11-83
2. Rivierenwet aanbrengen obstakels in Uiterwaard te		
- Amerongen	22-08-74	24-04-75
- Rhenen	03-02-83	22-11-83
- een eerdere aanvraag voor Rhenen werd niet afgedaan (mededeling: "niet nodig")	21-06-78	(22-01-79)
Waterschap Kromme Rijn		
1. Aanbrengen pompput 2 Remmerden	16-06-78	?
2. Waarnemingsputten AM 1 en AM 2 / RH 1 en RH 2	16-10-75	01-12-75
3. Waarnemingsputten Leersum	10-03-76	18-05-76
4. Waarnemingsputten Rhenen + pompput	28-09-76	11-10-76
5. Aanbrengen kabel in Uiterwaard	09-11-76	10-12-76
Gemeente Amerongen		
1. Aanlegvergunningen putten in Uiterwaard en leiding	01-11-74	?
2. Waarnemingsputten AM 1 en AM 2	10-07-75	04-09-75
3. TL Remmerden-Leersum	05-08-80	10-03-81
Gemeente Rhenen		
1. Bouwvergunning Proefzuiveringsinstallatie	14-06-78	08-08-78
2. TL Remmerden-Elst		28-02-80
3. TL Remmerden-Leersum		06-01-81
Gemeente Leersum		
1. TL Remmerden-Leersum	19-08-80	?
2. Hinderwet installatie		26-05-82
3. Bouwvergunning installatie		
4. Aanlegvergunning infiltratieleiding		23-09-82

* Niet ingevulde data zijn niet meer te achterhalen

Bijlage 2

Overzicht privaatrechtelijke overeenkomsten

	aanvrage	verlening
Staatsbosbeheer		
1. Waarnemingsputten Leersum	16-12-75	12-01-76
2. Infiltratieput + leggen leiding	08-80	25-03-81
PUEM		
Stroomlevering Amerongen/Rhenen	22-10-74	09-12-76
College van Kerkvoogden, Rhenen		
1. Waarnemingsputten RH 1 en RH 2	16-10-75	04-12-75*
2. Waarnemingsputten + pompput	28-09-76	08-10-76
3. Leggen van stroomkabel	09-11-76	05-01-77*
4. Pompput 2 Uiterwaard	19-06-78	
Steenfabriek "Over Betuwe"		
1. Pompput 2 Uiterwaard		
2. Oprichten proefzuiveringsinstallatie	11-09-78	18-09-78
3. Verlenging termijn proefzuiverings-installatie	10-10-80	24-10-80
Diversen		
1. Overeenkomsten + schaderegelingen met grondeigenaren (TL-Remmerden-Leersum)		
2. G. Laros - aanleg RH 3		29-07-76
3. G.J.G.C. Graaf van Aldenburg Bentinck (waarnemingsputten Amerongen)	20-01-75	11-03-76
4. Rentmeester Doude van Troostwijk (schakelkast Remmerden)		

* Excuses voor trage behandeling!

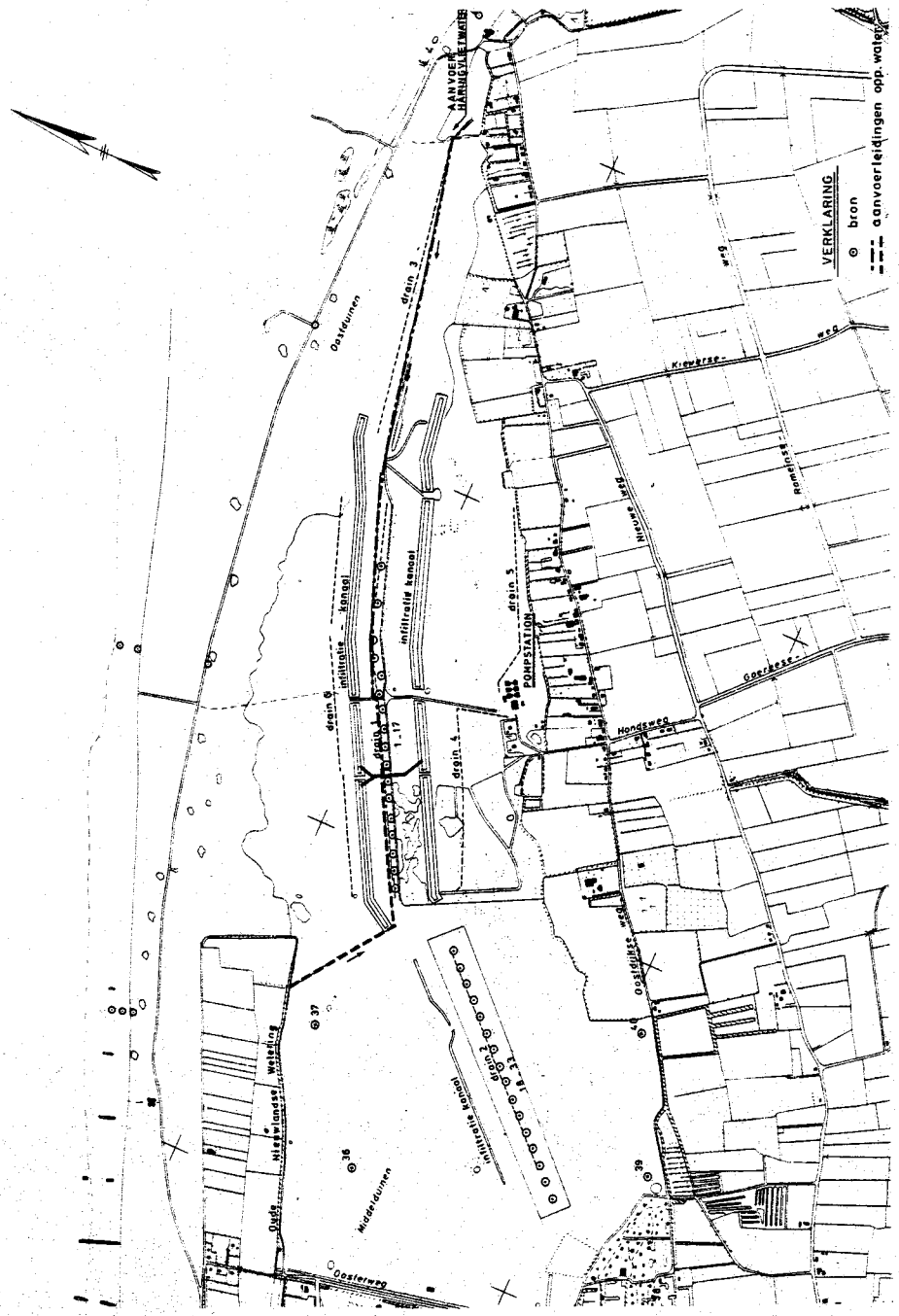
EXPERIMENT PUTINFILTRATIE OP GOEREE-OVERFLAKKEE

H.J.L. de Kraa
N.V. Watermaatschappij Zuid-West-Nederland

1 HUIDIGE SITUATIE

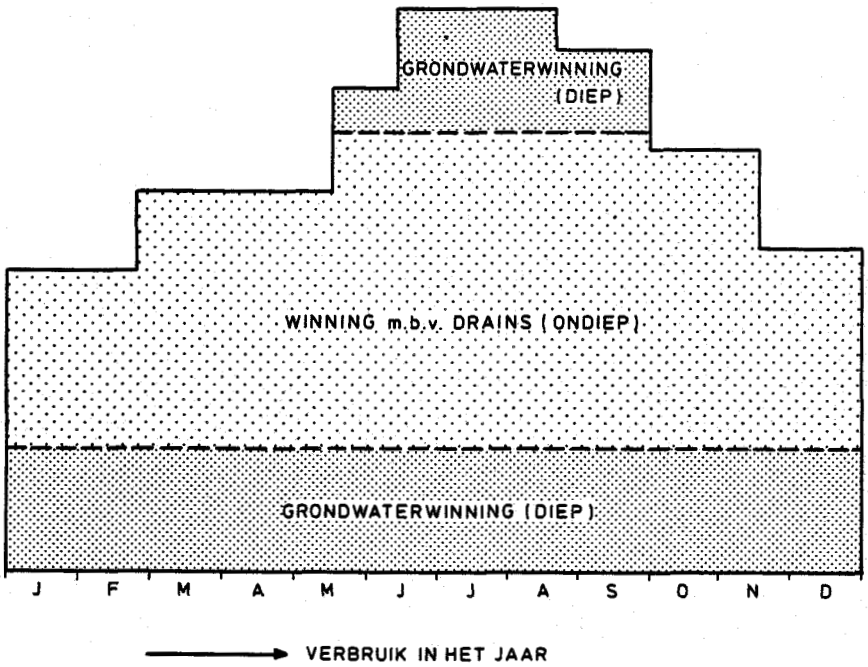
Het eiland Goeree-Overflakkee heeft ongeveer 41.000 inwoners. Het drinkwaterverbruik was in 1983 2,8 miljoen m^3. Een aanzienlijk deel van de verbruiken is toe te schrijven aan de recreatie welke in de zomermaanden op het eiland plaatsvindt. Het maximum etmaalverbruik bedraagt thans bijna 1,6 maal de gemiddelde dag en is gelijk aan ongeveer 12.500 m^3. Deze piekfactor vertoont nog een stijgende tendens. De maximale maandproduktie is een factor 1,7 hoger dan de minimum maandproduktie.

De winning vindt plaats in de duinen bij Ouddorp. De zoetwatervoorraad reikt niet verder dan 50 m beneden NAP. Hierdoor kan de diepe grondwaterwinning slechts een beperkte omvang hebben van 300.000 m^3/jaar. Een grondwaterwinning elders levert ook nog eens 300.000 m^3/jaar (Kleistee). De aanvullende produktie vindt plaats in het dunne bovenpakket (tussen NAP en 5 m +NAP) met een stelsel van infiltratiekanalen en drains. Zie voor een overzichtstekening figuur 1. Voor infiltratie wordt voornamelijk gebruik gemaakt van water uit het Haringvlietbekken.
Op korte termijn zullen ten behoeve van de hoge zomerverbruiken aanvullende winningsmiddelen worden aangelegd omdat de mogelijkheid om extra grondwater in de zomer te winnen beperkt is (zie figuur 2).

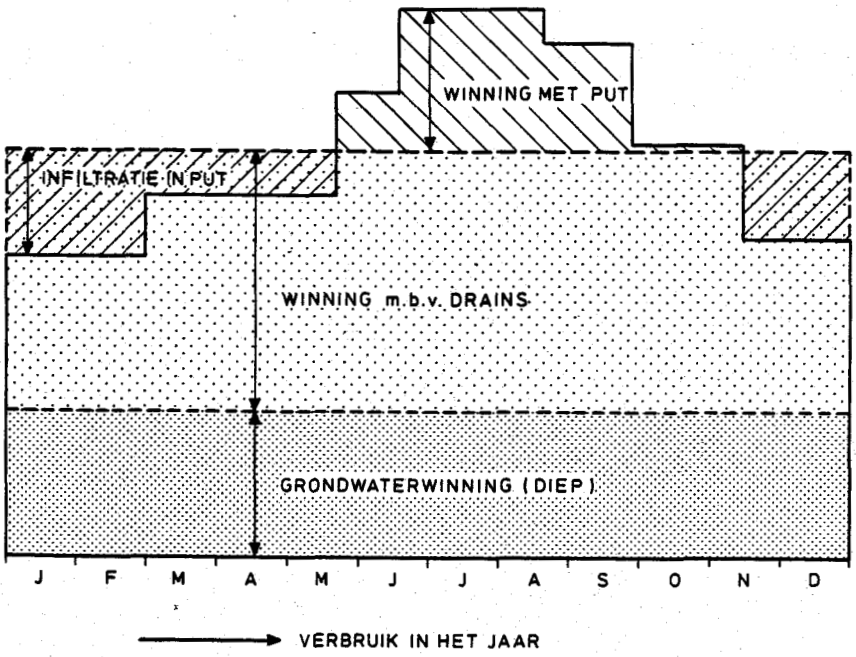

VERKLARING
bron
aanvoerleidingen opp. water
AANVOER HARINGVLIETWATER
drain 3
Oostduinen
infiltratie kanaal
drain 5
POMPSTATION
drain 4
Hondsweg
Goerkese
Nieuwe weg
Kiewerse weg
Oostduikse weg
Middelduinen
Oosterweg
Oude Nieuwlandse Wetering
infiltratie kanaal
drain 2
drain 6
1.17
18-33
37
36
39
40

Figuur 1

HUIDIG SYSTEEM



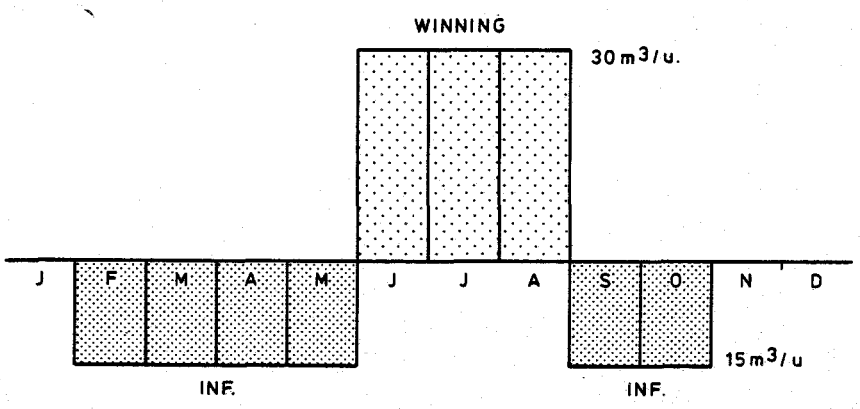
MOGELIJK TOEKOMSTIG SYSTEEM



Figuur 2

2 TOEKOMSTIGE SITUATIE

Gezien vanuit het oogpunt van de natuurwaarden van het terrein zou het wenselijk zijn als de winningsmiddelen ten behoeve van de piekproduktiecapaciteit tot minder grote ingrepen in het terrein zouden leiden. De aanleg van kanalen en drains ten behoeve van een capaciteit welke maar gedurende 10 % van het jaar vereist is, is dan ook vanuit het oogpunt van terreinbeslag niet optimaal.
Als "capaciteitafvlakkend" middel moet de oplossing met behulp van seizoensgebonden voorraadvorming overwogen worden. Hierbij wordt gedacht aan de ondergrondse opslag van gezuiverd water in een watervoerend pakket tussen NAP en 30 m -NAP. De voorraadvorming geschiedt door zoutverdringing. Het geborgen volume is echter relatief zo gering dat de verplaatsing van het zoet/zout grensvlak nauwelijks meetbaar zal zijn.
Op korte termijn (herfst 1984) zal de WMZ in de duinen bij Ouddorp een proef met een infiltratieput starten. Doelstelling van deze proef is om te onderzoeken of infiltratie met een put in de fijnzandige formatie tot 35 m beneden maaiveld mogelijk is en welke kwaliteit water hiertoe vereist is. De eerste opzet is zodanig dat in de eerste cyclus van een jaar ± 70.000 m^3 water van drinkwaterkwaliteit in voor- en najaar geïnfiltreerd zal worden, waarna in de zomer onderzocht zal worden in hoeverre dit water met dezelfde put versneld is terug te winnen. Een en ander kan bereikt worden door gedurende zes maanden 15 m^3/uur te infiltreren en gedurende 3 maanden met 30 m^3/uur terug te winnen (zie figuur 3).
Als de eerste opzet slaagt, zal gekeken worden of minder gezuiverd water voor infiltratie toegepast kan worden en of een ontwerp op praktijkschaal op een geschikte locatie in Ouddorp mogelijk is. Hierbij zou dan in de zomermaanden gedacht moeten worden aan een capaciteit van meer dan 1.000 m^3/etmaal.



Figuur 3

3 NEVENASPECTEN

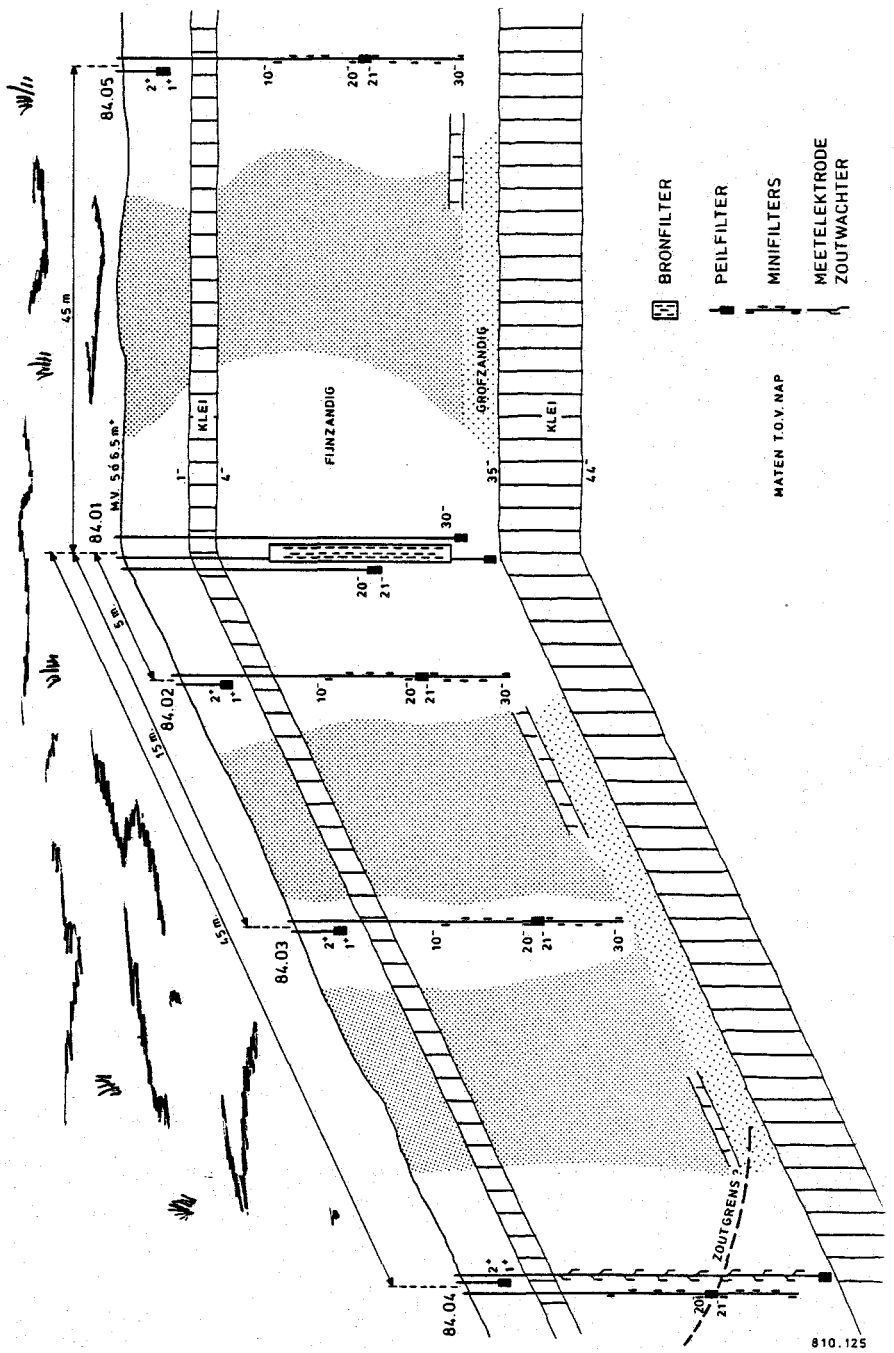
3.1 Afvlakking Cl^--gehalte Haringvlietwater

Doordat het chloridegehalte in het Haringvlietwater sterk varieert over het jaar en bovendien soms ontoelaatbaar hoge waarden bereikt, is een verhoogde waakzaamheid voor het waterleidingbedrijf geboden. Met behulp van een langetermijnbuffering zou het mogelijk worden in tijden van een relatief laag Cl^--gehalte meer water in de ondergrond "op te bergen" en in tijden van een hogere Cl^--last ditzelfde water weer opnieuw te winnen en bij het ruwwater te mengen. Op jaarbasis zal hierdoor een Cl^--afvlakking plaatsvinden.

3.2 Geohydrologie

Omdat de weerstandbiedende lagen, zowel aan onder- als aan bovenzijde van het diepe watervoerende pakket in Ouddorp van plaats tot plaats sterk van karakter verschillen zal nader onderzoek moeten uitwijzen of geschikte locaties aanwezig zijn. Ook zal onderzocht moeten worden hoe het zoet/zoutgrensvlak zich gedraagt nabij de infiltratie/winningsput.

Bij de uitvoering van de boringen is gebleken dat bij de proeflocatie een weerstandbiedende laag aanwezig is van NAP tot 4 m -NAP. Een fijnzandig watervoerend pakket loopt van 4 m -NAP tot 35 m -NAP. Aan de onderzijde hiervan bevindt zich een 10 m dikke, vaste kleilaag. Bij de boorgatmeting is gebleken dat de weerstand net boven de kleilaag sterk daalt; hetgeen wijst op het voorkomen van brakwater (vermoedelijk diffusie uit kleilaag). Uit eerdere onderzoekingen is gebleken dat het zoet/zoutgrensvlak zich nabij deze locatie op 35 à 40 m -NAP bevindt. Hoewel het hier om een zeer fijnzandige formatie gaat (korreldiameter 100 tot 300 μm) lijkt infiltratie mogelijk, alhoewel bijzondere aandacht besteed zal worden aan verstoppingsverschijnselen. Daar het verhang (en dientengevolge de natuurlijke afstroming) in het diepe pakket zeer gering is, zal zich - theoretisch - rondom de infiltratieput een min of meer cilindervormig volume drinkwater vormen, dat bij terugwinning ook weer nagenoeg geheel verdwijnt. Gezien de ligging van het zoet/zoutgrensvlak zal aandacht besteed worden aan de vraag in hoeverre dit vlak weggedrongen kan worden.
Ten behoeve van het onderzoek is gekozen voor een infiltratieput met vier peilbuizen, welke verdeeld zijn over twee loodrechte raaien. De putten hebben freatische en diepe filters en zijn, in het watervoerende pakket, uitgerust met minifilters. In één peilbuis op 45 m afstand is tevens een zoutwachter gemonteerd. Schematisch is een en ander weergegeven in figuur 4.


BRONFILTER
PEILFILTER
MINIFILTERS
MEETELEKTRODE ZOUTWACHTER
MATEN T.O.V. NAP
FIJNZANDIG
GROFZANDIG
KLEI
KLEI
ZOUTGRENS ?
84.01
84.02
84.03
84.04
84.05
45 m
5 m
15 m
45 m
810.125

Figuur 4

3.3 Bedrijfsvoering

In geval een - al of niet dual-purpose - infiltratieput op praktijkschaal voor een winningssysteem als aanwezig te Ouddorp, mogelijk blijkt, zal niet alleen de zuivering maar ook de winning een over het jaar gelijkmatiger beeld te zien geven. De drains zullen in het laagseizoen meer produceren ten behoeve van de infiltratieputten en in het hoogseizoen relatief minder omdat dan de produktie van de putten benut kan worden. Een en ander zal het huidige infiltratie- en winningssysteem qua bedrijfsvoering ten goede komen.

Goes, april 1984

HYDROLOGISCH VOORONDERZOEK TEN BEHOEVE VAN DE KEUZE VAN DE LOCATIE VOOR DIEPINFILTRATIE; EEN VOORBEELD

J.H. Peters
KIWA N.V., Nieuwegein.

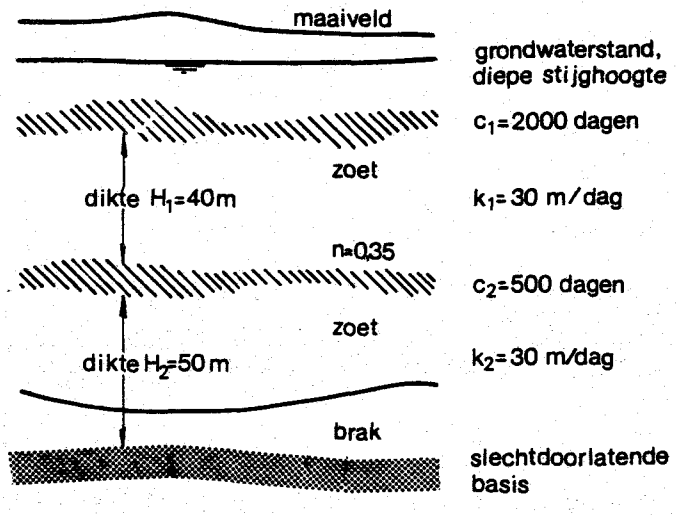
1 INLEIDING

Persputten hebben vele toepassingsmogelijkheden (1). Het onderzoek is er echter vooral op gericht kennis en inzichten te vergaren zodat persputinfiltratie op praktijkschaal kan worden toegepast als alternatief voor infiltratie met behulp van geulen, panden of bekkens (open-infiltratie) en voor de seizoensopslag van zoet water in brakke watervoerende pakketten.
Voordat daadwerkelijk begonnen wordt met het ontwerpen van een persputsysteem (het totaal van win- en persputten), zal een keuze worden gemaakt voor de locatie. In een vooronderzoek zullen naast een beoordeling van de hydrologische geschiktheid tevens andere factoren moeten worden beschouwd. Te noemen zijn mogelijkheden voor bescherming, de ter plaatse aanwezige grondwaterkwaliteit en de noodzakelijke leidingaanleg. Dit laatste niet alleen vanwege de hoge kosten die hiermee gemoeid kunnen zijn maar ook omdat vergraving een langdurige verstoring van natuur en landschap inhoudt. Dit alles maakt deel uit van het onderzoek naar het effect van het bouwen en exploiteren van een persputsysteem op de natuurlijke waarden van de omgeving.
In deze bijdrage zal aan de hand van een fictief voorbeeld worden aangegeven hoe hydrologisch vooronderzoek voor één bepaalde locatie eruit zou kunnen zien. Hierbij zal gebruik gemaakt worden van de resultaten van de werkgroep Hydrologie van Persputsystemen; een werkgroep die is opgericht voor de bestudering van de specifiek

geohydrologische aspecten van persputinfiltratie (2). Te noemen zijn: kwaliteitsafvlakking, grondwaterstanden en -stijghoogten, voorraadvorming, dichtheidsstroming (stroming ten gevolge van verschillen in dichtheid, soortelijke volumieke massa van het water), terugwinpercentage en bescherming.

2 VOORBEELD

De realisatie van een persputsysteem verdient alleen aanbeveling in een geohydrologisch en geohydrochemisch goed onderzocht of te onderzoeken gebied dat voldoende kan worden beschermd tegen verontreiniging. Uit sedimentologisch onderzoek kan wellicht informatie gehaald worden over de formaties ook voor wat betreft verbreiding en insluiting van kleilagen, inhomogeniteiten en anisotropie. Ook boorgat- of geothermisch onderzoek kan hierover informatie verschaffen (3). Veronderstel dat om welke redenen dan ook, een bepaalde locatie in aanmerking komt waarvan het geologische profiel (voor zover bekend) is weergegeven in figuur 1.



Figuur 1 - Een geologisch profiel

De ontwerpcapaciteit Q_{tot} voor het persputsysteem is op 5 Mm^3/a gesteld. De voor hygiënische be-

trouwbaarheid belangrijke minimum verblijftijd T_{min} is 1 maand. Een gelijkmatige 'lineaire' spreivan verblijftijden wordt in het algemeen als gewenst beschouwd (9). De grootte van de spreiding ΔT is van belang voor het kwaliteitsafvlakkend effect. Als voor de spreiding 6 maanden gekozen wordt, is de gemiddelde verblijftijd T_{gem} gelijk aan 4 maanden.
Het eerste watervoerende pakket is de 'target-aquifer', het pakket met dikte H_1 waarin zowel pers- als winputten worden geplaatst. De fractie van de bodem die wordt doorstroomd (het effectieve porievolume n) is 0.35. Voor de oppervlakte O van het gebied waarbinnen pers- en winputten worden geplaatst, moet dus gelden

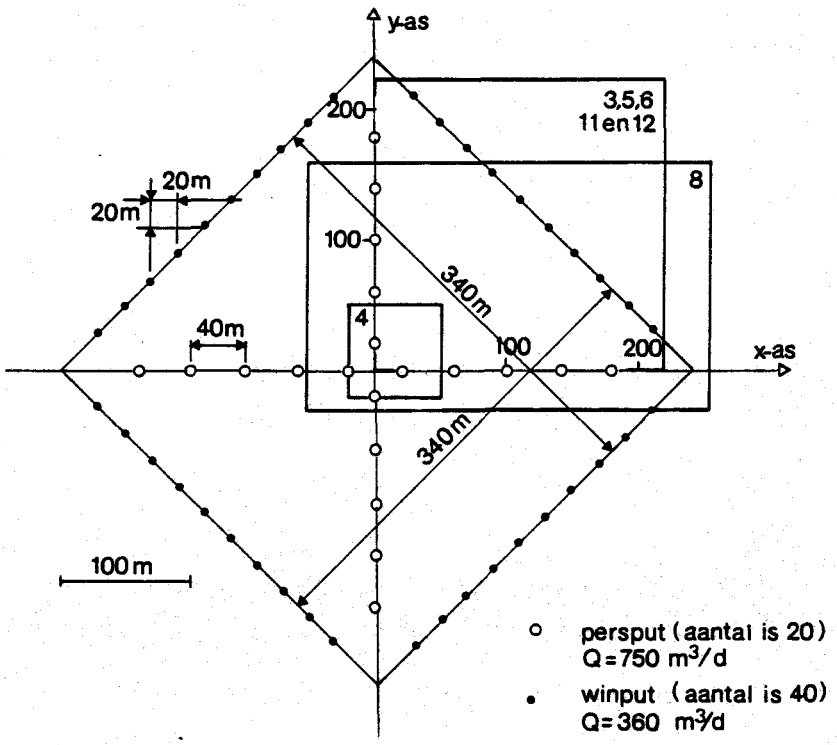
$$O = \frac{Q_{tot} \cdot T_{gem}}{H_1 \cdot n}$$

Zodat O gelijk is aan 12 ha, een gebied van 350 m bij 350 m. Het is dus duidelijk dat grote verblijftijden een directe consequentie hebben voor de grootte van het benodigde terrein.
De plaats van de putten is onder andere van hydrologische factoren afhankelijk. Zo wordt de minimum afstand tussen pers- en winputten bepaald door de verblijftijd die niet mag worden onderschreden. Maximum afstanden zijn echter ook van belang. Als het water een lange weg moet kiezen, dan zal het hiervoor noodzakelijke verval groot zijn en daarmee de verliezen naar (en invloeden in) boven- en onderliggende pakketten. Opgemerkt moet worden dat de stijghoogten in verband met bodemstabiliteit aan maxima zijn gebonden (afhankelijk van bodemopbouw, diepte van omstorting, 'natuurlijke' stijghoogte, afwerking boorgat etc.).
In het geval dat winputten door persputten worden ingesloten, is het duidelijk dat intrusie uit boven- en onderliggende pakketten zal optreden. Voor het beschouwde profiel is dit ongunstig gezien de

mindere kwaliteit van het water in het diepe pakket. Omgekeerd als persputten door winputten worden ingesloten, zal binnen het systeem 'overdruk heersen', waardoor water naar andere pakketten verdwijnt en dus intrusie uitgesloten is. Een bijkomend voordeel is dat bij onderbroken infiltratie winning verspreid over een groot gebied plaatsvindt (winmiddelen staan immers aan de 'buitenkant').
Voor de pers- en winputten kiezen we boorgatdiameters van 0,6 meter. De volumestroom van de winputten is 15 m^3/uur of 360 m^3/dag. Voor 40 putten is dit op jaarbasis 5,3 Mm^3.
Veronderstel een vooronderzoek naar de verstoppende eigenschappen van het water dat later voor infiltratie zal worden gebruikt. Een van de conclusies hiervan zou kunnen zijn dat een infiltratiesnelheid (volumestroomdichtheid) op de boorgatwand van 0,8 m/uur ook op lange termijn goed haalbaar is. Als de omstorting van het persfilter een lengte heeft van 20 meter is de oppervlakte van de boorgatwand 38 m^2. Wellicht kan de ontwerpvolumestroom voor de persputten op 30 m^3/uur gesteld worden. Het benodigde aantal persputten is dan 20.

3 SITUERING VAN DE PUTTEN

Bij oppervlakte-infiltratie kan een gunstige verdeling van verblijftijden worden verkregen door de middelen in de vorm van een veelhoek te plaatsen (4). Ditzelfde kan ook bij persputinfiltratie. De plaatsing van de putten binnen het gebied van 350 m bij 350 m kan bijvoorbeeld zijn als is weergegeven in figuur 2. Persputten worden geplaatst op de diagonalen van het vierkant; winputten langs de zijden. Opgemerkt moet worden dat een eventueel voor de toekomst geplande uitbreiding (fasering) zijn invloed heeft op de putconfiguratie.

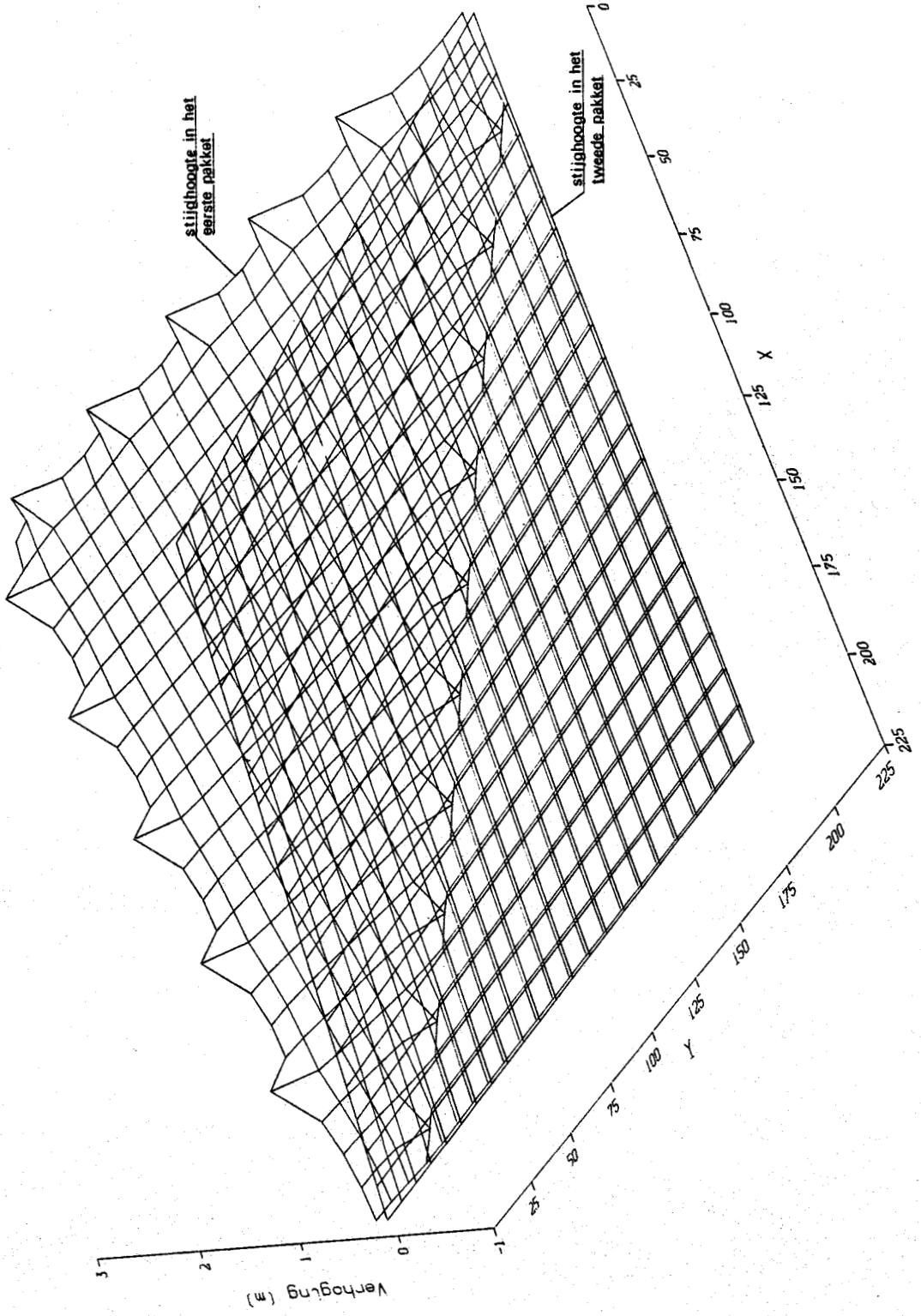


Figuur 2 - Plaatsing van win- en persputten. Genummerde kaders hebben betrekking op andere figuren (3, 4, 5, 6, 8, 11 en 12)

Om ook buiten de winputten-serie in het eerste pakket overdruk te handhaven, hoeft de infiltratie in dit geval slechts circa 4% groter te zijn dan de onttrekking. Deze overinfiltratie zorgt er onder andere voor dat ook bij onderbroken infiltratie gedurende een zekere tijd alleen kunstmatig geïnfiltreerd water wordt onttrokken.

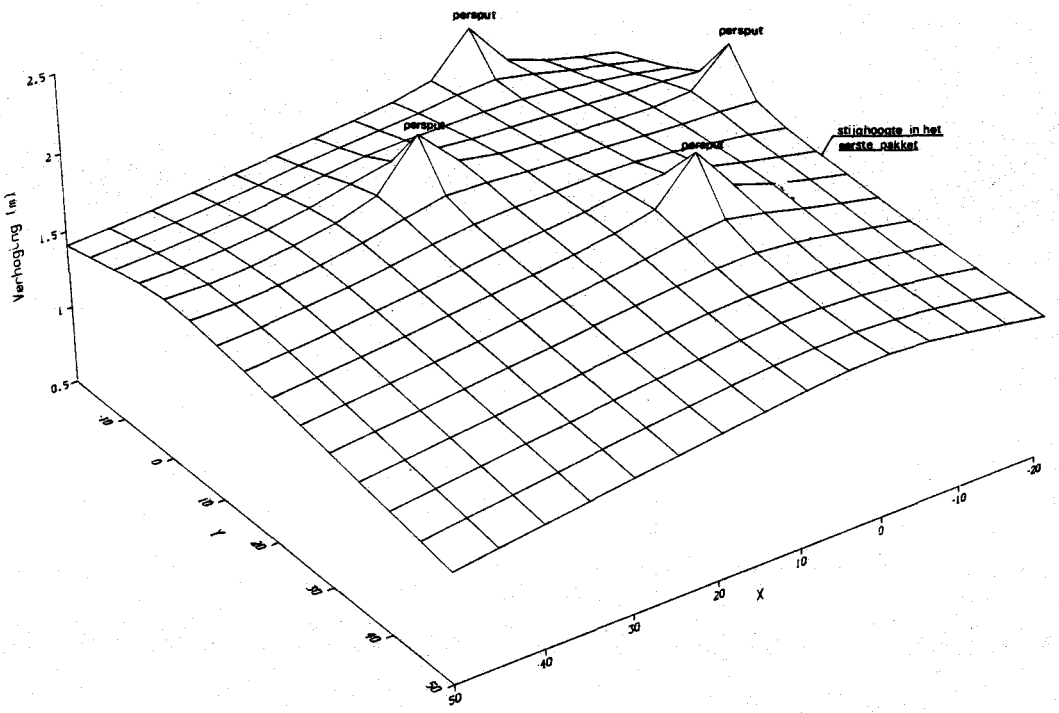
4 STIJGHOOGTEN

De stationair optredende stijghoogten voor zowel het eerste als tweede pakket zijn te berekenen onder andere met het door Vinkers (KIWA) geschreven model ATLAS, een analytisch computermodel gebaseerd op de vergelijkingen van Huisman-Kemperman (5). Het programma voorziet in het grafisch weergeven van de resultaten. De stijghoogte-vlakken



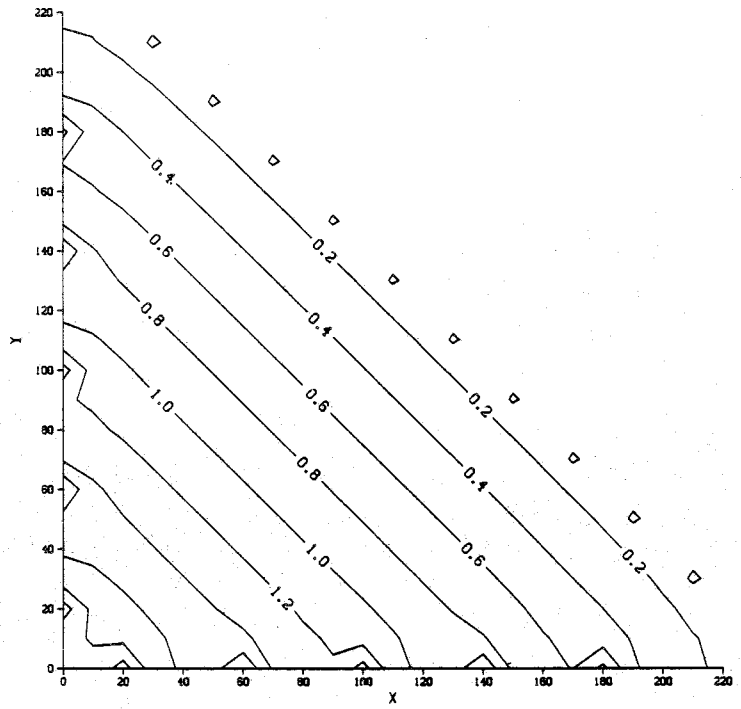
Figuur 3 - Perspectief-plot van de hoogten tot waar het grondwater stijgt in buizen die in de pakketten geplaatst zijn. Het bovenste vlak geeft de stijghoogte in het eerste pakket weer. Het onderste vlak heeft betrekking op de stijghoogte in het diepe pakket (overinfiltratie 4%, oorspronkelijke stijghoogte is nulniveau, maten in meters).

voor het eerste en tweede pakket zijn weergegeven in figuur 3; uit overwegingen van symmetrie slechts voor het in figuur 2 weergegeven kwadrant. In figuur 4 is voor een klein detail in het centrum van het systeem het stijghoogtevlak voor het eerste pakket weergegeven.

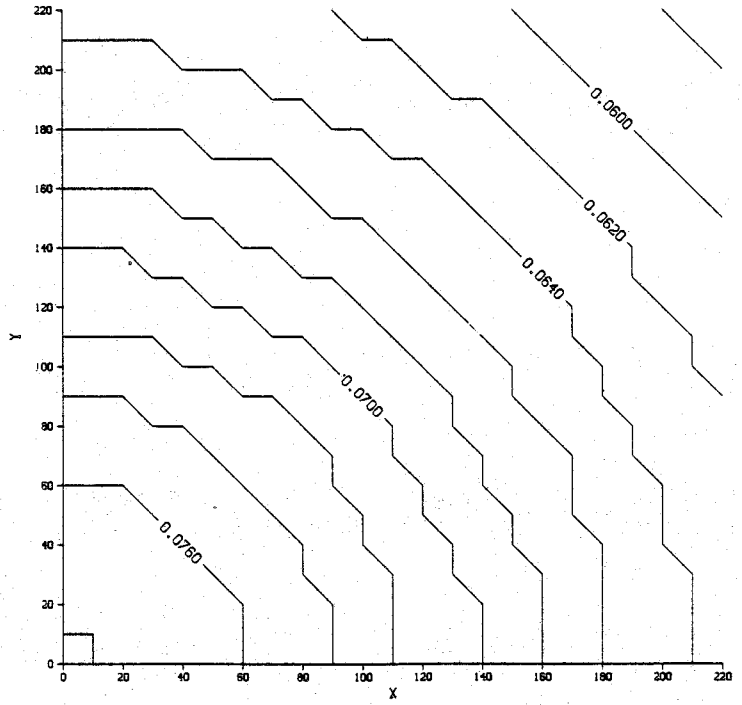


Figuur 4 - Perspectief-plot van de stijghoogte in het eerste pakket. Detail van het centrum van het systeem (overinfiltratie 4%, oorspronkelijke hoogte is nulniveau, maten in meters).

Een andere optie van het door Boerhout (KIWA) toegevoegde plotprogramma is het maken van contourplots van de in de knooppunten van een regelmatig netwerk berekende stijghoogten, zie figuren 5 en 6.



Figuur 5 - Contourplot van de stijghoogte in het eerste pakket (overinfiltratie 4%, oorspronkelijke stijghoogte is nulniveau, maten in meters)

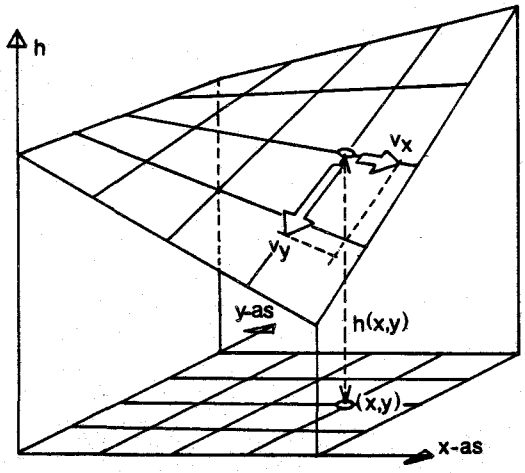


Figuur 6 - Contourplot van de stijghoogte in het tweede pakket (overinfiltratie 4 %, oorspronkelijke stijghoogte is nulniveau, maten in meters)

Uit de figuren 3, 5 en 6 blijkt dat alleen in zeer kleine gebiedjes nabij de winputten er water uit het diepe pakket wordt aangetrokken. (Immers alleen dáár is de stijghoogte in het eerste pakket lager dan in het tweede pakket). Dit is water dat uit het eerste pakket afkomstig moet zijn omdat overal elders er wegzijging is uit het eerste pakket. In het tweede pakket is zelfs geen stagnatiepunt waar upconing van brak water zou kunnen plaatsvinden.
Het op de beschreven wijze exploiteren van een persputsysteem kan dan ook theoretisch niet leiden tot verzilting van winputten. De overinfiltratie zorgt voor een gelijkmatige voorraadvorming in het eerste pakket. De overdruk in het eerste pakket veroorzaakt een zeer gelijkmatige verdringing van het licht brakke water dat zich diep in het tweede pakket bevindt. Hierbij treden verticale en horizontale snelheden op van enkele meters per jaar, een orde kleiner dan reeds van nature optredende grondwatersnelheden (In deze berekening is geen rekening gehouden met het kleine verschil in dichtheid tussen het zoete en brakke water. Dit dichtheidsverschil beïnvloedt de stroming echter niet in ongunstige zin). Van extra brakwatervorming kan dus nauwelijks sprake zijn.

5 STROMINGEN

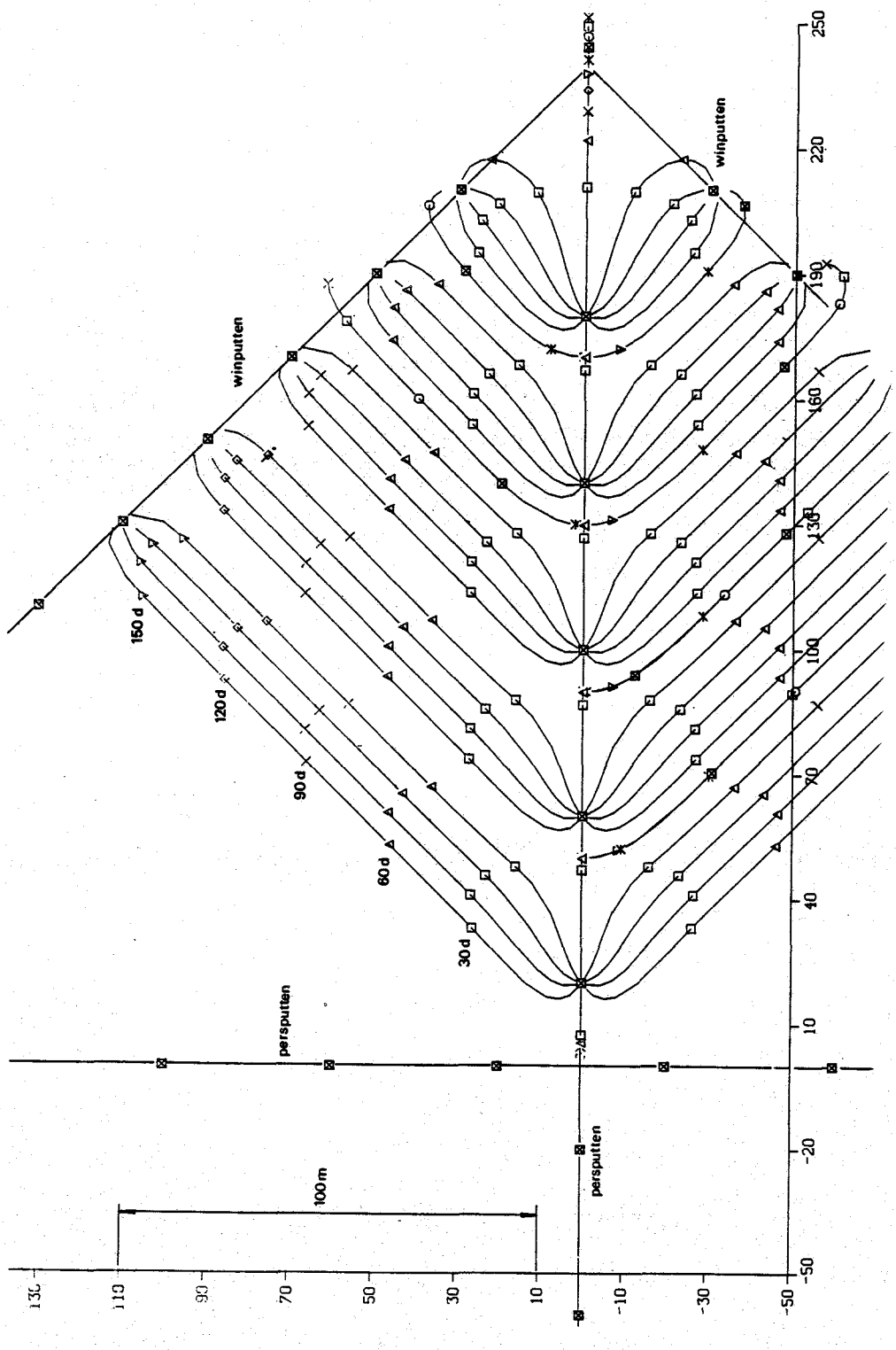
In isotrope pakketten -waarin dus de doorlatendheid in alle (horizontale) richtingen gelijk is- stroomt het water in de richting van de grootste stijghoogtegradiënt, de grootste helling van het 'tentdak' uit figuur 3 en 4. Uit de stijghoogten h(x,y) die bepaald zijn in de hoekpunten van het regelmatige netwerk, kan de verdeling van de stroomsnelheid (v_x, v_y) worden berekend, zie figuur 7.



$h(x,y) = ax + by + cxy + d$
$v_x(x,y) = g \cdot (a + cy)$
$v_y(x,y) = g \cdot (b + cx)$
$g = -k/n$

Figuur 7 - Stroming berekend uit het stijghoogte-beeld

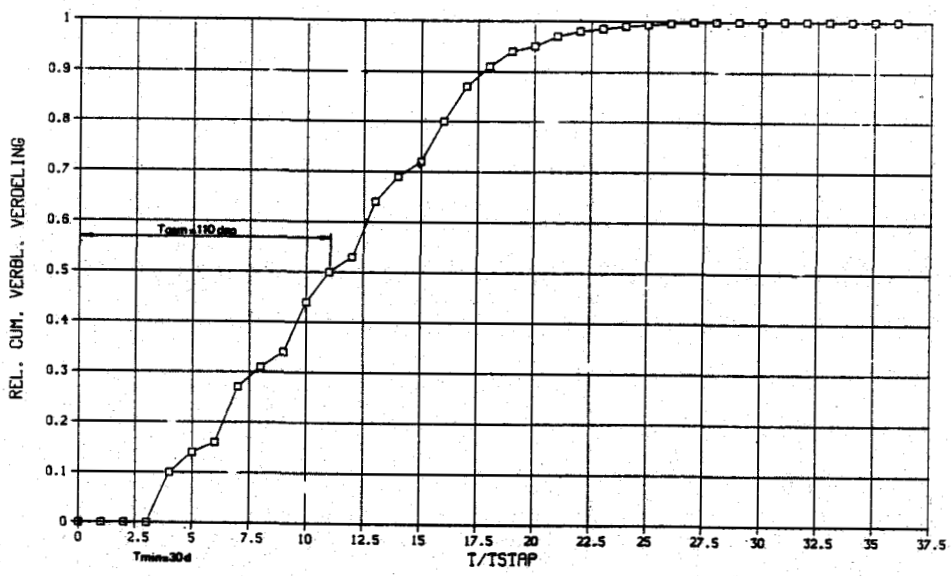
Stroombanen kunnen echter ook direct berekend worden met het programma FLOP dat door Van den Akker is ontwikkeld (6). Ten behoeve van berekeningen van stroombanen in een 'twee-lagen-systeem' is dit programma uitgebreid (7). Een handleiding voor gebruik van dit programma is beschikbaar (8). Het programma is gebruikt bij de berekening van de stroming van pers- naar winputten voor een groot aantal voorbeelden (9). De resultaten van een berekening voor het beschouwde persputsysteem is weergegeven in figuur 8.



Figuur 8 - Stroombanen in het eerste pakket (over-infiltratie 4%, verblijftijden 30, 60, 90, 120, 150, 180, 210, 240, 270 en 300 dagen)

6 VERBLIJFTIJDEN

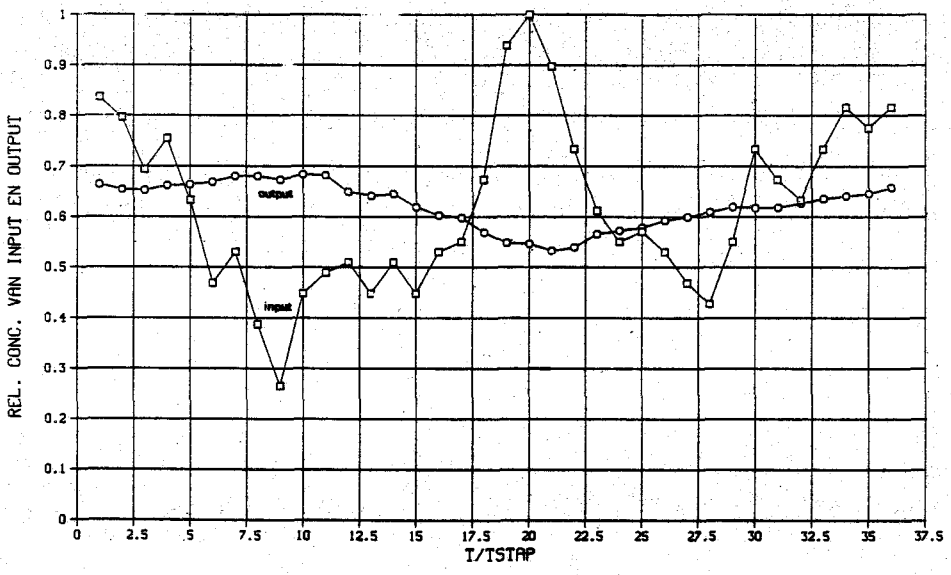
Verblijftijden zijn van belang in verband met hygiënische betrouwbaarheid en voor de mate van kwaliteitsafvlakking. Uit figuur 8 kunnen de verblijftijden van de verschillende fracties van de totale volumestroom worden afgeleid. In figuur 9 is de (relatieve cumulatieve) verblijftijdsverdeling weergegeven. Op de verticale as staat de fractie die bij de winmiddelen is gearriveerd binnen de verblijftijd die is weergegeven op de horizontale as. De verdeling benadert vrij nauwkeurig een lineaire verdeling met een spreiding van 5.5 maand. De minimum verblijftijd is 34 dagen, afgerond tot 30 dagen.



Figuur 9 - De relatieve cumulatieve verblijftijdsverdeling behorend bij het stroombanenpatroon als weergegeven in figuur 8 (TSTAP = 10 dagen, T_{gem} = 110 dagen, T_{min} = 30 dagen)

Beschikbaar is onder andere het programma DEMKWA waarmee het concentratieverloop in het opgepompte

water kan worden berekend als zowel verblijftijdsverdeling als concentratieverloop in het infiltratiewater (input) bekend zijn (10). Dit programma is gebruikt om de reactie (output) van het beschouwde persputsysteem op een fictieve input te bepalen. Input en output van een conservatieve stof zoals bijvoorbeeld het chloridegehalte zijn weergegeven in figuur 10. Hierbij is verondersteld dat zowel input als output een periodiek verloop kennen. Het jaar is hierbij opgedeeld in 36 tijdstappen van 10 dagen.



Figuur 10 - Input en output van bijvoorbeeld het chloridegehalte bij een verblijftijdsverdeling als in figuur 9 (TSTAP = 10 dagen)

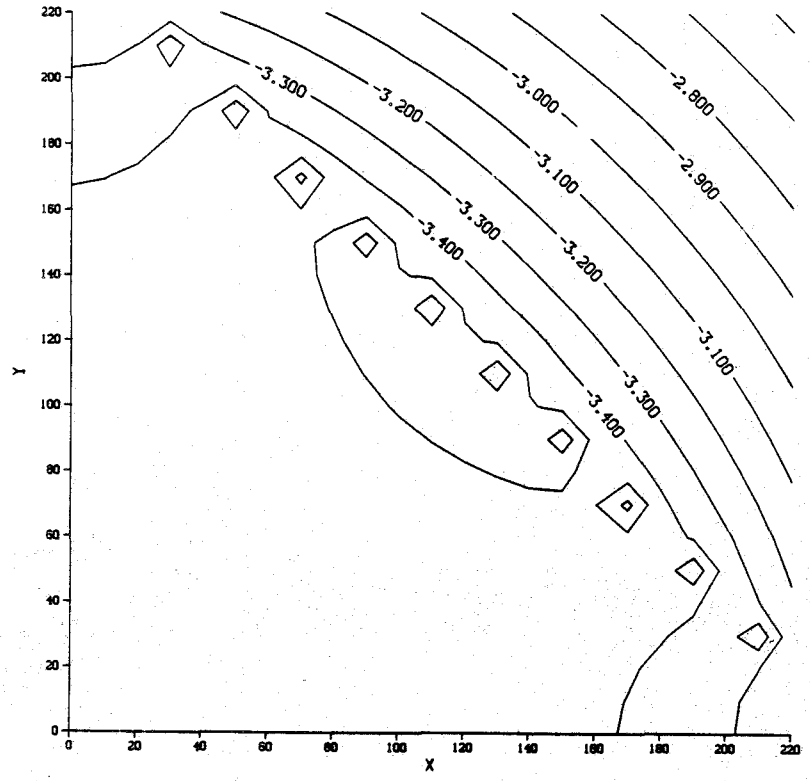
Het blijkt dat de maximale concentratiewisseling door de verblijftijdsspreiding met 79% afneemt. De maximale concentratie neemt met 32% af. Het kan eenvoudig worden aangetoond dat de demping van temperatuurfluctuaties nog groter en zo goed als volledig zal zijn.

7 VOORRAAD

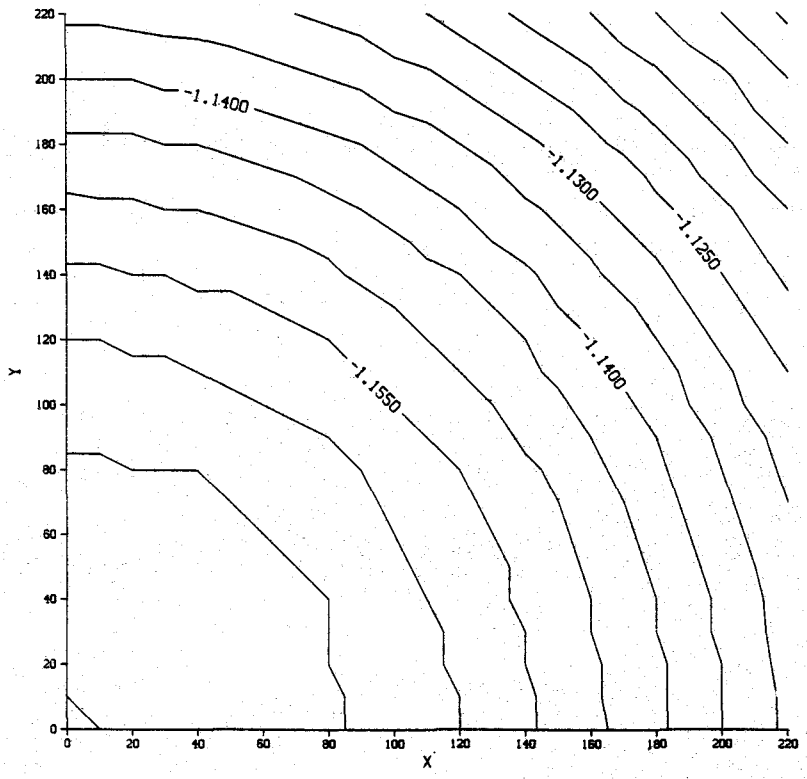
De voorraad kan worden gedefinieerd als de hoe-

veelheid water die kan worden onttrokken terwijl de infiltratie is gestopt door wat voor oorzaak dan ook (leidingbreuk, onderhoud persputten, innamestop). Deze voorraad kan beperkt zijn door grondwaterstandsfluctuaties, het aantrekken van natuurlijk grondwater of verzilting van de winputten.

Reeds geconstateerd is dat de overdruk in het eerste pakket zorgt voor een zeer gelijkmatige verdringing van het natuurlijke grondwater in het diepe pakket en in het eerste pakket buiten de winmiddelen. Bij onderbroken infiltratie en gecontinueerde onttrekking zal in het eerste pakket een verlaging optreden die instroming uit het freatische en diepe pakket zal veroorzaken. De verlagingen hebben binnen enkele dagen voor meer dan 90 % de eindwaarde bereikt. De stationaire eindverlagingen s_1 en s_2 voor het eerste en tweede pakket zijn weergegeven in de figuren 11 en 12. Ook zijn modellen beschikbaar waarmee gebruik makend van de "Well-function" het nog niet stationair zijnde stijghoogtepatroon kan worden berekend.



Figuur 11 - Eindverandering van de stijghoogte in het eerste pakket bij onderbroken infiltratie (maten in meters)



Figuur 12 - Eindverandering van de stijghoogte in het tweede pakket bij onderbroken infiltratie (maten in meters)

Voor de maximale inzijging q_1 uit het freatische pakket geldt

$$q_1 = \frac{s_1}{c_1} = 1.75 * 10^{-3} \text{ m/dag}$$

Als bij een dalende grondwaterstand de bergingscoëfficiënt 15% is, kan de grondwaterstand in bijvoorbeeld 30 dagen niet meer dan 35 cm dalen. (Dit is een fluctuatie die voor wat betreft grootte meestal door natuurlijke, seizoensfluctuaties wordt overtroffen). In werkelijkheid zal de grondwaterstandsdaling kleiner zijn omdat de eindverlaging niet instantaan optreedt en omdat deze verlaging zich met een vertraging door de bovenste weerstandbiedende laag voortplant. Ook moet worden opgemerkt dat bij een slechts tijdelijk verlaagde grondwaterstand er in het dalingstraject een vrij grote hoeveelheid water tussen de korrels achterblijft (meer dan de helft) die niet voor de plantengroei verloren is en dat de kans op, of frequentie van, in de toekomst optredende onderbroken infiltratie moeilijk is in te schatten. In de laatste decennia is in Nederland slechts enkele malen sprake geweest van een periode van onderbroken infiltratie (meestal ten gevolge van een stop van de inname uit oppervlaktewater). Deze perioden waren echter allemaal van korte duur.

Bij de onderbroken infiltratie is er binnen het beschouwde systeem een stroming q_2 uit het tweede naar het eerste pakket van maximaal

$$q_2 = \frac{s_1 - s_2}{c_2} = 4.6 * 10^{-3} \text{ m/dag}$$

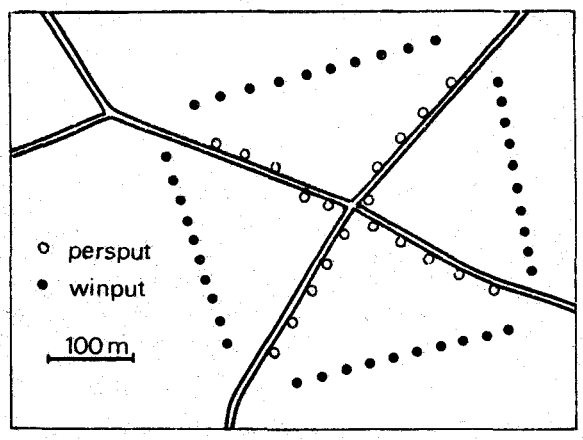
Bij een effectieve porositeit van 0,35 is de werkelijke verticale intrusiesnelheid maximaal 13 mm/dag. Als de infiltratie 30 dagen onderbroken is, kan een brakwaterfront in het diepe pakket niet meer dan 40 cm zijn gestegen. Achtereenvol-

gens zal bij herstart van de infiltratie verdringing weer verder gaan.

8 SAMENVATTING EN CONCLUSIES

In deze bijdrage worden globaal de meest essentiele hydrologische aspecten beschouwd die van belang zijn in een vooronderzoek naar de geschiktheid voor persputinfiltratie. Hierbij is gebruik gemaakt van analytische modellen. Bij een uiteindelijk ontwerp zal ook gebruik gemaakt kunnen worden van numerieke computermodellen zodat verschillen in bodemopbouw -als die bekend zijn- kunnen worden verdisconteerd.
Het blijkt dat het goed mogelijk is een systeem te ontwerpen waarbij bijvoorbeeld de invloed van het systeem op de omgeving voor wat stromingen en stijghoogten betreft minimaal is. Een kleine verhoging van de grondwaterstand binnen het systeem is te ondervangen met een kleine onttrekking of drainage in het freatische pakket die kan worden gestopt zodra de infiltratie onderbroken wordt. Een andere oplossing is het kiezen van een 'topografisch hoog' als plaats voor het systeem. De natuurlijke grondwaterstanden ten opzichte van maaiveld zullen daar waarschijnlijk 'laag' zijn zodat kleine grondwaterstandsfluctuaties nauwelijks invloed hebben. Lage grondwaterstanden zijn ook gunstig in verband met de toe te laten verhoging van de stijghoogte (bodemstabiliteit).
Bij het uiteindelijk ontwerp zullen tevens tal van andere factoren moeten worden betrokken. Zo kan voor de plaatsing van de putten rekening gehouden worden met landschap, topografie, natuurlijke grondwaterstanden en -stromingen, bestaande tracés van paden, wegen en leidingen etc. Extra vergraving in een bepaald terrein kan zo beperkt blijven tot enkele procenten van de totale oppervlakte. De

persputten -de putten die waarschijnlijk de meeste aandacht blijven vragen- kunnen langs bestaande wegen of paden worden gesitueerd, bijvoorbeeld als weergegeven in figuur 13.



Figuur 13 - Een voorbeeld van plaatsing van pers- en winputten

Geconcludeerd kan worden dat voor een bepaalde toepassing van persputten in wezen nu reeds voldoende hydrologische kennis aanwezig is. Echter de winning van tijdelijk met behulp van persputten in zoute of sterk brakke pakketten geborgen hoeveelheden zoet water is minder goed mogelijk. Dit wordt veroorzaakt door de convectieve stromingen ten gevolge van de dichtheidsverschillen en de daarbij optredende brakwatervorming (11). Als echter doorlatendheden en/of dichtheidsverschillen klein zijn, kunnen deze stromingen beperkt blijven. Ook is het wellicht belangrijk de infiltratie dan op grotere diepte (dan de winning) te laten plaatsvinden.
Meer rapportage over het onderzoek naar de stromingen van zoet en zout grondwater die veroorzaakt worden door infiltraties en onttrekkingen is in voorbereiding. Ook kan verwezen worden naar (12) en (13).

Nieuwegein, maart 1984.

9 LITERATUUR

1 Peters, J.H., Enkele mogelijkheden van persputten bij de watervoorziening, H_2O (15), nr. 15, pag. 389-395, 1982.

2 Roebert, A.J., Werkgroep Hydrologie van Persputsystemen geïnstalleerd, H_2O (12), nr. 15, pag. 341-343, 1979.

3 Peters, J.H., W. van Dalfsen en J.J. Steinmetz. Temperatuurmetingen bruikbaar bij onderzoek naar verbreiding van infiltratiewater uit persputten, H_2O (17) nummer 4, pag. 68-72, 1984.

4 Vermeer, P.A., De situering van infiltratie- en onttrekkingsmiddelen bij kunstmatige infiltratie, H_2O (6), nr. 3, pag. 58-65, 1973.

5 Huisman, L. en Kemperman, J., Bemaling van spanningsgrondwater, De Ingenieur (62), nr. 13, pag. 29-35, 1951.

6 Akker, C. van den, Numerical analysis of the streamfunction in plane groundwater flow, Ph.D. Thesis Delft. pag. 130, 1982.

7 Akker, C. van den and Peters, J.H., Streamlines and traveltimes of groundwater in a two-layered aquifer system. Studies in Environmental Science, Vol 17, pag. 843-848, 1981.

8 Akker, C. van den, Gan, J.B.S. en Peters, J.H., Handleiding bij het computerprogramma FLOP, KIWA-rapport SWE-330, pp 81, 1981.

9 Peters, J.H., Akker, C. van den en Gan, J.B.S., Afvlakking van waterkwaliteit bij persputinfiltratie, KIWA-rapport SWE-83.017, pp 102, 1983.

10 Peters, J.H., Afvlakking van kwaliteitsfluctuaties door spreiding van verblijftijden bij kunstmatige infiltratie, KIWA-rapport SWE-403, pp 53, 1982.

11 Peters, J.H., The movement of fresh water injected in salaquifers, KIWA-report SWE-83.007, pp. 20, 1983.

12 Peters, J.H., De stroming van zoet en zout grondwater in een "confined aquifer" berekend met vortexbeleggingen, KIWA-rapport SWE-83.002, pag. 42, 1983.

13 Verruijt, A. en J.B.S. Gan, Niet-stationaire stroming van zoet en zout grondwater met de elementenmethode, H_2O (16), nummer 24, pag 542-547, 1983.

KWALITEITSVERANDERINGEN VAN WATER BIJ DIEPE INFILTRATIE MET PUTTEN

J. van Puffelen
Duinwaterleiding van 's-Gravenhage

1 INLEIDING

De infiltratie van voorgezuiverd rivierwater in de duinen vindt al tientallen jaren plaats in het bovengelegen eerste watervoerende pakket (WVP).
Dit geschiedt in relatief grote infiltratiepannen, geulen en kanalen met relatief geringe infiltratiesnelheden, namelijk in de orde van grootte van centimeters per uur. Kwaliteitsveranderingen van het water hierbij zijn redelijk bekend en gerapporteerd, onder andere door Lips et al (1969), Van Puffelen (1979) en Stuyfzand (1985). Van aanvang af was er echter grote behoefte om ook de veel dikkere, diepere zandlagen te benutten voor infiltratie. Deze zogenaamde diepe infiltratie kon echter niet worden gerealiseerd, omdat de techniek ontbrak om dit uit te voeren en met name om putverstopping te voorkomen.
Een andere, belangrijke vraag, die van aanvang af is gesteld, is welke kwaliteitsverandering van water mag worden verwacht bij "diepe" infiltratie in vergelijking met die bij de gebruikelijke "open" infiltratie. Er is hiervoor onderzoek uitgevoerd bij de proefputten, die in de rapportage van Olsthoorn (1982) worden vermeld.
Dat onderzoek is echter tekort of vanwege de optredende verstoppingsproblemen onvolledig en niet systematisch uitgevoerd, zodat niet mag worden verwacht, dat op dit moment een afdoend antwoord op de vraag betreffende de kwaliteitsverandering kan worden gegeven. Wel is het mogelijk een aantal indica-

ties te geven over de te verwachten effecten. In de volgende paragrafen zal dit voor respectievelijk geïnfiltreerd drinkwater en voorgezuiverd rivierwater worden gedaan. Afgezien wordt van een literatuurbeschouwing van dit onderwerp, onder andere omdat dit deels door anderen reeds is gedaan (Bulten et al, 1974) en omdat de zegkracht van ervaring elders op dit punt niet erg groot is voor het Nederlandse kustduingebied.

2 DIEPE INFILTRATIE VAN DRINKWATER

2.1 Algemeen

Vanwege ernstige verstoppingsproblemen bij de eerste proefput in 1969 bij Hoogovens, waarmee voorgezuiverd Lekwater werd geïnfiltreerd, is vanaf 1973 onderzocht of "diepe" infiltratie met putten eigenlijk wel mogelijk is. Daartoe is bij drie waterleidingbedrijven niet rivierwater, maar drinkwater in proefputten geïnfiltreerd.
De gedachte hierachter is, dat drinkwater de beste kwaliteit water is, die beschikbaar is voor putinfiltratie, wat betreft de verstoppende eigenschappen uitgedrukt in MFI-waarden (Membraan Filtratie Index volgens een gestandaardiseerde KIWA-test; Schippers en Verdouw, 1980). Hoewel kwaliteitsveranderingen van drinkwater bij bodempassage en met name een kwaliteitsverbetering niet van groot belang zijn, is toch bij drie proefputten onderzoek hiernaar verricht. Het doel hiervan was vooral inzicht te verkrijgen in de geochemische en hydrochemische processen, die plaatsvinden bij doorstroming met aeroob, ver gezuiverd water van anaerobe grond met een samenstelling, die niet in evenwicht is met dat water.

2.2 Haags drinkwater

De eerste put betrof die van de Duinwaterleiding te 's-Gravenhage (de DIP), die van maart 1973 tot maart 1980 zonder noemenswaardige verstopping in bedrijf is geweest. De resultaten zijn, behalve in het reeds genoemde rapport van Olsthoorn (1982), beschreven in KIWA-mededeling nr. 41 (Olsthoorn et al, 1975).
Hoofdstuk 6 daarin handelt over de veranderingen in chemische samenstelling van het geïnfiltreerde drinkwater. De resultaten na 1975 zijn verwerkt in een rapport van Kooper (1980), terwijl de resultaten van het chemisch onderzoek bij een onttrekkingsproef van november 1976 tot februari 1977 door Van Beek (1980) zijn gerapporteerd.
Het Haagse drinkwater is geïnfiltreerd in een put met een boorgatmiddellijn van 0,45 m en een PVC-putfilterlengte van 19,6 m, reikend van 25 tot 44,6 m -NAP. De kwaliteitsverandering van het drinkwater in de bodem is gevolgd door regelmatige bemonstering van het water uit waarnemingsputten op 6, 15 en 36,5 m afstand van de infiltratieput. Deze bemonstering vond plaats nadat de putinhoud tweemaal was ververst door afpomping. Het zuurstofgehalte is "in situ" gemeten door middel van een in de filterstijgbuis neergelaten zuurstofelektrode. De overige analysen zijn op het laboratorium volgens standaardvoorschriften verricht. Voor verdere details zij verwezen naar de genoemde rapporten. De conclusies, die volgen uit de vergelijking van de kwaliteitsgegevens van de verschillende waarnemingsputten, rekening houdend met de modale reistijd van het water, kunnen als volgt worden samengevat.
Tijdens de bodempassage nemen de gehalten van zuurstof en nitraat in het geïnfiltreerde water sterk

af, terwijl die van sulfaat, calcium en waterstofcarbonaat duidelijk toenemen. Daarnaast is een geringe daling waarneembaar van de gehalten van organische stoffen en een toename van het ijzer- en mangaangehalte op plaatsen waar het zuurstofgehalte nagenoeg nul is geworden. Het drinkwater vóór infiltratie bevat geen noemenswaardige hoeveelheden ijzer, mangaan en ammonium. De waargenomen veranderingen in de chemische samenstelling van het water zijn aannemelijk gemaakt door een oxidatie te veronderstellen van ijzersulfide, een mangaanmineraal en organisch materiaal in de bodem door zuurstof en nitraat uit het water. Het zuurstofverbruik, leidend tot gehalten van nagenoeg nul, wordt vooral door ijzersulfide teweeggebracht volgens de reactie:

$$FeS_2(s) + 3,5\ O_2 + H_2O \rightarrow Fe^{2+} + 2SO_4^{2-} + 2H^+$$

Kwantitatieve berekeningen op grond van het toegenomen sulfaatgehalte ondersteunen deze aanname.
Nitraat kan een verdere oxidatie bewerkstelligen van in volgorde: organische stoffen, ijzer-II en mangaan-II.
De veronderstelde reacties zijn:

$$CH_2O(s) + 0,8\ NO_3^- \rightarrow HCO_3^- + 0,4\ N_2 + 0,4\ H_2O + 0,2\ H^+$$

$$Fe^{2+} + 0,2\ NO_3^- + 2,4\ H_2O \rightarrow Fe(OH)_3\ (s) + 0,1\ N_2 + 1,8\ H^+$$

$$Mn^{2+} + 0,4\ NO_3^- + 0,8\ H_2O \rightarrow MnO_2\ (s) + 0,2\ N_2 + 1,6\ H^+$$

Het gevormde zuur lost kalk uit de bodem op volgens de reactie:

$$CaCO_3\ (s) + H^+ \rightarrow Ca^{2+} + HCO_3^-$$

Van Beek (in Olsthoorn et al, 1975; 1980) en Kooper (1980) hebben pogingen gedaan om met behulp van vorenstaande 5 reacties de veranderingen in de chemische samenstelling van het water tijdens bodempassage kwantitatief te verklaren. Dit is hen redelijk goed gelukt, waarmee het bewijs van de juistheid nog niet is geleverd, maar wel sterke aanwijzingen ervoor zijn aangevoerd. Overigens betekenen deze reacties tussen water en bodem, dat het drinkwater nogal verslechtert in kwaliteit met uitzondering van een geringe verlaging van het organische stofgehalte en een meer of minder grote reductie van het nitraatgehalte. Bij terugwinning, hetgeen uiteraard de bedoeling is, zou een nazuivering nodig zijn om het zuurstofgehalte weer op peil te brengen en ijzer, mangaan en ammonium te verwijderen.
Tevens zijn het sulfaatgehalte (SO_4^{2-}) en de hardheid (Ca^{2+} en HCO_3^-) toegenomen. Wel is het zo, dat de reacties in de bodem een aflopend karakter hebben, omdat enkele bodembestanddelen en met name de ijzersulfiden uitgeput raken. Dit effect is in de zeven jaren van de proef duidelijk geconstateerd aan de hand van een in de tijd oplopend nitraat- en zuurstofgehalte, in die volgorde, in de waarnemingsputten beginnend bij die met de kortste reistijd. Een uitputting zal afhankelijk van de originele bodemsamenstelling jaren vergen. Wil men het teruggewonnen water niet nazuiveren dan moet de terugwinning zo worden ingericht, dat alleen dat water wordt onttrokken uit het gedeelte van de bodem, dat in evenwicht is met het geïnfiltreerde water, dus na uitputting van reactieve bestanddelen in de grond bijvoorbeeld via de infiltratieput zelf ("dual purpose putten").

2.3 Drinkwater van het pompstation Andijk

De tweede put, waarin vanaf september 1975 drinkwater is geïnfiltreerd, betrof de AIP te Castricum van het Provinciaal Waterleidingbedrijf van Noord-Holland. Het drinkwater werd verkregen via een transportleiding uit Andijk. De situatie te Castricum leek op het eerste gezicht niet zo verschillend van die te 's-Gravenhage, maar al snel bleek, dat er zich te Castricum wèl ernstige verstoppingsproblemen voordeden. Hierdoor is de infiltratie veel onregelmatiger verlopen dan te 's-Gravenhage, terwijl er bovendien niet uitsluitend drinkwater afkomstig uit Andijk geïnfiltreerd is, maar ook, gedeeltelijk, drinkwater afkomstig van andere pompstations. Het interpreteren van de gegevens is daarom extra gecompliceerd. Alleen gegevens van de waarnemingsput op 8 m van de infiltratieput (reistijd 3 dagen) geven duidelijke informatie (Kooper, 1980). In grote lijnen mag worden gesteld, dat de waarnemingen van de kwaliteitsveranderingen van het Noord-Hollands drinkwater in de bodem overeenstemmen met de Haagse waarnemingen. Ook te Castricum is er sprake van een duidelijke toename van de gehalten van sulfaat, calcium, waterstofcarbonaat, ijzer en mangaan, gekoppeld aan dalende concentraties van zuurstof en nitraat. Vooral de zuurstof- en nitraatgehalten variëren zeer sterk en maken een kwantitatieve interpretatie onmogelijk.

2.4 Drinkwater van het pompstation Leiduin

De derde put voor infiltratie van drinkwater betrof die te Leiduin van Gemeentewaterleidingen Amsterdam. De technische aspecten van deze put zijn

beschreven door Steinmetz (1977). Deze put is eigenlijk aangelegd voor onderzoek met voorgezuiverd rivierwater van de WRK (zie hoofdstuk 4), maar daaraan voorafgaande is er gedurende 42 dagen, namelijk van 8 november tot 20 december 1976, drinkwater afkomstig van het pompstation 2 te Leiduin geïnfiltreerd.
Tijdens deze, overigens korte, periode is de kwaliteitsverandering van het drinkwater in de bodem gevolgd door een intensieve bemonstering van waarnemingsputten op 5, 10 en 20 m afstand op 3 verschillende diepten en analyse van het water. De resultaten zijn uitvoerig beschouwd in een rapport van Stuyfzand (1977). De situatie op het pompstation te Leiduin komt vrij goed overeen met die te 's-Gravenhage ook wat betreft de kwaliteit van het drinkwater in 1976. Van bodemmonsters, die bij de boring van de put zijn genomen, is getracht de aanwezigheid van sulfide aan te tonen, hetgeen niet is gelukt mogelijk als gevolg van fouten bij de bemonstering. Wel is er onder andere veel kalk en weinig organisch materiaal in de bodemmonsters aangetroffen.
De kwaliteitsverandering van het drinkwater na putinfiltratie te Leiduin wijkt op een aantal punten af van die te 's-Gravenhage en te Castricum. In het begin van de infiltratieperiode was er eveneens sprake van een sterke daling van het zuurstofgehalte en een toename van het sulfaatgehalte, maar tegen het eind van de periode van 42 dagen is op 5 m afstand van de infiltratieput de kwaliteitsverandering al vrijwel nihil geworden. Op 10 m en 20 m nemen de veranderingen met de tijd ook duidelijk af. Sterk afwijkend te Leiduin is de daar waargenomen daling van het calcium- en waterstofcarbonaatgehalte.

Stuyfzand (1977) constateert verder een daling van het gehalte van fluoride en een met de tijd verminderende stijging van ijzer, mangaan, ammonium, organische stof (TOC), magnesium, kalium en fosfaat. Behalve de door Van Beek (in Olsthoorn et al, 1975) reeds geïntroduceerde redoxreacties met zuurstof en nitraat worden als belangrijk de volgende processen aangemerkt: (1) een adsorptie van Ca en Na onder desorptie van Mg, NH_4, K en mogelijk Fe en Mn en (2) de oxydatie van Fe en Mn in het oorspronkelijke adsorptiecomplex. Op deze processen wordt in een latere publikatie (Appelo et al, 1979) nader ingegaan. De gesignaleerde kwaliteitsveranderingen kunnen als kenmerkend worden beschouwd voor een met de afstand tot de infiltratieput langer durende periode, volgend op de doorbraak van voor de formatie vreemd infiltratiewater.

2.5 Conclusies

Samenvattend kan worden gesteld, dat de kwaliteitsverandering van drinkwater bij "diepe" infiltratie met proefputten voornamelijk wordt veroorzaakt door redoxreacties tussen zuurstof en nitraat als oxidatoren in het water en sulfide, organische stof en tweewaardig ijzer en mangaan als reductoren in de grond. Het daarbij geproduceerde zuur kan kalk uit de grond in oplossing doen gaan. Behalve een als gunstig te beoordelen verlaging van het nitraatgehalte moeten de verhogingen van de ijzer-, mangaan-, ammonium- en sulfaatgehalten en de hardheid als kwaliteitsverslechteringen worden aangeduid. Door uitputting van enkele bodembestanddelen (met name sulfiden) lijkt de kwaliteitsverandering van drinkwater in de tijd een deels aflopend karakter te hebben. Hoe snel deze afloop geschiedt hangt

sterk af van de oorspronkelijke samenstelling van het bodemmmateriaal in chemisch opzicht.

3 DIEPE INFILTRATIE VAN VOORGEZUIVERD RIVIERWATER IN DE HAAGSE DUINEN

3.1 Algemeen

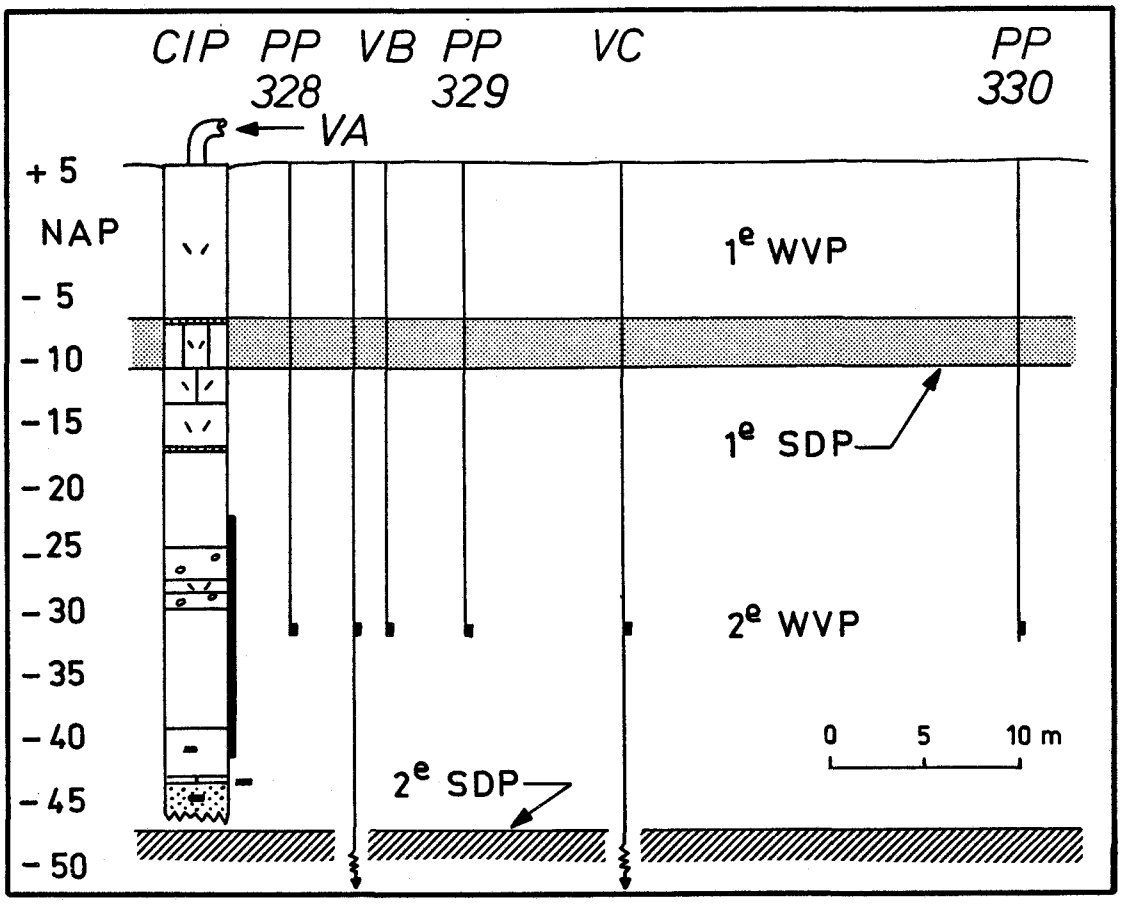
De infiltratie van drinkwater in putten had tot doel de verstoppingsproblematiek in de vingers te krijgen. Het is bij de drinkwatervoorziening in het algemeen de bedoeling voorgezuiverd rivierwater te infiltreren en geen drinkwater. Dit om diverse redenen, vooral echter voorraadvorming, kwaliteitsafvlakking, kwaliteitsverbetering en grondwateraanvulling.
Daarom is in 1974 bij de Duinwaterleiding te 's-Gravenhage een nieuwe put aangelegd (de CIP) om daarin gecoaguleerd en gefiltreerd Lekwater en later Maaswater te infiltreren. Bij deze tweede Haagse put zou ook de kwaliteitsverandering van het voorgezuiverde rivierwater, gezien de algemene doelstelling van de infiltratie, veel aandacht gaan krijgen.
De eerste, nogal negatieve resultaten betreffende de verstopping, die door Olsthoorn (1977 en 1982) zijn beschreven, gooiden echter roet in het eten.
Van juli 1974 tot en met november 1976 zijn 7 infiltratieruns uitgevoerd, waarbij steeds een sterke weerstandstoename in de put optrad, waardoor de duur van de runs beperkt bleef tot 1 à 2 maanden. Tussentijdse regeneraties werden uitgevoerd door onder andere sectiegewijs terugpompen en door behandeling met chloor en zoutzuur van de put. Daarnaast is (tussen de infiltratieruns door) voortdurend het coagulatieproces in het vlokkendekenappa-

raat van het fabrikaat Dorr-Oliver verbeterd onder andere door de snelfiltratie dubbel uit te voeren. Dit leidde tot zodanige verbeteringen, dat infiltratierun nr. 8 van 6 december 1976 tot 22 september 1977 duurde, dat wil zeggen ruim 9 maanden. Dit was mede te danken aan de dosering van 5 mg/l chloor. De laatste infiltratierun startte op 10 mei 1978 en is beëindigd op 27 november 1980. Alle infiltratieruns zijn voortdurend onderbroken uitgevoerd vanwege vele technische storingen in het vlokkendekenapparaat. Dit alles maakt, dat de infiltratie van voorgezuiverd rivierwater erg onregelmatig is verlopen. De langst aaneengesloten infiltratietijd is niet meer dan 2,5 maand geweest. Het is echter uiteindelijk wel gelukt de verstopping te voorkomen, waarbij gebleken is, dat de grootte van de ijzerzoutdosering hiervoor in grote mate bepalend is. Deze dosering is sinds augustus 1978 op 15-25 mg/l ijzer-III gehouden.
Het gegeven van een in de tijd zeer onregelmatige infiltratie, de voortdurende aanwezigheid van chloor in het te infiltreren water, de regeneraties met chemicaliën en de overgang van Lek- naar Maaswater maken, dat een bestudering van de kwaliteitsverandering in de grond niet meer dan een indicatie kan geven.
De kwaliteit van het voorgezuiverde rivierwater is gevolgd door bemonstering en analyse van het water uit waarnemingsputten op 4, 8, 15, 25 en 50 m afstand van de infiltratieput (CIP). In figuur 1 is de situatie met de aanduiding van de waarnemingsputten weergegeven.
De reistijden van het water zijn op grond van berekeningen gesteld op een halve dag tot put 328 op 4 m afstand en verder respectievelijk 2,5; 8,5; 24 en 95 dagen. Op grond van de doorbraak van "chloride-

fronten" kon de berekende 8,5 dag op 7-9 dag worden gesteld en de berekende 24 dag op 19-23 dag. De reistijd van het water naar de verstgelegen put 330 (op 50 m afstand) kon niet worden bepaald, aangezien de perioden van aaneengesloten infiltreren te kort daarvoor waren. De kwaliteitsverandering van het water uit deze verstgelegen put is daarom evenmin eenduidig en zal in de beschouwing niet of nauwelijks worden betrokken. De constructie van de infiltratieput voor het voorgezuiverde rivierwater is identiek aan die van de infiltratieput voor Haags drinkwater. Het PVC-putfilter heeft een lengte van 19 m reikend van 22,6 tot 41,6 m -NAP in een matig grof zandpakket. De 5 waarnemingsputten zijn eveneens van PVC gemaakt en bezitten een filterlengte van slechts 0,5 m op 31,8 m -NAP. De putten VA en VC op 8 en 25 m afstand hebben extra waarnemingsfilters op 53,4 en 75,0 m -NAP, eveneens van een halve meter lengte.

3.2 De kwaliteit van het grondwater vóór infiltratie

Voordat met infiltratie is begonnen, zijn de 5 waarnemingsfilters bemonsterd. In totaal zijn er 13 waarnemingen van de oorspronkelijke grondwaterkwaliteit verricht.
Opvallend was, dat deze kwaliteit van plaats tot plaats en in tijd verre van constant was. Het chloridegehalte lag tussen 130 en 230 mg/l. Het water was anaeroob en bevatte slechts sporen nitraat (tot 1 mg/l). De calcium- en waterstofcarbonaatgehalten waren relatief hoog, namelijk respectievelijk 100-120 mg/l en 190-265 mg/l. De organische stofgehalten waren variërend, hetgeen vooral bij het kleur-



Figuur 1 - Dwarsdoorsnede met de situatie van de DWL-persput CIP en bijbehorende waarnemingsfilters.

getal sterk tot uiting kwam. Van 2 van de 5 waarnemingsfilters zijn in het bemonsterde water tevens de gehalten van een aantal zware metalen bepaald. Koper, lood, chroom, cadmium en kwik kwamen niet of nauwelijks in aantoonbare hoeveelheden in het water voor. Het zinkgehalte lag tussen 17 en 88 µg/l, hetgeen ook relatief laag is.
Het heeft er alle schijn van, dat vooral gezien het chloridegehalte, het grondwater in de buurt van de infiltratieput geïnfiltreerd Lekwater is. Deze diepe infiltratie heeft vrijwel zeker plaatsgevonden in de vlakbij gelegen infiltratiepan en is mogelijk dankzij het ontbreken van een echte afsluitende kleilaag ter plaatse. Bij het boren zijn er namelijk slechts twee 5-10 cm dikke kleilaagjes aangetroffen op 7 en 17 m beneden NAP.
Enkele bij de boring verkregen grondmonsters zijn chemisch onderzocht op sulfiden, organische stof, stikstof- en fosforverbindingen. De resultaten zijn weergegeven in tabel 1.
Van sulfiden konden slechts sporen kwalitatief worden aangetoond. De grondmonsters bevatten wel duidelijk organische stoffen volgens de $KMnO_4$- en COD-bepaling (0,5 tot 6 promille als COD), stikstof volgens Kjeldahl en fosfaten.
De waarnemingsput VA op 75 m -NAP ligt in brak water met een chloridegehalte van 5000-6000 mg/l.

nr.	boordiepte m +NAP	beschrijving	$KMnO_4$-verbruik mg/g	COD mg/g	Kjeldahl N mg/g	totaal PO_4 mg/g
A	0,1 m - mv	referentie zand, "schoon"	21	2,0	1,4	0,8
B	0,8 m - mv	referentie zand, "schoon"	5	0,4	1,1	0,4
1	+ 5,2/- 1,9	matig fijn zand + schelpgruis	8	0,8	0,3	0,8
3	- 4,0/- 5,6	matig fijn zand + schelpgruis	11	0,9	0,3	1,1
6	- 7,0/-10,8	matig fijn zand, sterk slibhoudend	182	6	3,7	1,3
10	-17,2/-22,9	matig fijn zand	4	1,4	0,5	2,1
13	-26,3/-27,4	matig fijn tot matig grof zand	5	3,1	0,8	2,7
16	-29,7/-32,0	matig grof zand	18	0,9	0,3	1,1
19	-39,3/-42,3	matig fijn tot matig grof zand met verkoolde stukjes hout	21	3,5	0,8	1,1

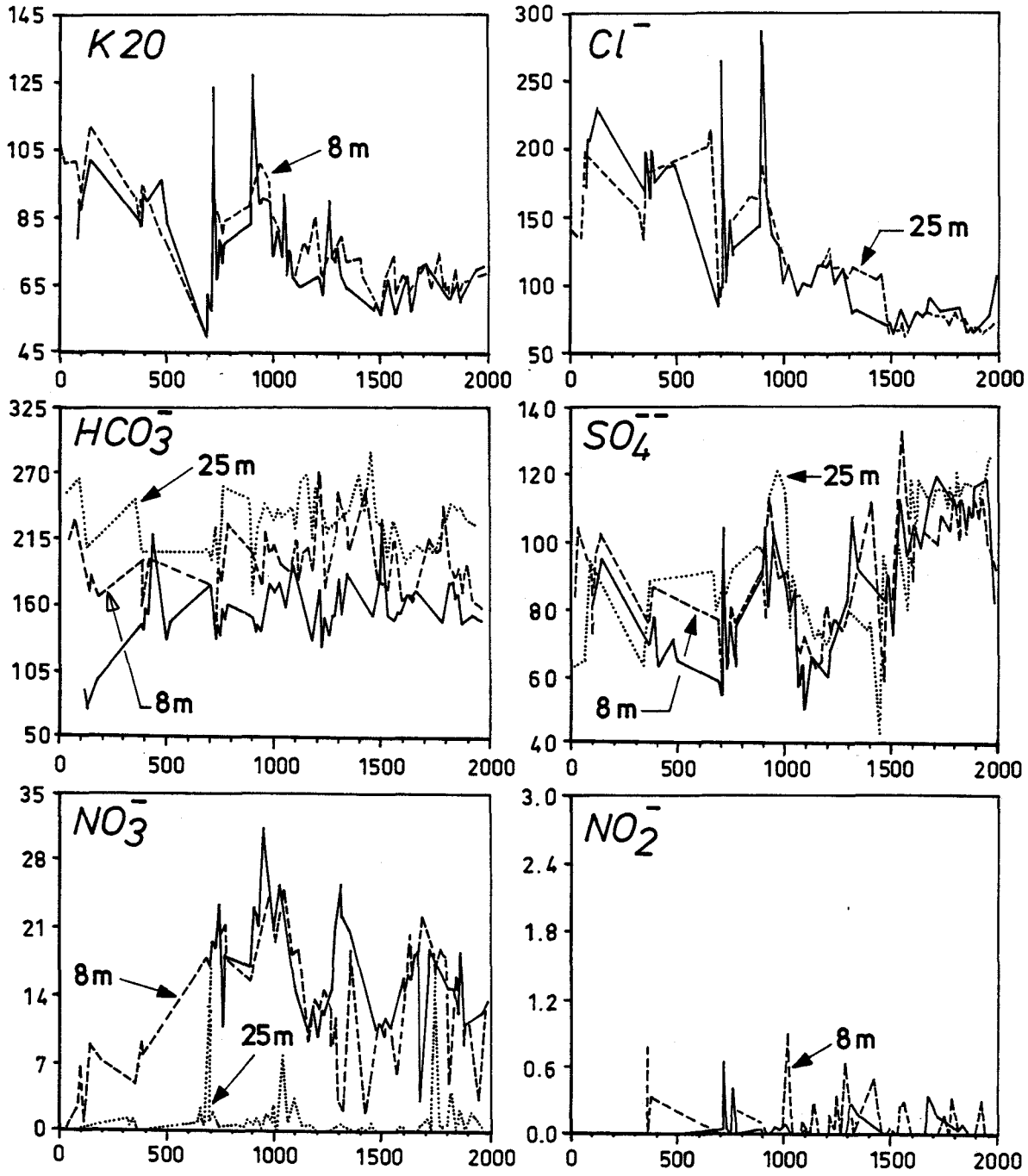
Tabel 1 - Onderzoek van enkele zandmonsters van de CIP-boring in vergelijking met twee referentiezandmonsters van respectievelijk 0,1 en 0,8 m - mv (in mg per gram zand) volgens standaard destructie- en analysemethodieken (februari 1974).

3.3 Kwaliteit van het geïnfiltreerde water

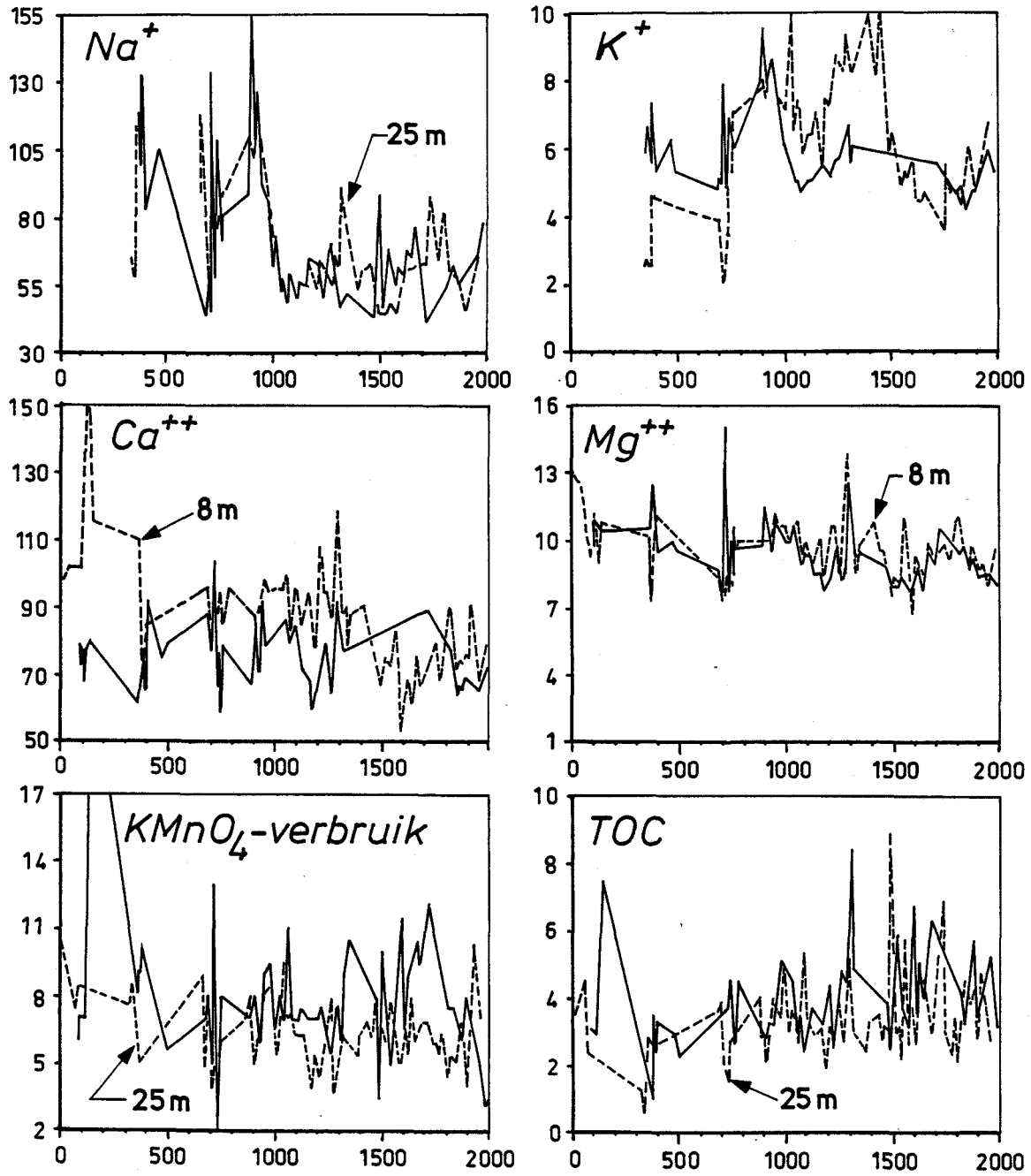
Het in de put geïnfiltreerde water was sinds 1976 het ter plekke gecoaguleerde, dubbelgefiltreerde en gechloorde Maaswater, afkomstig (via de transport-

leiding) van het pompstation te Bergambacht. Dit water en ook dat van de waarnemingsputten zijn na 1976 ongeveer eens per twee weken bemonsterd en geanalyseerd op ongeveer 40 verschillende kwaliteitsparameters. Daarvóór waren de bemonstering en analyse niet regelmatig.
De parameters betreffen die voor de belangrijkste zoutionen (de som als K_2O, chloride, sulfaat, waterstofcarbonaat, natrium, kalium, calcium, magnesium), voor organische stoffen (kleur, $KMnO_4$-verbruik, TOC, UV-extinctie, smaak), voor andere stoffen uit de bodem (ijzer, mangaan, silicaat, fosfaten, ammonium), voor stoffen samenhangend met redoxreacties (zuurstof, nitraat, nitriet), voor de genoemde zware metalen aangevuld met incidentele metingen van nikkel, cobalt, vanadium, arseen en seleen en voor enkele algemene eigenschappen (temperatuur, pH, troebelheid).
Alle verzamelde analyseresultaten tot en met 1979 zijn door het KIWA weergegeven in de vorm van tijdgrafieken. De x-as geeft hierbij het aantal dagen weer vanaf 8 mei 1974. In figuren 2 en 4 zijn de grafieken van 18 van de 25 belangrijkste parameters voor het geïnfiltreerde water en voor het water van 1 of 2 van de vijf waarnemingsfilters bijeengebracht.
Aan de hand van deze grafieken kunnen de volgende uitspraken worden gedaan voor de kwaliteit van het geïnfiltreerde water en in de volgende paragraaf voor de kwaliteitsverandering tijdens bodempassage. Vooral de periode na de 800ste dag (augustus 1976) is daarbij van betekenis.
Het zoutgehalte van het voorgezuiverde Maaswater is lager dan dat van het originele grondwater. Het chloride-, waterstofcarbonaat- en calciumgehalte zijn relatief laag namelijk respectievelijk onge-

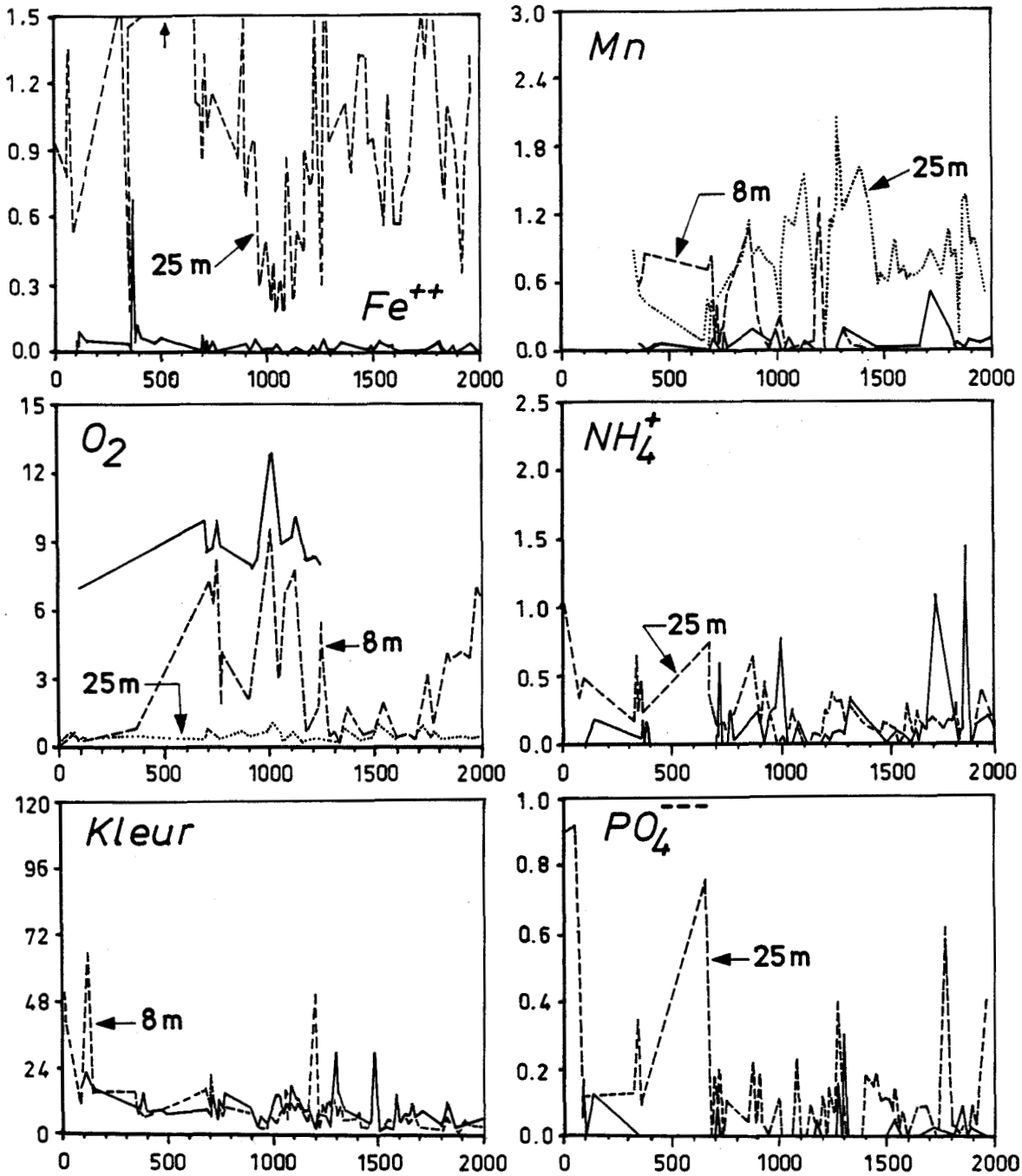
veer 80, 160 en 75 mg/l.
Het sulfaatgehalte varieert nogal sterk en lijkt oplopend te zijn in de betrokken tijdsperiode. Ook de gehalten aan organische stoffen zijn niet bijzonder hoog. Het kleurgetal van ongeveer 10 is veel lager dan dat van het originele grondwater, dat in waarde varieerde van 18 tot 58 mg/l platina standaard. Het TOC-gehalte is gemiddeld ongeveer 4 mg/l en het $KMnO_4$-verbruik ongeveer 9 mg/l. Het smaakgetal bedroeg ongeveer 3,5. Het geïnfiltreerde water bevatte een groot deel van de tijd slechts zeer geringe hoeveelheden ijzer, mangaan, ammonium en fosfaten. Door onvolkomenheden in de zuivering traden echter van tijd tot tijd belangrijk hogere gehalten voor met name mangaan en ammonium op. Het gehalte van silicaat was sterk seizoensafhankelijk, dat wil zeggen in voorjaar en zomer vanwege diatomeeëngroei zeer lage gehalten en in de winter gehalten tot 10 mg/l. Het water was normaliter vrijwel verzadigd met zuurstof (ongeveer 9 mg/l) en bevatte ongeveer 14 mg/l nitraat. De gehalten aan zware metalen lagen meestal slechts weinig boven de onderste analysegrens. Het zinkgehalte was ongeveer 25 µg/l. De troebelheid was kleiner dan 0,3 ppm SiO_2 (was stuurparameter voor wel of niet infiltreren), de pH lag tussen 7,0 en 8,0 en de temperatuur volgde uiteraard de normale seizoenschommeling.
Bacteriologisch onderzoek is niet verricht. Eind 1979 en in 1980 is 10 keer het trihalomethanengehalte gemeten. In de winter bedroeg dit 1-6 µg/l en in de zomer 10-30 µg/l vóór infiltratie.



Figuur 2 - Verandering in K_{20}, Cl^-, HCO_3^-, SO_4^-, NO_3- en NO_2-gehalte van voorgezuiverd, via de CIP-persput van de DWL geïnfiltreerd rivierwater bij bodempassage



Figuur 3 - Verandering in Na-, K-, Ca- en Mg-gehalte, $KMnO_4$-verbruik en TOC-gehalte van voorgezuiverd, via de CIP-persput van de DWL geïnfiltreerd rivierwater bij bodempassage



Figuur 4 - Verandering in Fe-, Mn-, O_2-, NH_4- en PO_4-gehalte en de kleur van voorgezuiverd, via de CIP-persput van de DWL geïnfiltreerd rivierwater bij bodempassage

3.4 Kwaliteitsveranderingen tijdens bodempassage

Ook bij het voorgezuiverde Maaswater treden de grootste veranderingen in de kwaliteit op, zoals in tabel 2 is te zien, als gevolg van redoxreacties met zuurstof en nitraat. Op 4 m van de infiltratieput was in het begin zuurstof volledig verbruikt, maar eind 1979 was het zuurstoffront hier niet constant, maar onregelmatig doorgebroken dat wil zeggen de gehalten waren soms gelijk aan die van het geïnfiltreerde water. Op 8 m afstand is het zuurstofgehalte gestegen tot 6 mg/l, terwijl op 15 m en verder het zuurstofgehalte steeds nagenoeg nul is gebleven.
Het nitraatgehalte was tot 8 m afstand onveranderd ongeveer 14 mg/l, terwijl op 15 m eerst nitraat volledig werd verbruikt, maar er daarna sprake was van een doorbraak, zij het onregelmatig zoals met zuurstof op 4 m afstand.
Op 25 en 50 m afstand is het nitraatgehalte gedurende de gehele periode nihil gebleven, hoewel enkele uitschieters zijn opgetreden.
Als reducerende stoffen komen sulfiden, organische stoffen, ijzer en mangaan in aanmerking. Bij deze infiltratieput lijken sulfiden een ondergeschikte rol te hebben gespeeld, gezien het feit, dat het sulfaatgehalte van het water tijdens bodempassage nauwelijks toeneemt. Er is wel een duidelijke toename bij alle putten van het calcium- en waterstofcarbonaatgehalte, waarbij het waterstofcarbonaatgehalte naar verhouding sterker toeneemt. Dit wijst op een kooldioxideproduktie als gevolg van de oxidatie van organische stoffen:

$$CH_2O(s) + O_2 \rightarrow CO_2 + H_2O$$

Aangezien het TOC-gehalte van het water nagenoeg onveranderd 4 mg/l blijft, is het mogelijk, dat deze organische stoffen voornamelijk uit de grond afkomstig zijn. De in de tijd variërende zuurstofgehalten van het water uit de putten op 4 en 8 m lopen ongeveer parallel met die van de waterstofcarbonaatgehalten, hetgeen deze aanname, dat organische stoffen als reducerende stoffen fungeren, bevestigt. Lage zuurstofgehalten corresponderen met hoge waterstofcarbonaatgehalten. De metingen van de pH geven hierbij geen nadere bevestiging, waarschijnlijk vanwege de onnauwkeurigheid van deze laboratoriummetingen, die eigenlijk in het veld uitgevoerd hadden moeten worden.
Het water uit de putten op 4 en 8 m afstand bevat geen ijzer en mangaan bij een onveranderd nitraatgehalte. Bij de put op 15 m, waar het water een duidelijk lager nitraatgehalte heeft, stijgen vooral de mangaangehalten. Het nitraatloze water uit de verder afgelegen putten bevat eveneens ijzer en mangaan.
De overige veranderingen in de kwaliteit van het voorgezuiverde Maaswater zijn gering. Het water neemt fosfaat uit de bodem op: het ortho-fosfaatgehalte neemt toe tot ongeveer 0,1 mg/l. Het ammoniumgehalte verandert vrijwel niet.
Wat betreft de organische stoffen is er weinig verandering, soms een toename, soms een afname. De smaak van het water blijft vrijwel onveranderd. Het gehalte aan trihalomethanen neemt niet af. In alle putten, behalve de verstgelegen, worden gehalten tot 60 µg/l aangetroffen. De kleur, UV-extinctie en het $KMnO_4$-verbruik verbeteren lichtjes met uitzondering van een zeer hoge kleur op 25 m afstand. De gehalten aan zware metalen zijn behalve van het geïnfiltreerde water gemeten van het water uit de

afstand tot persput (m)	4	8	15	25	50
parameter / putcode	pp 328	VA	pp 329	VC	pp 330
reistijd (dagen)	0,5	2,5	8,5	24	95
Cl^- (mg/l)	-1	0	4	7	45
O_2 (mg/l)	-5,2	-9,8	-10,0	-10,0	-10,0
pH	-0,09	-0,16	-0,34	-0,36	-0,17
K_{20} (mS/m)	2,8	3,7	7,2	7,4	20,6
HCO_3^- (mg/l)	9	18	52	59	72
SO_4^{--} (mg/l)	4	4	-1	-5	3
Na^+ (mg/l)	-6	-3	-7	-7	14
K^+ (mg/l)	0,1*	0,4*	0,4*	0,0*	-2,0*
Ca^{++} (mg/l)	2	5*	15*	10*	20*
Mg^{++} (mg/l)	0,6	0,4	0,1	-0,6	-1,8
TOC (mg/l)	0,9	0,0	0,7	-0,8	-0,9
$KMnO_4$-verbruik	-0,6	-1,6	-2,1	-2,0	-1,8
UV-extinctie (E/m)	-0,4	-1,0	-1,7	2,7	0,2
Kleur (mg/l)	-2,5	-1,0	-3,9	43	7
Smaakgetal (n)	-0,6	-0,3	-0,6	-0,2	-0,5
NH_4^+ (mg/l)	-0,01	-0,03	0,02	0,06	0,16
NO_2^- (mg/l)	0,12	0,06	0,01	-0,04	-0,04
NO_3^- (mg/l)	1,2	-1,0	-6,7	-13,6	-12,0
PO_4-ortho (mg/l)	0,03	0,03	0,07	0,06	0,10
SiO_2 (mg/l)	0,2	0,1	1,0	4,9	11,9
Fe-totaal (mg/l)	0,01	0,01	0,06	0,84	0,73
Mn (mg/l)	-0,01	-0,01	1,34	0,83	0,48

* = over 1979

Tabel 2 - Kwaliteitsveranderingen van het water op toenemende afstand van de CIP onttrokken uit bemonsteringsputten, ten opzichte van het voorgezuiverde, te infilteren Maaswater. Gemiddelden over 1978 (13-18 waarnemingen)

putten op 15 en 25 m afstand van de infiltratieput. De gehalten, die daarbij zijn vastgesteld, wijken nauwelijks af van die van het geïnfiltreerde water. Alleen de zinkgehalten lagen iets hoger namelijk op een niveau van 30-60 µg/l. Veel veranderingen waren er natuurlijk ook niet te verwachten, gezien de lage waarden voor deze gehalten van het geïnfiltreerde water en van het "oorspronkelijke" grondwater.

3.5 Conclusies

Samenvattend moet worden gesteld, dat de kwaliteitsverandering van voorgezuiverd Maaswater niet veel afwijkt van die van drinkwater. Mogelijke verschillen worden veel meer veroorzaakt door verschillen in grondsamenstelling wat betreft de aanwezigheid van sulfiden, organische stoffen en dergelijke, dan door verschillen in kwaliteit van het geïnfiltreerde water zelf. Met name ook ten aanzien van organische stoffen, zoals bijvoorbeeld smaakstoffen en trihalomethanen, die in het voorgezuiverde Maaswater in hogere concentraties voorkomen dan in drinkwater, is er niet of nauwelijks sprake van een kwaliteitsverbetering.
Gezien echter de vele beperkingen waarmee deze infiltratieproef gepaard is gegaan, mogen deze conclusies zeker niet als algemeen geldend worden gezien. Zij zijn zoals vermeld niet meer dan indicatief.

4 DIEPE INFILTRATIE VAN VOORGEZUIVERD LEKWATER IN DE AMSTERDAMSE DUINEN

In de in par. 2.4 genoemde infiltratieput van Gemeentewaterleidingen op het pompstation te Leiduin is na het drinkwater voorgezuiverd Lekwater ge-

bracht. Van de periode van februari tot en met juli 1977 zijn gegevens beschikbaar van deze infiltratie en de daarbij optredende kwaliteitsveranderingen van het water tijdens bodempassage (februari tot en met april, Jonker, 1977; mei tot en met juli, Van der Plas, 1977). De opstelling van de putten en uitvoering van de proef is in detail beschreven door Steinmetz (1977) en Jonker (1977). Op 1 februari 1977 is begonnen met de infiltratie van voorgezuiverd Lekwater (WRK-water) met een volumestroom van 30 m^3/h. De infiltratie is dagelijks gedurende 12 minuten onderbroken voor een terugpomping met een viermaal hogere snelheid. Het voornaamste doel van deze proef was te onderzoeken of de verstopping van de put kon worden beheerst met een regelmatige terugpomping.
Kwaliteitsveranderingen van het geïnfiltreerde water zijn gevolgd door bemonstering en onderzoek van het water van waarnemingsputten op 5,10, 16, 20 en 40 m afstand van de infiltratieput op circa 33 m-NAP (behalve die op 16 m afstand: 17 m-NAP). Het waarnemingsfilter op 33 m-NAP onderschept een relatief snelle stroomdraad.
De waargenomen kwaliteitsveranderingen dragen duidelijk het stempel van de voorafgaande drinkwaterinfiltratie (zie par. 2.4), namelijk een reeds vergevorderde uitspoeling van het infiltratiepakket aan Fe, Mn, PO_4, Mg, NH_4, K en SiO_2 tot en met de waarnemingsput op 20 m afstand (reistijd = 14 dagen) i.t.t. de put op 40 m afstand (reistijd = 63 dagen), waar het gedurende 42 dagen geïnfiltreerde drinkwater nèt niet aankwam. Het veel geringer aantal malen doorspoeling van het pakket tussen persput en waarnemingsput op 40 m ten opzichte van de andere bestudeerde waarnemingsputten manifesteert zich daarnaast in het volgende:

(1) op 40 m afstand is de nitraatreductie 100 %. Op 5 m is echter het zuurstoffront al vrijwel volledig doorgebroken na ongeveer een maand en op 10 m het nitraatfront na ongeveer 2,5 maand. Op 20 m is de nitraatreductie circa 85 %;
(2) op 20 m afstand treedt nog een duidelijke toename van het sulfaatgehalte op, terwijl op 5 en 10 m afstand sulfaat onveranderd blijft. Op 40 m afstand is deze toename het hoogst, namelijk 10-15 mg/l, hetgeen duidelijk hoger is dan bij de Haagse CIP-proef;
(3) het Ca-gehalte op 40 m daalt ten opzichte van de invoer ten gevolge van het overheersende effect van adsorptie (vooral onder desorptie van Mg, NH_4 en K), terwijl het Ca-gehalte op 5, 10 en 20 m stijgt door oplossing van kalk.
De overeenkomst tussen de kwaliteitsveranderingen van voorgezuiverd rivierwater te Den Haag (zie par. 3) en voorgezuiverd Lekwater te Leiduin is in principe groot. Verschillen zijn er ten aanzien van de aard en omvang van kationenuitwisseling, de mate van aanwezigheid van pyriet en de snelheid, waarmee de redoxreacties aflopend zijn.

5 VOORTZETTING VAN HET ONDERZOEK

Zoals in de inleiding van dit hoofdstuk is gezegd, is het van belang te weten in hoeverre de kwaliteitsverandering van voorgezuiverd rivierwater bij "open, ondiepe" infiltratie overeenkomt met die bij "diepe" infiltratie met putten. Bij "open" infiltratie gaat het om de volgende aspecten.

a. Kwaliteitsafvlakking door spreiding in reistijden van het water. Op dit aspect wordt niet nader ingegaan, omdat door een juiste ligging ten

opzichte van elkaar van infiltratie- en winningsputten een minstens even goede kwaliteitsafvlakking is te realiseren. Dit is vooral een hydrologisch probleem.

b. De verandering van bacteriologisch (hygiënisch) onbetrouwbaar oppervlaktewater in water, dat na bodempassage de bacteriologische betrouwbaarheid van grondwater benadert. Gezien de tijdens de laatste jaren sterker geworden toxicologische bezwaren tegen chloor, is dit aspect langzamerhand één der belangrijkste pluspunten van infiltratie geworden.
Het kon echter bij de "diepe" infiltratie nog niet worden onderzocht om de reeds genoemde redenen, namelijk dat drinkwater bacteriologisch reeds in orde is en dat het voorgezuiverde Maas- en Lekwater steeds sterk gechloord was om verstopping te vermijden.
Bij een voortzetting van het onderzoek met andere putten is het waarschijnlijk mogelijk om deze chloring achterwege te laten, zodat aan dit bacteriologische en ook virologische aspect de vereiste aandacht geschonken kan worden.

c. De verlaging van het totaal aan organische stoffen. Door de verdergaande voorzuivering is het organische stofgehalte reeds zover verlaagd, dat bij duinpassage slechts een geringe verbetering optreedt. Bij de "open" infiltratie is dit effect ook geconstateerd (Stuyfzand 1985).
Duinpassage levert zowel "diep" als "ondiep" een vergelijkbare, redelijk constante kwaliteit water op, gemeten aan het $KMnO_4$-verbruik, UV-extinctie, TOC-gehalte en het kleurgetal. Opvallend is wel het optreden van pieken in deze ge-

halten. Nader onderzoek hiernaar is gewenst.

d. Ook bij "open" infiltratie treedt op sommige plaatsen, maar niet overal, anaerobie en verwijdering van nitraat op door redoxreacties. Een sulfaattoename in het duininfiltratiesysteem als geheel wordt echter niet (meer) geconstateerd (Stuyfzand, 1985). Als reducerende stoffen fungeren vooral organische stoffen, die aanwezig zijn in na 25 jaar infiltratie nog steeds humusrijke gedeelten in de bodem of die in het water aanwezig zijn bijvoorbeeld tijdens en na sterke algengroei in de infiltratiemiddelen.
Wat betreft de redox- en oplosreacties is er in principe dus geen verschil tussen "diepe" en "ondiepe" infiltratie. Wel is er verschil in de mate waarin de reacties verlopen, maar dit kan als begineffect worden gezien. Een betere kwantificering van dit in de tijd verlopende effect is gewenst om de snelheid van de zuurstof- en nitraatdoorslagfronten te kunnen voorspellen en de situering van winningsputten daarmee eventueel te kunnen bepalen.

e. Bij "open" infiltratie kunnen zware metalen worden verwijderd. Door de voorzuivering van het Maas- en Lekwater zijn de gehalten aan zware metalen tot een zeer laag niveau teruggebracht.
Over een verwijdering bij "diepe" infiltratie is daarom niets te zeggen. Verder onderzoek hiernaar heeft alleen zin, indien zware metalen in meetbare concentraties in het in nieuwe infiltratieputten te infiltreren water voorkomen.

f. Ook organische microverontreinigingen en smaakstoffen worden in het algemeen geheel of gedeel-

telijk verwijderd en/of omgezet bij "open" infiltratie. Bij "diepe" infiltratie is dit aspect nog onvoldoende onderzocht, vooral ook omdat het voorgezuiverde water weinig organische microverontreinigingen bevatte. Wel is er geconstateerd, dat er geen verwijdering van smaakstoffen en trihalomethanen optreedt. Ook dit aspect dient bij verder onderzoek de aandacht te hebben met name ook wat betreft het gedrag van stoffen, die het AOCl-gehalte bepalen.

g. Er bestaan aanwijzingen, dat bij "open" infiltratie een verbetering in de toxicologische kwaliteit van het water kan optreden. Hoe dit bij "diepe" infiltratie is, vormt eveneens een punt van verder onderzoek.

Het kan worden gesteld, dat de processen, die een rol spelen bij de kwaliteitsverandering van voorgezuiverd rivierwater in de duinen, bij "ondiepe" en "diepe" infiltratie in principe gelijk zijn, maar dat de mate waarin ze verlopen verschillend kan zijn.
Ten aanzien van de optredende redox- en oplosreacties is het voldoende duidelijk wat er gebeurt in de grond, maar ten aanzien van een aantal hygiënische aspecten dient het onderzoek grotendeels nog te beginnen. Doordat alle aandacht op de verstoppingsproblematiek heeft gelegen, met als gevolg onder andere chloren en grote onregelmatigheden, zijn deze aspecten nog onderbelicht. Verder onderzoek dient te worden gericht op de bacteriologische, virologische en toxicologische eigenschappen van het water en op de verwijdering van organische microverontreinigingen.

6 VERANTWOORDING

Dit overzicht is tot stand gekomen in het kader van het project "Hygiënische aspecten bij bodempassage". Voor kritische opmerkingen is de auteur dank verschuldigd aan de leden van de Werkgroep die dit project begeleidt. Speciale dank gaat uit naar drs. P.J. Stuyfzand (KIWA N.V.) voor de redactie van de tekst en het verzorgen van de figuren.

7 LITERATUUR

Appelo, C.A.J., Stuyfzand, P.J. en Engelen, G.B. (1979); "Reacties van Rijnwater in de Veluwe en duinen: een experimentele studie en een infiltratieproef". H_2O 12 (15), p. 328-332 en 343.

Beek, C.G.E.M. van (1980); "Veranderingen in de chemische samenstelling van het water na infiltratie en onttrekking via de DIP". Concept-KIWA-rapport, juni 1980.

Bulten, B., Brandes, C. en Puffelen, J. van (1974); "Verslag van bezoeken aan objecten voor kunstmatige infiltratie van water door middel van putten in de USA".

Jonker, H. (1979); "Hydrochemische aspecten bij de injectie van WRK-water door middel van een persput te Leiduin". Rapport GW Amsterdam.

Kooper, W.F. (1980); "Kwaliteitsverandering van via persputten geïnfiltreerd water". Concept-KIWA-rapport.

Lips, H.J.M., Bulten, B. en Puffelen, J. van (1969); "Kwaliteitsverandering bij infiltratie in de duinen". Rapport Werkgroep Inf. Rivierwater in Duinen, 60 p.

Olsthoorn, T.N. (1977); "Persputten, op zoek naar de juiste middenweg". H_2O (10), nr. 26, pp. 586-589.

Olsthoorn, T.N. (1982); "Verstopping van persputten". KIWA-mededeling 71.

Olsthoorn, T.N., Tuinzaad, H., Beek, C.G.E.M. van en Puffelen, J. van (1975); "Putinfiltratie met drinkwater te 's-Gravenhage". KIWA-mededeling 41.

Plas, D. van der (1977); 6 maanden kwaliteitsveranderingen van geïnjecteerd WRK-water in de persput te Leiduin. Concept GW-rapport. 31 p..

Puffelen, J. van (1979); "Berging van oppervlaktewater in de ondergrond". H_2O (12), p. 541-548.

Schippers, J.C. en Verdouw, J. (1980); The Modified Fouling Index, a Method for determining the fouling characteristics of water. Desalination 32, pp. 137-148.

Steinmetz, J.J. (1977); "Technische aspecten van een infiltratie met behulp van een persput". H_2O (10), p. 590-594.

Stuyfzand, P.J. (1979); "Hydrochemical aspects of drinking water injection by a deep well in a semiconfined aquifer at Leiduin pumpingstation near Zandvoort, North Holland". Rapport GW Amsterdam, 130 p..

Stuyfzand, P.J. (1985); "Kwaliteitsveranderingen van oppervlaktewater bij kunstmatige infiltratie in de Nederlandse kustduinen: macroparameters". KIWA-mededeling in voorbereiding.

VERANDERINGEN IN DE CHEMISCHE SAMENSTELLING VAN DRINKWATER NA PUTINFILTRATIE

C.G.E.M. van Beek, Keuringsinstituut voor Waterleidingartikelen KIWA N.V.
J. van Puffelen, Duinwaterleiding van 's-Gravenhage

1 INLEIDING

In het verleden zijn experimenten met putinfiltratie van drinkwater uitgevoerd door de Duinwaterleiding van 's-Gravenhage met de DIP (= Drinkwater Infiltratie Put), het Provinciaal Waterleidingbedrijf van Noord-Holland met de AIP (= Andijkwater Infiltratie Put) en de Gemeentewaterleidingen van Amsterdam met de WIP (= WRK-water Infiltratie Put). In deze bijdrage zal worden ingegaan op de veranderingen in de chemische samenstelling van drinkwater tijdens de doorstroming van een watervoerend pakket. Alleen het DIP-experiment zal worden behandeld. De resultaten van de beide andere experimenten bevestigen in grote lijnen de conclusies getrokken uit het onderzoek uitgevoerd te 's-Gravenhage (Van Puffelen, dit rapport).
Water dat in de bodem infiltreert zal over het algemeen een samenstelling bezitten die niet in evenwicht verkeert met de bodem ter plaatse. Dit zal met name het geval zijn bij kunstmatige infiltratie. Het systeem bodem-water zal naar een nieuw chemisch evenwicht streven. Er zullen allerlei reacties plaatsvinden die de samenstelling van het water meer of minder veranderen. Voor de opzet van een systeem bestaande uit pers- en winputten en voor de zuivering van het teruggewonnen water, is kennis omtrent de aard, de mate en de tijdsduur van het optreden van deze reacties belangrijk.

2 UITVOERING VAN DE EXPERIMENTEN

2.1 Het drinkwater van de Duinwaterleiding

De putinfiltratie met drinkwater van de Duinwaterleiding is van 1973 tot 1980 met één put uitge-

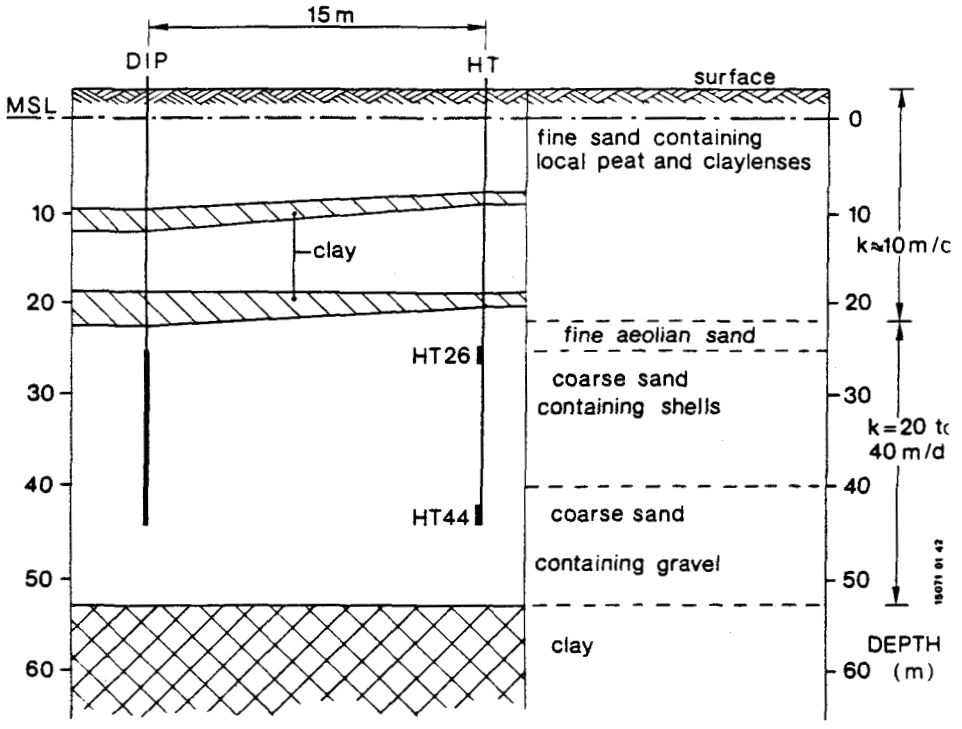
Parameter	drinkwater 1974	drinkwater 1978	lokaal grondwater
Temperatuur, in °C	12,4	11,5	10
Elektrisch geleidingsvermogen bij 20 °C, in mS/m	91	63	70
Waterstofexponent, pH (-)	7,61	7,76	7,35
Chloride (Cl^-)	169	89	87
Nitraat (NO_3^-)	8,5	7,3	0,5
Sulfaat (SO_4^{2-})	82,5	69	52
Waterstofcarbonaat (HCO_3^-)	191	198	300
Vrij kooldioxide (CO_2)(berekend)	10	7	28
Ortho-fosfaat (PO_4^{3-})	0,04	0,05	0,28
Silicaat (SiO_2)	10	10	42
Ammonium (NH_4^+)	0,03	0,04	1,7
IJzer (Fe)	0,03	0,01	3,3
Mangaan (Mn)	0,03	0,005	0,26
Zuurstof (O_2)	8,1	9,4	0,2
Natrium (Na^+)	89	50	51
Totale hardheid, in mmol/l	2,79	2,33	3,00
TOC	2,8	3,6	7,0

Tabel 1 - Jaargemiddelden van de samenstelling (in mg/l, tenzij anders aangegeven) van het drinkwater van de Duinwaterleiding van 's-Gravenhage in een jaar met de Rijn als bron (1974) en één met de Maas als bron (1978). Tevens is de samenstelling van het plaatselijke grondwater voor de aanvang van het experiment aangegeven

voerd. In die periode valt ook een verandering van de herkomst van het drinkwater, namelijk van de Rijn naar de Maas in 1976. Deze overgang had tot gevolg dat de chemische samenstelling van het drinkwater veranderde, voornamelijk een verlaging van de concentratie van natrium en chloride. Om een indruk te geven van de samenstelling zijn in tabel 1 de jaargemiddelden van een aantal parameters van 1974 en van 1978 - dat wil zeggen in de periode met de Rijn en met de Maas als bron - samengevat.

2.2 Geohydrologie en beschrijving van de putten

In figuur 1 is enige informatie ter plaatse van de opstelling samengevat. Het betreffende watervoerende pakket strekt zich uit tussen circa 22 en 52 m-NAP. Tot circa 25 m-NAP bestaat het uit fijnzandige aeolische afzettingen. Tussen circa 25 en 40 m-NAP bevinden zich afwisselend matig fijne tot matig grove kustnabije rivierafzettingen. Deze afzettingen bevatten schelpen. Tot 52 m-NAP bevinden zich afzettingen bestaande uit grof zand en grind afkomstig van verwilderde rivieren. In deze afzettingen zijn slibhoudende lagen tussengeschakeld. Tussen 52 en 63 m zijn fluviatiele klei-afzettingen aanwezig. Deze kleilaag heeft een grote weerstand tegen verticale waterbeweging en vormt de basis van het watervoerend pakket. De kD-waarde van het watervoerend pakket zelf bedraagt circa 1000 m^2/d. Ten behoeve van het experiment zijn in 1972 een infiltratieput (DIP) en een waarnemingsput (HT) op 15 m afstand geplaatst.
Beide putten zijn met de pulsmethode aangelegd. De putfilters bestaan uit PVC met een diameter van respectievelijk 190/200 mm voor de DIP en 45/50 mm voor de HT.



Figuur 1 - Ligging van de injectieput DIP en de waarnemingsputten HT 26 en HT 44. Tevens is een geologisch profiel en enige geologische informatie gegeven

2.3 Geohydrochemie

In tabel 1 is tevens de chemische samenstelling van het oorspronkelijke grondwater ter plaatse van de put aangegeven. Dit water is anaeroob, bevat geen nitraat en heeft een lichte zwavelwaterstofgeur. Kenmerkend zijn verder de relatief hoge concentratie van waterstofcarbonaat en silicaat en de aanwezigheid van ijzer, mangaan en ammonium. De concentratie aan organisch materiaal, gemeten als organisch koolstof (TOC), is eveneens hoog in vergelij-

king met dat van het te infiltreren drinkwater. Vanwege het verschil in chemische samenstelling tussen het oorspronkelijke grondwater en het te infiltreren drinkwater is te verwachten, dat het drinkwater tijdens bodempassage in samenstelling zal veranderen in de richting van de samenstelling van het oorspronkelijke grondwater.

2.4 Programma van infiltratie

De infiltratie in de put is gestart op 29 maart 1973. De volumestroom bedroeg 36,5 m^3/h en is op 24 april 1975 tot 60 m^3/h opgevoerd. De infiltratie is zonder onderbreking tot 22 november 1976 gehandhaafd.
Om te kunnen nagaan of en in hoeverre tijdens de infiltratie een accumulatie van verontreinigingen is opgetreden is van 29 november tot 1 februari 1977 op de infiltratieput een onttrekkingsexperiment uitgevoerd. Er bleken geen verontreinigingen aanwezig te zijn.
Op 14 februari 1977 werd de infiltratie hervat met een volumestroom van 60 m^3/h en met een gelijktijdige terugwinning in een nieuwe onttrekkingsput op 34 m afstand van de infiltratieput. Dit experiment is zonder onderbreking tot maart 1980 voortgezet.
De experimenten zijn gezien de doelstelling zeer succesvol verlopen. In de zeven jaar van nagenoeg niet onderbroken infiltratie is er in en om de infiltratieput geen noemenswaardige toeneming van de weerstand voor infiltratie opgetreden. In totaal is ruim 3.10^6 m^3 water in één put geïnfiltreerd.

2.5 Monsterneming en analyse

De bemonstering van de waarnemingsputten is op

1 november 1973, ofwel 8 maanden na de start van de infiltratie, aangevangen. Het eerste halfjaar werd deze bemonstering wekelijks uitgevoerd en daarna 1 x per 2 weken.
De monsterneming geschiedde nadat eerst met behulp van een membraanpompje tweemaal de inhoud van de betreffende put was onttrokken. De zuurstofconcentratie en de temperatuur werden met behulp van een neergelaten sonde ter plaatse in het filter gemeten. De monsters water werden naar het vlakbij gelegen laboratorium van de Duinwaterleiding getransporteerd, waarna onmiddellijk de pH en de concentratie van waterstofcarbonaat zijn bepaald. Daarna volgden de analyses van de overige parameters, waarbij indien nodig de monsters water in de koelkast zijn bewaard. De analyses zijn zoveel mogelijk uitgevoerd volgens de in Nederland genormaliseerde analysemethoden voor drinkwater. Behalve de reeds genoemde parameters zijn tevens bepaald: het elektrisch geleidingsvermogen en de concentraties van chloride, nitraat, sulfaat, ammonium, fosfaat, calcium, magnesium, TOC en ijzer, het $KMnO_4$-verbruik en het kleur- en smaakgetal.

3 RESULTATEN TIJDENS INJECTIE

3.1 Schatting van de reistijden

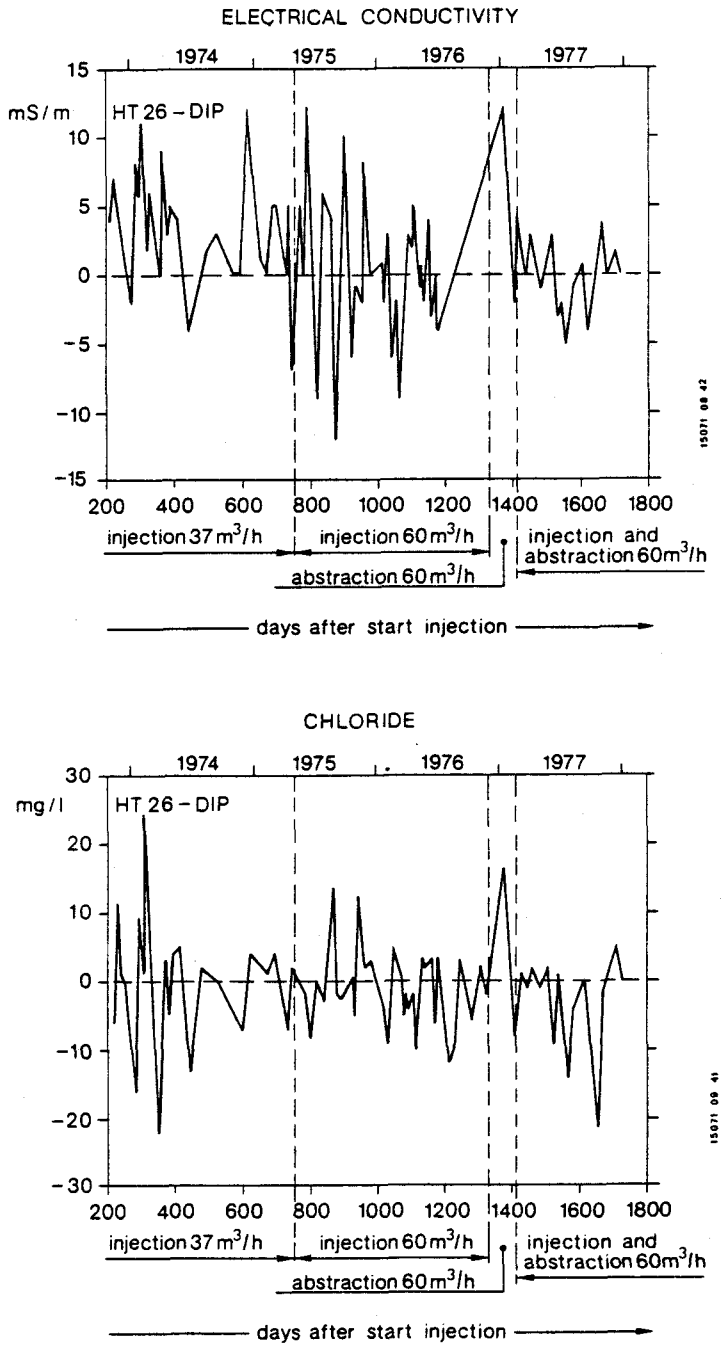
Van de gemiddelde reistijd van de injectieput tot aan de waarnemingsputten is een minimum en een maximum schatting te maken. Indien het geïnjecteerde water zich alleen over de hoogte van het putfilter horizontaal cylindervormig in het watervoerend pakket verbreidt, zal bij een volumestroom van 36,5 m^3/h de gemiddelde reistijd 126 h bedragen. Indien het geïnjecteerde water zich cylindervorming

over de gehele hoogte van het watervoerend pakket van de put af verbreidt zal de gemiddelde reistijd 213 h bedragen. De werkelijke gemiddelde reistijd zal hier tussenin liggen. Bij een volumestroom van injectie van 60 m^3/h zijn deze tijden respectievelijk 78 en 130 h.
De grondwaterstroming ter plaatse van het experiment bevindt zich loodrecht op de puttenrij. Onder de heersende omstandigheden kan de werkelijke watersnelheid ten gevolge van deze stroming op 18 m/jaar worden geschat (Olsthoorn et al, 1975). Dit is verwaarloosbaar ten opzichte van de boven geschatte reistijden.

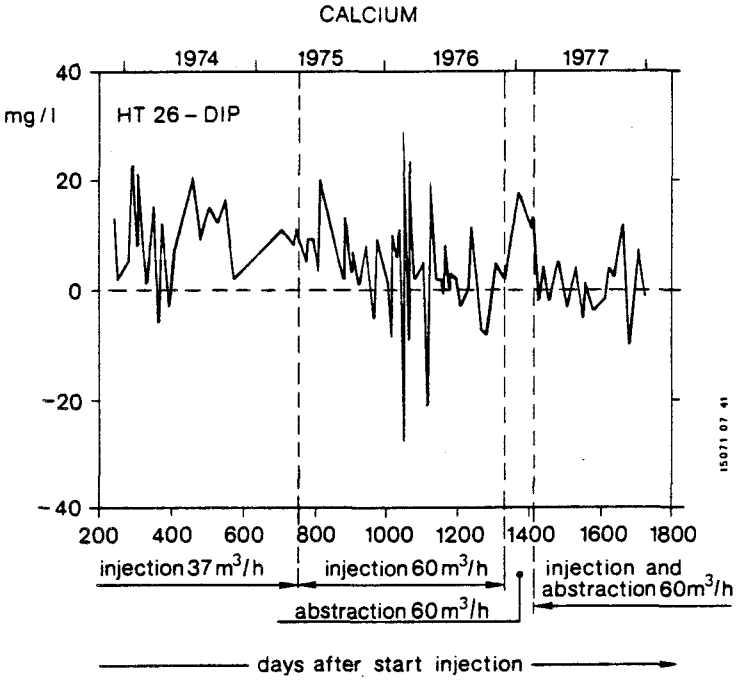
3.2 Bespreking van de resultaten

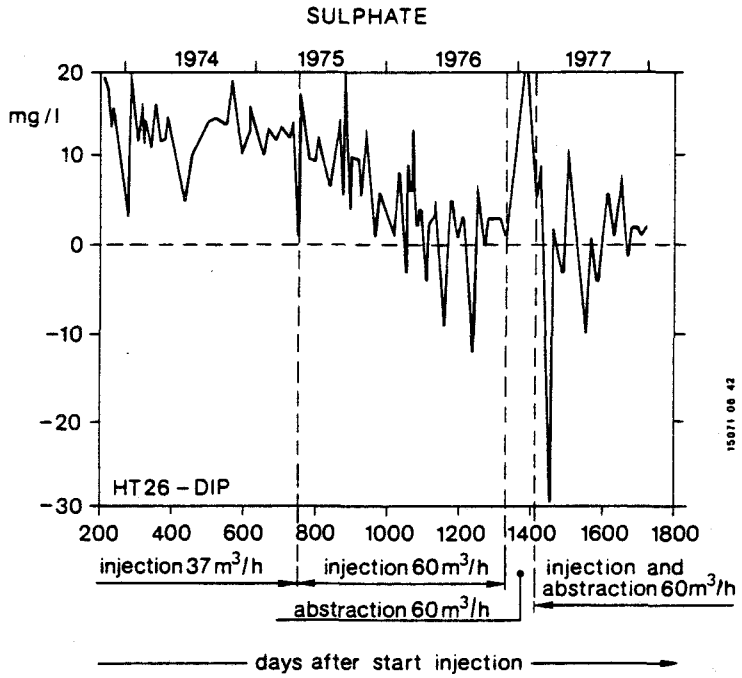
Het geïnjecteerde drinkwater bestaat uit oppervlaktewater dat een kunstmatige infiltratie in het ondiepe pakket in de duinen heeft ondergaan, aangevuld met enig diep grondwater en nuttige neerslag. De variaties in chemische samenstelling die in het oppervlaktewater aanwezig zijn, zijn na de kunstmatige infiltratie duidelijk afgevlakt, maar nog wel aanwezig (Van Puffelen, 1979).
Vanwege deze variaties is niet het verloop van iedere parameter in de tijd afzonderlijk bestudeerd, maar is het verschil in de waarde van iedere parameter tussen de bewuste waarnemingsput en de injectieput berekend en tegen de tijd uitgezet. Hierbij is geen rekening gehouden met de reistijd tussen waarnemings- en injectieput, dat wil zeggen steeds de analyseresultaten van eenzelfde dag zijn vergeleken. Zolang de variaties geleidelijk verlopen, dat wil zeggen dat de verandering in concentratie over het tijdsinterval van monsterneming slechts gering is, hetgeen het geval is, is de gemaakte fout te verwaarlozen.

In figuur 2 is het verschil van de concentraties in HT 26 en DIP (HT26-DIP) tegen de tijd uitgezet. Een stijging in concentratie tijdens de stroming van DIP naar HT 26 resulteert in een positieve, een daling in een negatieve waarde. Uit figuur 2 blijkt dat het verschil in chlorideconcentratie inderdaad nagenoeg gelijk is aan nul. Tevens blijkt uit deze figuur dat het elektrisch geleidingsvermogen tot ongeveer dag 700 van het experiment positief is; dat wil zeggen tussen de injectie- en de waarnemingsput stijgt de som van de concentraties. Dit blijkt inderdaad het geval voor de concentraties van sulfaat, waterstofcarbonaat en calcium. Deze stijging valt samen met een daling in de concentraties van nitraat en zuurstof. Opvallend is dat de veranderingen in concentratie van sulfaat en calcium en van pH en zuurstof langer aanwezig blijven dan de veranderingen in concentratie van nitraat en waterstofcarbonaat. De overige concentratieverschillen zijn niet in figuur 2 weergegeven. De concentratieverschillen van ijzer, kalium, magnesium en natrium blijven over de onderzochte periode constant, kleur, TOC, $KMnO_4$-verbruik en fosfaat dalen, en ammonium en mangaan stijgen een weinig.
Waarnemingsput HT 44 vertoont hetzelfde beeld. Deze kwalitatieve beschrijving laat een aantal belangrijke conclusies toe. De veranderingen in de concentraties van sulfaat, waterstofcarbonaat, nitraat en calcium lopen over de beschouwde periode af. Aangezien de chemische samenstelling van het injectiewater vrijwel constant blijft, blijkt uit dit aflopende karakter, dat het injectiewater reageert met vaste stoffen in het watervoerend pakket en dat deze stoffen daar in principe in beperkte mate aanwezig zijn. Bovendien treden, omdat niet alle con-

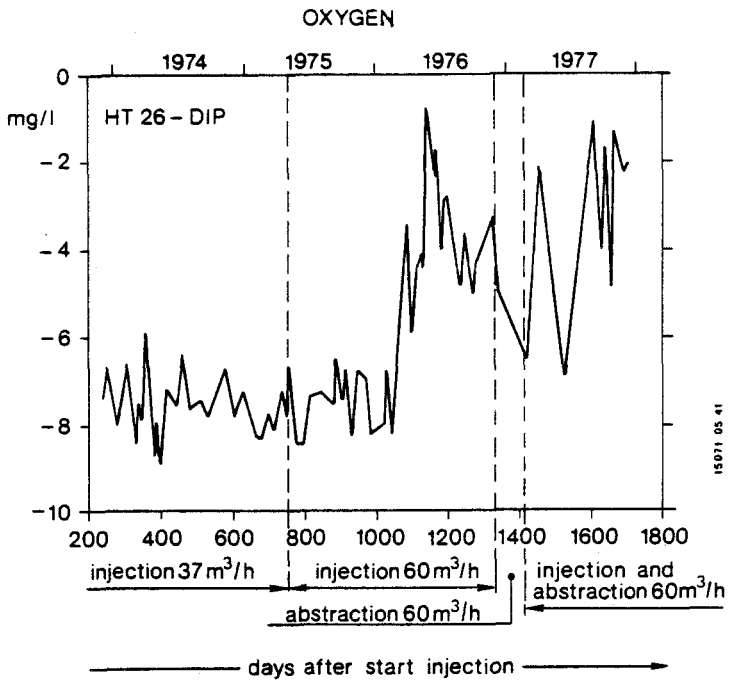


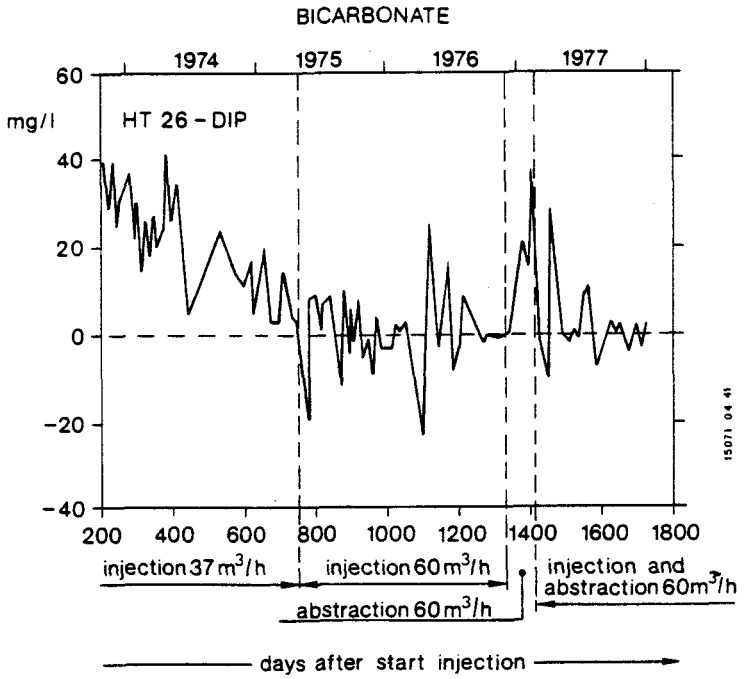
Figuur 2 - Samenvatting van de berekende verschillen in concentratie tussen waarnemingsput HT 26 en injectieput DIP. Verticaal is het verschil voor de aangegeven parameter en horizontaal de tijd uitgezet. Bij de berekening van het verschil is geen rekening gehouden met de gemiddelde verblijftijd van het water in het watervoerende pakket tussen beide putten



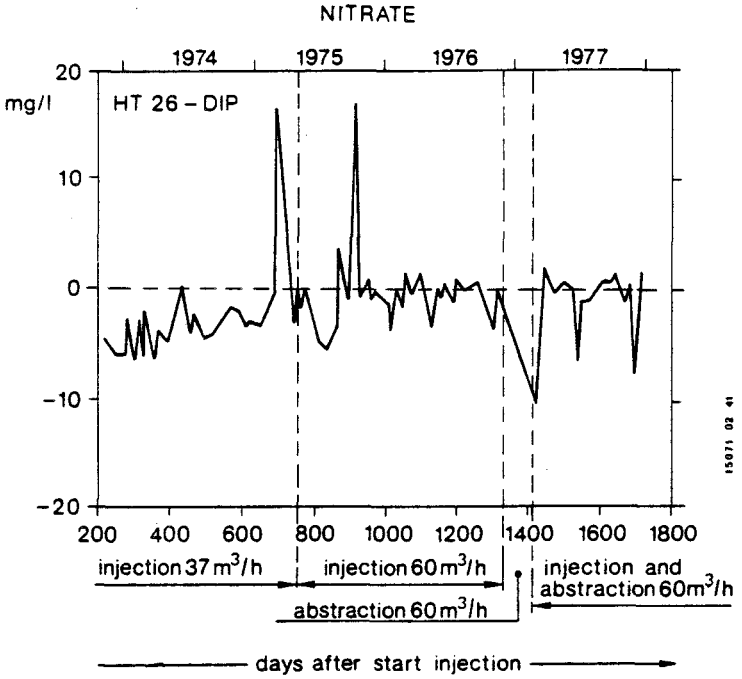


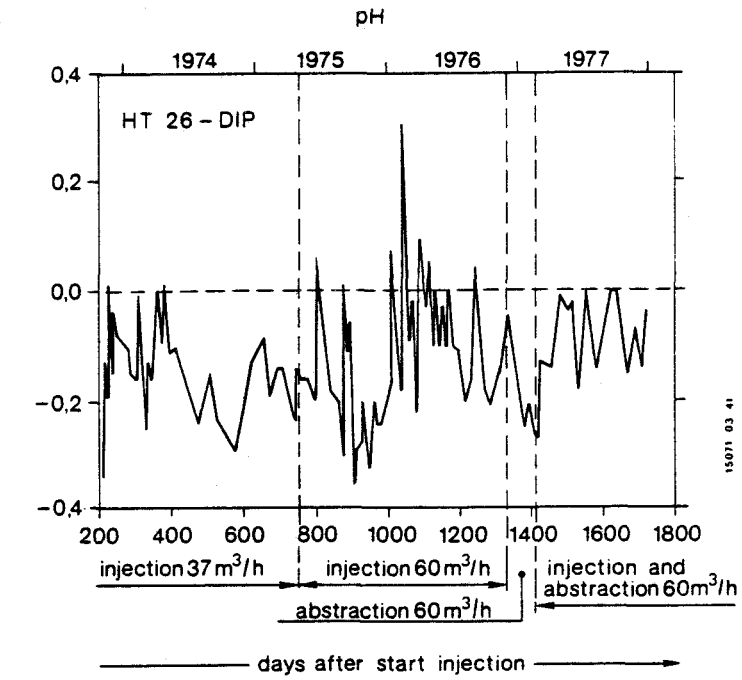
Figuur 2 - Vervolg





Figuur 2 - Vervolg





Figuur 2 - Vervolg

centratieveranderingen op een zelfde moment eindigen, verschillende reacties naast elkaar op.

4 INTERPRETATIE

Voor een kwantitatieve interpretatie van de waargenomen verschillen in chemische samenstelling tussen het injectiewater en het water afkomstig van de waarnemingsputten is het noodzakelijk te corrigeren voor de reistijd van het water van de injectieput tot aan de betreffende waarnemingsput.
Bij een korte reistijd is deze correctie te omzeilen door een periode te zoeken waarin de chemische samenstelling van het injectiewater constant is.
Een dergelijke periode kwam voor tussen 28 februari en 1 mei 1974. Over deze periode zijn 10 waarnemingen beschikbaar. De gemiddelden en de standaarddeviaties van de verschillende stoffen zijn in tabel 2 samengevat. De standaarddeviatie is hier samengesteld uit toevallige fouten tijdens monsterneming en analyse, maar ook uit werkelijk aanwezige variaties in de samenstelling. Uit tabel 2 blijkt dat de som van de anionen en van de kationen op equivalentbasis onderling niet meer dan circa 2,5 % verschillen.

	DIP	HT26	HT44
Elektrisch geleidings-vermogen, in mS/m	85,6 ±1,6	89,5 ±1,8	88,1 ±1,1
pH (-)	7,60±0,06	7,51±0,04	7,40±0,08
$KMnO_4$-verbruik	5,7 ±1,1	4,5 ±1,3	4,1 ±0,6
TOC (C)	3,1 ±0,6	2,3 ±0,8	2,3 ±0,6
Chloride (Cl^-)	151,4 ±7,6	148,2 ±2,3	147,7 ±2,5
Nitraat (NO_3^-)	9,4 ±0,8	4,8 ±1,0	6,0 ±1,2
Sulfaat (SO_4^{2-})	74,3 ±1,2	87,2 ±1,4	84,7 ±1,8
Waterstofcarbo-naat (HCO_3^-)	196,2 ±6,3	221,2 ±3,4	212,0 ±7,8
Vrij koolzuur (CO_2) berekend,	9,3	12,7	15,6
Fosfaat (PO_4)	0,14±0,08	0,05±0,00	0,06±0,02
Ammonium (NH_4^+)	0,03±0,01	0,04±0,02	0,07±0,10
IJzer-totaal (Fe)	0,04±0,04	0,05±0,06	0,07±0,07
Mangaan (Mn)	nb	nb	nb
Zuurstof (O_2)	8,1 ±0,6	0,2	0,2
Calcium (Ca^{2+})	92,8 ±7,5	100,2 ±8,4	98,8 ±6,6
Magnesium (Mg^{2+})	9,7 ±0,4	9,3 ±0,4	9,3 ±0,3
Natrium (Na^+)	77,5 ± 3,3	nb	nb
Kalium (K^+)	5,2 ± 0,1	nb	nb
Som anionen, in meq/l	9,18		
Som kationen, in meq/l	8,96		

Tabel 2 - Gemiddelden en standaarddeviaties van de concentratie (in mg/l tenzij anders aangegeven) van de aangegeven stoffen in het injectiewater en in het water onttrokken aan de aangegeven waarnemingsputten (nb = niet bepaald)

Uit de pH en de concentratie van waterstofcarbonaat is de concentratie van vrij koolzuur berekend vol-

gens:

$$pH = pK' + \log \frac{[HCO_3^-]}{[H_2CO_3]}$$

In deze vergelijking is pK' gelijk aan 6,41; dit wil zeggen na omrekening naar de heersende temperatuur (10 °C) en ionensterkte (I ≈ 0,014 mol/l).

	HT26-DIP	HT44-DIP
TOC (C)	0,07±0,11	0,07±0,09*
nitraat (NO_3^-)	-0,07±0,02**	-0,06±0,02**
sulfaat (SO_4^{2-})	0,14±0,02**	0,11±0,02**
waterstofcarbonaat (HCO_3^-)	0,41±0,11**	0,26±0,15**
calcium (Ca^{2+})	0,19±0,28	0,15±0,25
magnesium (Mg^{2+})	-0,01±0,03	-0,01±0,02
ijzer	0	0
zuurstof (O_2)	-0,25±0,02**	-0,25±0,02**
vrij koolzuur (CO_2)	0,08	0,14
NO_3^- + SO_4^{2-} + HCO_3^-, in meq/l	0,61±0,13	0,43±0,17
Ca^{2+} + Mg^{2+}, in meq/l	0,34±0,57	0,27±0,54
gebruikte concentratie voor calcium	0,31	0,22

Tabel 3 - Gemiddelden en standaard deviaties van de verschillen in concentratie (in mmol/l tenzij anders aangegeven) van de aangegeven parameters tussen injectieput (DIP) en aangegeven waarnemingsput (* verschil in concentratie significant op 5 % niveau; ** verschil in concentratie significant op 0,5 % niveau)

In tabel 3 zijn de veranderingen in chemische samenstelling samengevat. Electroneutraliteit gebiedt dat de som van de concentraties van de anionen en van de kationen op equivalentbasis aan elkaar gelijk zijn. Uit tabel 3 blijkt dit niet het geval te zijn voor de sommen van de veranderingen in concentraties tussen de injectieput en de waarnemingsputten. Aangezien de standaarddeviatie van de veranderingen van de concentratie van calcium (en magnesium) groot is en die van de veranderingen in de concentraties van de anionen klein, wordt aangenomen dat de gevonden verandering in de concentratie van calcium (en magnesium) te laag is. Voor de interpretatie van de gegevens van tabel 3 wordt daarom uitgegaan van de berekende verandering in concentratie van calcium.

Met behulp van massabalansen is het mogelijk na te gaan welke reacties zijn opgetreden. In onderstaande reacties staat voor iedere vergelijking het betrokken traject aangegeven, HT 26 voor het traject HT 26-DIP, en HT 44 voor HT 44-DIP. De onderstreepte concentratieverandering is als maatgevend beschouwd. De maatgevende concentratieveranderingen, in mmol/l, zijn afkomstig uit tabel 3, indien de betrokken stof slechts in één reactie is betrokken, of wordt in de tekst berekend, indien de stof in meerdere reacties is betrokken.

De concentraties van zuurstof en nitraat zijn gedaald. Het oxyderend vermogen, dat met de daling van deze concentraties overeenkomt, kan worden berekend:

	O_2	$+ 4\ H^+$	$+ 4\ e$	$= 2\ H_2O$	(1)
	0,25	1,00	1,00		
	NO_3^-	$+ 6\ H^+$	$+ 5\ e$	$= \frac{1}{2}\ N_2 + 3\ H_2O$	(2)
HT 26	0,07	0,42	0,35		
HT 44	0,06	0,36	0,30		

De stijging in de sulfaatconcentratie geeft aan dat sulfiden zijn geoxydeerd. Vast organisch materiaal bevat niet meer dan maximaal 2 gew. % zwavel. Indien de stijging in sulfaatconcentratie veroorzaakt zou zijn door oxydatie van organisch materiaal zou, in vergelijking met de stijging in de concentratie van sulfaat, de stijging in de som van de concentraties van anorganisch en organisch koolstof veel groter moeten zijn geweest dan nu wordt gevonden. De stijging in de sulfaatconcentratie wordt daarom toegeschreven aan de oxydatie van anorganisch materiaal. De meest waarschijnlijke bron is pyriet (FeS_2).
Aangezien geen stijging in de concentratie van ijzer wordt gevonden, wordt het bij deze oxydatie gevormde ijzer vastgelegd. Uit de aanwezigheid van nitraat in de waarnemingsputten blijkt dat het milieu al minder anaeroob is geworden. De meest waarschijnlijke vorm waarin het vrijgekomen ijzer(II) wordt vastgelegd, is derhalve ijzer(III)hydroxyde.

$$FeS_2(s) + 11\ H_2O = Fe(OH)_3(s) + 2\ SO_4^{2-} + 19\ H^+ + 15\ e \qquad (3)$$

HT 26	0,14	1,33	1,05
HT 44	0,11	1,05	0,83

Uit vergelijking (3) blijkt dat bij deze reactie veel protonen (zuur) vrijkomen. Aangezien de pH niet noemenswaardig veranderd, treedt neutralisatie op. Gezien de aanwezigheid van schelpen in het wa-

tervoerend pakket, zal dit door calciumcarbonaat gebeuren.

$CaCO_3(s)$ +	H^+	= Ca^{2+} +	HCO_3^-	(4)
HT 26	0,31	0,31	0,31	
HT 44	0,22	0,22	0,22	

Vergelijking van de in (3) geproduceerde en in (1) en (2) verbruikte elektronen geeft aan dat nog een oxydatiereactie heeft plaatsgevonden. Bij de heersende pH zal bij het in oplossing gaan van calciumcarbonaat de stijging in de concentratie van calcium nagenoeg gelijk zijn aan die van waterstofcarbonaat. Uit tabel 3 blijkt dat de stijging in de concentratie van waterstofcarbonaat groter is dan die van calcium. Deze extra toename kan worden toegeschreven aan de oxydatie van organisch materiaal. Dit organisch materiaal kan zowel afkomstig zijn uit het watervoerend pakket, als uit het injectiewater. Dit laatste blijkt uit een daling van de concentratie van organische koolstof, zie ook tabel 2. Deze oxydatiereactie kan als volgt worden uitgeschreven:

$CH_2O(s)$ + $2\ H_2O$ =	HCO_3^- +	$5\ H^+$ +	$4\ e$	(5)
HT 26	0,08	0,38	0,30	
HT 44	0,11	0,59	0,47	

De maatgevende verandering in concentratie van de elektronen is hier berekend uit de vier vooraf beschreven reacties, zie ook tabel 4.
Bovenstaande reactie wordt dus als sluitpost voor de redoxreacties beschouwd. In vergelijking (5) wordt het organisch materiaal door $CH_2O(s)$ weergegeven. Aangezien de werkelijke samenstelling van het geoxydeerde materiaal niet bekend is, bevatten

de berekende reactiecoëfficiënten bijgevolg een mate van onzekerheid.

In de weergegeven reacties (1), (2), (3), (4) en (5) zijn de veranderingen in de concentraties van respectievelijk zuurstof, nitraat, sulfaat, hardheid en elektronen als maatgevend aangehouden.
Alle onzekerheden zijn nu geaccumuleerd in de veranderingen in de concentraties van de protonen, waterstofcarbonaat en vrij koolzuur. Deze veranderingen zijn in tabel 4 samengevat. Hierbij zijn de veranderingen die een verbruik inhouden, dat wil zeggen het linkerlid van de vergelijking, negatief aangegeven en is vorming positief aangegeven.

	elektronen		protonen		waterstof-carbonaat	
put	HT 26	HT 44	HT 26	HT 44	HT 26	HT 44
verandering volgens tabel 3	-	-	-	-	+0,41	+0,26
verandering volgens reactie (1)	-1,00	-1,00	-1,00	-1,00	-	-
(2)	-0,35	-0,30	-0,42	-0,36	-	-
(3)	+1,05	+0,83	+1,33	+1,05	-	-
(4)	-	-	-0,31	-0,22	+0,31	+0,22
(5)	+0,30	+0,47	+0,38	+0,59	+0,08	+0,12
som	0,00	0,00	-0,02	+0,06	+0,39	+0,34

Tabel 4 - Verandering in de concentratie van de aangegeven parameters (in mmol/l) ten gevolge van de verschillende chemische reacties

Uit tabel 4 blijkt dat de concentratieveranderingen tussen de infiltratieput DIP en de waarnemingsput HT 26 met de beschreven reacties voldoende zijn verklaard. Voor waarnemingsput HT 44 resteert een overschot van respectievelijk 0,065 mmol/l H^+ en 0,08 mmol/l HCO_3^-. Met behulp van het waterstofcarbonaat-vrij koolzuur evenwicht kan de balans kloppend worden gemaakt:

$$H^+ + HCO_3^- = H_2CO_3 \qquad (6)$$

HT 44	0,06	0,06	0,06

In tabel 3 is aangegeven dat de toeneming in de concentratie van vrij koolzuur in HT 26 en HT 44 respectievelijk 0,08 en 0,14 mmol/l bedraagt. Voor beide waarnemingsputten resteert nu nog een tekort van 0,08 mmol/l vrij koolzuur.
Aangezien alle onzekerheden van de voorafgaande vergelijkingen in de berekende concentratieveranderingen van waterstofcarbonaat en vrij koolzuur zijn geaccumuleerd en gezien de grootte van de standaarddeviaties in de concentratieveranderingen (zie tabel 3) wordt de bereikte overeenstemming bevredigend geacht.
De gevonden concentratieveranderingen kunnen dus worden toegeschreven aan de oxydatie van pyriet en organisch materiaal onder invloed van zuurstof en nitraat en de neutralisatie van het hierbij gevormde zuur door het oplossen van calciumcarbonaat en door het waterstofcarbonaat-vrij koolzuurevenwicht. Het gehele reactieschema kan als volgt worden samengevat:

HT 26: $0{,}07\ FeS_2(s) + 0{,}31\ CaCO_3(s) + 0{,}08\ CH_2O(s) + 0{,}25\ O_2 + 0{,}07\ NO_3^- + 0{,}21\ H_2O + 0{,}02\ H^+ = 0{,}07\ Fe(OH)_3(s) + 0{,}14\ SO_4^{2-} + 0{,}31\ Ca^{2+} + 0{,}39\ HCO_3^- + 0{,}035\ N_2$, en

HT 44: $0{,}055\ FeS_2(s) + 0{,}22\ CaCO_3(s) + 0{,}12\ CH_2O(s) + 0{,}25\ O_2 + 0{,}06\ NO_3^- + 0{,}165\ H_2O = 0{,}055\ Fe(OH)_3(s) + 0{,}11\ SO_4^{2-} + 0{,}22\ Ca^{2+} + 0{,}33\ HCO_3^- + 0{,}06\ H^+ + 0{,}03\ N_2$

5 SLOTBESCHOUWING

Bij de injectie van aeroob water in een anaeroob watervoerend pakket treedt een aantal redoxreacties op. Bij deze redoxreacties worden pyriet en organisch materiaal, aanwezig in de vaste fase van het watervoerend pakket, geoxydeerd door zuurstof en nitraat aanwezig in het injectiewater. De aanwezigheid van pyriet en organisch materiaal is afgeleid uit de gevonden concentratieveranderingen. Tevens wordt een klein gedeelte van het organisch materiaal in oplossing verwijderd. Bij deze redoxreacties wordt zuur gevormd. Dit zuur wordt geneutraliseerd door de in het watervoerend pakket aanwezige calciumcarbonaat en door het waterstofcarbonaat-vrij koolzuurevenwicht. Bij de hier gepresenteerde benadering is aangenomen dat bij de oxydatie van pyriet het sulfide in het watervoerend pakket volledig wordt geoxydeerd tot sulfaat. In de praktijk zal deze oxydatie veel gecompliceerder verlopen. Uit onderzoek van Bouleque (1977) en Bouleque and Michard (1979) is bekend dat bij de oxydatie van pyriet allerlei intermediaire zwavelverbindingen, in het bijzonder elementair zwavel, S_8, en thiosulfaat, $S_2O_3^{2-}$, worden gevormd. Tijdens de monsterneming is aan de eventuele aanwezigheid van deze tussenprodukten geen aandacht besteed. Ook Stumm en Morgan (1981 p. 470) geven een gecompliceerder mo-

del voor de oxydatie van pyriet.
Voor zover ons bekend zijn buiten Nederland alleen in Bay Park, New York, oriënterende experimenten met injectie van drinkwater in een watervoerend pakket uitgevoerd (Vecchioli et al. 1975, Ragone et al. 1973). Het watervoerend pakket in Bay Park bevat geen calciumcarbonaat. Daardoor is de daling in pH aldaar veel groter.
Tijdens de periode waarin de metingen zijn uitgevoerd is geen aanwijzing gevonden voor het optreden van kationenwisseling. Het optreden van kationenwisseling ligt ook niet erg voor de hand aangezien het watervoerend pakket niet of nauwelijks klei bevat.

Het watervoerend pakket bevat pyriet en organisch materiaal in eindige hoeveelheden. De processen zullen dus aflopen en rond de injectieput zal zich een aerobe zone vormen. Deze zone zal zich in de loop van de tijd rond de put uitbreiden. In de waarnemingsputten stijgt eerst de concentratie van nitraat en vervolgens die van zuurstof. Er ontstaat derhalve een chromatografisch effect waarbij het nitraatfront voorloopt op het zuurstoffront.

De hier beschreven geohydrochemische processen hebben grote consequenties voor een systeem bestaande uit afzonderlijke infiltratie- en onttrekkingsputten. Na verloop van tijd zal langs de kortste stroomlijn tussen de infiltratie- en de onttrekkingsput doorslag van zuurstof optreden.
Langs langere stroomlijnen zal nog ijzerbevattend water naar de onttrekkingsput toestromen. Ten gevolge van de menging van zuurstofbevattend en van ijzerbevattend water zal putverstopping optreden.
Bij de opzet van een dergelijk systeem zal hiermee

rekening dienen te worden gehouden. Hoe ernstig de verstopping zal zijn en hoe lang met dit optreden rekening zal moeten worden gehouden valt niet aan te geven.
Zolang de omgeving van het injectie-onttrekkingssysteem niet in geohydrochemisch evenwicht is, zal het onttrokken water ijzer, mangaan en ammonium bevatten. Alvorens dit water als drinkwater te kunnen distribueren zullen deze stoffen verwijderd dienen te worden.
Factoren die de tijdsduur van de aanwezigheid van ijzer, mangaan en ammonium in het onttrokken water en van het optreden van putverstopping zullen bepalen, zijn het gehalte en de aard van voorkomen van ijzersulfiden, organisch materiaal en calciumcarbonaat in het watervoerend pakket.

6 VERANTWOORDING

Het beschreven onderzoek is uitgevoerd door de Duinwaterleiding van 's-Gravenhage en geëvalueerd in het kader van het door de VEWIN aan het KIWA opgedragen speurwerkprogramma in samenwerking met de deelnemende bedrijven.
Aan de totstandkoming van deze publikatie hebben de volgende personen een bijdrage geleverd: W. Kooper, H.J.M. Lips en P.J. Stuijfzand.

7 LITERATUUR

Bouleque, J. (1977): Equilibria in a sulfide rich water from Enghien-les-Bains, France, Geochim Cosmochim Acta 41, 1751-1758.

Bouleque, J. and Michard, G. (1979): `Sulfur speciations and redox processes in reducing environments, in E.A. Jenne (Ed) Chemical modeling in aqueous systems, ACS Symposium Series 93, p. 25-50.

Olsthoorn, T.N., Tuinzaad, H., Beek, C.G.E.M. van en Puffelen, J. van (1975): Putinfiltratie met drinkwater te 's-Gravenhage, KIWA-Mededeling 41.

Puffelen, J. van (1979): Berging van oppervlaktewater in de ondergrond, H_2O 12 (24) 541-548.

Puffelen, J. van (1972): Kwaliteitsverandering bij de infiltratie van Rijnwater in de duinen, Postacademiale Cursus. Zuiveringssystemen bij de produktie van drinkwater, 13-16 september 1972, 12 p.

Ragone, S.E., Vecchioli, J. and Ku, H.F.H. (1973): Short term effect of injection of tertiarytreated sewage on iron concentration of water in Magothy aquifer, Bay Park, New York, in J. Braunstein (Ed) 2° Int. Symp. on underground waste management and artificial recharge, sept. 26-30, 1973, vol I, p. 273-290.

Stumm, W. and Morgan, J.J. (1981): Aquatic Chemistry, 2nd Edition, John Wiley, New York, 780 p.

Vecchioli, J., Oliva, J.A., Ragone, S.E. and Ku, H.F.H. (1975): Wastewater reclamation and recharge, Bay Park, N.Y., ASCE, J. Env. Eng. Div. 101 (EE2) 201-214.

Nieuwegein/'s-Gravenhage, maart 1984

PUTINFILTRATIE BIJ HOOGOVENS IJMUIDEN

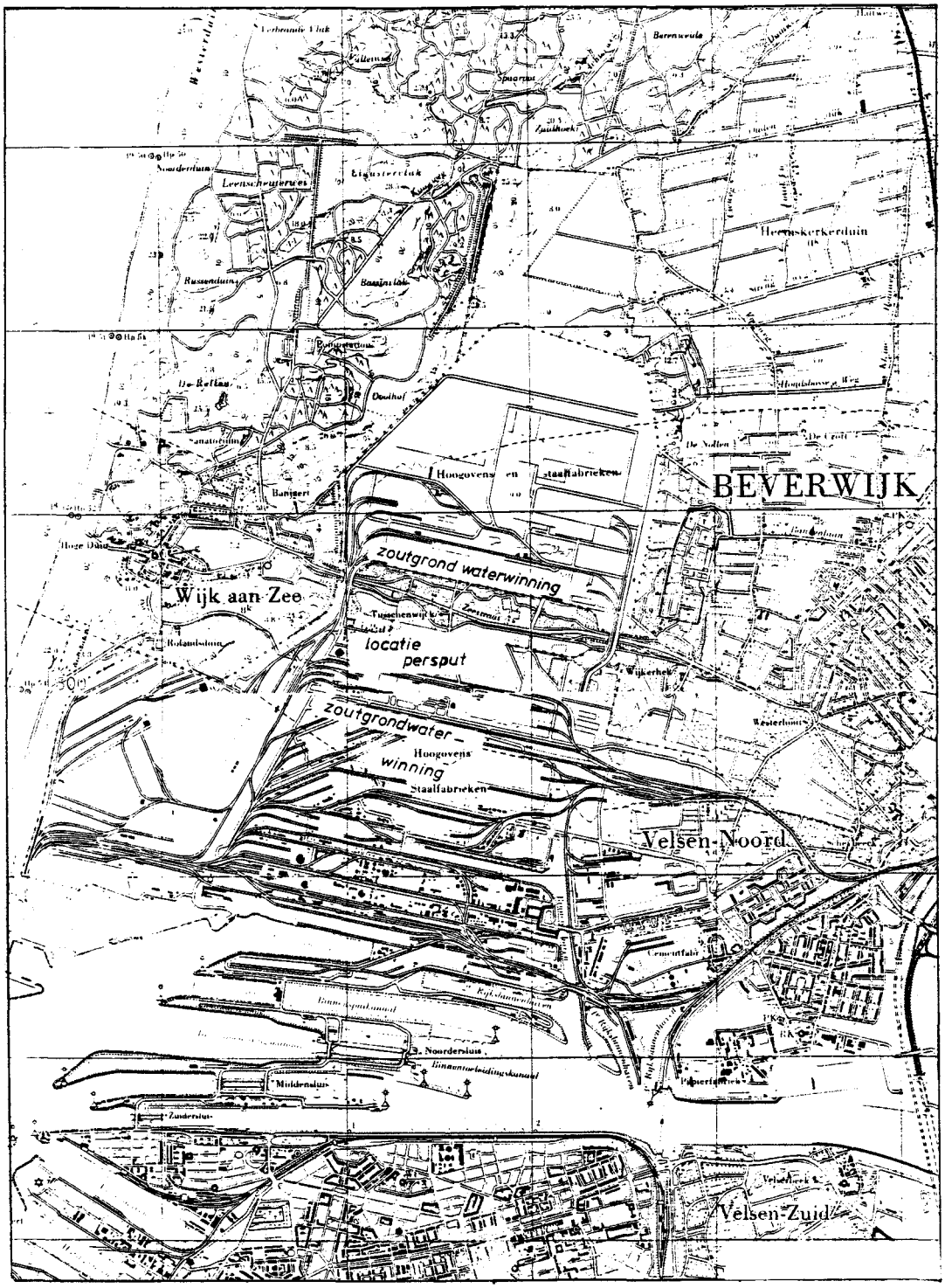
J.P.J. Krabbendam (Hoogovens Groep B.V.)

1 INLEIDING

Hoogovens is voor de bedrijfswatervoorziening aangewezen op de levering door de Watertransportmaatschappij Rijn-Kennemerland (WRK), althans wat zoet water betreft. De oorspronkelijke belangstelling van Hoogovens voor persputinfiltratie was gelegen in het overbruggen van perioden waarin het zoutgehalte van WRK-water (Nieuwegein) hoog is. Dit had met name betrekking op de voeding van de demineralisatie. Bij ontzouting met behulp van ionenwisselaars nemen met het zoutgehalte de chemicaliënkosten voor regeneratie toe; nog afgezien van problemen met bedrijfsvoering en capaciteit bij hoge zoutbelasting. Door opslag van water van goede kwaliteit zou op regeneratiekosten kunnen worden bespaard en zou de installatie op een minder hoog zoutgehalte kunnen worden gedimensioneerd. Een bijkomend aspect was het benutten van de zoetwaterbuffer als noodvoorziening tijdens storing in de aanvoer.

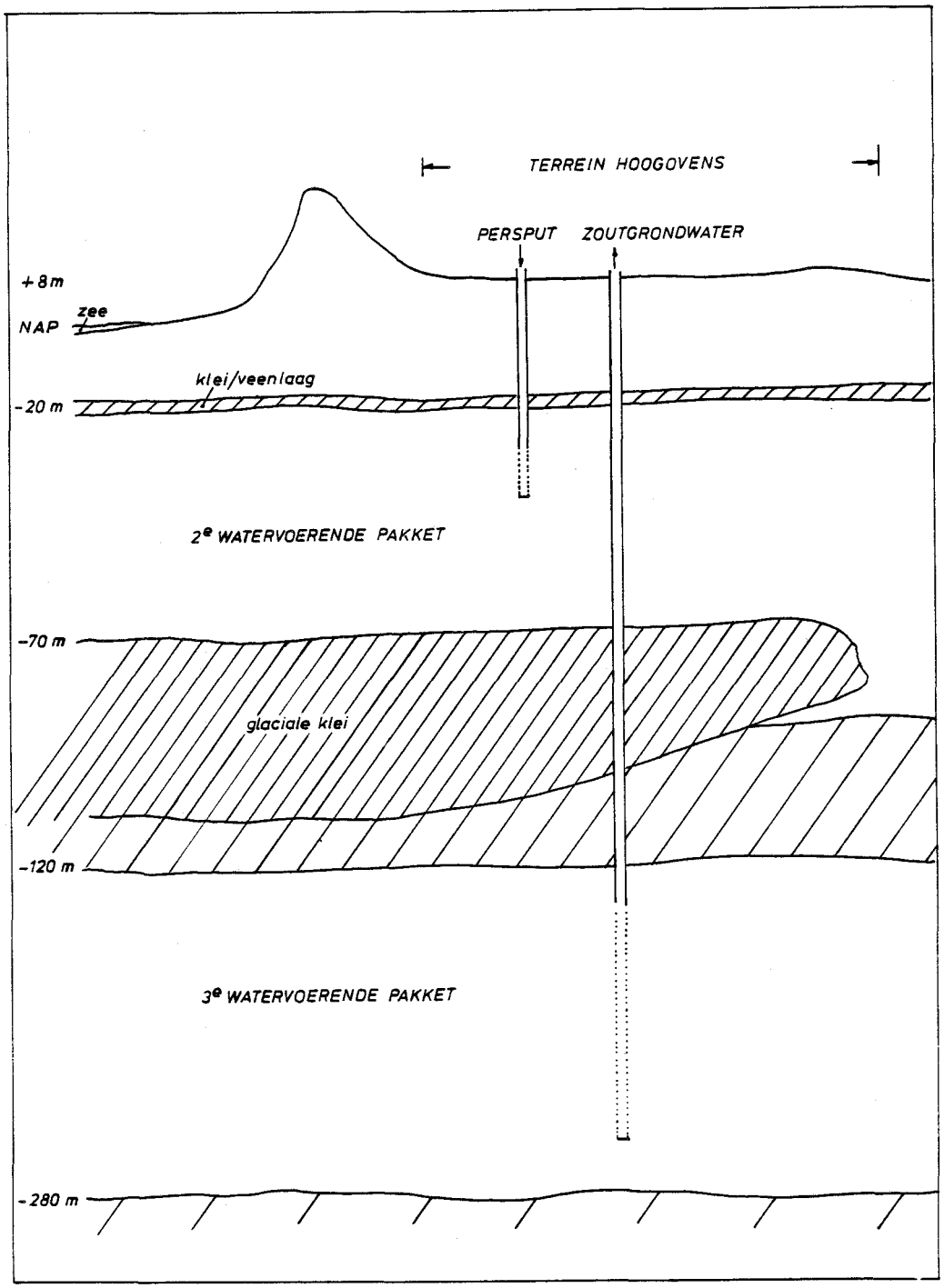
2 ZOETWATERBUFFER

De persputproef bij Hoogovens in het begin van de jaren '70 is dus te zien als onderzoek naar de mogelijkheid tot berging van water van goede kwaliteit. Deze proef was de eerste in het kader van de WIRDu, later de Commissie Infiltratie. De gebruikte put was onderdeel van een buiten bedrijf gestelde winning, zie figuur 1. Het WRK-water werd geïnfil-



Figuur 1 - Locatie, situatie

treerd in het tweede watervoerende pakket NAP - 20 tot - 70 m onder een enkele meters dikke klei/veenlaag, zie figuur 2. In deze periode onderging het WRK-water nog geen coagulatie voorafgaand aan de snelfiltratie.
Bij de proeven bleek het slibgehalte van het WRK-water continue infiltratie onmogelijk te maken; 70.000 m^3 werd bij toenemende weerstand geïnfiltreerd (lit. 1). Daarbij werd tussentijds eenmaal teruggepompt. Met behulp van electrodenkabels werd een indruk van de verdringing van het aanwezige zoute/brakke grondwater verkregen. Vervolgens werd onttrokken tot het chloridegehalte circa 300 mg/l was; ongeveer 2/3 deel, 47.000 m^3, werd teruggewonnen (lit. 2).
In de daarop volgende perioden werden kortere infiltratieduur van één tot drie weken en verhoging van de volumestroom bij terugpompen met een factor 2-4 beproefd, met aanvankelijke verbetering als resultaat.
Maandenlang kon het regime 2 x per week 31 uur infiltratie en ½ uur terugpompen worden gehandhaafd. In totaal werd nog circa 35.000 m^3 geïnfiltreerd. Daarna nam echter de blijvende weerstand zodanig toe dat slechts kort kon worden geïnfiltreerd, voordat opnieuw moest worden teruggepompt. Schoonspuiten met hoge druk mocht niet baten en kort daarop is de put bezweken, verzand door het opbarsten van de klei-afdichting bij een verloop.
Inmiddels is door het mede in bedrijf komen van WRK III met levering van water uit het IJsselmeer de zekerheid van levering vergroot. Het belang van een noodvoorziening is daarom zowel uit kwalitatief als kwantitatief oogpunt gezien, verminderd. Een infiltratieproject is daarom, afgewogen tegen besparing van ontzoutingskosten, in de huidige situatie economisch niet haalbaar.



Figuur 2 - Geohydrologisch profiel

3 ZOUT GRONDWATER

Zout grondwater wordt bij Hoogovens gebruikt als koelwater voor toepassingen waar een open of gesloten circulatiesysteem met koeltorens, gezien de vereiste lagere temperatuur, niet mogelijk is. Het wordt onttrokken op een diepte van NAP - 120 tot - 200 m uit een watervoerend pakket onder een 40 m dikke glaciale kleilaag, zie figuur 2. De huidige onttrekking bedraagt circa 22 mln m^3 per jaar. Temperatuur circa 14 °C.

De invloed van deze onttrekking op de stijghoogte van het grondwater in de omgeving van het staalbedrijf is onderwerp geweest van een geohydrologisch onderzoek. Daarbij is gebleken dat winning op het genoemde niveau mogelijk moet zijn, gezien tegen de achtergrond van de totale waterhuishouding, inclusief zoetwaterwinning door andere bedrijven in de omgeving.

Al is in een eerder stadium overwogen tot herinfiltratie van zout grondwater over te gaan, uit oogpunt van grondwaterbeheer is er, gezien het bovenstaande, geen aanleiding het enkele graden opgewarmde water in de grond terug te brengen. Overigens blijft in principe deze mogelijkheid open. Wel zou dan nader onderzoek nodig zijn om een geschikte locatie en de juiste filterdiepte vast te stellen ten einde te voorkomen dat opgewarmd water wordt aangetrokken. Daarnaast is het van wezenlijk belang het ijzerhoudende water na gebruik op zodanige wijze te verzamelen dat het zonder toetreden van lucht (zuurstof) kan worden geïnfiltreerd.

Het gebruikte zoute water wordt momenteel geloosd in een haven die in open verbinding staat met de zee.

4 COMPENSERENDE MAATREGELEN

Een ander toepassingsgebied van persputinfiltratie is gelegen in compensatie van onttrokken grondwater bij bemalingen. Bij de bouw van grote produktie-eenheden met diep gelegen funderingen en kelders zijn grote bouwputten nodig. De bemaling vergt soms langdurige en aanzienlijke onttrekkingen van grondwater. De grondwaterhuishouding van de streek in aanmerking genomen, wordt in bepaalde gevallen van overheidswege compensatie door retourbemaling voorgeschreven. Het gaat daarbij in een gebied met industriële bebouwing niet zozeer om het bovenste watervoerende pakket als wel om de dieper gelegen lagen. Bij Hoogovens gaat het dan om het zoetwatervoorkomen onder de duinen, waar infiltratie de verminderde voeding naar het tweede watervoerende pakket ten tijde van bemaling kan compenseren. Omdat de infiltratie alleen de inzijging door de ter plaatse aanwezige klei/veenlaag - de basis van het Holocene pakket - vervangt, behoeft slechts een beperkt percentage van de totale onttrekking te worden geïnfiltreerd. Het bemalingswater uit het bovenste watervoerende pakket is gedeeltelijk zuurstofhoudend en gedeeltelijk ijzerhoudend, hetgeen reeds in de onttrekkingsputten tot problemen met ijzerafzettingen leidt. Om deze reden zal in voorkomende gevallen voor de vervangende infiltratie WRK-water worden gebruikt. Deze watersoort is als bedrijfswater op veel plaatsen in het bedrijf beschikbaar.

Voor deze toepassing is vooral van belang dat het persputtenonderzoek gegevens levert omtrent het op peil houden van de infiltratiecapaciteit van de putten (regeneratie etc.).

5 LITERATUUR

1. Bulten, B.. WIRDU Werkgroep Persputten. Infiltratieproef met een persput op het terrein van Hoogovens. Interimrapport juni 1971.

2. Bulten, B.. WIRDU Werkgroep Persputten. Tweede interimrapport juni 1972; daarin hoofdstuk 2 Brandes, M.C. (verdringing en rendement terugpompen), hoofdstuk 1, paragraaf 6 Walter, F. (verdringing aan de hand van electrodenopstelling).

3. Bulten, B.. Commissie Infiltratie. Werkgroep Persputten. Derde interimrapport augustus 1973.

Een overzicht betreffende de persput bij Hoogovens biedt:

4. Olsthoorn, T.N.. Persputten, een met en een zonder verstopping. H_2O (10) nr. 25, p. 582 ev..

Voorts inzake de verstopping door zwevende stof, ingepast in breder kader:

5. Olsthoorn, T.N.. Werkgroep Persputten. Verstopping van persputten. KIWA-mededeling nr. 71. Hoofdstuk 3.2.

IJmuiden, februari 1984

GEOHYDROLOGICAL COMPENSATORY MEASURES TO PREVENT LAND SUBSIDENCE AS A RESULT OF THE RECLAMATION OF THE MARKERWAARD POLDER IN THE NETHERLANDS

Public Works Department, Rijkswaterstaat, Directorate of Water Management and Hydraulic Research, Northern District
IWACO B.V., ROTTERDAM

ABSTRACT

If the Markerwaard polder is reclaimed the water level in the polder will fall 5 to 6 metres over an area of 410 km^2. This will cause a drawdown of the piezometric levels in the Pleistocene aquifers underneath the eastern part of the province of North Holland. The spatial pattern of these drawdowns is calculated by a finite elements groundwater model.
Without countermeasures to compensate for the depletion of the piezometric level, settlement of the compressible Holocene clay and peat deposits will occur and resultant land subsidence may cause damage to buildings and infrastructure.
Drawdown of the piezometric levels can be entirely or partially countered by means of artificial recharge of water into the Pleistocene aquifers.
There are two methods for this, viz. vertical recharge wells and infiltration grooves in the remaining western peripheral lake between North Holland and the Markerwaard polder. The amount of water necessary for the countermeasures is calculated with the same groundwater model.

1 INTRODUCTION

The study area is situated in the north-western

part of the Netherlands (figure 1). The projected polder will have an area of 410 km^2 and will be reclaimed in the south-western part of Lake IJssel.

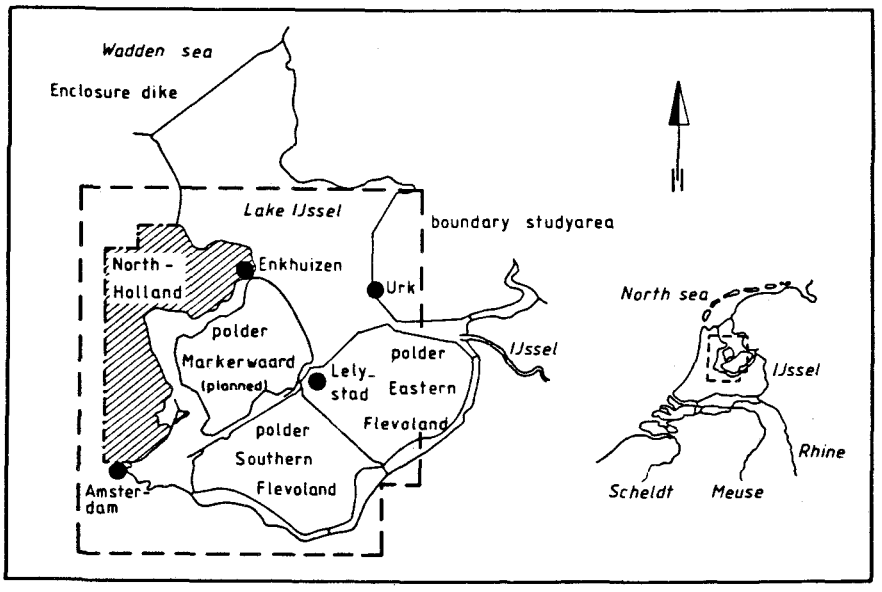


Figure 1 - Study area

The phreatic groundwater level in the new polder will be some 5 to 6 metres lower than the present water lever in Lake IJssel.
As a result, a groundwater flow towards the new polder will be induced. This will mean a considerable change in the groundwater regime underneath the new polder and its surrounding area. This change, particularly the drawdown of the piezometric level in the upper Pleistocene aquifer, could have a detrimental effect on agriculture and animal and plant life and may cause land subsidence, with resultant damage to buildings and infrastructure. This would be most likely to occur in the eastern part of the province of North Holland (the shaded area in figure 1).
The province of North Holland can be characterized as an old polder area with a surface level varying

from 1 to 4 metres below sea-level. The subsoil consists of Holocene clay and peat deposits 10 to 20 metres thick (lit. 12).
The purpose of this investigation was firstly, to forecast the changes in the groundwater regime underneath the province of North Holland and secondly, to provide a feasibility study of countermeasures against the effects of such changes in the groundwater regime (lit. 11).

2 GEOHYDROLOGICAL EFFECTS OF THE RECLAMATION OF THE MARKERWAARD POLDER

2.1 Introduction

Depending on the various geological and geohydrological conditions, reclamation of the polder will influence the existing groundwater regime. Because of the complexity of the geohydrological structure of the subsurface (in both a horizontal and vertical direction) together with strongly varying boundary conditions, the calculation of the groundwater flow had to be carried out with the help of a numerical model. Simple preliminary analytical calculations were used to determine the extent of the study area (= model area; figure 1). The geohydrological features of the model were derived from the geological conditions of the study area (lit. 3 and 11). After calibration and verification this numerical model was able to forecast the changes in the groundwater regime.

2.2 Geohydrological schematization

For the geohydrological calculations it is necessary to schematize the subsurface into aquifers and

aquitards, based on the geological conditions.
As shown in figure 2 the subsurface can be schematized into three aquifers covered and partially separated by aquitards. On the basis of the geohydrological framework a number of geohydrological maps have been prepared in which the preliminary values of the geohydrological parameters needed for the model computations, such as values of transmissivity (T) and vertical hydraulic resistance (c), are given. The parameter values firstly used are readjusted by means of model calibration.

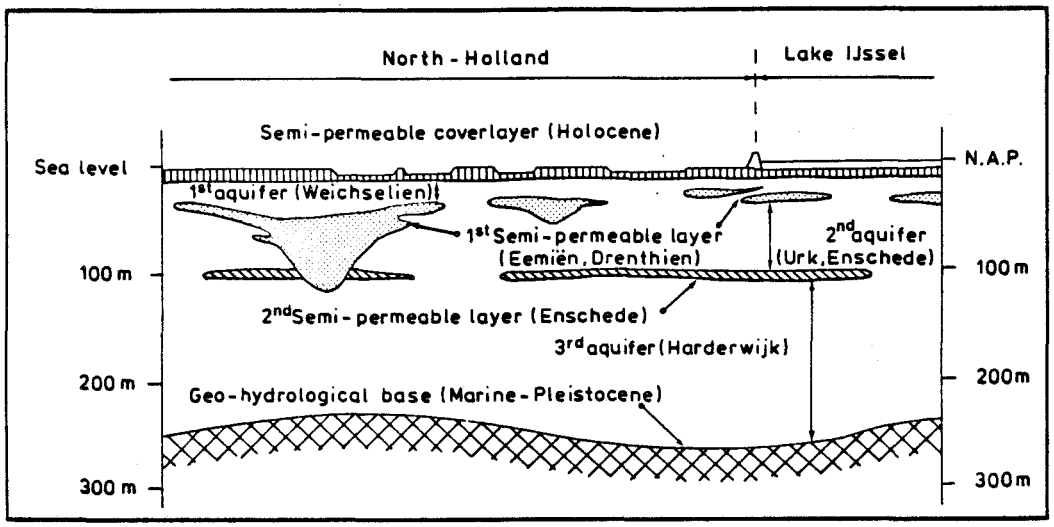


Figure 2 - Geohydrological profile

2.3 Calculations with the finite element model

2.3.1 Description of the model

To forecast the changes in the groundwater regime after reclamation of the Markerwaard, the FIESTA-model was used. This is a numerical physical finite element model which solves steady groundwater flow problems in multi-layered systems (lit. 1).
The finite element discretization is based on the

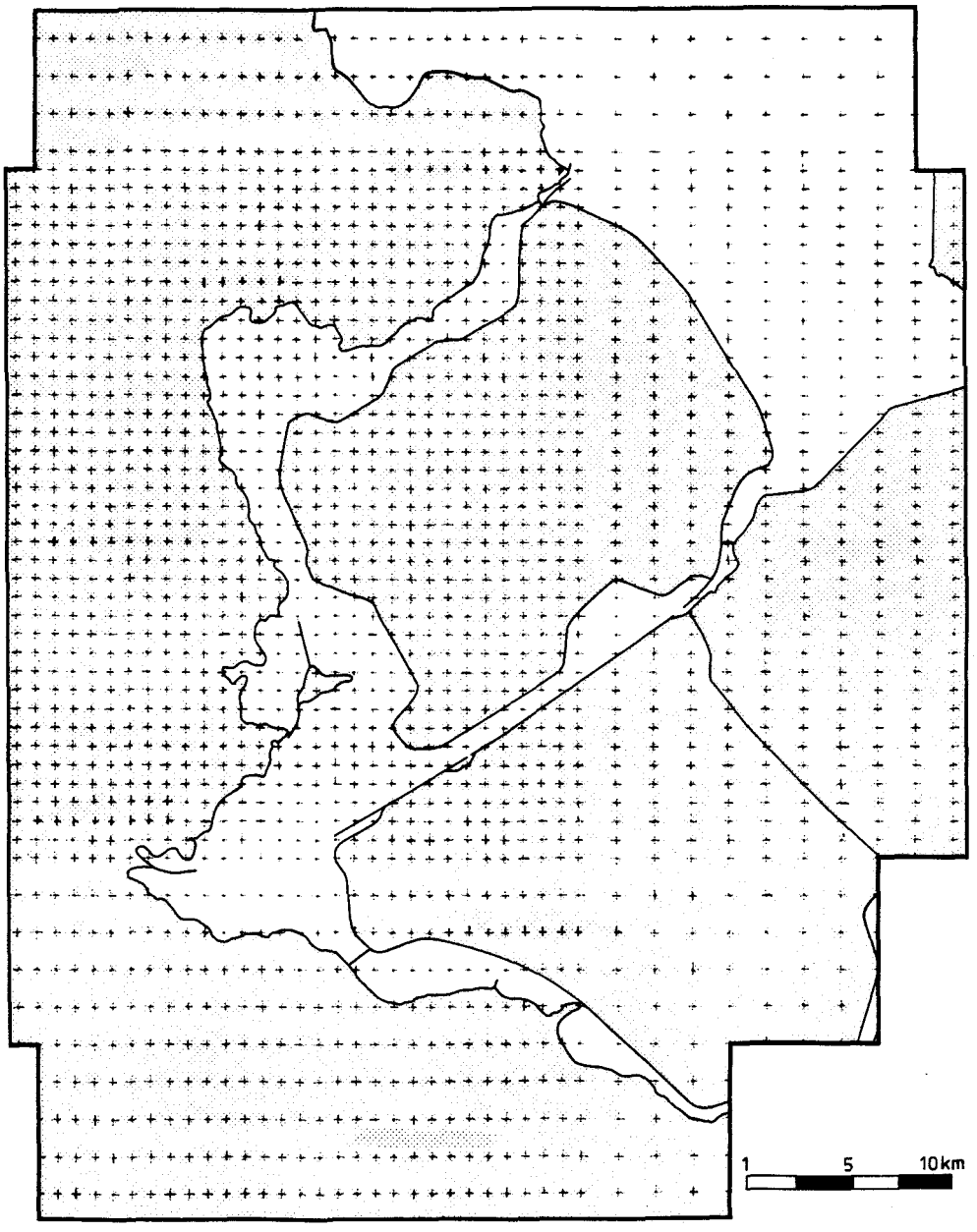


Figure 3 - Model area; part of grid spacing

regional character of this study and the expected effects of the reclamation of the Markerwaard polder (figure 3).
The FIESTA-model calculates the piezometric levels and vertical groundwaterflow for each nodal point of the three aquifers. In addition, water balances are calculated for the separate aquifers, the entire hydrological system and for those hydrological units that could be distinguished.

2.3.2 Calibration and verification of the model

For the calibration of the model (= parameter evaluation) the average piezometric levels over the period October/November 1978 were used (these being representative of a long term steady state situation), as well as infiltration and seepage values measured in the field.
The output of the model calculations, in terms of piezometric levels and vertical groundwater flows, should agree, within certain limits, with the measured data.
The geohydrological parameters in the model (T- en c-values) have been adjusted to an optimum value by a selective trial and error method. During the calibration process it became increasingly clear that the vertical hydraulic resistance of the Holocene aquitard is the most sensitive parameter for the groundwater flow of the area involved. Figure 4 shows the spatial distribution of this c-value as determined by the calibration of the model for the existing hydrological situation.

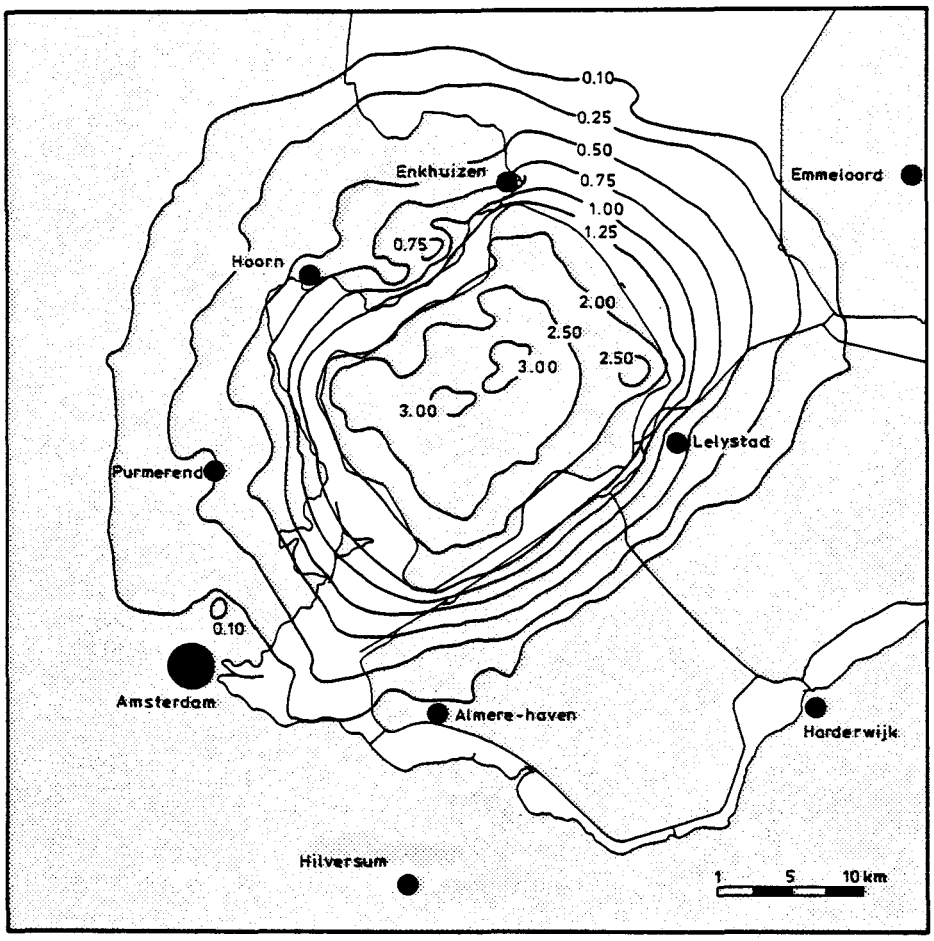


Figure 5 - Ultimate drawdown in upper aquifer

2.3.4 The speed of piezometric drawdown

Calculations have been made using an analytical non-steady groundwater flow model (lit. 9) to estimate the speed of the piezometric drawdown in relation to the speed of pumping dry the new polder.
In this model the consolidation of the compressible Holocene deposits has been taken into account as a function of time and place.
It appears from these calculations that under the Markerwaard and North Holland the piezometric level will recede at the same rate as ascertained under the north-western part of Southern Flevoland during and after the reclamation of this polder. In

After calibration, the forecasting ability of the model was verified with data, different from those used with the calibration.
In 1967 the Southern Flevoland polder (in the southern part of the model area) was reclaimed. This resulted in a drawdown of the piezometric levels in that particular region. The actual extent of the depletion was then compared with the predictions of the numerical model with fairly similar results.

2.3.3 Results of the calculations

To indicate the final situation (steady state) after the reclamation of the Markerwaard polder the input data of the model were adjusted as follows:
- in the new polder area the phreatic level drops 5 to 6 metres;
- in the same area the vertical hydraulic resistance of the Holocene aquitard decreases through ripening of the top soil and reclamation works. It was estimated, based on experience in other polders, that the c-values would decrease from about 27,000 days to 4,000 days.

After these adjustments, the new piezometric levels and vertical groundwater fluxes in the study area were calculated. Subtraction of these values from the corresponding values at present, results into the drawdowns of the piezometric levels in the three aquifers and the changes in infiltration and seepage rates.
The drawdown in the upper Pleistocene aquifer (figure 5) is especially important, because these data are important for the geotechnical calculations necessary to forecast land subsidence and subsequent damage.

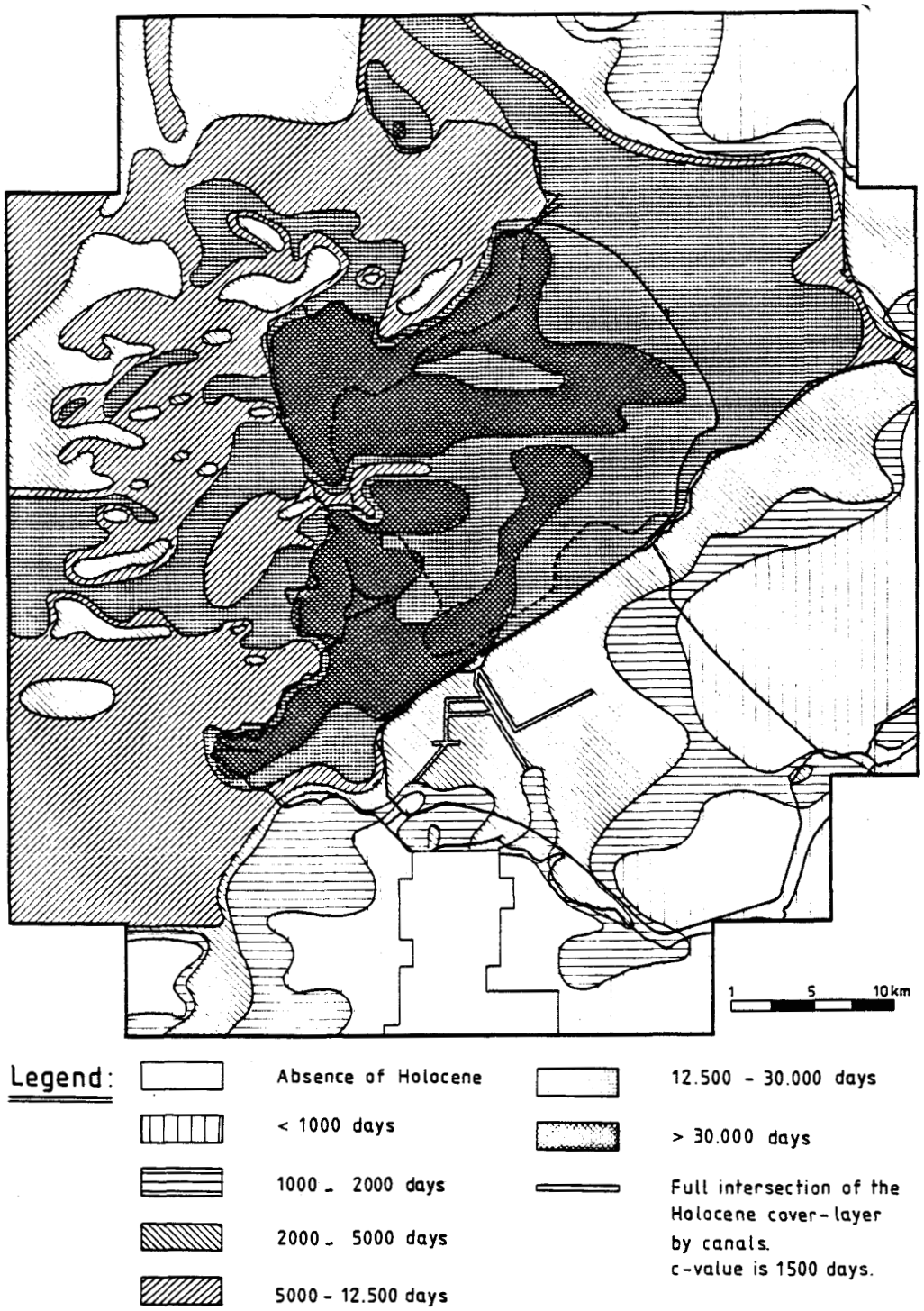


Figure 4 - Vertical hydraulic resistance (days) of the Holocene cover-layer (situation before reclamation of the Markerwaard polder)

Southern Flevoland and its surroundings measurements showed that one year, respectively five to seven years after the start of pumping, more than 50 %, respectively almost 100 %, of the final drop of the piezometric head was reached.
If the Markerwaard is pumped dry at the same rate as Southern Flevoland, it is to be expected that after 5 to 7 years about 90 % of the final drop under and around the Markerwaard will be reached.

3 COUNTERMEASURES TO PREVENT DRAWDOWN OF PIEZOMETRIC LEVELS

3.1 Introduction

Without countermeasures settlement of the compressible Holocene deposits will occur. Due to resulting land subsidence, buildings and infrastructure may be damaged (lit. 7).

3.2 Countermeasures studied

Drawdown of piezometric levels can be countered by means of artificial recharge of water into the Pleistocene aquifers. Various measures such as gas (air) injection, injection of chemicals, construction of slurry walls, sandpiles, infiltration galleries, recharge wells and infiltration grooves, have been briefly considered and analysed provisionally with regard to their technical, practical and economic feasibility.
Two solutions were found feasible for this specific problem and have been studied more in detail:

- injection of water by means of vertical recharge wells (figure 6). These wells can be located along the east coast of North Holland (figure 7)

or clustered near those urban areas most vulnerable to damage (figure 8).
Depletion can be entirely of partially compensated. Water can be taken from the peripheral lake and after purification pumped into a transport system towards the recharge wells;
- increase of the infiltration capacity of the western peripheral lake by dredging infiltration grooves (10-15 metres deep) which would intersect the covering Holocene deposits at several places (figure 9).

A third probable solution was derived from the results of the integrated study:
- slowing down the rate of drawdown by phasing out the reclamation works, or, by lowering the piezometric level gradually by phasing out the recharge well system over a period of about 30 years. Establishing a steady state in a period of 30 years will result in a very gradual settlement of the Holocene deposits, so damage to buildings may be greatly reduced.

3.3 Calculation methods

The amount of water necessary for complete or partial compensation by recharge wells and infiltration grooves was also calculated with the FIESTA-model. A model in which relations have been established between drawdown of the piezometric levels, land subsidence and damage to buildings and infrastructure (lit. 7) calculated the residual damage for partial compensatory measures.

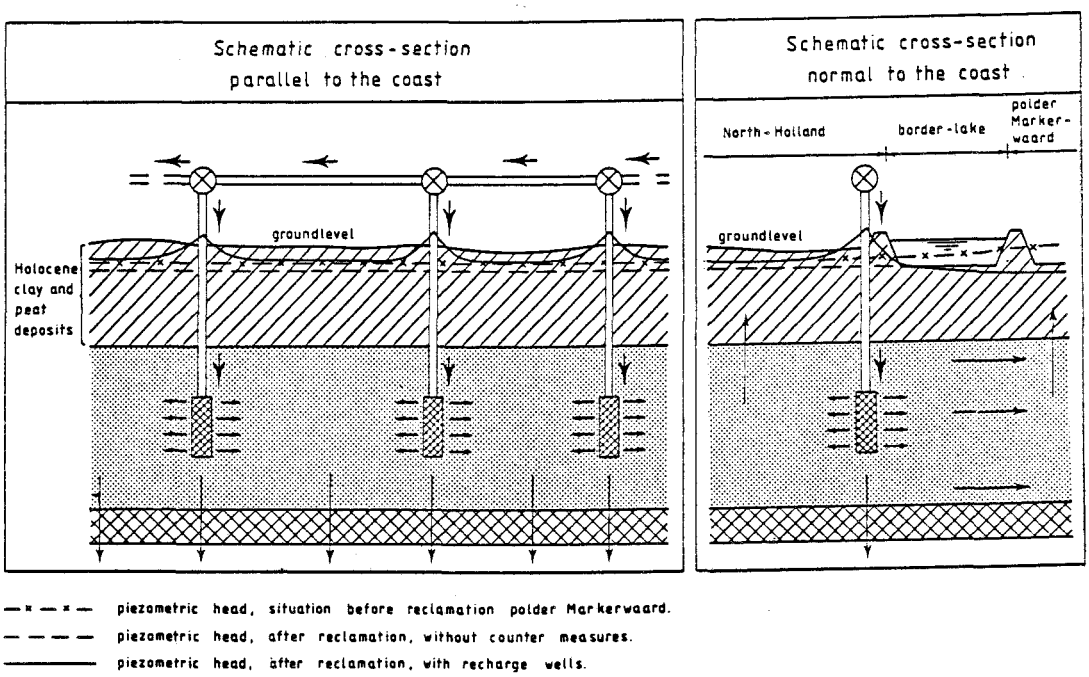


Figure 6 - Sketch of application recharge wells

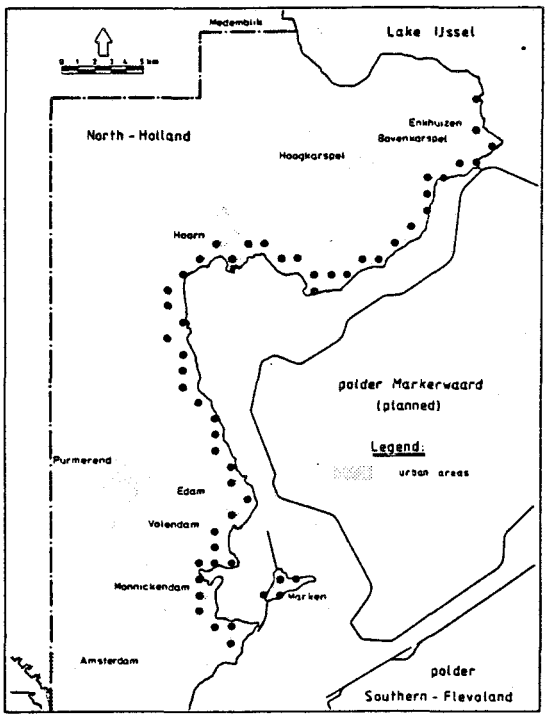


Figure 7 - Location of recharge wells for infiltration in 3 aquifers to compensate fully the drawdown of the piezometric level in North Holland

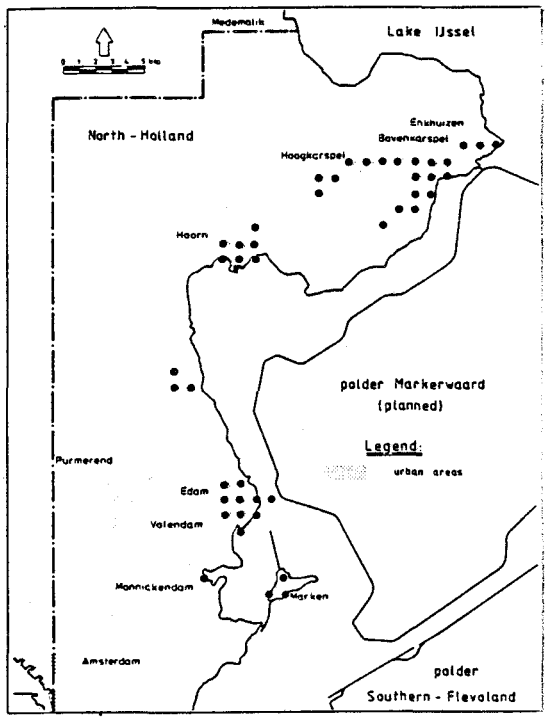


Figure 8 - Clustered locations of recharge wells for infiltration in the shallow aquifer to compensate fully or partially the area vulnerable to damage

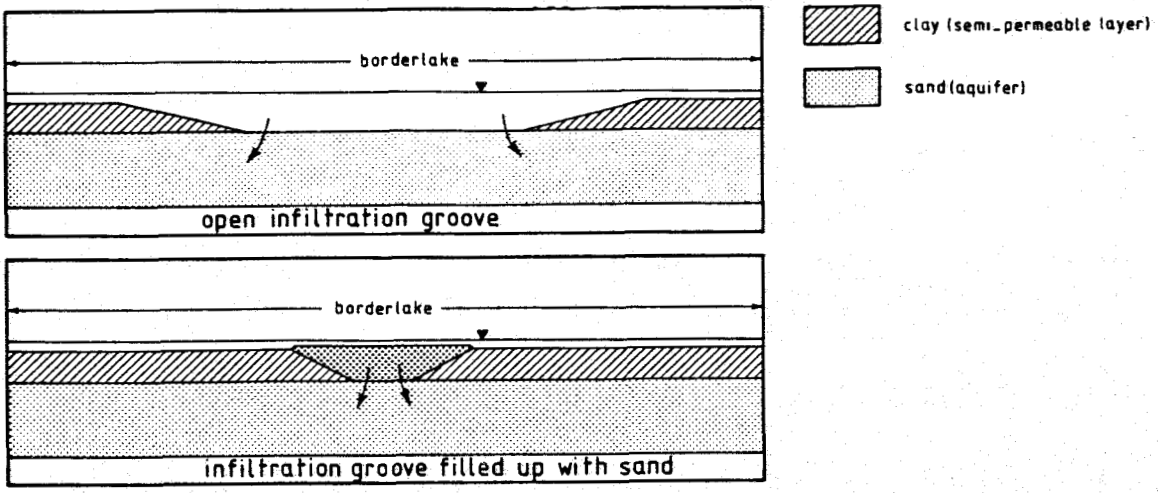


Figure 9a - Schematic cross-section of infiltration grooves

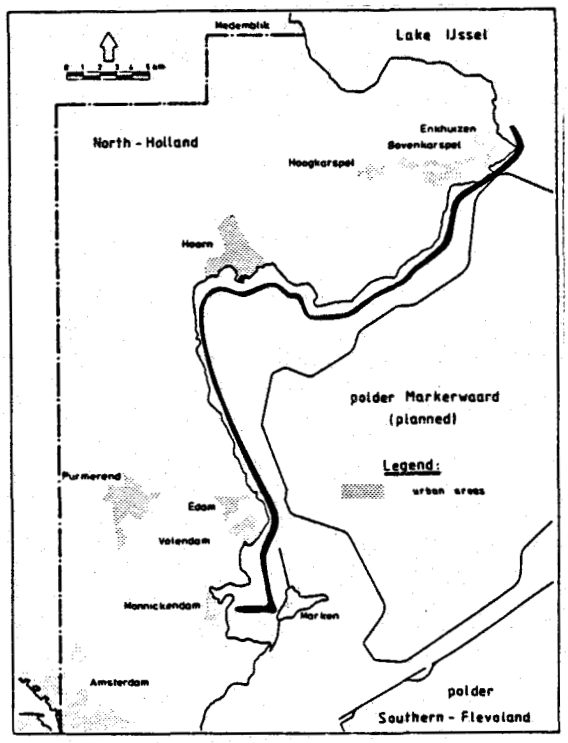


Figure 9b - Location of infiltration groove in the borderlake to compensate fully the drawdown of the piezometric level in North Holland

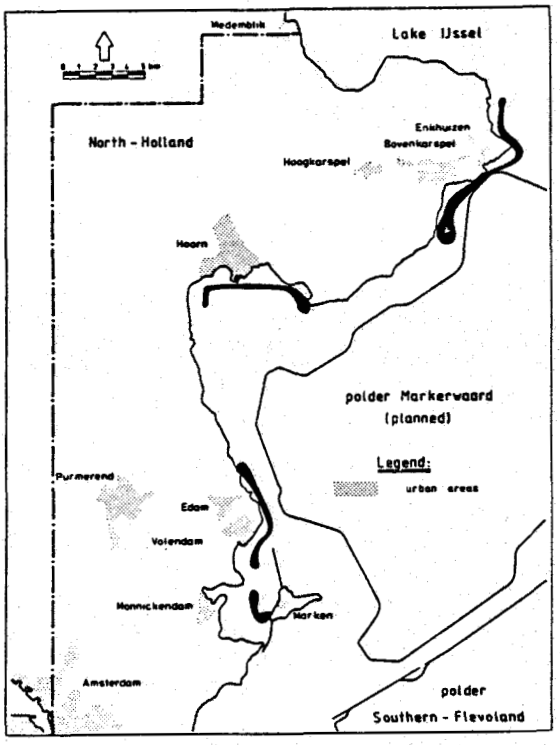


Figure 9c - Locations of infiltration areas in the borderlake to compensate, fully or partially, the drawdown of the piezometric level in the areas vulnerable to damage by land subsidence

3.4 Results of the calculations

When using recharge wells to compensate fully for the drawdown of the piezometric levels in North Holland, a yearly amount of 40 million m^3 infiltration water is necessary, i.e. about 215 recharge wells. To compensate only for the drawdown in the regions most vulnerable to damage, a yearly amount of 20 million m^3 is required, or about 125 recharge wells.

For optimum compensation of the drawdown by means of infiltration grooves, the infiltration area of these grooves should be 8 km^2 or 24 km^2, in the case of a hypothetical infiltration resistance of 100 and 300 days respectively.

Figure 10 gives the relations between the average drawdown per area of the piezometric level in the area vulnerable to damage and the total quantity of injection water. Figure 11 relates the calculated residual damage to buildings and infrastructure in North Holland to the total quantity of injection water, in both diagrams, both for recharge wells and infiltration grooves. It appears that use of recharge wells would require 50 % less water than use of grooves while achieving the same reduction of drawdowns. In addition, it appears that for the same quantity of infiltration the damage when using recharge wells is less than in the case of infiltration grooves.

The initial investments in the case of recharge wells have been estimated at US $ 60 million for a recharge quantity of 40 million m^3/year (no damage is expected at all) and US $ 40 million for a recharge quantity of 20 million m^3/year (90 % reduction of the total damage). The yearly operational costs amount to US $ 5 and 3.5 million respectively

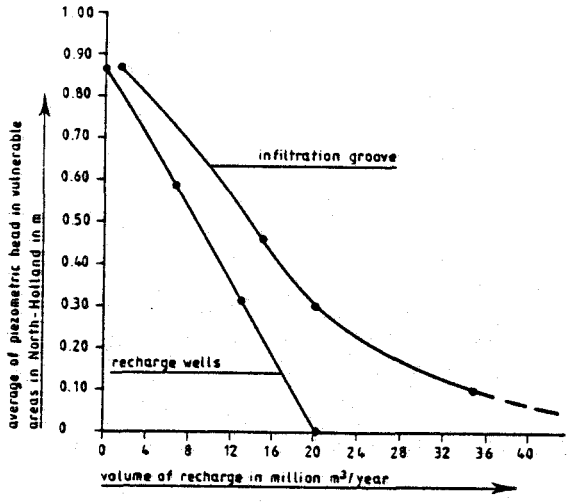


Figure 10 - Relation between the volume of artivicial recharge (wells or grooves) and the average piezometric drawdown in the vulnerable urban areas

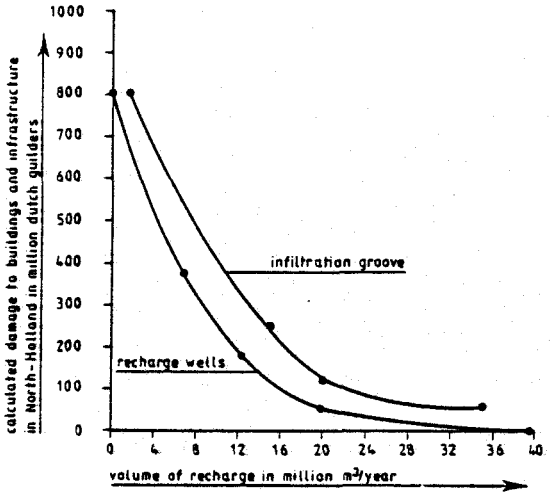


Figure 11 - Relation between the volume of artificial recharge (wells or grooves) and the damage to buildings and infrastructure

The period allowed for depreciation has been set at 30 years.

As far as infiltration grooves are concerned, the cost of removal of the Holocene clay and peat deposits amounts to US $·130 and 260 million depending on the above-mentioned hydraulic resistances (total damage will be reduced by 90 %). The yearly operational costs are estimated at US $ 1 million.

By varying the recharge quantities and the dimensions of the infiltration groove, the costs of countermeasures can be weighed against the remaining damage to buildings and infrastructure and the most favourable alternative can be chosen.

If drawdown of the piezometric levels in the upper Pleistocene aquifer is allowed to occur very slowly through phasing out the recharge well system over a

period of about 30 years, it is to be expected that damage to buildings and infrastructure in the regions most vulnerable to damage will be greatly reduced.
If, on the other hand, this is done by phasing out the reclamation works (over five years instead of six months) damage to buildings and infrastructure will be reduced by approximately 50 %. This will also mean an increase in reclamation costs.

4 GENERAL CONCLUSIONS

1. The ultimate drawdowns in the aquifers will under and around the polder have occured 5 to 7 years after the start of the reclamation of the Markerwaard polder.
2. The maximum drawdown in the upper Pleistocene aquifer will be 0.25 to 1.25 metres in the area situated within a distance of 5 to 10 kilometres from the coast of North Holland.
3. These drawdowns can feasibly be countered by means of artificial recharge of water into the Pleistocene aquifers both by application of recharge wells and dredging infiltration grooves. Recharge wells cost less initially then infiltration grooves, but are more expensive to maintain than grooves. It seems possible that these countermeasures could gradually be phased out within circa 30 years without significant damage.
4. A relationship was established between the extent of a countermeasure (quantity of injection water) and damage reduction, both for recharge wells and infiltration grooves.
5. A method has been developed to weigh the cost of countermeasures against damage to buildings and

infrastructure, and thus allow the best solution to be chosen.

6. If it is decided to reclaim the Markerwaard polder, further research will be necessary on the operational and technical aspects of the countermeasures studied. Experiments on a semi-technical scale with recharge wells and infiltration grooves will have to be made on location.

5 REFERENCES

1. Rijkswaterstaat, Dienst Informatieverwerking, 1978; FIESTA (Finite Elements model for STeady flow in Aquifers.
2. Rijkswaterstaat, Dienst der Zuiderzeewerken, Nota 287, 1976; Geohydrologische gevolgen van de aanleg van de Markerwaard.
3. IWACO B.V., Rapport 631, 1980; De technische mogelijkheden van het infiltreren van water in de bodem door middel van geboorde putten, ter verhoging van de druk in het grondwater.
4. IWACO B.V., Rapport 420-E 2, 1982; Geohydrologisch onderzoek Markerwaard. FIESTA-berekeningen naar de gevolgen van eventuele aanleg van de Markerwaard voor het huidige grondwaterregiem.
5. Heidemij B.V., Rapport 662-81/3, Arnhem, 1982; Een onderzoek in Noord-Holland naar de geohydrologische aspecten van de aanleg van de Markerwaard. Cultuurtechnisch onderzoek.

6. Heidemij B.V. Haarlem, Rapport 701-82/3, 1983; Een onderzoek in Noord-Holland naar de geohydrologische aspecten van de aanleg van de Markerwaard (geotechnisch rapport).

7. Adviesbureau voor Bouwtechniek B.V., Rapport SPMH 3020, Arnhem, 1982; Funderingstechnisch onderzoek. Eindrapport.

8. IWACO B.V., Rapport 420-F, Rotterdam, 1982; Tegenmaatregelen. Geohydrologisch onderzoek Markerwaard.

9. Laboratorium voor Grondmechanica, Rapport CO-242060/451, 1983; Invloed aanleg Markerwaard. Tijdsafhankelijke aspecten.

10. Rijkswaterstaat, directie Waterhuishouding en Waterbeweging, District Noord, WWNO-N-83.0002; Een onderzoek in Noord-Holland naar de geohydrologische aspecten van de aanleg van de Markerwaard.
Gedeeltelijk tegengaan van stijghoogtedalingen en het effect daarvan op de te verwachten herstelkosten aan bebouwing en infrastructuur.

11. Rijkswaterstaat, directie Waterhuishouding en Waterbeweging, District Noord, WWNO-N-82.0010; Een onderzoek in Noord-Holland naar de geohydrologische aspecten van de aanleg van de Markerwaard.

12. Rijks Geologische Dienst, Rapport 10374, 1981; Geologisch onderzoek in verband met de studie schadeverwachting inpoldering Markerwaard.

13. Instituut voor Cultuurtechniek en Waterhuishouding, Werkgroep Noord-Holland, Regionale studies 16, Wageningen, 1983; Kwaliteit en kwantiteit van grond- en oppervlaktewater in Noord-Holland benoorden het IJ.

WAT WETEN WE NU VAN DIEPINFILTRATIE?

Een poging tot synthese

J.H. Peters, Keuringsinstituut voor Waterleidingartikelen, KIWA N.V., Nieuwegein

1 INLEIDING

Een persput is niet echt een uitvinding. Het ligt voor de hand dat als waarde gehecht wordt aan een bodempassage in het produktieproces van oppervlaktewater tot drinkwater en als de realiseerbaarheid of wenselijkheid van open infiltratie - om welke reden dan ook - daalt, als de capaciteit van een begrensd infiltratiegebied moet worden verhoogd, of als een voorraad tussen inname en uiteindelijke drinkwaterzuivering moet worden aangebracht of een grotere bescherming gewenst is, dat dan gebruik gemaakt wordt van diepe pakketten. Waterleidingbedrijven startten dan ook al met kleinschalige persputexperimenten in de jaren 50 en 60. De ervaringen waren echter niet onverdeeld gunstig (Huijboom, dit rapport; Duijve, 1961). Ook toen was verstopping van de putten het grootste probleem. Het is geen boude bewering te stellen dat dat altijd wel zo zal blijven.

De proefnemingen die in het laatste decennium zijn uitgevoerd, hebben aan het licht gebracht waardoor deze verstopping ontstaat, hoe deze verstopping kan worden voorkomen en - in mindere mate - hoe de verstopping kan worden verwijderd (Olsthoorn, 1982). Aan het eind van de jaren 70 en het begin van de jaren 80 zijn echter vele nieuwe experimenten gestart of zijn plannen daartoe ontwikkeld. Hiervan wordt in dit rapport melding gemaakt. Deze nog lopende experimenten geven een verdieping van het in-

zicht en leiden wellicht tot een bijstelling van de resultaten en conclusies van het onderzoek dat dan ook geenszins als afgerond mag worden beschouwd. Het onderzoek is nu in een fase gekomen waarin naast de verstoppingsaspecten enkele andere (niet alleen technische) aspecten die te maken hebben met het daadwerkelijk ontwerpen en exploiteren van een persputsysteem, de aandacht moeten krijgen. Immers de techniek van persputinfiltratie is een duidelijk andere dan die van open infiltratie. Met name die waterleidingbedrijven die de laatste jaren op wat grotere schaal experimenten doen met persputten, hebben zeer waardevolle ervaringen opgedaan met tal van deelaspecten. Getracht is deze ervaringen in deze bijdrage samen te vatten. Hierbij doet zich de complicatie voor dat de proeven onderling moeilijk vergelijkbaar zijn. Ze zijn moeilijk onder één noemer te brengen. Zo loopt de kwaliteit van het voedingwater uiteen; een en ander is natuurlijk afhankelijk van de mate van voorzuivering. De proeven worden - zoals in de bijdragen kan worden gelezen - echter ook beïnvloed door de bedrijfstechnische mogelijkheden - en wellicht voorkeuren - en het idee achter de toepassing. Interessant is de ontwikkeling die "dual-purpose"-toepassing van persputten doormaakt. Seizoensopslag door afwisselend injectie en onttrekking van zoet water met dezelfde put - of het plan daartoe - wordt onder andere beschreven door Kieft, Wildschut en De Kraa in hun afzonderlijke bijdragen aan dit rapport. Persputten kennen nog een heel scala aan andere toepassingen en mogelijkheden (Peters, 1982). Diepinfiltratie wordt echter steeds nadrukkelijker genoemd als veelbelovend alternatief voor open infiltratie, de infiltratie van (voorgezuiverd) oppervlaktewater middels plassen, panden, pannen of geulen. Velen hebben hun onderzoek dan ook hierop toegespitst.

2 PLAATSKEUZE

Bij een directe methode van kunstmatige infiltratie is het mogelijk de plaatsen van inname uit oppervlaktewater, de voorzuivering, de infiltratie en de nazuivering relatief onafhankelijk van elkaar te kiezen. Een en ander wordt natuurlijk sterk bepaald door enerzijds de geschiedenis en anderzijds de afstanden waarover het water economisch gezien te transporteren is (in dit verband kan worden opgemerkt dat het bedoelde transport vaak voor een groot deel de kostprijs van het geproduceerde drinkwater bepaalt). Vaak worden echter een aantal stappen op één locatie gecombineerd. Elke stap stelt zijn eigen eisen voor wat betreft ruimte en omgeving. De infiltratie stelt vanzelfsprekend andere eisen dan de inname uit oppervlaktewater.

2.1 De locatie van diepinfiltratie

Infiltratie zal moeten gebeuren op geohydrologisch gezien goed onderzochte of te onderzoeken locaties. Zo zal de opbouw van de bodem en de verbreiding van watervoerende en min of meer afsluitende lagen goed bekend moeten zijn. Daarnaast dient er sprake te zijn van een "onbesproken verleden"; indien zich ernstige bodemverontreinigingen hebben voorgedaan of kunnen voordoen, is het verstandig infiltratie ten behoeve van de drinkwatervoorziening bij voorkeur elders te realiseren. Ook wenselijk is het dat de "target-aquifer" (het pakket waarin pers- en winputten worden geplaatst) aan de bovenzijde wordt afgesloten door dikke slechtdoorlatende lagen. Dit om een aantal redenen. Enerzijds wordt daardoor het risico van verontreiniging van het geëxploiteerde watervoerende pakket beperkt, anderzijds is daar-

door in het freatische grondwater nauwelijks zowel in grondwaterstand als in grondwaterkwaliteit een invloed van de persputinfiltratie merkbaar. De grondwaterstand zal bij afwezigheid van bedoelde lagen fluctuaties vertonen indien ten tijde van onderbroken infiltratie (om redenen van kwantiteit, calamiteit of persputregeneraties) de winning wordt gecontinueerd om tegemoet te komen aan de constante vraag naar water.
Als er sprake is van een natuurlijke grondwaterstroming die onafhankelijk is van de stroming veroorzaakt door de infiltratie- en winmiddelen, dan kan het zijn dat de onttrokken hoeveelheid voor een gedeelte uit natuurlijk grondwater bestaat en dat, als totale infiltratie en onttrekking aan elkaar gelijk zijn, zo'n zelfde hoeveelheid van het kunstmatig geïnfiltreerde water met de natuurlijke afstroming verdwijnt. Als zowel infiltratie- als winmiddelen in hetzelfde pakket met volledig spanningswater zijn gesitueerd dan kan de uitwisseling tussen natuurlijk grondwater en infiltratiewater theoretisch volledig worden voorkomen als de infiltratiemiddelen "bovenstrooms" van de winmiddelen worden geplaatst. Omdat de infiltratie groter en kleiner kan zijn dan de onttrekking en zowel infiltratie als onttrekking en de natuurlijke grondwaterstroming (in grootte en in richting) plaatselijk en in de tijd kunnen variëren, is het niet mogelijk over factoren als verlies- of terugwinpercentages algemeen geldende uitspraken te doen. Wel kan worden gesteld dat de uitwisseling van "natuurlijk" grondwater door infiltratiewater beperkt kan blijven tot een klein gebied. Andere criteria voor de plaatsing van de win- en infiltratiemiddelen zijn onder andere gegeven door Zaadnoordijk & Visser en Peters in bijdragen aan dit rapport.

De praktijk van de bescherming van waterwingebieden heeft uitgewezen dat een afdoende bescherming in grote gebieden vaak op praktische en uitvoeringstechnische bezwaren stuit. Het voorkómen dat verontreiniging optreedt in het stromingsgebied is pas mogelijk gebleken indien dit gebied voor een groot gedeelte in eigen beheer of eigendom wordt verkregen. Risico's voor de levering kunnen op die manier sterk worden gereduceerd. Het kan worden gesteld dat in dicht bebouwde gebieden een doelmatige bescherming welhaast onmogelijk is. Bovendien gaat de noodzakelijke leidingaanleg dan met extra (maatschappelijke) kosten gepaard, zoals de geschiedenis van de aanleg van leidingen in bewoonde gebieden ons dat leert. Tal van procedures kunnen leiden tot vertragingen en exponentieel stijgende rentelasten (bouwrente). Anderzijds zal realisatie en exploitatie van een persputsysteem in gebieden die reeds voor de watervoorziening maar zeker ook voor natuur- en milieubehoud van belang zijn, met name door de noodzakelijke vergraving (ten behoeve van leidingaanleg) en door verstoring van rust en bodemflora een achteruitgang bewerkstelligen voor wat betreft de natuurlijke waarden van de omgeving. Het zou interessant zijn te onderzoeken wat de invloed is die aanleg en exploitatie hebben op deze waarden en hoe die invloed kan worden beperkt.

2.2 De locatie van het innamepunt

De inname van oppervlaktewater wordt veeleer bepaald door vergunningsprocedures en plaatselijke omstandigheden als afstanden en mogelijkheden voor wat betreft ruimte dan door vrije keuzes (zie bijvoorbeeld Haasnoot, 1981). Indien een keuze uit verschillende "bronnen" toch mogelijk is, zal een

groot aantal factoren een rol spelen. Is het water stagnant of stromend (algen, zwevende stof), wat is het niveau van de verontreiniging (organisch, anorganisch, zware metalen, radioactiviteit), is hierin een stijgende of dalende tendens waar te nemen, in hoeverre is er sprake van "grensoverschrijdende" verontreiniging, wat kan het gevolg zijn van internationaal overleg met betrekking tot lozingen, hoe zijn de ontwikkelingen voor wat betreft industrialisatie en afvalwaterzuivering in het stroomgebied, is het mogelijk risico's door calamiteiten en lage afvoeren te kwantificeren etc. Al deze overwegingen hebben echter hun gevolgen voor de eisen die gesteld moeten worden aan zowel voorzuivering, transport als persputsysteem (voorraadaspecten). Uitgaande van de (in de toekomst) aangeboden kwaliteit zal de voorzuivering (voor zover er niet sprake is van een innamestop) ten allen tijde het oppervlaktewater moeten bereiden tot water dat zonder grote operationele problemen met persputten te infiltreren is. De aangeboden kwaliteit bepaalt ook minimum verblijftijd, gewenste kwaliteitsafvlakking en voorraadvorming en is aldus van belang voor de inrichting van het persputsysteem.
De plaats van een indirecte inname van "oppervlaktewater" als oevergrondwater wordt door volledig andere voorwaarden bepaald (zie bijvoorbeeld de bijdrage van Van der Laan en Jonkman in dit rapport). Gevolgen van de oevergrondwaterwinning (zettingen) moeten worden bestudeerd indien die zal worden gerealiseerd langs de rivieren in de Nederlandse veenweidegebieden.

3 VOORZUIVERING EN VERSTOPPING

Overal in de wereld worden persputten met wisselend

succes toegepast. Op plaatsen waar sprake is van succes wordt dat wellicht veroorzaakt door een verregaande voorzuivering maar meestal omdat er sprake is van enorm grove formaties veelal met secundaire doorlatendheid en porositeit in de vorm van "fractures" (zie Bianchi et al, 1978). In Nederland daarentegen zijn de Pleistocene watervoerende pakketten samengesteld uit zandige gronden met korreldiameters in de orde van 0,1 tot 0,5 mm (met soms plaatselijk grindlagen) en doorlatendheden van minder dan 10 tot enkele tientallen meters per dag (dit terwijl bijvoorbeeld in Duitsland wel wordt geadviseerd persputten pas toe te passen bij doorlatendheden groter dan 90 meter per dag). Ter plaatse van de boorgatwand (de overgang van de noodzakelijkerwijs tevens fijne omstorting naar de formatie) wordt dan ook zwevende stof afgevangen met daarbij onder andere de aan die deeltjes gebonden organische stof die voor micro-organismen assimileerbaar is. Aldus resulteert dit in een samenspel tussen mechanische en biologische factoren. Wellicht vangt het slijm dat bij bacteriegroei kan worden gevormd (in filteropeningen en in het begin van de omstorting) juist extra zwevende stof af en versnelt aldus het verstoppingsproces. In hoeverre bij persputverstopping biologische factoren een rol spelen, wordt wellicht niet zozeer bepaald door kiemgetallen in het voedingwater als wel door voor de groei belangrijke omstandigheden en invloeden als voedingsstoffen (substraat), temperatuur, chloorgehalte, etc.. In buitenlandse literatuur daarentegen wordt vaak een eventuele bacteriële verontreiniging van juist het infiltratiewater bestudeerd (Gass, 1981).
Het onderzoek naar de kwaliteitsparameters van met persputten te infiltreren water richt zich momen-

teel op een drietal metingen en bepalingen.

Op de eerste plaats de MFI (Membraan Filtratie Index). Dit is een maat voor de hoeveelheid in het water aanwezige colloïden en zwevende stoffen. In deze bepaling wordt gemeten wat (de verandering van) het debiet is dat bij een bepaalde temperatuur en onder een constante werkdruk stroomt door een gestandaardiseerd membraanfilter met kleine poriën van een bepaalde diameter (zie Schippers en Verdouw, dit rapport). Eerste inventarisaties geven aan dat met een MFI van de orde 100 s/l^2 (gemeten bij 200 kPa, 0,45 mu en 10 °C) infiltratie door middel van putten in Nederlandse Pleistocene zanden waarschijnlijk met grote operationele problemen gepaard zal gaan. Indien de MFI een waarde heeft in de orde van 10 s/l^2 zullen de resultaten naar verwachting al veel beter zijn. Door regelmatig doch kortstondig terug te pompen met een debiet dat bijvoorbeeld een factor 3 à 4 hoger is dan het infiltratiedebiet zal een groot gedeelte van de verstopping kunnen worden verwijderd. De bij deze kwaliteit van het water optredende korte looptijden van enkele dagen tot weken maken het noodzakelijk te onderzoeken in hoeverre het terugpompen kan worden geautomatiseerd (Konijnenberg, dit rapport). Als door een zorgvuldige voorzuivering blijvend een MFI kan worden bereikt in de range van 1 tot 5 s/l^2 (zoals bijvoorbeeld bij de experimenten beschreven door Kieft; Schuurmans en Steinmetz; Van der Laan en Jonkman, in dit rapport) dan kunnen wellicht looptijden van enkele maanden en misschien zelfs jaren worden verwacht. Het moet worden opgemerkt dat de getallen die genoemd zijn, slechts bedoeld zijn als indicatie omdat in ieder geval ook de ondergrond hierbij belangrijk is (zie ook paragraaf

5.3). Immers het onderzoek naar de mate waarin de MFI een aanwijzing kan geven voor de snelheid van "mechanische" verstopping, is nog niet voltooid. Een voorbeeld van de wat onduidelijke relatie tussen MFI en verstoppingssnelheid kan worden gevonden in de bijdrage van Lebouille aan dit rapport. In de eerste maanden van 1983 nam de "blijvende" verstopping van de daar beschreven proefput af terwijl de waterkwaliteit in MFI uitgedrukt toch niet uitgesproken goed was. Ook was de terugpompfrequentie laag. Ook hieruit kan geconcludeerd worden dat een voorzuivering voor persputinfiltratie niet enkel en alleen op een MFI-waarde mag worden afgestemd.

In een oriënterend stadium is het onderzoek naar de verstopping door biologische factoren. Er zijn duidelijke aanwijzingen dat die inderdaad een rol spelen. Zo neemt vaak de weerstand van een enigszins verstopte persput af indien deze enkele dagen tot weken wordt stopgezet. Het hierna onttrokken water verspreidt dan vaak een onaangename reuk. Een andere aanwijzing voor "biologische" verstopping is het effect van een oxydatiemiddel als bijvoorbeeld chloorbleekloog bij putregeneratie (Schuurmans en Steinmetz; Konijnenberg, dit rapport). Ook wordt waargenomen dat het verstoppingsgedrag een directe relatie lijkt te hebben met de temperatuur van het geïnjecteerde water. Verstopping of regeneratiefrequentie is namelijk veelal het grootst in de zomer (Lebouille; Konijnenberg; Schuurmans en Steinmetz, dit rapport). Dit zou kunnen worden beredeneerd omdat bij een verandering van de watertemperatuur bacteriën een gewijzigde groeisnelheid hebben maar ook door een invloed te veronderstellen van de temperatuur op de vorm en afmetingen van de colloïden, de kwaliteit van het ruwe water, de wer-

king van het voorzuiveringsproces of de kwaliteit van het water tijdens het verblijf in de transportleiding van de zuivering naar de infiltratie. Momenteel richt het onderzoek zich op de factoren temperatuur en AOC-belasting (AOC is de concentratie voor micro-organismen assimileerbaar organisch koolstof). De AOC-bepaling is ontwikkeld om een indruk te krijgen van de nagroei-potentie van drinkwater (zie onder andere Hijnen en Van der Kooij, dit rapport). Een ernstige biologische verstopping van persputten is te ondervangen door een lichte chloring van het infiltratiewater, iets dat niet de voorkeur heeft mede gezien de neveneffecten van deze desinfectie (de vorming van toxisch verdachte haloformen). Onduidelijk is nog wat precies de bezwaren zijn uit het oogpunt van volksgezondheid tegen een dergelijke bacteriegroeiremmende maatregel. Immers een en ander gaat aan de bodempassage vooraf. Wellicht is ook door een periodieke chloordosering persputverstopping tegen te gaan terwijl zo het chloorgebruik kan worden beperkt. Ook komen wellicht andere stoffen zoals bijvoorbeeld waterstofperoxide in aanmerking.

Voor zowel de mechanische, de chemische als de biologische aspecten van het onderzoek van de verstopping van persputten kan het boven de grond simuleren van de verstopping in zogenaamde parallel- of meeloopfilters (MLF) in een behoefte voorzien en van wezenlijke betekenis zijn omdat met dergelijke filters op eenvoudige wijze in situ en op voorhand meerdere watersoorten op laboratoriumschaal kunnen worden getest zonder dat hiervoor altijd uitgebreide en kostbare experimenten met echte putten nodig zijn. Bovendien kan hiermee, indien ze parallel aan bestaande persputten worden geplaatst, de onder-

grondse gang van zaken bij de putten worden gecontroleerd. Het moet nog worden onderzocht in hoeverre het verstoppingsgedrag van een MLF overeenkomt met dat van een persput en de resultaten nog vertaling behoeven. Hiertoe zullen naast de proefpersputten in Nederland meeloopfilters worden geplaatst (zie Schippers en Verdouw, dit rapport).

Experimenten tonen aan dat persputten ook met een lage MFI soms snel verstoppen op een mechanische wijze. Indien in het water deeltjes van wat grotere afmetingen - die slechts een geringe bijdrage aan de MFI geven - aanwezig zijn, is mogelijk de troebelheid een meer geschikte maat voor een te verwachten weerstandsopbouw door mechanische verstopping in de filterspleten of de omstorting (zie Konijnenberg, dit rapport). Ook een sterk kalkafzettend water kan mechanische verstopping geven door een neerslagvorming in de formatie of de omstorting ("chemische" verstopping). Mechanische verstopping kan ook onstaan door lucht- of gasbellen in het infiltratiewater bijvoorbeeld door luchtaanzuiging en onderdrukken in de infiltratieleiding ("fysische" verstopping). Dit kan door een juist ontwerp worden voorkomen. De verwachting is dat bij diepe putten deze problemen minder ernstig zullen zijn omdat bij de dan optredende hoge drukken de oplosbaarheden dienovereenkomstig hoger zijn. Bij een retourbemaling met (oververzadigd) water in een minder diep pakket is verstopping door kleine gasbellen echter niet ondenkbaar.

De wijze waarop persputverstopping zich openbaart, ligt voor de hand. Bij een constant infiltratiedebiet zal verstopping resulteren in verhoogde drukken en waterstanden in de put en in de omstorting

wellicht (bij open putten) met overlopen van de put en inundatie van de putkelder als gevolg. Een andere bovengrens van de druk in de put hangt samen met de stabiliteit van de bodem rond de put. Bij het opvoeren van de druk groeit de kans dat de bodem splijt of opbarst zodat het water de weg van de minste weerstand kan nemen en bijvoorbeeld langs de casing het maaiveld kan bereiken. Indien in de put de druk beperkt gehouden wordt, zal persputverstopping tot gevolg hebben dat het infiltratiedebiet zal afnemen tot beneden een economisch zinvol niveau.

Een belangrijk begrip in de voorzuivering is de bedrijfszekerheid. Immers bijvoorbeeld bij opstarten of andere debietswisselingen of operationele problemen in de voorzuivering zullen MFI-en troebelheidspieken of andere "dips" in de kwaliteit zoveel mogelijk moeten worden voorkomen aangezien persputverstopping daar erg gevoelig voor zal zijn.

Resumerend kan worden gesteld dat ook de voorzuivering een optimaliseringsprobleem is. De directe (chemicaliën) en indirecte (bijvoorbeeld meer slib) kosten van uitbreiding van de zuivering (extra stap, in-line coagulatie, hogere doseringen van bijvoorbeeld vlokmiddelen of een extra filtratiestap juist vóór de infiltratie) zullen moeten worden afgewogen tegen problemen in de bedrijfsvoering en kosten van regeneraties. Ook kan het zijn dat een bepaalde waterkwaliteit vanwege de vergunning vereist is.

Bij enkele van de in dit rapport beschreven experimenten wordt voor de bereiding van het voedingwater voor de persput gebruik gemaakt van "pandbodempas-

sage" (zie ook Bianchi et al, 1978 en Nightengale et al, 1981). Op deze wijze wordt het water geconditioneerd (zie Lebouille; Schuurmans en Steinmetz, dit rapport). Dit systeem heeft zich de laatste jaren ontwikkeld tot een techniek waarmee weliswaar met wisselend succes voedingwater voor proefpersputten wordt gemaakt. De techniek komt wellicht ook op andere plaatsen in aanmerking (zie bijvoorbeeld Zaadnoordijk en Visser, dit rapport), een reden waarom wat verder hierop wordt ingegaan.

Sinds de aanleg van de open infiltratiewerken heeft zich (door uitbreiding van de voorzuivering) een verbetering ingezet van de kwaliteit van het water zoals dat in de infiltratiegebieden wordt aangeboden. Dit zou er misschien toe kunnen bijdragen dat niet de inzijgsnelheid in de infiltratieplassen en -geulen een beperkende factor is en dat deze kan worden vergroot zonder dat operationele problemen met verstopping van de bodem van de plassen optreden. Een vergroting van alleen de inzijgsnelheden kan worden bewerkstelligd door een systeem van drains in (het midden van) de bodem van bestaande panden en geulen. Grondwaterstanden en verblijftijden van het bestaande systeem zullen hierdoor nauwelijks veranderen. Onderzoek naar de wijze waarop een dergelijk systeem dient te worden bedreven, zou ertoe kunnen leiden dat de jaarcapaciteit van bestaande infiltratieplaatsen kan worden vergroot door ter plaatse ook het diepe pakket te gebruiken. Het met behulp van de drains onttrokken water kan door middel van putten worden geïnfiltreerd wellicht met gebruikmaking van de bestaande leidingen en zonder dat het aantal of de oppervlakte van de open infiltratieplassen moet worden vergroot. Ook kan door geleidelijk water met persputten in het

diepduin te infiltreren - en mogelijk zout of brak water te verdringen - een voorraad worden aangelegd. Bij onttrekking ten tijde van calamiteiten zullen slechts beperkte grondwaterstandsverlagingen in het bovenduin worden veroorzaakt. In het algemeen kan worden gesteld dat voorraadbeheer zich beter kan voltrekken in het diepduin omdat ongewenste peilvariaties van de grondwaterstand dan beperkt blijven. Een en ander is afhankelijk van de dikte, weerstand en bergingscoëfficiënt van afsluitende slechtdoorlatende lagen en de bergingscoëfficiënt van het freatische pakket.
De lopende experimenten wijzen uit dat een langdurige en storingsvrije diepinfiltratie "via pandbodempassage" soms problematisch is. De indruk bestaat dat naast draindiepte, drainmateriaal, bestaande grondwaterstroming, "ouderdom" van het pand en capaciteit van de drain ook andere factoren belangrijk zijn. Bijvoorbeeld het gehalte organische stof in de bodem. Bij een (plaatselijk) hoog zuurstofverbruik zal het met de drains gewonnen water (plaatselijk) weinig zuurstof bevatten zodat ijzer in oplossing kan gaan. Ook kan dat optreden in de zomer als door de hoge lichtintensiteit door algengroei de zuurstofhuishouding in de panden en geulen instabiel wordt. De in de zomer tevens hoge temperatuur geeft dan aanleiding tot de groei van onder andere draadvormige ijzerbacteriën (zie Schuurmans en Steinmetz, dit rapport) in stijgbuis en filterspleten. Leptothrixbacteriën (schedevormend, met ijzerafzettingen) zijn gevonden in het uit een proefput van het PWN (de IP1) opgepompte water (Hijnen, 1984). Foto 1 toont het binnenste van het filter van deze put tijdens een video-inspectie op 10 augustus 1984. De put verstopt in de filterspleten en in het begin van de omstorting (zie Lebouille, dit rapport).

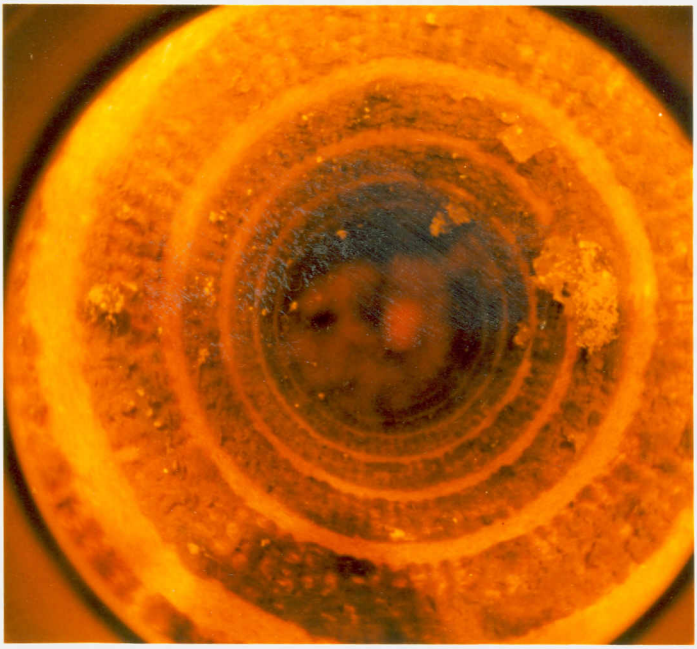


Foto 1 - Foto gemaakt (tijdens een video-inspectie op 10 augustus 1984) op een diepte van 77 meter van het filter van de IP1. Verstoppend materiaal bevindt zich in de filterspleten.

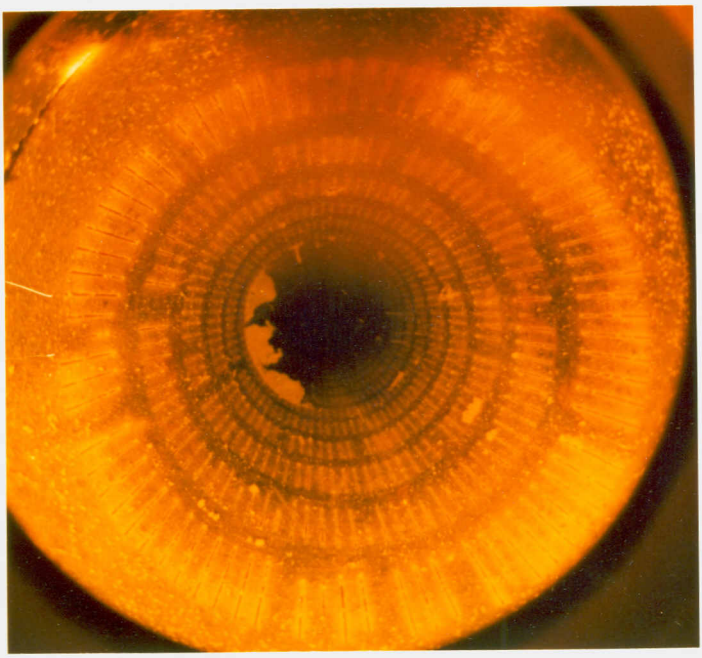


Foto 2 - Foto gemaakt van de IP2. Diepte 62,60 meter. Filterspleten relatief schoon. Verstoppend materiaal nauwelijks zichtbaar. Wél aangroei.

Foto 2 is gemaakt van het filter van een andere proefput (de IP2). Verstoppend materiaal is minder goed waar te nemen; dit bevindt zich op de boorgatwand. In het uit deze put opgepompte water zijn kleine compacte ijzervlokjes waargenomen (Hijnen, 1984). Al met al is een en ander een voldoende reden om ook aan het ijzergehalte van het voedingwater voor persputten meer aandacht te geven en het onderzoek niet uitsluitend af te stemmen op de eerder in dit hoofdstuk genoemde kwaliteitsparameters (ook een hoog percentage ijzer in de röntgen-microanalyse van regeneratiewater van de persput te Haren wijst al in die richting, zie Kieft, dit rapport).

4 TRANSPORT

De DIP-DWL was een put van de Duinwaterleiding van Den Haag die in de jaren 1973 tot 1980 gevoed werd met water "af pompstation" (zie Olsthoorn, 1982). "Drinkwaterkwaliteit" kan echter in het algemeen niet garanderen dat problemen met de bedrijfsvoering van persputten achterwege blijven. Bij het bedoelde experiment zal namelijk waarschijnlijk ook een rol hebben gespeeld dat het water nauwelijks een verblijf in distributieleidingen heeft gekend (en dat het water in feite reeds een bodempassage (de open infiltratie) achter de rug had).
Er zijn aanwijzingen dat ook bij grote afstanden tussen inname en voorzuivering enerzijds en infiltratie anderzijds het verblijf van het water in de leiding van belang is voor de parameters die van belang geacht worden voor de verstopping van persputten. Immers het water zal doorgaans niet tot drinkwaternormen zijn voorgezuiverd waardoor - meer nog dan in distributieleidingen - door allerlei

processen de kwaliteit kan veranderen. Processen als sedimentatie, opwoeling, biologische activiteit in de vorm van nagroei en/of afstervingsmechnismen, losraken van bacteriën of hogere organismen, corrosie etc. zullen worden beïnvloed door het leidingmateriaal, de verblijftijd, (het tijdstip van) de ingebruikname, de (omgevings-)temperatuur, debietswisselingen en eventuele nawerkingen van en veranderingen in het zuiveringsproces. Als door de genoemde processen opgeloste organische en anorganische stof (resten coagulatiemiddel) wordt omgezet in zwevende stof, colloïden of voor micro-organismen assimileerbaar organische koolstof zal het verblijf in de leiding een duidelijke verslechtering van de kwaliteit als voedingwater voor persputten betekenen.
Vanzelfsprekend is dat indien - over een grote afstand getransporteerd - water voor de infiltratie middels persputten weer in contact komt met de open lucht bijvoorbeeld in niet afgeschermde verdeelvijvers, de kwaliteit van het water enorm kan verslechteren door zoninstraling en het inwaaien van bladeren en stof. Ook stelt het transport wellicht andere eisen aan de voorzuivering dan de uiteindelijke infiltratie. Het is wellicht noodzakelijk om te onderzoeken of de zuivering tot "transporteerbaar" en "persputinfiltreerbaar" water te scheiden is. Immers ook de wensen en eisen die eventueel door verschillende afnemers gesteld worden aan het water "af voorzuivering" verschillen. Ook lijkt het zinvol te bestuderen wat het effect en de kosten zijn van een extra zuiveringsstap juist vóór de infiltratie temeer omdat persputverstopping kritisch zal reageren op een tijdelijk slechte kwaliteit ten gevolge van wijzigingen in de voorzuivering of bij het periodiek starten van een chloor-

dosering (met als doel het voorkomen van nagroei tijdens transport).

5 DE PERSPUT

Net zoals bij winputten zullen slecht ontworpen, geconstrueerde of ontwikkelde persputten bij voortduring problemen te zien geven. Deze zullen zich openbaren in energieverliezen, verstoppingsproblemen, regeneratiekosten, weinig effectieve bedrijfsuren en een korte levensduur. Gedegen onderzoek naar het ontwerp en de constructie van persputten kan kosten en problemen besparen.
In het begin van het persputonderzoek zijn bestaande winputten gebruikt voor de infiltratie. Later zijn persputten gebouwd die zich niet wezenlijk van winputten onderscheiden en je zou de vraag kunnen stellen of dit juist is aangezien door de omkering van stroomrichting toch een aantal aspecten verandert.
Het is verstandig ook bij persputten de verbinding tussen stijgbuis en putkop zó te maken dat beweging ten gevolge van zettingen mogelijk is. "Verontreiniging" van het watervoerend pakket door een neerwaartse stroming langs de stijgbuis zal bij infiltratie niet optreden en in ieder geval niet bezwaarlijk zijn bij putten die slechts als infiltratiemiddel worden gebruikt.

5.1 Dual of single purpose

Bij persputonderzoek is soms sprake van "dual-purpose-putten", putten die zowel voor infiltreren als voor onttrekken worden gebruikt (zie bijvoorbeeld Kieft; Wildschut; De Kraa, dit rapport). Beide functies stellen echter een aantal verschillende

eisen aan de put en aan de toevoer- en afvoerleidingen. Zo zal een leiding waarschijnlijk beter niet gebruikt kunnen worden (tenzij spuimogelijkheden aanwezig zijn) voor én de afvoer van opgepompt water én de toevoer van te infiltreren water. Beide waterkwaliteiten kunnen hierdoor verslechteren. Immers het te infiltreren water zou ijzerhydroxidevlokken kunnen gaan bevatten en het opgepompte water zou dezelfde nadelen gaan vertonen als verbonden aan een open winning van infiltratiewater, namelijk verlies van bacteriologische en virologische betrouwbaarheid. Het geheel aan voorzieningen dat moet worden getroffen aan de put kan een combinatie van de beide functies onaantrekkelijk maken. Door een put als dual-purpose-put te gebruiken is het gevaar van "cross-connection" niet denkbeeldig. Een ander nadeel van dual-purpose-putten is dat door de omschakeling van infiltreren op onttrekken (en omgekeerd) grote stijghoogteveranderingen worden geïntroduceerd die zich voortplanten tot in het freatische pakket en daar grondwaterstandsfluctuaties te zien kunnen geven, iets dat bij voorkeur moet worden voorkomen.
Een dual-purpose-put heeft echter ook voordelen. Zo zal de tijdens het infiltratieseizoen opgetreden "blijvende weerstand" (de weerstand die tijdens een korte bepomping niet verdwijnt) langzaam afnemen tijdens het winseizoen. Ook is het niet ondenkbaar dat een dual-purpose-put werkt als "ondergrondse ontijzeringsput". Het principe van ondergrondse ontijzering is onder andere beschreven door Van Beek (1984). Bij "multicycle-operation" (het meermalen injecteren in en onttrekken uit een voor een gedeelte brak pakket) zullen bovendien de terugwinpercentages toenemen bij voorraadvorming (Peters, 1983).

5.2 De boring

Experimenten tonen aan dat als de kwaliteit van het water redelijk is, toch vaak verstopping optreedt op de boorgatwand. Verstoppend materiaal wordt dan afgevangen daar waar de omstorting overgaat in de formatie (de boorgatwand). Het ligt dan ook voor de hand om - indien verstopping op de boorgatwand te verwachten is - deze te vergroten. De hoeveelheid verstoppend materiaal zal zich over een groter oppervlak verdelen zodat met de lagere snelheid op de boorgatwand dit resulteert in een slechts langzame weerstandsopbouw (gemeten in cm per m^3/uur volumestroom gecorrigeerd naar het viscositeitseffect bij een wisselende temperatuur). In Nederland zijn reeds met succes proefboringen uitgevoerd met een diameter van 2,40 m en een diepte van 40 m. Het verdient wellicht aanbeveling te onderzoeken of dergelijke boortechnieken op economische en veilige wijze kunnen worden gebruikt bij het boren ten behoeve van persputinfiltratie. Ofschoon de boortijd (een kostenfactor) wordt bepaald door de hoeveelheid te verwijderen zand is het waarschijnlijk dat het boren ongeveer 5 maal zo duur zal zijn bij een 5 maal zo grote diameter. Echter, de boorkosten maken slechts een gedeelte uit van de totale vaste kosten van een put.
De boorgatwand kan worden vergroot door (plaatselijk) met grotere diameters te boren (uitklapbare boorkoppen) en door het verdiepen van het boorgat.
Ook is het mogelijk om na het bereiken van de gewenste diepte, de boring met een kleinere diameter voort te zetten. Op een dergelijke wijze kan informatie worden verkregen over de ondergrond onder de putten en ontstaat tevens de mogelijkheid tot het plaatsen van peilfilters of zoutwachters ("zout-

wachterstaart"), zie Lebouille; Wildschut, dit rapport. Immers ook een ruime omstorting zal bevorderen dat het infiltratiewater verdeeld over een groot oppervlak de formatie binnenstroomt. De functie van de omstorting is tevens het filter te ondersteunen, te voorkomen dat fijn zand in de put komt bij tijdelijk onttrekken (ten behoeve van regenereren of ontwikkelen van de put) en ter beperking van de natuurlijke (hydraulische) weerstand van de put. Tevens wordt in de omstorting al enig verstoppend materiaal afgevangen. Een nadeel van een boorgatwand met een groot oppervlak is dat het minder goed mogelijk is om ten behoeve van ontwikkeling of regeneratie van de put een grote filtratiesnelheid (volumestroomdichtheid) te verwezenlijken op deze boorgatwand.
De gebruikelijke (luchtlift-)zuigboormethode (reverse circulation) kan zoals gezegd tot grote diameters gebruikt worden (een spuitboring slechts bij kleine diameters (tot 0,25 m) maar daarentegen wel met grote boorsnelheden en dus lage kosten). Bij het toenemen van de diepte wordt het kostenverschil dat aanwezig is tussen puls- en spoelboren exponentieel groter. Immers de afstand waarover de puls ("bailer") bewogen moet worden om te worden geleegd, stijgt erg snel. Dat is waarschijnlijk de reden dat pulsboren dieper dan 30 à 40 meter onaantrekkelijk wordt. Ook de kosten van verbuizing van het boorgat nemen dan toe door de "vertoeringen". Pulsen wordt daarom de laatste tijd minder toegepast. De risico's bij deze boormethode zullen daarom stijgen hetgeen invloed heeft op de prijs. Daarnaast kan ook met spoelboringen tegenwoordig een redelijk nauwkeurig inzicht in de lithologische opbouw van de bodem worden verkregen. Wel is het zaak de put goed te ontwikkelen als gebruik gemaakt is

van een boorspoeling.
Een van de functies van een spoeling is het leveren van voldoende tegendruk op de boorgatwand ten einde het boorgat te beveiligen en voor instorten te behoeden. Daarnaast fungeert een boorspoeling als transportmiddel voor het boorgruis en als afpleistering van de boorgatwand omdat om economische (en wellicht ook hygiënische) redenen moet worden voorkomen dat spoeling in de formatie dringt.
Om instroming van grondwater uit ontsloten lagen in het boorgat te voorkomen, dient de druk in het boorgat groter te zijn dan de druk in de formatie. Deze druk wordt geregeld door de hoogte van de vloeistofkom en door het soortelijk gewicht van de spoeling die door het toevoegen van allerlei stoffen (voornamelijk kleimineralen) kan worden beïnvloed (zie ook Wildschut, dit rapport).
Indringing van boorvloeistof in de formatie leidt ertoe, dat de doorlatendheid van de formatie rondom het boorgat wordt verlaagd als gevolg van het boorproces ("skineffect"). De grofheid van de formatie speelt hierbij een belangrijke rol. Zo zal in een grof pakket indringing van boorspoeling moeilijk te voorkomen zijn, waardoor tot op grotere diepte in de boorgatwand een weerstand opgebouwd wordt, die nog moeilijker te verwijderen is door schoonpompen dan een tegen de boorgatwand opgebouwde pleisterkoek. Zelfs indien zonder spoeling wordt geboord, zal doorboren van kleilagen tot gevolg hebben, dat verstoppend materiaal in de vorm van slib de spoeling verontreinigt en door de boorgatwand de formatie binnengaat en afpleistert. Het is zinvol dan tijdelijk over te schakelen op een andere spoelwatervijver (zie bijvoorbeeld Schuurmans en Steinmetz, dit rapport).

Samenvattend kan worden gesteld dat gestreefd dient te worden naar het voorkomen van een spoelingkoek wellicht door pulsen of door gebruik te maken van bacterieel of op andere wijze afbreekbare of desintegrerende (organische) spoelingen die goed afpleisterend werken. Putverstopping door bacteriële processen en andere (hygiënische) gevolgen van de aan de spoeling toegevoegde stoffen ("afbraakversnellers") worden hierdoor echter waarschijnlijker. Het laatste is bij persputten wellicht minder bezwaarlijk dan bij winputten.
Gezien de kosten van een pulsboring kan geconcludeerd worden dat een zuigboring de voorkeur heeft bij een diepte groter dan 30 à 40 meter. Een spoelingkoek kan worden voorkomen door gebruik te maken van gedeeltelijk (Antisol) of volledig (Revert) afbreekbare spoelingen. Een aantal waterleidingbedrijven heeft hiermee reeds ervaringen opgedaan (zie bijvoorbeeld Schuurmans en Steinmetz, dit rapport). Een spoelingkoek kan ook worden voorkomen door een overmaat aan werkwater (bijvoorbeeld drinkwater of water dat uit een naburige put wordt gewonnen) bij de boring. Edworthy (1978) doet ook de aanbeveling op deze wijze boringen voor persputten uit te voeren. Een en ander geldt natuurlijk ook voor winputten.

5.3 Boorgatonderzoek

Persputinfiltratie kan slechts succesvol zijn in een bodem waarvan de opbouw goed bekend is. Echter door tijdens het boren en na het voltooien van het boorgat geofysisch onderzoek te doen, kan zeer veel aanvullende informatie worden verkregen over de exacte plaats van goed en slecht doorlatende lagen zodat in nauw overleg met de boorondernemer de

juiste plaats van bijvoorbeeld filters en kleiproppen kan worden vastgesteld. Zeefanalyses (steekmonsters bij pulsboringen) en pompproef kunnen met weinig extra kosten worden uitgevoerd. De als winput bedoelde putten en de andere persputten kunnen hierbij als waarnemingsput worden gebruikt. Voor de verstopping is het van belang een indruk te hebben van het slib- of lutumgehalte van de formatie, het percentage "fines". Verschil in verstoppingsgedrag van de persputten in Nederland zal voor een gedeelte terug te voeren zijn tot een verschil in grofheid van de formatie (zie paragraaf 9). Het slibgehalte of percentage klei (met name montmorilloniet, "swelling clay") is van belang in verband met het gevaar voor kleidispersie. Voor een bestudering van de geohydrologie is de ontstaansgeschiedenis van de formatie van belang (sedimentologie). De opbouw van het pakket kan tevens bestudeerd worden met traceronderzoek, geothermometrie (zie Peters et al, 1984), elektrisch geleidingsvermogen (zie Konijnenberg, dit rapport) en flowmetingen in de putten.

5.4 Constructie van put en putkelder

De constructie van de putkop wordt voornamelijk bepaald door de uit te voeren regeneraties. De injectieleiding moet zo nauw worden geconstrueerd dat zich geen onderdrukken voordoen en moet beneden de vloeistofspiegel in de put eindigen. Als de put met perslucht wordt geregenereerd, wordt deze toevoerleiding afgesloten waarna de perslucht op diepte in de stijgbuis wordt geblazen. Deze lucht zal zich onder de bovenkant van de afgesloten stijgbuis ophopen en de vloeistofspiegel omlaag drukken. Als de afvoer wordt geopend, treedt de luchtlift in wer-

king. Door met een snelafsluiter de opgehoopte lucht stootsgewijs te laten ontsnappen ("jutteren"), kunnen tijdelijk grote onttrekkingsdebieten worden gehaald die het verstoppende materiaal loswoelen. Dit materiaal wordt door de luchtlift met het onttrokken water (en mogelijk overblijfselen en produkten van een chemische regeneratie) afgevoerd als "regeneratiewater". De drukval die optreedt bij het jutteren vereist een zekere sterkte van het geheel van stijgbuis en filter. Indien PVC gebruikt wordt, zal de drukklasse hierop moeten worden afgestemd.
De handelingen die in de putkelder moeten worden uitgevoerd, vereisen een goede toegankelijkheid hiervan. Een ruimte van 2 bij 2 bij 2 meter zal - zeker voor proefputten - geen overbodige luxe zijn. Persputten zullen naar verwachting in vergelijking met winputten voor wat de bedrijfsvoering betreft nu eenmaal meer aandacht vragen.
Ook de ventilatie van de putkelder is belangrijk. Bekend is dat tijdens en na een chemische regeneratie nooit de putkelder mag worden betreden daar opgehoopte gassen zelfs bij een kort verblijf tot verstikking kunnen leiden. Het verdient dan ook aanbeveling chemicaliën vanaf het maaiveld in te brengen. Ook zal het mogelijk moeten zijn om een pomp tijdelijk in de put te kunnen installeren (diameter stijgbuis). De toegang tot de putkelder zal dan ook boven de put gemaakt moeten worden. Ook kan naast het "mangat" een "pompgat" worden aangebracht in de bovenvloer van de waarschijnlijk uit betonnen prefab-elementen opgebouwde putkelder. In de kelder zal ruimte moeten zijn voor manometers, peilbuizen, voor het bergen van gereedschap, het plaatsen van afsluiters en een (cumulatieve) flowmeter en het plaatsen van apparatuur ten behoeve

van metingen van de kwaliteit van het infiltratie- (en mogelijk regeneratie-) water. Monsternamepunten en aftapkranen kunnen dan ook niet ontbreken.
Het verdient aanbeveling aan problemen die kunnen ontstaan door een hoge grondwaterstand (inundatie van putkelder) en door vorst bij tegelijkertijd onderbroken infiltratie de nodige aandacht te geven.

6 EXPLOITATIE

6.1 Regeneraties

Waar verstopping op den duur niet volledig is uit te sluiten, moet men weten hoe een verstopte put weer kan worden geregenereerd. Ook uit milieutechnische overwegingen dient hierbij het gebruik van chemicaliën zoveel mogelijk te worden vermeden. Bacteriegroei kan bijvoorbeeld voorkomen worden door chloring maar gezien de resultaten van het onderzoek naar de neveneffecten van de chemische desinfectie heeft dit niet de voorkeur.
Indien verstopping geweten wordt aan bacteriegroei ligt regeneratie met een oxydatiemiddel voor de hand. Regeneratie met chloorbleekloog is vaak zinvol gebleken (Konijnenberg; Schuurmans en Steinmetz, dit rapport). Een andere vorm van chemische regeneratie is met behulp van zuur. Deze regeneratie ligt meer voor de hand indien er slechts sprake is van verstopping door anorganische oorzaken (bijvoorbeeld door "resten coagulatiemiddel").
Welke chemische regeneratie ook toegepast wordt, dit zal telkens gecombineerd moeten worden met handelingen waardoor de ingebrachte middelen in contact gebracht worden met het verstoppende materiaal in het filter, de omstorting, de boorgatwand of wellicht de eerste centimeters van de formatie.

Door met perslucht de vloeistofspiegel naar beneden te drukken en daarna de druk weg te laten vallen zodat deze weer naar boven beweegt, wordt tevens een omkering van de stromingsrichting ter plaatse van het verstoppende materiaal bewerkstelligd. Een chemische regeneratie zal lang niet altijd noodzakelijk zijn. Zij zal dan ook altijd vooraf gegaan moeten worden door pogingen om slechts door een mechanische regeneratie de weerstand weg te nemen. Experimenten hebben uitgewezen dat alleen al door de put een aantal minuten te bepompen met een debiet dat een aantal malen het injectiedebiet is, de weerstand voor het grootste gedeelte kan worden weggenomen. Hiertoe moeten de vaste en variabele kosten van installatie van een onderwaterpomp afgewogen worden tegen de kosten van (geautomatiseerd) luchtliften. Indien na verloop van tijd de "blijvende" weerstand te hoog oploopt, kan deze wellicht met een chemische regeneratie worden verwijderd. Blijvende verstopping is hierbij gedefinieerd als de verstopping (weerstand) die niet door een korte terugpomping verdwijnt. Dit is niet echt een eenduidige definitie. Hiertoe moet de mechanische regeneratie exact omschreven worden (tijdsduur, debiet). Ook deze verstopping heeft soms een tijdelijk karakter; bij een lichte transportchloring, bij stilstand van de put of bij een daling van de watertemperatuur verdwijnt vaakt een groot gedeelte van deze "blijvende verstopping". Dit wordt opgemerkt in een groot aantal bijdragen in dit rapport.

Opgemerkt moet worden dat dikwijls te lang gewacht wordt met mechanisch regeneren. Als pas wordt teruggepompt nadat een zekere weerstand is opgebouwd, kan misschien slechts een gedeelte hiervan worden weggenomen. Ook de met "jutteren" te bereiken

stroomsnelheid ter plaatse van de verstopping wordt in hoge mate bepaald door een reeds aanwezige weerstand. Het verdient dan ook aanbeveling om zeer frequent en regelmatig (geautomatiseerd) terug te pompen (of te luchtliften met jutteren) al voordat er sprake is van weerstandsopbouw. Ook de onderzoeken die gerapporteerd worden door Konijnenberg en Lebouille wijzen daarop. Terugpompverliezen kunnen - zelfs bij hoge frequenties - beperkt blijven tot enkele procenten (zie bijvoorbeeld Konijnenberg, dit rapport). Bestudeerd moet worden of op deze wijze kan worden voorkomen dat een versnelling van het verstoppingsproces en een snelle opbouw van blijvende weerstand optreden. Chemisch regenereren zal dan wellicht niet - maar zeker minder frequent - noodzakelijk zijn.

Bij elke chemische regeneratie dient zich het probleem aan van de afvoer van het regeneratiewater. Indien slechts sprake is van een mechanische regeneratie en als het onttrokken water zoet is (hetgeen niet altijd zo hoeft te zijn bijvoorbeeld als de injectie van zoet water in een zout pakket lange tijd onderbroken is geweest) dan zal waarschijnlijk al op kleine afstand van de put een geconcentreerd lozingspunt kunnen worden gevonden. Wanneer ook chemisch geregenereerd wordt, dan zal de afvoer van het regeneratiewater een probleem vormen. Zo zal bij maximaal enkele tientallen liters aan chemicaliën per meter filter nooit meer dan ongeveer 2 m^3 worden toegevoegd (plus enkele m^3 water om het middel in contact te brengen met het verstoppende materiaal). Het regeneratiewater dat wordt onttrokken, kan nog met behulp van één enkele tankwagen worden verwijderd. Een andere optie is het leggen van een speciale "regeneratiewater-leiding" die dan

natuurlijk ook gebruikt kan worden voor de afvoer van het opgepompte water van een mechanische regeneratie ("spuileiding"). Een dergelijke leiding kan tegen relatief geringe kosten en zonder extra vergravingswerkzaamheden worden aangelegd als verschillende leidingen tegelijkertijd worden uitgevoerd in hetzelfde tracé of leidingstrook (aanvoer, perslucht (ten behoeve van luchtlift en jutteren), signaalkabels (ten behoeve van bediening, besturing en bewaking) en regeneratiewater). De regeneratiewater-leiding kan wellicht ook gebruikt worden voor de aanvoer van voldoende werkwater voor het uitvoeren van de boringen (zuigboring/luchtliftboring). Bij een systeem van vele tientallen persputten kunnen door te regeneren met perslucht (luchtliften en jutteren) vele (vaste) onderwaterpompen worden uitgespaard. Ook kan het aanbrengen en demonteren van tijdelijke pompen worden voorkomen.

6.2 Bewaking, sturing en bediening

Omdat de weerstand van persputten snel reageert op een tijdelijk slechte kwaliteit van het voedingwater is nauwgezette bewaking van de kwaliteit een uitermate belangrijke zaak. Een continu-analyse van de ingaande waterkwaliteit is vooralsnog alleen mogelijk voor wat betreft de parameter troebelheid (en niet voor wat betreft MFI, AOC of zwevende stof). Als deze met een vertraging - dus bijvoorbeeld gedurende 5 of 10 seconden - een bepaalde grenswaarde overschrijdt, kan het signaal gegeven worden om de toevoer naar de persputten (automatisch) te stoppen. Een andere mogelijkheid is te bewaken op weerstandstoename. Indien de tijdsduur tussen twee waarnemingen bijvoorbeeld een uur of minder is, kan de in deze periode opgelopen "scha-

de" (opgebouwde weerstand) beperkt gehouden worden. Bij automatisering van de weerstandsmeting (zie bijvoorbeeld Schuurmans en Steinmetz, dit rapport) is deze "fatalistische" methode een principe voor een alert en geschikt bewakingssysteem.

Regeneratie kan geschieden na vaste tussenpozen maar ook bij het bereiken van een bepaalde weerstand. Aldus moeten mogelijkheden aanwezig zijn om zowel de infiltratie van één enkele put (bij snelle weerstandstoename) als het hele systeem (bij een slechte waterkwaliteit) stop te zetten. Bediening per put moet dus tot de mogelijkheden behoren. Voor de weerstandsmeting is het noodzakelijk in elke put drie stijghoogten (stijgbuis, omstorting en formatie boven of onder een kleiprop) en de volumestroom (het debiet) te kunnen meten. Het (cumulatieve) debiet is ook noodzakelijk voor een logboek van de put en het totale systeem.
Een en ander is zeer geschikt om te worden geautomatiseerd. Bij 60 persputten kan elke put bijvoorbeeld 1 maal per uur worden afgetast waarna weerstanden en debieten worden vastgelegd. Eventueel kan het debiet worden aangepast of de infiltratie worden stopgezet.

7 OVERIGE ASPECTEN

Bij ontwerp, bouw en exploitatie van een persputsysteem zullen vele aspecten een rol spelen. Genoemd zijn reeds de milieu-aspecten. De gevolgen voor het natuurlijk milieu zijn nog niet kwantitatief onderzocht. Vergravingswerkzaamheden ten behoeve van leidingaanleg zullen namelijk ook bij diepte-infiltratie noodzakelijk zijn. Echter hoogteverschillen zullen nauwelijks een bezwaar vormen.

Ook kan een en ander zoveel mogelijk langs de bestaande wegen worden gerealiseerd (zie Peters, dit rapport). In dit hoofdstuk zal een aantal andere aspecten worden behandeld.

7.1 Juridische aspecten

De publieke opinie met betrekking tot persputten wordt beïnvloed door associaties die bestaan met putten die gebruikt worden voor de lozing van vloeibaar afval. Dit feit is ook terug te vinden in de wetgeving in een aantal landen. Daar is elke injectie van een vloeistof in de bodem, zelfs die van drinkwater, verboden. Andere gevolgen zijn de soms zeer tijdrovende beroepsprocedures bij het verlenen van vergunningen zoals zo uitvoerig en interessant beschreven door Van der Laan en Jonkman in dit rapport.
In het kader van de nieuwe grondwaterwet zijn belangrijk de ontwikkeling van het standpunt dat de provincies innemen inzake diepinfiltratie en (eventueel) de eisen voor wat betreft milieu-effectrapportage. Op provinciaal niveau zijn tevens streekplannen en provinciale verordeningen (bescherming bodem en grondwater) van belang. Daarnaast spelen gemeentelijke bestemmingsplannen.

7.2 Kostenaspecten

De kosten van persputinfiltratie bestaan uit (extra) kosten van zuivering ten einde over goed met persputten infiltreerbaar water te kunnen beschikken plus de kosten van aanleg en bouw van leidingen en putten (pers- én winputten) en de kosten van de putregeneraties. In een optimalisatieproces om de mate van voorzuivering te bepalen zijn de kosten

van leidingaanleg vast. Bij ver voorgezuiverd water kan de belasting van de persputten hoog zijn. De kosten van de bouw van de persputten is dan minimaal. Bij weinig gezuiverd water zal het bedrijven van een persputinfiltratiesysteem gekenmerkt worden door een groot aantal laagbelaste persputten met grote operationele problemen en veel regeneraties. Dit veroorzaakt dat de kosten van verschillende alternatieven niet ver uiteen zullen lopen. Bij een kostentechnische afweging tussen de verschillende varianten (zoals beschreven door Olsthoorn, 1982) moet per variant een aantal parameters worden verkregen door middel van experimenten met proefpersputten of wellicht meeloopfilters (de te verwachten regeneratiefrequentie, het maximaal aantal putregeneraties, de afschrijftermijn van de putten). De vraag is wat de waarde kan zijn van de "fictieve" parameters. Daarnaast kan het zijn dat verder dan voor het kostenminimum noodzakelijk is, zal worden gezuiverd (om redenen van persoonlijke voorkeur of vanwege voorwaarden aan vergunning verbonden). Ook wordt de belasting en uitvoering van de putten (hoogte omstorting, diepte) mede bepaald door hydrologie en lithologie.
Een belangrijk facet van persputinfiltratie (ook van oppervlakte-infiltratie) is de mogelijkheid om fasering in bouw en aanleg aan te brengen. Bij een langzame stijging van de gevraagde capaciteit is dit kostentechnisch aantrekkelijk. Als deze fasering achterwege wordt gelaten, kan het systeem in de eerste jaren ná de oplevering op lage capaciteit werken zodat ook de regeneratiefrequenties lager zullen zijn. Andere redenen voor niet-fasering zijn een geringere verstoring van het natuurlijk milieu, lagere boorkosten, standaardisatie, uitwisselbaarheid en het feit dat leidingen waarschijn-

lijk ook niet in fases gelegd worden (de aanvoer naar het infiltratiegebied vraagt soms de grootste investering).

Samengevat kan worden gesteld dat de extra kosten van persputinfiltratie vergeleken met oppervlakte-infiltratie bestaan uit:

- de kosten van extra zuivering:
  vaste (stichtings-)kosten, variabele (chemicaliën- en bedienings-)kosten en indirecte kosten bijvoorbeeld verband houdend met een groter slibprobleem;
- de kosten van de regeneraties vergeleken met de kosten van onderhoud (en eventueel opschonen) van open infiltratiemiddelen en
- de extra kosten van de pers- en winputten vergeleken met de kosten van infiltratie- en winmiddelen ten behoeve van oppervlakte-infiltratie.

Voor wat betreft overige kosten (onderhoud, leidingaanleg, nazuivering, besturing, bediening, bewaking en energie) zullen kosten bij diepte-infiltratie nauwelijks verschillen van de kosten bij open infiltratie. Opgemerkt moet nog worden dat vergelijking van de kosten van een eventueel in de toekomst te realiseren persputproject met de kosten van een in het verleden gerealiseerd oppervlakte-infiltratieproject mank gaat. Algemene kosten en bouwkosten zijn toegenomen. Tevens zijn in de loop der tijd de eisen en wensen voor wat betreft uitvoering en aankleding van elk project verzwaard.
Tot slot moet worden opgemerkt dat de vraag "wat kost diepinfiltratie?" niet in zijn algemeenheid te beantwoorden is. Kostprijsberekening is doorgaans uitermate gecompliceerd temeer omdat produktiekosten slechts voor een gedeelte de kostprijs bepalen.

Daarnaast zijn belangrijk:
- de grootte van het project (in relatie tot de bestaande totale levering);
- afschrijvingsvormen (annuïteit, uniteit);
- fasering, vollooptijd;
- bestaande contracten voor wat betreft levering en (en gros) inkoop (van drinkwater dan wel voorgezuiverd oppervlaktewater).

Vervanging van open infiltratie door diepinfiltratie zal een sterk prijseffect met zich brengen. Niet alleen zal meer capaciteit moeten worden gebouwd, ook moeten de kosten van buitengebruikstelling (investeringen die nog niet via de tarieven zijn terugverdiend) worden opgebracht.

7.3 Winning en nazuivering

Met het oog op terugwinning en zuivering van het geïnfiltreerde water is het gewenst de verandering van de waterkwaliteit tijdens de bodempassage te kennen. Hiervoor is het noodzakelijk dat de samenstelling van het formatiewater bekend is. De hoeveelheid organisch materiaal in de bodem bepaalt de concentratie aan opgeloste zuurstof, ijzer en mangaan in het onttrokken water. Infiltratie van zuurstofhoudend water in een anaeroob pakket zal een zich langzaam verplaatsend zuurstoffront te zien geven (zie Van Puffelen; Van Beek en Van Puffelen, dit rapport). Indien dit front een winput genaderd is, zal menging van watersoorten wellicht aanleiding geven tot verstopping door ijzerafzettingen en biomassa (een aspect dat onder meer punt van studie is bij het experiment van de DWL-Den Haag; zie Huijboom, dit rapport). In hoeverre dit kan worden tegengegaan door per winput water met zoveel moge-

lijk dezelfde verblijftijd aan te trekken en in hoeverre dit verschijnsel van tijdelijke aard is, is vooralsnog onduidelijk. Interessant is het wellicht te onderzoeken of de verwachte problemen te ondervangen zijn door - als doorbraak van het zuurstoffront dreigt - ondergrondse ontijzering toe te passen.

Verwacht mag worden dat de nazuivering van diepte-infiltraat zich in eerste instantie niet zal onderscheiden van die van oppervlakte-infiltraat. Bij een "anaerobe bodempassage" zal beluchting, snelfiltratie (eventueel een filtratie over actief kool dan wel langzaamzandfiltratie) noodzakelijk zijn. Afhankelijk van het zuurstofverbruik van de sedimenten zal het gewonnen water na verloop van tijd echter zuurstof gaan bevatten. Het is interessant om te onderzoeken wat hiervan het gevolg is voor de kwaliteitsverandering gedurende de bodempassage en voor de nazuivering.

8 DIEPINFILTRATIE HEEFT PROEFPROJECT NODIG

Nieuwe technologieën kosten altijd meer dan was verwacht. Dat is een onplezierige zaak omdat het de economische haalbaarheid van een project dat van de nieuwe techniek gebruik maakt, beïnvloedt terwijl daarbij toch ook onweegbare factoren - die moeilijk in geld kunnen worden uitgedrukt - een rol spelen. Anderzijds betekent onzekerheid over de kosten een drempel voor de beslissing tot het daadwerkelijk overgaan op de nieuwe techniek.
Fundamenteel onderzoek en onderzoek op kleine schaal is om te beginnen zeer zinvol en noodzakelijk om een indruk te krijgen van de technische haalbaarheid. In een volgend stadium is hetzelfde

onderzoek echter onvoldoende; voor een verantwoorde toepassing van een nieuwe technologie in de toekomst is onderzoek op beperkte praktijkschaal onvermijdelijk. In tal van onderzoeksgebieden voornamelijk op het gebied van de energievoorziening wordt dit geconstateerd. In wezen is de situatie bij persputinfiltratie niet anders. Het zijn keuzes en uitspraken die de doorslag geven en dat kan door middel van een persputproject op kleine praktijkschaal dat als demonstratieproject kan dienen. Eventuele drempels kunnen effectief weggenomen worden door subsidies en door een stimuleringsbeleid zoals dat in 1984 is geformuleerd door de Nederlandse regering.

9 GLOBALE TECHNISCHE SPECIFICATIES VAN HUIDIGE PROEFPERSPUTTEN IN BEDRIJF BIJ NEDERLANDSE WATERLEIDINGBEDRIJVEN (putten voor directe retourinfiltratie van onttrokken grondwater zijn niet opgenomen)

Noten bij tabel op volgende pagina.

1) Samenwerking met het PWN binnen de Werkgroep Watervoorziening Zuid-Kennemerland
2) PP2 tot 65 m -NAP in verband met "zoutwaterstaart" (met kleine diameter)
3) In verband met "zoutwachterstaart" beide boringen met kleine diameter doorgezet tot 115 respectievelijk 120 m -NAP
4) Met kleine diameter tot 41 m -NAP
5) Onderlinge afstand IP1 en IP2 is circa 400 m
6) Zie rapport KIWA SWO 84.226; uitwerking pompproef IP1
7) Van de korrelsamenstelling is vaak weinig bekend
8) Bepaald uit een groot aantal zeefmonsters tijdens boring ten hoogte van filterstelling
9) Onderlinge afstand P_c en P_d is circa 60 m
10) Onderlinge afstand FLIP 1 en FLIP 2 is circa 110 m
11) Het betreft hier M-cijfers
12) Korrelanalyse geeft een kD van 1194 m^2/d

exploitant van de put(ten)	Gemeentelijk Waterbedrijf Groningen GWG	Provinciaal Waterleidingbedrijf van Noord-Holland PWN		Waterleidingbedrijf Zuid-Kennemerland WLZK[1])	Gemeentewaterleidingen Amsterdam GW	Duinwaterleiding van 's-Gravenhage DWL-Den Haag	Watermaatschappij Zuid-West-Nederland WMZ	Waterleidingbedrijf Midden Nederland WMN
Plaats	Haren	Texel	Castricum	Kennemerduinen	Vogelenzang	Scheveningen	Ouddorp	Leersum
Aantal	1	3	2	2	1	2	1	1
Code		PP1, PP2, PP3	IP1, IP2[5])	P_c, P_d[9])	PP-II	FLIP1, FLIP2 [10])	P1	PP-Le5
Bouwjaar	1959	1977, 1978	1978, 1979	1980	1980	1983	1984	1983
Methode	zuigboring	luchtlift-zuigboring + spoeling Limburgiaklei	spoelboring	zuigboring + Antisol	zuigboring + Revert 2 spoelvijvers	luchtliftzuigboring zonder spoeling	luchtliftzuigboring met spoeling	luchtliftzuigboring zonder spoeling + Desander
Diameter boorgat (m)	0,6	0,5	1,0	0,6	0,7	0,6	0,6	0,5
Diepte in m -NAP	71	27[2])	84[3])	42	131	43 en 45	30[4])	57
Hoogte maaiveld in m +NAP	1,6	7,5; 8,8; 8,8	4,0; 4,7	6,7; 6,6	7,2	2,6; 7,3	6	15,2
Onderkant filter in m -NAP	69	circa 26	78; 80	38; 37	116	41 ; 42	25	49
Filterlengte (m)	10	4,8	20	9,6	14,4	17,5; 12,5	14,5	23,5
Materiaal filter	yang-teak	PVC	PVC	PVC	PVC	PVC	PVC	PVC
Diameter (mm)	150/180	180/200	180/200	185/200	230/250	185/200	185/200	226/250
Dikte (mm)	15	10	10	7,5	10	7,5	7,5	12
Filteroppervlak (m^2)	5,7	3,0	12,6	6,0	11,3	9,4	9,1	18,5
Spleetwijdte (mm)	2	1	1	1	1	1	0,6	1
Zandvang (m)	1	1	1	0,5	0,2	0,5	1	0,5
Lengte omstorting (m)	17,4	8	22	11,6	17	19,5; 14,5	17	28
Omstortingsgrind (mm)	2 - 3	1,25 - 1,75	1,2 - 1,7	1,2 - 1,7	1,2 - 1,7	1,5 - 2,5	0,8 - 1,25	1,5 - 2,5
Oppervlak boorgatwand (m^2)	33	12	69	22	37	37 ; 27	30	44
Dikte watervoerend pakket (m)	50 à 60	30 à 60	circa 40[5])[6])	circa 50	circa 50	21 ; 17	circa 20	circa 60
Doorlatendheid ter plaatse van filter (m/d)	-	10 à 15	25 à 35[5])[6])	circa 30	-	20 à 40	circa 10	-
Korreldiameter ter plaatse van filter (mm)[7])	0,8 - 1,1[11])	0,1 - 0,3 1 % slib	0,25 - 0,35	?	0,2 - 5,0[8])	0,3 - 0,5	0,1 - 0,3	0,3 - 0,8[8])
Doorlaatvermogen (m^2/d)	circa 2500	200 - 900	1250[6]) [12])	circa 1500	circa 2500	circa 500	circa 200	circa 2000
In gebruik als peraput	21-09-1979	02-03-1977; 29-08-1978	20-03-1981; 08-12-1981	01-09-1980; 12-06-1980	26-01-1981	28-06-1984	01-10-1984	29-11-1983
Totaal geïnfiltreerd in Mm^3 tot	0,55 september 1982	0,84 maart 1984	0,75 september 1983	0,84 september 1983	0,45 december 1983	0,10 november 1984	0,02 december 1984	0,26 november 1984
Range van de volumestroom per put in m^3/uur	21 - 28	15	20 - 45	10 - 30	18 - 28	20	5 - 20	35
Infiltratiesnelheid ter plaatse van boorgatwand (m/uur)	0,6 - 0,8	1,3	0,3 - 0,7	0,5 - 1,5	0,5 - 0,8	0,5 - 0,7	0,2 - 0,7	0,8
dual (d), single (s)	d	d	s	s	s	s	d	s
Range van de MFI (s/l^2)	1 - 5	-	IP1: 5 - 25 IP2: 10 - 50	P_c: < 2 P_d: 5 - 25	1 - 5	lange tijd < 1	2 - 5	1 - 4
Voorzuivering	drinkwater PS De Punt + PS Haren	gedestilleerd zeewater	IP1: WRK-I na pandbodempassage IP2: WRK-III	P_c: WRK-I na (langzaamzandfiltratie) P_d: WRK-I via verdeelvijver Leiduin	WRK-I na pandbodempassage	Maaswater na voorzuivering + flotatiestap	drinkwater PS Ouddorp	oevergrondwater + filtratiestappen
Verwijzing in dit rapport	Kieft	Wildschut	Lebouille	Konijnenberg	Schuurmans/ Steinmetz	Huijboom	De Kraa	Van der Laan/ Jonkman

10 LITERATUUR

- Beek, C.G.E.M. van, Ondergrondse ontijzering, een evaluatie van uitgevoerd onderzoek, KIWA-mededeling 78, 1984.
- Bianchi, W.C., H.I. Nightengale, R.L. Mc.Cormick, Subsurface Drain Collector-Deep Well Recharge System, JAWWA august 1978, p. 427-435.
- Duijve, J., Rapport betreffende de werking van de persbron in het infiltratiegebied in de periode van 20 'anuari 1960 - 10 mei 1961, Gemeentewaterleidingen Amsterdam, 1961.
- Edworthy, K.J., Water Research Centre, Technical Report TR 86, "Artificial Recharge through a borehole, Medmenham, Marlow, Bucks, 1978.
- Gass, T., Recharge well performance problems and rehabilitation, Water Well Journal, p. 36-37, 1981.
- Haasnoot, J., Doel en hoofdopzet (speciale uitgave, tijdschrift H_2O bij ingebruikname WRK-III), H_2O (jrg. 14), nr. 19, p. 416-418, 1981.
- Hijnen, W.A.M.. Microscopisch beeld van materiaal uit de IP1 en IP2 van het PWN, persoonlijke mededeling, 1984.
- Nightengale, H., R. Mc. Cormick, D. Cehrs, Fresno Recharge Well System, Water Well Journal, feb. 1981, p. 56-58.
- Olsthoorn, T.N., Verstopping van persputten, KIWA-mededeling 71, 1982.
- Peters, J.H., Enkele mogelijkheden van persputten bij de watervoorziening, H_2O (15), nr. 15, p. 389-395, 1982.
- Peters, J.H.. The movement of fresh water injected in salaquifers, KIWA SWE 83.007, 1983.

- Peters, J.H., W. van Dalfsen en J.J. Steinmetz, Temperatuurmetingen bruikbaar bij onderzoek naar verbreiding van infiltratiewater uit persputten, H_2O (17), nr. 4, p. 68 t/m 72, 1984.

Nieuwegein, oktober 1984

APPENDIX A

Samenstelling van de Werkgroep Persputten (augustus 1984)

- ir. B. Bulten (voorzitter), Vereniging van Exploitanten van Waterleidingbedrijven in Nederland (VEWIN), Rijswijk
- ir. J.H. Peters (secretaris), Keuringsinstituut voor Waterleidingartikelen (KIWA), Nieuwegein
- dr.ir. C. van den Akker, Rijksinstituut voor Volksgezondheid en Milieuhygiëne (RIVM), Leidschendam
- ir. M.G.M. den Blanken, Keuringsinstituut voor Waterleidingartikelen (KIWA), Nieuwegein
- ir. G.S. Huijboom, Duinwaterleiding van 's-Gravenhage (DWL-Den Haag), Den Haag
- ir. J.W. Kieft, Gemeentelijk Waterbedrijf Groningen (GWG), Groningen
- ir. H.J.L. de Kraa, N.V. Watermaatschappij Zuid-West-Nederland (WMZ), Goes
- ing. J.P.J. Krabbendam, Hoogovens Groep B.V., IJmuiden
- drs. J. van der Laan, Waterleidingbedrijf Midden-Nederland (WMN), Utrecht
- ir. J. van Puffelen, Duinwaterleiding van 's-Gravenhage (DWL-Den Haag), Den Haag
- ing. R.A. Schuurmans, Gemeentewaterleidingen (GW), Amsterdam
- drs. P.J. Stuyfzand, Keuringsinstituut voor Waterleidingartikelen (KIWA), Nieuwegein
- ir. J.E. van de Weijer, Rijkswaterstaat, Directie Waterhuishouding en Waterbeweging, District Noord, Lelystad
- ir. R.J. Wildschut, Provinciaal Waterleidingbedrijf van Noord-Holland (PWN), Bloemendaal
- ir. G.J. Zaadnoordijk, N.V. Leidsche Duinwatermaatschappij (LDM), Leiden

APPENDIX B

Samenstelling van de Taakgroep Filtratie Index (augustus 1984)

- ir. B. Bulten (voorzitter), Vereniging van Exploitanten van Waterleidingbedrijven in Nederland (VEWIN), Rijswijk
- J. Verdouw (secretaris), Keuringsinstituut voor Waterleidingartikelen (KIWA), Nieuwegein
- ing. P.L. Buyinck, Duinwaterleiding van 's-Gravenhage (DWL-Den Haag), Den Haag
- ing. K. Feenstra, Gemeentelijk Energiebedrijf Dordrecht, Dordrecht
- H.C. Folmer, Provinciaal Waterleidingbedrijf van Noord-Holland (PWN), Bloemendaal
- ir. P. Hiemstra, Waterleiding Maatschappij "Overijssel" N.V., Zwolle
- ing. H.J.H. Korfage, Waterleidingbedrijf Midden-Nederland (WMN), Utrecht
- ir. J.H. Peters, Keuringsinstituut voor Waterleidingartikelen (KIWA), Nieuwegein
- ir. J.C. Schippers, Keuringsinstituut voor Waterleidingartikelen (KIWA), Nieuwegein
- ing. J.J. Steinmetz, Gemeentewaterleidingen (GW), Amsterdam
- H. Wolters, Gemeentelijk Waterbedrijf Groningen (GWG), Groningen

APPENDIX C

Samenstelling van de Werkgroep Hydrologie van Persputsystemen (augustus 1984)

- prof.dr.ir. A. Verruijt (voorzitter), Technische Hogeschool Delft (THD), Delft
- ir. J.H. Peters (secretaris), Keuringsinstituut voor Waterleidingartikelen (KIWA), Nieuwegein
- dr.ir. C. van den Akker, Rijksinstituut voor Volksgezondheid en Milieuhygiëne (RIVM), Leidschendam
- ir. M.G.M. den Blanken, Keuringsinstituut voor Waterleidingartikelen (KIWA), Nieuwegein
- ir. G.S. Huijboom, Duinwaterleiding van 's-Gravenhage (DWL-Den Haag), Den Haag
- ir. J.W. Kieft, Gemeentelijk Waterbedrijf Groningen (GWG), Groningen
- ir. W.F. Konijnenberg, Provinciaal Waterleidingbedrijf van Noord-Holland (PWN), Bloemendaal
- ir. J.W. Kooiman, Gemeentewaterleidingen (GW), Amsterdam
- ir. A.N.M. Obdam, Rijksinstituut voor Volksgezondheid en Milieuhygiëne (RIVM), Leidschendam
- dr.ir. P. van der Veer, Bergen op Zoom
- ir. G.J. Zaadnoordijk, N.V. Leidsche Duinwater Maatschappij (LDM), Leiden