

Mededeling nr. 72

Werkgroep Persputten

VERSTOPPING VAN PERSPUTTEN, HOOFDLIJNEN

ir. T.N. Olsthoorn

Samengesteld binnen het speurwerkprogramma van de  
VEWIN

Rijswijk, augustus 1982

**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**

Groningehaven 7

Postbus 1072

3430 BB Nieuwegein

Telefoon (03402) 6 08 60

## VOORWOORD

Dit rapport is tot stand gekomen in het kader van het persputtenonderzoek, dat sinds 1973 onderdeel is van het speurwerkprogramma van de VEWIN. Het onderzoek is uitgevoerd door vijf waterleidingbedrijven, een industrie, twee overheidsinstellingen en het KIWA in wiens dienst de auteur van 1974 tot 1980 als projectleider van het persputtenonderzoek werkzaam was. Het onderzoek werd begeleid door de Werkgroep Persputten van het KIWA. De samenstelling van de Werkgroep is als appendix B opgenomen.

De participanten aan het onderzoek zijn:

Vereniging van Exploitanten van Waterleidingbedrijven in Nederland (VEWIN); Duinwaterleiding van 's-Gravenhage; Gemeentewaterleidingen Amsterdam; Provinciaal Waterleidingbedrijf van Noord-Holland; Waterleidingbedrijf Midden-Nederland; Gemeentelijk Waterbedrijf Groningen; Dienst der Zuiderzeewerken; Rijksinstituut voor Drinkwatervoorziening en ESTEL Hoogovens B.V..

<u>INHOUD</u>	<u>blz.</u>
SUMMARY	3
SAMENVATTING	5
1. INLEIDING	11
2. BODEMSPLIJTING	15
3. VERSTOPPING	19
3.1 Verstoppingsoorzaken	19
3.2 Zwevende stof	23
3.3 Gasbellen	41
3.4 Bacterieontwikkeling in de put	46
3.5 Chemische neerslagvorming in de put	50
3.6 Reacties tussen infiltratiewater en grondwater	51
3.7 Interactie tussen infiltratiewater en bodem	52
3.8 Wijziging van de korrelstructuur van de bodem	57
4. REGENEREREN	59
4.1 Algemeen	59
4.2 Mechanische regeneratiemethoden	60
4.2.1 Algemeen	60
4.2.2 Schoonpompen	61
4.2.3 Jutten met perslucht	67
4.2.4 Sectiegewijs pompen	74
4.2.5 "Surgen" en "bailen"	75
4.2.6 Hoge-drukspuit	76
4.2.7 Borstelen	76
4.3 Chemische regeneratiemethoden	76
4.3.1 Algemeen	76

	<u>blz.</u>
4.3.2 Chloor	77
4.3.3 Zuur	78
4.3.4 Polyfosfaten	81
4.3.5 Welke chemicaliën?	82
5. GLOBAAL ONTWERP	87
6. PUTONTWERP	99
6.1 Economisch	99
6.2 Hydrologisch	101
6.3 Hydraulisch	103
6.4 Technisch	105
6.5 Illustratie	108
7. GEBRUIKTE SYMBOLEN	113
8. LITERATUUR	119
APPENDICES	
A. Gegevens van de Nederlandse persputten (tot 1980) die door de Werkgroep Persputten intensief zijn onderzocht	131
B. Samenstelling van de Werkgroep Persputten	133

UDC: 556.332.634.004.64

UDC: 556.332.634.001.13

Keywords: Artificial groundwater recharge  
recharge wells, injection wells  
clogging, redevelopment, design

#### SUMMARY

Artificial recharge of groundwater-bearing formations with treated surface water gives waterworks an opportunity to make reliable use of surface waters, which are intrinsically unreliable resources. Artificial groundwater recharge is usually carried out by spreading with open basins or ditches. If suitable soil strata are present, but may not be used or are not suited to creation of an open recharge basin, then recharge wells may be an alternative means to bring the water into the soil.

However, the risk of clogging is very great with recharge wells. Therefore the clogging phenomena had to be studied in detail. This report presents, in broad lines, the results of the research in this field carried out, conveyed and financed in Holland by the Waterworks and the other participants (see "VOORWOORD"). The actual work was done under the auspices on the KIWA- Working Group on Research Wells (p. 133).

Of this report a complete English version is available from KIWA, (Olsthoorn, T.N., The clogging of recharge wells, main subjects; KIWA communication 72, 150 pp.). Also available is a much more detailed report on which this booklet is based (Olsthoorn, T.N., Verstopping van persputten; KIWA mededeling 71, 500 pp.) (in Dutch only)

The contents of the report may be summarized as follows: In chapter 1 an introduction is provided. Then, chapter 2 deals with the maximum allowable injection pressure

in order to prevent well failure due to soil fracturing. A rule of thumb is derived for this pressure. Chapter 3 covers causes and prevention of well clogging and mentions their hallmarks. Chapter 4 is indebted to the redevelopment (both mechanically and chemically) of clogged recharge wells. The effectiveness of the various methods is shown and compared and conclusions are drawn. Chapter 5 shows, as a result of the insight gained, a generally applicable design procedure, based on specific preliminary investigations. This procedure minimizes the over-all costs of the recharge-well system. Chapter 6, finally, deals with the design of the actual injection wells. It is shown, that, also at the level of the individual wells, optimization is feasible to minimize costs.

In conclusion to the contents of the report it is said, that clogging is no longer an insolvable problem. Recharge wells may therefore be considered as a technical means to inject water into underground strata.

Meanwhile the research is being continued to gain further experience with the prediction of the clogging potential of injection waters. Since 1979 also the hydrological and hygienical features arising with recharge wells are being studied.

These latter investigations will be published separately by KIWA.

UDC: 556.332.634.004.64

UDC: 556.332.634.001.13

Trefwoorden: Kunstmatige infiltratie, persputten, injectieputten, infiltratieputten, verstopping, regeneratie, ontwerp

### SAMENVATTING

Kunstmatige infiltratie (grondwateraanvulling) is een belangrijk proces bij de drinkwaterbereiding in Nederland en elders. Het onderzoek van de Nederlandse waterleidingbedrijven en enkele andere belanghebbenden wordt sinds 1973 in VEWIN\*-verband uitgevoerd en gefinancierd, onder begeleiding van de Commissie Infiltratie van het KIWA. Specialistische onderwerpen als het persputtenonderzoek worden in diverse werkgroepen nader onderzocht. De participanten (zie voorwoord) zijn in de werkgroepen en veelal tevens in de Commissie vertegenwoordigd.

Dit rapport is tot stand gekomen onder begeleiding van de Werkgroep Persputten (zie appendix B). Het onderzoek dat is begeleid door de beide andere werkgroepen van de Commissie Infiltratie (de "Werkgroep Hydrologie van Persputsystemen" en de "Werkgroep Hygiënische Aspecten bij Bodempassage"), zal afzonderlijk worden gerapporteerd.

Kunstmatige infiltratie biedt voor de waterleidingbedrijven een mogelijkheid om op betrouwbare wijze gebruik te maken van oppervlaktewater, een op zichzelf onbetrouwbare grondstof. Zijn geschikte bodemlagen aanwezig, maar kunnen of mogen geen open infiltratiebekkens worden toegepast, dan kan worden

\* VEWIN = Vereniging van Exploitanten van Waterleidingbedrijven in Nederland.



overwogen water met behulp van persputten in de bodem te brengen. Een belangrijk verschil tussen persputinfiltratie en infiltratie met behulp van open bekkens is de infiltratiesnelheid, die in het eerste geval enkele ordes van grootte hoger is. Als gevolg hiervan is de kans op verstopping bij persputten zeer groot, reden waarom het zwaartepunt van het onderzoek heeft gelegen op het bestuderen van deze verstoppingsproblematiek.

Dit rapport geeft in grote lijnen de resultaten van dit onderzoek, alsmede een aantal richtlijnen voor het ontwerpen van persputten. Voor een gedetailleerder verslag zie (Olsthoorn, 1982).

De maximaal toelaatbare druk in een persput waarbij nog geen bodemsplijting optreedt, is een randvoorwaarde bij de toepassing en wordt in hoofdstuk 2 behandeld. Een toelaatbare drukhoogte van 2 m water boven maaiveld voor elke 10 m dat de bovenzijde van de omstorting zich onder maaiveld bevindt, kan als praktische vuistregel worden gehanteerd.

Hoofdstuk 3 behandelt de oorzaken van persputverstopping en de preventie ervan, alsmede de kenmerkende verschijnselen. Het blijkt dat verstopping door luchtbellen en gasbellen, door neerslagvorming, door reacties met het bodemmateriaal en door bodemzettingen, met eenvoudige technische middelen en goed vooronderzoek voorkomen of ten minste verregaand beperkt kan worden. Preventie van verstopping door verwijdering van zwevende stof is moeilijker en vooral kostbaarder.

Hoewel ook wat de zwevende stof betreft verregaande beperking van de verstopping mogelijk is, kan het voordeliger zijn de mate van voorzuivering af te wegen tegen het aantal putten en de regeneratiefrequentie (hoofdstuk 5).

Persputten kunnen in praktisch alle gevallen met succes worden geregenereerd (hoofdstuk 4). Met schoonpompen wordt gemiddeld drie kwart verwijderd van dat deel van de verstoppingsweerstand dat sinds de voorgaande regeneratie is opgetreden. Schoonpompdebit en schoonpompduur doen hierbij nauwelijks ter zake, tenzij deze extreem lang respectievelijk extreem groot zijn. Het meer hardnekkige restant van de verstopping kan alleen met intensieve methoden worden weggenomen.

Voor de mechanische verwijdering is het essentieel, dat het water voortdurend heen en weer wordt bewogen. Intermitterend pompen, dat wil zeggen het herhaald aan- en uitschakelen van de pomp, draagt niet bij aan de regeneratie. Een persluchtsysteem is de meest flexibele, minst kwetsbare en eenvoudigst toe te passen techniek om persputten mechanisch en chemisch mee te reinigen. Het combineert een krachtig schoonpompsysteem met de mogelijkheid het water in de formatie heen en weer te bewegen en sterke debietstoten uit te voeren (jutteren). Alleen wanneer een groot aantal putten zeer frequent moet worden schoongepompt, zal een systeem met vast ingebouwde onderwaterpompen de voorkeur kunnen verdienen (geen geluidsoverlast bijvoorbeeld).

De hogedrukspuit is geschikt voor het schoonspuiten van putten die inwendig zijn verstopt. Een dergelijke verstopping kan zich voordoen bij winningsputten bij een infiltratiesysteem.

Wanneer de werking van mechanische regeneratiemethoden tegenvalt, kunnen zij met chemicaliën worden aangevuld. Men spreekt in dat geval van chemisch regenereren. Chloorbevattende middelen, zuur en polyfosfaat zijn de meest toegepaste chemicaliën. Welke middelen in aanmerking komen hangt af van de aard van het verstoppende materiaal en derhalve van de oorzaak van de verstopping. De oorzaak die in

een concrete situatie domineert, kan uitsluitend indirect worden afgeleid uit allerlei uitgevoerde metingen en andere aanwijzingen, terwijl voorts de vergelijking met elders opgedane ervaring (hoofdstuk 3) een belangrijke rol speelt.

Hoewel het moeilijk blijft om a priori het gedrag van een toekomstig persputtensysteem te voorspellen, kan met de gegevens van adequaat vooronderzoek een goed ontwerp worden gemaakt, waarbij de kosten minimaal zijn. Het globaal ontwerpen op basis van zulke onderzoeksgegevens wordt behandeld in hoofdstuk 5, waarna in hoofdstuk 6 het ontwerpen van de eigenlijke persputten aan de orde komt. Ook op het niveau van de individuele persputten blijkt een optimalisering mogelijk.

Daar de verstopping van persputten, volgens de inzichten die in dit rapport zijn beschreven, in de praktijk geen onoverkomelijk probleem vormt, is de technische toepassing van persputten in principe mogelijk op plaatsen waar het zogenaamde zoet-zoutvraagstuk (zie hieronder) niet speelt. Op deze plaatsen kan men met een infiltratie-terugwinsysteem de bodem gebruiken als een enorm filter en mengreservoir, dat voorgezuiverd oppervlaktewater in een goed en constant produkt transformeert en dat, na terugwinning, met een beperkte nabehandeling voor consumptie geschikt kan worden gemaakt. Een dergelijk systeem kan vooral daar aanbeveling verdienen waar een gebruikelijke grondwaterontrekking ten gevolge van daling van de grondwaterstand te grote schade aan andere belangen zou toebrengen, danwel vervuild grondwater dreigt te worden aange trokken. Ten tijde van een incidentele calamiteit met de aanvoer van het ruwe, te infiltreren water wordt zonodig tijdelijk op het grondwater inge-

teerd. Op incidentele basis kan de hieruit resulterende verlaging acceptabel zijn.

Veelal echter is één van de belangrijkste oogmerken bij de toepassing van persputten de vorming van een ondergrondse voorraad zoet water, die gewonnen kan worden zodra dat nodig is. Op plaatsen waar zoet grondwater drijft op zout grondwater met een iets hoger soortelijk gewicht, is de voorraadvorming denkbaar door verdringing van het zoute grondwater, zowel in horizontale als in verticale richting. De berekening van de verplaatsing van het grensvlak tussen het zoete en het zoute water, zonodig rekening houdend met de gelaagdheid van de ondergrond, is op dit moment nog moeilijk. De beschrijving van het gedrag en de vorming van brak water zowel plaatselijk op de korte termijn, als meer regionaal op de langere termijn, is op dit moment zelfs nog problematisch. Onderzoek naar deze aspecten is gaande.

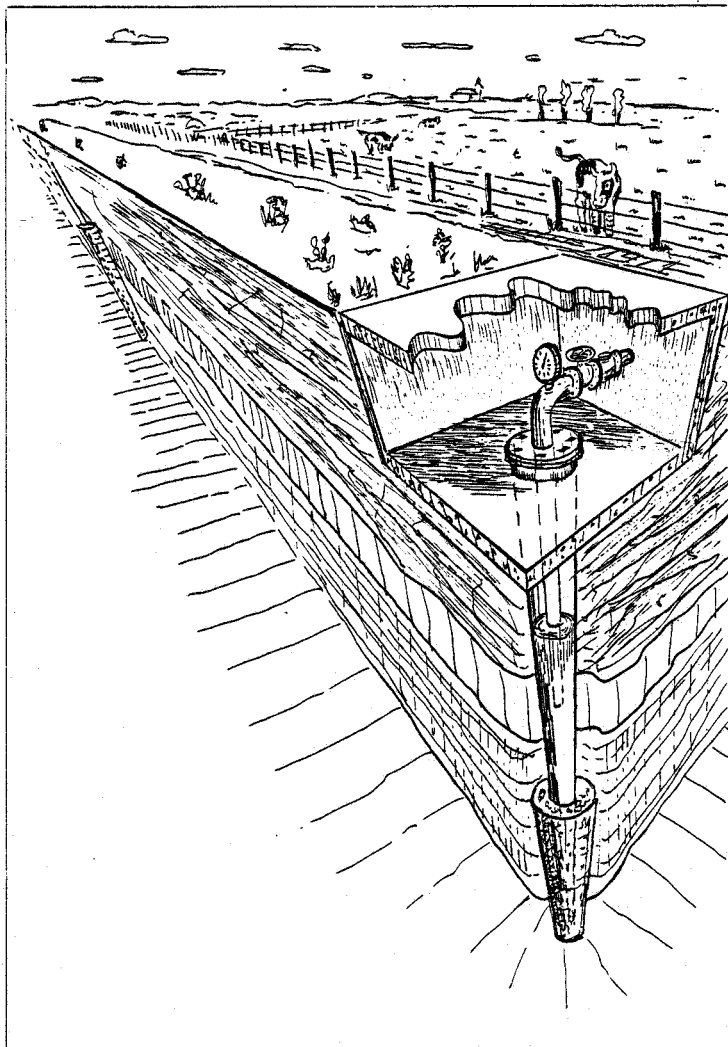
Eveneens van groot belang is de chemische en microbiologische kwaliteitsverbetering tijdens bodempassage met de daarbij behorende afbraak van bacteriën. Ook naar deze aspecten wordt in VEWIN-verband nog intensief onderzoek verricht.

## INLEIDING

Bij "kunstmatige infiltratie" wordt al dan niet gezuiverd oppervlaktewater in de grond gebracht, waar doorheen het naar de verderop gelegen winningsmiddelen stroomt. Het teruggewonnen water heeft een hygiënisch betere en vooral constante kwaliteit. Hiernaast is het belangrijk dat de terugwinning van het geïnfiltreerde water nog een aanzienlijke tijd kan worden voortgezet, wanneer de aanvoer van ruw water mocht wegvallen. Zo bekeken is kunstmatige infiltratie een methode om op betrouwbare wijze gebruik te kunnen maken van onbetrouwbaar oppervlaktewater. Zij heeft dit met spaarbekkens gemeen.

De infiltratie zelf (ook grondwateraanvulling genoemd) geschiedt in de regel op een eenvoudige manier, namelijk, door het laten wegzijgen uit hiervoor bestemde vijvers of kanalen (panden genoemd). Wanneer deze methodiek niet toepasbaar is, hetzij omdat de bovenste grondlagen ondoorlatend zijn, danwel de voor de panden benodigde ruimte ontbreekt, kan men het water via putten (zogenaamde persputten) in de grond brengen (fig. 1).

Persputten worden in andere bedrijfstakken op grote schaal toegepast, vooral bij de secundaire oliewinning (Tazelaar, 1969; Case, 1970; Patton, 1974 etc.), ten behoeve van deep-well-lozingen (Donaldson, 1972; Anoniem, 1973) en bij retourbemaling van grondwater (Brandes e.a., 1978). Ten behoeve van de waterleidingindustrie vinden zij toepassing in Spanje (Custodio-Gimea, 1970, 1980), Zwitserland (Schmassmann, 1978), Duitsland (Dorn, 1974) en op ruime schaal in Californië (Baffa, 1965; Bulten e.a., 1974; Doshi, 1972; Mc Illwain,



**Figuur 1 - Een eenvoudige persput in los bodem-  
teriaal**

1970) en Israël (Anoniem, 1969; Harpaz, 1970). In Nederland is de toepassing nog experimenteel, hoewel sinds een tiental jaren in ruime mate onderzoek is uitgevoerd en veel kennis en ervaring op dit gebied is vergaard (Bulten, 1971, 1972; Olsthoorn

e.a. 1975; Olsthoorn, 1977, 1979; zie ook de gegevens van de in het Nederlandse persputtenonderzoek onderzochte putten, appendix A).

Dit rapport bevat het resultaat van dit onderzoek voor wat betreft het onderdeel verstopping. De hier behandelde stof wordt elders nader onderbouwd (Olsthoorn, 1982).

Een persput (figuur 1) wijkt constructief nauwelijks af van een winningsput (Steinmetz, 1977, 1978; Sternau, 1967; Johnson e.a., 1966; Monkhouse and Philips, 1978 etc.). Hij zal in het algemeen iets steviger worden gemaakt (Uil en Deelder, 1978) en bevat een injectieleiding met toebehoren als afsluiters, eventueel een watermeter, een manometer en dergelijke.

In tegenstelling tot deep-well-lozingen en persputten van de olie-industrie, waar men vaak met tientallen tot honderden atmosferen overdruk werkt (Doscher and Weber, 1957), is het woord "persput" in de waterleidingindustrie meestal nauwelijks van toepassing. Gezien de geringe dieptes die de waterleiding toepast (tot zo'n 100 m), dient de druk namelijk sterk te worden beperkt, om te voorkomen, dat de grond rond de put bezwijkt (hoofdstuk 2). In veel gevallen gebruikt men in het geheel geen overdruk en is in de put ook tijdens bedrijf een vrije vloeistofspiegel aanwezig.

Aangezien de snelheid, waarmee het water ter plaatse van de boorgatwand de formatie binnentreedt, enkele ordes van grootte hoger is, dan waarmee het water bij infiltratiepanden in de bodem dringt, is het risico van verstopping bij een persput groot: waar een infiltratiepand pas na een aantal maanden

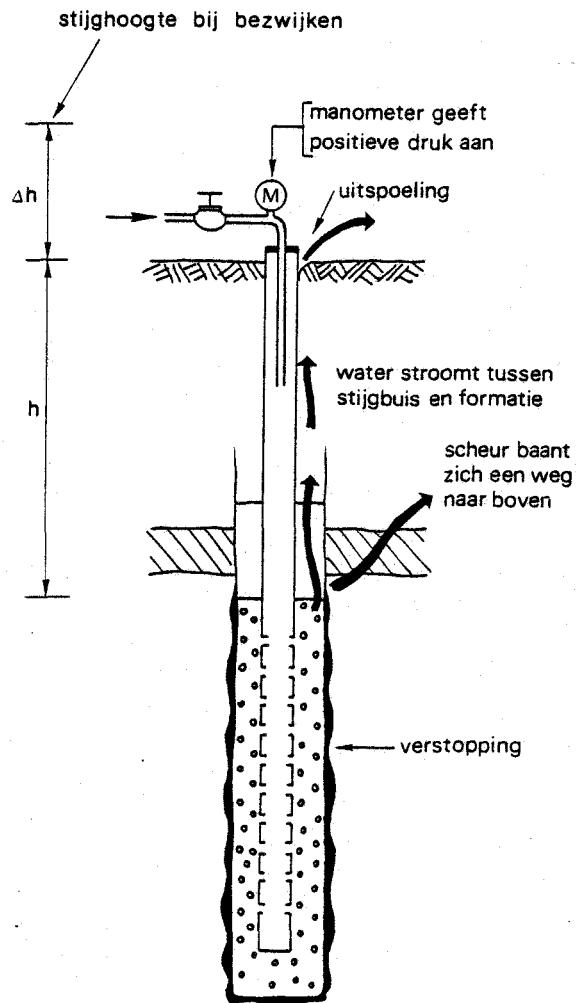
of jaren verstopt is, kan dit bij een persput reeds na dagen tot weken het geval zijn. Verstopping is bijgevolg een van de belangrijkste technische aspecten bij de toepassing van persputten. Met de oplossing van het verstoppingsvraagstuk is de toepassing van persputten als infiltratiemiddel technisch gezien mogelijk.



2

BODEMSPLIJTING

De bodem rond een persput bezwijkt bij te hoge injectiedruk (Howard and Fast, 1970; Hubbert, 1972), waarna de put door uitspoeling van bodemmateriaal onbruikbaar kan worden (figuur 2). De injectiedruk moet dus onder een maximaal toelaatbare waarde blijven, die als volgt kan worden berekend.



Figuur 2 - Onderloopsnelheid (achterloopsnelheid) van een infiltratieput

De minimale korrelspanning  $\sigma_3$  ( $N/m^2$ ) in een punt in de grond kan niet kleiner zijn dan de maximale korrelspanning  $\sigma_1$  in dat punt, gedeeld door de passieve gronddrukcoëfficiënt  $\lambda$ . Voor gronden met verwaarloosbare cohesie, zoals zand, klei en veen, hangt  $\lambda$  uitsluitend af van de hoek van inwendige wrijving  $\phi$  van de grond ( $\phi$  is grondeigenschap, zie standaardliteratuur grondmechanica):

$$\frac{\sigma_3}{\sigma_1} > \frac{1}{\lambda} = \frac{1 - \sin(\phi)}{1 + \sin(\phi)} \quad (2.1)$$

In ongeconsolideerd sediment met verwaarloosbare tektoniek (zand, klei en veen), kan  $\sigma_1$  gelijk worden gesteld aan de verticale totaal druk  $\sigma_g$  (grond-druk), verminderd met de waterspanning  $u$  ter plaatse.

Deze waterspanning loopt tijdens de infiltratie op met  $\Delta u$ . Aangezien bodemsplijting onmogelijk is, zolang de minimale korrelspanning  $\sigma_3 > 0$  (Verruijt, 1967), geldt:

$$\sigma_3 > (\sigma_g - u)/\lambda - \Delta u > 0 \quad (2.2)$$

$\Delta u$  is maximaal tegen de boorgatwand, terwijl  $\sigma_g - u$  daar minimaal is aan de bovenzijde van de omstorting. Dit is de kritische plaats en hierop dient bovenstaande eis te worden toegepast. Bevindt de bovenzijde van de omstorting zich op diepte  $h$  beneden maaiveld, dan volgt met  $\sigma_g = \gamma_g h$ ,  $u = \gamma_w h$ ,  $\Delta u = \gamma_w \Delta h$ , waarin  $\Delta h$  de drukhoogte in de put boven maaiveld en  $\gamma_g$  en  $\gamma_w$  het volume-gewicht van de natte

grond respectievelijk van water:

$$\Delta h < \frac{\gamma_g - \gamma_w}{\gamma_w} \frac{h}{\lambda} \quad (2.3)$$

Voor zandbodems geldt  $\gamma_g = 20000 \text{ N/m}^3$ , terwijl  $\gamma_w = 10000 \text{ N/m}^3$ . Daar normaliter  $\phi < 40^\circ$ , mag de waarde 5 als bovengrens voor  $\lambda$  worden aangehouden en geldt zodoende de vuistregel:

$$\Delta h < 0,2 h. \quad (2.4)$$

$\Delta h$  is nu de maximaal toelaatbare drukhoogte in de put boven maaiveld en geldt als zodanig evenzeer voor arthesisch grondwater. Alleen wanneer een dik pakket met lagere dichtheid (veen, klei) aanwezig is, dient een aparte berekening volgens (2.3) te worden gemaakt.

De ondergrens van 0,2 h blijkt ook te gelden voor de veel diepere persputten van de olie-industrie waarop "hydraulic fracturing" is toegepast (zie experimentele gegevens Howard and Fast, 1970, na omrekening naar hier behandelde grootheden, volumegewichten en dimensies (Olsthoorn, 1982)).

### 3 VERSTOPPING

#### 3.1 Verstoppingsoorzaken

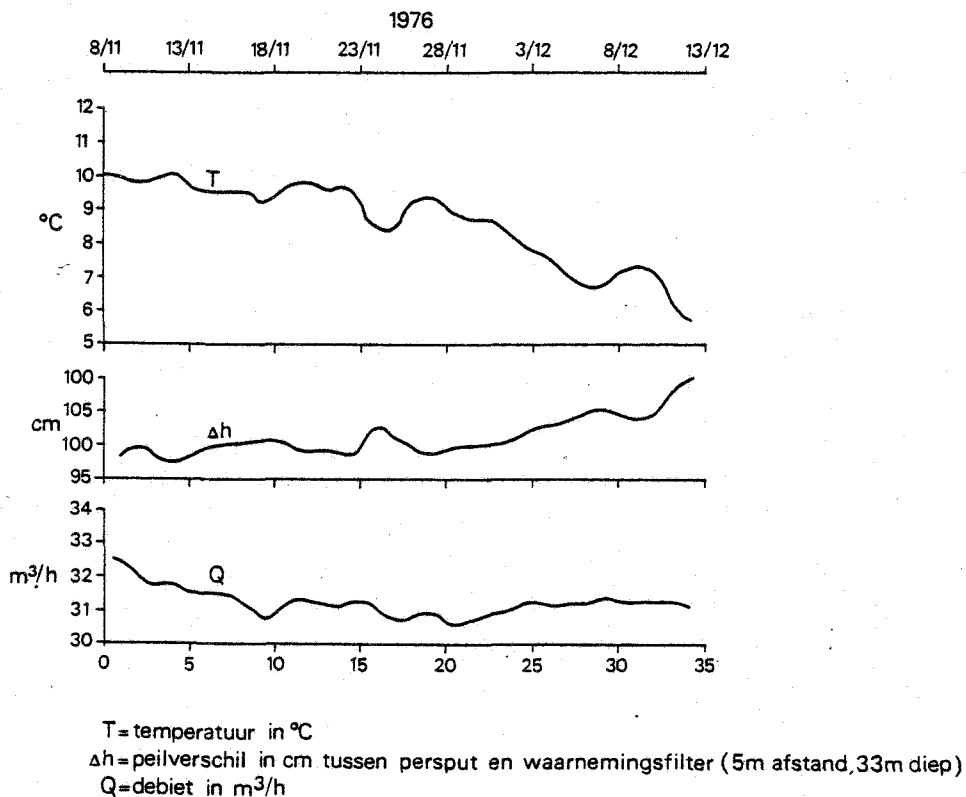
De volgende verstoppingsoorzaken kunnen worden aangegeven:

- 1) zwevende deeltjes in het infiltratiewater;
- 2) gasbellen in het water;
- 3) bacterieontwikkeling in en rond de put;
- 4) chemische neerslagvorming in het infiltratiewater en de put;
- 5) chemische neerslagvorming in de bodem;
- 6) zwellings- en dispersie van kleideeltjes in de bodem;
- 7) aantasting van de korrelstructuur van de bodem.

De oorzaken 2 tot en met 7 kunnen de installatie onbetrouwbaar maken en kunnen zeer ernstig zijn in hun gevolgen. Deze oorzaken dienen derhalve van tevoren te worden weggenomen, wat met adequaat onderzoek, een goed ontworpen installatie en een verantwoorde bedrijfsvoering ook mogelijk is.

Zwevende deeltjes en daarmee de verstopping door zwevende stof zijn niet altijd geheel te vermijden. De restconcentratie aan zwevende bestanddelen is afhankelijk van de samenstelling van het ruwe water, in samenhang met de wijze van voorzuivering. Per situatie is deze concentratie een directe functie van de zuiveringskosten, die hoog kunnen oplopen, wanneer een nagenoeg absolute verwijdering wordt nagestreefd. In de praktijk is afweging mogelijk tussen verder voorzuiveren, een groter aantal putten en vaker reinigen (regenereren) van de putten (zie hoofdstuk 5).

In tegenstelling tot grondwater, dat steeds nage-  
noeg dezelfde temperatuur (T) heeft, is de viscosi-  
teit ( $\mu$ ) van het voor infiltratie gebruikte opper-  
vlaktewater een punt om rekening mee te houden  
(figuur 3).



Figuur 3 - Reactie van het peilverschil tussen put en peilbuis,  $\Delta h$ , op schommelingen van de watertemperatuur en het infiltratiedebiet (uit Steinmetz, 1977, put Gemeentewaterleidingen te Leiduin).

De weerstand die het water ondervindt is hiermee immers evenredig. Het verschil tussen winters infiltratiewater van bijvoorbeeld 2 °C en zomers water van 28 °C is zodoende goed voor een (schijnbare) weerstandstoename van honderd procent.

De waterviscositeit  $\mu$  (Ns/m<sup>2</sup>) wordt nauwkeurig benaderd met:

$$\mu = \left\{ \left( \frac{510}{T + 43,1} \right)^{1,502} \right\} 10^{-3} \quad 0 < T \text{ (}^\circ\text{C)} < 100 \quad (3.1)$$

De eigenlijke verstopping van een persput blijkt dus pas na temperatuurscorrectie, die normaliter wordt uitgevoerd door de gemeten weerstand terug te rekenen naar de waarde die bij 10 °C zou zijn gemeten. De hiertoe benodigde vermenigvuldigingsfactor ( $\mu_{10}/\mu_T$ ) wordt vaak als volgt benaderd:

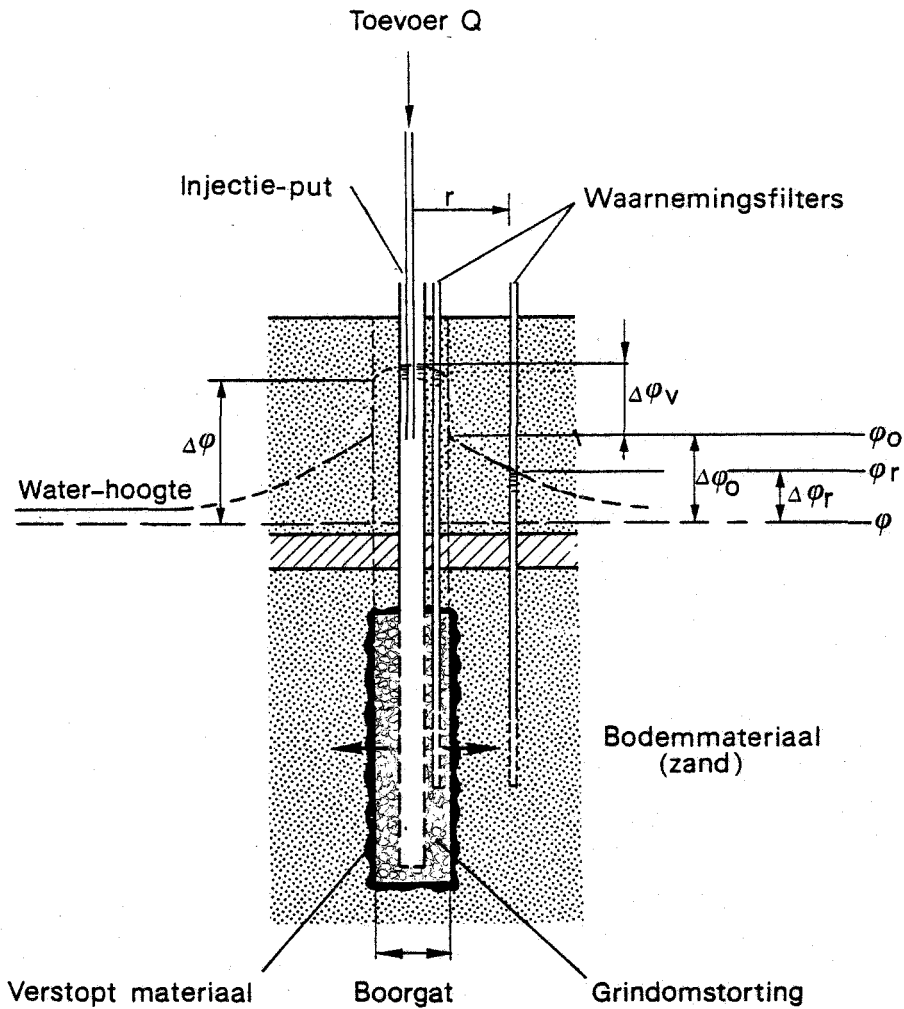
$$\frac{\mu_{10}}{\mu_T} \approx \frac{T + 20}{30} \quad (T \text{ in } ^\circ\text{C}) \quad (3.2)$$

De weerstand (W) van een persput volgt, na de temperatuurscorrectie, uit de toename van de benodigde druk of stijghoogte ( $\phi$ ) per eenheid van infiltratiedebiet (Q).

De zogenaamde verstoppingsweerstand ( $W_v$ ) is het verschil tussen de totale weerstand en de natuurlijke weerstand van de put, de weerstand van de put toen deze nog nieuw was:

$$W_v = \left( \frac{\mu_{10}}{\mu_T} \right) \left( \frac{\phi_o - \phi_r}{Q} \right); \quad (\text{m}/(\text{m}^3/\text{h})) \quad (3.3)$$

Voor  $\phi_o$  wordt het waterniveau of de druk in de put genomen.  $\phi_r$  is het waterniveau in een naburige peilbuis ( $\phi_r$ ) of de rustgrondwaterstand ( $\phi$ ) (figuur 4).



**Figuur 4 - Persputverstopping en relevante waterstanden**

Beschikt men over een peilbuis in de omstorting van de put, dan kan de verstopping van de filterspleten en de eerste centimeters omstortingsgrond apart worden bepaald. Aangezien de verstopping in verreweg de meeste gevallen op de boorgatwand is geconcentreerd en dan hoogstens enkele centimeters diep in het formatiezand reikt, kan ook het niveau in een peilfilter in dezelfde put, maar dan in fijn

zand boven of onder de omstorting, als referentie van de niet verstopte formatie dienst doen. Dit dan als alternatief voor een aparte peilput op enige afstand.

Vaak echter verdienen een of meerdere waarnemingsputten op afstand, om diverse andere redenen, de voorkeur.

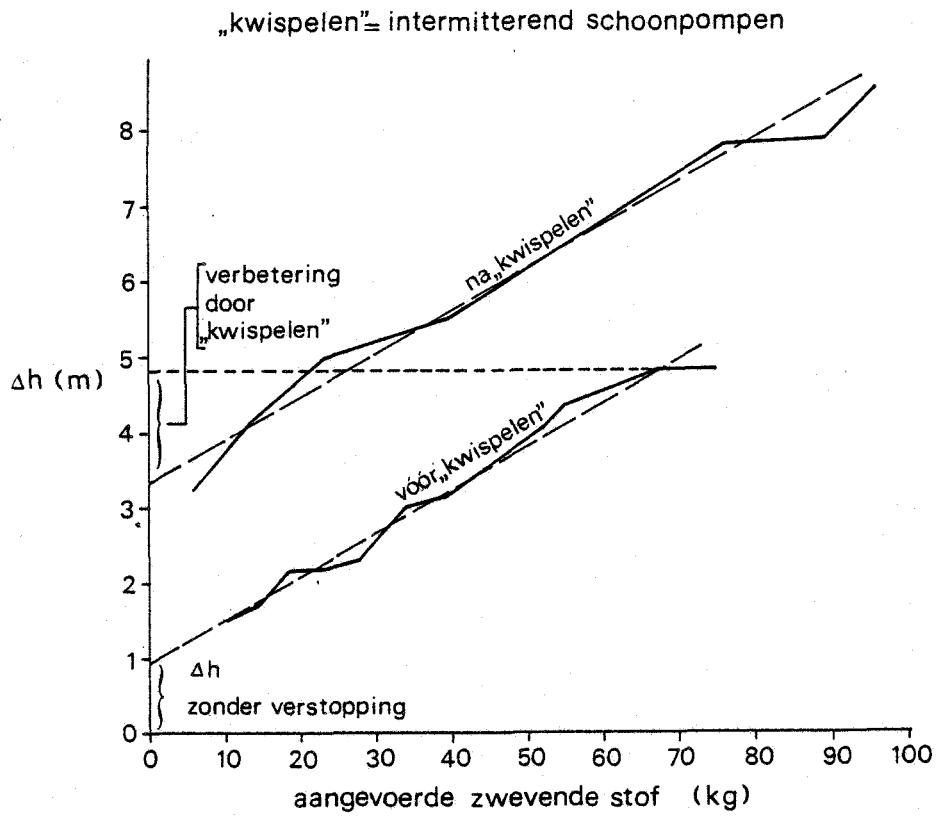
### 3.2 Zwevende stof

Wanneer, door een goede installatie, verstopping door lucht- of gasbellen en door een chloring, de verstopping door bacteriën kan worden uitgesloten, terwijl er geen aanwijzingen zijn dat chemische reacties in de put, met het oorspronkelijke grondwater of met de bodem plaatsvinden (zie volgende paragrafen), dan is de zwevende stof de meest waarschijnlijke verstoppingsoorzaak. De zwevende bestanddelen in het infiltratiewater kunnen van uiteenlopende aard, vorm en grootte zijn, anorganisch zowel als organisch van samenstelling.

Is de samenstelling van de zwevende stof enigszins constant, dan veroorzaakt deze in het algemeen een vaste weerstandstoename per kg ingebracht materiaal (figuur 5 en Vecchioli, 1980). Wanneer bovendien de concentratie constant is, dan is ook het verband tussen weerstand en totaal ingebracht volume water lineair (figuur 6 en 8). Daar, naast de normale evenredigheid tussen drukverhoging en debiet (Darcy), nu ook de toevoer van verstoppend materiaal per tijdseenheid evenredig is met het debiet, ontstaat een kwadratisch verband tussen de snelheid waarmee de injectiedruk of waterstand ( $\phi$ ) in de put oploopt en het infiltratiedebiet ( $Q$ ) (figuur 7):

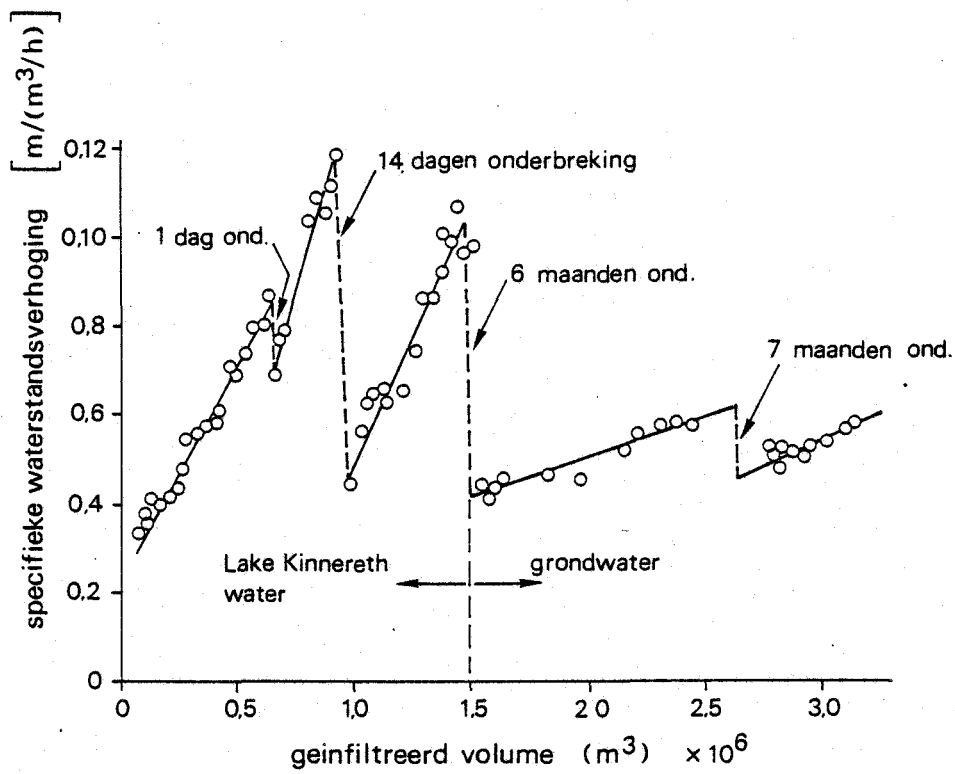
$$\frac{d\phi}{dt} \sim Q^2 \quad (3.4)$$



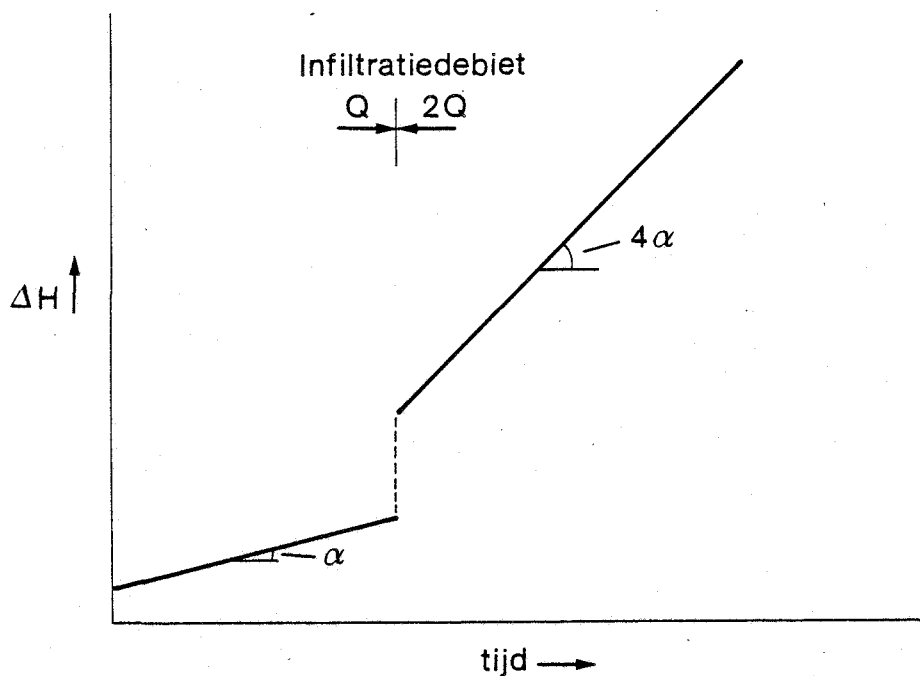


Hoogovenput, „weerstand“ vs. aangevoerd slib.

**Figuur 5 - Waterstand in de persput (minus die in van de waarnemingsput op 40 m afstand) als functie van de totale hoeveelheid slib die is geïnfiltreerd.**  
Hoogovenput, periode augustus 1970 tot februari 1971. (Uit Brandes, in: Bulten, 1972, zie appendix A voor verdere gegevens.)



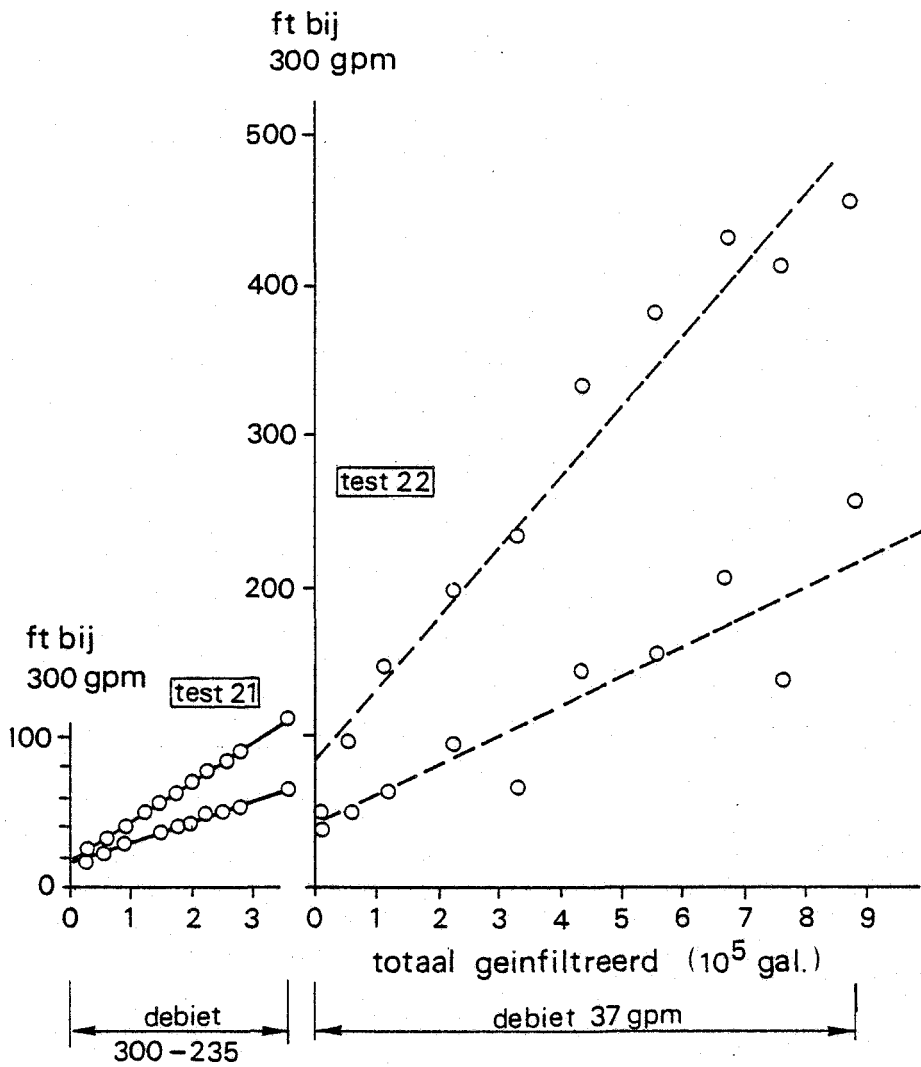
Figuur 6 - Specifieke waterstandsverhoging als functie van het totaal geïnfiltreerde volume. (Put Gilgal, Israël. Uit discussie, toegevoegd aan paper van Harpaz, 1970.)



Kwadratisch debietseffect op weerstand vs. tijd.

**Figuur 7 - Het effect van debietsverdubbeling op de benodigde infiltratiedruk (verstopping door zwevende stof)**

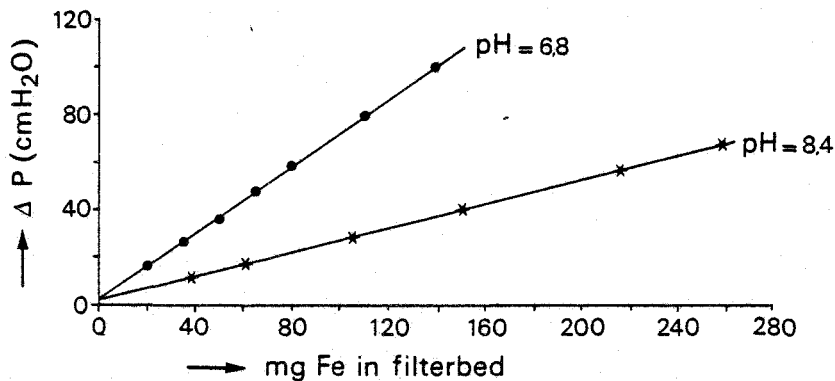
Met deze betrekking kan de gemeten drukopbouw, ondanks variaties in het infiltratiedebiet, worden omgerekend naar een bepaald standaarddebiet en uitgezet tegen het totaal geïnfiltreerde volume water. Ter illustratie is deze bewerking uitgevoerd op de gegevens van 2 proeven van Sniegocki (1963). Het verkregen verband (zie figuur 8) is lineair, ondanks een sterk debietverloop tijdens de proef. Bij andere putten wordt eveneens een dergelijk recht verband geconstateerd.



Weerstandstoename vs. totaal volume lineair ondanks sterk variërend infiltratiedebiet.  
(Geg. Sniegocki 1965).

Figuur 8 - De waterstand in de put respectievelijk de zandomstorting minus die in de waarnemingsput op 1,8 m afstand, teruggerekend naar 10 °C en 300 gpm (68,2 m<sup>3</sup>/h) als functie van het totaal geïnfiltreerd volume. Proeven 21 en 22 van Sniegocki, 1965 (gpm = gallons van 3,79 l per minuut).

In oppervlaktewater komen zeer veel natuurlijke en kunstmatige soorten zwevende stof voor, die zich, al naar gelang de samenstelling van het water en onderlinge interacties, anders kunnen gedragen. Zo blijken de verstoppende eigenschappen van een ijzerhydroxidesuspensie (figuur 9) sterk van de pH van het water af te hangen (Lerk, 1965).



Figuur 9 - Invloed van de pH op de drukval over een door een ijzersuspensie verstopt filter (Uit Lerk, 1965.)

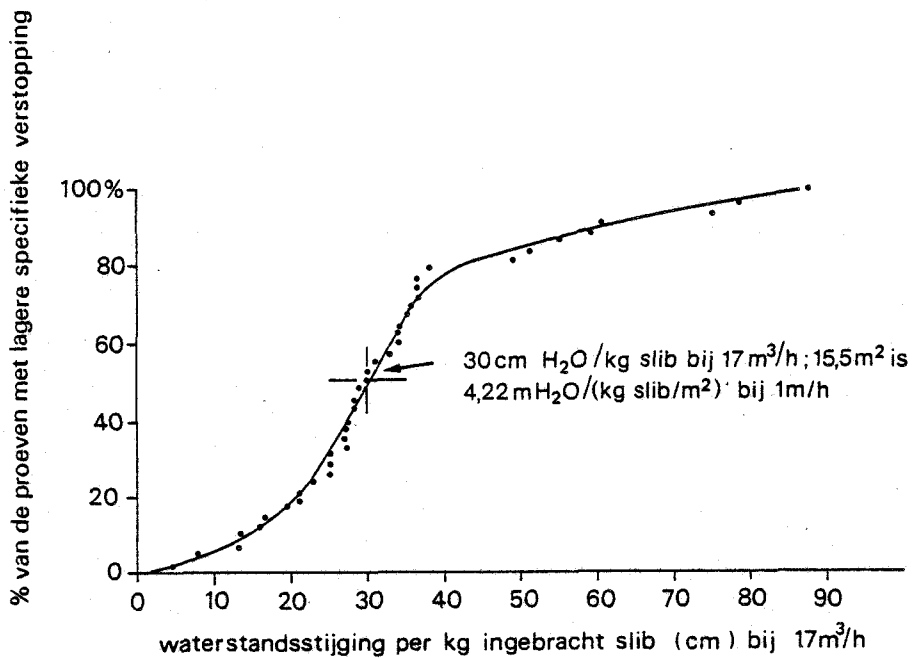
Verstoppende eigenschappen van kleisuspensies van dezelfde soort klei verschillen, wanneer de klei van verschillende vindplaatsen afkomstig is (Signor, 1973). Soms neemt de verstoppingssnelheid niet af, ondanks een sterke verlaging van de concentratie zwevende stof. Dit bleek (Sniegocki, 1963) het geval bij tussenschakeling van een coagulatie in de voorzuivering (zie Olsthoorn, 1982),

die de negatieve lading van de zwevende deeltjes wegneemt. Deze worden vervolgens, door de negatief geladen formatiekorrels, veel efficiënter afgevangen nu deeltjes en formatiemateriaal elkaar niet meer elektrisch afstoten. De deeltjes worden hierdoor in een dunnere verstoppingslaag geconcentreerd, met een relatief grote weerstandsofbouw als gevolg.

Bij een efficiënte filtratie door de bodem kunnen enkele grammen zwevende stof per m<sup>2</sup> infiltratieoppervlak reeds 1 m waterstandsstijging in de put veroorzaken bij een infiltratiesnelheid van rond 1 m/h op de boorgatwand (Marshall, 1968, Olsthoorn 1979). Bij de als hoog te beschouwen concentratie van 1 mg/l is dit dus al binnen enkele uren het geval. Bij een minder efficiënte filtratie door de bodem (fijne, negatief geladen zwevende deeltjes, grof bodemmateriaal, Rahman, 1969) kan dit veel langer duren (figuur 10 en Bichara, 1974).

De omstorting speelt in dit proces mee, waarbij zijn rol overeenkomt met de eerste grove laag van een meerlaagsfilter. De omstorting vangt zonder noemenswaardige weerstandsverhoging deeltjes af en ontlast daarmee de formatiewand, waar de verstopping zich concentreert. Hierdoor levert de omstorting over het algemeen een belangrijke reductie van de verstoppingssnelheid (Olsthoorn, 1982).

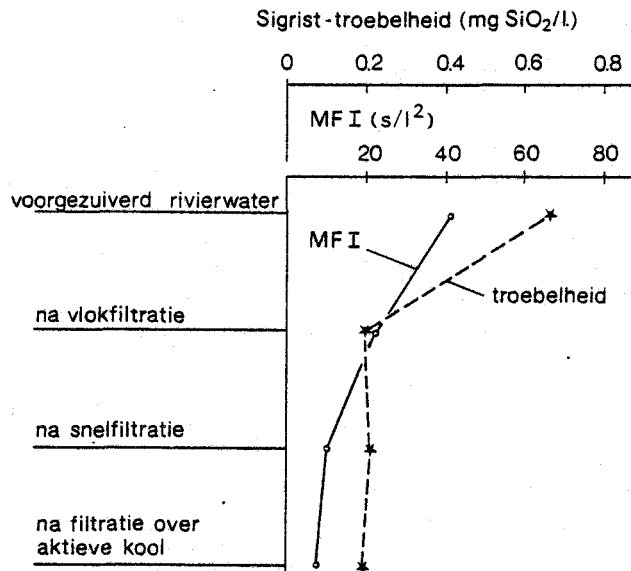
Uit de genoemde punten blijkt dat voorspelling van de verstopping die in een te ontwerpen persput zal optreden voorlopig een uitzichtloze zaak is, wanneer deze uitsluitend gebaseerd is op analyses van het infiltratiewater en de zwevende bestanddelen daarin. Het onderzoek wordt voorts bemoeilijkt, omdat er, bij water met een lage concentratie zweven-



Figuur 10 - Waterstandsstijging (cm) in de Hoogovenput per kg zwevende stof bij 17 m<sup>3</sup>/h. (zie voor nadere gegevens appendix A)

de stof, drinkwater bijvoorbeeld, geen verband bestaat tussen deze concentratie, de troebelheid en de verstopping van een persput (Olsthoorn, 1979). Uit dit soort gegevens zijn dan ook met betrekking tot de voorspelling en analyse van persputverstopping nauwelijks relevante conclusies te trekken.

Betere resultaten worden verkregen met een zogenaamde membraanfiltertest (figuur 11, Felsenthal 1956, Doscher and Weber, 1957, Stormont, 1958, Barkman and Davidson, 1972). De meest moderne membraanfiltertest is die volgens Schippers en Verdouw (1980), feitelijk een uitwerking voor de drinkwaterindustrie van het werk van Doscher en Weber (1957) en Barkman en Davidson (1972). Schippers en



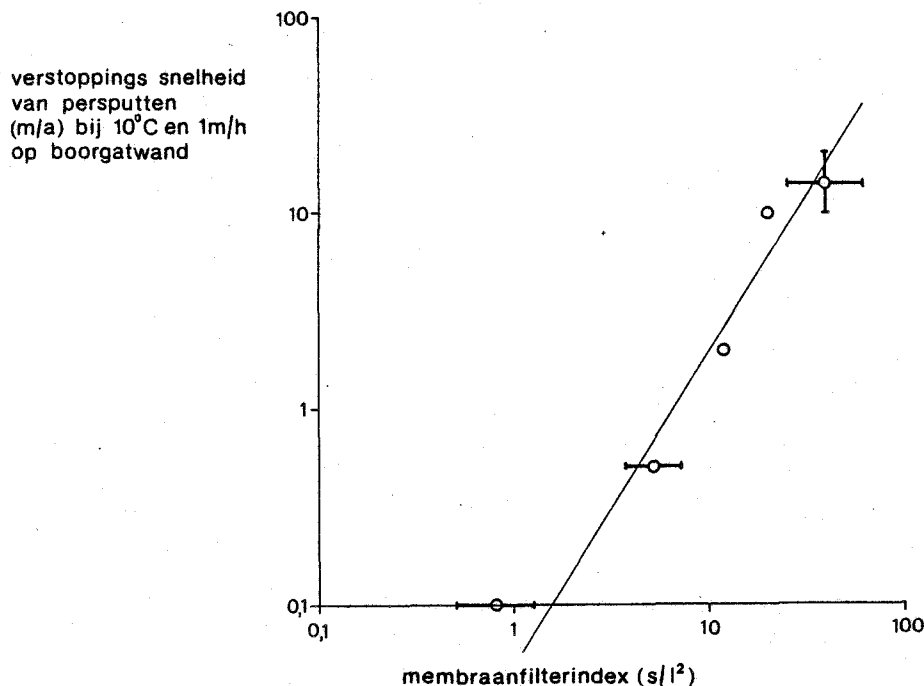
Gevoeligheid MFI vs. die van troebelheid.

**Figuur 11 - Afname van de troebelheid en de membraanfilterindex (MFI) in een proefzuiveringsinstallatie te Leiduin (Olsthoorn, 1979).**

Verdouw (1980) persen het te onderzoeken water onder constante druk (2 bar) door een membraanfilter van 47 mm diameter en poriën van 0,45 micrometer. Het resultaat wordt verwerkt tot de zogenaamde membraanfilterindex (ook: "Modified Fouling Index" genoemd), uitgedrukt in  $s/l^2$  (s= seconden, l= liter) waarvan kan worden gezegd, dat waarden onder 3 goed en boven 10 à 15 slecht zijn voor persputten (figuur 12).

Voor het uiteindelijke ontwerp zullen experimenten op praktijkschaal noodzakelijk blijven. De interpretatie van de gegevens van experimenten met proefputten wordt in hoofdstuk 5 behandeld.





**Fig. 12 - Verband tussen persputverstopping en membraanfilterindex van Nederlandse persputten**

Voor een goed begrip van dit soort verstopping en de interpretatie van verkregen proefresultaten worden enkele basisbetrekkingen afgeleid:

de toename van de stijghoogte  $\Delta\phi$  in een persput, ten opzichte van de rustwaterstand of het niveau in een nabije waarnemingsput, wordt nu gesplitst in een deel  $\Delta\phi_o$  ten gevolge van de bodem zelf en een deel  $\Delta\phi_v$  door verstopping (figuur 4), die de doorlatendheid  $k$  tussen de grenzen  $r_o$  en  $r_v$  tot  $k_v$  heeft gereduceerd. De in totaal benodigde

stijghoogtetoeename in de put bedraagt bij putfiltratie:

$$\begin{aligned}\Delta\phi &= \frac{Q}{2\pi k_v H} \ln\left(\frac{r_v}{r_o}\right) + \frac{Q}{2\pi k H} \ln\left(\frac{R}{r_v}\right) \\ &= \frac{Q}{2\pi k^* H} \ln\left(\frac{r_v}{r_o}\right) + \frac{Q}{2\pi k H} \ln\left(\frac{r_v}{r_o}\right) + \frac{Q}{2\pi k H} \ln\left(\frac{R}{r_v}\right) \quad (3.5)\end{aligned}$$

Waarin R een integratieconstante is (m).

Aangezien de laatste 2 termen te zamen de natuurlijke bodemweerstand leveren, namelijk:

$$\Delta\phi_o = \frac{Q}{2\pi k h} \ln\left(\frac{R}{r_o}\right); \text{ volgt met } \Delta\phi_v = \Delta\phi - \Delta\phi_o:$$

$$\Delta\phi_v = \frac{Q}{2\pi k^* H} \ln\left(\frac{r_v}{r_o}\right) = \frac{Q}{2\pi h} \left\{ \frac{1}{k_v} - \frac{1}{k} \right\} \ln\left(\frac{r_v}{r_o}\right) \quad (3.6)$$

zodat de sommatie in (3.5) steeds is toegestaan mits  $k_v$  wordt vervangen door  $k^*$ :

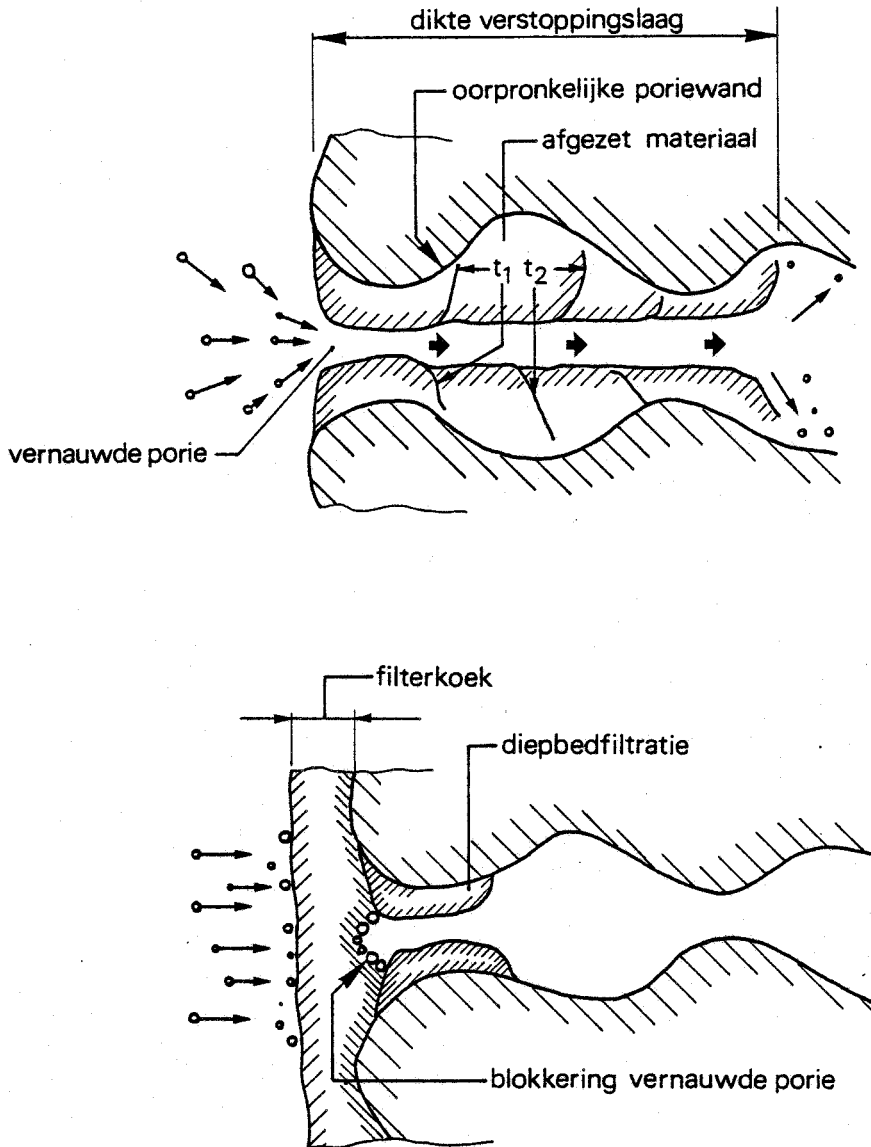
$$k^* = k k_v / (k - k_v) \quad (3.7)$$

Daar normaliter  $k \gg k_v$ , reduceert vergelijking (3.7) tot  $k^* = k_v$ .

De viscositeit van het water zit in deze doorlatendheidscoëfficiënten als volgt verwerkt:

$$k = \frac{\rho g}{\mu} k_i \quad (3.8)$$

$k$  = doorlatendheidscoëfficiënt (m/s),  $\rho$  = dichtheid van water;  $\rho = 1000 \text{ kg/m}^3$ ,  $g$  = sterkte van het zwaartekrachtsveld;  $g = 9,81 \text{ N/kg}$ ,  $k_i$  is intrinsieke doorlatendheidscoëfficiënt ( $\text{m}^2$ ), een materiaaleigenschap die onafhankelijk is van de vloeistof die er doorheen stroomt.



Figuur 13 - boven: Verstopping bij diepbedfiltratie.

onder: Worden poriën door de diepbedfiltratie te nauw, of zijn de deeltjes in het water te groot, dan ontstaat verstopping door koekfiltratie.

De drukval  $dp$  ( $N/m^2$ ) ten gevolge van de stroming door een verstoppingslaagje met dikte  $dl$  (m) en doorlatendheid  $k_i$  ( $m^2$ ), bedraagt, bij een debiet  $Q$  ( $m^3/s$ ) en een filtratieoppervlak  $A$  ( $m^2$ ):

$$dp = \left(\frac{\mu}{k_i}\right) \left(\frac{Q}{A}\right) dl \quad (3.9)$$

Daar  $p$  recht-evenredig is met  $Q$  en  $\mu$ , kan het begrip weerstand ( $W$ ) worden ingevoerd:

$$dW = d\left(\frac{p}{Q\mu}\right) = \left(\frac{1}{k_i A}\right) dl \quad (3.10)$$

Het toegevoerd volume verstoppingslaag per  $m^3$  water ( $dV$ ) hangt, via  $A$ , direct met  $dl$  samen:  $dV = A dl$ , terwijl voor een put:  $dV = (2\pi r)(H)dr$  met  $r$  de afstand tot het hart van de put waar de verstopping plaatsvindt en  $H$  de lengte van de omstorting, zodat:

$$dW = \frac{dV}{k_i A^2} = \left(\frac{1}{2\pi k_i H}\right) \left(\frac{dr}{r}\right) \quad (3.11)$$

Met  $W = 0$  als  $t = 0$ , dat wil zeggen  $r =$  de boorgatradius  $r_0$ :

$$W = \frac{1}{2\pi k_i H} \ln\left(\frac{r}{r_0}\right) \quad (3.12)$$

Bij koekfiltratie op de boorgatwand (figuur 13 onder) neemt  $r$  steeds verder af ( $r < r_0$ )

$$V = \int_0^t Qcdt = \pi H(r_0^2 - r^2) \quad (3.13)$$

Waarin  $c$  de concentratie zwevende stof (dimensie:  $m^3$  verstopte laag per  $m^3$  water).

Bij diepbedfiltratie (figuur 13 boven) geldt het omgekeerde: ( $r > r_0$ )

$$V = \int_0^t Qc dt = \pi H(r^2 - r_0^2) \quad (3.14)$$

Dit levert nu met  $\phi = \frac{p}{\rho g}$ :

$$\Delta\phi_v = \frac{(\mu/\rho g)Q}{2\pi k_i H} \ln\left(1 \pm \frac{V}{\pi r_0^2 H}\right) \quad (3.15)$$

Het plusteken voor diepbed en het minteken voor koekfiltratie. (Uiteraard hoort bij een ander filtratieproces ook een andere doorlatendheid.) Voor een kleine tijd en dus kleine  $V$  gaat de betrekking over in die voor lineaire filtratie:

$$\Delta\phi_v = \left(\frac{1}{\rho g}\right) \left(\frac{\mu}{k_i}\right) \left(\frac{Q}{A_0}\right) \left(\frac{V}{A_0}\right), \text{ waarin } A_0 = 2\pi r_0 H \quad (3.16)$$

Ofwel:

$$\Delta\phi_v = \left(\frac{1}{\rho g}\right) \left(\frac{\mu c}{k_i}\right) v \bar{V} \quad (3.17)$$

waarin  $v$  de infiltratiesnelheid op de boorgatwand ( $m/h$ ) en  $\bar{V}$  het per  $m^2$  boorgatwand ingebrachte volume zwevende stof ( $m$ ).

Aangezien deze betrekking onafhankelijk van het momentane debiet is afgeleid, geldt zij algemeen voor dit soort verstoppingen en is zowel bruikbaar bij infiltratie onder constante druk als bij infiltratie onder constant debiet.

Bij constante concentratie  $c$  ( $m^3$  verstoppingslaag per  $m^3$  water) geldt:

$$\Delta\phi_v = \left(\frac{1}{\rho g}\right) \left(\frac{c\mu}{k_i}\right) v \bar{U} \quad (3.18)$$

met  $\bar{U}$  het totaal per  $m^2$  boorgatwand geïnfiltreerde volume water (m).

Is bovendien het debiet constant, dan geldt:

$$\Delta\phi_v = \left(\frac{1}{\rho g}\right) \left(\frac{c\mu}{k_i}\right) v^2 t \quad , \quad (3.19)$$

equivalent met het eerder genoemde kwadratische verband tussen druktoename en infiltratiesnelheid.

Bij constante druk  $p$  of stijghoogte  $\phi$ , en een totaal geïnfiltreerd volume  $\bar{U}$  per  $m^2$  boorgatwand volgt, met  $v = v_0$  als  $t = 0$ :

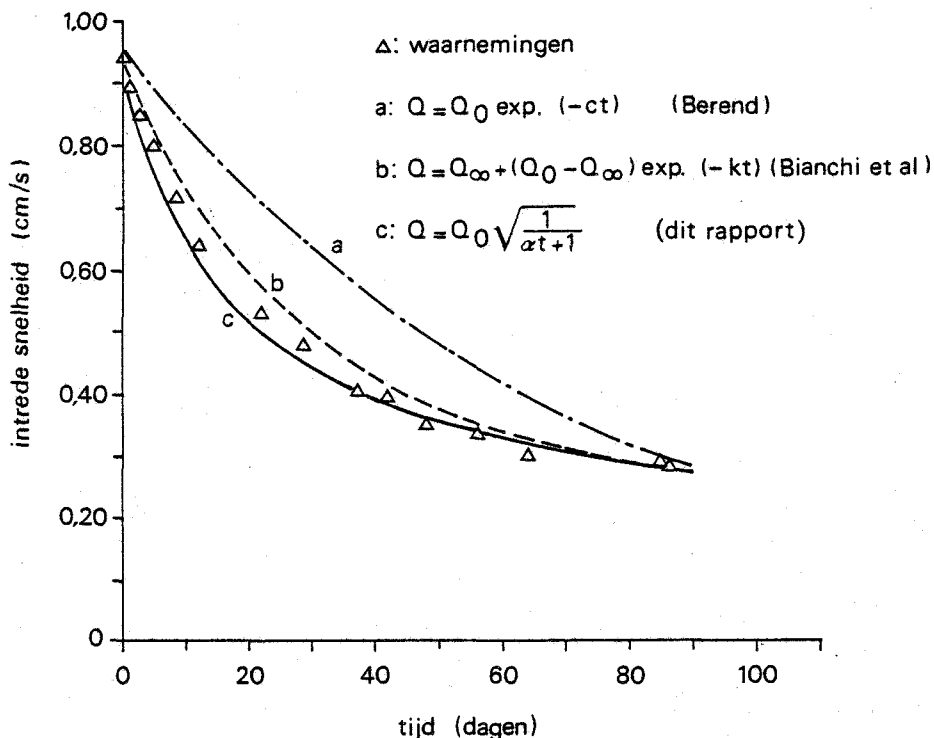
$$v = \frac{v_0}{a + 1} \quad \text{met } a = \left(\frac{v_0}{p}\right) \left(\frac{c\mu}{k_i}\right) \bar{U} \quad (3.20)$$

terwijl uitwerking naar de tijd  $t$  in plaats van naar  $\bar{U}$  oplevert:

$$v = \frac{v_0}{\sqrt{(bt + 1)}} \quad , \quad \text{met } b = \left(\frac{2}{p}\right) \left(\frac{c\mu}{k_i}\right) v_0^2 \quad (3.21)$$

Figuur 14 toont dat dit verband de resultaten van Bianchi en Nightingale (1978) beter dekt dan de door hun gebruikte kunstmatige benaderingen die een duidelijke fysische achtergrond ontberen.

De afgeleide formules kunnen worden gebruikt ter beschrijving van de verstopping door zwevende stof.



**Figuur 14 - De infiltratiesnelheid als functie van de tijd; vergelijking met verschillende formules uit Bianchi et al, 1978.**

De waterkwaliteit zelf, die gelijk gesteld kan worden aan de factor  $\frac{c}{k_i}$ , is alleen proefondervindelijk vast te stellen en zal in een natuurlijk water op onbekende wijze variëren, terwijl  $c$  en  $k_i$  ook nog van de formatie afhangen. Van belang is, dat de formules het mogelijk maken de verstopping van willekeurige persputten onderling te vergelijken. Hiertoe wordt de opgetreden stijghoogtetoeename teruggerekend naar het aantal meters waterstandsstijging, dat zou zijn opgetreden, wanneer het water een temperatuur van 10 °C had en gedurende 1

jaar, met een snelheid van 1 m/h op de boorgatwand zou zijn geïnfiltreerd.

Het is hierbij voldoende om alleen een punt aan het begin en aan het einde van de te beschouwen periode met elkaar te vergelijken. Aan het begin van de te beschouwen periode bedraagt het debiet  $Q_b$ , is de waterviscositeit  $\mu_b$  en de waterstand ten opzichte van de ruststand of die in een nabij gelegen peilput  $\phi_b$ . Aan het einde van de beschouwde periode zijn deze grootheden respectievelijk:  $Q_e$ ,  $\mu_e$  en  $\phi_e$ . Gedurende de periode met de lengte  $t$  werd het waterniveau  $U$  geïnfiltreerd. De put heeft een infiltratieoppervlak  $A$ . De gezochte standaardwaterstandsstijging  $\Delta\phi_s$  die zou optreden bij de standaard-infiltratiesnelheid  $v_o = Q_o/A$ , (1 m/h), waterviscositeit  $\mu_o$  (watertemperatuur 10 °C gedurende de standaardtijd  $t_o$  (8760 h) bedraagt:

$$\Delta\phi_s = \left\{ \phi_e \left( \frac{\mu_o}{\mu_e} \right) \left( \frac{v_o}{Q_e/A} \right) - \phi_b \left( \frac{\mu_o}{\mu_b} \right) \left( \frac{v_o}{Q_b/A} \right) \right\} \left\{ \frac{v_o t_o}{U/A} \right\} \quad (3.22)$$

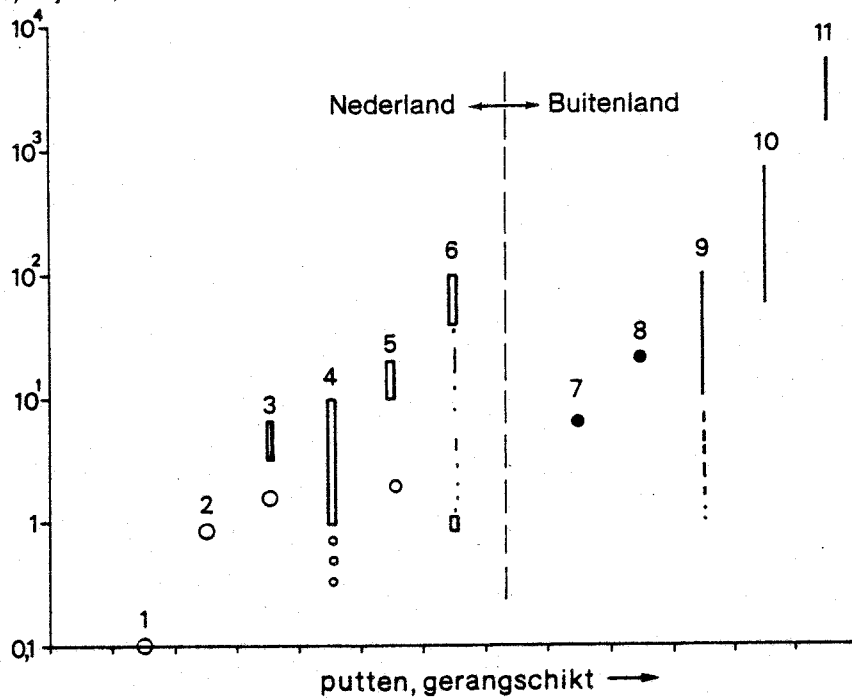
die, wanneer  $\mu_e = \mu_b = \mu_o$ ,  $Q_e = Q_b = v.A$  en  $U = vAt$ , overgaat in het bekende kwadratische verband:

$$\Delta\phi_s = (\phi_e - \phi_b) \left( \frac{v_o}{v} \right)^2 \left( \frac{t}{t_o} \right) \quad (3.23)$$

Met deze formules zijn persputten waarvan de gegevens bekend zijn onder eenzelfde noemer gebracht (zie fig. 15). Het bleek daarbij dat bekende, succesvolle genoemde installaties soms matig afsteken tegenover andere die als minder succesvol bekend staan.



verstoppingsnelheid  
(m/a) bij 1m/h en 10°C

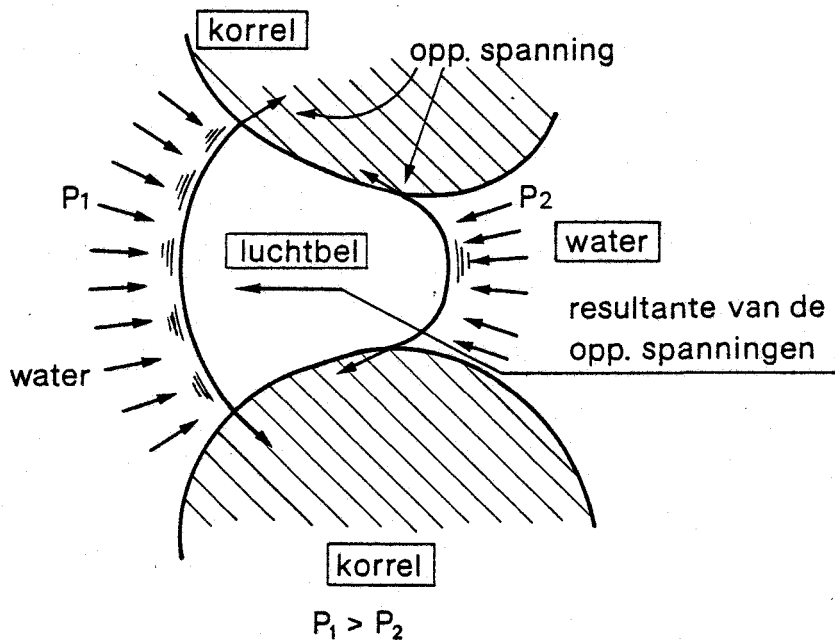


1. Den Haag, drinkwaterinfiltratie (1973-1980)
2. Leiduin, modelpersput (1978-1979)
3. Leiduin, WRK-waterinfiltratie (1977-1979)
4. Den Haag, rivierwater voorgezuiverd; proefinstallatie (1974-1980)
5. Hoogovens, gefiltreerd rivierwater (1970-1974)
6. Castricum, drinkwater in Andijk (1975-1980)
7. Putten Israël (Rebhun en Schwarz, 1968)
8. Putten Californië (Bulten, 1973)
9. Put in Texas (Sniegocki, 1965)
10. Put Long Island N.Y. (Vecchioli, 1972)
11. Put Norfolk Virginia (Brown en Silvey, 1973)

Vergelijking verstoppingsnelheid van Nederlandse en buitenlandse persputten

Fig. 15 - Opgetreden verstoppingsnelheden in persputten en modelproeven in fijn tot matig grof zand.

\* Zie appendix A



**Figuur 16 - Weerstand van een vastgelopen gasbel door vervorming, waardoor de oppervlaktespanning een weerstandbiedende kracht oplevert.**

### 3.3

#### Gasbellen

Gas- en luchtbelllen met een diameter van 1 à 10 mm stijgen met 0,3 à 0,4 m/s in water op (Rautenberg, 1975). Zij kunnen dus in de meeste persputten het filter bereiken, door de filterspletten en de omstorting dringen en dan de formatieporiën buitengewoon snel blokkeren (figuur 16, Sniegocki, 1963). Wanneer de injectieleiding geheel onder in het filter uitmondt, kunnen de belllen het gehele filter verstoppen. Mondt deze leiding boven het filter uit, dan is dit niet het geval, omdat de belllen, met hun bij benadering constante stijgsnelheid door

de met de diepte in het filter afnemende verticale watersnelheid, het onderste filtergedeelte niet kunnen bereiken. Laat men in een dergelijke put met het toenemen van de verstopping het debiet teruglopen, dan blijkt de verstopping op een zeker niveau te stabiliseren. Er is dan evenwicht tussen aanvoer en oplossen. De hoge snelheid waarmee de put vanaf het moment van in bedrijfname verstopt en het genoemde evenwicht zijn kenmerkend voor de verstopping door gasbellen.

Bellen kunnen in het water terechtkomen door:

- a) vrije val van water in de put (entrainment);
- b) lekken op plaatsen in de leidingen waar een onderdruk heerst (afsluiters, bovenzijde injectieleiding);
- c) oververzadiging van een bepaald gas (ontstaan door drukdaling of verwarming).

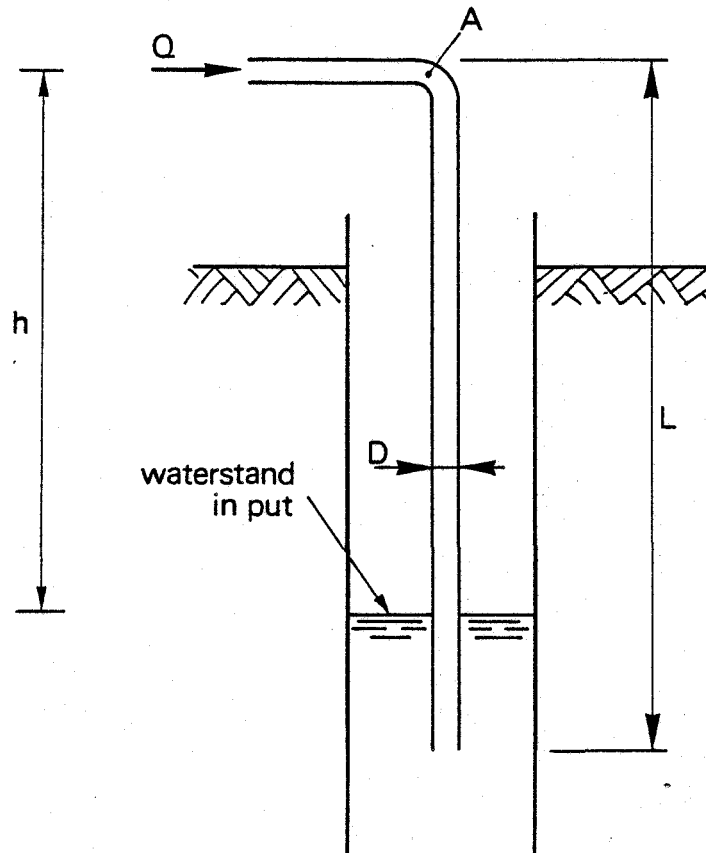
ad a

De vrije val van het water en onderdruk aan de bovenzijde van de injectieleiding wordt voorkomen door deze aan de onderzijde van de juiste (eventueel regelbare) restrictie te voorzien, dan wel een zodanig nauwe injectieleiding toe te passen, dat zijn wandfrictie de benodigde tegendruk verzekert (Sniegocki en Reed, 1963).

De vereiste frictie  $f$  (weerstand in  $\text{mH}_2\text{O}$  per m injectieleiding) bedraagt (figuur 17):

$$f = h/L \quad (3.24)$$

met  $h$  de afstand van het laagste punt van de injectieleiding tot het laagste waterniveau (m) in de put en  $L$  de lengte van het verticale deel van de injectieleiding (m). Tabel 1 geeft waarden voor  $f$



Figuur 17 - Essentiële maten van een infiltratie-leiding

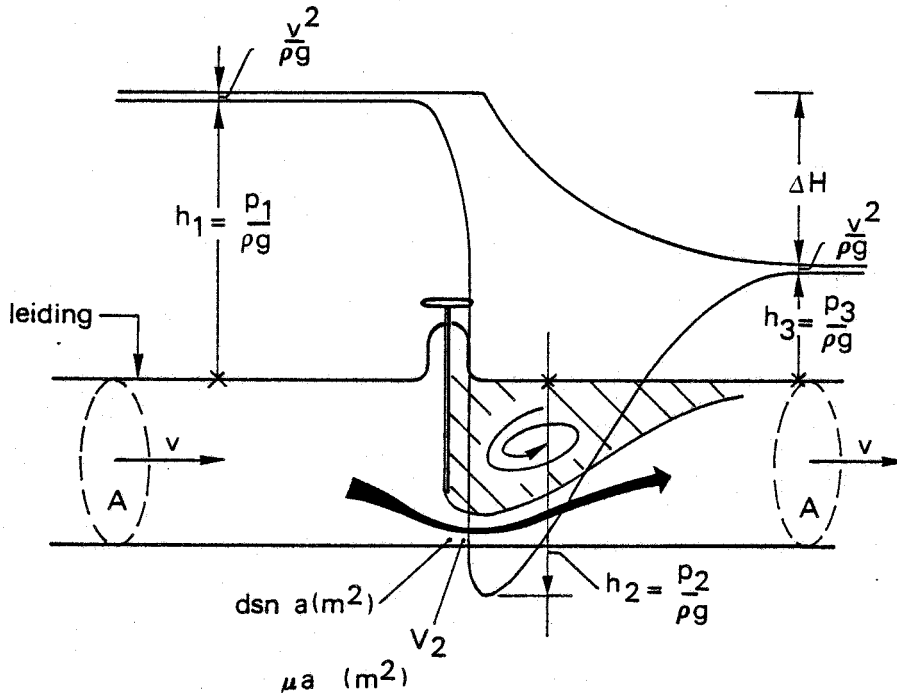
als functie van de inwendige diameter  $d$  van de injectieleiding en het infiltratiedebiet  $Q$ .

$d$ (mm)	25	30	40	50	60	70	80
$Q$ ( $m^3/h$ )							
5	0,33	0,15	0,04				
10	1,39	0,56	0,13	0,04			
25	8,10	3,19	0,75	0,24	0,10	0,05	
50		12,3	2,81	0,91	0,36	0,17	0,09
100			10,9	3,46	1,37	0,63	0,32
200				13,4	5,26	2,39	1,21

Tabel 1 - Frictie  $f$  ( $mH_2O/m$ ) van kunststof-leidingen met inwendige diameter  $d$  (mm) bij een debiet  $Q$  ( $m^3/h$ ), bij  $10\text{ }^\circ\text{C}$  watertemperatuur (berekend volgens Huisman, 1969).

ad b

Dicht achter de schuif van een geknepen afsluiter heerst een relatief lage druk (figuur 18).



Figuur 18 - Verloop van energie- en drukhoogte over een afsluiter.

Een negatieve waarde (lager dan atmosferisch) kan aanzuiging van lucht betekenen. Dit moet worden voorkomen door een voldoende hoog drukk niveau achter de afsluiter te handhaven. De keeldrukhoogte  $h_2$  (m) blijft positief wanneer de drukhoogte achter de afsluiter,  $h_3$ , aan de volgende betrekking voldoet:

$$h_3 > 2 \Delta H \sqrt{\left(\frac{v}{2g}\right)} \quad (3.25)$$

waarin  $\Delta H$  het piëzometrisch verval over de afsluiter (m) en  $v$  de gemiddelde watersnelheid verderop in de buis (m/s) en  $g$  de sterkte van het zwaartekrachtsveld (N/kg). Bij een watersnelheid van 1 m/s en een voordrukhoogte  $h_1$  van 10 mH<sub>2</sub>O, mag de drukhoogte achter de afsluiter dus niet verder zakken dan 0,91 mH<sub>2</sub>O, zoals met bovenstaande betrekking eenvoudig is te controleren.

ad c

Opwarming van water vermindert de oplosbaarheid van gassen. Het effect is echter gering, het blijkt circa 2 % per graad celcius te bedragen. Omdat de oplosbaarheid evenredig stijgt met toename van de absolute druk, kan het opwarmingseffect door een geringe drukverhoging teniet worden gedaan.

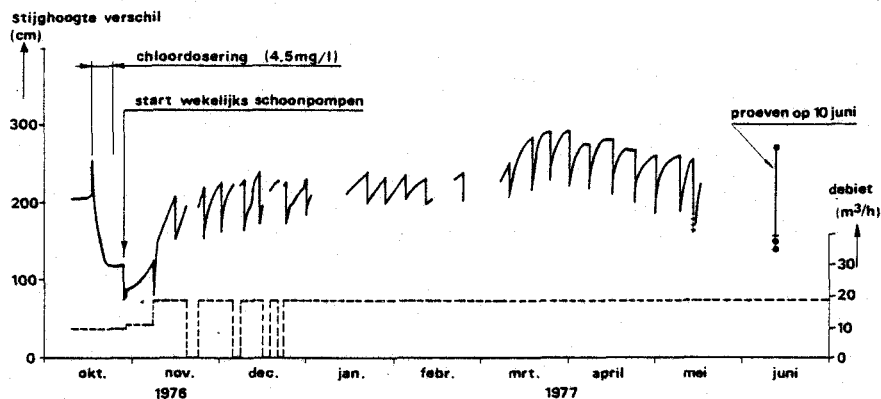
Een drukverhoging die overeenkomt met 1 mH<sub>2</sub>O in een leiding waarin een drukhoogte van 5 mH<sub>2</sub>O heerst levert dus (op zeeniveau, met 10 mH<sub>2</sub>O atmosferische drukhoogte) een toename van de oplosbaarheid met  $1/15 = 7$  %. Deze zeer geringe drukverhoging is dus reeds voldoende om circa 3,5 graden temperatuurstijging te compenseren. De watertemperatuur vormt derhalve geen probleem bij infiltratie via persputten.

De oplosbaarheid van gas is hoofdzakelijk een probleem bij retourbemaling van grondwater, dat soms veel methaan bevat. Door de sterke drukafname die samengaat met het uit de diepte omhoog brengen van het water, kan dit oververzadigd raken en kan een sterke ontgassing, c.q. bellenvorming optreden. Om zulk water opnieuw te kunnen infiltreren kan een adequate ontgassingsinstallatie nodig zijn of moet, ten koste van veel energie en zwaarder leidingwerk, in alle leidingen een hoge druk worden gehandhaafd (Brandes e.a., 1978).

### Bacterieontwikkeling in de put

Het volume van een 1 mm dikke zandkorrel is even groot als dat van alle bacteriën in een kubieke meter water te zamen, wanneer dit water het voor gezuiverd water tamelijk hoge aantal van 1000 (bolvormige, 1 micrometer dikke) bacteriën per milliliter zou bevatten. Bacteriën in het voorgezuiverde infiltratiewater kunnen daarom in de praktijk geen verstopping van betekenis teweeg brengen. Verstopping veroorzaken zij pas wanneer zij zich in de put sterk vermenigvuldigen. Bij een verdubbelingstijd van bijvoorbeeld 8 uren kan een enkele bacterie, in theorie, binnen 12 dagen voor  $10^{16}$  nakomelingen zorgen, goed voor een circa 1 cm dikke slijmlaag over 1 vierkante meter filteroppervlak. Bij een verdubbelingstijd van 80 uren is dit na 120 dagen het geval. Het is duidelijk dat een dergelijke laag van slijm en bacterielichaampjes op de boorgatwand de persput volledig zou verstoppen.

In welke mate een uitgebreide groei mogelijk is, wordt, wanneer geen desinfectiemiddelen aanwezig zijn, bepaald door de aanvoer van door bacteriën ontleedbare organische stof. Bij een hoog aanbod treedt na een vermenigvuldigingsperiode van enkele dagen tot enkele weken een zich versnellende verstopping op, die tot een nagenoeg volledige verslijming van de put kan leiden (Vecchioli, 1972). Na schoonpompen blijven echter voldoende bacteriën achter om na hervatten van de infiltratie direct en zonder aanlooperperiode verstopping te gaan veroorzaken. Is het aanbod daarentegen laag, dan ontstaat na enige tijd een evenwicht, waarbij de verstopping stagneert. De dissimilatie (voedselverbranding) is dan gelijk aan het voedselaanbod en de assimilatie (groei) is tot nul afgenomen (figuur 19). Omdat



Stijghoogte in de omstorting van de put te Castricum minus stijghoogte in de waarnemingsput op 8 meter afstand, sinds september 1976.

Fig. 19 - De waterstand in de omstorting minus die in de waarnemingsput op 8 m afstand, vanaf de 2e infiltratieproef. PWN-persput in Castricum (zie appendix A)

hier de assimileerbare organische stof in het infiltratiewater bepalend is, zeggen chemische maatstaven voor de hoeveelheid organische stof, zoals COD en  $\text{KMnO}_4$ , weinig. De BOD is een betere, maar ongevoelige maat, hoogstens geschikt om werkelijk slechte watersoorten te herkennen, terwijl de AOC (het assimileerbare organische koolstof) (zie Kooij V.d., 1978) de meest belovende maat is. Getalswaarden zijn op dit moment echter nog niet te geven.

Het voedselaanbod is op geringe "diepte" dus bij de filterspletten en in de eerste centimeters van de omstorting groter dan verderop in de omstorting en in de formatie. Dit leidt bij een sterke bacteriegroei tot ondiepe, maar sterke verstopping van de



filterspletten (figuur 20) en de omstorting. Zwevende stof verstopt in het algemeen juist niet de filterspletten en de omstorting, maar veeleer de formatiewand.

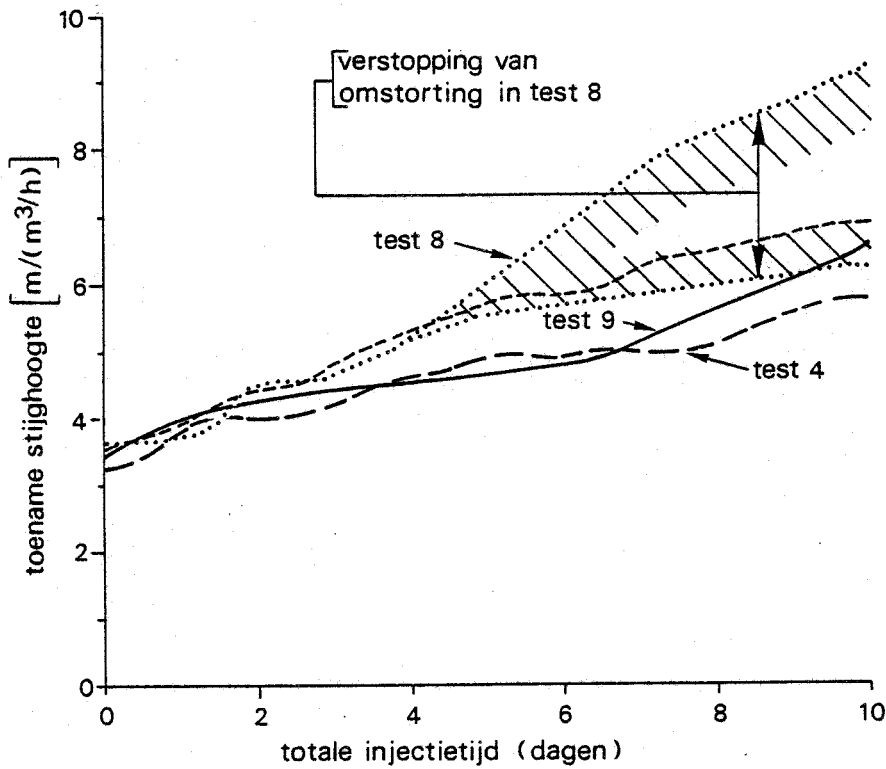


Fig. 20 - Stijging van de waterstand in de put gedurende 4 infiltratieproeven. Alleen het water in proef 8 was niet gehoord; alleen in proef 8 verstopt de omstorting. (Uit Ehrlich et al, 1973; zie ook tabel 3.9).

Verstopping door organische stof en door bacteriën leidt tot rotting, wanneer de infiltratie wordt gestaakt. Is de put enkele weken buiten bedrijf geweest, dan heeft het water in zulke gevallen een slechte smaak en reuk en is de weerstand van de put afgenomen (Harpaz, 1970, Eren and Goldsmid, 1970), vaak zelfs aanzienlijk (fig. 21 en 6).

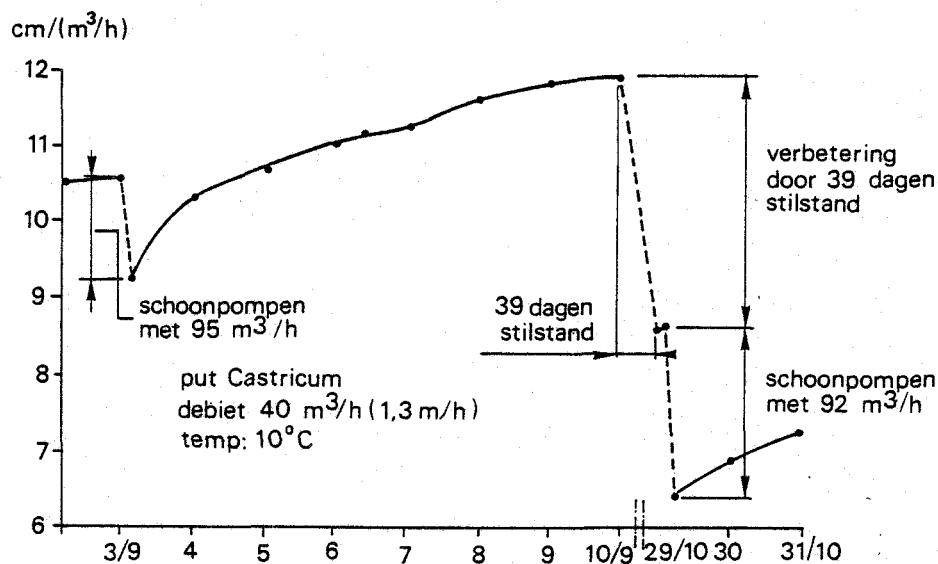


Fig. 21 - Afname van de verstoppingsweerstand (waterstandput minus die in waarnemingsput op 8 m afstand, gedeeld door infiltratiedebiet) door stilstand gedurende 39 dagen. PWN-infiltratieput in Castricum, september-oktober 1979 (zie appendix A voor nadere gegevens)

De bacteriën en hun eventuele slijm fungeren als een net voor anorganische deeltjes, die door de geringe diepte van de verstoppende bacterielaag nu nauwelijks in de formatie kunnen doordringen. Een zo verstopte put is daarom door schoonpompen relatief goed te reinigen. Meestal wordt getracht de verstopping te voorkomen door te infiltreren met 0,2 tot 2 mg vrij chloor per liter infiltratiewater. Aangezien het chloor in de bodem meestal zeer snel wordt verbruikt, is op enige diepte toch nog een bacterie-ontwikkeling mogelijk. Een variërende chloordosering, of een periodieke kort durende chloring met een hoge concentratie (100 mg chloor per liter en meer, Krone, 1970) kan dit ondervangen en de voorkeur verdienen boven een constante continu-chloring.

De ondiepe verstopping, de aanvankelijk geringe, maar na een aantal dagen steeds toenemende verstoppingsnelheid en een soms later optredend evenwicht, de weerstandsvermindering die vanzelf optreedt wanneer de put een aantal weken buiten bedrijf wordt gesteld en het beperken van de indringingsdiepte van andere verstoppende bestanddelen, zijn kenmerken van de verstopping door bacteriën.

### 3.5 Chemische neerslagvorming in de put

Het "bacterieslijm" uit de vorige paragraaf zou een biologisch neerslag genoemd kunnen worden, als tegenhanger van een chemisch neerslag. Een chemisch neerslag veroorzaakt zwevende bestanddelen in het water, die als zodanig kunnen worden herkend en opgespoord. Het neerslag kan echter aan onze aandacht ontsnappen, wanneer het pas in de put wordt gevormd. Er is echter geen reden waarom in de put

reacties zouden optreden, die in de toevoerleidingen uitblijven. Anders wordt het, wanneer onmiddellijk voor de put met het water wordt "gerommeld" bijvoorbeeld een andere watersoort wordt bijgemengd (een bekend euvel bij persputten van de olie-industrie (Farley and Redline 1968, Case 1970, Patton 1974)) of de een of andere dosering, meestal chloor, wordt toegepast. Dit laatste trad op bij een proefput in Den Haag, waar het chloor dat kort voor de put werd gedoseerd, neerslag van mangaandioxide veroorzaakte (Olsthoorn, 1982). Dit mangaan was als verontreiniging bij het coagulatiemiddel (ijzerchloride) aanwezig, maar werd niet door de filtratie verwijderd. De verwijdering geschiedde pas toen de chloring vóór de snelfilters was geplaatst, wat het probleem oploste. In het algemeen dient men op reacties bedacht te zijn wanneer direct vóór een persput aan de samenstelling van het infiltratiewater wordt gesleuteld.

### 3.6

#### Reacties tussen het infiltratiewater en het grondwater

Ofschoon vermenging van grondwater (dikwijls zuurstofloos en ijzerhoudend) met infiltratiewater (meestal zuurstofrijk) neerslagen (ijzerhydroxiden) kan veroorzaken (Warner, 1966), gebeurt dit in de praktijk niet noemenswaard. Reacties kunnen alleen plaatsvinden in de mengzône tussen het verdrongen grondwater en het verdringende infiltratiewater. Deze mengzône blijft relatief dun en verplaatst zich voortdurend van de put af. Maar ook de reactiviteit van de mengzône neemt, als gevolg van de reacties die daarin reeds plaatsvonden, steeds verder af. Alleen in gespleten formaties, waarin de stroming hoofdzakelijk door de spleten plaatsvindt,

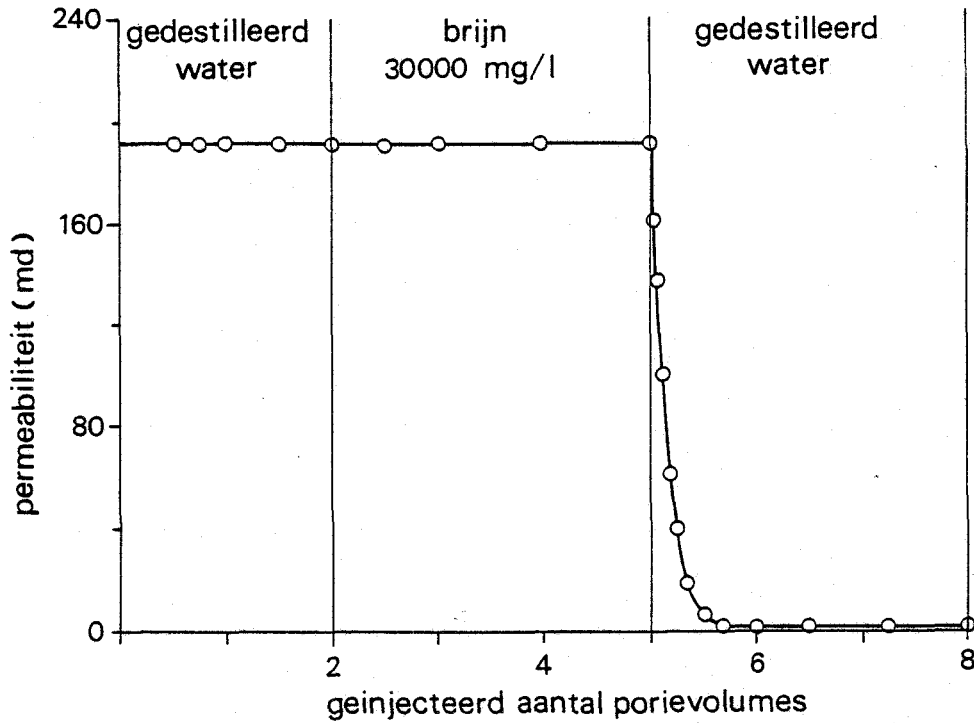
maar het overgrote deel van het oorspronkelijke grondwater in de formatieporiën nog lange tijd aanwezig blijft, is een langdurige en intensieve vermenging van grond- en infiltratiewater, met mogelijk nare gevolgen, goed denkbaar.

Voor korrelige formaties, zonder spleten, toonde Bernard (1955) in het laboratorium aan, dat noch bij het parallel aan elkaar stromen van twee reactieve neerslag vormende watersoorten, noch bij het achter elkaar stromen hiervan (verdringing) een verstopping van betekenis optreedt. Uit de ervaringen met persputten is, hoewel de situatie uit de eerste zin van deze paragraaf veelvuldig wordt aangetroffen, evenmin iets van een dergelijke verstopping gebleken.

Vermenging van verschillende watersoorten treedt echter wel op bij onttrekkingsputten (Case, 1970), als logisch gevolg van de verblijftijdsspreiding die de bodempassage teweeg brengt. Winningsputten van een persputtensysteem kunnen dan ook relatief snel inwendig verstopten. Deze verstopping is echter gemakkelijk en goed met een horizontaal gerichte hogedrukspuit te verwijderen (figuur 32).

### 3.7 Interactie tussen infiltratiewater en bodem

De interactie tussen het infiltratiewater en de bodem betreft praktisch uitsluitend de zwellings- en dispersie van kleimineralen, voor zover deze althans rond de korrels van het watervoerende pakket aanwezig zijn (figuur 22).



Risico: injectie zoet water in zoute bodem.

**Figuur 22 - Typerend effect van het zoutgehalte (NaCl) van het doorstromende water op de doorlatendheid van een monster Berea-zandsteen (Mungan, 1965)**

Kleimineralen bestaan uit negatief geladen plaatjes, draadjes of vlokjes (Milot, 1979), die door positieve ionen bijeen worden gehouden. Hoe hoger de valentie van de positieve ionen in het water en hoe hoger hun concentratie, hoe dichter en steviger de mineralen opeengepakt zitten. Verlaging van de ionensterkte en vervanging van hoogvalente ionen (voornamelijk  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ) door laagvalente ( $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ), veroorzaakt een lossere pakking (zwellings) en vaak ook het gedeeltelijk teloorgaan van de onder-

linge binding van de kleideeltjes, die vervolgens met het stromende water worden meegevoerd (dispersie). De zwellings veroorzaakt het dichtknijpen van de poriën en dispersie de blokkering van poriën, wanneer de meestromende deeltjes daarin vastlopen. Stroming is daarna niet of nauwelijks meer mogelijk.

In Norfolk, Virginia, veroorzaakte de kleidispersie de uniek snelle persputverstopping van ruim 3500 mH<sub>2</sub>O/jaar (0,4 m H<sub>2</sub>O/h) bij een infiltratiesnelheid van 1 m/h op de boorgatwand. (Brown en Silvey, 1973, zie ook figuur 15).

De SAR van het water (Sodium Adsorption Ratio) wordt vaak als maat gehanteerd voor het risico van zwellings en dispersie van kleimineralen:

$$*SAR = \frac{[Na^+] + [K^+]}{\sqrt{[Ca^{2+}] + [Mg^{2+}]}} \quad (\text{conc. in mol/m}^3) \quad (3.26)$$

Hoe hoger de SAR, hoe groter het risico. De invloed van de ionensterkte komt in de SAR maar gedeeltelijk tot zijn recht, waardoor kleimineralen in zout grondwater, ondanks de daarbij behorende hoge SAR, toch stevig samengeklonterd zijn. Zoet water heeft in het algemeen een gunstig lage SAR. Dit verandert echter volledig bij ondergrondse verdringing van

\* De SAR-definitie bevat eigenlijk geen kalium, terwijl de PAR (Potassium Adsorption Ratio) wél kalium maar geen natrium bevat. Vergelijking (3.26) zou dan ook beter PSAR genoemd kunnen worden, namelijk de som van de in de literatuur gebruikte SAR en PAR.

brak of zout water door zoet water (figuur 22 en 23). Door kationenwisseling (figuur 24) tussen het eerste infiltratiewater (zône 2 in figuur 23) en de aanvankelijk met het zoute water in evenwicht verkerende bodem (zône 3 in figuur 23), krijgt dit infiltratiewater dezelfde SAR als het verdrongen grondwater, nu echter bij de lage ionensterkte van het infiltratiewater. Deze gevarenozône (2) kan, wanneer de formatie enige hiervoor gevoelige klei bevat, de zwellings en dispersie van de kleimineralen oproepen. De verstopping treedt dan onmiddellijk op waarna veelal nauwelijks meer stroming mogelijk is. Bij infiltratie in een put in zout grondwater dient men derhalve steeds op dit gevaar bedacht te zijn. Dit risico bestaat wanneer de SAR van het grondwater te hoog is ( $SAR > 3$  à 5, Krone, 1970). De SAR van het infiltratiewater doet niet ter zake.

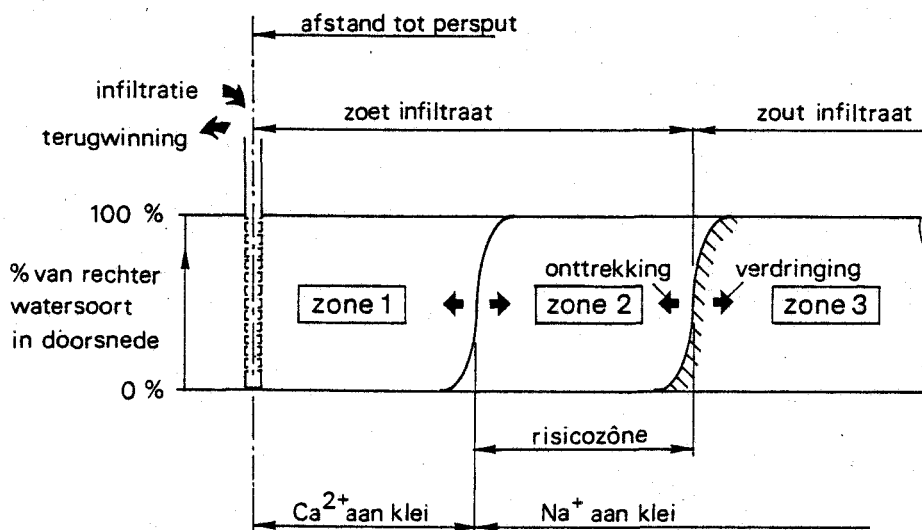
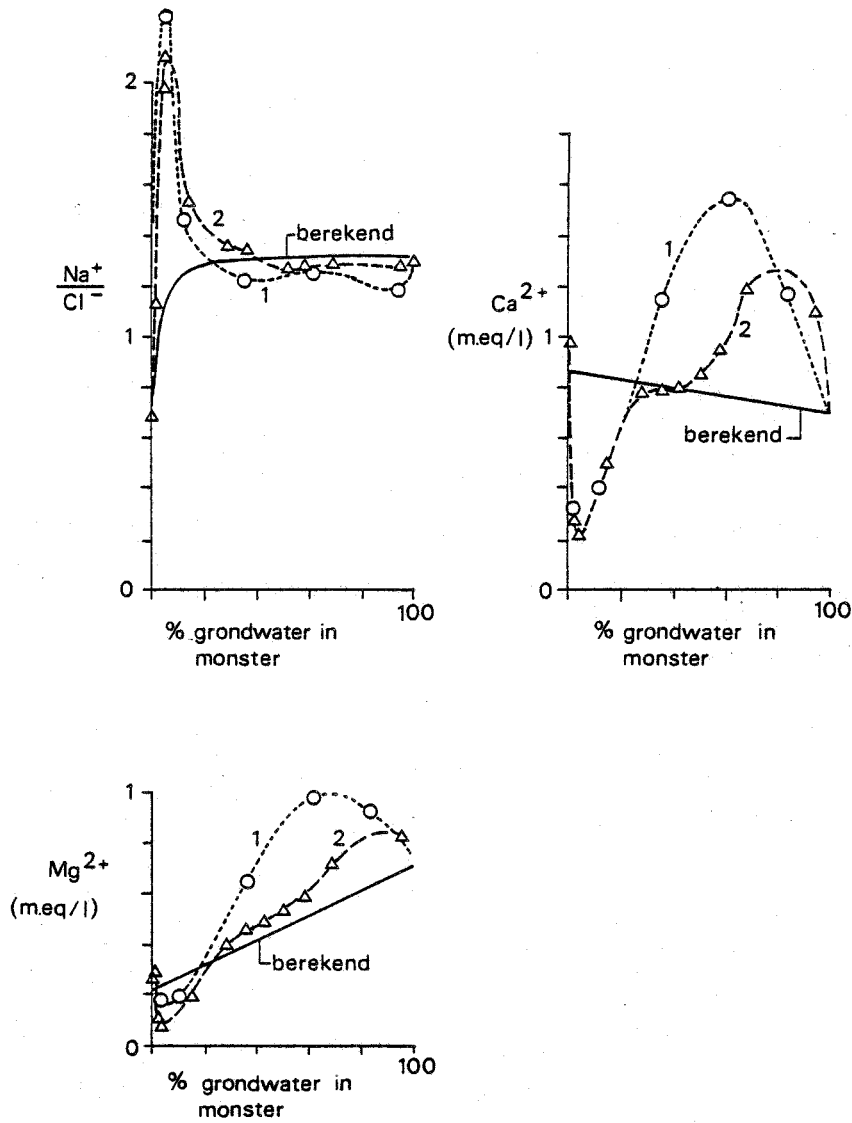


Fig. 23 - Verdringing van zout grondwater (3) met zoet infiltratiewater (1) veroorzaakt door kationenwisseling een natrium-water bij lage ionensterkte in het eerst geïnfiltrateerde water (2). Deze zône (2) is een risico met betrekking tot zwellings en dispersie van kleimineralen.





Figuur 24 - De berekende (getrokken lijn) en de gemeten (onderbroken lijn) concentratie van  $Mg^{2+}$ ,  $Ca^{2+}$  en de verhouding ( $Na^+/Cl^-$ ), als functie van de (uit het chloride) berekende mengverhouding tussen grond- en infiltratiewater in het opgepompte water. De afwijkingen van de getrokken lijnen demonstreren de opgetreden kationenwisseling (berekend uit gegevens van Brown and Silvey, 1973).

Laboratoriumonderzoek naar de kleimineralen in de infiltratielaag en tests met ongeroerde grondmonsters kan uitwijzen of het gevaar reeël is, wanneer de SAR te hoog mocht blijken (Brown and Silvey, 1973). Is dit het geval, dan kan de verstopping voor 80 tot 90 % worden beperkt met een vóórinfiltratie van een aantal kubieke meters water met een hoge concentratie  $\text{CaCl}_2$ , die voldoende moet zijn om de reactie uit te stellen tot 1 à 2 m buiten de put (Brown en Silvey, 1973). De effectievere hoogwaardige metaal-ionen waarmee de olie-industrie dit probleem voorkomt (zirconium, hafnium, titanium en dergelijke, zie Veley, 1969) zijn voor de waterleidingindustrie onbruikbaar.

Zolang stroming nog mogelijk is, is zwelling een omkeerbaar proces, in tegenstelling tot dispersie. Regenereren van een door zwelling en of dispersie verstopte bodem rond de put is maar gedeeltelijk mogelijk. Bij de regeneratie van een door kleidispersie verstopte bodem is een voortdurende stromingsomkering (jutteren) essentieël.

### 3.8

#### Wijziging van de korrelstructuur van de bodem

Door herhaald infiltreren en onttrekken en door uitloging van de bodem met zuur, kan deze zich enigszins zetten, wat rond de put een doorlatendheidsdaling kan veroorzaken (Johnson, 1966). De gevolgen hiervan zijn echter beperkt, daar de reductiefactor in orde van grootte van 1 à 3 ligt, maar hoogstens enkele m diep kan reiken en na de zetting geen verdere reductie meer optreedt. Wanneer de doorlatendheidscoëfficiënt  $k$  tot  $k_v$  afneemt kan volgens een eerdere afleiding (formule 3.7) de

resultierende drukstijging direct worden berekend,  
met:

$$k^* = k k_v / (k - k_v) \quad (3.7)$$

en

$$\Delta\phi_v = \frac{Q}{2\pi k^* H} \ln\left(\frac{r_v}{r_o}\right) \quad (3.27)$$

Bij  $v_o = Q/(2\pi r_o H) = 1 \text{ m/h (24 m/d)}$ ,  $k = 10 \text{ m/d}$ ,  
 $k_v = 0,5 k$  zodat  $k^* = k_v$ ; met voorts  $r_v = 3 \text{ m}$  en  $r_o$   
 $= 0,25 \text{ m}$  volgt als voorbeeld:

$$\Delta\phi_v = \frac{(24)}{(10)} (0,25) \ln\left(\frac{3}{0,25}\right) = 1,49 \text{ m}$$

hetgeen een beperkte reductie betekent.

## 4 REGENEREREN VAN PERSPUTTEN

### 4.1 Algemeen

Wanneer goede methodes worden toegepast, kan een persput in praktisch alle gevallen met succes worden geregenereerd (gereinigd). Er zijn in feite geen of nauwelijks persputten bekend die niet meer te regenereren waren. Was dit toch het geval, dan bleek de put in de regel defect, verzand (Olsthoorn, 1977) of bezweken door het overmatig oppompen van omringend formatiezand (Bruington and Seares, 1965) en was het falen derhalve te wijten aan een verkeerde of te zwakke constructie.

Er zijn mechanische (hydraulische) en chemische regeneratiemethoden. Een chemische methode wil alleen maar zeggen, dat, ter versterking van de regeneratie, chemicaliën worden ingezet bij een mechanische methode. Chemische en de meer arbeidsintensieve mechanische methoden worden normaliter pas gebruikt, wanneer de eenvoudige mechanische methoden te weinig resultaat opleveren of teveel tijd in beslag nemen, voordat het gewenste resultaat is bereikt. Dit zal het geval zijn nadat een put een (groot) aantal keren achtereen met een eenvoudige methode is gereinigd (bijvoorbeeld door schoonpompen), die weliswaar succesvol is, doch steeds een zeker (gering) gedeelte van de sedert de vorige regeneratie opgebouwde verstoppingsweerstand laat zitten (figuur 36). Van tijd tot tijd is dan een soort grote schoonmaak gewenst.

Wanneer een wat geringere voorzuivering wordt gebruikt, loopt de weerstand in het algemeen relatief snel op. De putten zullen dan met korte interval-

len, meestal 1 dag tot 1 maand (figuur 19), en doorgaans automatisch worden schoongepompt.

Bij een vergaande voorzuivering en een traag oplopende weerstand is het interval tussen twee opeenvolgende regeneraties groter, meestal 6 maanden tot 5 jaar (Bruington and Seares, 1965). Een automatisch schoonpompsysteem loont zich dan niet en men is geneigd elke put direct een meer intensieve behandeling te geven, zodra hij aan de beurt is (Cooper, 1971). Zo'n intensieve behandeling vergt een regeneratieploeg van doorgaans twee mensen gedurende een halve tot twee dagen per put.

Een geringe kwaliteitsteruggang van het infiltratiewater, door bijvoorbeeld een ontregeling van de voorzuivering, kan een snelle verstopping van de persputten veroorzaken en het gehele persputtensysteem buiten bedrijf stellen. In alle gevallen behoren persputten daarom eenvoudig en snel te kunnen worden schoongepompt of men nu met bovengenoemde regelmaat regeneert of alleen maar wanneer de putten eraan toe zijn.

## 4.2 Mechanische regeneratiemethoden

### 4.2.1 Algemeen

Er bestaat een groot aantal regeneratiemethoden, doch lang niet alle zijn even belangrijk. In volgorde van hun belang voor de waterleidingindustrie kunnen de volgende worden genoemd:

- a) schoonpompen;
- b) jutteren met perslucht;
- c) sectiegewijs schoonpompen;
- d) schoonspuiten onder hoge druk (jetting);
- e) "surgen" en "bailen";

- f) borstelen;
  - g) hoogfrequent trillen;
  - h) gebruik van explosieven in de put en
  - i) formatiesplijting ("hydraulic fracturing").
- Methoden g) tot en met i) worden uitsluitend toegepast in diepe persputten in vast gesteente (bij deep-well-lozing en bij de olie-industrie (Tazelaar, 1968)); zij blijven hier verder buiten beschouwing. De overige methoden zullen al naar hun belang meer of minder uitgebreid worden behandeld.

#### 4.2.2 Schoonpompen

Schoonpompen van een persput is ongetwijfeld de meest voorkomende reinigingstechniek. Ten aanzien van de vereiste pompcapaciteit, pompduur en pomptechniek blijken in de praktijk de nodige misverstanden te bestaan, die nu door het beschikbare feitenmateriaal kunnen worden weggenomen.

Het schoonpompen van persputten in fijne, ongeconsolideerde formaties verwijdert gemiddeld ruim driekwart van de verstoppingsweerstand die zich heeft opgebouwd sinds de in bedrijfname of de vorige reiniging van de persput (zie tabel 2 en figuur 36).

Put of modelproef	$v_i$ <sup>5)</sup> $Q_p/Q_i$ <sup>6)</sup> verwijderings		
	(m/h)	(-)	percentage
Rebhun & Schwarz (grof zand)	13 1)	0,46	40
Put GAT 24 (Final Report Israel)	13 2)	0,85	61
Hoogovenput	11 0)	1,10	72
Den Haag	1,2 <sup>0)</sup>	2,2	73
put GAT 21	37 2)	0,64	75
Hoogovenput	1,1 <sup>0)</sup>	1,7	76
Castricum	0,6 <sup>0)</sup>	0,9	76
Rebhun & Schwarz (fijn zand)	13 1)	0,46	82
put GAT 9	11 2)	0,38	83
Castricum	0,6 <sup>0)</sup>	5,0	85
Bichara (constante drukval, afnemend debiet)	7,1 <sup>3)</sup>	0,6	89
Bichara	7,1 <sup>3)</sup>	1,2	92
put GAT 6	8 2)	0,61	95
Vecchioli test 7	0,6 <sup>4)</sup>	3	96
Mediaan:			80

- <sup>0)</sup> Berekend uit oorspronkelijke gegevens
- <sup>1)</sup> Berekend uit opmerkingen in artikel van Rebhun en Schwarz (1968)
- <sup>2)</sup> Berekend met gegevens uit Final Report Israel (1969). De boorgatdiameter is hier geschat op 0,6 m.
- <sup>3)</sup> Berekend uit gegevens in proefschrift van Bichara (1974).
- <sup>4)</sup> Proef duurde 33 dagen. Infiltratiesnelheid na 19 dagen verlaagd van 1,1 naar 0,6 m/h (Vecchioli, 1972)
- <sup>5)</sup>  $v_i$  is de infiltratiesnelheid op de boorgatwand
- <sup>6)</sup> Opvallend is het vaak geringe pompdebiet ten opzichte van het infiltratiedebiet ( $Q_p/Q_i$ )

Tabel 2 - Overzicht van het door schoonpompen bereikte verwijderingspercentage van de opgetreden verstoppingsweerstand, gerangschikt naar oplopend verwijderingspercentage.

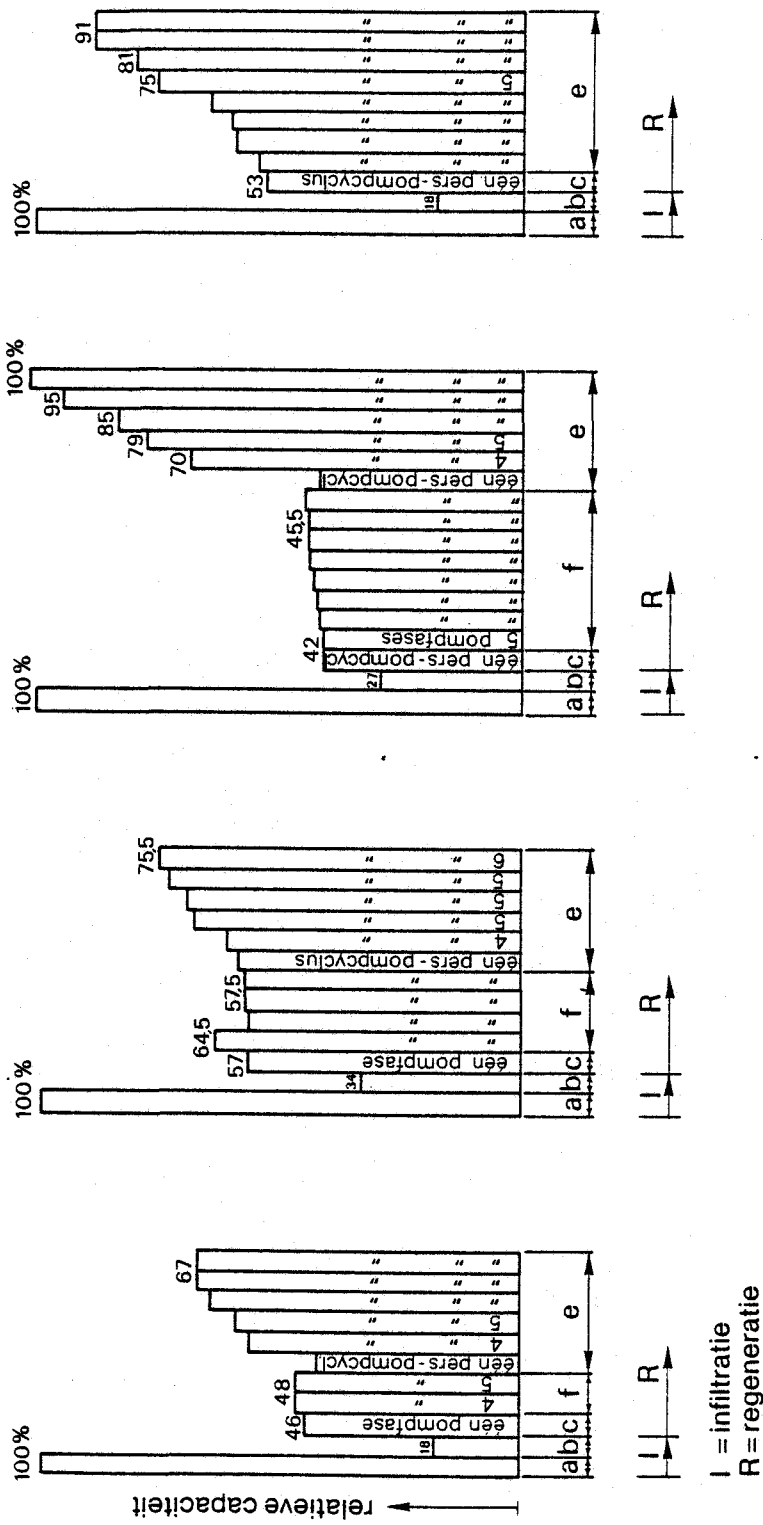


Fig. 25 - Effect van intermitterend pompen ("één pomphase") en van stromingsomkering ("één pers-pompcycl") op een verstopte put. (Modelproeven van Bichara, 1974.)



De omkering van de stroomrichting, die het pompen teweeg brengt doet het feitelijke werk (figuur 25). Of men nu twee minuten of een hele dag pompt, het verschil blijkt nauwelijks te meten (tabel 3).

$\Delta h(\text{mH}_2\text{O})$ \ t(min)	2	30	720	gemiddeld
2,5	90	88	89	89
5	94	89	92	92
gemiddeld	92	88	91	

Tabel 3 Reductie (%) van de opgetreden verstoppingsweerstand door schoonpompen als functie van pompduur (t) en constant gehouden "drukval" ( $\Delta h$ ) over het putmodel (Thesis, Bichara, 1974)

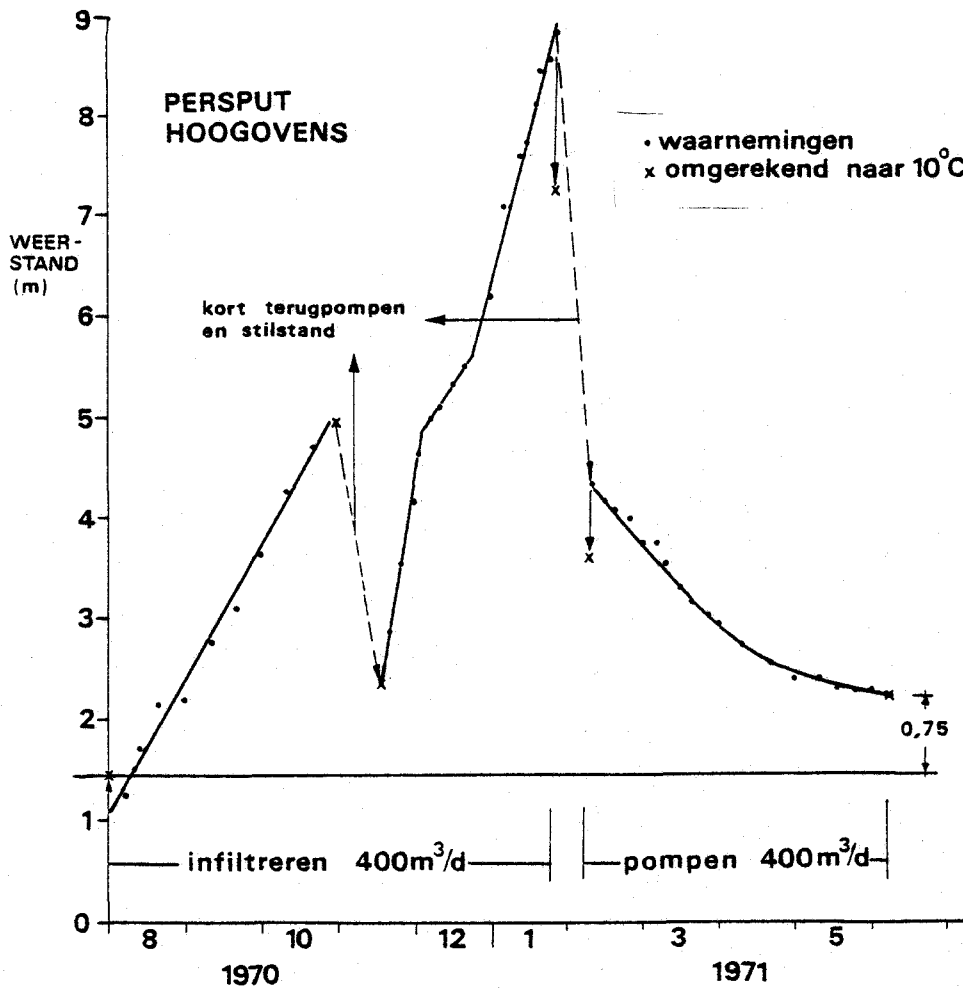


Fig. 26 - De waterstand in de persput van ESTEL Hoogovens B.V. te IJmuiden minus die in de waarnemingsput op 40 m afstand (tijdens infiltreren) en omgekeerd (tijdens schoonpompen) demonstreert het onmiddellijke effect van schoonpompen en de zeer trage verbetering van langdurig pompen.

Doorpompen heeft pas effect, wanneer dit weken tot maanden achtereen geschiedt (figuur 26), een situatie die normaliter alleen in zogenaamde "dual-purpose-putten" voorkomt (veel toegepast in Israël, tabel 4).

put	$Q_i$	$Q_p$	$V_i$	$V_p$	$\frac{\phi_0}{Q_i}$	$\frac{\phi_1}{Q_i}$	$\frac{\phi_2}{Q_p}$	$\frac{\phi_3}{Q_p}$	$W_\infty$	$W_1$	$W_2$	$W_3$
	(m <sup>3</sup> /h)		(10 <sup>3</sup> m <sup>3</sup> )		(m/(100 m <sup>3</sup> /h))				(%)			
Gat 6	220	170	0,21	0,75	2,7	6,7	2,9	2,1	0	100	5	-15*
Gat 9	425	160	0,90	0,37	0,9	4,5	1,5	1,0	0	100	17	3
GAT 21	780	500	1,7	1,95	0,28	1,9	0,67	0,33	0	100	25	3
GAT 24	520	440	1,0	0,39	0,76	3,1	1,7	1,1	0	100	39	15
Gemiddeld									0	100	22	2

\* 15 % beter dan aan het begin van het infiltratieseeizoen.

Tabel 4 Reductie van de tijdens een infiltratieseeizoen opgetreden weerstand  $W_1 = (\phi_1 - \phi_0)/Q_i = 100\%$  tot  $W_2 = \phi_1/Q_p - \phi_0/Q_i$  direct na het starten van pomp respectievelijk  $W_3 = \phi_3/Q_p - \phi_0/Q_i$  aan het eind van het pompseizoen, voor 4 dual purpose putten in Israel. (Anoniem, 1969: Underground Water Storage study brael, Final Report, FAO, Rome, 1969).  $Q_i$  = infiltratiedebiet,  $Q_p$  = pompdebiet,  $\phi$  = stijghoogte in put ten opzichte van de natuurlijke waarde bij afwezigheid van verstopping (nieuwe put),  $\phi_0$  is nieuwe put,  $\phi_1$  is moment aan begin infiltratieseeizoen,  $\phi_2$  moment aan het eind van het infiltratieseeizoen,  $\phi_3$  enkele minuten na start pompseizoen,  $\phi_4$  eind pompseizoen.  $V_i$ ,  $V_p$  totaal geïnfiltreerd respectievelijk opgepompt volume in de respectievelijke seizoenen.

Het schoonpompdebiet zelf heeft enige invloed, in die zin, dat een debietsverhoging met een factor vijf de vuilverwijdering misschien vergroot van 75 % tot 85 % (figuur 27). In alle gevallen blijft, ook bij een groot schoonpompdebiet, de watersnelheid op de boorgatwand beperkt tot enkele meters per uur, onvoldoende voor een grondige reiniging. Intermitterend pompen, het herhaald in- en uitschakelen van de pomp, blijkt praktisch geen resultaat te hebben (figuur 25, figuur 28). De vermeende stootwerking treedt niet op, omdat het pompdebiet telkenmale na het starten van de pomp asymptotisch naar zijn eindwaarde toeloopt. Hier tegenover staat het zogenaamde jutteren, de voortdurende omkering van de stroomrichting door herhaald infiltreren en pompen. Jutteren blijkt een uitstekende mechanische reinigingsmethode, die de weerstand met kleine stapjes tot zeer lage waarden terug kan brengen (figuur 25 en 28).

#### 4.2.3 Jutteren met perslucht

Perslucht leent zich uitstekend voor het regenereren van persputten. Door inblazen van de perslucht op een zekere diepte in de put ontstaat een mammoetpomp, ook "luchtlift" of "airlift" genoemd, die bij een goed ontwerp een grote capaciteit kan hebben (Rautenberg, 1974). Wordt de putkop afgesloten (figuur 29), dan drukt de perslucht de vrije waterpiegel in de put omlaag en veroorzaakt zo gedurende korte tijd een infiltratie. Opent men hierna met een snelafsluiter de afvoer, dan veroorzaakt de plotselinge drukval een snelle stijging van de vloeistofspiegel in de put en daarmee gedurende enkele seconden een onttrekkingsdebiet, waarvoor normaliter een extreem grote onderwaterpomp nodig

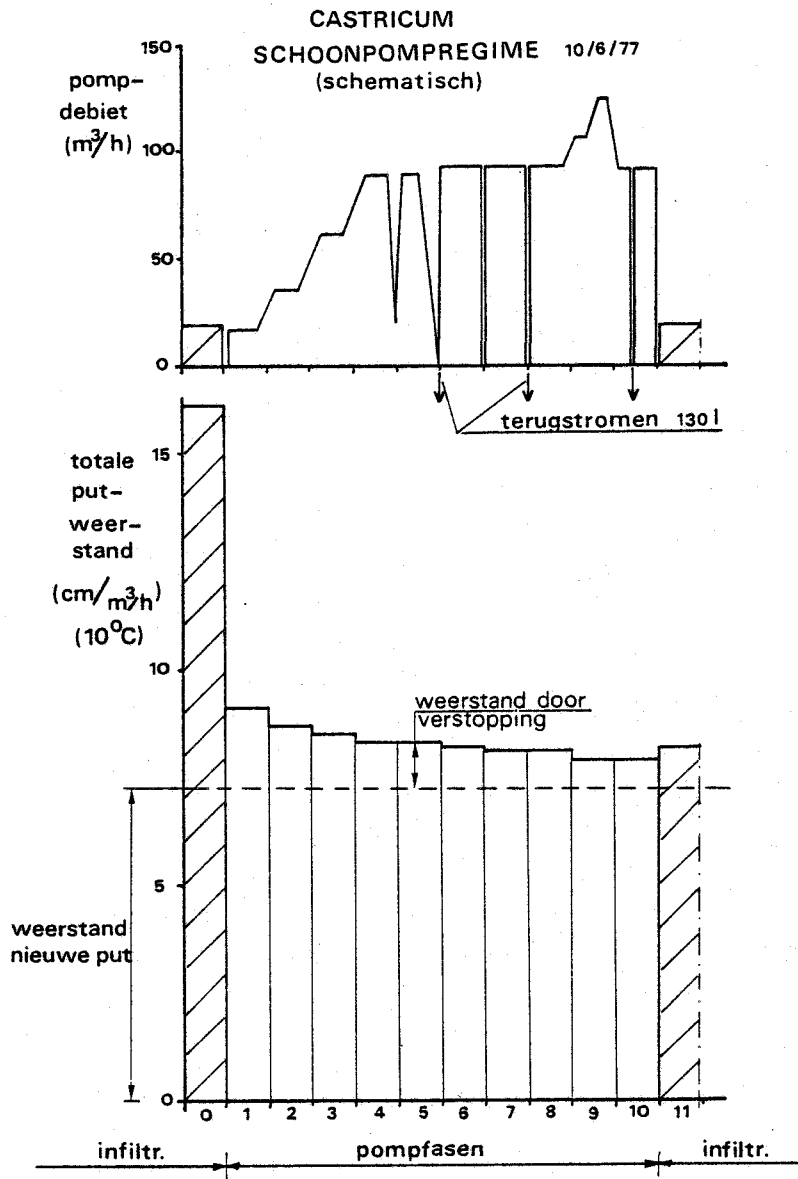


Fig. 27 - Het verloop van de weerstand van de persput in Castricum (10-6-1977, zie ook appendix A) toont dat dé grote verbetering optreedt door de omkering van de stroomrichting tijdens het eerste aanzetten van de pomp, ook met laag debiet. Verregaande vergroting van het pompdebiet levert relatief weinig meer.

percentage van de verstoppings-  
weerstand die in de direct vooraf-  
gaande infiltratierun optrad

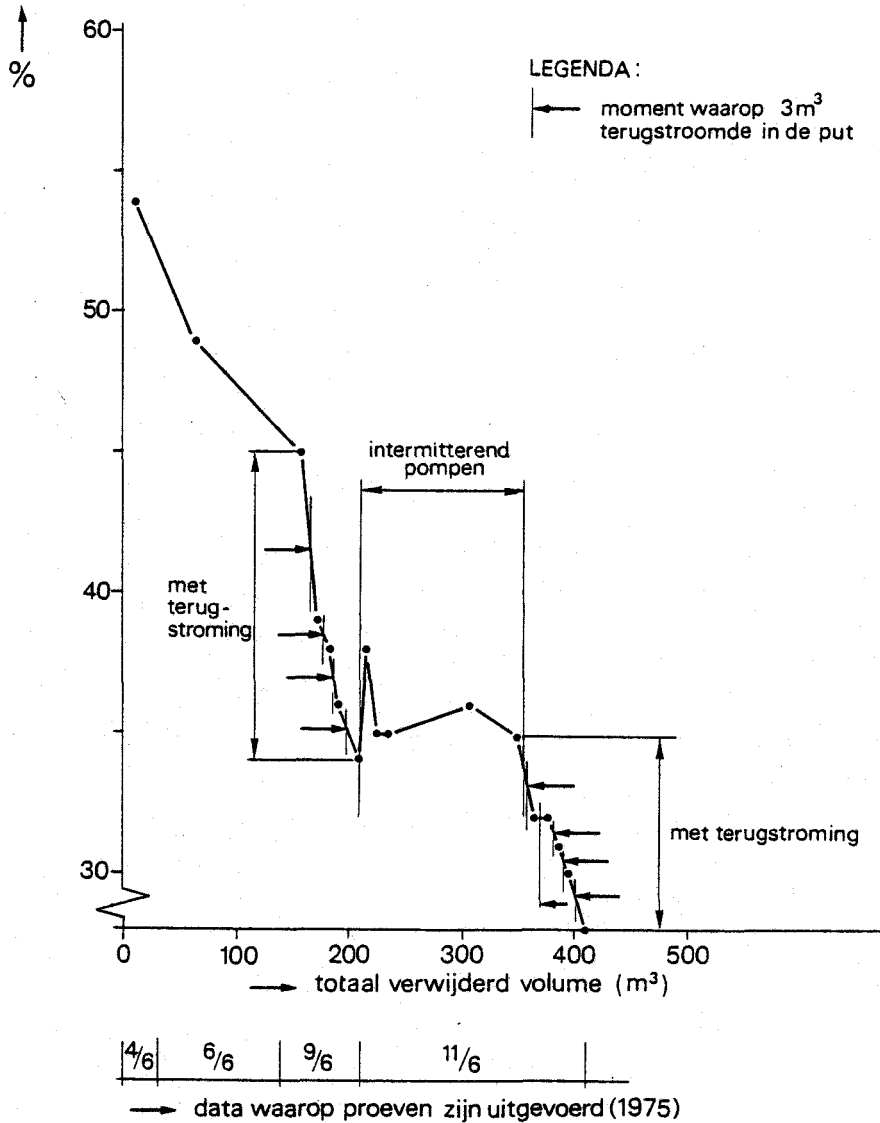
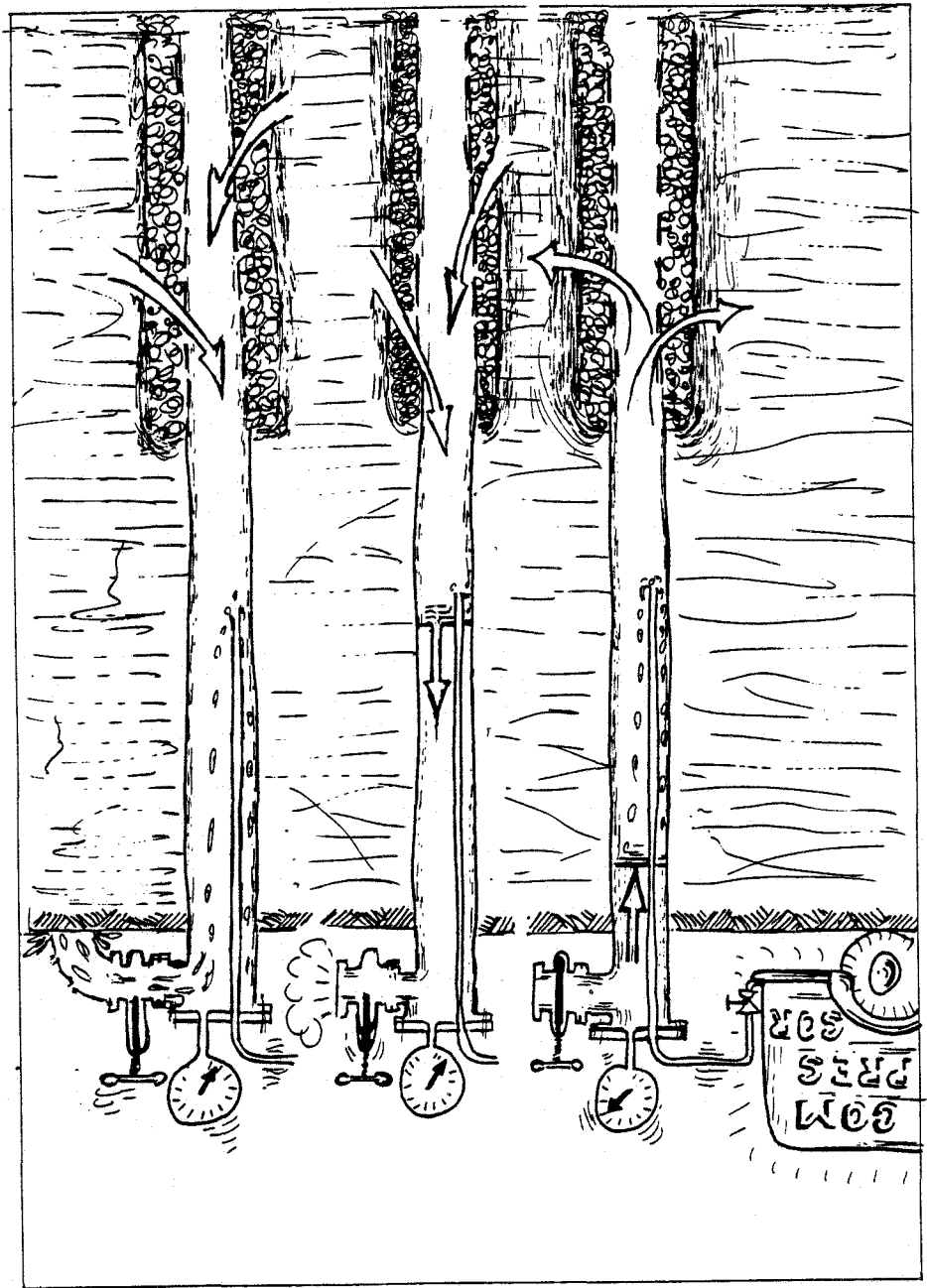


Fig. 28 - Effect van stromingsomkering en zuiver intermitterend pompen op de verstopping van de 2e persput van de Duinwaterleiding van 's-Gravenhage (zie appendix A).

Figuur 29 - Juteren met perslucht



zou zijn. Wordt het inblazen voortgezet, dan wordt het losgemaakte materiaal direct verwijderd. Het herhaald met perslucht neerdrücken van de vloeistofspiegel in de put, gevolgd door het laten omhoog schieten ervan en eventueel kort doorpompen heet jutteren met perslucht. Het water in de formatie kan met de perslucht heen en weer worden bewogen, hetgeen gewenst is bij het gebruik van chemicaliën.

Eenvoud, degelijkheid en lage investeringskosten maken het wat lage rendement van de mammoetpomp (30 % tot 45 %) meer dan goed. Het loont dan ook om het persputontwerp op het jutteren met perslucht af te stemmen (hoofdstuk 6). De berekening van de mammoetpomp is elders uitvoerig gegeven (Rautenberg, 1974, Olsthoorn, 1978).

Het kortdurende debiet, dat ontstaat door de snel stijgende waterspiegel na openen van de snelafsluiter op de putkop, kan als volgt worden benaderd (Kruseman en De Ridder, 1970, Olsthoorn 1982):

$$Q = \Delta\phi \left\{ W_v + \frac{1}{4\pi kH} \ln \left( \frac{2,25 kHt}{S r_o^2} \right) \right\} \quad (4.1)$$

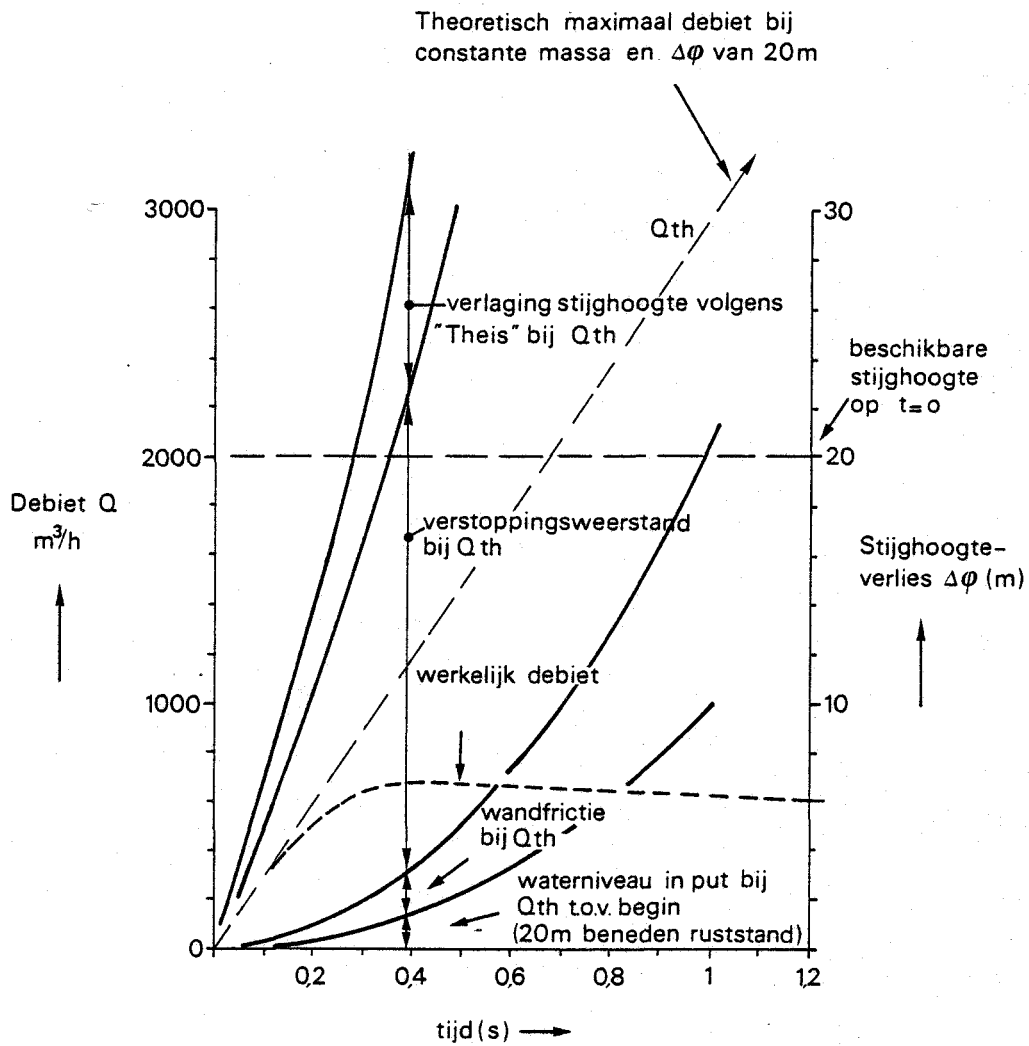
$Q$  is hierin het debiet ( $m^3/s$ ),  $k$  de bodemdoorlatendheid ( $m/s$ ),  $H$  de lengte van de putomstorting ( $m$ ),  $S$  de bergingscoëfficiënt (dimensieloos),  $r_o$  de halve diameter van het boorgat ( $m$ ) en  $\Delta\phi$  de maximum neerwaartse verdringing van de vloeistofspiegel in de put ( $m$ ).  $W_v$  is de verstoppingsweerstand van de put ( $m/(m^3/s)$ ).



Voor de persput van Gemeentewaterleidingen gold tijdens een experiment  $\Delta\phi = 20$  m,  $W_v = 0,5\text{m}/(30 \text{ m}^3/\text{h})$  ofwel  $60 \text{ m}/(\text{m}^3/\text{s})$ ,  $k = 20 \text{ m/d}$  ofwel  $0,00023 \text{ m/s}$ ,  $S = 0,001$ ,  $H = 15 \text{ m}$  en  $r_o = 0,3 \text{ m}$ . Deze waarden ingevuld in (4.1) levert (vergelijk het normale infiltratiedebiet van  $30 \text{ m}^3/\text{h}$ ):

t (s)	0,1	0,2	0,3	0,5	1
Q ( $\text{m}^3/\text{h}$ )	660	570	530	490	440

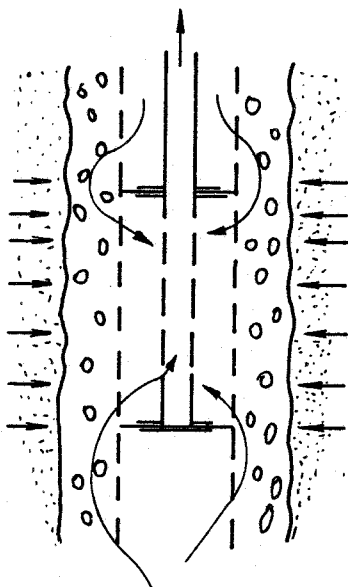
Aangezien gedurende de eerste 0,2 seconden de traagheidskrachten overheersen en na circa 0,5 seconden de stijging van de vloeistofspiegel een merkbare grootte heeft bereikt (figuur 30), geldt de formule tussen globaal 0,3 en 0,5 seconden na het openen van de snelafsluiter. Het maximum debiet bedraagt in dit voorbeeld derhalve rond  $500 \text{ m}^3/\text{h}$ . De grootte van het maximum debiet is sterk afhankelijk van de waarde van  $W_v$ . Bij een ernstig verstopte put kan het maximum debiet dus aanvankelijk nogal tegenvallen, maar neemt met de voortschrijding van de regeneratie (dalende  $W_v$ ) toe. Wel is het aan te bevelen om het regenereren niet uit te stellen tot de put ernstig verstopt is.



Figuur 30 - Debiet en stijghoogteverdeling als functie van de tijd, na openen van snelafsluiter nadat de waterkolom tevoren met perslucht 20 meter omlaag was gedrukt. Put Gemeentewaterleidingen

#### 4.2.4 Sectiegewijs pompen

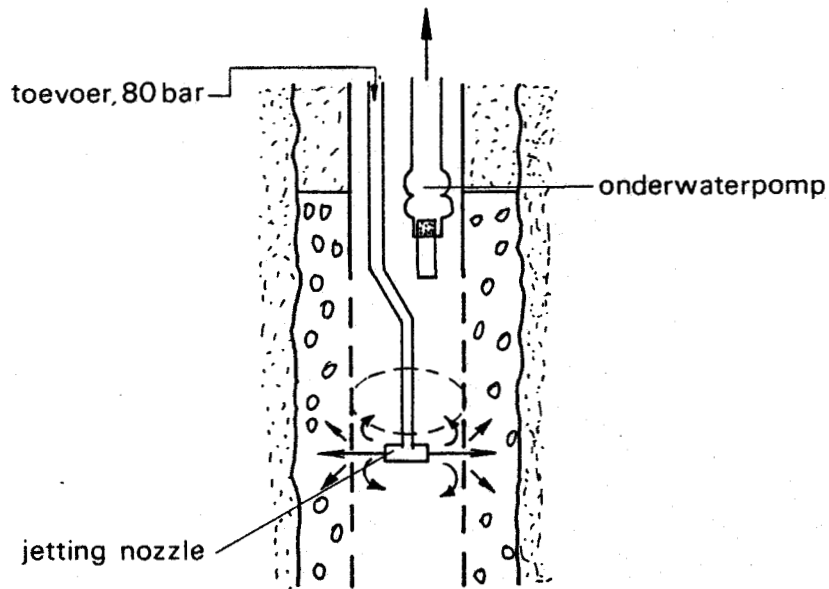
Een sectieapparaat (figuur 31) is een middel om met een beperkt vermogen (kleine pomp) plaatselijk een hoge watersnelheid in de omstorting te realiseren. Door de sterke kortsluiting via de omstorting blijft er op en achter de boorgatwand echter nauwelijks iets van de gewenste hoge snelheid over (Ellenberger and Aseltine, 1973). Sectiegewijs pompen heeft dan ook vooral zin wanneer in hoofdzaak de omstorting is verstopt. Zo'n verstopping is te verwachten bij een overmatige bacterieontwikkeling in de put, maar komt zelden voor bij andere vormen van verstopping. Bij chemisch regenereren kan een sectieapparaat worden gebruikt voor het nauwkeurig inbrengen van de chemicaliën. Sectiegewijs pompen is slechts zelden lonend, enerzijds vanwege de aangeduide kortsluitstroming via de omstorting en anderzijds vanwege zijn bewerkelijkheid.



**Figuur 31 - Kortsluiting tijdens sectiegewijs schoonpompen**

#### 4.2.5 Hogedrukspuit

"Jetting" is het met een krachtige waterstraal lossputten van vuil, bijvoorbeeld op de manier als weergegeven in figuur 32.



**Figuur 32 - "Jetting" (schematisch)**

Het losgewoelde materiaal wordt door gelijktijdig pomp van de put direct afgevoerd. Ondanks de hoge druk die wordt toegepast, in de orde van 80 bar, reikt de straal niet dieper dan enkele cm in de omstorting. Voor dieper vuil, zoals bij persputten meestal aanwezig, valt er dan ook niet veel van te verwachten. Wel leent de methode zich uitstekend voor het schoonsputten van putten die inwendig zijn vervuild en waar filterspletten zijn verstopt. Deze vorm van verstopping is te verwachten in de onttrekkingsputten bij een infiltratiesysteem. De me-

thode wordt verder met succes gebruikt voor het nauwkeurig en met kracht inbrengen van chemicaliën.

#### 4.2.6 "Surgen" en "bailen"

"Surgen" is het heen en weer bewegen van het water in de formatie door middel van een op en neer gaande zuiger in de stijgbuis of de filterbuis.

Wordt de zuiger vervangen door een puls (bail) met voetklep, dan veroorzaakt de op en neer gaande beweging tevens een pompeffect, waarmee losgemaakt materiaal tijdens het "bailen" wordt afgevoerd. Vanzelfsprekend is bailen beter dan surgen, maar het biedt geen voordelen ten opzichte van de persluchtmethode, die zonder speciale apparatuur of demontage van de putkop kan worden uitgevoerd.

#### 4.2.7 Borstelen

Borstelen is uitsluitend geschikt voor het reinigen van het inwendige van de stijg- en filterbuis. Bij persputten moet het nut van borstelen sterk worden betwijfeld.

### 4.3 Chemische regeneratiemethoden

#### 4.3.1 Algemeen

In sommige gevallen zit een deel van het verstoppende materiaal zo vast, dat het met mechanische middelen niet meer te verwijderen schijnt. De mechanische methoden kunnen dan met chemicaliën worden aangevuld, die, voorafgaand aan de mechanische regeneratie, in de put worden gebracht.

Belangrijke chemicaliën zijn:

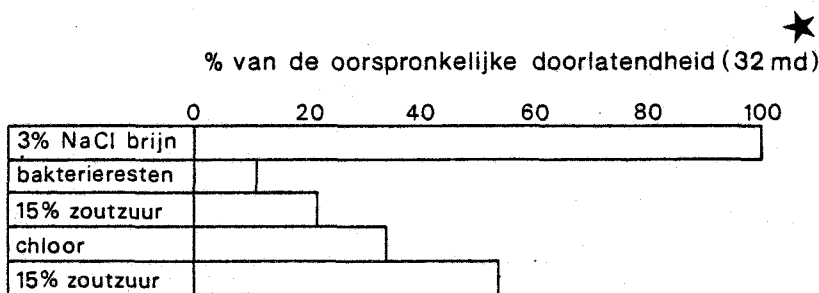
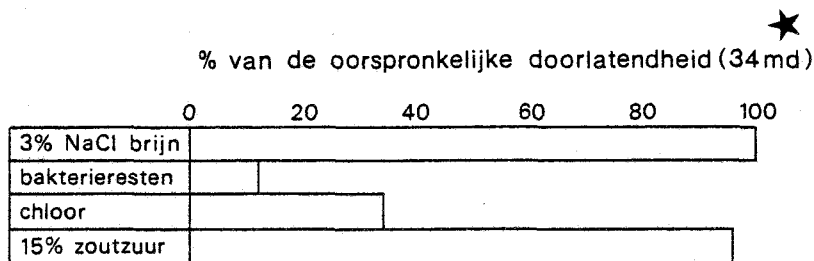
- a) chloor (als gas) en chloorbevattende middelen als chloorbleekloog (vloeistof) en calciumhypochloriet (korrels);
- b) zuur, met name zoutzuur (verkrijgbaar als vloeistof in vaten) en sulfaminezuur ( $\text{HSO}_3\text{NH}_2$ , korrels);
- c) polyfosfaten (korrels).

#### 4.3.2

##### Chloor

Chloor en chloorbevattende middelen worden gebruikt om organische afzettingen (slijm) weg te branden en in stukken te breken, terwijl voorts het doden van bacteriën wordt beoogd. De toegepaste concentraties bedragen ter plaatse van het te verwijderen materiaal enkele honderden tot soms duizenden milligrammen vrij chloor per liter. De hoeveelheid chloorwater dient voldoende te zijn voor de omstorting en 2 tot 5 decimeters daarbuiten. Wordt de verstopping tevens door anorganische bestanddelen veroorzaakt, dan verdient een dubbele behandeling van de put aanbeveling, namelijk eerst een met chloor, gevolgd door een behandeling met zuur (Crowe, 1968, figuur 33). Omdat op deze manier eerst de inkapselende organische stof wordt verwijderd, zijn anorganische deeltjes bij de navolgende zuurbehandeling beter bereikbaar.

Chloor is een bijzonder gevaarlijk gas (longoedeem) het dient daarom met inachtneming van de geldende veiligheidsvoorschriften in de stroom infiltrerend water te worden geïnjecteerd. Chloorbleekloog en opgelost calciumhypochloriet kunnen op dezelfde wijze worden ingebracht, maar vaak gebeurt dit met een dunne leiding tot onderin de put. Deze leiding



★ 1md = 1millidarcy  $\approx 0,0006$  m/d

**Figuur 33 - Regenereren van persputten: het verschil tussen "eerst chloor, dan zuur" en "eerst zuur, dan chloor" (uit Crowe, 1968).**

wordt vervolgens stukje voor stukje opgetrokken, tot het filter over de hele hoogte is voorzien. Met een zekere hoeveelheid water worden de chemicaliën hierna de omstorting en de formatie ingedreven. Soms worden de chemicaliën eenvoudigweg in de put gestort. Het is niet duidelijk of hierdoor het regeneratieresultaat belangrijk vermindert. Door onzekerheid omtrent de plaatsen die zo worden bereikt, zouden wij deze methode willen ontraden.

#### 4.3.3 Zuur

Zuur wordt voornamelijk toegepast ter verwijdering van afzettingen van ijzer- en aluminiumhydroxyden die afkomstig kunnen zijn van het gebruikte coagu-

latiemiddel waarvan resten door de filters zijn gestroomd. Natuurlijk kunnen ook andere oplosbare verstoppingsmaterialen met zuur worden verwijderd.

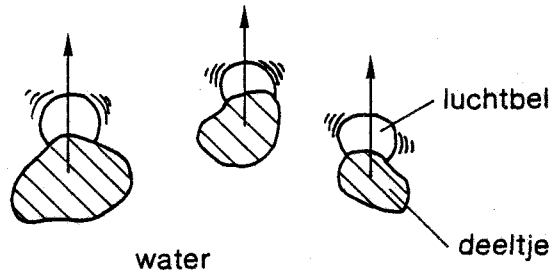
Het sulfaminezuur is verkrijgbaar als korrels en is daarom veiliger te vervoeren en te gebruiken dan het in vaten geleverde zoutzuur. Sulfaminezuur is echter duurder en zwakker dan zoutzuur (Schafer, 1974).

De zuur-concentratie is bij voorkeur zo hoog, dat de pH van het ingebrachte zure water kleiner of gelijk aan nul is (Olsthoorn, 1977). Het inbrengen kan op dezelfde manier geschieden als bij de chloorbevattende middelen en de hoeveelheid dient ook hier voldoende te zijn voor een diepte van 20 tot 50 cm buiten de boorgatwand. Deze beperkte regeneratiediepte is voldoende in fijnzandige formaties en infiltratiesnelheden tot enkele meters per uur op de boorgatwand en beperkt het totale chemicaliënverbruik aanzienlijk.

In kalkhoudende formaties ontstaat bij regeneratie met geconcentreerd zuur een enorme hoeveelheid koolzuurgas, die het opgepompte water een sterk bruisend aanzien geeft. Het is vermoedelijk de hoge oppervlakte-energie (oppervlaktetenspanning) van de door het zuur schoongebeitste formatiekorrels, waardoor de gasbellen zich niet aan de korrels kunnen hechten (volledige korrelbevochtiging, figuur 34) en zij in de praktijk gemakkelijk en zonder restverstopping blijken te worden weggepompt (Olsthoorn, 1982), dit in tegenstelling tot luchtbellen (zonder zuur) die in de bodem zijn geraakt (Sniegocki, 1963).

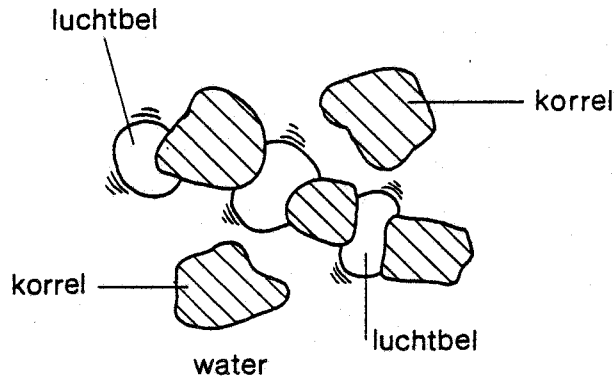


Fig. 34 a



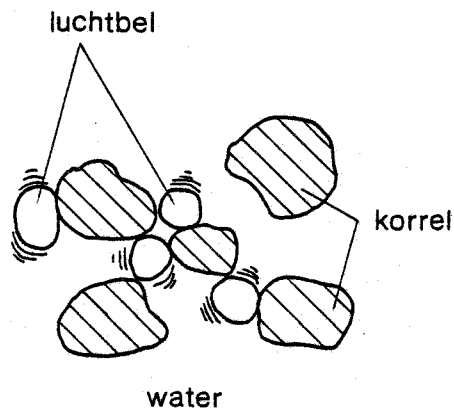
FLOTATIE

Fig. 34 b



SLECHT BEVOCHTIGDE KORRELS

Fig. 34 c



VOLLEDIG BEVOCHTIGDE KORRELS

Fig. 34 - Korrelbevochtiging bij lucht of gas in de formatie

Veiligheidsmaatregelen zijn bij het werken met zuur even belangrijk als bij het werken met chloor en chloorhoudende middelen. Zo mogen chloorhoudende middelen nimmer met zuur worden gemengd, omdat daarbij chloorgas ontstaat. Het zware en reukloze koolzuurgas, dat bij een zuurbehandeling kan ontstaan, kan zich bijvoorbeeld in een putschacht ophopen, met waarschijnlijk dodelijk gevolg voor diegene die daarin afdaalt (en de redders die volgen). De zuurbehandeling maakt in zwavelhoudende formaties het zeer giftige waterstofsulfide vrij waarvan de aanvankelijk penetrante geur na korte tijd niet meer wordt waargenomen.

Bevatten put, toevoerleidingen of filter metalen die door de toegepaste chemicaliën kunnen worden aangetast, dan dient het gebruik van inhibitors, stoffen die het metaal door vorming van een huidje beschermen, aanbeveling.

Soms wordt de werking van het chemische middel verbeterd door toevoeging van een bevochtigingsmiddel (Gawalek, 1962; Osipow, 1962; Schafer, 1974). In de praktijk blijkt dit laatste meestal overbodig.

#### 4.3.4 Polyfosfaten

Polyfosfaten worden ingezet ter verwijdering van kleideeltjes, slib, silt en luchtbellen (Kleber, 1950, Sniegocki en Brown, 1970). Polyfosfaat is ook bekend als "glassy phosphates" natriumhexametafosfaat en onder handelsnamen als "Polyphos" en "Calgon" een naam die afkomstig is van "calcium gone". Het polyfosfaat werkt in het algemeen op de volgende manieren (Lyons, 1973; Toy, 1976):

a) ontharding door binding van hoogvalente metaal-

- ionen (zoals  $Mg^{2+}$  en  $Ca^{2+}$ ) in opgeloste complexen (Engels: sequestering);
- b) dispergeren van klei-, slib-, ijzerhydroxide- en mangaanhydroxidedeeltjes door sterke adsorptie aan opgelost polyfosfaat;
  - c) voorkomt neerslagvorming door interferentie met zich vormende kristallen (Engels: threshold);
  - d) verbetert de werking van zeep en detergents door verlaging van de kritische micel-concentratie en tenslotte;
  - e) breekt en emulgeert vetten en alkanen door de hoge pH ten gevolge van het tijdens het productieproces toegevoegde loog (hydrolyse).

Net als bij het wassen met zeep werkt polyfosfaat uitsluitend bij voldoende agitatie van het water. Dit kan met de persluchttechniek op eenvoudige wijze worden bereikt. Vaak moet de behandeling enkele keren worden herhaald, om het maximale effect te kunnen bereiken (Schafer, 1974; Sniegocki, 1963).

Het is vermoedelijk de hoge oppervlakte-energie die de bodemkorrels verkrijgen door adsorptie van het polyfosfaat en de daardoor opgeroepen volledige korrelbevochtiging (figuur 34), waardoor eventuele luchtbellens gemakkelijk kunnen worden verwijderd. (Dit is ook na behandeling met geconcentreerd zuur het geval.) Dit verklaart het succes van het gebruik van polyfosfaat ter verwijdering van een luchtbellensverstopping (Sniegocki, 1963) en de gemakkelijke verwijdering van de koolzuurgasbellens na regenereren met zuur in kalkhoudende grond (Olsthoorn, 1982). Het realiseren van volledige bevochtiging vereist agitatie, bijvoorbeeld jutten met perslucht.

De optimale concentratie is onbekend. In het algemeen wordt getracht om zoveel mogelijk polyfosfaat op te lossen. Dit oplossen verloopt moeizaam door de beperkte oplosbaarheid en het glasachtige huidje, dat zich om de korrels vormt, zodra deze met water in aanraking komen. In sommige gevallen wordt het polyfosfaat apart opgelost in verwarmd water, waarbij voortdurend wordt geroerd; vaak wordt echter een geperforeerd vat gebruikt waarin het polyfosfaat voortdurend in de stijgbuis op en neer wordt bewogen. Apart oplossen en inbrengen zoals bij de hiervoor behandelde chemicaliën verdient de voorkeur.

Aangezien klei- en slibdeeltjes door hun negatieve lading verder in de formatie kunnen doordringen, dient de behandelingsdiepte groter te zijn dan bij chloor en zuur. Immers het polyfosfaat dient met name de verwijdering van zulke deeltjes. Een diepte van 50 tot 100 cm zal in het algemeen voldoende zijn. Alleen wanneer dispersie van kleimineralen een rol speelt moet de behandelingsdiepte mogelijk nog enigszins worden vergroot, bijvoorbeeld tot 150 cm buiten de put, vooropgesteld dat na deze kleiverstopping nog stroming mogelijk is. Zonder stroming is uiteraard geen regeneratie mogelijk.

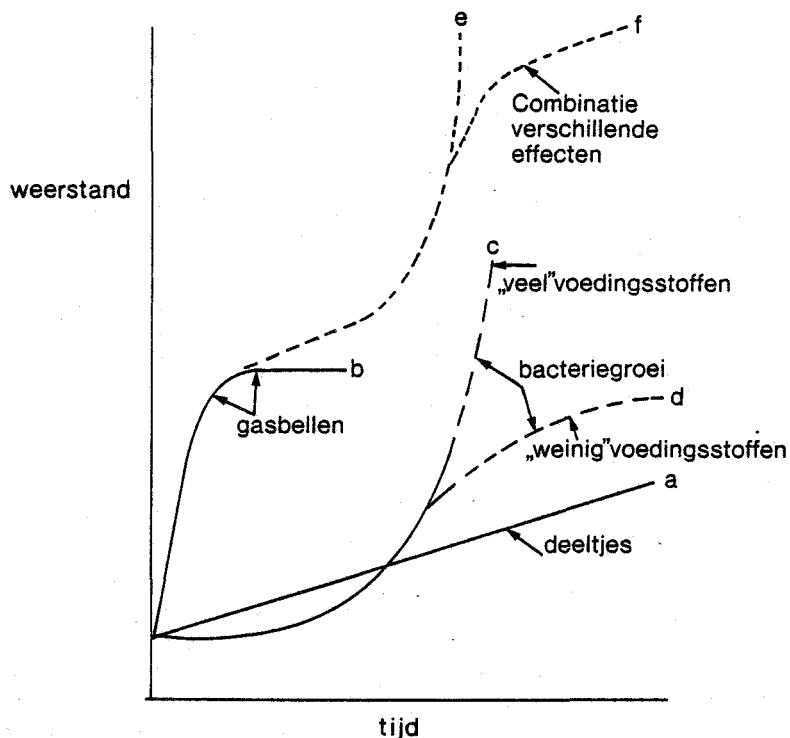
Praktisch zonder uitzondering wordt calciumhypochloriet of chloorbleekloog aan het polyfosfaat toegevoegd, om gelijktijdig eventueel aanwezig organisch materiaal te verwijderen. Door dit samengaan van polyfosfaat en chloor is het onmogelijk, om met het beschikbare informatiemateriaal aan te geven, in hoeverre een bepaald regeneratieresultaat door het polyfosfaat zelf wordt veroorzaakt.

Agitatie, essentieel bij een behandeling met polyfosfaat, is minstens wenselijk bij het gebruik van andere chemicaliën. Behalve de persluchtmethode kan ook een sectieapparaat of hogedrukspuit hiertoe worden gebruikt, die bovendien het nauwkeurig inbrengen van het chemische middel mogelijk maken.

#### 4.3.5 Welke chemicaliën?

Welke chemicaliën moeten worden toegepast wordt bepaald door de aard van het verstoppende materiaal. Is dit, zoals vaak het geval, een mengsel organische en anorganische bestanddelen, dan kunnen verschillende behandelingen nodig zijn, bijvoorbeeld polyfosfaat plus chloor, gevolgd door een aparte behandeling met zuur. Treedt in hoofdzaak overmatige bacteriegroei op, dan kan uiteraard met een chloorbehandeling worden volstaan. Is de verstopping in hoofdzaak het gevolg van een doorslag van coagulatiemiddel, zoals bij een niet optimaal werkend zuiveringssysteem voorkomt, dan kan met een zuurbehandeling worden volstaan. Luchtbellen kunnen met zuur of met polyfosfaat worden verwijderd, mits voldoende agitatie wordt toegepast. Dispersie van kleimineralen en verstopping door klei- en slibdeeltjes kan een behandeling met polyfosfaat vergen.

De vraag welke verstoppingsoorzaak in een concrete situatie aan de orde is, kan alleen indirect worden afgeleid uit de verschillende verkregen aanwijzingen, zoals het verloop van de verstoppingsopbouw (figuur 35), de herkomst en de samenstelling van het infiltratiewater, de toegepaste voorzuiveringsmethode, de zwevende bestanddelen in het infiltra-



**Figuur 35 - Kenmerkend verstoppingsverloop voor uitsluitend zwevende stof (a), gas- of luchtballen (b) en bacteriegroei (c), groot voedselaanbod; (d), beperkt voedselaanbod). In de praktijk kunnen de diverse vormen gelijktijdig voorkomen (e), respectievelijk (f).**

tiewater en in het bij schoonpompen opgepompte water, uit kleidispersieproeven en doorstroomproeven met ongeroerde grondmonsters, uit analyses van grondmonsters, doorstroomproeven met andere materialen en dergelijke meer (zie ook hoofdstuk 3).

GLOBAAL ONTWERP

Door systematische afweging van de kosten van de voorzuivering, het boren van meer putten, het sneller vervangen van deze putten en de kosten van het regenereren van de putten is een kostenminimalisatie mogelijk.

De enige vorm van verstopping die in de praktijk niet altijd tevoren kan worden voorkomen, is die door zwevende stof. Aangezien bij zwevende stof de snelheid van de druktoename in de put een factor vier kleiner wordt bij halvering van de infiltratiesnelheid (figuur 7), is optimaliseren van bovengenoemde parameters aantrekkelijk, ter minimalisering van de totale kosten per m<sup>3</sup> geïnfiltreerd water.

In veel persputtensystemen zal een vast ingebouwd schoonpompsysteem worden toegepast. De investeringskosten en het gebruik van deze installatie worden hierna onder putkosten en onderhoud gerangschikt en niet apart als regeneratiekosten berekend. Regeneratiekosten worden dus beperkt tot de kosten die samenhangen met een meer intensieve reiniging van de put, een reiniging althans waarvoor een speciaal toegeruste regeneratieploeg in actie komt (figuur 36).

Met verstopping wordt, wanneer een vaste schoonpompinstallatie aanwezig is, dan ook alleen dat deel van de weerstand bedoeld dat na gebruik van deze vaste pompinstallatie achterblijft ( $v_2 \Delta t$  in figuur 36).

Grondslag van de optimalisatie is de keuze van een regeneratiecriterium, het sein waarop de regenera-

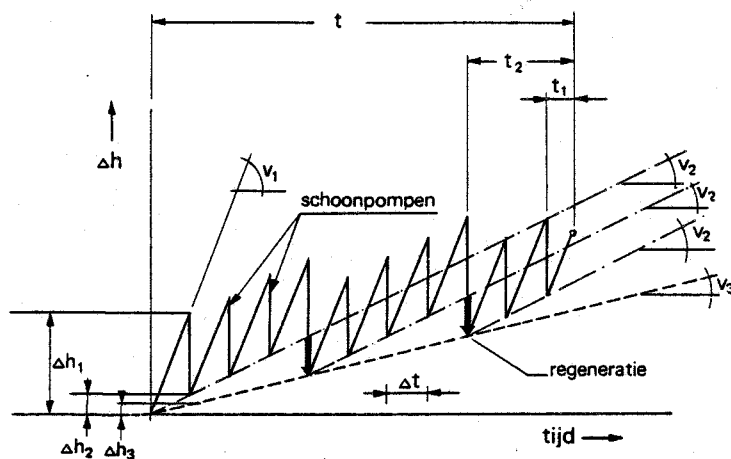


Fig. 36 - Schematisch verloop van de waterstand in een persput ten gevolge van verstopping, schoonpompen en regeneraties. De tijdschaal kan naar believen worden gevarieerd door middel van de keuze van het infiltratiedebiet en de waterkwaliteit.

tieploeg in actie komt. Beter dan het bereiken van de maximaal toelaatbare injectiedruk (zie hoofdstuk 2) is het criterium dat uitgaat van een zekere weerstandstoename na schoonpompen sinds de vorige regeneratie. De snelheid waarmee het criterium zal worden bereikt levert de regeneratiefrequentie.

Om de voor het ontwerpen benodigde gegevens te verkrijgen is vooronderzoek nodig. Hierbij wordt met putten in de uitgekozen formatie onderzocht, hoe snel het gekozen regeneratiecriterium met de in aanmerking komende watersoorten wordt bereikt.

Dit levert de regeneratiefrequentie  $rf_0$  (1/jaar), die hoort bij deze watersoort, deze putten (omvang  $A_0$  ( $m^2$ )), deze formatie en dit debiet ( $Q_0$  ( $m^3/h$ )).

Deze regeneratiefrequentie is zodoende een directe functie van de zuiveringskosten.



Het resultaat van een uitgebreid vooronderzoek zou er nu als volgt kunnen uitzien (tabel 5).

Proef	Voorzuivering	Regeneratie- frequentie proefput $rf_0$ ( 1/jaar)	Zuiverings- kosten (lit. Anon- niem, 1978) (fl/m <sup>3</sup> )
1	chlooring	52	0,02
2	BCL+SF	12	0,05
3	BCL+C+SF	4	0,11
4	BCL+C+SF+SC+SF	0,5	0,25
5	BCL+C+SF+AK+HF	0,1	0,50

Tabel 5 - Mogelijk resultaat van vooronderzoek met proefputten met infiltratieoppervlak  $A_0$  en vast debiet  $Q_0$  (BCL= breekpuntschlo-ring, SF= snelfiltratie, C= coagulatie, SC= secundaire coagulatie, AK= actieve koolfiltratie en HF= hyperfiltratie)

Indien de latere bedrijfspotten een ander debiet  $Q$  en omvang  $A$  krijgen, volgt met vergelijking 3.19 de bijbehorende regeneratiefrequentie  $rf$  direct uit  $rf_0$  die met de proeven is verkregen:

$$rf = \left(\frac{v}{v_0}\right)^2 rf_0 \quad \text{waarin } v = Q/A \text{ en } \quad (5.1)$$

$$v_0 = Q_0/A_0,$$

de respectievelijke infiltratiesnelheden op de boorgatwand.  $A = 2\pi rH$  en  $A_0 = 2\pi r_0 H_0$  met  $r, r_0$  de boorgatdiameters en  $H, H_0$  de omstortingshoogtes van de bedrijfs- en proefput respectievelijk.

Voor het gehele persputtensysteem bedragen de zuiveringskosten  $K_z$  (fl/jaar) bij een totaal debiet  $Q_t$  ( $m^3/a$ ) en een van  $rf_0$  afhankende prijs per  $m^3$ .

De putkosten bedragen op jaarbasis, inclusief terreinleidingen, eventuele vaste schoonpompinstallaties en dergelijke, bij  $n$  putten totaal  $\bar{a} k_p$

(fl/put):

$$K_p = n k_p r^* \quad (5.2)$$

waarin  $r^*$ , de annuïteit, van de rentevoet  $re$  (fractie/jaar) en de aflossingstermijn  $T$  (jaar) afhangt:

$$r^* = \frac{re \exp(re T)}{(\exp(re T) - 1)} \quad (5.3)$$

$T$  wordt gelijk genomen aan de levensduur van de putten. Deze gaan, met een totaal van  $N$  mogelijke regeneraties per put, bij een regeneratiefrequentie  $rf$  ( $jaar^{-1}$ ),  $N/rf$  jaar mee.

De regeneratiekosten,  $K_r$  (fl/jaar), tenslotte, bedragen bij  $k_r$  aan regeneratiekosten per put en per keer (fl/regeneratie):

$$K_r = n rf k_r \quad (5.4)$$

De totale kosten  $K_t = K_z + K_p + K_r$  moeten worden geminimaliseerd. Met:

$$n = Q_t/Q \text{ en } Q = Q_0 \left(\frac{A}{A_0}\right) \sqrt{\left(\frac{rf}{rf_0}\right)} \quad (5.5)$$

Deling door  $Q_t$  levert de totale kosten  $k_T$  per  $m^3$  geïnfiltreerd water:

$$k_t = k_z + \frac{1}{A} \left[ \left( \frac{A_0}{Q_0} \right) \sqrt{\left( \frac{rf_0}{rf} \right)} k_p \left\{ \frac{re \exp(re N/rf)}{\exp(re N/rf)} \right\} + \right. \\ \left. + \left( \frac{A_0}{Q_0} \right) \sqrt{(rf \ rf_0)} k_r \right] \quad (5.6)$$

waarin A en rf de onafhankelijke variabelen zijn.

Optimaliseren naar putomvang A betekent het boorsysteem kiezen waarmee de laagste kosten mer m<sup>2</sup> infiltratieoppervlak worden bereikt (zie ook hoofdstuk 6), dat wil zeggen k<sub>p</sub>/A minimaal, tegelijkertijd echter ervoor wakend, dat de zo gekozen constructiemethode niet leidt tot veel moeilijker te regenereren putten waardoor k<sub>r</sub> beduidend stijgt.

Tenzij bijzondere putten (bijvoorbeeld Ranney wells) of bijzonder grote putten worden toegepast (meerdere meters diameter) behoeft men voor een sterk toenemende k<sub>r</sub> niet bevreesd te zijn (zie ook hoofdstuk 6).

Resteert het bepalen van de optimale regeneratiefrequentie rf. Nulstelling van de partiële afgeleide k<sub>T</sub> naar rf levert, na de nodige omwerkingen, het volgende algemene verband tussen de dimensieloze groepen k<sub>r</sub>N/k<sub>p</sub> en u = re T = re N/rf:

$$\frac{k_r N}{k_p} = \left\{ \frac{u \exp(u)}{\exp(u)-1} \right\} * \left\{ 1 + \frac{2u}{1-\exp(u)} \right\} \quad (5.7)$$

Dit verband (zie figuur 37) is te benaderen door:

$$k_r N/k_p < 1: \\ rf = r_0 N \{ 0,78 \exp(-0,53 k_r N/k_p) \} \quad (5.8)$$

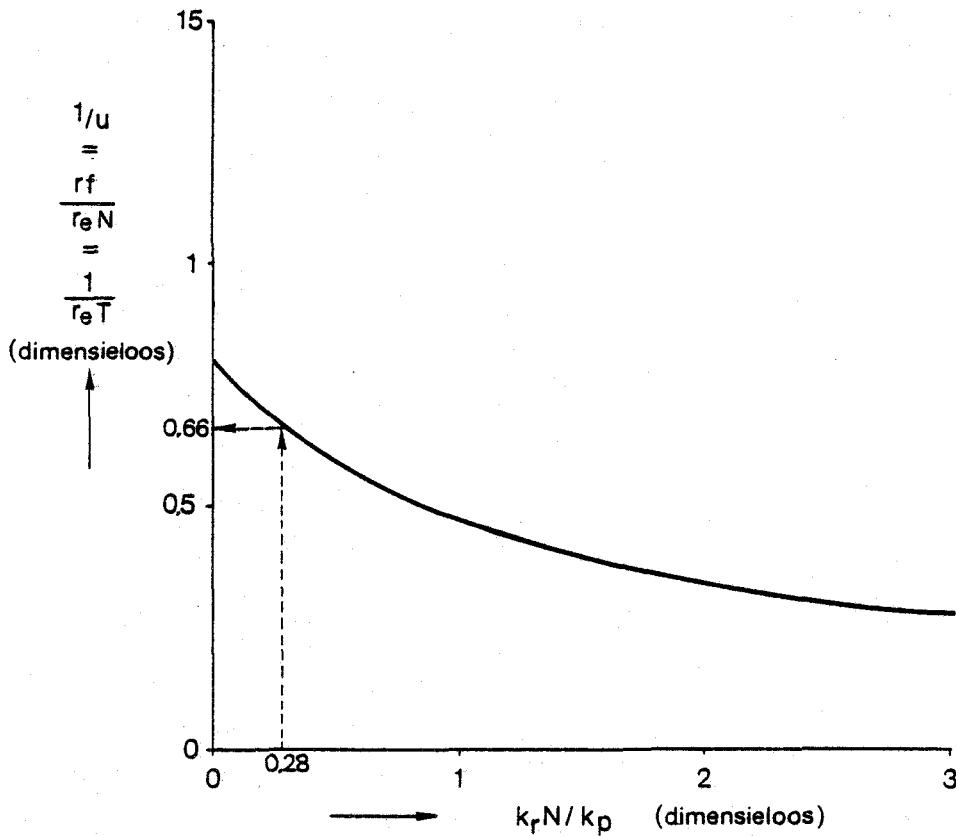
en

$$k_r N / k_p > 1:$$
$$rf = r_o N \{ 0,56 \exp (- 0,23 k_r N / k_p) \} \quad (5.9)$$

De optimale frequentie rf stijgt dus naarmate re, de rentevoet, toeneemt en de constructiekosten van een put,  $k_p$ , stijgen ten opzichte van de regeneratiekosten  $k_r$ . Aangezien de N vóór de exponent in alle praktische gevallen ( $k_r/k_p$  orde  $10^{-2}$ ) veel belangrijker is dan de N in het argument, neemt de optimale rf tevens toe met de regenereerbaarheid van de putten. Dat bij dit alles de afschrijftermijn T binnen redelijke grenzen blijft is hierna geïllustreerd voor  $k_r/k_p = 0,02$  en  $re = 0,1$ :

N (aant.)	1	2	5	10	20	50	100	200
rf(jaar <sup>-1</sup> )	0,077	0,152	0,37	0,70	1,26	2,2	23,5	4,5
T (jaar)	13,0	13,2	13,5	14,3	15,8	22,7	28,5	44,4

Ter illustratie van de beschreven methodiek wordt hierna een te ontwerpen installatie met een capaciteit van 30 miljoen m<sup>3</sup>/a beschouwd, waarbij wordt verondersteld dat het vooronderzoek de resultaten heeft opgeleverd van tabel 5 met proefputten bij  $Q_o = 50$  m<sup>3</sup>/h en dat deze proefputten reeds zijn geoptimaliseerd naar de verhouding  $k_p/A$  (zie hoofdstuk 6). De te bouwen bedrijfspoten zullen dus hetzelfde infiltratieoppervlak A krijgen en de proefputten zullen in het latere systeem worden opgenomen. Inclusief terreinleidingen en vast ingebouwde pompinstallatie kost een put in dit voorbeeld f 80.000,--. Elke regeneratie kost f 1.500,-- en de rentevoet re bedraagt 10 %. De putten kunnen tijdens hun bestaan minstens 15 maal worden gerege-  
nereerd (N = 15).



Bepaling optimale regeneratiefrequentie.

Fig. 37 - Verband tussen de dimensieloze groepen  $\frac{r_f}{r_e N}$  en  $\frac{k_r N}{k_p}$ .  $r_f$  = optimale regeneratiefrequentie ( $\text{jaar}^{-1}$ ),  $r_e$  = rentevoet (% per jaar/100),  $N$  = het maximum aantal regeneraties dat de put kan ondergaan,  $k_r$  = kosten van één enkele regeneratie,  $k_p$  investeringskosten van 1 infiltratieput inclusief afwerking en entourage.

De optimale regeneratiefrequentie  $r_f$  volgt nu uit figuur 37 met :

$$\frac{k_r N}{k_p} = \frac{(1500) (15)}{(80\ 000)} = 0,28 \rightarrow \frac{r_f}{r_e N} = 0,66$$

zodat

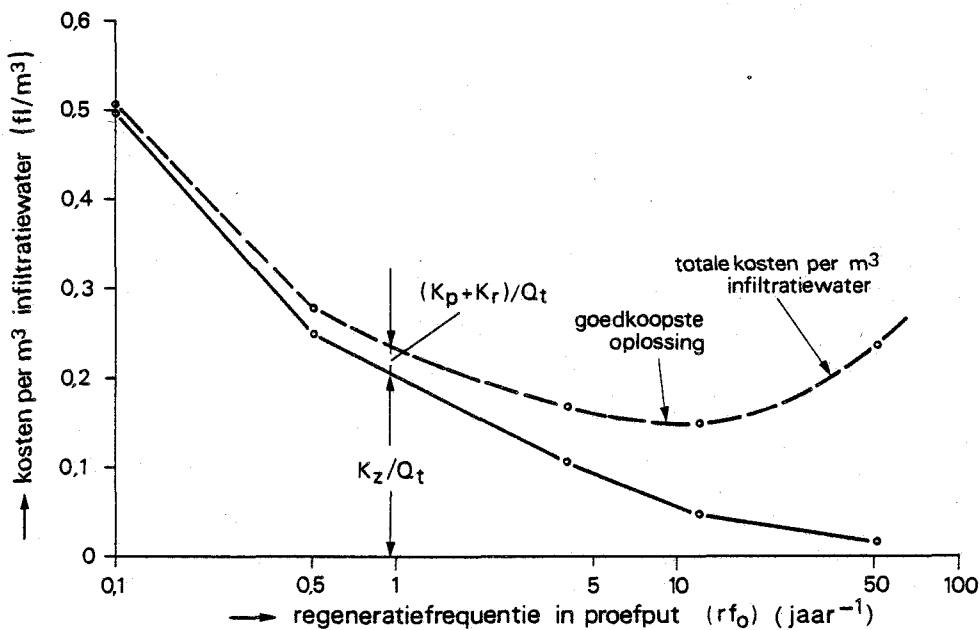
$$rf = (0,66)(0,1)(15) = 1,0/\text{jaar}; \text{ en}$$

$$T = (15)/(1,0) = 15 \text{ jaar.}$$

Na invulling levert de formule voor de totale kosten per  $\text{m}^3$ :

$$k_T = k_z + (0,030) \sqrt{(rf_0)} \quad (\text{fl}/\text{m}^3)$$

$k_z$  volgt als functie van  $rf_0$  uit tabel 5, zodat  $k_T$  als functie van uitsluitend de kwaliteit van het infiltratiewater ( $rf_0$ ) kan worden weergegeven.



Figuur 38 - Kosten van de voorzuivering per  $\text{m}^3$  ( $K_z$ ) en totale minimale infiltratiekosten per  $\text{m}^3$  ( $(K_z+K_p+K_r)/Q_T$ ) als functie van de kwaliteit van het infiltratiewater ( $rf_0$ ).

Dit is gedaan in figuur 38. De goedkoopste oplossing wordt hier verkregen bij  $rf_0 = 9/\text{jaar}$ , terwijl de beproefde zuivering (chloring plus snelfiltratie) met  $rf_0 = 12/\text{jaar}$  een nagenoeg gelijk resultaat oplevert.

Kiezen wij deze zuivering, dan volgt voor de capaciteit van de bedrijfsputten:

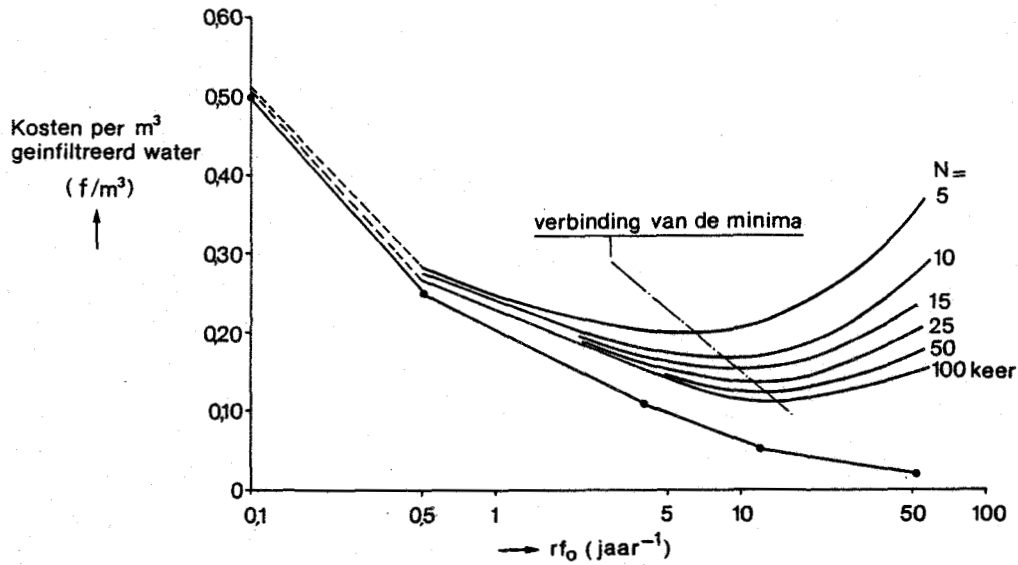
$$Q = (50) \sqrt{(1)/(12)} = 14 \text{ m}^3/\text{h} \quad (5.12)$$

een in de meeste gevallen aanvaardbare waarde. Bij 8000 draaiuren per jaar is het benodigde aantal putten:

$$n = (30)10^6 / ((14)(8000)) = 270 \text{ stuks,}$$

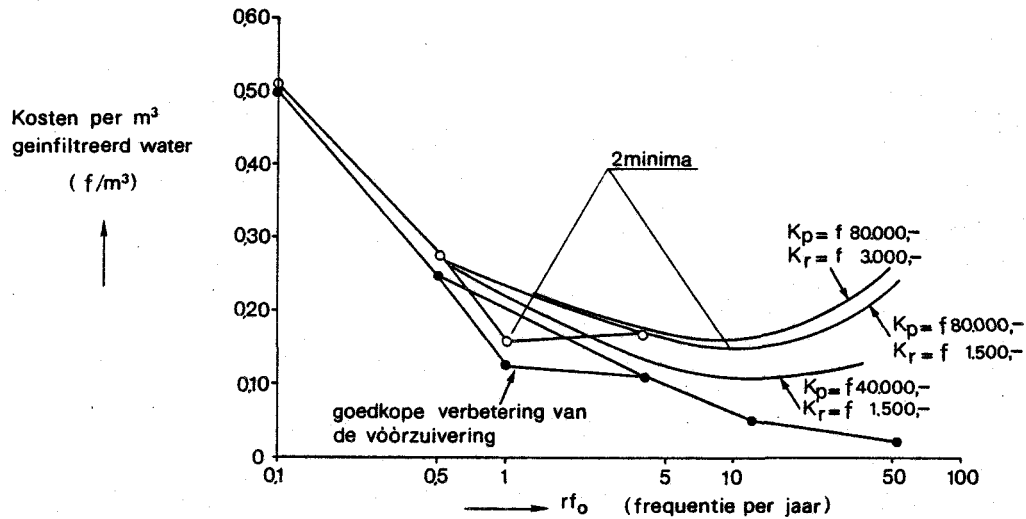
terwijl de totale kosten blijkens figuur 38 uitkomen op f 0,15/m<sup>3</sup>, ofwel f (4,5).10<sup>6</sup>,-/jaar.

Dit resultaat hangt onder meer af van het mogelijke aantal regeneraties  $N$ . Volgens fig. 39 blijkt dat grotere waarden dan 25 nauwelijks van invloed zijn. Waarden van  $N$  beneden circa 15 hebben echter een belangrijke invloed op de kosten. 15 regeneraties per put is in de praktijk in de meeste gevallen haalbaar en vaak zijn tientallen regeneraties per put mogelijk. Een regeneratiemethode moet dus in het algemeen  $N > 25$  garanderen om minimale kosten te verzekeren. Figuur 40, tenslotte, toont de invloed van de putkosten  $k_p$  en de regeneratiekosten  $k_r$  op het optimum en de totale kosten.



Figuur 39 - De totale en minimale kosten per m<sup>3</sup> geïnfiltreerd water voor verschillende waarden van het in totaal mogelijke aantal regeneraties (N) dat een put kan ondergaan, als functie van de waterkwaliteit ( $rf_0$ ), zie ook figuur 38.





**Figuur 40 - Het effect van een goedkope verbetering van de voorzuivering, van halvering van de putkosten en van verdubbeling van de regeneratiekosten op de kosten per  $m^3$  geïnfiltreerd water; alles ten opzichte van de situatie in figuur 38.**

De figuur laat ook de invloed zien van een goedkope verbetering van de voorzuivering. Deze blijkt hier in vergelijking tot de reeds verkregen oplossing een even dure oplossing op te leveren (dat wil zeggen meer zuiveren, maar minder putten en regeneraties).

Voor de uiteindelijke keuze kunnen vanzelfsprekend geheel andere factoren en overwegingen meetellen. Eén ervan is de bescherming van de bodem. Zeker indien de kosten dezelfde zijn (fig. 40) zal met het oog op de bescherming van de bodem een verdergaande voorzuivering de voorkeur verdienen.

6 PUTONTWERP

6.1 Economisch

Met behulp van de in het vorige hoofdstuk behandelde methodiek worden, voorafgaand aan het ontwerp van de eigenlijke putten, reeds een aantal globale variabelen vastgelegd, die nu nader ingevuld dienen te worden. Het in totaal benodigde infiltratieoppervlak is een van de variabelen die hier reeds vaststaan. Dit oppervlak (A) bedraagt bij n putten met boorgatdiameter  $2r$  en omstortingslengte  $H$ :

$$A = n(2\pi r)H \quad (6.1)$$

In het algemeen kunnen de constructiekosten van de benodigde n putten met onderstaande formule beschreven worden:

$$K_p = n \left[ K_0 + \{K_1 + aH\} \left\{ 1 + b \left( \frac{r-r_0}{r_0} \right) \right\} \right] \quad (6.2)$$

$K_0$  zijn de kosten voor de aan- en afvoer van het boormaterieel en dergelijke, berekend per put,  $K_1$  zijn de boor- plus afwerkingskosten tot de bovenzijde van de omstorting,  $a$  zijn de boor- plus afwerkingskosten per meter omstortingslengte,  $H$  is de lengte van de omstorting,  $b$  een factor voor het boren met een andere diameter dan de standaardwaarde  $2r_0$ .

Minimaliseren van de boorkosten is een optimaliseringsvraagstuk, waarbij het bijplaatsen van putten

wordt afgewogen tegen dieper boren en boren met een andere diameter. Een en ander wordt begrensd door de beschikbare dikte van de formatie en de mogelijkheden van de verschillende boortechnieken.

Is A bijvoorbeeld 10.000 m<sup>2</sup> en wordt als eerste benadering voor H 15m en r=r<sub>o</sub>=0,25m gekozen, dan bedraagt het aantal benodigde persputten 424. In dit voorbeeld kiezen we verder K<sub>o</sub> = f 10.000,--, K<sub>1</sub> = f 10.000,--, a = f 300,-- per meter en b = 0,5, zodat het boren van een tweemaal zo breed boorgat f 450,-- per meter kost.

Met deze getallen heeft elke put een infiltratieoppervlak van 23,6 m<sup>2</sup> en kost f 24.500,--. Worden de putten juist zoveel (dH) dieper geboord, dat met één put minder kan worden volstaan, dus:

$$2\pi r_o H = (n-1)2\pi r_o dH \quad (6.3)$$

zodat

$$dH = H/(n-1)$$

dan kost dit:

$$dK_p = \left( \frac{\partial K_p}{\partial H} \right)_{n-1} dH = aH = f 4500,--$$

waar een besparing van 1 put, dus f 24.500,--, tegenover staat.

Worden de putten daarentegen met een grotere diameter geboord, eveneens zodanig dat met één put minder kan worden volstaan, dus:

$$2\pi r_o H = (n-1)2\pi(r-r_o)H, \text{ zodat} \quad (6.6)$$

$$r-r_o = r_o/(n-1), \text{ dan kost dit:} \quad (6.7)$$

$$dK_p = \left(\frac{\partial K}{\partial r}\right)_{n-1} dr = b(K_1+aH) = f 7.250,-- \quad (6.8)$$

In dit voorbeeld is het dus gunstig om, zover dat mogelijk is, dieper, vervolgens breder te boren en pas als laatste meer putten te maken. Op deze wijze kan het benodigde infiltratieoppervlak tegen minimale kosten worden verkregen. Bedraagt de realiseerbare filterlengte (H) bijvoorbeeld 20 m en de maximale diameter bij het gebruikte boorsysteem 1 m, dan zouden in plaats van de eerder berekende 424 putten er maar 160 moeten worden geboord en bedraagt de investering geen f 10.388.000,-- maar f 5.440.000,--.

## 6.2

### Hydrologisch

Aangezien de toelaatbare injectiedruk evenredig is met de diepte van de bovenzijde van de omstorting (hoofdstuk 2), wordt een redelijke afstand met het maaiveld gehandhaafd, bijvoorbeeld minimaal 10 m. De toelaatbare waterstand in de put bedraagt dan 2 m boven het maaiveld, zodat, rekening houdend met een ruimte van 2 m voor eventuele verstopping, de ontwerpstijghoogte in zo'n put niet boven het maaiveld mag uitkomen. De lage viscositeit van winters oppervlaktewater dient hierbij zonodig mede in beschouwing te worden genomen. Meer putten (maar dan eventueel met een kleinere diameter) en/of grotere afstanden tussen de putten zijn wellicht nodig om aan deze randvoorwaarde te kunnen voldoen.

Worden de persputten bijvoorbeeld gelijkmatig verdeeld over een lengte (L) van 5000 m en aan weerszijde op 200 m afstand door winningsputten geflankeerd, dan behoeft buiten deze reeksen winningsputten normaliter geen beïnvloeding van de grondwaterstanden op te treden. De maximale waterstandsverhoging in de (n) schone putten op afstand  $b=L/n$  uiteen, bij een totaal infiltratiedebiet (Q) van 25 miljoen  $m^3$ /jaar, een doorlaatfactor van de formatie (kH) van 1000  $m^2/d$  bij 10 graden celcius watertemperatuur en een minimale watertemperatuur van 0 graden celcius, bedraagt (Huisman, 1972):

$$\Delta\phi = \left(\frac{\mu_0}{\mu_{10}}\right) \left\{ \frac{1}{2} \left(\frac{Q}{L}\right) \left(\frac{1}{kH}\right) + \frac{(Q/n)}{2\pi kH} \ln\left(\frac{b}{2\pi r_0}\right) \right\} \quad (6.9)$$

Nu is:

$$\frac{b}{2\pi r_0} = \frac{nb}{n2\pi r_0 H} = \frac{LH}{A} = \text{constant en} \quad (6.10)$$

bedraagt:  $\frac{(5000)(20)}{(10\ 000)} = 10$ , zodat in dit voorbeeld,

met  $\frac{\mu_0}{\mu_{10}} = 1,37$  :

$$\Delta\phi = (1,37) \left\{ (1,37) + (25,1)/n \right\} = 1,9 + 34/n$$

Hoewel n nauwkeurig uit deze betrekking kan worden berekend, is het direct duidelijk, dat bij grote aantallen putten,  $n > 100$ , uitsluitend de constante term, hier 1,9 m, nog een rol speelt.

Om tijdens het bedrijf met schone putten waterstanden boven maaiveld tegen te gaan, mag de natuurlijke grondwaterstand 's winters derhalve niet hoger zijn, dan ongeveer 2 m minus maaiveld. (Bij putten

waarin de omstorting dieper begint is meer speling beschikbaar.)

### 6.3

#### Hydraulisch

Besluit men tot regenereren met perslucht, dan dient de put daarop te worden afgestemd, hoofdzakelijk door de keuze van de diameter van de stijg- en filterbuis. Figuur 41 illustreert dit aan de hand van het verband tussen het opgepompte waterdebiet en het daarvoor benodigde luchtdebiet; een en ander voor enkele waarden van de putweerstand  $W = \frac{\Delta\phi}{Q}$ .  $\Delta\phi$  (m/(m<sup>3</sup>/h)) die met  $R = 1000$  m in het onderhavige voorbeeld voor de schone putten rond 0,03 bedraagt:

$$\frac{\Delta\phi}{Q} \approx \frac{1}{2\pi kH} \ln\left(\frac{R}{r_0}\right) = \frac{(24)}{(2)\pi(1000)} \ln\left(\frac{1000}{0,5}\right) = 0,029$$

(dimensie: (mH<sub>2</sub>O/(m<sup>3</sup>/h)))

De grootte van de doorlaatfactor,  $kH$ , en van de verstopping zijn in hoge mate bepalend voor het verkregen waterdebiet, evenals de inblaasdiepte (die zo groot mogelijk dient te zijn) en het uitstroomverlies in de putkop (dat zoveel mogelijk moet worden beperkt). In dit voorbeeld biedt de grote stijgbuisdiameter geen voordeel en blijkt 0,3 m diameter praktisch optimaal. Hiermee kan met een stevige compressor (meer dan 4 normaal-kubieke meter lucht per minuut), afhankelijk van de mate van verstopping, een debiet van 100 à 200 m<sup>3</sup>/h gehaald zullen worden. Gaat men jutteren, dan kan met een veel kleinere compressor gedurende korte tijd een groot debiet worden bereikt (hoofdstuk 4):

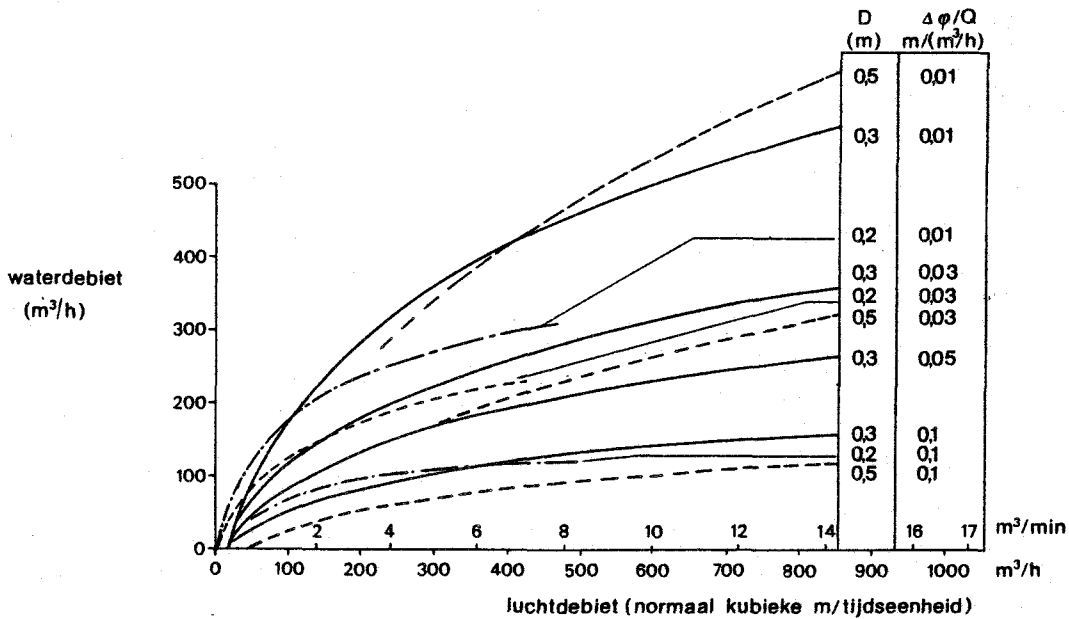


Fig. 41 - Verband tussen waterdebiet en benodigd luchtdebiet (Olsthoorn, 1978) voor 3 stijgbuisdiameters en enkele waarden van de specifieke verlaging  $\Delta\phi/Q$  (m/(m<sup>3</sup>/h)), een wandfrictiecoëfficiënt  $\lambda$  van 0,025, uitstroomweerstandscoefficient  $\xi$  van 1, luchtleidingdiameter 0,025 m, een rustwaterstand van 3 m beneden maaiveld en het inblaaspunt van de perslucht op 30 m diepte.

$$Q = \Delta\phi \left\{ W_v + \frac{1}{4\pi kH} \ln\left(\frac{2,25 kHt}{r^2 S}\right) \right\} \quad (4.1)$$

Het topdebiet treedt op bij  $t \approx 0,3$  s. Bij een verstoppingsweerstand  $W_v$  van  $0,05$  m/(m<sup>3</sup>/h), dit is  $180$  m/(m<sup>3</sup>/s) een bergingscoëfficiënt  $S$  van  $0,001$  en  $\Delta\phi = 10$  m volgt:

$$Q = 10 / \{ 180 + 23,7 \} = 0,049 \text{ m}^3/\text{s} = 177 \text{ m}^3/\text{h}.$$

Naarmate de regeneratie voortschrijdt en de verstoppingsweerstand daalt, neemt  $Q$  toe.

Bedraagt de verstoppingsweerstand nog  $0,02$  m/(m<sup>3</sup>/h), dit is  $72$  m/(m<sup>3</sup>/s), dan is  $Q$  al toegenomen tot  $380$  m<sup>3</sup>/h! Met het oog op de invloed van de verstopping op het jutterdebiet, verdient het aanbeveling op tijd te regenereren.

#### 6.4

##### Technisch

Nu de optimale stijgbuis- en filterdiameter is bepaald op  $0,3$  m, wordt de annulaire ruimte, na plaatsing van de nodige peilbuizen, tot  $1$  m onder en boven het filter met omstortingsgrind opgevuld. Met uitzondering van formaties die uit zeer fijn en uniform zand bestaan, is grind van  $2$  tot  $3$  mm hiervoor geschikt (Kobus, 1976).

Slecht doorlatende lagen worden afgedicht om lekkage en kortsluiting te voorkomen. Het is een goede gewoonte om boven de omstorting een meter zand en vervolgens een of meerdere meters klei of kleicement aan te brengen. Door de geringere hoek van inwendige wrijving (hoofdstuk 2) is klei, na een zekere zettingsperiode, beter dan zand bestand



tegen hoge waterdrukken. Zelfs kunnen achterloops geraakte putten met kleiaanvulling na een rustperiode van enkele weken tot maanden weer bruikbaar zijn (Brandes, e.a., 1978).

Het is niet bekend of een bepaald boorsysteem van voordeel is. Van een voordeel van gepulste boringen ten opzichte van gespoten of gezogen boringen of omgekeerd met name met het oog op gebruik van boorpoelingen is in de praktijk tot nog toe niets gebleken. Een persput kan bij elk goed boorsysteem naar tevredenheid functioneren.

Met het oog op eventueel gebruik van chemicaliën wordt bij voorkeur kunststof gebruikt voor de stijg- en filterbuis. Een hoge stijfheidsklasse is sterk aan te bevelen om bezwijken tijdens het regenereren te voorkomen (Uil en Deelder, 1978). Het is onbekend of het grote open oppervlak van sommige roestvast stalen putfilters (tot 30 %) belangrijke voordelen biedt ten opzichte van gebruikelijke kunststoffilters met een veel geringer open oppervlak (circa 7 %). De veel hogere kosten van zulke geavanceerde metalen filters wegen doorgaans zwaarder dan de vermeende voordelen.

De injectieleiding dient steeds onder druk te blijven. De hiervoor benodigde ontwerpgegevens kunnen aan paragraaf 3.2 worden ontleend. In het onderhavige geval kan hiervoor een dunne leiding met voldoende wandfrictie worden gekozen tot onder in de put. Bij het regenereren kan de perslucht dan via dezelfde leiding worden ingeblazen (figuur 42).

Bij 18 m<sup>3</sup>/h infiltratiedebiet (in dit voorbeeld, namelijk 25.10<sup>6</sup>m<sup>3</sup>/a, bij 160 putten) een laagste

grondwaterstand van 3 m onder maaiveld en de onderzijde van de injectieleiding op 30 m minus maaiveld, bedraagt de benodigde frictie circa  $3/30 = 0,1$  m/m. Een leiding met een inwendige diameter van 50 mm (frictie: 0,12 m/m bij  $18 \text{ m}^3/\text{h}$ , zie tabel 1) is hiertoe geschikt.

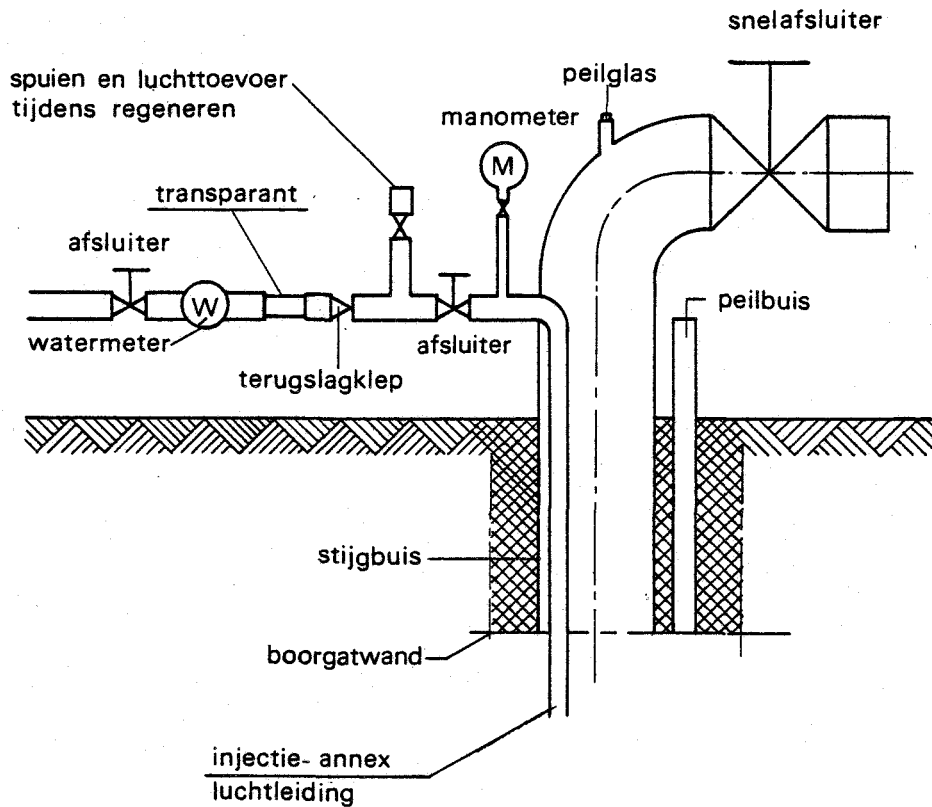
De putkop kan van een afvoer met snelafsluiter worden voorzien, die tijdens het regenereren wordt gebruikt. Het regeneratiewater wordt bij voorkeur via een aparte vuilwaterleiding geloosd (na neutralisatie van eventueel gebruikte chemicaliën).

Een peil/bemonsteringsbuis, manometer, watermeter, afsluiter, aansluiting voor de perslucht, spuileiding en zo mogelijk een stukje transparante buis (vanwege het barstgevaar bij voorkeur geen perspex maar transparant PVC) in de injectieleiding ter visuele controle, completeren de put (figuur 42).

Om te voorkomen dat de druk in de putten te hoog oploopt, is een overstort aan het einde van de centrale toevoerleiding, bekend als "kerstboom" (Brandes e.a., 1978), aan te bevelen. Deze maakt tevens spuien mogelijk.

Om het verstoppingsverloop te kunnen volgen zijn peilbuizen noodzakelijk. Een praktische opstelling is een peilbuis in de put, één of twee in de omstorting en één of twee in fijn zand boven of onder de omstorting. De laatste geven de stijghoogte in de niet verstopte formatie weer terwijl die in de put zelf het verloop en de locatie van de verstopping aangeeft (zie ook figuur 4).

Hoe een persputtensysteem er globaal uit zou kunnen



Figuur 42 - Voorbeeld persputappendages (schematisch)

zien op plaatsen waar het zoet-zoutvraagstuk niet speelt wordt met onderstaand voorbeeld geïllustreerd.

6.5

Illustratie

Stel dat een persputtensysteem wordt overwogen ter beveiliging van een oppervlaktewaterwinning en -zuivering. Kwaliteitsbuffering en overbrugbaarheid van een stagnatie in de toevoer van ruw water zijn

dan de doelstellingen. De benodigde capaciteit is 15 miljoen m<sup>3</sup>/jaar, terwijl het beschikbare watervoerende pakket ter plaatse 30 m dik blijkt te zijn met een doorlaatfactor,  $kH$ , van 1000 m<sup>2</sup>/dag, een porositeit van 35 %, een bergingscoëfficiënt van 0,001 en is afgedekt door een kleilaag met een weerstand,  $c$ , van 1000 d. De ontworpen persputten, elk met 30 m filter in een 0,6 m breed boorgat, hebben elk bij een redelijke infiltratiesnelheid van 1 m/h op de boorgatwand een capaciteit van 56 m<sup>3</sup>/h. Voor het totale systeem zijn derhalve 30 putten noodzakelijk.

Om beïnvloeding van de grondwaterstanden in de omgeving zoveel mogelijk te vermijden, worden de persputten op een cirkel geplaatst die de cirkel met de winningsputten geheel omsluit.

30 winningsputten, met eveneens een capaciteit van 56 m<sup>3</sup>/h, op 25 m uiteen, passen op een cirkel met een straal van 120 m. Ten einde twee maanden ondergrondse verblijftijd te verkrijgen worden de persputten op een ring geplaatst met een straal van 300 m. Het peil op de ring winningsputten is nu 6,7 m lager dan de natuurlijke grondwaterstand. De verlaging in het pakket boven de semi-permeabele laag is beduidend minder en kan in principe worden tegengegaan door ook in dat pakket water te infiltreren, eventueel via sloten.

Wanneer de toevoer van het ruwe water, om wat voor reden dan ook, wordt onderbroken, wordt de winning voortgezet, waarbij uit de aard der zaak de grondwaterstanden dalen. In dit voorbeeld ontstaat echter binnen 10 dagen een praktisch stationaire situatie. De extra dalingen ten gevolge van de onderbreking, die dan zullen zijn opgetreden, zijn hier

onder getabelleerd.

Afstand: (m)	300	600	1000	2000	5000
Zakking: (m)	9,0	5,1	2,8	0,8	0,0

Ter plaatse van en binnen de ring onttrekkingsputten is de totale verlaging maximaal en bedraagt nu dus  $9,0 + 6,7 = 15,7$  m ten opzichte van de natuurlijke grondwaterstand. De stijghoogten in een bovenliggend watervoerend pakket zullen eveneens zakken. Bij een weerstand  $c$  van 1000 dagen is de neerwaartse stroming door de kleilaag, uitgedrukt in mm/d, gelijk aan de berekende zakking. Voor  $r < 300$  m betekent dit  $(9 \text{ mm/d})(60 \text{ d}) = 540 \text{ mm}$  na 60 dagen stagnatie van de ruwwatertoevoer. Dit komt bij een bergingscoëfficiënt van bijvoorbeeld 25 % in het afdekkende pakket, neer op een waterstands-daling van grofweg maximaal 2 m.

Tijdens een dergelijke interruptie van de infiltratie stroomt een druppel water die zich aanvankelijk op circa 400 m van het hart van de installatie bevond, gemiddeld juist tot aan de ring met persputten en loopt tijdens navolgend normaal bedrijf dus kans om vroeg of laat door de winningsputten te worden opgepompt. Druppels die zich op gemiddeld meer dan globaal 400 m afstand bevonden worden niet gewonnen. Met andere woorden het gevaar van aantrekken van vervuild grondwater over grote afstanden, zoals bij de normale grondwaterwinning mogelijk is, is bij een dergelijk persputtensysteem nagenoeg afwezig.

Uit dit voorbeeld kan men concluderen, dat een persputtensysteem van deze capaciteit onder de aangegeven omstandigheden mogelijk zou kunnen zijn,

wanneer de berekende incidentele verlagingen geaccepteerd zouden worden en het gebied met een straal van 300 tot 500 m beschermd en onder beheer van het waterleidingbedrijf zou staan. Zoals blijkt kan een periode waarin de aanvoer van ruw water stagneert in dit voorbeeld worden overbrugd zonder dat tevoren een voorraad water behoeft te worden aangelegd.

GEBRUIKTE SYMBOLEN

De dimensies zijn gegeven in de meest gebruikte ISO-eenheden. De keuze van de eenheden in de formules is onbelangrijk, mits consistent, dat wil zeggen dat in een bepaalde formule geen uren en seconden of  $m^3$  en liters door elkaar gebruikt mogen worden.

- $a$ [fl/m] = boor- en afwerkingskosten van een put, per meter putfilter
- $A$ [ $m^2$ ] = putomvang of infiltratieoppervlak van een persput, berekend als boorgatometrek maal omstortingslengte:  $A = 2\pi rH$
- $A_0$ [ $m^2$ ] = idem, voor de proefputten:  $A_0 = 2\pi r_0 H_0$
- $b$ [\*] = prijsfactor voor het boren en afwerken van putten met een diameter ( $2r$ ) in plaats van de standaarddiameter ( $2r_0$ )
- $c$ [\*] = concentratie zwevende stof, uitgedrukt als  $m^3$  verstoppingslaag per  $m^3$  geïnfiltriseerd water
- $f$ [\*] = wandfrictie van de injectieleiding, uitgedrukt als  $mH_2O$ -verval per  $m$  buislengte
- $g$ [N/kg] = sterkte van het zwaartekrachtsveld
- $h$ [m] = afstand vanaf maaiveld tot aan de bovenzijde van de omstorting
- $\Delta h$ [m] = druk- of stijghoogte in de omstorting boven maaiveld

\* = dimensieloos

$h_1$ [m]	= drukhoogte in een buis voor een afsluiter
$h_2$ [m]	= minimale drukhoogte in een buis onmiddellijk achter de afsluiter
$h_3$ [m]	= drukhoogte in een buis op circa 10 buisdiameters achter de afsluiter
$\Delta H$ [m]	= drukhoogteverval over de afsluiter, bij niet horizontale buis: energiehoogteverval of piëzometrisch verval
$H$ [m]	= omstortingslengte van de bedrijfsputten
$H_0$ [m]	= idem, van de proefputten
$k$ [m/d]	= doorlatendheidscoëfficiënt van de niet verstopte grond
$k_v$ [m/d]	= idem, van de verstopte grond
$k_*$ [m/d]	= $kk_v / (k - k_v)$
$k_i$ [m <sup>2</sup> ]	= intrinsieke doorlatendheidscoëfficiënt, grondeigenschap, onafhankelijk van temperatuur of gebruikte vloeistof: $k_i = (\mu/\rho g) * (k \text{ of } k_r)$
$k_z$ [fl/m <sup>3</sup> ]	= zuiveringskosten per m <sup>3</sup> infiltratiewater
$k_p$ [fl]	= investering per put, inclusief bijbehorende terreinleidingen en eventuele pompen
$k_r$ [fl]	= kosten van één regeneratie
$K_z$ [fl/a]	= totale zuiveringskosten per jaar
$K_p$ [fl/a]	= totale afschrijvingskosten van putten per jaar
$K_r$ [fl/a]	= totale regeneratiekosten per jaar
$K_T$ [fl/a]	= totale kosten per jaar: $K_T = k_z + K_p + K_r$



$K_0$ [fl]	= vast bedrag in de constructiekosten van een put
$K_1$ [fl]	= constructie- en afwerkingskosten van een put, exclusief $K_0$ , gerekend van maaiveld tot bovenzijde van de omstorting
$l$ [m]	= dikte van de verstopte laag: $dl$ [m] toename van $l$
MFI [s/l <sup>2</sup> ]	= membraanfilterindex, maat voor de verstoppingssnelheid van een membraanfilter, uitgedrukt in seconden per liter-kwadraat
$Q$ [m <sup>3</sup> /d of m <sup>3</sup> /h of m <sup>3</sup> /s]	= infiltratiedebiet in de bedrijfsputten (volumestroom)
$Q_0$ [m <sup>3</sup> /d etc.]	= idem, in de proefputten
$Q_T$ [m <sup>3</sup> /d etc.]	= totale infiltratiedebiet van het systeem
$r$ [m]	= boorgatradius van de bedrijfsputten of bepaalde afstand tot hart van de persput
$r_0$ [m]	= boorgatradius, soms specifieke boorgatradius van de proefputten
$r^*$ [fractie per jaar]	= annuïteit
$re$ [fractie per jaar]	= rentevoet
$rf$ [1/a]	= regeneratiefrequentie van de bedrijfsputten
$rf_0$ [1/a]	= idem van proefputten onder vaste proefomstandigheden, is onder meer functie van de waterkwaliteit

- $r_v$ [m] = afstand van de buitenzijde van de verstopte laag tot het hart van de put
- $R$ [m] = afstand waarop de stijghoogte constant is, geohydrologische randvoorwaarde
- $S$ [\*] = bergingscoëfficiënt, in geohydrologische constanten
- $^1$ ) SAR [ $\sqrt{(\text{mol}/\text{m}^3)}$ ] = Sodium Adsorption Ratio SAR =  $([\text{Na}^+] + [\text{K}^+]) / \sqrt{([\text{Mg}^{2+}] + [\text{Ca}^{2+}])}$ , conc. in [ $\text{mol}/\text{m}^3$ ]
- $t$ [s of h of d] = tijd
- $T$  [°C] = watertemperatuur
- $T$ [jaar] = afschrijftermijn of levensduur van de persputten (hoofdstuk 5)
- $u$ [N/m<sup>2</sup>] = waterspanning in een put in de grond;  $\Delta h$  is toename van  $u$  door de infiltratie (hoofdstuk 2)
- $u$ [\*] =  $k_r N / k_p = r_e N / r_f = reT$  (hoofdstuk 5)
- $U$ [m<sup>3</sup>] = totaal per put geïnfiltreerd volume
- $\bar{U}$ [m] = totaal per vierkante meter boorgatwand geïnfiltreerd volume water
- $v$ [m/s] = watersnelheid in een buisleiding
- $v$ [m/h] = filtersnelheid op de boorgatwand van de bedrijfsputten:  $v = Q/A$
- $v_o$ [m/h] = idem, in de proefputten:  $v_o = Q_o/A_o$
- $v_o$  [m/h] = filtersnelheid op de boorgatwand op tijdstip nul

$^1$ ) feitelijk PSAR: (Sodium + Potasium) Adsorption Ratio [ $\sqrt{(\text{mol}/\text{m}^3)}$ ]

\* = dimensieloos

- $V[m^3]$  = volume van de verstoppingslaag  
 $V = \int_0^t Q_c dt$
- $W[h]$  = weerstand van de verstopte laag,  
uitgedrukt als in  $mH_2O$  per  $m/h$   
filtersnelheid
- $W_v[h/m^2]$  = verstoppingsweerstand van een  
persput, uitgedrukt als in  $mH_2O$   
per  $m^3/h$  infiltratiedebiet

Griekse letters

$\gamma_g$ [N/m <sup>3</sup> ]	= volumegewicht natte grond
$\gamma_w$ [N/m <sup>3</sup> ]	= volumegewicht water
$\phi$ [graden of radialen]	= grondeigenschap, hoek van inwendige wrijving (hoofdstuk 2)
$\phi$ [m]	= grondwaterstijghoogte ten opzichte van een horizontaal referentievlak (hoofdstuk 3 tot en met 6)
$\phi_o$ [m]	= waterstand of stijghoogte in de put of de omstorting
$\phi_r$ [m]	= waterstand of stijghoogte op zekere afstand van de put
$\Delta\phi$ [m]	= stijging van de waterstand of de stijghoogte in de put
$\Delta\phi_s$ [m/a]	= standaardverstoppingssnelheid: $\Delta\phi$ na 1 jaar infiltreren met $v = 1$ m/h op de boorgatwand bij 10 °C watertemperatuur
$\lambda$ [*]	= passieve gronddrukcoëfficiënt (hoofdstuk 2) $\lambda$
$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	= dichtheid van water
$\sigma_1$ [N/m <sup>2</sup> ]	= maximum korrelspanning in een punt in de grond
$\sigma_3$ [N/m <sup>2</sup> ]	= minimum korrelspanning in een punt in de grond
$\sigma_g$ [N/m <sup>2</sup> ]	= verticale grondspanning (= korrelspanning + waterspanning) in een punt in de grond
$\mu_T$ [Ns/m <sup>2</sup> ]	= dynamische waterviscositeit bij T ° Celsius watertemperatuur

\* = dimensieloos

LITERATUUR

1. Anoniem; Studiegroep Diepe Ondergrondse Lozing van Afvalstoffen: Vooruitzichten tot ondergrondse verwijdering van afvalstoffen in Nederland.  
Den Haag, TNO, 1973, 127 pp.
2. Anoniem; Studiegroep Duinwaterwinning en Alternatieven: Duinwaterwinning en alternatieven.  
Leiden, Centrum voor Milieukunde der Rijksuniversiteit Leiden, 1978, 306 pp.
3. Anoniem; Underground Water Storage Study, Israël; Final Report.  
Rome, FAO, 1969, FAO/SF:39/ISR-9, 112 pp.
4. Baffa J.J. e.a.; Experience with Injection Wells for Artificial Ground Water Recharge; Task Group Report.  
JAWWA, May 1965, pp 629-639.
5. Barkman J.H.; D.H. Davidson; Measuring Water Quality and Predicting Well Impairment.  
Journ. Petr. Techn. Trans., AIME, 253, July 1972, pp 865-873.
6. Bernard G.G.; Effect of Reactions Between Interstitial and Injected Waters on Permeability of Rocks.  
Producers monthly, dec. 1955, pp 26-32.
7. Bichara A.F.; An Experimental Study of Long-term Artificial Recharge of Groundwater into Confined Aquifers using wells;  
Strathclyde, Univ. of Strathclyde, 1974, ca. 400 pp.

8. Brandes e.a.; Retourbemaling, Rapport van het KIVI, Den Haag, 1978.
9. Brown D.L.; H.D. Silvey; Underground Storage and Retrieval of Fresh Water from a Brackish-water Aquifer.  
New Orleans, Preprints of papers, 2nd. Int. Symp. on Underground Waste Management and Artificial Recharge, Sept. 26-30, 1973.  
Menasha, George Benta Co, 1973, Vol I, pp 373-419.
10. Bruington A.E.; F.D. Seares; Operating a sea water barrier Project.  
Journ. of the Irr. and Drain. Div. ASCE, March 1965, pp 117- 141.
11. Bulten, B.; Infiltratieproef met een persput op het terrein van de Hoogovens. Interimrapport van de Werkgroep Persputten van de WIRDU, PWN, Bloemendaal 1971
12. Bulten, B.; Infiltratieproef met een persput op het terrein van de Hoogovens. Tweede Interimrapport van de Werkgroep Persputten van de WIRDU, PWN, Bloemendaal 1972
13. Bulten, B.; M.C. Brandes; J. van Puffelen; Verslag van bezoeken aan objecten voor kunstmatige infiltratie van water door middel van putten in de USA.  
Bloemendaal, Provinciaal Waterleidingbedrijf van Noord-Holland, 1974, circa 100 pp.

14. Case L.C.; Water Problems in Oil production - an Oparator's Manuel.  
Tulsa, The Petroleum Publishing Co. Tulsa, Okl. USA, circa 1970, 133 pp.
15. Cooper D.K.; Barrier Well Redevelopment Manual.  
Los Angeles, LA County Flood Control District Water Conservation Division, 1971, File no. 176.41 346.41 375.41.
16. Crowe C.W.; New Treating Technique to Remove Bacterial Residues from Water-Injection wells.  
Journ. Ptr. Tech., 1968, pp 475-478.
17. Custodio-Gimena E.; Well Injection Near Barcelona, Spain.  
See the discussion of the paper 12, p. 330, in:  
"Artififial Groundwater Recharge". Proceedings of the Conference held at the University of Reading, England, 21-24 September 1970, vol. 2.
18. Custodio E.; J. Isamat; J. Miralles; Twenty-five Years of Groundwater Recharge in Barcelona (Spain).  
Dortmund, 1980, paper 6.1. In: proceedings of the international symposium on Artificial Groundwater Recharge, held in Dortmund (FAG), 14-18 May, 1979.
19. Donaldson E.C.; Injection Wells and Operations Today.  
American Ass. of Petr. Geologists, Memoir 18 (1972)24, pp 24- 46.

20. Dorn, F.; Geschichte und Bedeutung der Wassergewinnungsanlagen in Wiesbaden Schierstein, In: Künstliche Grundwasseranreicherung am Rhein, Band 2, ESWE, Stadtwerke Wiesbaden AG, Wiesbaden 1974.
21. Doscher T.M.; L. Weber; The Use of the Membrane Filter in Determining Quality of Water for Subsurface Injection. Drill. and Prod. Prac., API (1957) 169-179.
22. Doshi R.; J.A. Rancilio; Alamitos Barrier Project. Los Angeles, LA County Flood Control Distr., 1972, rep. 1971-72.
23. Ehrlich G.G. e.a.; Microbiological Aspects of Groundwater Recharge-Injection of Purified Unchlorinated Sewage Effluent at Bay Park, Long Island, New York. Journ. Res. U.S. Geol. Survey 1 (1973)3, pp 341-344.
24. Ellenberger C.W.; R.J. Aseltine; Selective Acid Stimulation to Improve Vertical Efficiency in Injection Wells - Case Study. Journ. of Petr. Tech., Jan. 1977, pp 25-29.
25. Eren J.; Y. Goldsmid; Sanitary Significance of Coliform Bacteria in Recharge Wells. In: Artificial Groundwater Recharge Conference, Reading, 21-24 Sept., 1970. Reading, Wat. Res. Ass., 1971, Vol 2, supp. paper B, pp 415- 427.



26. Farley J.T.; D.G. Redline; Evaluation of Flood Water Quality in the West Montalvo Field.  
J. pet. Techn., July 1968, pp 683-687.
27. Felsenthal, M.; B.L. Carlberg; Measuring Quality of Injection Waters.  
Petroleum Engineer, 28 (1956) 12, B53.
28. Gawalek G.; Wasch- und Netzmittel.  
Berlin, Akademie-Verlag; 1962, 232 pp.
29. Harpaz Y; Practical Experiences of Well Recharge.  
In: Artificial Groundwater Recharge Conference, Reading 21-24 Sept., 1970.  
Reading, Wat. Res. Ass, 1971, Vol 2, paper 12, pp 297-335.
30. Hewitt C.H.; Analytical Techniques for Recognizing Water Sensitive Reservoir Rocks.  
Journ. of Petr. Techn., August 1963, pp 813-818.
31. Howard G.C.; C.R. Fast; Hydraulic Fracturing.  
Soc. of Petr. Eng. of AIME; 1970.
32. Hubbert M.K.; D.G. Willis; Mechanics of Hydraulic Fracturing.  
AAGP. Memoir 18, 1972, pp 199-217.
33. Huisman L.; Stromingsweerstand in leidingen.  
Rijswijk, KIWA, 1969, mededeling 14, 124 pp + bijlage.
34. Huisman L.; Groundwater Recovery.  
London and Bastingstoke, Macmillan, 1972, 336 pp.

35. Johnson A.I. e.a.; Laboratory Study of Aquifer Properties and Well Design for an Artificial-Recharge Site.  
Washington, USGS, 1966, watersupply paper 1615-H, 41 pp.
36. Kleber J.P.; Well Cleaning with Calgon.  
JAWWA, May 1950, pp 481-484.
37. Kobus E.J.M. e.a.; Omstortingen van waterwinningssputten en het maximaal toetlaatbare putdebiet.  
Rijswijk, KIWA, 1976, med. nr. 45, 107 pp.
38. Kooij, D. v.d.; Ontwikkeling van een methode om de nagroeimogelijkheid van bacteriën in drinkwater te bepalen.  
H2O 12 (1978) 8, pp 164-167.
39. Krone R.B.; Borehole Recharge; the Compatibility of Recharge Water with the Aquifer.  
In: Artificial Groundwater Recharge Conference, Reading 21-24 Sept., 1970.  
Reading, Wat. Res. Ass., 1971, Vol 2, paper 10, pp 263-277.
40. Kruseman G.P.; N.A. de Ridder; Analysis and evaluation of pumping test data.  
Wageningen, Int. Inst. for Land Reclamation and Improvement, 1970, Bulletin 11, 200 pp.
41. Lerk C.F.; Enkele aspecten van de ontijzering van grondwater; Thesis Delft, Waltman, 1965, 130 pp.

42. Lyons J.W.; Distribution of Polyphosphate Deflocculants in Aquous Suspensions of Inorganic Solids.  
In: Griffith E.J. e.a. (eds); Environmental Phosphorus Handbook.  
New York, John Wiley & Sons, 1973, pp 281-288.
43. Marshall J.K. e.a.; Operation of a Recharge Borehole.  
Proc. Inst. Civ. Engrs, 41 (1968) pp 447-473.
44. Mc Cune C.C.; On Site Testing to Define Injection Water Quality Requirements.  
Journ. Petr. Techn., Jan. 1977, pp 17-24.
45. Mc Ilwain R.R.; W.T. Pitts; C.C. Evans; West Coast Basin Barrier Project 1967-1969.  
Los Angeles County Flood Control Distr., 1970.  
Rep. on the Control of Seawater Intrusion.  
1970.
46. Millot G.; Clay.  
Scientific American, 1979, pp 77-84.
47. Monkhouse R.A.; S. Philips; The Design, Construction and Maintenance of Recharge wells.  
Reading (UK), Central Water Planning Unit, nov. 1978. Technical Note No. 25.
48. Mungan N.; Permeability Reduction through Changes in pH and Salinity.  
Journal of Petr. Techn., Dec. 1965, pp 1449-1453.

49. Olsthoorn T.N.; H. Tuinzaad, C.G.E.M. van Beek;  
J. van Puffelen; Putinfiltratie met drinkwater  
te 's-Gravenhage.  
Rijswijk, KIWA, 1975, KIWA-mededeling 41,94  
pp.
50. Olsthoorn T.N.; In Nederlandse zandformaties  
zijn de totale en de effectieve porositeit aan  
elkaar gelijk.  
H2O, 10 (1977)5, pp 118-122.
51. Olsthoorn T.N.; Persputten, één met en één  
zonder verstopping.  
H2O, 10 (1977)26, pp. 582-584.
52. Olsthoorn T.N.; Persputten, op zoek naar de  
juiste middenweg.  
H2O, 10 (1977)26, pp 586-589.
53. Olsthoorn T.N.; Dimensioneren van retourputten  
met het oog op luchtliftend schoonpompen.  
In: Retourbemaling, Rapport van de Studiegroep  
Retourbemaling, Bijlage 5.C.  
Den Haag, KIVI, 1978.
54. Olsthoorn T.N. Onderloopsheid van retourputten.  
In: Retourbemaling.  
Den Haag, KIVI, 1978, bijlage 3 D.
55. Olsthoorn T.N.; Forschungsergebnisse mit  
Anreicherungsbrunnen in Holland. Proc. Int.  
Symp. "Künstliche Grundwasseranreicherung"  
Dortmund, 14-18 Mai 1979, In Press.
56. Olsthoorn, T.N.; Verstopping van persputten  
KIWA, 1982, circa 500 pp in press.

57. Osipow L.I.; Surface Chemistry; Theory and Industrial Applications.  
New York, Reinhold Publishing Corporation, 1962, 473 pp.
58. Patton C.C.; Oilfield Water Systems.  
Campbell Petroleum Series, 1974, 178 pp.
59. Rahman A. e.a.; Effect of Sediment Concentration on Well Recharge in a Fine Sand Aquifer.  
Wat. Res. Res. 5 (1969) 3. pp. 641-646.
60. Rautenberg J.; Theoretische und experimentelle Untersuchungen zur Wasserförderung nach dem Lufthabeverfahren. Thesis Karlsruhe, Techn. Universität 1972.
61. Rebhun M.; J. Schwarz; Clogging and Contamination Processes in Recharge Wells.  
Wat. Res. res. 4 (1968) 6, pp. 1207-1217.
62. Schippers J.C.; J. Verdouw; The Modified-Fouling-Index, a Method for Determining the Fouling Characteristics of Water.  
Desalination 32 (1980) pp. 137-148.
63. Schmassmann, H; Aus der Praxis der Grundwasseranreicherung in der Schweiz  
Oesterreichische Wasserwirtschaft 30 (1978) 1/2; p.7 - 18.
64. Schafer D.C.; The right Chemicals are able to Restore or Increase Well Yield.  
Johnson Drillers Journ., Jan.-Febr. 1974, pp. 1-3 and 13.

65. Signor D.C.; Laboraty Facility for Studies related tot Artificial Recharge. Preprints of Papers for the Second Int. Symp, on Underground Waste Management and Artificial Recharge, New Orleans, Louisiana, 1973, AAPG, 1973, pp 799-822.
66. Sniegocki R.T.; Geochemical Aspects of Artificial Recharge Water-supply paper, 1615-E, Washington, USGS-1963, 41 pp.
67. Sniegocki R.T.; Problems in Artificial Recharge trough Wells in the Grand Prairie Region Arkanas. Water-supply paper, 1615-F, Washington, USGS, 1963, 25 pp.
68. Sniegocki R.T.; R.F. Brown; Clogging in Recharge wels; Causes and Cures. In: Artificial Groundwater Recharge Conference, Reading 21-24 sept, 1970.  
Reading, Water Res. Ass. 1971, Vol 2, Paper 13, pp. 337-353.
69. Sniegocki R.T.; J.E. Reed; Principles of Siphons with respect tot the Artificial Recharge, Studies in the Grand Prairie region, Arkanas Washington, USGS, 1963, water-supply paper 1615-D, 1965 pp.
70. Steinmetz J.J.; Technische opbouw van de persput te Leiduin, Rijswijk, KIWA 1978. KIWA, med. 56, pp.55.
71. Steinmetz J.J.; Technische aspecten van een infiltratie met behulp van een persput.  
H2O, 10 (1977) 26, pp. 590-594.

72. Sternau R.; Artificial Recharge of Water through Wells, Experience and Techniques AISH Symposium, Haifa 1967.
73. Stormont D.H.; Filter Test Gives Data on Quality of Flood Waters. The Oil and Gas Journal 84 (1958) nov. 3 p. 84.
74. Tazelaar W.Z.; Waterinjectie in olievelden. Voordracht voor het Hydrologisch Colloquium, gehouden Delft, 2 oktober 1968.
75. Toy A.D.F.; Phosphorus Chemistry in Everyday Living. Chemical Society Washington D.C. American 1976, pp.237.
76. Uil H.; C. Deelder; Enkele aspecten bij het dichtklappen van PVC-buizen in pompputten. H2O 11 (1978) 20, pp. 451-455.
77. Vecchioli J.; Experimental Injection of Tertiary Treated Sewage in a Deep Well at Bay Park, Long Island, N.Y.; A summary of early results. New England Water Works Association, Vol. 86 (1972) 2, pp. 87-103.
78. Vecchioli J.; H.F.H. Ku and D.J. Sulam; Hydraulic Effects of Recharging the Magothy Aquifer, Bay Park, New York, with Tertiary-Treated Sewage. USGS professional paper 751-F, Washington 1980

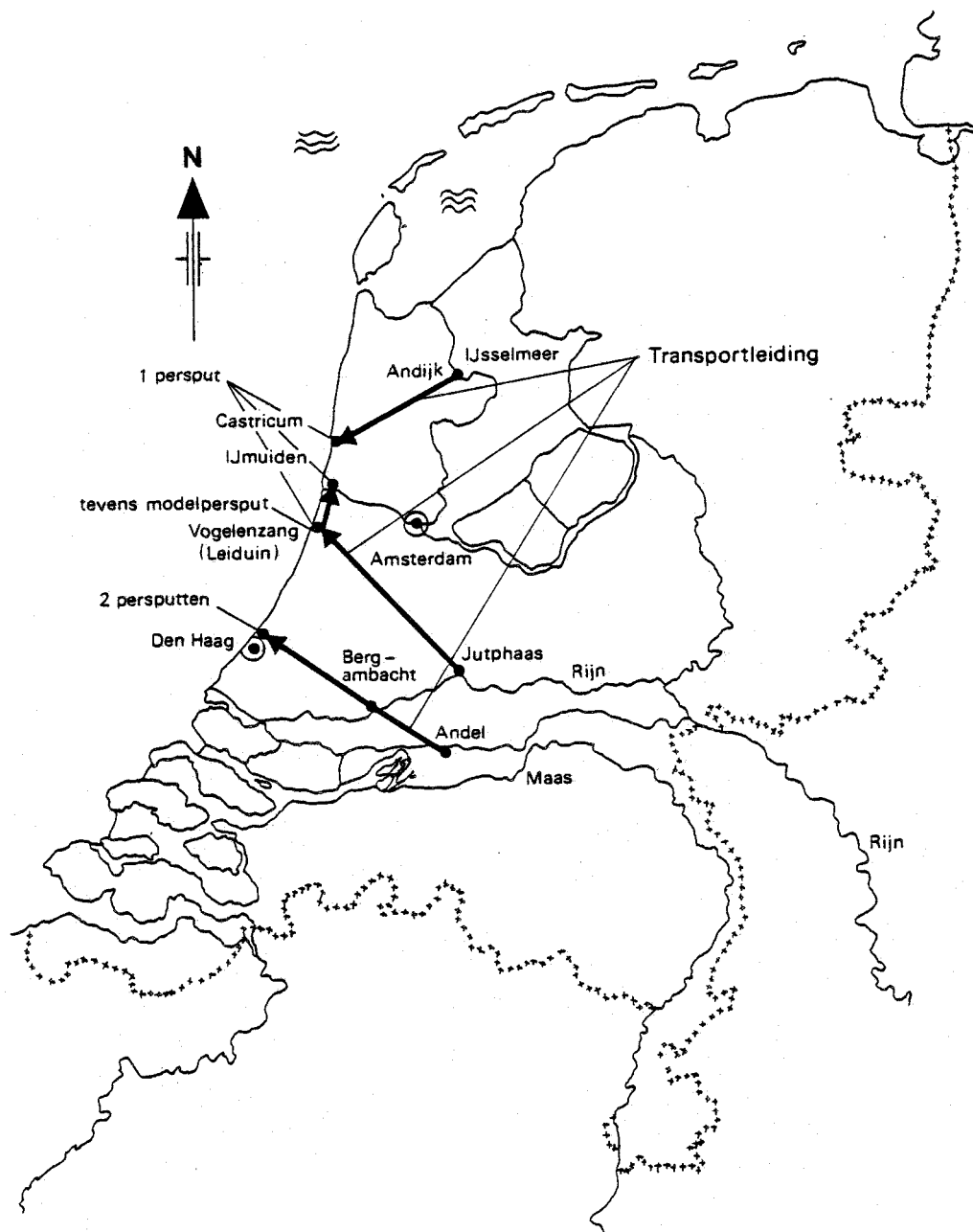
79. Veley C.D.; How hydrolyzable Metal Ions react with Clays to Control Formation Water Sensivity.  
Journ. of Petr. techn. sept. 1969 pp. 1111-1118.
  
80. Verruyt A.; Comment on Boutsma and Horvat.  
Proceedings of Geotechnical Conference.  
Oslo. 1967, Vol.2, p.125.
  
81. Warner D.L.; Deep Well Waste Injection Reaction with Aquifer Water. Journ. of the Dan. Eng. Div. Augustus 1966, pp. 45-69.



APPENDIX A

Gegevens van de Nederlandse Persputten (tot 1980) die door de Werkgroep persputten intensief zijn onderzocht.

Eigenaar van de infiltratieput	ESTEL Hoogovens B.V.	Duinwaterleiding van 's-Gravenhage (DWL)		Prov. Waterleidingbedrijf van Noord-Holland (PWN)	Gemeentwaterleidingen Amsterdam (GW)	Rijksinstituut voor Drinkwatervoorziening (RID)
Bijzonderheden	Gefiltreerd rivierwater	Drinkwaterinfiltratie	Nazuivering in proefinstallatie	Drinkwater uit Andijk	Rivierwater na coagulatie, bezinking en filtratie	Modelput, vergaan de voorzuivering in proefinstallatie
PLAATS	IJMUIDEN	DEN HAAG	DEN HAAG	CASTRICUM	VOGELENZANG	VOGELENZANG
Boormethode	Pulsboring	Pulsboring	Pulsboring	Spoelboring	Pulsboring	—
Boorgatdiepte (-NAP) (m)	40,2	45,6	42,6	93,0	38,0	—
Boorgatdiameter (m)	0,40	0,45	0,45	0,80	0,57	0,40
Omstortingslengte (m)	12,1	21,6	21,2	11,4	16,6	3,0
Uitwendig omstortingsoppervlak (m <sup>2</sup> )	15,5	30,8	30,3	29,7	29,2	4,0
Omstortingsgrind (mm)	1-2/2-4	1,5-2,5	1,5-2,5	1,2-1,7	1,2-1,7	1,5-2,5
Filtermateriaal	Koper	PVC	PVC	PVC	PVC	PVC
Filterlengte	10	19,4	19,4	9,4	14,0	2,0
Filterdiameter (mm)	125/121	200/190	200/190	200/180	250/230	200/190
Filteroppervlak (m <sup>2</sup> )	3,97	12,2	12,0	5,9	10,7	0,63
Filterspleetwijdte (mm)	1-10	1	1	1	1	1
Open oppervlakte van het filter (%)	?	6,7	± 7	6	7	± 7
Dikte van het watervoerend pakket (m)	28	30	60?	60	60	4,5
Doorlatendheidscoëfficiënt (m/s)	0,15.10 <sup>-3</sup>	0,28.10 <sup>-3</sup>	0,26.10 <sup>-3</sup>	0,35.10 <sup>-3</sup>	0,16.10 <sup>-3</sup>	0,2.10 <sup>-3</sup>
Infiltratiedebiet (m <sup>3</sup> /h)	16,7	36 à 60	36	10 à 30	30	3,5
Infiltratiesnelheid op boorgatwand (m/h)	1,1	1,2 à 2,0	1,2	0,34 1,0	1,0	0,9
Bouwjaar	1948	1973	1974	1974	1976	1978
In gebruik als infiltratieput	Aug. 1970 tot Febr. 1974	Sedert Mrt. 1973, tot 1980	Sedert Juli 1974, tot 1980	Sedert Sept. 1975	Sedert Nov. 1976, tot 1980	Aug. 1978 tot Jan. 1979
Geïnfiltreerd volume tot mei 1979 (m <sup>3</sup> )	0,13.10 <sup>6</sup>	2,5.10 <sup>6</sup>	0,7.10 <sup>6</sup>	0,7.10 <sup>6</sup>	0,3.10 <sup>6</sup>	48000



**Figuur 43 - Lokatie van proefpersputten die betrokken waren in het gezamenlijke Nederlandse persputtenonderzoek tot 1980**

APPENDIX B

Samenstelling van de Werkgroep Persputten

Akker, ir. C. van den, Gemeentewaterleidingen Amsterdam. Lid sinds 1975. (Sinds 1980 werkzaam bij het RID.)

Beek, ir. C.G.E.M. van, KIWA N.V., Rijswijk. Lid sinds 1974.

Bos, ir. S.G., Duinwaterleiding van 's-Gravenhage. Lid 1971-1973.

Boorsma, drs. H.J., Rijksinstituut voor Drinkwatervoorziening, Voorburg. Lid van 1970 tot 1972.

Bulten, ir. B., Voorzitter sinds oprichting, 1970. Tot 1 juni 1975 werkzaam bij het Provinciaal Waterleidingbedrijf van Noord-Holland te Bloemendaal, sindsdien bij de VEWIN in Rijswijk.

Brandes, ir. M.C., Rijksinstituut voor Drinkwatervoorziening, Voorburg. Lid sinds 1972. (Overleden, 31 mei 1981.)

Claessen, drs. F.A.M.. Tot 1 juni 1977 werkzaam bij de Dienst der Zuiderzeewerken in Den Haag, sindsdien bij Rijkswaterstaat, directie Waterhuishouding en Waterbeweging, District Noord, te Lelystad. Lid sinds 1973.

Duin, H.J.E.M. van, ESTEL Hoogovens B.V., IJmuiden. Lid van 1970 tot 1974.

Duyve, ing. J., Gemeentewaterleidingen, Amsterdam. Lid sinds oprichting in 1970.

Felius, ir. G.P., Dienst Zuiderzeewerken, Den Haag.  
Lid van 1970 tot 1973.

Haaren, drs. F.J. van, Gemeentewaterleidingen,  
Amsterdam. Lid van 1970 tot 1972. (Overleden.)

Kieft, ir. J.W., Gemeentelijk Waterbedrijf  
Groningen. Lid sinds november 1979.

Klaren, W., ESTEL Hoogovens B.V.. Lid van 1971 tot  
1972.

Kobus, dr. E.J.M., KIWA N.V., Rijswijk. Lid van  
1974 tot 1975.

Krabbendam, ing. J.P.J., ESTEL Hoogovens B.V.,  
IJmuiden. Lid sinds 1974.

Kuiperi, ir. J.C.H., ESTEL Hoogovens B.V.,  
IJmuiden. Lid van 1970 tot 1972.

Laan, drs. J. van der, Waterleidingbedrijf Midden-  
Nederland, Utrecht. Lid sinds 1974.

Olsthoorn, ir. T.N., KIWA N.V., Rijswijk. Lid en  
projectleider van 1974 tot 1980, secretaris van  
1975 tot 1979.

Peters, ir. J.H., KIWA N.V., projectleider sinds  
1980, bovendien secretaris sinds 1981.

Puffelen, ir. J. van, Duinwaterleiding van  
's-Gravenhage. Lid sinds 1970, secretaris tot maart  
1975.

Romijn, drs. E., Rijkinstituut voor Drinkwatervoor-  
ziening, Voorburg. Lid 1970 tot 1972.

Tuinzaad, ir. H., Duinwaterleiding van  
's-Gravenhage. Lid sinds oprichting in 1970.

Visser, ir. W., ESTEL Hoogovens B.V.. Lid van 1970  
tot 1972.

Vlasblom, ir. W.J., Provinciaal Waterleidingbedrijf  
van Noord-Holland, Bloemendaal. Lid tot 1974.

Wildschut, ir. R.J., Provinciaal Waterleidingbe-  
drijf van Noord-Holland, Bloemendaal. Lid sinds  
1975.

Winsen, ing. P.J. van, KIWA N.V., Rijswijk. Lid en  
secretaris sinds 1979 tot 1981.