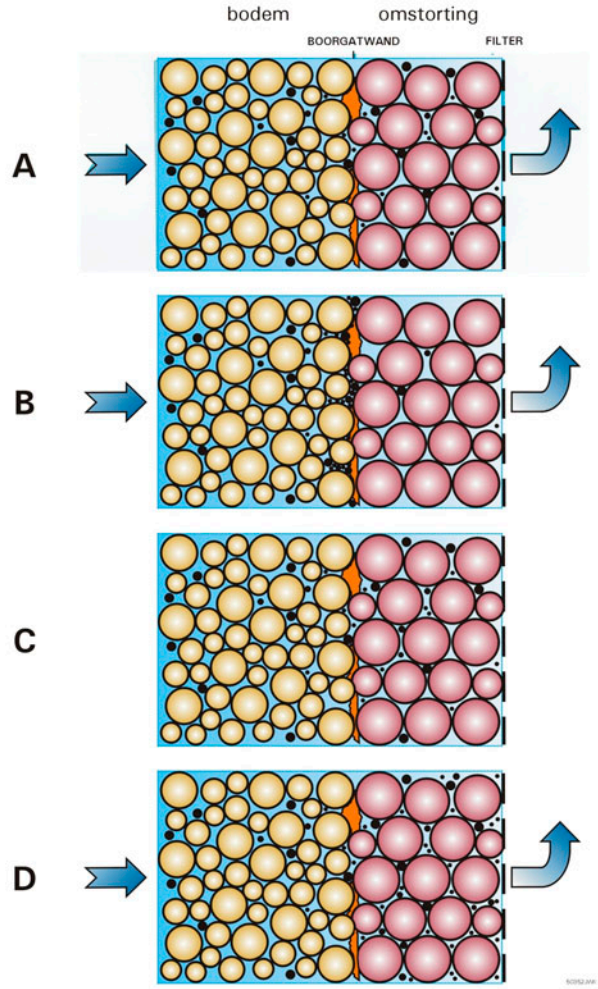
BTO 2005.046
Juli 2005

Putverstopping en deeltjes in grondwater: diagnose en aanzet voor therapie

Stand van zaken medio 2005



BTO 2005.046
Juli 2005

Putverstopping en deeltjes in grondwater: diagnose en aanzet voor therapie

Stand van zaken medio 2005

© 2005 Kiwa N.V.
Alle rechten voorbehouden. Niets uit deze uitgave mag worden verveelvoudigd, opgeslagen in een geautomatiseerd gegevensbestand, of openbaar gemaakt, in enige vorm of op enige wijze, hetzij electronisch, mechanisch, door fotokopieën, opnamen, of enig andere manier, zonder voorafgaande schriftelijke toestemming van de uitgever.

Opdrachtgever
CvO

Projectnummer
11.1456.404.030

Kiwa N.V.
Water Research
Groningenhaven 7
Postbus 1072
3430 BB Nieuwegein

Telefoon 030 60 69 511
Fax 030 60 61 165
Internet www.kiwa.nl

Colofon

Titel
Putverstopping en deeltjes in grondwater: diagnose en eerste aanzet voor therapie

Projectnummer
11.1456.404

Projectmanager
Jan Willem Kooiman

Kwaliteitsborger(s)
Marc Balemans, Jan Willem Kooiman

Auteur(s)
Bert-Rik de Zwart, Kees van Beek, Jan Willem Kooiman

Dit rapport is verspreid onder BTO-participanten en is openbaar

Samenvatting

Putverstopping is al een aantal decennia een probleem binnen de waterwereld. Eind jaren 90 van de vorige eeuw werd duidelijk dat al het grondwater, onttrokken uit (semi)spanningspakketten, deeltjes bevat en dat deze mogelijk de oorzaak zijn van de verslechtering van putten.

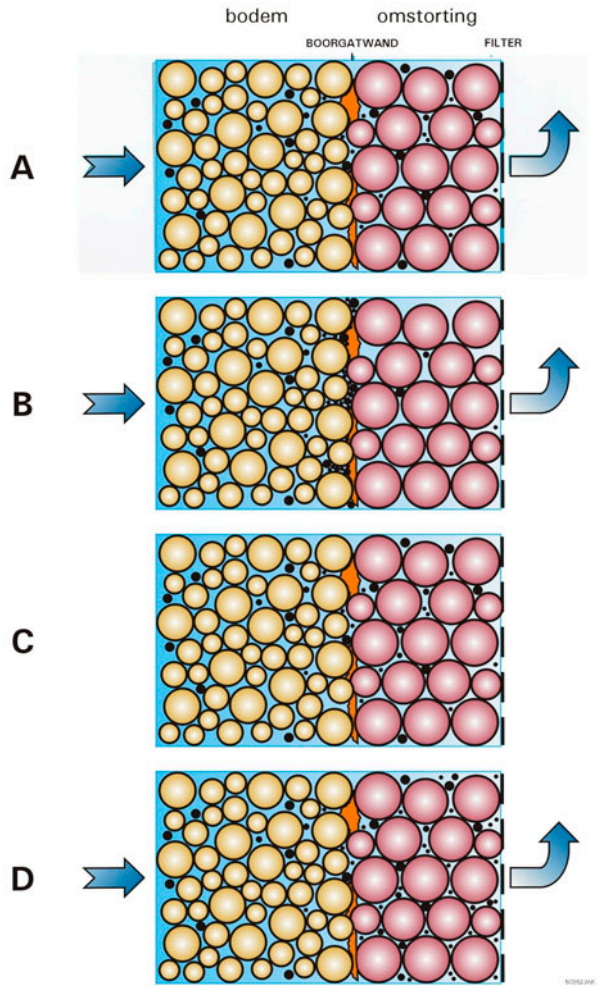
Onder ongunstige omstandigheden, zoals een hoge concentratie deeltjes, een put met een te hoge pompcapaciteit, een boorgatwand met minimale diameters van poriehalzen en een niet aangepaste bedrijfsvoering, zal putverstopping optreden door accumulatie van deeltjes nabij de boorgatwand. Het optreden van putverstopping verstoort niet alleen de bedrijfsvoering en brengt kosten met zich mee, maar putten die (semi)spanningswater onttrekken zijn gewoonlijk diep en daardoor kostbaar, terwijl de regeneratie niet altijd succesvol is.

"Om een vinger achter deze vorm van putverstopping te krijgen", is in de afgelopen jaren uitgebreid praktisch en fundamenteel onderzoek uitgevoerd naar het vóórkomen van deeltjes in grondwater, de relatie met putverstopping en de invloed van de bedrijfsvoering daarop. Het voorliggende rapport geeft de huidige (medio 2005) stand van zaken weer van het onderzoek. We geven de resultaten van deeltjestellingen, de classificatie van verstoppend materiaal, de verstoppingsoorzaken, en de mogelijkheid om putverstopping te beheersen of te voorkómen met specifieke bedrijfsvoering.

Er zijn twee verstoppingsoorzaken te onderscheiden. Bij de eerste wordt de verstopping al geïnitieerd tijdens de aanleg door het achterblijven van deeltjes boorspoeling op de boorgatwand. Bij de tweede is sprake van brugvorming door deeltjes in de directe omgeving van de put.
Om het verstoppende materiaal te classificeren zijn op twee locaties, Rodenhuis (Zuid-Holland) en Noordbergum (Friesland) horizontale steekmonster genomen loodrecht op de boorgatwand. Via een SEM-analyse is aangetoond dat het verstoppende materiaal in de ondergrond dezelfde samenstelling heeft als de deeltjes die gemeten worden in het onttrokken grondwater.
In de afgelopen jaren is de uitvoering van deeltjestellingen en de verwerking van de meetgegevens verder ontwikkeld. Dat heeft geleid tot een standaard-presentatie van de meetgegevens. De analyse van de meetgegevens heeft vernieuwende inzichten opgeleverd. Zo kan met de zogeheten Pareto-helling worden geconstateerd of sprake is van een verstopping.

Putschakelen als remedie tegen putverstopping
Het onderzoek in de afgelopen jaren heeft tot een doorbraak geleid. Over de werking is de volgende werkhypothese ontwikkeld (figuur S). Tijdens het onttrekken van grondwater wordt zwevend materiaal meegevoerd dat accumuleert op de boorgatwand (A). Hierdoor verstoppen de poriën en wordt de toestroming naar de put bemoeilijkt, wat zich onder andere uit in een verlaging van de waterstand in de put. Tijdens de onttrekkingsperiode blijven die deeltjes daar 'vast' zitten omdat er steeds water naar de put blijft stromen en die nieuw aangevoerde deeltjes de vastzittende deeltjes als het ware vast blijven drukken (B). Er zijn verschillende mechanismen die deze blokkade kunnen veroorzaken, waarvan de 'brugvorming' de belangrijkste lijkt te zijn.

© Kiwa N.V.



Figuur S Verloop van het verstoppingsproces en effect van het putschakelen op de deeltjes in bodem en omstorting

Als de put wordt uitgeschakeld stroomt er geen water meer naar de put en komt een deel van de deeltjes 'los' te zitten: er is geen druk meer die ze op hun plaats houdt (C).
Bij het weer aanschakelen van de put zullen deze 'losse' deeltjes grotendeels met het dan onttrokken grondwater worden verwijderd, waarmee het verstoppende materiaal verdwijnt (D).
Indien bij het aanzetten van de onderwaterpomp alle deeltjes worden verwijderd die gedurende de voorgaande periode op de boorgatwand zijn geaccumuleerd zal geen verstopping optreden. Indien dat niet het geval is, zal wel verstopping optreden.
Inmiddels is een strategie bepaald om een optimale bedrijfsvoering te bepalen ten aanzien van het verminderen van putverstopping (debiet en schakelen). Deze strategie wordt in de praktijk getoetst en omgezet in een toepasbare handleiding.

Op dit moment hebben we de indruk dat de inzichten zich niet meer zo sterk zullen wijzigen als in de afgelopen 2 jaar. We richten ons nu vooral op de praktische uitwerking van die inzichten, die moet resulteren in een bruikbare handleiding voor de putbeheerders.
Deze uitwerking zal nog wel de nodige tijd in beslag nemen omdat zich allerlei praktische problemen voordoen die we nu nog niet kunnen voorzien.

Toekomstig onderzoek
Het toekomstig onderzoek richt zich op situaties die vallen binnen de normale bandbreedte, en op situaties die daar niet binnenvallen (onderzoek in de breedte), en op de relatie tussen deeltjesconcentratie en volumestroom, aard van de deeltjes, verschillen tussen verschillende watervoerende pakketten of geologische formaties (onderzoek in de 'diepte').

Doel rapport
Om die experimenten te 'begeleiden' leek het goed om de achterliggende theorie toegankelijk te maken voor de waterleidingbedrijven en andere belangstellenden.

Inhoud

Samenvatting 5

Inhoud 7

1 Inleiding 9

2 Deeltjes in grondwater en putverstopping 11

2.1 Belang van deeltjesonderzoek 11

2.2 Classificatie op basis van korrelgrootte (zwevend materiaal) 12

2.3 Hoeveelheid deeltjes in het grondwater 13

2.4 Mechanische putverstopping en deeltjes 13

2.4.1 Filtratie processen 14
2.4.2 Verstoppingsoorzaak 1 (initieel) 14
2.4.3 Verstoppingsoorzaak 2 (brugvorming) 14

2.5 Ondersteuning vanuit de praktijk: Steekmonsters 15

2.5.1 Puttenveld Rodenhuis, Bergambacht (Hydron Zuid-Holland) 16
2.5.2 Puttenveld Ritskebos, Noardbergum (Vitens Friesland) 16
2.5.3 Bemonsteren van onttrokken grondwater 18

3 Deeltjestellingen 19

3.1 Drie mogelijkheden voor de bepaling van de deeltjeshoeveelheden 19

3.2 Deeltjestellingen gebaseerd op lichtblokkade 19

3.3 Deeltjestellers en meetprotocol 20

3.3.1 Deeltjesteller Met One (in gebruik t/m juni 2005) 21
3.3.2 Deeltjesteller Pamas Waterviewer (in gebruik vanaf juli 2005) 22

3.4 Verstoringen van de tellingen 22

4 Deeltjestellingen: presentatie en interpretatie 23

4.1 Deeltjesconcentraties 23

4.2 Korrelgrootteverdeling 26

4.3 Pareto verdeling 27

5 Putschakelen 31

5.1 Hypothese over putschakelen en verwijderen deeltjes 31

© Kiwa N.V.

5.2 De massabalans in relatie tot putverstopping 33

5.3 Factoren die de deeltjesverwijdering bepalen 34

5.3.1 Schakelfrequentie 34
5.3.2 Volumestroom van de onttrekking 35
5.3.3 Invloed aquifer 36

6 Strategie beheersing Putverstopping 37

7 Conclusies en aanbevelingen 41

Literatuur 43

I Handleiding deeltjestellingen 45

II Brochure PAMAS Waterviewer 49

III Artikel H2O Putschakelen en verstopping 51

IV Artikel H2O Betrouwbare deeltjestellingen 53

© Kiwa N.V.

1 Inleiding

Hét grote probleem bij grondwateronttrekking is de verstopping van pompputten, en dan vooral de mechanische verstopping. Deze verstopping treedt op bij de boorgatwand (is de overgang van het bodemmateriaal en de omstorting) en wordt veroorzaakt doordat deeltjes, die van nature in het grondwater aanwezig zijn, op de boorgatwand achterblijven en de poriën verstoppen.
Dit probleem veroorzaakt jaarlijks hoge kosten voor regeneratie van de pompputten en afschrijvingstermijnen die korter zijn dan bij niet-verstoppende putten.
In het kader van het BTO, maar ook daarbuiten is door de waterbedrijven en Kiwa in samenwerking met andere instituten, de afgelopen jaren veel onderzoek uitgevoerd om tot een praktisch toepasbare oplossing te komen. Dat onderzoek heeft voor een doorbraak gezorgd in het inzicht in de oorzaak van die putverstopping en voor een hypothese hoe die verstopping te voorkómen dan wel te minimaliseren is.

In de afgelopen jaren zijn op meer dan 100 putten deeltjestellingen uitgevoerd aan het onttrokken grondwater. De resultaten van deze tellingen zijn altijd op zich zelf staand geëvalueerd en geïnterpreteerd. Tot nu toe zijn nog niet de resultaten van alle metingen bij elkaar gevoegd en als totaal geëvalueerd en geïnterpreteerd. Wel zijn de metinen die tot 2003 zijn uitgevoerd nog eens een keer opnieuw bekeken, met in het achterhoofd de huidige inzichten in deeltjes en deeltjestellingen (Van Beek, 2005). In de (internationale) literatuur is tot op heden nagenoeg niets gepubliceerd over deeltjes in grondwater. Er zijn wel enkele publicaties over de aanwezigheid van colloïden in grondwater (Ryan and Gschwend, 1994, 1992, 1990; Ryan and Elimelech, 1996).
De deeltjestellingen in de beginjaren (1998-2003) vertonen daarom alle kenmerken van een eerste verkenning: we wisten niet wanneer een telling correct was uitgevoerd, en niet wat we allemaal met de resultaten konden doen. Hierdoor zijn de resultaten van de metingen steeds op zichzelf bekeken. Inmiddels hebben we meer dan 100 putten doorgemeten en is het duidelijk dat deeltjes de oorzaak van verstopping zijn. Daarnaast is duidelijk dat ook het onttrokken grondwater van *niet*-verstoppende putten ook deeltjes bevat. Het afgelopen jaar is veel aandacht besteedt aan het ontwikkelen van een geschikte methode en techniek om aan de hand van deeltjestellingen inzicht te krijgen in het verstoppende karakter van een put. De werkwijze van deeltjestellingen is al vastgelegd door Jeroen Prins (Prins, 2003), waardoor onderling vergelijkbare resultaten worden verkregen.

In het voorliggende rapport geven we de huidige (medio 2005) stand van zaken weer van het onderzoek naar de aanwezigheid van deeltjes in grondwater, de deeltjesmetingen, etc. In de afgelopen jaren is in gesprekken, presentaties en korte notities het gedachtegoed rondom deeltjes in grondwater in relatie tot putverstopping bekend gemaakt. Achteraf kunnen we zien dat zich daarin ook een sterke ontwikkeling heeft voorgedaan. Door de wisselwerking tussen theoretische voortgang en praktijkinzichten is de relatie tussen putverstopping en deeltjes in grondwater steeds verder uitgekristalliseerd. Op dit moment hebben we de indruk dat de inzichten zich niet meer zo sterk zullen wijzigen als in de afgelopen 2 jaar. We richten ons nu vooral op de praktische uitwerking van die inzichten, die moet resulteren in een bruikbare handleiding voor de putbeheerders.
Deze uitwerking zal nog wel de nodige tijd in beslag nemen omdat zich allerlei praktische problemen voordoen die we nu nog niet kunnen voorzien. Van groot belang

is dat waterleidingbedrijven, en eventueel andere grondwateronttrekkers, bereid zijn experimenten uit te voeren om de hypothese en de daarop gebaseerde bedrijfsvoeringsadviezen te toetsen. De eerste experimenten bij enkele waterbedrijven lijken veelbelovend.

Om die experimenten te 'begeleiden' leek het goed om de achterliggende theorie toegankelijk te maken voor de waterleidingbedrijven en andere belangstellenden. In het voorliggende rapport gaan we in op de relatie tussen deeltjes in het grondwater en putverstopping (hoofdstuk 2), op deeltjestellers (hoofdstuk 3), en op de mogelijkheden van het weergeven en interpreteren van de meetresultaten (hoofdstuk 4).
In de hoofdstukken 5 en 6 gaan we in op de mogelijkheid om putverstopping te voorkómen of te minimaliseren door gebruik te maken van het putschakelen.

2 Deeltjes in grondwater en putverstopping

Het belangrijkste putverstoppingsprobleem in Nederland is onlosmakelijk verbonden met het voorkomen van zwevend materiaal, ofwel deeltjes. Nabij de oorspronkelijke boorgatwand hopen deeltjes zich op in de poriën, waardoor de doorstroming verslechtert. Om het mechanische verstoppingproces goed te kunnen begrijpen is het uiteraard vereist om meer te weten over de eigenschappen, omstandigheden en afzettingsprocessen van deeltjes aanwezig in grondwater. De belangrijkste vragen die we willen beantwoorden zijn:

1) Wat verstaan we onder deeltjes?
2) Hoeveel deeltjes zijn er?
3) Hoe groot zijn de deeltjes?
4) Waar komen de deeltjes vandaan?
5) Wat is de samenstelling van deeltjes?
6) Welke processen zorgen dat de deeltjes met het grondwater meestromen en de boorgatwand verstoppen?

Als eerste is in de literatuur gezocht naar antwoorden op deze vragen en zijn daarna deeltjestellingen uitgevoerd om de eigenschappen van de deeltjes in het veld te meten.

In dit hoofdstuk wordt een kort overzicht gegeven van de informatie die verkregen is uit de literatuur. Verder wordt de hypothese van mechanische putverstopping gemotiveerd en gevalideerd door middel van verkregen data uit het veld. De deeltjestellingen en de resultaten daarvan worden niet besproken in dit hoofdstuk.

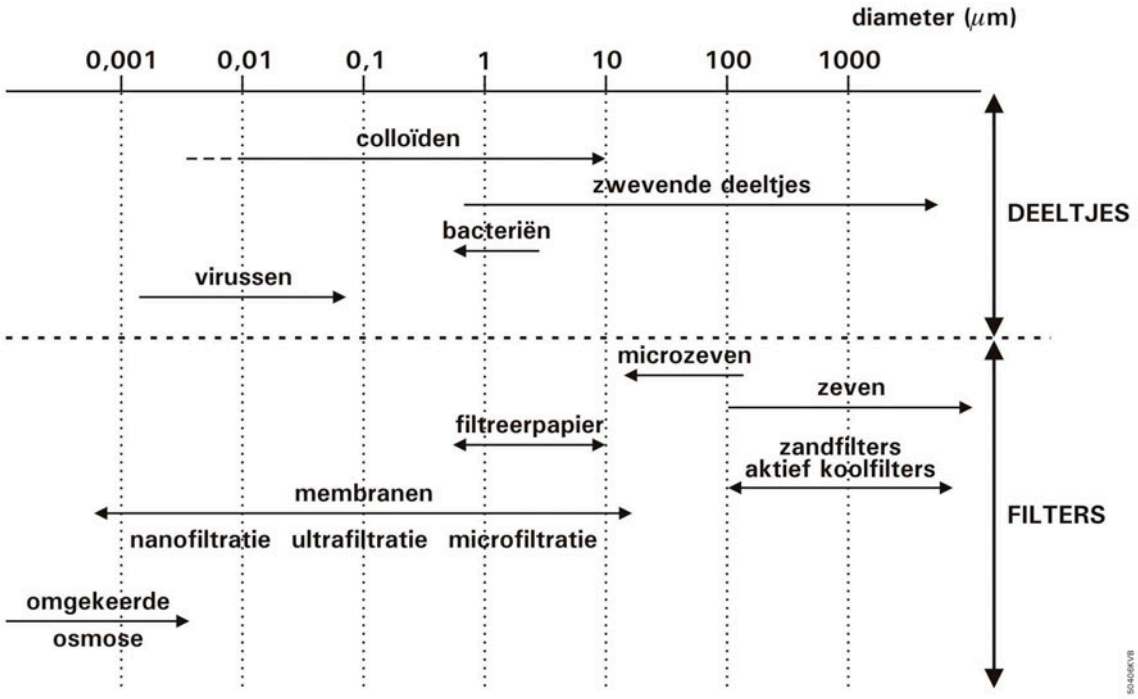
2.1 Belang van deeltjesonderzoek

Informatie over de aanwezigheid van zwevend materiaal in (onttrokken) grondwater is van belang vanwege het optreden van (mechanische) putverstopping. Dit betreft niet alleen pompputten van de waterleidingbedrijven, maar ook putten gebruikt voor industriële en landbouwkundige doeleinden, voor koude-warmte-opslag en voor bemalingwerken. Om het belang voor dit laatste aan te geven hoeft alleen maar te worden verwezen naar de spectaculaire verstopping van de bemaling voor het ondergrondse tramtunneltracé in Den Haag, en de daaruit voortvloeiende overstroming (GeoDelft, 2001). Daarnaast bestaat momenteel een streven om via membraanfiltratie direct drinkwater uit grondwater te bereiden. Zwevend materiaal dat aanwezig is in het onttrokken grondwater zal tot een extra belasting van de membranen leiden.

Naast het belang van zwevend materiaal bij het optreden van verstopping wordt in de internationale wetenschappelijke literatuur veel aandacht besteed aan de rol van zwevend materiaal als drager voor verontreinigingen. Verontreinigingen kunnen aan zwevend materiaal adsorberen, waardoor deze verontreinigingen in de bodem geheel andere transporteigenschappen krijgen. Zo kunnen verontreinigingen geadsorbeerd aan zwevend materiaal veel verder in de bodem worden getransporteerd dan in niet geadsorbeerde toestand. Dit betreft in het bijzonder radioactieve stoffen en bestrijdingsmiddelen (en andere complexe organische stoffen). In het bijzonder voor diepe opslag van radioactieve verontreinigingen wordt onderzoek uitgevoerd naar de rol van zwevend materiaal bij de verspreiding door zwevend materiaal (van der Weerd et al., 1998, McCarthy en Degueldre, 1993, Enfield en Bengtson , 1988).

2.2 Classificatie op basis van korrelgrootte (zwevend materiaal)

De classificatie van deeltjes (zwevend materiaal) is gebaseerd op korrelgrootte. Er bestaat geen universele indeling, verschillende auteurs houden verschillende indelingen aan. Figuur 1 geeft als voorbeeld de indeling van Stumm (1977) met de diameter voor verschillende materialen. De korrelgrootte van mobiele deeltjes in grondwater varieert in diameter tussen circa 1 en 100 µm.
Voor de huidige praktijk is volgens figuur 1 sprake van grote colloïden of van fijn zwevend materiaal.



Figuur 1 Classificatie van deeltjes op basis van diameter en van filtermateriaal op basis van poriediameter, gewijzigd naar Stumm (1977).

De bovengrens wordt gesteld door de natuur: de grofte van de formatie bepaalt de maximale diameter van de deeltjes die kunnen passeren. Bepalend is de doorsnede van de poriën waar de deeltjes doorheen stromen. De dichtste bolstapeling kan worden weergegeven door drie rakende cirkels. Uitgaande van een korrelgrootte van het pakket van 500 µm bedraagt de diameter van de ingeschreven cirkel 70 µm. Dit is theoretisch de maximale diameter. In de praktijk houden we rekening met een factor 2 à 3, zodat de maximale diameter van het zwevend materiaal in de orde van 20 à 40 µm ligt. In meer fijnzandige sedimenten zal de maximale diameter wat kleiner zijn, in grove sedimenten wat groter.

De ondergrens wordt beperkt door het meetbereik van de bestaande meetapparatuur. De ondergrens van de gebruikte deeltjestellers (zie hoofdstuk 3) is momenteel 2 µm. Vanuit de literatuur is gegeven dat er ook veel deeltjes beneden de 2 µm voorkomen in grondwater. Er bestaan meer geavanceerde tellers met een ondergrens van 0,5 µm om ook de kleinste deeltjes te tellen. Deze zijn tot op heden in het putverstoppingsonderzoek niet toegepast.

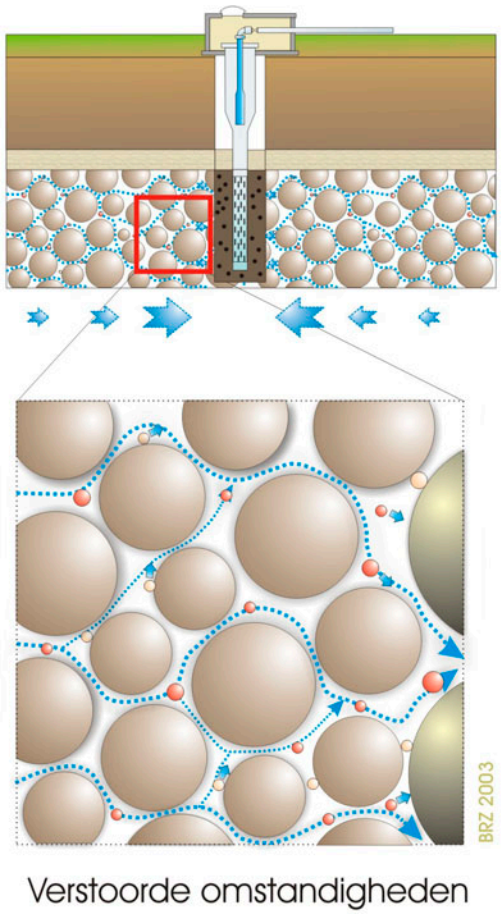
Voor de huidige praktijk betekent het dat het gemeten korrelgrootte-interval ligt tussen 2 en circa 40 µm.

2.3 Hoeveelheid deeltjes in het grondwater

Het aantal deeltjes wordt weergegeven als aantal deeltjes per volume-eenheid [n/ml]. Deze 'concentratie' is gedurende de stroming niet constant, dit in tegenstelling tot stoffen die echt opgelost zijn zoals chloride. Deeltjes zijn niet opgelost maar als "suspensie" aanwezig, en hebben een significante massa en grootte. Doordat deeltjes in een fysieke vorm aanwezig zijn, bepalen interactie met de bodemmatrix (fysisch-chemische krachten) en "sleepkracht" van het langsstromende water (hydrodynamische krachten) in belangrijke mate de concentratie van deeltjes in suspensie. De belangrijkste invloedsfactoren op de concentratie zijn pH, oppervlakte lading, chemische samenstelling van het grondwater en de stroomsnelheid.

2.4 Mechanische putverstopping en deeltjes

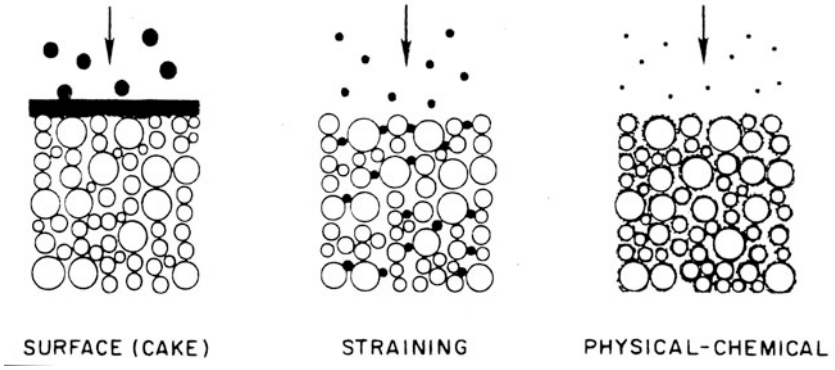
Wanneer van mechanische putverstopping wordt gesproken, zijn de deeltjes automatisch betrokken. De term mechanische putverstopping is namelijk afgeleid van het fysiek vastlopen van deeltjes in de poriën. Voornamelijk mechanische (hydrodynamische) krachten veroorzaken het vastlopen van deeltjes, een proces dat los staat van chemische en microbiologische processen. De plek van vastlopen ligt (altijd) dicht bij de boorgatwand, dus er wordt ook wel gesproken van boorgatwand verstopping. Figuur 2 illustreert een schematische weergave van een pompput in een watervoerend pakket met deeltjes in suspensie in het grondwater. Het rode vierkant geeft de locatie van verstopping aan.



Figuur 2 Schematische weergave van een pompput in een watervoerend pakker met deeltjes. Door het aanzetten van de onderwaterpomp worden de deeltjes naar de put toegetrokken en afgevangen bij de boorgatwand.

2.4.1 *Filtratie processen*

Deeltjes kunnen door verschillende processen vastlopen in het watervoerend pakket. Gebaseerd op de grootte van het deeltje ten opzichte van de poriegrootte heeft McDowell-Boyer deze processen beschreven. Figuur 3 visualiseert deze processen:
1) **Oppervlakte filtratie**. Deeltjes zijn groter dan de poriën, waardoor alle deeltjes afgefilterd worden en een cake (dikke laag deeltjes) wordt opgebouwd. Een goed voorbeeld van dit type filtratie is het infiltreren van een boorspoeling waarbij de boorgatwand wordt afgedicht.
2) **Interne filtratie**. Wanneer deeltjes iets kleiner zijn dan de gemiddelde poriegrootte zullen de deeltjes mobiel zijn in het zandpakket en "vastlopen" in het pakket.
3) **Fysisch-chemische filtratie.** Wanneer deeltjes veel kleiner zijn dan de gemiddelde poriegrootte worden deeltjes alleen vastgehouden door chemische en elektrostatische krachten, deze krachten spelen een grote rol wanneer deeltjes erg klein zijn.



Figuur 3 De drie filtratie mechanismen volgens McDowell-Boyer.

De eerste twee filtratiemechanismen spelen een rol bij het veroorzaken van mechanische putverstopping.

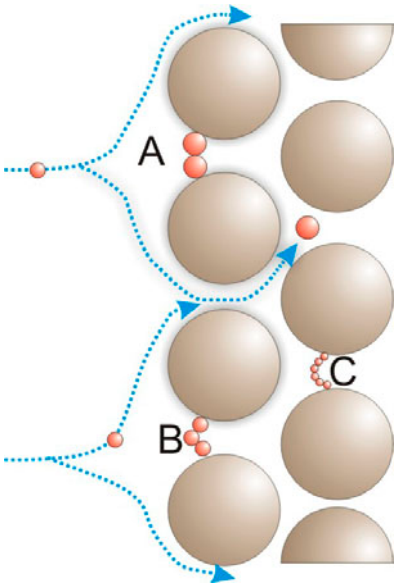
2.4.2 *Verstoppingsoorzaak 1 (initieel)*

Putverstopping door deeltjes wordt al geïnitieerd tijdens de aanleg van een pompput. Tijdens het boren van een put wordt altijd boorvloeistof (spoeling) gebruikt, bestaande uit water met of zonder additionele componenten (bijvoorbeeld CMC of bentoniet of materiaal afkomstig uit bovenliggende lagen). De functie van de spoeling is om het watervoerende pakket af te dichten, het boorgat open te houden en te zorgen dat er nauwelijks spoeling verloren wordt in het watervoerend pakket. De spoeling met toegevoegde componenten vormt een filtercake op de formatie (Oppervlakte filtratie, zie figuur 3) . Echter na het inbouwen van de put moet deze spoeling verwijderd worden zodat het water de put in kan stromen. De huidige praktijk van putontwikkeling is zodanig dat niet in alle gevallen de boorvloeistof helemaal wordt verwijderd, hoewel dat wel mogelijk zou zijn bij een meer uitgebreide ontwikkeling. Het zorgt voor een zone waarin een gedeelte van de poriën al slecht toegankelijk zijn en waarin de deeltjes sneller zullen worden afgevangen.

2.4.3 *Verstoppingsoorzaak 2 (brugvorming)*

Naast de filterende werking van de boorgatwand door spoelingsresten, worden deeltjes door een ander mechanisme afgevangen, namelijk het vormen van bruggen in de nauwe poriën. Het vormen van de bruggen zal toenemen naarmate deeltjes dichter bij de boorgatwand komen. Door de radiale geometrie van een put stroomt het grondwater steeds sneller richting de put, waardoor de deeltjesbelasting dicht bij de

put steeds groter wordt. Bruggen kunnen worden gevormd wanneer twee of meer deeltjes tegelijkertijd door een porie willen stromen en daardoor vastlopen. In figuur 4 wordt dit schematisch weergegeven.



Figuur 4 Drie varianten van brugvorming. A geeft de situatie weer waarin 2 deeltjes een porie blokkeren, bij B en C zijn bruggen die bestaan uit meerdere deeltjes.

Het vormen van bruggen kan vergeleken worden met de doorstroming van verkeer op een rotonde. Op drukke momenten van de dag gaat het verkeer langzamer rijden wanneer een rotonde dichterbij komt. Dicht bij de rotonde staat het verkeer stil omdat het zo druk op de rotonde is dat er geen goede doorstroom meer mogelijk is. Het verkeer hoopt zich op en verstopt de rotonde. Dit proces vindt ook plaats beneden in de put nabij de boorgatwand. Waar zoals bij het "rotonde"-effect verkeersdrukte, snelheid en de grootte (enkel of dubbel) een rol spelen voor de doorstroom, zijn er enkele factoren, die een rol spelen bij het vormen van de bruggen:

1) Hoeveelheid deeltjes (concentratie).
2) Stroomsnelheid (aanvoer).
3) Aspect ratio (grootte van de deeltjes in relatie tot de poriegrootte, bepaald door het watervoerende pakket).
4) Het soort deeltje (vorm, lading, vervormbaarheid).
5) Stroom geometrie (radiale stroming of lineaire stroming).

Afhankelijk van deze factoren treedt brugvorming (putverstopping) wel of niet op. Daarnaast speelt ook de mate van verbreken van de deeltjesbruggen door putschakelen en regeneratie mee aan het wel of niet verstoppen.

2.5 Ondersteuning vanuit de praktijk: Steekmonsters

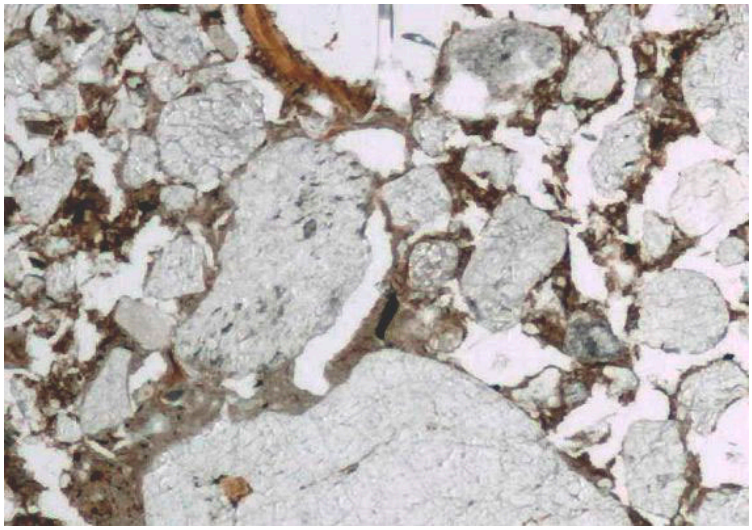
Naast de grootte van de deeltjes is het ook van belang te weten waaruit de deeltjes bestaan. Micromorfologisch onderzoek is uitgevoerd op twee verstoppende pompputten te Rodenhuis (Zuid-Holland) en Noardbergum (Friesland). In aanvulling op dit onderzoek is microscopisch onderzoek uitgevoerd door de Universiteit Utrecht. Het doel van het onderzoek is de aard, de distributie en herkomst van het verstoppingmateriaal te bepalen en te visualiseren, zodat meer inzicht wordt verkregen in het verstoppingproces. Hiervoor zijn ongestoorde sediment monsters op

verschillende diepten naast de putwand gemonsterd en bestudeert met en stereo- en petrografische microscoop (Jongmans, 2004).

Voor de beide pompputten betrof het een destructief onderzoek (de putten waren na het onderzoek niet meer bruikbaar). Allereerst werden ze uitgeboord tot aan de boorgatwand, waarna op de diepte van het (voormalige) onttrekkingsfilter meerdere horizontale steekmonsters zijn genomen met speciaal hiervoor ontwikkelde apparatuur. Voorafgaand aan het microscopisch onderzoek zijn aan de putkop door middel van filtratie monsters genomen van het zwevend materiaal.

2.5.1 Puttenveld Rodenhuis, Bergambacht (Hydron Zuid-Holland)

In 1999 zijn voor het eerst horizontale steekmonsters genomen van een verstopte boorgatwand op het puttenveld Rodenhuis te Bergambacht door Hydron Zuid-Holland (Timmer et al., 2003 & 2000). Deze pompput was gelegen in het rivierengebied en was ter plaatse van de boorgatwand verstopt. De steekmonsters zijn vervolgens geprepareerd voor micromorfologisch onderzoek met behulp van slijpplaatjes. Uit dit micromorfologisch onderzoek bleek dat de verstopping werd veroorzaakt door accumulatie van zwevend materiaal. Dit materiaal bestaat voornamelijk uit organisch materiaal, kleideeltjes en kalk met een diameter van 1 µm tot 20 µm, waarvan de fijne fractie het meeste voor komt (zie figuur 5). Het resultaat van het micromorfologisch onderzoek was dat het zwevende materiaal van nature afkomstig is uit het watervoerend pakket. Het geaccumuleerde materiaal werd binnen een straal van 10 centimeter vanaf de boorgatwand gevonden. Daarnaast zijn geen aanwijzingen gevonden voor chemische of bacteriologische verstopping. Dit onderzoek gaf als eerste bewijs voor de accumulatie van deeltjes nabij de boorgatwand.

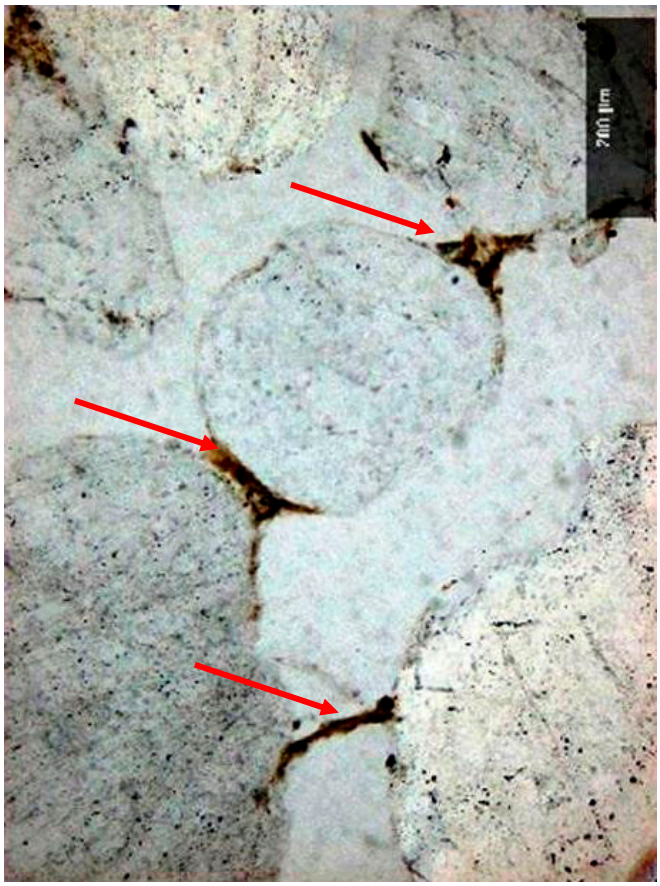


Figuur 5 Een slijpplaatje van het watervoerende pakket nabij de boorgatwand van de verstopte put in Rodenhuis. De grote korrels zijn kwartskorrels en het donkere materiaal is het geaccumuleerde zwevende materiaal.

2.5.2 Puttenveld Ritskebos, Noardbergum (Vitens Friesland)

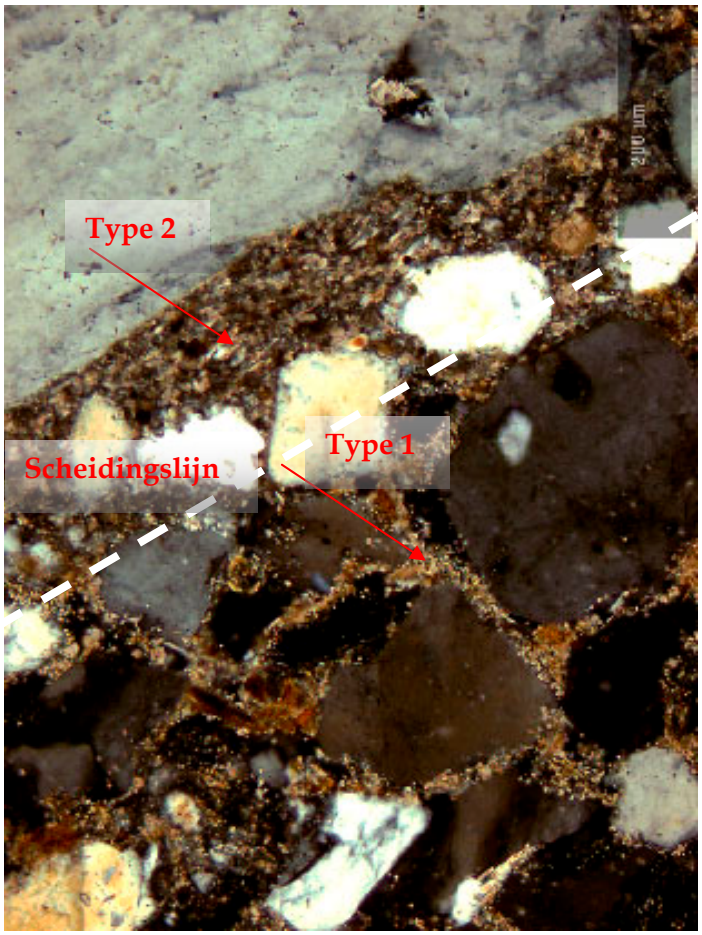
In het voorjaar van 2004 is op het puttenveld Ritskebos put 50A uitgeboord en zijn ongestoorde sedimentmonsters op 4 niveaus (70 m., 73 m., 77 m. en 80 m) direct naast de putwand in horizontale richting in het filtertraject genomen. Ook in de put in Friesland werd geaccumuleerd materiaal in de porieruimte gevonden. Het materiaal was hier tussen de 1 en < 20 µm groot, bestaande uit brokjes primair calciet en

secundair $CaCO_3$. Tevens werd in de fijnere fractie klei waargenomen. Ook werden hier een geringe (<2%) hoeveelheid pyriet framboiden (10-30 µm) regelmatig verspreid in de grondmassa waargenomen. Dicht bij de boorgatwand zijn de meeste poriën volledig gevuld met het zwevende materiaal, echter wat verder van de boorgatwand vandaan (5 cm) werden deeltjes als bruggen in de nauwe poriehalzen aangetroffen (figuur 6).



Figuur 6 Een slijpplaat van het watervoerende pakket op ongeveer 5 cm van de boorgatwand. Hier is goed te zien dat de accumulatie van deeltjes in eerst instantie in de nauwe poriehalzen plaatsvindt (rode pijlen).

Er worden twee types afzetting onderscheiden. Type 2 wordt gerelateerd aan de initiële verstopping (paragraaf 2.4.2) . Type 1 wordt gerelateerd aan brugvorming (paragraaf 2.4.3).
Op de slijpplaatjes gemaakt van het pakket dicht bij de boorgatwand zijn beide typen aangetroffen. Type 2 heeft meer pyriet framboiden, veel kwartskorreltjes, minder tot geen kalkdeeltjes en bevat georiënteerde mica's in vergelijking tot type 1. Ook is de pakking van type 2 dichter. Type 1 bevat veel meer kalkdeeltjes en ligt in de sediment grondmassa tegen type 2 aan (Figuur 7). Hieruit kan geconcludeerd worden dat type 1 jonger is dan type 2**.** Type 2 ligt weer tegen zeer grote kwartskorrels aan (1.5 mm), zeer waarschijnlijk afkomstig uit de omstorting.



Figuur 7 Een slijpplaatje van het watervoerende pakket nabij de boorgatwand.

2.5.3 *Bemonsteren van onttrokken grondwater*

In aanvulling op het steekmonster-onderzoek en uitgevoerde deeltjestellingen is op beide locaties (Rodenhuis en Noardbergum) onttrokken grondwater aan de putkop afgefilterd (Tapias, 2005). Het doel van het onderzoek is om de aard, grootte en vorm van de deeltjes te bepalen. Daarnaast om te verifiëren of de deeltjes die meegevoerd worden met het onttrokken water dezelfde deeltjes zijn als aangetroffen in de steekmonsters.

De SEM analyse van de monsters toonde aan dat hetzelfde materiaal dat onderin de put op de boorgatwand werd aangetroffen ook in het ontrokken grondwater wordt gevonden. Dit betekent dat er niet één type deeltje wordt afgevangen, maar een gedeelte van de totale aanvoer. Verder komen de grootte en vorm van de deeltjes overeen met de resultaten van de steekmonsters.

3 Deeltjestellingen

In hoofdstuk 2 is duidelijk geworden dat inzicht in deeltjes van groot belang is voor mechanische putverstopping. In dit hoofdstuk gaan we daarom dieper in op het daadwerkelijk tellen van die deeltjes.

3.1 Drie mogelijkheden voor de bepaling van de deeltjeshoeveelheden

Normaliter bevat onttrokken grondwater op het oog geen vast materiaal, zodat we kunnen stellen dat voor de meting van deeltjes gevoelige apparatuur noodzakelijk is. Voor het meten staan verschillende mogelijkheden ter beschikking, namelijk de troebelheidmeter, MFI-apparatuur en deeltjestellers:

- Troebelheidmeter
  De troebelheid vormt een maat voor de aanwezigheid van materiaal in (grond)water. Echter om de troebelheid te kunnen meten, dient deze een bepaalde maat te overschrijden. In de praktijk blijkt de troebelheid van onttrokken grondwater te gering om met succes een troebelheidmeter te kunnen inzetten.
- MFI
  Bij de MFI meting wordt water met een constante volumestroom onder druk door een 0,45 µm filter geleid. Materiaal groter dan 0,45 µm aanwezig in het water blijft op het filter achter, waardoor de druk over het filter toeneemt. Het verloop in de tijd van de toename van de druk geeft een indruk van de hoeveelheid materiaal aanwezig in het water. Hoe minder materiaal in het water aanwezig is, des te langer de meting duurt.
- Deeltjestellers
  Er bestaan verschillende typen deeltjestellers: tellers gebaseerd op blokkering van licht, gebaseerd op verstrooiing van licht en laser geïnduceerde explosies. Voor het tellen van lage concentratie deeltjes en van deeltjes met kleine diameter blijken deeltjestellers geschikt.

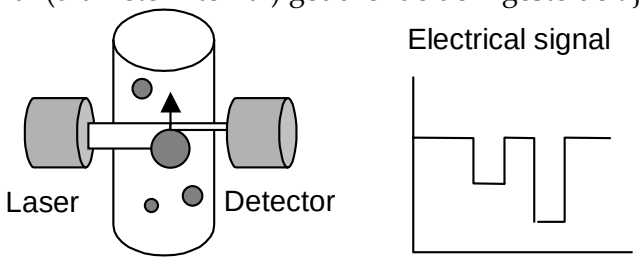
Nadeel van de troebelheidmeter en de MFI-apparatuur is dat zij geen deeltjes tellen, maar indirecte methoden zijn, die bovendien voor deeltjestellingen erg ongevoelig zijn. De deeltjesteller is een (meer) directe methode en geschikt voor metingen aan grondwater.

3.2 Deeltjestellingen gebaseerd op lichtblokkade

In het onderzoek naar putverstopping is gebruik gemaakt van deeltjestellers. Een deeltjesteller meet continu het aantal deeltjes en de bijbehorende diameter.
Er bestaan verschillende typen deeltjestellers: tellers gebaseerd op blokkering van licht, gebaseerd op verstrooiing van licht en gebaseerd op laser geïnduceerde explosies. Voor deeltjes in grondwater blijkt de lichtblokkade methode geschikt. Bovendien was bij Kiwa een teller aanwezig die gebaseerd is op dit principe (de 'Met One online').

Bij de lichtblokkade methode wordt het te onderzoeken water met een constante volumestroom door een cuvet geleid (zie figuur 8). Dit cuvet wordt doorschenen met een laserstraal, die op de tegenoverliggende lichtgevoelige cel (detector) een elektrische stroom (electrical signal, puls) genereert. Als een deeltje in het water passeert blokkeert het deeltje een gedeelte van de laserstraal. De detector ontvangt maar een gedeelte van de laserstraal waardoor het signaal veranderd met als gevolg dat de sensor een kleinere puls afgeeft. Met behulp van de bijgeleverde software worden uit deze

pulsveranderingen (schaduwen) aantallen en grootte van de deeltjes berekend. Het uiteindelijke meetresultaat is de gemiddelde concentratie (aantal deeltjes per ml) per korrelgrootteinterval (diameterinterval) gedurende de ingestelde tijdsduur.



Figuur 8 Schematische weergave van het meetprincipe van de deeltjestellers.

Beperkingen

Hoewel de lichtblokkade-methode geschikt is voor deeltjestellingen in grondwater kent de methode ook enkele beperkingen:

- *Transparantie en vorm van deeltjes beïnvloeden de meting.*
  De deeltjesteller wordt geijkt met behulp van een vloeistof met daarin opgenomen een hoeveelheid gefabriceerde ondoorzichtige bolvormige latex bolletjes met exact bekende diameters en aantallen per ml. Natuurlijke materialen in grondwater kunnen echter ook half doorzichtig en/of onregelmatig van vorm zijn (organisch materiaal en verschillende mineralen). Bovendien speelt bij afwijkende vormen de positie in de laserstraal een rol: zo kan een plaatje voor een naald worden aangezien, en een naald voor een bol. Afwijkingen in transparantie en vorm zullen dus het resultaat van de meting beïnvloeden. Het is ons momenteel niet bekend op welke wijze het interne computerprogramma uit de metingen de concentraties en de (equivalent)diameters berekend. Volgens verschillende leveranciers bedraagt deze afwijking niet meer dan enkele procenten (Pamas, PMT en PSS).
- *Bepaling van nauwkeurige absolute concentraties is lastig.*
  Tijdens de meting moet de stroomsnelheid van het door te meten water door het cuvet constant zijn (100 ml/min). De rekenprogrammatuur is afgesteld op deze volumestroom. Een afwijkende volumestroom resulteert in een evenredige afwijking van de gemeten concentratie. Een volumestroom van 110 ml/min resulteert dus in een 10% te hoge concentratie.
  In de praktijk zal altijd enige variatie in stroomsnelheid optreden. Echter tijdens lange metingen wordt een goede indruk van de situatie verkregen.
- *Reproduceerbaarheid en gevoeligheid van de metingen is moeilijk.*
  Zolang de metingen met hetzelfde apparaat onder identieke omstandigheden worden uitgevoerd, zijn de verkregen resultaten onderling goed vergelijkbaar. In de praktijk blijken er storingen op te kunnen treden die de metingen beïnvloeden, bijvoorbeeld trillingen, veroorzaakt door andere apparatuur, zorgen ervoor dat extra deeltjes worden losgemaakt.

3.3 Deeltjestellers en meetprotocol

Rond 1996 (van Beek et al., 1998) zijn de eerste deeltjestellingen in onttrokken grondwater uitgevoerd. Tot dan toe werden binnen de waterleidingbedrijven deeltjestellers ingezet ter controle van de werking van filters en niet bij de onttrekking van grondwater (en bij distributie van drinkwater). Gedurende de periode tot 2003 zijn de deeltjestellingen door verschillende medewerkers met verschillende apparatuur (sensoren) uitgevoerd.

Tijdens een test- en ijkfase (juni 2004) bleek door het in serie meten met twee sensoren,

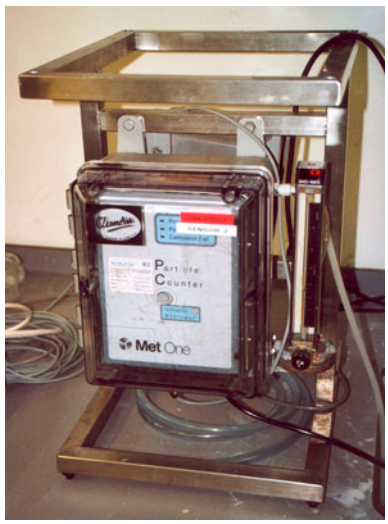
dat beide sensoren een verschil in concentratie van ongeveer 20% vertoonden. Omdat de uitvoering van deeltjestellingen zeer gevoelig is voor verstoringen, moet ook rekening worden gehouden met verschillen in resultaat ten gevolge van de uitvoering van de metingen. Het gevolg hiervan is dat de resultaten zijn behept met een apparaateffect en zeer waarschijnlijk ook met een laboranteffect. De resultaten van de metingen vertonen daardoor een grote spreiding.

Om in de toekomst deze meetverschillen te minimaliseren is een standaard meetmethode voor deeltjestellingen opgesteld (Prins, 2003). Aan de hand van ervaringen bij de meting, wordt deze handleiding voortdurend aangepast. Deze gedetailleerde meetprocedure is beschreven in bijlage I.

Op basis van de metingen is de wens ontstaan om ook kleinere deeltjes (ondergrens 1 µm) en met meer kanalen deeltjes te kunnen tellen. Voordeel hiervan is dat we kleinere deeltjes ook kunnen tellen en de fractieverdeling over de meetrange (1-100 µm) gelijkelijk kunnen verdelen. Een inventarisatie van bestaande deeltjestellers is uitgevoerd. Kiwa heeft in mei 2005 besloten twee Pamas Waterviewers aan te schaffen, die vanaf 1 juli 2005 worden gebruikt voor alle deeltjestellingen aan pompputten.

3.3.1 Deeltjesteller Met One (in gebruik t/m juni 2005)

De deeltjestellers waarmee het onderzoek in dit rapport zijn uitgevoerd zijn de 'Met One online deeltjestellers' van het type PCX (Particle Counting X-ray) (zie figuur 9).



Figuur 9 Foto van de deeltjesteller Met One, die gebruikt is bij het onderzoek

Deze teller kan deeltjes detecteren vanaf 2 tot en met 750 µm in zes vrij te kiezen korrelgrootte klassen. Omdat in grondwater de kleinere deeltjes in grotere aantallen voorkomen is gekozen voor klasse-grenzen die daarbij aansluiten. De intervallen voor de kleinere diameters zijn kleiner dan die voor de grotere diameters: 2-3; 3-5; 5-7; 7-10; 10-15 en > 15 µm.

Ook de duur van de meting kan zelf worden gekozen. In de praktijk wordt vaak 60 seconden aangehouden, en enkele keren 30 seconden. Van deze tijd is 12 seconden nodig voor de berekening van de gemiddelde concentratie per grootteklasse, waardoor de zuivere meettijd respectievelijk 48 en 18 seconden bedraagt.

Meting over een korte periode resulteert in een groot oplossend vermogen: het is op deze wijze mogelijk kortdurende verstoringen in concentratie waar te nemen. Nadeel is dat het signaal minder stabiel is, maar het is natuurlijk mogelijk resultaten van metingen gedurende 1 minuut samen te voegen tot metingen van 2, 3 of meer minuten. Ten gevolge van deze middeling zullen kortdurende verstoringen worden weggemiddeld, en ontstaat een veel stabieler signaal.

Het belangrijke voordeel van deze teller is dat het geschikt is om langdurig on-line te meten in het veld, en dat een acceptabele nauwkeurigheid is te verkrijgen.

3.3.2 Deeltjesteller Pamas Waterviewer (in gebruik vanaf juli 2005)

De Pamas Waterviewer kan deeltjes detecteren vanaf 1 tot en met 200 µm in acht vrij te kiezen korrelgrootte klassen. Omdat in grondwater de kleinere deeltjes in grotere aantallen voorkomen is het nu ook mogelijk om de kleinste deeltjes te tellen.
Voor de tellingen wordt 25 ml grondwater/min gebruikt, hierbij wordt gebruik gemaakt van een flowcontroller zodat precies 25 ml/min wordt afgetapt.
Met de PAMAS Waterviewer is het mogelijk om een gedetaillerder inzicht te krijgen in de verdeling van deeltjes die verstopping veroorzaken.

Een brochure van de PAMAS Waterviewer is opgenomen in bijlage II.

3.4 Verstoringen van de tellingen

Voor de juiste interpretatie van de meetresultaten moet goed bedacht worden wáár de meting precies plaatsvindt. Tot nu toe zijn de meeste metingen uitgevoerd aan het onttrokken grondwater via de monsterkraan op de putkop. Het grondwater is dan achtereenvolgens al gepasseerd: watervoerend pakket, boorgatwand, omstorting, putfilterwand, putfilterbuis, onderwaterpomp, stijgleiding, monsterkraan, monsterslang en tenslotte apparaat. Op al deze onderdelen kunnen deeltjes met de omgeving reageren. Dat betekent dus dat de deeltjestelling níet de deeltjes in het grondwater of de deeltjes op de boorgatwand telt. De volgende ´verstoringen´ kunnen optreden:

1. Deeltjes uit het grondwater blijven achter op de boorgatwand.
2. Deeltjes kunnen ´onderweg´(kraanhuis, aanvoerleidinkje, klep, etc.') ergens blijven ´plakken´.
3. Deeltjes in pomp, stijgbuis of op andere plaatsen (´vuil´) kunnen door trillingen of stoten losraken.
4. Wervelingen bij de onderwaterpomp oefenen invloed uit op het aantal deeltjes. Deeltjes kunnen zowel coaguleren als desintegreren.
5. Het schakelen van de pomp kan vastgelopen deeltjes weer laten loskomen.
6. Gasbellen, van bijvoorbeeld methaan, geven (ten onrechte) meetresultaten, vooral van grotere deeltjes.

Het is tot op heden nog niet mogelijk gebleken deze verstoringen te kwantificeren. De voorlopige indruk bestaat dat circa 25% van de aangevoerde deeltjes op de boorgatwand achterblijft, uiteraard afhankelijk van de verstoppingstoestand. Ook bestaat de indruk dat het verschil in gemeten deeltjes, als deeltjes per ml, tussen een verstopte put en een niet-verstopte put niet zo groot is. Maar omdat het om grote hoeveelheden water gaat (bij 100 m3/uur = 2400 m3/dag = 2,4 miljard ml geeft een verschil van 1 deeltje per ml al een totaalverschil van 2,4 miljard deeltjes) kan toch verstopping optreden.

4 Deeltjestellingen: presentatie en interpretatie

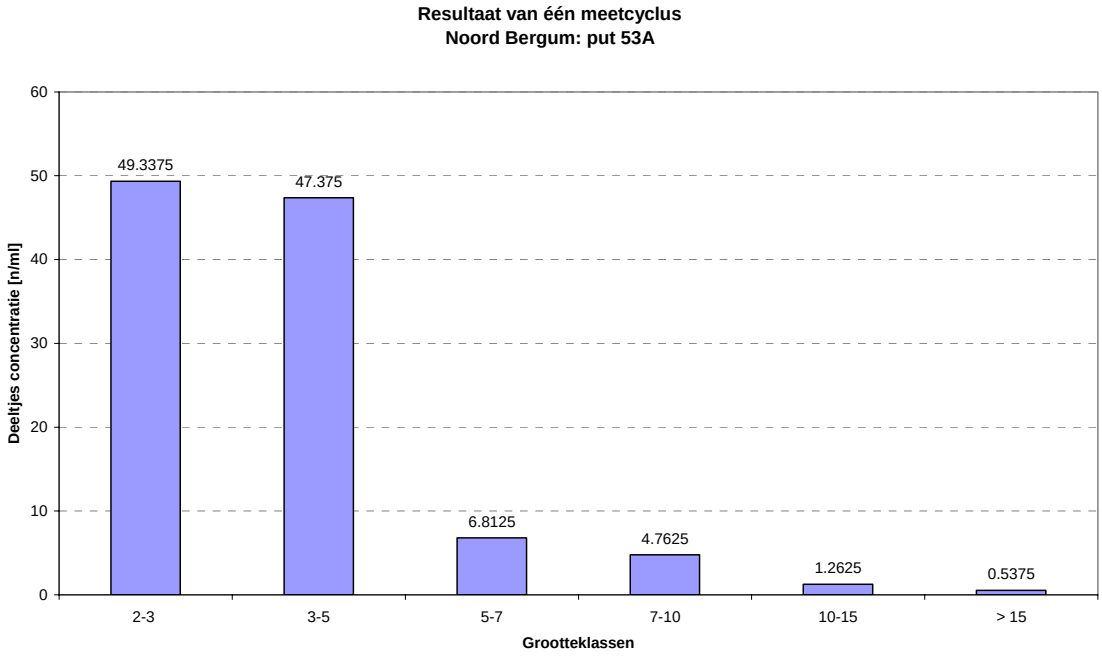
Het meetresultaat van deeltjestellers bestaat uit de aantallen deeltjes per ml in verschillende grootteklassen. Deze kunnen op verschillende manieren worden gepresenteerd, met verschillende interpretatiemogelijkheden.
De volgende drie standaard presentatiemogelijkheden worden in dit hoofdstuk verder uitgewerkt:

- De deeltjesconcentratie, tegen de tijd.
- De korrelgrootteverdeling tegen de tijd.
- De Pareto-helling

Waar mogelijk worden voorbeelden gegeven van de metingen op het pompstation Noordbergum van Vitens Friesland op put 53A op 1 en 2 april 2004 (tijdsaanduiding in de figuren is volgens het schema "mnd-dg-jr": 4-1-04).

4.1 Deeltjesconcentraties

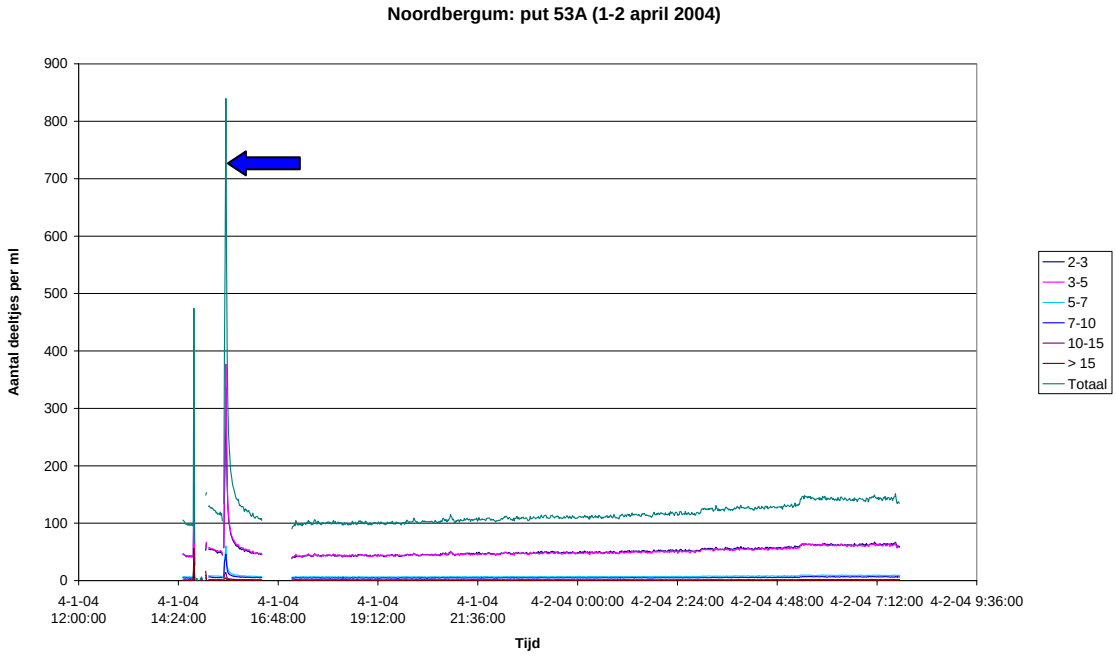
Eén meetcyclus door de deeltjesteller duurt 1 minuut. Het meetresultaat is het aantal deeltjes per ml, onderverdeeld in grootteklassen. Figuur 10 geeft de uitkomst van een willekeurige meetcyclus. Er is een verdeling gemaakt in zes grootteklassen: 2-3; 3-5; 5-7; 7-10; 10-15 en > 15 µm. Er is bijvoorbeeld te zien dat het aantal deeltjes tussen 2-3 µm 49,3 per ml bedraagt, en tussen 7-10 µm 4,7 per ml. Heel duidelijk is dat er voornamelijk kleine deeltjes, kleiner of gelijk aan 5 µm, aanwezig zijn in het onttrokken grondwater.



Figuur 10 Aantal deeltjes per ml voor 6 grootteklassen gedurende één meetcyclus van 1 minuut

Eén volledige deeltjestelling duurt minimaal 8 uur, en bestaat dus uit minimaal 8 x 60 = 480 meetcycly van de deeltjesteller. De volledige telling op put 53A is in figuur 11

weergegeven, en loopt van 1 april 2004 ca 14.30 uur tot 2 april 2004 ca. 7.30 uur, totaal circa 17 uur. Voor elk van de 6 grootteklassen is het verloop van de concentratie gegeven, en de deeltjesconcentratie varieert tussen 0 en 400 deeltjes/ml. Ook is de totale concentratie van de deeltjes in het ontrokken grondwater binnen het meetbereik weergegeven, met een maximum van 850 deeltjes/ml.

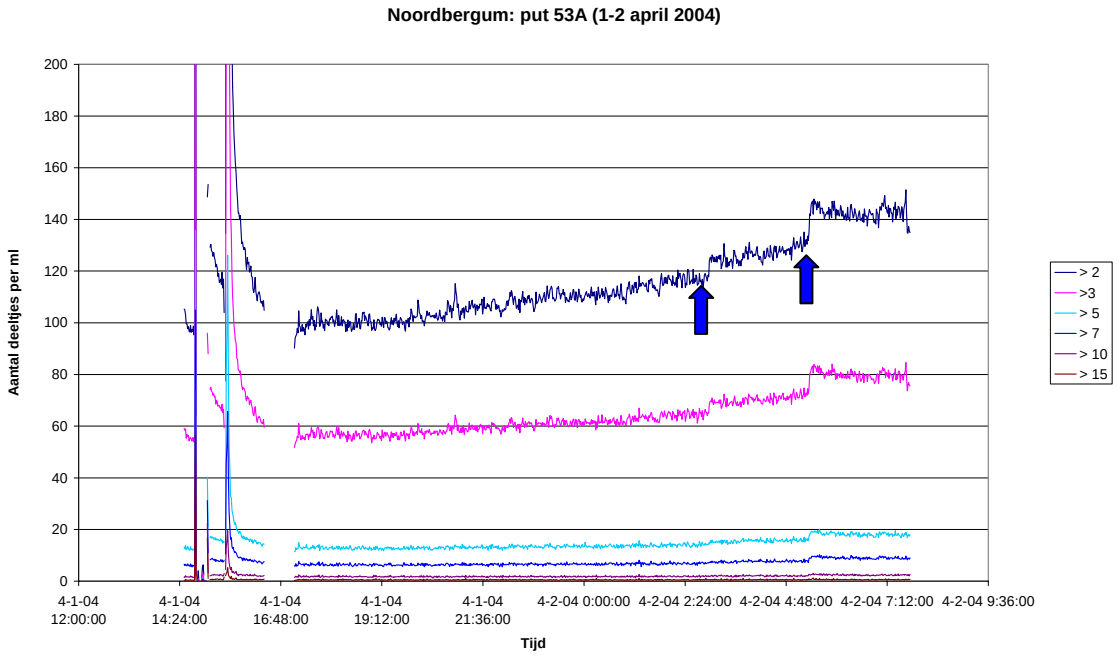


Figuur 11 Verloop van de concentratie van deeltjes in de aangegeven grootteklassen.

De informatie die uit figuur 11 te verkrijgen is is beperkt omdat de verticale as opgerekt wordt door de piek in de meting aangegeven door de pijl in de grafiek. Deze piek wordt veroorzaakt door het uit- en aanuitschakelen van de onderwaterpomp in de put. Hoofdstuk 5 gaat verder in op de effecten van het schakelen van de onderwaterpomp.
Verder is in figuur 11 te zien dat de totaalconcentratie langzaam oploopt. Waarschijnlijk komt dit door een lichte toename van de doorstroomsnelheid van het grondwater door de deeltjesteller, waardoor er per tijdseenheid meer deeltjes worden geteld. De deeltjesteller is 'geijkt' op een doorstroomsnelheid van 100 ml/min.

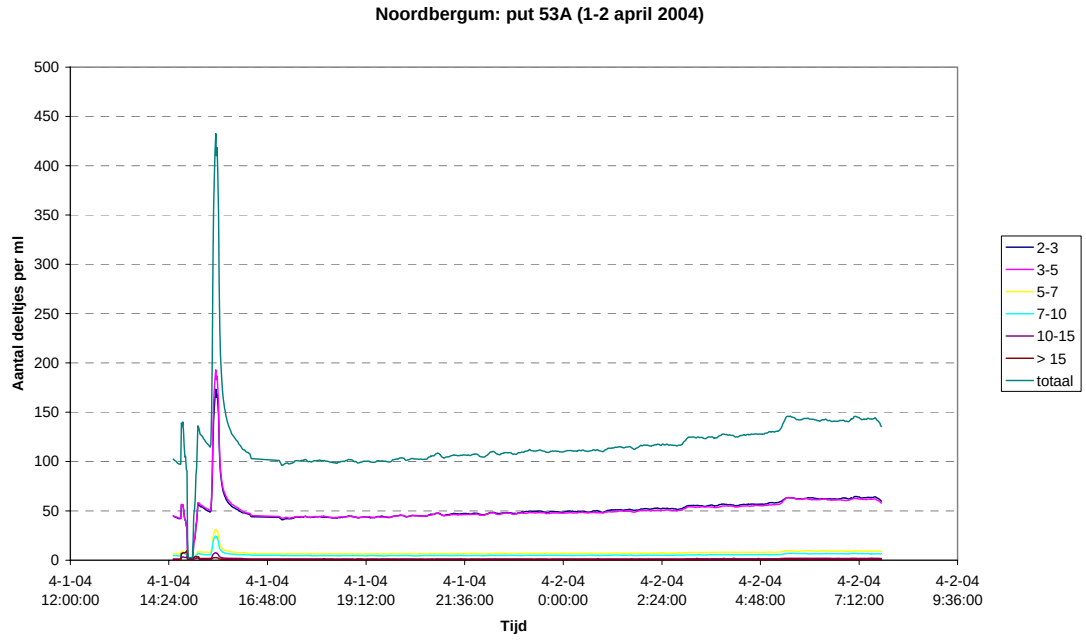
De interpretatie van figuur 11 wordt verder bemoeilijkt doordat de verlopen van de concentraties van 2-3 µm en 3–5 µm samenvallen. Dit kan voorkómen worden door het presenteren van de cumulatieve concentraties, zoals gebeurd is in figuur 12 en het afknotten van de y-as tot een maximum van 200 deeltjes per ml.
De categorie > 2 µm geeft feitelijk de totale concentratie weer, omdat alleen deeltjes groter dan 2 µm zijn gemeten. Het verschil tussen de bovenste en de daaropvolgende lijn (> 3 µm) is het aantal deeltjes tussen 2-3 µm.

Duidelijk is te zien dat de totale deeltjesconcentratie toeneemt van 100 tot meer dan 140/ml. Ook zijn twee sprongen in de meting (aangegeven door de pijlen) te zien welke voortkomen uit beïnvloeding van andere putten die aan- en uitschakelen. De laatste uren van de meting laten een stationaire waarde zien.



Figuur 12 Resultaten van de deeltjestelling waarin de resultaten cumulatief zijn uitgezet.

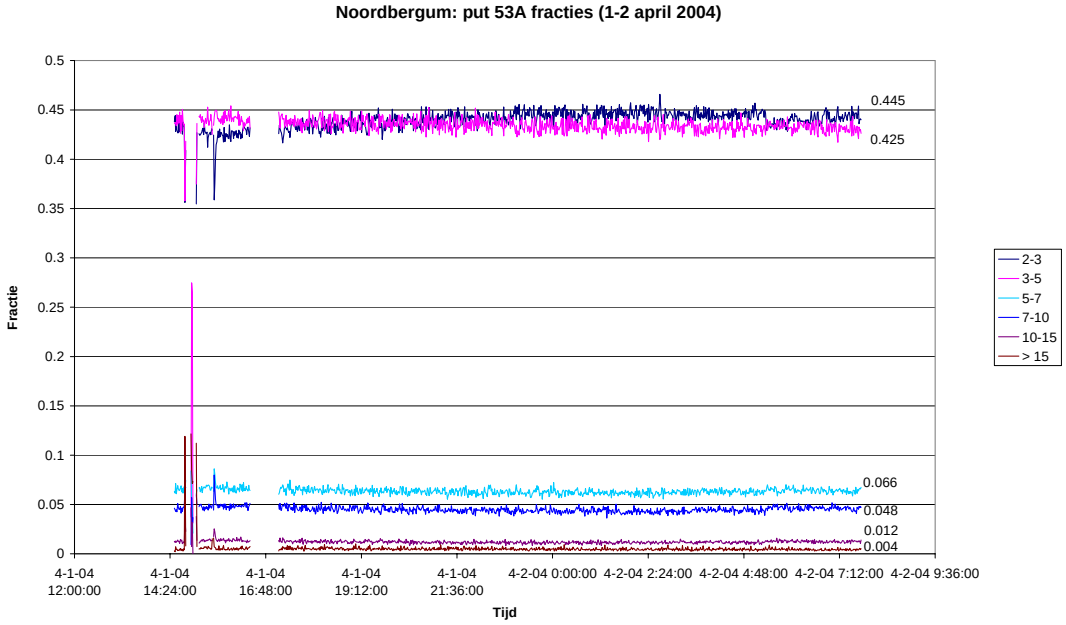
De meetresultaten in figuur 11 en 12, één meting per 60 seconden, geven een zeer onrustig beeld, de variaties zijn groot. Door het middelen van meetresultaten, wat in feite betekent een langere meetperiode, wordt een stabieler beeld verkregen. In figuur 13 zijn, als voorbeeld, de metingen voor perioden van 10 minuten gegeven.



Figuur 13 Concentratie voor meetperioden van 10 minuten (vgl fig 11, meetperiode 1 minuut)

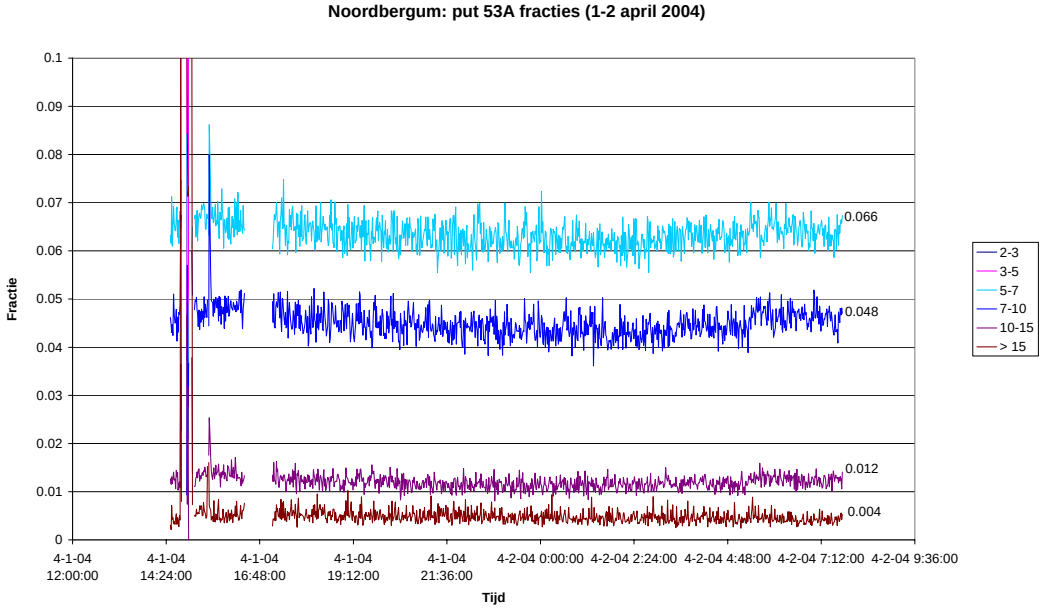
4.2 Korrelgrootteverdeling

Een andere manier om de meetresultaten weer te geven is via de korrelgrootteverdeling. In figuur 14 is voor elk van de zes grootteklassen per meting het deel van het totaal weergegeven (fractie).



Figuur 14 Verloop van de fractionele korrelgrootteverdeling per onderscheiden korrelgrootteklasse.

Om de verdeling van de grotere klassen beter te zien wordt “ingezoomd” op het gedeelte van tussen 0 en 0.1(figuur 15).



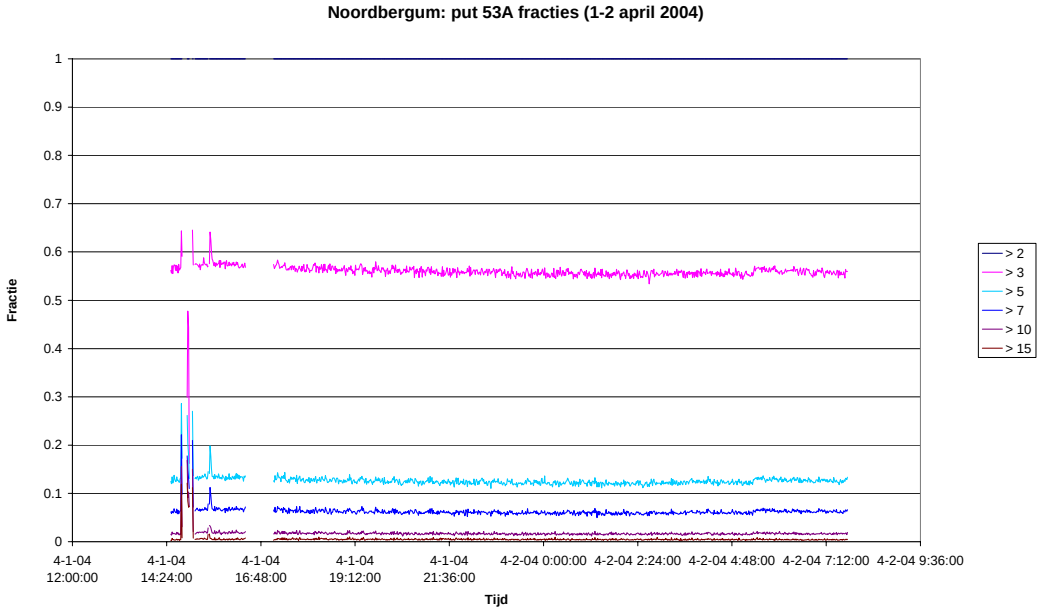
Figuur 15 Verloop van de fractionele korrelgrootteverdeling per onderscheiden korrelgrootteklasse ingezoomd op de grootste klassen.

De gemiddelde waarden voor de fracties kunnen uit figuur 14 en 15 worden afgelezen:

2-3 µm: 44,5 %

3-5	µm:	42,5 %
5-7	µm:	6,6 %
7- 10	µm:	4,8 %
10-15	µm:	1,2 %
>15	µm:	0,4 %.

Ook hier geldt dat ook gekozen kan worden voor een cumulatieve korrelgrootteverdeling om te voorkomen dat er overlap plaatsvindt, zoals in dit geval tussen de klassen 2-3 en 3-5 µm, zoals in figuur 14. De bovenste horizontale lijn, ter hoogte van het getal 1 (100%), geeft de totale hoeveelheid weer, dus eigenlijk de gemeten waarden > 2 µm.



Figuur 16 De cumulatieve korrelgrootteverdeling

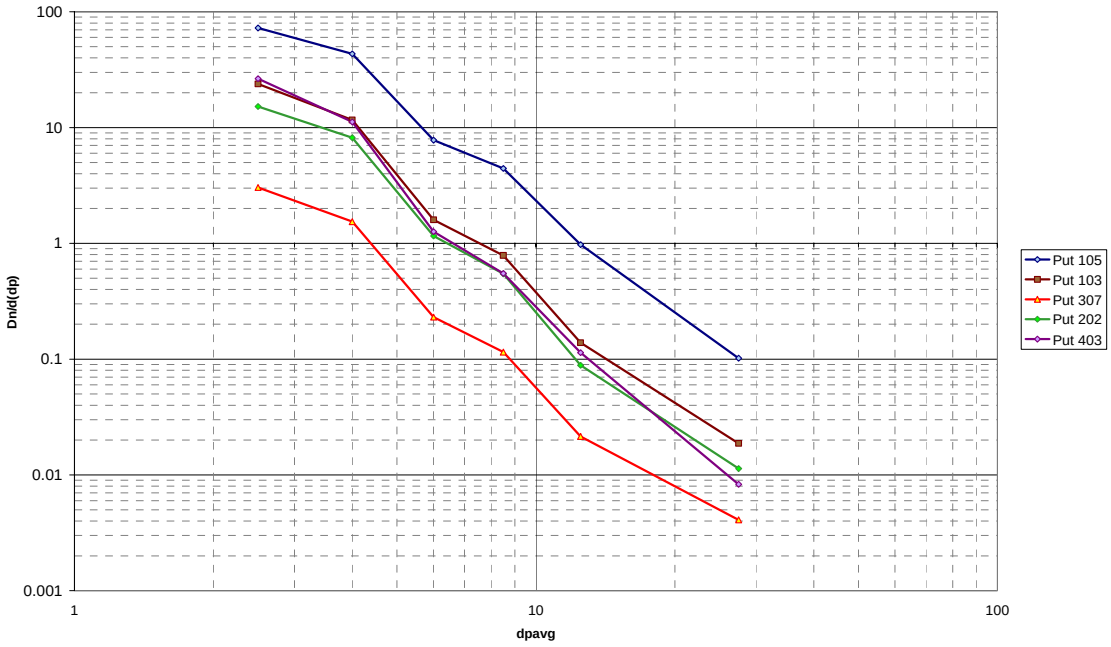
Voortgaand onderzoek moet aangeven of deze manier van presenteren meer informatie geeft over de mate van verstopping en over de geologische formaties. Als we aannemen dat een verstopte put vooral de grotere deeltjes tegenhoudt, dan zou gedurende het verstoppingsproces het percentage grotere deeltjes lager moeten worden. Mogelijk is het ook zo dat verschillende geologische formaties verschillen te zien geven in korrelgrootte-verdeling.

4.3 Pareto verdeling

De korrelgrootteverdeling kan met behulp van de Pareto-vergelijking met één getal worden gekarakteriseerd. Korrelgrootteverdelingen van deeltjes in lucht en water kunnen beschreven worden met behulp van een “particle size distribution function” (PDF). Eén van deze verdelingsfuncties is de zogeheten vergelijking van Pareto of de “power law distribution” Lawler, D. (1997), Zwart, A.H. de and Van Beek (in prep.II,). Onder natuurlijke omstandigheden geldt het volgende. Als de deeltjesconcentratie dubbel-logaritmisch wordt uitgezet tegen de korreldiameter ontstaat volgens de Pareto-vergelijking een rechte lijn. In figuur 17 is dat voor vijf metingen op puttenveld in Helmond (Brabant Water) weergegeven.

In figuur 17 is te zien dat alle lijnen nagenoeg evenwijdig aan elkaar lopen. Dit houdt in dat de korrelgrootte verdeling van de deeltjes in het grondwater hetzelfde is voor

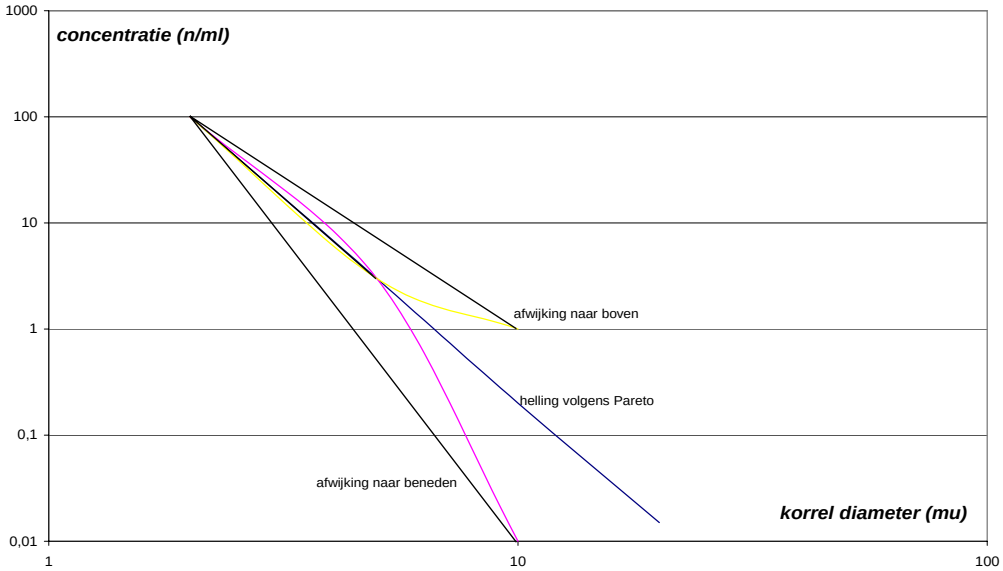
elke put. De hoogte van de lijnen zijn verschillend omdat de absolute concentratie van de verschillende putten in Helmond variëren.



Figuur 17 Pareto-verdeling: relatie tussen concentratie en korreldiameter voor vijf tellingen van een meting bij ingestelde diametergrenzen van 2, 5, 7, 10 en 20 µm.

Bij afwijkingen van de natuurlijke situatie, wat onder andere bij sterk verstoppende putten het geval is, zullen de lijnen niet meer recht zijn maar afwijkingen vertonen. Er zijn dan twee mogelijkheden (figuur 18):

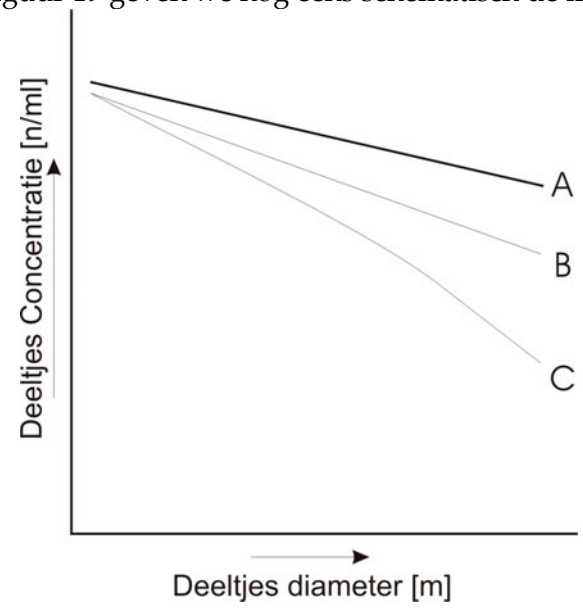
a. Grote deeltjes zijn ondervertegenwoordigd. In dat geval zal de rechte Pareto-lijn naar beneden afbuigen. Dat kan het geval zijn bij (toenemende) putverstopping waarbij relatief meer grote deeltjes worden tegengehouden.
b. Grote deeltjes zijn oververtegenwoordigd. De Pareto-lijn zal naar boven afbuigen. Dit kan het geval zijn bij de aanwezigheid van gasbellen die de meting verstoren.



Figuur 18 Pareto-verdeling: afwijkingen van de rechte lijn bij afwijkingen van de natuurlijke situatie.

Verloop van putverstopping monitoren
Toename van de putverstopping in de loop van de tijd kan bijvoorbeeld worden gesignaleerd door hellingshoeken te berekenen. Dat kan als volgt, uitgaande van het voorbeeld in figuur 17.
Elke lijn in figuur 17 bestaat uit 6 punten, gebaseerd op de verschillende grootteklassen. Tussen elke twee punten van zo´n lijn is de hellingshoek te berekenen. Voor de natuurlijke situatie zijn die allemaal aan elkaar gelijk. Zo zal de hellingshoek tussen 2 en 5 µm gelijk zijn aan die tussen 2 en 10 µm . Bij afwijkingen van de natuurlijke situatie zoals weergegeven in figuur 18 zullen de hellingshoeken van 2-5 µm en van 2-10 µm niet meer aan elkaar gelijk zijn. Als die hellingshoeken regelmatig worden berekend en als functie van de tijd worden uitgezet wordt al snel duidelijk of de put bezig is met verstoppen.

Samenvattend
Het gebruik van de Pareto-hellingen kan zeer behulpzaam zijn bij het constateren van putverstopping. In figuur 19 geven we nog eens schematisch de mogelijkheden weer.



Figuur 19 Enige voorbeelden van de dubbel-logaritmische relatie tussen deeltjesconcentratie en korrelgrootte.Lijn A geeft de juiste (natuurlijke) deeltjesverdeling, lijn B en C geven schematisch afwijkende verdelingen door het optreden van putverstopping.

Lijn A geeft de natuurlijke deeltjesverdeling weer.
Als bij een verstoppende put van iedere grootteklasse relatief evenveel deeltjes op de boorgatwand worden afgefiltreerd zal lijn A evenwijdig naar beneden verschuiven (hier niet afgebeeld).
Lijn B geeft de situatie weer dat bij putverstopping van iedere korrelgrootteklasse een steeds toenemend gedeelte op de boorgatwand achterblijft. Lijn B ligt lager dan A en heeft een steiler verloop. NB voor deze rechte lijn is toch sprake van een afwijking van de natuurlijke situatie.
Indien (nagenoeg) alleen grote deeltjes worden afgevangen raken deze ondervertegenwoordigd en zal de lijn een knik of kromming vertonen (lijn C).

5 Putschakelen

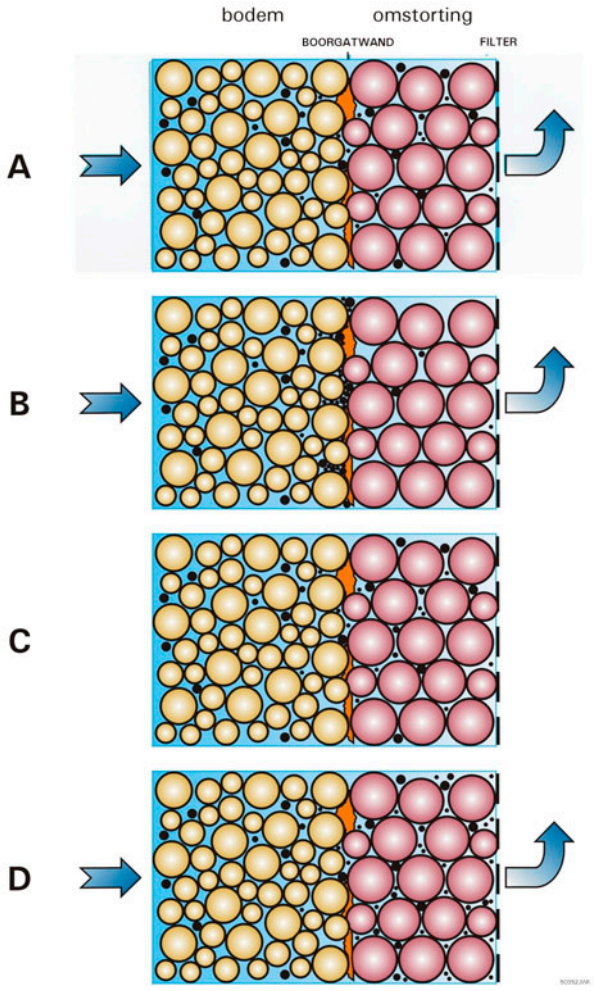
Op basis van waarnemingen, een combinatie van divermetingen en deeltjestellingen, is de hypothese gesteld dat frequent schakelen mechanische putverstopping kan voorkomen dan wel kan verminderen (Van Beek et al, 2004; zie ook bijlage III). Na het verschijnen van dat artikel is het onderzoek doorgegaan en zijn vorderingen geboekt. In dit hoofdstuk doen we daarvan verslag.

5.1 Hypothese over putschakelen en verwijderen deeltjes

Het uitgevoerde onderzoek, een wisselwerking tussen voortgaande theorievorming en praktijkexperimenten, heeft een hypothese opgeleverd over de relatie tussen het putdebiet, de schakelfrequentie en de putverstopping.
Met figuur 20 onderbouwen we de hypothese met een korte beschouwing over de processen die naar verwachting optreden. Daarna geven we aan hoe dat uitwerkt in de tellingen van de deeltjes (figuur 21), omdat we daarmee de hypothese kunnen 'meten'.

Processen

Figuur 20 geeft in vier opeenvolgende figuren de processen weer die volgens de hypothese optreden.

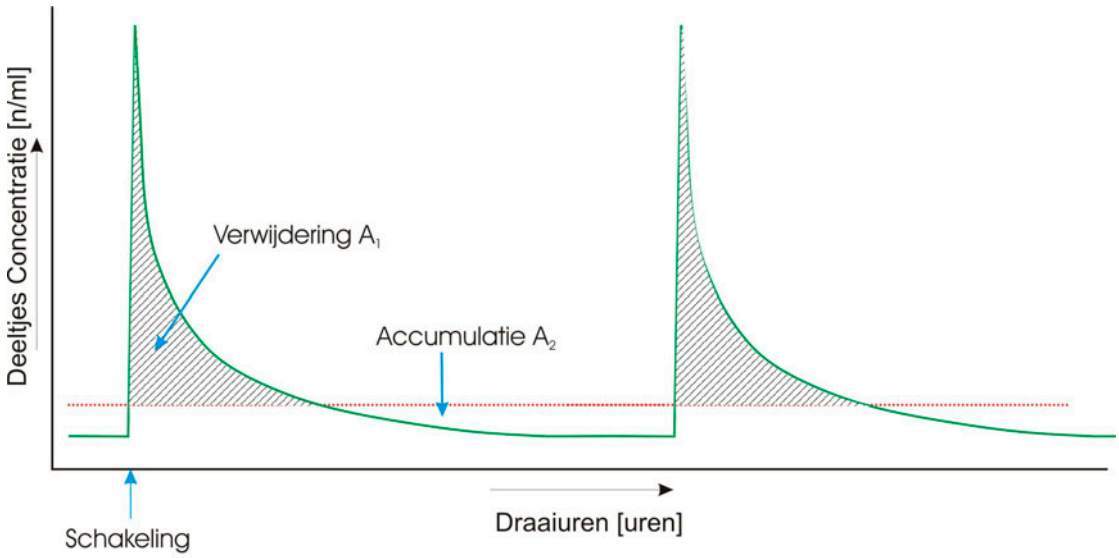


Figuur 20 Verloop van het verstoppingsproces en effect van het putschakelen op de deeltjes in bodem en omstorting

Gegeven zijn de oorspronkelijk aanwezige bodem, de omstorting, het (put)filter en de boorgatwand. Ter plaatse van de boorgatwand is verstoppend materiaal aanwezig (initiële verstopping). Het materiaal van de omstorting heeft een grotere diameter dan dat van het bodemmateriaal.

A. Plaatje A geeft de situatie weer bij de start van de onttrekking. Water wordt onttrokken en met het grondwater komen deeltjes, hier schematisch weergegeven als zwarte bolletjes, mee. Deze zullen deels achterblijven in de nabijheid van de omstorting als gevolg van fysische processen: brugvorming, en nauwe poriën of doorgangen tussen de zandkorrels. Hierdoor zal de put langzaam maar zeker verstoppen.
B. Na verloop van tijd is de put nabij de boorgatwand verstopt. Deze verstopping zal in de loop van de tijd steeds erger worden, omdat het aanwezige verstoppende materiaal de 'nieuw' aanstromende deeltjes ook gaat afvangen. De ontstane bruggen zullen in stand blijven omdat er door de grondwaterstroming een constante druk van buiten naar binnen zal blijven bestaan.
C. Als de verstopping een bepaald niveau overschrijdt wordt de onttrekking gestaakt (de pomp wordt uitgeschakeld). Plaatje C geeft het 'rustmoment ' weer, de druk van buiten naar binnen valt weg, en het verstoppende materiaal zal zich ter plaatse iets gaan verspreiden en 'losser' gaan zitten.
D. Als de pomp weer wordt ingeschakeld en de onttrekking weer op gang komt zal het dan 'los' zittende materiaal worden meegenomen. Door het aanzetten van de pomp ontstaat een extra versnellingskracht die kortdurend grote kracht uitoefent. Dit verklaart de piek in deeltjes die direct na het putschakelen gemeten wordt.

Deeltjestellingen
Figuur 21 geeft een karakteristiek beeld van het verloop van de deeltjesconcentratie bij een continue meting aan het onttrokken grondwater en bij twee putschakelingen.



Figuur 21 Schematische weergave van een deeltjestelling bij schakelen van de onderwaterpomp.

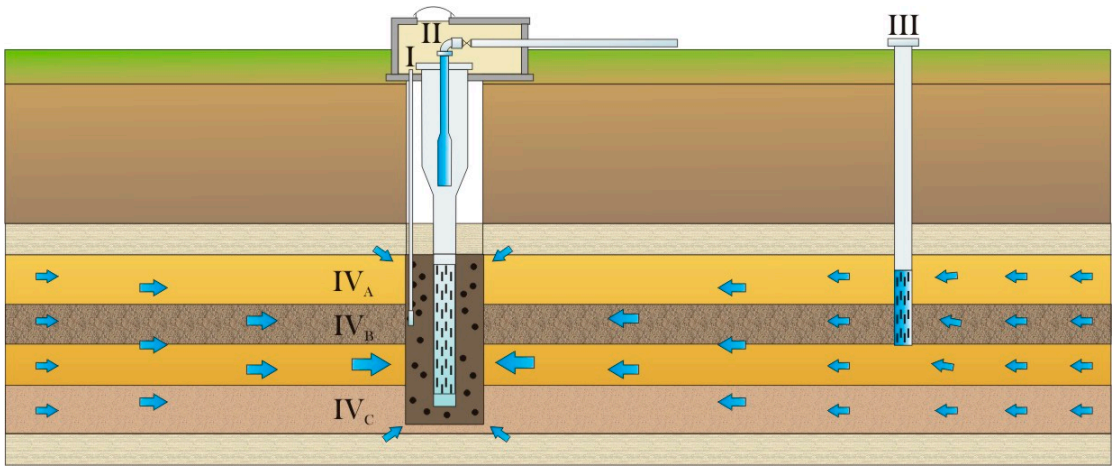
Tijdens normale onttrekking worden deeltjes afgevangen op de boorgatwand, waardoor bij de meting aan de putkop een lagere deeltjesconcentratie gemeten wordt dan in de buurt van de boorgatwand. De rode horizontale lijn is de oorspronkelijke deeltjesconcentratie die bij de boorgatwand arriveert. De groene lijn is de gemeten

deeltjesconcentratie aan de putkop. Voorafgaand aan de schakeling ligt de groene lijn onder de rode, wat betekent dat een gedeelte van de deeltjes accumuleert op de boorgatwand. Na het schakelen ligt de groene lijn ver boven de rode lijn, wat betekent dat er nu veel meer deeltjes gemeten worden aan de putkop dan er in het grondwater aanwezig zijn. Door het schakelen wordt een groot aantal deeltjes mobiel gemaakt en geteld.
Wanneer het totale aantal deeltjes dat direct na een schakeling losgemaakt wordt kleiner is dan het aantal dat in de voorafgaande onttrekkingsperiode accumuleert op de boorgatwand, zal dat leiden tot een toename van de verstopping. Als echter het aantal verwijderde deeltjes even groot is zal er geen (verdergaande) putverstopping optreden.

De uitdaging is nu om het juiste moment van putschakelen te vinden. Daarop richt zich het onderzoek dat verder in dit hoofdstuk beschreven wordt. Allereerst wordt in paragraaf 5.2 de massabalans verder uitgewerkt.

5.2 De massabalans in relatie tot putverstopping

Door middel van een aantal metingen op, rond en in een waterput kan een **massabalans** voor deeltjes opgesteld worden. Figuur 22 geeft een schematische voorstelling voor mogelijke meetlocaties, namelijk het waarnemingsfilter in de omstorting, het onttrokken grondwater aan de putkop, een waarnemingsput op enige afstand, en een sectiegewijze meting in de put zelf.



Figuur 22 Meetlocaties voor het bepalen van de massabalans. I = waarnemingsfilter, II = putkop, III =waarnermingsput en IV sectiegewijs.

Met behulp van deze meetpunten kan voor deeltjes de volgende massabalans (**M**) worden opgezet:

$$\mathbf{M}_{\text{afgefilterd op Bgw}} = \mathbf{M}_{\mathbf{aanvoer}} - \mathbf{M}_{\text{put}} - \mathbf{M}_{\text{afgezet in put}}$$

De natuurlijke verdeling ($\mathbf{M}_{\mathbf{aanvoer}}$) kan gemeten worden in een waarnemingsfilter op enige afstand van de put (locatie **III** in figuur 22) of eventueel in een niet-verstoppende put.
De concentratie aan de put ($\mathbf{M}_{\text{put}}$) kan gemeten worden aan de putkop (locatie **II** in figuur 22) of sectiegewijs over het filtertraject (locaties **IV** in figuur 22). Daarnaast nemen we aan dat een zeer kleine fractie in de put zal achterblijven (<< 1%) dus $\mathbf{M}_{\text{afgezet in put}}$ wordt verwaarloosd. Nu is het mogelijk om $\mathbf{M}_{\text{afgefilterd op Bgw}}$ te bepalen.

© Kiwa N.V.

Uit de resultaten van de deeltjestestellingen en divermetingen is ook duidelijk geworden dat tenminste een gedeelte van deze deeltjes weer gemobiliseerd kan worden. Dit houdt in dat de massabalans gecorrigeerd moet worden voor het schakelen:

$$\mathbf{M}_{\text{afgefilterd op Bgw}} = \mathbf{M}_{\textbf{aanvoer}} - \mathbf{M}_{\text{put}} - \mathbf{M}_{\text{schakelen}}$$

Hieruit blijkt ook dat putverstopping zal optreden wanneer niet alle deeltjes, die geaccumuleerd zijn op de boorgatwand, worden verwijderd tijdens het schakelen. Om een goed resultaat te krijgen is het dus belangrijk om lang te meten en meerdere schakelingen goed door te meten.

Bovenstaande massabalans is principieel correct, maar is niet operationeel. M_{put} en $M_{schakelen}$ zijn ondubbelzinnig gedefinieerd, in tegenstelling tot $M_{aanvoer}$. Het is niet bewezen dat de natuurlijke achtergrondconcentratie van deeltjes over de gehele hoogte van het watervoerend pakket en in alle richtingen rond de put gelijk is, tot nu toe wordt dit echter wel aangenomen.
Om deeltjes te kunnen meten, moet water aan de waarnemingsput worden onttrokken. Deze onttrekking zelf beïnvloedt de omgeving van het filter van de waarnemingsput, en daarmee mogelijk de concentratie van deeltjes rond de waarnemingsput. Wel wordt met een minimale ontrekken die nodig is voor de meten de waarnemingsput afgepompt. Het gaat hierbij om een zeer kleine volume; 6 liter per uur.
Het operationeel maken van $M_{aanvoer}$ vraagt echter nog wel de nodige aandacht.

5.3 Factoren die de deeltjesverwijdering bepalen

De factoren die de deeltjesverwijdering bij putschakelen bepalen zijn onder andere de schakelfrequentie, de volumestroom en de aquifer.

5.3.1 Schakelfrequentie

De hoeveelheid deeltjes die gedurende een onttrekkingsperiode op de boorgatwand accumuleert is gelijk aan:

$$M_Q = Qc_Q t$$

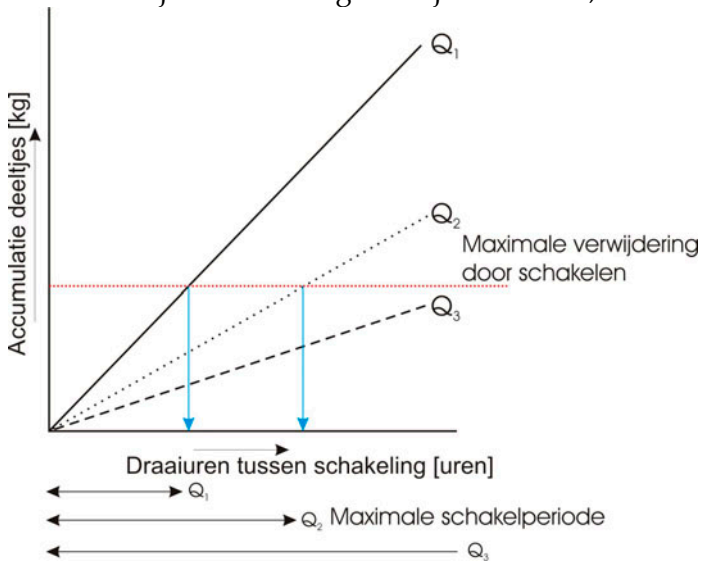
Hierin is:

M_Q = aantal deeltjes > 2 µm
Q: volumestroom van onttrekking, m^3/h
c_Q: afgevangen deeltjesconcentratie bij volumestroom Q, aantal > 2 µm/ml
t: onttrekkingsperiode, h

De relatie tussen het aantal draaiuren tussen de schakelingen (schakelfrequentie) en de geaccumuleerde en verwijderde hoeveelheid deeltjes is weergegeven in figuur 23.
Als de put in bedrijf is accumuleren er deeltjes rondom de boorgatwand. Hoe dat proces zich precies voltrekt is nog niet helemaal bekend, maar voor het gemak gaan we even uit van een lineaire toename van het aantal deeltjes in de tijd. Bij een grotere volumestroom (Q_1) zal dat sneller gaan dan bij lagere debieten (Q_2 en Q_3).
Bij het aanschakelen van de onderwaterpomp worden deeltjes verwijderd die voorafgaand aan de schakeling, gedurende de voorgaande onttrekkingsperiode, op de boorgatwand zijn geaccumuleerd. We gaan ervan uit dat er bij één schakeling een maximaal verwijderbare hoeveelheid bestaat, die (enigszins) afhankelijk zal zijn van de volumestroom, en gelijk is aan $M_{max,Q}$. Bij een 'schone' put en onder normale omstandigheden zal geen verstopping optreden als de hoeveelheid deeltjes die tussen

© Kiwa N.V.

twee schakelingen accumuleert (M_Q) kleiner is dan de maximaal verwijderbare hoeveelheid ($M_{max,Q}$).
In figuur 23 is, onder de horizontale as, voor elk van de drie gegeven volumestromen, aangegeven het aantal draaiuren tussen twee schakelingen waarbij al het geaccumuleerde materiaal bij de schakeling verwijderd wordt, en er dus geen

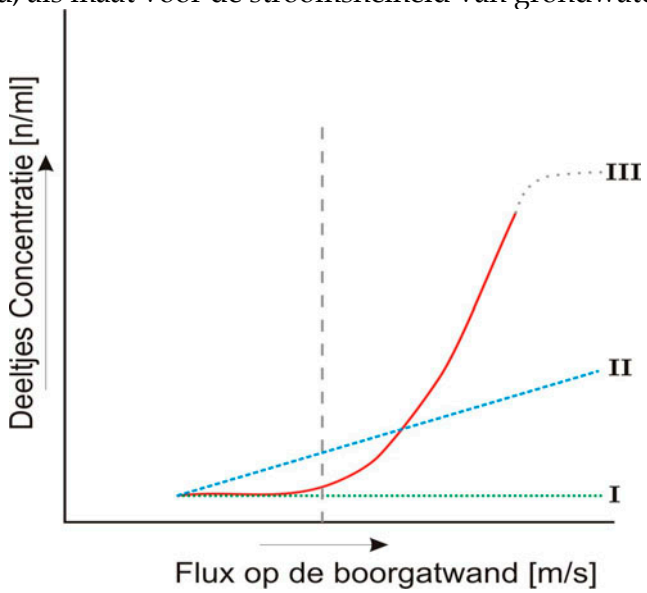


Figuur 23 Relatie tussen maximaal verwijderbare hoeveelheid deeltjes en schakelfrequentie van de onderwaterpomp.

verstopping optreedt. Daaruit wordt duidelijk dat hoe groter de volumestroom hoe kleiner het aantal draaiuren tussen twee schakelingen is. Eenzelfde redenering zou opgaan als er geen lineair verband zou zijn (zie par 5.3.2).

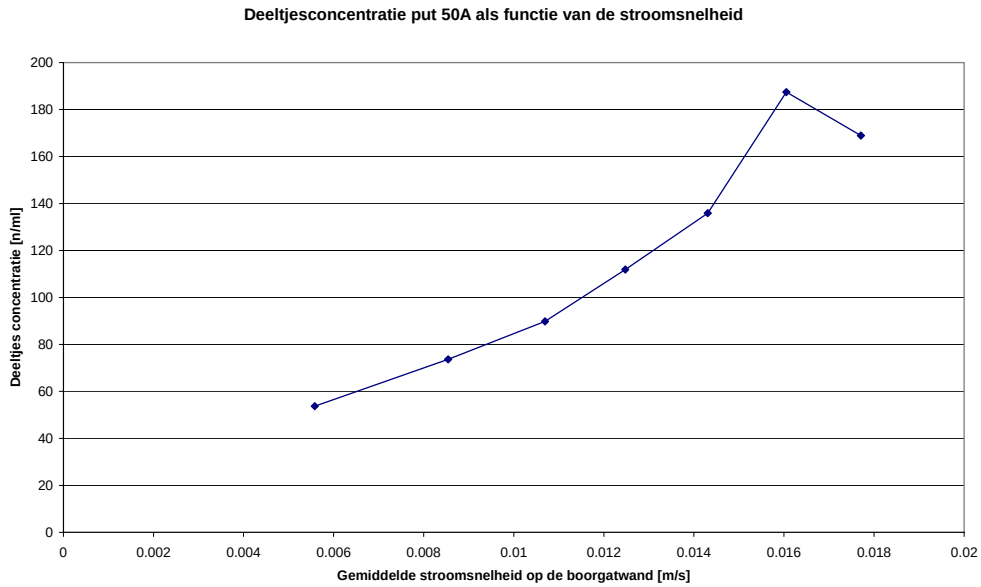
5.3.2 *Volumestroom van de onttrekking*

De concentratie van deeltjes in het onttrokken grondwater wordt sterk beïnvloed door de stroomsnelheid van het grondwater, dat wil zeggen door de volumestroom van onttrekking. Figuur 24 geeft enige mogelijke relaties tussen deeltjesconcentratie en flux op de boorgatwand, als maat voor de stroomsnelheid van grondwater.



Figuur 24 Mogelijke relaties tussen deeltjesconcentratie in onttrokken grondwater en stroomsnelheid van grondwater, weergegeven als flux op de boorgatwand.

Lijn I is representatief voor een stof opgelost in water zonder enige interactie met de bodemmatrix, zoals chloride.
In de praktijk blijkt de deeltjesconcentratie na het overschrijden van een soort drempelsnelheid (verticale gestreepte lijn) exponentieel toe te nemen, zie lijn III. Dat kan verklaard worden uit het feit dat er een minimale sleepkracht nodig is voor het mobiliseren van deeltjes vanuit de formatie. Daarom wordt ook verwacht dat er een maximum concentratie zal zijn, echter dit is in de praktijk nog niet waargenomen. .
Figuur 25 toont een meting uit de praktijk op put 50A op puttenveld Ritskebos in Noord Bergum, Friesland (Vitens).



Figuur 25 Gemeten relatie tussen gemiddelde stroomsnelheid en deeltjesconcentratie op put 50A op Ritskebos, Noord Bergum (Vitens Friesland).

Vanuit figuur 24 en 25 wordt ook duidelijk dat een verlaging van de volumestroom van de onttrekking gepaard gaat met een meer dan proportionele afname in de belasting van de boorgatwand met deeltjes. Daardoor wordt ook verwacht dat dit tot een meer dan proportionele vermindering van de verstoppingsnelheid zal leiden.
Lijn II geeft een lineaire toename van de deeltjesconcentratie met de ontrekkingssnelheid weer. Dit is tot op heden niet waargenomen en ook niet te verwachten, geredeneerd literatuur over deeltjes.

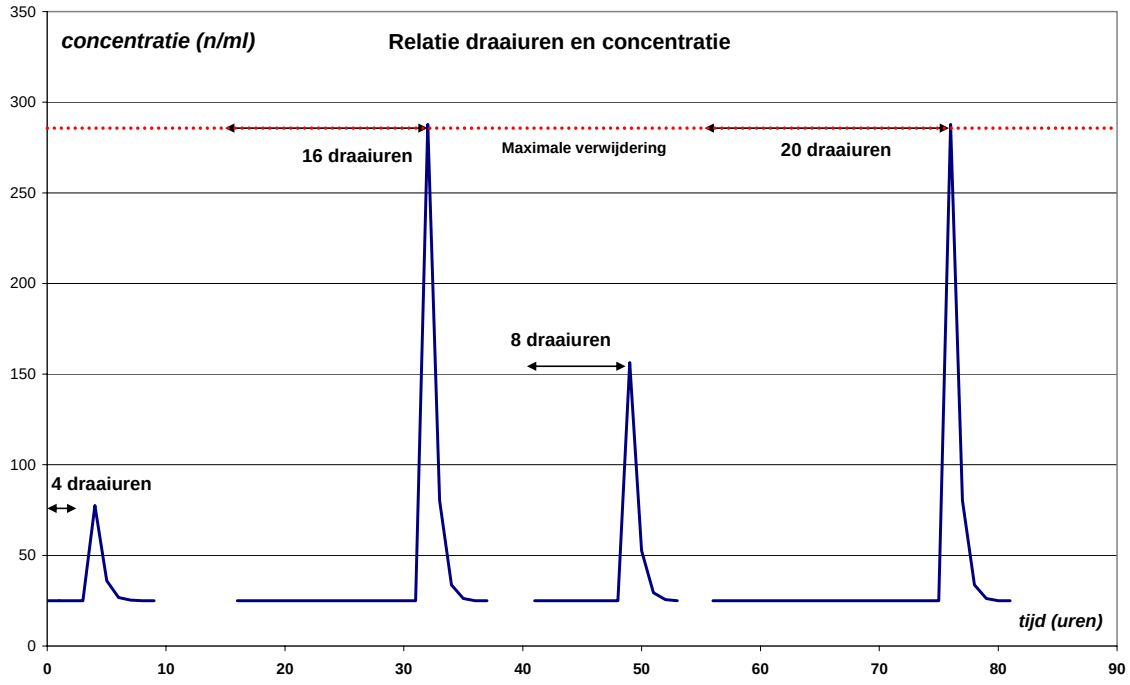
5.3.3 Invloed aquifer

Tot nu toe zijn deeltjes aangetroffen in grondwater onttrokken aan pakketten met (semi)spannings grondwater, zij het in zeer wisselende concentraties.
Door Prins (2003, et al 2004) is onderzoek gedaan naar de relatie tussen deeltjes en de geologische formatie (zie ook bijlage IV). Daaruit konden geen eenduidige conclusies worden getrokken. Wel werd geconcludeerd dat gekeken zou moeten worden naar de relatie tussen deeltjes en de samenstelling van de ondergrond: korrelgrootte, sortering van het zand en percentage bijmengsels van klei, leem en veen. Hiervoor ontbreken echter veelal voldoende meetgegevens.
Deze relatie vormt echter een belangrijk aandachtspunt voor de komende tijd, omdat duidelijk is dat de formatie zelf de bron van de deeltjes is en daarom ook zelf de hoeveelheid en soort deeltjes “bepaalt”.

6 Strategie beheersing Putverstopping

Op grond van de bovengenoemde inzichten en hypothese wordt een expertmodel opgezet waarmee putverstopping kan worden beheerst en zo mogelijk voorkómen. We streven naar een methode om tot verstoppingvrije putten(velden) te komen.
Het expertmodel dient ter bepaling van de optimale combinatie van (maximale) capaciteit van onderwaterpomp en schakelfrequentie van een put zonder dat verstopping optreedt.

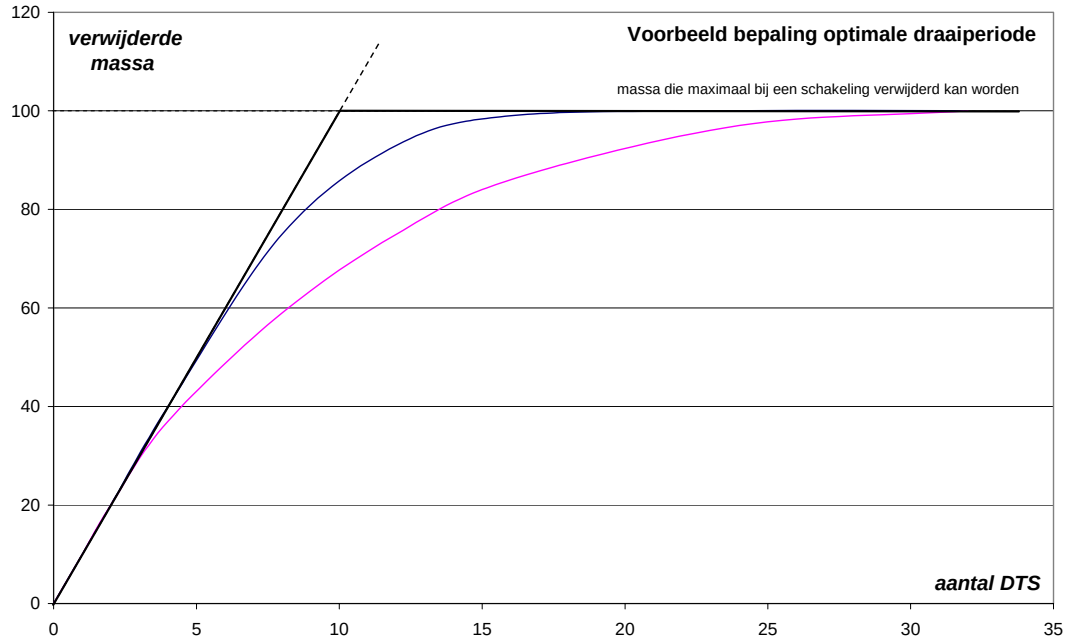
Hierbij gelden de volgende uitgangspunten:
1. de hoeveelheid deeltjes die op de boorgatwand accumuleert is recht evenredig met het aantal draaiuren van de onderwaterpomp, en
2. de hoeveelheid deeltjes, die bij één schakeling van de onderwaterpomp wordt verwijderd, is gebonden aan een maximum.



Figuur 26 Relatie tussen draaiuren en deeltjesconcentratie na putschakelen

In figuur 26 is dat schematisch weergegeven. Hoe groter het aantal draaiuren, hoe groter het aantal verwijderde deeltjes (weergegeven in het oppervlak onder de piek). Het maximaal aantal verwijderde deeltjes bij 4, 8 en 16 draaiuren is ongeveer recht evenredig met het aantal draaiuren, respectievelijk 75, 150 en 300 deeltjes/ml.
Na 20 draaiuren blijkt de piek ook circa 300 deeltjes/ml te zijn, wat betekent dat na 20 draaiuren niet al het verstoppende materiaal is verwijderd, maar slecht een hoeveelheid die overeenkomt met een draaitijd van 16 uur. De conclusie is dat een draaitijd van 20 uur te lang is om putverstopping te voorkómen.

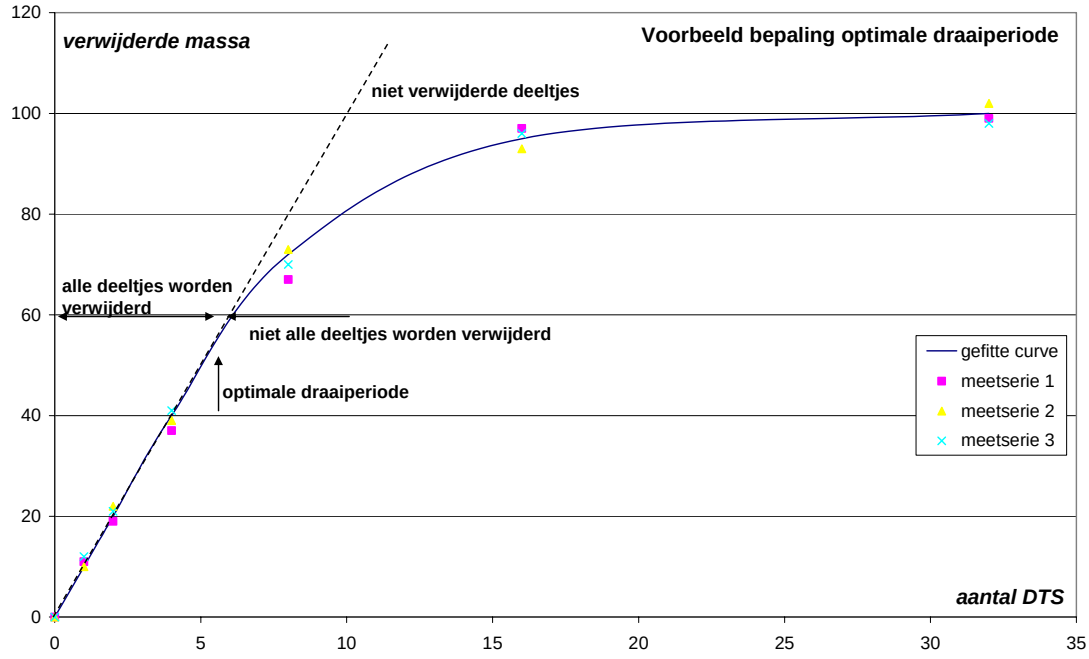
© Kiwa N.V.



Figuur 27 Voorbeeld bepaling optimale draaiperiode

Het expertmodel moet de optimale draaiperiode bepalen. In figuur 27 is schematisch weergegeven hoe we ons dat voorstellen. De horizontale as geeft het aantal Draaiuren tussen Twee opeenvolgende Schakelingen (DTS) weer, en vormt daarmee een maat voor de hoeveelheid deeltjes die op de boorgatwand accumuleert. De verticale as geeft de verwijderde hoeveelheid weer, met ook de hoeveelheid die maximaal bij één schakeling verwijderd kan worden (zie ook figuur 23).
In de praktijk zal hoogst waarschijnlijk tussen de geaccumuleerde en de verwijderde hoeveelheid deeltjes geen geknikte lineaire relatie aanwezig zijn, maar een gebogen curve. Waar de gebogen curve begint af te wijken van de lineaire curve bevindt zich het maximaal aantal DTS, waarbij geen verstopping optreedt. Veldonderzoek zal moeten aangeven hoe de relatie tussen geaccumuleerde en verwijderde massa er in werkelijkheid uitziet.
Bovenstaande curve betreft de relatie voor één put bij de geïnstalleerde onderwaterpomp. Indien een andere onderwaterpomp, met een kleinere of grotere capaciteit wordt geïnstalleerd, zal een andere curve gevonden worden. Indien de relatie tussen capaciteit en concentratie bekend is, kan een schatting worden gemaakt van de maximale capaciteit van de onderwaterpomp waarbij geen verstopping optreedt.

Veldonderzoek
Het onderzoek bestaat uit het bepalen van de verwijderde hoeveelheid na 1, 2, 4, 8, 16 en 32 uur onttrekking. In de praktijk zal gewoonlijk minimaal 1/dag geschakeld worden. Het punt 32 uur dient om het horizontale gedeelte van de curve te bepalen. Een probleem wordt mogelijk gevormd door een “historie” effect: gemiddeld wordt dan wel al het geaccumuleerde materiaal verwijderd, maar het behoeft niet zo te zijn dat iedere keer precies het materiaal dat na de voorgaande schakeling is geaccumuleerd, wordt verwijderd. Voor het begin van de bepaling dient door frequent schakelen de boorgatwand te worden “schoon” gemaakt.
De veldmetingen moeten resulteren in de grafiek van figuur 28.



Figuur 28 Relatie tussen DTS en verwijderde massa, met bepaling van de optimale draaiperiode

7 Conclusies en aanbevelingen

Conclusies

Uit het lopende onderzoek naar de relatie tussen deeltjes in grondwater en mechanische verstopping van pompputten kunnen momenteel de volgende conclusies worden getrokken:

1) In al het onttrokken grondwater bevinden zich deeltjes, gekarakteriseerd als grote colloïden of als fijn zwevend materiaal. In Nederlandse omstandigheden varieert de korrelgrootte in het onttrokken grondwater tussen 1 en 40 µm.
2) Er worden twee verstoppingsoorzaken onderscheiden:
   a) Initieel: door achtergebleven boorvloeistof op de boorgatwand wordt de instroming bemoeilijkt.
   b) Brugvorming: deeltjes vormen bruggen die de doorstroming blokkeren.
3) Het verstoppende materiaal is bepaald met horizontale steekmonsters te Rodenhuis (Zuid-Holland) en Noardbergum (Friesland). Bij Rodenhuis bestond het uit organisch materiaal, kleideeltjes en kalk, bij Noardbergum uit brokjes primair Calcite, secundair $CaCO_3$ en klei, bij beide putten was de diameter van het materiaal tussen 1 en 20 µm.
4) Laboratoriumonderzoek aan het onttrokken water van diezelfde putten wordt momenteel uitgevoerd, en de eerste indruk is dat daarmee hetzelfde materiaal wordt gevonden.
5) Deeltjestellers gebaseerd op het lichtblokkade-principe blijken zeer geschikt te zijn voor het tellen van deeltjes in onttrokken grondwater. Recent heeft Kiwa twee nieuwe tellers aangeschaft (PAMAS Waterviewer), waarmee in de komende tijd op veel locaties tellingen worden uitgevoerd. Vanwege mogelijke verstoringen is zorgvuldigheid bij de uitvoering zeer gewenst om reproduceerbare metingen te krijgen.
6) De meetresultaten van de deeltjestellers bestaan uit aantallen deeltjes per ml voor verschillende grootteklassen. Deze worden voorlopig gepresenteerd in grafieken met de deeltjesconcentratie en de korrelgrootteverdeling als functie van de tijd, en de Pareto-helling waarin de deeltjesconcentratie en de korreldiameter tegen elkaar zijn uitgezet. Hiermee kan voorlopig voldoende informatie worden verkregen om de relatie tussen deeltjes en putverstopping in beeld te brengen.
7) Afwijkingen in de Pareto-helling geven snel een indicatie van de verstoppingsgevoeligheid van een put.
8) Uit praktijkmetingen is gebleken dat het uit- en aanschakelen van de pomp kan leiden tot vermindering van de putverstopping. Er is een hypothese opgesteld over de relatie tussen het putdebiet, de schakelfrequentie en de putverstopping, mede in verhouding tot de aantallen deeltjes in het onttrokken grondwater. Deze hypothese wordt momenteel in de praktijk getoetst aan de hand van onder andere deeltjestellingen. Er wordt een handleiding gemaakt waarmee de putbeheerders snel en eenvoudig de optimale schakelfrequentie kunnen bepalen.

Aanbevelingen

1) Zoeken naar een snellere en goedkopere methode om de samenstelling van het verstoppende materiaal te bepalen. De analyse van het verstoppende materiaal is tot nu toe erg kostbaar en arbeidsintensief geweest: horizontale steekmonsters, affiltering van het onttrokken water, maken en analyseren van slijpplaatjes.

2) Zoeken naar een methode en/of protocol voor het snel en goedkoop uitvoeren van deeltjestellingen onder variabele omstandigheden.
3) Zoeken naar een snellere en meer eenvoudige methode om de meetresultaten van de deeltjestellers te presenteren. Ook zoeken naar andere presentatiemogelijkheden om meer informatie te verkrijgen uit de tellingen. Dat zal mede gebaseerd moeten zijn op de voortgang van het wetenschappelijke onderzoek.
4) Uitvoeren van deeltjestellingen op verschillende locaties en onder verschillende omstandigheden om de hypothese over deeltjes en verstopping verder te onderbouwen, en om te komen tot een praktische handleiding voor de putbeheerder.
   Onder zoveel mogelijk verschillende omstandigheden verstaan we: verschillende geologische formaties, verstoppende en niet verstoppende puttenvelden, verschillende bedrijfsvoeringen etc. Het onderzoek moet informatie geven over de variatie in deeltjesconcentraties: wat is de natuurlijke variatie in concentraties, korrelgrootteverdelingen en Pareto-hellingen? Ook deeltjestellingen bij verschillende volumestromen, metingen in waarnemingsputten, onderzoek naar de aard van de deeltjes, etc.
5) Onderzoek uitvoeren naar een andere parameter dan de Sichardtsnelheid voor het bepalen van het ontwerpdebiet.
   Momenteel wordt de Sichardtsnelheid als ontwerpcriterium voor de capaciteit van een put gehanteerd. In een stabiele bodemmatrix kan de stroomsnelheid, afgezien van het ontstaan van een turbulente stroming (maar die kan beter op andere wijze worden geschat), geen invloed hebben op het functioneren van een put. Waarschijnlijk is de Sichardt snelheid een afgeleide grootheid: in het voorgaande bleek al dat de deeltjesconcentratie wordt bepaald door de stroomsnelheid van het grondwater. Maar als dat zo is, kan een ontwerpcriterium beter direct op basis van deeltjesconcentratie worden geformuleerd.

Literatuur

Beek, C.G.E.M. van and D. van der Kooij (1982): Sulfate reducing bacteria in ground water from clogging and non-clogging shallow wells in the Netherlands river region, Groundwater 20 (3) 298-302.

Beek, C.G.E.M. van, C.J.G. Janssen, M.H.A. Juhász-Holterman en J.H. Peters (1998): Verstopping van productieputten door deeltjes, H_2O 31 (17) 18-20.

Beek, C.G.E.M. van (2000): Deeltjes in onttrokken grondwater, niet verstoppende puttenvelden, Kiwa BTO 2000-182(c).

Beek, C.G.E.M. van (2002): Mechanische putverstopping: Oorzaak, preventie en kostenbesparing, H2O 35 (18) 37-39.

Beek, Kees van, Ate Oosterhof, Rob Breedveld en Bert-Rik de Zwart (2004): Zelfregenererende pompputten, frequent schakelen voorkomt mechanische putverstopping, H2O 37 (18) 36-38.

Beek, C.G.E.M. van (2005): Deeltjestellingen in onttrokken grondwater. Evaluatie van metingen tot 2003. Kiwa BTO 2005.049 (s)

Enfield, C.G. and G. Bengtson (1988): Macromolecular transport of hydrophobic contaminants in aqueous environments, Groundwater 26, 64-70.

Jongmans, T (2004), Rapport waterwinput verstopping Ritskebos (Vitens) Stereomicroscopisch en Micromorfologisch onderzoek.

Juhász-Holterman, M. (2002): Projectplan werkpakket 6: bedrijfsvoering. BTS-project putverstopping.

Juhász-Holterman, M., Marc Balemans en Chris Jansen (in prep.): Beter inzicht in putverstopping door hoogfrequente stijghoogtemetingen.

Lawler, D. (1997) Particle size distribution in treatment processes: Theory and practice. Water Science and Technology **36** (4), 15-23

McDowell-Boyer, L.M., Hunt, J.R., and Sitar, N. (1986) Particle transport through porous media. Water Resources Research **22** (13), 1901-1921

McCarthy, J.F., and C. Degueldre (1993): Sampling and characterization of colloids and particles in ground water for studying their role in contaminant transport, in J. Buffle and H.P. van Leeuwen (Eds) Environmental Particles, Lewis, Boca Raton, Fla.

Prins, J. (2003): Suspended material in abstracted groundwater in the Netherlands. First results, Kiwa rapport KWR 03.029, Kiwa Nieuwegein.

Prins, Jeroen, Bert-Rik de Zwart en Kees van Beek (2004): Betrouwbare deeltjestellingen, stap voorwaarts in putverstoppingsonderzoek, H_2O 37 (1)

Ryan, J.N. and M. Elimelech (1996): Colloid mobilization and transport in groundwater. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, 107, 1-56.

Ryan, J.N. and Ph.M. Gschwend (1994): Effects of solution chemistry on clay colloid release from an iron oxide-coated aquifer sand, Env. Sci. Techn. 28 (9) 1717-1726.

Ryan, J.N. and Ph.M. Gschwend (1992): Effects of iron diagenesis on the transport of colloidal clay in an unconfined sand aquifer, Geochim. Cosmochim. Acta 56 (4) 1507-1521.

Ryan, J.N. and Ph.M. Gschwend (1990): Colloid mobilization in two Atlantic coastal plain aquifers: field studies, Water Res. Res. 26 (2) 307-322.

© Kiwa N.V.

Schijven, J.F. and S.M. Hassanizadeh (2000): Removal of viruses by soil passage: overview of modeling, processes and parameters, Critical Rev. Env. Sc. Techn. 30 (1) 49-127.

Tapias, L. (2005), Characterization of Particles in Abstracted Groundwater with Scanning Electron Microscopy, rapport BTO 2005.050 (s), afstudeerverslag Universiteit Utrecht.

Timmer, H., J.D. Verdel en A. Jongmans (2000): Verstopping putten door van nature aanwezig materiaal, H_2O 33 (20) 24-26.

Timmer, H., Verdel, J.D., and Jongmans, A. (2003) Well clogging by particles in Dutch well fields . JAWWA, 95 (8) 112-118.

Weerd, H. van der, A. Leijnse and W.H. van Riemsdijk (1998): Transport of reactive colloids and contaminants in groundwater: effect of nonlinear kinetic interactions, J. Cont. Hydr. 32 (3/4) 313-332

Zwart, A.H. de and Van Beek (in prep I) Understanding physical clogging processes near pumping wells.

Zwart, A.H. de, Van Beek and Schotting (in prep II) Characterization of particles in unconsolidated aquifers - composition and distribution

I Handleiding deeltjestellingen

Meetprocedure voor deeltjestellingen bij putten

In deze bijlage wordt de methode beschreven die gebruikt is bij het uitvoeren van de deeltjestellingen. Om er zeker van te zijn dat de deeltjesteller is staat is om nauwkeurig te meten is het allereerst nodig om de apparatuur goed schoon te maken. Hiermee kan de deeltjesafgifte door de deeltjesteller zelf worden geminimaliseerd. Verder zal in deze bijlage worden besproken welke informatie van te voren bekend moet zijn, hoe de apparatuur geïnstalleerd moet worden en hoe de deeltjestellingen uitgevoerd moeten worden.

1. Voorbereiding van de apparatuur

- Het schoonmaken van de apparatuur gaat het beste met behulp van een verdunde salpeterzuuroplosing van ongeveer 10%. Hiermee kunnen onder andere accumulaties van kalk en ijzerhydroxiden snel verwijderd worden uit de deeltjesteller.
- Laat deze oplossing gedurende 5 à 10 minuten circuleren door de deeltjesteller. Hiervoor kan het pompje worden gebruikt dat ook bij de metingen voor de juiste stroomsnelheid zorgt.
- Ook de slangen die gebruikt gaan worden kunnen mogelijk geaccumuleerd materiaal bevatten dat deeltjes af kan geven. Daarom is het aan te raden om bij het circuleren van de salpeterzuuroplossing door de deeltjesteller dezelfde slangen te gebruiken als die bij de metingen gebruikt gaan worden.
- Ook moet de overloop (zie verderop in dit protocol) die gebruikt wordt bij de deeltjestellingen worden gespoeld met salpeterzuur.
- Na 5 à 10 minuten circuleren moet het salpeterzuur worden verwijderd. Dit kan het beste worden gedaan door te spoelen met gefilterd (0.45 μm filter) kraanwater, omdat dat een bufferwerking heeft. Hierdoor worden zuurresten sneller geneutraliseerd. Bij gebruik van milli Q duurt het veel langer om de zuurresten te verwijderen.
- Het hele systeem (deeltjesteller, slangen en overloop) moet daarna korte tijd worden nagespoeld met milli Q om te voorkomen dat bestanddelen uit het kraanwater de kans krijgen om te accumuleren in het systeem (b.v. in de vorm van kalk).
- Nultelling. Als het goed is meet de deeltjesteller nu vrijwel geen deeltjes meer in het water dat langs stroomt. Zo niet, dan moet langer worden gespoeld met milli Q, en eventueel nogmaals met de verdunde salpeterzuur oplossing.

2. Informatie die bekend moet zijn voor een meting

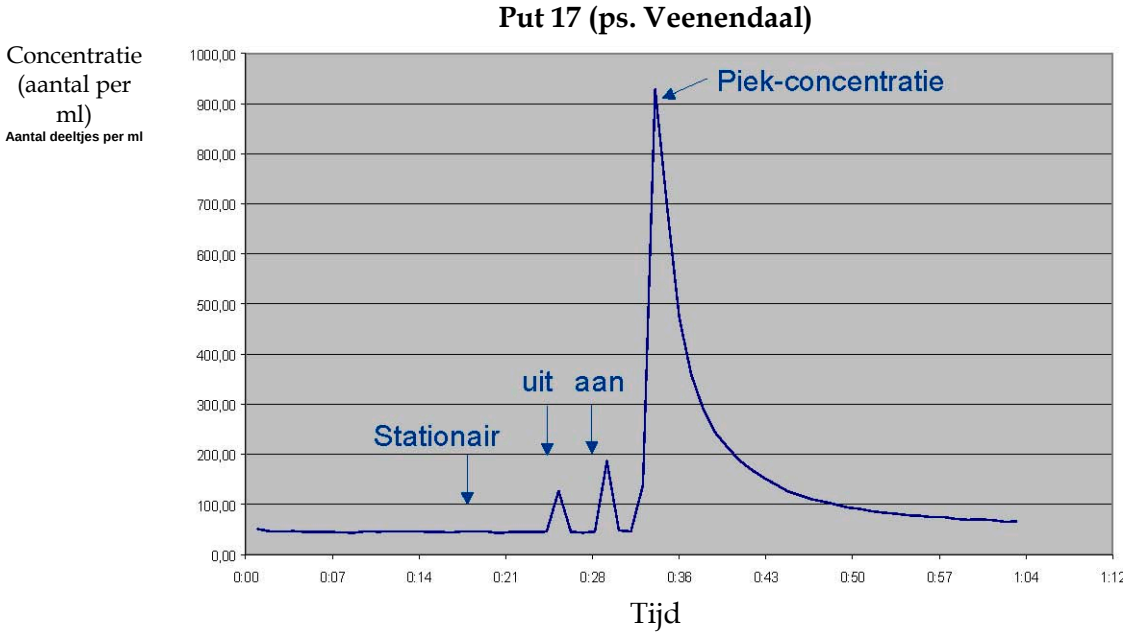
- Hoe lang (voor elke meting) was de put al in bedrijf, zonder tussendoor te hebben geschakeld. Tijdens de testmetingen bij pompstation Tull en 't Waal werd duidelijk dat het een aantal uren duurt voor er - na aanschakelen van de onderwaterpomp - een constante deeltjesconcentratie wordt bereikt. Daarom moet de put voor een deeltjestelling tenminste 3 uur continu in bedrijf zijn geweest.
- Om er (bijna) zeker van te zijn dat de te meten putten lang genoeg van te voren aangeschakeld, is het aan te raden om dit enkele dagen van te voren af te spreken met de machinist van het pompstation.
- Het type onderwaterpomp ("normaal" of van het type "slow-starter"). Bij

"normale" onderwaterpompen wordt na aanschakelen de maximale capaciteit in een (zeer) korte tijd bereikt. Slow-starters bereiken na aanschakelen niet direct hun maximale capaciteit. Bovendien is de uiteindelijke capaciteit van "slow-starters" instelbaar door de machinist van het pompstation, of door een computer die de bedrijfsvoering regelt.
- De capaciteit van de onderwaterpomp en het volume van de put. Deze parameters bepalen de reistijd van het onttrokken water van het putfilter naar het oppervlak. Het is handig om tijdens de metingen deze reistijden te weten, omdat ze van invloed zijn op de tijdduur van de metingen.

3. De installatie van de apparatuur bij een put
- Eerst moet ervoor worden gezorgd dat de put op handbediening is ingesteld en niet wordt aangestuurd door een computer. Dit voorkomt ongewenst schakelen van de put tijdens een meting.
- Voor de uitvoering van de deeltjestellingen moet de deeltjesteller worden aangesloten op de monsterkraan. Deze is in elke put aanwezig. Voordat dit wordt gedaan is het allereerst belangrijk om korte tijd de kraan volledig open te draaien, zodat een groot deel van eventueel in het kraanhuis geaccumuleerd materiaal kan worden afgevoerd. Daarna kunnen de slangen aan de kraan worden gekoppeld, maar nog niet de deeltjesteller. Bij elke meting moeten slangen van dezelfde lengte worden gebruikt. Dit zorgt ervoor dat bij elke meting de verblijftijd van het water in het meetsysteem constant is.
- Het is aan te raden om eerst nog enige tijd de slangen te laten doorspoelen met putwater. Mochten er toch nog wat deeltjes loskomen uit het kraanhuis, dan komen ze in ieder geval niet in de deeltjesteller terecht. In sommige gevallen is het mogelijk het uiteinde van de monsterkraan te vervangen door een verbindingsstuk (zelf meebrengen) tussen de rest van de kraan en de slangen. Dit zorgt voor een betere verbinding en bovendien kan het verbindingsstuk van te voren worden schoongemaakt.
- In de tussentijd kan de deeltjesteller worden klaargezet en aangesloten op de computer.
- Daarna kan ook de deeltjesteller en het pompje op de slangen worden aangesloten. Om ervoor te zorgen dat de stroming door de deeltjesteller tijdens de metingen op 100 ml/minuut blijft, moeten een overloop en een pompje worden gebruikt. Het water uit de put komt dan eerst in de overloop terecht. Dit gebeurd onder de druk van de put zelf. De hoeveelheid die op deze manier per minuut door de overloop stroom is enkele liters per minuut. Met behulp van het pompje kan vervolgens de gewenste hoeveelheid water (=100 ml/min) uit de overloop worden onttrokken. Het pompje moet altijd na de deeltjesteller worden geïnstalleerd om eventuele afgifte van deeltjes te voorkomen. Bovendien is het pompje gevoelig voor drukveranderingen. Daarom is het aan te raden het pompje boven de deeltjesteller te installeren en de overloop op gelijke hoogte met het pompje. Dit draagt bij aan een constantere stroming.

4. Het uitvoeren van deeltjestellingen bij putten

- Een voorbeeld van het verloop van de concentratie tijdens een deeltjestelling bij een put is te zien in figuur A.



Figuur A: Voorbeeld van het verloop van de deeltjesconcentratie tijdens een deeltjestelling, uitgevoerd volgens de meetprocedure.

- Eerst moet een constante deeltjesconcentratie gemeten worden. Dit duurt meestal ongeveer een half uur, maar deze tijd hangt vooral af van de putconstructie en de hoeveelheid geaccumuleerd materiaal in de monsterkraan.
- Als de concentratie gedurende tenminste 5 (, maar zo mogelijk 10-15) minuten constant is, kan de pomp in de put worden uitgeschakeld. Dit kan "op afstand" worden gedaan door de machinist, of met behulp van de stroomschakelaar in de put. In beide gevallen is het belangrijk om de tijd van uitschakelen te noteren. Het uitschakelen kan leiden tot een deeltjespiek uit de monsterkraan (zie fig. 1).
- Vervolgens kan de put na enkele minuten weer worden aangeschakeld. Ook hiervan moet de tijd genoteerd worden. Het aanschakelen zal na een aantal minuten leiden tot de meting van een deeltjespiek uit de omgeving van het putfilter (zie fig. A). Het aanschakelen kan opnieuw zorgen voor een deeltjespiek uit de monsterkraan (zie fig. A).
- Nadat de onderwaterpomp weer is ingeschakeld, is het aan te raden om tenminste nog 15-20 minuten te blijven meten om ook de vorm van de concentratiepiek (zie fig. A) vast te leggen. De meettijd na aanschakelen is afhankelijk van de diepte van de put, de onttrekkingscapaciteit van de onderwaterpomp en het volume van de put. Bij diepe putten met een groot volume moet langer gemeten worden dan de ondiepe putten met een klein volume.
- Tijdens de metingen is het belangrijk om alle bijzonderheden te noteren, met de tijd waarop ze plaatsvonden. Een voorbeeld hiervoor is het voorkomen van luchtbellen tijdens een meting. Deze kunnen namelijk als "deeltjes" worden geteld.

II Brochure PAMAS Waterviewer

PAMAS
PARTIKELMESS- UND ANALYSESYSTEME GMBH

WaterViewer

On-line particle counter for liquids, Water quality control measurements

Particle measurement system with built-in sensor, flow control, and sampling system.

Volumetric cell design of PAMAS sensors guarantees highest accuracy, resolution, and best statistics.

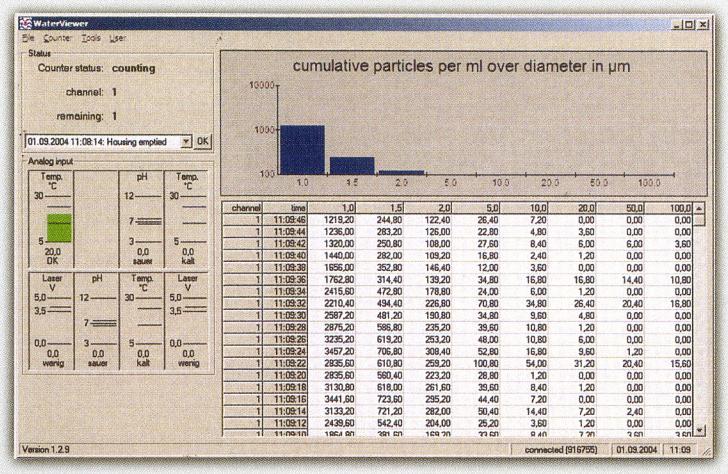
Optional features:

- Networking capabilities
- Expandable to 8 - 32 waterlines using automatic multiplexer unit
- Automated sensor cleaning
- Multiple analogue and digital I/O
- Signal light for status and alarm

Standard features:

- Programming capabilities make the system as versatile as a PLC
- True single particle counting
- Fully automated operation
- RS-422 serial communication port
- Standard size range: 1 - 200 µm (800 µm)
- Particle concentrations from 0 up to 200,000 p/ml
- Different dynamic range sensors available
- System easily connected to analogue and digital devices

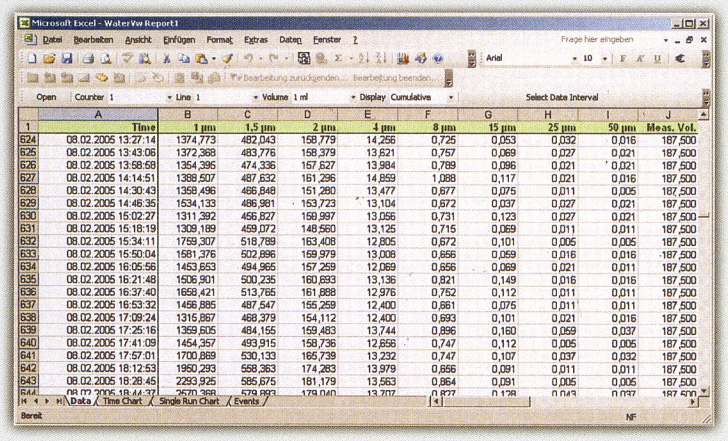
Software - Easy to Operate & User Friendly



Simple to Setup and Easy Data Download

Making life as trouble-free as possible -
This was the concept when designing the software. Just a few operator steps are required to do the PAMAS WaterViewer setup.

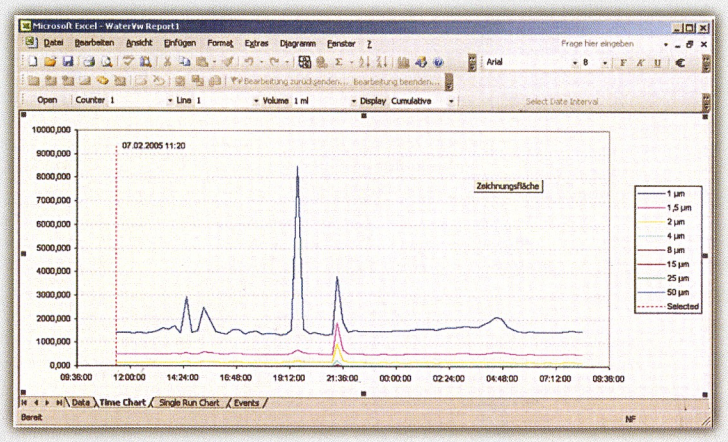
The PAMAS WaterViewer can be run without a PC connected permanently as it is capable of storing more than 2,000 data sets in its internal ring-buffer memory for later download to a PC for analysis by the software. This Download itself is plug-and-play.



Easy Data Import

Large amounts of data can be handled using the Excel® Macro software delivered with each system.
The software macro can be installed on as many computers as you need so that data sampling and analysis can be performed on many computer systems.

Experienced Excel users may make changes to the macro to suit their special needs or PAMAS are happy to make changes to meet customer requirements.



Trends and Events made Visible

Raw data in column format are not easy to interpret.
A graphical trend of the count data makes the results clear at first glance. Trend monitoring can be set-up with just a few mouse clicks. Just select the data you want to visualize. Your weekly reports are then easily produced by importing the Excel data into your word processor.

PAMAS recommends to install a SFU for on-line water systems

System options available:

Suction WaterViewer base system:	WV-S
Pressurized WaterViewer base sys.:	WV-P
Sensor:	15 - 25 - 50 - 100
Sensor Flushing Unit:	SFU
Inlet Multiplexer 4:	4MuX
Inlet Multiplexer 8:	8MuX
Analogue-to-Digital Converter 8 conn.:	ADC
Digital-to-Analogue Converter 4 conn.:	DAC
Programmable Logic Control conn.:	PLC
Signal Tower (for alarms):	TOW

Example for an order:

WV-P-50-SFU-4MuX-ADC-ADC-PLC as order code.

Refer to technical data, page 4.

Global Power
Local Presence

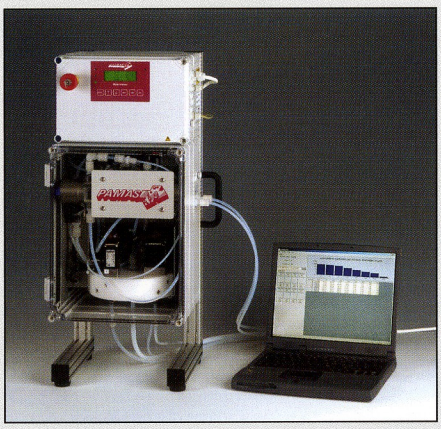
Modular Design - User Benefits

Cost-Effective Multiplexer

When combined with the optional Waterline Input Multiplexer (Shown: 4MuX; White disk inside the bottom housing), the PAMAS WaterViewer is a very economic system for sequentially sampling multiple water sources.

The Multiplexer Unit is easily flushed to remove contamination within a few minutes. The optional Sensor Flushing Unit protects the sensor from possible blockages, e.g. as a result of mixing water coming from different sources. Therefore high concentration of iron or manganese is no longer a cause for frequent maintenance.

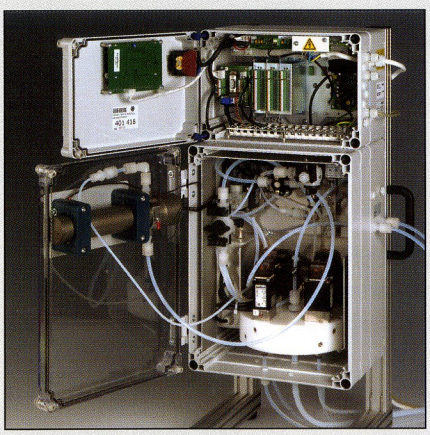
The result is reliable unattended operation for long periods of time at a low cost per waterline.



If Mobility Matters

Whilst the system is designed for wall-mount operation, the PAMAS WaterViewer is also available with an aluminium mounting rack as shown.
This makes it a highly mobile system, for in-house or outdoor measurements including wells and settling basins.
The IP 65 housing protects against ingress of water spray and rainfall.

The PAMAS WaterViewer also performs well with other liquids - Please ask for details.



Easy Service

The modular design of the system makes it easy to service and maintain.
Two separate housings for the electronics and hydraulics reduce the risk of damage caused by any internal water leaks.
Easy access to all electronic parts, sensor and the multiplexer help to keep service costs low.
High-quality plastic and stainless steel fittings protect against corrosion.
This ensures long-term stability of measurements and protects your investment. PAMAS offers service contracts and service on demand, at reasonable cost and with short response times.
The system is designed to run 24h/365d per year.

Please ask for details.

Some short information on sensitivity and particle number concentration:

A single spherical particle of 1 micron in diameter has a volume of 5.236×10^{-13} ml.

A single 1 micron particle detected per milliliter therefore is 0.5236 ppt (parts per trillion).

PAMAS particle counters even can measure much lower concentrations, starting from zero.

Complete water analysis, trend monitoring, and data storage

PAMAS
PARTIKELMESS- UND ANALYSESYSTEME GMBH

The PAMAS WaterViewer is more than just a particle counter. In reality it is a measurement system, that detects and sizes particles, and can be integrated into nearly any type of measurement system, that includes analogue or digital signalling. It can automatically respond to out of limit conditions, i.e. change measurement routines in respect of measurement results already obtained.

Multiple I/O channels make it as versatile as a PLC.

Many WaterViewers can be combined on a network of measurement devices that control a complete water treatment plant.

MultiplexUnit and SensorFlushUnit are available - running under full control of the WaterViewer. So a single measurement system can work on up to 32 water sources (or even more). Contamination debris build-up in the sensor can be removed automatically and is reported to the user.

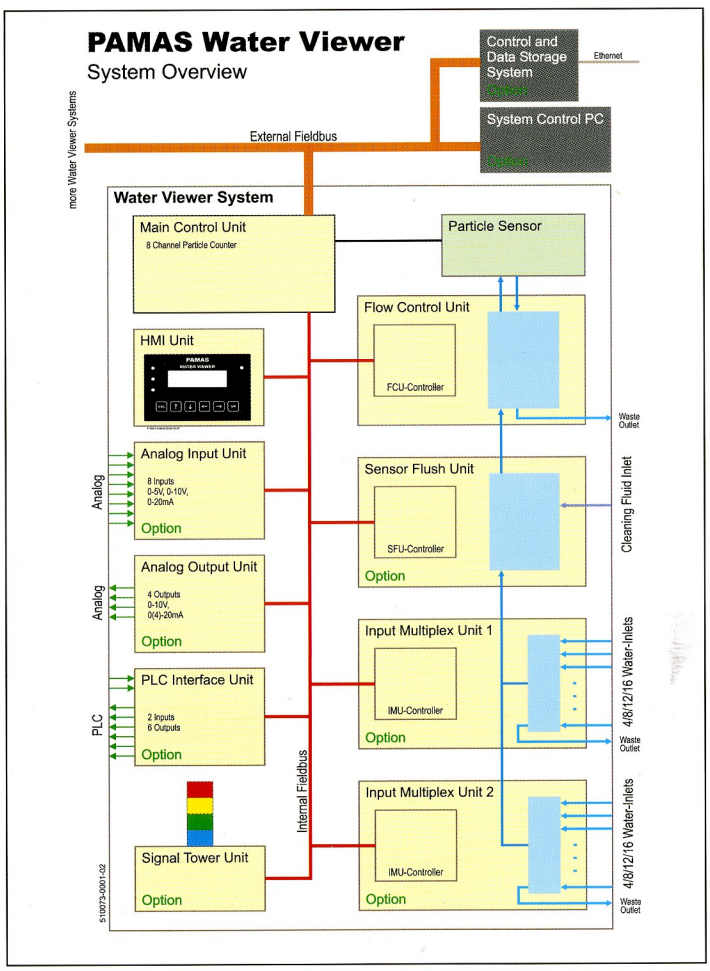
This provides a previously unheard of flexibility in use - and is the best solution for water quality measurements available today.

The PAMAS WaterViewer has been designed to be modular making it easy to adapt to the user's changing requirements.

PAMAS-utilization of volumetric flow-cells guarantee that each particle passing through the sensor will be detected, counted and sized.

Calibration of sensors
Pulse height calibration with latex standards, according to ANSI/NFPA T2.9.6R1-1990 and ASTM F 658-80.

- Particle analysis in up to 8 size channels simultaneously
- Data storage in internal ring-buffer memory and long-term storage on external computer
- Constant flow rate through sensor by metering pump
- Communication ports for connection of system to external computer
- Flexible & programmable
- Can act as a PLC (option)
- Automated sensor flushing (option) removes deposited debris
- Safety features for unattended long-term use
- Easy to connect
- Data storage in standard data format
- 21 cfr part 11 (option)



Technical data

Sampling system:
metering pump, wear resistant ceramic piston and cylinder

Counter system:
WaterViewer, 8 size ranges

Power:
90 -240 V AC, 50 - 60Hz
12 - 30 V DC

Sensors:

HCB-LD-15/25
Size range: 1–100 µm
Max. particle concentration:
200,000 p/ml at 10 ml/min

HCB-LD-25/25
Size range: 1–200 µm
Max. particle concentration:
120,000 p/ml at 10 ml/min

HCB-LD-50/50
Size range: 1–400 µm
Max. particle concentration:
24,000 p/ml at 25 ml/min

HCB-LD-100
Size range: 2–800 µm
Max. particle concentration:
1,200 p/ml at 50 ml/min

(All concentrations given at 7.8% coincidence.)

Housing:
IP 65

Relative humidity:
0 - 100%, even condensing

Pressure range:
0.5 - 4 bar
(specially designed suction system available)

Size and Weight
(W x H x D) in mm
Single Water Line
300 x 400 x 242
approx. 11 kg

with MuX
300 x 600 x 242
4 MuX appr. 16 kg
8 MuX appr. 17 kg

PAMAS HEAD OFFICE
Dieselstraße 10
D-71277 Rutesheim
Phone +49 7152 99 63 0
Fax +49 7152 54 86 2
E-mail info@pamas.de

PAMAS USA
1408 South Denver Avenue
Tulsa, OK 74119 USA
Phone +1 918 743 6762
Fax +1 918 743 6917
E-mail ClayBielo@earthlink.net

PAMAS FINLAND
JHC, Hirsalantie 11
FIN-02420 Jorvas
Phone +358 9 299 6886
Fax +358 9 299 6887
E-mail esko.niiranen@pamas.de

PAMAS BENELUX
Battelsesteenweg 455 A
B-2800 Mechelen
Phone +32 15 28 2010
Fax +32 15 28 2009
E-mail paul.pollmann@pamas.de

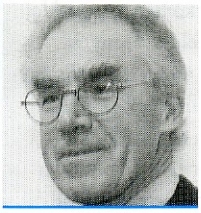
Please visit our website at www.pamas.de

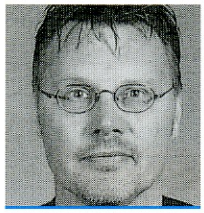
® Registered trademarks are properties of their individual owners. All specifications are subject to change without notice.

04/2005-3000-E

III Artikel H2O Putschakelen en verstopping

Beek, van, et al, 2004





Frequent schakelen voorkomt mechanische putverstopping

Kees van Beek, Kiwa Water Research
Ate Oosterhof, Vitens Watertechnologie
Rob Breedveld, Hydron Advies & Diensten
Bert-Rik de Zwart, TU Delft

Waterleidingbedrijven en kennisinstituten verrichten gezamenlijk onderzoek naar de oorzaken van mechanische putverstopping en maatregelen om die verstopping te verwijderen of te voorkómen. Dit heeft een vernieuwende werkhypothese opgeleverd. Mechanische verstopping (verstopping van de boorgatwand) wordt veroorzaakt door deeltjes die vastlopen op de overgang van formatie naar omstorting. Op basis van gegevens van onder andere de puttenvelden Boerhaar, Heel, Noordbergum en Tull en 't Waal blijkt dat verstopping te beheersen is door regelmatig te schakelen. De noodzakelijke schakelfrequentie is daarbij afhankelijk van de capaciteit van de onderwaterpomp, de concentratie deeltjes in het onttrokken grondwater en lokale omstandigheden, zoals de weerstand op de overgang van formatie naar omstorting en de aard van de verstoppende deeltjes.

Hét grote probleem bij grondwateronttrekking is de verstopping van pompputten en dan vooral mechanische verstopping. Deze verstopping ontstaat als deeltjes, die van nature in het grondwater aanwezig zijn, achterblijven op de boorgatwand (de overgang van formatie-omstorting) en daar de poriën verstoppen. Sinds 2000 verrichten Brabant Water, Hydron, Vitens, WML, IF Technology, HoekLoos, TU Delft en Kiwa Water Research hiernaar onderzoek, dat mede ondersteund wordt door het Ministerie van Economische Zaken in het kader van het BTS-subsidieprogramma[1),2),5)]. Bij de start van het onderzoek bestond het beeld dat mechanische putverstopping alleen optreedt als deeltjes in het grondwater aanwezig zijn. Deeltjestellingen wijzen echter uit dat ook het grondwater op niet-verstoppende puttenvelden deeltjes bevat. Blijkbaar is de verklaring voor het wel of niet verstoppen van putten gecompliceerder.

Stijghoogtemetingen gedurende bedrijfsvoering

Enkele jaren geleden begon WML met langdurige hoogfrequente metingen van de waterstand in pompputten. Reden daarvoor was het vermoeden dat door deze manier van meten meer en beter inzicht zal ontstaan in de effecten van bedrijfsvoering - met name schakelen van de onderwaterpomp - op putverstopping. Dit fenomeen is als één van de hypothesen binnen het BTS-project opgenomen[3)]. Vervolgens zijn ook andere bedrijven overgegaan op hoogfrequente metingen van de grondwaterstand. Dataloggers registreren meerdere keren per dag de waterstand in de put. Tot op heden werden deze waterstanden handmatig en daarom minder frequent gemeten. Voordeel van hoogfrequente metingen is dat het nu mogelijk is de bedrijfsvoering, en dan met name het aan- en uitschakelen van de pompput, goed te volgen[4)].

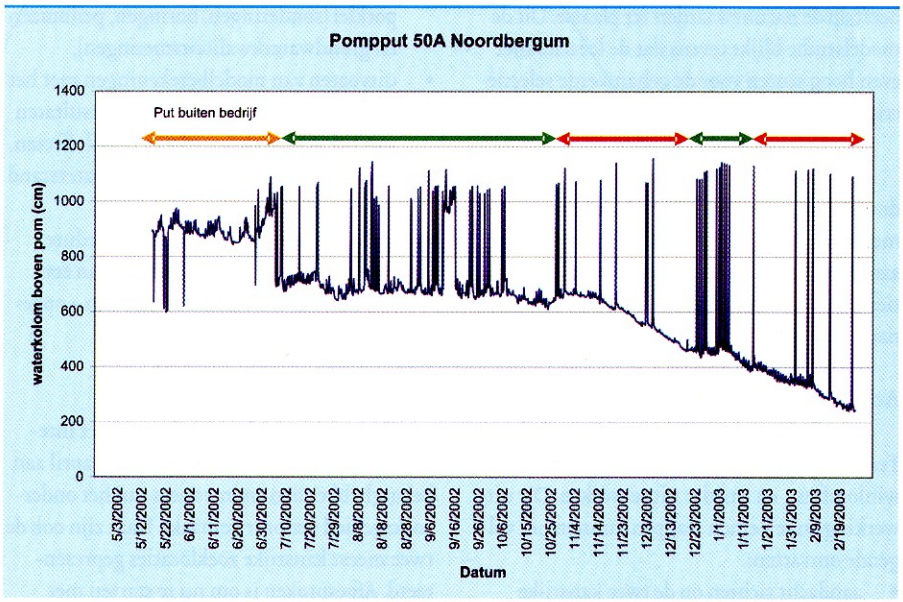
Afbeelding 1 toont het verloop van de waterstand in put 50A van puttenveld Noordbergum (Vitens Friesland) van mei 2002 t/m februari 2003. Door de frequente metingen is het uitschakelen (ruststand, de hogere pieken) en aanschakelen (bedrijfsstand, de onderste meer doorlopende lijn) van de onderwaterpomp goed te volgen. De interessante periode begint omstreeks juli 2002. Goed te zien is dat in perioden van frequent schakelen, gekenmerkt door afwisselende rust- en bedrijfswaterspiegel, de waterstand tijdens bedrijf min of meer gelijk blijft. Bij minder frequent schakelen, gekenmerkt door een lang aanhoudende bedrijfswaterspiegel, daalt de waterstand. De toename van het verschil in waterstand tijdens bedrijf en rust duidt op het optreden van putverstopping. Wat verder opvalt, is dat in perioden van frequent schakelen de opgetreden verstopping niet wordt weggenomen.

Wat gebeurt er in de put?

Blijkbaar gebeurt er bij het aanschakelen van de onderwaterpomp iets wat verstopping tegengaat. Reden om ons te verdiepen in het aanschakelen van onderwaterpompen. Afbeelding 2 toont het verloop van de concentratie van zwevend materiaal in het onttrokken grondwater tijdens het aanschakelen van put 26 op puttenveld Tull en 't Waal (Hydron Midden-Nederland).

Opvallend in afbeelding 2 is de steeds terugkerende gelijkvormigheid van het verloop van de concentratie deeltjes na het aan-

Afb. 1: Verloop van de stijghoogte in put 50A op het puttenveld Noordbergum. Vóór juli 2002 wordt de stijghoogte beïnvloed door een nabij gelegen put. Gedurende perioden met frequent schakelen blijft de stijghoogte tijdens bedrijf min of meer constant. Bij minder frequent schakelen daalt deze stijghoogte.

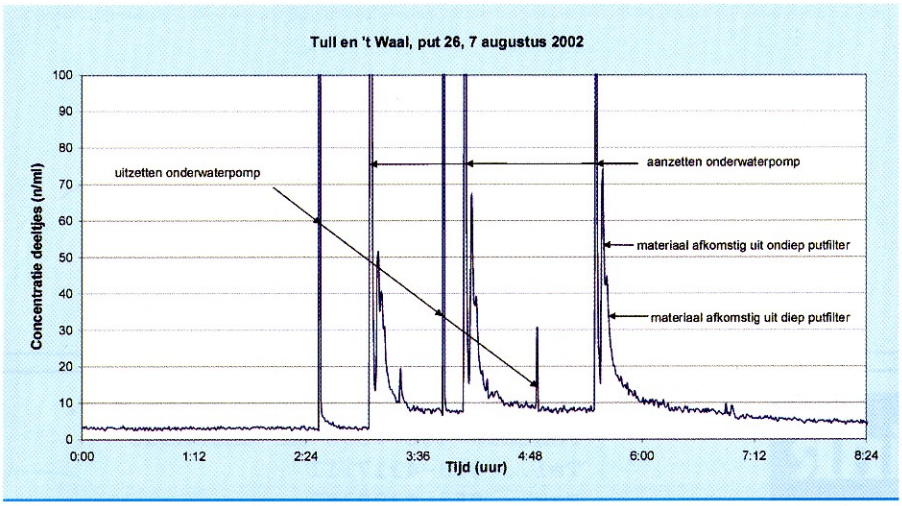


schakelen van de onderwaterpomp; de metingen zijn reproduceerbaar en representatief voor een verschijnsel dat iedere keer bij het aanschakelen optreedt. Bij het uit- en aanschakelen van de onderwaterpomp wordt een piek in de concentratie gemeten: door het aanschakelen van de onderwaterpomp wordt aangehecht materiaal in pomp, stijgleiding, monsterkraan en monsterslang los gemaakt. Vervolgens wordt een concentratiepiek gemeten, waarvan de aankomsttijd samenvalt met de verblijftijd van het water in de waterkolom boven het putfilter. Put 26 is uitgerust met twee putfilters; dit zien we terug in twee pieken afkomstig van respectievelijk het ondiepe en het diepe putfilter. Door het aanschakelen van de onderwaterpomp wordt het water in de omgeving van de put in versnelling gebracht. Deze versnelling resulteert in een grotere schuifspanning op de bodemmatrix, waardoor geaccumuleerd materiaal losraakt.

Bij de deeltjesmeting wordt naast de concentratie ook de korrelgrootteverdeling gemeten. Afbeelding 3 toont de korrelgrootteverdelingen tijdens de periode die in afbeelding 2 is weergegeven.

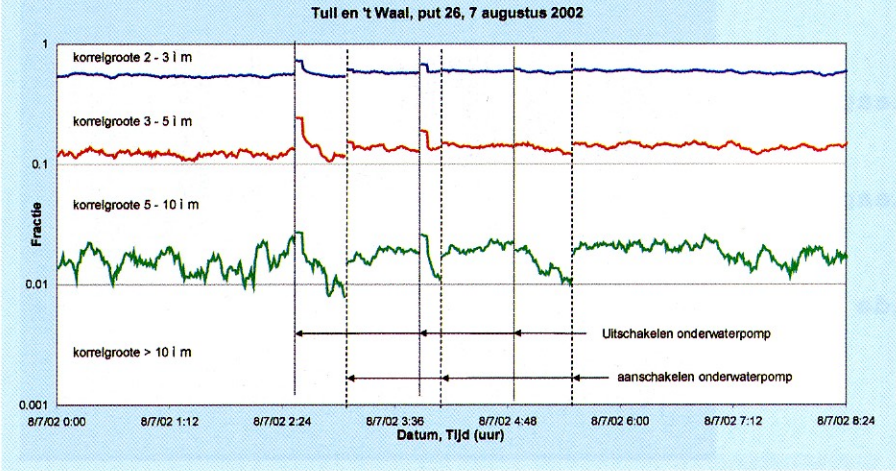
Uit afbeelding 3 blijkt dat de korrelgrootteverdeling gedurende enige tijd na het aanschakelen iets naar de grove fractie verschuift: vlak na het aanschakelen is de fractie deeltjes met een diameter van meer dan 10 µm groter dan 0,01, terwijl voor het schakelen regelmatig waarden van minder dan 0,01 worden gemeten. Tijdens het aanschakelen van de pomp wordt materiaal van de boorgatwand verwijderd dat daar gedurende de voorafgaande onttrekkingsperiode is geaccumuleerd. Indien al het materiaal dat gedurende deze voorafgaande periode is geaccumuleerd wordt verwijderd, zal geen putverstopping optreden; indien slechts een gedeelte wordt verwijderd, zal wel putverstopping optreden.

Tijdens het onttrekken van grondwater worden deeltjes meegevoerd die accumuleren op de boorgatwand. Hierdoor verstoppen de poriën en wordt de toestroming naar de put bemoeilijkt, wat zich onder andere uit in een verlaging van de stijghoogte. Tijdens de onttrekkingsperiode blijven die deeltjes 'vast' zitten op de boorgatwand, omdat steeds water naar de put blijft stromen en die nieuw aangevoerde deeltjes de vastzittende deeltjes als het ware vast drukken. Als de put wordt uitgeschakeld, stroomt geen water meer naar de put en komt een deel van de deeltjes 'los' te zitten: er is geen druk meer om ze op hun plaats te houden. Bij het weer aanschakelen van de put zullen deze 'losse' deeltjes grotendeels met het dan onttrokken grondwater worden verwijderd, waarmee het verstoppende materiaal verdwijnt. De vraag is waarom die deeltjes nu wél door de poriën worden getrokken en tijdens de 'gewone' bedrijfsvoering niet.



Afb. 2: *Concentratieverloop van deeltjes tijdens het schakelen van put 26, puttenveld Tull en 't Waal (Hydron Midden-Nederland). Het aanschakelen van de onderwaterpomp wordt gekenmerkt door drie opeenvolgende pieken in concentratie: de eerste piek bestaat uit losgeraakt materiaal uit de monsterkraan of onderwaterpomp, de tweede piek bestaat uit materiaal afkomstig uit het ondiepe putfilter en de derde piek uit materiaal uit het diepe putfilter. De concentratie nadert vervolgens de evenwichtswaarde. Het uitschakelen van de onderwaterpomp wordt gekenmerkt door een vlak verloop.*

Afb. 3: *Verloop van de korrelgrootteverdeling tijdens het aanschakelen van put 26 op puttenveld Tull en 't Waal. De lijnen geven het moment van aan- en uitschakelen van de pomp weer. De fractie van deeltjes met een korrelgroote van meer dan 10 µm is iets groter dan 0,01, deeltjes van meer dan 5µm iets groter dan 0,1. Het verschil tussen beide geeft de fractie aan met een diameter tussen 5 en 10 µm. Enzovoorts.*



Waaruit bestaat het verstoppend materiaal?

Uit onderzoek van Timmer et al.[6]) is bekend dat het verstoppend materiaal uit organisch materiaal, klei en minerale delen als kwarts en kalk bestaat. Organisch materiaal en klei zijn vervormbaar in tegenstelling tot minerale delen. Mogelijk levert het weer aanschakelen van de onderwaterpomp voldoende impuls om organisch materiaal en kleiplaatjes zodanig te vervormen dat het door de poriehalzen wordt gesleurd. Bij accumulatie van minerale (niet vervormbare) deeltjes op de boorgatwand kan verstopping veroorzaakt worden, doordat één deeltje de voorliggende poriehals niet kan passeren of doordat brugvorming van meerdere kleine deeltjes optreedt. Bij het uitschakelen van de onderwaterpomp kunnen deeltjes zich herpositioneren en vallen bruggen uit elkaar. Bij het weer aanschakelen van de pomp kunnen de betreffende deeltjes mogelijk wel worden afgevoerd.

Optimum tussen capaciteit en schakelfrequentie

In het voorgaande is aangegeven dat mechanische putverstopping door regelmatig schakelen kan worden beheerst. Uit het onderzoek binnen het project 'Putverstopping' blijkt dat onder andere putconstructie, -aanleg en -ontwikkeling een rol spelen. Het is nu zaak kennis te ontwikkelen waarmee voor iedere

individuele put de bedrijfsvoering kan worden bepaald waarbij het optreden van verstopping wordt voorkómen dan wel geminimaliseerd. Dat kan door het optimum te zoeken tussen belasting van de put met deeltjes (het product van onttrekkingscapaciteit en deeltjesconcentratie) en schakelfrequentie. Binnen het bedrijfstakonderzoek én het BTS-project 'Putverstopping' wordt op dit moment gewerkt aan een eenvoudig instrument om dit optimum te bepalen. ¶

LITERATUUR

1) Van Beek C. (2002). Mechanische putverstopping: oorzaak, preventie en kostenbesparing. H_2O nr. 18, pag. 37-39.
2) Van Beek C. (2000). Deeltjes in onttrokken grondwater, niet verstoppende puttenvelden. Kiwa BTO 2000-182(c).
3) Juhász-Holterman M. (2002). Projectplan werkpakket 6: bedrijfsvoering. BTS-project 'Putverstopping'.
4) Juhász-Holterman M., Marc Balemans en Chris Jansen (2004). Beter inzicht in putverstopping door hoogfrequente stijghoogtemetingen. H_2O nr. 17, pag. 29.
5) Prins Jeroen, Bert-Rik de Zwart en Kees van Beek (2004). Betrouwbare deeltjestellingen, stap voorwaarts in putverstoppingsonderzoek, H^2 nr. 1, pag. 24.
6) Timmer H., J. Verdel en A. Jongmans (2000). Verstopping putten door van nature aanwezig materiaal. H_2O nr. 20, pag. 24-26.

advertentie

Epimid Vorrink

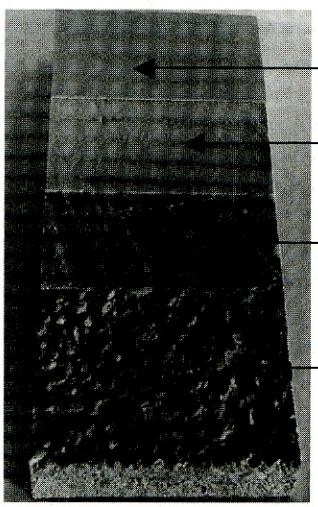
Epimid Vorrink Kunststoffen B.V.
Postbus 468-7500 AL Enschede
Tel.: 053-4317111
Fax.: 053-4309357

Productie en verwerking uit één hand
Nieuw gecertificeerd voor minerale ondergronden

Nieuw Kiwa productcertificaat:

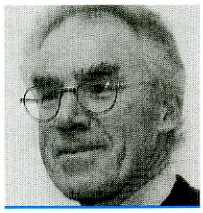
BRL-K19002 (nr.: K22416/01)

Beschermingssystemen op minerale ondergronden t.b.v. drinkwatertoepassingen



IV Artikel H2O Betrouwbare deeltjestellingen

Prins et al, 2004



Betrouwbare deeltjestellingen: een stap voorwaarts in putverstoppingsonderzoek

JEROEN PRINS, KIWA WATER RESEARCH
BERT-RIK DE ZWART, TU DELFT / KIWA WATER RESEARCH
KEES VAN BEEK, KIWA WATER RESEARCH

In het kader van het door Senter gesubsidieerde putverstoppingsonderzoek voerde Kiwa Water Research onderzoek uit naar de aanwezigheid van zwevend materiaal in onttrokken grondwater van pompputten (zie H₂O nr. 24/2001, pag. 8-9). Het doel was tweeledig: een relatie aantonen tussen mechanische verstopping van pompputten en de aanwezigheid van zwevend materiaal én verband leggen tussen de geologie van watervoerende pakketten en de aanwezigheid van zwevend materiaal. Hiervoor is een methode ontwikkeld om zwevend materiaal in onttrokken grondwater te meten. Metingen bij 57 putten, verspreid over elf puttenvelden in Nederland, laten zien dat een verband bestaat tussen de concentratie zwevend materiaal en het vóórkomen van putverstopping. Overtuigend bewijs voor een relatie tussen de geologie en de concentratie van zwevend materiaal is niet gevonden.

Al enige jaren vormt putverstopping een belangrijk onderzoeksthema voor de waterbedrijven. Eerder onderzoek van Kiwa naar het optreden van putverstopping wees uit dat bij een groot deel van de pompputten voor de drinkwaterwinning in Nederland mechanische verstopping optreedt[1]. Deze vorm van putverstopping leidt tot hoge kosten (energie en regeneraties) voor waterleidingbedrijven. Putverstopping brengt de bedrijfszekerheid in gevaar en leidt tot voortijdige vervanging van pompputten. Van Beek[2] stelt dat mechanische verstopping wordt veroorzaakt door accumulatie van deeltjes op de boorgatwand als aan twee voorwaarden wordt voldaan: er zitten deeltjes in het grondwater en er is een barrière tussen de omstorting en de formatie. Een deel van de deeltjes wordt dan ter plaatse van de boorgatwand afgevangen en verstopt de pompput. Deze barrière kan ontstaan tijdens de aanleg van een put, wanneer resten van de boorspoeling achterblijven in poriën rond het boorgat.

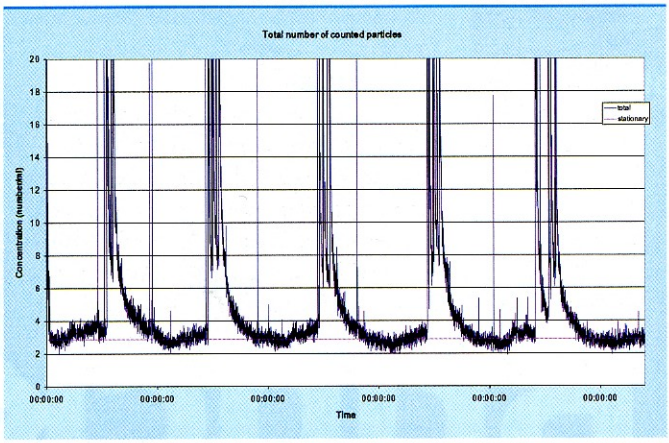
Over de oorsprong, grootte, samenstelling en concentratie van het zwevende materiaal is nog weinig bekend. Het onderzoek van Timmer e.a.[3] vormt het enige aanknopingspunt wat betreft de samenstelling en herkomst van het afgezette materiaal. Het zwevende materiaal in grondwater dat verantwoordelijk lijkt te zijn voor mechanische putverstopping, bestaat uit deeltjes met een diameter van ongeveer één tot honderd micrometer. De geaccumuleerde deeltjes zijn van nature aanwezig in het grondwater en bestaan voornamelijk uit formatiemateriaal[3],[4].

Het onderzoek naar de aanwezigheid van deeltjes had tot doel om een betrouwbare meetmethode te ontwikkelen voor veldonderzoek, een relatie te vinden tussen deeltjes en geologie (lithologie), tussen de concentratie deeltjes en het vóórkomen van putverstopping én de relatie tussen onttrekkingsnelheid in het pakket en deeltjesconcentratie verder te onderzoeken.

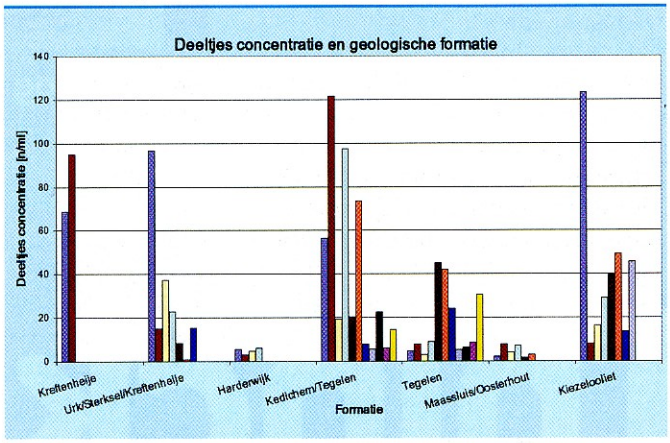
Een betrouwbare meetprocedure

Metingen aan deeltjes in onttrokken grondwater van pompputten zijn eerder verricht[5]. Uit de evaluatie van verschillende van deze metingen bleek, dat deze onvoldoende vergelijkbaar en reproduceerbaar te zijn. Om goede metingen te kunnen verrichten voor dit onderzoek is een apparaat nodig waarmee niet alleen deze eigenschappen worden bereikt, maar ook eenvoudig, snel en nauwkeurig de concentratie van zwevend materiaal in grondwater kan worden gemeten. Een dergelijk meetapparaat moet deeltjes met groottes in het gewenste meetbereik (1 à 100 micrometer) kunnen meten. Verder moet het geschikt zijn om het tijdsverloop van lage deeltjesconcentraties te meten. Een deeltjesteller met lichtblokkade-mechanisme bleek hiervoor het meest geschikt te zijn. Dit apparaat detecteert deeltjes met behulp van een laserstraal en een lichtgevoelige cel en verdeelt ze in een aantal

Afb. 1: *Verloop van de concentratie van zwevend materiaal (Ø groter dan 2µ) tijdens een continue testmeting gedurende vijf dagen op put 26 op puttenveld Tull en 't Waal (Hydron Midden-Nederland).*

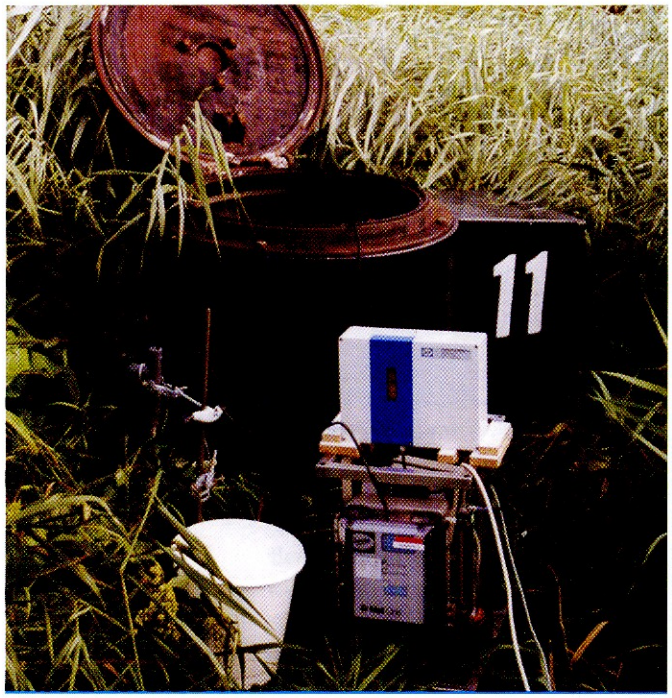


Afb. 2: *Relatie tussen geologische formatie en deeltjesconcentratie bij normale bedrijfsvoering.*



Meetprocedure veldmetingen

- Zorg dat alle meetapparatuur en slangen van te voren gereinigd zijn;
- Voor elke meting moet een put minimaal drie uur in bedrijf zijn geweest en de monsterkraan hebben gelopen. Dan kan de stationaire concentratie worden gemeten. Hierbij moet de deeltjesconcentratie gedurende minimaal 15 minuten constant blijven;
- Om de concentratiepiek afkomstig uit de omgeving van het putfilter te kunnen meten, is het nodig om de put een keer uit en aan te schakelen. Door de drukgolven die opgewekt worden door het abrupt uit- en aanschakelen van de onderwaterpomp, kunnen korte deeltjespulsen uit de omgeving van de monsterkraan vrijkomen. Enkele minuten na het aanschakelen arriveert een deeltjespiek uit de omgeving van het putfilter/boorgatwand. Deze piek kan mogelijk extra informatie opleveren over mechanische verstopping. Binnen dit onderzoek is hieraan geen aandacht besteed;
- Na het bereiken van de piekconcentratie moet nog enige tijd worden gemeten om ook de vorm van de afname te kunnen meten.



Veldopstelling in puttenveld Rodenhuis.

klassen. Deze deeltjesteller is gemakkelijk aan te sluiten op de monsterkraan van een put, waardoor het niet nodig is om ingrijpende veranderingen aan de put uit te voeren voor een meting. Omdat ook andere deeltjes geregistreerd zullen worden, die niet afkomstig zijn uit het watervoerend pakket, is het belangrijk om steeds dezelfde, betrouwbare meetmethode te gebruiken. Daarmee kan het effect van de 'verstorende' deeltjes op de meetresultaten worden geminimaliseerd (bijvoorbeeld het effect van deeltjes uit de monsterkraan). De ontwikkelde procedure is getest tijdens een veldexperiment op het puttenveld Tull en 't Waal (Hydron Midden-Nederland). Afbeelding 1 toont het resultaat van een continue meting gedurende vijf dagen.

De hoge pieken in afbeelding 1 zijn veroorzaakt door het aan- en uitschakelen van de onderwaterpomp tijdens het spoelen van de filters in het zuiveringsgebouw. De put stond vooraan in de bedrijfsvoering, zodat hij nagenoeg continu in bedrijf was en alleen in de vroege ochtend een paar keer schakelde. Na elke schakelperiode bleek de deeltjesconcentratie naar een constante waarde te gaan. Deze stationaire concentratie is in de grafiek aangegeven met een horizontale lijn. Deze stationaire concentratie wordt als representatief voor het onttrokken grondwater beschouwd. Na het schakelen van de put duurde het altijd enkele uren voordat deze concentratie bereikt werd. Nadat testmetingen waren uitgevoerd, is een definitieve meetprocedure opgesteld (zie kader).

Metingen op locatie

Vervolgens zijn metingen uitgevoerd bij 57 putten op elf puttenvelden, tijdens de normale bedrijfssituatie. Voor de selectie van de putten(velden) is een aantal criteria gehanteerd: voldoende informatie over de hydrochemie, lithologie van het watervoerend pakket, putconstructie en bedrijfsvoering, voldoende spreiding van geologische pakketten voor het onderzoek naar de relatie tussen geologie en aanwezigheid van deeltjes, geen putten die zelf deeltjes zouden kunnen afgeven (hout, roodkoper) en een voorkeur voor putten met een kort putfilter, zodat duidelijk is aan welk pakket wordt onttrokken.

De metingen zijn uitgevoerd bij 39 verstoppende en 18 niet-verstoppende putten. In alle gevallen bleek het onttrokken grondwater zwevend materiaal te bevatten. De concentratie van deeltjes groter dan 2µ varieerde van één tot 120 deeltjes per ml. De resultaten zijn verwerkt in een matrix met alle gegevens over watervoerend pakket, putconstructie, hydrochemie en bedrijfsvoering. Met behulp van deze matrix zijn tientallen variabelen, onder andere de concentraties ijzer en cadmium, de stroomsnelheid in watervoerend pakket, filterlengte, bouwjaar, geologie, grootteverdeling en boormethode, onderzocht op relatie met deeltjes. De belangrijkste resultaten worden hier gepresenteerd. Voor een overzicht van de gehele analyse wordt verwezen naar het afstudeerverslag.

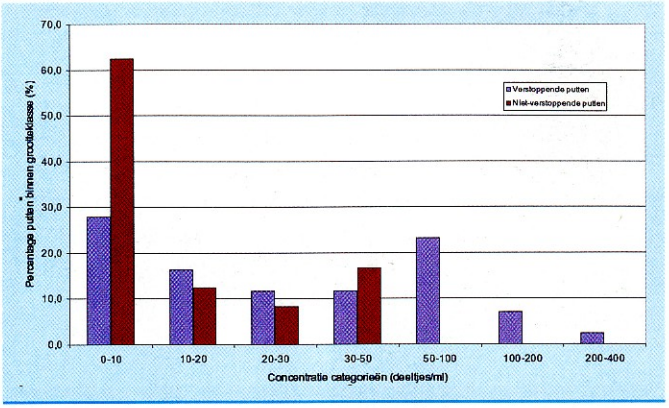
De relatie tussen deeltjes en geologische formatie

In de literatuur wordt vermeld dat de deeltjes uit de formatie zelf afkomstig zijn. De veronderstelling van een relatie tussen deeltjesconcentratie en geologische formatie ligt dan voor de hand. Een duidelijke relatie werd echter niet gevonden. Twee formaties hebben een aanzienlijk lagere concentratie dan andere formaties (Harderwijk en Maassluis/Oosterhout), maar de spreiding in concentratie van de overige formaties is te groot om een correlatie aan te tonen (zie afbeelding 2). De formatienaam is geen goede variabele om de relatie tussen geologie en deeltjes aan te toetsen. Binnen één formatie kan een groot verschil in samenstelling van het watervoerend pakket voorkomen. De naam is een aanduiding van de afzettingsperiode (tijd) en is meestal niet karakteristiek voor een bepaalde afzetting: de lithologie varieert. Het is daarom beter om te kijken naar een relatie tussen deeltjes en de samenstelling van de ondergrond (korrelgrootte, sortering van het zand en percentage bijmengsels van klei, leem en veen). Dit is wel geprobeerd, maar de beschikbare gegevens, zoals de lithologie van de watervoerende pakketten, waren lang niet altijd voldoende voor analyse.

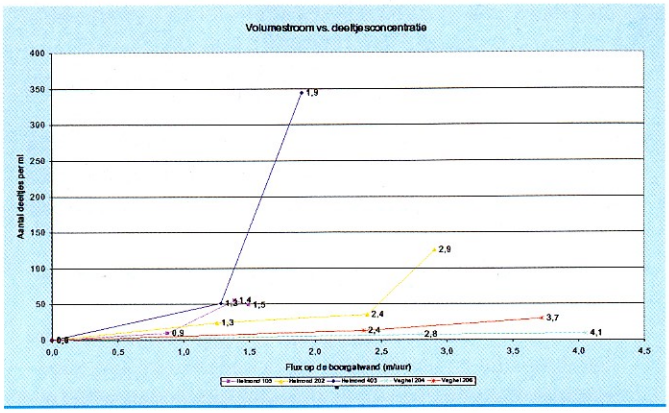
Meer gedetailleerde informatie over de lokale geologie resulteert hopelijk wel in een relatie met deeltjes.

De relatie tussen deeltjes en putverstopping

Vanwege het mechanische verstoppingsproces verwachten we een relatie tussen mechanische verstopping en deeltjesconcentratie. Afbeelding 3 toont voor niet- en voor wel-verstoppende putten de verdeling van de gemeten deeltjesconcentraties. De indeling in verstoppend en niet-verstoppend is aangegeven door het betrokken waterleidingbedrijf. Beide groepen zijn eerst op 100 procent gesteld en daarna verdeeld over een aantal concentratiecategorieën.



Afb. 3: Relatie tussen verstoppende en niet-verstoppende putten en deeltjesconcentratie.



Afb. 4: Concentratie van zwevend materiaal in het onttrokken grondwater als functie van onttrekkingcapaciteit (flux op de boorgatwand.) De putten te Veghel verstoppen niet, die te Helmond wel. Uit deze grafiek kan voor de putten in Helmond een kritische capaciteit worden afgelezen, waaronder de verstoppingsnelheid veel geringer zal zijn.

Putten zonder verstoppingsproblemen hebben lagere concentraties; 60 procent valt binnen de laagste concentratiecategorie. Verder is in afbeelding 3 te zien dat de niet-verstoppende putten (binnen dit onderzoek) niet in de hoogste categorieën voorkomen. Voor verstoppende putten werd verwacht dat deze voornamelijk hoge concentraties deeltjes zouden bevatten, maar het onttrokken grondwater van deze putten vertonen een meer gelijkmatige verdeling over alle categorieën.

Relatie tussen deeltjes en de flux op de boorgatwand

Bij onttrekking van grondwater door pompputten neemt de stroomsnelheid van het grondwater toe door de radiale geometrie. De stroombanen convergeren en hierdoor zal de sleepkracht van het grondwater toenemen. Aangehechte deeltjes zullen daardoor eerder van de matrix loslaten. Bovendien zorgt de toenemende stroomsterkte ervoor dat de deeltjes gemakkelijker in suspensie kunnen blijven. Een relatie tussen stroomsnelheid en deeltjesconcentratie ligt dus voor de hand. Een grotere snelheid zal resulteren in een grotere deeltjesconcentratie. Om deze hypothese te onderzoeken zijn deeltjesmetingen uitgevoerd bij verschillende onttrekkingcapaciteiten van een put. Afbeelding 4 toont de concentratie van deeltjes in het onttrokken grondwater als functie van de flux op de boorgatwand: tussen beide blijkt inderdaad een relatie te bestaan. In de grafiek is te zien dat een aantal curves bestaan uit twee delen. Het eerste gedeelte is vlak en het tweede gedeelte is veel steiler (putten Helmond). Dit knikpunt geeft het optimale debiet aan, waarbij de afgifte van deeltjes nog laag en acceptabel is. Boven dit knikpunt worden veel meer deeltjes gemobiliseerd en zal de putverstopping aanzienlijk verergeren. Deze relatie is echter wel specifiek voor iedere put, vanwege verschillen in putconstructie en lokale omstandigheden.

Uit afbeelding 4 blijkt tevens dat bij de putten van pompstation Veghel een verhoging van de flux geen steile toename tot gevolg heeft. Blijkbaar bevat het watervoerend pakket in Veghel nauwelijks zwevend materiaal. In Veghel is dan ook geen mechanische verstopping, in Helmond wel.

Conclusies

Dit onderzoek naar de relatie tussen het optreden van mechanische verstopping en de hoeveelheid zwevend materiaal in het grondwater heeft meer inzicht opgeleverd in het mechanische verstoppingsproces:

- Een betrouwbare meetmethode is ontwikkeld om snel en eenvoudig deeltjes in opgepompt water te meten;
- Een relatie tussen deeltjesconcentratie en de geologische formatie is niet gevonden, omdat de formatienaam geen goede variabele is om de relatie tussen geologie en deeltjes te toetsen. Verder was de beschikbare geologische data niet gedetailleerd genoeg om te gebruiken in de analyse. Met behulp van precieze informatie van de lithologie verwachten we wel een onderscheid te kunnen maken;
- De meetresultaten tonen aan dat grondwater in **niet**-verstoppende putten (zeer) lage concentraties deeltjes bevat. De relatie tussen geringe aanwezigheid van deeltjes en niet optreden van putverstopping is hiermee bevestigd;
- Voor verstoppende putten is echter geen duidelijke relatie tussen deeltjesconcentratie en verstopping gevonden. Verwacht werd dat deze voornamelijk hoge concentraties deeltjes zouden bevatten, maar de concentratie van deeltjes in verstoppende putten variëren van laag tot hoog;
- Tussen deeltjesconcentratie in het onttrokken grondwater en flux op de boorgatwand bestaat een niet-lineair verband. Deze relatie is specifiek voor iedere put en kan gebruikt worden om voor die put een optimaal onttrekkingdebiet vast te stellen door het knikpunt in de curve te bepalen.

Aanbevelingen voor verder onderzoek

- Met nieuwe, meer gedetailleerde gegevens over de lithologie van watervoerende pakketten een hernieuwde analyse maken om een relatie aan te tonen tussen het watervoerend pakket en de deeltjes;
- Uitvoeren van sectiemetingen over het filtertraject. Naar verwachting zal de concentratie over het filtertraject verschillen vanwege een variabele flux en de veranderende samenstelling van het pakket;
- Tijdens de meting monsters nemen waarmee met behulp van SEM-microscopisch onderzoek de samenstelling van de aanwezige deeltjes kan worden bepaald. Deze deeltjessamenstelling kan dan worden vergeleken met de samenstelling van het watervoerend pakket;
- Herhalingsmetingen uitvoeren om vast te stellen of de deeltjesconcentratie verandert in de tijd. ¶

LITERATUUR

1) Schrama E., M. Balemans en C. van Beek (2001). Quick scan putverstopping en regeneratie bij vijf waterbedrijven. BTO-rapport 2001-169. Kiwa.
2) Van Beek C. (2002). Mechanische putverstopping: oorzaak, preventie en kostenbesparing. H_2O nr. 18, pag. 37-39.
3) Timmer H., J-D. Verdel en A. Jongmans (2000). Verstopping putten door van nature aanwezig materiaal. H_2O nr. 20, pag. 24-26.
4) Ryan J. en M. Elimelech (1996). Review colloid mobilisation and transport in groundwater: Colloids and Surfaces A: Physicochemical and engineering aspects, , v. 107, p. 1- 56.
5) Van Beek C., E. Schrama, M. Eck. en J. Verstraelen (1999). Verstopping van diepe putten door deeltjes. H_2O nr. 16/17, pag. 21-24.
6) Prins J. (2003). Suspended matter in abstracted groundwater in the Netherlands. MSc thesis.