

---

# Aanwezigheid van deeltjes in onttrokken grondwater

Kees van Beek  
Harrie Timmer  
Bert-Rik de Zwart

---

*Ontrokken grondwater uit anaërobe (semi)spanningspakketten bevat deeltjes. Dit blijkt uit onderzoek naar het optreden van mechanische putverstopping in dit type pakket, waarbij deze deeltjes accumuleren op de boorgatwand. Van de aanwezigheid van minerale en organische deeltjes, van ongeveer 1 tot 20  $\mu\text{m}$  groot, is in de nationale hydrologische literatuur nog geen melding gemaakt, en in de internationale literatuur slechts sporadisch.*

*In deze bijdrage karakteriseren wij deze deeltjes aan de hand van aard, concentratie en korrelgrootteverdeling. Ook het gedrag van deeltjes in watervoerende pakketten wordt beschreven. Consequenties van de aanwezigheid van deeltjes voor het optreden van mechanische putverstopping komen niet aan de orde.*

## Inleiding

Vele putten(velden), die (semi)spanningsgrondwater, inclusief oevergrondwater, onttrekken, verstoppen op de boorgatwand (mechanische verstopping). Aangezien de verstopping op enige afstand van de put is gelokaliseerd, moet de verstopping toegeschreven worden aan een proces dat onder invloed van de onttrekking wordt geïntensiveerd. In het verleden werd hierbij voor oevergrondwaterwinningen gedacht aan het optreden van sulfaatreductie (Van Beek en Van der Kooij, 1982), al of niet gecombineerd met accumulatie van deeltjes. Later bleek dat boorgatwandverstopping ook voorkomt op puttenvelden met nagenoeg sulfaatloos water ( $< 0,5$  mg/l sulfaat) waar sulfaatreductie geen rol kan spelen, en de nadruk nog sterker op de mogelijke rol van deeltjes kwam te liggen. Toen dan ook deeltjestellers beschikbaar kwamen, zijn in voorkomende gevallen deeltjestellingen uitgevoerd (Van Beek e.a., 1998). Deze tellingen zijn door Kiwa WR uitgevoerd als advieswerk voor waterleidingbedrijven, in het kader van het BedrijfsTak Onderzoek (BTO), en als onderdeel van het BTS-project putverstopping, op basis van een via Senter verkregen subsidie van het Ministerie van Economische Zaken.

Informatie over de aanwezigheid van deeltjes 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

---

Kees van Beek en Bert-Rik de Zwart zijn werkzaam bij Kiwa Water Research. Harrie Timmer is werkzaam bij Hydron Zuid Holland. Bert-Rik de Zwart is ook werkzaam bij TU Delft.

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 overstrooming (GeoDelft, 2002).

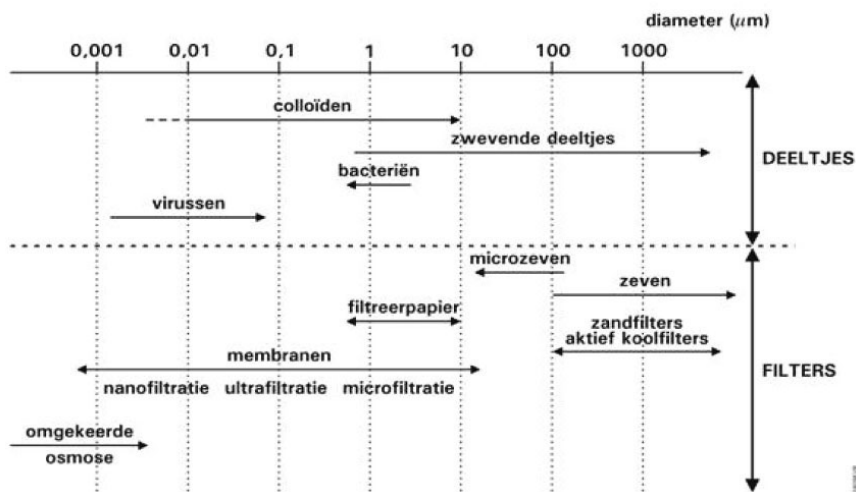
Daarnaast bestaat momenteel een streven om via membraanfiltratie direct drinkwater uit grondwater te bereiden. Echter, deeltjes aanwezig in het onttrokken grondwater zullen tot verstopping van de membranen leiden.

Naast het belang van deeltjes bij het optreden van verstopping wordt in de internationale wetenschappelijke literatuur veel aandacht besteed aan de rol van colloïden als drager voor verontreinigingen. Verontreinigingen kunnen aan colloïden adsorberen, waardoor deze verontreinigingen in de bodem geheel andere transporteigenschappen krijgen. Zo kunnen verontreinigingen geadsorbeerd aan colloïden 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 colloïden als mogelijke “carrier” voor de verspreiding van deze stoffen (Van der Weerd e.a., 1998, McCarthy en Degueudre, 1993, Enfield en Bengtson, 1988).

Colloïden dienen ook als analoog voor transport door de bodem van virussen en bacteriën (Schijven en Hazzanizadeh, 2000).

### Definitie van deeltjes

De definitie van zwevend materiaal is onder meer gebaseerd op korrelgrootte. Afbeelding 1 geeft de diameter voor verschillende materialen. Deze afbeelding is gebaseerd op Stumm (1977); andere auteurs houden weer andere grenzen aan.



**Afbeelding 1:** Classificatie van deeltjes op basis van diameter en van filtermateriaal op basis van porie-diameter, gewijzigd naar Stumm (1977).

Uit afbeelding 1 blijkt dat volgens de indeling van Stumm (1977) de diameter van deeltjes varieert tussen 0,5 µm en 5 mm, en dat de diameter van deeltjes een overlap vertoont met

de diameter van colloïden. Het onderscheid tussen deeltjes en colloïden wordt gevormd door de af- respectievelijk aanwezigheid van onderlinge interactie en interactie met de bodemmatrix. De belangrijkste kracht die het gedrag van deeltjes bepaald wordt gevormd door hydrodynamische krachten en van colloïden door elektrostatische krachten. Dit gedrag van deeltjes zal later nog worden toegelicht.

Voor de diameter van deeltjes aanwezig in grondwater wordt door de bodemmatrix een bovengrens gesteld: de grofte van de formatie bepaalt de maximale diameter. De dichtste bolstapelning kan worden weergegeven door drie elkaar rakende cirkels. Uitgaande van een korrelgrootte van het pakket van 500  $\mu\text{m}$  bedraagt de diameter van de ingeschreven cirkel 70  $\mu\text{m}$ . Dit is theoretisch de maximale diameter van een deeltje dat deze poriehal zou kunnen passeren. In fijnzandigere sedimenten zal de maximale diameter kleiner zijn, in grovere sedimenten groter. Toepassing van een veiligheidsfactor van circa 2 levert een maximale diameter van deeltjes in zandig sediment van 20 tot uiterlijk 50  $\mu\text{m}$ .

In het hanteren van de ondergrens volgen we een praktische benadering: de ondergrens wordt gesteld door die van de toegepaste meetapparatuur. Deze ondergrens bedraagt in onze metingen 2  $\mu\text{m}$ , terwijl momenteel een ondergrens van 0,5 à 1  $\mu\text{m}$  mogelijk is. Met andere woorden, in deze bijdrage hebben deeltjes een diameter die varieert van 2 tot circa 20  $\mu\text{m}$ , maximaal 50  $\mu\text{m}$ .

## Aard van deeltjes

Vanwege het optreden van putverstopping door deeltjes en het belang van de continuïteit van de drinkwaterproductie, zijn door de waterbedrijven Hydron Zuid-Holland en Vitens Friesland onderzoeken uitgevoerd om de aard en de locatie van verstoppende deeltjes te bepalen.

Zoals beschreven in Timmer e.a. (2003, 2000) en Oosterhof e.a. (in voorbereiding) zijn steekmonsters genomen van de boorgatwand van diverse verstopte putten in het rivierengebied van Zuid-Holland en in Friesland. Om deze monsters te kunnen nemen zijn de putten eerst opgeboord tot de diameter van het oorspronkelijke boorgat, waarna met een speciaal apparaat horizontaal ongestoorde grondmonsters zijn gestoken van het verstoppende materiaal op de boorgatwand en de direct achterliggende formatie.

Deze steekmonsters zijn vervolgens bij Wageningen Universiteit geprepareerd voor micromorfologisch onderzoek. Het ongeconsolideerde zandige materiaal is daartoe eerst in vloeibare hars ingebed, waarna het monster langzaam is uitgehard. Vervolgens zijn uiterst dunne doorsneden vervaardigd (slijpplaatjes). Uit het micromorfologisch onderzoek en de SEM-analyse bleek dat de verstopping geconcentreerd is in de eerste 5 centimeter buiten de boorgatwand en werd veroorzaakt door accumulatie van zwevend materiaal. Dit geaccumuleerde materiaal bestaat in het rivierengebied voornamelijk uit deeltjes organisch materiaal, klei en kalk met een diameter van 1 tot 10  $\mu\text{m}$ . In de diepe put te Friesland is kalk het meest dominante materiaal met een vergelijkbare grootte. Uit vergelijking van het geaccumuleerde materiaal met de samenstelling van de omliggende formatie, bepaald met behulp van verticale ongestoorde steekmonsters, blijkt dat het materiaal afkomstig is uit het watervoerend pakket.

Ook uit de literatuur, onder andere Ryan en Elimelech (1996), blijkt dat zwevend materiaal in grondwater bestaat uit materiaal dat van nature in de bodem aanwezig is. Naast de reeds genoemde materialen betreft dat dan deeltjes ijzerhydroxide en kwarts.

## Meting van deeltjes

Voor het meten van de aanwezigheid van deeltjes in (grond)water staan verschillende instrumenten ter beschikking, namelijk de troebelheidsmeter, de MFI en de deeltjesteller.

### *Troebelheidsmeter*

De troebelheid vormt een maat voor de aanwezigheid van materiaal in (grond)water. Er is echter een ondergrens aan de waarneembare troebelheid, en in de praktijk blijkt de troebelheid van onttrokken grondwater te gering om met succes een troebelheidsmeter te kunnen inzetten.

### *MFI*

Bij de MFI meting wordt water met een constante volumestroom onder druk door een 0,45  $\mu\text{m}$  filter geleid. Materiaal groter dan 0,45  $\mu\text{m}$  blijft op het filter achter, waardoor de druk over het filter toeneemt. De toename van de druk in de tijd 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. De MFI is een goede indicator voor de (gemiddelde) aanwezigheid van deeltjes, maar geeft geen informatie over grootte en aard.

Uit voorgaande volgt dat zowel meting van troebelheid als MFI indirecte methoden zijn, die bovendien voor deeltjestellingen te ongevoelig zijn.

### *Deeltjesteller*

Bij ons onderzoek hebben wij gebruik gemaakt van deeltjestellers. Met een deeltjesteller worden continu aantallen deeltjes met bijbehorende diameter gemeten.

Er bestaan verschillende typen deeltjestellers: tellers gebaseerd op blokkering van licht, gebaseerd op verstrooiing van licht en laser geïnduceerde explosies. Bij onze metingen hebben we gebruik gemaakt van de lichtblokkade methode. Hierbij wordt het te onderzoeken water met een constante volumestroom door een cuvet geleid. Dit cuvet wordt doorschijnen met een laserstraal, waarbij aanwezige deeltjes op de tegenoverliggende lichtgevoelige cel schaduwen geven. Met behulp van de bijgeleverde software worden uit deze schaduwen aantallen en grootte van de deeltjes berekend. Uiteindelijk worden de resultaten van de metingen gepresenteerd als gemiddelde concentratie (aantal deeltjes per ml) per ingesteld korrelgrootte-interval (diameterinterval) gedurende de ingestelde tijdsduur.

De lichtblokkade methode is het meest geschikt voor het bepalen van deeltjes concentraties in grondwater. Deze methode heeft echter ook zijn beperkingen.

Transparantie en vorm van de deeltjes beïnvloeden de meting.

- *De deeltjesteller is geïkt met behulp van ondoorzichtige bolvormige latex bolletjes.*

Natuurlijke materialen zoals organisch materiaal en verschillende mineralen kunnen echter ook half doorzichtig en/of onregelmatig van vorm zijn. 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 niet bekend op welke wijze de bijgeleverde software uit de ruwe metingen concentraties en diameters berekent. Volgens verschillende leveranciers bedraagt deze afwijking niet meer dan enkele procenten (Pamas, PMT en PSS).

- *Bepaling van een nauwkeurige absolute concentratie is lastig.* Tijdens de meting moet de stroomsnelheid van het door te meten water door het cuvet constant zijn (100 ml/min). Afwijkingen in stroomsnelheid resulteren in afwijkende concentraties. In de praktijk zal altijd enige variatie in stroomsnelheid optreden maar tijdens metingen over langere perioden (minimaal 24 uur) wordt een goede indruk van de situatie verkregen.
- *Reproduceerbaarheid en gevoeligheid van de metingen.* Zolang de metingen met hetzelfde apparaat onder identieke omstandigheden worden uitgevoerd, zijn de verkregen resultaten onderling goed vergelijkbaar. Dit blijkt minder het geval zijn bij resultaten van metingen verkregen met verschillende apparaten of onder verschillende omstandigheden. Daarnaast zijn verstoringen, zoals trillingen waarbij extra deeltjes worden losgemaakt, direct terug te zien in het resultaat van de meting. De metingen moeten dus met precisie worden uitgevoerd.
- *Verstoring door aanwezigheid van gasbubbelletjes.* Gasbubbelletjes in water breken licht, waardoor schaduwen op de lichtgevoelige cel ontstaan, die als deeltjes worden geteld. Gasbubbelletjes kunnen ontstaan door het aantrekken van "valse" lucht en ten gevolge van de aanwezigheid van methaan in het onttrokken grondwater.

Voor metingen van de deeltjesconcentratie op pompputten is een protocol opgesteld (Prins, 2003), dat aan de hand van ervaringen bij metingen voortdurend wordt aangepast. Echter een volledige nauwkeurighedsanalyse voor de verschillende factoren is niet uitgevoerd. Het onderlinge verschil tussen twee identieke deeltjesmeters komt maximaal op ongeveer op  $\pm 25\%$ . Calibratie en het reinigen van de apparatuur spelen hierbij een belangrijke rol.

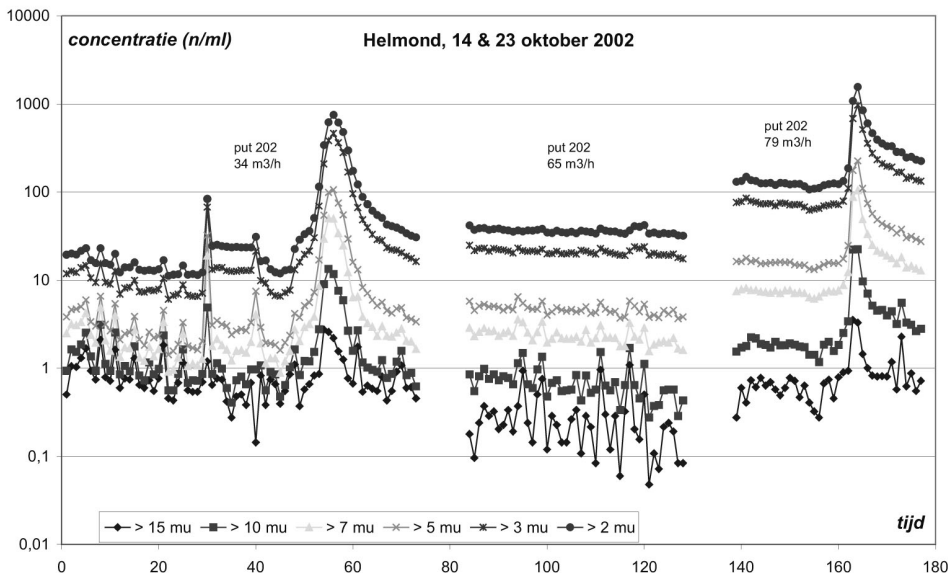
### **Deeltjes in onttrokken grondwater**

Vanwege de relevantie voor het optreden van putverstopping, en om bovengenoemde meettechnische problemen zoveel mogelijk te voorkomen, zijn de metingen uitgevoerd via de monsterkraan op de putkop. Tijdens de interpretatie moet echter wel rekening gehouden worden met de beïnvloeding van de meting door het affilteren van de deeltjes op de boorgatwand. Zoals reeds vermeld vertonen veel putten(velden), die (semi)spanningsgrondwater onttrekken, mechanische verstopping. Met andere woorden een (onbekend) deel van de aangevoerde deeltjes blijft achter op de boorgatwand. Aangezien de meting wordt uitgevoerd aan het filtraat (na passage van de boorgatwand) resulteert de meting in een onderschatting van de concentratie en mogelijk wordt ook de grootteverdeling beïnvloed.

### **Deeltjesconcentratie**

Met de resultaten van de metingen van deeltjes kunnen verschillende bewerkingen worden uitgevoerd. In deze bijdrage beperken we ons tot deeltjesconcentratie en korrelgrootteverdeling. Om de praktische betekenis aan te geven, zullen beide begrippen worden toegelicht

aan de resultaten van metingen op het puttenveld Helmond (Brabant Water). Afbeelding 2 toont de resultaten van drie kortdurende metingen van 30 à 60 minuten aan put 202 bij drie verschillende volumestromen van onttrekking, namelijk circa 34, 65 en 79 m<sup>3</sup>/h.



**Afbeelding 2:** Deeltjesconcentratie in het grondwater van put 202 op puttenveld Helmond bij drie verschillende volumestromen van onttrekking. De horizontale as toont de tijd in minuten. De verticale as is logaritmeisch aangegeven, zodat ook de concentratie van de grote deeltjes kan worden afgelezen. De pieken in concentratie bij 34 en 79 m<sup>3</sup>/h worden veroorzaakt door het 5 keer uit- en aanschakelen van de onderwaterpomp.

Afbeelding 2 laat een groot aantal waarnemingen toe:

- 1 De concentratie van deeltjes in het onttrokken grondwater wordt sterk bepaald door de grootte van de volumestroom van onttrekking. Bij een onttrekking van 34 m<sup>3</sup>/h bedraagt de concentratie circa 12/ml en bij 79 m<sup>3</sup>/h meer dan 100/ml. Een ruime verdubbeling van de onttrekking gaat dus samen met bijna een vertienvoudiging van de concentratie: de toename in concentratie is dus meer dan proportioneel in vergelijking met de onttrekking.
- 2 De concentratie van deeltjes laat, in alle korrelgrootten, zodanig grote verschillen zien, dat een verticale logaritmeische as is gebruikt. De concentratie van deeltjes groter dan 2 µm varieert tussen 10 en 1000/ml. De concentratie van deeltjes groter dan 15 µm varieert tussen 0,1 en 2/ml.
- 3 In afbeelding 2 is op 60 minuten en ongeveer op 165 minuten een hoge piek te zien (in de afbeelding door pijlen aangegeven). Deze hoge pieken in concentratie van circa 1000 deeltjes per ml worden veroorzaakt door het 5 maal uit- en onmiddellijk weer aanschakelen van de onderwaterpomp. De onttrekking van 34 m<sup>3</sup>/h vertoont voor de piek in concentratie een onrustig verloop in concentratie. Deze verstoringen worden waarschijnlijk veroorzaakt door het schakelen van andere putten en andere verstoringen tijdens de meting.

- 4 Alleen bij 65 en bij 79 m<sup>3</sup>/h voor het schakelen vertoont de concentratie een vlak verloop. Na het schakelen bij 35 en 79 m<sup>3</sup>/h is bij beëindiging van de meting nog geen vlak verloop bereikt. Met andere woorden voor het bereiken van de evenwichtsconcentratie moet de put lang in bedrijf zijn, en had langer gemeten moeten worden. De voorgeschreven meetperiode in meetprocedure is naar aanleiding van deze waarneming aangepast naar minimaal 8 uur.

De hoge pieken in concentratie van deeltjes bij het aanzetten van de onderwaterpomp duiden op het 'extra' verwijderen van deeltjes. Deze deeltjes zijn gedurende de voorgaande onttrekkingsperiode op de boorgatwand geaccumuleerd. Indien bij het aanzetten van de onderwaterpomp alle gedurende de voorgaande onttrekkingsperiode geaccumuleerde deeltjes worden verwijderd zal geen verstopping optreden (Van Beek e.a., 2004).

### **Deeltjesconcentratie en ionconcentratie**

In deze bijdrage wordt concentratie gehanteerd in de vorm van aantal deeltjes per volume-eenheid (n/ml). Een concentratie wordt gewoonlijk weergegeven als mg/l (massa/volume-eenheid).

Het is duidelijk dat de concentratie van een opgeloste stof (bijvoorbeeld chloride) ook kan worden weergegeven als aantal moleculen per volume-eenheid, en dat anderzijds, bij aanname van een gemiddelde dichtheid, het aantal deeltjes per ml kan worden omgerekend naar mg/l. Omdat aantal per ml, met bijbehorende diameter, veel informatiever is dan gewicht per volume-eenheid, hanteren wij de eerste eenheid.

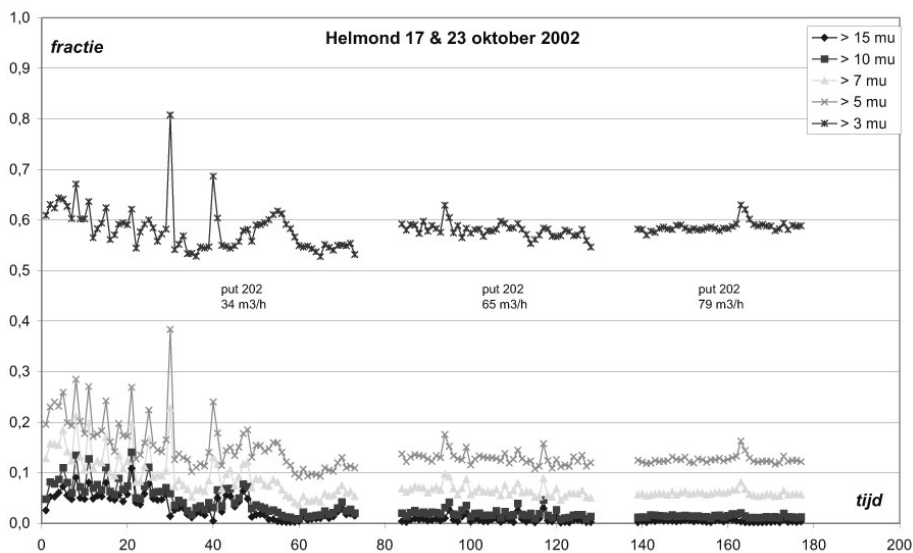
Er is natuurlijk wel een fundamenteel verschil tussen de concentratie van opgeloste stoffen. Deze is onafhankelijk van de volumestroom van onttrekking. Voor de concentratie van deeltjes in suspensie is dat niet het geval. Deze ondervinden door hun omvang en massa wrijving in de bodemmatrix en de "sleepkracht" van het langsstromende water bepaalt dan ook in belangrijke mate de concentratie van deeltjes.

### **Korrelgrootteverdeling**

Onderstaande afbeelding toont de cumulatieve korrelgrootteverdeling van de deeltjes in het onttrokken grondwater van put 202 op puttenveld Helmond bij verschillende volumestromen van onttrekking.

Aan de hand van afbeelding 3 kunnen de volgende waarnemingen worden gemaakt:

- 1 Het percentage van de korrelgrootte 2-3  $\mu\text{m}$  varieert tussen 100-53  $\approx$  47% bij 34 m<sup>3</sup>/h en 100-58  $\approx$  42% bij 79 m<sup>3</sup>/h en van de korrelgrootte 3-5  $\mu\text{m}$  53-10  $\approx$  43% bij 34 m<sup>3</sup>/h tot 58-12  $\approx$  46% bij 79 m<sup>3</sup>/h. De korrelgrootteklassen 2-3 en 3-5  $\mu\text{m}$  zijn dus globaal in gelijke mate vertegenwoordigd. Uit de afbeelding blijkt tevens dat niet alleen de concentratie, maar ook de korrelgrootteverdeling door de stroomsnelheid wordt beïnvloed.
- 2 De korrelgrootteklassen 2-3  $\mu\text{m}$ , 3-5  $\mu\text{m}$ , 5-7  $\mu\text{m}$ , 7-10  $\mu\text{m}$ , 10-15  $\mu\text{m}$  en > 15  $\mu\text{m}$  zijn in steeds afnemende mate vertegenwoordigd bij toenemende volumestromen van onttrekking. Aan de maximale diameter van het zwevend materiaal wordt door de diameter van de poriehalzen van de bodemmatrix van het watervoerend pakket een bovengrens gesteld.



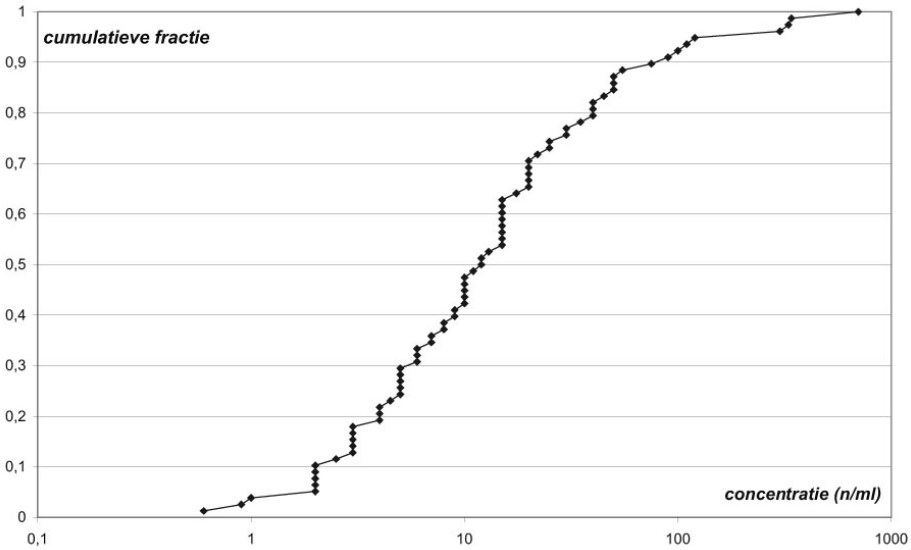
**Afbeelding 3:** Cumulatieve korrelgrootteverdeling van zwevend materiaal in het onttrokken grondwater van put 202 op puttenveld Helmond bij verschillende volumestromen van onttrekking.

- 3 De korrelgrootteverdeling varieert gedurende de meting, in het bijzonder tijdens het schakelen van de onderwaterpomp. Bij het schakelen nemen de grove fracties toe; met andere woorden er worden relatief meer grote deeltjes verwijderd (aangegeven door de pijl in de afbeelding).
- 4 Het onttrokken grondwater van put 202 bevat bij 34 m<sup>3</sup>/h een grote fractie deeltjes > 15 µm, terwijl bovendien gedurende de meting de korrelgrootteverdeling nogal fluctueert. Waarschijnlijk is het resultaat van deze meting verstoord door de aanwezigheid van gasbellen van methaan. Bij onttrekking van het grondwater uit dit watervoerend pakket komt methaan regelmatig vrij. Deze bellen komen soms terecht in het meetsysteem waardoor de meting gedeeltelijk verstoord wordt.

### Concentratie van deeltjes in onttrokken grondwater

In het voorgaande is de aanwezigheid van deeltjes in onttrokken grondwater beschreven aan de situatie van put 202 van het puttenveld Helmond. De vraag doet zich onmiddellijk voor in hoeverre dit puttenveld representatief is voor de situatie in Nederland. Daarom geeft afbeelding 4 de resultaten van alle tot nu toe uitgevoerde deeltjestellingen in het onttrokken grondwater (putten over de periode 2000–2005). De metingen zijn uitgevoerd bij de bestaande bedrijfsvoering en uitgezet in de vorm van een cumulatieve frequentieverdeling van de concentratie van deeltjes met een diameter groter dan 2 µm. De weergegeven concentraties zijn of wel de waarden uit het horizontale verloop van de concentratie (cf afbeelding 3) dan wel de laagst gemeten waarden. In deze afbeelding is geen onderscheid gemaakt tussen “verstoppende” en “niet verstoppende” puttenvelden.





**Afbeelding 4:** Frequentieverdeling van de concentratie van deeltjes met een diameter groter dan 2  $\mu\text{m}$  in het onttrokken grondwater onder normale bedrijfsomstandigheden (van Beek, 2005).

Uit afbeelding 4 blijkt dat de concentratie van deeltjes met een diameter groter dan 2  $\mu\text{m}$  in het onttrokken grondwater een logaritmische verdeling vertoont. Binnen deze logaritmische verdeling varieert de concentratie voornamelijk tussen 2 tot 50/ml, terwijl de uiterste waarden gelijk zijn aan respectievelijk 0,6 en 700/ml.

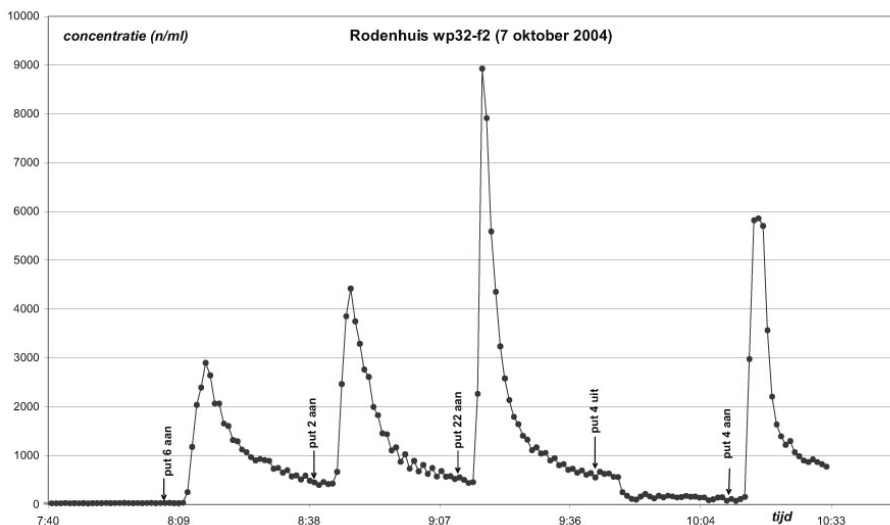
Zoals reeds vermeld wordt feitelijk de concentratie in het “filtraat” gemeten. Omdat op de boorgatwand een gedeelte van de deeltjes, al of niet tijdelijk, wordt afgefilterd, zal de concentratie in het toestromende grondwater voor het passeren van de boorgatwand hoger zijn. Om de deeltjesconcentratie in het grondwater weer te geven zou de curve in afbeelding 4 dus wat “naar rechts” moeten worden verschoven.

### Gedrag van deeltjes

Verschillende mechanische krachten zijn van invloed op de concentratie van deeltjes in het onttrokken grondwater: een versnellingskracht bij het aanzetten van de onderwaterpomp, een snelheidskracht tijdens de onttrekking, en de zwaartekracht. Indien dit de enige krachten zijn die op deeltjes werken, dat wil zeggen geen elektrostatische krachten, dan zullen deeltjes direct op veranderingen in deze krachten reageren.

Het gedrag van deeltjes wordt toegelicht aan afbeelding 5 (naar Prins, 2004), gebaseerd op resultaten van metingen aan een waarnemingsput op puttenveld Rodenhuis. Afbeelding 5 geeft de concentratie van deeltjes in het grondwater van een waarnemingsput. Opvallend zijn de snelle, en heftige, reacties op het schakelen van de omringende productieputten. Aangezien de waarnemingsput niet verbonden is met deze putten, bij voorbeeld via de ruwwaterleiding, kan deze reactie niet veroorzaakt worden door trillingen die via deze leiding kunnen worden voortgeplant. De reactie vindt dus plaats via het watervoerend pakket. Deze snelle en heftige reacties kunnen alleen verklaard worden als deeltjes in

grondwater bij schakelen zich gedragen als donsveertjes in lucht bij een zuchtje wind.



**Afbeelding 5:** Verloop van de concentratie van deeltjes in het grondwater van een waarnemingsput als functie van het schakelen van onderwaterpompen in omgevende productieputten. Alle putten zijn in een lijn gelegen, put 6 bevindt zich 50 m ten westen van put 4, put 2 50 m ten oosten van put 4, put 22 25 m ten westen van put 4 en waarnemingsput 33 5 m ten westen van put 4. De vertraging in reactie op het schakelen van de omringende putten wordt veroorzaakt door het verdringen van het volume water aanwezig in de stijgbuis door het onttrokken volume van de onderwaterpomp.

## Slotbeschouwing

In voorgaande is aangetoond dat het onttrokken (anaërobe) grondwater in Nederland deeltjes bevat. De concentratie van deze deeltjes met bijbehorende korrelgrootteverdeling kan bepaald worden met deeltjestellers gebaseerd op het lichtblokkade principe. De uitvoering van deeltjestellingen is gevoelig voor verstoringen, zoals trillingen veroorzaakt door het schakelen van de onderwaterpomp.

De metingen zijn uitgevoerd aan maaiveld, dat wil zeggen na filtratie over de boorgatwand, wat resulteert in een (onbekende) onderschatting van de concentratie. Wel is duidelijk dat de aanwezigheid en het gedrag van deeltjes een belangrijke rol spelen bij het optreden van mechanische verstopping (verstopping van de boorgatwand).

De in dit artikel beschreven metingen worden komende jaren voortgezet in zoveel mogelijk verschillende putten, om zo een representatief beeld te krijgen van het fenomeen. Hiermee hopen we in de toekomst bij te dragen aan het beantwoorden van de vele nog onbeantwoorde fundamentele en praktische vragen over het transport van deeltjes in grondwater.

## Literatuur

- Beek, C.G.E.M. van (2005)** Deeltjestellingen aan onttrokken grondwater, Evaluatie van metingen tot 2003, Kiwa BTO 2005.018.
- Beek, Kees van, Ate Oosterhof, Rob Breedveld en Bert-Rik de Zwart (2004)** Zelfgenererende pompputten, frequent schakelen voorkomt mechanische putverstopping, in: *H<sub>2</sub>O*, 37 (18), pag 36–38.
- Beek, C.G.E.M. van, C.J.G. Janssen, M.H.A. Juhasz-Holterman en J.H. Peters (1998)** Verstopping van productieputten door deeltjes; in: *H<sub>2</sub>O*, 31 (17), pag 18–20.
- Beek, C.G.E.M. van en D. van der Kooij (1982)** Sulfate reducing bacteria in ground water from clogging and non-clogging shallow wells in the Netherlands river region; in: *Groundwater* 20 (3), pag 298–302.
- Enfield, C.G. en G. Bengtson (1988)** Macromolecular transport of hydrophobic contaminants in aqueous environments; in: *Groundwater* 26, pag 64–70.
- GeoDelft (2002)** GeoDelft lost deel uitvoeringsproblemen Haagse tramtunnel op; in: Jaarverslag Geodelft 2001, pag 26–28.
- McCarthy, J.F., and C. Degueudre (1993)** Sampling and characterization of colloids and particles in ground water for studying their role in contaminant transport; in: J. Buffle en H.P. van Leeuwen (red) *Environmental Particles*, Lewis, Boca Raton, Fla.
- Oosterhof, A.T., A.H. de Zwart, A. Nieuwaal en A. Jongmans (in voorbereiding)** Putverstoppingsonderzoek Ritskebos.
- Prins, J. (2004)** Achtergrondconcentratie van deeltjes in grondwater, Resultaten van metingen in waarnemingsfilter op puttenveld Rodenhuis; naam, plaats?
- Prins, J. (2003)** Suspended material in abstracted groundwater in the Netherlands. First results, Kiwa rapport KWR 03.029, Kiwa Nieuwegein.
- Prins, J., A.H. de Zwart en C.G.E.M. van Beek (2004)** Betrouwbare deeltjestellingen: Een stap voorwaarts in putverstoppingsonderzoek; in: *H<sub>2</sub>O*, 37 (1), pag 24–26.
- Ryan, J.N. en M. Elimelech (1996)** Colloid mobilization and transport in groundwater. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 107, pag 1–56.
- Schijven, J.F. en S.M. Hassanizadeh (2000)** Removal of viruses by soil passage: overview of modeling, processes and parameters, *Critical Rev. Env. Sc. Techn.* 30 (1), pag 49–127.
- Stumm, W. (1977)** Chemical interaction in particle separation *Env. Sci. Techn.* 11 (12), pag 1066–1070.
- Timmer, H., J.D. Verdel en A. Jongmans (2000)** Verstopping van putten door van nature aanwezig materiaal; in: *H<sub>2</sub>O* 33 (20), pag 24–26.
- Timmer, H., J.D. Verdel en A. Jongmans (2003)** Well clogging by particles in Dutch well fields; in: *JAWWA*, 95 (8), pag 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; in: *J. Cont. Hydr.* 32 (3/4), pag 313–332.
- Zwart, A.H. de en C.G.E.M. van Beek (in voorbereiding)** Physical clogging processes near water supply wells.