



Onderzoeksgebied

De experimenten vonden plaats in het lagedruk transportsysteem van Waterleidingbedrijf Amsterdam, thans Waternet, tussen productiebedrijf Leiduin en diverse reinwaterreservoirs/pompstations in de stad (zie afb. 1). Vanaf het productiebedrijf te Leiduin (meetpunt L1) wordt het drinkwater door verschillende transportleidingen naar het westen van Amsterdam getransporteerd. Het meeste water gaat via het pompstation Haarlemmermeer (meetpunt L2). Na Haarlemmermeer stroomt het water via meerdere leidingen naar verschillende pompstations in Amsterdam, namelijk Amstelveenseweg, Osdorp en Haarlemmerweg. De stations aan de Amstelveenseweg en Haarlemmerweg zijn uitgerust met reinwaterreservoirs en pompen, terwijl Osdorp een boosterstation is dat het water rechtstreeks van de transportleiding de stad in pompt. Bij het distributiereservoir Amstelveenseweg, dat wordt gevoed door twee transportleidingen, zijn de derde en vierde meetlocatie gesitueerd: L3 Amstelveenseweg Noord en L4 Amstelveenseweg Zuid. De Amstelveenseweg Noord-leiding is iets korter dan de Amstelveenseweg Zuid-leiding, hetgeen resulteert in verschillende verblijftijden. De totale afstand tussen Leiduin en Amstelveenseweg is ongeveer 23 km. De leidingen in dit traject zijn van beton en staal met een cement lining. Omdat gebruik gemaakt wordt van reinwaterreservoirs, kan het systeem bedreven worden met een afgevlakt debiet. Veranderingen in snelheid in vergelijking met een distributienet zijn daarom beperkt.

Gebruikte meetapparatuur

Om de deeltjesgehalten van het transportsysteem te kunnen vergelijken, zijn twee deeltjestellers gelijktijdig gebruikt op twee verschillende meetlocaties. In de eerste serie metingen zijn de deeltjestellers een week gebruikt op Leiduin (L1) en Haarlemmermeer (L2). Daarna is de deeltjesteller van Leiduin verplaatst naar Amstelveenseweg Noord (L3). Naast deeltjestellingen zijn ook troebelheid en

Analyse van deeltjes in het transportleidingnet van Amsterdam

JASPER VERBERK, TU DELFT

JAN VREEBURG, KIWA WATER RESEARCH / TU DELFT

ARNE BOSCH, WATERNET, SECTOR DRINKWATER AMSTERDAM

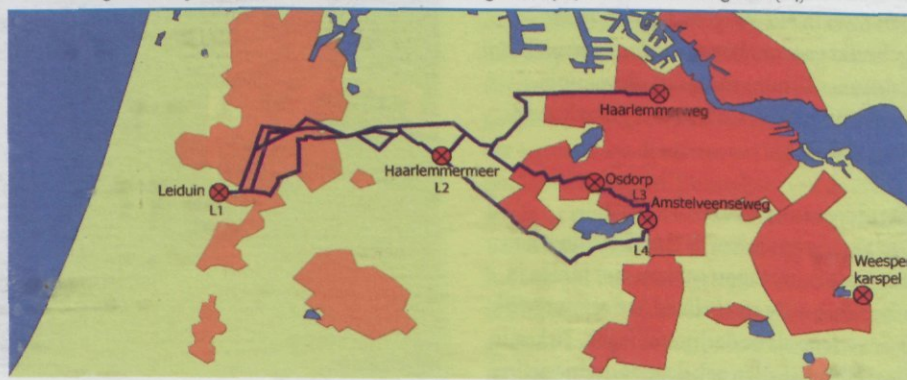
HANS VAN DIJK, TU DELFT / KIWA WATER RESEARCH

Bruin water is voor klanten de belangrijkste reden om te klagen bij het waterleidingbedrijf over de kwaliteit van het drinkwater. De oorzaak is meestal het opwerpen van deeltjes als gevolg van een hydraulisch incident. Voor de analyse van aard en oorzaak van bruin water worden soms continue on-line troebelheidsmetingen gebruikt. Dit is echter een indirecte optische meetmethode, die geen informatie geeft over de hoeveelheid en de samenstelling van de deeltjes. Daarom zijn in nieuw onderzoek deeltjestellingen en grootvolumemonsteranalyse ingezet om aantal, volume, massa en samenstelling van de deeltjes in het transportleidingnet van Waterleidingbedrijf Amsterdam, thans Waternet, te analyseren. Daaruit blijkt dat het volume en de massa aan deeltjes te Leiduin gering zijn en dat verderop in het transportsysteem volume en massa van de deeltjes sterk toenemen. Deze deeltjes bestaan voornamelijk uit organische stof en ijzer, hoewel ook een groot aantal andere elementen aangetoond zijn. De deeltjes zijn mogelijk afkomstig van uitloging van leidingmateriaal (cement), uitvloeking van opgelost ijzer en mangaan en biologische groei.

Het grootste gedeelte van de waterkwaliteitsklachten bij drinkwaterbedrijven heeft te maken met het optreden van bruin water. Bruin water wordt veroorzaakt door opwerping van sediment dat in de loop van de tijd is geaccumuleerd in het distributienet. De opwerping is het gevolg van een verstoring van de normale hydraulische omstandigheden, bijvoorbeeld door een breuk in de leiding of een grote afname door een brandkraan en/of omkering van stromingsrichting. Sediment in het distributienet kan afkomstig zijn van verschillende processen, zoals de niet complete verwijdering van deeltjes in de zuivering, de productie van deeltjes als gevolg van biologische processen of door de uitloging en corrosie van leidingmateriaal. Vorming, groei, opwerping en bezinking van deeltjes is een erg complex geheel van processen waarbij contacttijd, contact materiaal, hydraulische condities en de aard van de deeltjes allemaal een rol spelen. Tot nu toe wordt de waterkwaliteit ten aanzien van deeltjes in het distributienet soms continu bepaald door troebelheidmetingen. Recentelijk zijn echter deeltjestellers gebruikt om informatie te krijgen over het aantal en de

grootte van deeltjes in het distributienet³. Het doel van het hier beschreven onderzoek is om informatie over de hoeveelheid, volume, massa en samenstelling van deeltjes in een distributienet te verzamelen en te relateren aan de processen die bijdragen tot het optreden van bruin water. Uiteindelijk zal dit leiden tot een gerichte aanpak van die processen die de meeste invloed hebben op het ontstaan van bruin water.

Afb. 1: Monsterlocaties zoals gebruikt in deze studie. Leiduin (L1) is de productielocatie. Monsters werden ook genomen bij Haarlemmermeer (L2), Amstelveenseweg Noord (L3) en Amstelveenseweg Zuid (L4).



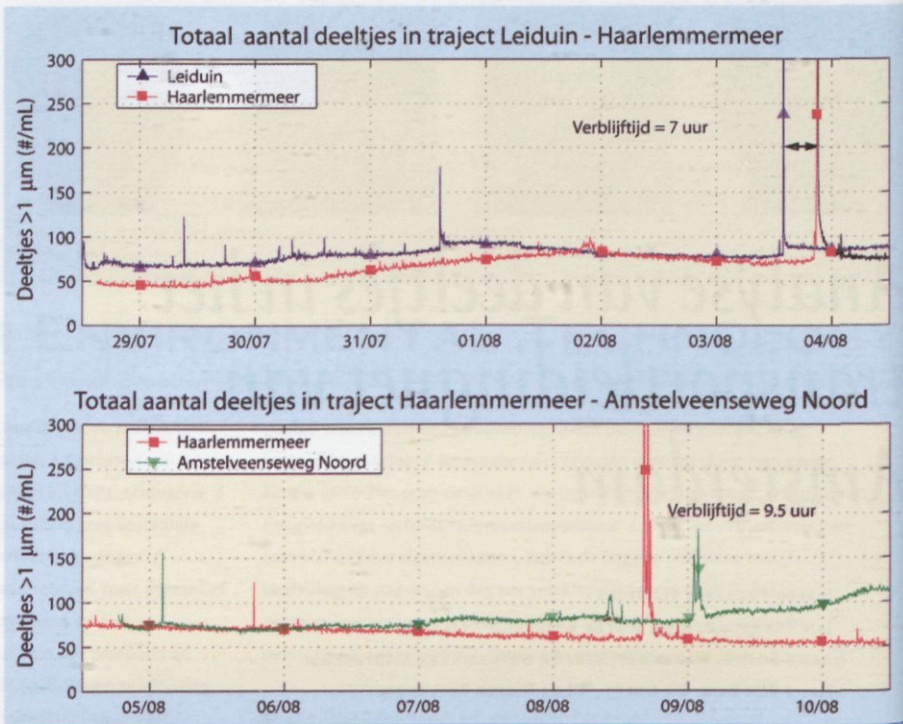
zuurgraad gemeten op de meetlocaties Leiduin en Haarlemmermeer. De resultaten van deze metingen worden hier niet gegeven. Twee filterinstallaties (ook wel TILVS genoemd, wat staat voor Time Integrated Large Volume Samplers) zijn gebruikt op Leiduin, Amstelveenseweg Noord en Amstelveenseweg Zuid. Op deze meetlocaties zijn de twee filterinstallaties altijd gelijktijdig ingezet om zo duplo monsters te nemen. De experimenten met TILVS zijn uitgevoerd wanneer ook een deeltjesteller op de meetlocatie aanwezig was.

De gebruikte deeltjestellers zijn MetOne PCX met 32 kanalen met een bandbreedte van 1 µm, lopend van 1 tot meer dan 31 µm. De deeltjestellers zijn, voordat begonnen is met de experimenten, gelijktijdig gecalibreerd. Experimenten, eerst in het laboratorium en daarna op Leiduin, toonden aan dat de orde van grootte van het aantal deeltjes goed met elkaar in overeenstemming was. Pieken in deeltjesaantallen werden gelijktijdig waargenomen en het verschil in gemeten aantallen deeltjes bedroeg altijd minder dan tien procent.

De experimentele TILVS-installaties bestaan uit een True-Dos pomp, een drukbestendig overstortvat en een roestvrij stalen filterreeneheid (zie foto). De pomp is een verdringerpomp en levert een constant debiet bij een oplopende druk. De volumestroom was in de range van 0.5-4.0 l/h over een tijdsperiode van 19 tot 72 uur. De meeste monsters werden gefiltreerd over een 0.45 µm cellulose acetaat filter. Maar ook zijn 0.2 µm polycarbonaat en 1.2 µm cellulose acetaat filters gebruikt om te onderzoeken welke poriegrootte het meest geschikt is voor filtratie. De filters werden voorgespoeld met demiwater en gedroogd bij 105°C. Na de experimenten werden de filters gravimetrisch geanalyseerd op het gehalte aan zwevende stof (total suspended solids of TSS, na droging op 105°C in een oven). Filters met een massa lager dan 2.2 mg werden niet in de verdere analyse meegenomen (detectielimiet). Van vier experimenten op Amstelveenseweg is tevens het gehalte aan organische stof op de filters bepaald (volatile suspended solids of VSS, door bepaling van het gewichtsverlies bij 550°C). Anorganische analyse van de filters is natchemisch uitgevoerd in het laboratorium van Kiwa in Nieuwegein. ICP-MS werd gebruikt voor analyse van kalium, magnesium, calcium, silicium, mangaan, aluminium, koper, barium en zink. IJzer is geanalyseerd door vlam-AAS.

Deeltjesaantallen

De resultaten van de deeltjestellingen in het Leiduin-transportstelsel zijn te zien in afbeelding 2. De troebelheid had een vergelijkbaar verloop als de deeltjestellingen. Pieken in troebelheid werden ook door de deeltjestellers



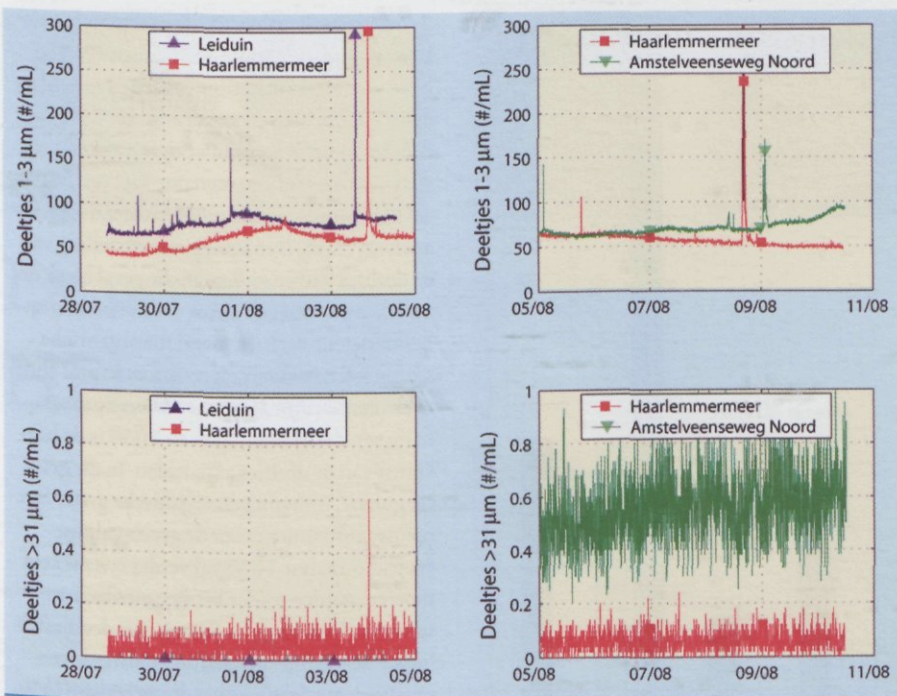
Afb. 2: Totaal aantal deeltjes in het transportsysteem van Leiduin.

waargenomen, maar niet alle pieken in de deeltjestellingen zijn terug te vinden in de troebelheid. Deeltjestellers blijken gevoeliger te zijn dan troebelheidsmeters. De verblijftijd tussen twee meetlocaties kon exact bepaald worden aan de hand van de pieken in de deeltjestellingen, zoals blijkt uit de pieken op 3 en 8 augustus. De verblijftijd van Leiduin naar Haarlemmermeer is op dat tijdstip zeven uur, de verblijftijd van Haarlemmermeer naar Amstelveenseweg Noord bedraagt dan 9.5 uur. De meerwaarde van de deeltjestellingen is voorts dat aantal en grootte van de deeltjes

bepaald wordt. Met deeltjestellingen is het mogelijk meer specifiek naar bepaalde deeltjesranges te kijken. Er wordt immers in 32 kanalen met een meetrange van 1 µm gemeten. In afbeelding 3 is het aantal deeltjes per ml voor de ranges 1-3 µm en groter dan 31 µm weergegeven. Uit deze figuur kan afgeleid worden dat op Leiduin voornamelijk kleine deeltjes (1-3 µm) aanwezig zijn, terwijl grotere deeltjes niet waargenomen worden. Op locatie Haarlemmermeer is het aantal kleine deeltjes iets lager dan op Leiduin. Het is vooralsnog niet duidelijk of dit veroorzaakt wordt door sedi-

De filterinstallatie: links op de foto de pomp, in het midden het overstortvat en rechts het membraanfilter.



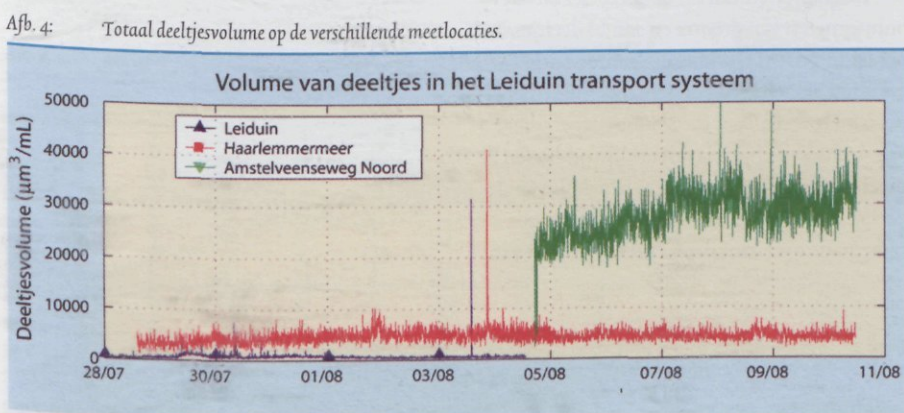


Afb. 3: Deeltjes kleiner dan 3 en groter dan 31 µm in het transportsysteem van Leiduin. De grafieken links tonen een vergelijking tussen Leiduin en Haarlemmermeer, de grafieken rechts een vergelijking tussen Haarlemmermeer en Amstelveenseweg Noord.

mentatie en/of flocculatie of door meetverschillen tussen de twee deeltjestellers. Op locatie Haarlemmermeer zijn veel meer grote deeltjes (ongeveer 0.06 deeltjes groter dan 31 µm per ml) aanwezig dan op Leiduin (geen enkel deeltje groter dan 10 µm). Op locatie Amstelveenseweg Noord is het aantal kleine deeltjes (1-3 µm) nog steeds ongeveer 60 deeltjes per ml, terwijl het aantal grote deeltjes (groter dan 31 µm) verder is toegenomen (tot 1 deeltje per ml). Gedurende het transport van water van

Leiduin naar de distributiereservoirs in Amsterdam worden duidelijk grotere deeltjes gevormd of opgewerveld.

De verandering in deeltjesgrootte en aantal, met name de toename van de grotere deeltjes, heeft een groot effect op het totale volume aan deeltjes. Voor de berekening hiervan is aangenomen dat de deeltjes sferisch zijn met een geometrisch gemiddelde diameter van de deeltjesrange. In afbeelding 4 zijn de resulta-



Tabel 1: Gemiddeld gehalte aan deeltjes in het transportsysteem van Leiduin.

meetlocatie	totale massa (mg)	gefiltreerd volume (l)	TSS (µg/l)	VSS (µg/l)
Leiduin	0.4 - 1.2	48 - 191	< 13	niet gemeten
Amstelveenseweg Noord	3.1 - 4.2	80 - 112	37 - 49	15 - 39
Amstelveenseweg Zuid	3.2 - 6.6	92 - 96	33 - 71	8 - 14

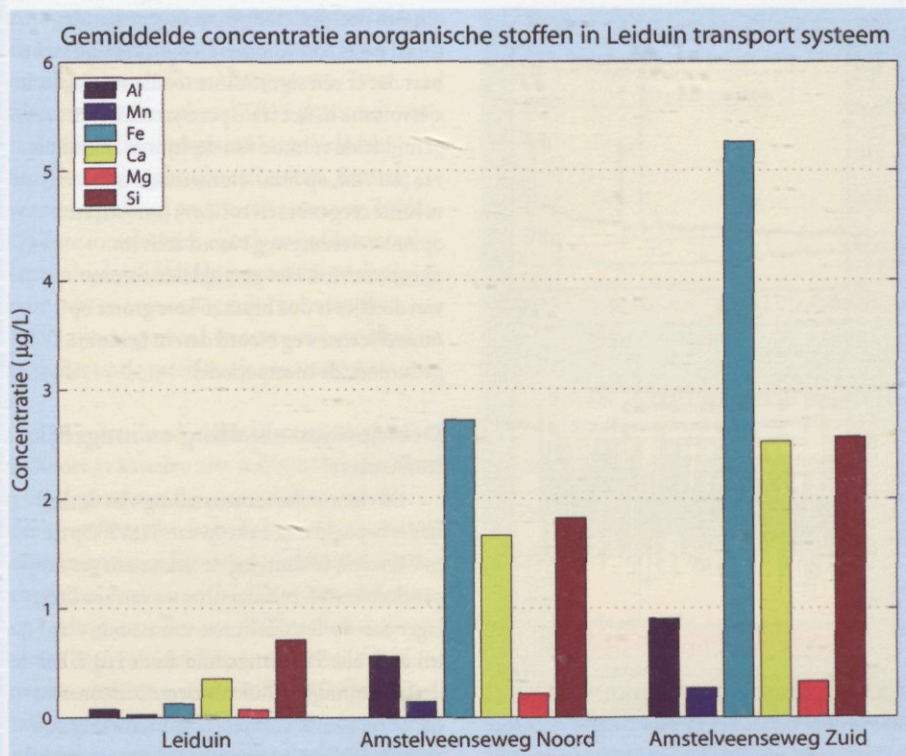
ten van deeltjestellingen weergegeven als totaal berekend volume. Het is duidelijk zichtbaar dat er een significante toename is in deeltjesvolume in het transportsysteem. Het gemiddelde volume van deeltjes in Leiduin is 714 µm³/ml, op Haarlemmermeer is dit volume toegenomen tot 4.575 µm³/ml en op Amstelveenseweg Noord zelfs tot 28.097 µm³/ml. Het gemiddelde volume van deeltjes is dus bijna 40 keer groter op Amstelveenseweg Noord dan in Leiduin gedurende de meetperiode!

Deeltjessamenstelling en mogelijke herkomst

De chemische samenstelling van de deeltjes is bepaald met behulp van TILVS. Op de meetlocatie Leiduin lag de massa aan gesuspenderde stof, zelfs na filtratie van 190 liter, lager dan de detectielimiet van 2.2 mg, wat inhoudt een TSS van minder dan 13 µg/l. Uit de deeltjestellingen bleek al dat op Leiduin voornamelijk kleine deeltjes (1 µm) aanwezig zijn en deze deeltjes vertegenwoordigen nauwelijks volume en dus ook nauwelijks massa. Op Amstelveenseweg lagen de gemeten massa's op het filterpapier in de range van 2.2 tot 6.6 milligram. Monsters tot 112 liter zijn gefiltreerd. De Amstelveenseweg Zuid-leiding had een gemiddelde TSS-concentratie van 65 µg/l (dus een toename met minimaal een factor 5), terwijl de Noord-leiding een gemiddelde TSS-concentratie had van 48 µg/l.

Statistisch gezien is er geen significant verschil tussen de concentraties van de twee leidingen ($t = -2.068$, $n = 15$, $p = 0.059$), alhoewel de deeltjestellingen in de meetperiode ook een lager volume aan deeltjes gaf in de Noord-leiding. Omdat de TSS-meting en deeltjestellingen onafhankelijk van elkaar plaatsvonden, is dit indicatief voor een echt verschil tussen de beide leidingen.

Het was niet mogelijk het gehalte aan organische stof (VSS) te meten op de locatie Leiduin vanwege de geringe massa op de filters. Op de locatie Amstelveenseweg bedroeg het 15 tot 55 procent van de totale gefiltreerde massa. Dit is lager dan gevonden door Gauthier et al.¹⁾ voor de deeltjes groter dan 5 µm in Nancy en Montreal. Het gehalte aan organische stof varieerde op deze plaatsen van 40 tot 76 procent van de gefiltreerde massa. Van belang is wel dat deze monsters in een distributienet zijn genomen, terwijl de monsters in dit onderzoek uit een constant doorstroomd lagedruk transportsysteem komen. De analyses van de anorganische stoffen laten zien dat er een grote toename is van een groot aantal componenten in het Leiduin transportsysteem (afbeelding 5), in het bijzonder de hoeveelheid gesuspenderd ijzer. Te Leiduin bedraagt de concentratie 0.13 µg/l. Vergeleken met een concentratie van



Afb. 5: Concentratie van de belangrijkste anorganische elementen op de verschillende meetlocaties.

5.3 µg/l op de meetlocatie Amstelveenseweg Zuid is dit een toename met een factor 40! Deze toename kan worden veroorzaakt door de resuspensie van oud sediment of door nafloculatie van opgelost en colloïdaal ijzer. Toename als gevolg van corrosie is niet waarschijnlijk, omdat in het onderzochte leidinggedeelte geen onbeklede (giet)ijzeren componenten aanwezig zijn.

Aan de hand van de concentraties aan anorganische elementen en de organische stof kan een massabalans van deeltjes gemaakt worden. Om deze massabalans te completeren is aangenomen dat Fe als $\text{Fe}(\text{OH})_3$, Mn als MnO_2 , Al als $\text{Al}(\text{OH})_3$ en Si als SiO_2 aanwezig is. De resultaten van de massabalans voor de meetlocaties Amstelveenseweg Noord en Zuid zijn weergegeven in tabel 2. Het was helaas niet mogelijk eenzelfde massabalans voor de meetlocatie te Leiduin op te stellen, omdat de massa op de filters hier te gering was. Uit tabel 2 volgt dat de massabalans redelijk klopend is. Het aandeel onbepaalde deeltjes bedraagt minder dan een kwart van de totale gefiltreerde massa. Dit is ongeveer eenzelfde resultaat als dat van Gauthier et al.¹⁾ In dat onderzoek bedroeg het aandeel onbepaalde deeltjes een vijfde van de massa op het filter.

Uit tabel 2 volgt ook dat het aandeel anorganische componenten redelijk constant is in het transportsysteem. Alleen het aandeel organische stof vertoont een grote variatie tussen de twee meetlocaties. De toename van de concentraties aan gesuspendeerd ijzer en mangaan kan het gevolg zijn van flocculatie van deze

metalen van kleine (kleiner dan 0,45 µm) naar grotere deeltjes. Deze componenten zijn immers in drinkwater altijd in lage concentraties in opgeloste vorm aanwezig (orde van enkele µg/l). De herkomst van Al, Si, Mg en Ca ligt zeer waarschijnlijk bij uitloging van cement van de pijpleiding. Van den Hoven & Vreeburg²⁾ hebben aangetoond dat uitloging bijna altijd verwacht kan worden in transportsystemen met cementgebonden materialen.

Conclusie

De resultaten van dit onderzoek zijn dat online meten van grootte en aantal deeltjes in het leidingnet veel additionele informatie geeft ten opzichte van de gebruikelijke troebelheidsmetingen. Door de grotere gevoeligheid van deeltjestellingen is de verblijftijd tussen de meetlocaties nauwkeuriger te bepalen. Met de deeltjestellingen is het mogelijk om meer informatie over aantal, grootte en volume van

de deeltjes te bepalen. Op de productielocatie Leiduin zijn geen grote deeltjes aanwezig in het water af pompstation. Maar 23 km verderop in het transportsysteem zijn wel veel grote deeltjes in het water aanwezig. Omgerekend naar volume is er een toename met een factor 40! Met behulp van de grootvolumemonsteranalyse (TILVS) is massa en samenstelling van de deeltjes vast te stellen. In dit geval bleek de massa minimaal een factor 5 toe te nemen en bestonden de deeltjes vooral uit organische stof en ijzer, hoewel ook een groot aantal andere elementen zijn aangetoond. Uit de combinatie van deeltjestellingen en TILVS is de herkomst van de deeltjes af te leiden. In dit geval coagulatie, uitloging en organische groei. Het nieuwe instrument voor de groot-volumemonsteranalyse TILVS zal verder ontwikkeld moeten worden totdat het betrouwbaar en universeel inzetbaar is. Samen met deeltjestellingen zal de filterinstallatie informatie verschaffen over de processen die zich afspelen in het distributienet, waardoor gerichte maatregelen om de waterkwaliteit te behouden kunnen worden genomen. 

LITERATUUR

- 1) Gauthier V., B. Barbeau, R. Millette, J. Block en M. Prevost (2001). Suspended particles in the drinking water of two distribution systems. *Water Science and Technology: Water Supply* nr. 4, pag. 237-245.
- 2) Van de Hoven Th. en J. Vreeburg (1992). Distribution system analysis by continuous monitoring and network calculation. *Water Supply* nr. 1, pag. 117-124.
- 3) Vreeburg J., C. Kivit, J. van Dijk en J. Verberk (2005). Herkomst en gedrag van deeltjes in drinkwaterleidingnetten. *H₂O* nr. 7, pag. 65-68.

Tabel 2: Massabalans van het filterpapier (% van droog gewicht op het filter).

component	Amstelveenseweg Zuid	Amstelveenseweg Noord
$\text{Fe}(\text{OH})_3$	19.1	19.6
MnO_2	1.0	0.8
$\text{Al}(\text{OH})_3$	5.8	5.0
SiO_2	8.6	7.1
overige anorganische elementen	5.5	5.3
organische stof	56.3	38.1
totaal	96.3	75.8