

Concentraties, bindingspercentages en bezinkingsmogelijkheden van verontreinigingen in afstromend hemelwater

Praktijkmetingen in Nederland



Concentraties, bindingspercentages en bezinkingsmogelijkheden van verontreinigingen in afstromend hemelwater

Praktijkmetingen in Nederland

ir. E. (Erno) de Graaf, dr. ir. J. (Jeroen) Kluck, ing. P.R. (Pascal) Kregting

auteurs

ir. Erno de Graaf, dr. ir. Jeroen Kluck, ing. Pascal Kregting

tekstadvies

Lijntekst, Utrecht

vormgeving

GAW ontwerp+communicatie, Wageningen

druk

Drukkerij Modern, Bennekom

isbn

978 90 73645 34 9

Deze uitgave is met de grootst mogelijke zorg samengesteld. Niettemin aanvaarden de auteurs en de uitgever geen enkele aansprakelijkheid voor mogelijke onjuistheden of eventuele gevolgen daarvan.

Inhoud

	Samenvatting	4	
1	Inleiding	5	
1.1	Aanleiding	5	
1.2	Doel	5	
1.3	Bijdragen	5	
1.4	Leeswijzer	6	
2	Onderzoeksmethoden	7	
2.1	Monstername	7	
2.2	Monsteranalyse	8	
3	Locaties en data monstername	10	
4	Resultaten	12	
4.1	Chemische samenstelling en bindingspercentage	12	
4.2	Korrelgrootteverdeling	14	
4.3	Valsnelheden	17	
4.4	Vergelijking gemeten korrelgrootte met gemeten valsnelheden	17	> 3
5	Conclusies	19	
6	Aanbevelingen meetmethoden	20	
6.1	Monstername	20	
6.2	Monsteranalyse	20	
6.3	Vervolgonderzoek	21	
7	Literatuur	22	
	Bijlage 1 Schema kwaliteitseisen oppervlaktewater	23	
	Bijlage 2 Mogelijke verklaringen afwijkingen resultaten Sedimet	24	

Samenvatting

In Nederland komt een groot deel van het hemelwater in de riolering terecht. Vaak gaat dit water samen met het huishoudelijke afvalwater naar een rioolwaterzuiveringsinstallatie (rwzi). De laatste jaren koppelen gemeenten echter steeds meer verharde oppervlakken af en krijgt nieuwbouw vaak een gescheiden rioolstelsel. Dit betekent dat hemelwater via een hemelwatersysteem direct naar het oppervlaktewater stroomt. Maar dit water kan verontreinigingen bevatten, zoals zware metalen van daken of PAK's van wegen. Verontreinigingen in hemelwater zijn meestal opgelost of gebonden aan zwevende stof. Gemeenten en waterschappen leggen soms bezinkvoorzieningen aan om verontreinigingen gebonden aan zwevende stof te verwijderen.

Onderzoek

4 < Tauw heeft in opdracht van Stichting RIONED en diverse gemeenten enkele karakteristieken van afstromend hemelwater bepaald. Het gaat om de concentratie verontreinigingen en de binding daarvan aan onopgeloste bestanddelen, de korrelgrootteverdeling en de valsnelheid van de aanwezige deeltjes. Voor waterschappen, gemeenten en adviesbureaus is inzicht in deze karakteristieken belangrijk. Op basis daarvan kunnen zij de kosteneffectiviteit van maatregelen beoordelen en/of (beheer) maatregelen optimaliseren.

Resultaten

Voor de meeste stoffen liggen de gevonden concentraties rond of onder het gemiddelde van STOWA's database regenwater. De gemiddelde bindingspercentages liggen ook onder de gemiddelde databasewaarde: ongeveer 10%. Er is een grote spreiding in de bindingspercentages gemeten. Ook de korrelgrootteverdeling varieert sterk per locatie en neerslaggebeurtenis.

Tijdens het onderzoek bleek de gekozen methode om de valsnelheden te bepalen niet geschikt voor monsters met een laag gehalte onopgeloste bestanddelen. Op basis van de beschikbare data is de verwachting dat gemiddeld 60% van de onopgeloste bestanddelen een valsnelheid heeft van minder dan 1 m/uur. De onzekerheid hierin is echter groot. Tussen de monsters zijn grote verschillen waargenomen.

Conclusies

De bindingspercentages van de onderzochte stoffen liggen rond de 60% (met uitzondering van PAK's). Algemeen is de verwachting dat het grootste deel van deze 60% is gebonden aan de kleine, moeilijk bezinkbare deeltjes. Op basis hiervan is voor de meeste verontreinigende stoffen een bezinkrendement van meer dan 50% theoretisch al nauwelijks haalbaar. Gezien de lage valsnelheid is een rendement van zo'n 25% waarschijnlijker. Dergelijke lage rendementen komen overeen met de resultaten van eerdere meetprojecten.

Bij zulke lage rendementen voor bezinkvoorzieningen is het de vraag of bij hemelwaterstelsels met een gemiddelde concentratie verontreinigingen de aanleg van een bezinkvoorziening een effectieve maatregel is. Om de kwaliteit van het afstromende hemelwater verder te verbeteren, liggen maatregelen zoals een bodempassage meer voor de hand. Op specifieke locaties met hoge concentraties kunnen bezinkvoorzieningen mogelijk wel een aanzienlijke bijdrage leveren.

1 Inleiding

Dit hoofdstuk beschrijft de ontwikkelingen die de aanleiding vormen voor dit onderzoek en het onderzoeksdoel. Ook vindt u hier wie aan het onderzoek hebben meegewerkt en een leeswijzer voor de overige hoofdstukken.

1.1 Aanleiding

In een intensief bebouwd en gebruikt gebied als Nederland komt een groot deel van het hemelwater in de riolering terecht. Vaak gaat dit water samen met het huishoudelijke afvalwater naar een rioolwaterzuiveringsinstallatie (rwzi). De laatste jaren koppelen gemeenten echter steeds meer verharde oppervlakken af en krijgt nieuwbouw vaak een gescheiden rioolstelsel. Dit betekent dat hemelwater via een hemelwatersysteem direct naar het oppervlaktewater stroomt. Als het hemelwater in stedelijk gebied over verharde oppervlakken stroomt, zoals daken en wegen, neemt het verontreinigingen op. Deze verontreinigingen belanden zo in het oppervlaktewater en beïnvloeden het aquatische milieu. Welke effecten afkoppelen op het milieu kan hebben, hangt af van de kwaliteit van de waterstromen en de soort verontreinigingen. Tot voor kort was het standaard om randvoorzieningen aan te brengen bij het vermoeden dat het water te veel verontreinigingen bevat. Meestal verwijderen de randvoorzieningen slibdeeltjes en daaraan gebonden verontreinigingen door bezinking.

Nog weinig bekend

Verontreinigingen in hemelwater zijn meestal opgelost of gebonden aan zwevende stof. Sporadisch komen verontreinigingen ook in pure vorm voor, zoals een metaaldeeltje of een oliedruppel. Ondanks verschillende eerdere onderzoeken (onder meer door Wentink en Boogaard, 2002) is het onduidelijk in welke mate en aan welke fractie verontreinigingen gebonden zijn. Ook over de hoeveelheid zwevende stoffen die het hemelwater bij afstroming meeneemt en hoe groot deze deeltjes zijn, is weinig bekend. De literatuur over de samenstelling van het afstromende hemelwater splitst sporadisch de totale verontreiniging in een opgelost en een gebonden deel. Deze informatie is wel nodig om een beeld te krijgen van de wijze waarop de verontreiniging in het water aanwezig is.

Van de gebonden fractie is bekend dat de meeste verontreinigingen gebonden zijn aan de kleinste fractie. Maar welke valsnelheid hierbij hoort, is in Nederland nooit goed uitgezocht. Internationaal heeft onderzoek vooral geleid tot het inzicht dat er een behoorlijk grote spreiding is in de bezinkbaarheid. Zonder inzicht in de maatgevende valsnelheid is eigenlijk niet goed gefundeerd een bezinkvoorziening te ontwerpen.

1.2 Doel

Het doel is inzicht te krijgen in de concentraties en bindingspercentages van verontreinigingen en meer kennis op te doen over de maatgevende valsnelheden en de spreiding van de valsnelheden. Deze informatie is voor waterschappen, gemeenten en adviesbureaus belangrijk, omdat zij daarmee de kosteneffectiviteit van maatregelen kunnen beoordelen en/of (beheer) maatregelen kunnen optimaliseren.

1.3 Bijdragen

Naast Stichting RIONED hebben de gemeenten Alphen aan den Rijn, Amsterdam (Waternet), Schagen, Zaanstad en Zijpe bijgedragen aan het onderzoek. Deze gemeenten hebben geschikte monsterlocaties geselecteerd en de metadata (locatiekenmerken) hierover aangeleverd. Zij hebben een notitie ontvangen met een korte beschrijving van de onderzoeksmethode en de resultaten in hun eigen gemeente.

Ondanks een gemiddelde jaarneerslag van bijna 800 mm bleek het verzamelen van hemelwatermonsters lastiger dan verwacht (zie paragraaf 2.1). De monsters zijn daarom over een periode van bijna anderhalf jaar genomen. Wij danken de stagiaires die hebben geholpen om de data te verzamelen en de analyses uit te voeren: Pascal Kregting (Haagse Hogeschool, Den Haag), Jochem Zielstra (Hogeschool Amsterdam, Amsterdam), Wouter Jonker (Wellantcollege, Houten), Barry Leguijt (Vrije Universiteit, Amsterdam) en Mark op 't Landt (Hogeschool van Amsterdam, Amsterdam).

Tauw dankt ook de TUDelft voor de samenwerking en voor het gebruik van de Sedimet en de deeltjesteller.

1.4 Leeswijzer

Hoofdstuk 2 beschrijft de gevolgde onderzoeksmethoden.

Hoofdstuk 3 bevat de onderzoekslocaties, hun belangrijkste kenmerken en de data waarop de monsters zijn genomen.

Hoofdstuk 4 presenteert de resultaten en vergelijkt deze met nationale en internationale literatuur.

Hoofdstuk 5 beschrijft de belangrijkste conclusies van het onderzoek.

Hoofdstuk 6 biedt aanbevelingen om de onderzoeksmethoden te verbeteren.

Hoofdstuk 7 geeft een overzicht van de gebruikte literatuur.

Bijlage 1 bevat het kwaliteitseisenschema voor oppervlaktewater.

Bijlage 2 beschrijft mogelijke verklaringen voor afwijkingen in de resultaten van de Sedimet.

2 Onderzoeksmethoden

Het onderzoek naar de bezinkingskarakteristieken bestaat uit drie stappen:

- monstername (zie paragraaf 2.1);
- monsteranalyse (zie paragraaf 2.2);
- vergelijking van de resultaten met literatuur. (Deze laatste stap komt in hoofdstuk 4 aan de orde.)

2.1 Monstername

Voor de monstername van hemelwater is antwoord nodig op drie vragen:

- 1 Wat is een representatieve locatie?
- 2 Wat is een goed moment?
- 3 Wat is een goede manier?

1 Representatieve locatie

Het is lastig om een representatieve monsternamelocatie te vinden. Het afstromende hemelwater dat in een kolk stroomt, is anders dan het water dat uit een riool in het oppervlaktewater stroomt. Sommige zwevende deeltjes blijven achter in de kolk of bezinken in het riool.

Deze deeltjes kunnen tijdens heviger buien weer verder getransporteerd worden naar het oppervlaktewater. Voor dit onderzoek is gekozen om watermonsters te nemen in het hemelwaterriool vlak voor de uitlaat naar het oppervlaktewater. Dit geeft het beste beeld van de belasting op het oppervlaktewater en is ook het meest representatief voor de eventuele input van een zuiverende voorziening. Bezinkingseffecten in riool en kolk zijn in dit onderzoek dus niet meegenomen.

2 Goed moment

Het is ook moeilijk om een goed moment voor monstername te vinden. Bij het begin van een bui is een 'first flush' te meten. Maar vooral in verdrongen hemelwaterriolen bestaat dan de kans dat het monster een groot aandeel hemelwater uit eerdere buien of zelfs ingestroomd oppervlaktewater bevat. Aan het eind van een bui is de concentratie verontreinigingen vaak iets lager dan gemiddeld. Aangezien elk tijdstip voor- en nadelen heeft, hebben uiteindelijk meestal praktische omstandigheden de doorslag gegeven.

3 Goede manier

Tot slot is het lastig om een monster te nemen dat de gemiddelde hemelwaterafvoer goed weergeeft. Een groot

deel van het niet opgeloste materiaal wordt over de rioolbodem getransporteerd. Hoger in de waterkolom is veel minder zwevende stof te vinden. Onder de aanname dat zich halverwege de buis een goed gemiddelde bevindt, zijn de monsters ongeveer op halve buishoogte met een pomp met slang uit een hemelwaterput gezogen. Bij niet volledig gevulde leidingen is de slang op de helft van de waterdiepte gehouden. Het instroompunt van de slang is met een afstandhouder op vaste afstand van de bodem gehouden. Bij punten met een vrije uitstroming is een emmer onder het uitstroompunt gehouden. Op deze manier is een integraal, dieptegemiddeld monster genomen. Bovendien zijn zo in de analyse ook de deeltjes meegenomen die over de bodem worden getransporteerd. Als de monstername met een emmer bij vrije uitstroming heeft plaatsgevonden, staat dit vermeld in tabel 3.1 onder het kopje 'Bijzonderheden monstername'. Door de vele monsters geven de resultaten een representatief beeld van de gemiddelde hemelwaterafvoer.

> 7

Planning monstername

Veel neerslag valt met een te lage intensiteit om representatieve monsters te kunnen nemen. Bij hevige regen zorgt het lokale karakter van de bui ervoor dat het lastig is op de juiste tijd op de juiste plaats te zijn. Om de monstername in te plannen, heeft Tauw dagelijks de neerslagvoorspelling bijgehouden. Als 3 mm of meer neerslag per dag werd voorspeld, plande Tauw op basis van radarbeelden in waar en wanneer monstername kon plaatsvinden. Omdat de eerste millimeters neerslag nauwelijks tot afstroming komen, zijn alleen monsters genomen bij buien met (ruim) meer dan 5 mm neerslag.

Vier deelmonsters

Het mengmonster van elke locatie is gesplitst in vier deelmonsters. Twee om zware metalen, PAK's en fosfor te analyseren (totaal en opgeloste fractie) en twee om de korrelgrootte en valsnelheid vast te stellen.

2.2 Monsteranalyse

Met de analyse zijn de volgende eigenschappen van de hemelwatermonsters bepaald:

- 1 de chemische samenstelling en het bindingspercentage (zie paragraaf 2.2.1);
- 2 de korrelgrootteverdeling (zie paragraaf 2.2.2);
- 3 de valsnelheid (zie paragraaf 2.2.3).

Alle analyseresultaten zijn verzameld in een spreadsheet die u kunt opvragen bij Stichting RIONED.

2.2.1 Chemische samenstelling en bindingspercentage

Van de monsters is in het laboratorium de concentratie verontreinigende stoffen bepaald. In dit onderzoek gaat het om zware metalen, PAK's en fosfor. Naast de kwaliteit van het afstromende hemelwater is de vorm waarin de verontreinigingen zich in dit water bevinden van belang. Vooral de mate waarin verontreinigingen zich binden aan de diverse fracties zwevende stof, is relevant voor de toepasbare behandelingswijzen van hemelwater.

8 <

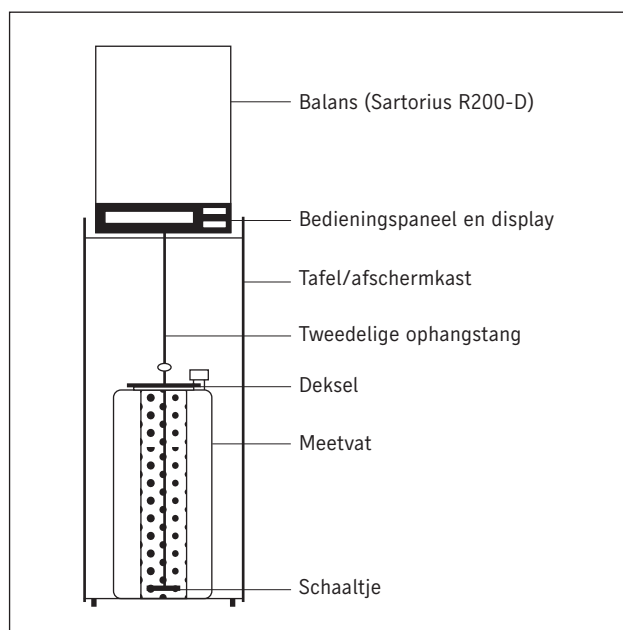
Om de binding van verontreinigingen aan onopgeloste bestanddelen te bepalen, is de totale verontreinigingslast gesplitst in een opgeloste en een gebonden fractie. Door het watermonster door een filter van 0,45 mm te leiden, blijven de zwevende stoffen in het filter achter. Het gefilterde water bevat dan de opgeloste verontreinigingen. Het verschil tussen de totale concentratie en het opgeloste deel is dan het aandeel van de gebonden verontreiniging (deeltjes groter dan 0,45 mm).

2.2.2 Korrelgrootteverdeling

Op de Technische Universiteit Delft is de korrelgrootteverdeling bepaald met een deeltjesteller. In de deeltjesteller worden de deeltjes langs een lichtbron geleid. De mate van lichtabsorptie wordt daarna omgerekend naar de deeltjesgrootte. Deze deeltjesteller is geschikt voor deeltjes met een grootte van 0,002 tot 0,4 mm. Bij het omrekenen van het aantal deeltjes naar een fractieverdeling is aangenomen dat alle deeltjes een gelijke vorm en eenzelfde soortelijk gewicht hebben.

2.2.3 Valsnelheid

Om de valsnelheden te berekenen, is de Sedimet-opstelling gebruikt. Dit is een proefopstelling die de TUDelft in



Figuur 2.1 Schematische weergave Sedimet

de jaren 90 heeft ontwikkeld. Hiermee is van een monster relatief eenvoudig een bezinkcurve te bepalen (Den Toom en Kranenburg, 1992). De Sedimet bestaat uit een meetvat met een zeer nauwkeurige weegschaal die vlak boven de bodem hangt (zie figuur 2.1). De methode is gebaseerd op het principe van Oden (Oden, 1915). Dit principe komt verderop in deze paragraaf nader aan de orde. De proefopstelling geeft de verdeling van de valsnelheid in relatie tot het gewicht van het slib. Deze methodiek heeft een hoge afleesnauwkeurigheid (10 μg) en is geschikt om de bezinkingskarakteristieken van monsters te bepalen voor valsnelheden tussen 0,1 en 10 m/uur.

Bezinken en wegen

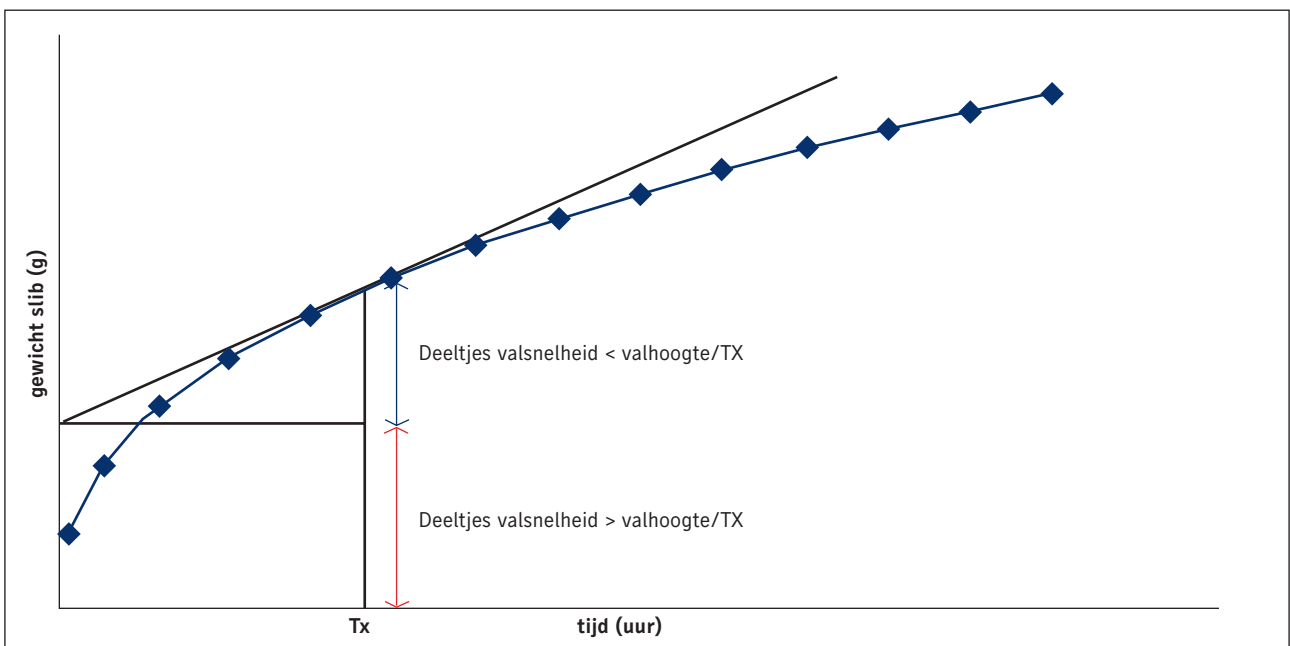
Als het monster goed gemengd is, duurt de meting minimaal 9 uur. De deeltjes gaan bezinken en het grootste gedeelte daalt op het weegschaaltje en wordt gemeten. Elk deeltje heeft een eigen valsnelheid. Hierbij registreert een computer hoeveel gewicht op het weegschaaltje neerkomt. De bezinkende deeltjes veroorzaken de gewichtstoename. Voorwaarde is wel dat alle deeltjes een grotere dichtheid hebben dan het hemelwater, zodat deze stoffen kunnen bezinken. Aannemelijk is dat bij een goede doormenging de valhoogte van de deeltjes in een bepaalde grootteklasse gelijkmatig over de hoogte van het meetvat is verdeeld. Het gewicht op het schaaltje

neemt in tijdsinterval toe met de som van de gewichten van alle deeltjes die in dat tijdsinterval bezinken.

Principe van Oden

Het gewicht op de weegschaal op een zeker moment (T_x) bestaat enerzijds uit alle deeltjes met een valsnelheid groter dan de maximale valhoogte/ T_x en anderzijds uit

deeltjes met een lagere valsnelheid (het deel dat nog aan het bezinken is) (zie figuur 2.2). Op basis van dit principe is de verdeling van de valsnelheden te bepalen door op een aantal momenten de afgeleide (raaklijn) van de gewichttoename op de weegschaal af te lezen. Aan het einde van een proef, hoort de lijn horizontaal te lopen. Dan is al het bezinkbare materiaal bezonken.



Figuur 2.2 Schematische weergave principe van Oden

3 Locaties en data monstername

De watermonsters voor het onderzoek zijn genomen in de volgende gemeenten:

- Alphen aan den Rijn
- Amsterdam
- Schagen
- Zaanstad
- Zijpe.

De meetomstandigheden zijn zo goed mogelijk vastgelegd. Deze gegevens zijn verzameld in een spreadsheet die u kunt opvragen bij Stichting RIONED. Hierbij gaat het onder meer om:

- de neerslag in voorgaande dagen;
- het seizoen;
- de inschatting van de aanwezigheid van foutieve aansluitingen;
- de aanwezigheid van bouwactiviteiten;
- de omvang van het afstroomgebied;
- de stroomsnelheid tijdens de monstername.

Locaties en kenmerken

De belangrijkste kenmerken van de verschillende locaties vindt u in tabel 3.1. De afvoerende oppervlakken bestaan voornamelijk uit dakoppervlak en/of straat met open verharding in woonwijken en wijkontsluitingswegen. In de gemeente Zijpe is ook het afstromende hemelwater van een verkeersluw bedrijventerrein gemeten.

Moment monstername

Uit praktische overwegingen zijn de meeste monsters aan het eind van een bui genomen. In Zijpe (Sint Maartensvlotbrug) en Amsterdam (Ookmeerweg) zijn monsters voor en na een zuiverende voorziening genomen.

Locatie	Verhard oppervlak	Bijzonderheden	Datum	Neerslag dag monstername [mm]	Neerslag week voor monstername [mm]	Bijzonderheden monstername
Amsterdam, Centrumring Stadhouderskade	drukke weg	trambaan, stadsring	26 augustus 2010	52,8	43,2	integraal monster uit inkomende leiding
Amsterdam, John Hadleystraat	woonwijk		26 augustus 2010	52,8	43,2	
Amsterdam, Nieuwe Leeuwarderweg	drukke weg	vierbaansweg + kruising, werkzaamheden	12 mei 2010	14,2	1,3	
Amsterdam, Nieuwe Leeuwarderweg2	drukke weg	vierbaansweg + kruising, werkzaamheden	12 mei 2010	14,2	1,3	
Amsterdam, Ookmeerweg voor	drukke weg		23 augustus 2010	34	15,3	integraal monster uit inkomende leiding
Amsterdam, Ookmeerweg na	drukke weg		23 augustus 2010	34	15,3	
Amsterdam, Europaboulevard	drukke weg	veel bomen	26 augustus 2010	52,8	43,2	hemelwater stroomt put in
Amsterdam, IJburglaan Haveneiland	woonwijk		26 augustus 2010	52,8	43,2	
Amsterdam, Steigereiland (Schokkerjachtdijk)	woonwijk		12 mei 2010	14,2	1,3	
Zijpe, 't Zand bui 1	industrie-terrein	industrieterrein met lichte nijverheid	3 mei 2010	23,2	5	kikker in de put, veel sediment op bodem
Zijpe, 't Zand bui 2	industrie-terrein	industrieterrein met lichte nijverheid	7 september 2010	14,4	1,2	
Zijpe, Hoenderpark	woonwijk		7 september 2010	14,4	1,2	
Zijpe, Sintmaartensvlotbrug	woonwijk	voor lamellenfilter	7 september 2010	14,4	1,2	vol muggen en blaadjes
Zijpe, Sintmaartensvlotbrug	woonwijk	na lamellenfilter	7 september 2010	14,4	1,2	H2S-geur uit lamellenfilter
Zaandam, Lindenlaan	woonwijk		11 november 2010	12,1	20,3	laatste put voor VGS-gemaal
Zaandam, Notenlaan 6	woonwijk		16 juni 2011	7,7	32,8	laatste put voor overstort
Zaandam, Notenlaan 17	woonwijk		16 juni 2011	7,7	32,8	
Zaandam, Mellum 2	woonwijk		16 juni 2011	7,7	32,8	laatste put voor overstort
Alphen ad Rijn, Toermalijnstraat	woonwijk		8 juni 2010	10	3	helder water
Alphen ad Rijn, Laan der Continenten	drukke weg		8 juni 2010	10	3	
Alphen ad Rijn, Eendenkooi/Kooikerstraat	woonwijk		8 juni 2010	10	3	troebel, vieze geur (foutieve aansluitingen?)
Alphen ad Rijn, Amethiststraat	woonwijk		8 juni 2010	10	3	dun laagje water, mogelijk slib in monster
Schagen, Westersingel	woonwijk		14 september 2010	5,7	31,9	hemelwater over overstort-muur
Schagen, Welmolen	drukke weg		14 september 2010	5,7	31,9	integraal monster uit inkomende leiding
Schagen, Torenstraat	woonwijk		14 september 2010	5,7	31,9	
Schagen, Zijperweg	industrie-terrein		14 september 2010	5,7	31,9	andere plek kruising open, rwa-uitlaat tijdelijk afgesloten

4 Resultaten

Dit hoofdstuk presenteert de onderzoeksresultaten en vergelijkt deze met nationale en internationale literatuur. Achtereenvolgens komen de resultaten aan bod van:

- de chemische samenstelling en het bindingspercentage (zie paragraaf 4.1);
- de korrelgrootteverdeling (zie paragraaf 4.2);
- de valsnelheden (zie paragraaf 4.3);
- de vergelijking van gemeten korrelgrootte met gemeten valsnelheden (zie paragraaf 4.4).

4.1 Chemische samenstelling en bindingspercentage

4.1.1 Chemische samenstelling

In figuur 4.1 staan de analyseresultaten van de concentraties lood, koper, nikkel, cadmium, zink, fosfor en PAK10 in de verschillende monsters. Ter vergelijking geeft de figuur ook het gemiddelde uit een aantal Nederlandse onderzoeken (Boogaard en Lemmen, 2007) en de normconcentratie (MTR) weer. Mede als gevolg van de Kaderrichtlijn Water (KRW) zijn de normen in Nederland

verdeeld over verschillende wetten en besluiten. Voor 2010 waren de MTR-waarden uit de Vierde nota waterhuishouding leidend. De waterkwaliteitsnormen vanuit de KRW zijn in Nederland geïmplementeerd in het Besluit kwaliteitseisen en monitoring water (Bkmw 2009) en een onderliggende ministeriële regeling. In bijlage 1 vindt u een schema van het huidige toetsingskader.

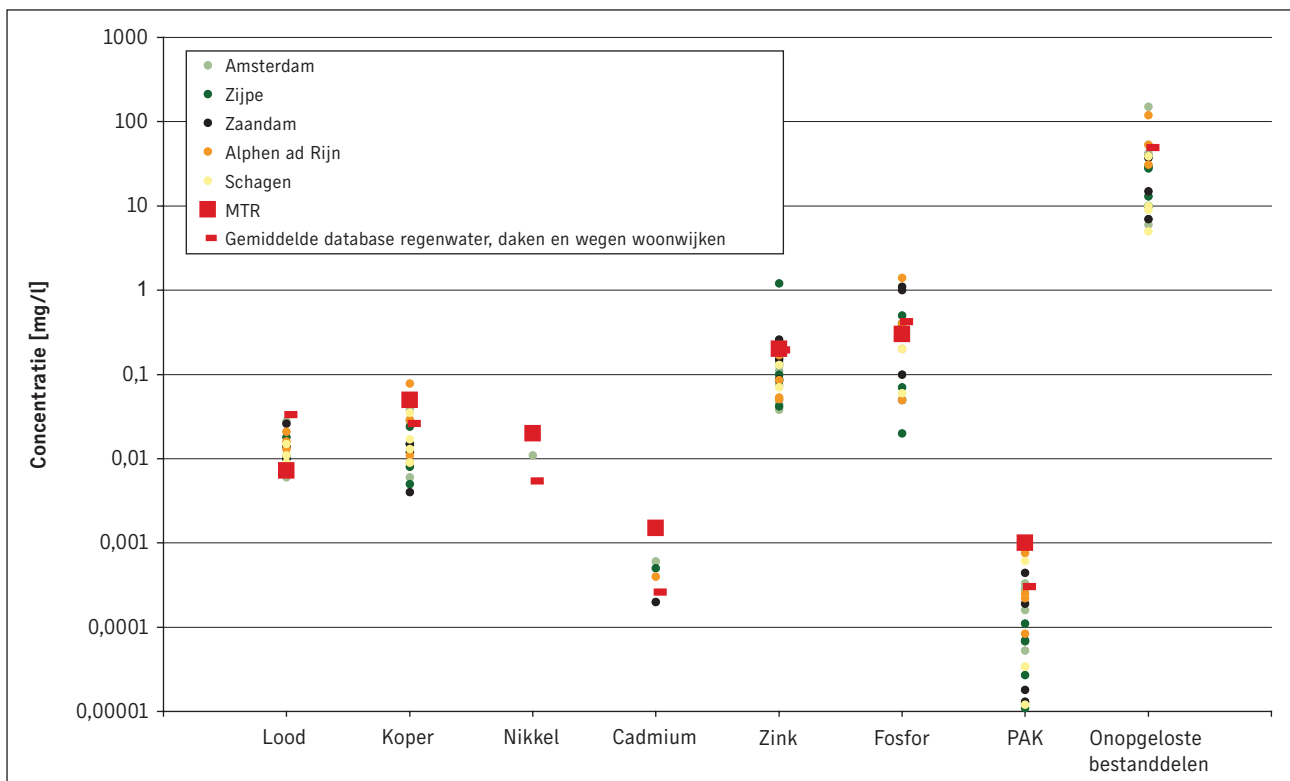
Soorten stoffen

Van de geanalyseerde stoffen zijn lood en nikkel prioritaire stoffen (PS), koper en zink zijn specifieke verontreinigende stoffen (SVS) en cadmium en fosfor vallen in de categorie andere stoffen (AS). Enkele van de geanalyseerde PAK's zijn PS voor de KRW, andere PAK's zijn SVS. Voor het overzicht zijn in dit onderzoek de PAK's niet opgesplitst, maar is PAK10 gebruikt.

Gebruikte normen

Conform het schema in bijlage 1 is voor lood en nikkel de norm uit bijlage 1 van het Bkmw gebruikt. Voor koper en zink komen de normen uit de Ministeriële regeling monito-

12 <



Figuur 4.1 Concentraties verontreiniging vergeleken met norm en gemiddelde database regenwater

ring KRW. De MTR-waarden uit de Vierde nota waterhuishouding zijn gebruikt voor cadmium, fosfor en PAK10.

Resultaten

Voor de meeste stoffen liggen de gevonden concentraties rond of onder het gemiddelde van de database regenwater. Opvallend is de situatie voor lood: de gevonden concentraties liggen allemaal onder het gemiddelde van de database regenwater, maar meestal nog wel boven de MTR-waarde. De lage waarden ten opzichte van de database zijn te verklaren doordat in de database nog metingen uit de tijd van loodhoudende brandstoffen verwerkt zijn. Bij zink valt de meting voor het lamellenfilter in Sint Maartensvlotbrug (Zijpe) op. Hier is zes keer de MTR-waarde gemeten, maar de opgeloste fractie in het monster blijft wel onder de norm. Het is dus goed mogelijk dat dit een uitschieter is, veroorzaakt door één enkel deeltje met veel zink.

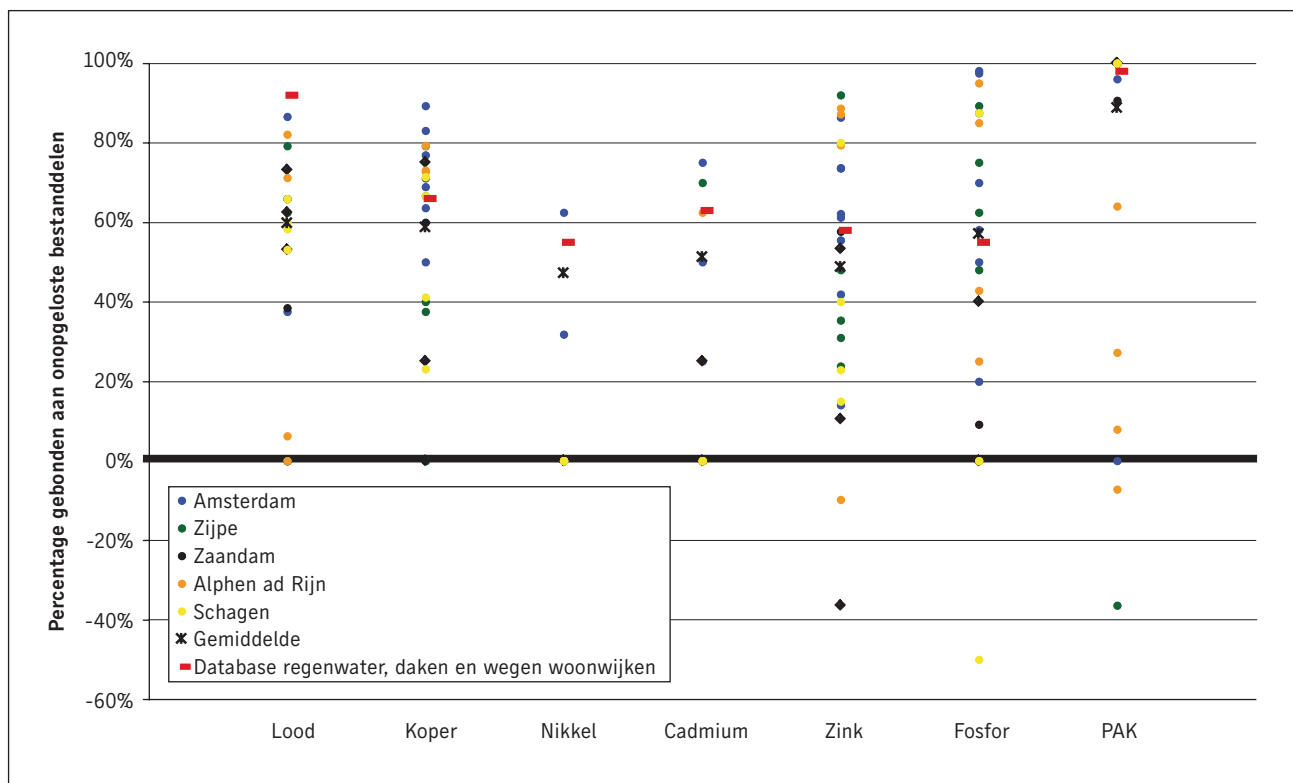
4.1.2 Bindingspercentage

In figuur 4.2 staan de gemeten bindingspercentages (zie paragraaf 2.2.1 voor methode). In de figuur valt vooral

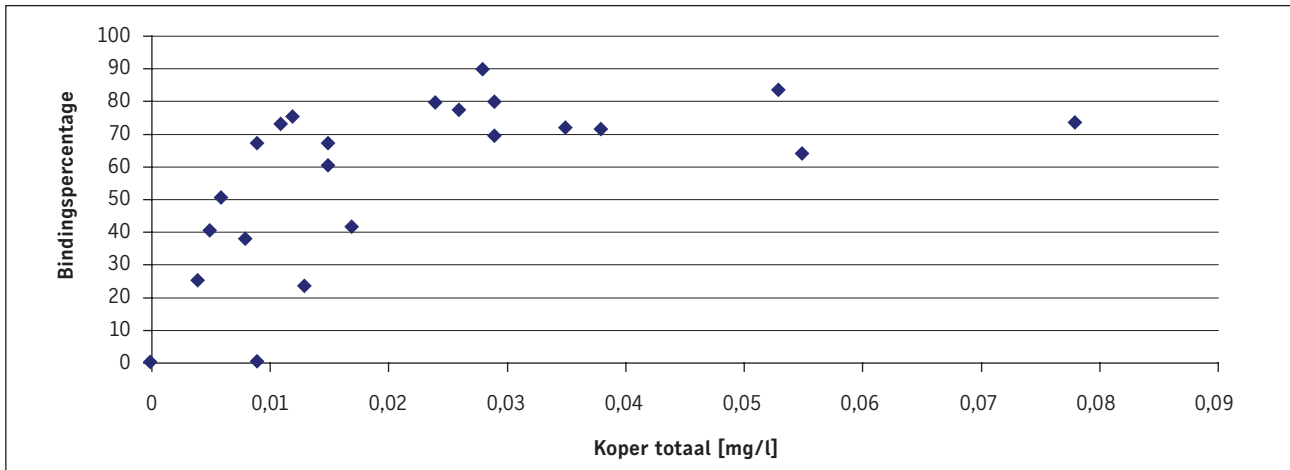
de grote spreiding op. Deze is groter dan in de database regenwater. Ook zijn enkele negatieve bindingspercentages gemeten. Dit is fysisch niet mogelijk, maar komt waarschijnlijk doordat monsters niet volledig homogeen waren. Bij de berekening van de gemiddelde bindingspercentages zijn de negatieve waarden niet meegenomen. De gemiddelden liggen over het algemeen ongeveer 10% onder de gemiddelde waarde uit de database regenwater. Het bindingspercentage voor lood ligt zelfs 30% lager.

Alleen voor fosfor ligt het gemiddelde bindingspercentage (iets) boven de gemiddelde waarde uit de database regenwater. Dat de overige bindingspercentages lager liggen dan de database, is te verklaren doordat ook de concentraties verontreinigende stoffen lager liggen dan in de database regenwater. De grootste daling van het bindingspercentage (lood) komt ook overeen met de grootste daling in de totale concentratie. Figuur 4.3 illustreert dit met een grafiek die het bindingspercentage van koper uitzet tegen de totale concentratie. Bij hogere koperconcentraties zit een groter deel gebonden aan

> 13



Figuur 4.2 Bindingspercentage vergeleken met gemiddelde eerdere onderzoeken in Nederland



Figuur 4.3 Relatie bindingspercentage en concentratie bij koper

onopgeloste bestanddelen. Gezien de grote spreiding in de bindingspercentages zal het rendement van een bezinkvoorziening sterk kunnen variëren in ruimte en tijd.

14 <

4.2 Korrelgrootteverdeling

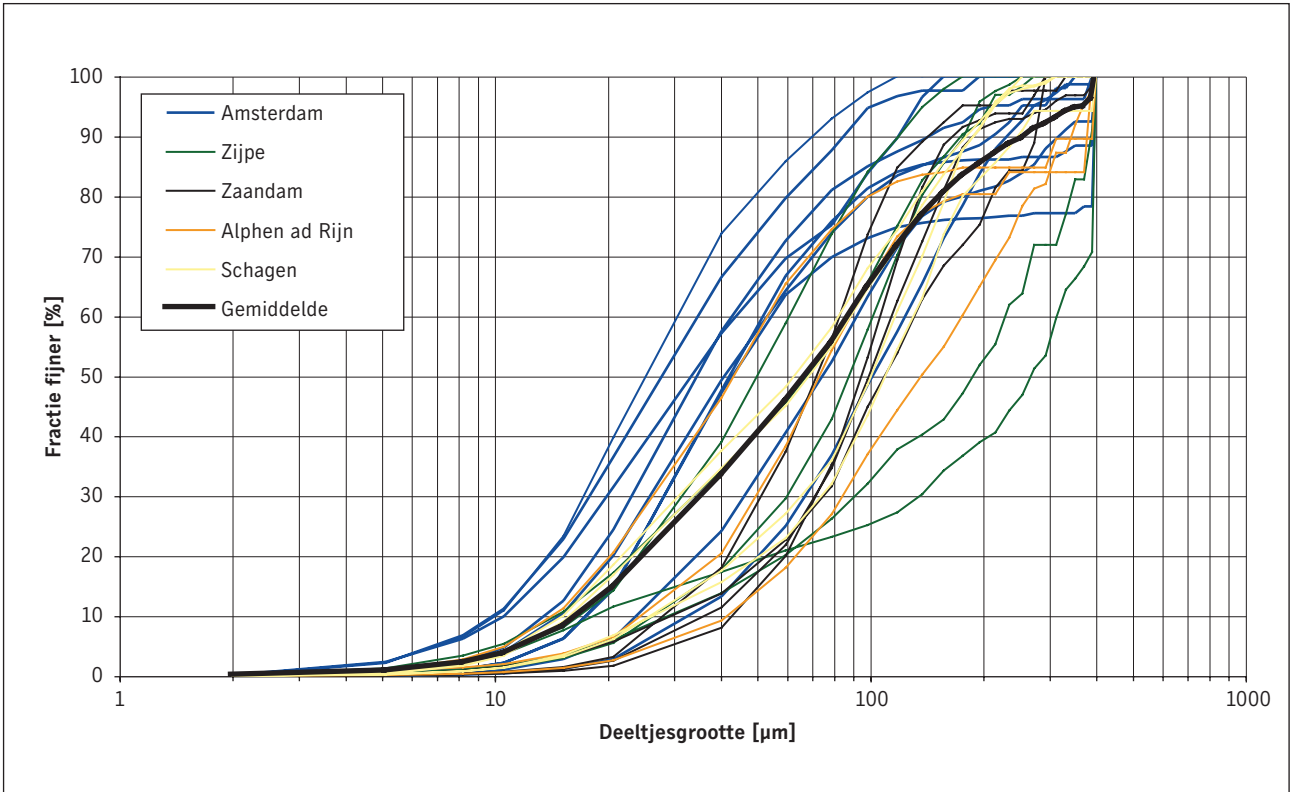
Figuur 4.4 geeft de gemeten korrelgrootteverdeling weer (zie paragraaf 2.2.2 voor methode). De fractieverdelingen zijn gebaseerd op volume en niet op gewicht.

Opvallend is de grote spreiding in korrelgrootteverdelingen. De mediane korrelgrootte (D50, 50% van de deeltjes (naar volume) heeft een grotere diameter en 50% een kleinere) varieert tussen de 25 en 270 µm. Vooral bij Zijpe, 't Zand bui 1 en Zijpe, Sintmaartensvlotbrug voor filter zijn relatief grote deeltjes gevonden. In een groot deel van de Amsterdamse hemelwaterriolen zijn de aanwezige deeltjes juist relatief klein.

De korrelgrootteverdeling varieert dus sterk per locatie. Op twee locaties is twee keer gemeten. In Amsterdam zijn tijdens één bui twee monsters genomen op verschillende punten in de hemelwaterpompkelder aan de Nieuwe Leeuwarderweg. In beide monsters was de mediane korrelgrootte 43 µm. In Zijpe zijn op één locatie meerdere monsters genomen tijdens twee verschillende buien. De mediane korrelgroottes waren hierbij 70 en 270 µm. Ook de variatie op één locatie (in de tijd) kan dus groot zijn.

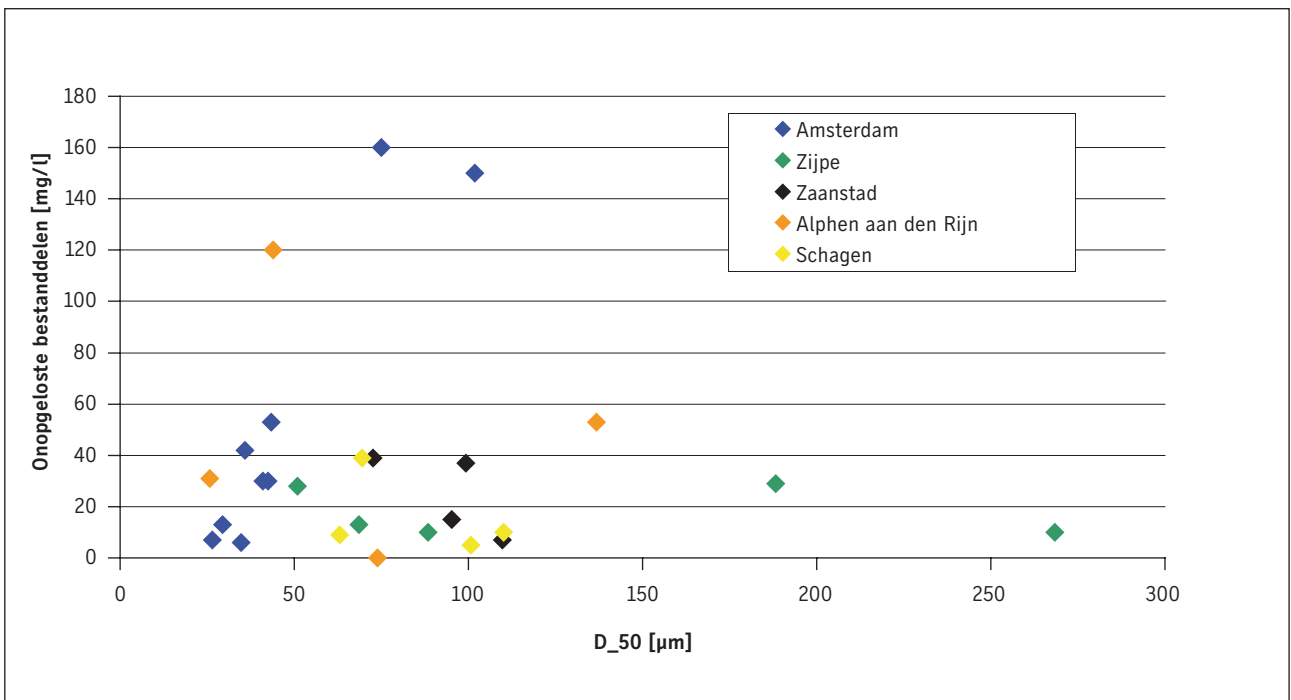
De verwachting was dat tussen de hoeveelheid zwevende stof en de mediane korrelgrootte een sterke relatie zou bestaan. Een grotere mediane korrelgrootte zou overeen moeten komen met relatief veel zwevende stof. Om deze hypothese te toetsen, zet figuur 4.5 de mediane korrelgrootte (D50) uit tegen de concentratie onopgeloste bestanddelen. In dit onderzoek is geen eenduidige relatie gevonden tussen de mediane korrelgrootte en de concentratie onopgeloste bestanddelen. Het is dus niet per definitie zo dat van hemelwater met een hoge concentratie zwevende stof een groter deel bezinkt dan van hemelwater met een lagere concentratie verontreiniging.

Dat de korrelgrootteverdeling per locatie sterk kan variëren, komt overeen met de conclusies uit een eerdere vergelijking tussen diverse internationale onderzoeken (Boogaard et al., 2007a). Figuur 4.6 laat een vergelijking zien tussen de korrelgrootteverdelingen van Amsterdam en de korrelgrootteverdelingen uit diverse internationale onderzoeken. Laatstgenoemde verdelingen zijn met verschillende methoden onderzocht en gebaseerd op monsters uit verschillende punten in het rioolsysteem. Daardoor geven deze onderzoeken een goed beeld van variatie in korrelgrootteverdeling van de zwevende deeltjes in een hemelwaterriolering.

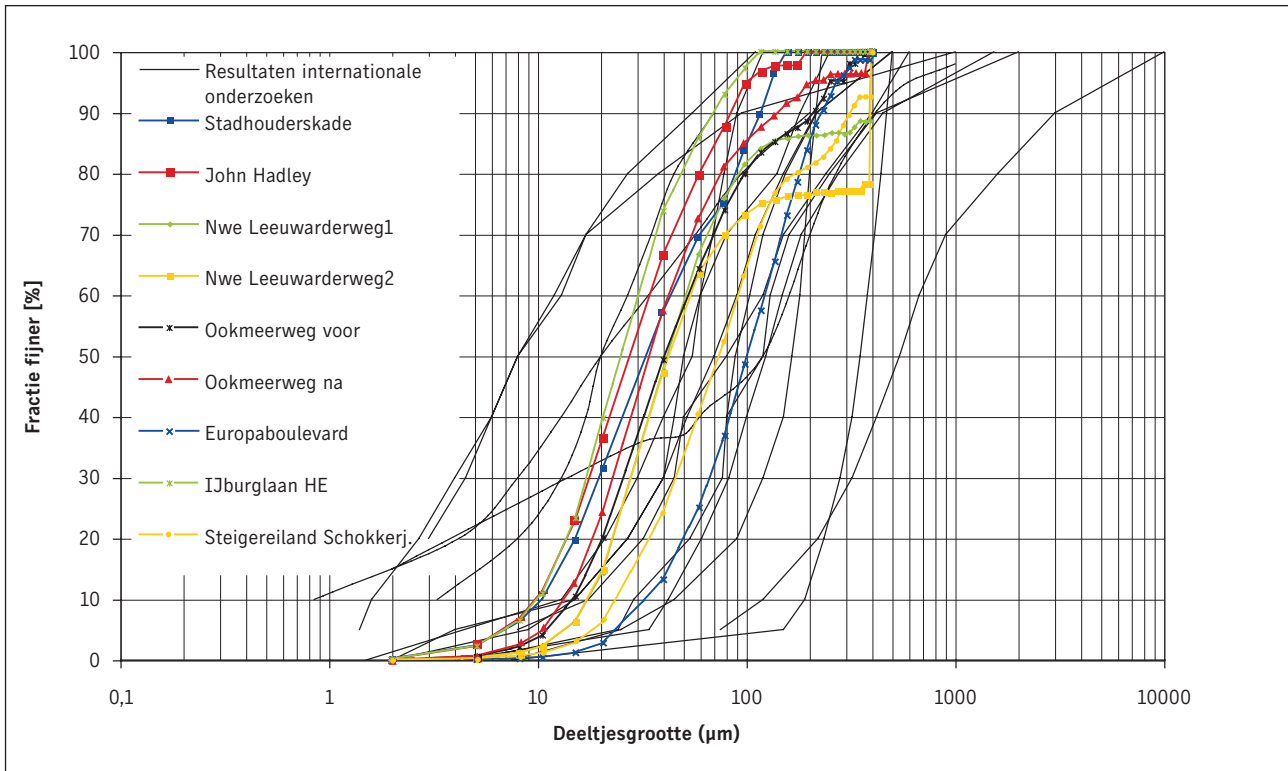


> 15

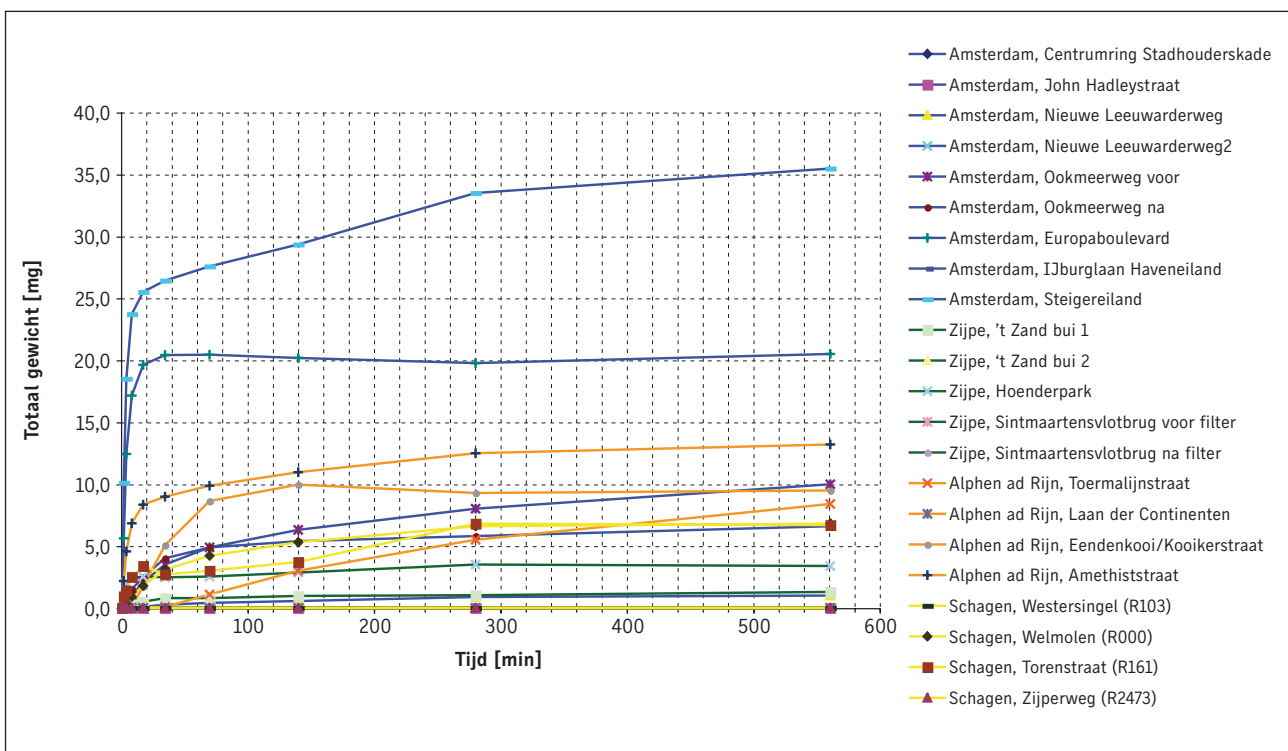
Figuur 4.4 Korrelgrootteverdeling (fractiepercentages gebaseerd op volume)



Figuur 4.5 Relatie D50 en concentratie onopgeloste bestanddelen



Figuur 4.6 Vergelijking korrelgrootteverdeling (Amsterdam) met internationale literatuur



Figuur 4.7 Data valselnelheidsmetingen (gecorrigeerd voor verdamping)

4.3 Valsnelheden

Op basis van de theorie (zie paragraaf 2.2.3) werden curves verwacht als in figuur 2.2. De verwachting was een constante afname van de snelheid waarin het gewicht toeneemt. Maar enkele meetresultaten waren opmerkelijk: gewichtsafname in de tijd of zelfs deels een stijging van de gewichtstoename in de tijd. Bijlage 2 beschrijft de vreemde resultaten en geeft een aantal oorzaken voor deze afwijkingen. Enkele meetresultaten waren op basis van correctie voor verdamping nog te 'redden'. Voor de 'goede' meetresultaten en deze 'geredde' metingen geeft figuur 4.7 de gecorrigeerde meetwaarden.

N.B. De valsnelheden van de monsters uit Zaanstad (als laatste genomen) waren door technische mankementen niet meer met de Sedimet te analyseren. Daarom ontbreken deze.

Figuur 4.8 bevat dezelfde informatie als figuur 4.7, maar figuur 4.8 geeft het gewicht op tijdstip [t] weer als percentage van het eindgewicht (en op een logaritmische tijdsas).

Vanwege het onregelmatige verloop was op deze data de methode van Oden niet toepasbaar. Na 15 minuten, het moment waarop alle deeltjes met een valsnelheid groter dan 1 m/uur bezonken zouden moeten zijn, is 0 tot 95% van het uiteindelijke gewicht bereikt. Er is dus duidelijk sprake van een grote spreiding in de resultaten. De gemiddelde waarde na 15 minuten ligt op 40%. Op basis van de grafiek is te schatten dat gemiddeld 60% van de onopgeloste bestanddelen een valsnelheid heeft van minder dan 1 m/uur.

Of het gemiddelde percentage in werkelijkheid hoger of lager dan 60% ligt, is moeilijk te zeggen. Hierbij spelen drie effecten een rol:

- 1 Het gewicht van deeltjes met een valsnelheid groter dan 13,5 m/uur is niet meegenomen. Dit leidt tot een overschatting van het percentage deeltjes met een lage bezinksnelheid.
- 2 Bij het gemeten gewicht zitten ook deeltjes met een valsnelheid lager dan 1 m/uur, die zich bij aanvang van de proef dicht bij de bodem bevonden. Dit is de fractie

'deeltjes valsnelheid < valhoogte/Tx' uit figuur 2.2. Dit leidt tot een onderschatting van het percentage deeltjes met een lage bezinksnelheid.

- 3 Het aandeel deeltjes met een lage bezinksnelheid is overschat door temperatureffecten (zie bijlage 2 voor toelichting). Maar dit effect zal in de eerste 15 minuten van het experiment klein zijn.

4.4 Vergelijking gemeten korrelgrootte met gemeten valsnelheden

Om de gemeten valsnelheden te kunnen toetsen, zijn de theoretische valsnelheden berekend op basis van de gemeten korrelgrootteverdeling. De vergelijking is gemaakt voor het gemiddelde van alle monsters en voor de monsters van 'Alphen aan den Rijn Amethiststraat' en 'Amsterdam Ookmeerweg voor'. Voor deze twee monsters is gekozen, omdat de Sedimet bij deze monsters ongeveer de verwachte resultaten gaf.

> 17

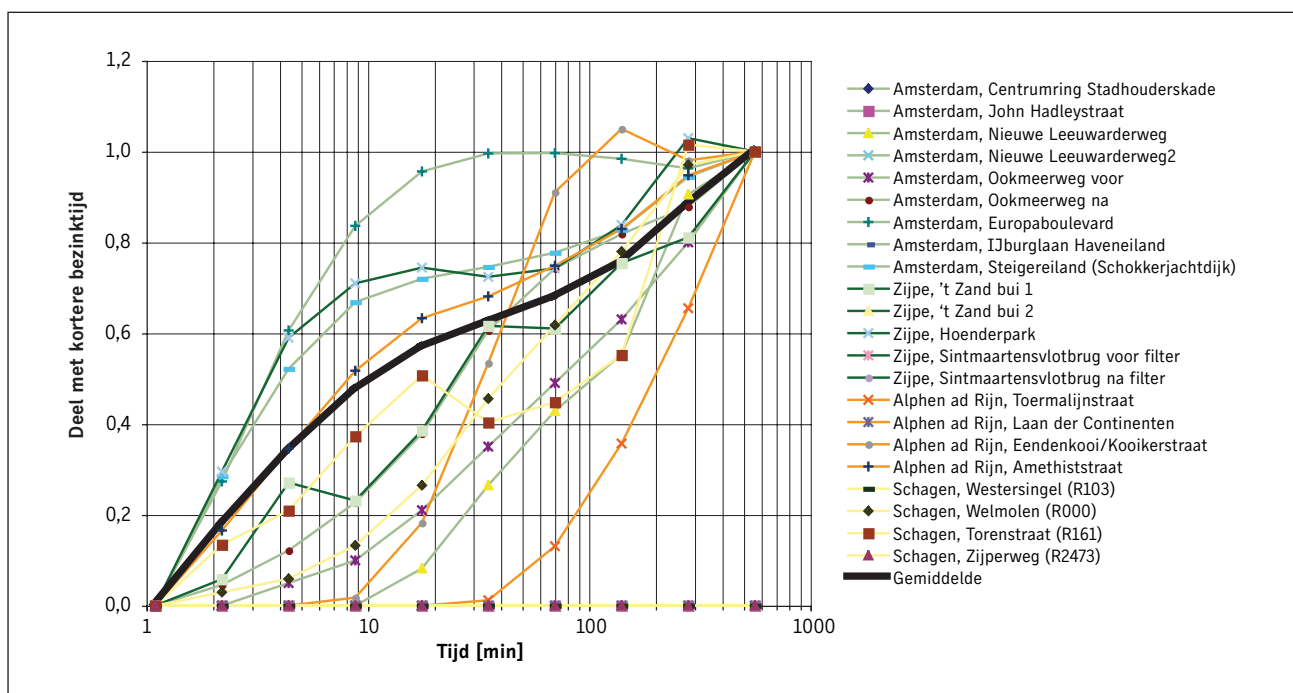
De theoretische valsnelheden zijn berekend met de wet van Stokes en de aanname dat de deeltjes perfect rond zijn. Voor het soortelijk gewicht van de deeltjes zijn drie verschillende waarden aangenomen: 1.500 kg/m³, 2.000 kg/m³ en een variabele dichtheid (1.500 kg/m³ voor deeltjes groter dan 200 µm, 1.200 kg/m³ voor deeltjes 100-200 µm en 1.050 kg/m³ voor de deeltjes kleiner dan 100 µm).

Figuur 4.9 geeft de berekende (theoretische) valsnelheden en de gemeten valsnelheden weer. Duidelijk zichtbaar is dat de theoretische valsnelheden gebaseerd op een variabele, lage dichtheid van de deeltjes het dichtst bij de gemeten valsnelheden liggen.

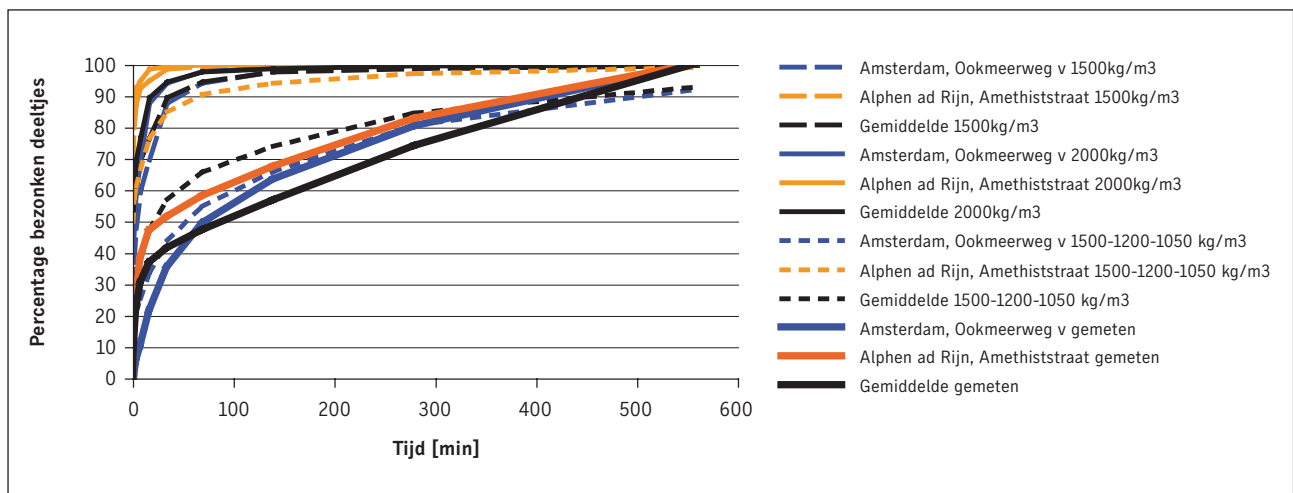
De theoretische valsnelheden bij een variabele dichtheid van 1.500 kg/m³ voor deeltjes groter dan 200 µm, 1.200 kg/m³ voor deeltjes 100-200 µm en 1.050 kg/m³ voor de deeltjes kleiner dan 100 µm benadert de valsnelheden zoals deze zijn gemeten met de Sedimet. Deze verdeling komt redelijk goed overeen met de dichtheden die Brombach et al. (1993) hebben gemeten in de onopgeloste bestanddelen van een droogweerstelsel: 2.200 kg/m³ voor deeltjes tussen de 150 en 350 µm,

1.230 kg/m³ voor deeltjes 60-150 µm en 1.060 kg/m³ voor de deeltjes kleiner dan 60 µm. Hoewel dit metingen aan een dwa-stelsel betreft, geven ze toch een referentiepunt.

Te concluderen is dat vooral de kleinere deeltjes een relatief laag soortelijk gewicht hebben van 1.050 à 1.250 kg/m³ en dus lastig bezinkbaar zijn.



Figuur 4.8 Data valsnelheidsmetingen (gecorrigeerd voor verdamping)



Figuur 4.9 Vergelijking gemeten valsnelheden en valsnelheden berekend o.b.v. korrelgrootteverdeling

5 Conclusies

Dit hoofdstuk beschrijft de belangrijkste conclusies van het onderzoek. Bij het interpreteren van de conclusies moet u bedenken dat de analyses zijn verricht op een beperkt aantal steekmonsters. Steekmonsters zijn minder representatief dan buigemiddelde concentraties.

Concentraties

Voor de meeste stoffen liggen de gevonden concentraties in de genomen steekmonsters rond of onder het gemiddelde van de database regenwater. Opvallend is de situatie voor lood: de gevonden concentraties liggen allemaal onder het gemiddelde van de database regenwater, maar meestal wel boven de nieuwe MTR-waarde. Dit is ongetwijfeld het gevolg van minder gebruik van loodhoudende benzine.

Bindingspercentage

In de bindingspercentages van de verontreinigingen aan zwevende stof is een grote spreiding gemeten. Hierdoor zal het rendement van een bezinkvoorziening sterk kunnen variëren in ruimte en tijd. De gemiddelde percentages liggen ongeveer 10% onder de gemiddelde waarde uit de database regenwater. Lage bindingspercentages maken dat het verwijderen van verontreinigingen via filtratie of bezinking moeilijker zal zijn dan gedacht op basis van de database regenwater.

Korrelgrootteverdeling

In de korrelgrootteverdelingen van de verschillende monsters is een grote variatie gemeten. Niet alleen per locatie, maar ook op één locatie. De mediane korrelgrootte varieert tussen de 25 en 270 μm . Maar de korrelgrootteverdelingen vallen niet buiten de bandbreedtes van eerdere (internationale) onderzoeken. Met name de lage waarde is opvallend. Dat duidt op water met voornamelijk zeer kleine deeltjes, die moeilijk door bezinking te verwijderen zijn.

Valsnelheden

Ook de valsnelheden in de verschillende monsters variëren sterk. Op basis van de beschikbare data is de verwachting dat gemiddeld 60% van de onopgeloste bestanddelen een valsnelheid heeft van minder dan 1 m/uur. De onzekerheid hierin is echter groot.

Door het gemeten bezinkingsgedrag te vergelijken met valsnelheden op basis van Stokes en de korrelgrootteverdeling, is geconstateerd dat de kleinere deeltjes waarschijnlijk een soortelijk gewicht hebben van 1.050 à 1.250 kg/m^3 en dus lastig bezinkbaar zijn.

Bezinkrendement

De bindingspercentages van de onderzochte stoffen liggen rond de 60% (met uitzondering van PAK's). Algemeen is de verwachting dat het grootste deel van deze 60% is gebonden aan de kleine, moeilijk bezinkbare deeltjes. Zo constateerden Dierschke et al. (2010) bijvoorbeeld dat 80% van het gebonden koper aan deeltjes kleiner dan 200 μm zit. Voor PAK's geldt bij 80% een waarde van 160 μm . Op basis van deze getallen en de eerder genoemde bindingspercentages is voor de meeste verontreinigende stoffen een bezinkrendement van meer dan 50% theoretisch al nauwelijks haalbaar. Gezien de lage valsnelheid is een rendement van zo'n 25% waarschijnlijker.

Effectieve maatregelen

Dergelijke lage rendementen komen overeen met de resultaten van eerdere meetprojecten in Arnhem (Boogaard et al., 2010) en Amsterdam (DHV/DWR, 1997). De vraag is dan of bij hemelwaterstelsels met een gemiddelde concentratie verontreinigingen de aanleg van een bezinkvoorziening een effectieve maatregel is. Om de kwaliteit van het afstromende hemelwater verder te verbeteren, liggen maatregelen zoals een bodempassage meer voor de hand. Op specifieke locaties met hoge concentraties kunnen bezinkvoorzieningen mogelijk wel een aanzienlijke bijdrage leveren.

6 Aanbevelingen meetmethoden

Tijdens het onderzoek kwamen beperkingen van de monstername- en analysemethoden aan het licht. Zo bleek het handmatig nemen van monsters in afstromend hemelwater lastig vanwege het grillige karakter van veel buien. Ook waren de resultaten van de Sedimet-opstelling vaak niet stabiel. In dit hoofdstuk staan aanbevelingen om de meetmethoden te verbeteren.

6.1 Monstername

Bij de monstername bleek het moeilijk om op het juiste moment een steekmonster te nemen. Vooral de timing is lastig; het grootste deel van de neerslag valt met een lage intensiteit en leidt nauwelijks tot afstroming. (Tijdens geen van de monsternames zijn stroomsnelheden hoger dan 5 cm/s gemeten.) Hevige buien zijn vaak een lokaal verschijnsel en het is moeilijk om op de juiste tijd op de juiste plaats te zijn. Een oplossing is automatische monsternameapparatuur, maar deze is relatief duur en vraagt om bovengrondse ruimte en een stroomaansluiting. Eigenlijk is eenvoudige, compacte monsternameapparatuur nodig die een monster neemt bij een bepaalde stroomsnelheid of een op afstand verstuurd signaal.

Representatief monster

Een ander probleem was het verzamelen van een representatief monster. In dit onderzoek zijn de steekmonsters halverwege de waterkolom genomen, maar hiermee wordt het bodemtransport onderschat. De oplossing hiervoor is: een integraal monster nemen. Maar dit is technisch bijna niet te realiseren. Bovendien vindt het meeste bodemtransport plaats tijdens enkele hevige buien. Het is dus maar de vraag of een integraal monster ook van de juiste bui is. Overigens beveelt ISO 5667-10 (Water quality - Sampling - Part 10: Guidance on sampling of waste waters, 1992) aan om monsters op 1/3 van de waterdiepte te nemen.

6.2 Monsteranalyse

6.2.1 Korrelgrootteverdeling

In dit onderzoek is de korrelgrootteverdeling bepaald met een deeltjesteller gebaseerd op lichtabsorptie met een bereik van 2-400 μm . Het lijkt voor de Nederlandse situatie niet zinvol ook de korrelgrootteverdeling boven de 400 μm te bepalen, omdat de meeste deeltjes kleiner dan 400 μm zijn

(zie figuur 4.4). Helaas hebben de meeste diffractiedeeltjestellers een kleiner bereik, bijvoorbeeld 2-150 μm . Zoals figuur 4.4 laat zien, zitten in de meeste monsters veel deeltjes groter dan 150 μm (tot 70%). Een combinatie van zeven en diffractie is dan een goed alternatief. Maar deze methode is wel bewerkelijker en hiervoor is een groter monster nodig.

6.2.2 Valsnelheden

De meetresultaten van de Sedimet zijn slechts in enkele gevallen bruikbaar. Bij de meeste analyses ontstaat een grillig patroon of ontstaan zelfs negatieve waarden.

Verklaringen hiervoor zijn:

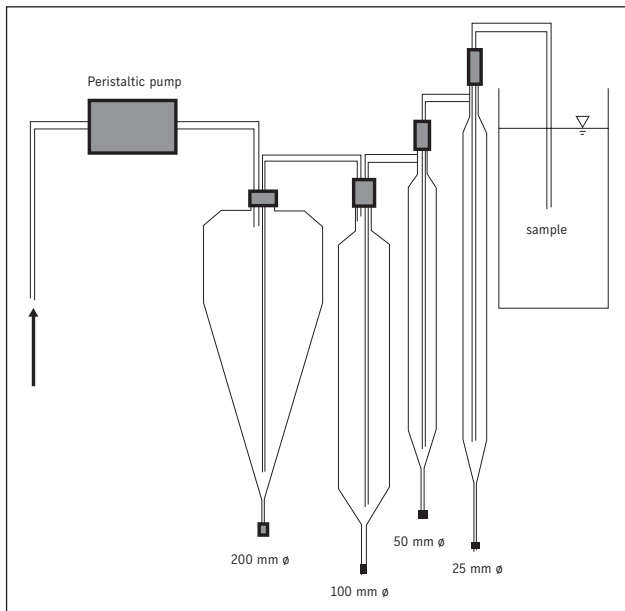
- de relatief kleine hoeveelheid zwevende stof ten opzichte van verstoringen tijdens het meten;
- het vermoeden dat door nog onbekende oorzaak eerder bezonken deeltjes soms van de weegschaal afvallen;
- in een enkel monster is zoöplankton waargenomen, dat voor verstoring kan hebben gezorgd.

Kolomtest

Een alternatieve manier om valsnelheden te bepalen, is met een kolomtest. Deze methode pasten onder meer Boogaard et al. (2010) toe om de valsnelheid van deeltjes in watermonsters uit een lamellenfilter in Arnhem te bepalen. Zij gebruikten een kolom van 1.500 mm hoog en 42 mm in diameter geheel gevuld met een volledig gemixt homogeen monster. Op verschillende tijdstippen trokken zij daarna onder aan de kolom een watermonster dat zij analyseerden op het gehalte zwevende stof en troebelheid. Doordat de kolom hoger is dan het Sedimet-meetvat, is deze minder gevoelig voor de initiële bezinking. Daarentegen zorgt de kleinere diameter eerder voor wandeffecten.

Elutriationtest

Een andere methode is het gebruik van een 'elutriation apparatus' (vrij naar Bommana et al., 2004) (zie figuur 6.1). Het monster (rechts) wordt door steeds grotere kolommen geleid, waardoor de stroomsnelheid steeds verder afneemt. Deeltjes met een valsnelheid lager dan de stroomsnelheid in de kolom worden meegenomen naar de volgende kolom. Deeltjes met een hogere valsnelheid blijven in de kolom achter. Zo zijn na een bepaalde tijd de onopgeloste bestanddelen gesplitst in verschillende fracties, elk met een valsnelheid(range).



Figuur 6.1 Principe elutriationtest

Tabel 6.1 geeft een overzicht van de drie technieken om valsnelheden te bepalen met de bijbehorende voor- en nadelen.

Op deze ‘hoofdtechnieken’ zijn variaties mogelijk om de methode te vereenvoudigen:

- Kluck et al. (2008) hebben een simpeler versie van de elutriationmethode uitgevoerd. Zij gebruikten één kolom waaraan ze drinkwater toevoegden. Het debiet door deze kolom voerden ze stapsgewijs op.
- De kolomtest is eenvoudiger uit te voeren door een troebelheidsmeter in de kolom te integreren (uiteraard met aandacht voor eventuele profielverstoringen). Voor

deze variant moet wel de relatie tussen troebelheid en concentratie onopgeloste bestanddelen bekend zijn.

6.3 Vervolonderzoek

Het is eenvoudiger om de deeltjesgrootte te bepalen dan de valsnelheid. Daarom zou meer onderzoek kunnen plaatsvinden naar de relatie tussen deeltjesgrootte en valsnelheid. Bijvoorbeeld door met elutriation een monster te scheiden en daarna met diffractie de grootte van de gevonden deeltjes te bepalen. De volgende stap naar verdere generalisatie is de bepaling van het gemiddeld soortelijk gewicht per fractie.

Het zou interessant zijn vast te stellen welke methode het meest geschikt is om valsnelheden te bepalen. Hiervoor zou (een kunstmatig samengesteld) monster onderzocht moeten worden met de Sedimet, een kolomtest en een elutriationtest.

> 21

De analyses in dit onderzoek zijn uitgevoerd op steekmonsters, dus de bepaalde concentraties zijn geen buigemiddelde concentraties. Omdat ook geen debieten zijn bepaald, is het lastig harde uitspraken te doen over de representativiteit van de monsters of de gevonden resultaten. Als de beste methode om valsnelheden te bepalen is vastgesteld, zijn de in dit onderzoek uitgevoerde analyses voor andere gemeenten te herhalen. Om na te gaan of de gevonden waarden ook representatief zijn voor andere delen van Nederland, zou dit onderzoek bij voorkeur buiten Noord-Holland moeten gebeuren.

Techniek	Voordelen	Nadelen
Sedimet	<ul style="list-style-type: none"> • Eenvoudig 	<ul style="list-style-type: none"> • Geen scheiding van fracties • Niet geschikt voor monsters met weinig onopgeloste bestanddelen
Kolomtest	<ul style="list-style-type: none"> • Relatief eenvoudig • Geen dure apparatuur nodig 	<ul style="list-style-type: none"> • Veel analyses/vertaalslagen nodig • Handmatig periodiek monsters nemen • Relatief groot effect wanden • Geen scheiding van fracties
Elutriationtest	<ul style="list-style-type: none"> • Scheiding van fracties (en verdere analyse) mogelijk • Weinig gevoelig voor initiële verstoringen 	<ul style="list-style-type: none"> • Arbeidsintensief • Veel apparatuur nodig

Tabel 6.1 Voor- en nadelen methodes voor bepalen bezinkingskarakteristieken

7 Literatuur

- Bommanna G.K., Marsalek J., Exall K., Stephens R.P., Rochfort Q. and Seto P. (2004). A Water Elutriation Apparatus for Measuring Settling Velocity Distribution of Suspended Solids in Combined Sewer Overflows. In: *Water Qual. Res. J. Canada*, 2004 • Volume 39, No. 4, 432–438.
- Boogaard F.C. and Baars E.J. (2004). Randvoorziening voor regenwater functioneert goed. In: *H₂O* nr. 3 2004.
- Boogaard F.C., Rombout J., Kluck J. en Wentink R. (2007a). Zuiverende voorzieningen regenwater. STOWA 2007-20, Utrecht.
- Boogaard F.C. en Lemmen G.B. (2007b) De feiten over de kwaliteit van afstromend regenwater. Stowa rapport-nummer 2007-021, Utrecht.
- Boogaard F.C., Langeveld J.G., Liefing H.J., Kluck J. (2010). Storm water quality and removal efficiency rates of lamella filters, NOVATECH 2010.
- Brombach H., Xanthopoulos C., Hahn H. H. and Pisano W.C. (1993). Experience with vortex separators for combined sewer overflow control, *Water Science and Technology*, vol 27, no. 5-6, pp 93-104.
- DHV/DWR (1997). Ontvangbak Julianapark, deel 1 beschrijving en toelichting.
- Dierschke M., Welker A. and Dierkes C. (2010). Selection of a Reference Material for the testing of Decentralized Stormwater Treatment Facilities. Novatech 2010, 7th International Conference: Sustainable techniques and strategies in urban waste water, 27. Juni - 1. Juli 2010, Lyon, France.
- Graaf de E.R.T., Baars E.J. en Kluck J. (2008). Settling curves of pollutants in storm water. 11th International Conference on Urban Drainage, Edinburgh, Scotland, UK, 2008.
- Gromaire-Mertz M.C., Garnaud S. Gonzalez A. and Chebbo G. (1999). Characterisation of urban runoff pollution in Paris, *Wat. Sci. Tech.*, vol. 39, n°2, p. 1-8.
- Kluck J., Graaf de E.R.T. en Baars E.J. (2008). Bezinkbaarheid verontreinigingen in slib bezinkvoorziening regenwater. In: *Rioleringswetenschappen* nr. 8 2008.
- Oden S. (1915). Eine neue methode zur mechanischen Bodenanalyse. *Internationale Mitteilungen für Bodenkunde*, 5: 257-311.
- Toom A.M. den en Kranenburg C. (1992). De Sedimet, een sedimentatiebalans. Rapport no. 4-92. TuD Faculteit der Civiele Techniek, Vakgroep Waterbouwkunde, Laboratorium voor Vloeistofmechanica.
- Wentink R. en Boogaard F.C. (2002). Verschijningsvormen verontreinigingen in afstromend hemelwater. Tauw bv, rapport R001-0446327FCB-D01-U, Utrecht, The Netherlands.

Bijlage 1 Schema kwaliteitseisen oppervlaktewater

Bron: Toetsingskader waterkwaliteit in de waterwetvergunning na implementatie van de KRW (leidraad voor de waterschappen)

Toelichting: Dit Toetsingskader heeft geen formele status maar vormt een hulpmiddel om de wettelijke toetsingsstappen ordelijk te doorlopen en daarbij de juiste overwegingen en argumentatie vast te leggen. Gebruik is op eigen verantwoording. Suggesties voor verbetering zijn welkom bij de projectgroep Bkmw, Besluit Kwaliteitseisen Monitoring Water, (en vergunningverlening en/of de Unie van Waterschappen.

(1) Categorie	(2) Situatie vóór 2010	(3) Situatie vanaf 2010 ALLE wateren	(4) Situatie vanaf 2010 KRW-wa- terlichamen
Prioritaire stoffen (PS)	MTR-waarden in 4 ^e Nota Waterhuishouding	Waarden in bijlage I Bkmw	Milieukwaliteitseisen in bijlage I Bkmw;
Specifieke verontreinigende stoffen (SVS) ¹		Waarden in bijlage I van ministeriële regeling bij Bkmw	Milieukwaliteitseisen in Bkmw; waarden in bijlage I van minis- teriële regeling
'Andere stoffen' (AS)		Waarden/methode in Handboek Waterbeheer (p.m.); vooralsnog 'oude' MTR-waarden	n.v.t. voor KRW-toetsing
Fysisch-chemische pa- rameters (FC)		Regionaal geregeld in waterhuishoudingsplan (WHP) of waterbeheer- plan (WBP)	Regionaal beleid in pro- vinciaal waterplan (PWP) en/of waterbeheerplan (WBP)
Hydromorfologische kwaliteitselementen (HK)			
Biologische kwaliteitsele- menten			

> 23

¹) Voorheen ook wel 'overige relevante stoffen' genoemd.

Bijlage 2 Mogelijke verklaringen afwijkingen resultaten Sedimet

De meetresultaten van de Sedimet gaven in sommige gevallen onlogische resultaten. Deze bijlage beschrijft enkele verschijnselen die dit mogelijk verklaren:

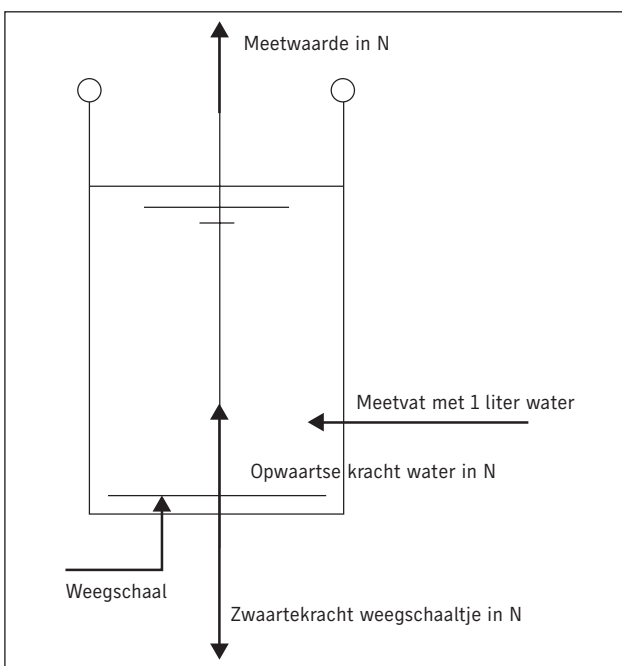
- uitzetten of krimpen van water bij temperatuurverandering (zie paragraaf B2.1);
- verdamping (zie paragraaf B2.2);
- uitzetten van het ijzeren weegschaaltje bij temperatuurstijging (zie paragraaf B2.3).

Paragraaf B2.4 maakt vervolgens een vergelijking tussen de meetresultaten en de grootte van de mogelijke afwijkingen. Tot slot vindt u in paragraaf B2.5 enkele originele meetresultaten.

B2.1 Uitzetten of krimpen van water bij temperatuurverandering

Temperatuurstijgingen of -dalingen zorgen respectievelijk voor het uitzetten of krimpen van water. Hierdoor verandert de opwaartse kracht en ontstaat een afwijking in het gemeten gewicht van het weegschaaltje. Om de grootte van dit effect te berekenen, is een voorbeeldberekening uitgevoerd, gebaseerd op de volgende waarden:

- Inhoud hemelwatermonster: 1 liter.
- Gewicht weegschaaltje: 32 gram.
- Waterhoogte boven weegschaaltje: 24 cm.



Figuur B2.1 Krachtenvergelijking

- Een theoretische temperatuurstijging van 10°C: van 10 naar 20°C.

Bij een temperatuur van 4°C is de dichtheid van water het grootst, het volume uiteraard het kleinst. Per graad stijging of daling ten opzichte van 4°C zet water 0,00021 liter per liter uit. Bij een temperatuurstijging van 10°C bedraagt dit dus 0,0021 liter. Als monsters onder de 4°C zijn bemeten, zal het volume eerst krimpen en boven de 4°C weer uitzetten.

De berekening is uit te voeren met de krachtenvergelijking (zie figuur B2.1). Er spelen drie krachten:

- 1 zwaartekracht weegschaaltje (beide situaties gelijk);
- 2 opwaartse kracht water;
- 3 kracht op weegschaaltje (gemeten gewicht).

Aangezien de zwaartekracht op het weegschaaltje niet verandert, is de verandering van de meetwaarde dus geheel een gevolg van de verandering in opwaartse kracht. (Figuur B2.1)

In de situatie van 10°C en 20°C zet het water uit en komt meer ijzer onder water te staan. Hieronder ziet u de berekening in de verandering van meetwaarden. De waterstand in het meetvat is 24 + 1 = 25 cm = 250 mm. 1 mm waterhoogte bevat dus $1/250 = 0,004$ liter water. Hieruit is de waterstijging te berekenen: $0,0021/0,004 = 0,52$ mm waterstijging. Hierdoor komt ook het stangetje van de weegschaal 0,52 mm onder water te staan.

Volume ijzer: situatie 10°C

Schaaltje: $\pi \times 0,025^2 \times 0,001 = 1,96 \times 10^{-6} \text{m}^3$

Stangetje: $0,24 \times 0,003^2 = 0,00000216 \text{m}^3$

Totaal = $4,123495408493 \times 10^{-6} \text{m}^3$

In de situatie van 20°C staat het stangetje iets verder onder water en dit geeft een andere inhoud.

Volume ijzer: situatie 20°C

Schaaltje: $\pi \times 0,025^2 \times 0,001 = 1,96 \times 10^{-6} \text{m}^3$

Stangetje: $0,24052 \times 0,003^2 = 0,00000216468 \text{m}^3$

Totaal = $4,128175408493 \times 10^{-6} \text{m}^3$

Soortelijk gewicht water 10°C = 998,3746 kg/m³

Soortelijk gewicht water 20°C = 996,2824 kg/m³

Berekening

Hier wordt de inhoud van het weegschaaltje (onder water) vermenigvuldigd met het soortelijk gewicht van water om het verschil in opwaartse kracht te berekenen. Zo wordt de afwijking in gemeten gewicht berekend.

10°C →

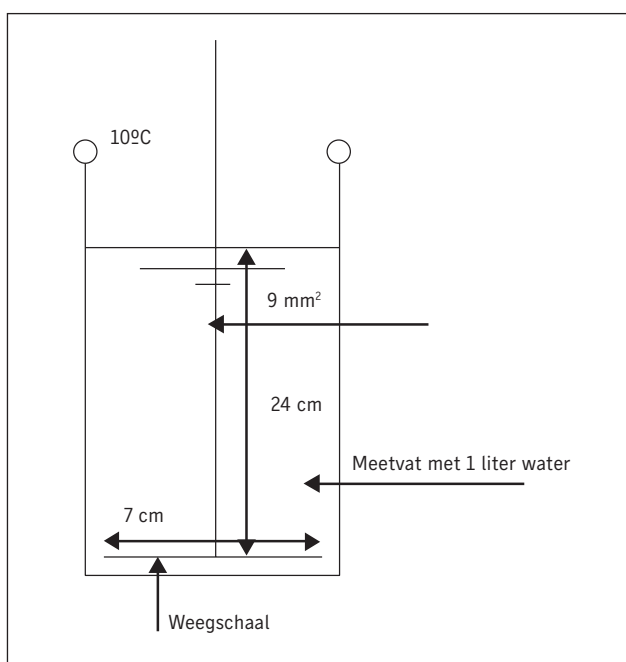
$$(4,123495408493 \times 10^{-6} \text{m}^3) \times 998,3746 \text{ kg/m}^3 \times 9,81 = 0,0403857401 \text{ N}$$

20°C →

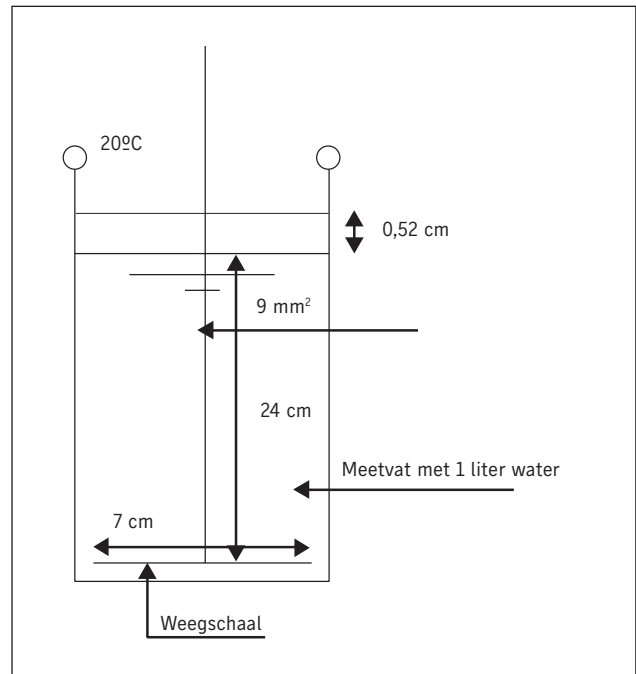
$$(4,128175408493 \times 10^{-6} \text{m}^3) \times 996,2824 \text{ kg/m}^3 \times 9,81 = 0,0403468476 \text{ N}$$

$$10^\circ\text{C} - 20^\circ\text{C} = 38,8927 \text{ mN} \rightarrow 3,9646 \text{ mg}$$

Hierdoor zal de opwaartse kracht 3,88927 mN per 1 graad temperatuurstijging kleiner worden. Dus de weegschaal zal 0,39646 mg extra aangeven. Bij een temperatuurdaling van één graad zal het gemeten gewicht juist 0,39646 mg dalen. Bij temperaturen onder de 4°C zijn de effecten precies omgekeerd.



Figuur B2.2 Situatie bij 10°C



Figuur B2.3 Situatie bij 20°C

> 25

B2.2 Verdamping

Het kan zijn dat verdamping een afwijking veroorzaakt. Bij verdamping daalt het waterniveau in het meetvat. Hierdoor komt een groter deel van het weegschaalstangetje boven water te hangen en neemt de opwaartse kracht af.

Bij 1 mm verdamping en een doorsnede van het stangetje van 3 bij 3 mm is de berekening als volgt:

$$0,001 \times 0,003^2 \times 1000 \text{ kg/m}^3 \times 9,81 = 88,29 \text{ mN} = 9,00 \text{ mg.}$$

Dus bij 1 mm verdamping zal de weegschaal 9,00 mg extra gewicht aangeven.

De verdamping met deksel is verwaarloosbaar klein (ongeveer een factor 10 kleiner).

B2.3 Uitzetten ijzeren weegschaaltje bij temperatuurstijging

Net als de meeste stoffen zet staal uit bij temperatuurstijging. De uitzettingscoëfficiënt voor 1°C temperatuurstijging is 0,0122 mm per meter staal. Voor het volume is te rekenen met $36,6 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3$. Voor de berekening is het volume van het weegschaaltje onder water bij de verwarmde situatie nodig. Deze waarde is in paragraaf B2.1 van deze bijlage berekend als $4,128175408493 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3$. Deze waarde is vervolgens te vermenigvuldigen met de uitzettingscoëfficiënt (volume) van $36,6 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3$. Deze uitkomst geeft de uitzetting weer in m^3 . Als deze waarde wordt vermenigvuldigd met de dichtheid van water, is de verandering van de opwaartse kracht in N te berekenen.

De berekening:

$$26 < 4,128175408493 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3 \text{ (volume weegschaal onder water)} \cdot 36,6 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3 \text{ (uitzettingscoëfficiënt)} = 1,5109122 \cdot 10^{-10} \text{ m}^3$$

$$1,5109122 \cdot 10^{-10} \text{ m}^3 \cdot 996,2824 \text{ (dichtheid water } 20^\circ\text{C)} \cdot 1000 \text{ (N naar mN)} \cdot 9,81 \text{ (g)} = 0,0014767 \text{ mN}$$

$$0,0014767 \text{ mN} / 9,81 = 0,0001505295 \text{ mg}$$

0,0014767 mN en 0,0001505295 mg zijn de afwijkingen in meetresultaten per graad C temperatuurstijging.

De conclusie houdt in dat deze afwijking ongeveer 0,05% is vergeleken met afwijking 1 (in paragraaf B5.1) en 2 (in paragraaf B5.2). Hierdoor zal de afwijking in deze paragraaf (afwijking 3) niet relevant zijn voor dit onderzoek.

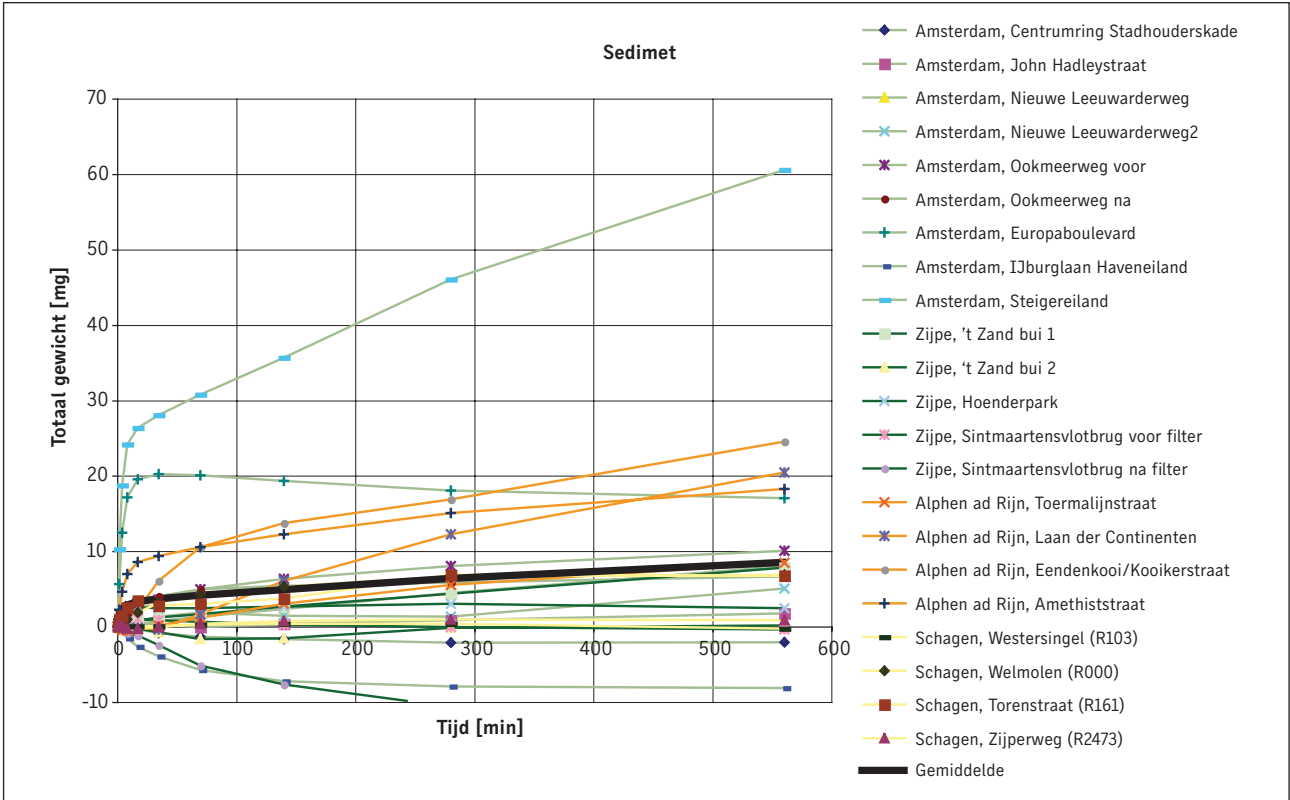
B2.4 Effect afwijkingen op meetresultaten

Samenvatting resultaten in paragrafen B2.1 t/m B2.3:

- 1 Door de dichtheidsverandering van water geeft de Sedimet 0,39646 mg meer aan bij één graad C temperatuurstijging boven de 4°C.
- 2 Bij 1 mm verdamping zal de weegschaal 9,00 mg extra gewicht meten.
- 3 De afwijking die ontstaat doordat het weegschaaltje uitzet, is verwaarloosbaar klein ten opzichte van de andere twee effecten.

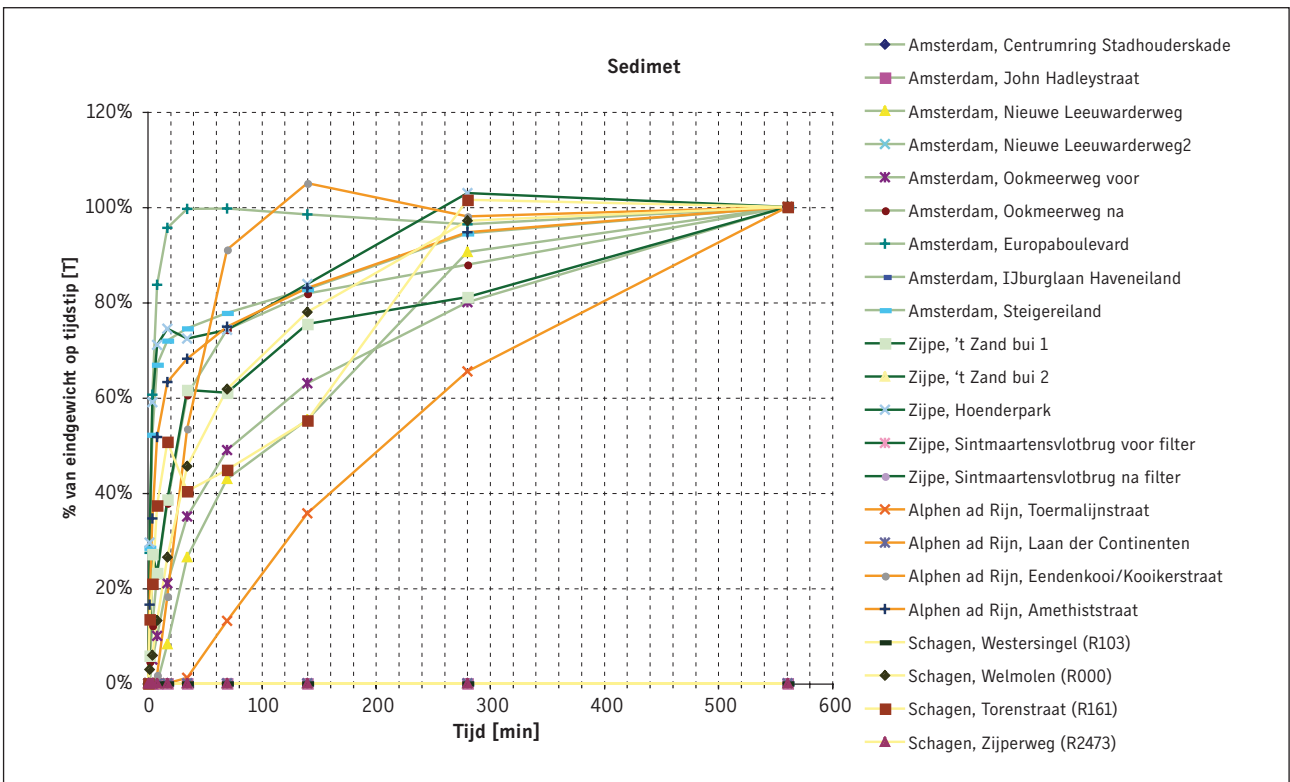
Om de monsters zo goed mogelijk te conserveren, zijn deze bewaard op een constante temperatuur van 2°C. Voor de Sedimet-analyses zijn de monsters uit de koelkast gehaald en in een ruimte op kamertemperatuur geanalyseerd. Tijdens de analyse stijgt de temperatuur in het meetvat dus. De exacte temperatuuroename is niet meer te achterhalen, maar ondanks de dubbele wandisolatie lijkt een stijging van 5 à 10°C mogelijk.

De metingen vóór 8 juni 2010 vonden plaats zonder deksel op de Sedimet-opstelling. Deze hebben waarschijnlijk met veel verdamping te maken gehad. Hiervoor is achteraf gecorrigeerd. Voor de temperatuurstijging is niet gecorrigeerd. Op een gemiddelde gehalte onopgeloste bestanddelen van 36 mg/l, waarvan naar schatting de helft op het weegschaaltje kan vallen en de helft ernaast, is de hierdoor geïntroduceerde fout enkele tientallen procenten (bijna 4 mg bij stijging van 10°C). Dit leidt tot een overschatting van het aandeel met een lage bezinksnelheid, omdat binnen een kwartier alle deeltjes met een valsnelheid groter dan 1 m/uur bezonken zijn. Het grootste deel van de temperatuurstijging vindt dus plaats bij de metingen voor de kleinere valsnelheden.



> 27

Figuur B2.4 Ruwe data valsnelheidsmetingen



Figuur B2.5 Resultaten valsnelheidsmetingen geschaald naar eindgewicht per monster

B2.5 Originele meetresultaten

Figuur B2.4 toont de gewichtstoename van de Sedimet over de eerste 9 uur. In het hoofdrapport (figuur 4.7) is hiervoor gecorrigeerd. De grootste gewichtstoename vindt plaats in de eerste 30 minuten (alle deeltjes met een valsnelheid van meer dan 0,5 m/uur en een deel van de deeltjes met een kleinere valsnelheid). Op basis van deze data is de verwachting dat gemiddeld 60% van de onopgeloste bestanddelen een valsnelheid heeft van minder dan 1 m/uur.

Verdamping

Bij de vier resultaten van Alphen aan den Rijn en het resultaat van Amsterdam Steigereiland neemt het gewicht ook na een lange periode nog toe. De oorzaak hiervan is verdamping. Doordat het water verdampte, kwam een steeds groter deel van de tweedelige ophangstang (zie figuur 2.1) boven het wateroppervlak uit. De verminderende opwaartse druk van het water (Archimedes) zorgde voor de gemeten gewichtstoename. Op basis van de gewichtstoename na bezinking van alle deeltjes is voor deze monsters later een correctie toegepast.

Zoöplankton

Bij de proef met het monster van Alphen aan den Rijn Eendenkooi/Kooikerstraat kunnen de resultaten van de Sedimet-weegschaal verstoord zijn doordat in het monster enkele specimen zoöplankton zaten. Gezien de meetresultaten lijkt dit niet het geval; in de andere monsters is geen zoöplankton waargenomen.

Om de valsnelheden nader te onderzoeken, zet figuur B2.5 de gemeten waarden uit tegen het eindgewicht (onbetrouwbare metingen niet weergegeven). De valsnelheden in de verschillende monsters blijken sterk te variëren.

Met medewerking van Alphen aan den Rijn, Schagen, Waternet, Zaanstad en Zijpe hebben stagiaires van diverse hogescholen en universiteiten steekmonsters genomen in hemelwaterriolen. Deze monsters zijn geanalyseerd op concentraties van verontreinigende stoffen en de binding aan bezinkbare deeltjes. Daarvan zijn valsnelheden bepaald. Op basis van de analyses is voor de meeste stoffen een bezinkrendement van circa 25% te verwachten.

Ook eerdere metingen wijzen in deze richting. De spreiding in gevonden bindingspercentages en valsnelheden is echter groot en de representativiteit van steekmonsters is onduidelijk. Daarom zijn nog geen harde conclusies mogelijk.