A network diagram consisting of various sized light blue circles connected by thin white lines, set against a solid blue background. The circles vary in size and are distributed across the page, with some larger circles acting as hubs.

Bedrijfstakonderzoek
BTO 2022.043 | Oktober 2022

Toepasbaar maken van Aquarellus

**Een numerieke methode voor het
voorspellen van sedimentatie in het
leidingnet**

Rapport

Toepasbaar maken van Aquarellus

Een numerieke methode voor het voorspellen van sedimentatie in het leidingnet

BTO 2022.043 | Oktober 2022

Dit onderzoek is onderdeel van het collectieve Bedrijfstakonderzoek van KWR, de waterbedrijven en Vewin.

Opdrachtnummer

402045

Projectmanager

ir. P.M. (Petra) Holzhaus (opvolger van drs. P.G.G. (Nellie) Slaats)

Opdrachtgever

BTO - Thematisch onderzoek - Distributie

Auteur(s)

Dr. J.R.G. (Joost) van Summeren, Dr. M.S. (Mark) Morley, ir. A. (Amitosh) Dash, drs. L. (Luuk) de Waal

Kwaliteitsborger(s)

Dr. P. (Peter) van Thienen

Verzonden naar

Dit rapport is verspreid onder BTO-participanten.

Een jaar na publicatie is het openbaar.

Keywords

bruin water, waterkwaliteit, distributie

Jaar van publicatie
2022

Meer informatie

Dr. J.R.G. (Joost) van Summeren
T 06-54294828
E Joost.van.Summeren@kwrwater.nl

PO Box 1072
3430 BB Nieuwegein
The Netherlands

T +31 (0)30 60 69 511
F +31 (0)30 60 61 165
E info@kwrwater.nl
I www.kwrwater.nl

KWR

Oktober 2022 ©

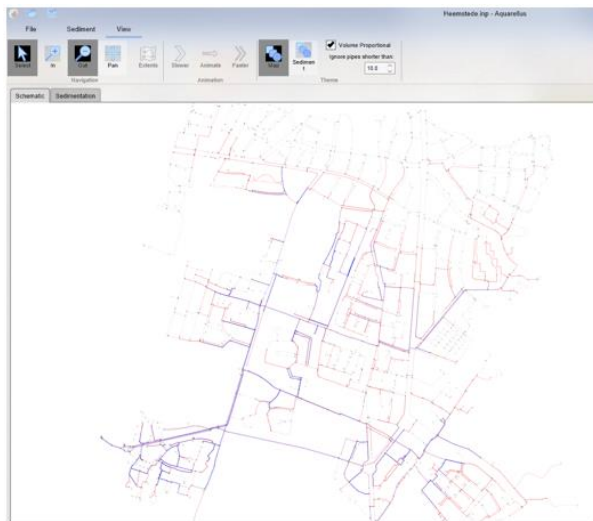
Alle rechten voorbehouden aan KWR. Niets uit deze uitgave mag - zonder voorafgaande schriftelijke toestemming van KWR - worden verveelvoudigd, opgeslagen in een geautomatiseerd gegevensbestand, of openbaar gemaakt, in enige vorm of op enige wijze, hetzij elektronisch, mechanisch, door fotokopieën, opnamen, of enig andere manier.

Managementsamenvatting

Aquarellus: numerieke tool helpt waterbedrijven sedimentatie in leidingnet voorspellen

Auteur(s) Dr. J.R.G. (Joost) van Summeren, dr. M.S. (Mark) Morley, dr. Ir. A. (Amitosh) Dash, drs. L. (Luuk) de Waal

Bruin water veroorzaakt veel waterkwaliteitsmeldingen door klanten. De numerieke tool *Aquarellus* kan waterbedrijven helpen achterhalen hoe snel en waar in het leidingnet risicogebieden ontstaan, zodat zij de effectiviteit van schoonmaakprogramma's kunnen verhogen, de beste meetlocaties kunnen prioriteren en nog schonere leidingnetten kunnen ontwerpen. *Aquarellus* is nu doorontwikkeld voor het voorspellen van sedimenten in leidingnetten. De rekensnelheid en het gebruiksgemak van de tool sluiten aan bij de wensen van de eindgebruikers en er is meer inzicht in de variatie van de relevante modelparameters en hoe invoerparameters de voorspellingen beïnvloeden. Om het vertrouwen in de voorspellende kracht van *Aquarellus* te vergroten worden drie vervolgstappen aanbevolen: (i) valideer de modelvoorspellingen met praktijkmetingen (geschikte troebelheidsmetingen, voldoende kennis van hydraulische condities en deeltjesaanvoer), (ii) bepaal de invloed van hydraulische onzekerheden op de modeluitkomsten; (iii) valideer de voorspellingen met praktijkmetingen (geschikte troebelheidsmetingen, voldoende kennis van hydraulische condities en deeltjesaanvoer) en (iii) versterk de onderbouwing van de in *Aquarellus* gebruikte empirisch onderbouwde wetten via experimenten in een proefopstelling.



Met Aquarellus berekende sedimenten in het leidingnet van Castricum (PWN). Blauwe en rode kleurtonen geven de aanwezigheid weer van twee sedimenttypes met verschillende deeltjeseigenschappen.

Belang: beter optreden tegen bruin water

Overlast door bruin water veroorzaakt veel van de waterkwaliteitsklachten bij waterbedrijven. Bruin water kan ontstaan als geaccumuleerd microscopisch fijn deeltjesmateriaal in beweging komt door een hydraulische verstoring. De onderliggende processen zijn niet volledig begrepen, maar praktijkonderzoek

suggereert een zekere voorspelbaarheid van (de locaties en snelheid van) accumulatie van deeltjesmateriaal en de stroomcondities waarbij het weer in beweging komt.

Drinkwaterbedrijven kunnen tegen bruin water optreden door (i) de kwaliteit van de zuivering te

verbeteren, (ii) zelfreinigende leidingnetten te implementeren en (iii) te spuien om deeltjesmateriaal te verwijderen. Beter kunnen voorspellen hoe snel en waar in het leidingnet deeltjesvervuilingen ontstaan, kan waterbedrijven helpen om effectieve schoonmaakprogramma's op te stellen, effectieve meetlocaties te bepalen en leidingnetten met maximale zelfreinigende capaciteit te ontwerpen.

Aanpak: tool ontwikkeld, invoerparameters en zeggingskracht resultaten onderzocht

De numerieke tool *Aquarellus* is doorontwikkeld van prototype naar werkbare tool. Daarnaast zijn relevante waarden voor invoerparameters van *Aquarellus* vastgesteld voor negen drinkwatermonsters uit drie distributiegebieden: met lab-experimenten zijn eigenschappen van deeltjes in suspensie bepaald (bezinking, deeltjesgrootte, deeltjesmassa, mobiliteit van deeltjes in stromend drinkwater). Ook is geanalyseerd hoe gevoelig de uitkomsten van *Aquarellus* zijn voor de numerieke resolutie. *Aquarellus* is toegepast op de gebieden Spijkenisse (Evides) en Castricum (PWN). Voor beide gebieden hebben de bedrijven troebelheidsmetingen beschikbaar gesteld ter validatie van de tool met praktijkgegevens. Met de eindgebruikers is de inzet van *Aquarellus* bij de bedrijfsvoering van drinkwaterbedrijven bekeken in een workshop en met een enquête.

Resultaten: tool is bruikbaar voor voorspellende berekeningen, validatie verdient aandacht

Aquarellus kan nu de deeltjesaccumulatie in distributienetten voorspellen met een rekensnelheid en gebruiksgemak die voldoen aan de wensen van de eindgebruiker. De labexperimenten geven meer inzicht in de variatie aan invoerparameters (massadichtheid, deeltjesgrootte, bezinksnelheid) waarmee rekening moet worden gehouden. *Aquarellus*-berekeningen met het leidingnetmodel van Castricum demonstreren hoe invoerwaarden de uitkomsten beïnvloeden. Het is in dit onderzoek onvoldoende gelukt om de modellen te valideren met praktijkmetingen voor Spijkenisse (Evides) en Castricum (PWN). Een geleerde les is dat gedegen validatie hoge eisen stelt aan het aantal en de kwaliteit van de praktijkmetingen en kennis vereist

van (onzekerheden in) hydraulica en de hoeveelheid aangevoerd deeltjesmateriaal.

Toepassing: Aquarellus toepassen en betrouwbaarheid verder versterken

Aquarellus is geschikt voor het voorspellen van sedimenten in leidingnetten. Er is meer inzicht ontstaan in de te verwachten variatie aan invoerparameters en de gevoeligheid van de rekenresultaten voor de numerieke resolutie. Er zijn nog beperkingen bij de toepassing van *Aquarellus*. Zo is het transport van microscopische deeltjes door een leidingnet gevoelig voor (de historie van) hydraulische omstandigheden en onzekerheden in deeltjeseigenschappen en deeltjesaanvoer: factoren waarover geen volledige kennis mogelijk is. Ook kunnen sommige aannames in *Aquarellus* afwijkingen ten opzichte van de werkelijkheid veroorzaken. Om betrouwbaardere uitkomsten van *Aquarellus* te krijgen en de tool effectiever in te zetten worden de volgende vervolgstappen voorgesteld:

- De berekende deeltjesvervuiling verder valideren met troebelheidsmetingen en kennis van de hydraulische historie en deeltjesbelasting (concentratie en deeltjestype);
- Met *Aquarellus* de invloed bepalen van onzekerheden door de hydraulica (stochastische verbruiksvariëaties van individuele huishoudens; dagvariëaties en seizoensinvloeden; invloed van werkzaamheden, spuiacties, e.d.);
- De onderbouwing van *Aquarellus* versterken, bijvoorbeeld door het bepalen van de bezinksnelheid en bedload-snelheid als functie van de schuifspanning, de hoogteafhankelijke deeltjesverdeling in het bedload-transportregime en de invloed van bochten, afsluiters, appendages, zinkers op deeltjestransport.

Rapport

Dit onderzoek is beschreven in het rapport *Toepasbaar maken van Aquarellus* – een numerieke methode voor het voorspellen van sedimentatie in het leidingnet (BTO 2022.043)

Meer informatie

Titels, voornaam en naam

T

E Joost.van.Summeren@kwrwater.nl

PO Box 1072

3430 BB Nieuwegein

The Netherlands



Inhoud

Rapport	2
<i>Managementsamenvatting</i>	3
Inhoud	5
1 Inleiding	7
1.1 Deeltjesvervuiling in distributienetten	7
1.2 Ontwikkeling van een numerieke tool	8
1.3 Onderzoeksdoel	8
1.4 Leeswijzer	9
2 Ontwikkeling van Aquarellus versie v2	10
2.1 Fysische principes	10
2.2 Software-architectuur	11
2.3 Particle Transport Module	11
2.4 Verbeteren van rekenprestaties van Aquarellus	13
2.5 Uitbreidingen functionaliteit	15
2.6 Modelverificatie	16
3 Bepalen van deeltjeseigenschappen in het lab	17
3.1 Inleiding	17
3.2 Methode	17
3.2.1 Literatuurstudie naar relatie deeltjeseigenschappen, troebelheid en bezinksnelheid	17
3.2.2 Monstername voor labexperimenten	18
3.2.3 Bezinkproef	19
3.2.4 Deeltjesgroottebepaling	19
3.2.5 Doorstromingsproef	20
3.2.6 Labanalyse	21
3.3 Resultaten en discussie	22
3.3.1 Bezinkproef	22
3.3.2 Bepalen van deeltjesgrootte met deeltjesteller	23
3.3.3 Labanalyse van deeltjeseigenschappen	24
3.3.4 Bepalen van transporteigenschappen met buisopstelling	25
3.4 Concluderende opmerkingen	25
4 Sedimentmodellering en relatie tot troebelheidsmetingen Spijkenisse en Castricum	27
4.1 Inleiding	27
4.2 Onderzoeksgebied Spijkenisse (Evides)	27

4.2.1	Leidingnetmodel: hydraulica en deeltjesbron	27
4.2.2	Vergelijking met gemeten troebelheid	28
4.3	Onderzoeksgebied Castricum	30
4.3.1	Leidingnetmodel: hydraulica en deeltjesbron	30
4.3.2	Numerieke resolutie	31
4.3.3	Berekende sedimentvorming	31
4.3.4	Vergelijking met troebelheidsmetingen	33
5	Onderzoek naar toepassing van Aquarellus	36
5.1	Inleiding	36
5.2	Reflectie op de voorspellende kracht van Aquarellus	36
5.3	Validatie met praktijkgegevens	36
5.4	Invloed van modelonzekerheden	37
5.5	Onderbouwen van modelaannames	37
6	Conclusies en aanbevelingen	38
6.1	Conclusies	38
6.2	Aanbevelingen voor toepassing	38
6.3	Aanbevelingen voor vervolgonderzoek	39
6.3.1	Validatie met praktijkmetingen	39
6.3.2	Cosmetische verbeteringen van gebruikerstool	39
6.3.3	Bepalen van gevoeligheid voor variaties in hydraulica en deeltjesbronnen	39
6.3.4	Empirische onderbouwing van fysische processen	40
7	Literatuur	41
I	Aanbeveling go/no-go	42
II	Modelverificatie	55
III	Protocol verstoringsproeven	61
IV	Reactie PWN Toepassing Aquarellus	66

1 Inleiding

1.1 Deeltjesvervuiling in distributienetten

Een groot deel van meldingen m.b.t. de waterkwaliteit van klanten aan waterbedrijven in Nederland, België en wereldwijd is gerelateerd aan bruin water. Hoewel in de volksmond (en in dit rapport) meestal “bruin water” wordt gebruikt, gaat het in de meeste gevallen niet om een *verkleuring* maar om *troebel* water met een verhoogde concentratie van microscopische deeltjes in suspensie met het drinkwater. Bruin water is een esthetisch fenomeen: het deeltjesmateriaal vormt op zichzelf doorgaans geen gevaar voor de volksgezondheid, maar leidt wel tot bezorgdheid en overlast bij klanten, bijvoorbeeld vanwege verkleuring van wasgoed. Ook zijn er aanwijzingen dat deeltjesvervuiling een negatieve invloed heeft op het functioneren van (keerkleppen in) watermeters (Meerkerk, 2009). Waterbedrijven willen weten hoe snel en waar in het leidingnet deeltjesvervuilingen ontstaan en hoe zij incidenten kunnen voorkomen of effecten ervan kunnen mitigeren.

Bedrijfstakingonderzoek gericht op het bruinwatervraagstuk heeft sinds het begin van de jaren 1990 al veel nuttige inzichten opgeleverd. Tegenwoordig wordt microscopisch deeltjesmateriaal dat ontsnapt aan of ontstaat in zuiveringsprocessen als een belangrijke deeltjesbron gezien, naast bronnen binnenin het distributienet zoals roestende gietijzeren leidingen. Bruinwaterincidenten ontstaan als na een periode van accumulatie van deeltjesmateriaal een hydraulische verstoring optreedt die het materiaal weer mobiliseert (Vreeburg, 2007; Vreeburg & Boxall, 2007). Hydraulische verstoringen worden veroorzaakt door een verhoging van de snelheid of versnelling van het water boven de gangbare omstandigheden, bijvoorbeeld vanwege afsluitermanipulaties of afwijkende verbruikspatronen.

Over de precieze aard van de processen van accumulatie en remobilisatie is in de wetenschappelijke literatuur nog geen consensus, omdat deze processen complex, onderling afhankelijkheid en conditie-specifiek zijn. Praktijkonderzoek suggereert echter een zekere mate van herhaalbaarheid in de locaties en de snelheid waarmee deeltjesvervuiling opbouwt. In een voorgaand bedrijfstakingonderzoek (Blokker & Schaap (2011)) is in twee wijken in Purmerend (PWN) met vergelijkbare leidingnetkarakteristieken de troebelheid tijdens spuiacties gemeten op verschillende momenten over een periode van twee jaar. Beide wijken bleken met een constante (voorspelbare), maar onderling verschillende, snelheid te vervuilen. Ander bedrijfstakingonderzoek laat zien dat distributieleidingen zelfreinigend zijn wanneer de (gemodelleerde) dagelijkse maximale snelheid boven de 0,2 tot 0,25 m/s uitkomt. Ook bleken bestaande leidingnetten minder snel te vervuilen door ze beter doorstromend te maken met behulp van het dichtzetten van afsluiters (Blokker & Schaap, 2011). Beneden de zelfreinigende snelheid kunnen leidingen vervuilen, maar ook schoon blijven: de lokaal optredende stroomsnelheid was niet de enige verklarende factor. Accumulatie van deeltjesmateriaal hangt mogelijk ook samen met de aanwezigheid van bochten, diameterovergangen, T-stukken, afsluiters, brandkranen en zinkers.

De huidige inzichten dragen bij aan het handelingsperspectief van drinkwaterbedrijven. Huidige risicoreductie-strategieën van drinkwaterbedrijven bestaan uit:

- realiseren van kwaliteitsverbeteringen in zuiveringsprocessen (beperken van de vuillast);
- implementeren van zelfreinigende leidingnetten (om accumulatie te beperken);
- het uitvoeren van spuiacties om deeltjesmateriaal te verwijderen voordat het accumuleert tot hoeveelheden die tot overlast kunnen leiden.

Hoewel deze strategieën deels succesvol zijn, zijn de processen en mechanismen complex en nog niet volledig begrepen. Bovenstaande voorbeelden suggereren echter wel een zekere systematiek van vervuilingsspatronen die mede onder invloed van de hydraulische omstandigheden ontstaan. Vanuit deze ervaring is bij drinkwaterbedrijven de wens ontstaan om met een numeriek model te voorspellen hoe snel en waar in het leidingnet deeltjesmateriaal accumuleert. Een voorspellend model zou waterbedrijven nieuwe mogelijkheden bieden om bruinwaterklachten te voorkomen, bijvoorbeeld door tijdig de juiste gebieden te spuien of netontwerpen te verbeteren.

1.2 Ontwikkeling van een numerieke tool

Tegen de hierboven geschetste achtergrond is in voorgaand onderzoek gestart met de ontwikkeling van een numerieke tool om deeltjesaccumulatie te voorspellen in het distributienet. Er is een fysisch model opgesteld dat de meest relevante transportprocessen beschrijft (Speerpuntonderzoek geïnitieerd door PWN en Evides; Van Summeren & Blokker, 2017; Van Summeren e.a., 2017). Op basis van dit model is een prototype van de tool *Aquarellus* ontwikkeld (Van Summeren & Morley, 2019): een rekenmodel waarmee kan worden voorspeld op welke locaties en hoe snel sedimentatie optreedt in het leidingnet. Het beoogde toepassingsgebied voor waterbedrijven is:

- verhogen van de effectiviteit van schoonmaakprogramma's, bijvoorbeeld door gedifferentieerde schoonmaakprogramma's waarbij gericht spoelacties worden uitgevoerd in gebieden die de tool aanwijst als hotspots van vervuiling, aanvullend op bestaande spuiprogramma's;
- bieden van een hulpmiddel bij het opstellen van meetstrategieën om de vervuilingssystematiek in kaart te brengen;
- verbeteren van de zelfreinigende werking van het (secundaire) leidingnetwerk.

Met het prototype bleken nauwkeurige¹ berekeningen echter uitsluitend uitvoerbaar voor kleine leidingnetten (tientallen km's totale leidinglengte) en met onpraktisch lange rekentijden. Daarnaast gaven de BTO-waterbedrijven een aantal wensen om de tool gebruiksvriendelijker te maken en aanbevelingen voor veldmetingen en labexperimenten om de transporteigenschappen van deeltjes te bepalen die samenhangen met relevante invoerparameters voor *Aquarellus* (bezinksnelheid van deeltjes, deeltjesgrootte, bedloadsnelheid, mobiliteitsgrenzen).

1.3 Onderzoeksdoel

Het doel van het voorliggende onderzoek is:

1. efficiënter en gebruiksvriendelijker maken van de tool, zodat deze toepasbaar wordt in praktijksituaties;
2. vaststellen van waarden van relevante invoerparameters voor specifieke gebieden;
3. valideren van de tool aan de hand van veldexperimenten;
4. onderzoeken van het operationele voordeel voor de eindgebruikers (verhogen van de effectiviteit van schoonmaakplannen, bepalen van effectieve meetlocaties, ontwerpen van zelfreinigende secundaire leidingnetten).

¹ D.w.z. berekeningen met een hoge resolutie (m.b.t. tijdstap en aantal deeltjes) waarvan betekenisvolle resultaten zijn te verwachten, waarbij dit laatste is vastgesteld door een vergelijking met een analytische oplossing,

1.4 Leeswijzer

Het voorliggende rapport is als volgt opgebouwd:

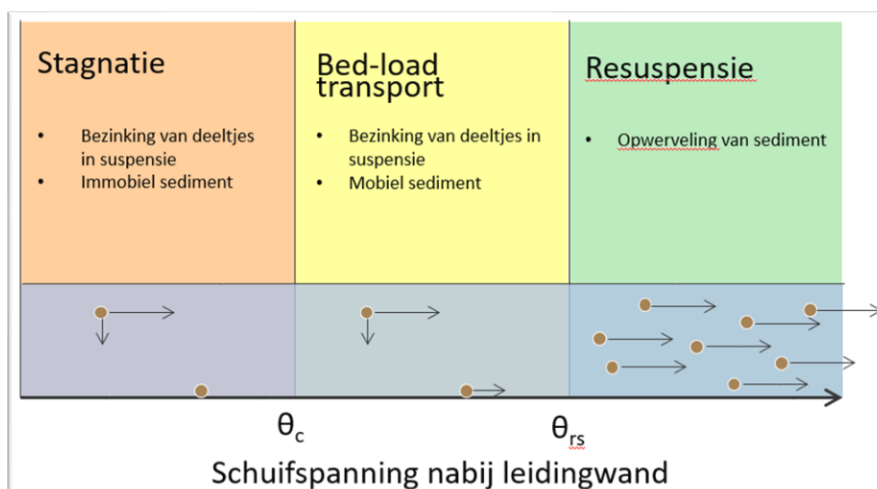
- Hoofdstuk 2 beschrijft de technische werking en ontwikkeling van de numerieke tool. Een bijbehorende gebruikershandleiding is beschikbaar als afzonderlijk rapport (BTO 2022.201(s)).
- In Hoofdstuk 3 zijn de aanpak en uitkomsten van een aantal labexperimenten beschreven. Met deze experimenten zijn eigenschappen van deeltjes in suspensie uit 9 drinkwatermonsters uit 3 distributiegebieden bepaald.
- Hoofdstuk 4 beschrijft een ledingnetanalyse met *Aquarellus* voor de gebieden Spijkenisse (Evides) en Castricum (PWN), gericht op validatie van de tool met praktijkgegevens. Voor beide gebieden hebben de bedrijven troebelheidsmetingen beschikbaar gesteld.
- Hoofdstuk 5 bevat een beschouwing op de inzet van *Aquarellus* als hulp in de bedrijfsvoering van drinkwaterbedrijven.
- Conclusies en aanbevelingen voor vervolgonderzoek zijn beschreven in Hoofdstuk 6.

2 Ontwikkeling van Aquarellus versie v2

2.1 Fysische principes

Aquarellus is gebaseerd op fysische transportprocessen waarvan de aannames en achterliggende motivatie zijn beschreven in Van Summeren e.a. (2017) en Van Summeren & Blokker (2017). Hieronder zijn de belangrijkste punten herhaald:

- Het model is gebaseerd op fysische wetten voor deeltjestransport: bezinking onder invloed van zwaartekracht, bedload-transport en resuspensie. Chemische en microbiologische processen zijn bewust buiten beschouwing gelaten in *Aquarellus*. Chemische processen zoals flocculatie kunnen de eigenschappen van deeltjes veranderen, maar vergen een gedetailleerd kennis van deeltjeseigenschappen en de lokale chemische watersamenstelling. In voorgaand bedrijfstakonderzoek is een eerst stap gezet om de instandhouding en het loslaten van biofilm te vertalen naar een samenhangende numerieke beschrijving (Blokker, 2017). Hieruit bleek dat meer onderzoek nodig is naar het effect van hydraulische omstandigheden, temperatuur en concentratie voedingsstoffen in het leidingnet om de instandhouding en het loslaten van biofilm beter te begrijpen; het betrouwbaar voorspellen van de aanwezigheid (of de karakteristieken) van biofilm ligt nog niet binnen handbereik en zijn niet meegenomen in *Aquarellus*. Voorts zijn ook turbulente processen (zoals diffusie, dispersie, turboforese) verwaarloosd: de invloed op deeltjestransport zal onder veelvoorkomende omstandigheden in Nederlandse drinkwaterleidingen kleiner zijn dan de gemodelleerde fysische transportprocessen (Van Thienen e.a., 2011).
- Het raamwerk is gebaseerd op fysische wetmatigheden, in tegenstelling tot een data-gedreven model. Dit heeft als voordeel dat uitkomsten zijn te duiden in termen van goed begrepen processen en dat het mogelijk is om voorspellingen te maken in gebieden of voor (toekomst)scenario's waarvoor geen metingen beschikbaar zijn.
- Het deeltjestransport is onderverdeeld in drie transportregimes op basis van de schuifspanning aan de leidingwand (Figuur 1):
 - bezinking van deeltjes in suspensie en stagnatie van sediment beneden een kritische (dimensieloze) schuifspanning ($\theta < \theta_c$);
 - bezinking van deeltjes in suspensie en bedloadtransport op de leidingenbodem bij tussenliggende schuifspanningen ($\theta_c \leq \theta \leq \theta_{rs}$);
 - opwerveling (resuspensie) van deeltjesmateriaal op de leidingbodem bij hoge schuifspanningen ($\theta > \theta_{rs}$).



Figuur 1. Schematische weergave van transportprocessen waarop *Aquarellus* is gebaseerd (overgenomen uit Van Summeren & Morley, 2019).

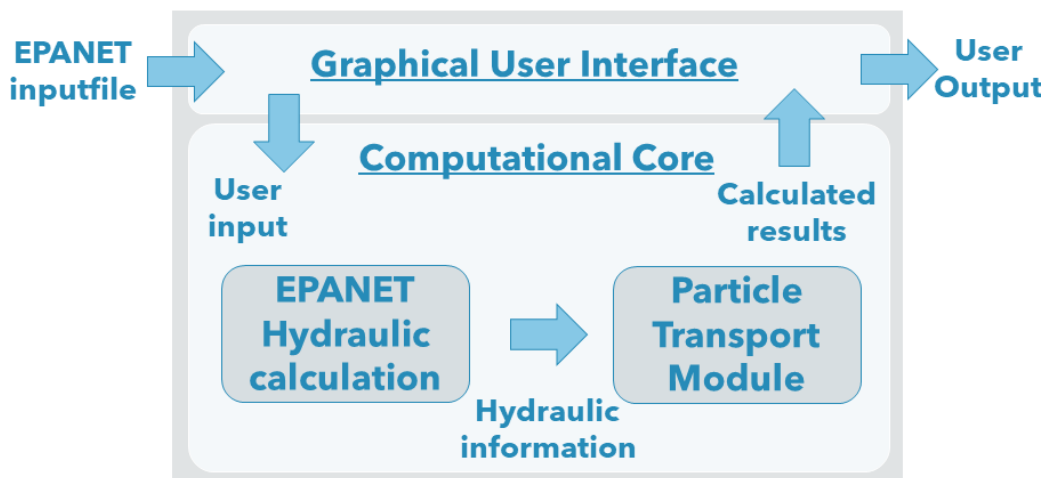
2.2 Software-architectuur

De software-architectuur van *Aquarellus* is schematisch weergegeven in Figuur 2. De gebruiker interacteert met *Aquarellus* via de gebruikersinterface (“Graphical User Interface”, GUI). Hierin wordt een EPANET invoerbestand ingevoerd met informatie over het hydraulisch leidingnet, aangevuld met informatie over de deeltjesbronnen (knoop-ID en een tijdsafhankelijk patroon van de massaconcentratie). Meerdere leidingknopen kunnen als bronknoop worden aangewezen en aan elke bron kan een tijdsafhankelijk concentratiepatroon worden toegekend. Via de GUI specificeert de gebruiker tevens een aantal parameterwaarden m.b.t. het type deeltjesmateriaal (deeltjesdichtheid, -diameter, mobiliteitsgrenswaarden voor de schuifspanning), de simulatieperiode en de numerieke resolutie en randvoorwaarden. Samen vormen deze stappen de probleemdefinitie. Hierna kan de berekening worden gestart.

Het rekenhart van *Aquarellus* bestaat uit twee gekoppelde modules:

- EPANET-rekenkern (EPANETtools) voor het berekenen van het hydraulisch transport;
- Particle Transport Module (PTM) die zorgdraagt voor de boekhouding van het deeltjestransport.

Na afloop van een berekening worden de resultaten weergegeven in de GUI en kunnen deze worden opgeslagen in tabelvorm of als binair databestand (voor documentatiedoeleinden of het uitvoeren van een vervolgberekening). Voor praktische informatie over het installeren en gebruik van de tool wordt de lezer verwezen naar de gebruikershandleiding van *Aquarellus* (Van Summeren, 2022).



Figuur 2. Architectuur van *Aquarellus*.

2.3 Particle Transport Module

De PTM verzorgt de boekhouding van deeltjes in de drie transportmodi: in suspensie, stilstand en bedload-transport. Deeltjes kunnen van modus veranderen afhankelijk van de hydraulische omstandigheden. Voor elke modus wordt de positie van de deeltjes in het leidingnet bijgehouden en (voor deeltjes in suspensie) ook de hoogtecoördinaat van deeltjes in de leiding.

Vier parameters bepalen de numerieke resolutie van het deeltjestransport (in aanvulling op de parameters die de numerieke resolutie van de hydraulische berekening bepalen):

- N : deeltjesaggregatiefactor, het aantal deeltjes dat als één deeltjespakket door het leidingnet beweegt;

- Δt_{inj} : injectie tijdstap waarmee deeltjes de bron verlaten;
- Δt_{tp} : tijdstap waarmee deeltjes door het leidingnet worden getransporteerd;
- Δt_{clm} : “clumping” tijdsinterval waarmee arriverende deeltjes in bedload-transport aan het eind van een leiding worden “vastgehouden” om vervolgens gecombineerd als één deeltjespakket verder te reizen in de benedenstroomse leiding. Voor de opgelopen achterstand tijdens de wachttijd wordt gecompenseerd bij vrijgave.

Een hogere waarde van Δt_{clm} , Δt_{inj} , Δt_{tp} en/of N gaat gepaard met een besparing van geheugenruimte en rekentijden, ten koste van de nauwkeurigheid van de berekening (vanwege een kleiner aantal deeltjespakketten in het geval van Δt_{clm} , N en/of Δt_{inj} of een grovere benadering van de posities van de pakketjes in het geval van Δt_{tp}). (zie ook de modelverificatie beschreven in Sectie 2.6).

Op injectieknoopen berekent de PTM elke hydraulische tijdstap hoeveel deeltjes per seconde (n) er nodig zijn om, passend bij de actuele volumestroom (Q_f), de voorgeschreven massaconcentratie (C_m in kg/kg) te bereiken:

$$n = \frac{6Q_f C_m \rho_f}{\rho_p d_p^3}$$

met ρ_f en ρ_p de massadichtheden van water respectievelijk het deeltjesmateriaal (kg/m^3), en d_p de deeltjesdiameter (m).

Om numerieke redenen worden het aantal deeltjes gereduceerd door een zeker aantal (N) deeltjes in een pakketje samen te nemen². De resolutie van het deeltjestransport bij de bronknoop wordt bepaald door het aantal deeltjespakketjes per injectietijdstap (M):

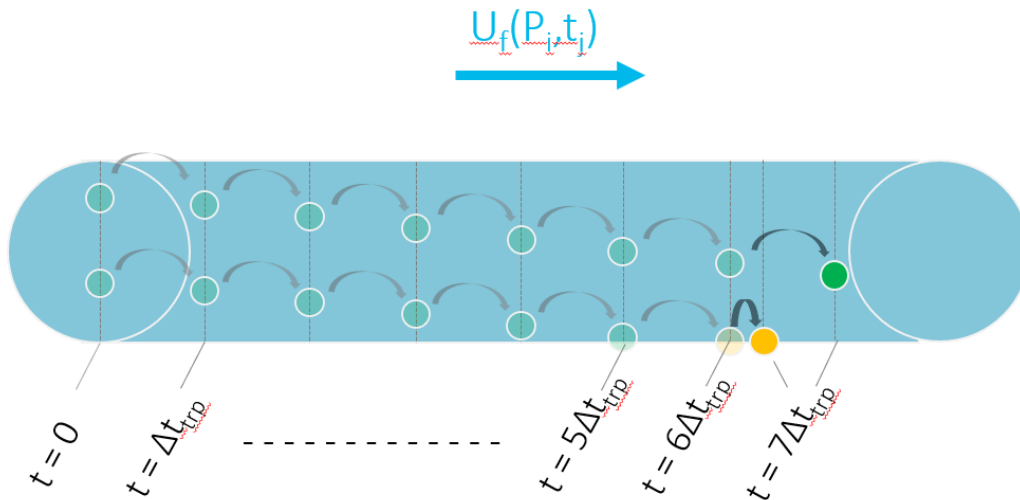
$$M = \frac{n \Delta t_{inj}}{N}$$

De werking van de PTM wordt nader toegelicht aan de hand van Figuur 3. Hierin is een leiding met een begin- en eindknoop weergegeven. De snelheid van het water (U_f) varieert in de tijd en per leiding, maar in dit simpele voorbeeld wordt U_f constant verondersteld. Daarmee is ook de dimensieloze schuifspanning, θ , constant en we nemen aan dat het bedloadtransportregime actief is ($\theta_c \leq \theta \leq \theta_{rs}$, gele zone in Figuur 1). Aan het begin van de simulatie ($t = 0$) bevinden zich aan het begin van de leiding twee deeltjespakketjes (groene bolletjes, Figuur 3). Elke tijdstap Δt_{trp} wordt de positie van de pakketjes in suspensie aangepast, zowel in de stroomrichting (advectie met de watersnelheid) als verticaal (aanpassen van de hoogtecoördinaat corresponderend met de valsnelheid). In het voorbeeld bereikt het onderste deeltjespakket na zes tijdstappen de leidingbodem. Hierop gaat het over in de bedloadtransportmodus. In de daarop volgende tijdstap beweegt het bovenste pakketje nog altijd in suspensie en met de watersnelheid, terwijl het pakketje op de bodem met de bedloadsnelheid beweegt. Na afloop van de 7^e tijdstap bevinden de twee pakketjes zich op andere posities in de leiding.

Zou de stagnatieconditie gelden ($\theta \leq \theta_c$) i.p.v. die voor bedloadtransport, dan zouden deeltjes die de bodem bereiken niet van positie veranderen. Om geheugenruimte te besparen worden stilstaande deeltjespakketten

² De gebruiker zou ook de injectie-concentraties door een vaste factor kunnen delen en na afloop van een simulatie alle massa's met dezelfde factor vermenigvuldigen. Dit organiseert de PTM nu “achter de schermen” wat fouten voorkomt.

toegekend aan een leiding, maar wordt niet de precieze locatie bijgehouden. Als de resuspensieconditie geldt ($\theta > \theta_{rs}$), dan worden alle deeltjes (suspensie, bedload, en stilstaand) evenredig over de leidinghoogte herverdeeld³.



Figuur 3. Schematische weergave van de deeltjestransportberekening. Deeltjes in suspensie (groen) bezinken en bewegen zich voort met de snelheid van het water (U_f). Deeltjes op de bodem in de bedloadtransportmodus (oranje) bewegen met een snelheid kleiner dan de watersnelheid.

Bij splitsende waterstromen verdeelt de PTM de deeltjeslast naar rato van de volumestromen in de benedenstroomse leidingen. Ook op verbruiksknopen splitst het deeltjesmateriaal zich o.b.v. de volumestroomverhouding. Bij samenkomende waterstromen wordt de deeltjeslast in de bovenstroomse leidingen opgeteld. Op diameterovergangen wordt de *absolute* hoogtecoördinaat van deeltjespakketjes in suspensie aangepast, waarbij de *relatieve* hoogtecoördinaat onveranderd blijft. Afsluiters, bochten en hoogteverschillen (zoals bij zinkers) hebben in het model geen invloed op het deeltjestransport. In reinwaterkelders wordt volledige bezinking verondersteld en de concentratie op nul gezet bij de uitstroom (put voor deeltjesmateriaal).

2.4 Verbeteren van rekenprestaties van Aquarellus

Een belangrijke opbrengst van dit onderzoek was het verbeteren van de rekenprestaties van *Aquarellus*. Een eerder prototype werd door de eindgebruikers te beperkt bevonden in rekensnelheid en benodigde geheugenruimte. De wens tot een bruikbare tool is vertaald in de set van prestatie-eisen (Tabel 1).

Hierbij werd onderscheid gemaakt tussen een “laptop”-variant (snelle berekeningen op een gangbare laptop computer) en een “high-performance” variant (minder snelle berekeningen voor grotere leidingnetten). Aan deze eisen is voldaan met een tussenversie van *Aquarellus* (versie v1.1). Gaandeweg werd duidelijk dat één tool kon voldoen aan beide sets van eisen. *Aquarellus* is daarom nu als enkelvoudige variant uitgevoerd.

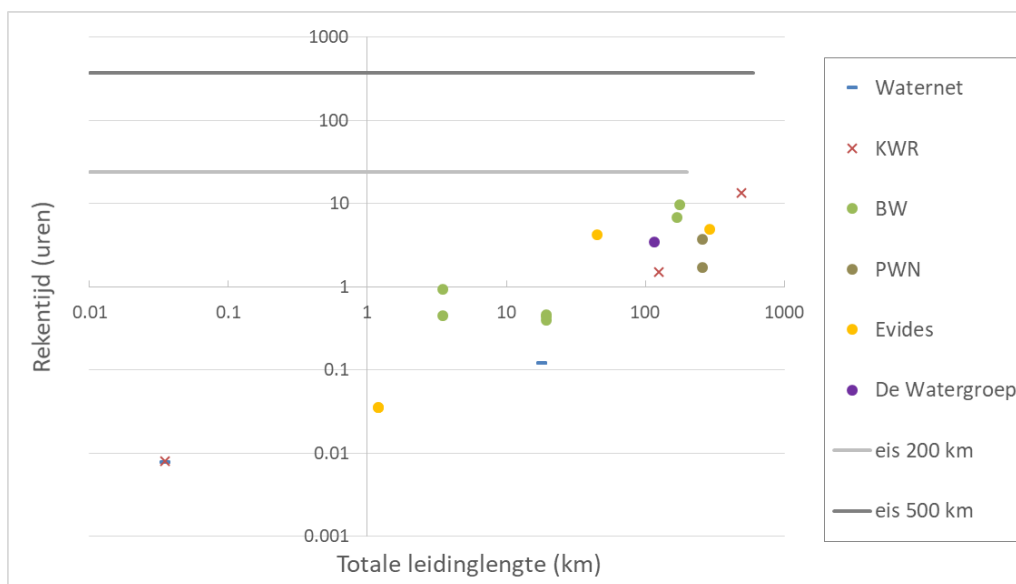
De projectgroepen van 6 waterbedrijven (Brabant Water, Waternet, PWN, De Watergroep, Evides en Dunea) hebben de versie getest en KWR van feedback voorzien. Deze feedback opgenomen in Bijlage I van dit rapport (memo “Aanbeveling go/no-go BTO Toepasbaar maken Aquarellus”).

³ Vanwege homogenisatie door turbulente diffusie. Experimentele studies laten zien dat voor deeltjesmengsels rond de kritische schuifspanning de deeltjesconcentratie gradueel afneemt met de hoogte. Een dergelijke gradatie is niet gemodelleerd; wel is non-binaire resuspensie te benaderen met een multi-species berekening waarbij grove, zware deeltjestypes resuspenderen bij een hogere absolute schuifspanning.

In Figuur 4 zijn de rekestijden in verband gebracht met de eisen voor leidingnetmodellen met verschillende leidinglengte. De rekestijden voor leidingnetten van 35 m tot ca. 500 km vallen binnen de gestelde prestatie-eisen zoals geformuleerd in Tabel 1. Een geheugenruimte van 16 GB is voldoende om leidingnetten tot 200 km door te rekenen, conform de eisen.

Tabel 1. Prestatie-eisen en beoogde toepassing van Aquarellus zoals geformuleerd in het projectplan.

Variant	Prestatie			Frequentie inzet	Rekenvoorziening
	Totale leidinglengte	Simulatieperiode (minimaal mogelijk)	Rekensnelheid (simulatieperiode: rekestijd)		
Laptop	200 km	1 maand	1 maand : 1 dag	Op elk moment	Laptop quadcore (i7, 16 GB)
High performance	500 km	1 maand ⁴	2 dagen : 1 dag	1 x per 1-5 jaar	Multi-processor rekenserver



Figuur 4. Rekestijden van Aquarellus v1.1 voor modellen van verschillende leidinglengte.

De belangrijkste aanpassingen die de verbeterde prestaties mogelijk maakten, waren:

- *Ijle representatie deeltjestransport*. Het prototype hield de positie van deeltjespakketjes bij m.b.v. een 1-D discreet rooster op het hele leidingnet, waarvan in veel gevallen slechts een fractie van de roostercellen daadwerkelijk was gevuld met één of meerdere deeltjespakketten. In de nieuwe versie wordt van elk deeltje de positie in het leidingnet bijgehouden zonder discreet rooster ("ijle representatie"). De sedimenttransportberekeningen zijn aangepast met een dynamisch toewijzing van de geheugenruimte; dit levert een grote besparing op van geheugenruimte⁵.

⁴ Langere simulatieperioden (tot 6 maanden) moeten mogelijk worden (om het lange-termijn transport van bed load transport te bepalen, maar tegen een langere rekestijd).

⁵ In de oude opzet was de totale lengte van het leidingnet leidend qua rekenprestaties. Met de ijle representatie is de leidinglengte op zichzelf niet meer relevant, maar is het aantal deeltjespakketjes leidend. Het aantal pakketjes hangt in de praktijk meestal samen met de totale

- *Parallellisatie*. Het verdelen van berekeningen over meerdere rekenkernen verbeterde de rekensnelheid. Het aantal rekenkernen is door de gebruiker te kiezen.
- *Code-optimalisatie*. Het optimaliseren van de code leidde tot verdere verbetering van de rekensnelheid en effectiever gebruik van de geheugenruimte.

2.5 Uitbreidingen functionaliteit

Naast het verbeteren van de rekenprestaties is de functionaliteit op een aantal punten verbeterd:

- *Multi-speciesberekening*. Het is mogelijk om berekeningen uit te voeren met meer dan één deeltjestype. Het deeltjestype wordt gedefinieerd door de massadichtheid (ρ_p), diameter (d_p) en de grenswaarden van de schuifspanning m.b.t. deeltjesmobiliteit (θ_c, θ_{rs}). De gebruiker kan meerdere deeltjestypes toekennen aan dezelfde deeltjesbron of hetzelfde type aan meerdere bronnen, elk met hun eigen tijdsafhankelijke patroon.
- *Exportmogelijkheden*. Mogelijkheid tot exporteren van tabelwaarden (CSV/XLSX bestandsformaat) van sedimentmassa's (voor alle leidingen en bron- en verbruiksknoppen, voor alle monitortijdstappen, transportmodi, en deeltjestypes). Ook is het mogelijk om rekenuitkomsten op te slaan als binair bestand ("AQR"-formaat) en weer in te lezen t.b.v. een vervolgberekening.
- *Grafische interface*. De GUI is op een aantal punten verbeterd, waaronder: duidelijkere lay-out van keuzemenu's, aangepaste kleurenpalet van overzichtskaarten, logo toegevoegd en kolombreedtes aangepast voor betere leesbaarheid.
- *Weergave sedimentmassa/-concentratie*. Er is voorzien in de mogelijkheid om de sedimentmassa in een leiding weer te geven als massa (kg) of als massaconcentratie (kg/L). De massaconcentratie heeft als voordeel dat de sedimenthoeveelheid onafhankelijk is van het leidingvolume.
- *Optioneel uitsluiten korte leidingen*. Korte leidingen kunnen een hoge sedimentconcentratie hebben, zelfs bij een lage sedimentmassa, en zijn bovendien het gevoeligst voor numerieke afrondingseffecten. De hoge maximale concentratiewaarden kunnen de kleurschaal verstoren. Daarom is voorzien in de mogelijkheid om leidingen korter dan max. 100 m uit te sluiten van de grafische kaartweergave.
- *Gebruikershandleiding*. Een handleiding voor installatie en praktisch gebruik is opgeleverd als rapport (Van Summeren, 2022).

Met de projectgroepleden zijn toekomstige (cosmetische) verbeteringen besproken. De belangrijkste zijn:

- *Dynamische kleurschaal sedimentatiekaarten*: een door de gebruiker instelbare kleurschaalverdeling ten behoeve van een flexibele visualisatie.
- *Zichtbaar maken van leidinginformatie*: het tonen van de leiding-ID en sedimentinformatie op de leidingnetkaarten bij selectie van individuele leidingen.

leidinglengte (in grotere netten bevatten i.h.a. meer deeltjesmateriaal), maar hangt ook af van andere parameters zoals de simulatieduur (het aantal totaal aantal deeltjespakketten neemt meestal toe tijdens de initialisatieperiode) en de concentratie van de bron (hogere concentratie, meer deeltjespakketten).

- *Selectie deeltjestypes*: de mogelijkheid om deeltjestypen aan/uit te vinken op de sedimentatie-leidingnetkaart (voor multi-speciesberekeningen).
- *Animatie van sedimentatiepatronen*: een animatie-voorziening (tijdschuifbalk) voor de sedimentkaart die de evolutie van sedimentatiepatronen inzichtelijker maakt.
- *Toevoegen van cartografische informatie*: opnemen van een topografische kaart (OpenStreetMap software) als achtergrond bij de leidingnet- en sedimentkaart. Hiermee is al geëxperimenteerd, maar de kaartgegevens bevatten alleen de gegevens voor Nederland en niet die voor Vlaanderen. Ook veroorzaakte de geografische kaarten het vastlopen van de GUI bij schuiven en zoomen. Ten behoeve van de stabiliteit van de GUI is besloten om de geografische achterweg te laten in de huidige versie van *Aquarellus*.
- *Automatisch aanpassen van het aantal deeltjes per injectietijdstap (M)*: door het aantal deeltjespakketten per tijdstap automatisch aan te passen aan de volumestroom (en deeltjeseigenschappen in geval van een multi-speciesberekening) wordt de resolutie beter afgestemd op het probleem.

2.6 Modelverificatie

Een aantal tests zijn uitgevoerd om te beoordelen of *Aquarellus* (versie 2) correct is geïmplementeerd t.o.v. het conceptuele model (modelverificatie). Hiertoe zijn modelberekeningen getoetst aan analytische uitkomsten van kleine hypothetische leidingnetten en het leidingnetmodel van Castricum (PWN), waarvoor geen analytische uitkomst beschikbaar is. De resultaten zijn beschreven in Bijlage II van dit rapport. De belangrijkste bevindingen zijn:

- De transportsnelheid van deeltjesmateriaal wordt correct beschreven binnen de grenzen van de benchmarktests met een klein hypothetisch leidingnet. De bovengrens van de onnauwkeurigheid is vastgesteld op <6 % voor materiaal in suspensie en <8 % voor bedloadtransport. De ondergrens ligt mogelijk veel lager, maar is niet in nader detail onderzocht.
- De massa's van deeltjesmateriaal in suspensie (M_{SUS}) en sediment (statisch materiaal, M_{STAT}) zijn getoetst aan analytische berekende waarden in het kleine leidingnetmodel met korte (5 m) leidingen. De onnauwkeurigheid neemt af van ca. 50 % voor de laagst geteste resolutie ($\Delta t_{clm} = 1$; $\Delta t_{inj} = \Delta t_{tpt} = 60$; deeltjesaggregatiefactor $N = 1 \cdot 10^6$) tot 0,04-0,6 % voor de hoogst geteste resolutie ($\Delta t_{clm} = \Delta t_{inj} = \Delta t_{tpt} = 1$; deeltjesaggregatiefactor $N = 1000$). Daarmee presteert de huidige versie van *Aquarellus* (versie 2) vergelijkbaar aan het prototype (versie 1) met de fijnst mogelijke resolutie-instellingen.
- *Aquarellus* berekent deeltjesmateriaal in suspensie (M_{SUS}) nauwkeuriger dan sedimenten M_{STAT} (in een klein leidingnetmodel na 5 dagen simulatietijd). Dit hangt mogelijk samen met het feit dat sediment over een langere periode accumuleert en numerieke onnauwkeurigheden opstapelen (in tegenstelling tot materiaal in suspensie dat continu ververst).
- De berekeningen met kleine leidingnetmodellen en het Castricum-model suggereren dat de tijdstapgroottes Δt_{inj} en Δt_{tpt} leidend zijn voor de maximaal haalbare nauwkeurigheid en dat deze nauwkeurigheid optreedt indien de gekozen deeltjesaggregatiefactor N correspondeert met een aantal deeltjes per injectietijdstap ($M = n\Delta t_{inj}/N$) groter dan $1 \cdot 10^6$. Voorzichtigheid is geboden om dit als algemene vuistregel toe te passen: de numerieke onnauwkeurigheid (en het opstapelen van fouten) hangt namelijk samen met deeltjesconcentraties in het gehele leidingnetmodel die niet makkelijk zijn te voorspellen. Het uitvoeren van een resolutietest wordt aanbevolen voor elk hydraulisch scenario.

3 Bepalen van deeltjeseigenschappen in het lab

3.1 Inleiding

De materiaaleigenschappen van deeltjes zijn van invloed op het deeltjestransport en de sedimentatiepatronen die zich in het leidingnet vormen. In *Aquarellus* zijn de bepalende invoerparameters de massadichtheid (ρ_p) en diameter (d_p) van deeltjes en de kritische schuifspanning waarbij deeltjes mobiliseren (θ_c) en resuspenderen (θ_{rs}). De vakliteratuur geeft een beperkt beeld van de bovengenoemde parameters voor Nederlandse en buitenlandse distributiesystemen (voor een gedetailleerde beschouwing zie Van Summeren & Blokker, 2017).

Tegen deze achtergrond is een labonderzoek uitgevoerd, gericht op twee vragen:

- Welke (variatie in) deeltjeseigenschappen zijn te verwachten *tussen* en *binnen* distributiegebieden in Nederland en Vlaanderen?
- Hoe kan een waterbedrijf met praktisch uitvoerbare tests een ruwe inschatting maken van de deeltjeseigenschappen?

Hiertoe zijn vier laboratoriumexperimenten uitgevoerd gericht op het bepalen van bovengenoemde invoerwaarden (ρ_p , d_p , θ_c , θ_{rs}) voor 9 drinkwatermonsters in 3 distributiegebieden.

3.2 Methode

3.2.1 Literatuurstudie naar relatie deeltjeseigenschappen, troebelheid en bezinksnelheid

Voorafgaand aan de experimenten is een literatuuronderzoek uitgevoerd naar het verband tussen gemeten troebelheid van drinkwatermonsters, deeltjesmassa (total suspended solids, TSS), de verdeling van deeltjesgrootte en de bezinksnelheid van deeltjes. De belangrijkste uitkomsten zijn hieronder samengevat.

Relatie troebelheid – deeltjesmassa:

Op basis van acht geraadpleegde studies volgt dat de relatie troebelheid - deeltjesmassa een grote variatie vertoont: in het TSS-domein van 0 tot 100 mg/l neemt de troebelheid toe tot een maximumwaarde die varieert van ca. 50 tot ca. 200 NTU. Het verband is in de meeste gevallen bij benadering lineair in dit parameterdomein. Er bestaat geen universeel geldende relatie tussen troebelheid en deeltjesmassa (TSS), omdat deze relatie afhangt van locatie-specifieke factoren zoals de deeltjeseigenschappen (grootte, dichtheid, vorm en type), de eigenschappen van het water (kleur, ouderdom) en de spoeltechniek van de zuivering (Holliday et al., 2003). Hoewel sediment-specifieke correlaties nuttig zijn als real-time indicator voor gesuspendeerde vaste stoffen, zijn troebelheid en TSS twee verschillende grootheden; voor een goede modellering van een gebied moeten beide parameters afzonderlijk worden gemeten.

Korrelgrootteverdeling

In de literatuur is een aantal deeltjesgrootteverdelingen gepubliceerd die zijn verkregen uit metingen tijdens spoelacties. Boxall et al. (2001) geeft een overzicht van metingen uit het VK en Nederland. Nederlandse monsters bestaan hoofdzakelijk uit kleine deeltjes met een diameter van minder dan 10 μm ; Britse monsters vertonen een brede piek tussen ruwweg 5 en 30 μm . Mogelijke verklaringen zijn verschillen in waterbronnen (overwegend grondwater met minder deeltjes voor de Nederlandse situatie tegenover overwegend oppervlaktewater in het VK),

deeltjesbronnen (in het VK wordt vooral het leidingnet als bron veronderstelt; in Nederland de zuivering) en mogelijk zuiveringsprocessen. Korrelgroottes tussen 0.5 en 400 μm met mediaanwaarden tussen 8 en 27 μm zijn afgeleid voor 6 locaties in Australische distributienetten (Ryan et al., 2008).

Deeltjesdichtheid

Boxall et al. (2001) rapporteren een gemiddelde dichtheid van de deeltjes van 1000 tot 1300 kg/m^3 . Op basis van monsters op 20 verschillende locaties in Australië rapporteren Ryan et al. (2008) een deeltjesdichtheden van 1180 tot 2040 kg/m^3 .

Relatie tussen troebelheid en bezinksnelheid

Deeltjes in drinkwater worden in het algemeen gekenmerkt door een *verdeling* van bezinkeigenschappen. De bezinksnelheid van individuele deeltjes is niet op een kant-en-klare manier te meten. In theorie kan de bezinkingssnelheid van deeltjes in drinkwatermonsters worden afgeleid o.b.v. de verandering van de bezinkhoogte met de tijd. Voor een aggregaat van verschillende deeltjestypes is de bezinkhoogtes echter een zeer diffuus front. In de literatuur wordt bezinking daarom meestal gekarakteriseerd door de troebelheidsafname van een gemengd monster uit te zetten tegen de tijd. De afname verloopt exponentieel in de tijd en sneller voor grote en zware deeltjes en bij een hogere temperatuur, in overeenstemming met de Wet van Stokes. Op deze manier is een beeld te krijgen van de bezinksnelheid met relatief makkelijk uit te voeren experimenten: meten van de troebelheidsafname tijdens een bezinkexperiment en karakterisering van deeltjeseigenschappen zoals de deeltjesgrootte en -dichtheid.

3.2.2 Monstername voor labexperimenten

Drie waterbedrijven hebben in de zomer van 2020 verstoringsproeven uitgevoerd op drie locaties in Neerpelt (De Watergroep), Maaswijk (Spijkenisse, Evides) en Sint Jansklooster (Vitens). Bij de monstername is een door KWR opgesteld protocol gevolgd (zie Bijlage II). Elk drinkwaterbedrijf nam monsters in het tertiaire net (op 80 tot 110 mm PVC leidingen) op drie locaties: 'dichtbij', 'midden', en 'ver' van de leveringslocatie⁶. De monsters bevonden zich op hetzelfde stroomtraject, wat betekent dat hetzelfde water langs de drie locaties stroomde. De monsters zijn genomen in gebieden met een vermoed hoog risico op deeltjesvervuiling; de troebelheidswaarden zijn niet indicatief voor de algemene waterkwaliteit in de drie gebieden. In totaal zijn negen monsters van 20 L verzameld, welke met vier soorten labexperimenten zijn geanalyseerd. De literatuurstudie (Sectie 3.2.1) heeft als basis gediend voor deze experimenten die hieronder zijn beschreven (Sectie 3.2.3-3.2.6).

⁶ De locatie Maaswijk (Evides) ligt dicht bij het pompstation. Hier is het nog steeds nuttig om op drie locaties te meten: het verschil in reistijd is beperkt, maar de hydraulische omstandigheden kunnen nog steeds veranderen naarmate dieper in het leidingnet wordt gemonsterd.



Figuur 5. Uitvoeren van de verstoringproef door Evides in Maaswijk, Spijkenisse.

3.2.3 Bezinkproef

Voor alle 9 monsters zijn bezinkproeven uitgevoerd met een bekglasopstelling (Figuur 6). Van ieder monster is 2 L gemengd met een roerder (10 minuten met 150 r.p.m.) waarna gedurende 24 uur discontinu de troebelheid is gemeten met een Hach 2100 IQ troebelheidsmeter. De snelheid waarmee de troebelheid afneemt is gekwantificeerd door de halfwaardetijd ($\tau_{1/2}$) te berekenen, via een exponentiële fit van de meetwaarden in MS Excel. Het aannemen van exponentiële afname wordt ook elders in de wetenschappelijke literatuur gebruikt, zie bijvoorbeeld Ryan e.a. (2008). Deze halfwaardetijd is een indicatorwaarde voor de bezinksnelheid (u_s) van het deeltjesmateriaal –een globale maat voor een pluriform mengsel van deeltjes met verschillende individuele bezinksnelheden.



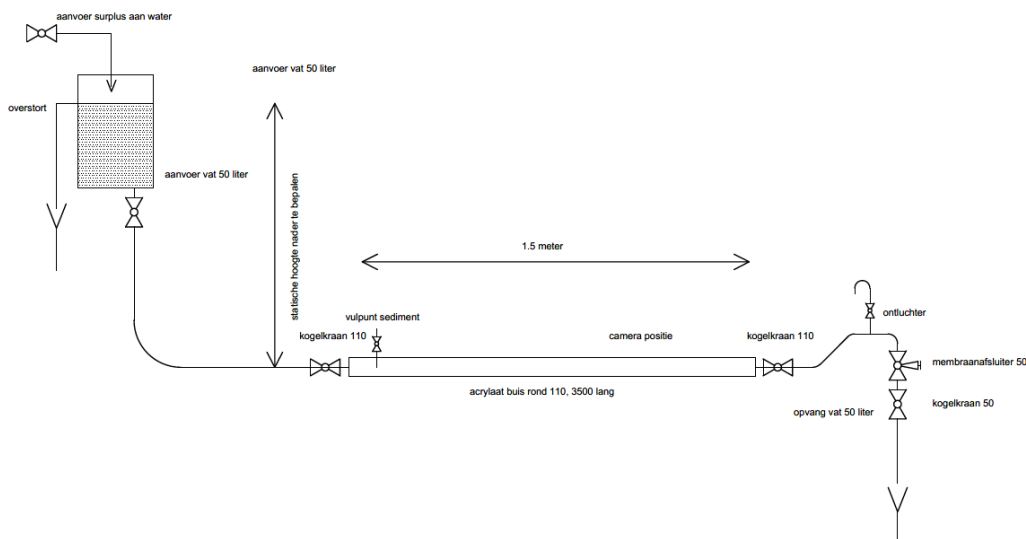
Figuur 6. Bekerglasopstelling voor bepalen van afname van de troebelheid.

3.2.4 Deeltjesgroottebepaling

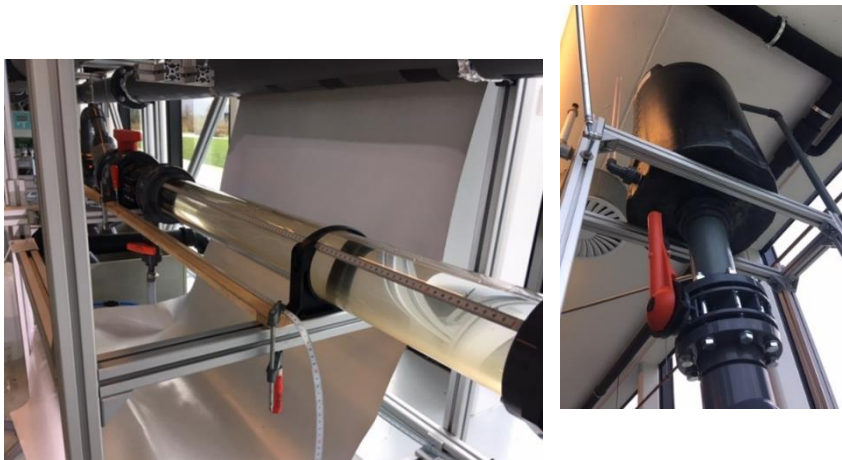
De deeltjesgrootte-verdeling is voor de negen samples bepaald met een PAMAS deeltjesteller in zeven deeltjesgrootte-intervallen: 1-3 μm ; 3-5 μm ; 5-10 μm ; 10-20 μm ; 20-35 μm ; 35-60 μm ; en 60-100 μm . De grootte is geïnterpreteerd als deeltjesdiameter (d_p) –een redelijke aanname voor bij benadering sferische deeltjes. De originele monsters zijn met twee verschillende verdunningen geanalyseerd (5 maal en 10 maal verdund), waarvoor is gecorrigeerd in de uitkomsten.

3.2.5 Doorstromingsproef

Een doorstromingsproef met een buisopstelling is uitgevoerd voor onderzoek naar het opwervelgedrag van deeltjes. Specifiek gaat het om het bepalen van grenswaarden van de schuifspanning voor mobilisatie (θ_c) en resuspensie (θ_{rs}), het vóórkomen van bed load transport en de bed load snelheid (u_{bl}). Hiervoor is een bestaande proefinstallatie aangepast (Figuur 7 en Figuur 8) met als belangrijkste componenten: een 100 L buffervat op 2 meter hoogte van waaruit water wordt aangevoerd; een PVC buis van 100 mm diameter waarvan een transparant deel kan worden afgesloten, gevuld en geleegd via een afdichtbare openingen; en een afvoer met een handafsluiter voor het regelen van de doorstroming. Het deeltjesgedrag is gefilmd met 2 gefixeerde smartphone-camera's (boven- en zijaanzicht). Het afgevoerde water voerde langs een deeltjesteller. Er zijn voor 3 monsters proeven uitgevoerd (monsters DW1, DW3 en VI2) volgens een protocol met als belangrijkste stappen: (i) reinigen van de installatie door deze schoon te spoelen, (ii) vullen van de gereinigde buisopstelling en tank met ultra-puur water (MilliQ), (iii) leggen van het afsluitbare transparante buisdeel en inbrengen van een monster van 15 L, (iv) laten bezinken van het monster totdat er geen zichtbare verandering optreedt in de troebelheidsprofiel, (v) doorstromen met milliQ-water volgens een stapsgewijze ophoging van de watersnelheid.



Figuur 7. Ontwerp van de buisopstelling voor doorstroomproef.



Figuur 8. Buisopstelling voor doorstroomproef met (links) vulbaar transparant buisdeel en (rechts) buffervat.

3.2.6 Labanalyse

In het Chemisch lab van KWR (Laboratorium voor Materiaalonderzoek en Chemische analyse, LMC) zijn voor de negen monsters bepaald:

- Het volume van het natte sediment, V_{nat} (Figuur 9).
- Het drooggewicht (of "droogrest"), m_{drg} : van 1 L gehomogeniseerd monster is bij 105°C het monster ingedroogd en het resterende droge deeltjesmateriaal gewogen.
- De gloeirest: de droogrest is verhit tot 450°C. Bij deze temperatuur verbrandt het organische, maar niet het anorganische materiaal.
- Volume van het natte sediment, V_{nat} .

Als maat voor de deeltjesdichtheid (ρ_p) gebruiken we de dichtheid van het natte sediment ρ_{nat} , berekend als $\rho_{nat} = \frac{m_{nat}}{V_{nat}}$, met m_{nat} de massa van het natte sediment. De massa van het natte sediment bestaat uit de massa van het water (m_w) en die van het droge sediment (het drooggewicht, m_{drg}): $m_{nat} = m_w + m_{drg} = \rho_w V_w + m_{drg}$. De watermassa is geschat door de volumefractie van het water te berekenen uit de natte volume minus het (kleine) volume van het droge sediment: $V_w = V_{nat} - V_{drg} = V_{nat} - (m_{drg}/\rho_{drg})$. Samenvattend levert dit:

$$\rho_{nat} = \frac{1}{V_{nat}} \left(\rho_w \left[V_{nat} - \frac{m_{drg}}{\rho_{drg}} \right] + m_{drg} \right)$$

Het aannemen van de (onbekende) dichtheid van het droge sediment, ρ_{drg} , introduceert een onzekerheid in ρ_{nat} . In de presentatie (Sectie 3.3.3) zijn de sedimentdichtheden van verschillende monsters onderling vergeleken onder aanname van een oneindige dichtheid ρ_{drg} (ofwel: het droge sediment neemt geen volume in). Een valide alternatief zou zijn om een de dichtheid van een ijzer ($7860 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$) - mangaan ($7210 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$) mengsel te nemen, maar omdat de samenstelling niet is bepaald in de labanalyse is hier niet voor gekozen.



Figuur 9. Labopstelling voor het bepalen van deeltjeseigenschappen: het bezinken van deeltjesmateriaal om het volume van nat sediment te bepalen.

3.3 Resultaten en discussie

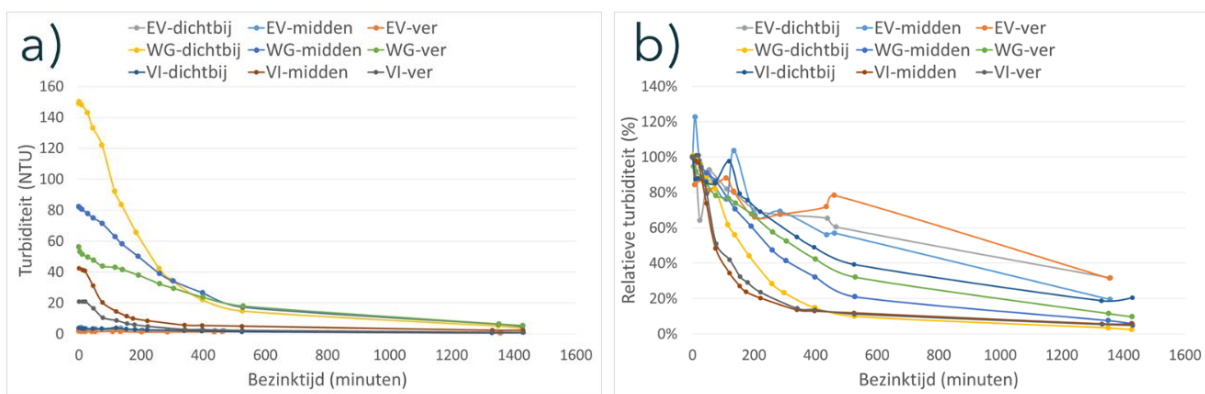
3.3.1 Bezinkproef

De tijdens de bezinkproef gemeten troebelheden en berekende halfwaardetijden zijn weergegeven in Figuur 10 en Tabel 2. Troebelheidswaarden zijn uitgedrukt in absolute waarden (in NTU, Figuur 10a) en genormaliseerd met de initiële troebelheid (Figuur 10b). De initiële troebelheid (gemeten aan het begin van het experiment waarbij het monster volledig gemengd is) toont een grote variatie, zowel *tussen* als *binnen* de drie distributiegebieden, met de hoogste initiële troebelheden voor de monsters van De Watergroep (60-150 NTU), gevolgd door die van Vitens (0-40 NTU) en Evides (0 NTU).

Indien deeltjesmateriaal voornamelijk ontstaat bij het leveringspunt en op grotere afstand van dit leveringspunt afneemt in hoeveelheid en is samengesteld uit trager bezinkend materiaal, is te verwachten dat zowel de initiële troebelheid als de halfwaardetijden $\tau_{1/2}$ afnemen met de afstand tot het leveringspunt. Deze relatie is alleen aanwezig voor de drie monsters van De Watergroep, maar niet voor die van Vitens en Evides; blijkbaar bestaan er andere mechanismes die dergelijke patronen verklaren. Hierbij is te denken aan (i) een herordening tot meer complexe sedimentatiepatronen vanwege bedload-transport en herhaaldelijke opwerveling en bezinking; (ii) de aanwezigheid van deeltjesbronnen benedenstrooms van het leveringspunt, zoals roestende leidingen of koppelingen; (iii) chemische processen die de deeltjesamenstelling tijdens transport kunnen veranderen zoals flocculatie, coagulatie; en (iv) microbiologische processen zoals biofilmvorming waardoor diep in het leidingnet grotere deeltjes kunnen ontstaan.

Voor elk van de drie onderzochte gebieden (maar niet voor het geheel van negen samples) is schijnbare bezinking sneller (d.w.z. troebelheidsafname sneller, $\tau_{1/2}$ korter) bij een hogere initiële troebelheid. Een verband dat op toeval berust is niet uit te sluiten. Andere mogelijke verklaringen zijn:

- snel-bezinkende deeltjes concentreren makkelijker op plekken dan traag-bezinkende deeltjes die bij dezelfde stroomsnelheid i.h.a. over een groter gebied zullen bezinken;
- in troebele samples zijn hogere deeltjesconcentraties te verwachten; deeltjes kunnen vaker botsen tijdens bezinking. Dit zou vlokvorming (flocculatie) kunnen bevorderen. De aggregatie resulteert in deeltjes met een lagere dichtheid, maar grotere massa en een hogere bezinksnelheid tot gevolg. Echter, voor de gemeten troebelheden (minder dan 1 deeltje op de miljoen) is vrije bezinking een redelijke aanname en de interactie tussen deeltjes te verwaarlozen. Daarnaast resulteren botsingen in een *afname* van de bezinksnelheid, wat de snellere bezinking (deels) teniet zou doen of zelfs tot een lagere bezinksnelheid zou leiden. Flocculatie ligt als drijvend mechanisme voor een snellere bezinking hiermee minder voor de hand.



Figuur 10. Tijdreeksen van de gemeten troebelheid tijdens bezinkproeven. (a) Absolute troebelheid, (b) troebelheid genormaliseerd naar de initiële troebelheid (d.w.z. gemeten aan het begin van het experiment). "EV"=Evides; "WG"= De Watergroep; "VI"= Vitens. 1440 minuten correspondeert met één dag.

Tabel 2. Overzicht van meetuitkomsten van vier labexperimenten voor negen verstoringproeven. De namen van de samples refereren aan de monsterlocaties: "DW"=De Watergroep; "EV"= Evides; "VI"=Vitens en "1","2" en "3" staat voor "dichtbij", "midden" en "ver"van het pompstation. (*) Geen resultaten vanwege te kleine hoeveelheid deeltjesmateriaal.

Sample	Bezinkproef		Deeltjestelling		Labanalyse			Buisproef
	Initiële troebelheid (FTU) +/-5	Halfwaardetijd (uur)	Log10(aantal deeltjes)	Aandeel deeltjes 1-3 µm / totaal (%)	Droogrest (mG/L)	Fractie org/anorg (%)	Dichtheid (kg/m ³)	
DW1	149	4,1	6,33	68,7	100	46,4	1052,6	Wand-aanhechting
DW2	82,3	5,5	6,19	59,4	64	39,2	1045,7	
DW3	56,1	6,8	5,91	64,1	42	38,3	1084	bed load & resuspensie
EV1	3,32	12,4	4,62	68,7	3,2	3,1	*	
EV2	3,35	9,4	4,26	59,4	4,6	19,6	*	
EV3	1,85	13,3	4,11	64,1	2,1	57,1	*	
VI1	3,94	9,2	4,58	66,5	5,7	28,1	*	
VI2	42,3	4,5	5,54	47	63	40,8	1018	Wand-aanhechting
VI3	20,8	4,4	4,95	40	37	38,4	1018,5	

3.3.2 Bepalen van deeltjesgrootte met deeltjesteller

Het totaal aantal gemeten deeltjes (getoond als logaritmische waarden in Tabel 2) is sterk gecorreleerd aan de initiële troebelheid (correlatiecoëfficiënt = 0.90). De relatieve verdeling in grootteklassen (Figuur 11) en de fractie van fijne deeltjes (Tabel 2, "Aandeel deeltjes 1 - 3 µm / totaal (%)") toont dat veruit de meeste deeltjes (40 – 70%) zich bevinden in het 1-3 µm domein. Het aandeel neemt sterk af met de deeltjesgrootte. Binnen de drie gebieden varieert het aandeel enigszins met de afstand tot het pompstation, maar hierin tekenen zich geen duidelijke verbanden af. Er is wel een (zwak) positief verband tussen de fractie fijne (1-3 µm) deeltjes en de halfwaardetijd (correlatiecoëfficiënt = 0.52). Dit is te verwachten aangezien volgens de Wet van Stokes de bezinksnelheid toeneemt met het kwadraat van de deeltjesdiameter. Voor de onderzochte monsters is de halfwaardetijd (relatief makkelijk meetbaar met een bezinkproef en troebelheidsmeter een ruwe indicator voor de deeltjesgrootte (die minder makkelijk te meten is met een deeltjesteller).



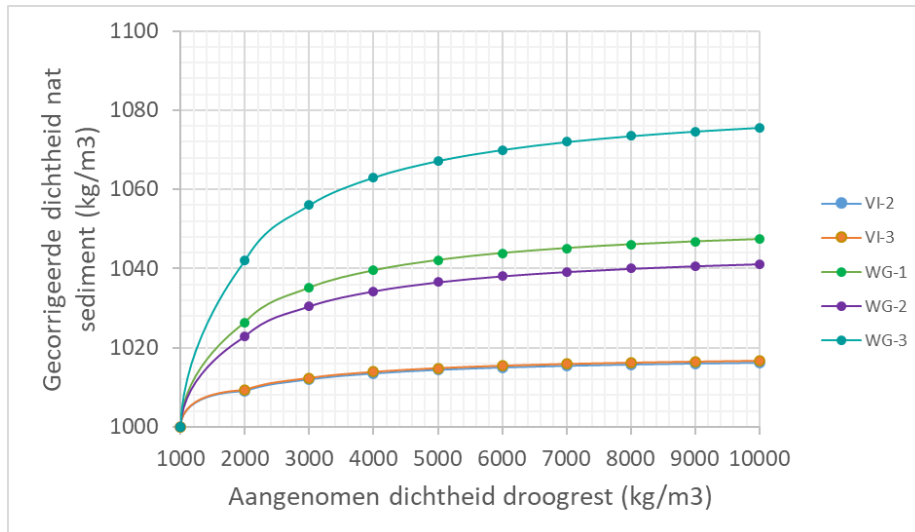
Figuur 11. Verdeling van deeltjesgroottes in acht grootteklassen. Van boven naar beneden zijn de uitkomsten getoond voor Neerpelt (De Watergroep), Maaswijk (Evides) en St. Jansklooster (Vitens). Voor elk gebied representeren de blauwe (achter), rode (midden) en groene (vooraan) staafdiagrammen de monsterlocaties van dichtbij, midden en veraf van het pompstation.

3.3.3 Labanalyse van deeltjeseigenschappen

Voor vijf monsters was voldoende materiaal aanwezig om dichtheden van het natte sediment af te leiden volgens de aannames uit Sectie 3.2.6. De resultaten in Figuur 12 tonen dat de afgeleide dichtheden variëren tussen 1018 en 1084 kg/m³ (onder de aanname van een oneindige massadichtheid van het droge deeltjesmateriaal, zie Sectie 3.2.6). Deze waarden zijn in overeenstemming met gemeten dichtheden voor het Britse distributienet (1000-1300 kg/m³). Omdat voor slechts vijf monsters een dichtheid was af te leiden, zijn deze weggelaten uit de

correlatieanalyse. Meer meetgegevens zijn nodig om een duidelijk empirisch verband vast te stellen tussen deeltjesdichtheid (en -grootte) en de halfwaardetijd (als maat voor de bezinksnelheid van deeltjes).

Voor de negen monsters is geen duidelijke correlatie vastgesteld tussen de fractie organisch/anorganisch materiaal en één van de andere parameters (halfwaardetijd, aantal deeltjes, aandeel fijne deeltjes). De fractie organisch/anorganisch materiaal is dus niet bruikbaar als indicator voor deze parameters voor deze set monsters.



Figuur 12. Berekende deeltjesdichtheid als functie van aangenomen vaste stof dichtheid voor monsters van Vitens (VI-2, VI-3) en De Watergroep (WG-1, WG-2, WG-3).

3.3.4 Bepalen van transporteigenschappen met buisopstelling

Van de drie experimenten met de buisopstelling, is voor één experiment (monster DWG1) een opeenvolging van stilliggend sediment – bed load transport – resuspensie waargenomen. Dit toont ten eerste aan dat bed load transport inderdaad voorkomt tussen de stagnatie en resuspensie van deeltjesmateriaal in stromend drinkwater. Voor de andere twee experimenten (monsters VIT2 en DWG3) werd pas bij een hoge stroomsnelheid transport van deeltjesmateriaal waargenomen. Dit transport leek eerder op erosie van materiaal dat op de gehele omtrek van de leidingwand was geaccumuleerd; bed load transport of resuspensie werden niet waargenomen.

3.4 Concluderende opmerkingen

De hierboven beschreven analyse leverde nuttige informatie over de deeltjesgrootteverdeling en van de troebelheidsafname met een bekerglastest (als maat voor de bezinksnelheid) in drinkwatermonsters. De geschatte deeltjesdichtheid en het bepalen van mobiliteitscondities met de doorstroomproef waren minder eenduidig te interpreteren. De volgende aandachtspunten worden opgemerkt:

- De monsternames zijn uitgevoerd met een verstoringsproef. De eigenschappen van deeltjes in de monsters wijken daarom mogelijk af van de deeltjes in de leidingen. Hoe groot deze afwijking werkelijk is, is lastig te bepalen, tenzij de eigenschappen in-situ (bijvoorbeeld met een robot) of onverstoord ex-situ metingen (bijvoorbeeld met coupons) wordt gewerkt.
- De troebelheidsmeting in een bekerglastest geeft weliswaar een nuttige indicatie voor de valsnelheid maar is geen directe maat hiervoor. Het is mogelijk om de valsnelheden van individuele deeltjes (in troebel drinkwatermonster) te meten met optische methoden zoals particle tracking velocimetry (PTV), waarbij laserlicht stroboscopisch een volume belicht en de positie van individuele deeltjes kan worden gevolgd.

- Hoewel het buiten de strekking van dit project viel, kan het nuttig zijn om de deeltjeseigenschappen proberen te koppelen aan vormingsprocesses (bepaalde zuiveringsprocessen, roestende leidingen, etc.) Hiertoe zou de karakterisering uitgebreid kunnen worden met een structuuranalyse (scanning electron microscopy (SEM), Röntgendiffractie (X-Ray diffraction, XRD) of een analyse van de chemische samenstelling of biologische eigenschappen (bacterial community analysis, QPCR).

4 Sedimentmodellering en relatie tot troebelheidsmetingen Spijkenisse en Castricum

4.1 Inleiding

Om inzicht te krijgen in de toepasbaarheid, is *Aquarellus* toegepast op twee onderzoeksgebieden: Spijkenisse (Evides) en Castricum (PWN). Het onderzoeksdoel bestond uit:

1. *Gevoeligheidsanalyse van invoerparameters*. Het doel was inzicht te verkrijgen in de gevoeligheid van de berekende sedimentatiepatronen ten opzichte van relevante invoerparameters in het licht van onzekerheden in deze parameters:
 - a. deeltjeseigenschappen massadichtheid (ρ_p), diameter (d_p) en kritische schuifspanning waarbij deeltjes mobiliseren (θ_c) en resuspenderen (θ_{rs});
 - b. dagelijkse verbruiksvariatie en dagfactor.
2. *Vergelijking van berekende sedimentpatronen met troebelheidsmetingen*. De onderzoeksgebieden zijn geselecteerd op basis van beschikbare gegevens van troebelheidsmetingen. Indien een accurate experimentele opzet mogelijk is, is *Aquarellus* te valideren o.b.v. de overeenkomst tussen berekende sedimenten en gemeten troebelheidswaarden.

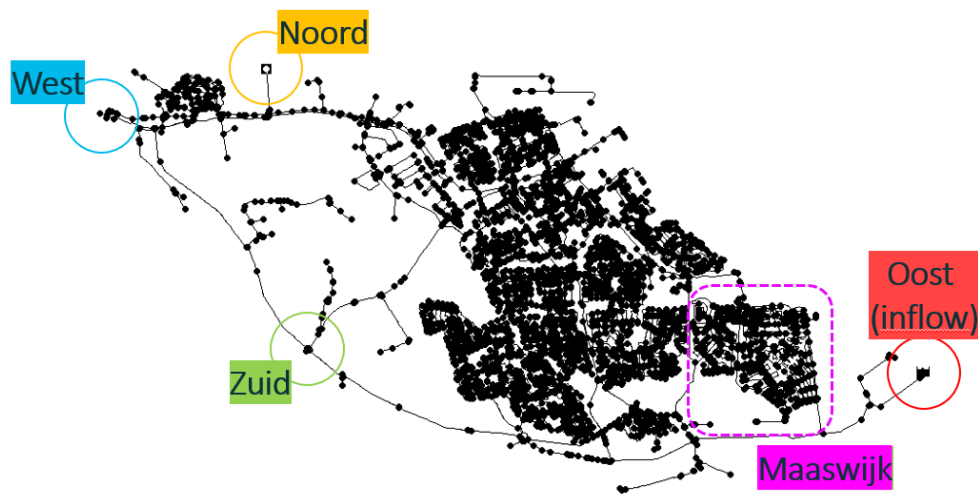
Hieronder wordt het onderzoek naar Spijkenisse en Castricum apart beschreven. De deelonderzoeken zijn deels overlappend en aanvullend.

4.2 Onderzoeksgebied Spijkenisse (Evides)

De analyse voor Spijkenisse (Evides) was uitgevoerd met een tussenversie van *Aquarellus*. Hiervan bleek achteraf dat de hoeveelheid deeltjesmateriaal correct werd berekend maar incorrect werd opgeslagen en weggeschreven. De resultaten waren hierdoor onbetrouwbaar en zijn niet opgenomen in dit rapport. Er was geen ruimte meer om de berekeningen over te doen. Voor de volledigheid zijn hieronder op hoofdlijnen de aanpak en geleerde lessen toegelicht.

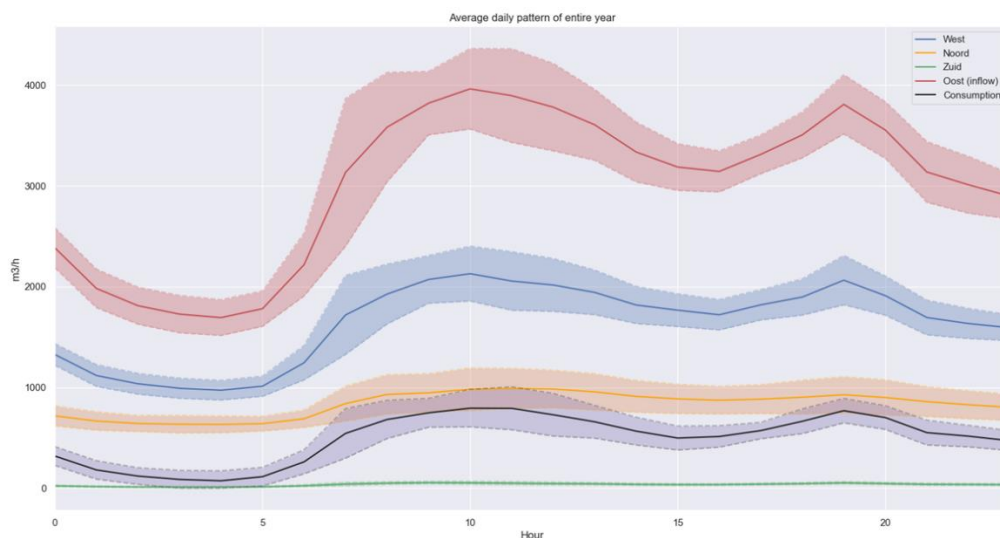
4.2.1 Leidingnetmodel: hydraulica en deeltjesbron

Het hydraulisch leidingnet van Spijkenisse voor 2016 bevat één leveringspunt (vanuit WPB Beerenplaat) en drie doorvoerlocaties (Figuur 13). Het leveringspunt is tevens als enige deeltjesbron toegewezen. Het huishoudelijk verbruik is uitgesplitst naar het totaalverbruik met een 24-uurs verbruikspatroon van een standaard weekdag. De totale leidinglengte is 293 km en het model bevat 7328 leidingen en 6649 leidingknopen.



Figuur 13. Leidingnetmodel Spijkenisse (Evides)

Uit een analyse van de online meetgegevens van Evides is de variatie in levering, doorvoer en totaalverbruik afgeleid voor het 2016 model (Figuur 14). Hieruit volgde dat verbruiksveranderingen tot 11% (dagfactor van 0.89 tot 1.11) volstaan om gebruikelijke leveringsituaties te beschrijven, d.w.z. verbruik dat correspondeert met variaties in (door)levering die binnen één standaarddeviatie van de online meetgegevens vallen.



Figuur 14. Volumestromen van levering (rood), doorlevering (blauw, oranje, groen) en totaalverbruik (zwart). De gekleurde banen representeren één standaarddeviatie (aan elke kant van het gemiddelde).

4.2.2 Vergelijking met gemeten troebelheid

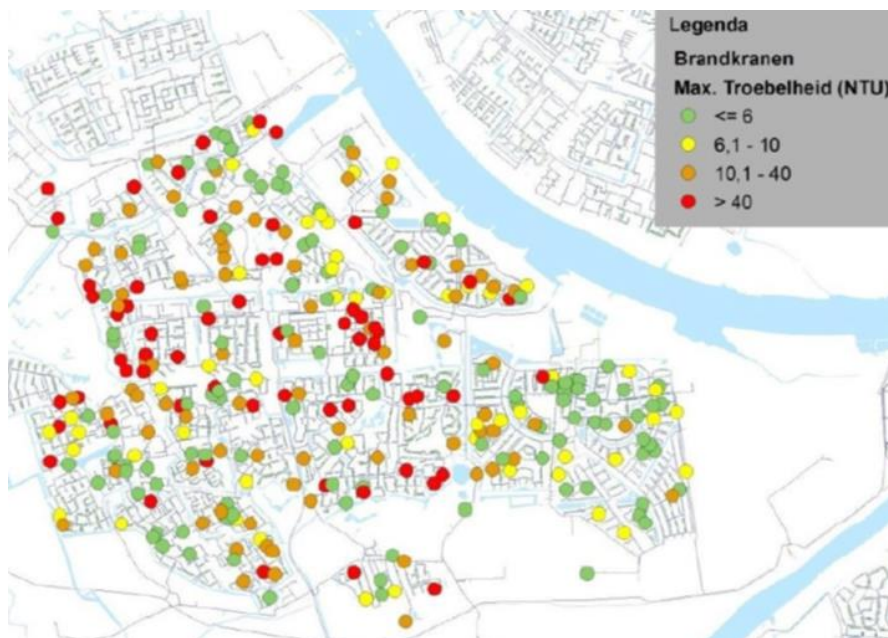
Evides heeft troebelheidsgegevens beschikbaar gesteld uit 2016 (Figuur 15). Het gaat om de maximale troebelheid gemeten tijdens spuicaties uitgevoerd in een periode van ca. 1 jaar. De troebelheidswaarden zijn vergeleken met rekenuitkomsten van *Aquarellus*.

Een vergelijkende analyse was gericht op de validatie van *Aquarellus*. Hiertoe zijn berekeningen met het Spijkenissemodel voor 2016 vergeleken met de troebelheidswaarden. Dit is gecombineerd met een

gevoeligheidsanalyse gericht op het verkrijgen van inzicht van de invloed van invoerparameters op de berekende sedimentpatronen. Per scenario zijn de volgende parameters gevarieerd: deeltjesdichtheid (ρ_p), -diameter (d_p), mobiliteitscriteria θ_c en θ_{rs}) en dagfactor. De variatie van deeltjeseigenschappen is gebaseerd op de uitkomsten van Hoofdstuk 3. De dagfactor is gevarieerd met $\pm 11\%$, conform de eerdere volumestroomanalyse (Figuur 14). Tenslotte zijn de berekende sedimentpatronen gebruikt om wijken met een verhoogd vervuilingsrisico aan te wijzen (kwalitatieve analyse) en toekomstige locaties voor troebelheidsmetingen aan te wijzen.

Zoals beschreven in de vorige sectie, zijn de resultaten van de vergelijkende analyse niet geïnterpreteerd en bewust niet opgenomen in dit rapport. Een aantal aandachtspunten zijn nuttig om te vermelden:

- Troebelheid gemeten tijdens spuiacties zijn een goede maat om *Aquarellus* mee te valideren. In tegenstelling tot OPM-metingen is de troebelheid indicatief voor *al* het opwervbare deeltjesmateriaal in de leiding.
- Het aantal metingen in Spijkenisse was hoog en had een goede gebiedsdekking (Figuur 15).
- Een ander voordeel is dat de spuiacties in een relatieve korte periode zijn uitgevoerd en volgens het schoonwaterfrontprincipe. Dit beperkt de kans op tussentijdse hydraulische verstoringen die een vergelijkende analyse lastiger maken.
- Een nadeel was dat alleen de maximale troebelheid tijdens spuien bewaard was gebleven; het maximum is strikt genomen niet indicatief voor de deeltjesvervuiling in de leiding.
- Spuisecties waren niet beschikbaar. De brandkraanlocaties moesten visueel en met een GIS-analyse worden gelinkt aan de leiding-ID. Hierbij werd echter niet duidelijk welke leidingen precies tot de spuisectie behoorden.



Figuur 15. Maximale troebelheid gemeten tijdens spuiacties in Spijkenisse, uitgevoerd door Evides. Figuur is gecreëerd door Evides.

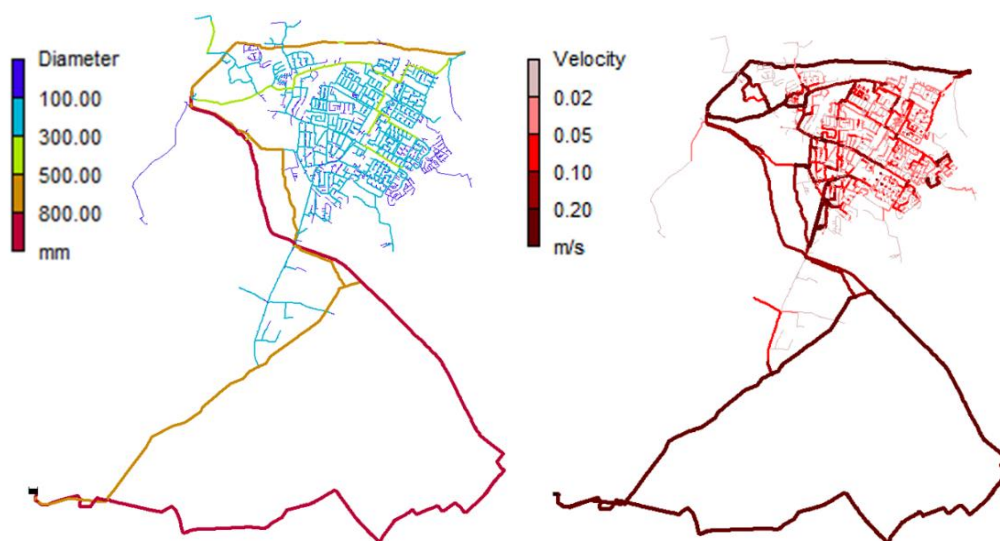
4.3 Onderzoeksgebied Castricum

4.3.1 Leidingnetmodel: hydraulica en deeltjesbron

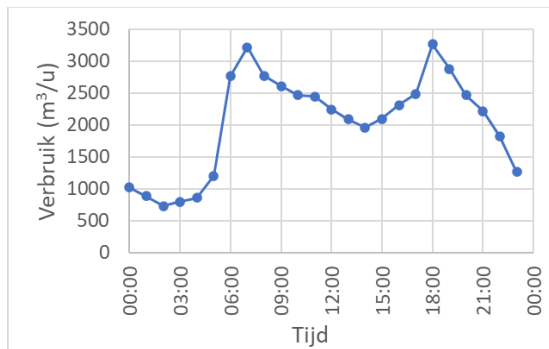
Na een inventarisatie door PWN is het leidingnet van Castricum geselecteerd als onderzoeksgebied. Het voldeed aan drie wensen: (i) een relatief simpel leidingnet (slechts één voeding, één aaneengesloten woonkern, geen reinwaterkelders), (ii) beschikbaarheid van gemeten troebelheid van drinkwater, (iii) een hydraulisch “rustig” gebied, d.w.z. dat in de evaluatieperiode (2011 – 2020) geen grote verstoringen (door spuiacties, grote bouwwerkzaamheden of netwerkuitbreidingen) voorkwamen in de evaluatieperiode, hoewel er wel kleine verstoringen optraden (zoals kleine bouwwerkzaamheden en operationele acties). Deze eigenschappen maken het makkelijker de rekenresultaten te interpreteren en te vergelijken met troebelheidsmetingen.

Het hydraulisch leidingnetmodel (Figuur 16) bestaat uit een netwerk gevoed vanuit één leveringspunt in het uiterste zuidwesten van het gebied (WPB Wim Mensink). Dit punt is de enige gemodelleerde deeltjesbron. Aangenomen is een constante deeltjesconcentratie ($0,023 \cdot 10^{-6}$ kg/kg), geschat uit de gemiddelde waarde van beschikbare troebelheidsmetingen (0,023 FTU, standaarddeviatie 0,014 FTU in de periode 1/1/2022-5/7/2022). Vanuit dit leveringspunt is de hoofdstroom noordwaarts richting de woonkern in een s-vormige transportleiding (Figuur 16). De bovenste helft van deze s-vorm krult om de woonkern en voedt de woonkern in de richting van de klok op meerdere locaties (Figuur 16). De totale leidinglengte is 141 km en het model bevat 3076 leidingen en 2975 leidingknopen.

De huishoudelijk verbruikspatronen zijn uitgesplitst naar het totaalverbruik in het gebied (Figuur 17). Het verbruikspatruon wordt dagelijks herhaald voor de volledige simulatieperiode van 30 dagen.



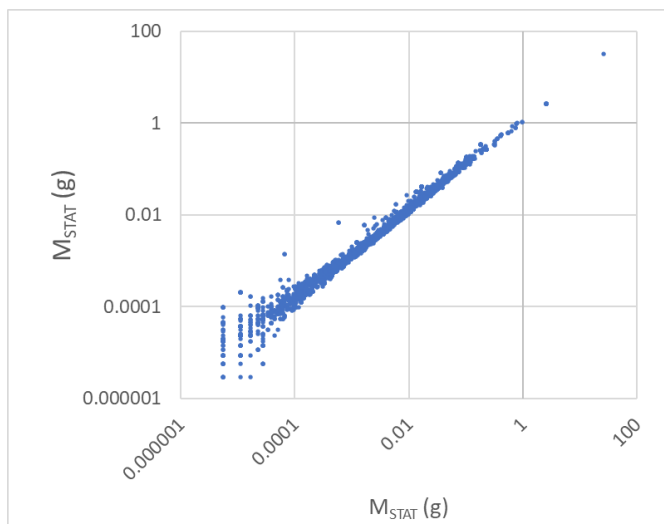
Figuur 16. Hydraulisch model van Castricum met (links) leidingdiameters en (rechts) snelheden om 08:00 uur. Het leveringspunt bevindt zich in het zuidwesten.



Figuur 17. Dagelijks patroon van het totaalverbruik van leidingnetmodel Castricum.

4.3.2 Numerieke resolutie

Er is gekozen voor een numerieke resolutie van $\Delta t_{inj} = \Delta t_{tpt} = 10$ s, $\Delta t_{clm} = 1$ s, $N = 1 \cdot 10^4$ (deeltjesaggregatiefactor), corresponderend met $M = 2,5 \cdot 10^4$ (aantal deeltjes per tijdstap bij de bron), als compromis tussen rektijden (ca. 10 uur rektijd voor een simulatieperiode van 30 dagen) en nauwkeurigheid van de deeltjestransport-berekeningen. De waarde voor M is lager dan de aanbevolen waarde ($M > 1 \cdot 10^6$, Sectie 2.6). De impact van deze keuze is onderzocht door het statisch sediment te vergelijken met een modelrun met een twee maal lagere N -waarde ($N = 5000$ i.p.v. 10000) en daarmee een tweemaal hogere M -waarde ($5 \cdot 10^4$ i.p.v. $2,5 \cdot 10^4$). De massa's van statisch sediment na vier dagen simulatietijd zijn voor beide modellen berekend en weergegeven in Figuur 18 ($N=5000$ verticaal; $N=10000$ horizontaal). Elk datapunt representeert een individuele leiding. Bij een perfecte overeenkomst zouden alle punten op de diagonaal $x=y$ vallen. Er is nagegaan dat na een modeltijd van 4 uur het $N = 10000$ model 82 % van de hoeveelheid statisch sediment bevat t.o.v. het $N = 5000$ model. De genormeerde kwadratisch gemiddelde fout (root-mean-squared-error) tussen de twee modellen van sedimentmassa's van individuele leidingen is 27 %. Dit betekent dat de oplossing nog niet volledig is geconvergeerd. Wel laat Figuur 18 zien dat de verdeling van sedimentmassa over de leidingen niet heel gevoelig meer is van de waarden van N .



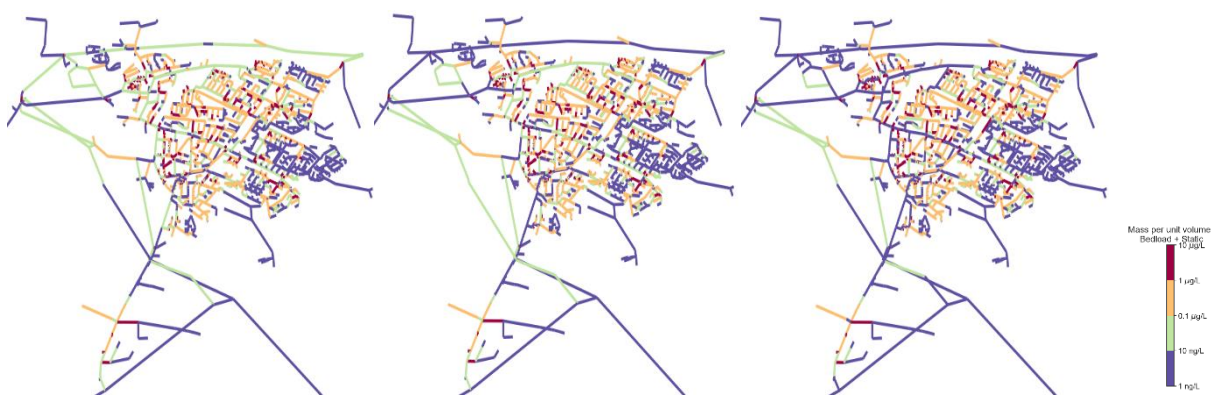
Figuur 18. Statische sedimentmassa na 4 dagen modeltijd vergeleken voor het Castricum model met schaalfactor voor deeltjesaggregatie $N=10000$ (horizontaal) en $N=5000$ (verticaal). Elk punt representeert een leiding in het model.

4.3.3 Berekende sedimentvorming

De invloed van kortdurende stromingsvariaties op sedimentpatronen (samenhangend met dagelijkse verbruiksvariaties) en meerdaagse sedimentopbouw is onderzocht voor het hierboven beschreven leidingnetmodel van Castricum.

Volumestromen variëren het meest tijdens de verbruikspiek in de ochtend (Figuur 17). Dit valt samen met de grootste verandering in de sedimentatiepatronen, zoals getoond in Figuur 19 voor modeltijd van 03:00, 06:00 en 09:00 uur. Het inzetten van de ochtendpiek (vergelijk de situatie van 03:00 en 06:00 uur) gaat gepaard met een afname van sedimenten in sommige delen van de transportleiding, maar heeft geen substantiële invloed op de sedimenten in de distributieleidingen in de woonkern. Een plausible verklaring is dat de snelheden in transportleidingen i.h.a. hoger zijn dan in distributieleidingen (Figuur 16) en eerder de kritische schuifspanning voor resuspensie overschrijden; de schuifspanning is evenredig aan het kwadraat van de snelheid.

De sedimentpatronen in de woonkern lijken enerzijds erg ongevoelig voor de gemodelleerde dagelijkse verbruiksvariatie (wat ze beter voorspelbaar maakt); anderzijds beïnvloedt de dagelijkse variatie wel de aanvoer vanuit de transportleidingen die het distributiegebied (woonkern) voeden en op indirecte wijze ook de sedimentatiepatronen. De precieze manier waarop dit gebeurt vergt een gedetailleerde analyse van de uitkomsten.



Figuur 19. Berekend sediment voor het leidingnetmodel van Castricum. Van links naar rechts is de situatie om 03:00, 06:00 en 09:00 uur weergegeven op de laatste dag van de 30-daagse simulatie. Leidingen buiten de figuur, vallen in de laagste sedimentklasse (<10 ng/L).

De verandering van sedimenten gedurende 30 dagen is berekend en voor drie momenten getoond in Figuur 20. Hoewel de hoeveelheid sediment elke 10 dagen toeneemt, verandert het ruimtelijke patroon in de woonkern weinig; ten opzichte van elkaar worden dezelfde leidingen vuil. Dit is verder onderbouwd met tijdreeksen van de berekende totale hoeveelheid massa in het leidingnet in Figuur 21. De hoeveelheid statisch sediment neemt op een voorspelbare manier toe. Het materiaal in bed-load transport is ook voorspelbaar en neemt na ca. één week niet meer toe (afgezien van een variatie die samenhangt met dagelijkse verbruiksvariaties). De resultaten suggereert dat het ruimtelijke sedimentpatroon na 30 dagen is te extrapoleren naar de toekomst: na 60 dagen is te verwachten dat de hoeveelheid (statisch) sediment in distributieleidingen ruwweg is verdubbeld t.o.v. de situatie na 30 dagen⁷.

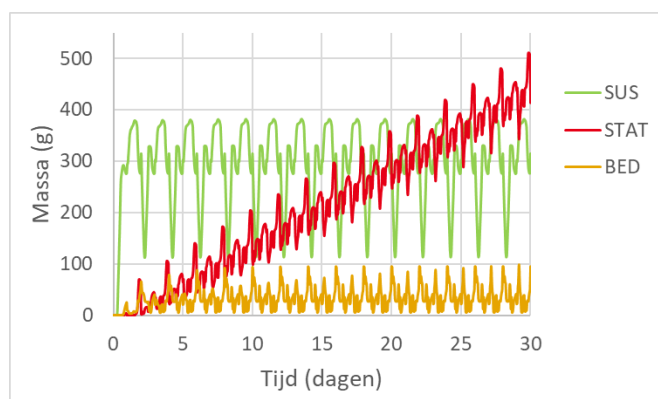
In tegenstelling tot de hierboven besproken distributieleidingen is de berekende hoeveelheid sediment niet op een simpele manier te extrapoleren in de tijd. Dit sluit aan bij de eerder genoemde veronderstelling dat dagelijkse snelheidsvariaties een groter effect hebben op sedimenten in transportleidingen dan distributieleidingen in het Castricum-model.

⁷ Aquarellus laat opeenhoping van sedimenten tot in het oneindige toe: de invloed van een sedimentlaag op de hydraulica zit er niet in. Ter illustratie voor de tijd die nodig is dit effect relevant te maken: in de berekening van Castricum zijn leidingen na 30 dagen tot maximaal 10 µg/L gevuld met sediment. Om 1 liter leidinginhoud tot 1% te vullen is ten minste 10 g sediment nodig (of meer, indien de sedimentdichtheid hoger is dan die van water, zoals in dit rekenvoorbeeld aangenomen). Bij gelijkblijvende sedimentatiesnelheid duurt het ca. 83 jaar om deze hoeveelheid sediment te bereiken.

In werkelijke leidingnetten zullen stromingspatronen een natuurlijke variatie vertonen, vanwege weekend- en feestdagen, seizoensgebonden verbruik, stochastisch verbruik en verbruik op het niveau van individuele huishoudens (in plaats van geaggregeerd verbruik zoals gangbaar is in hydraulische leidingnetmodellen). Deze effecten zijn niet in het model van Castricum opgenomen, maar kunnen wel de sedimentvorming beïnvloeden. Een nuttige vervolgstap zou zijn om de invloed van deze aspecten te onderzoeken.



Figuur 20. Berekend sediment voor het leidingnetmodel van Castricum na een simulatietijd van (van links naar rechts) 10, 20 en 30 dagen. Leidingen buiten de figuur, vallen in de laagste sedimentklasse (<10 ng/L).

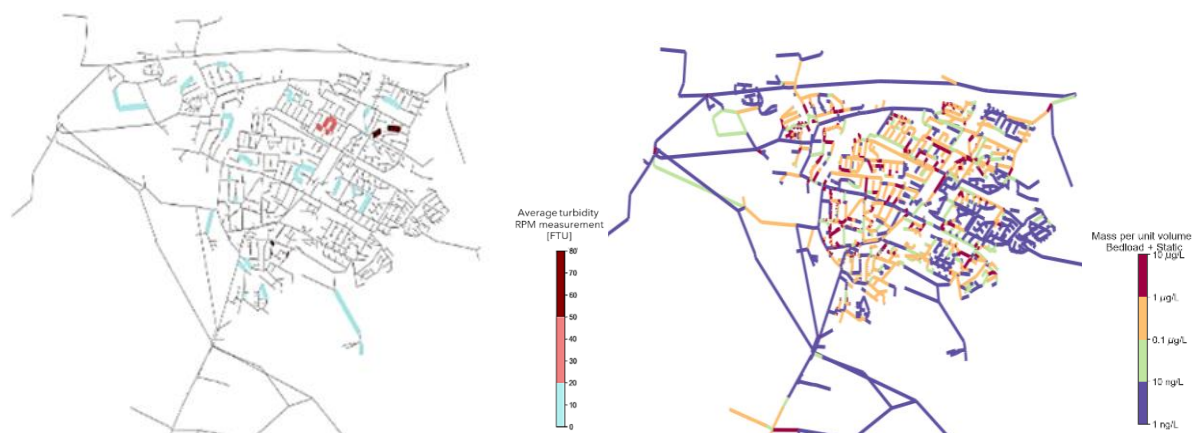


Figuur 21. Totale hoeveelheid berekend deeltjesmateriaal in het leidingnet van Castricum per transportmodus ("SUS"=materiaal in suspensie; "STAT"=statisch; "BED"=bedload transport).

4.3.4 Vergelijking met troebelheidsmetingen

PWN voert systematische troebelheidsmetingen uit volgens de opwervingspotentiemethode (OPM): een meetprotocol gericht op het meten van de aanwezigheid en mobiliteit van deeltjesmateriaal in leidingsegmenten met diameters in het bereik van 50-200 mm⁸ (Vreeburg e.a., 2005). Voor Castricum waren voor de periode 2011-2020 gegevens beschikbaar op 22 locaties. Figuur 22 toont een overzicht van de gemeten gemiddelde troebelheid. Om een zo goed mogelijk vergelijkbare verstoringsgeschiedenis te bereiken, zijn alleen troebelheidsmetingen gebruikt die drie jaar eerder een voorafgaande meting hadden op de dezelfde locatie. De gemiddelde troebelheid van de volgmeting is als maat voor de troebelheid genomen; er is dus niet uitgegaan van een verschil met de voorafgaande meting o.i.d.).

⁸ De OPM bestaat uit een gecontroleerde en reproduceerbare verhoging van 0,35 m/s bovenop de actuele snelheid op het moment van de meting. Deze hydraulische verstoring werd gecreëerd door een brandkraan te openen op een geïsoleerd leidingsegment om een eenrichtingspoeling tot stand te brengen. PWN hield de verstoring gedurende 15 minuten in stand en de troebelheid werd om de 3 minuten gecontroleerd, waarvan het gemiddelde in deze studie werd gebruikt



Figuur 22. (links) Gemiddelde troebelheid van drinkwater gemeten in Castricum (PWN) volgens de opwervingspotentiemethode (OPM); (rechts). Sedimentmassa's na 30 dagen (zelfde als Figuur 20, rechterpaneel).

De gemiddelde troebelheidswaarden zijn uitgezet tegen de berekende hoeveelheid sediment op de betreffende leidingsecties in Figuur 23. Locaties met een lage berekende sedimentconcentratie ($<0,1 \mu\text{g/L}$) vallen samen met lage gemeten troebelheidswaarden ($<10 \text{ FTU}$). Voor berekende concentraties hoger dan $0,1 \mu\text{g/L}$ is geen duidelijke relatie met gemeten troebelheidswaarden. Op basis van bovengenoemde vergelijking zijn echter geen conclusies verbonden aan de vergelijkende analyse. De redenen hiervoor zijn hieronder uiteengezet:

- *Hydraulische onzekerheden*

- Kleine werkzaamheden zijn door PWN gedocumenteerd, maar het beoordelen, interpreteren en modelleren vergt een inspanning die niet binnen de grenzen van dit project zou passen.
- In het model was de invloed van weekend- en feestdagen en seizoenen niet opgenomen. Deze zijn in principe te schatten uit de online gemeten volumestroom bij het pompstation, maar als eerste stap is gekozen voor een relatief simpele modelopzet.
- Stochastisch verbruik van huishoudens was niet opgenomen in het model. Stochastisch verbruik is te benaderen met het rekenpakket SIMDEUM.

- *Onzekerheden deeltjesmateriaal*

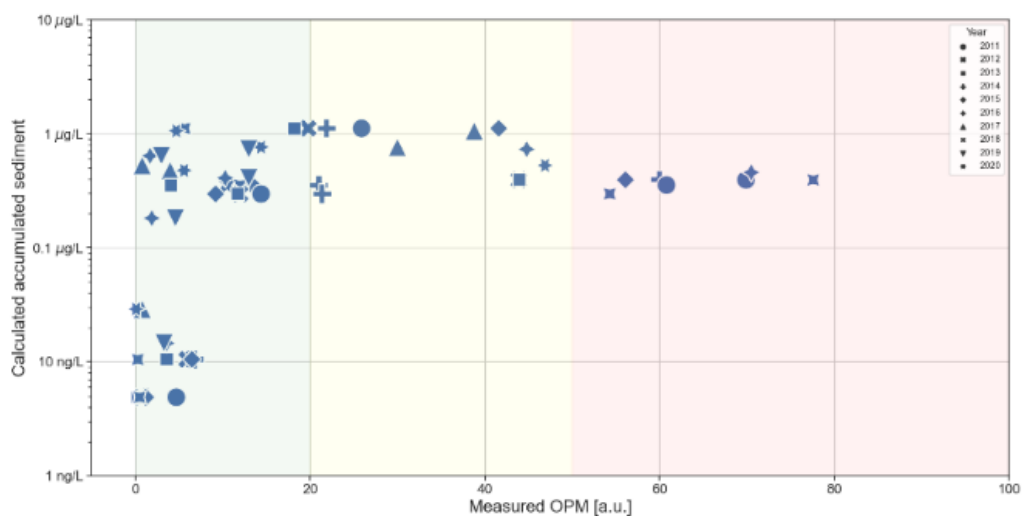
- De concentratie van deeltjesaanvoer is constant verondersteld, waar deze in werkelijkheid piekwaarden laat zien.
- Het sedimenttype is niet bepaald voor dit gebied en dit kan van invloed zijn op de hoeveelheid en de ruimtelijke verdeling van sedimenten in het gebied kan beïnvloeden (Sectie 4.2).
- De massa-troebelheidsrelatie onbekend, de beperkte simulatietijd van dertig dagen komt niet overeen met de periode tussen opeenvolgende OPM-metingen (drie jaar). Deze aspecten zijn in principe te omzeilen door naar massa-troebelheids*correlaties* te kijken, i.p.v. de absolute waarden te analyseren.

- *Zeggingskracht OPM-metingen*

- OPM metingen zijn indicatief voor de aanwezigheid *en* mobiliteit van aanwezig deeltjesmateriaal (Vreeburg, 2007), terwijl *Aquarellus* in principe alleen de aanwezigheid voorspelt en mobiliteit

veronderstelt. Materiaal kan onopgewerveld blijven tijdens een OPM-verstoring omdat (i) de schuifspanning niet volstaat om (zware en grove) deeltjes op te werfelen, of (ii) processen zoals cementatie of opname in biofilm de opwervelingspotentie verlagen. In principe is *Aquarellus* geschikt om het eerstgenoemde effect te simuleren: samengestelde sedimenten zijn met een multi-species berekening na te bootsen en de hydraulica van een OPM-verstoring is te modelleren. In respons op de OPM-verstoring zou dan alleen het makkelijk te mobiliseren sediment opwervelen. Het laatstgenoemde effect is echter niet te simuleren met *Aquarellus*; dit valt buiten de strekking van de huidige versie van het model.

- *Aantal locaties*. Het aantal OPM-metingen is beperkt en beslaat een periode van 10 jaar. Een betere dekking in een kortere periode is wenselijk.



Figuur 23. Gemeten troebelheid tijdens OPM-metingen uitgezet tegen de berekende hoeveelheid sediment (genormaliseerd met de leidinginhoud).

5 Onderzoek naar toepassing van Aquarellus

5.1 Inleiding

Met de opgedane ervaring in dit project is een scherper beeld ontstaan hoe *Aquarellus* kan bijdragen aan het ontwerp van schonere leidingnetten en effectieve schoonmaakprocedures. Hieraan bijgedragen heeft de dialoog met de projectgroepleden, o.a. tijdens de workshop op 15 mei 2022 en in de vorm van een schriftelijke reactie op vragen van KWR door PWN (Matthijs Rietveld, integraal opgenomen in Bijlage IV van dit rapport). De inzichten vormen de basis van onderstaande synthese.

5.2 Reflectie op de voorspellende kracht van Aquarellus

In dit onderzoek is *Aquarellus* opgeleverd als een geverifieerde en werkbare tool waarmee sedimentvorming in leidingnetten is te voorspellen. De tool geeft op leidingniveau inzicht in de gemodelleerde processen en op het niveau van leidingnetten van de vorming van sedimentpatronen. Hiermee zijn deelgebieden (wijken, buurten, gemeenten) te prioriteren o.b.v. de graad van deeltjesvervuiling. Het is echter nog onvoldoende duidelijk in hoeverre de voorspellingen overeenkomen met de werkelijkheid. Het valideren met praktijkgegevens is essentieel om vertrouwen te krijgen in de voorspellende kracht van *Aquarellus*.

Belemmerende factoren voor de voorspellende kracht (punt i hieronder) en de kwaliteit van validatie (punt ii en iii) zijn:

- (i) (bewuste) aannames in de beschrijving van de gemodelleerde processen, zoals bijvoorbeeld de afwezige invloed van chemische, microbiologische en turbulente processen op het deeltjestransport;
- (ii) onvolledige kennis van modelrandvoorwaarden, zoals de (historie van) hydraulische condities, deeltjeseigenschappen en correcte leidingnetgegevens;
- (iii) onvoldoende troebelheidsgegevens om berekeningen mee te valideren.

Voor geen van deze factoren is een simpele oplossing voorhanden. Wel is het mogelijk om in vervolgonderzoek stapsgewijs het inzicht in processen te verbeteren en de voorspellende kracht van de tool beter te beoordelen. Deze stappen worden hieronder nader toegelicht.

5.3 Validatie met praktijkgegevens

Om meer vertrouwen in de voorspellende kracht van *Aquarellus* te verkrijgen is verdere validatie met praktijkmetingen essentieel. De twee validatiestudies uitgevoerd in dit onderzoek (Hoofdstuk 4) leverden geen sluitende antwoorden op. Dit hing samen met een modelleer-technisch probleem (in het geval van Spijkenisse) en met de kwaliteit van de beschikbare metingen, zoals onvolledige informatie van het spuittraject en gemiddelde troebelheidswaarden (Spijkenisse) of een te beperkte dekking aan metingen (Castricum).

Om de voorspellende kracht van *Aquarellus* in de toekomst te beoordelen zijn verdere validatie-inspanningen nodig. Bij toenemend vertrouwen zal *Aquarellus* in de eerste plaats inzetbaar zijn als vervanging van een deel van OPM-metingen. Daarna kan gedacht worden aan het toepassen van *Aquarellus* als hulpmiddel bij het prioriteren

van spuigebieden⁹. Voor dat laatst moet de generaliseerbaarheid van *Aquarellus* tussen verschillende gebieden voldoende zijn aangetoond.

5.4 Invloed van modelonzekerheden

Toenemende ontwikkelingen op het gebied van digitalisering (digital twins, smart water networks, robotisering) vergroten de mogelijkheden om in real-time voor een volledig leidingnet de hydraulische condities te meten en documenteren. Leidingnetten volledig met volledig gedekte snelheidsmetingen zullen op korte termijn echter nog niet gangbaar zijn.

Een andere manier om om te gaan met de onvolledige informatie is door de invloed van hydraulische verstoringen in kaart te brengen met modelberekening. De volgende invloedfactoren zijn hierbij van belang: stochastische verbruiksvariaties en toekennen van verbruik aan individuele huishouden (i.p.v. geaggregeerd), week-/weekend-/feestdagen, seizoensinvloeden, de invloed van afsluitermanipulaties gerelateerd aan werkzaamheden of spuiacties.

5.5 Onderbouwen van modelaannames

Processen zijn complex, onderling verbonden en conditie-afhankelijk zoals besproken in Sectie 2.1. Inzicht in transportprocessen van deeltjesmateriaal in drinkwaterleidingen kan worden vergroot met metingen in gecontroleerde labomstandigheden of in-situ.

Gecontroleerde labexperimenten kunnen worden ingericht voor een betere bepaling van:

- *Bezinksnelheid*. In de wetenschappelijke gemeenschap is geen consensus over of deeltjes alleen bezinken beneden het criterium voor resuspensie (zoals gemodelleerd in *Aquarellus*) of beneden een lagere grenswaarde in de buurt van de overgang van statische naar bedload-condities.
- *Bedload-transport*.
 - o Er zijn aanwijzingen dat onder bedload-condities de concentratieverdeling niet constant is (zoals aangenomen in *Aquarellus*) maar afhankelijk van de hoogte en de deeltjeseigenschappen. Dit heeft invloed op de sedimentpatronen die onder bedload-condities ontstaat (meer bezinking dichtbij de deeltjesbron).
 - o De bedload-snelheid neemt lineair toe met de schuifspanning in *Aquarellus*. Deze relatie is niet goed bepaald voor ronde drinkwaterleidingen op druk, maar heeft wel invloed op de sedimentpatronen.
- De invloed van bochten, afsluiters, appendages, zinkers op deeltjestransport is niet goed bekend.

Om bovenstaande invloedfactoren te onderzoeken is een gecontroleerde lab-omgeving nodig. Hiervoor zou het meest geschikt zijn een meetopstelling zonder recirculatie in een simpele rechte leiding met controle over de hydraulische condities en deeltjesaanvoer.

⁹ Het kan ook tegelijkertijd .Toepassing voor prioritering van spuiacties is waarschijnlijk al erg leerzaam, het is echter nog onduidelijk of de uitkomsten van *Aquarellus* de prioritering verbeteren ten opzichte van de huidige benadering voor prioritering.

6 Conclusies en aanbevelingen

6.1 Conclusies

De belangrijkste bevindingen van het onderzoek zijn hieronder samengevat.

In dit project is een numerieke tool, *Aquarellus* (Versie 2.0), ontwikkeld voor het voorspellen van sedimenten in leidingnetten. De nieuwe versie voldoet aan vooraf door eindgebruikers gestelde eisen m.b.t. rekenprestaties (rekensnelheid en geheugenruimte) en gebruiksgemak (onderzoeksdoel 1, Sectie 1.3). Massa's van deeltjesmateriaal berekend in een klein leidingnetmodel hebben een onnauwkeurigheid van 0,04 % tot 0,6 % ten opzichte van analytische berekende waarden, met de hoogste instelbare numerieke resolutie (timestepwaarden $\Delta t_{clm} = \Delta t_{inj} = \Delta t_{tpt} = 1$ en schaalfactor voor deeltjesaggregatie $N = 1000$). Daarmee rekent de huidige versie even nauwkeurig (maar veel sneller) dan het prototype van *Aquarellus* (versie 1). Met een aantal convergentietests is aangetoond hoe de resultaten convergeren naar de analytische uitkomst bij verfijning van de numerieke resolutie.

Op basis van labexperimenten (bezinking in bekersglas, deeltjestelling, bepaling van drooggewicht, doorstromingsproef) zijn deeltjeseigenschappen gekarakteriseerd in drinkwatermonsters genomen tijdens verstoringproeven op negen locaties in distributiegebieden van drie bedrijven (De Watergroep, Evides, Vitens). Dit geeft een beeld van de variatie aan invoerparameters waarmee rekening moet worden gehouden in berekeningen met *Aquarellus* (onderzoeksdoel 2, Sectie 1.3).

Berekeningen voor het leidingnetmodel van Castricum laten zien hoe *Aquarellus* kan worden ingezet voor sedimentvoorspellingen. De uitkomsten laten na ongeveer een week modelleertijd een quasi-stationair gedrag zien: berekende totale massa's vertonen een dagelijkse variatie die samenhangt met het verbruikspatroon in het gebied, maar de meerdaagse gemiddeldes convergeren naar een constante waarde (voor materiaal in suspensie en bedload) of nemen lineair in de tijd toen (stilstaand sediment). Dit suggereert dat de modelresultaten zijn te extrapoleren naar langere tijd (voor dit specifieke geval met een top-down verbruikspatroon dat zich elke 24 uur herhaalt).

Het is in dit onderzoek onvoldoende gelukt om de modellen te valideren met praktijkmetingen voor Spijkenisse (Evides) en Castricum (PWN) (onderzoeksdoel 3, Sectie 1.3). Voor het Spijkenisse onderzoeksgebied waren modelleerresultaten niet te analyseren vanwege een technische probleem in een tussenversie van de tool. Afgezien hiervan werd de validatie bemoeilijkt omdat (i) het spuittraject niet bekend was maar alleen de brandkraanlocaties en (ii) alleen de maximale troebelheid bekend was, welke geen volledig beeld geeft van de deeltjesvervuiling op het spuittraject. De validatie van Castricum werd bemoeilijkt door onzekerheden in hydraulica (samenhangend met kleine verstoringen of afwijkingen van het gemodelleerde verbruik), onzekerheden in de hoeveelheid aangevoerd deeltjesmateriaal en een beperkt aantal OPM-metingen.

6.2 Aanbevelingen voor toepassing

Aquarellus is in dit project geschikt gemaakt voor het voorspellen van sedimenten in leidingnetten. Als belangrijkste vervolgstap wordt aanbevolen om ermee aan de slag te gaan, d.w.z. om *Aquarellus* toe te passen op werkelijke distributiegebieden en in te zetten als hulpmiddel bij het prioriteren van meetlocaties en spuigebieden. Het ligt voor de hand om de waterbedrijven hierin een centrale rol spelen. (Hiermee wordt voortgebouwd op het onderzoek naar toepassing; onderzoeksdoel 4, Sectie 1.3.) Daarbij kan worden vertrouwd op de consistentie van de uitkomsten binnen de gestelde modelaannames, maar het is goed om de uitkomsten kritisch te blijven bekijken en alle ervaringen te delen met KWR, zodat er zo snel mogelijk een gedeeld beeld ontstaat van de praktische

toepasbaarheid en eventuele verbeterpunten van *Aquarellus*. Wellicht heeft dit invloed op het cosmetisch verbeteren van *Aquarellus* (Sectie 6.3.2) of de noodzaak voor empirische onderbouwing van deeltjestransportprocessen (Sectie 6.3.4).

6.3 Aanbevelingen voor vervolgonderzoek

6.3.1 Validatie met praktijkmetingen

Pas bij voldoende vertrouwen in de uitkomsten, is *Aquarellus* in te zetten als hulpmiddel bij het prioriteren van meetlocaties en spuigebieden of optimalisatie van leidingnetontwerpen geoptimaliseerd voor een zelfreinigende capaciteit. Om de voorspellende kracht van *Aquarellus* beter te beoordelen is het nodig de berekende deeltjesvervuiling te valideren met (toekomstige of historische) troebelheidsmetingen. Hierbij moet ook een representatief hydraulisch model en bruikbare kennis van de hydraulische historie en de deeltjesbronnen beschikbaar zijn. Het validatiemateriaal bestaat bij voorkeur uit troebelheidsmetingen uitgevoerd tijdens spuiacties of in-situ (bijvoorbeeld met steeklansen). Deze aanbeveling sluit aan bij de aanbeveling voor toepassing (Sectie 6.2) en wordt het belangrijkste bevonden van de vier aanbevelingen voor vervolgonderzoek (benoemd in Sectie 6.3).

6.3.2 Cosmetische verbeteringen van gebruikerstool

Tijdens het project zijn in overleg met de projectgroepleden een aantal toekomstige verbeteringen aan *Aquarellus* voorgesteld. Deze verbeteringen zijn cosmetisch van aard en dragen bij aan het gebruiksgemak van de tool (samenvattend uit Sectie 2.5):

- dynamische kleurenschaal sedimentatiekaarten;
- zichtbaar maken van leiding- en sedimentinformatie op de leidingnetkaarten bij selectie van individuele leidingen;
- mogelijkheid om deeltjestypen te selecteren op de sedimentatie-leidingnetkaart (voor multi-species berekeningen);
- animatie-mogelijkheid voor tijdsafhankelijke sedimentatiepatronen;
- toevoegen van kartografische informatie als achtergrond bij de leidingnetkaarten;
- automatisch aanpassen van het aantal deeltjes per injectietijdstap (M) aan de volumestroom op de bronknoop.

6.3.3 Bepalen van gevoeligheid voor variaties in hydraulica en deeltjesbronnen

De randvoorwaarden voor berekeningen met *Aquarellus* bestaan uit de (historie van) hydraulische omstandigheden en informatie van deeltjesbronnen (locaties, concentratiepatronen en deeltjeseigenschappen). Correcte, op metingen gebaseerde randvoorwaarden dragen bij aan de kwaliteit van de voorspellingen, maar de informatie is i.h.a. verre van compleet. Het wordt aanbevolen om de invloed van de volgende hydraulische factoren in kaart te brengen met een gevoeligheidsanalyse (Sectie 5.4):

- stochastische verbruiksvariaties;
- verbruik van individuele huishoudens (i.p.v. geaggregeerd verbruik);
- variaties als gevolg van week-/weekend-/feestdagen en seizoensinvloeden;

- de invloed van afsluitermutaties gerelateerd aan bijvoorbeeld operationele schakelingen, onderhoud of spuiacties.

Afhankelijk van de hiaten in de beschikbare informatie wordt ook aanbevolen een gevoeligheidsanalyse uit te voeren op relevante factoren m.b.t. de deeltjesbron, zoals de variaties in eigenschappen en concentraties van het deeltjesmateriaal.

6.3.4 Empirische onderbouwing van fysische processen

Aquarellus is gebaseerd op empirisch onderbouwde fysische wetten. Om de onderbouwing te versterken wordt aanbevolen om met een proefopstelling onder gecontroleerde omstandigheden experimenten uit te voeren gericht op (samengevat uit Sectie 5.3):

- bepalen van de bezinksnelheid als functie van de schuifspanning;
- bepalen van de bedload-snelheid en hoogteafhankelijke deeltjesverdeling in het bedload-transportregime;
- de invloed van bochten, afsluiters, appendages, zinkers op deeltjestransport.

Hierbij wordt gedacht aan een meetopstelling met een simpele leidingconfiguratie zonder recirculatie en met controle over de hydraulische condities en deeltjesaanvoer.

7 Literatuur

Blokker, E. J. M. (2017). *Modelling growth in the distribution network*. BTO 2017.077, KWR Water Research Institute, Nieuwegein.

Blokker, E. J. M., Schaap, P. G. (2011). *Het modelleren van deeltjes in het leidingnet*. BTO 2011.047, KWR Water Research Institute, Nieuwegein.

Boxall, J. B., Saul, A. J., Gunstead, J. D. & Dewis, N. (2001). *A Novel approach to modelling sediment movement in distribution mains based on particle characteristics*. Water Software Systems, Ch. 1: Theory and Applications, ed. By: Ulanicki, B., Coulbeck, B., Race, J.P., Hertfordshire, UK, 2001.

Holliday, C. P., Rasmussen, T. C. & Miler, W. P. (2003) *Establishing the relationship between turbidity and total suspended sediment concentration*. N: Georgia Water Resources Conference (ed: K. J. Hatcher). University of Georgia, Athens, GA, U.S.A., 2003.

Meerkerk, M., (2009). *De levensduur van in watermeters geïntegreerde keerkleppen – De bevindingen van een literatuurevaluatie*. KWR 09.038, KWR Watercycle Research Institute.

Ryan, G., Mathes, P., Haylock, G., Jayarathne, A., Wu, J., Noui-Mehidi, N., Grainger, C. & Nguyen, B. V. (2008). *Particles in water distribution systems*. Report no. 33. The Cooperative Research Centre for Water Quality and Treatment, 2008.

Van Summeren, J. (2022). *Gebruikershandleiding Aquarellus*. BTO 2022.201(s), KWR Water Research Institute, Nieuwegein.

Van Summeren, J., Albert, M., Schaap, P., De Kater, H. (2017). *Naar een vervuilingsvoorspellingstool*. BTO 2017.031. KWR Watercycle Research Institute, Nieuwegein.

Van Summeren, J. & Morley, M. (2019). *Ontwikkeling, validatie en onderbouwing van vervuilingsvoorspellingstool Aquarellus*. BTO 2019.211(s). KWR Watercycle Research, Nieuwegein.

Van Thienen, P., Vreeburg, J. H. G., Blokker, E. J. M. (2011). *Radial transport processes as a precursor to particle deposition in drinking water distribution systems*. Water Research 45, pp. 1807-1817.

Vreeburg, J., (2007). *Discolouration in drinking water systems: a particular approach*. Ph.D. Thesis, Delft University of Technology.

Vreeburg, J., Schaap, P., and Van Dijk, J. (2005). *Measuring discoloration risk: resuspension potential method*, in M. van Loosdrecht & J. Clement (Eds.), *2nd IWA Leading-Edge Conference on Water and Wastewater Treatment Technologies*, Praag, Tsjechische Republiek. 2005, pp. 123-132.

I Aanbeveling go/no-go

Van Joost van Summeren (KWR)	Onderwerp Aanbeveling go/no-go BTO Toepasbaar maken Aquarellus	Datum 12 juni 2020
Bestemd voor Leden van de Themagroep Distributie	Kopie / afschrift Mark Morley, Mirjam Blokker, Nellie Slaats (KWR)	Pagina 1/13

1. Doel en achtergrond

In het BTO-project “Toepasbaar maken van Aquarellus” is een go/no-go moment gedefinieerd. De Themagroep Distributie beslist over de go/no-go op basis van behaalde verbeteringen in rekensnelheid van Aquarellus; de eisen voor verbetering zijn vastgelegd in het projectplan. Pas na een positieve go/no-go zullen de vervolgactiviteiten worden uitgevoerd: het gebruiksvriendelijker maken van de gebruikersinterface, validatie van de rekenresultaten met meetgegevens en onderzoek naar de toepassingsmogelijkheden.

KWR heeft op 17 mei 2020 versie 2 van Aquarellus aan de projectgroepleden beschikbaar gesteld. Zij hebben Aquarellus versie 2 getest en schriftelijk feedback aan KWR gestuurd (Brabant Water, Waternet, PWN, De Watergroep, Evides, en Dunea). Op basis van deze feedback geeft KWR in dit memo een aanbeveling aan de Themagroep Distributie over de go/no-go beslissing (Sectie 2). De aanbeveling is gemotiveerd met reacties van KWR (rode tekst in Bijlage A) op de feedback van de projectgroepleden (tekst in blauw en zwart in Bijlage A).

De technische eisen zoals geformuleerd in het projectplan zijn aangehaald in Tabel 1. Oorspronkelijk werden twee varianten voorzien (Laptop variant en server-variant), maar gaandeweg werd duidelijk dat één enkele tool aan beide eisen kon voldoen. Deze ene tool is onderworpen aan de eisen voor beide varianten.

De belangrijkste aanpassingen aan Aquarellus die tot een verbetering van de prestaties hebben geleid zijn: parallelisatie voor berekeningen op meerdere rekenkernen, aangepaste sedimenttransportberekening met een dynamisch geheugen.

Tabel 1. Prestatie-eisen van Aquarellus zoals geformuleerd in het projectplan.

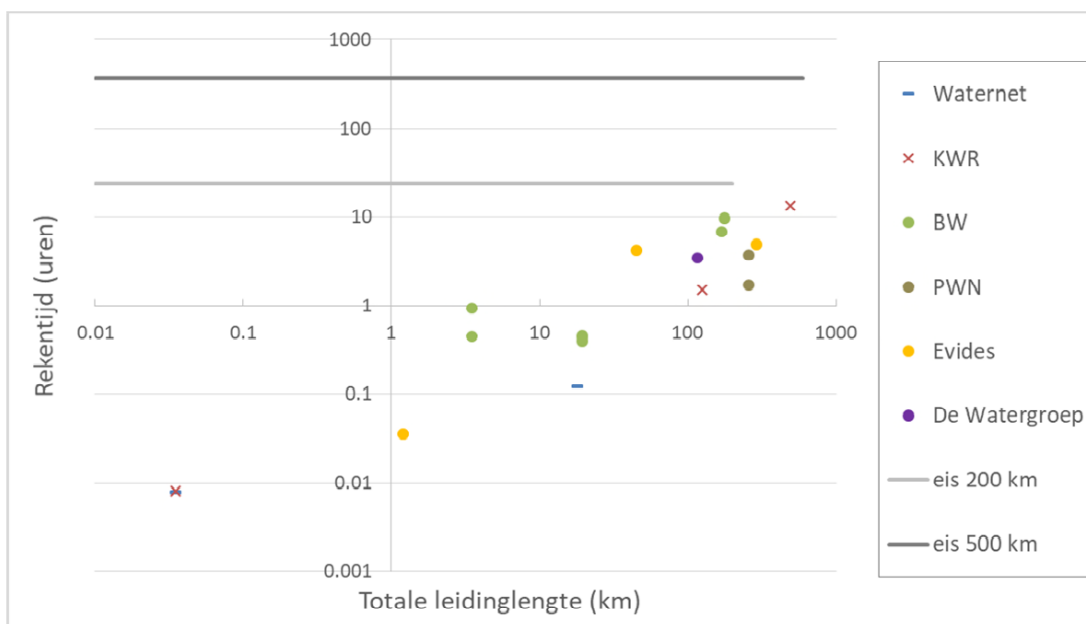
Variant	Prestatie			Frequentie inzet	Rekenvoorziening
	Totale leiding-lengte	Simulatie-periode (minimaal mogelijk)	Rekensnelheid (simulatieperiode : rekestijd)		
Laptop	200 km	1 maand	1 maand : 1 dag	Op elk moment	Laptop quadcore (i7, 16 GB)
High performance	500 km	1 maand ¹	2 dagen : 1 dag	1 x per 1-5 jaar	Multi-processor rekenserver

¹ Langere simulatieperiodes (tot 6 maanden) moeten mogelijk worden (om het lange-termijn transport van bed load transport te bepalen, maar tegen een langere rekestijd).

2. Aanbeveling van KWR aan de Themagroep: GO

KWR beveelt een GO aan voor voortzetting van het project. Deze positieve aanbeveling wordt gedaan op basis van de feedback van 6 projectgroepleden (Brabant Water, Waternet, PWN, De Watergroep, Evides, en Dunea) en bevindingen van KWR. Drie bedrijven hebben zich expliciet uitgelaten over de go/no-go (Waternet, PWN, Dunea). In alle gevallen gaat het om een GO. De hoofdpunten waarop KWR de positieve aanbeveling baseert zijn:

1. De door KWR en de 6 PG-leden berekende **rekentijden** vallen binnen de gestelde prestatie-eisen voor de rekentijd. Zie Figuur 1 voor een overzicht. Zoals verwacht is de totale leidinglengte de belangrijkste factor. Daarnaast neemt de rekentijd toe met de sedimentbelasting in het leidingnet. De meeste berekeningen zijn uitgevoerd met een erg hoge sedimentbelasting; de gepresenteerde rekentijden worden daarom niet als te conservatief beschouwd.
2. Een **geheugenruimte** van 16 GB is voldoende om leidingnetten tot 200 km door te rekenen. Dit is een eis voor de laptop-variant (naast de rekentijd).
3. Een aantal PG-leden plaatsten kanttekeningen bij hoge berekende **sedimentmassa's**. Deze zijn echter verklaarbaar en te herleiden tot (i) een fout in de grafische interface (kg i.p.v. g); hierdoor lijken de massa's 1000 maal hoger dan in werkelijkheid en/of (ii) een hoge bronterm (inkomend deeltjesmateriaal bij het leverpunt) en lage stroomsnelheid waardoor er veel deeltjesmateriaal ophoopt in de leidingen.
4. Een aantal PG-leden merkt op dat de uitkomsten van Aquarellus nog niet zijn **gevalideerd** voor leidingnetten van relevante lengte (tot 100-en kilometers). Dit is een terecht punt, maar geen onderdeel van de go/no-go: in de projectopzet is besloten eerst de rekentijden te verbeteren en daarna (in projectactiviteit 3) metingen uit een pilotgebied te gebruiken om Aquarellus te valideren. Met de door KWR uitgevoerde benchmarkberekeningen is wel aangetoond dat het massatransport met een kleine onnauwkeurigheid wordt berekend (1 tot 6%, afhankelijk van de ingestelde resolutie).
5. Als wordt afgeweken van de **tijdstap** van 1 uur, worden sedimentpatronen niet correct ingelezen. Het betreft hier een probleem in de boekhouding in de code, maar geen essentiële fout in de berekening van het massatransport. Dit probleem zal worden opgelost in het vervolg van activiteit 1.
6. Andere **aandachtspunten** betreffen aanpassingen die volgens de projectplanning voorzien waren in het vervolg van activiteit 1, na de go/no-go. Deze zijn opgenomen in Tabel 2. Dit is nuttige feedback voor de vervolgstapen van het project.



Figuur 1. Rekestijden van Aquarellus voor modellen van verschillende leidinglengte.

Tabel 2. Door PG-leden genoemde aandachtspunten, ingepland in vervolgvactiteiten.

Onderdeel	Actie	Gepland in projectactiviteit
Aquarellus tool	Herstellen van juiste eenheid (g i.p.v kg) in tabelwaarden in "Sedimentation > Links")	1b (na go/no-go)
	Consistent gebruik van de term "bed load" transport (en niet "base load")	1b (na go/no-go)
	Verbeteren grafische interface, inclusief visualisatie van resultaten met netwerkkaarten, en leiding-ID's (in tabblad 'Network'.	1d, 1e (na go/no-go)
	Herstellen van mogelijkheid tot exporteren van tussen- en eindresultaten.	1c (na go/no-go)
	Vrij kiezen van instellingen door gebruiker, zoals de simulatieperiode, deeltjesgrootte en -massadichtheid.	1b (na go/no-go)
	KWR zal nagaan of de invoerpatronen van bronnen intuïtiever kunnen worden gemaakt.	1b (na go/no-go)
Handleiding	Correcte beschrijving minimum clumping resolutie.	1g (na go/no-go)
	Uitgebreider beschrijving van EPANET instellingen	1g (na go/no-go)
Validatie	Valideren van uitkomsten met troebelheidsmetingen uit pilotgebied	3

BIJLAGE A. Feedback bedrijven en reactie KWR

A1. Inleiding

Tekst in zwart in Sectie A2 t./m A7 is van de projectgroepleden; reacties van KWR zijn in rood weergegeven. Uit ruimte-overweging zijn alleen de kernpunten van de reacties van Brabant Water opgenomen. De overige reacties zijn volledig.

A2. Brabant Water

1. **De sediment-balans klopt niet bij alle nagenoeg benchmark-varianten.** Ik heb hiervoor de aanvoer van sediment op knoop Z vergeleken met het totaal aan sediment in het netwerk na 31 dagen simulatie. De aanvoer bedraagt volgens de toelichting 31 dagen maal 24 uur maal 43,9 g/h (sediment)deeltjes. Dat komt overeen met een totale aanvoer van 32,7 kg. De modelresultaten geven een totale sediment last variërend van 2 tot 30343 kg (zie tabblad 'simulaties'; kolom P). Wat is hier aan de hand? Is de eenheid van de resultaat tabel van Aquarellus2 onjuist? Moet dit wellicht 30343 g zijn? Indien gedeeld door 1000 bedraagt de fractie sediment/toevoer tussen de 0 en 93 % voor de doorgerekende varianten.

In de huidige versie wordt in tabblad "Sedimentation > Links" de deeltjesmateriaalmassa's in kg weergegeven waar dat g (gram) moet zijn. Dit is een fout in de weergave, geen fout in de berekening. Herstel is triviaal en zal gebeuren in vervolgvactiteiten 1b-g van het projectplan.

Als hiervoor wordt gecorrigeerd, dan is de massabalans kloppend. Dit is nagegaan voor model waarin al het deeltjesmateriaal in de eerste leiding bezinkt. De totale massa met een onnauwkeurigheid van 1×10^{-5} wordt berekend. De afwijking in de resultaten van Brabant Water (93% totale massa in plaats van de verwachte 100%) is het gevolg van een fout in de code die inmiddels is hersteld (de massatotalen in de grafische interface werden op de verkeerde momenten getoond).

2. **Wijziging van het pattern van de sediment_inflow geeft foutieve resultaten.** Zie benchmark 1 t./m 1d in het tabblad 'simulaties'. In Benchmark01a is de sediment_inflow per kwartier toegediend; dus 96 intervallen per dag. Dit geeft een 39 % lagere sediment-last terwijl verwacht mag worden dat dit geen invloed heeft. Wijziging van de overige rekenintervallen naar 0:15 geeft geen ander resultaat, dus geen verbetering.

In versie 2 van Aquarellus resulteert een tijdstap van 15 minuten in een fout in de berekening. De sediment-aanvoer wordt dan alleen het eerste kwartier van elk uur aangevoerd, gevolgd door 3 kwartier zonder aanvoer. Dit veroorzaakt een blok-patroon in de aanvoer van deeltjes in suspensie en verklaart de lagere sedimentlast. Het betreft hier een fout in de boekhouding van Aquarellus, niet in de fundamentele berekening van deeltjestransport. Dit zal in de vervolgvactiteiten worden hersteld.

3. **Wijziging van de 'duration' geeft ook een fout resultaat.** Vergelijk benchmark 1 en 1d in het tabblad 'simulaties'. Sim 1d geeft een 49% lagere sediment-last. In de software toelichting staat dat sowieso voor 31 dagen wordt doorgerekend.

Dit komt omdat het patroon voor sediment-aanvoer niet is aangepast aan de langere simulatieperiode. Op deze manier wordt afwisselend 1 dag water met en zonder sediment aangevoerd. Dit verklaart de ruwweg gehalveerde sedimentlast (49%). KWR is nagegaan dat, na uitbreiding van het patroon, de massa's vergelijkbaar zijn met het model met een Duration van 24 uur ($M_{SUS} = 7 \text{ g (48 u)}$) vs. 7 g (24 u) ; $M_{STATIC} = 118 \text{ g (48 u)}$ vs. 116 g (24 u)).

4. **Wijziging van de leidinglengte van het originele benchmark-model (benchmark 2a t/m 2d t.o.v. 1) geeft een te hoge sediment-last.** Deze fout hangt mogelijk samen met conclusie 1. Als de eenheid in de uitvoertabel een factor 1000 lager moet zijn, dus g i.p.v. kg, dan zou het kunnen kloppen.
Dit is inderdaad geheel toe te schrijven aan de fout in weergave van de uitvoerwaarden (kg i.p.v. g, zie punt 1).
5. **Wijziging van de demand-multiplier van het originele benchmark-model (benchmark 3a t/m 3d t.o.v. 1) geeft voor lager verbruik een te hoge sediment-last.** Dezelfde opmerking als bij conclusie 1 en 4. Bij eenheid g i.p.v. kg zouden de resultaten 3a t/m 3d wel kunnen kloppen.
Model Benchmark3a geeft echter als resultaat voor leiding ZA een totale sedimentlast van 30343 kg; zie tabblad 3a; cel I11. Delen door 1000 geeft voor dat leidingdeel een sedimentconcentratie van 21 kg per m³ inhoud van de buis; zie tabblad 3a; cel K11. Is dat reëel? Dat is namelijk ongeveer 4 kg sediment per meter buis van 600 mm diameter.
De eerder uitgevoerde benchmark-berekeningen en de massa-balansberekening (zie punt 1) tonen aan dat het sedimenttransport in Aquarellus consistent wordt berekend. De sedimentmassa's hangen op een consistente manier af van de toegekende bronmassa's en de fractie die bezinkt.

De berekende hoge sedimentmassa's (na de genoemde correctie) hangen samen met de modelopzet:

- (i) Hoge inkomende deeltjesmassa. Deze is omgerekend ruim 1 mg/L. Uitgaande van schattingen o.b.v. OPM-metingen in PWN-gebied (Blokker & Schaap, BTO 2011.047) is een troebelheid van ruwweg 1 FTU te verwachten. Voor uitgaand rein water is de troebelheid in het algemeen vele malen lager.
 - (ii) Lage stroomsnelheid (4 cm/s in de 600 mm leiding). Onder deze condities treedt continu bezinking op en geen verplaatsing door opwerveling of bed load transport. Hierdoor ontstaat een snelle ophoping van sediment in dit scenario.
6. **De rekentijd van de benchmark-modellen wordt nagenoeg volledig bepaald door de totale hoeveelheid berekende base load in het netwerk.** Zie de tabbladen met grafiek (g_rekent_base_bench) in de spreadsheet.
Dit is inderdaad een logisch verband: hoe meer leidingdelen immobiel of bed load materiaal bevatten, hoe hoger het aantal berekeningen per tijdstap. De rekentijd neemt is i.h.a. korter aan het begin van de simulatie, maar de simulatieperiode van 31 dagen is lang genoeg om voorbij deze "snelle start"-effecten te gaan. Verder bevatten deze scenario's erg grote sedimentmassa's (zie punt 5, hierboven); met kleinere massa's zijn snellere rekestijden te verwachten, zoals de berekeningen van Brabant Water suggereren.
7. **De rekentijd voor grotere modellen (20 tot 200 km leidinglengte; respectievelijk 600 tot 5500 leidingdelen) geeft voor de simduur van 31 dagen zowel een lineair als exponentieel verband met de totale leidinglengte van het netwerk.** Zie tabblad g_rekent_lengte. Ik heb te weinig testen voor het vaststellen van het juiste verband. Ik heb verder de indruk dat de rekentijd van de volgende 31 dagen flink kan oplopen omdat ik tijdens de berekening zie dat het verwachte eindtijdstip van de berekening steeds opschuift naar later.

Een verklaring voor toenemende rekestijden met toenemende simulatieduur is de toename van sediment in het leidingnet (zie punt 6 hierboven).

Uit alle reacties van de projectgroep-leden ontstaat echter een consistent beeld:

- o Modellen tot 200 km totale leidinglengte worden binnen de gestelde eis voor de laptopvariant berekend.

- o Modellen met een lengte tot 500 km voldoen aan de snelheidseisen voor de server-variant (zie Figuur 1). De berekeningen zijn bovendien uit te voeren op een reguliere laptop (8 GB RAM, 8 processoren) en voldoen ook aan de eisen van de laptop-variant (geen eis).

8. **De totaal base load is voor de rekenmodellen waalwijk1#2 en waalwijk7#1 bij drie leidingen uitzonderlijk hoog.** De maximumwaarde bedraagt 103 kg base load per m leiding (diam 152 mm) in model 7#1. Klopt dit? Zie de kolommen L van tabbladen 1#2 en 7#1 en de grafiek g_base_lengte.

Vanwege de fout in het loggen (kg i.p.v. g) lijken de waarden 1000 maal hoger dan in werkelijkheid (zie punt 1). Daarnaast is de gemodelleerde inkomende massa waarschijnlijk vele malen hoger dan voor typisch rein water (zie punt 5). Onder de gemodelleerde omstandigheden zijn de waarden niet onrealistisch.

Aanbeveling voor de go/no-go:

1. Check de eenheden van de uitvoertabel. Suggestie gram i.p.v. kg sediment? **Gedaan, dit is een triviale fout in gelogde eenheden, zal worden hersteld.**
2. Check de invoer van sediment met andere intervallen.
3. Check de invloed van de duration op het rekenresultaat. **Gedaan, geen probleem (zie punt 3).**
4. Check de base load berekening. Soms uitzonderlijke hoge waarden per m buis. **Verklaarbaar met modelopzet.**
5. Betere visuele uitvoer. Ik kan nu geen goed beeld krijgen van de hotspots. Een omslachtige mogelijkheid is natuurlijk om de rekenresultaten weer in te laden in een hydraulisch rekenpakket en deze te laten weergeven.
Dit is onderdeel van het vervolg van activiteit 1.
6. De mogelijkheid om bijvoorbeeld een weekpatroon voor verbruik in te voeren. Dit geeft een krachtige verbetering van de dynamische stroomsnelheden en het gedrag van het sediment.
Dit is in de huidige versie al mogelijk.
7. Probeer de lengte van de verwachte rekestijd in te schatten aan de hand van de testresultaten van ook andere bedrijven. Welke modelparameters spelen een rol? Nu lijken total baseload en vooral lengte een rol te spelen. Welke invloed heeft bijvoorbeeld de simduur, nu vast op 31 dagen, op de rekestijd?

Zie figuur 1. Leidend is de totale leidinglengte. De hoeveelheid sediment in het leidingnet is significant maar secundair. De invloed van de hoeveelheid sediment is ook een plausibele verklaring voor de schijnbare invloed van de simulatieduur.

A3. Waternet

Bevindingen Aquarellus versie 2

Ralf de Groot Waternet:

Toelichting op bevindingen:

In de handleiding is de aanbevolen Sediment "clumping" resolution 0s. Echter de kleinste waarde die men kan selecteren is 1s.

Dit is inderdaad een fout in de gebruiksaanwijzing. Deze zal worden hersteld in de beoogde handleiding van Aquarellus.

In de gebruikshandleiding heeft men het over bedload en in de tool over baseload, dit is hetzelfde. Is het niet handiger om 1 benaming aan te houden?

Mee eens, na de go/no-go zullen we consistent "Bed load" gebruiken.

Het blijft onoverzichtelijk waar welke leiding zich bevindt zonder het model in Epanet te openen. Het is niet een, twee, drie te achterhalen waar nou de leidingen bevinden met het meeste sediment ophoping. Het tabblad network heeft nu nog niet echt een toegevoegde waarde.

Dat klopt. In deze fase van het project is de aandacht hieraan bewust beperkt. Dit zal worden verbeterd in de vervolgactiviteiten.

De performance is goed maar er zijn nog wel wat vraagtekens bij de uitkomsten van de berekeningsresultaten. Bij het Diemen Noord (DMN) model is er totaal 18 kg aan static sediment mass na 31 dagen, is dit realistisch? Tevens varieert deze in sommige leidingen gedurende de 31 dagen en aan het eind is deze 0 kg.

De hoge sedimentmassa werd ook door Brabant Water genoemd (Sectie 3.2, punten 1, 4 en 8). Hier wordt volstaan met een korte toelichting. De hoge sedimentmassa heeft is te verwachten vanwege:

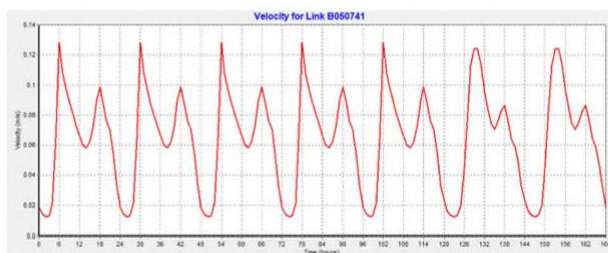
- het foutief weergegeven van sedimentmassa's in kg i.p.v. g in het tabblad "Sedimentation > Links"; hierdoor lijken de massa's 1000 maal groter dan berekend;
- de hoge concentratie deeltjesmateriaal die het leidingnet instroomt (concentratie van omgerekend ruwweg 2 mg/L). In de praktijk zal water dat het pompstation verlaat meestal een lagere concentratie hebben.

De genoemde variatie van sedimentmassa (zie de figuur van Waternet hieronder) is te verklaren als zelfreinigende effect: afwisseld vindt opbouw en opwerveling van sediment plaats bij lage, respectievelijk hoge stroomsnelheden (zie ook de stroomsnelheden in deze leiding in de figuur daaronder, figuur KWR).

Aanbeveling voor de go/no-go: GO

Tabel met rekenuitkomsten:

	<Naam run 1>	<Naam run 2>
Type processor	Intel(R) Core(TM) i5-8265U CPU @ 1.60GHz 1.80GHz	idem
Aantal gebruikte rekenkernen	8	8
RAM geheugenruimte	16 GB (15,7 GB beschikbaar)	idem
Naam EPANET-model	Benchmark.inp	Dmn_week.inp
Totale leidinglengte	35 m	17951 m
Simulatieperiode	31 dagen	31 dagen
Frequency of injection en Frequency of transport (zelfde waarde)	60	60
Rekentijd	28 seconde	7 m 14s
Opmerkingen		Moest eerst Aquarellus afsluiten en opnieuw opstarten om nieuw model te laden. De static load fluctueert gedurende de 31 dagen, hoe kan dat?



2.1 PWN

Bevindingen Aquarellus versie 2

George Mesman, Martin Klein Artman PWNf:

Toelichting op bevindingen:

De EPANET model vereisten kort beschrijven

Het rekenstapprobleemp/c moet worden aangepast

Het gaat hier om hetzelfde punt als genoemd in de reactie van Brabant Water – punt 2. De lezer wordt daar naartoe verwezen.

Grafische deel moet worden verbeterd

Dit zal worden uitgevoerd in het onderdeel van activiteit 1 dat na de go/no-go is gepland.

Bij positieve beoordeling en validatie van de rekenresultaten vind ik de rekestijden acceptabel

Validatie is gepland in activiteit 3 van het project.

Aanbeveling voor de go/no go:

Wat mij (George) aangaat is het een go.

Tabel met rekenuitkomsten:

	<Naam run 1>	<Naam run 2>	...	
Type processor	Intel(R) Core(TM)i7-3610 QM CPU@2,3GHz	Intel(R) Core(TM)i7-3610 QM CPU@2,3GHz		
Aantal gebruikte rekenkernen	8	8		
RAM geheugenruimte	32 GB	32 GB		
Naam EPANET-model	Gem_Texel_2017_01_vanuit EPA 4 BS 60.inp	Gem_Texel_2017_01_vanuit EPA 4 BS 30.inp		
Totale leidinglengte	256,749 km	256,749 km		
Simulatieperiode	31 dagen	31 dagen		
Frequency of injection en Frequency of transport (zelfde waarde)	60s	30s		
Rekestijd	1:43:31	3:45:15		
Opmerkingen				

3.5. De Watergroep

Bevindingen Aquarellus versie 2

Naam + bedrijf: Evi Loozen – De Watergroep

Toelichting op bevindingen:

Resultaten voorlopig moeilijk te interpreteren omdat:

- Niet visueel te bekijken in 'network'
Verbetering is onderdeel van vervolgactiviteit 1 (gepland na de go/no-go).
- Simulatie duurt lang, resultaten kunnen de volgende dag niet meer bekeken worden, omdat je de simulatie niet kan opslaan. Bij export (en weer import), worden dan enkel de eindresultaten ingeladen? Of de hele simulatieperiode?
Hiervan zijn we ons bewust. In het vervolg van activiteit 1 zal het exporteren van tussen- en eindresultaten mogelijk worden.

Aanbeveling voor de go/no-go:

De mogelijkheid om de simulatieresultaten op te slaan, zodat er niet opnieuw hoeft gerund te worden is een must voor de go/no-go-beslissing. Niet alleen de eindresultaten aan het einde van de simulatie, maar alle resultaten gedurende de simulatieperiode.

Tabel met rekenuitkomsten:

	Spiere-Helkijn
Type processor	Intel(R) Core(TM) i7-9850H
Aantal gebruikte rekenkernen	6 cores
RAM geheugenruimte	16 GB
Naam EPANET- model	Spiere_Helkijn_TEST
Totale leidinglengte	117 km
Simulatieperiode	31 dagen
Frequency of injection en Frequency of transport (zelfde waarde)	60 s
Rekentijd	207 minuten
Opmerkingen	

3.6 Evides

Bevindingen Aquarellus versie 2

Naam + bedrijf:

Evides Waterbedrijf Henk de Kater

Toelichting op bevindingen:

Software is eenvoudig te installeren op stand-alone laptop buiten bedrijfs ICT.

Voor het testen is het natuurlijk belangrijk dat alle waarden goed staan. In deze versie zijn veel parameters vastgezet, dat maakt werken nu eenvoudig.

Bij onvoldoende parameters voor sediment input in EPANET model volgt na berekening geen resultaten. Voordeel is wel dat de berekeningen dan veel sneller gaan.

Testen met 3 modellen uitgevoerd, klein model 1 km, model 45 km en model 295 km. Het model van 1 km kostte bij de vorige versie voor 7 daen 6 uur aan rekentijd. nu 2 minuten.

Net als bij vorige versie nog geen gevoel bij resultaten sedimentberekeningen.

Aanbeveling voor de go/no-go:

Berekeningstijden lijken goed aan de gestelde eisen te voldoen.

Onderzoeken waarom model Maaswijk bijna evenveel tijd kost als vergelijkbaar 6 keer zo groot model.

Vermoedelijk omdat de rekentijden afhangen van hoeveel leidingen met sediment zijn gevuld. Wellicht ligt dat in beide gevallen dicht bij elkaar, ondanks het verschil in leidinglengte van de netwerken. Zie ook punt 6 van Brabant Water.

Om gevoel te krijgen bij resultaten zou het goed zijn om uitkomsten Hoofddorp met Aquarellus 2 te vergelijken met vorige versie, maar hoe? Dit is eerder aangetoond voor een klein (35 m) benchmark model. De massa van deeltjesmateriaal in suspensie en bed load kwam voor beide versies goed overeen met een analytische berekening, d.w.z. met een onnauwkeurigheid van 1 tot 6%. Ook interessant om uitkomsten model Spijkenisse en deelmodel Maaswijk qua resultaten te analyseren.

Tabel met rekenuitkomsten:

	Hoofddorp 1	Hoofddorp 2	Maaswijk	Spijkenisse
Type processor	Intel i5 4210 CPU	Intel i5 4210 CPU	Intel i5 4210 CPU	Intel i5 4210 CPU
Aantal gebruikte rekenkernen	4?	4?	4?	4?
RAM geheugenruimte	8 GB	8 GB	8 GB	8 GB
Naam EPANET-model	Hoofddorp (ring_open)	Hoofddorp (ring_closed)	Maaswijk	Spijkenisse
Totale leidinglengte	1192 m	1192 m	45126 m	292493 m
Simulatieperiode	Uur-berekening over 31 dagen (vast)	Uur-berekening over 31 dagen (vast)	Uur-berekening over 31 dagen (vast)	Uur-berekening over 31 dagen (vast)
Frequency of injection en Frequency of transport (zelfde waarde)	Beiden op default waarde 60 sec	Beiden op default waarde 60 sec	Beiden op default waarde 60 sec	Beiden op default waarde 60 sec
Rekentijd	2:07	2:06	4:11:28	4:54:15
Opmerkingen				

3.7 Dunea

Bevindingen Aquarellus versie 2

Naam + bedrijf:

Toelichting op bevindingen:

Als beide frequenties aan elkaar gelijk dienen te zijn. Waarom kan ik ze afzonderlijk invullen?

In de handleiding staat dat de clumping resolution 0sec moet zijn. Lijkt me nogal laag. Is daarnaast ook niet mogelijk in het model.

Dit moet inderdaad 1 sec zijn. Dit is per abuis verkeerd vermeld in de meegestuurde toelichting, maar zal worden hersteld in de te schrijven Handleiding.

Een melding als Aquarellus Epanet niet succesvol kan inlezen is handig.

Betere beschrijving wat ik met het Epanet model moet doen qua instelling is handig. Heb nu alle settings van jullie voorbeeld gekopieerd. Maar was me niet duidelijk waarom mijn model in eerste instantie niet werkte.

In de te schrijven handleiding zal dit in meer detail worden beschreven.

Interface ziet er goed uit. Maar op het netwerk tab zie ik drie knoppen onder "visualize". Alleen timestep is beschikbaar.

De grafische interface wordt op verschillende punten verbeterd in het vervolg van activiteit 1, na de go/no-go.

Als ik door een tijdreeks heenga dan verkleurt het netwerk. Het is me niet duidelijk of ik daarmee de mate van sedimentatie zie.

Nee, dat is niet geval. Ook dit zal worden verbeterd in het vervolg van activiteit 1, zoals gepland.

Bij Dunea hebben we geen laptops, om een executabel beschikbaar te maken op mijn zero-client omgeving moet ik een hele procedure door. Ik heb het op mn eigen laptop getests.

Onduidelijk waar ik de simulatie periode invul. Is dat in het *.inp file.. want die is standaard toch 31dagen?

Om makkelijk de eisen te kunnen testen is de simulatieperiode gefixeerd op 31 dagen. In de volgende versie wordt dit vrij instelbaar via de *.inp-file (Duration in het TIMES-blok).

Ik begrijp niet helemaal hoe de totale load wordt berekend. Het lijkt alsof load g/s is. onafhankelijk van de flow uit het reservoir. Zou toch logischer zijn als het concentratie*flow is.

De invoer (CONC in de INP) is in 'deeltjes per seconde', en wordt via de deeltjesdichtheid en -grootte omgerekend naar gram per seconde. Dit is mogelijkwijs niet de meest intuïtieve manier. We zullen overwegen om dit te veranderen in een volgende versie na de go/no-go.

Aanbeveling voor de go/no-go:

Go, met opmerking dat een validatie in het veld aan moet tonen dat aquarellus goede resultaten genereerd

Tabel met rekenuitkomsten:

	<Naam run 1>	<Naam run 2>	...	
Type processor	I5-8365U @1.6GHZ			
Aantal gebruikte rekenkernen	8			
RAM geheugenruimte	8gb installed			
Naam EPANET-model	Duindorp	Duindorp	Duindorp	Duindorp
Totale leidinglengte	13.881 meter	13.881 meter	13.881 meter	13.881 meter
Simulatieperiode	1 maand			
Frequency of injection en Frequency of transport (zelfde waarde)	1	60	30	20
Rekentijd		0:21:25	1:25:23	3:21:53
Opmerkingen	Run failed. Gebeurde niks. Had aquarelles 2x geopend..			

II Modelverificatie

II.I Overzicht van benchmark tests

Een viertal benchmarkmodellen zijn gebruikt om een aantal processen te toetsen aan analytisch berekende waarden met de rekenkern van *Aquarellus* (versie 2¹⁰):

- de hoeveelheid deeltjesmateriaal die een leiding instroomt en vervolgens bezinkt (benchmark SET, Sectie II.II);
- de snelheid van deeltjesmateriaal in resuspensie na bezinking (benchmark RES, Sectie II.III);
- de snelheid van deeltjesmateriaal in bedload-transport na bezinking (benchmark BED, Sectie II.IV) ;
- de deeltjesmassa in suspensie en op de leidingbodem (benchmark RING, Sectie II.V).

Ook is de invloed van de numerieke resolutie op de uitkomsten onderzocht door de parameters N (benchmark SET en RING) en Δt_{inj} , Δt_{tpt} (benchmark SET en RING) te variëren.

II.II Benchmark SET - instroom en bezinking

Het SET-model bestaat uit een leiding van 130 m lengte en 100 mm diameter. In de eerste uur van de simulatie wordt vanuit bronknoop Z materiaal aangevoerd ($Q_f = 1 \text{ m}^3/\text{u}$; $C_m = 1 \cdot 10^{-6} \text{ kg/kg}$); daarna stopt de aanvoer ($Q_f = 0 \text{ m}^3/\text{u}$; $C_m = 0 \text{ kg/kg}$). Overige relevante parameterwaarden zijn vermeld in Tabel 3. Analytisch is berekend dat er in de eerste fase in totaal 0,9167 g materiaal de leiding in stroomt. De modelparameters zijn zo gekozen dat al het ingestroomde deeltjesmateriaal binnen 1 uur bezinkt en nooit het einde van de leiding bereikt. Verder is aangenomen: $\Delta t_{clm} = \Delta t_{inj} = \Delta t_{tpt} = 1 \text{ s}$ en is de deeltjesaggregatiefactor N gevarieerd van $1 \cdot 10^3$ tot $1 \cdot 10^6$ met vermenigvuldigingsstappen van 10. Het aantal deeltjes is $n = 4 \cdot 10^9$. Het aantal deeltjes per injectietijdstap varieert met N als: $M = \frac{n \Delta t_{inj}}{N}$.

¹⁰ Na het uitvoeren van deze tests zijn nog cosmetische aanpassingen uitgevoerd die echter geen invloed hebben op de nauwkeurigheid van de berekeningen.

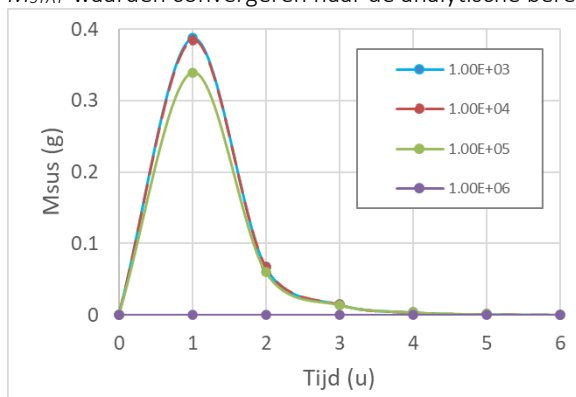
Tabel 3. Modelparameters voor scenario SET.130

Parameter	Symbol	Waarde	Eenheid
Leidingeigenschappen			
Leidingdiameter	d_pipe	100	mm
Hydraulische eigenschappen			
Fluid flow (initieel)	Qfi	1	m ³ /h
Stroomsnelheid (initieel)	u_fi	3.54E-02	m/s
Deeltjeseigenschappen			
Deeltjesconcentratie (massa)	Cm	1.00E-06	kg/kg
Deeltjesdichtheid	rho_p	1550	kg/m ³
Deeltjesdiameter	d_p	1.00E-05	m
Relatieve deeltjesdichtheid	s	0.55	N.A.
Kritische schuifspanning (incipient)	TH_c	1	N.A.
Kritische schuifspanning (resuspensie)	TH_rs	10	N.A.
Bezinksnelheid	u_s	3.00E-05	m/s
Bezinktijd	t_s	3.34E+06	s
Inflow			
Inkomend deeltjesmateriaal	dm_in/dt	2.778E-07	kg/s

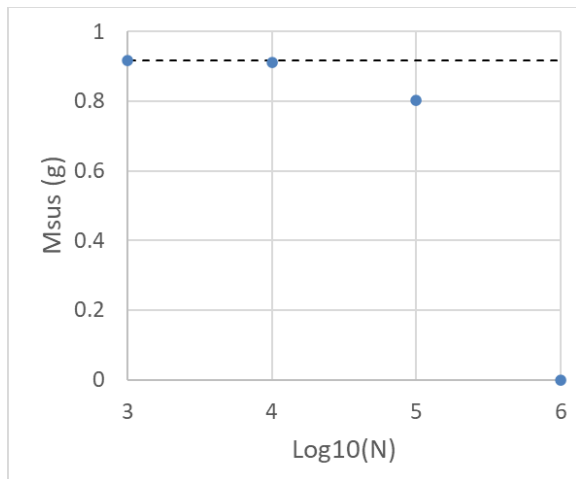
Figuur 24 toont de met *Aquarellus* berekende massa in suspensie (M_{SUS}). Deze neemt toe van nul tot de maximale waarde in het 1^e uur. Daarna bezinkt het materiaal grotendeels in het eerste uur. De bezinking is echter niet volledig: de massa neemt in de tijd gradueel (i.p.v. linear) af naar nul. Hoewel het om een secundair effect gaat, is hiervoor geen sluitende verklaring gevonden.

Verder toont Figuur 24 dat de resultaten voor opeenvolgende verlaging van N met een factor 10 convergeren (t.o.v. elkaar). Als N toeneemt, wijken de uitkomsten steeds verder af van elkaar. Voor dit model geeft een waarde van $N \leq 1.10^4$ (corresponderend met $M \geq 4.10^5$) een afwijking van <1% in de maximum M_{SUS} -waarde op $t = 1$ uur.

Als extra controle op het bezinkingsproces is de statische massa (M_{STAT}) na 24 uur (wanneer al het materiaal is bezonken, $M_{SUS} = 0$ g). De uitkomsten in Figuur 25 laten zien dat voor opeenvolgende lagere waarde van N de M_{STAT} -waarden convergeren naar de analytische berekende waarde.



Figuur 24. Berekende massa in suspensie tegen de simulatietijd voor benchmarkmodel SET en voor N -waarden zoals aangegeven in de legenda.



Figuur 25. Berekende massa van statisch materiaal na een simulatietijd van 24 uur voor benchmarkmodel SET tegen N -waarden. De analytische waarde is aangegeven met de stippellijn.

II.III Benchmark RES -resuspensie na bezinking

Benchmarkmodel RES is gericht op verificatie van het proces van transport van deeltjes in suspensie van eerder bezonken materiaal. Het RES-model is een uitbreiding van het SET-benchmark. De 1^e leiding van 130 m (knoop Z tot A) wordt opgevolgd door een tweede leiding van 19870 m (A tot B) en een derde van 10 m (B tot C). De volumestroom is gelijk aan het verbruik op eindknoop C. De simulatie bestaat uit drie periode: aanvoer tijdens langzame doorstroming (van 0 tot 1 uur, $Q_f = 1 \text{ m}^3/\text{u}$; $C_m = 1.10^{-6} \text{ kg/kg}$), afwezigheid van aanvoer en stroming (van 1 tot 12 uur, $Q_f = 0 \text{ m}^3/\text{u}$; $C_m = 0 \text{ kg/kg}$) en snelle doorstroming waarin het resuspensie-transportregime actief is (12-24 uur; $Q_f = 15 \text{ m}^3/\text{u}$; $C_m = 0 \text{ kg/kg}$). De analytisch berekende reistijd in de periode van resuspensie is 10u24m (gerekend van knoop A tot C) of 10u28m (van Z tot C). Het materiaal dient knoop C dus te verlaten in het 23^e uur (1 uur aanvoer + 11 uur stilstand + ruim 10 uur reistijd). Overige modelparameters zijn vermeld in Tabel 3. Verder is aangenomen: $\Delta t_{clm} = \Delta t_{inj} = \Delta t_{pt} = 1\text{s}$ en deeltjesaggregatiefactor $N = 1.10^3$.

In de berekende uitkomst verlaat al het materiaal knoop C in het 23^e uur van de simulatie, overeenkomend met de verwachting. Hieruit volgt een maximale onnauwkeurigheid van de snelheid van deeltje in suspensie van maximaal 6% ((660 min – 624 min)/624min). Deze waarde moet gezien worden als een bovengrens: de nauwkeurigheid is wellicht veel hoger, maar dit vergt een verfijndere bepaling (het tijdsinterval waarmee resultaten zijn weg te schrijven staat vast op 1 uur in de huidige versie van *Aquarellus*).

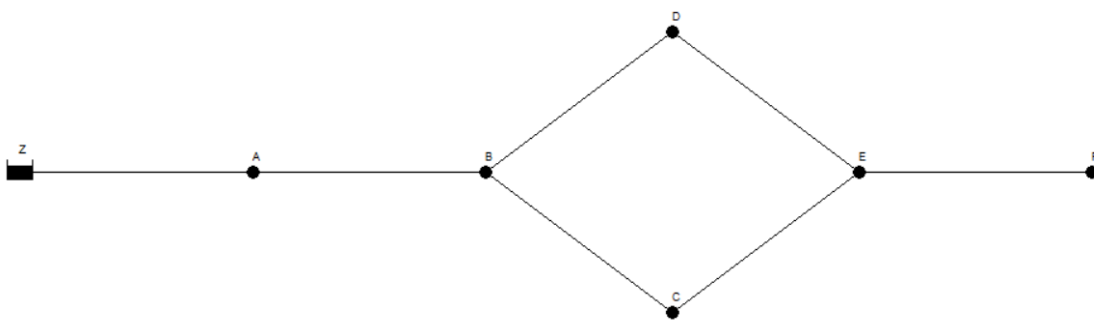
II.IV Benchmark BED -bedload-transport na bezinking

Het BED-benchmark is bedoeld om de snelheid van bedload-transport te verifiëren. Het is gelijk aan het RES benchmark, maar met een aangepaste totale leidinglengte (3500 m; alleen leiding AB is ingekort) en doorstroomsnelheid zodanig dat het bedload-transportregime actief is (12-24 uur; $Q_f = 8,1 \text{ m}^3/\text{u}$; $C_m = 0 \text{ kg/kg}$; bedload-snelheid $u_{bl} = 8,92 \text{ cm/s}$). De reistijd tot de eindknoop ligt tussen 10u30m (knoop A tot C) en 10u54m (knoop Z tot C). Zoals in het RES-benchmarkmodel voorspelt de berekening dat al het materiaal knoop C verlaat in het 23^e uur van de simulatie.

De berekenede resultaten tonen ook dat het materiaal knoop C in het juiste uur van simulatie verlaat. Daarmee is de maximale onnauwkeurigheid van de bedload-transportersnelheid bepaald op 8,3% ((654 min – 600 min)/654 min). Zoals bij het RES-benchmark is de onnauwkeurigheid mogelijk veel kleiner, maar niet verfijnder bepaald.

II.V Benchmark RING

Benchmark RING is gebruikt om de nauwkeurigheid van de *Aquarellus*-resultaten te toetsen in een model waarin waterstromen uit elkaar gaan en samenkomen en wat de invloed is van de temporele en ruimtelijke resolutie op de berekende resultaten. Het RING-model bestaat uit 7 korte (5 m) leidingen en bevat een leidingsplitsing en -samenkomst (Figuur 26). Alle leidinglengtes zijn 5m en de diameters zijn 600 mm voor leiding ZA, AB en EF en 424,3 mm voor leiding BD, BC, DB en CD. Voor een gedetailleerde beschrijving wordt verwezen naar Van Summeren & Morley (2019) waarin hetzelfde model is gebruikt bij het toetsen van het prototype van *Aquarellus* (versie 1). Analytisch is de massa van deeltjesmateriaal in suspensie, bedload-transport en stagnatie-modus bepaald. De uitkomsten van *Aquarellus* zijn hiermee vergeleken voor verschillende resolutieparameters (Δt_{inj} , Δt_{tpt} en deeltjesaggregatiefactor N).



Figuur 26. Leidingnetmodel RING.

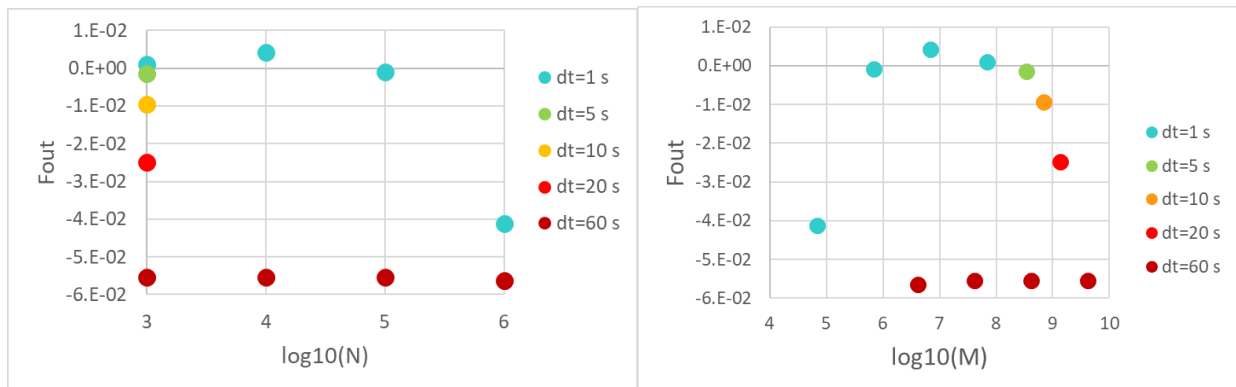
Tabel 4 vermeldt de resultaten van benchmark RING. Aangegeven zijn:

- een aantal combinaties van numerieke resolutieparameters waarmee de berekeningen zijn uitgevoerd (“resolutieparameters”);
- de analytisch berekende massa in suspensie- en statische modus voor een drietal leidingen en het totaal van alle zeven leidingen (“Analytisch”), en;
- de genormaliseerde fout t.o.v. de analytische uitkomst voor elk scenario (“Fout”). Een waarde van 0.01 betekent dat de berekende waarde 1% hoger is dan de analytisch berekende waarde.

Tabel 4. Onnauwkeurigheden van berekende deeltjesmassa's ("Fout") t.o.v. van analytisch berekende waarden ("Analytisch") als functie van de numeriek resolutie ("Resolutieparameters").

Resolutieparameters					Analytisch							
dt_inj	dt_tpt	dt_clm	N	M	M _{SUS} (g)				M _{SED} (g)			
					ZA	BC	EF	TOT	ZA	BC	EF	TOT
s	s	s	n.v.t.	n.v.t.	1.413	0.705	1.405	7.045	5.547	3.923	5.547	32.333
Fout												
1	1	1	1.E+03	6.8E+07	-1.9E-03	5.9E-03	6.1E-03	1.0E-03	-5.4E-03	-3.9E-04	-6.3E-03	-3.2E-03
1	1	1	1.E+04	6.8E+06	-1.9E-03	5.4E-03	6.1E-03	4.3E-03	-6.3E-03	9.3E-04	-6.0E-03	-3.5E-03
1	1	1	1.E+05	6.8E+05	-6.4E-03	-2.7E-05	8.9E-04	-9.0E-04	-1.2E-02	-2.8E-03	-1.3E-02	-8.7E-03
1	1	1	1.E+06	6.8E+04	-1.7E-02	-6.0E-02	-6.0E-02	-4.1E-02	-1.0E-02	-7.8E-02	-7.0E-02	-5.0E-02
5	5	1	1.E+03	3.4E+08	-1.7E-02	-1.7E-02	-1.7E-02	-1.5E-03	-1.0E-01	-8.7E-02	-1.4E-01	-9.3E-02
10	10	1	1.E+03	6.8E+08	-5.7E-02	2.2E-02	-5.6E-02	-9.4E-03	-3.1E-02	-8.7E-02	-1.1E-01	-7.3E-02
20	20	1	1.E+03	1.4E+09	-5.7E-02	1.0E-01	-5.6E-02	-2.5E-02	-5.8E-02	-4.9E-02	-2.2E-01	-7.9E-01
60	60	1	1.E+03	4.1E+09	-5.7E-02	-5.5E-02	-5.4E-02	-5.5E-02	-5.7E-02	-5.3E-01	-5.3E-01	-4.5E-01
60	60	1	1.E+04	4.1E+08	-5.7E-02	-5.5E-02	-5.4E-02	-5.5E-02	-5.8E-02	-5.2E-01	-5.2E-01	-4.5E-01
60	60	1	1.E+05	4.1E+07	-5.7E-02	-5.5E-02	-5.4E-02	-5.5E-02	-1.0E-01	-5.8E-01	-5.5E-01	-4.9E-01
60	60	1	1.E+06	4.1E+06	-5.7E-02	-5.5E-02	-5.6E-02	-5.6E-02	-6.2E-02	-5.3E-01	-5.3E-01	-4.5E-01

Om de invloed van N , M , Δt_{inj} en Δt_{tpt} te verduidelijken is het totaal voor M_{SUS} uitgezet tegen deeltjesaggregatiefactor (N) en het aantal deeltjes per injectietijdstep (M) in Figuur 27.



Figuur 27. Fout t.o.v. deeltjesaggregatiefactor N (links) en het aantal deeltjes per injectietijdstep M (rechts). De legenda verwijst naar de waarden voor de tijdstap $\Delta t_{inj} = \Delta t_{tpt}$.

De belangrijkste bevindingen voor benchmark RING zijn:

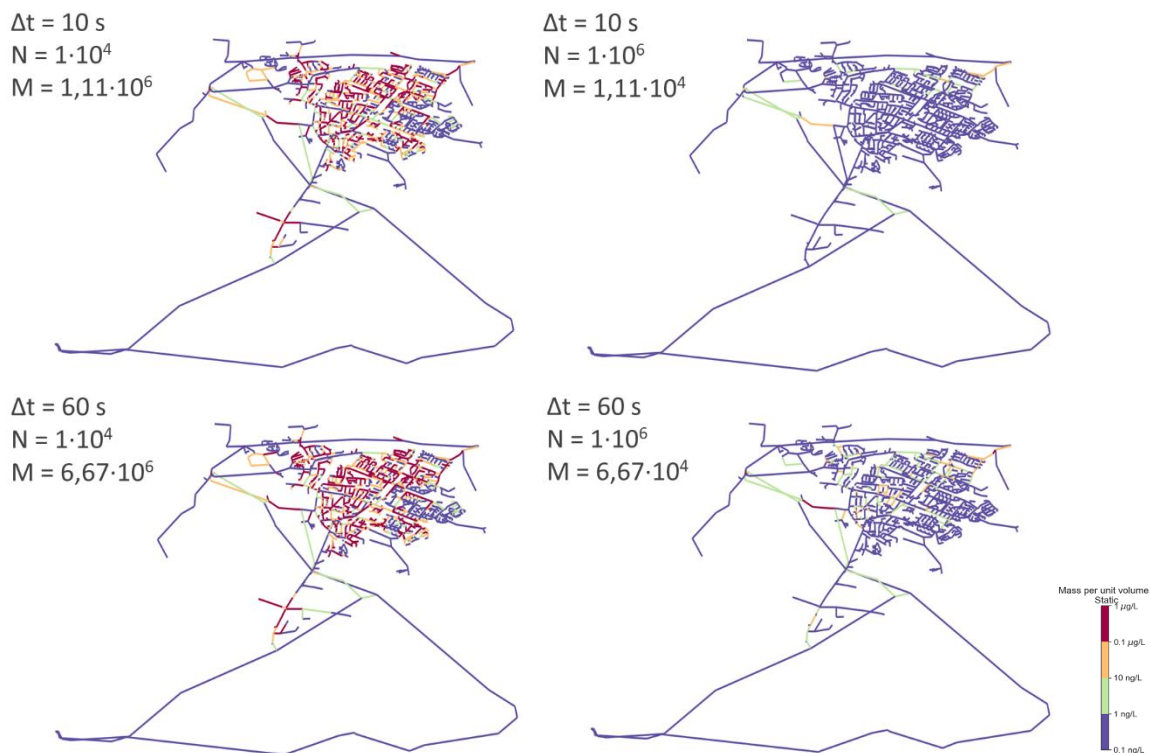
- Absolute onnauwkeurigheden in M_{SUS} en M_{STAT} nemen af tot 0,04 % tot 0,6 % voor de test met de hoogste numerieke resolutie ($\Delta t_{clm} = \Delta t_{inj} = \Delta t_{tpt} = 1$; deeltjesaggregatiefactor $N = 1000$). Dit is vergelijkbaar en zelfs iets nauwkeuriger dan de 0,3 -1,1 % waarmee het prototype *Aquarellus* (Versie V1) was getoetst bij de hoogste haalbare resolutie (Van Summeren & Morley, 2019).
- Voor de geteste scenario's berekent *Aquarellus* M_{SUS} nauwkeuriger dan M_{STAT} . Dit hangt mogelijk samen met het feit dat sediment over een langere periode accumuleert, terwijl deeltjesmateriaal in suspensie zich steeds vernieuwt en fouten zich niet opstapelen.
- Zowel de tijdstapresolutie ($\Delta t_{inj} = \Delta t_{tpt}$) als het aantal deeltjespakketten (N en de daarvan afgeleide M) zijn van invloed op de onnauwkeurigheid van M_{SUS} en M_{STAT} , maar de tijdstapresolutie ($\Delta t_{inj} = \Delta t_{tpt}$) is leidend: de tijdstapgrootte ($\Delta t_{inj} = \Delta t_{tpt}$) bepaalt de maximaal haalbare nauwkeurigheid, ongeacht de waarde van N (of M , zie Figuur 27).
- Rekenresultaten verliezen aan nauwkeurigheid (ongeacht de gekozen tijdstapgrootte) bij een te hoge N (te lage M). Dit gebeurt bij een vaste waarde voor het aantal deeltjes per injectietijdstep (M van ca. $1 \cdot 10^6$ Figuur 27; N is variabel), ongeacht de gekozen tijdstapgrootte (Figuur 18).

II.VI Resolutietest voor leidingnetmodel Castricum

De RING-benchmark uit voorgaande sectie suggereert een nuttige vuistregel voor de resolutie-instellingen: voor een voldoende nauwkeurige berekening is de tijdstapgrootte ($\Delta t_{inj} = \Delta t_{pt}$) leidend en een M -waarde $> 1 \cdot 10^6$ een voorwaarde. De vraag is of deze vuistregel toepasbaar is op grotere leidingnetmodellen met meer variatie in volumestromen, deeltjesconcentraties en leidinglengtes. Dit is onderzocht met een resolutietest van het leidingnetmodel van Castricum door de waarden van $\Delta t_{inj} = \Delta t_{pt}$ en N te variëren.

De uitkomsten in Figuur 28 tonen dat voor waarden van $M > 1 \cdot 10^6$ de sedimentatiepatronen na 30 dagen simulatietijd erg op elkaar lijken voor Δt -waarden van 10 s en 60 s (linkerpanelen in Figuur 28). Voor een 100 maal lagere M -waarde (ordegrootte 10^4) accumuleert er substantieel minder sediment in het leidingnetmodel (vergelijk rechter- met linkerpanelen in Figuur 28). De verklaring hiervoor is dat het aantal deeltjespakketjes niet dekkend is om het deeltjestransport goed te beschrijven, in combinatie met een functie in de code die het aantal deeltjes naar beneden toe afrond. Ook de invloed van Δt op het sedimentatiepatroon is voor de simulaties met lagere M -waarden veel substantiëler, wat suggereert dat de oplossing numeriek niet stabiel is.

Voor het Castricum-model zijn geen analytische oplossing voorhanden. De conclusies op basis van een beperkt aantal experimenten zijn daarom niet sluitend, maar lijken overeen te stemmen met vuistregels voor de RING-modellen: resultaten veranderen en worden instabiel indien de M -waarde wordt verlaagd van ordegrootte 10^6 naar 10^4 .



Figuur 28. Berekende sedimentatiepatronen voor het leidingnetmodel van Castricum met waarden voor de tijdstapgrootte en deeltjesaggregatiefactor N zoals aangegeven in de legenda.

III Protocol verstoringsproeven

PROTOCOL VERSTORINGSPROEVEN BEDRIJVEN – Joost van Summeren (KWR Water Research), 7 augustus 2020

Achtergrond

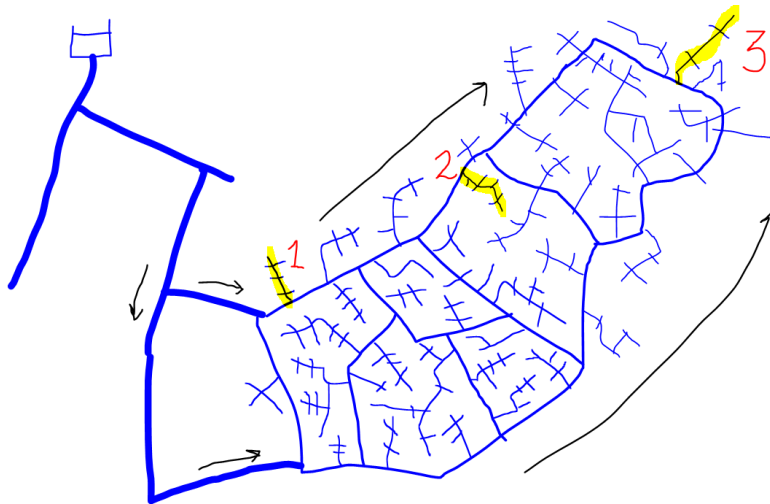
In het kader van BTO “Toepasbaar maken van Aquarellus” nemen 3 drinkwaterbedrijven (De Watergroep, Evides, Vitens) monsters, elk op drie locaties. KWR gebruikt deze monsters om transporteigenschappen van deeltjesmateriaal te bepalen. Hiermee wordt inzicht verkregen in invoergegevens van *Aquarellus* voor het pilotgebied en in hoeverre deeltjeseigenschappen variëren tussen verschillende gebieden of binnen een traject in hetzelfde gebied.

Monsterlocaties

- Drie bedrijven bereiden verstoringsproeven voor:
 - Verstoor met een snelheid van ten minste 1 m/s, liefst 1,5 m/s.
 - Bij een standaard spuiactie wordt vanuit een schoonwaterfront gewerkt en drie maal ververs. Voor deze verstoringsproeven is alleen de eerste verversing van belang omdat daarin de hoogste troebelheid wordt verwacht. Een schoonwaterfront is niet per sé nodig, maar ook geen bezwaar.
 - In dit protocol wordt consequent “verstoringsproef” gebruikt, i.p.v. “spuiactie”, aangezien het doel is om troebel water te verzamelen en niet om de leiding schoon te maken.
- Kies één distributiegebied met voeding vanuit één pompstation; liefst een gebied met een hoog bruinwater risico. Monsters met een hoge troebelheid zijn gewenst.
- Kies drie meetlocaties in het tertiaire leidingnet die steeds verder van het pompstation liggen:
 - (i) dicht bij het pompstation bij een transportleiding. Dit kan bijvoorbeeld een aftakking op een transportleiding zijn, om overlast te beperken;
 - (ii) dicht bij de klant in het tertiaire net;
 - (iii) ruwweg halverwege (i) en (ii).
- Kies monsterlocaties die aftakken van dezelfde hoofdstroom in het leidingnet. Zie de figuur hieronder voor een schematische weergave van het idee.
- Kies bij voorkeur meetlocaties waar een hoge troebelheid wordt verwacht, bijvoorbeeld in gebieden waarin veel bruinwaterklachten voorkomen en waar niet recentelijk (afgelopen twee jaar) nog een schoonmaakactie heeft plaatsgevonden. Ga na wat de tijd tot de laatste schoonmaakactie is geweest en noteer dit in de invullijst (zie onder).
- Kies 110 mm diameter leidingen van PVC.
- Lengte traject: bepaal deze vooraf, zie onder kopje ‘Verstoringsproef –voorbereiding’. Mogelijk is het lastig om een voldoende lang traject te vinden in het tertiaire leidingnet. In dat geval is het ook toegestaan om het traject zoveel mogelijk in het tertiaire leidingnet te houden, maar ook een deel van het secundaire traject te gebruiken. Houd dan wel rekening met diameterovergangen bij het berekenen van de trajectlengte.

Indien bovengenoemde niet mogelijk is, neem dan contact op met KWR.

Noot Evides: De locatie Maaswijk ligt dicht bij het pompstation. Hier is het nog steeds nuttig om op drie locaties te meten: het verschil in reistijd is beperkt, maar de hydraulische omstandigheden kunnen nog steeds veranderen naarmate dieper in het leidingnet wordt gemonsterd.



Planning

- Graag voor 6 augustus 2020 de definitieve planning en eventuele vragen naar aanleiding van dit protocol aanleveren bij KWR.
- Gewenste aanlevering van de monsters aan KWR is 30 september 2020.

Verstoringsproef -voorbereiding

- Bepaal vooraf de volumestroom van de aftapkraan, bijvoorbeeld door deze op een andere locatie aan te sluiten en te meten hoe lang het duurt om een 10 L emmer te vullen. De volumestroom is dan het volume van de emmer (10 L) gedeeld door de tijd in seconden. Vemenigvuldig de uitkomst met 60. Dit is de volumestroom in L/min. Bereken daarmee de minimale verstoringstijd, als volgt:
 - Bij een kraanvolumestroom van bijvoorbeeld 9 L/min is een jerrycan van 20 liter in ruim twee minuten te vullen: de pure vultijd is 20 liter / 9 liter per minuut = 2m14s . Reken een extra halve minuut voor opstarten van de proef. De minimale verstoringstijd is dan 2m44s (of 164 s).
- Bereken de minimale trajectlengte:
 - Trajectlengte = minimale verstoringstijd (bijvoorbeeld 164 s) maal de verstoringssnelheid (1,5 m/s) = 246 m. (Deze berekening klopt alleen als er geen diameterovergangen zijn in het aanvoerende traject).
 - Zorg dat het werkelijke verstoringstraject langer is dan de minimale trajectlengte. Op deze manier wordt gemonsterd in de zogenaamde 'eerste verversing'. Zorg dat niet buiten de periode van eerste verversing wordt getapt.
- Label de drie jerrycans: "Bedrijfsnaam + locatienummer"
- installeer een tapkraan op een opzetleiding die is aangesloten via een opzetstuk op de brandkraan.
- Sluit ook een troebelheidsmeter aan op de opzetleiding. Zorg dat de aansluitleiding tussen troebelheidsmeter en opzetstuk niet te lang is om vertraging in de meetgegevens te voorkomen.
- Maak een foto van de hele meetopstelling.
- Bepaal de geografische-coördinaten de samplelocatie. Teken de locaties in op een kaart van het leidingnet.

Verstoringsproef -uitvoeren

- Open eerst de aftapkraan en start een stopwatch op het moment dat de brandkraan (langzaam) geopend wordt.
- Voorkom invloed van vervuiling in brandkraan en T-stuk (het insluit-effect): rustig open- en dichtdraaien van de brandkraan, zorg voor het vrij weglopen van brandkraaninhoud.
- Pas een verstoringssnelheid toe van 1,5 m/s (circa 12.7 L/s & 45.9 m³/uur in een DN110 leiding). Gebruik evt. een spuizak om het leidingwater gecontroleerd af te voeren.
- Meet de troebelheid tijdens de verstoringproef met een frequentie 1/s – 1/min.
- Meet ook de volumestroom (of snelheid) op de brandkraan.
- Start direct na het insluit-effect met vullen van de jerrycan.
- Vul de jerrycan binnen het vooraf bepaalde tijdsinterval.
- Nadat de jerrycan is gevuld, noteer de totale duur van de verstoring..
- Voor het goed uitvoeren van de verstoringproef zijn twee monteurs nodig: 1: vullen jerrycan & 2: regelen van de volumestroom en timen met stopwatch.

Opsturen van verstoring monsters

- Voer bovenstaande uit op de drie verstoringlocaties.
- Stuur de monsters naar KWR (Expeditie, Groningenhaven 7, 3433PE in Nieuwegein t.a.v. Luuk de Waal).
 - de drie volle, gelabelde jerrycans;
 - verduister elke jerrycan door ze in een vuilniszak te pakken.
- Stuur digitaal naar KWR:
 - meetgegevens van troebelheid en (indien beschikbaar) volumestroom of snelheid tijdens de 3 verstoringen mee;
 - foto van de opstellingen;
 - leidingkaart met ingetekende verstoringlocaties;
 - invulijst met gegevens.

Benodigdheden

- Opzetstuk voor brandkraan
- Tapkraan
- Troebelheidsmeter
- Volumestroommeter
- Drie schone (niet eerder gebruikte, of goed gereinigde) 20L jerrycans incl. dop
- Stopwatch
- Mobiele telefoon (voor foto's) met kaarten-app (voor coördinaat-bepaling)
- Onderstaande invulijst voor 3 monsterlocaties
- Pen / stift
- Rekenmachine met 'Pi-functie (inhoud leiding [m³] = pi maal de straal van de leiding [m] in het kwadraat * de lengte van de leiding [m])
- Twee mensen
- Rol vuilniszakken (voor donker verpakken van jerrycans)
- Trechter

Met vragen en/of onduidelijkheden kunt u terecht bij:

-Joost van Summeren - (06-54294828) – vakantie (10 aug t/m 30 aug 2020)

Bijlage I: invullijst bij meetprotocol

Bedrijf:

Leiding-ID: Locatie 1 (dichtst bij P.S) / Locatie 2 (midden) / Locatie 3 (ver van P.S.)

Gebied:

LOCATIE A

Leiding-ID		
Leidingdiameter		mm
Leidingmateriaal		
Tijdstip tot laatste schoonmaakactie		Jaartal/ datum
Geografische-coördinaten samplepunt	Lengtegraad: Breedtegraad:	
Leidinglengte verstoringstraject		meter
Berekende 'eerste verversing'		minuten
Gebruikte tijdsinterval voor vullen jerrycan		minuten

Tijd van monstername:		
Start-tijd vullen [#minuten sinds start stopwatch]	Eind-tijd vullen [#minuten sinds start stopwatch]	Opmerkingen
[minuten : seconden]	[minuten : seconden]	

IV Reactie PWN Toepassing Aquarellus

Vragen door KWR zijn in zwart weergegeven; antwoorden van PWN in rood.

1. Proces van opstellen en uitvoeren van schoonmaakplannen / meetprogramma's:

a. Beschrijf de stappen van ontwerp tot uitvoering, inclusief de interactie tussen verschillende afdelingen binnen de organisatie, gebruik van technische hulpmiddelen zoals Spuiplanner, GIS, etc.

Afdeling Leidingbeheer van PWN laat elk jaar ongeveer 600 OPM metingen uitvoeren door de monteursafdeling SOLIP. Op basis daarvan analyseert Leidingbeheer welke gebieden moeten worden gespuid en welke schoonwaterfronten er gebruikt moeten worden. Voor dat laatste wordt het leidingnet bestudeert in GIS en een goed overwogen rand van het spui gebied gekozen.

Vervolgens wordt door de hydraulica specialisten van afdeling Het Loket berekend wat de snelheid in die leidingen is, en beoordeelt Leidingbeheer of dan verwacht kan worden dat de aanvoerende leiding schoon is. Als dat niet het geval is wordt een meting (spui actie) uitgezet om dit te bepalen. Deze wordt uitgevoerd met het maximale debiet wat nodig is vanuit de betreffende leiding.

Mocht de aanvoerende leiding inderdaad vervuult blijken te zijn, dan moet die eerst gespuid worden.

Vervolgens wordt Het Loket een knip gemaakt uit het Synergi model voor de Spuiplanner met de druk randvoorwaardes.

De werkvoorbereiders van SOLIP maken dan met de Spuiplanner een spuiplan en die wordt uitgevoerd door de monteurs van dezelfde afdeling.

b. Wat is het doel en belang van de plannen/programma's?

Om klanten te voorzien van helder drinkwater met een troebelheid lager dan de wettelijke norm. De wettelijke norm is vertaald naar een grenswaarde van gemiddeld 50 FTU voor een OPM meting, waarbij 30 FTU geldt als signaalwaarde.

c. Op welke manier worden behaalde resultaten geëvalueerd?

Via de spuiplanner wordt een schatting gemaakt van de tijd die nodig is om een leiding schoon te spuien. Daarnaast wordt de troebelheid gemeten tijdens de spuiacties. Een spuiactie wordt pas gestopt bij een troebelheid lager dan 1 FTU of in GGIJ bij 2 tot 3 FTU.

2. Beschrijf hoe Aquarellus als hulpmiddel kan worden ingezet in dit proces.

Aquarellus kan mogelijk een deel van de OPM metingen vervangen door juist de gevoelige locaties aan te wijzen. En/of het zou een zekere priorisering van spui gebieden kunnen geven. Voor dat laatste moet de generaliseerbaarheid van Aquarellus tussen verschillende gebieden wel voldoende gedekt zijn.

3. Hoe zou je de toegevoegde waarde van Aquarellus kunnen beoordelen? Wanneer is het gebruik van Aquarellus succesvol te noemen?

Als op zijn minst de relatieve vervuilingssnelheid tussen wijken in een gemeente betrouwbaar kan worden geschat.

4. Voor schoonmaakacties die zich over de jaren/decennia herhalen: Hoe worden de uitkomsten van het ene schoonmaakplan of meetprogramma meegenomen in een volgende ronde?

De OPM wordt steeds herhaald en wordt gebruikt om te bepalen wanneer er opnieuw gespuid moeten worden.

Een aantal gebieden (vooral met GGIJ) vervuilen bij PWN snel. Dit is naar ons idee niet te voorkomen. De spuiplannen hoeven ook niet veranderd te worden (als het leidingnet hetzelfde is gebleven). De effectiviteit zou niet af moeten hangen van de exacte routes van de spui acties.

5. Wat betekent het gebruik van Aquarellus voor het proces van opstellen van plannen/programma's of voor de organisatie van het bedrijf? Denk hierbij aan :

a. Draagkracht en capaciteit (menskracht, expertise, digitale infrastructuur, etc.) binnen de organisatie om Aquarellus langdurig toe te passen en op te nemen in het proces. Kan het makkelijk worden opgenomen in de bestaande organisatie?

b. Het actueel houden van hydraulische leidingnetmodellen

c. Welke informatie van het hydraulisch leidingnetmodel ontbreekt nog om Aquarellus goed te kunnen toepassen? Wat is hiervoor nodig (beter registratie / meer of andere metingen/ bemonstering / sensormetingen)

Het zou vrij gemakkelijk opgenomen kunnen worden in de afdeling Leidingbeheer. Die hoeven dan mogelijk minder metingen uit te laten voeren door monteurs, maar er zal zelf aan gerekend kunnen worden.

Het is wel noodzakelijk om daarvoor genoeg reken capaciteit vrij te maken, bijvoorbeeld door een heel aantal kleinere knippen te maken uit het grote leidingnetmodel. Dat is wel een serieus vraagstuk, met name als dit steeds opnieuw gedaan zou moeten worden bij het aanpassen van het leidingnet (wat een continu proces is).

Een andere optie zou zijn om eens in de zoveel jaar een uitgebreide analyse uit te voeren in plaats van elk jaar een nieuwe exercitie te doen.

Mijn eerste zorg is nu nog om Aquarellus betrouwbaar genoeg te hebben om metingen te kunnen vervangen.

Vraag is of de validatie goed genoeg kan met OPM of spui data of dat er meer continue sensormetingen nodig zouden zijn bijvoorbeeld.

6. Zijn er aanbevelingen voor Aquarellus: welke functionaliteit moet in de toekomst worden toegevoegd of verbeterd om de toegevoegde waarde van de rekentool te verhogen?

Een kleurenschaal die handmatig geschaald kan worden of logaritmisch geschaald is, zodat uitschieters niet zo'n invloed hebben.

7. Zijn er andere zaken van belang voor het toepassen van Aquarellus die nog niet genoemd zijn?