



BTO 2017.002 | November 2017

BTO rapport

CFD modellering van
spoelen snelfilters en
doorstromen
reinwaterreservoirs

BTO

CFD modellering van spoelen snelfilters en doorstromen reinwaterreservoirs

BTO 2017.002 | November 2017

Opdrachtnummer

400379

Projectmanager

ir. L. Palmen / dr. ir. B.A. Wols

Opdrachtgever

BTO - Speerpuntonderzoek

Kwaliteitsborger(s)

dr. ir. D. Vries

Auteur(s)

dr. ir. B.A. Wols, ir. B. van den Akker

Verzonden aan

BTO participanten

Jaar van publicatie
2017

Meer informatie

dr. ir. Bas Wols
T 030-6069604
E bas.wols@kwrwater.nl

Keywords

CFD, spoelen, ontijzering, snelfilter, reinwaterreservoir, temperatuur

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



BTO 2017.002 November 2017 © KWR

Alle rechten voorbehouden.

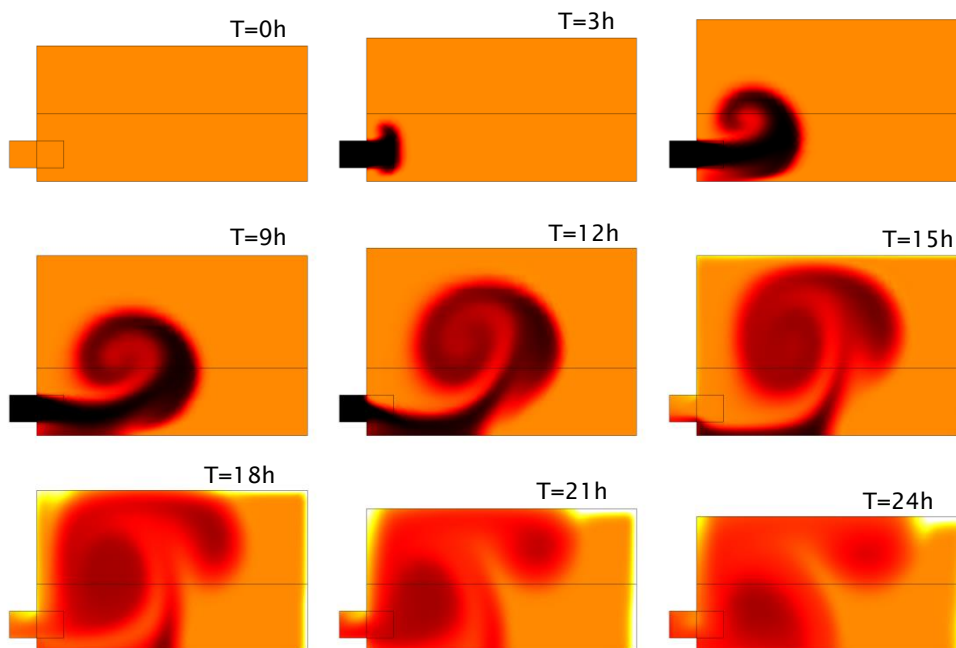
Niets uit deze uitgave mag worden verveelvoudigd, opgeslagen in een geautomatiseerd gegevensbestand, of openbaar gemaakt, in enige vorm of op enige wijze, hetzij elektronisch, mechanisch, door fotokopieën, opnamen, of enig andere manier, zonder voorafgaande schriftelijke toestemming van de uitgever.

BTO Managementsamenvatting

Optimalisatie en standaardisatie van snelfilters en reinwaterreservoirs mogelijk dankzij CFD-modellering

Auteur(s) dr.ir. Bas Wols en ir. Benjamin van den Akker

Aan de hand van een gedetailleerde modellering van vloeistofstromen (computational fluid dynamics – CFD) is verbetering van ontwerp en bedrijfsvoering van snelfilters en reinwaterreservoirs mogelijk. Dit blijkt uit onderzoek waarbij in de modellering van snelfilters de vuilafvoer tijdens een waterspoeling is gesimuleerd. Voor het doorstromen van reinwaterreservoirs gebeurde de simulatie voor de temperatuur en leeftijd van het water. Het ontwikkelde CFD-model kan gebruikt worden voor inschatting van de beste spoeltijd op een specifieke locatie. Voor de reinwaterreservoirs geldt dat met de juiste bedrijfsvoering hoge leeftijden en hoge temperaturen voor een groot deel kunnen worden vermeden, bijvoorbeeld door verlaging van de hydraulische verblijftijd en periodieke leging van het reservoir.



Voorbeeldberekening van temperaturen [van zwart naar wit: 10-20 °C] in een reinwaterreservoir tijdens een vul- en leegcyclus

Belang: optimalisering en standaardisering snelfilters en reinwaterreservoirs

Snelfilters moeten tijdens het spoelen het vuil zo optimaal mogelijk afvoeren, met zo min mogelijk spoelwaterverlies en behoud van een goede waterkwaliteit. Reinwaterreservoirs kunnen te maken hebben met afnemende waterkwaliteit als

gevolg van lange verblijftijden gecombineerd met hoge temperaturen. In beide gevallen kunnen modellen worden ingezet om te helpen in optimalisatie en standaardisatie van ontwerp en bedrijfsvoering.

Aanpak: vergelijking modelvoorspellingen met praktijkgegevens voor afvoer van ijzer en mangaan

Voor betrouwbare voorspellingen over het vuiltransport tijdens spoeling van een snelfilter of doorstroming van reinwaterreservoirs zijn geavanceerde stromingsmodellen (computational fluid dynamics - CFD) nodig. Deze modellen beschrijven nauwkeurig de interactie tussen waterstroming, luchtstroming en bewegende zanddeeltjes of die van de waterstroming met warmtetransport. Na toepassing van het CFD-model tijdens een spoeling van een zandfilter is de afvoer van ijzer en mangaan die hierbij optrad gemodelleerd. Resultaten van de simulaties zijn vergeleken met experimentele gegevens uit praktijkinstallaties van Vitens.

Resultaten: complexe stromingsverschijnselen in kaart gebracht voor installaties van Vitens

Gemodelleerde concentraties van ijzer en mangaan bij zandfilterspoeling komen goed overeen met gemeten waarden. Voor de afvoer van ijzer en/of mangaan kan beter worden gewerkt met twee spoelgoten, gecombineerd met een lagere bovenwaterstand. Dit verkort de spoelduur. Modellering van een lucht-water spoeling blijkt niet goed mogelijk. Daarom is het effect van de duur van de luchtspoeling en de luchtsnelheid bepaald met kolomexperimenten. Hieruit volgt dat spoelduur een grotere invloed heeft op de hoeveelheid afgeschuurd materiaal dan spoelsnelheid.

Voor het doorstromen van reinwaterreservoirs zijn de waterstroming, temperaturen en leeftijden van

het water gesimuleerd. Daarnaast zijn temperatuurmetingen gedaan over de hoogte van een bovengronds reservoir van Vitens. Hieruit kwam naar voren dat vanaf de (voor)zomer hoge temperaturen optreden in de bovenlaag van het reservoir. De temperatuurstratificatie blijft gedurende de zomer in stand en verdwijnt in het najaar. Het CFD-model bleek niet in staat de stratificatie te voorspellen. Een vereenvoudigd model dat onder meer KNMI-gegevens over temperatuur en zonneschijn bleek de temperaturen beter te kunnen voorspellen.

Implementatie: modellering toepasbaar voor beter ontwerp en bedrijfsvoering

Het vereenvoudigde CFD-model maakt doorberekening van effecten van aanpassingen in bedrijfsvoeringparameters mogelijk. Voor snelfilters kunnen inschattingen worden gemaakt van de beste spoeltijd op een specifieke locatie. Met de juiste bedrijfsvoering van reinwaterreservoirs, zoals verlaging van hydraulische verblijftijd en periodieke leging van het reservoir, kunnen hoge leeftijden en temperaturen van het water deels worden vermeden. Daarnaast is controle nodig van andere bovengrondse reservoirs in Leeuwarden, om te kijken of daar ook een zomerse temperatuurstratificatie optreedt met eventuele gevolgen voor de waterkwaliteit.

Rapport

Dit onderzoek is beschreven in rapport *CFD modellering van spoelen snelfilters en doorstromen reinwaterreservoirs* (BTO-2017.002).

Jaar van publicatie
2017

Meer informatie
dr. ir. Bas Wols
T 030-6069604
E bas.wols@kwrwater.nl

Keywords
CFD, spoelen, ontijzering, snelfilter,
reinwaterreservoir, temperatuur

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 Watercycle
Research
Institute

BTO 2017.002 November 2017 © KWR

Alle rechten voorbehouden.

Niets uit deze uitgave mag worden vervoelvoudigd, 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, zonder voorafgaande schriftelijke toestemming van de uitgever.

Inhoud

Inhoud	2
1 Inleiding	3
1.1 CFD modellering	3
1.2 Spoelen van snelfilters	3
1.3 Doorstromen van reinwaterreservoirs	3
1.4 Leeswijzer	4
2 Spoelen van snelfilters	5
2.1 Inleiding	5
2.2 Prioritering onderzoeksvragen	5
2.3 Modellering van spoelprocessen	9
2.4 Overige modellen	15
2.5 Validatie model met praktijkdata	17
2.6 Experimenten op proefinstallatie-schaal	22
2.7 Verbeteren ontwerpparameters	34
3 Doorstromen van reinwaterreservoirs	35
3.1 Inleiding	35
3.2 Modellering	35
3.3 Resultaten 2D CFD 'proof-of-principle'	41
3.4 Resultaten 3D CFD modellering	47
3.5 Resultaten vereenvoudigde modellering	55
3.6 Experimenten	61
3.7 Validatie	69
3.8 Aanbevelingen voor ontwerp en/of bedrijfsvoering	73
4 Conclusies en aanbevelingen	75
4.1 Conclusies	75
4.2 Aanbevelingen voor de praktijk	75
4.3 Aanbevelingen voor vervolgonderzoek	76
5 Referenties	78
Bijlage I Experimenten filterkolom	80
Deeltjesverdeling per aantallen deeltjes	86
Berekening hoeveelheid ijzer in het filtermateriaal	86
Bijlage II Vergelijking versimpeld model en CFD	87

1 Inleiding

1.1 CFD modellering

Vitens en KWR hebben in voorgaand BTO speerpuntonderzoek CFD-modellering toegepast op onthardingsinstallaties en plaatbeluchters [17]. Hierbij is voor het eerst de complexe meefasestroming van onthardingsreactoren in kaart gebracht. De modelaanpak helpt Vitens om de ontwerpen van installaties te verbeteren. Dit is onder meer gebruikt om te komen tot een gestandaardiseerd ontwerp voor onthardingsinstallaties. In het huidige onderzoek wordt CFD-modellering toegepast om inzicht te krijgen in het spoelen van snelfilters en het doorstromen van reinwaterreservoirs.

Computational Fluid Dynamics (CFD) is een krachtig instrument om vloeistofstromen te simuleren. Het wordt in de industrie veel toegepast om ontwerpen te analyseren, testen, evalueren en verbeteren. Voorbeelden zijn de auto-industrie, vliegtuigindustrie, voedingsmiddelenindustrie, olie- en gasindustrie. In de drinkwatersector wordt CFD de afgelopen tien jaar ook meer toegepast, bijvoorbeeld om het energieverbruik van UV installaties of membraaninstallaties te verlagen. Als de beschrijving van de waterstroming wordt gecombineerd met de fysisch-chemische processen die spelen in de zuivering ontstaat een krachtig instrument om de zuiveringsefficiëntie te voorspellen. De kennis die door deze combinatie wordt opgedaan kan gebruikt worden om de ontwerpen van zuiveringsinstallaties en/of bedrijfsvoering te verbeteren.

1.2 Spoelen van snelfilters

Voor het behoud van de verwijderingsprestaties van snelfilters, zijn spoelingen noodzakelijk. Het is bij het spoelen zaak om de biologie en metaaloxide-afzettingen in het filtermateriaal te behouden, omdat deze een katalytische werking op adsorptie en nitrificatie hebben en tegelijkertijd de afzettingen die voor een hogere weerstand (de 'filterkoek') zorgen te verwijderen. Bij dubbellaagsfilters is het belangrijk om naast het wegspoelen van filterkoek, de verschillende werking van de lagen gedurende het filtratie- en spoelproces in stand te houden. Uit onderzoek van Vitens blijkt dat in dubbellaagsfilters op locatie Spannenburg door aangroei van een van de lagen een mengbed ontstaat bij het spoelen. Daarnaast verslechtert de nitrificatie. Op den duur verandert het dubbellaagsfilter door menging in een heterogeen enkellaagsfilter, met als gevolg meer spoelingen door een snellere verstopping en dus een groter spoelwaterverbruik. Daarnaast kunnen veranderingen in bedrijfsvoering, de werking van spoelwaterbezinkinstallaties beïnvloeden doordat de concentraties van metaaloxiden in het slib veranderen. Met behulp van meefase-CFD kan de stroming en beweging van het filterbed tijdens het spoelen in beeld worden gebracht. Hiermee kan gemodelleerd worden hoe het filterbed zich gedraagt tijdens het spoelen en hoe het vuil in het spoelwater wordt afgevoerd.

1.3 Doorstromen van reinwaterreservoirs

Bij reinwaterreservoirs heeft het ontwerp en de mate van doorstroming van het reservoir een grote invloed op de verblijftijden van het reine water in het reservoir, en daarmee de waterkwaliteit. De aanwezigheid van zones met stilstaand water – de zogenoemde dode zones – kan leiden tot lange verblijftijden (ook wel leeftijden genoemd) van het water en mogelijke bacteriegroei. Daarnaast kunnen bovengrondse reinwaterreservoirs (bijv. Leeuwarden) gevoelig zijn voor opwarming, wat leidt tot thermische stratificatie. Thermische stratificatie is de opdeling van het watervolume in verschillende waterlagen met

verschillende temperaturen. Dichtheidsverschillen kunnen de stratificatie in stand houden. Deze stratificatie heeft tot gevolg dat bepaalde waterdelen naast hoge leeftijden ook sterk opwarmen met als gevolg een te hoge bacteriegroei. CFD kan de aanwezigheid van dode zones in combinatie met hoge temperaturen in kaart brengen voor diverse ontwerpen en bedrijfsvoeringparameters. De leeftijden en temperaturen in een reinwaterreservoir kunnen op deze manier berekend worden.

1.4 Leeswijzer

De CFD-modellering van beide onderwerpen wordt per hoofdstuk behandeld volgens een indeling: inleiding, modelaanpak, resultaten en conclusies. Het spoelen van snelfilters wordt beschreven in hoofdstuk 2, en het doorstromen van reinwaterreservoirs in hoofdstuk 3. Conclusies en aanbevelingen worden beschreven in hoofdstuk 4.

2 Spoelen van snelfilters

2.1 Inleiding

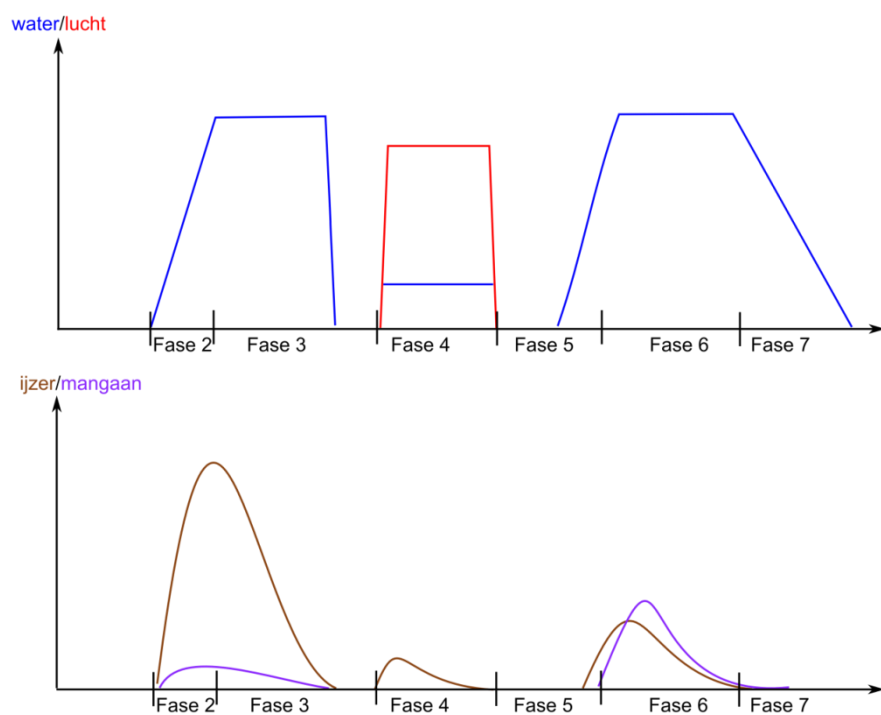
In de wetenschappelijke literatuur zijn er bijna geen onderzoeken gevonden die de modellering van het spoelen van snelfilters met CFD beschrijven. In Kim et al. (2011) [6] wordt de spoeling van filters voor zeewaterfiltratie experimenteel en numeriek onderzocht. Hieruit volgde dat de combinatie van water/lucht spoeling meest effectief was voor het losspoelen van vuil. Daarnaast zijn er een aantal onderzoeken uitgevoerd waarin de filtratie met CFD is gemodelleerd [5, 10].

2.2 Prioritering onderzoeksvragen

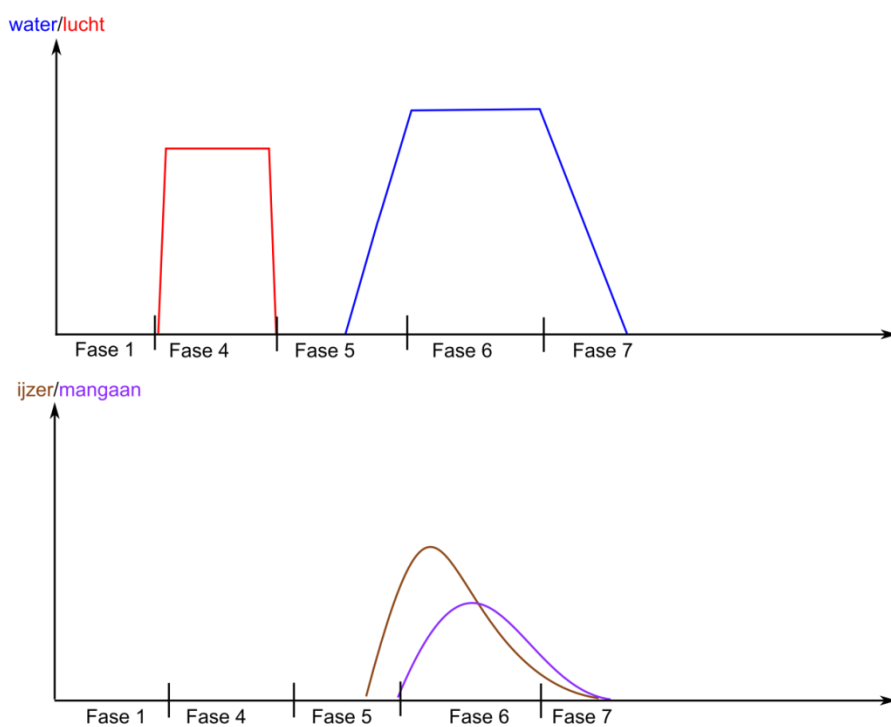
Voor het spoelen van snelfilters worden veel verschillende spoelprocedures toegepast. Het spoelproces kan opgedeeld worden in verschillende fasen, waarin gedurende een bepaalde tijd met lucht, water of een combinatie van lucht en water wordt gespoeld. Elke fase heeft een specifiek doel. Bij Vitens kunnen in totaal 7 fasen onderscheiden worden, te weten:

1. Niveauverlaging
2. Opbouwfase
3. Voorspoelfase
4. Water-/luchtspoelfase of luchtspoelfase
5. Luchtverdrivingsfase
6. Naspoelfase
7. Afbouwfase

Elke fase heeft haar specifieke onderzoeksvragen, waaruit modelleeruitdagingen volgen. Deze worden beschreven in 2.2.1 t/m 2.2.7 voor in eerste instantie een enkellaags filter. Als er alleen met lucht gespoeld wordt, dan worden fase 1, 4, 5, 6, 7 uitgevoerd. Dit wordt voornamelijk gedaan in filters die materiaal bevatten met een lage soortelijke massa (zoals dubbellaagsfilters met hydro-antraciet) om te voorkomen dat filtermateriaal wegspoelt. Als er met zowel water als lucht wordt gespoeld, worden fase 2 t/m 7 uitgevoerd. Een voorbeeld van een lucht-water spoeling en een luchtspoeling wordt kwalitatief geïllustreerd in Figuur 2.1 en Figuur 2.2. Voor een dubbellaags filter zijn dezelfde spoelfasen als die voor een enkellaagsfilter van belang, voor de modellering van een dubbellaagsfilter dient echter rekening gehouden te worden met een extra korrelfase. Naast het type materiaal, hebben de filterdoppen en de bovenwaterstand invloed op de effectiviteit van het spoelproces.



Figuur 2.1 Spoelproces voor een lucht-water spoeling, boven staan de water- en luchtdebieten weergegeven per fase, onder de afgespoelde hoeveelheden ijzer en mangaan (de piek in ijzerconcentratie in de voorspoelfase treedt alleen op bij flocculente ontijzering).



Figuur 2.2 Spoelproces voor alleen een luchtspoeling, boven staan de water- en luchtdebieten weergegeven per fase, onder de afgespoelde hoeveelheden ijzer en mangaan..

2.2.1 Fase 1: Niveauverlaging

Deze fase is alleen relevant in geval van een luchtspoeling. Het waterniveau wordt hier verlaagd tot vlak boven het filterbed. Hier zijn geen onderzoeksvragen relevant en deze fase hoeft ook niet gemodelleerd te worden.

2.2.2 Fase 2: Opbouwfase: losbreken filterkoek

Deze fase wordt niet voorafgegaan door een niveauverlaging. Het filter blijft vol staan met water. Er wordt hier gespoeld met expansie, zodat de filterkoek voorzichtig wordt losgebroken. De watertoevoer wordt geleidelijk verhoogd om te voorkomen dat plaatselijk het water met een te hoge snelheid de filterkoek meeneemt. Belangrijkste onderzoeksvraag is welke bedexpansie nodig is om de filterkoek grotendeels te verwijderen. De te modelleren processen zijn: stromingsverschijnselen van de waterfase en zandfase, en ermee gepaard gaande krachten en spanningen op het samengekleefd filtermateriaal. Hiervoor is een tweefasen model met water en zand nodig, en wellicht ook het samengekleefd materiaal als aparte fase.

2.2.3 Fase 3: Voorspoelfase

De voorspoelfase heeft als doel om makkelijk te verwijderen, losse ijzervlokken en calciumcarbonaat af te voeren. Voorspoelen gebeurt alleen als er makkelijk te verwijderen vuil aanwezig is. Hier wordt bij Vitens niet met lucht gespoeld, omdat er anders filtermateriaal meegespoeld zal worden vanwege de hoge watersnelheid. De gewenste bedexpansie is per locatie verschillend, soms wordt er wel met geringe bedexpansie gespoeld, soms niet. De onderzoeksvragen hier zijn: Hoe worden de ijzervlokken effectief weggespoeld? Wat is de minimaal benodigde spoelduur om (nagenoeg) alle ijzervlokken te verwijderen? De te modelleren processen zijn: water-zand stroming en de afvoer van losse ijzervlokken. Hiervoor is een tweefasen-model met water- en zandfase nodig, en het (passieve) transportmechanisme van colloïdale deeltjes in waterfase.

2.2.4 Fase 4: Water/luchtspoelfase

Het filter wordt gespoeld met alleen lucht of met een water/lucht mengsel. De luchtspoeling heeft als doel om de adsorptieve afzettingen deels los te schuren van het filtermateriaal. Hierbij dient de luchtsnelheid voldoende hoog te zijn om het vuil los te schuren, maar ook weer niet te hoog (luchtsnelheid is vaak rond de 60 m/h). Een te hoge spoelsnelheid verslechtert de ontijzering en ontmangling van het filter. Bovendien kunnen bij een te hoge luchtstroming recirculaties ontstaan, die de stratificatie van het filterbed ernstig verstoren. In deze fase zal geen bedexpansie zijn. De watersnelheid zal maximaal de helft van de vorige fase zijn om te voorkomen dat filtermateriaal wordt verwijderd (max. 20 m/h). Belangrijkste onderzoeksvragen zijn: Hoe groot zijn de schuifkrachten op de korrels door de luchtspoeling? Wat is het optimale luchtdebiet voor het schoenspoelen van de filtermateriaal? De te modelleren processen zijn: lucht/zand spoeling, of lucht/water/zand spoeling, en de schuifkrachten op de zanddeeltjes. Hiervoor is een tweefasen model met lucht en zand of een drie-fasen model met lucht, water en zand nodig.

2.2.5 Fase 5: Luchtverdrivingsfase

De watersnelheid wordt hier langzaam verhoogd om de lucht uit het filter te verdrijven. Hierbij moet voorkomen worden dat filtermateriaal wordt verwijderd. Deze fase wordt niet gemodelleerd te omdat er voor Vitens geen relevante onderzoeksvragen zijn.

2.2.6 Fase 6: Naspoelfase: vervuiling afvoeren

De naspoelfase heeft als doel om de losgemaakte vervuiling af te voeren uit het filterbed. Dit is voornamelijk materiaal met een hogere soortelijke massa dan de soortelijke massa van het filtermateriaal door de hoge concentraties ijzer- en mangaanoxides. Het is waarschijnlijker

dat het vuil meer is opgehoopt aan de bovenkant van het filter. Er is hier niet altijd sprake van bedexpansie. De onderzoeksvragen zijn: Hoe worden de ijzer- en mangaandeeltjes weggespoeld? Wat is de minimale spoelsnelheid van het water? Wanneer zijn alle ijzer- en mangaandeeltjes weggespoeld uit het filterbed? De te modelleren processen zijn: water/zand stroming en afvoer van ijzer- en mangaandeeltjes. Hiervoor is een tweefasen model met water en zand nodig, en het passieve transport van deeltjes in waterfase. (hetzelfde als fase 3)

2.2.7 Fase 7: Afbouwfase: filteropbouw herstellen

Het spoelen wordt langzaam afgebouwd en het filterbed zakt weer in. De spoelsnelheid en duur van de afbouwfase is van belang om stratificatie van het filterbed te bewerkstelligen, zodat deze weer in zijn oorspronkelijke staat wordt gebracht. Dit is vooral van belang bij een dubbellaagsfilter (zie 2.2.8).

2.2.8 Dubbellaagsfilter

Sommige filters zijn uitgevoerd als een dubbellaagsfilter, zoals in Spannenburg. Hier is bovenop een laag zand, een laag bestaande uit antraciet geplaatst. Het probleem dat hier kan ontstaan is het vermengen van beide lagen tijdens het spoelen. Menging kan ontstaan door o.a. veranderende dichtheden van het filtermedium door aangroei van metaaloxiden. Hierbij kunnen de verschillende spoelfasen eveneens voor mengeffecten zorgen. Bij een dubbellaagsfilter dient er rekening gehouden te worden met een extra, gesuspendeerde fase (antraciet). De belangrijkste onderzoeksvragen zijn: Wat is de menging tussen de lagen gedurende de verschillende spoelfasen? Wat zijn de maximale spoeldebieten zonder dat het filter 'weggeblazen' wordt? Hoe wordt de filteropbouw weer hersteld bij afname van het spoeldebiet? De te modelleren processen zijn: stroming van het mengsel water, zand en antraciet, eventueel in combinatie met een luchtstroming. Afhankelijk van de probleemstelling, is een driefasen- of vierfasen-model nodig. Dit kan Euler-Euler-Euler zijn of Euler-Lagrange. Het verschil tussen Euler-Euler en Euler-Lagrange wordt uitgelegd in 2.3.1. De verwachting is dat Euler-Lagrange eenvoudiger te implementeren is en de wisselwerking tussen zand en antraciet beter gemodelleerd kan worden. Dit kan vanwege rekentijden slechts voor een klein gedeelte van het filterbed worden uitgevoerd, en mogelijk alleen in 2D.

2.2.9 Invloed doppen

Het water en/of de lucht waarmee gespoeld wordt stroomt door spoeldoppen. Deze zijn in een regelmatig patroon geplaatst op de bodem van het filter, bijvoorbeeld met een hart-op-hart afstand van 10 cm. Er wordt aangenomen dat de stroming van het water/lucht-mengsel gerekend vanaf de doppen vrij snel homogeen verdeeld zal zijn over het filterbed (verdeling van bellen en snelheden). De belangrijkste onderzoeksvragen zijn: is de waterstroming uit de doppen al snel homogeen of ontstaan er recirculaties? De te modelleren processen zijn water-zand stroming, waarvoor een tweefasen model met water en zand nodig is. Dit kan eventueel aangevuld worden met een luchtfase.

2.2.10 Invloed bovenwaterstand

Het afgevoerde vuil uit het filterbed komt in het bovenwater en zal hier afgevoerd moeten worden naar de spoelgoten. Als dit niet effectief gebeurt kan er vuil achterblijven in het bovenwater. De onderzoeksvragen zijn: Hoe wordt het vuil uit de bovenwaterlaag afgevoerd? Hoe lang duurt het voordat al het vuil is afgevoerd? De te modelleren processen zijn: waterstroming en afvoer van vuildeeltjes. Hiervoor kan het tweefasen model van het filter gebruikt worden met daaraan toegevoegd het transport van passieve deeltjes.

2.2.11 Samenvatting te modelleren spoelprocessen

De processen zijn samengevat en geprioriteerd in Tabel 2.1. Op basis van deze prioritering en de mogelijkheden wat betreft modellering zal de focus worden gelegd op de voor- en naspoelfase en invloed van de bovenwaterstand voor een enkellaagsfilter. Voor de dubbellaagsfilters en lucht-water spoelingen is daarnaast ook geprobeerd om met CFD de stroming van drie fasen te simuleren. Daarnaast is in een proefinstallatie onder meer het effect van luchtspoelen onderzocht (zie 2.6).

Tabel 2.1 Overzicht van de relevante modelleringen tijdens de spoeling

Spoelproces	Modellering	Modeltype	Schaal	Prioriteit
Fase 1; Niveauverlaging	-			Niet relevant
Fase 2: Opbouwfase	W/Z	Euler-Euler	Hele zandbed	Laag
Fase 3: Voorspoelfase	W/Z, deeltjes	Euler-Euler	Hele zandbed	Hoog
Fase 4: Water-luchtspoelfase	L/Z	Euler-Euler	Hele zandbed	Hoog, maar lastig te modelleren
	L/W/Z	Euler(3x)	Hele zandbed	Laag
Fase 5: Luchtverdrijvingsfase	L/W/Z	Euler(3x)	Hele zandbed	Laag
Fase 6: Naspoelfase	W/Z, deeltjes	Euler-Euler	Hele zandbed	Hoog
Fase 7: Afbouwfase	W/Z	Euler-Euler	Hele zandbed	Hoog voor dubbellaags, maar lastig te modelleren
Invloed doppen	W/Z	Euler-Euler	Zandbed boven een paar doppen	Laag
Invloed bovenwaterstand	W, deeltjes	Euler	Bovenwater	Hoog
Gelaagd filter	W/Z1/Z2	Euler-Lagr	Gedeelte (evt. 2D), ~100 000 korrels	Hoog, maar lastig te modelleren
	L/Z1/Z2	Euler-Lagr	Gedeelte (evt. 2D), ~100 000 korrels	
	L/W/Z1/Z2	Euler(2x)-Lagr	Gedeelte (evt. 2D), ~100 000 korrels	

2.3 Modellering van spoelprocessen

Op basis van de ervaring met tweefasestromingen die opgedaan is in eerdere CFD-studies naar ontharding en plaatbeluchters [17], is gekozen om ook voor dit onderwerp voor het softwarepakket OpenFOAM te kiezen. OpenFOAM is een compleet CFD-pakket met wetenschappelijke onderbouwing en is ontwikkeld volgens het open-source principe.

Het open-sourcekarakter van het OpenFOAM-project maakt het toevoegen en aanpassen van modellen of modelstructuren mogelijk, en door het modulaire karakter van het pakket is het samenvoegen van verschillende fysische processen relatief eenvoudig. Van deze eigenschappen is gebruikgemaakt om de modellen te vormen die ontwikkeld zijn voor dit project.

Twee paden zijn ingeslagen om filterspoelcycli te modelleren: ten eerste is de aangepaste versie van de tweefasesolver *twoPhaseEulerFoam* [11], die oorspronkelijk is gebruikt en doorontwikkeld om onthardingsreactoren te simuleren [17], gewijzigd naar de eigenschappen van snelfilters en toegepast om waterspoeling te simuleren. Ten tweede is geïnventariseerd of een solver die relatief kort geleden is toegevoegd aan OpenFOAM, *multiphaseEulerFoam*, gebruikt kan worden om meer dan twee fasen te simuleren. Dit laatste is relevant om luchtspoelingen en spoelingen van dubbellaagsfilters te modelleren.

2.3.1 Tweefasenmodel

Er zijn twee mogelijkheden om de twee fasen te modelleren: Euler-Euler en Euler-Lagrange. In de Euler-Lagrangebenadering worden de deeltjesfase expliciet als losse deeltjes (puntmassa's) gesimuleerd, met numerieke benaderingen voor de interacties tussen deeltjes onderling (botsingen) en tussen de deeltjes en de vloeibare fase (drag). Een dergelijke simulatie zou verder inzicht kunnen geven in bijvoorbeeld het menggedrag van zand- en antracietkorrels tijdens een filterspoeling.

In het Euler-Eulermodel worden twee fasen elk als een soort vloeistof gemodelleerd, en worden twee massa- en impulsbalansen opgelost met impulsoverdracht tussen de fasen. In elke rekencel wordt de fractie van elke fase bijgehouden, en de fracties van beide fasen tellen op tot 1. Dit lijkt een goed compromis gebleken tussen de gedetailleerde beschrijving die geboden wordt door Euler-Lagrange- of DNS-modellen (Direct Numerical Simulation), die voor onze doeleinden te rekenintensief zijn, en de wat grovere benaderingen van bijvoorbeeld Mixture Models, waarvoor het gehele systeem met één enkele fase gemodelleerd wordt.

Voor de zandkorrels is uitgegaan van een soortelijke dichtheid van 2,700 kg/l. Voor turbulentie is het $k-\epsilon$ model gebruikt met een turbulente lengteschaal l van 1 cm. Deze parameter is gekozen op basis van de manier van instroom (doppenbodem), maar is (nog) niet gebaseerd op een model- of meetgegevens.

Ten behoeve van de reproduceerbaarheid van de resultaten zijn de randvoorwaarden en startcondities weergegeven in Tabel 2.2. De informatie in deze tabel en de bijbehorende uitleg is ter ondersteuning van het begrip van de technische achtergrond van het CFD-model en voor reproduceerbaarheid van de resultaten. Deze tabel is niet nodig voor een inhoudelijk begrip van de resultaten.

De begrenzingen (randen) van het domein zijn onderverdeeld in een inlet (vlak van instroom, in dit geval de doppenbodem), een of meerdere outlets (spoelgoten), en vaste wanden. De afkorting ZG staat voor *zeroGradient*, de randvoorwaarde dat de gradiënt van de betreffende parameter op nul wordt gezet.

Tabel 2.2 Randvoorwaarden voor spoelmodel (zie tekst voor uitleg)

	α_1	$\{k, \epsilon\}$	p	$\mathbf{U}_{\text{grind}}$	$\mathbf{U}_{\text{water}}$	T
Inlet	0	$\{k, \epsilon\}_{\text{init}}$	U -linked	(0, 0, 0)	$U_{\text{in}}(t)$	ZG
Wanden	ZG	ZG	U -linked	(0, 0, 0)	(0, 0, 0)	ZG
Outlet	IO	ZG	0	(0, 0, 0)	p -linked	IO
Startconditie	$\alpha_{1, \text{init}}$	$\{k, \epsilon\}_{\text{init}}$	0	(0, 0, 0)	(0, 0, 0)	T_{init}

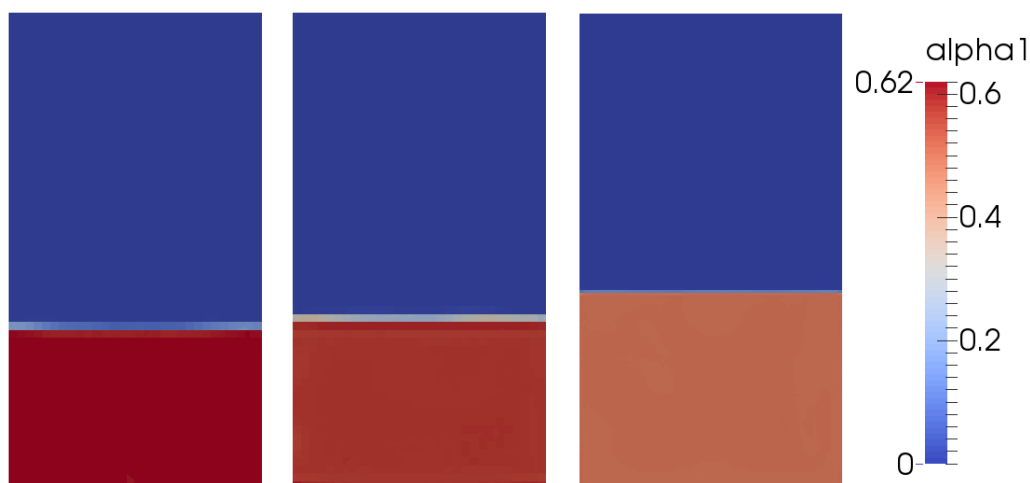
De parameters zijn de volgende:

- α_1 : de volumefractie van grind (fractie 1; water is fractie 2). Deze is bij de inlet op 0 gezet zodat alleen water binnenstroomt; verder is bij de outlet de *inletOutlet*-instelling gebruikt (IO, zie onderstaand). Daarnaast is binnen het domein een bepakkingslimiet van 0,62 ingesteld. Dat wil zeggen, de volumefractie van grind wordt beperkt tot die waarde (het overige volume bestaat uit de poriën, die in een vast bed ongeveer 38% van het volume innemen, en die in een natfilter gevuld zijn met water).

- k en ϵ : de turbulentieparameters. Deze worden ingesteld bij de bodem op basis van een turbulente lengteschaal van 1 cm en de maximale instroomsnelheid van het water tijdens de gesimuleerde spoelbeurt.
- p : de druk. Deze wordt op de inlet en wanden berekend op basis van het snelheidsveld (*fixedFluxPressure* in OpenFOAM). Met U -linked randvoorwaarde wordt daarom de snelheid op basis van het drukveld bedoeld. Als referentie wordt de druk op de outlet op 0 gezet.
- U_{grind} : de snelheid van de grindfase. Deze wordt op alle wanden op de nulvector ingesteld, zodat het grind het filter niet kan verlaten.
- U_{water} : de snelheid van de waterfase. De instroom volgt het ingestelde spoelschema, en bij de outlet wordt de functie *pressureInletOutletVelocity* gebruikt (p -linked), zodat de snelheid bij instroom wordt afgeleid van de flux van de aanliggende cel in de richting loodrecht op het oppervlak. Bij positieve uitstroom fungeert deze randvoorwaarde analoog aan *zeroGradient* (zie onder).
- T : de tracerconcentratie. Aan de waterfase is een passieve tracer toegevoegd om de beweging van (opgeloste) vervuilingstoffen te kunnen volgen. Bij de outlet is de *inletOutlet*-instelling gebruikt: dit fungeert bij uitstroom analoog aan *zeroGradient*, maar betekent bij instroom terug de reactor in (als de toevoer van water zeer laag is, is het mogelijk dat er rondom de outlet circulatiestromen ontstaan) dat er tracerloos water terugstroomt. Oftewel, de 'tracer massa' die het gesimuleerde domein verlaat, is permanent verdwenen.

2.3.2 Proof-of-concept: verticale uitstroom

Om het model te beproeven zijn simulaties uitgevoerd met een simpele benadering van een filter als een balk van (3,2x3,2x6) m. Het filterbed is initieel 2 m hoog. Voor dit conceptmodel is de wateruitstroom verticaal. Het rekenrooster bestaat uit 54000 cellen. Het filtermateriaal bestaat in deze simulaties uit bolvormige grindkorrels met een diameter van 2 mm, tenzij anders aangeduid.

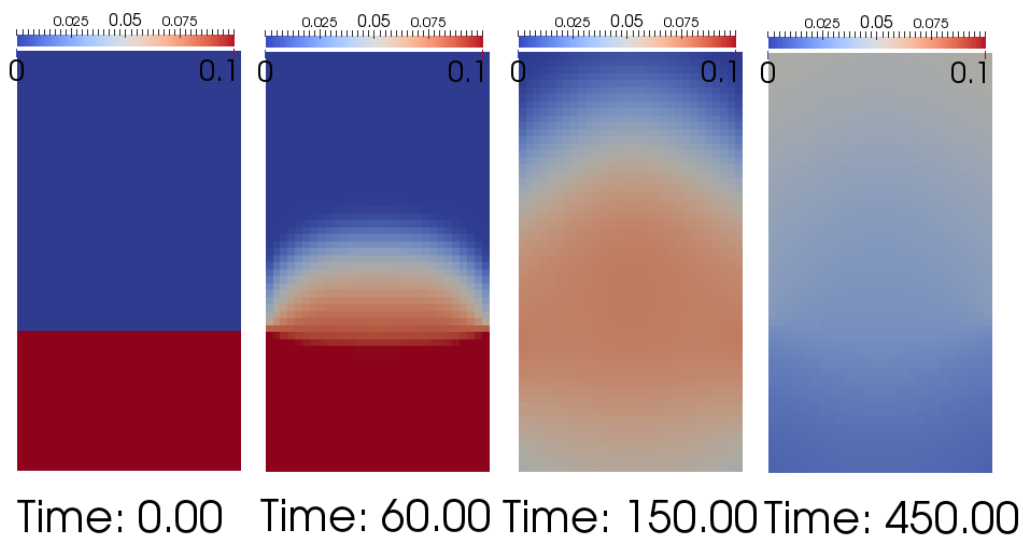


Figuur 2.3 Bedexpansie voor modelfilters. Getoond zijn doorsnedes van het volledige 3D-model. Links: 2 mm grindkorrels; 40 m/h waterinvoer; midden: 2 mm grindkorrels; 80 m/h waterinvoer; rechts: 0,7 mm grindkorrels, 40 m/h waterinvoer.

In Figuur 2.3 wordt de bedexpansie getoond van drie verschillende simulaties. Te zien valt dat het bed bijna niet expandeert bij een spoelsnelheid van 40 m/h (links), maar dat bij 80 m/h een expansie van ongeveer 5% plaatsvindt (midden). Bij kleinere grindkorrels (0,7 mm, rechts) is er al bij 40 m/h een expansies van ongeveer 23% zichtbaar. Dit komt grofweg

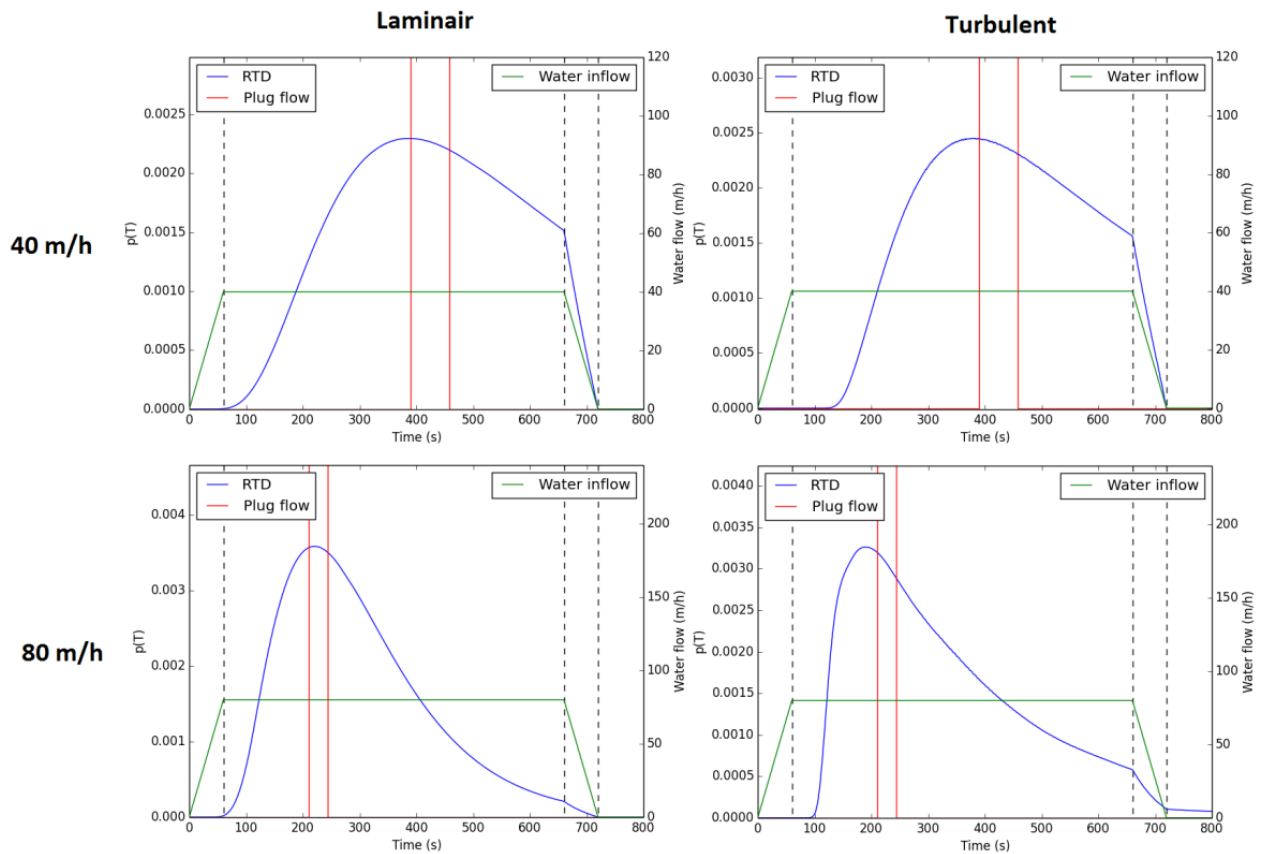
overeen met de resultaten die bij Vitens zijn uitgevoerd naar de expansie van onthardingskorrels [22].

Om de verwijdering van vervuiling uit het filterbed te simuleren is er een tracer toegevoegd die bij aanvang van de simulatie homogeen over het filterbed verdeeld is. Deze tracer beweegt mee met de waterfase, en aan de hand van de hoeveelheid uitstromende tracermassa wordt bepaald hoe lang het duurt om de vervuiling uit het gesimuleerde domein te spoelen. Deze benadering is geldig zolang de deeltjes kleiner zijn dan 50 μm (zie 2.6.5). De spoelcyclus die gesimuleerd is bestaat uit een lineaire opvoer van de instroom van nul tot de maximale spoelsnelheid, waarna tien minuten lang die snelheid aangehouden wordt, waarna deze weer lineair tot nul wordt afgebouwd over een minuut.



Figuur 2.4 Verwijdering van een tracer uit het filterbed met een maximale spoelsnelheid van 40 m/h (doorsneden van 3D-model), 2 mm grindkorrels. De eenheid van de tracerconcentratie is arbitrair gekozen.

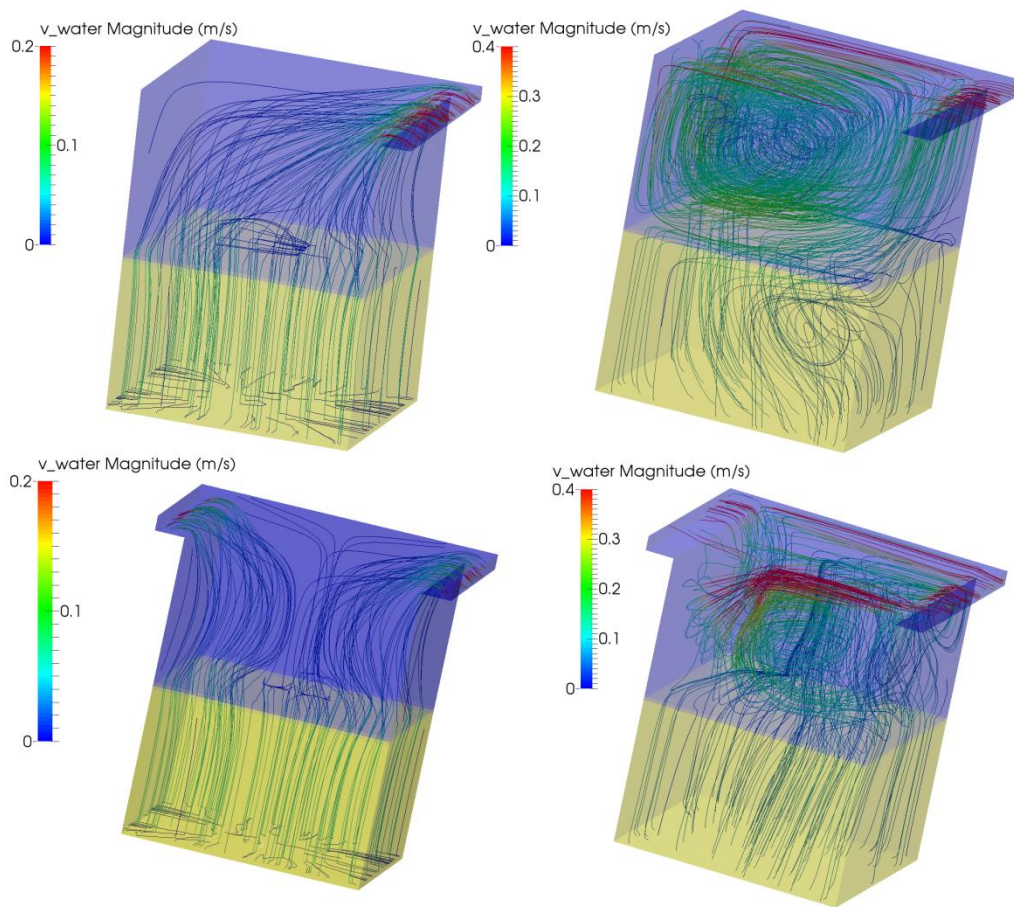
In Figuur 2.4 worden vier momentopnames weergegeven van de tracerconcentratie over het gehele domein. De tracer verspreidt zich langzaam over het domein en verdwijnt aan de bovenkant uit de simulatie. De massa die hiermee verdwijnt is weergegeven in Figuur 2.5 voor twee verschillende stroomsnelheden en turbulentie-eigenschappen. Bij deze simulaties is er weinig verschil tussen laminaire en turbulente stroming qua verwijdering, mogelijk komt dit door de vereenvoudigde en symmetrische geometrie.



Figuur 2.5 Verbliftijden van die tracer die aan het begin van de simulatie homogeen over het filterbed verdeeld is (2 mm grindkorrels). De verblijftijdsspreiding is in blauw weergegeven; het rode blok geeft de theoretische spreiding bij propstroom aan en de groene plot geeft het spoelprogramma weer.

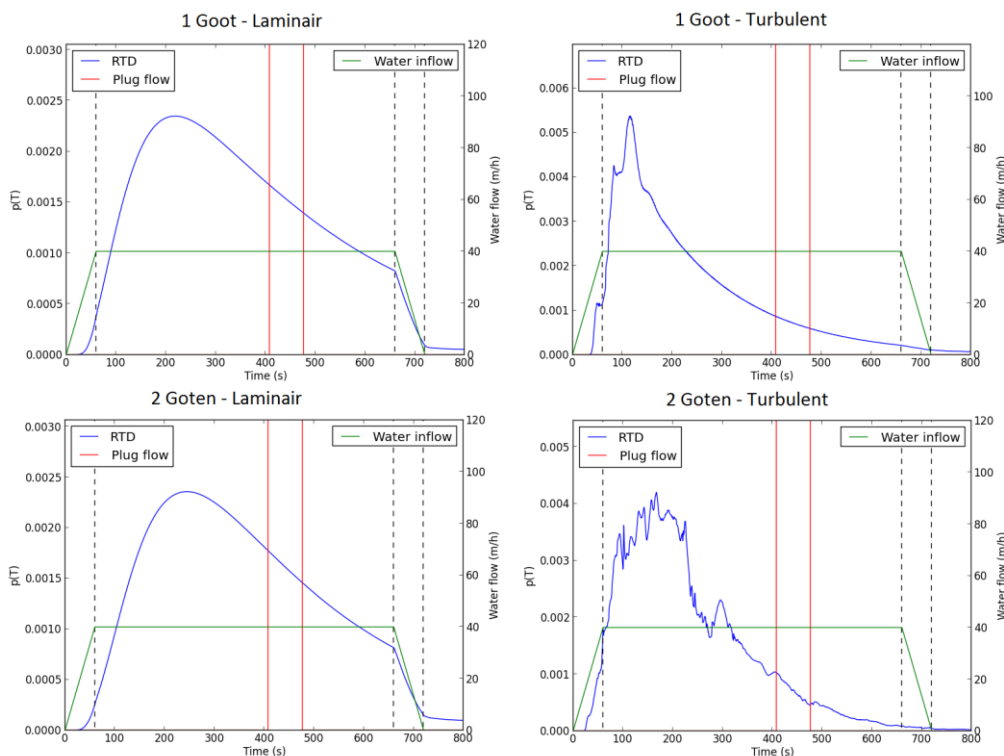
2.3.3 Spoelgoten

Bij een filterspoeling stroomt het water niet verticaal een filter uit, maar stroomt het uit de overstortgoot/-goten weg. Om een dergelijke goot accuraat te simuleren zou een derde fase aan het model toegevoegd moeten worden, namelijk de lucht die boven de filter en de goot hangt. Dit zou echter de complexiteit van het model aanzienlijk verhogen, en daarmee de reken- en onderzoeksduur vergroten. Om dit te vermijden wordt een goot gemodelleerd als een balk van enkele gridcellen hoog (wat in dit geval correspondeert met 20 cm) waarboven een vast 'waterplafond' hangt. Het water stroomt in dit model dus niet als gevolg van zwaartekracht over een stortgoot, maar wordt via een balkvormige pijp horizontaal uit de filter geleid. Deze modelfilters zijn 4 m hoog (plus 20 cm voor de overstort), en zijn verder identiek aan de modellen met verticale uitstroom.



Figuur 2.6 Stroomlijnen van de waterfase voor één en twee spoelgoten met laminaire stroming (links) en turbulente stroming (rechts) bij een waterinvoer van 40 m/h. Vooral het stroompatroon bij twee goten en turbulente stroming (rechtsonder) is slechts een momentopname: deze is constant aan verandering onderhevig.

In Figuur 2.6 worden de stromingspatronen getoond tijdens simulaties met laminaire en turbulente stromingskarakteristieken. Hieruit valt op te maken dat de turbulentie die verwacht wordt tijdens een filterspoeling een groot effect heeft op het stromingspatroon in de bovenwaterstand. Zeker bij één spoelgoot worden er grote circulatiestromen waargenomen in de z-richting boven het filterbed (Figuur 2.6, rechtsboven) aan de overkant van de goot. Dit wordt weerspiegeld in de verblijftijdspreiding (Figuur 2.7): na toevoeging van turbulentie ontstaat er een dode zone in de bovenwaterstand aan de overkant van de goot, waardoor de tracer eerder uit het domein verdwijnt (omdat een deel van het volume (bijna) niet bezocht wordt door het spoelwater duurt het minder lang om de goot te bereiken). Dit zou in de praktijk betekenen dat er minder lang gespoeld hoeft te worden om vervuiling uit het filterbed te halen, maar dat eventuele vervuiling die in de bovenwaterstand bestaat, of daar door een luchtspoeling terecht is gekomen, niet verwijderd wordt. Hierbij moet wel vermeld worden dat in dit proefmodel een zeer grote bovenwaterstand is aangenomen (2 m). Bij twee spoelgoten is dit effect bij dit fictieve filter niet zichtbaar: het stromingspatroon is niet continu gelijk zodat het gehele volume bezocht wordt (Figuur 2.6, rechtsonder) en de verblijftijdspreiding van de passieve tracer wijkt minder sterk af van het laminaire geval (Figuur 2.7, onder).



Figuur 2.7 Gesimuleerde verblijftijdsspreidingen van een tracer die initieel homogeen over het filterbed verdeeld is en over 1 (boven) of 2 goten (onder) geleid wordt onder laminaire (links) en turbulente condities (rechts). De verblijftijdsspreiding is in blauw weergegeven; het rode blok geeft de theoretische spreiding bij propstroom aan en de groene plot geeft het spoelprogramma weer.

2.4 Overige modellen

Er zijn nog enkele andere modellen getest om een filterspoeling te simuleren. Deze brachten (nog) geen goed resultaat, maar worden hier ter volledigheid van de rapportage kort behandeld.

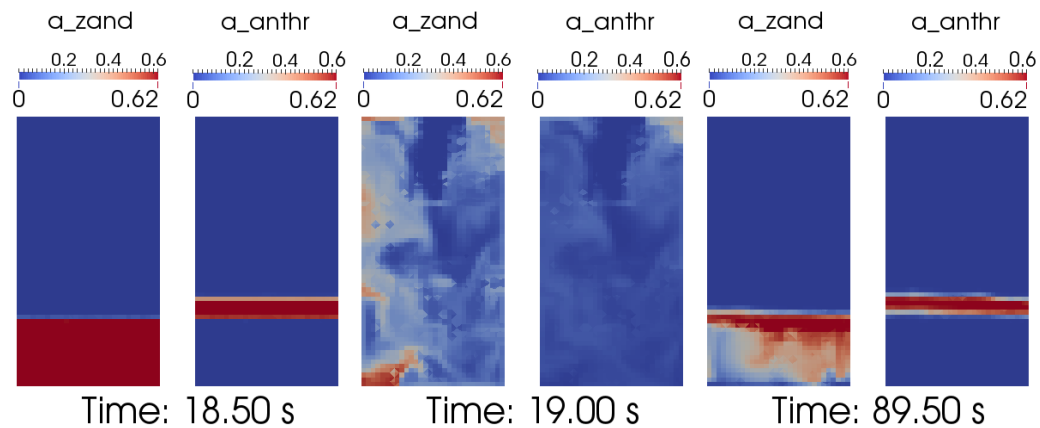
2.4.1 Meerfasenmodel

Om de stroming van meerdere vaste fasen (bijvoorbeeld een zand- en antracietlaag) accuraat te simuleren, evenals een enkellaags filter met lucht/water spoeling, is het noodzakelijk om het tweefasemodel uit te breiden tot meerdere fasen. In de nieuwere versies van OpenFOAM¹ bestaat deze functionaliteit; echter is de bepakkingslimiet niet geïmplementeerd. Deze is nodig om de volumefractie van de vaste fasen te beperken, want een significant deel van het filterbed wordt ingenomen door de poriën tussen de korrels.

In een poging om toch een bruikbaar meerfasenmodel te verkrijgen is het model *multiphaseEulerFoam* uitgebreid met een bepakkingslimiet uit een eerdere versie van *twoPhaseEulerFoam*, met aangepaste termen voor de toegevoegde fasen. Het resultaat is echter niet zoals verwacht (Figuur 2.8): in elke geteste configuratie levert dit model resultaten op waaraan geen fysische interpretatie kan worden gegeven en welke volstrekt niet aannemelijk lijken.. De precieze oorzaak hiervan is onbekend, maar heeft waarschijnlijk te maken met de interactie tussen de implementatie van de bepakkingslimiet en de rest van het meerfasenmodel. Op het voornaamste internetforum voor OpenFOAM is een vraag

¹ Voor dit werk is OpenFOAM 2.3.x gebruikt

uitgezet over dit probleem[23], maar daarop is ten tijde van schrijven geen respons ontvangen.



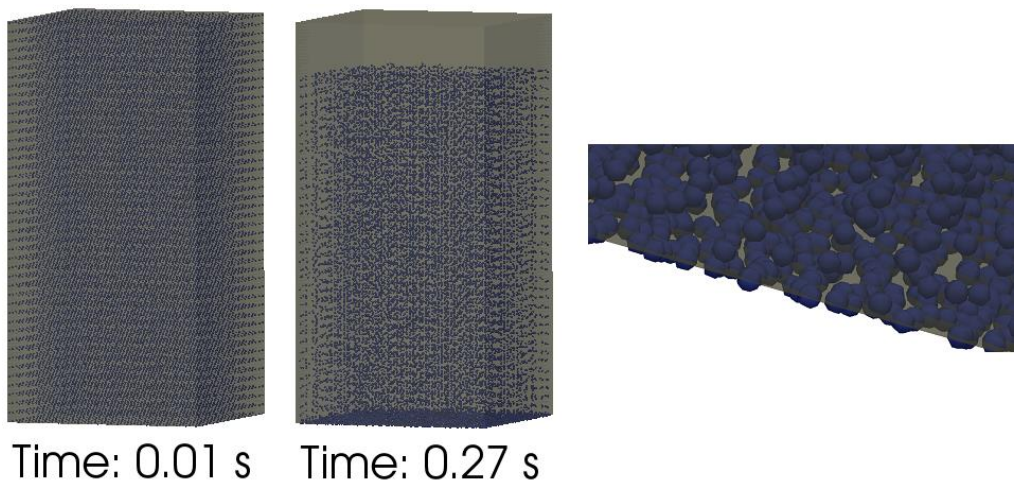
Figuur 2.8 Doorsnedes van een testsimulatie van een filter met dimensies (3,2x3,2x6.0) m, met een laag zand (1,5 mm) en daarbovenop antraciet (3 mm). Getoond zijn de volumefracties van zand en antraciet, het overige volume wordt ingenomen door water. Na een periode van fysisch plausibel gedrag treedt er een sterk afwijkende gebeurtenis op (hier tussen 18,5 s en 19 s). Ook de eindsituatie is niet meer plausibel, gegeven het gebrek aan zand op de bodem.

2.4.1.1 Euler-Lagrange

Er is een prototypemodel gemaakt voor de Euler-Lagrangebenadering waarin de deeltjesfase expliciet als losse deeltjes (puntmassa's) gesimuleerd wordt, met numerieke benaderingen voor de interacties tussen deeltjes onderling (botsingen) en tussen de deeltjes en de vloeibare fase (drag). Een dergelijk simulatie zou verder inzicht kunnen geven in bijvoorbeeld het menggedrag van zand- en antracietkorrels tijdens een filterspoeling.

In het gevormde model zakken 18.000 zandkorrels simpelweg in onder invloed van de zwaartekracht in een met water gevuld bed (Figuur 2.9). Het simuleren van 0,27 s met een tijdsstap van 0,5 ms duurde met een moderne rekencomputer² 86 uur. Aangezien de benodigde simulatietijd om (de belangrijkste aspecten van) een filterspoeling goed in het model te vangen meerdere ordes van grootte hoger ligt, werd het niet praktisch geacht om dit model verder te ontwikkelen voor dit project.

² HP Z820 2x6c E5-2640 workstation met 64 GB RAM



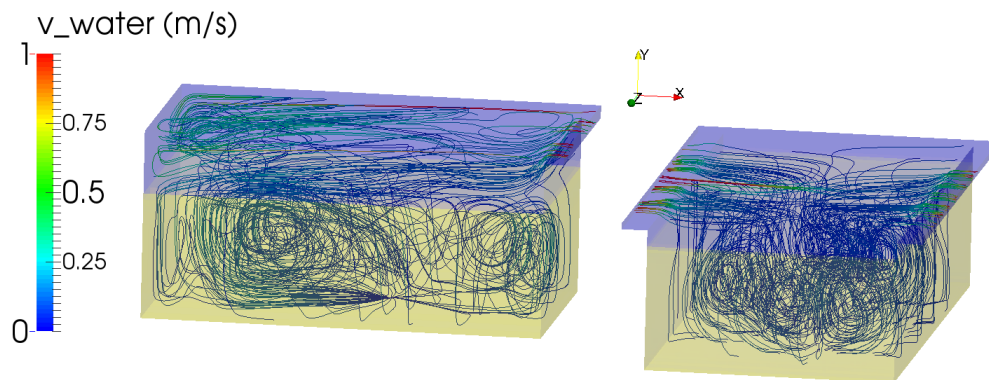
Figuur 2.9 Euler-Lagrangemodel met 18.000 zandkorrels (1.2 mm) in een stilliggend waterbassin van (100x100x200) mm. De deeltjes zakken onder invloed van de zwaartekracht naar de bodem. Rechts valt te zien dat de korrels kunnen overlappen en door elkaar kunnen bewegen. Dit kan omdat ze gemodelleerd worden als puntmassa's.

2.5 Validatie model met praktijkdata

Om het filterspoelmodel te valideren zijn modelresultaten vergeleken met experimentele resultaten. De experimentele gegevens zijn door Vitens aangeleverd en betreffen gegevens van de snelfilters in Harderbroek en Zoelen [7].

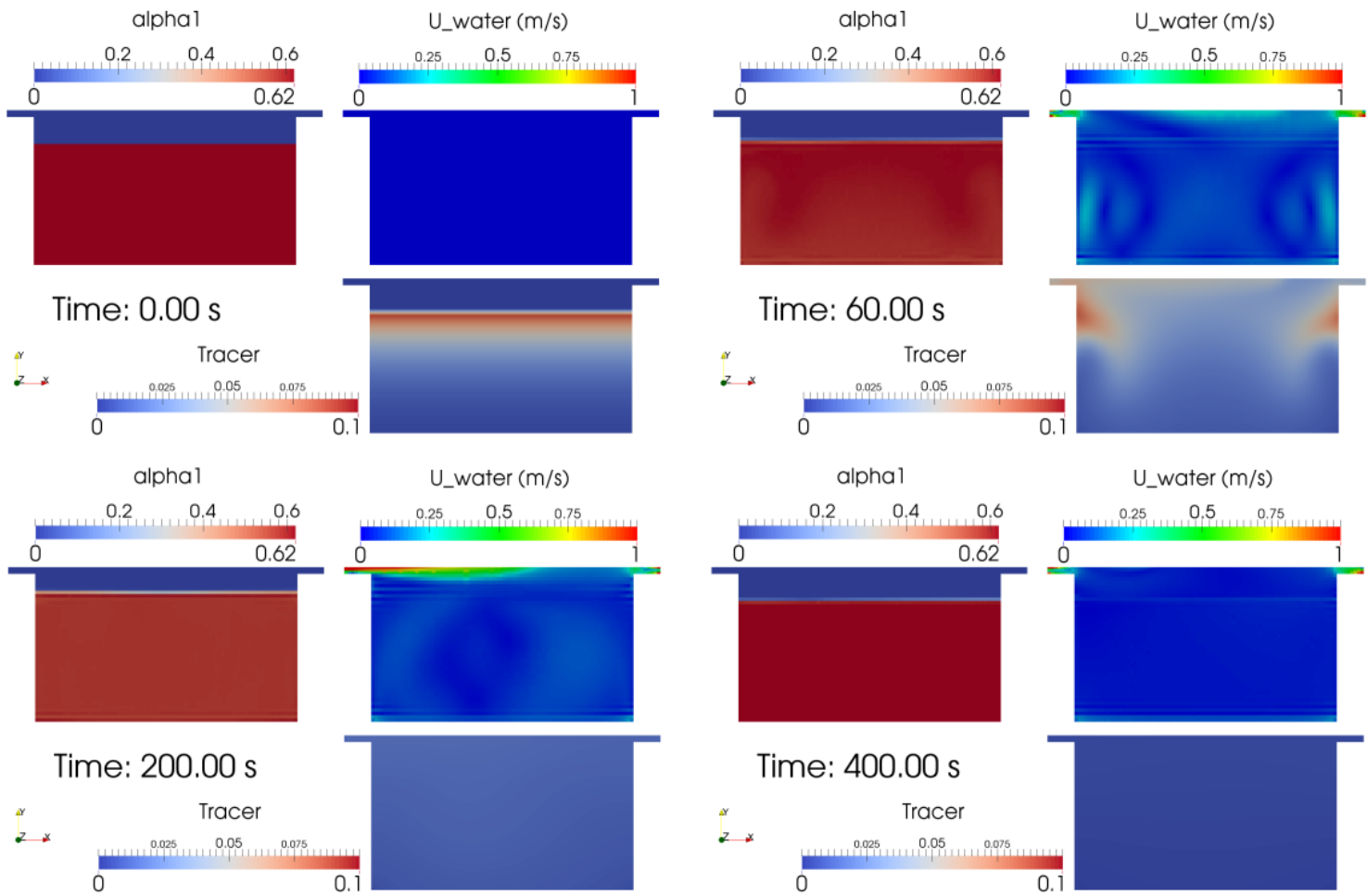
De snelfilters in Harderbroek zijn (6.25x3.85x2.75) m groot met een (vast) filterbed van 2 m hoog. De grindkorrels zijn (0.8-1.25) mm groot; in het model is een homogene dispersie van deeltjes met een diameter van 1 mm aangenomen. Aan de korte zijde zit aan één kant een spoelgoot (Figuur 2.10, links). Tijdens het experiment werden drie spoelsnelheden gebruikt: eerst werd gespoeld met 25 m/h, daarna een periode met 12.5 m/h en tenslotte een blok met 41.7 m/h. Het rekenrooster voor het CFD-model bestaat uit ca. 76000 cellen, met een spoelgoot van 20 cm hoog, waardoor het gehele domein 2.95 m hoog is.

De filters in Zoelen zijn (7.9*3.9*2.2) m groot met een filterbedhoogte van 1.8 m: 1 m zand van (0.8-1.2) mm met daarop 0,8 m hydroantraciet van (1.4-2.5) mm. Omdat het CFD-model slechts één grindfase kan simuleren is dit voor de simulaties gehomogeniseerd tot een enkele fractie met een diameter van 1.5 mm. De filters hebben aan beide lange kanten spoelgoten (Figuur 2.10, rechts). Het CFD-model beschrijft ca. 625000 gridcellen; voor deze locatie kon een hogere spatiale resolutie worden toegepast omdat de gebruikte spoelprogramma's significant korter waren dan het lange programma toegepast in Harderbroek. Door deze hogere resolutie kon de hoogte van de spoelgoot beperkt worden tot 10 cm.

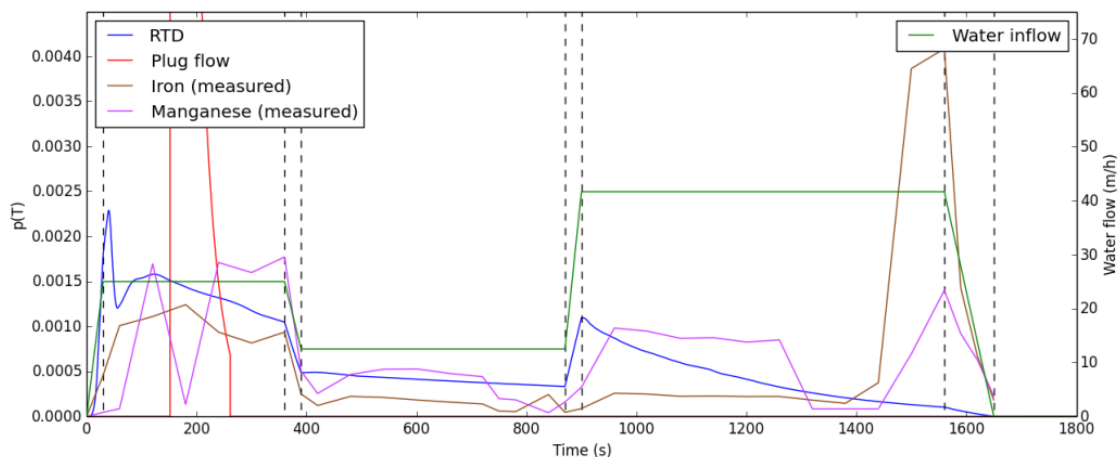


Figuur 2.10 Momentopnames van de stromingspatronen voor de snelfilters in Harderbroek (links) en Zoelen (rechts).

Beide experimenten zijn gekoppeld aan CFD-simulaties. Voor beide modellen is de vervuiling gemodelleerd door een passieve tracer die initieel verdeeld is volgens een exponentieel verval als functie van de afstand tot de bovenkant van het filterbed, met een karakteristieke afstand van 50 cm (op 50 cm is de concentratie 37% van die van bovenin). Dit is zo gekozen omdat de verwijdering van bijvoorbeeld ijzer voornamelijk bovenin het filterbed plaatsvindt (bijv. [1]), waardoor het merendeel van de vervuiling daar verwacht wordt aan het einde van een filterloop.



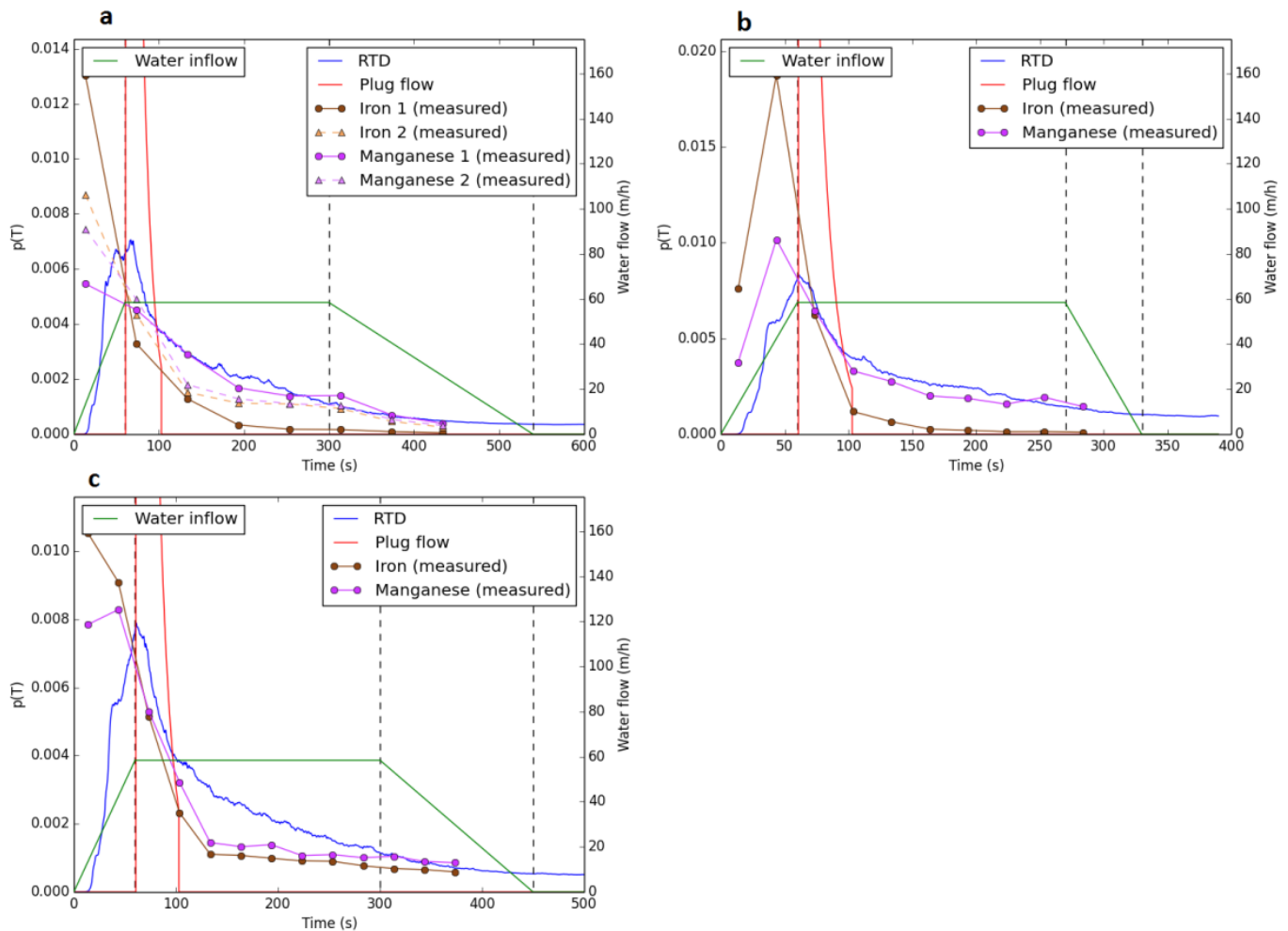
Figuur 2.11 Dwarsdoorsnedes van momentopnames van het model van de eerste meetreeks in Zoelen. Steeds wordt linksboven de volumefractie van zand getoond, met rechtsboven de absolute snelheid van het water en rechtsonder de tracer in een arbitraire eenheid. De tracer is bij aanvang van de simulatie vooral bovenin het filterbed aanwezig is (zie tekst) en wordt daarna weggespoeld. Vergelijk met Figuur 2.13a.



Figuur 2.12: Verblijftijdsspreiding van vervuiling in het model (blauw) samen met metingen aan ijzer (bruin) en mangaan (paars) uit Harderbroek, met het spoelprogramma weergegeven in groen. De gemeten ijzer en mangaanwaarden zijn genormaliseerd (zodat het oppervlakte onder de grafiek 1 is). De rode plot geeft de verwachte verblijftijdsspreiding voor propstroom aan voor de initiële verdeling van vervuiling in het model (zie tekst).

De modelresultaten voor Harderbroek komen niet helemaal overeen met de experimentele data (Figuur 2.12). De gemodelleerde en gemeten curves zijn genormaliseerd zodanig dat het oppervlakte onder de grafiek gelijk is aan 1. Het globale verloop van de ijzer- en mangaancurves valt te herkennen in de verblijftijdsspreiding van het model, maar enkele pieken in de plots wijken af. Vooral de piek in zowel ijzer als mangaan aan het einde van de meetreeks wordt niet verklaard door het model. De oorzaak van deze piek is bij ons onbekend.

De experimenten in Zoelen bestaan uit twee reeksen: voor de eerste reeks (Figuur 2.13a) werden twee identieke waterspoelingen toegepast, met daartussenin een luchtspoeling. De tweede reeks verliep eveneens zo, maar hierbij waren de waterspoelingen niet identiek. Figuur 2.13b toont de eerste spoeling tijdens deze reeks en Figuur 2.13c de tweede spoeling. De gemodelleerde uitspoelcurve lijkt de curve van gemeten mangaan goed te volgen en in mindere mate die van ijzer. Verschil in dichtheden van mangaan en ijzerdeeltjes zijn niet meegenomen, omdat aangenomen is dat het merendeel van de deeltjes zo klein is dat dit effect klein is. Mogelijk dat de aangenomen verdeling in het filterbed na filtratie volgens de e-macht beter past bij die van mangaan dan die van ijzer, omdat mangaan meestal dieper in het bed wordt verwijderd. De aangenomen karakteristieke afstand van 50 cm in het model is wellicht te groot voor ijzer. Uit het BTO onderzoek 'onderste korrel boven' blijkt bijvoorbeeld dat in de eerste 50 cm 95% van het ijzer wordt verwijderd [14].



Figuur 2.13: Verblijftijdsspreiding van vervuiling in het model (blauw) voor Zoelen, samen met metingen aan ijzer (bruin) en mangaan (paars). Het spoelprogramma is weergegeven in groen. De rode plot geeft de verwachte verblijftijdsspreiding voor propstroom aan voor de initiële verdeling van vervuiling in het model (zie tekst). **a:** resultaten voor de eerste reeks aan experimenten, waar twee keer achter elkaar werd gespoeld volgens een identiek patroon, onderbroken door een luchtspoeling. De tweede reeks metingen is in stippellijnen weergegeven. **b:** resultaten voor de eerste spoeling in de tweede reeks experimenten. **c:** resultaten voor de tweede spoeling uit de tweede reeks experimenten.

2.6 Experimenten op proefinstallatie-schaal

2.6.1 Inleiding

Naast de modellering zijn experimenten uitgevoerd op proefinstallatieniveau. Hiermee is het effect van de duur en de intensiteit van het spoelen met lucht op het loskomen van ijzer en mangaandeeltjes onderzocht.

2.6.2 Experimentele opzet

Het filtermateriaal uit de dubbellaags snelfilters van Velddriel is gebruikt in het experiment. Tijdens het vervangen van het filtermateriaal in Velddriel, is er materiaal uit 10 lagen over de hoogte verzameld. Voor iedere laag van 25 cm zijn er twee emmers verzameld (zie Figuur 2.14). Er zijn drie emmers gebruikt voor de experimenten: (1) de bovenste laag (0-25 cm) welke de antracietlaag wordt genoemd, (2) de laag iets boven het midden (75-100cm) welke de menglaag wordt genoemd en de onderste laag (175-200 cm), dit is de zandlaag.

Een kolom van 12 cm diameter is over een hoogte van 0.75m gevuld met hetzelfde materiaal (dus materiaal uit een van de lagen). Onderin de kolom is 1 filterdop geplaatst waarmee met lucht of water gespoeld kan worden. De kolom is vervolgens met verschillende luchtsnelheden gespoeld (oplopend van 30 m/h naar 60 m/h en tenslotte 80 m/h). Tussendoor is het losgemaakte materiaal weggespoeld met een waterspoeling van 60 m/h. Hiervan zijn monsters genomen om de ijzer, mangaan en silicium gehaltes te bepalen (na 0, 0.5, 1, 2, 3 en 5 minuten). Naast het laten oplopen van de luchtspoeling in stappen is met een nieuwe batch filtermateriaal uit dezelfde laag ook direct met een spoelsnelheid van 80 m/h gespoeld. Hiermee wordt onderzocht of er in stappen evenveel loskomt als dat er direct met de hoge luchtsnelheid wordt gespoeld.



Figuur 2.14 Overzicht van de emmers met filtermateriaal uit Velddriel

Kolomdiameter	12 cm
Dichtheid nat zand	2000 kg/m ³
Porositeit	0.38
Hoogte	1.5 m
Hoogte bed	0.75 m
Volume nat zand	8.4823 L
Volume water kolom	11.70557 L
Gewicht	16.9646 kg
Bruto benodigd	18.66106 kg
Max. spoelsnelheid water	60 m/h
Max. spoelsnelheid lucht	80 m/h
Max. debiet water	0.68 m ³ /h
Max. debiet lucht	0.90 m ³ /h
Spoelsnelheid (m/h)	Verblijftijden kolom
20	3.645
40	1.8225
60	1.215
80	0.91125



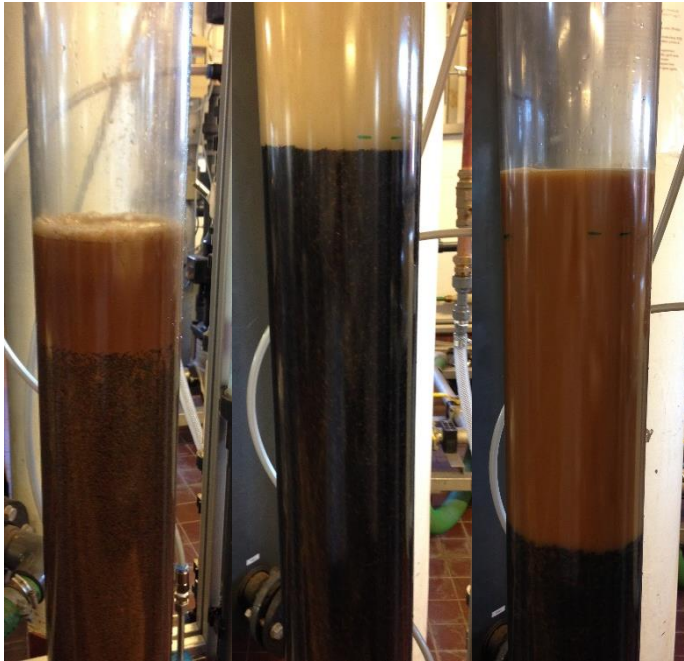
Figuur 2.15 Experimentele opstelling: eigenschappen van de kolom en foto van de opstelling (voor de experimenten is 1 kolom gebruikt).

Naast monsters voor ijzer, mangaan en siliciumanalyses is de bedexpansie gemeten tijdens het spoelen en zijn er zeefkrommes genomen voor de spoeling. De analyses zijn uitgevoerd door het laboratorium van Vitens. Daarnaast zijn er verzamelmonsters (van 1L) genomen voor deeltjestellingen. Om te voorkomen dat de deeltjesteller vastloopt zijn deze monsters verdund met een factor 10.

Een overzicht van de geplande experimenten en gegevens van de kolom staan in Figuur 2.16.

Figuur 2.16 Uitgevoerde experimenten in de filterkolom

2.6.3 Visuele resultaten



Figuur 2.17 Foto's gedurende het experiment: na vullen kolom met filtermateriaal (links), na 5 minuten spoelen met water (midden) en na 15 minuten spoelen met lucht (rechts). De donkere laag is het filtermateriaal, de lichtbruine laag is een waterlaag met afgespoeld vuil uit het filter.

Filtermateriaal

Visuele inspectie van het filtermateriaal laat zien dat het bed al erg gemengd is. Zowel zandkorrels als antracietkorrels lijken in alle lagen voor te komen. De bovenste laag heeft duidelijk een bruine kleur, terwijl de andere lagen een zwarte kleur hebben.

Waterspoeling

Tijdens de waterspoeling komt het bed in expansie en is de beweging van de deeltjes goed te zien. Het water boven het filter wordt meteen bruin, wat vervolgens langzaam uitgespoeld wordt. Na 5 minuten is het water nagenoeg helder geworden en lijkt er weinig meer los te komen (Figuur 2.17 in het midden). Bij de antracietlaag was dit anders, daar moest er tenminste 10 minuten gespoeld worden voordat het water helder werd. Na afloop van de spoeling zakt het bed weer in, maar is de bedhoogte wel groter dan na vullen (zo'n 5-10% meer).

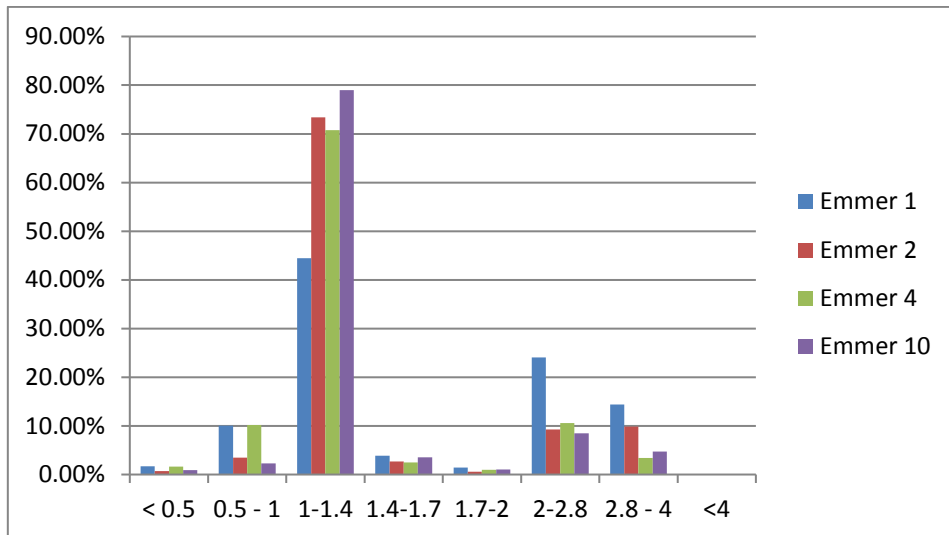
Luchtspoeling

Tijdens de luchtspoeling wordt het filtermateriaal bovenop het filter omhoog gespoten en zakt het weer in. Dit ziet er erg dynamisch uit. In het filter lijken de filterkorrels weinig te bewegen en stroomt de lucht er als het ware tussendoor. Er is geen bedexpansie tijdens de luchtspoeling omdat het bed veel te zwaar is om omhoog geduwd te worden door de lucht. Pas in het bovenste laagje wordt er materiaal met een hoge snelheid omhoog geduwd. Na de luchtspoeling is het water bruin geworden (Figuur 2.17).

2.6.4 Resultaten zeefkrommen

De zeefkrommen zijn weergegeven in Figuur 2.18. Emmer 1 is de antracietlaag, emmer 2 de laag daaronder. Emmer 4 de menglaag en emmer 10 de zandlaag. De zeefkrommen zijn bepaald na drogen. De hoeveelheid droge stof is gelijk aan: 78% voor emmer 1, 85% voor

emmer 2, 86% voor emmer 4 en 10. De deeltjesgrootteverdeling is in laag 2-10 nagenoeg hetzelfde, wat het beeld bevestigt dat het bed gemengd is. Alleen de bovenste laag heeft iets meer grote deeltjes.



Figuur 2.18 Zeefkrommen, emmer 1 is bovenste antracietlaag (0-25 cm), emmer 2 de laag daaronder (25-50 cm), emmer 4 de menglaag (75-100 cm) en emmer 10 de zandlaag (175-200 cm)

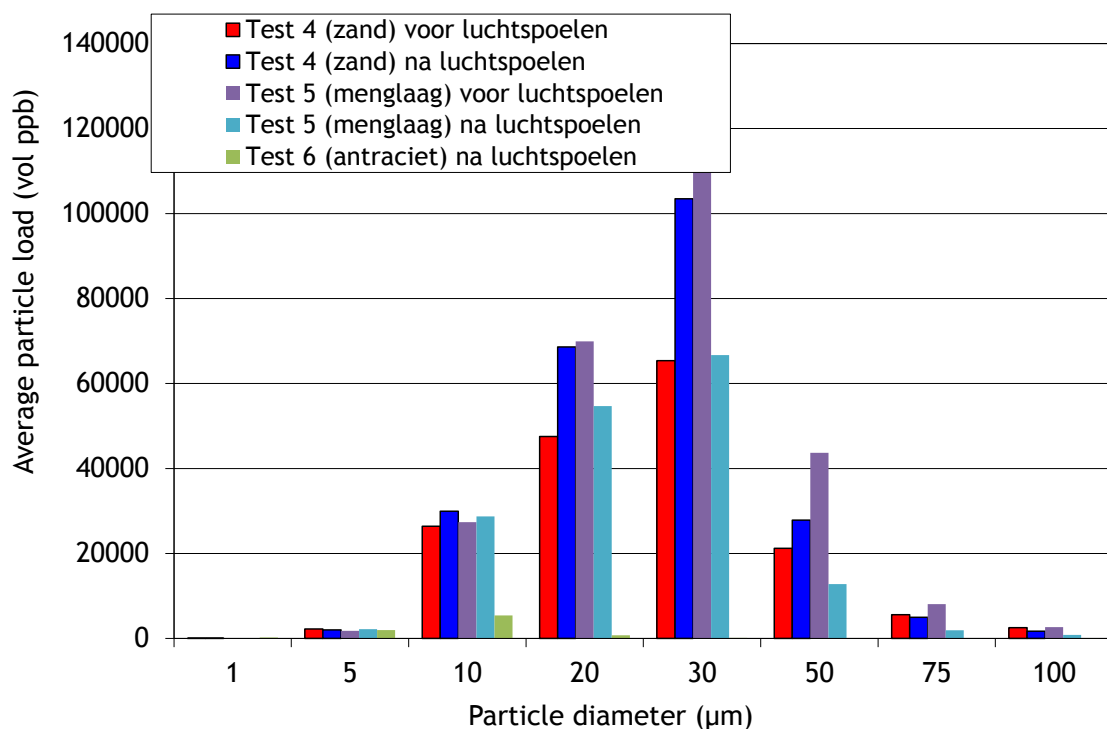
2.6.5 Resultaten deeltjestelling

De resultaten van de deeltjestellingen van het uitgespoelde materiaal zijn weergegeven in Figuur 2.19. Voor de klasse van 100µm geldt dat hierin alle deeltjes zitten van 100µm en groter. Voor de klasse van 1µm geldt dat hierin alle deeltjes zitten kleiner dan 1µm. De deeltjestelling is achteraf gedaan met een monster van 1L. Deze is verzameld tijdens de waterspoeling van het filter. Na het vullen van het materiaal is er een waterspoeling gedaan om het loszittend vuil te verwijderen, aangegeven als de deeltjestelling voor luchtspoelen. De deeltjestelling na luchtspoelen is van het monster dat verzameld is tijdens de waterspoeling na een luchtspoeling van 80 m/h. De deeltjesverdeling in de zandlaag en menglaag laat min of meer hetzelfde beeld zien. De deeltjestelling van het spoelwater in de antracietlaag laat een heel ander beeld zien dan dat van de andere lagen: er zijn veel meer deeltjes van 1 µm, en veel minder deeltjes van 10 µm en groter. Vanwege het geringe volume van deze kleine deeltjes is dit niet goed zichtbaar in Figuur 2.19 (resultaten van deeltjestelling als aantal deeltjes zijn weergegeven in de Bijlage I). De verschillen tussen voor en na het luchtspoelen lijken klein. Na de luchtspoeling is de deeltjesgrootteverdeling van de uitgespoelde deeltjes vergelijkbaar met die van direct na de eerste waterspoeling.

Tabel 2.3 Overzicht valsnelheid deeltjes voor verschillende deeltjesgroottes volgens Grace (1986).

Uitgaande van een dichtheid van de deeltjes van 2300 kg/m³, gemeten voor materiaal op locatie Engelse Werk

Diameter deeltje	100 µm	75 µm	50 µm	30 µm	20 µm	10 µm	5 µm	1 µm
Valsnelheid [m/h]	24	14	6.3	2.3	1.0	0.26	0.064	0.003



Figuur 2.19 Deeltjestellingen van het spoelwater, voor en na het spoelen met 80 m/h lucht.

De valsnelheden van de verschillende deeltjesgroottes zijn weergegeven in Tabel 2.3. Bij een deeltjesgrootte van 50 µm begint de valsnelheid van het deeltje relevant te worden (zo'n 10% van de gemiddelde stroomsnelheid van het water). Bij deeltjesgroottes van 30 µm en kleiner zal het deeltje grotendeels meebewegen met de waterstroom. Dit geldt voor het grootste gedeelte van de deeltjes.

2.6.6 Resultaten bedhoogtes

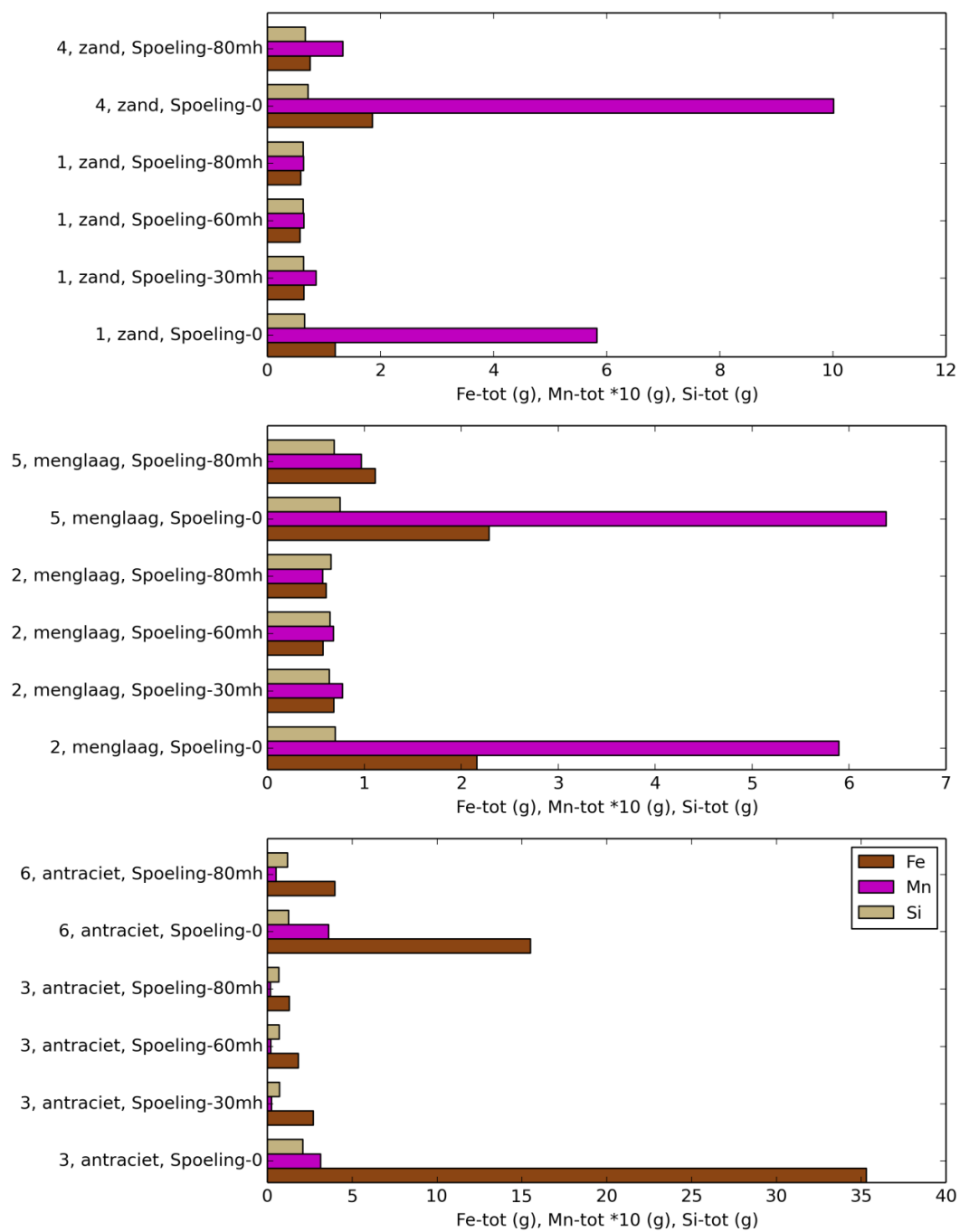
Alle experimenten laten een vergelijkbaar beeld zien wat betreft bedhoogtes. Na het vullen van de filterkolom met filtermateriaal is de bedhoogte 70 cm. Gedurende het spoelen met 80 m/h loopt de bedhoogte op tot 88 cm. Deze zakt na de waterspoeling in tot 79 cm. Tijdens de luchtspoeling wordt er filtermateriaal omhoog gespoten tot een hoogte van 110 cm. Na de luchtspoeling zakt het bed terug tot een hoogte van 74 cm. De snelheid van de luchtspoeling lijkt hier weinig effect op te hebben.

2.6.7 Resultaten analyses

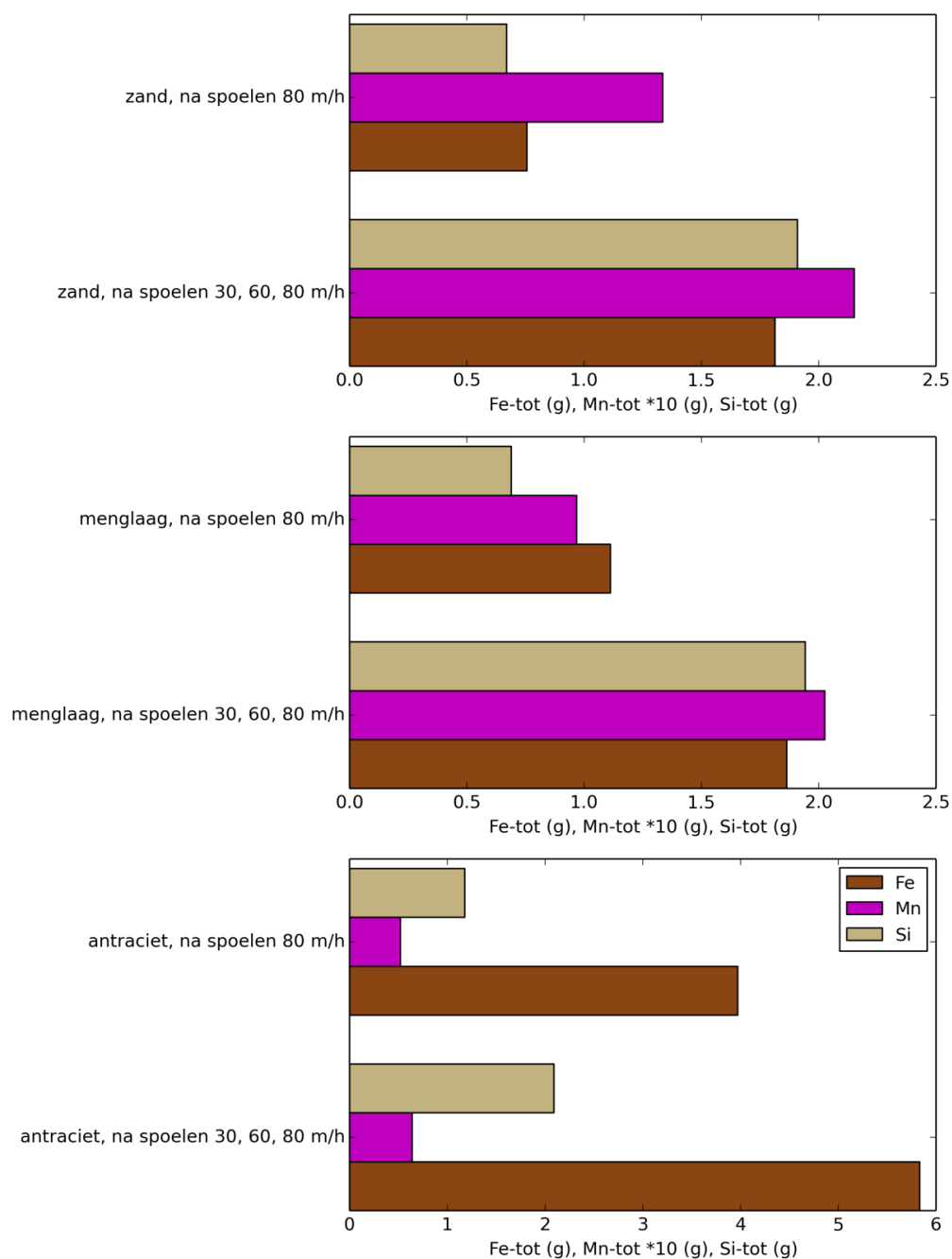
Alle resultaten van de analyses staan in Bijlage I. Voor de drie lagen zijn de concentraties van ijzer (totaal), mangaan (totaal) en silicium (totaal) weergegeven als functie van de tijd. Vervolgens is de totale massa uitgespoeld materiaal bepaald door de tijdreeksen te integreren en te vermenigvuldigen met het debiet. Dit is weergegeven in Figuur 2.20 voor alle experimenten. Het meeste materiaal wordt weggespoeld in de eerste spoelfase met water. Vooral in de bovenste laag wordt veel ijzer weggespoeld. Bij het opvoeren van de luchtspoelsnelheid lijkt na iedere luchtspoeling min of meer evenveel materiaal weggespoeld te worden. Als er direct met 80 m/h lucht wordt gespoeld komt er wel meer materiaal los dan als er direct met 30 m/h lucht wordt gespoeld. Echter, de totale hoeveelheid materiaal na een spoeling van 30, 60 en 80 m/h is veel meer dan na een directe spoeling van 80 m/h (Figuur 2.21). De aanname dat bij een bepaalde luchtspoelsnelheid op een gegeven moment

alles wat losgescheurd kan worden ook loskomt lijkt niet op te gaan. Er lijkt steeds weer nieuw materiaal uitgespoeld te worden. Visueel is dit ook getest door na een spoeling van 80 m/h weer te spoelen met 30 m/h en bij de lagere spoeling werd het water opnieuw bruin. Dit is niet verwonderlijk, als gekeken wordt naar de hoeveelheid ijzer die uitgespoeld wordt ten opzichte van de hoeveelheid ijzer aanwezig op de korrel. Een grove inschatting geeft een totale hoeveelheid ijzer van ~1 kg ijzer in de proefkolom (zie Bijlage I). Hier wordt dus maar zo'n 1% van uitgespoeld.

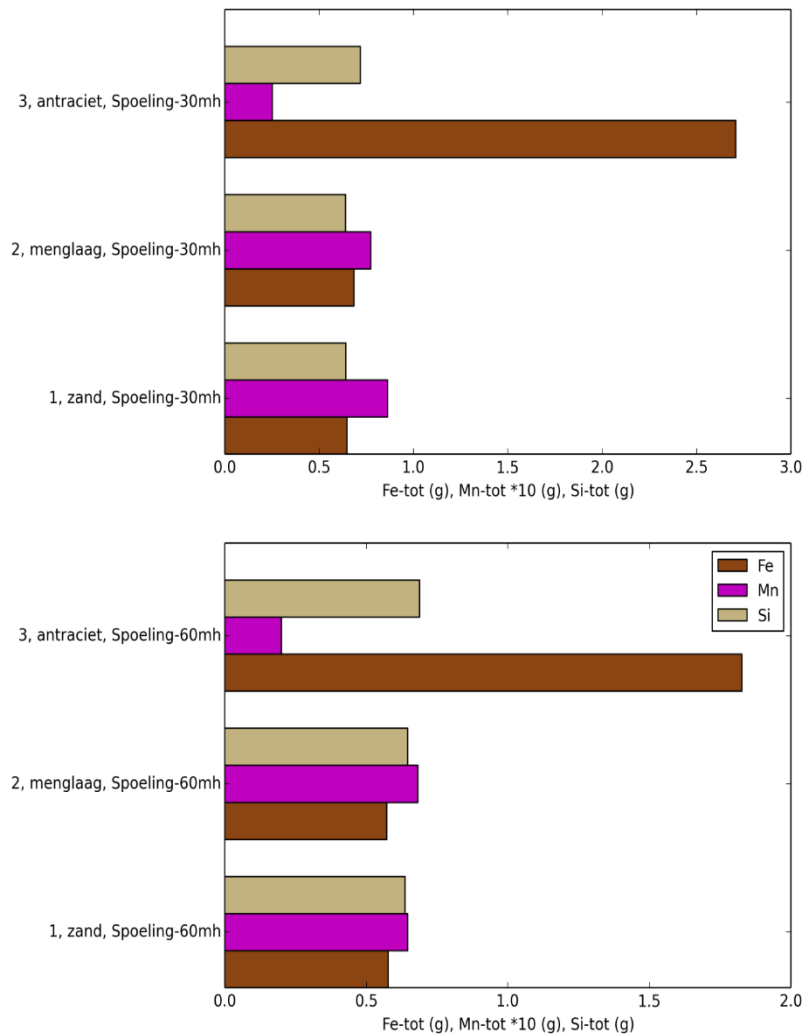
De hoeveelheid afgespoeld silicium lijkt per spoelbeurt min of meer gelijk te zijn. Bij iedere waterspoeling valt de concentratie silicium ook terug tot een niveau van ~9 mg/L. Er blijven kleine zanddeeltjes uitgespoeld worden, waarin echter geen ijzer of mangaan meer aanwezig is.



Figuur 2.20 Overzicht totaal uitgespoeld materiaal in alle experimenten.



Figuur 2.21 Totaal afgespoeld materiaal na opbouwen van de luchtspoeling (30, 60 en 80 m/h) en na direct met 80 m/h lucht gespoeld te hebben.



Figuur 2.22 Totaal afgespoeld materiaal in de verschillende lagen bij eenzelfde spoeling

In Figuur 2.22 is het totaal afgespoeld materiaal weergegeven over de verschillende lagen bij eenzelfde spoelsnelheid. In de onderste laag wordt het meeste mangaan afgespoeld en in de bovenste laag het meeste ijzer. Dit is in overeenstemming met de verwachte belading van het dubbellaagsfilter tijdens de filtratie.

2.6.8 Discussie

Opvallend is dat na iedere verhoging van de spoelsnelheid er eenzelfde hoeveelheid materiaal wordt afgespoeld (Figuur 2.20). Enerzijds zou door het verhogen van de spoelsnelheid er meer materiaal moeten loskomen vanwege de hogere schuifspanningen door schuring. Anderzijds komt er minder materiaal los, omdat er al een tijd gespoeld is. Deze effecten lijken elkaar nagenoeg op te heffen.

Als voorbeeld is het totaal afgespoeld materiaal uitgezet tegen het product van de spoelsnelheid en spoelduur. Bij de opeenvolgende luchtspoelingen is deze factor berekend als het cumulatieve effect van de opeenvolgende spoelingen. Hierbij ontstaan punten voor de spoeling van 30 m/h, 30-60 m/h, 30-60-80 m/h en direct 80 m/h. Er is gevarieerd met de wijze waarop de spoelsnelheid en spoelduur samenhangen met het afgespoeld materiaal. Als

gekozen wordt voor evenredigheid met de wortel van de tijd en de 4-de machtswortel van de spoelsnelheid ontstaat er min of meer een rechte lijn (Figuur 2.23). Dit laat zien dat de tijdsduur een groter effect heeft dan de luchtsnelheid. Dit is uiteraard een indicatie, maar laat zien dat spoelduur een groter effect heeft dan luchtspoelsnelheid.

Voor de kalibratie van het model werd aangenomen dat er bij een bepaalde luchtsnelheid al het materiaal dat los kon schuren ook losgekomen is. Dit is echter geen valide aanname. Er lijkt over de tijd steeds weer nieuw materiaal los te komen.

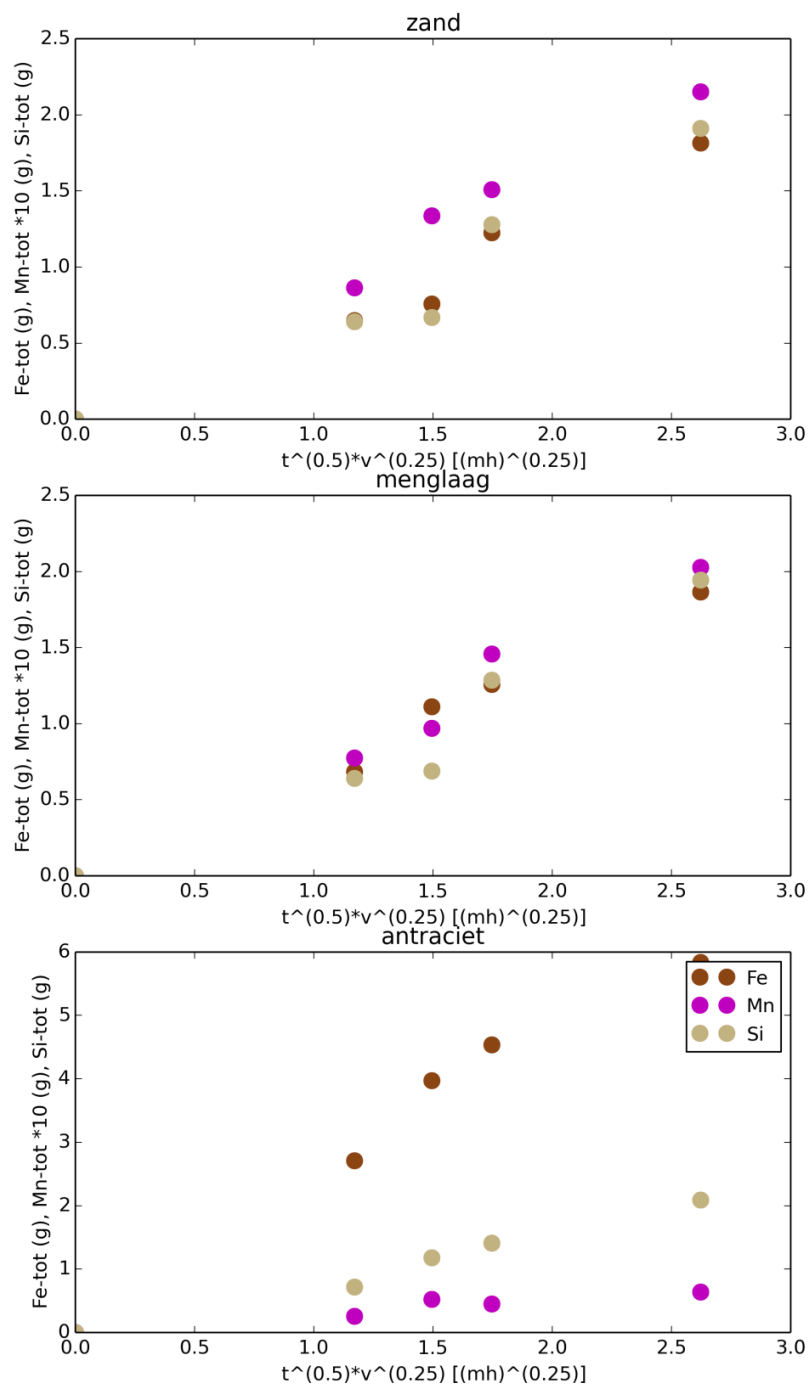
Het loskomen van ijzer en mangaan tijdens de luchtspoeling lijkt een effect van de mechanische werking van de lucht. De hypothese is dat de lucht langs het filtermateriaal schuurt. De luchtbellen zullen waarschijnlijk een bepaald pad door de poriën kiezen (de weg van de minste weerstand). Dat zou als gevolg hebben dat niet al het filtermateriaal goed afgeschuurd wordt.

Daarnaast is het mogelijk dat het meeste materiaal losgemaakt wordt aan de bovenkant, omdat de korrels hier het meeste bewegen. Op basis van deze experimenten valt hier echter weinig over te zeggen. Om dit te toetsen zijn andere experimenten nodig. Overigens bewegen de korrels tijdens de waterspoeling zonder lucht ook veel, maar vindt er blijkbaar nauwelijks mechanische werking plaats, omdat er geen nieuw afgezet materiaal vrijkomt bij alleen de waterspoeling.

2.6.9 Conclusie en aanbevelingen

Experimenten in een proefinstallatie zijn uitgevoerd om het spoelen van een snelfilter na te bootsen. Hiervoor is het filtermateriaal van een dubbellaagsbed uit Velddriel gebruikt. De belangrijkste conclusies zijn:

- Het dubbellaagse filterbed blijkt zo goed als volledig gemengd te zijn. Alleen in de bovenste laag zit meer antraciet. De bovenste laag bevat ook meer ijzer.
- Uit deeltjestellingen blijkt dat het meeste losgespoelde materiaal kleiner dan 50 μm is. De deeltjes zullen dan grotendeels met de waterstroming meebewegen.
- Tijdens de eerste waterspoeling worden de grootste hoeveelheden ijzer en mangaan losgespoeld. Na ongeveer 5 minuten is het spoelwater helder en wordt er weinig meer losgespoeld.
- Tijdens iedere luchtspoeling wordt er nieuw ijzer en mangaan losgespoeld. Na een 15 minuten luchtspoelen is nog niet al het materiaal losgeschuurd. Ook als er daarna met een lagere luchtsnelheid wordt gespoeld komt er weer nieuw materiaal los. Dit is anders dan in het model was aangenomen.
- De duur van de luchtspoeling heeft een grotere invloed dan de luchtsnelheid. De hoeveelheid afgespoeld materiaal lijkt evenredig met de wortel van de spoelduur en vierde machtswortel van de luchtsnelheid.
- De gemeten bedexpansies en uitspoelcurves kunnen gebruikt worden om het CFD model te valideren. Kalibratie van de hoeveelheid losgeschuurd materiaal in het CFD model lijkt lastig met deze data.
- Het meerfasen CFD model met de combinatie water-lucht-zand-antraciet werkt niet naar behoren.
- De hoeveelheid afgespoeld ijzer is ongeveer 1% van het totale ijzer op de korrels.



Figuur 2.23 Totale hoeveelheid afgespoeld materiaal uitgezet tegen de spoelsnelheid (t) en spoeldebiet (v)

2.7 Verbeteren ontwerpparameters

Op basis van de modellering en experimenten zijn de volgende aanpassingen aan het ontwerp en/of bedrijfsvoering mogelijk om het spoelen van de snelfilters te verbeteren:

- CFD-simulaties laten zien dat met een lagere bovenwaterstand tijdens het spoelen de spoelduur verkort kan worden (minder spoelwaterverlies).
- CFD-simulaties laten zien dat twee goten leiden tot een betere menging en gelijkmatiger verdeelde afvoer van het vuil, zodat er korter gespoeld kan worden (minder spoelwaterverlies).
- Met behulp van CFD-simulaties kan voor een specifieke locatie bepaald worden hoe lang er gespoeld moet worden om bijv. 95% van het uitgespoelde materiaal af te voeren, zodat de spoeltijd geminimaliseerd kan worden (minder spoelwaterverlies, of een betere afvoer van vuil).
- Het effect van verhogen van de luchtsnelheid is beperkter dan die van het vergroten van de spoelduur. De luchtsnelheid zou verlaagd kunnen worden om te besparen op energieverbruik.
- Daarnaast lijkt het kiezen van een langere spoeltijd met lucht effectiever dan het verhogen van de luchtsnelheid. Dit bespaart mogelijk energie, maar kan aan de andere kant het totale spoelproces verlengen. Het is wel de vraag hoe nuttig het is om veel (adsorptief) ijzer los te schuren.

3 Doorstromen van reinwaterreservoirs

3.1 Inleiding

Reinwaterreservoirs bevatten een grote voorraad water waar de verblijftijden relatief lang kunnen worden. Lange verblijftijden in combinatie met hoge temperaturen leiden mogelijk tot een slechtere waterkwaliteit [4], zoals een toename in *Aeromonas* ([3, 16]). Vitens meet in de nazomer op verschillende locaties verhoogde *Aeromonas* getallen. Door kortsluitstromen en dode zones kunnen watervolumes in het reservoir ontstaan met nog langere verblijftijden. Mogelijk dat temperatuurstratificatie dit verergert. Vooral bovengrondse reservoirs kunnen op warme zomerdagen opwarmen. Klimaatverandering zal de frequentie en mate van opwarming in de komende decennia versterken. Om deze reden zijn (CFD) modellen opgesteld van de reinwaterreservoirs om te onderzoeken of er dode zones zijn en hoe groot de verblijftijden (en leeftijden van het water in de reservoirs) zijn. Hierbij is ook gebruik gemaakt van het modelleren van warmteoverdracht, om de temperatuurstratificatie en invloed hiervan op de verblijftijden te onderzoeken. Daarnaast zijn er metingen uitgevoerd om de temperatuurverdeling over de hoogte vast te stellen. Met de gebruikte modellen kan onderzocht worden in hoeverre het ontwerp en/of de bedrijfsvoering van de reinwaterreservoir verbeterd kan worden om de verblijftijden te verkorten en hoge temperaturen te voorkomen.

In de literatuur zijn een aantal onderzoeken uitgevoerd om de menging in waterreservoirs te verbeteren met behulp van CFD [8, 9, 12, 13, 15, 18–21]. In het buitenland wordt vaak met chloor gewerkt en is de menging extra van belang om te zorgen dat al het water in contact met chloor komt. Diverse aanpassingen aan de kelder zijn onderzocht om menging te verbeteren, zoals Venturi's [15], nozzles [9], baffles [19] of de geometrie van de kelder [20]. 'Bouyancy' effecten zijn onderzocht door [12, 13], waar aangetoond wordt dat menging bevorderd kan worden door dichtheidsverschillen.

In het onderzoek van Wolthek [18], is de hydraulica in reinwaterreservoirs uitgebreid onderzocht met behulp van CFD. Dit is gedaan voor de 'mixed' en 'flow-through' modus. In 'mixed' modus wordt met eenzelfde leiding op het ene moment de kelder gevuld en op een later moment de kelder geleegd. In 'flow-through' modus wordt continue gevuld en geleegd middels twee aparte leidingen. Resultaten zijn gevalideerd met metingen op lab-schaal en gaven goede overeenkomsten tussen model en meting. Uit de hydraulische berekeningen bleek dat mengtijden groter zijn dan de verblijftijden (mengtijd is de tijd die nodig is om 95% van het reservoir te mengen), en dus aan de hoge kant zijn. Dit kan opgelost worden door het toepassen van kleinere openingen bij de instroom (mixed modus) en/of het plaatsen van baffles (in flow-through modus). De volgende stap in de modellering is het toevoegen van temperatuur en leeftijden, wat in het huidige project is uitgevoerd.

3.2 Modellering

Het reinwaterreservoir is gemodelleerd met twee typen modellen: het CFD model (in 2D en 3D) om alle details van de stroming en menging te bepalen en een vereenvoudigd model om over langere periodes door te rekenen.

3.2.1 Vereenvoudigde modellering

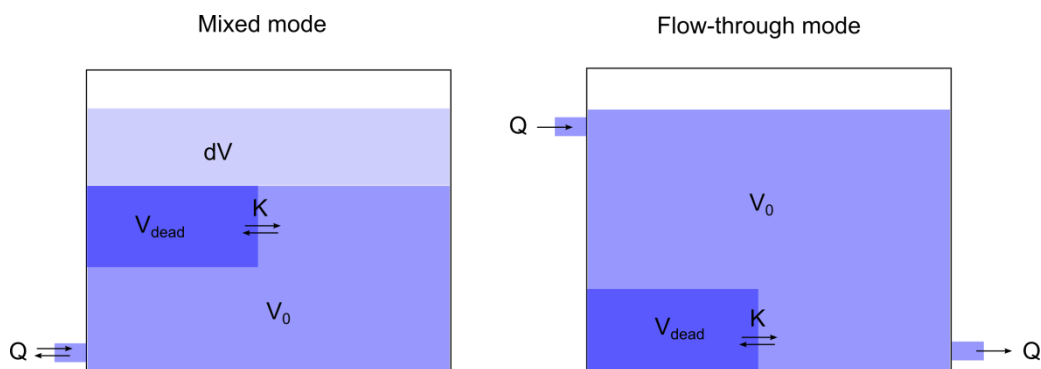
In het vereenvoudigd model is het reservoir opgebouwd uit een aantal volumedeeltjes, die elk als een gemengd vat beschouwd worden. Omdat de tank geen constant watervolume heeft, kan een deeltje vol of leeg zijn. Voor ieder deeltje worden verschillende grootheden bijgehouden, zoals leeftijd, concentratie van een tracer en temperatuur. Gedurende iedere tijdstap kan er water in- of uitstromen. Bij uitstroom betekent dit dat een aantal met water gevulde deeltjes op leeg worden gezet (het aantal volgt uit het waterdebiet d.m.v. een stochastische bemonstering). Als de deeltjes op leeg worden gezet, worden de waarden van de grootheden gereset (het water is immers uitgestroomd). Bij de instroom worden een aantal lege deeltjes op gevuld gezet. De waarden van de grootheden worden gelijk gesteld aan de waarden van de instroomrandvoorwaarde voor deze deeltjes. Een gedeelte van het totale watervolume kan als dode zone ingesteld worden. De dode zone is niet direct in contact met de instroom of uitstroom, maar wisselt met een bepaalde snelheid deeltjes uit tussen het hoofdvolume (V_0) en de dode zone (V_{dead}). De hoeveelheid uitgewisseld water (K) wordt gedurende iedere tijdstap (Δt) berekend aan de hand van de mengtijd (T_{mix}):

$$K = V_{dead} \left(1 - 0.05^{\frac{\Delta t}{T_{mix}}} \right)$$

Op deze manier zal 95% van het water in de dode zone gemengd zijn na de mengtijd T_{mix} . De mengtijd kan bepaald worden aan de hand van metingen of CFD berekeningen.

Het vul- en leegregime van het reinwaterreservoir kan volgens de *mixed mode* en *flow-through mode* bedreven worden (Figuur 3.1): in de *mixed mode* is er een enkele aansluiting, die óf water onttrekt óf water toevoert aan het reservoir. De waterspiegel zal daarom variëren. Bij de *flow-through mode* is er zowel een instroom als een uitstroom. Als de instroom en uitstroom gelijk zijn, zal het waterniveau constant zijn. De instroom en uitstroom kunnen echter ook verschillen, zodat de waterspiegel varieert.

Binnen ieder gevuld deeltje kunnen ook reacties optreden met een bron of afbraak term, zodat de temperatuurverandering of verandering in concentratie bijgehouden kan worden. Het voordeel van deze methode met losse deeltjes is dat een beeld ontstaat van de verdeling van verblijftijden, leeftijden en concentraties.



Figuur 3.1 Vereenvoudigde modellering, links staat de *mixed mode* met een enkele inlaat- en uitlaatpijp. Rechts de *flow-through mode* met een aparte inlaat- en uitlaatpijp.

Voor de instroom en uitstroom kunnen van willekeurige functies gebruik gemaakt worden. De volgende functies zijn geïmplementeerd:

- Sinus-functie, waarin een vast dag-nacht ritme is vastgelegd volgens een sinus.

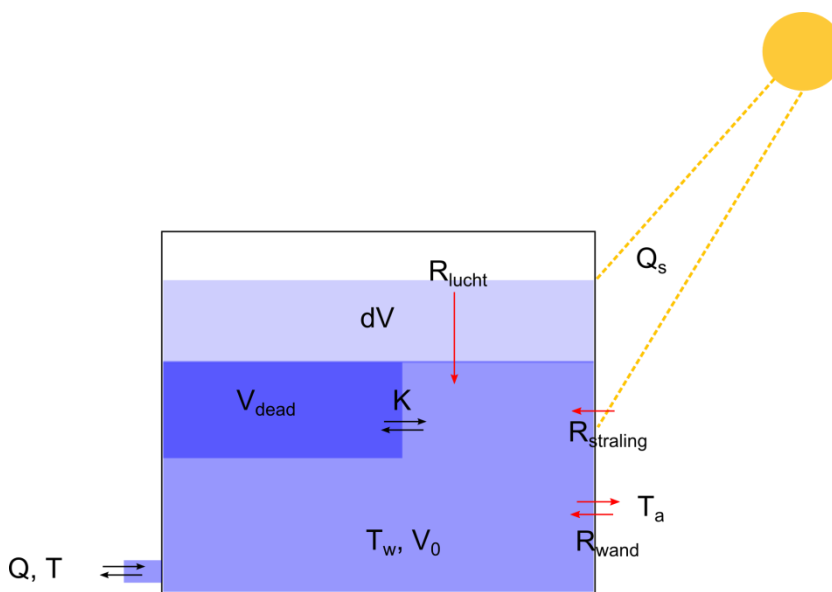
- Blokfuncties, waarin in overeenstemming met het gehanteerde vul- en leegregime gebruik gemaakt wordt van een vulblok en een leegblok. De tijdsperiode van de blokken kan ingesteld worden.

Daarnaast kan gemeten data uit de praktijk (vul- en leegdebieten, temperaturen) gebruikt worden.

3.2.1.1 Warmte

Om de temperatuur te bepalen in het reservoir zijn een aantal zaken van belang (Figuur 3.2):

- Temperatuur van het instromende water.
- Uitwisseling van warmte via de wanden van de reinwaterreservoir
- Uitwisseling van warmte met de luchtlaag boven het wateroppervlak.
- Uitwisseling van warmte door middel van zonnestraling (bovengrondse reservoirs)



Figuur 3.2 Warmteoverdracht in de reinwaterreservoir

Voor de temperatuur van het instromende water kan een constante waarde (bijv. 12 graden Celsius voor grondwater) genomen worden of actuele data uit de zuivering.

De uitwisseling van warmte via de wanden of direct door straling wordt bepaald met de volgende eerste orde differentiaalvergelijking:

$$V_0 \rho_w c_p \frac{dT_w}{dt} = R_{straling} + R_{wand} + R_{lucht}$$

Waarbij T_w de watertemperatuur is [K], V_0 het totale volume van de tank [m³], ρ_w de dichtheid van water [kg/m³], c_p de warmtecapaciteit van water [J/kg/K], en R_x de bronnen van warmte. Voor ieder volumedeeltje in het model wordt deze vergelijking opgelost.

De uitwisseling van warmte via de buitenwanden hangt af van de menging van het water in het reservoir, het materiaal en dikte van de buitenwand en de temperatuur buiten het reservoir (grondtemperatuur of luchttemperatuur voor een bovengronds reservoir):

$$R_{wand} = Ah(T_a - T_w)$$

Waarbij T_a de buitentemperatuur [K], A het oppervlakte waarover de warmteoverdracht [m^2] plaatsvindt en h de warmteoverdrachtscoëfficiënt [$\text{W}/\text{m}^2/\text{K}$]. De warmteoverdrachtscoëfficiënt bestaat uit twee delen: geleiding door de buitenwand en convectie door het water in het reservoir:

$$\frac{1}{h} = \frac{d}{\lambda} + \frac{1}{h_w}$$

Waarbij λ de warmtegeleidingscoëfficiënt is van de buitenwand [$\text{W}/\text{K}/\text{m}$] en d de dikte van de buitenwand [m]. De warmteoverdracht door convectie h_w [$\text{W}/\text{m}^2/\text{K}$] is afhankelijk van de menging in de tank (dit bepaalt het temperatuurprofiel aan de wand) en wordt bepaald aan de hand van het Nusselt-getal:

$$Nu = \frac{h_w L}{\lambda_w}$$

Waarbij L een karakteristieke lengte [m] is en λ_w de warmtegeleidingscoëfficiënt van water [$\text{W}/\text{K}/\text{m}$]. Afhankelijk van het mengregime kan het Nusselt-getal berekend worden. Hier is gebruik gemaakt van een formulering van Bejan (2004) [2], die geldt voor gesloten tanks:

$$Nu = 0.364 \frac{L}{H} Ra^{0.25}$$

Ra is het Rayleigh-getal, deze geeft de mate van natuurlijke convectie door temperatuurverschillen aan:

$$Ra = \frac{g \beta H^3 \Delta T}{\alpha \nu}$$

Waarbij α de thermische diffusiviteit van water is [m^2/s], ν de kinematische viscositeit van water [m^2/s], g de zwaartekrachtversnelling [m/s^2], β de thermische expansie van water, H de karakteristieke hoogte van de tank [m] en ΔT het temperatuurverschil tussen buitenwand en water. De waarden van de fysische constanten van water staan in Tabel 3.1.

De warmteoverdracht via de luchtlaag wordt op dezelfde manier berekend als die van de wand, alleen nu is de warmteoverdrachtscoëfficiënt gelijk aan h_w (warmteoverdracht door convectie). In eerste instantie is de warmteoverdracht via de luchtlaag op nul gezet, met het idee dat de luchtlaag een sterke isolator is en voornamelijk de temperatuur van het water zal aannemen.

De warmteoverdracht door zonnestraling wordt berekend met:

$$R_{straling} = A Q$$

Waarbij Q de energie van de zonnestraling is [W/m^2] en A het oppervlakte van de tank waar de zon op schijnt (er is geen rekening gehouden met de hoek waaronder de zonnestraling op het oppervlakte schijnt). Via het KNMI kunnen waarden van de zonnestraling op uurbasis opgevraagd worden voor verschillende KNMI-stations. Hier is geen rekening gehouden met reflectie van de zonnestraling aan de wand van het reservoir.

Naast KNMI-gegevens over zonnestraling, kunnen ook de door het KNMI gemeten buitentemperaturen (op uurbasis) als input voor het model gebruikt worden.

Tabel 3.1 Overzicht van gebruikte fysische constanten

	Staal	Beton	Water (25 °C)
λ [W/m/K]	~50	~2	0.6
α [m ² /s]	-	-	$0.143 \cdot 10^{-6}$
c_p [J/kg/K]	-	-	$4.186 \cdot 10^3$
β [1/K]	-	-	$207 \cdot 10^{-6}$

3.2.1.2 Kentallen

De verhouding tussen de convectie door temperatuurverschillen (dichtheidsverschillen) en impuls (bijv. bij een jetstraal) is weergegeven door het Archimedes-getal Ar :

$$Ar = \frac{Gr}{Re^2}$$

Waarbij Re het Reynolds getal is en Gr het Grashof getal, welke gelijk is aan:

$$Gr = \frac{g\beta D^3 \Delta T}{\nu^2}$$

Als $Ar \ll 1$ zal de stroming door de 'jet' overheersen, en als $Ar \gg 1$ zal de convectie als gevolg van temperatuurverschillen domineren.

3.2.1.3 Leeftijd

Naast de warmte wordt de leeftijd van ieder waterdeeltje bijgehouden volgens de volgende differentiaalvergelijking:

$$\frac{d[age]}{dt} = 1$$

Als beginvoorwaarde geldt dat de leeftijd 0 is en voor instromende deeltjes is de leeftijd ook 0 (randvoorwaarde).

3.2.2 CFD modellering

In eerste instantie is een 'proof-of-principle' uitgevoerd met een 2D model om te onderzoeken of de verschillende fysische processen tegelijk gemodelleerd konden worden. Vervolgens is gewerkt met een 3D model. Voor de CFD modellering is gebruik gemaakt van de software COMSOL Multiphysics.

Proof-of-principle (2D)

De volgende fysische processen zijn gemodelleerd:

1. Turbulente stroming van het water. Voor de turbulentiemodellering is gebruik gemaakt van het k- ϵ model. De turbulente stroming van het water is gekoppeld aan het warmtetransport door middel van de dichtheid en viscositeit van het water: de temperatuur bepaalt de dichtheid en viscositeit van het water.
2. Warmtetransport. Het warmtetransport is gekoppeld aan de turbulente stroming door middel van convectie (meebewegen met de stroming) en diffusie. De (turbulente) diffusie zorgt voor de grootste verspreiding en is berekend volgens Kays-Crawford (deze bepaalt een specifiek Prandtl getal). Het Prandtl getal geeft de verhouding tussen impulsoverdracht en warmteoverdracht weer.
3. Transport van een (passieve) tracer. De tracer maakt gebruik van het snelheidsveld en turbulente diffusie van de berekeningen in stap 1. Voor het Schmidt getal is 1

gebruikt. Het Schmidt getal geeft de verhouding tussen kinematische viscositeit en moleculaire diffusiviteit weer, simpel gezegd de mate waarin turbulente menging van waterdeeltjes gelijk is aan turbulente menging van opgeloste stoffen. Er wordt gerekend met twee tracers: een passieve om de verblijftijdspreiding te bepalen en een tracer met een nul-de-orde afbraakterm om de leeftijd van het water te bepalen.

Het volume water in het reinwaterreservoir is niet constant omdat er een enkele aansluiting is, die 's nachts water toevoert naar het reservoir en overdag water onttrekt. Daarom wordt met een moving mesh (ALE) gewerkt. Het bovenste gedeelte van het mesh (3/4 van de initiële waterhoogte in het reservoir) kan meebewegen met de waterspiegel. Als het reservoir gevuld wordt, worden de mesh elementen uitgerekt. De zijwanden van het moving mesh kunnen in hoogterichting vrij bewegen en voor de bovenwand is een beweging opgelegd evenredig met de stijging van het wateroppervlakte (op basis van het ingaande debiet):

$$z_{mesh}(t) = \int_0^t u_{in}(\tau) d\tau \frac{R_{pipe}}{R_{tank}},$$

Waarbij u_{in} de ingaande watersnelheid is en R_{pipe} en R_{tank} de straal van de instroompijp en tank respectievelijk. Het vrije oppervlakte beweegt nu als een star object. Op deze manier zijn de rekentijden korter.

Als instroomrandvoorwaarde is een tijdsafhankelijke snelheid opgelegd die zowel positief als negatief kan zijn. In eerste instantie is gewerkt met een sinusfunctie. Als de instroom positief is, wordt er water met een vaste temperatuur en tracerconcentratie ingevoerd. Deze worden in COMSOL ingevoerd door middel van 'open boundaries'.

Voor het warmtetransport is op de zijwanden een 'heat-flux' randvoorwaarde gezet:

$$F_{wand} = 2 \frac{\lambda_{wand}}{d_{wand}} (T_a - T_w)$$

De factor 2 wordt gebruikt, omdat de verhouding tussen oppervlakte en volume in 2D 2 keer zo klein is als in 3D. Op deze manier is de totale warmteflux in 2D hetzelfde als in 3D. Warmtetransport is in eerste instantie alleen op de zijwanden gezet en niet op de bovenwand, omdat de luchtlaag aan de bovenwand extra isolatie geeft.

Daarnaast is voor de zonnestraling een 'boundary heat source' gebruikt, waarbij de zonnestraling (in W/m²) als bron wordt gebruikt. Deze is ook tijdsafhankelijk (zon schijnt alleen overdag). In eerste instantie is hier ook gewerkt met een (half deel van een) sinusfunctie. De zonnestraling is zowel op de zijwand als bovenwand gezet. Deze is in 2D ook met een factor verhoogd om rekening te houden met het grotere oppervlakte-volume verhouding in 3D. Deze factor is afhankelijk van de diameter-hoogte verhouding in de tank en gelijk aan: $(2H+R)/(H+R)$.

3D modellering

Dezelfde fysische processen als in het proof-of-principle model zijn gemodelleerd. De hoogte van het reservoir wordt nu bepaald met de verhouding van de oppervlaktes van de instroomleiding en de wateroppervlakte:

$$z_{mesh}(t) = \int_0^t u_{in}(\tau) d\tau \frac{A_{pipe}}{A_{tank}},$$

3.2.3 Gemodelleerde reservoirs

De volgende reservoirs zijn gemodelleerd met CFD (Tabel 3.2):

- Reservoir 'de Greuns': een bovengronds reservoir
- Dedemsvaart
- Rhenen (Candia)

De Greuns is zowel in 2D als 3D gemodelleerd, Dedemsvaart en Rhenen alleen in 3D.

Tabel 3.2 Kentallen van de gemodelleerde reinwaterreservoirs.

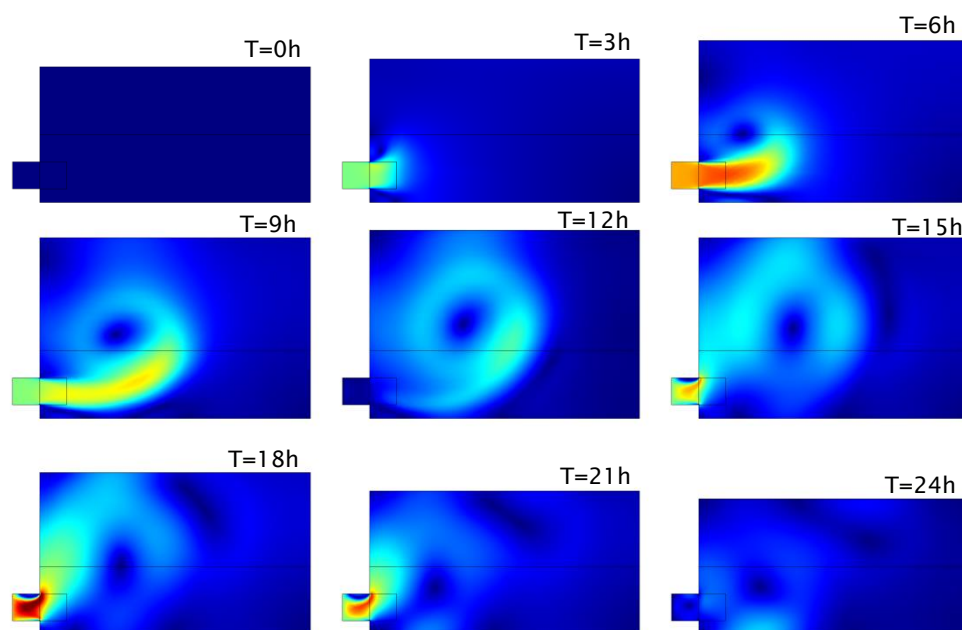
	$H_{\text{gem}} [\text{m}]$	$V_{\text{gem}} [\text{m}^3]$	$dQ [\text{m}^3/\text{dag}]$	$T_h [\text{h}]$
De Greuns	11.5	6106	2673	55
Dedemsvaart	1.58	500	100	120
Rhenen	3.64	1144	229	120

3.3 Resultaten 2D CFD 'proof-of-principle'

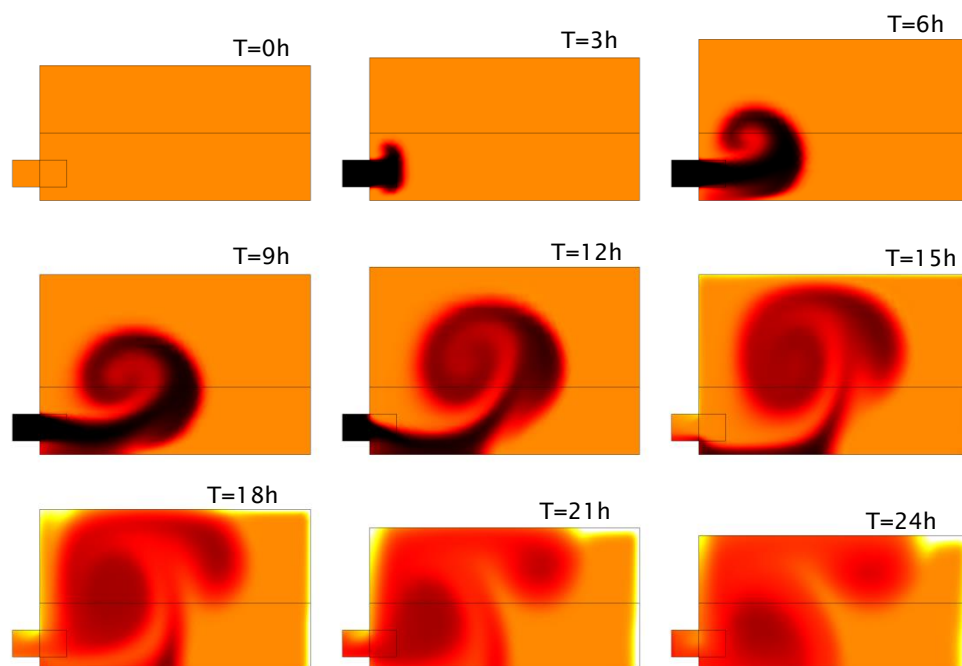
In de eerste berekening is alleen de waterstroming en het bewegende mesh gemodelleerd. Hiervoor is een fictief reservoir gebruikt. Vervolgens is het warmtetransport en tracertransport toegevoegd. De rekentijden in 2D zijn goed te overzien (10 dagen zijn gesimuleerd in een aantal uren). Voor het warmtetransport zijn de variabelen weergegeven in Tabel 3.3 gebruikt. De in- en uitstroom is gemodelleerd als een sinus (zie Figuur 3.8). De hydraulische verblijftijd in de tank is ongeveer 40h. De gemodelleerde snelheden en temperatuur zijn weergegeven in Figuur 3.3 en Figuur 3.4. Tijdens het vullen (0-12h) gaat het waterniveau omhoog en vormen zich een jet en recirculatie in het reservoir. Tijdens het legen (12-24h) ijlt de recirculatie nog na, dit zorgt voor menging, zodat de temperatuur ook gelijkmatiger verdeeld raakt. Daarnaast is er tijdens het legen ook opwarming van buiten, zichtbaar in de witte gebieden aan de buitenkant. Hier was de opwaartse kracht door dichtheidsverschillen vanwege temperatuurverschillen echter niet goed gemodelleerd. Dit moet namelijk expliciet als volumekracht (gelijk aan $-\rho g$, waarbij de dichtheid ρ afhankelijk is van de temperatuur van het water) in COMSOL worden opgegeven. De resultaten van de flow en temperatuur met bouyancy zijn weergegeven in Figuur 3.5 en Figuur 3.6. De snelheden zijn een factor 20 hoger en de jet is niet meer zichtbaar. De circulaties vanwege dichtheidsverschillen domineren nu over de stroming door de ingaande jet.

Tabel 3.3 Gebruikte parameters in 'proof-of-principle' modellering

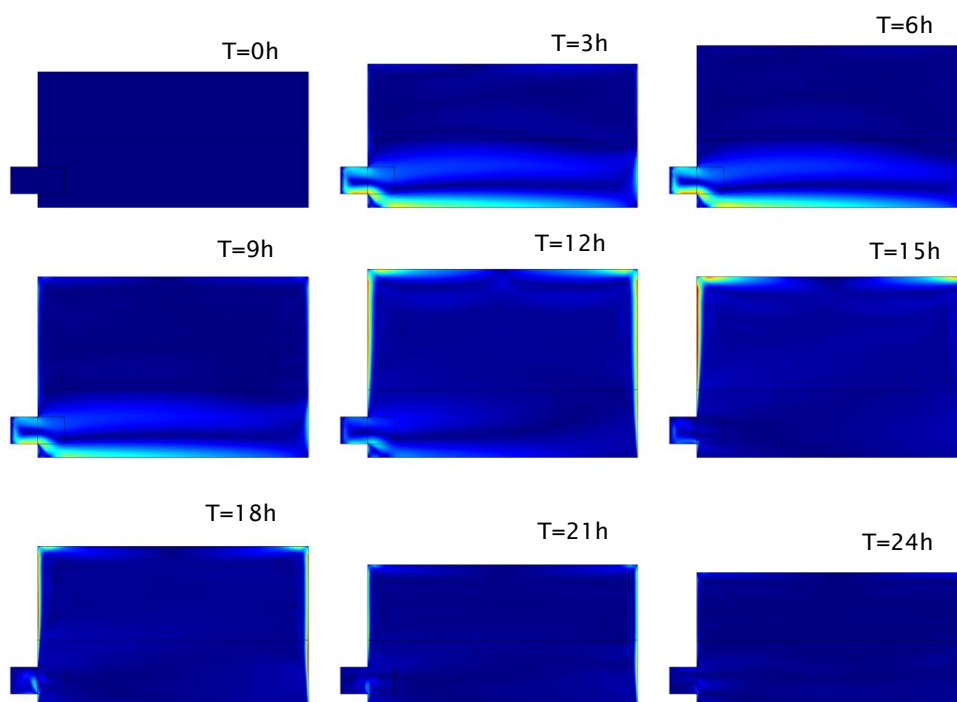
Initiële temperatuur (T_0)	15 °C
Buitentemperatuur (T_a)	15-30 °C
Watertemperatuur (T_{in})	12 °C
λ_{wand}	50 W/m/K
Q_{sun}	200 W/m ²
Dikte wand (h_{wand})	50 mm



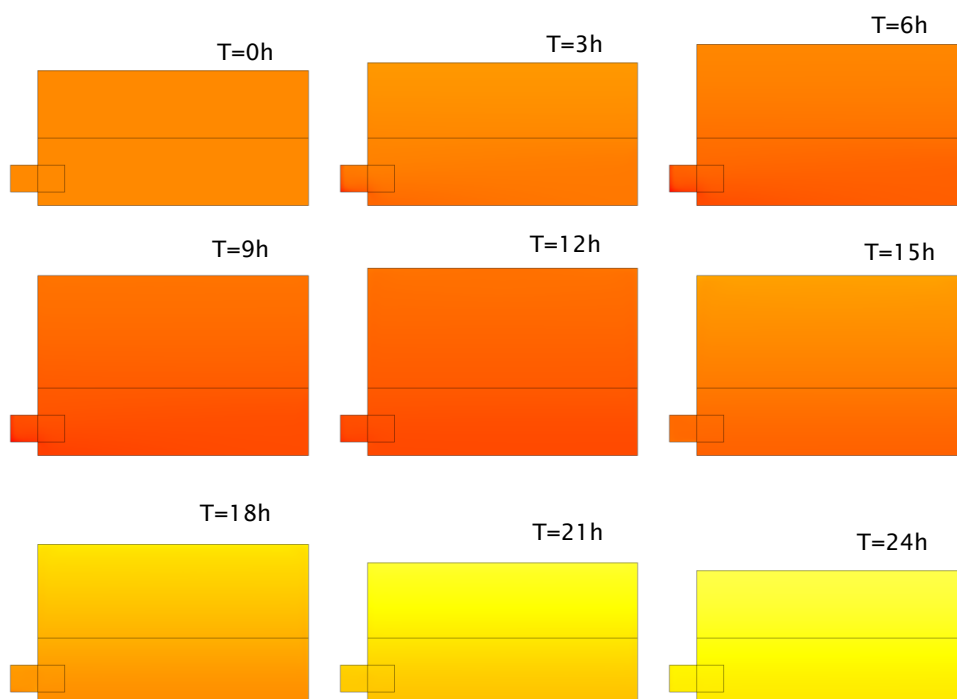
Figuur 3.3 Proof-of-principle: snelheden [van blauw 0 mm/s naar rood 1mm/s] in een reservoir tijdens een volledige vul- (0 t/m 12u) en leegcyclus (na 12u), zonder bouyancy.



Figuur 3.4 Proof-of-principle: temperaturen [van zwart naar wit: 10-20 °C] in een reservoir tijdens een volledige vul- en leegcyclus, zonder bouyancy.



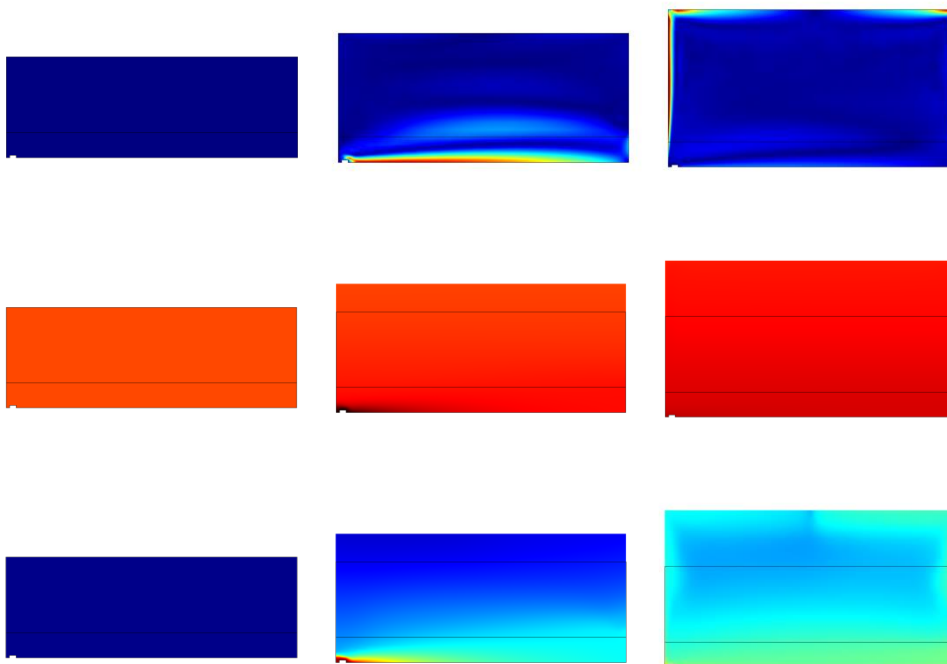
Figuur 3.5 Proof-of-principle: snelheden [van blauw naar rood: 0-25mm/s] in een reservoir tijdens een volledige vul- en leegcyclus, met bouyancy.



Figuur 3.6 Proof-of-principle: temperaturen [van zwart naar wit: 10-20 °C] in een reservoir tijdens een volledige vul- en leegcyclus, met bouyancy.

3.3.1 Resultaten 2D CFD modellering 'De Greuns'

Vervolgens is het reservoir 'De Greuns' in 2D gemodelleerd met CFD (met bouyancy). De Greuns (Leeuwarden) is een cilindervormig reservoir met een enkele pijp die dient als instroom (in de nacht) of uitstroom (overdag). De in- en uitstroom in het reservoir is gevarieerd met een sinusfunctie om het dag-nacht ritme te simuleren. Een doorsnede van het reservoir is gemaakt door het midden van de instroompijp (zie Figuur 3.7). Het waterniveau varieert tussen de 9 en 14 m, de diameter van het reservoir is 26 m. De maximale instroomsnelheid is 0.8 cm/s, wat correspondeert met een debiet van 350 m³/h (in 3D). Dezelfde parameters als genoemd in Tabel 3.3 zijn gebruikt.

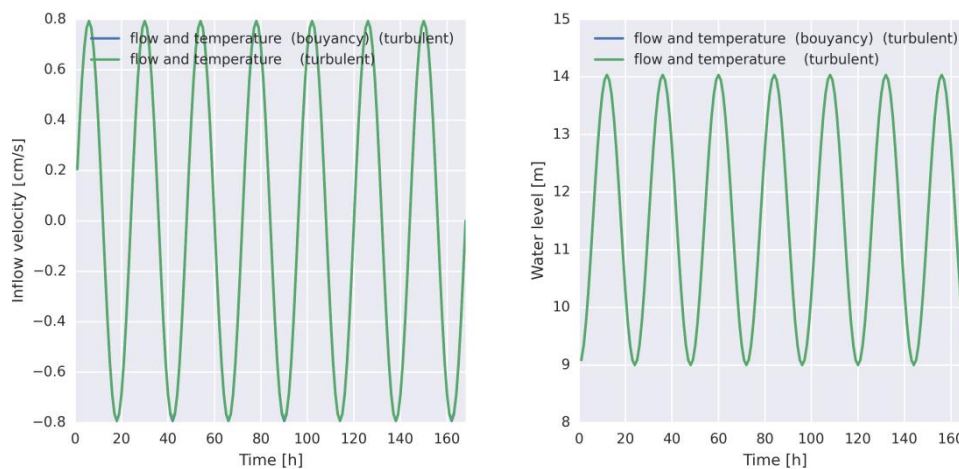


Figuur 3.7 2D CFD modellering van reservoir De Greuns. Snelheden [0-25 mm/s] (boven), temperatuur [12-20 °C] (midden) en tracer [0-1] (onder) na 0 uur (links), 6 uur (midden) en 12 uur (rechts).

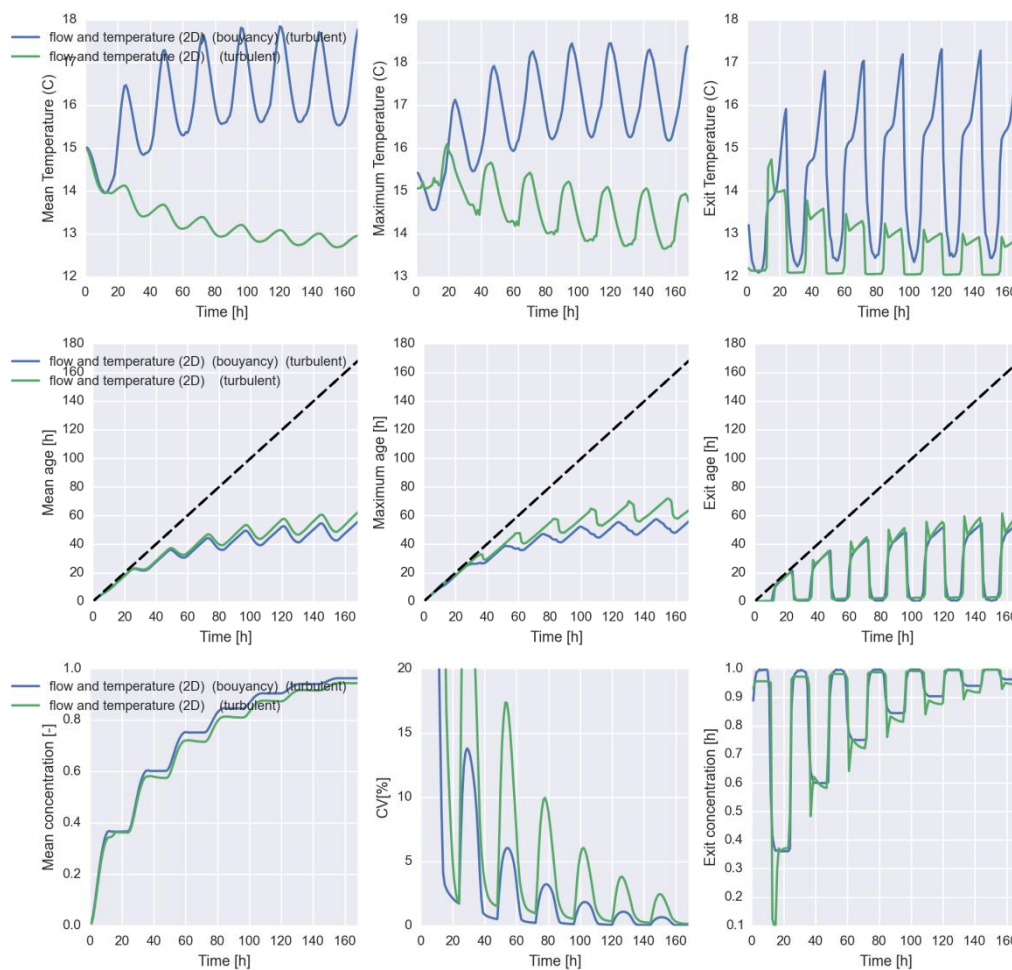
Aan de hand van de berekende snelheden, temperaturen, leeftijden en tracerconcentraties zijn een aantal grootheden verzameld en uitgezet tegen de tijd:

- Instroomsnelheid: snelheid van het instromende water (negatief is uitstroom).
- Waterniveau in het reservoir.
- Gemiddelde temperatuur: de gemiddelde temperatuur van het water in het reservoir.
- Maximum temperatuur: de maximum temperatuur van het water in het reservoir.
- Exit temperatuur: temperatuur van het water bij de uitstroom.
- Gemiddelde leeftijd: de gemiddelde leeftijd van het water in het reservoir.
- Maximum leeftijd: de maximum leeftijd van het water in het reservoir.
- Exit leeftijd: leeftijd van het water bij de uitstroom.
- Gemiddelde concentratie: gemiddelde concentratie van de tracer in het reservoir.
- CV2: variatiecoëfficiënt (standaarddeviatie gedeeld door gemiddelde) in het kwadraat van de tracer. De standaarddeviatie wordt berekend als het gemiddelde over het reservoir van de lokale tracerwaarde minus de gemiddelde tracerwaarde in het kwadraat.
- Exit concentratie: concentratie van de tracer bij de uitstroom.

Deze grootheden zijn uitgezet in Figuur 3.8 en Figuur 3.9. Het wel of niet meenemen van een bouyancy term heeft een grote invloed op de gemiddelde en maximumtemperaturen en CV2, omdat het mengpatroon compleet anders wordt. De invloed op de leeftijd is kleiner. Het temperatuursverloop laat duidelijk het dag-nacht ritme zichtbaar zien: 's nachts wordt het reservoir gevuld met water van 12 °C, waardoor de temperatuur in de kelder zakt, welke overdag weer opwarmt door de hoge buitentemperatuur en zonnestraling. De dag-nacht temperatuurverdeling gaat uiteindelijk naar een steady-state toe. Hetzelfde beeld is zichtbaar bij de leeftijden: deze dalen als er vers water wordt toegevoerd en stijgen overdag als er water wordt onttrokken.



Figuur 3.8 Instroomsnelheid (links) en waterniveau (rechts) als functie van de tijd voor het reservoir.



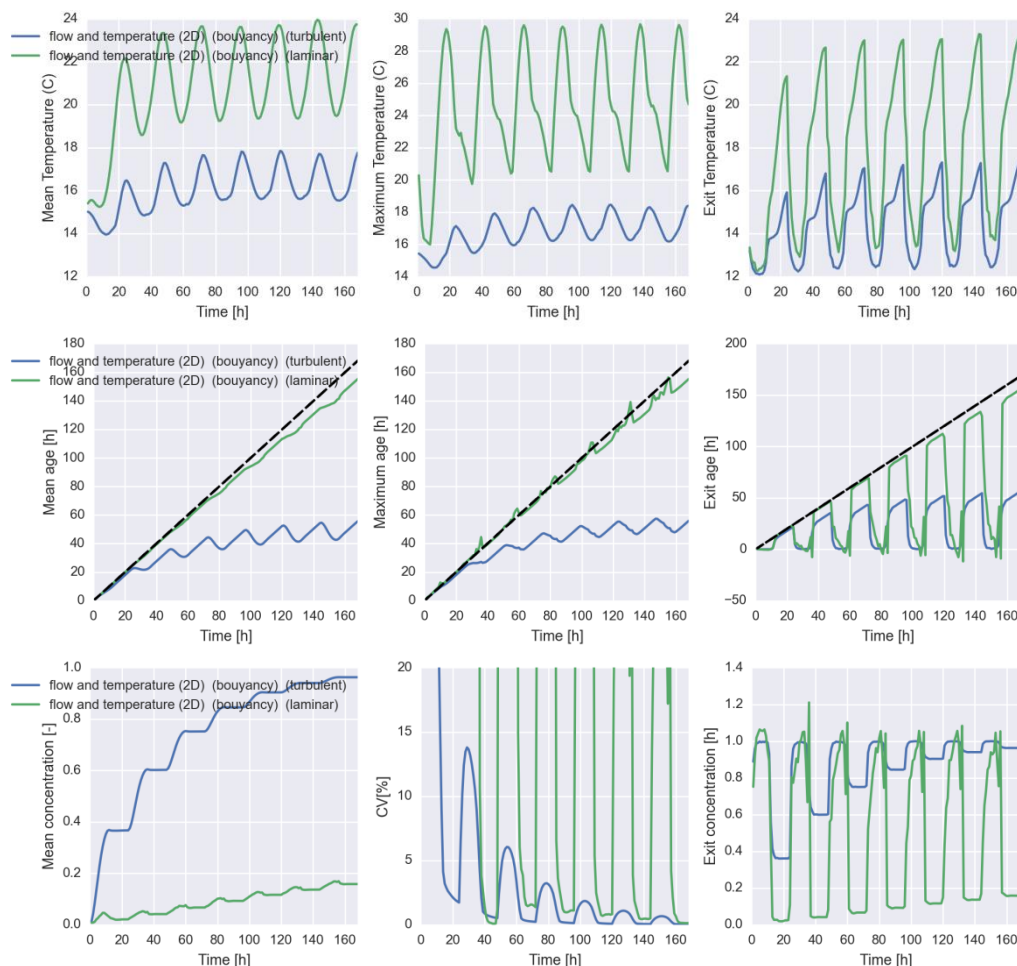
Figuur 3.9 Resultaten van 2D CFD model van temperatuur (boven), leeftijd (midden) van het water en tracer (onder) voor berekeningen met bouyancy kracht (blauw) en zonder (groen). Gemodelleerde reservoir is De Greuns.

3.3.2 Laminair versus turbulent

Een belangrijke vraag is of de stroming in de tank laminair of turbulent is. Dit kan ingeschat worden aan de hand van de Reynolds getallen voor twee extremen: op basis van de ingaande stroming (jet) en op basis van een gelijkmatig verdeelde stroming in de tank (in Tabel 3.4 en Tabel 3.5 staan de Reynolds getallen voor de drie reservoirs). Op basis van de Reynolds getallen van de ingaande 'jet' met water is de stroming turbulent. Als de snelheid vervolgens gelijkmatig verdeeld zou worden over de tank, is de stroming in De Greuns nog turbulent, maar in Dedemsvaart niet meer. Omdat de stroming niet gelijkmatig verdeeld zal zijn over de tank, zal voor de tank van Dedemsvaart waarschijnlijk een gedeelte laminair worden. Als er geleegd of gevuld wordt met lagere debieten, kan de snelheid verder omlaag gaan en zou de stroming ook in de andere tanks laminair kunnen worden. Het meest waarschijnlijk is dat de stroming voor een groot gedeelte turbulent is en een korte tijd laminair kan worden.

De resultaten voor een laminaire en turbulente stroming zijn weergegeven in Figuur 3.10. In het laminaire geval is er een sterke stijging van de gemiddelde en maximum temperatuur te zien. Omdat de menging een stuk lager is, kan het water aan de zijwanden sterk opwarmen, wat zorgt voor een hoge maximumtemperatuur. Een klein gedeelte van het reservoir lijkt

maar gebruikt te worden, de rest is als het ware een grote dode zone. Hierdoor loopt de gemiddelde temperatuur ook sterk op en de leeftijd ook voor de laminaire stroming. De resultaten met laminaire stroming lijken vrij extreem. In het vervolg is daarom uitgegaan van turbulente stroming, ook omdat de stroming voor het grootste gedeelte turbulent lijkt te zijn in het reservoir.



Figuur 3.10 Resultaten 2D CFD model van temperatuur (boven), leeftijd (midden) van het water en tracer (onder) voor berekeningen met turbulentie (blauw) en zonder turbulentie (groen). Gemodelleerde reservoir is De Greuns.

3.4 Resultaten 3D CFD modellering

Vitens heeft gegevens aangeleverd van de waterniveaus en debieten van ingaande en uitgaande flows. Hieruit is een representatieve vul- en leegcyclus genomen met bijbehorende debieten en waterniveaus, welke gebruikt zijn in de CFD modellering. Voor de Greuns en Rhenen wordt een 24 uur cyclus van vullen en legen volgens een sinus gemodelleerd, terwijl het reservoir in Dedemsvaart een 48 uur cyclus volgt, die beschreven wordt met een stapfunctie.

De kentallen zijn weergegeven in Tabel 3.3 (op basis van de ingaande waterstroom) en in Tabel 3.4 (op basis van de dimensies van het reservoir). Als het water met een 'jet' in het reservoir stroomt is de stroming turbulent en zijn zowel de jet-stroming als de stroming

door convectie van belang (Archimedes getallen in de buurt van de 1). In het reservoir, als de 'jet' stroming meer uitgesmeerd wordt over het watervolume, zal juist de stroming door convectie domineren (Archimedes $\gg 1$).

Tabel 3.4 Kentallen van de gemodelleerde reinwaterreservoirs op basis van de ingaande waterstroom.

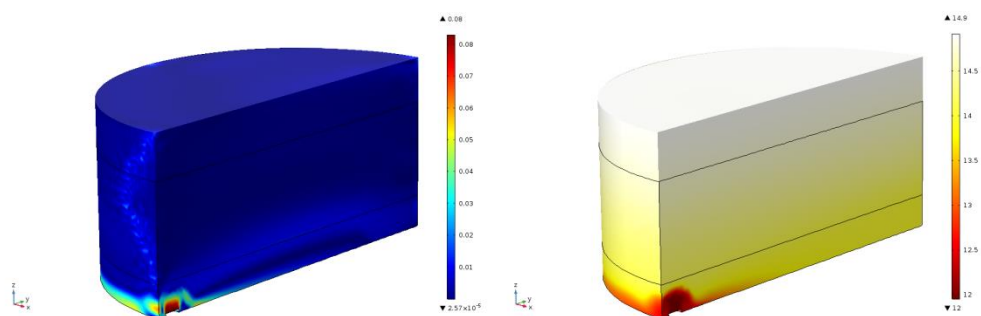
	dT [°C]	D [m]	Q [m ³ /h]	U [m/s]	Re	Gr	Ar
De Greuns	7.5	1.2	382	9.4E-02	1.1E+05	2.6E+10	2.1E+00
Dedemsvaart	7.5	1.3	25	5.2E-03	6.8E+03	3.3E+10	7.2E+02
Rhenen	7.5	0.25	30	1.7E-01	4.2E+04	2.4E+08	1.3E-01

Tabel 3.5 Kentallen van de gemodelleerde reinwaterreservoirs op basis van de gemiddelde stroomsnelheid in de tank.

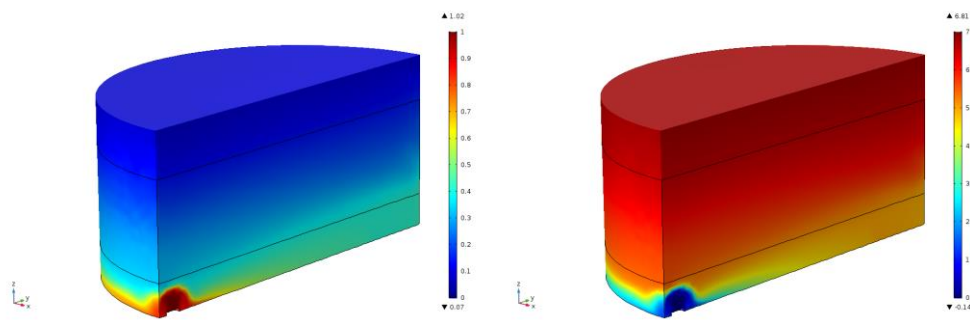
	dT [°C]	D [m]	Q [m ³ /h]	U [m/s]	Re	Gr	Ar
De Greuns	7.5	26	382	2.0E-04	5.2E+03	2.7E+14	9.9E+06
Dedemsvaart	7.5	24	25	1.5E-05	3.7E+02	2.1E+14	1.6E+09
Rhenen	7.5	20	30	2.7E-05	5.3E+02	1.2E+14	4.3E+08

3.4.1 Reservoir 'de Greuns'

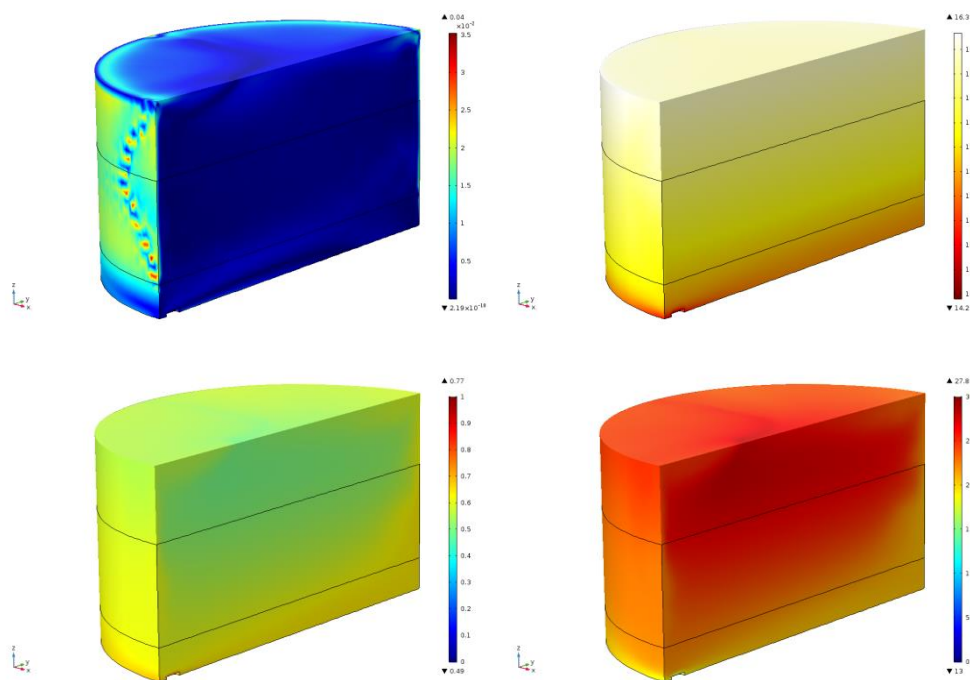
Bij de modellering van de Greuns zijn de pilaren niet meegenomen om rekentijd te besparen, en is vanwege de symmetrie de helft van het reservoir doorgerekend³. Voor de passieve tracer wordt de massabalans gecontroleerd. Op iedere tijdstap wordt de totale massa van de tracer in het reservoir bepaald (volume integraal van de concentratie). Deze moet gelijk zijn aan de ingaande massa. Deze is bepaald aan de oppervlakte integraal van de instromende snelheid maal de instroomconcentratie (massa per tijdseenheid). Deze wordt vervolgens opgeteld voor iedere tijdstap. Voor het reservoir zonder pilaren is dit verschil kleiner dan 5%. De berekende stroming, temperatuur, tracer en leeftijd op verschillende momenten is weergegeven in Figuur 3.11 en Figuur 3.12. Het plaatje na 7 uur laat het beeld zien tijdens het vullen. Opvallend is dat het water niet als een jet omhoog gaat. De lagere temperatuur van het ingaande water voorkomt dit. Hierdoor ontstaat een stratificatie, deze wordt echter weer opgemengd bij het vullen (of legen). Tijdens het legen is er helemaal geen stratificatie meer en zijn de concentraties van de tracer en de leeftijd van het water gelijkmatig verdeeld over het reservoir.



³ Desondanks is de rekenserver ruim een week aan het rekenen voor 24h simulatietijd.



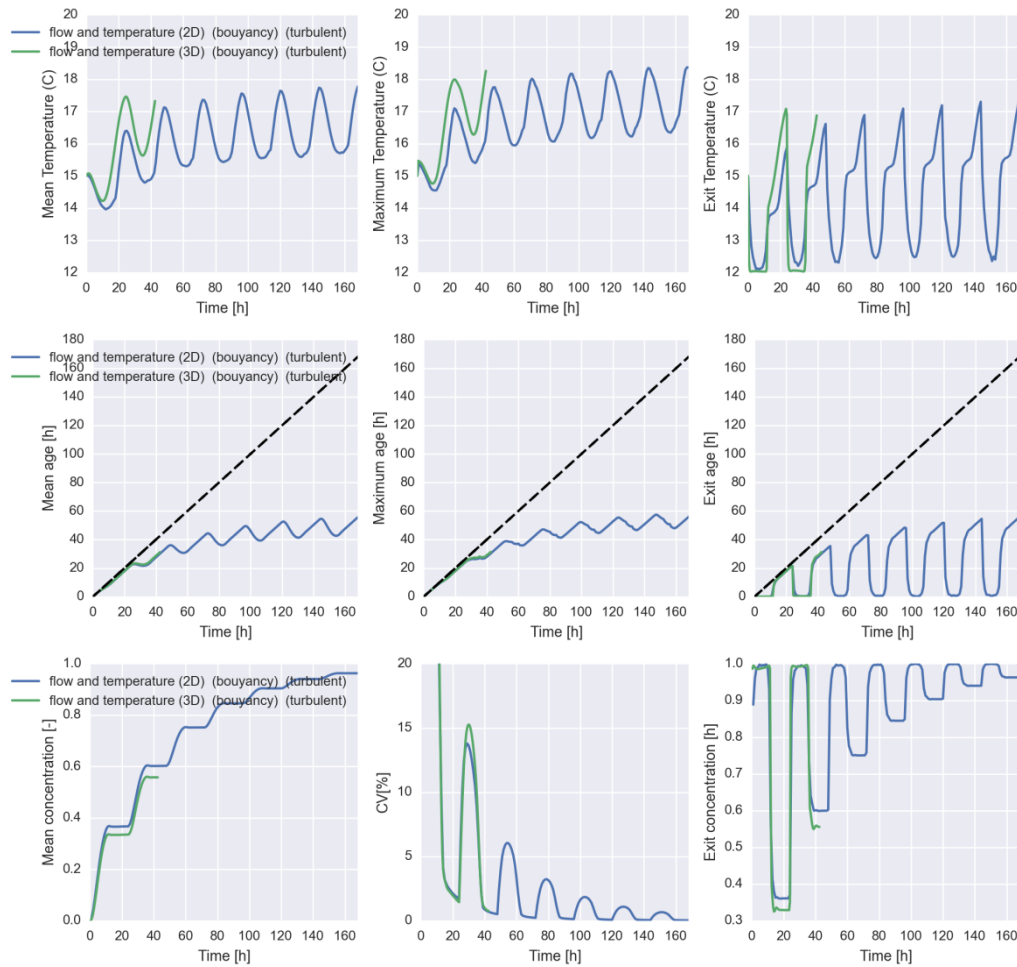
Figuur 3.11 Reservoir de Greuns: berekende stroming (linksboven), temperatuur (rechtsboven), tracer (linksonder) en leeftijd (rechtsonder) van het water na 7 uur, tijdens vullen van het reservoir.



Figuur 3.12 Reservoir de Greuns: Berekende stroming (linksboven), temperatuur (rechtsboven), tracer (linksonder) en leeftijd (rechtsonder) van het water na 36 uur, dit is net na het vullen van het reservoir op dag 2.

De resultaten van temperatuur, leeftijd en tracer over de tijd zijn weergegeven in Figuur 3.13. In het reservoir van De Greuns mengt het ingaande water relatief snel met het water in de tank. Na 13.5 uur is de CV^2 kleiner dan 5% en is het ingaande water nagenoeg volledig gemengd. Vanwege de goede menging is de maximale temperatuur in het reservoir niet veel hoger dan de gemiddelde temperatuur. Hetzelfde geldt voor de leeftijd. De maximum leeftijd in het water loopt op tot niet meer dan 60 uur. Deze wordt vooral bepaald door de besturing van het reservoir (verhouding ingaande/uitgaande flows en volume). Temperaturen lopen in 2D op tot maximaal 18.5 graden in de tank bij een ingaande watertemperatuur van 12 °C, buitentemperatuur van 30 °C en maximale zonnestraling van 200 W/m², zie Tabel 3.3.

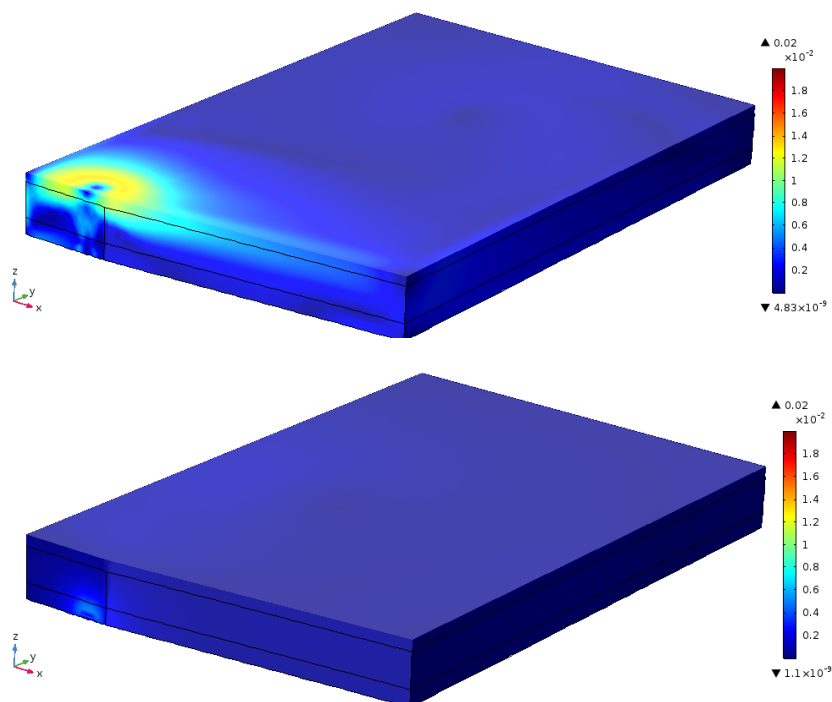
De verschillen tussen 2D en 3D zijn eveneens weergegeven in Figuur 3.13. Het 2D model heeft een week gesimuleerd, terwijl het 3D model 2 dagen heeft gesimuleerd. De verschillen in menging en leeftijd zijn klein tussen 2D en 3D. De verschillen in temperatuur zijn groter. Dit heeft mede te maken met het andere contactoppervlakte tussen de buitenwanden en het water. In 2D is de verhouding tussen het watervolume en contactoppervlakte een factor 2 kleiner. Dit is gecompenseerd door de ingaande warmteflux met een factor 2 te verhogen (zie ook 3.2.2). Omdat de warmteoverdracht ook sterk bepaald wordt door de temperatuur van het water aan de zijwand, ontstaan er verschillen tussen 2D en 3D.



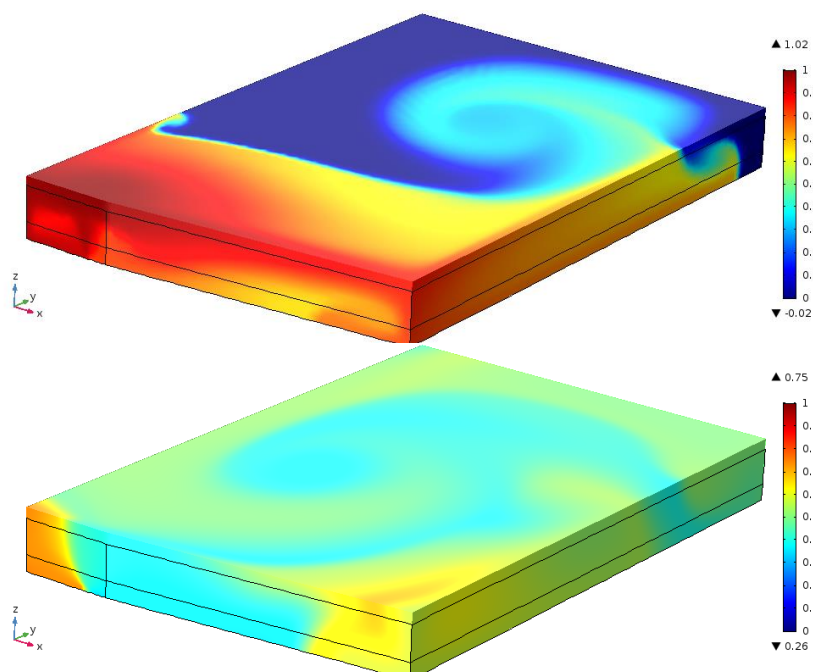
Figuur 3.13 Resultaten (turbulente) CFD model van temperatuur (boven), leeftijd (midden) van het water en tracer (onder) voor berekeningen in 2D (blauw) en 3D (groen). Gemodelleerde reservoir is De Greuns.

3.4.2 Reservoir Dedemsvaart

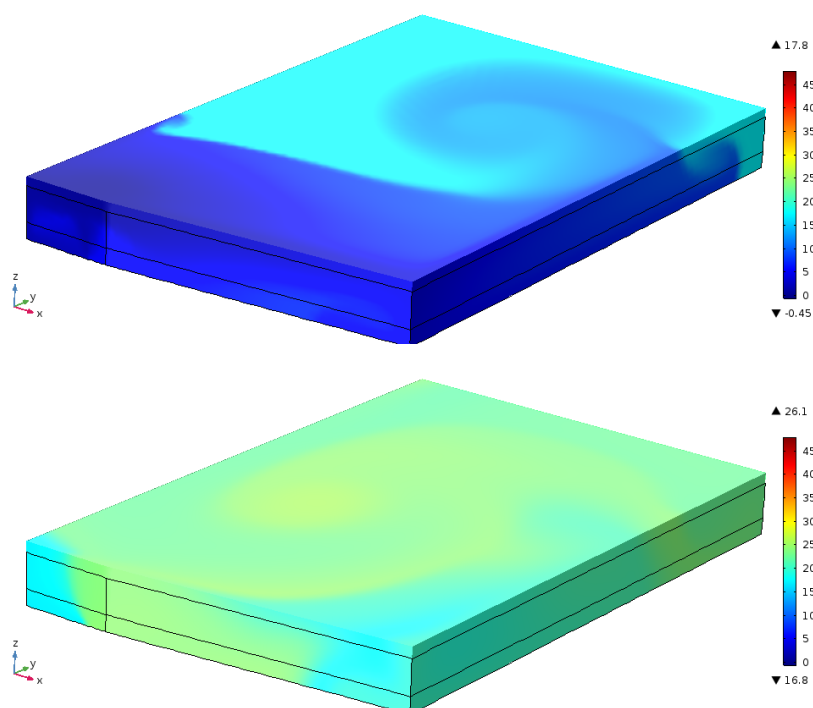
Dedemsvaart is een ondergronds reservoir. Omdat de zijwanden hiervan niet direct in contact staat met de zon en buitenlucht, zal de toename in temperatuur klein zijn. De temperatuur zal vooral bepaald worden door de temperatuur van het ingaande water. Daarom is het warmtetransport niet gemodelleerd voor dit reservoir. Dit reservoir is alleen in 3D gemodelleerd gedurende 48 uur. Het vul- en leegregime volgen een 48-uur cyclus: gedurende 4 uur wordt er water overdag onttrokken en om de nacht wordt het water bijgevuld in 8 uur (Figuur 3.17). Om het reservoir relatief ondiep en rechthoekig is, zijn de mengtijden groot. Na 48 uur is de CV nog zo'n 8%. Ook de leeftijd loopt op, na 48 uur rekenen is de maximale leeftijd nog niet bereikt. Naast de lange mengtijd is de gemiddelde verblijftijd ook groot in dit reservoir, ongeveer 120 uur (zie Tabel 3.6). In Figuur 3.14 is de stroming tijdens vullen en legen weergegeven. Tijdens vullen is er wel een jet omhoog en is temperatuurstratificatie waarneembaar. De tracer laat duidelijk zien dat het een tijd duurt voordat het reservoir gemengd is (Figuur 3.15). Na 17.5h is de tracer pas halverwege het reservoir en vormt zich ook een duidelijke recirculatie. Hetzelfde geldt voor de leeftijd van het water (Figuur 3.16)



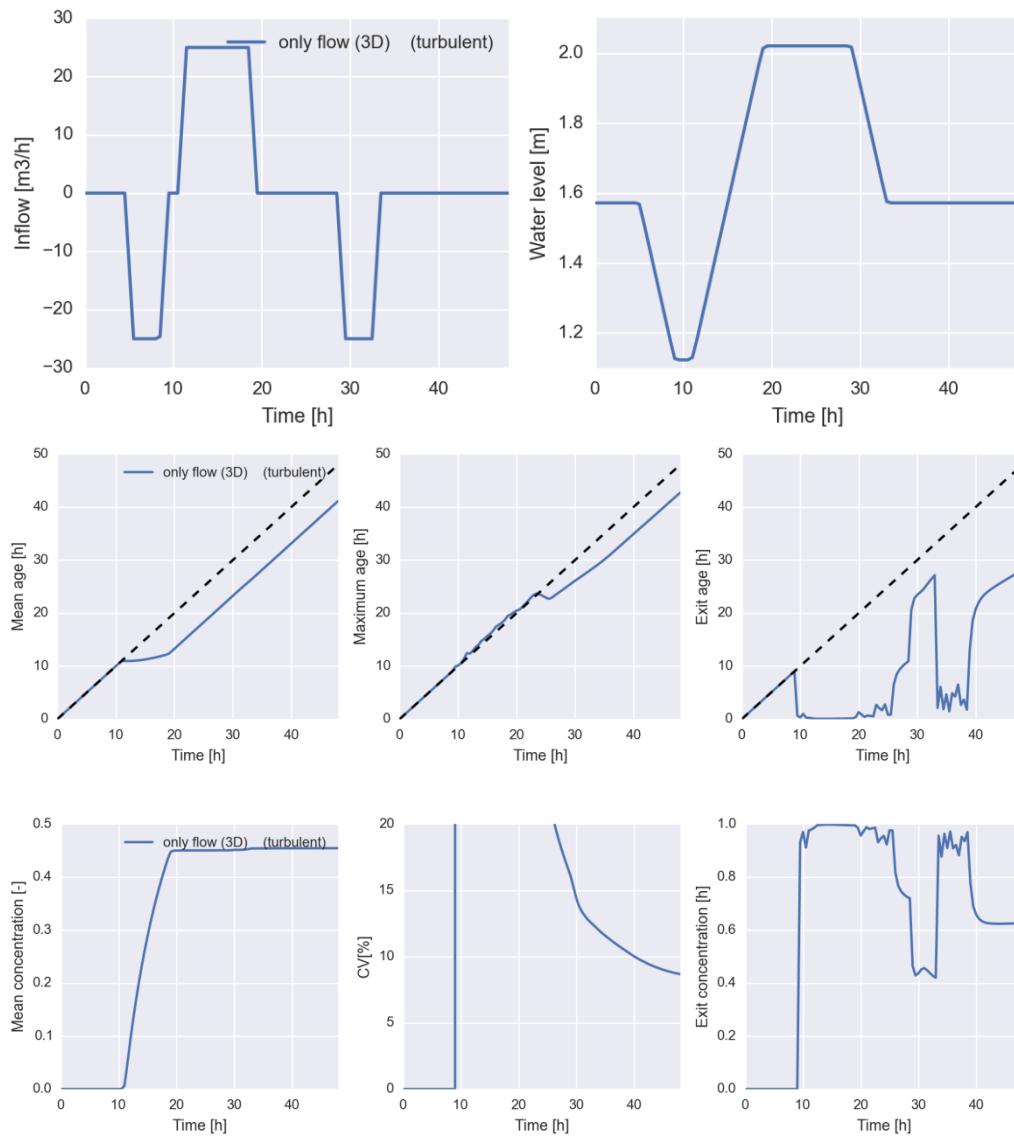
Figuur 3.14 Stroming in het reservoir (in m/s) Dedemsvaart na 17.5 uur (tijdens vullen, bovenste figuur) en na 30 uur (tijdens legen, onderste figuur). Instroom van het water vindt plaats linksonder in het reservoir.



Figuur 3.15 Concentratie tracer in reservoir Dedemsvaart na 17.5 uur (tijdens vullen, bovenste figuur) en na 30 uur (tijdens legen, onderste figuur).



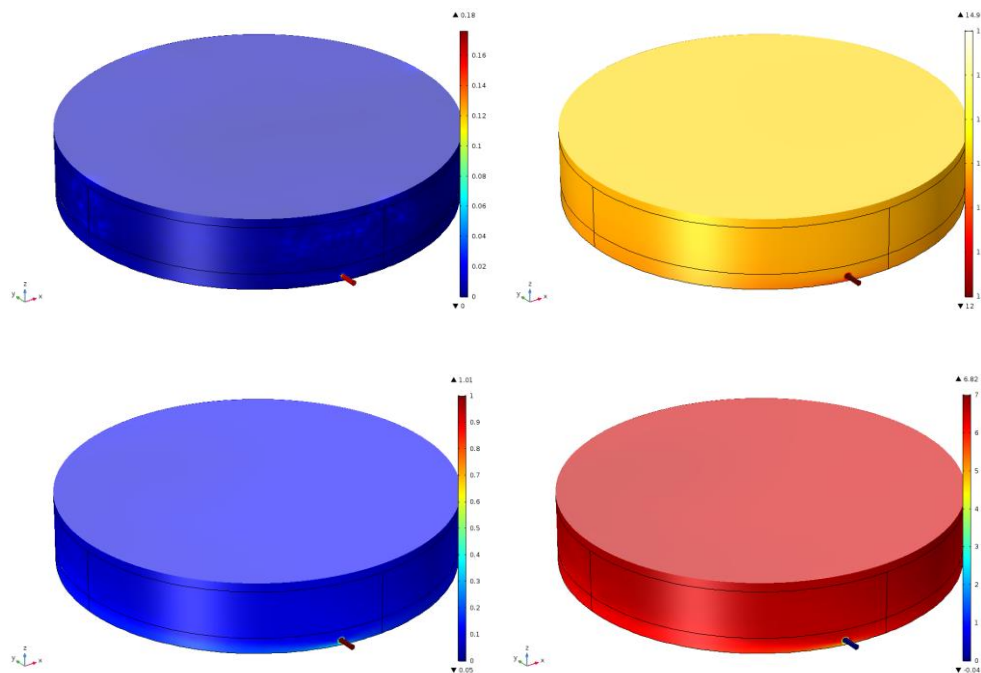
Figuur 3.16 Leeftijd van het water (in uren) in het reservoir Dedemsvaart na 17.5 uur (tijdens vullen, bovenste figuur) en na 30 uur (tijdens legen, onderste figuur).



Figuur 3.17 Resultaten (turbulente) 3D CFD model van ingaande flow en waterniveau (boven), leeftijd (midden) van het water en tracer (onder) . Met exit wordt de concentratie bij de inlaat/uitlaat bedoeld. Gemodelleerde reservoir is Dedemsvaart.

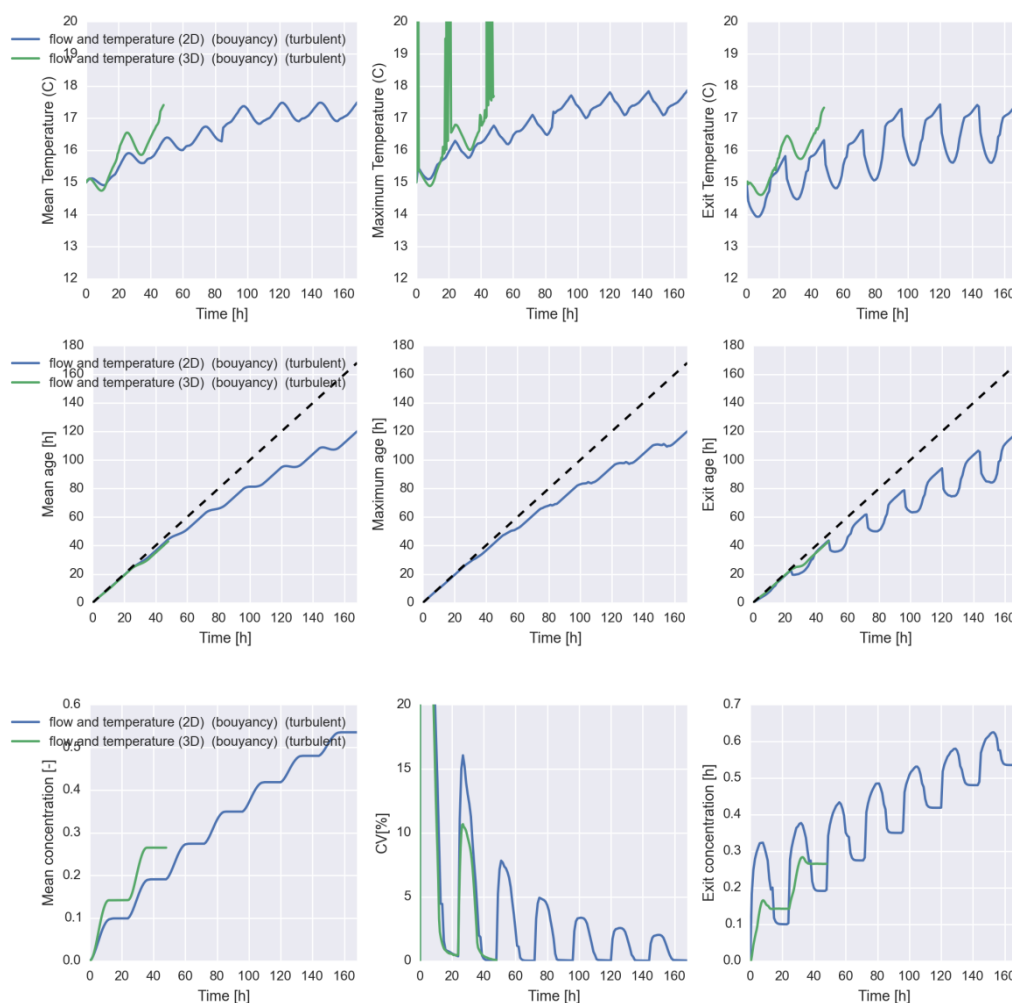
3.4.3 Reservoir Rhenen

Rhenen is een relatief klein bovengronds reservoir met een volume van 1500 m³. Dagelijks wordt het reservoir 's nachts gevuld tot zo'n ~1250 m³ en overdag geleegd tot ~1000 m³. Het vullen en legen wordt gemodelleerd met een sinus, waarbij het maximum ligt op 30 m³/h. De hydraulische verblijftijd in het reservoir is ongeveer 120 uur (zie Tabel 3.6).



Figuur 3.18 Reservoir Rhenen: Berekende stroming (linksboven), temperatuur (rechtsboven), tracer (linksonder) en leeftijd (rechtsonder) van het water na 7 uur (tijdens vullen van het reservoir).

De berekende snelheden, temperatuur, tracer en leeftijd is weergegeven in Figuur 3.18. De menging lijkt hier meteen goed, er is weinig stratificatie en de concentraties zijn gelijkmatig verdeeld. Dit is vergelijkbaar op andere tijdstippen. De resultaten over de tijd zijn weergegeven in Figuur 3.19. Vanwege de lange hydraulische verblijftijd zijn de leeftijden van het water ook hoog, die lopen na 7 dagen simulatietijd nog op tot boven de 120 uur. De mengtijden zijn relatief kort, na 11.5 uur is de CV kleiner dan 5%. Temperaturen lopen in 2D op tot maximaal 18 graden in de tank (bij een ingaande watertemperatuur van 12 °C, buitentemperatuur van 30 °C en zonnestraling, zie Tabel 3.3). Net zoals bij het reservoir van de Greuns loopt in 3D de temperatuur verder op dan in 2D. In de maximum temperatuur zitten een aantal vreemde pieken, zeer waarschijnlijk veroorzaakt door numerieke fouten. Deze piekwaarden hebben geen invloed op de gemiddelde temperatuur.



Figuur 3.19 Resultaten (turbulente) CFD model van temperatuur (boven), leeftijd (midden) van het water en tracer (onder) voor berekeningen in 2D (blauw) en 3D (groen). Gemodelleerde reservoir is Rhenen.

Een overzicht met de mengtijden, leeftijden en maximale temperatuur voor de drie gemodelleerde reservoirs is weergegeven in Tabel 3.6. In het reservoir van Dedemsvaart zijn de mengtijden erg groot vanwege de ondiepe rechthoekige geometrie. De gemiddelde verblijftijden bepalen voor een groot gedeelte de maximale leeftijden.

Tabel 3.6 Overzicht van hydraulische verblijftijden op basis van de gemiddelde waterstanden in de reservoirs en de berekende mengtijden en leeftijden volgens het CFD model.

	Kentallen				CFD resultaten		
	H _{gem} [m]	V _{gem} [m ³]	dQ [m ³ /dag]	Th [h]	T _{meng} [h]	Max. age [h]	Max. T [°C]
De Greuns	11.5	6106	2673	55	13.5	60	18.5 (2D)
Dedemsvaart	1.58	500	100	120	>48	>48	-
Rhenen	3.64	1144	229	120	11.5	>120	18 (2D)

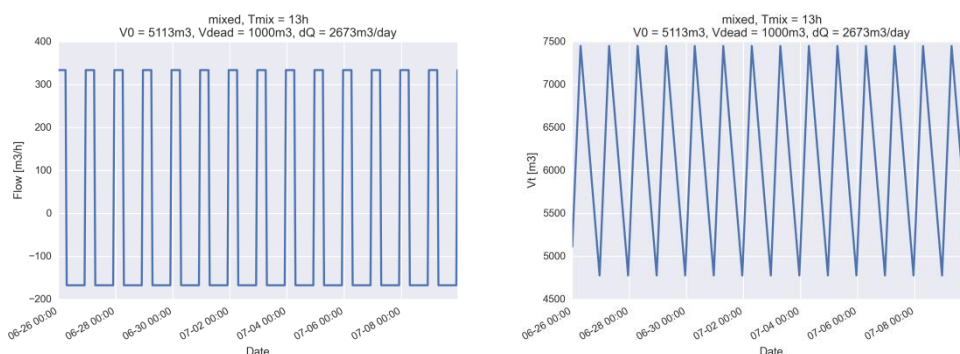
3.5 Resultaten vereenvoudigde modellering

Met de vereenvoudigde modellering kan een langere periode worden doorgerekend. Voor de in- en uitgaande flows zijn stapfuncties gebruikt die het best overeenkomen met de

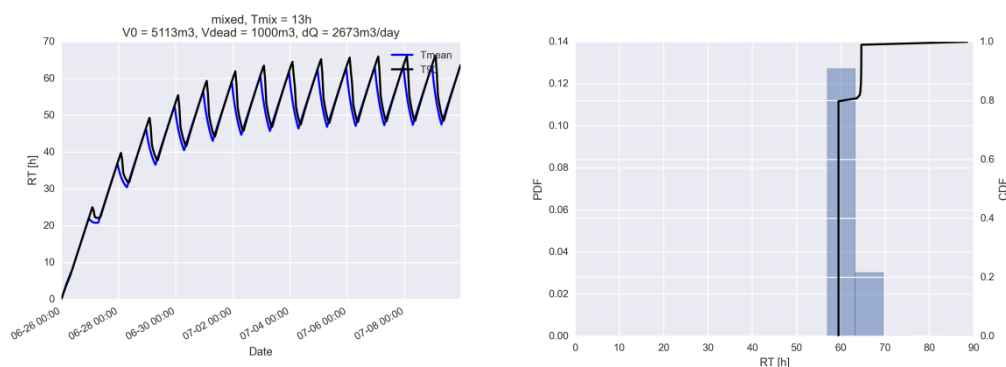
werkelijke procesvoering. Dit komt neer op een onttrekking overdag en een vulmoment in de nacht. De gebruikte tijden en andere parameters zijn weergegeven in Tabel 3.7. Een aantal resultaten voor reservoir 'De Greuns' zijn weergegeven in Figuur 3.20-Figuur 3.23. De gemiddelde leeftijd van het water en verdeling kan met het versimpeld model voorspeld worden. Vanwege het vullen en legen verloopt de leeftijd met een zaagtand, deze gaat wel naar een stationaire toestand toe. De verdeling van leeftijden over het reservoir is klein. Dit heeft te maken met de mengtijd die relatief kort is. Het temperatuursverloop laat de voorspelde temperatuur zien over een langere periode (Figuur 3.22, Figuur 3.23) op basis van de KNMI gegevens.

Tabel 3.7 Gebruikte parameters in de vereenvoudigde modellering

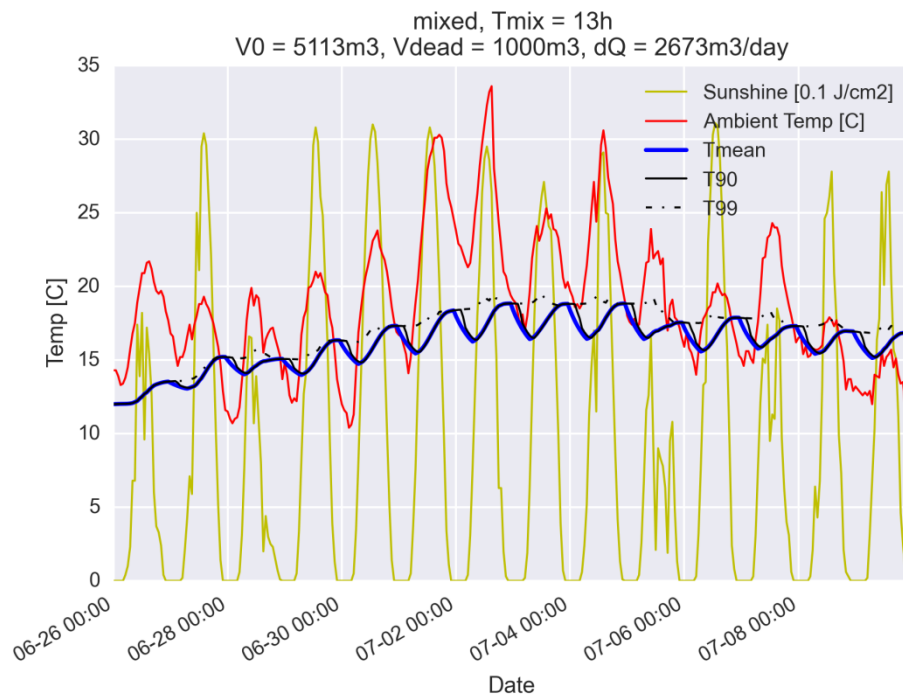
	Greuns	Rhenen	Dedemsvaart
T_{meng} [h]	13.5	11.5	80
V_{dead} [m ³]	1000	100	100
Vul- en leegtijden	Leeg: 07:00-23:00, Vullen: 23:00-07:00	Leeg: 08:00-24:00 Vullen: 00:00-08:00	Leeg: 04:00-08:00 Vullen (om de dag): 11:00-19:00
λ (wand) [W/m/K]	50	50	50
Dikte wand [mm]	50	200	6
Ingaande temperatuur (T_{in} [°C])	12	12	12



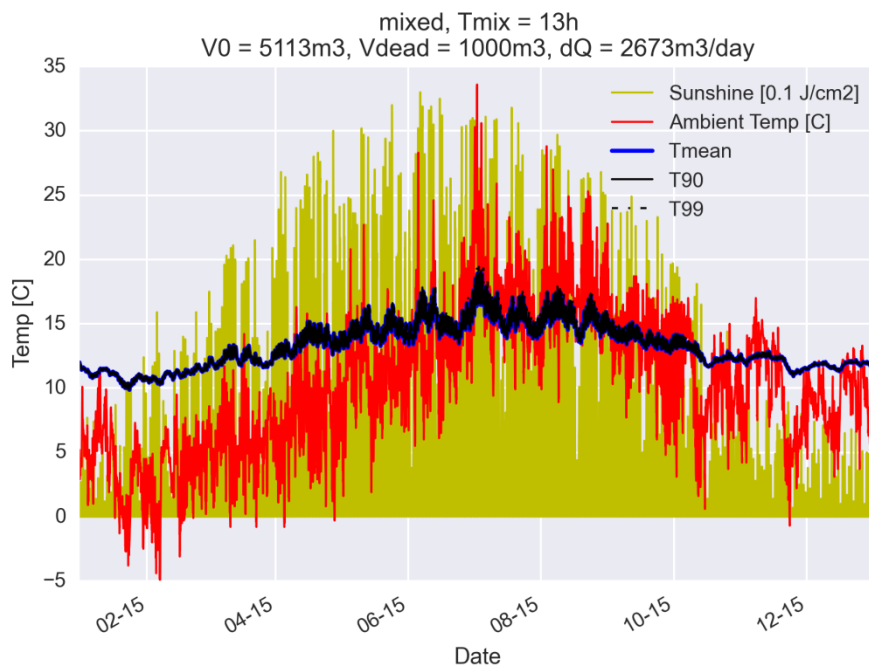
Figuur 3.20 In- en uitstroom (links) en volume reservoir (rechts) voor de vereenvoudigde modellering voor reservoir 'De Greuns', 2 weken doorgerekend.



Figuur 3.21 Leeftijd van het water over de tijd (links) en de waarschijnlijkheidsverdeling (PDF als histogram, rechts) en cumulatieve dichtheidsverdeling (CDF, zwarte lijn, rechts) na twee weken voor de vereenvoudigde modellering voor reservoir 'De Greuns', 2 weken doorgerekend.



Figuur 3.22 Temperatuur van omgeving, watertemperatuur en zonnestraling voor de vereenvoudigde modellering van reservoir 'De Greuns', 2 weken doorgerekend.



Figuur 3.23 Temperatuursverloop van het water (blauw) in het reservoir aan de Greunsweg, buitentemperatuur (rood), zonnescijns (geel) over het jaar 2015.

3.5.1 Gevoeligheden versimpeld model

Verschillende scenario's zijn doorerekend en de gevolgen voor temperatuur en leeftijd zijn in kaart gebracht. Voor ieder scenario is heel 2015 doorerekend, waarin gebruik gemaakt is van weergegevens van het KNMI voor buitentemperatuur en zonnestraling. Tenzij anders aangegeven worden de parameterwaarden voor het standaardscenario gebruikt. De volgende scenario's zijn doorerekend:

- Standaard [2015_default], de waarden zijn $\lambda=50$ W/m/K, $dr=5$ cm, $V_{dead}=1000$ m³, $T_{mix}=13.5$ h, $T_{in}=12$ °C.
- Lage geleidbaarheid wand [2015_low_h]: $\lambda=2$ W/m/K
- Kleine wanddikte [2015_low_dr]: $dr=5$ mm
- Kleine dode zone [2015_low_Vdead]: $V_{dead}=100$ m³
- Lange mengtijd [2015_high_Tmix]; $T_{mix}=48$ h
- Hogere ingaande temperatuur van het water [2015_Tin=13]: $T_{in}=13$ °C

De volgende parameters zijn berekend voor elk scenario:

- Jaargemiddelde temperatuur van het water gemiddeld over de tank (TG_{mn})
- Jaarmaximum temperatuur van het water gemiddeld over de tank (TG_{max})
- Jaarmaximum temperatuur van het 1% warmste water in de tank ($T99_{max}$)
- Jaargemiddelde leeftijd van het water gemiddeld over de tank (Age_{mn})
- Jaarmaximum leeftijd van het water gemiddeld over de tank (Age_{max})
- Jaarmaximum leeftijd van het 1% oudste water in de tank ($Age99_{max}$)

Resultaten zijn weergegeven in Tabel 3.8. De berekeningen zijn uitgevoerd voor het bovengrondse reservoir aan de Greunsweg. De geleidbaarheid van de wand en dikte van de wand hebben een kleine invloed op het temperatuursverloop. De grootte van de dode zone heeft wel een invloed op de maximum leeftijden in de tank, en slechts een kleine invloed op de maximum temperatuur. De tijdsduur waarop de tank volledig gemengd is is van groot belang. Bij hogere mengtijden neemt de maximum leeftijd sterk toe en daarnaast de maximum temperatuur ook. Het verhogen van de ingaande temperatuur leidt ook tot hogere temperaturen in de tank.

Tabel 3.8 Gevoeligheidsanalyse, temperatuur en leeftijdparameters voor verschillende scenario's (de Greuns).

	Age _{mn}	Age _{max}	Age99 _{max}	TG _{mn}	TG _{max}	T99 _{max}
2015_default	54.9	63.8	77.5	13.3	18.9	19.5
2015_low_h	54.9	63.8	77.6	13.5	18.5	19.2
2015_low_dr	54.9	63.8	77.5	13.3	19.0	19.5
2015_low_Vdead	54.6	63.5	66.4	13.3	18.9	18.9
2015_high_Tmix	56.8	66.3	112.7	13.3	19.1	23.1
2015_Tin=13	54.9	63.8	77.5	14.1	19.7	20.2

Daarnaast is een gevoeligheidsanalyse uitgevoerd voor diverse parameters die beïnvloed kunnen worden d.m.v. de bedrijfsvoering of het ontwerp. Voor reservoir De Greuns zijn dit:

- Standaard [2015_default], $dQ=2000 \text{ m}^3/\text{dag}$, $T_{\text{mix}}=13.5\text{h}$, 'mixed' mode, stapvormig verloop van ingaand en uitgaand debiet, minimale waterniveau = 9m.
- Een groter leeg- en vuldebiet [2015_dQ=4000]: $dQ=4000 \text{ m}^3/\text{dag}$
- Een kleiner leeg- en vuldebiet [2015_dQ=1000]: $dQ=1000 \text{ m}^3/\text{dag}$
- Een sinusvormig verloop van ingaand en uitgaand debiet [2015_Greuns_sinus]
- Reservoir wordt bedreven in flow-through mode met constant hetzelfde in- en uitgaande debiet [2015_Greuns_flow]
- Een lager waterniveau (en volume) in het reservoir [2015_Greuns_H0=3m]: minimum waterniveau = 3m.

Tabel 3.9 Gevoeligheidsanalyse, temperatuur en leeftijdparameters voor verschillende scenario's m.b.t. de bedrijfsvoering (de Greuns).

	Age _{mn}	Age _{max}	Age99 _{max}	TG _{mn}	TG _{max}	T99 _{max}
2015_default	54.9	63.8	77.5	13.3	18.9	19.5
2015_Greuns_dQ=4000	33.4	42.5	56.1	13.7	18.2	18.9
2015_Greuns_dQ=1000	130.4	140.7	154.5	15.1	23.7	24.0
2015_Greuns_sinus	56.4	63.9	76.6	14.2	19.7	20.8
2015_Greuns_flow	46.4	46.7	60.7	13.9	18.6	19.8
2015_Greuns_H0=3	22.9	32.4	52.8	14.2	25.0	30.6

Het veranderen van het vul- en leegdebiet op een dag heeft het grootste effect op de leeftijden en temperaturen (Tabel 3.9). Een flow-through systeem met constante debieten geeft iets lagere leeftijden en vergelijkbare temperaturen. Het bedienen van het vullen en legen volgens een sinusfunctie leidt juist tot hogere temperaturen. Het verlagen van het waterniveau leidt wel tot lagere leeftijden, omdat de hydraulische verblijftijd korter wordt. Echter de maximale temperaturen lopen nu wel op, omdat er veel minder watervolume is.

Voor reservoir van Rhenen (Candia) zijn de volgende bedrijfsmatige/ontwerpparameters onderzocht:

- Standaard [2015_Candia_default], $dQ=229 \text{ m}^3/24\text{h}$, $T_{\text{mix}}=11.5\text{h}$, 'mixed' mode, stapvormig verloop van ingaand en uitgaand debiet, minimum waterniveau = 3.28 m.
- Een kleiner leeg- en vuldebiet [2015_Candia_dQ=110]: $dQ=110 \text{ m}^3/24\text{h}$
- Een groter leeg- en vuldebiet [2015_Candia_dQ=458]: $dQ=458 \text{ m}^3/24\text{h}$
- Een kleinere mengtijd [2015_Candia_Tmix=6]: $T_{\text{mix}} = 6\text{h}$
- Een grotere mengtijd [2015_Candia_Tmix=23]: $T_{\text{mix}} = 23\text{h}$
- Een verlaging van het minimale waterniveau in het reservoir [2015_Candia_H0=2], naar 2.0 m
- Een sinusvormig verloop van ingaand en uitgaand debiet [2015_Candia_sinus]
- Reservoir wordt bedreven in flow-through mode met constant hetzelfde in- en uitgaande debiet [2015_Candia_flow]

Verlagen van het vul- en leegdebiet geeft hogere leeftijden van het water en hogere temperaturen. Het omgekeerde geldt voor het vergroten van het vul- en leegdebiet. Veranderen van de mengtijden heeft een beperkt effect. Bij langere mengtijden worden de maximale temperaturen en leeftijden in de kelder iets hoger. Verlagen van het waterniveau in de kelder heeft een positief effect op de leeftijden, al neemt de maximale temperatuur wel toe (het gemiddelde blijft gelijk). Vanwege het lagere niveau wordt het water sneller opgewarmd op warme dagen. Vullen en legen volgens een sinus heeft weinig effect op

leeftijden en temperaturen. Het bedrijven in flow-through modus heeft een klein positief effect op de leeftijden en temperaturen.

Tabel 3.10 Gevoeligheidsanalyse, temperatuur en leeftijdparameters voor verschillende scenario's m.b.t. de bedrijfsvoering (Rhenen).

	Age _{mn}	Age _{max}	Age99 _{max}	TG _{mn}	TG _{max}	T99 _{max}
2015_Candia_default	119.1	129.0	139.0	16.0	28.3	28.3
2015_Candia_dQ=110	233.2	247.8	258.7	17.1	32.6	32.6
2015_Candia_dQ=458	53.9	62.7	73.6	14.8	23.4	23.4
2015_Candia_Tmix=6	119.0	128.9	134.9	16.0	28.3	28.3
2015_Candia_Tmix=23	119.5	129.5	150.2	16.0	28.4	30.5
2015_Candia_H0=2	78.0	87.1	99.9	15.9	30.6	30.7
2015_Candia_sinus	119.4	128.1	138.8	16.1	28.2	28.4
2015_Candia_flow	107.0	108.4	120.9	15.7	27.0	28.1

Voor reservoir van Dedemsvaart zijn de volgende bedrijfsmatige/ontwerpparameters onderzocht:

- Standaard [2015_Dedemsvaart_default], dQ=200 m³/48h, Tmix=80h, 'mixed' mode, stapvormig verloop van ingaand en uitgaand debiet, minimum waterniveau = 70% van het maximum (=1.6m).
- Een groter leeg- en vuldebiet [2015_Dedemsvaart_dQ=400]: dQ=400 m³/48h
- Een kleinere mengtijd [2015_Dedemsvaart_Tmix=20]: T_{mix} = 20h
- Een sinusvormig verloop van ingaand en uitgaand debiet [2015_Dedemsvaart_sinus]
- Reservoir wordt bedreven in flow-through mode met constant hetzelfde in- en uitgaande debiet [2015_Dedemsvaart_flow]
- Een vul- en leegperiode van 24 uur [2015_Dedemsvaart_period=24h]
- Een verlaging van het minimale waterniveau in het reservoir [2015_Dedemsvaart_H0=0-35], naar 35% van het maximum niveau (=0.8 m)

Tabel 3.11 Gevoeligheidsanalyse, leeftijdparameters voor verschillende scenario's m.b.t. de bedrijfsvoering (Dedemsvaart).

	Age _{mn}	Age _{max}	Age99 _{max}
2015_Dedemsvaart_default	88.6	113.1	242.3
2015_Dedemsvaart_dQ=400	40.4	73.0	205.2
2015_Dedemsvaart_Tmix=20	83.4	105.3	136.9
2015_Dedemsvaart_sinus	100.1	117.8	222.8
2015_Dedemsvaart_flow	90.8	92.4	227.2
2015_Dedemsvaart_period=24h	37.7	54.1	186.5
2015_Dedemsvaart_H0=0-35	54.5	84.2	259.7

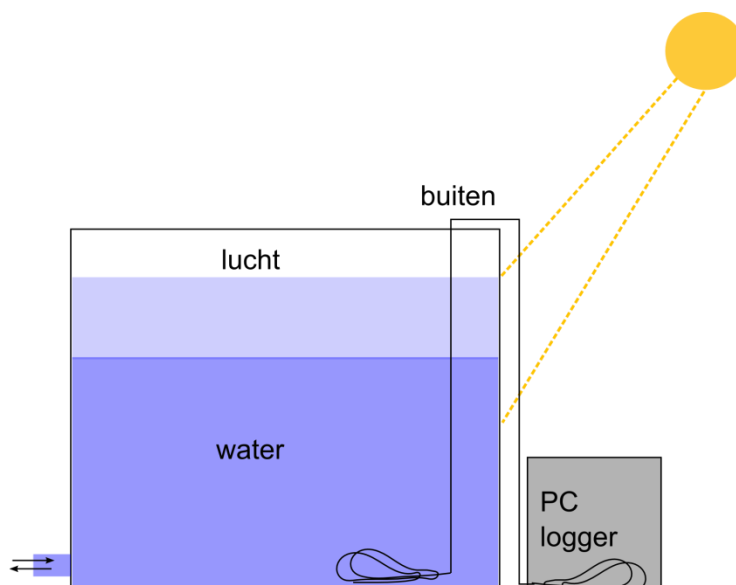
Maatregelen die de gemiddelde verblijftijd omlaag brengen, zoals het vergroten van het vul- en leegdebiet, en het verkorten van de periode, leiden tot lagere leeftijden (zowel gemiddeld als in de extremen), zie Tabel 3.11. Het veranderen van het vul- en leegpatroon naar een sinusfunctie of naar een flow-through modus (met constante debieten) leiden tot iets kleinere maximale verblijftijden, de gemiddelde verblijftijden zijn echter wat hoger. Verlagen van de mengtijd heeft het grootste effect op de maximale verblijftijden. Hiervoor zullen echter structurele aanpassingen nodig zijn, zoals plaatsen van schotten of veranderen van

de instroom. Verlagen van het waterniveau leidt tot lagere gemiddelde leeftijden, echter de maximale verblijftijd is wel toegenomen. Dit wordt mogelijk veroorzaakt doordat de lengte/hoogte verhouding schever wordt en daardoor de menging slechter.

3.6 Experimenten

In het reservoir van De Greuns is een DTS-kabel geïnstalleerd die de temperatuur over de hoogte kan meten. De kabel is geïnstalleerd van 13 oktober 2015 t/m november 2016. Over de lengte van de kabel wordt de temperatuur gemeten met een ruimtelijke resolutie van 1 m, welke met tijdsintervallen van 15 minuten wordt opgeslagen. In totaal is de kabel 200 m lang. Bij het loggen van de data wordt uitgegaan van 934 meetpunten, waarvan meetpunt 736-934 de temperatuur langs de kabel meten (ieder meetpunt representeert 1 meter). Naast het reinwaterreservoir staat een gebouwtje waar een computer de gegevens opslaat. De kabel legt het volgende traject af (Figuur 3.24):

- Stuk in het gebouw (~ 149 m)
- Van het gebouw door de grond naar het reinwaterreservoir (~1 m)
- Langs de buitenwand van het reinwaterreservoir naar het dak van het reinwaterreservoir (~14 m)
- Op het dak vindt de doorvoer naar de binnenkant van het reinwaterreservoir plaats. De kabel gaat eerst door een luchtlaag voordat het wateroppervlakte wordt bereikt (deze afstand is variabel, afhankelijk van het vul/leeg regime). Onder in het reinwaterreservoir is de kabel gefixeerd en ligt met een paar lussen op de grond (~ 20 m).



Figuur 3.24 Plaatsing van DTS kabel in het reinwaterreservoir 'De Greuns'

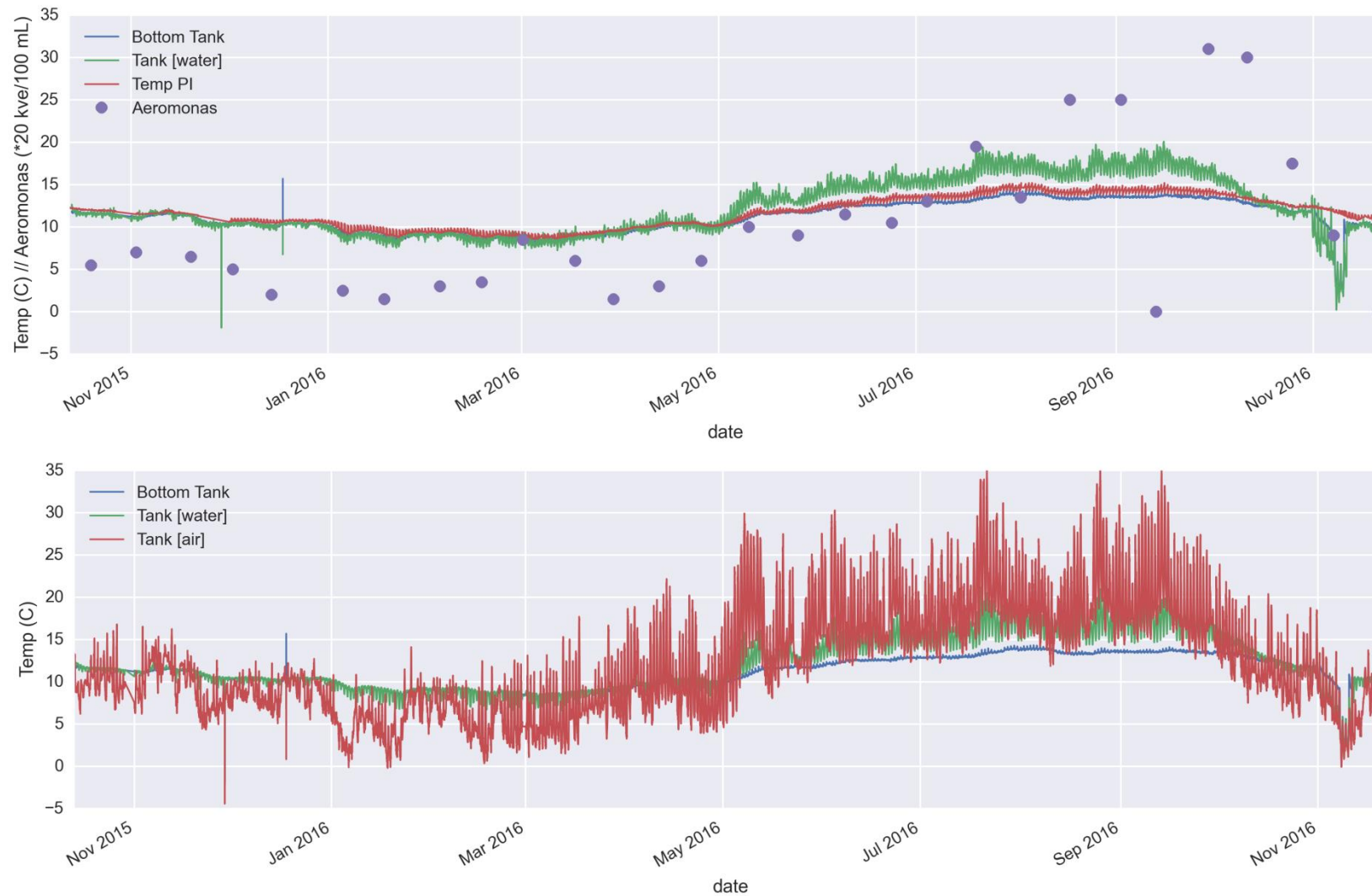
Naast metingen van de DTS kabel worden het watervolume in de tank, in- en uitstroomdebiet, temperatuur (opgevraagd uit PI systeem van Vitens) en Aeromonas getallen van het instromende en uitstromende water bijgehouden. Met behulp van het gemeten watervolume is vastgesteld per tijdstap welk gedeelte van de kabel in het water ligt of in de luchtlaag boven het water ligt.

Met behulp van de DTS kabel kunnen de volgende temperaturen bepaald worden over de tijd:

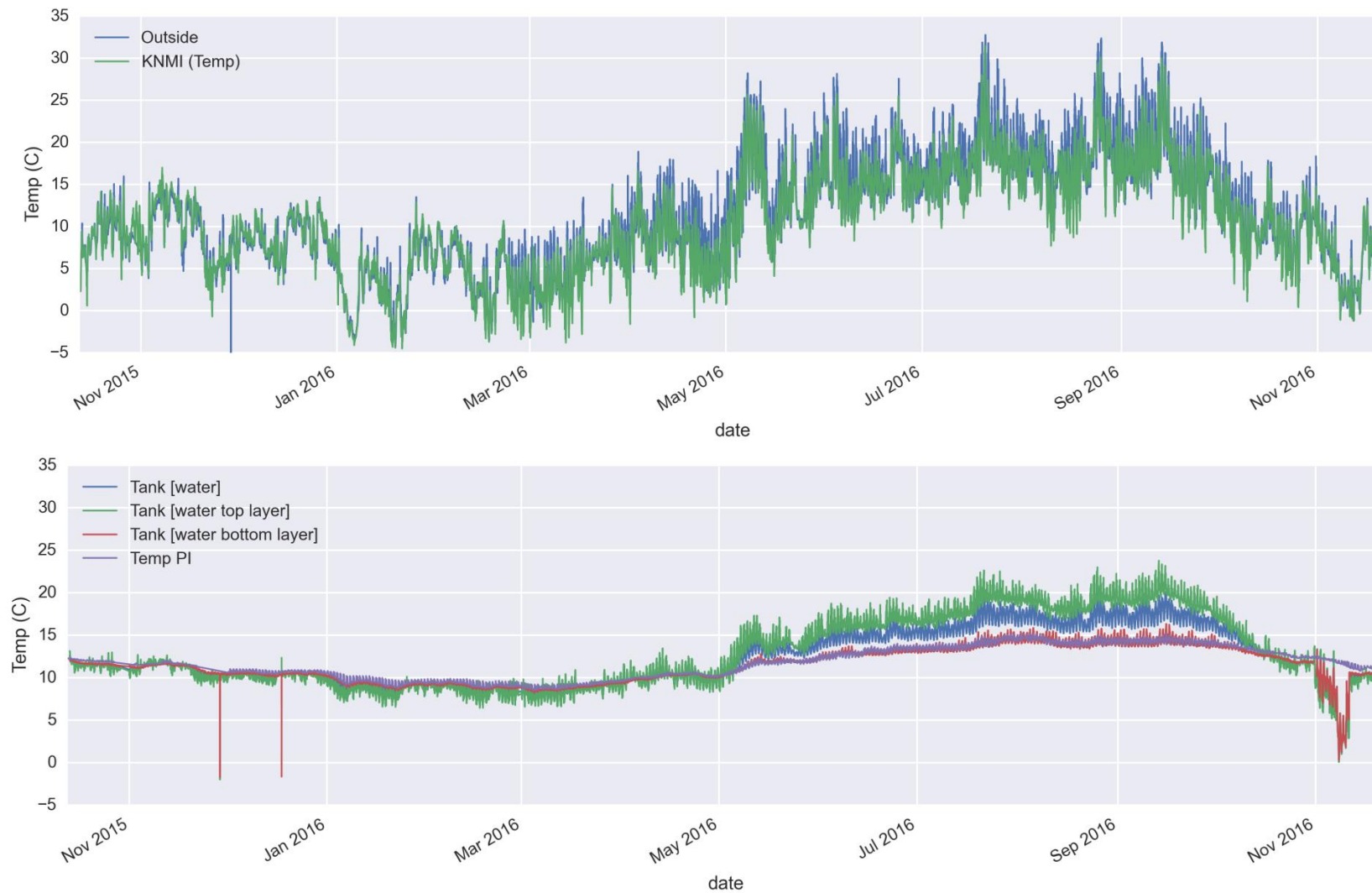
- Gemiddelde buitentemperatuur (uit het stuk kabel dat langs de buitenwand loopt - meetpunt 885-899 in de kabel)
- Gemiddelde temperatuur in de luchtlaag boven het watervolume (vanaf meetpunt 899 t/m de waterspiegel – bepaald uit het gemeten watervolume).
- Gemiddelde temperatuur van het water (vanaf de waterspiegel t/m meetpunt 914)
- Gemiddelde temperatuur op de bodem van de kelder (meetpunt 914-934)

Van deze temperaturen zijn tijdreeksen gemaakt. Deze zijn vergeleken met KNMI-gegevens van station Leeuwarden (uurgegevens, opgevraagd via de website van het KNMI) en de gemeten temperatuur op de in- en uitgaande leiding.

De gemeten temperatuur aan de buitenwand van de kelder komt goed overeen met KNMI-gegevens (Figuur 3.26, boven). Hieruit blijkt dat de temperatuurmeting van de DTS kabel betrouwbaar is. In de zomer loopt de temperatuur aan de buitenwand wel hoger op, dit heeft mogelijk te maken met de zonnestraling direct op de kabel. In de periode tot en met mei 2016 is de gemiddelde temperatuur van het water in de tank bijna gelijk aan de temperatuur op de bodem van de tank en van het uitgaande water (Figuur 3.25). In de periode mei-oktober 2016 ontstaan er verschillen. De gemiddelde temperatuur in de tank loopt op. Er ontstaat een temperatuurverschil tussen de bodem en het wateroppervlakte. Hierdoor loopt de temperatuur van het uitgaande water ook iets op (deze wordt iets boven de bodem afgetapt). De temperatuur in de luchtlaag direct boven het water loopt ook flink op (op warme dagen boven de 35 °C – hoogst gemeten luchttemperatuur is 38 °C op 21 juli 2016 in de middag), in de zomer zijn deze temperaturen ook hoger dan de buitentemperatuur. De hoge temperatuur in de luchtlaag zorgt voor opwarming van het water aan de bovenkant. De hoogste gemiddelde temperatuur van het water is 20 °C, gemeten op 15 september. Medio oktober is de gemiddelde watertemperatuur weer gelijk aan die op de bodem. Begin november neemt de temperatuur in het reservoir opeens sterk af en wordt gelijk aan de buitentemperatuur. De in- en uitgaande debieten zijn in deze periode ook lager, wat erop duidt dat de kelder voor een korte periode buiten bedrijf is genomen (er zijn twee parallelle kelders). Navraag bij Vitens bevestigde dat een kelder in deze periode inderdaad buiten bedrijf is genomen.



Figuur 3.25 Tijdreeksen van gemeten temperaturen in reservoir De Greuns. Bovenste figuur geeft de verdeling van temperaturen over de tank weer (gemiddelde temperatuur in de tank (groen), op de bodem van de tank (blauw) en op de instroompijp (rood)) met de Aeromonas getallen. Het onderste figuur geeft ook de luchttemperatuur boven de waterlaag weer.

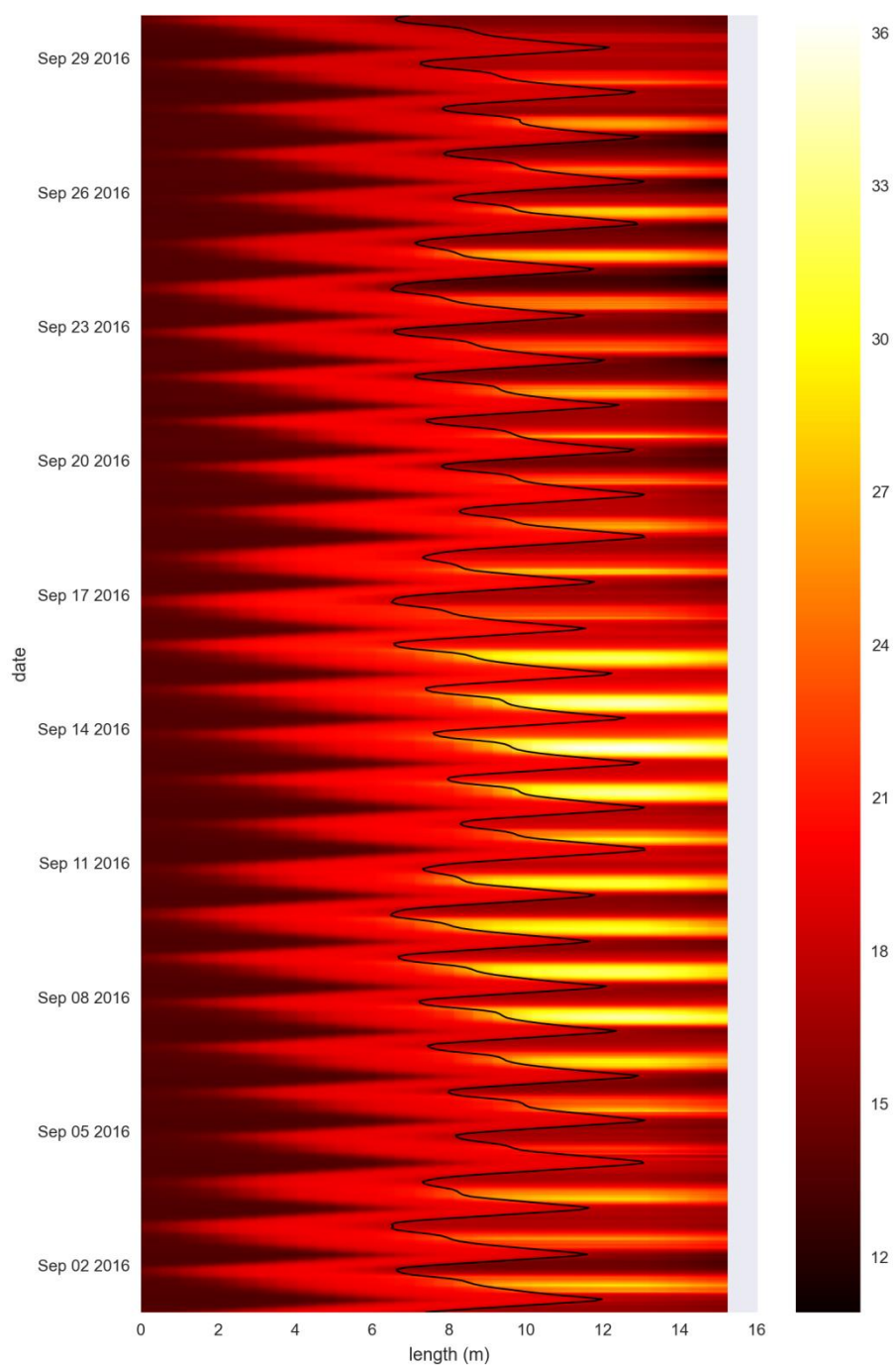


Figuur 3.26 Temperatuurgegevens aan de buitenkant van het reservoir vergeleken met KNMI uurgegevens van Weerstation Leeuwarden (boven) en temperatuurgegevens in het reservoir van de hele waterlaag (blauw), de bovenste laag (6m onder de waterspiegel, groen) en de onderste laag (rood), vergeleken meetgegevens van de in- en uitgaande pijp (paars).

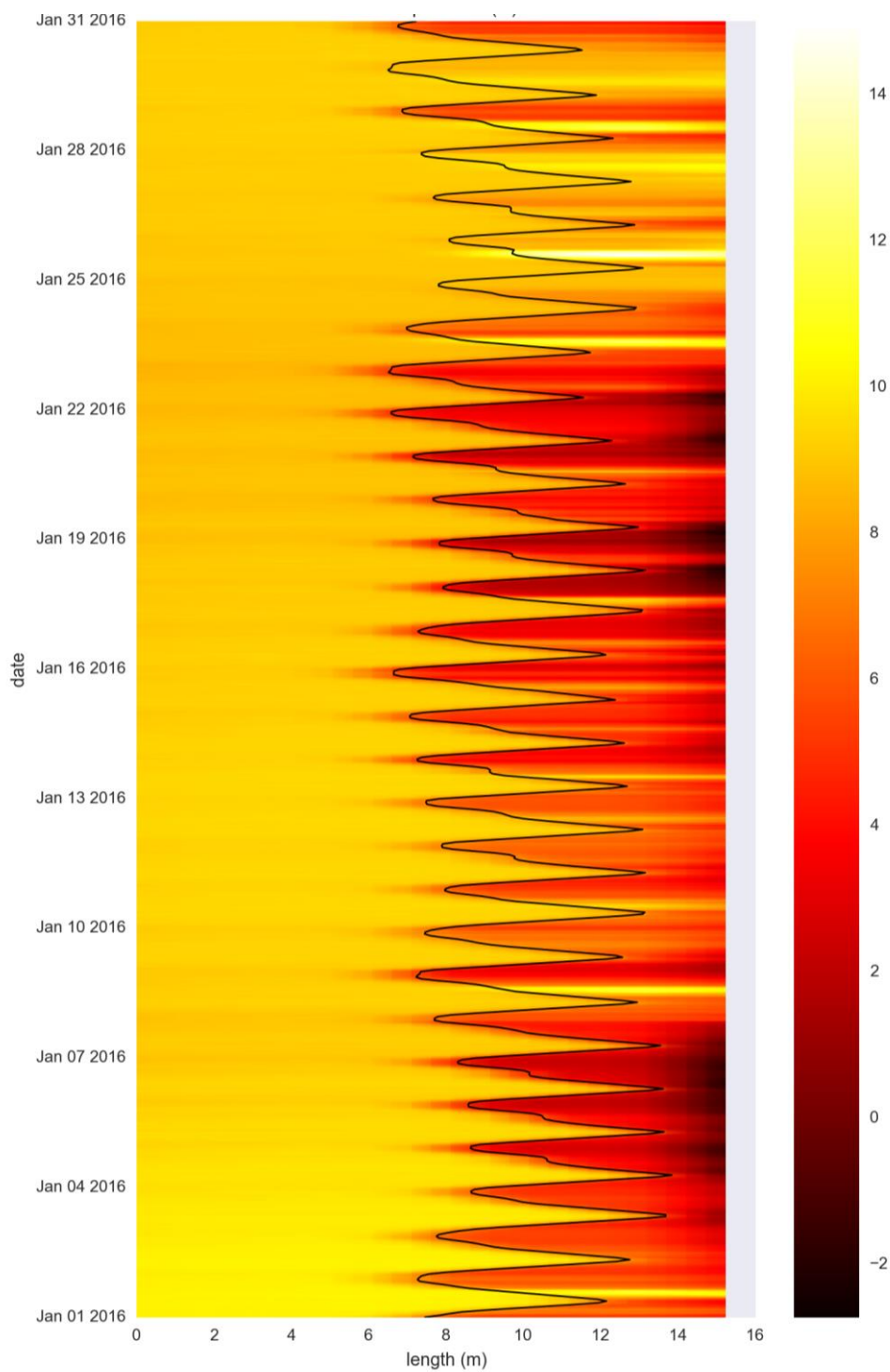
In Figuur 3.27 is het ruimtetijd-diagram van de gemeten temperatuur weergegeven voor de maand september. Hierin is de temperatuurverdeling over de tijd zichtbaar gemaakt. De zwarte lijn geeft het waterniveau over de tijd aan. Het vullen van de kelder in de nachten met een temperatuur van rond de 13 graden en vervolgens legen overdag is zichtbaar in de donkere 'driehoeken' in het diagram. Daarboven lijkt een warmere laag te zijn met temperaturen rond de 20 graden. De vraag is in hoeverre deze lagen met elkaar mengen. Bij een volledig mengen binnen 8 uur zal na het vullen de temperatuur overal gelijk zijn. Omgekeerd bij geen menging zal de koude laag niet verder komen dan de toename in waterniveau (de hoeveelheid water waarmee de kelder gevuld wordt). Het verschil in waterniveau ligt tussen de 4 en 5 meter, terwijl de koudere laag tot een hoogte komt van tussen de 7 en 8 meter (aan het eind van het vulregime). Bij het legen bereikt de warme laag bijna de bodem komend van een hoogte van 7 of 8 meter. Over een hoogte ~3 meter vindt dan wel menging plaats. In de tussentijd zal overdag de warmere laag weer opgewarmd worden door de warme luchtlaag erboven. De stratificatie blijft redelijk in stand. In Figuur 3.26 (onder) is de temperatuur van de bovenste en onderste waterlaag over het hele jaar weergegeven. In de zomerperiode is de bovenste laag beduidend warmer ten opzichte van de onderste laag (de temperatuur in de bovenste laag loopt op tot gemiddeld 20-22 °C en de onderste laag blijft rond de 15 °C). De temperatuur in de onderste laag is gelijk aan de gemeten temperatuur in de in- en uitstroombleiding. Kijkend naar de periode 12 september-17 september (Figuur 3.29), een warme periode met temperaturen boven de 30 graden buiten, is te zien dat de temperatuur in de luchtlaag in de tank boven de 35 graden uitkomt, en de temperatuur in de bovenste waterlaag ruim boven de 20 graden uitkomt, terwijl de temperatuur in de onderste laag rond de 14-15 graden blijft steken. Deze loopt aan het einde van de periode iets op, maar blijft grotendeels gelijk aan de temperatuur van het inkomende water. Dat is ook goed te zien aan de temperatuur van het uitgaande water op de leiding: deze neemt op een dag slechts met 0.5 graden toe ten opzichte van de ingaande temperatuur. In het najaar verdwijnt de stratificatie weer en zijn de temperaturen in de boven- en onderlaag gelijk.

De *Aeromonas* getallen lopen in de zomer op en zijn maximaal in oktober. Mogelijk dat dit samenhangt met de stratificatie. Nagroei van *Aeromonas* is sterker bij hoge temperaturen en langere verblijftijden. In het najaar wordt mogelijk de gevormde *Aeromonas* in de warmere bovenlaag sneller opgemengd met de onderlaag vanwege het wegvallen van de stratificatie. Hiervoor moet echter in meer detail onderzocht worden hoe de groei van *Aeromonas* verloopt in het reservoir en hoe dit wordt afgegeven aan het uitgaande water.

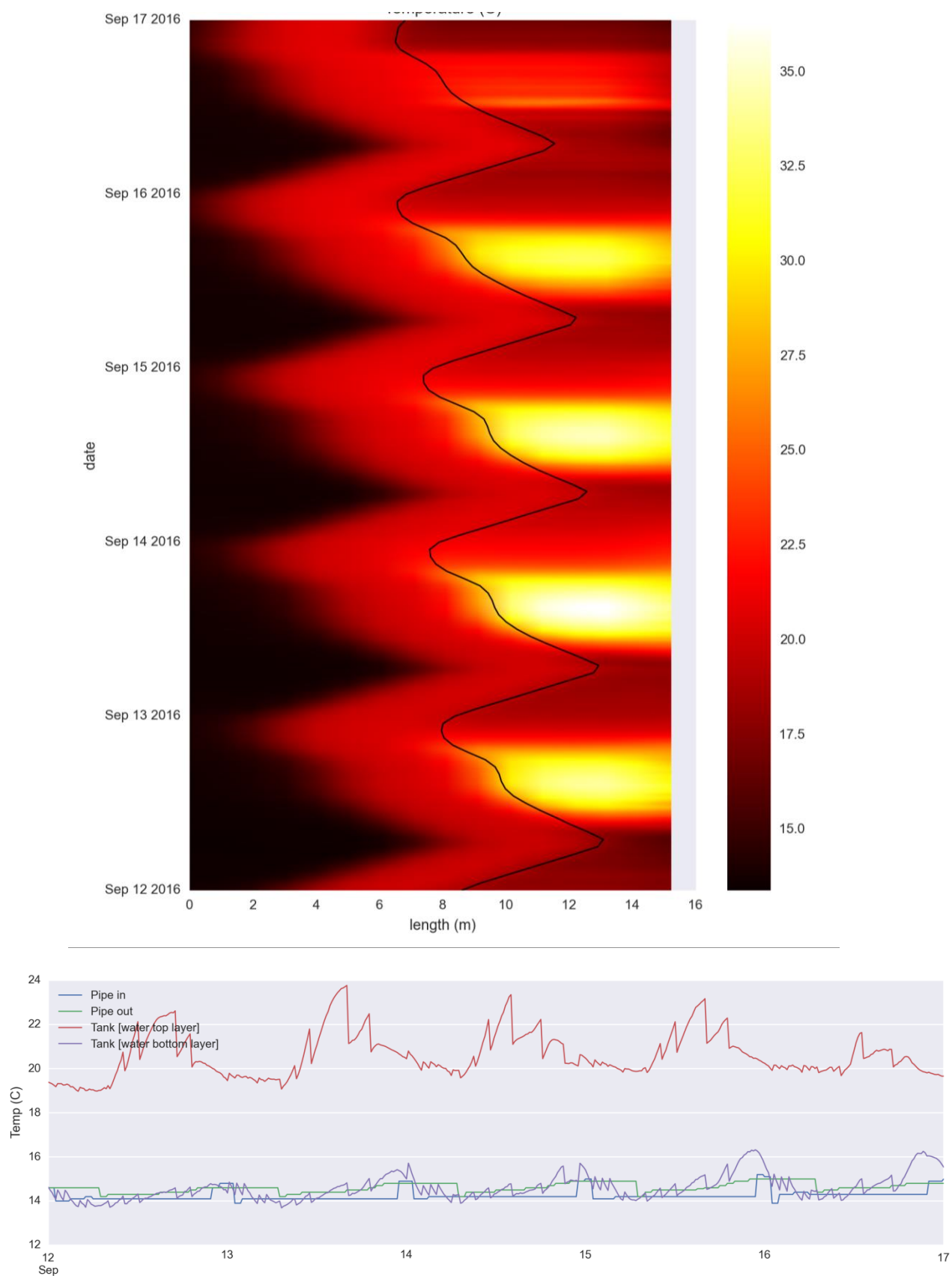
Het is interessant om ook een koude maand nader te onderzoeken (Figuur 3.28). De luchttemperatuur is nu duidelijk lager (10 graden lager) dan de watertemperatuur. Nu is er geen 'zigzag' patroon zichtbaar. Afkoeling van het water vindt wel plaats aan de bovenkant, maar dit lijkt of snel op te mengen of er vindt minder warmteoverdracht plaats. In de winterperiode is de watertemperatuur in ieder geval gelijk verdeeld over het reservoir.



Figuur 3.27 Ruimtetijd diagram van de gemeten temperatuur in september 2016. De zwarte lijn geeft het waterniveau aan. Kleurlegenda geeft de temperatuur in graden Celsius aan.



Figuur 3.28 Ruimtetijd diagram van de gemeten temperatuur in januari 2016. De zwarte lijn geeft het waterniveau aan. Kleurlegenda geeft de temperatuur in graden Celsius aan.



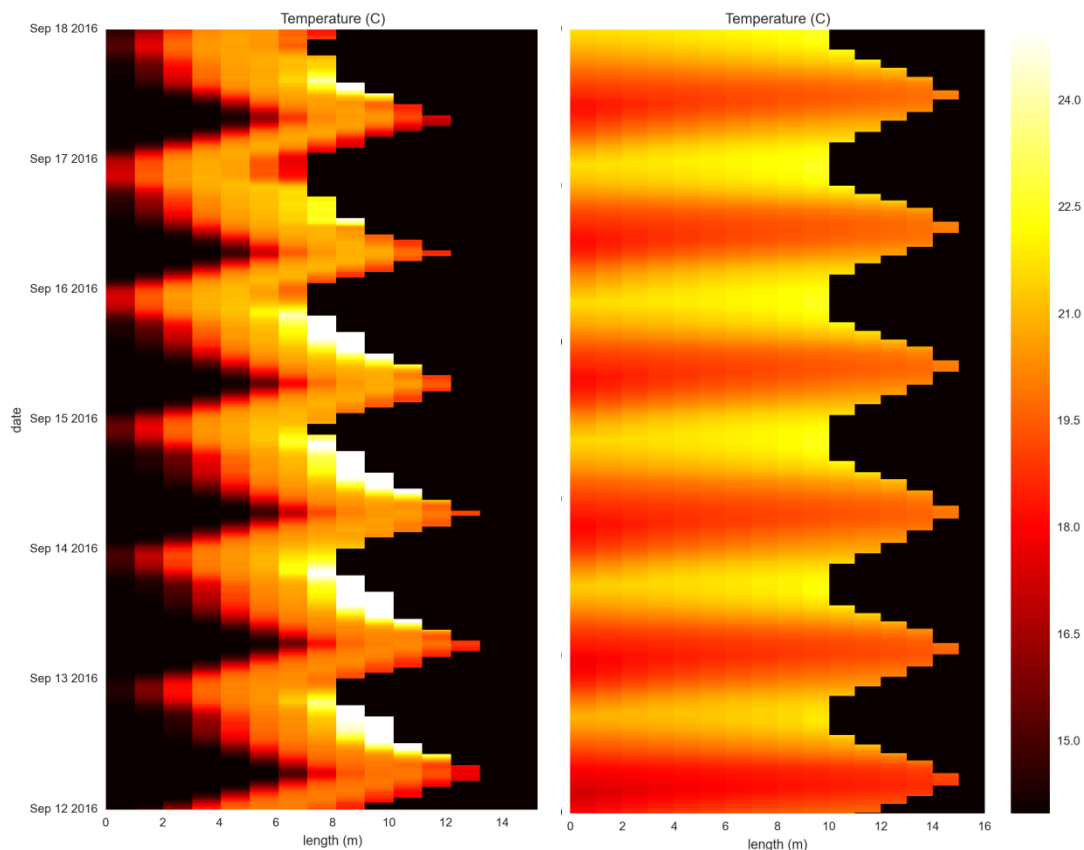
Figuur 3.29 Ruimte-tijd-diagram van de gemeten temperatuur in een warme periode in september 2016. De zwarte lijn geeft het waterniveau aan. Het onderste figuur geeft de temperatuur over de tijd aan van het ingaande water (blauw), uitgaande water (groen), de bovenste waterlaag (rood) en onderste waterlaag (paars).

3.7 Validatie

3.7.1 Vergelijking CFD en metingen

Uit het CFD model blijkt dat de menging groot is en er geen stratificatie optreedt. Uit de metingen in de winterperiode wordt dit beeld bevestigd, de metingen in de zomerperiode laten echter wel een stratificatie zien. In het CFD model is de menging echter te sterk om een stratificatie te laten ontstaan of in stand te houden. Door het toevoegen van de 'bouyancy' term aan het CFD model ontstaat een recirculatiestroming die hogere recirculatiesnelheden geeft dan de instroomsnelheden. Ondanks dat een 'bouyancy' term wel nodig is om een stratificatie te krijgen, geeft deze in COMSOL een te sterke recirculatie om een stratificatie in stand te houden. De keus van het turbulentiemodel heeft een sterke invloed op de menging: in geval van laminaire stroming is de menging veel kleiner en kan er wel een stratificatie ontstaan. De kentallen (Tabel 3.2) voor reservoir De Greuns laten echter zien dat turbulentie wel te verwachten is. Alternatieve turbulentiemodellen (Low Re $k-\epsilon$, $k-\omega$, L-VEL, SST) zijn een mogelijkheid, deze zijn echter minder stabiel in COMSOL en convergeren niet voor dit probleem. Aanpassen van de turbulentie lengteschaal in het $k-\epsilon$ model heeft weinig effect.

Een nauwkeurigere vergelijking is gemaakt door de omstandigheden van de warme periode van 12-18 september na te bootsten in het 2D CFD model. Hiervoor worden niet de exacte gemeten temperatuur en zonnestraling gebruikt, omdat het CFD model niet goed overweg kan met het grillige verloop hiervan. In plaats daarvan is een vereenvoudigd sinusvormig verloop gebruikt. Hetzelfde geldt voor het verloop van het waterniveau. De maximum buitentemperatuur wordt op 35 graden gezet, en het minimum op 20 graden, dit representeert de temperatuur in de luchtlaag bovenin de kelder. Vanwege deze hoge temperaturen in de luchtlaag is een extra randvoorwaarde voor de temperatuur op het



Figuur 3.30 Gemeten temperatuursverloop (links) en gemodelleerd met 2D CFD (rechts) voor reservoir De Greuns.

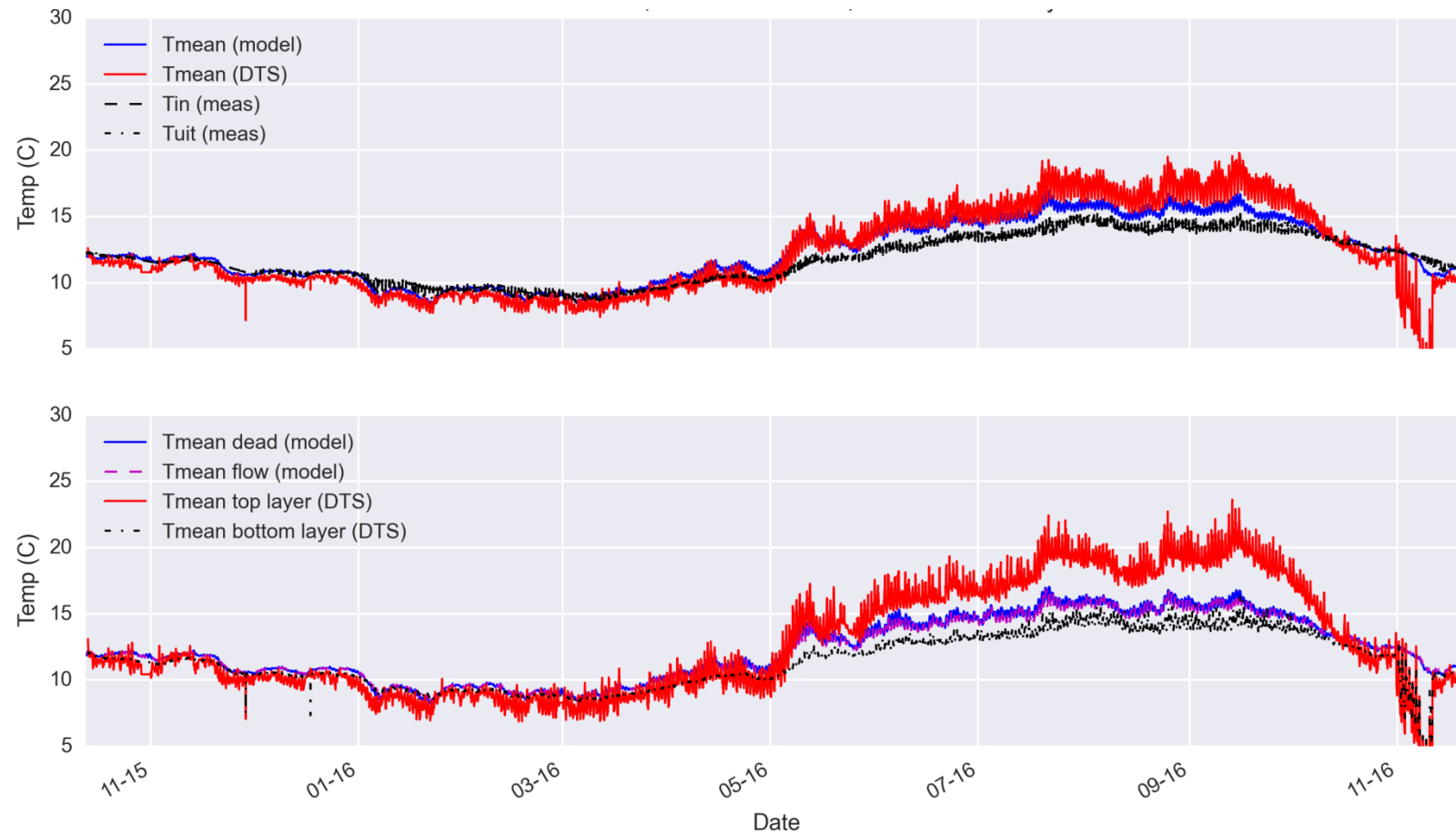
wateroppervlakte gezet, welke gelijk genomen is aan een sinusvormig verloop van de temperatuur tussen 20 en 35 graden. De maximale zonnestraling wordt gezet op 250 W/m^2 .

Omdat niet precies dezelfde omstandigheden zijn gemodelleerd, is het niet te verwachten dat de gemodelleerde temperatuur exact overeenkomt met de gemeten temperatuur. Echter, uit Figuur 3.30 volgt dat er grote verschillen zijn tussen model en metingen. De stratificatie wordt nauwelijks gevonden in het model: de lage temperaturen van het ingaande water worden vrij snel opgemengd en gelijkmatig verdeeld over de hoogte. Hetzelfde geldt voor de opwarming overdag (tijdens het legen van het reservoir).

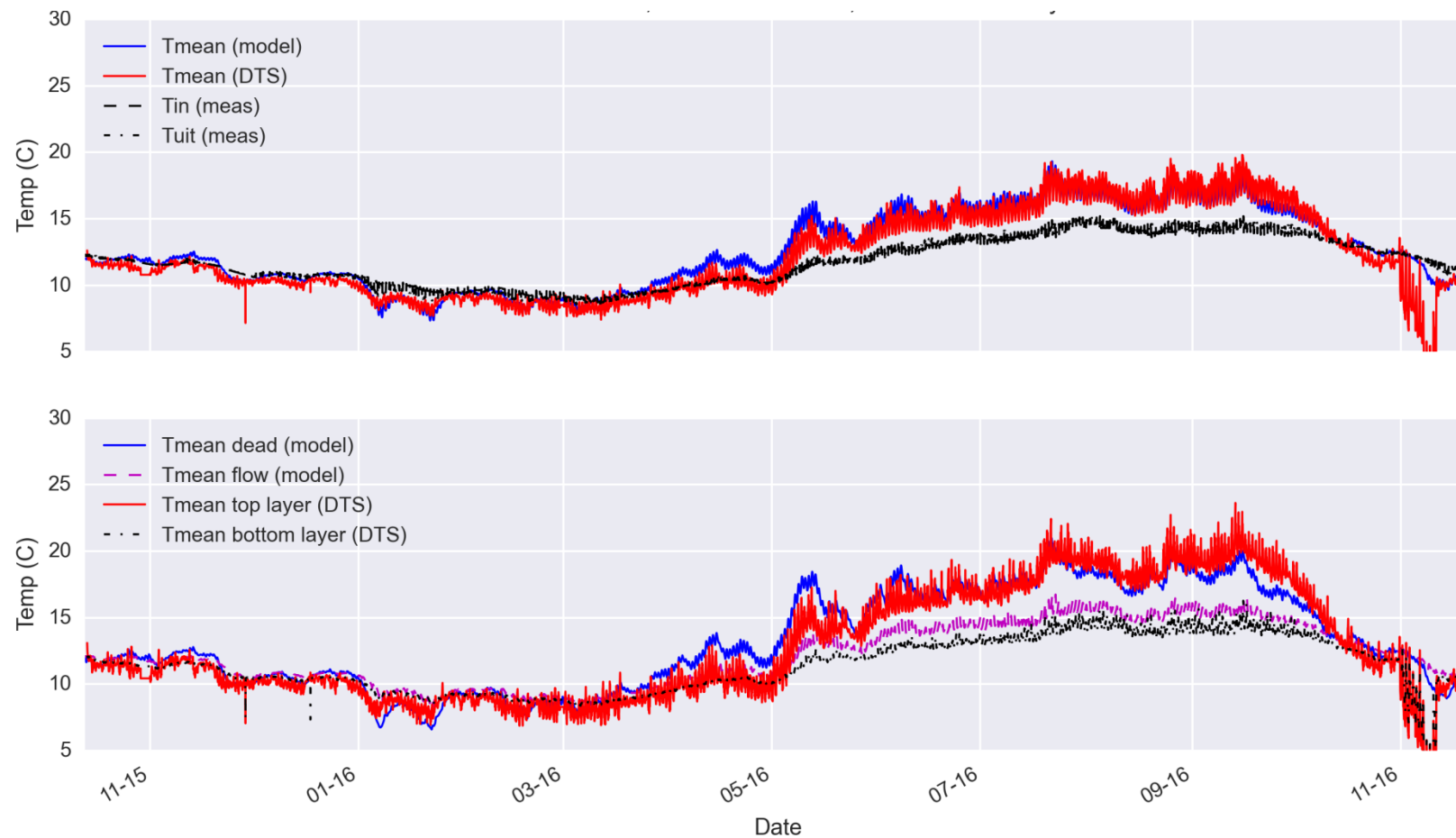
3.7.2 Vergelijking versimpeld model en metingen

In het versimpelde model kan met behulp van de KNMI-gegevens de daadwerkelijke zonnestraling en buitentemperatuur als invoer meegenomen worden, zodat de gemeten temperaturen vergeleken kunnen worden met de berekende temperaturen. Dit is gedaan voor de hele periode waarin de DTS kabel de temperatuur heeft gemeten. In eerste instantie is gebruik gemaakt van een mengtijd (tussen dode zone en doorstroomd gebied) van 13.5 uur in het versimpeld model. Omdat de metingen aangeven dat de menging klein is, is vervolgens ook een berekening uitgevoerd met een verhoogde mengtijd. Bovendien is de opwarming veranderd in het model: alleen de dode zone wordt opgewarmd door de luchtlaag erboven (voor de temperatuur van de luchtlaag is de KNMI temperatuur gebruikt van station Leeuwarden) en door de zonnestraling. Het volume van de dode zone is gelijk gesteld aan de 5 m hoge bovenlaag, zoals gemeten in het experiment.

De gemiddelde temperatuur in het reinwaterreservoir wordt redelijk goed voorspeld door het model (Figuur 3.31, boven). In het voorjaar van 2016 geeft het model een kleine overschatting van de gemiddelde temperatuur, voor de overige perioden klopt het temperatuurprofiel goed met de metingen van de DTS. Dit laat zien dat de warmteoverdracht goed ingeschat kunnen worden op basis van KNMI-gegevens. Echter, vanwege de lage mengtijd is de temperatuur in de dode en doorstroomde zone bijna gelijk en wordt de gemeten temperatuur in de bovenste laag van het reservoir niet goed voorspeld (Figuur 3.31, onder). Daarom zijn er berekeningen uitgevoerd met een mengtijd van 7 dagen (Figuur 3.32). M.u.v. een kleine afwijking in het voorjaar en najaar, komt bij deze mengtijd de watertemperatuur in de bovenste laag redelijk goed overeen met de temperatuur in de dode zone, en de temperatuur in de onderste laag komt goed overeen met de doorstroomde zone.



Figuur 3.31 Gemeten en gemodelleerde temperatuur in de reinwaterreservoir bij een mengtijd van 13.5 uur. (boven) gemiddelde gemeten en gemodelleerde temperatuur, (onder) gemeten temperatuur in de bovenste laag (rood) en onderste laag (zwart) en gemodelleerde temperatuur in de dode zone (blauw) en doorstroomde zone (paars).



Figuur 3.32 Gemeten en gemodelleerde temperatuur in de reinwaterreservoir bij een mengtijd van 7 dagen. (boven) gemiddelde gemeten en gemodelleerde temperatuur, (onder) gemeten temperatuur in de bovenste laag (rood) en onderste laag (zwart) en gemodelleerde temperatuur in de dode zone (blauw) en doorstroomde zone (paars).

3.8 Aanbevelingen voor ontwerp en/of bedrijfsvoering

In de zomerperiode treedt er in het reservoir van 'De Greuns' een temperatuurstratificatie op. Dit wordt niet goed voorspeld door het CFD model. In het versimpeld model kan door aanpassing van de mengtijd naar 7 dagen de temperatuur in de warmere bovenlaag goed voorspeld worden. In de winterperiode treedt er geen temperatuurstratificatie op en is de menging beter.

Het uitgaande water van reservoir 'De Greuns' heeft bijna dezelfde temperatuur als het ingaande water ten gevolg van de temperatuurstratificatie. Dit heeft als voordeel dat de temperatuur van het uitgaande water in de zomer laag blijft. Echter, de temperatuur en de verblijftijden in de bovenste laag kunnen oplopen, zodat de waterkwaliteit hier kan afnemen. Dit kan mogelijk de verhoogde Aeromonas getallen in de nazomer verklaren. De vraag is echter of de nagroei in deze bovenlaag optreedt en in welke mate en wanneer deze dan in het uitgaande water terechtkomt. Als de warme bovenlaag verantwoordelijk is voor de hogere Aeromonasgetallen is het aan te bevelen om in de bedrijfsvoering met enige regelmaat het reservoir helemaal leeg te maken (met name in de zomermaanden).

Met het versimpeld model kan het verloop van de temperatuur en leeftijd van het water over het jaar gemodelleerd worden. Hiermee kan voor verschillende reinwaterreservoirs van Vitens de effecten van de bedrijfsvoering op de temperaturen en leeftijd inzichtelijk gemaakt worden. Hiervoor is het wel aan te bevelen het model te kalibreren a.h.v. metingen en/of meer accurate CFD modellen om een geschikte waarde voor de menging tussen hoofdvolume en dode zone te vinden.

De waterkwaliteit wordt daarnaast ook grotendeels beïnvloed door de gemiddelde verblijftijd. Deze kan verlaagd worden door:

- Lager niveau in het reinwaterreservoir. Verblijftijden worden hiermee substantieel verkort (evenredig met de hydraulische verblijftijd). Ondanks de korte verblijftijden kan de maximale temperatuur wel hoger worden vanwege het kleinere volume. Op de warmste dagen is zal dit mogelijk leiden tot een verhoogd (gezondheids)risico.
- Verhogen van debiet door het reinwaterreservoir. Dit is een mogelijkheid als niet al het geproduceerde water door het reservoir gaat. Dit verlaagt de verblijftijden en ook de maximumtemperatuur.
- Een combinatie van bovenstaande oplossingen, afhankelijk van het weer: lager niveau bij lagere temperaturen en verhogen debiet (als dit mogelijk is) bij hogere temperaturen.
- Het bedrijven van de kelder in 'flow-through' modus door de aanleg van een extra pijp kan ook leiden tot kleine verbeteringen in verblijftijden en temperatuur. Door maatwerk (per locatie de juiste positie/grootte van instroompip te bepalen) kan de menging verder bevorderd worden.

Het aanpassen van het vul- en leegregime zelf (bijv. d.m.v. een sinus of een blok) heeft weinig effect. Het verdient ook de aanbeveling om de bedrijfsvoeringsparameters (vul- en leegdebieten, waterniveaus) van verschillende reinwaterreservoirs van Vitens te bekijken, omdat alleen al de hydraulische verblijftijden (zonder dode zones) van sommige kelders behoorlijk kunnen oplopen, zoals bij Dedemsvaart.

Voor andere reservoirs met een andere lengte/hoogte verhouding en/of vorm, is de menging slechter dan voor een cilindrisch ontwerp. Een voorbeeld waarbij de menging zeer langzaam verloopt is het rechthoekige reservoir in Dedemsvaart. Hiervoor zijn aanpassingen in het ontwerp nodig om de menging te verbeteren, zoals het plaatsen van schotten, het verkleinen van de inlaatpijp, nozzles/venturi's etc. Dit is niet onderzocht in dit project, maar uit de literatuur is bekend dat dit werkt [9, 15, 18, 19]. Daarnaast kunnen de bovengenoemde maatregelen in de bedrijfsvoering ook tot verbeteringen leiden. Met behulp van CFD (zonder

warmte-overdracht) kan per kelder onderzocht worden hoe deze het beste aangepast kan worden om dode zones te voorkomen die optreden vanwege de geometrie.

4 Conclusies en aanbevelingen

4.1 Conclusies

Het spoelen van snelfilters en het doorstromen van reinwaterreservoirs is onderzocht met behulp van CFD-modellering.

Voor het spoelen van de snelfilters is gebruik gemaakt van meerfasen-CFD, waarin zowel de zandfase als de waterfase is gemodelleerd. Daarnaast is voor het wegspoelen van vuil een passieve tracer gebruikt, die meebeweegt met de stroming. Uit experimenten volgt dat de meeste uitgespoelde deeltjes kleiner zijn dan 50 μm . Uit deze experimenten en uit valsnelheidsberekeningen blijkt dat met name deze fractie (0 tot 50 μm) met de waterstroming meebeweegt. Het is niet mogelijk gebleken om de stroming van de suspensie met meer dan twee fasen te modelleren. Als consequentie kunnen spoelingen van dubbellaagsfilters of lucht-water spoelingen nog niet gesimuleerd worden. Met behulp van tweefasen CFD-modellering is wel onderzocht hoe het vuil in het filterbed wordt weggespoeld en wat het effect is van het ontwerp van het filter en de spoelgoot. De positie van één of meerdere spoelgoten beïnvloedt in sterke mate de stroming in de bovenwaterstand en daarmee het afvoeren van het vuil. Daarnaast is met proefinstallatie-onderzoek (filtermateriaal van een dubbellaagsbed uit Velddriel) vastgesteld wat het effect is van de duur en snelheid van de luchtspoeling op het loskomen van ijzer en mangaan. Uit de experimenten volgt dat de duur van de luchtspoeling een grotere invloed heeft dan de luchtsnelheid. De hoeveelheid afgespoeld materiaal lijkt recht evenredig met de wortel van de spoelduur en vierde machtswortel van de luchtsnelheid.

Voor het doorstromen van reinwaterreservoirs is zowel een CFD-model als een versimpeld model opgesteld om de leeftijden en temperaturen in de reservoirs te bepalen. Daarnaast zijn metingen van de temperatuur over de hoogte van een bovengronds reservoir (Leeuwarden) uitgevoerd. Voor het bovengrondse reservoir is het van belang om dichtheidsverschillen als gevolg van temperatuurverschillen mee te nemen in de modellering. In het CFD model leidde dit echter tot een overschatting van recirculaties als gevolg van dichtheidsverschillen. Hierdoor is de menging groot en ontstaat er geen stratificatie, welke wel gemeten werd in de zomermaanden. Het versimpeld model werkt als een geroerd vat met een dode zone. Tussen de dode zone en het geroerde vat wordt water uitgewisseld. Daarnaast kunnen de niveauverschillen van het reservoir meegenomen worden. Met het versimpeld model kan op basis van KNMI gegevens van buitentemperatuur, zonnestraling en bedrijfsvoeringgegevens (in- en uitgaande debieten) de temperatuur en ook leeftijden van het water gemodelleerd worden. De uitwisseling van water tussen de dode zone en doorstroomde zone kan hierbij aangepast worden op basis van CFD resultaten of metingen. Uit de metingen volgde dat in de zomermaanden een warme bovenlaag met temperaturen boven de 20 graden ontstond, welke in het najaar weer verdween. Dit kan goed nagebootst worden door het versimpeld model. Het risico bestaat dat in de bovenlaag door opwarming meer bacteriegroei plaatsvindt.

4.2 Aanbevelingen voor de praktijk

Op basis van de modellering en experimenten zijn de volgende aanpassingen aan het ontwerp en/of bedrijfsvoering mogelijk om het spoelen van de snelfilters te verbeteren:

- Met een lagere bovenwaterstand tijdens het spoelen kan de spoelduur verkort worden (minder spoelwaterverlies). Dit gaat mogelijk wel ten koste van meer filtermateriaalverlies. Dit kan gedaan worden door de spoelgoot dichter bij het filterbedoppervlakte te plaatsen.
- Twee goten leiden tot een betere menging en gelijkmatiger verdeelde afvoer van het vuil, zodat er korter gespoeld kan worden (minder spoelwaterverlies).
- Met behulp van modelsimulaties kan voor een specifieke locatie bepaald worden hoe lang er gespoeld moet worden om bijv. 95% van het uitgespoelde materiaal af te voeren, zodat de spoeltijd geminimaliseerd kan worden (minder spoelwaterverlies, of een betere afvoer van vuil).
- Het effect van verhogen van de luchtsnelheid is beperkt, deze zou eerder verlaagd kunnen worden om zodoende minder energieverbruik te realiseren.
- Daarnaast lijkt het kiezen van een langere spoeltijd met lucht effectiever dan het verhogen van de luchtsnelheid. Dit bespaart mogelijk energie, maar zal aan de andere kant het totale spoelproces verlengen.

Voor de reinwaterreservoirs zijn de volgende aanbevelingen van belang voor de praktijk:

- Door kritisch te kijken naar de bedrijfsvoering van de reinwaterreservoirs bij Vitens kunnen reservoirs met hoge gemiddelde verblijftijden al direct geïdentificeerd worden. Met het versimpeld model kunnen in meer detail de leeftijden en temperaturen over het jaar berekend worden voor een reservoir. Hiermee kan ook het effect van diverse bedrijfsvoeringsparameters op leeftijden en temperaturen bepaald worden.
- De leeftijden en/of hoge temperaturen kunnen in het algemeen verbeterd worden door de volgende maatregelen in de bedrijfsvoering:
 - Een lager niveau aanhouden in het reinwaterreservoir. Verblijftijden worden hiermee substantieel verkort (evenredig met de hydraulische verblijftijd). De temperatuur kan echter wel iets hoger worden. Op de warmste dagen is dit waarschijnlijk niet de handigste oplossing.
 - Verhogen van het debiet door het reinwaterreservoir. Dit is een mogelijkheid als niet al het geproduceerde water door het reservoir gaat. Dit verlaagt de verblijftijden en ook de maximumtemperatuur.
 - Een combinatie van bovenstaande oplossingen, afhankelijk van het weer: lager niveau bij lagere temperaturen en verhogen debiet (als dit mogelijk is) bij hogere temperaturen.
 - Het bedienen van de kelder in 'flow-through' modus door de aanleg van een extra pijp kan ook leiden tot kleine verbeteringen in verblijftijden en temperatuur.
- De stratificatie die optreedt in de zomer in reservoir 'De Greuns' zal waarschijnlijk ook optreden in andere bovengrondse reservoirs van Vitens. Het is van belang om deze effecten te monitoren i.v.m. een verhoogd risico van verslechtering van de waterkwaliteit in de bovenlaag gedurende warme dagen.
- Voor kelders met bijzondere vormen en 'scheve' hoogte/lengte verhouding zullen er ook zonder stratificatie dode zones ontstaan en zijn aanpassingen in het ontwerp nodig om de menging te verbeteren.

4.3 Aanbevelingen voor vervolgonderzoek

Voor het spoelen van snelfilters is het interessant om de verdeling van ijzer en mangaan over de hoogte van het filter beter in te schatten, zodat het wegspoelen van ijzer en mangaan nauwkeuriger gemodelleerd kan worden. Om het mengen en ontmengen van zand en antraciet in dubbellaagsfilters beter te begrijpen en beschrijven is het nodig om met meer dan twee fasen te modelleren. De CFD -modellen hiervoor zijn nog volop in ontwikkeling, zodat betere resultaten geboekt kunnen worden in de toekomst met OpenFoam of andere

CFD-software. Een andere vervolgvraag is hoeveel (adsorptief) ijzer er bij de luchtspoeling losgeschuurd dient te worden. Uit de metingen volgde namelijk dat er steeds weer nieuw ijzer vrijkomt na iedere luchtspoeling, en de vraag dient zich op in hoeverre het nuttig is de ijzeroxiden los te spoelen.

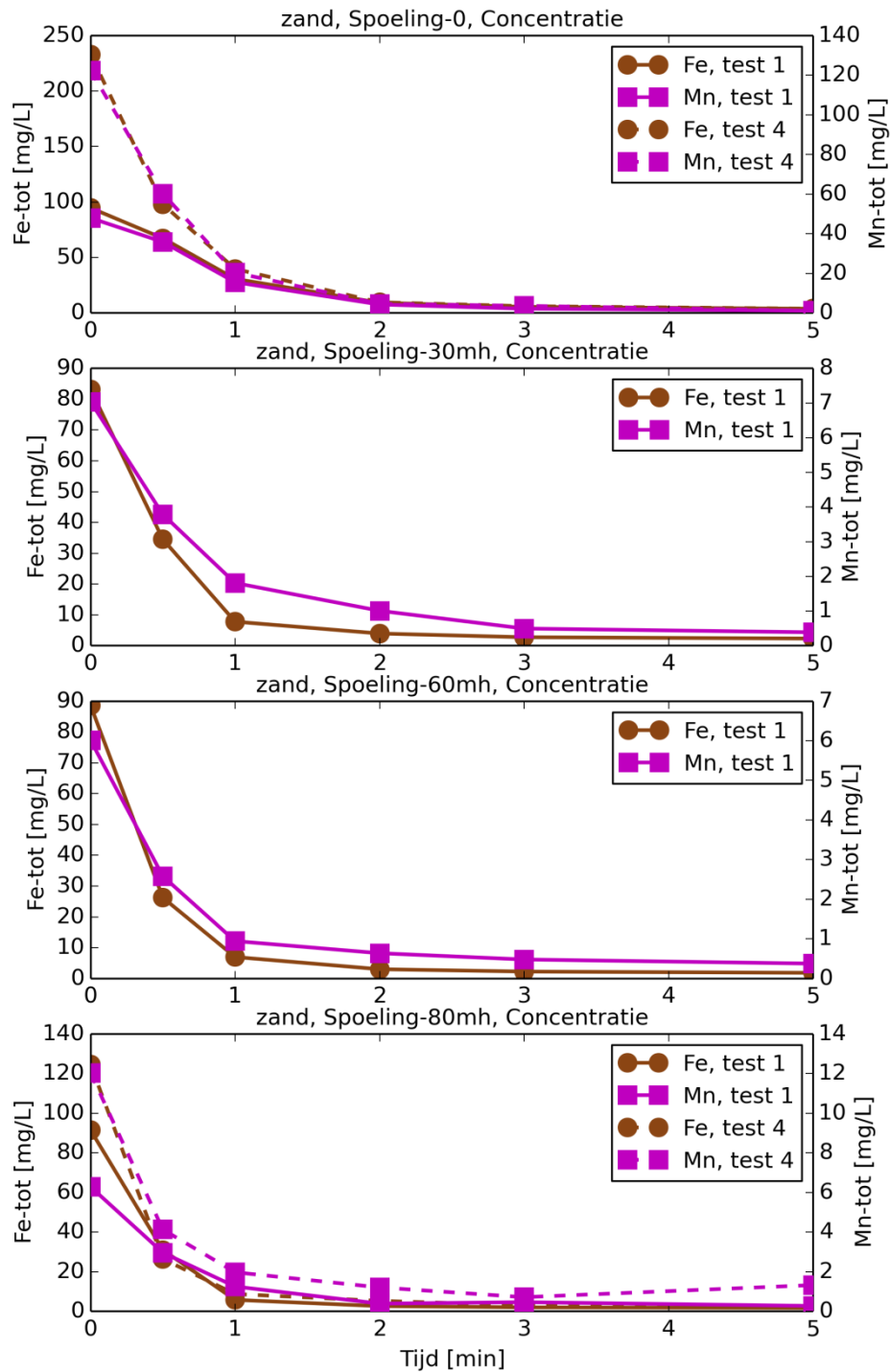
Voor het reinwaterreservoir is het, vanuit gezondheidskundig oogpunt, aan te bevelen om het effect van de stratificatie in Leeuwarden op de groei van *Aeromonas* te beschouwen. Treedt in de warme bovenlaag daadwerkelijk meer groei van *Aeromonas* op en hoe komt deze vervolgens in het uitgaande water terecht? Door daarnaast de bacteriële groei toe te voegen aan het versimpeld model kan de combinatie van temperatuur en verblijftijd op bijvoorbeeld *Aeromonas* ingeschat worden en kan dit model gevalideerd worden met metingen. In eerste instantie kan met behulp van het versimpeld model ook de watertemperatuur in andere jaren, waarin hogere *Aeromonas* getallen gemeten werden, gesimuleerd worden om te zien of de hogere *Aeromonas* getallen corresponderen met hogere watertemperaturen. Tenslotte is het nauwkeuriger modelleren van de temperatuurstratificatie in het CFD model een punt van aandacht.

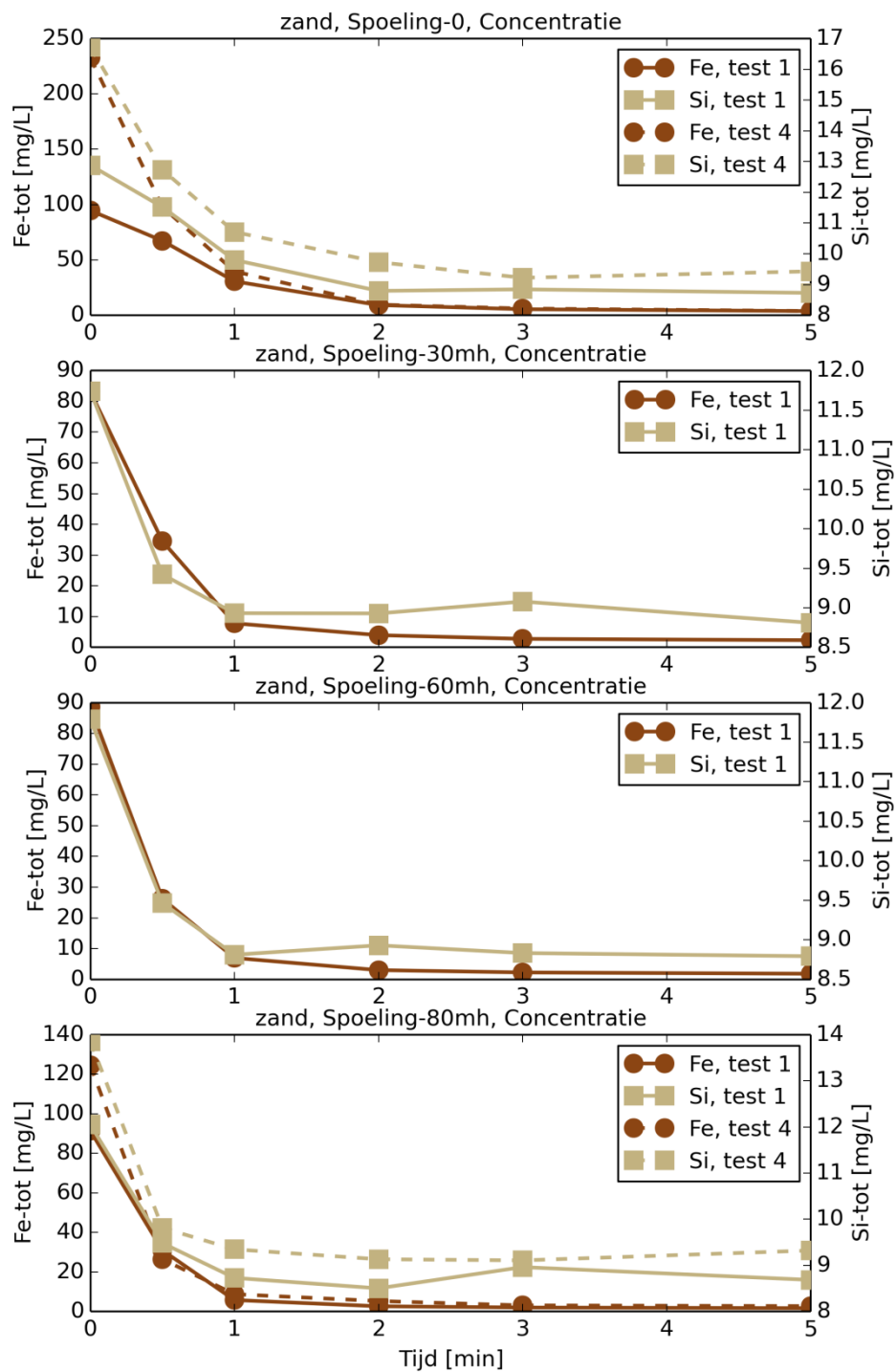
5 Referenties

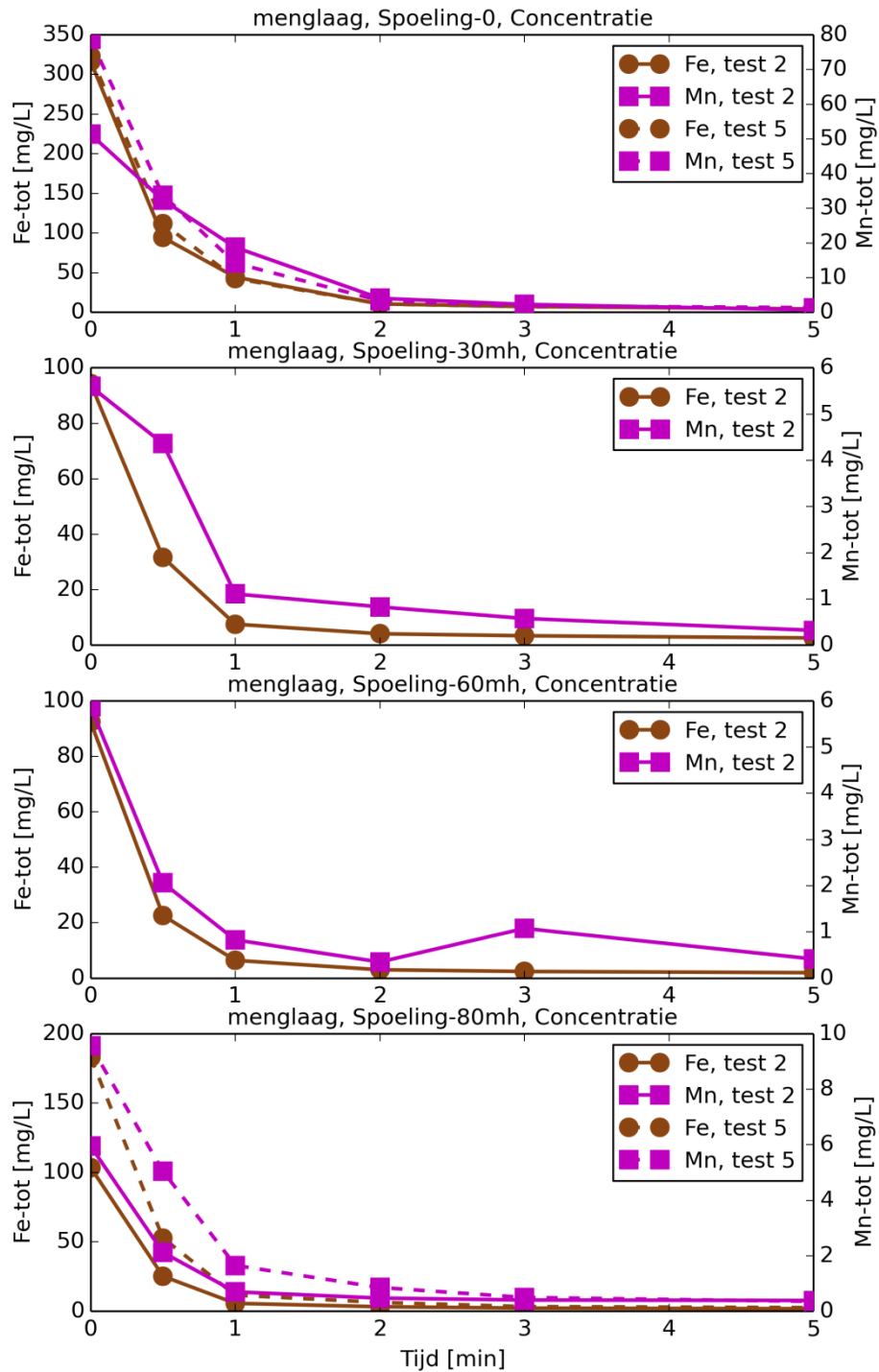
- [1] Akker, B. van den, Antoniou, A., Hartog, N., Vries, D. and Hofs, B. 2014. *Iron and manganese removal through subsurface and filtration processes*. Technical Report #BTO 2014.047.
- [2] Bejan, A. 2004. *Convection Heat Transfer, 3rd ed.* John Wiley & Sons, New York.
- [3] Blokker, M., Wielen, P. van der, Donocik, A. and Zaadstra, E. 2010. Verblijftijd belangrijkste parameter in nagroei *Aeromonas* in de vulleiding Son-Vierlingsbeek. *H2O*. 8, (2010), 46–49.
- [4] Grayman, W.M., Rossman, L.A., Deininger, R.A., Smith, C.D., Arnold, C.N. and Smith, J.F. 2004. Mixing and aging of water in distribution system storage facilities. *Journal / American Water Works Association*. 96, 9 (2004), 70–80+10.
- [5] Hassan, A.A., Li, Z., Sahle-Demessie, E. and Sorial, G.A. 2013. Computational fluid dynamics simulation of transport and retention of nanoparticle in saturated sand filters. *Journal of Hazardous Materials*. 244-245, (2013), 251–258.
- [6] Kim, S.-H., Lim, H.-K., Jeong, W.-C. and Park, N.-S. 2011. Optimum backwash method for granular media filtration of seawater. *Desalination and Water Treatment*. 32, 1-3 (2011), 431–436.
- [7] Leijssen, H. and Zweere, G. Correspondentie.
- [8] Moncho-Esteve, I.J., Palau-Salvador, G., Brevis, W., Vaas, M.O. and López-Jiménez, P.A. 2015. Numerical simulation of the hydrodynamics and turbulent mixing process in a drinking water storage tank. *Journal of Hydraulic Research*. 53, 2 (2015), 207–217.
- [9] Montoya-Pachongo, C., Lan-Beatove, S., Torres-Lozada, P., Cruz-Vélez, C.H. and Escobar-Rivera, J.C. 2016. Effects of water inlet configuration in a service reservoir applying CFD modelling. *Ingenieria e Investigacion*. 36, 1 (2016), 31–40.
- [10] Qi, W.K., Guo, Y.L., Xue, M. and Li, Y.Y. 2013. Hydraulic analysis of an upflow sand filter: Tracer experiments, mathematical model and CFD computation. *Chemical Engineering Science*. 104, (2013), 460–472.
- [11] Rusche, H. 2002. *Computational Fluid Dynamics of Dispersed Two-Phase Flows at High Phase Fractions*. Imperial College of Science, Technology & Medicine, London, UK.
- [12] Tian, X. and Roberts, P.J.W. 2008. Mixing in water storage tanks. I: No buoyancy effects. *Journal of Environmental Engineering*. 134, 12 (2008), 974–985.
- [13] Tian, X. and Roberts, P.J.W. 2008. Mixing in water storage tanks. II: With buoyancy effects. *Journal of Environmental Engineering*. 134, 12 (2008), 986–995.
- [14] Vries, D. and Bertelkamp, C. 2016. *Iron and manganese removal: recent advances in modelling of the treatment efficiency by rapid sand filtration*. KWR Watercycle Research Institute, BTO 2016.015.
- [15] Walski, T., Cummings, K., Malloy, A. and Whitman, B. Evaluation of venturi to destratify water tanks. *World Environmental and Water Resources Congress 2015: Floods, Droughts, and Ecosystems - Proceedings of the 2015 World Environmental and Water Resources Congress* 724–735.
- [16] Wielen, P. van der and Kooij, D. van de 2011. *Inventarisatie van Aeromonas en koloniegetal 22 C in drinkwater en relaties met fysisch/chemische parameters*. KWR Watercycle Research Institute, BTO 2011.001.
- [17] Wols, B.A. and Akker, B. van den 2014. *Inzicht en oplossingen voor kwesties in de waterzuivering door Computational Fluid Dynamics (CFD)*. Technical Report #BTO 2014.019. KWR.
- [18] Wolthek, N.B.A. 2014. *Experimental and numerical modelling of water storage reservoir Noordburgum*.
- [19] Zhang, J.M., Khoo, B.C., Lee, H.P., Teo, C.P., Haja, N. and Peng, K.Q. 2012. Effects of baffle configurations on the performance of a potable water service reservoir. *Journal of Environmental Engineering (United States)*. 138, 5 (2012), 578–587.
- [20] Zhang, J.M., Lee, H.P., Khoo, B.C., Peng, K.Q., Zhong, L., Kang, C.W. and Ba, T. 2014. Shape effect on mixing and age distributions in service reservoirs. *Journal - American Water Works Association*. 106, 11 (2014), E481–E491.
- [21] Zhang, J.M., Lee, H.P., Khoo, B.C., Teo, C.P., Haja, N. and Peng, K.Q. 2011. Modeling and simulations of flow pattern, chlorine concentration, and mean age distributions in potable water service reservoir of Singapore. *Journal of Environmental Engineering*. 137, 7 (2011), 575–584.
- [22] Zweere, G.J. Correspondentie.

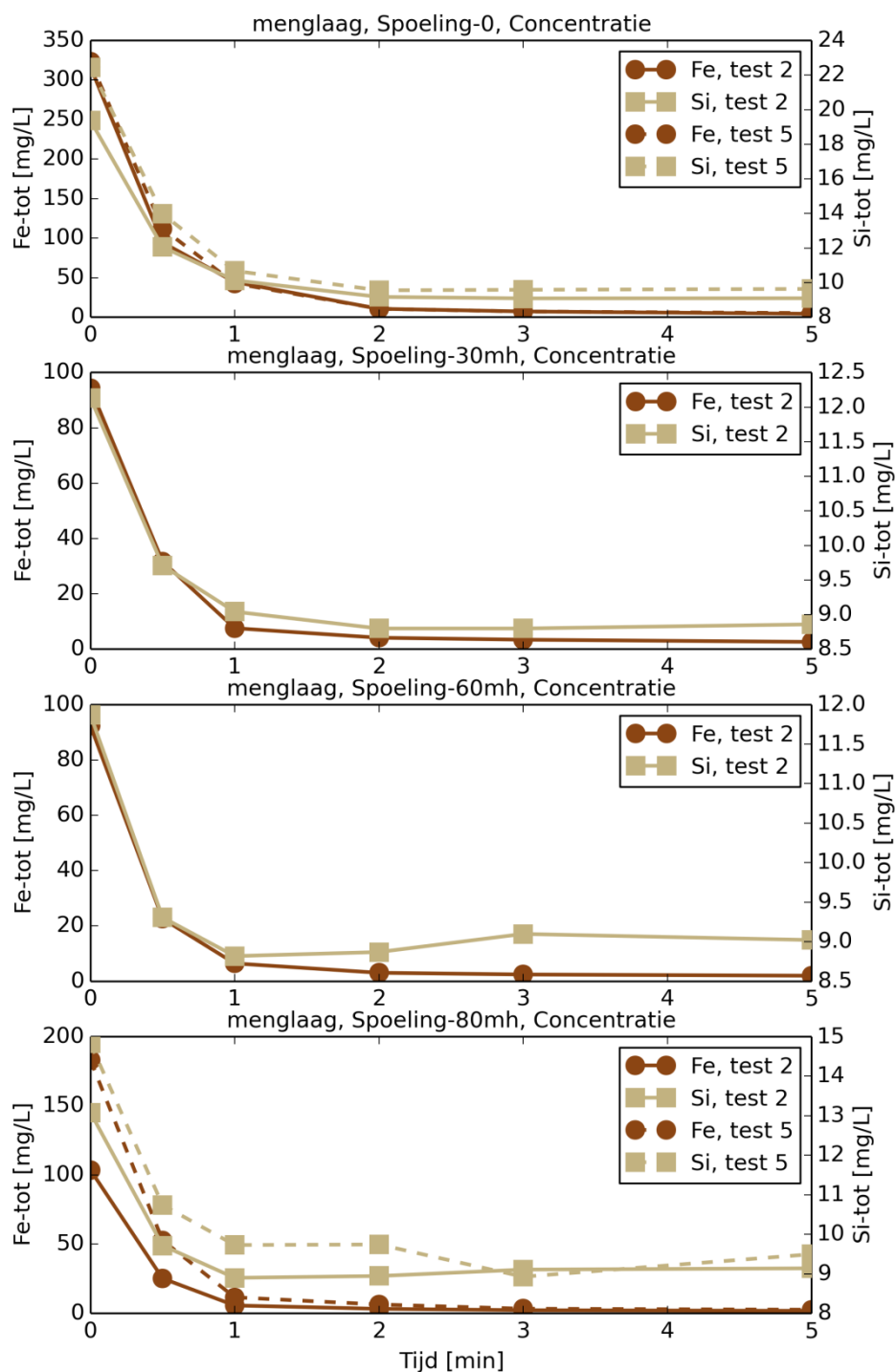
- [23] Packing limiter in multiphaseEulerFoam: <http://www.cfd-online.com/Forums/openfoam-solving/152909-packing-limiter-multiphaseeulerfoam.html>.

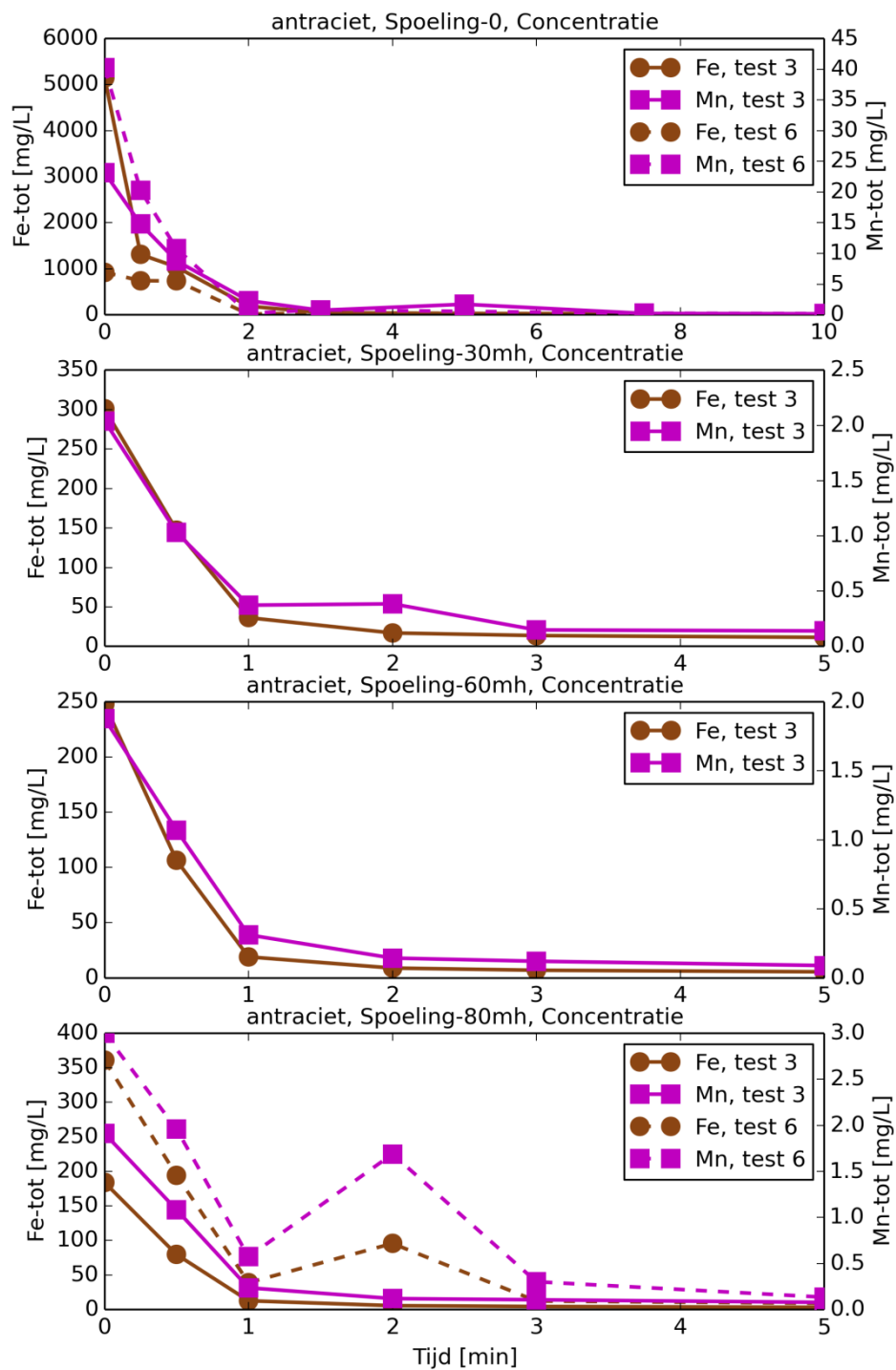
Bijlage I Experimenten filterkolom

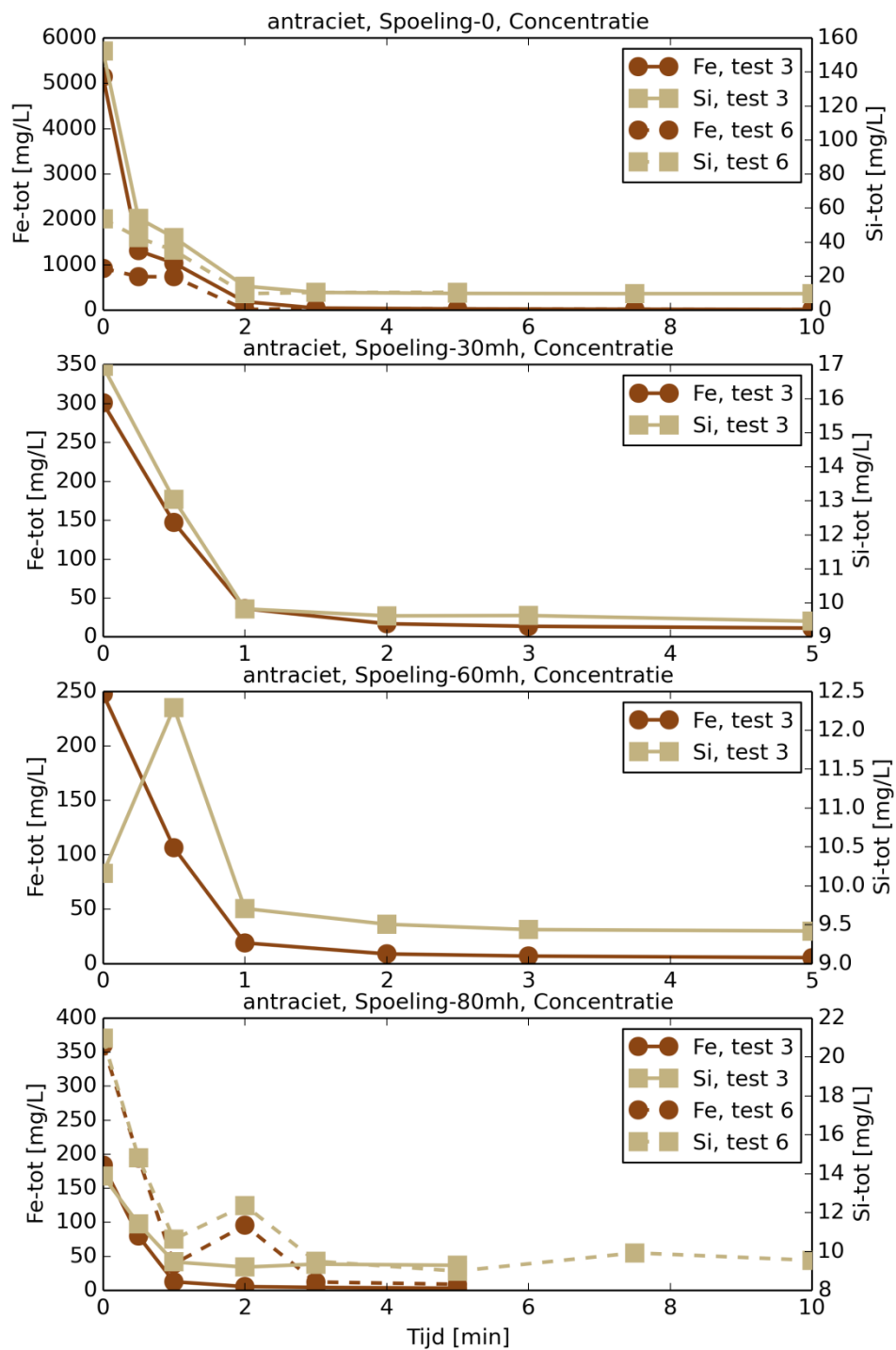




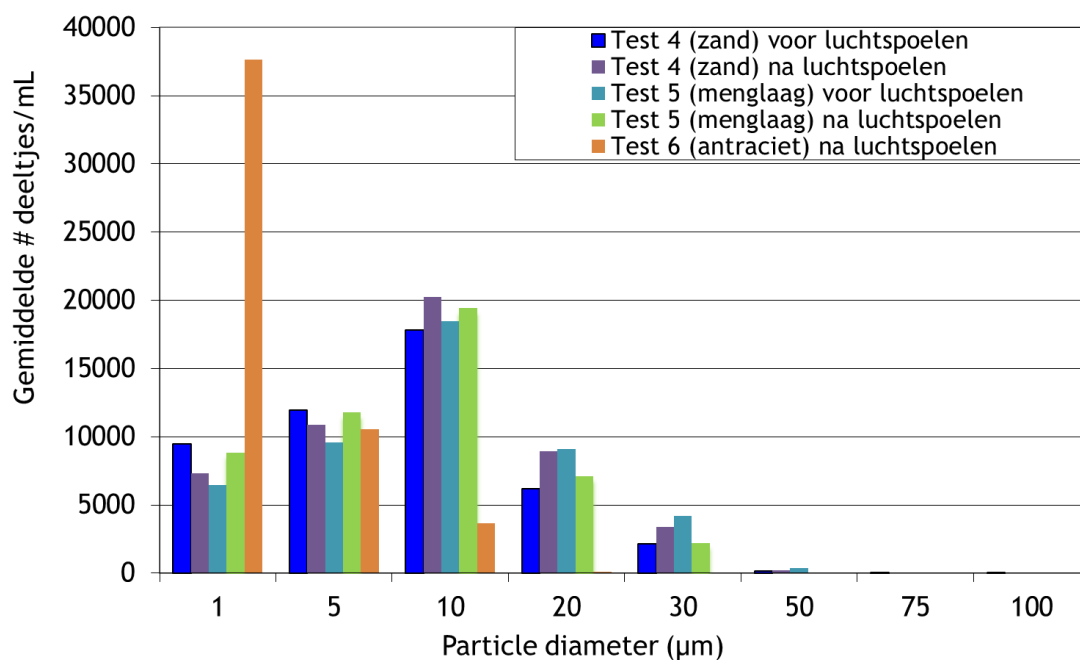








Deeltjesverdeling per aantallen deeltjes

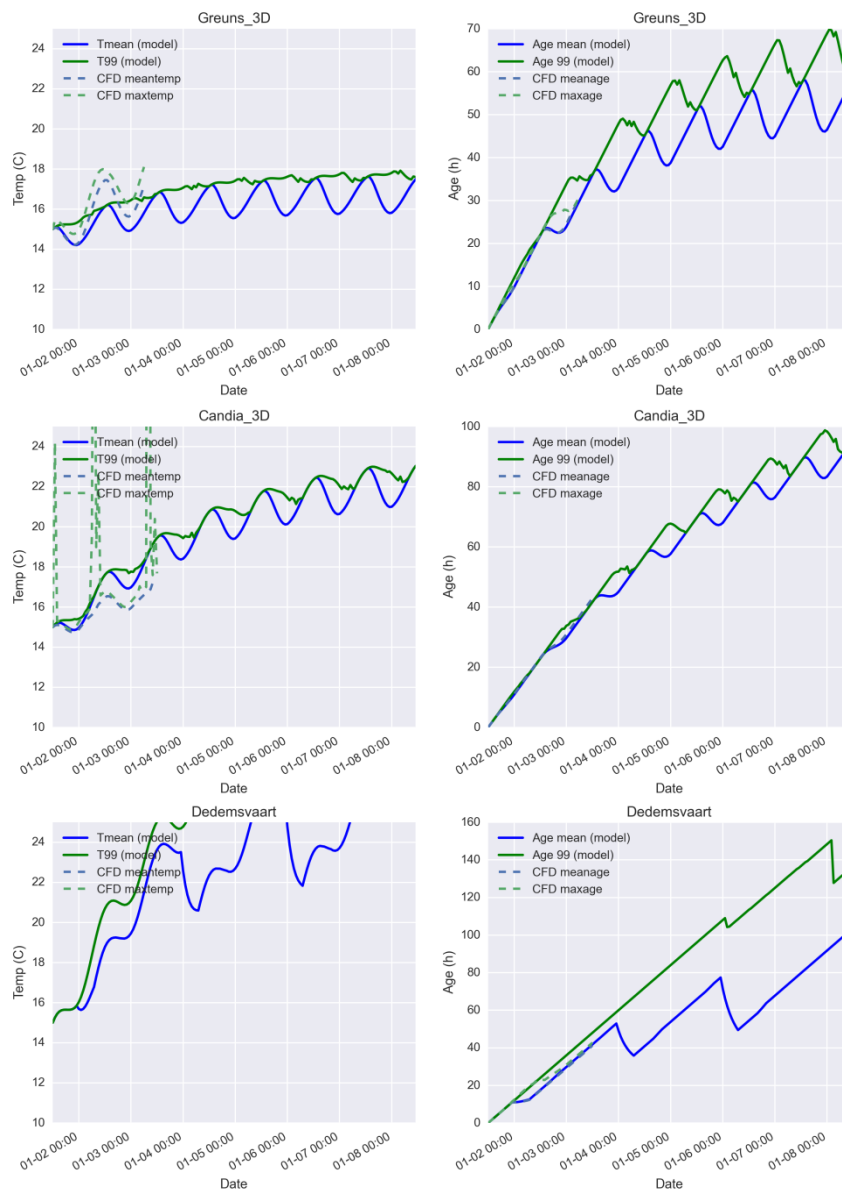


Berekening hoeveelheid ijzer in het filtermateriaal

Straal kolom	0.06 m						
Hoogte bed	0.75 m						
Volume	8.4823 l						
Stortdichtheid zand	1.6 kg/l	Schatting op basis van gegevens Holten					
massa zand	13.5717 kg						
Holten VF zand (50-100 cm)		Holten NF zand (50-100 cm)		Spannenburg VF zand (0-50 cm)			
Aangroei filtermateriaal	0.188 kg/kg	Aangroei filtermateriaal	0.326 kg/kg	Aangroei filtermateri	0.996 kg/kg		
IJzer in aangroei	0.27 kg/kg	IJzer in aangroei	0.028 kg/kg	IJzer in aangroei	0.24 kg/kg		
Totaal ijzer in kolom	0.57988 kg	Totaal ijzer	0.093426 kg	Totaal ijzer	1.625338 kg		
mangaan in aangroei	0.00086 kg/kg	mangaan in aangroei	0.17 kg/kg	mangaan in aangroei	0.00085 kg/kg		
Totaal mangaan in kolom	0.00185 kg	Totaal mangaan	0.567227 kg	Totaal mangaan	0.005756 kg		

Bijlage II Vergelijking versimpeld model en CFD

Het versimpelde model is vergeleken met de 3D CFD resultaten voor de drie kelders (Figuur 5.1). Voor de mengtijden tussen dode zone en de hoofdstroom zijn de berekende mengtijden van het CFD model gebruikt (zie Tabel 3.6). De leeftijden berekend door het versimpelde model komen goed overeen met de CFD modellen. De temperaturen laten iets meer verschillen zien: voor de Greuns zijn de temperaturen voor het versimpelde model wat lager dan voor het CFD model, en bij het reservoir in Rhenen is dat omgekeerd. Net zoals bij de verschillen tussen 2D en 3D kunnen deze verschillen verklaard worden aan de hand van de warmteoverdracht tussen zijwand en water, die afhankelijk is van de temperatuur van het water aan de wand. In het versimpelde model zijn hiervoor aannames gemaakt over de menging van het water (zie 3.2.1.1), terwijl in het CFD model de temperatuur van het water aan de wand direct berekend wordt.



Figuur 5.1 Vergelijking tussen versimpelde model en CFD modellen voor reservoir de Greuns (boven), Candia (midden) en Dedemsvaart (onder).