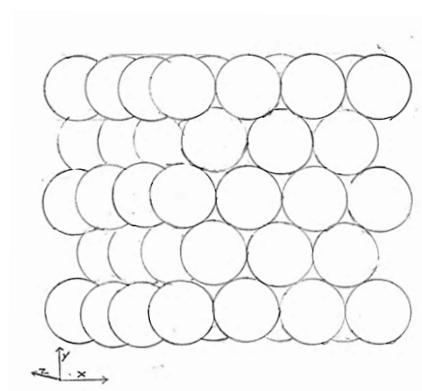
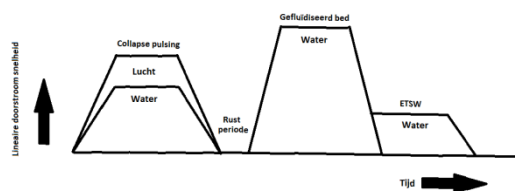
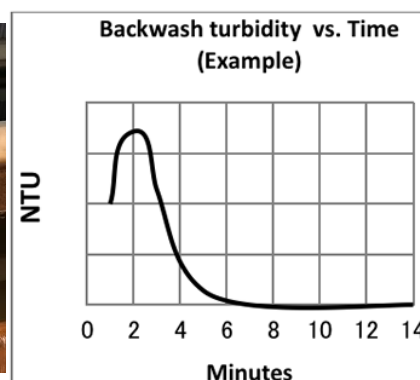




ETSW-Zetting

De hydraulische invloed van de Extended Terminal Sub-fluidisation Wash (ETSW) op de zetting van het gepakte filterbed en het uitblijven van de eerste filtraatpiek bij een filterspoeling.

Sam Rutten



Afstudeeropdracht

Auteur

Sam Rutten
Email: sam.b.rutten@gmail.com

Bedrijf

Waternet, Sector Drinkwater, Afdeling Productie
Team Waterkwaliteit en Procesondersteuning
Vestiging Weesperkarspel
Driemondweg 21
1108 AJ Amsterdam Zuidoost
Tel. 020 - 608 7000

Bedrijfsbegeleiders

Onno Kramer
Email: Onno.Kramer@waternet.nl
Eric Baars
Email: Eric.baars@waternet.nl

Opleiding

Hogeschool Utrecht
Institute for Life Sciences and Chemistry
Faculteit Natuur en Techniek
Chemische Technologie
Heidelberglaan 7
3501 AA Utrecht
Tel. 088 - 481 82 83

Afstudeerdocent

Joop Slaa
Email: joop.slaa@hu.nl

Datum

29 mei 2017

De Extended Terminal Sub-fluidisation Wash (ETSW) veroorzaakt zetting van het gepakte filterbed, oftewel verlaging van de porositeit, door middel van opwaartse doorstroming. De doorlatendheid neemt hierdoor af ten gunste van de waterkwaliteit.

Samenvatting

Om de drinkwaterkwaliteit te verbeteren is in 2014 de spoelprocedure van de snelle-zandfiltratie aangevuld met de ETSW procedure. Bij de ETSW wordt na de traditionele spoeling een volledig filterbedvolume bij zeer lage snelheid stroomopwaarts doorgespoeld. Voorgaand onderzoek door Amburgey toont aan dat door middel van de ETSW de eerste filtraatpiek niet optreedt, waardoor dit eerste filtraat niet meer hoeft te worden geloosd op oppervlaktewater of het riool. Amburgey schrijft deze verbeteringen in de waterkwaliteit toe aan verschillende biologische en chemische, echter niet aan hydraulische processen. Om meer inzicht te verkrijgen in de mogelijke oorzaken van deze drinkwaterkwaliteit verbetering wordt in deze opdracht het hydraulisch effect van de ETSW procedure onderzocht. Om de hydraulische effecten van de ETSW te onderzoeken wordt er gebruik gemaakt van de expansie/filtratie-meetopstelling in de proefinstallatie te Weesperkarspel. Door het gebruik van deze opstelling is het mogelijk het effect van de ETSW in een geconditioneerde omgeving te meten. Tijdens het onderzoek is water gebruikt zonder vuillast in een schoon filterbed. Het is hierdoor mogelijk om enkel op de hydraulische effecten te richten en hiermee de onderzoeksvraag te beantwoorden.

Om het effect van de ETSW aan te tonen, is de spoelprocedure van het snelfiltratie-proces uit de praktijk gesimuleerd. De simulatie werd uitgevoerd bij verschillende temperaturen om het effect van de viscositeit en de oppervlaktespanning van het water op de ETSW procedure vast te stellen. Tijdens de simulaties van de ETSW methode, werd gedurende een periode van een half uur de temperatuur, drukverschil, waterflow en bedhoogte gemeten.

De resultaten van de simulaties tonen aan dat de ETSW een zetting van gemiddeld 1% in het gepakte filterbed veroorzaakt. Door deze zetting neemt de porositeit van het filterbed met 1% af, waardoor vervolgens de specifieke doorlatendheid met 4% afneemt.

Uitgaande van de resultaten is het zeer waarschijnlijk dat de zetting van het gepakte filterbed een positieve invloed heeft op de drinkwaterkwaliteit. Wanneer het gepakte filterbed met 1% zet, zal dit 85% van de vuillast tegenhouden.

De opgestelde hypothese stelt dat voorkeurstromen ontstaan in de vorm van grotere kanalen in het filterbed door de expansie tijdens de terugspoeling. Deze grotere kanalen zullen de vuillast niet tegenhouden waardoor de eerste filtraatpiek ontstaat. De grotere kanalen zullen door wrijvingskrachten en impulsmomenten ontstaan en opgewekt door de ETSW instorten, waardoor alleen relatief kleinere kanalen overblijven. Deze relatief kleinere kanalen zullen de vuillast tegenhouden en de eerste filtraatpiek voorkomen. Aan de hand van de verkregen resultaten kan het effect van de ETSW met deze hypothese worden verklaard. Daarnaast blijkt de temperatuur van invloed te zijn op de mate van zetting. Bij een lage temperatuur, of hogere viscositeit, zal het gepakte filterbed verder zetten dan bij een hogere temperatuur. De mate van zetting blijkt onafhankelijk van de korrelvorm. De afname van de bedhoogte van het gepakte bed tijdens de ETSW is niet of nauwelijks meetbaar in het drukverschil over het bed.

Om de zetting door middel van de ETSW in de praktijk waar te nemen zal de bedhoogte moeten worden gemeten. Vervolgonderzoek met vuillast is aanbevolen om een concrete uitspraak mogelijk te maken over de bijdrage van de zetting op de verwijdering van de 1^e filtraatpiek. Daarnaast is het aanbevolen vervolgonderzoek uit te voeren naar het gebruik van lucht om zetting van het gepakte filterbed te laten optreden. Met de focus op de koelfiltratie is het aanbevolen de spoelprocedure met 'filter resting' in plaats van de ETSW te onderzoeken. Uiteindelijk is het aanbevolen alle bevindingen te valideren met behulp van de praktijksituatie.

Voorwoord

Voor u ligt mijn afstudeerverslag dat de afsluiting vormt van de bachelor Chemische Technologie aan de Hogeschool Utrecht. Dit verslag is tot stand gekomen tijdens een enorm leerzame tijd bij Waternet. Het was een geweldige ervaring om praktisch wetenschappelijk onderzoek te doen naar de hydraulische werking van de ETSW, beschreven in dit verslag. In dit voorwoord wil ik van de gelegenheid gebruik maken een aantal mensen te bedanken.

Allereerst wil ik Onno Kramer en Eric Baars bedanken voor hun begeleiding van mijn afstudeerprogramma. Hun gezamenlijke kennis en ervaring op het gebied van drinkwaterproductie waren een onuitputtelijke bron van kennis en inspiratie. Hun uitstekende begeleiding, op professioneel en op persoonlijk vlak hebben ertoe geleid dat ik het beste uit mijzelf kon halen.

Vervolgens wil ik Leon Kors bedanken voor het mogelijk maken van de afstudeerstage en het vertrouwen dat hij in mij heeft gehad.

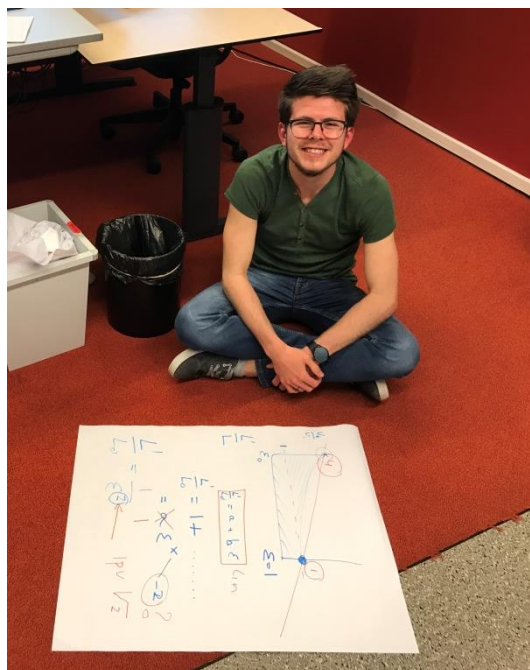
Daarnaast wil ik Peter de Moel en Wim van Vugt bedanken, wiens expertise in de drinkwaterproductie en wiskunde als belangrijke inspiratiebron hebben gediend.

Ik wil Awad Elarbab bedanken voor de samenwerking tijdens de afstudeerstage. Deze samenwerking bracht de mogelijkheid elkaar te ondersteunen op theoretisch en praktisch vlak. Ook wil ik alle collega's van Waternet bedanken voor de geweldige tijd die ik bij het hun heb gehad.

Tot slot wil ik mijn ouders en Jip van Egdom bedanken voor hun geduld en begrip tijdens mijn afstudeertraject.

Sam Rutten

Mei 2017



Inhoudsopgave

Samenvatting	iv
Voorwoord	v
Inhoudsopgave	vi
1 Inleiding	1
2 Aanleiding	2
3 Achtergronden van de drinkwaterproductie	4
3.1 Drinkwaterproductie	4
3.2 Snelfiltratie nader bekeken	5
3.2.1 Schoonmaken van de snelle zandfilters, de spoeling	5
3.2.2 De Extended Terminal Sub-fluidisation Wash procedure	6
3.3 Overeenkomst tussen grondmechanica en het filtratieproces	7
3.3.1 Zetting van een poreus korrelbed	7
3.3.2 De invloed van zetting op de doorlatendheid van een gepakt bed	8
4 De fysische modellen gebruikt voor de snelfiltratie	9
4.1 Basisbegrippen ter ondersteuning van de modellen	9
4.1.1 Het open volume in een korrelbed, de porositeit	9
4.1.2 De verandering van afgelegde weg in een korrelbed, de tortuositeit	9
4.1.3 Deeltjes karakterisering	9
4.1.3.1 Definitie en bepaling van de zeefdiameter	10
4.1.3.2 Definitie en bepaling van de hydraulische diameter	10
4.2 Fysische modellen gebruikt bij het filtratieproces	11
4.2.1 De wet van Darcy	11
4.2.2 De wet van Hagen-Poiseuille als bouwsteen voor de filtratiemodellen	11
4.2.3 De formule van Kozeny	12
4.2.4 De aanpassing van Carmen aan de formule van Kozeny	13
4.2.5 De formule van Burke-Plummer, het drukverschil in het turbulente stromingsregime	13
4.2.6 De samengestelde formule van Kozeny, Carmen en Burke-Plummer	13
4.2.7 De Formule van Ergun, het drukverschil bij laminaire en turbulente stroming	14
5 Materialen en methodes	15
5.1 Doelstellingen van het onderzoek	15
5.2 Het experiment-ontwerp	15
5.3 De gebruikte methodes en apparatuur	16
5.3.1 De soortelijke massabepaling	16
5.3.2 De zeefanalyse	17
5.3.3 De bezinkdiameter vaststellen	17
5.3.4 De expansie/filtratiekolom	17

6	Resultaten	18
6.1	Ondersteunende experimenten	18
6.1.1	Soortelijke massabepaling	18
6.1.2	Bepaling van de zeefdiameter	19
6.1.3	Bepaling van de Brown-Lawler bezinkdiameter met terminale bezinking	20
6.2	Modelvergelijking bij het filtratieproces	21
6.3	Simulatie van de ETSW procedure	23
6.3.1	Invloeden van verschillende factoren op de zettingsgraad	26
6.3.2	Voorspellend model van de vuillast	29
7	Ter discussie stelling van de simulatie	30
8	Conclusies	31
9	Aanbevelingen	32
10	Symbolenlijst	33
11	Literatuur	34
12	Bijlagen	36
I.	Schematische weergave van de drinkwaterproductie Loenderveen/Weesperkarspel	36
II.	Statistische verklaring voor het verband tussen de watertemperatuur en de zetting	37
III.	Voorbeeldberekening ontwikkeld model	38
IV.	Rudimentaire kostenanalyse van het lozen van het 1 ^e filtraat	40
V.	KKKBMI-Analyse van de spoelprocedures	41
VI.	Afleiding voor het bereken van de porositeit	42
VII.	Filtratieresultaten	43
VIII.	Resultaten simulatie ETSW	47
IX.	Road maps voor het gebruik van de modellen	50
X.	Foto's van de spoeling van de snelfilters te Loenderveen	52

1 Inleiding

Waternet is het enige bedrijf in Nederland dat de hele watercyclus beheert. Deze bijzondere rol zorgt ervoor dat zij een belangrijke maatschappelijke taak hebben. Waternet is verantwoordelijk voor het continue leveren van schoon en veilig drinkwater, de behandeling van afvalwater en het beheer van het oppervlaktewater en dijken in Amsterdam en omstreken. Deze onderdelen van de watercyclus zijn ondergebracht bij verschillende afdelingen binnen Waternet. De afdeling Productie is verantwoordelijk voor het leveren van drinkwater. Binnen de afdeling zorgt het team Waterkwaliteit en Procesondersteuning (Team WP) voor de kennis om de processen beter te begrijpen en voor procesoptimalisaties om de verregaande automatisering te ondersteunen. Gezamenlijk met het team Onderzoek en Advies wordt praktisch wetenschappelijk onderzoek gedaan naar procesverbeteringen.

Gericht op de toekomst, waarin bedrijven milieuvriendelijker en duurzamer moeten werken, heeft Waternet zichzelf het doel gesteld in 2020 CO₂ neutraal te zijn. Om deze verduurzaming door te voeren worden onderzoeken uitgevoerd naar vermindering in het gebruik van grondstoffen, energie, chemicaliën en spoelwater. Een voorbeeld van de verduurzaming van processen is de transitie van granaatzand naar calciet als ent-materiaal bij het hardheidsreductieproces. Hierbij werd het granaatzand voorheen uit Australië gewonnen en waren de kalkpellets, ontwikkeld tijdens de hardheidsreductie, niet herbruikbaar. De transitie naar calciet maakt het mogelijk de kalkpellets te hergebruiken als grondstof voor de hardheidsreductie en andere chemische processen. Ondanks deze verduurzamingen brengen deze veranderingen, chemische, biologische en hydraulische vragen met zich mee. Voor het team WP is het van belang deze vraagstukken te verklaren en vast te leggen in modellen die praktisch toepasbaar zijn.

2 Aanleiding

Vanwege het doel om in 2020 CO₂ neutraal te zijn, heeft Waternet alle zuiveringsstappen bij drinkwaterproductie opnieuw geïnventariseerd. Het doel hiervan was om de zuiveringstappen te optimaliseren, het verbruik van chemicaliën en grondstoffen te verminderen en, wanneer mogelijk, aan te passen zodat deze duurzamer worden.

Bij de snelfiltratie is hierom in de zomer van 2014 de 'Extended Terminal Sub-fluidisation Wash' (ETSW) procedure meegenomen bij de spoeling. Deze procedure is een toevoeging aan de standaard snelfilterspoeling. Bij de ETSW wordt na de traditionele spoeling een volledig filterbedvolume bij zeer lage snelheid stroomopwaarts doorgespoeld.

Uit onderzoek is gebleken dat deze methode de eerste filtraatpiek voorkomt en hierdoor de waterkwaliteit gedurende het hele filtratieproces stabiel blijft^[12]. De procedure voorkomt hiermee de doorstroming van troebel water naar de volgende zuiveringstappen en zorgt er voor dat het eerste filtraat na de spoeling niet hoeft te worden geloosd.

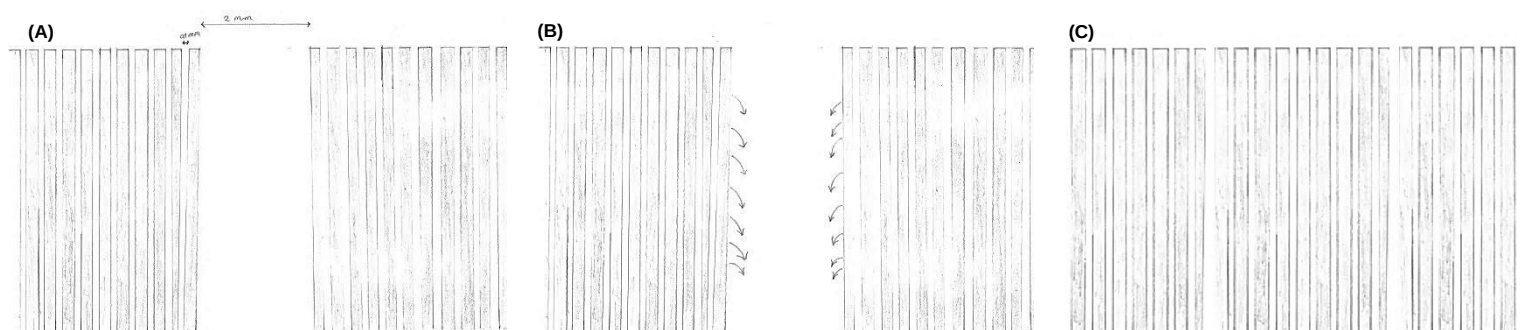
De ETSW verhoogt hiermee de bedrijfszekerheid en kwaliteit van het gefiltreerde water.

In september 2016 is de waterkwaliteit na de spoeling opnieuw onderzocht en bleek deze te zijn verbeterd tegenover de resultaten verkregen voordat de ETSW werd toegepast^[12].

Om het effect van ETSW te verklaren zijn in dit onderzoek vier hypothesen opgesteld:

I. Heroriëntatie van de natuurlijke deeltjes in het gepakte filterbed.

De eerste hypothese gaat uit van een heroriëntatie van het gepakte filterbed. Omdat het materiaal gebruikt bij de filtratie niet een perfecte ronde vorm heeft kan deze in oriëntatie veranderen. De heroriëntatie vindt plaats doordat het gepakte filterbed voorkeurstromen in de vorm van specifiek grotere kanalen ontwikkeld na de expansie van het filterbed. De kanalen met de grotere poriën zullen tijdens de start van de filtratie grotendeels de vuillast doorlaten, waardoor de eerste filtraatpiek ontstaat. Uiteindelijk zullen deze kanalen instorten en zal de constante toegestane troebelheid weer worden bereikt. De ETSW zorgt, door wrijvingskrachten en impulsmomenten, ervoor dat de gevormde voorkeurskanalen met specifieke grotere diameter instorten. Doordat deze grotendeels vuil doorlatende kanalen instorten zal het vuil tijdens de filtratie meteen tegen worden gehouden door de specifiek kleinere kanalen, waardoor de eerste filtraatpiek niet meer optreedt. Deze hypothese wordt grafisch weergegeven in Figuur 1.



Figuur 1. Schematische weergave van de heroriëntatie van de kanalen in een gepakt filterbed.

A: Grotere kanalen ontstaan na de Expansie.

B: Instorten van de grotere kanalen met behulp van de ETSW.

C: Uniforme kleine kanalen ontstaan na de ETSW procedure.

II. Uitspoeling van de achtergebleven vervuiling.

De tweede hypothese gaat uit van een verwijdering van het al losgekomen vuil tijdens de expansie van het filterbed. Doordat het bed met een lage opwaartse stroom extra wordt gespoeld, wordt de achtergebleven vuillast met het water uitgespoeld. Hierdoor zal tijdens de start van de filtratie geen vuil in het bed aanwezig zijn, waardoor deze niet in het eerste filtraat worden mee gespoeld^[1].

III. Nafiltratie in opwaartse stromingsrichting.

De derde hypothese gaat uit van een verplaatsing van de vuillast in het filterbed. Doordat de vuillast met de opwaartse stroom mee wordt genomen zal dit zich op het filter en in de bovenste laag van het filter achterblijven. Doordat de onderste laag van het filter volledig schoon is zal, wanneer de filtratie start, het eerste vuil opgevangen worden en gedeeltelijk doorslaan door de schone onderste filter laag.

IV. Natuurlijke lading van het korrelmateriaal.

De vierde hypothese gaat uit van elektrostatische en magnetische ladingen die een rol spelen bij colloïdale deeltjes. Door verandering van de wrijvingskrachten tijdens de expansie van het filterbed zullen colloïdale deeltjes los komen van het filterbed. Hierdoor zal de zetapotential van deze deeltjes veranderen. Door de verandering in zetapotential zullen de colloïdale deeltjes zich anders positioneren in het filterbed, waardoor zij niet meer uitspoelen^{[1][2]}.

Dit onderzoek concentreert zich op de hydraulische en kinematische effecten van de ETSW procedure bij de snelle-zandfiltratie. Om deze reden wordt alleen hypothese 1 in de praktijk getest. Om de invloed van de opwaartse filtratiestroom tijdens de spoeling hydraulisch en kinematisch te verklaren wordt tijdens dit onderzoek alleen gebruik gemaakt van een schoon filterbed en water zonder vuillast. Door de eliminatie van vuil wordt het mogelijk specifiek een antwoord te geven op het vraagstuk van de hydraulische en kinematische effecten op een snelfilter. Dit is namelijk niet mogelijk wanneer in het onderzoek vuillast wordt meegenomen door chemische en biologische interacties van het vuil met het filterbed. Uiteindelijk is het mogelijk met de verkregen kennis de spoeling met de ETSW procedure verder inzichtelijk te maken.

Naast de verklaring van de ETSW procedure worden verschillende filtratiemodellen vergeleken met de praktijk. Hierbij worden de modellen gebruikt om het drukverschil over een filterbed te voorspellen. Deze voorspellingen worden vergeleken met de empirisch bepaalde data waarna, op basis van de afwijking in voorspeld drukverschil met de praktijkmetingen, het beste model gekozen wordt.

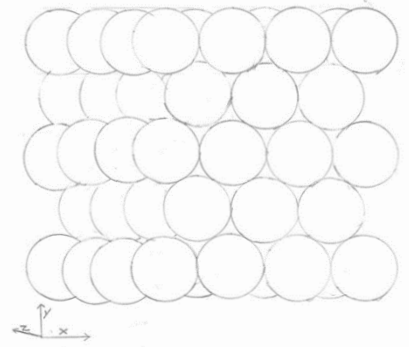
3 Achtergronden van de drinkwaterproductie

Dit hoofdstuk beschrijft de achtergronden van de drinkwaterproductie, waarbij de focus wordt gelegd op het snelfiltratie-spoelproces. Daarnaast wordt de koppeling gelegd met het zetten van een gepakt zandfilterbed en de grondmechanica.

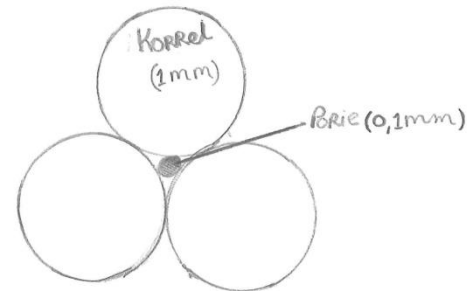
3.1 Drinkwaterproductie

Waternet maakt gebruik van vier locaties waar de productie van drinkwater plaatsvindt. Op de locaties Loenderveen en Nieuwegein wordt ruw water ingenomen vanuit de Bethunepolder en het Lekkanaal waarna de voorzuivering plaatsvindt. Deze voorzuivering vindt plaats om een groot deel van de ongewenste stoffen en gesuspendeerde verontreiniging te verwijderen. De voorzuivering begint met de coagulatie waarbij colloïdale deeltjes gedestabiliseerd worden en vlokvorming optreedt. De gecreëerde vlokken zullen bezinken of opdrijven, waardoor deze te verwijderen zijn met behulp van bezinking en snelle zandfiltratie.

De snelfiltratie vindt plaats volgens het principe van granulaire diepbed filtratie. Voor deze filtratie wordt gebruik gemaakt van zand met een gemiddelde diameter van 1 mm en een neerwaartse lineaire doorstroomsnelheid van 5 – 10 m/uur. Door de bolstapeling, weergegeven in Figuur 2, ontstaan tussen de zanddeeltjes kanalen van ongeveer 1/10 van de diameter die te klein zijn voor de vlokken om te passeren. De vorming van deze poriën staat weergegeven in Figuur 3. De vervuiling zal door middel van coagulatie vlokken vormen met een diameter van circa 1 tot 10 mm terwijl het snelfilterzand een circa 1 mm in diameter is. Na de zandfiltratie wordt het water verpompt naar de volgende locaties voor de hoofdzuivering. Het water uit de Bethunepolder wordt verpompt naar Weesperkarspel en het water uit Nieuwegein wordt via de Amsterdamse Waterleidingduinen verpompt naar locatie Leiduin.



Figuur 2. Schematische weergave van een bolstapeling.



Figuur 3. Schematische weergave van de poriegrootte ontstaan door de bolstapeling.

De hoofdzuivering wordt verdeeld in vier stappen. Wanneer het water vanuit de voorzuivering aankomt wordt deze behandeld met ozon. De ozonbehandeling breekt de grote organische moleculen af en maakt pathogenen en microverontreinigingen onschadelijk. Na de ozonbehandeling wordt het water onthard met behulp van korrelreactoren. In deze korrelreactoren kristalliseren calciumionen als calciumcarbonaat op calciënt-materiaal in een gefluidiseerd bed. Na de ontharding wordt het water door actieve koolfilters geleid. Deze filters adsorberen de schadelijke stoffen in het water, waarna deze deels worden afgebroken door biologische micro-organismen in de filters. De laatste stap in de hoofdzuivering is de langzame zandfiltratie. De langzame zandfiltratie volgt het principe van koekfiltratie. Het water stroomt met een lage snelheid door de poriën in het filter die te klein zijn voor micro-organismen en de laatste overgebleven gesuspendeerde deeltjes, waardoor deze verwijderd worden. Hierna is het water geschikt als drinkwater. Waternet produceert circa 90 miljoen m³ drinkwater op jaarbasis. Locatie Leiduin levert circa 60 miljoen m³ en Weesperkarspel levert de overige 30 miljoen m³ van het drinkwater. Een schematische weergave van de drinkwaterproductie op locaties Loenderveen en Weesperkarspel staat weergegeven in bijlage I.

3.2 Snelfiltratie nader bekeken

Snelfiltratie is een wereldwijd veel toegepaste zuiveringsstap waarbij een vloeistof door een poreus medium stroomt. Tijdens deze stroming door het poreuze medium wordt de kwaliteit van de vloeistof verbeterd door de verwijdering van gesuspendeerde deeltjes, verlaging van het aantal bacteriën en andere organismen en door de verandering in de chemische samenstelling.

In de waterzuivering wordt filtratie in meerdere zuiveringstappen ook toegepast. Het poreuze medium dat hiervoor gebruikt wordt kan in principe elk chemisch stabiel materiaal zijn, maar granulaire zandbedden worden veelal gebruikt. Voordelen aan het gebruik van zandbedden zijn de verkrijgbaarheid en relatieve lage kosten om het proces te laten verlopen. Tijdens de filtratie met een granulaire zandbed wordt de vervuiling in het water opgevangen tussen de korrels en kanalen in het filterbed. Door de ophoping van dit vuil neemt de ruimte waardoor het water kan stromen af en zal de weerstand van het bed toenemen en de effectiviteit van de filtratie afnemen. Naarmate het filtratieproces wordt uitgevoerd zal de weerstand uiteindelijk te veel toenemen waardoor het filter zal doorbreken. Deze doorbraak zorgt er voor dat het ruwe water volledig door wordt gelaten. Om de doorbraak te voorkomen wordt het filter schoongemaakt met behulp van een spoeling^[10].

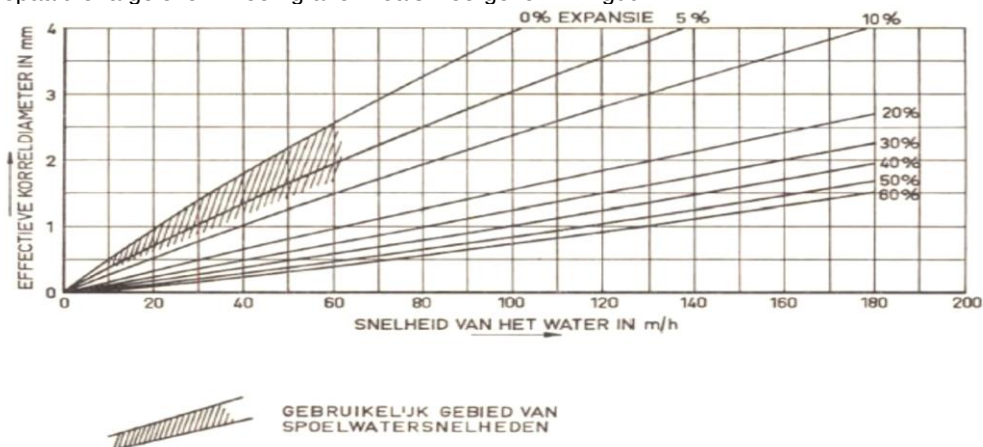
3.2.1 Schoonmaken van de snelle zandfilters, de spoeling

Om doorbraak van een snel-zandfilter te voorkomen wordt een snelfilter filter teruggespoeld met water en lucht. Deze spoeling bestaat uit drie stappen. In de eerste spoeling wordt het opgehoopte vuil eerst losgemaakt met behulp van 'collapse pulsing'. Tijdens de collapse pulsing wordt zowel water als lucht in opwaartse richting door het filterbed geleid. Door de toevoer van lucht ontstaan bellen in het filterbed waardoor het gepakte bed wordt opgeschud. Dit leidt tot wrijving tussen de korrels waardoor het geaccumuleerde vuil tussen de korrels los wordt geschuurd. Na de collapse pulsing krijgt het bed enkele minuten om tot rust te komen.

Na de rustperiode wordt water in opwaartse richting door het filterbed gestuurd. Tijdens deze stap wordt de snelheid van het water zo ingesteld dat het filterbed voor 5 – 10 % expandeert. Bij een diameter van de korrels van 1 mm wordt de waterspoeling uitgevoerd met een lineaire snelheid van 30 – 40 m/uur. De mate van expansie wordt berekend met behulp van formule 1.

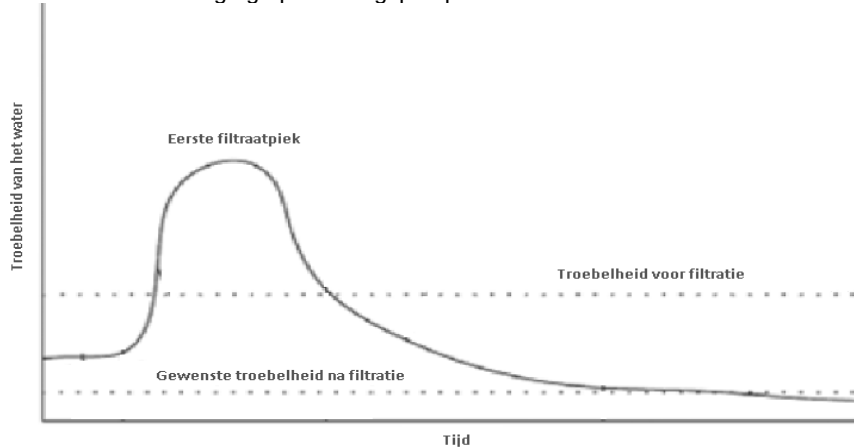
$$E = \frac{L_e - L_0}{L_0} \quad (1)$$

De mate van expansie is afhankelijk van de doorstroomsnelheid en wordt experimenteel bepaald of afgelezen in een grafiek zoals weergegeven in Figuur 4.



Figuur 4. Effectieve korrel diameter [mm] uitgezet tegen de spoelsnelheid [m/uur] voor verschillende mate van expansie, waarbij de gemiddelde diameter van het snelfilterzand zich in het gemarkeerde gebied bevindt^[22].

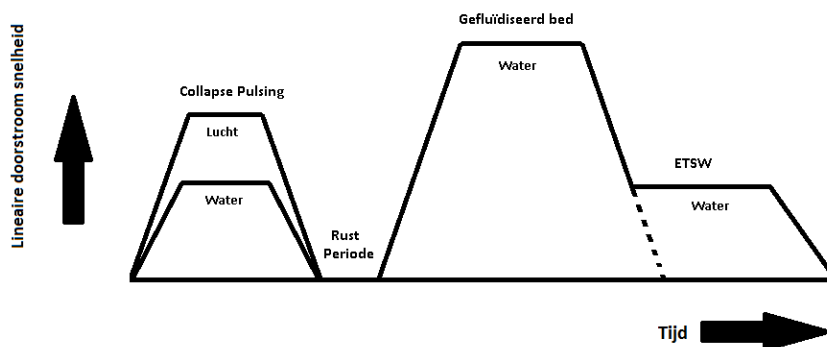
De expansie zorgt ervoor dat de vuillast uit het filter kan worden uitgespoeld. Nadat het geëxpandeerde filterbed voor een vastgestelde tijd terug is gespoeld wordt deze trapsgewijs teruggebracht naar een gepakt bed. Hierna werd voorheen het filter weer in gebruik genomen, waarbij gedurende een half uur het eerste filtraat, vanwege verhoogde vervuiling op het riool of oppervlaktewater wordt geloosd (Zie Figuur 6). De Extended Terminal Sub-fluidisation Wash is een toevoeging op de terugspoelprocedure.



Figuur 5. Schematische weergave van de opstart van de snelfiltratie.

3.2.2 De Extended Terminal Sub-fluidisation Wash procedure

De Extended Terminal Sub-fluidisation Wash (ETSW) procedure is een extra stap in het terugspoelproces waarbij het gepakte-filterbed na de conventionele expansie gedurende een filtervolume met gepakt bed opwaarts bedreven wordt als filtratie met een snelheid van circa 5 m/uur. Het doel van deze opwaartse doorstroming is om de tijdens de expansie losgekomen overgebleven vuillast in en op het gepakte filterbed te verwijderen, waardoor deze niet meer mee worden gespoeld in het eerste filtraat.



Figuur 6. Schematische weergave terugspoelprocedure van een snel-zandfilter met de ETSW.

Volgens Amburgey ontstaan door de lage snelheden gebruikt bij de ETSW, niet genoeg wrijvingskrachten om nieuw vuil te los te schuren, terwijl de al los gekomen vuillast wel wordt uitgespoeld. Uitgaande van de theorie van extra collectoren beschreven door Amburgey^{[1][2]} en Bonini^[3] is het onlogisch om een zo laag mogelijke concentratie aan vervuiling in het gespoelde filterbed te creëren. De theorie van extra collectoren stelt dat het de overgebleven vuillast na de spoelprocedure filterrijping versnelt waardoor het drinkwater sneller de gewenste kwaliteit bereikt. Dit effect wordt echter weer tegengesproken door de zetapotential van de vuillast. Tijdens de spoeling zal de elektrostatische lading van de vuillast in toenemende mate negatiever worden. Deze afname zal aanhouden totdat de vuillast zijn originele ruw water zetapotential bereikt. Een verklaring voor de verandering van de zetapotential van de vuillast is tot op heden nog niet gegeven^[2].

De hydraulische verklaring van de ETSW berust op de specifieke grootte van de poriën. De vorming van de poriën ontstaat wanneer een filterbed na de spoeling weer met langzaam afnemende opwaartse stroom naar een gepakt filterbed wordt gebracht. Dit gepakte filterbed heeft hierbij de, in grondmechanica gebruikte term, maagdelijke zetting, bereikt en een specifiek skelet van korrels opgebouwd. In deze gepakte toestand zal het bed vanwege de hoekige vorm van het zand een instabiele korrelstapeling hebben. Door deze korrelstapeling zal de poriegrootte niet uniform verdeeld zijn. De aanname is dat een klein percentage van de poriën in het gepakte filterbed een relatief grotere diameter hebben dan de diameter van de vuillast en hierdoor de vuillast niet blokkeren. Het relatief kleine aandeel in poriën met de grotere diameter zullen tijdens het opstarten van de filtratie, vanwege verstoringen van de instabiele korrelstapeling door wrijvingskrachten van het water en diffusie van de vuillast instorten. Hierna zullen deze voorheen grotere poriën de vuillast wel tegenhouden en zal de waterkwaliteit een stabiele waarde aannemen. De ETSW zorgt voor opwaartse wrijvingskrachten door de viscositeit en de oppervlaktespanning van het water. Doordat deze wrijvingen als impuls energie in het gepakte filterbed brengen zijn deze in staat de instabiele korrelstapeling te verstoren. Deze verstoring zorgt ervoor dat de grote poriën die zijn ontstaan tijdens de maagdelijke zetting instorten en de kleinste poriegrootte wordt bereikt. Deze instorting verlaagt hiermee de doorlaatbaarheid van het filterbed, waardoor de vuillast van de eerste filtraatpiek wordt tegengehouden.

3.3 Overeenkomst tussen grondmechanica en het filtratieproces

Grondmechanica is onderdeel van het vakgebied Geotechniek. Wanneer een bodemlaag bestaat uit los, poreus materiaal worden de eigenschappen van de grond beschreven volgens de grondmechanica. De grondmechanica bestudeert de interactie van korrelstapelings in poreuze grondlagen onder invloed van belasting en vloeistofstromen^[20]. Tijdens een dieptefiltratie beïnvloedt de vloeistofstroom het gepakte filterbed door middel van schuifspanningen. Door deze stromen ontstaat zetting van het filterbed dat een verlaging van de doorlatendheid met zich mee brengt.

3.3.1 Zetting van een poreus korrelbed

Zetting treedt op door krachten, zoals schuifspanningen en normaalspanningen, die worden uitgeoefend op de korrelstapeling van een grondlaag. Wanneer deze spanningen op aanknopingspunten tussen de korrels te groot worden zal de korrelstapeling verstoord raken en zal de grondlaag zich heroriënteren. Tijdens deze heroriëntatie zullen de korrels een voorkeur hebben op een stabiele positie met veel aanknopingspunten tussen de korrels. De toename van aanknopingspunten zal blijven optreden totdat de evenwichtstoestand wordt bereikt. Doordat het aantal aanknopingspunten tussen de korrels zal toenemen, zal de hoeveelheid open ruimte tussen de korrels afnemen. Als dit plaatsvindt in een gesloten systeem, waarin alleen de hoogte van de korrelstapeling variabel is, zal het korrelbed inzakken. De zetting kan optreden zonder invloed van externe factoren. Wanneer dit het geval is spreekt men over primaire zetting. Als er echter zetting optreedt door externe factoren wordt secundaire zetting genoemd. De mate van zetting is afhankelijk van de beginsituatie van het gepakte bed. De open ruimte tussen de korrels zal groter zijn wanneer een korrelbed vanuit een gefluidiseerde situatie met een langzaam afnemende opwaartse snelheid wordt neergelegd en externe factoren geen invloed hebben gehad op de korrelstapeling. Wanneer dit het geval is spreekt men van een maagdelijke zetting en een primaire skeletopbouw. Echter, wanneer een korrelbed tijdens de fluidisatie abrupt wordt gestopt en de stapeling van de korrels ongecontroleerd plaatsvindt, zal de open ruimte tussen de korrels kleiner zijn.

3.3.2 De invloed van zetting op de doorlatendheid van een gepakt bed

Een poreus gepakt bed, waarin kanaalvorming optreedt, is in staat lucht of vloeistof door te laten. De mate waarin dit gepakte bed een vloeistof of luchtstroom doorlaat wordt de doorlatendheid genoemd. De doorlatendheid is afhankelijk van de open ruimte in het gepakte bed en de open ruimte is weer afhankelijk van de korrelstapeling, die direct wordt beïnvloed door de mate van zetting. Wanneer een korrelbed vanuit gefluïdiseerde toestand voorzichtig naar de maagdelijke en geclassificeerde zetting wordt teruggebracht, zullen de kanalen en de open ruimte groter zijn dan bij een ongecontroleerde instorting van het bed. Hierdoor zal een maagdelijk gezet korrelbed meer lucht of vloeistof doorlaten dan een beter gezet bed. Voor de filtratie is het van belang dat kanalen kleiner zijn dan de vuillast en er tevens geen grotere gaten in het bed zitten die de vuillast grotendeels doorlaten en zal een verder gezet en ingestort bed een beter resultaat opleveren.

4 De fysische modellen gebruikt voor de snelfiltratie

In dit hoofdstuk wordt de fysische basis van het snelle-zandfiltratieproces besproken. Enkele basisbegrippen voor het gebruik van de modellen wordt beschreven, waarna de modellen gebruikt in dit onderzoek worden onderbouwd.

4.1 Basisbegrippen ter ondersteuning van de modellen

Bij het gebruik van de onderstaande modellen wordt gebruik gemaakt van termen die veel gebruikt worden bij het vakgebied stromingsleer. De termen porositeit en tortuositeit en het karakteriseren van deeltjes in een gepakt bed worden nader onderbouwd.

4.1.1 Het open volume in een korrelbed, de porositeit

De porositeit geeft de verhouding tussen het volume open ruimte en het totale volume in een systeem waarbij een gas/vloeistof en vaste stof gemengd worden. De porositeit is te berekenen met behulp van formule 2.

$$\varepsilon = 1 - \frac{4 \cdot m}{\rho_s \cdot \pi \cdot d_k^2 \cdot L} \quad (2)$$

Tijdens de filtratie zal de porositeit afnemen doordat de massa van het bed met het opnemen van de vuillast zal toenemen. Bij de expansie zal de porositeit toenemen. Doordat het bed uit elkaar beweegt en hierdoor de bedhoogte toeneemt ontstaat er meer open ruimte tussen de deeltjes. De afleiding van formule 2 staat in bijlage III

4.1.2 De verandering van afgelegde weg in een korrelbed, de tortuositeit

Wanneer een vloeistofstroom door een korrelbed heen stroomt, zal deze door de aanwezigheid van de korrels een andere weglengte krijgen. Deze afgelegde weg zal groter zijn dan wanneer een vloeistofstroom door een open buis stroomt. De verhouding in weglengtes wordt gedefinieerd als de tortuositeit en wordt berekend met de volgende vergelijking.

$$\tau = \frac{L_e}{L} \quad (3)$$

Waarbij L_e de verlengde afgelegde weg is veroorzaakt door de korrels en L de afgelegde weg in een open ruimte.

4.1.3 Deeltjes karakterisering

Bij het gebruik van de grootte van deeltjes in modellen worden deze deeltjes beschreven als perfect ronde, gladde deeltjes. Bij natuurlijke materialen is dit echter nooit het geval (zie Figuur 7). Om deze natuurlijke ruwe deeltjes te beschrijven zijn verschillende technieken ontwikkeld om de afmetingen te karakteriseren. De gebruikte diameter karakterisering methodes die voor dit onderzoek zijn gebruikt worden verder beschreven^[23].



Figuur 7. Voorbeelden van de vormen van deeltjes.

Van links naar rechts: Glasparel 1 mm; Calciet pellets 1 mm; Snelfilterzand 0.8 – 1.25 mm.

4.1.3.1 Definitie en bepaling van de zeefdiameter

De zeefdiameter wordt bepaald met behulp van zeven met een vastgestelde diameter. Om de diameter te karakteriseren worden deze zeven opgestapeld van kleinste zeefwijdte naar de grootste zeefwijdte. Het verschil tussen de opeenvolgende zeefwijdtes bedraagt een factor 1,12. De zeefwijdte wordt bepaald door de gemiddelde diameter van het product te schatten. Wanneer deze zijn geschat wordt rondom deze diameter een zeefreeks opgesteld. Na het opstellen van de zeefreeks wordt het product geladen op de zeef met de grootste zeefwijdte. Hierna wordt met behulp van een zeefmachine het product gezeefd.

Na afloop van de zeefprocedure kunnen de overgebleven fracties op de zeven gewogen worden en een cumulatief gemiddelde bepaald worden. Het is hierna ook mogelijk de uniformiteit coëfficiënt vast te stellen. De uniformiteit coëfficiënt geeft de mate van spreiding van de diametergrootte weer van het product. Deze wordt bepaald door de zeefwijdte waarbij 60 procent van de zeeffractie door de zeef passeert te delen door de zeefwijdte waarbij 10 procent door de zeef passeert^[23].

Naast het gebruik van deze zeefanalyse is het ook mogelijk te fractioneren tussen twee zeven. Hierbij worden twee zeven met bekende diameter opgestapeld en het overgebleven product tussen de zeven opgevangen. Het gemiddelde van de twee gebruikte zeven wordt dan gesteld als de gemiddelde diameter van het product.

4.1.3.2 Definitie en bepaling van de Brown-Lawler bezinkdiameter

De hydraulische diameter beschrijft het gedrag van één korrel met de diameter van een perfect rond deeltje die door een medium beweegt. Het medium dat hiervoor gebruikt wordt is vaak water. Wanneer de snelheid waarmee een deeltje door de vloeistof stroomt vastgesteld wordt en de dichtheid van het deeltje en de vloeistof bekend zijn kan met behulp van de formule van Stokes (Formule 4) de bezinkdiameter berekend worden^[23].

$$d_p = \sqrt{\frac{18\eta \cdot v_t}{g(\rho_s - \rho_l)}} \quad \text{Re}_t < 1 \quad (4)$$

$$\text{Re}_t = \frac{\rho_l \cdot v_t \cdot d_p}{\eta} \quad (5)$$

De formule van Stokes om de diameter van een korrel te beschrijven is alleen geldig bij een terminale Reynoldsgetal, Re_t , kleiner dan 1 (Formule 5). Het gebied waarin de te onderzoeken korrels zich bevinden ligt echter bij Re_t 200. Om in dit gebied de diameter te bepalen wordt er gebruik gemaakt van de weerstandscoefficiënt, C_D , van het deeltje. Dit is de wrijving die een korrel ondervindt tijdens de bezinking. Om de weerstandscoefficiënt van een korrel te berekenen wordt de formule van Brown-Lawler gebruikt (Formule 6).

$$C_D = \frac{24}{\text{Re}_t} (1 + 0.15 \text{Re}_t^{0.681}) + \frac{0.407}{1 + \frac{8710}{\text{Re}_t}} \quad \text{Re}_t < 200.000 \quad (6)$$

De formule van Brown-Lawler beschrijft zowel het laminaire, turbulente en overgangsgebied van de terminale bezinking. Vanuit de berekende weerstandscoefficiënt wordt de diameter berekend worden met behulp van formule 7.

$$d_{bl} = \frac{4}{3} \cdot \frac{C_D \rho_l v_t^2}{g(\rho_s - \rho_l)} \quad (7)$$

Omdat deze formules een impliciete vergelijking vormen, omdat Re_t (formule 5) afhankelijk is van de diameter van een deeltje, en formule 7 deze uitrekent, wordt de diameter met behulp van iteratie vastgesteld.

4.2 Fysische modellen gebruikt bij het filtratieproces

Tijdens de filtratie is het van belang dat het drukverschil over het filterbed gecontroleerd wordt. Met het gebruik van modellen is het mogelijk het drukverschil over het gepakte filterbed te voorspellen en het filtratieproces hiermee aan te sturen. Een van de meest gebruikte modellen om de filtratie over een gepakt bed te voorspellen is de wet van Darcy, echter zijn de modellen van Kozeny, Carmen, Burke-Plummer en Ergun ook geschikt het drukverschil te voorspellen. De modellen onderzocht in het onderzoek worden hier onderbouwd en uiteindelijk vergeleken met de praktijk.

4.2.1 De wet van Darcy

Poreuze vaste stoffen, waarvan de poriën in contact staan met elkaar zijn in staat stromingen van gasen en vloeistoffen door te laten. Wanneer deze poriën homogeen verdeelt zijn is het mogelijk een doorlaatbaarheid aan de vaste stof toe te kennen. Dit verband wordt beschreven met de wet van Darcy. Vanuit experimentele data, uitgevoerd op zandlagen, werd een verband gevonden tussen het drukverschil en de superficiële snelheid, de snelheid van de vloeistof buiten het gepakte filterbed in m/s.

$$v_s = K * \frac{\Delta P}{\eta * L} \quad (8)$$

Met behulp van dimensieanalyse van de bovenstaande formule volgt dat de doorlatendheid, K, uitgedrukt wordt in m/s^[18]. De doorlatendheid van een gepakt bed kan bepaald worden met behulp van formule 9, waarbij de doorlatendheid afhankelijk is van de dichtheid en viscositeit van het medium en de permeabiliteit van het filtermateriaal.

$$K = \frac{\kappa \rho_l}{\eta} \quad (9)$$

Deze permeabiliteit wordt berekend met behulp van de diameter van de korrel en de porositeit, zoals weergegeven in formule 10.

$$\kappa = \frac{d_p^2 \varepsilon^3}{180(1-\varepsilon)^2} \quad (10)$$

De wet van Darcy heeft de basis gelegd voor de modelering van het filtratieproces.

4.2.2 De wet van Hagen-Poiseuille als bouwsteen voor de filtratiemodellen

De wet van Hagen-Poiseuille beschrijft de stroming van een niet samendrukbare Newtoniaanse vloeistof door een cilindrische buis met een constante binnendiameter. De wet is experimenteel afgeleid door Jean Leonard Marie Poiseuille en Gotthilf Heinrich Ludwig Hagen in 1838 en wordt nog steeds gebruikt om stroming door capillaire buizen, als een injectienaald, te beschrijven. De wet van Poiseuille veronderstelt dat het drukverschil in de cilindrische buis afhankelijk is van de viscositeit, de lineaire doorstroomsnelheid en de afmetingen van de buis.

$$\Delta P = \frac{32\eta * L * v_s}{d_k^2} \quad (11)$$

Als een gepakt filterbed wordt beschreven als een bed met N aantal capillaire buizen, met bekende diameter en lengte, én de viscositeit en doorstromingsnelheid van de vloeistof bekend zijn kan het drukverschil over het gepakte bed worden berekend. Als randvoorwaarde voor het gebruik van de wet van Hagen Poiseuille geldt dat de stroming door de buis laminair is. Deze wordt bepaald door het Reynoldsgetal van de buis te berekenen aan de hand van formule 12.

$$Re = \frac{\rho v D}{\eta} \quad Re < 2000 \text{ laminair} \quad Re > 4500 \text{ Turbulent.} \quad (12)$$

4.2.3 De formule van Kozeny

De wet van Hagen-Poiseuille is alleen geldig bij stroming door een lege buis. Dit is echter niet het geval in een gepakt filterbed waar een vernauwing van het doorstroomde oppervlak optreedt door de aanwezige korrels. Door de vernauwing zal de doorstromingsnelheid toenemen in het gepakte filterbed tegenover de lege buis. Om deze toename in doorstromingsnelheid te corrigeren heeft Kozeny de superficiële of lineaire snelheid gedeeld door de porositeit. De berekende snelheid tussen de korrels wordt de interstitiële snelheid genoemd.

$$v_i = \frac{v_s}{\epsilon} \quad (13)$$

Daarnaast vond Kozeny een verband tussen de doorlatendheid van een gepakt filterbed en de vorm en korrelstapeling van het materiaal. Om hiervoor te corrigeren wordt de diameter van de kolom vervangen door de hydraulische diameter. Deze wordt berekend met formule 14.

$$d_h = 4 * \frac{\text{Open volume}}{\text{bevochtigd oppervlakt}} = 4 * \frac{\pi D^2 * L * \epsilon}{\pi D^2 * L * (1 - \epsilon) * a} = \frac{4 * \epsilon d_p}{6(1 - \epsilon)} \quad (14)$$

Waarbij a de verhouding van het totaal volume en oppervlakte van de korrels is in het gepakte bed.

$$a = \frac{4\pi * r_p^2}{\frac{4}{3}\pi * r_p^3} = \frac{3}{r_p} = \frac{6}{d_p} \quad (15)$$

Wanneer de correcties van formules 13 en 14 in de vergelijking van Hagen-Poiseuille (formule 11) worden geïntroduceerd ontstaat de aangepaste formule van Hagen-Poiseuille.

$$\Delta P = \frac{72\eta * L * v_s * (1 - \epsilon)^2}{d_p^2 * \epsilon^3} \quad (16)$$

Aan de hand van experimenteel verkregen data bleek deze formule nog een afwijking te vertonen van de praktijk. Deze afwijking werd verklaard door de afgelegde weg door het gepakte filterbed. Deze afgelegde weg zal toenemen doordat de vloeistof rondom de korrels moet stromen. Om hiervoor te corrigeren vermenigvuldigd Kozeny zijn formule met een factor 2,5. Dit levert de uiteindelijke formule van Kozeny op.

$$\Delta P = \frac{180\eta * L * v_s * (1 - \epsilon)^2}{d_p^2 * \epsilon^3} \quad Re_\epsilon < 1 \quad (17)$$

Deze formule heeft, net als de formule van Hagen-Poiseuille, de randvoorwaarde dat de stroming door het gepakte bed laminair is. Het Reynoldsgetal wordt echter met een andere formule uitgerekend. Deze is afhankelijk van de diameter van de korrels en de porositeit van het gepakte bed.

$$Re_{\varepsilon} = \frac{\rho v d_p}{\eta(1-\varepsilon)} \quad Re < 1 \text{ laminair} \quad Re > 500 \text{ Turbulent.} \quad (18)$$

4.2.4 De aanpassing van Carmen aan de formule van Kozeny

Uit experimentele data bepaalde Carmen dat de formule van Kozeny alleen het drukverschil in het laminaire stromingsregime voorspelde. Omdat stroming in een gepakt bed in de praktijk een Reynoldsgetal in het overgangsgebied heeft, wijkt de formule van Kozeny altijd af. Om hiervoor te corrigeren ontwikkelde Carmen een extra term om het drukverschil in het overgangsgebied van het stromingsregime te beschrijven. Het overgangsgebied bevindt zich tussen $1 < Re_{\varepsilon} < 600$. De formule van Carmen is als volgt:

$$\Delta P = \frac{2.87 \eta^{0.1} v_s^{1.9} (1-\varepsilon)^{1.1} \rho_w^{0.9}}{d_p^{1.1} \varepsilon^3} * L \quad 1 < Re_{\varepsilon} < 600 \quad (19)$$

De formule van Kozeny (formule 17) en de tweede term geïntroduceerd door Carmen (Formule 19) vormen samen de formule van Carman-Kozeny.

$$\Delta P = \left(\frac{180 \eta v_s (1-\varepsilon)^2}{d_p^2 \varepsilon^3} + \frac{2.87 \eta^{0.1} v_s^{1.9} (1-\varepsilon)^{1.1} \rho_w^{0.9}}{d_p^{1.1} \varepsilon^3} \right) * L \quad 0 < Re_{\varepsilon} < 600 \quad (20)$$

4.2.5 De formule van Burke-Plummer, het drukverschil in het turbulente stromingsregime

Omdat de formule van Kozeny alleen het drukverschil in het laminaire stromingsregime beschrijft is met behulp van empirische gegevens de formule van Burke-Plummer ontwikkeld. Deze formule is geldig vanaf $1000 < Re_{\varepsilon}$.

$$\Delta P = \frac{1.75 (1-\varepsilon) \rho_w v_s^2}{\varepsilon^3 d_p} * L \quad 1000 < Re_{\varepsilon} \quad (21)$$

Deze aanpassing maakt het mogelijk het drukverschil in het turbulente stromingsregime te beschrijven.

4.2.6 De samengestelde formule van Kozeny, Carmen en Burke-Plummer

Om het drukverschil over het gehele stromingsregime te beschrijven worden formules 17, 19 en 21 gesommeerd waardoor de volgende formule ontstaat.

$$\Delta P = \left(\frac{180 \eta v_s (1-\varepsilon)^2}{d_p^2 \varepsilon^3} + \frac{2.87 \eta^{0.1} v_s^{1.9} (1-\varepsilon)^{1.1} \rho_w^{0.9}}{d_p^{1.1} \varepsilon^3} + \frac{1.75 (1-\varepsilon) \rho_w v_s^2}{\varepsilon^3 d_p} \right) * L \quad (22)$$

4.2.7 De Formule van Ergun, het drukverschil bij laminaire en turbulente stroming

Ergun heeft de formule van Carman-Kozeny gevalideerd en gekalibreerd. Tijdens de validatie bleek de toegevoegde tweede term van Carmen niet van invloed te zijn en bleek de constante 180 in de term van Kozeny niet de juiste benadering te hebben. Om hiervoor te corrigeren is de tweede term van Carmen verwijderd uit de formule en is de aangepaste formule van Hagen-Poiseuille (formule 16) vermenigvuldigd met de tortuositeit. Deze is door Ergun empirisch vastgesteld als een factor 2. De verkregen waarde werd hierna afgerond op 150, omdat dit het drukverschil het beste voorspelde. Dit leverde formule 23.

$$\Delta P = \frac{150\eta * L * v_s * (1-\varepsilon)^2}{d_p^2 * \varepsilon^3} \quad (23)$$

Om niet alleen het laminaire stromingsregime te beschrijven heeft Ergun formules 21 en 23 gesommeerd waaruit de formule van Ergun is ontstaan.

$$\Delta P = \left(\frac{150\eta * v_s * (1-\varepsilon)^2}{d_p^2 * \varepsilon^3} + \frac{1,75(1-\varepsilon)\rho_w v_s^2}{\varepsilon^3 d_p} \right) * L \quad (24)$$

5 Materialen en methodes

In dit hoofdstuk wordt de worden de praktische onderzoeksactiviteiten beschreven. De gebruikte apparatuur en de methodes voor de bepaling van de soortelijke massa en de korrel diameter van het materiaal wordt verder onderbouwd.

5.1 Doelstellingen van het onderzoek

Het doel van het onderzoek is een hydraulische verklaring te geven voor de ETSW procedure. Om deze verklaring te vinden worden datasets, verkregen vanuit de praktijk, gebruikt om de hypothesen te valideren. Deze datasets bestaan uit simulaties van de ETSW procedure en filtratiemetingen op proefschaal. Naast de verklaring voor de ETSW worden de Formules van Darcy, Kozeny, Carman-Kozeny, Ergun en Carman-Kozeny-Burke-Plummer gevalideerd voor het filtratieproces. Dit wordt gedaan door de modellen te vergelijken met de praktijkgegevens verkregen uit de filtratiemetingen. Voor de validatie wordt er geen rekening gehouden met de randvoorwaarden van de formules. Ook worden de zeefdiameter en hydraulische diameter met elkaar vergeleken bij het gebruik van de formules.

5.2 Het experiment-ontwerp

Tijdens dit onderzoek worden een samengestelde fractie snelfilterzand en glaspereels van gemiddeld 1 mm als filtermaterialen gebruikt. De soortelijke massa van het snelfilterzand en de glaspereels wordt voor de experimenten vastgesteld zodat deze later gebruikt kunnen worden om de porositeit van het gepakte bed vast te stellen. Ook zal een zeefanalyse worden uitgevoerd op beide materialen zodat de specifieke gewichtsgemiddelde diameter bekend is. De Brown-Lawler bezinkdiameter wordt bepaald met behulp van terminale bezinkproeven en formules 5, 6 en 7 beschreven in de theorie.

Om de ETSW procedure te verklaren wordt deze op proefschaal gesimuleerd om mogelijke fysieke veranderingen in het gepakte filterbed waar te nemen. Tijdens deze simulatie wordt niet de gehele terugspoelprocedure gevolgd. Doordat de op schaal gemaakte proefkolom niet in de mogelijkheid is om 'collapse pulsing' te simuleren wordt deze stap overgeslagen. De expansie van het filterbed wordt wel gesimuleerd. Het bed wordt voor circa 10 minuten, 10 % geëxpandeerd waarna het gefluidiseerde filterbed met langzaam afnemende doorstroomsnelheid terug wordt gebracht naar een gepakt bed. Wanneer de opwaartse doorstroomsnelheid eenmaal is teruggebracht naar 5 m/uur wordt de eerste meting uitgevoerd. Hierna wordt gedurende een half uur iedere 5 minuten gemeten. Tijdens deze metingen worden de volgende gegevens gemeten.

- Het drukverschil.
- De doorstroomsnelheid.
- De bedhoogte van het gepakte bed.
- De temperatuur.

Tijdens de filtratiemetingen wordt het filterbed eerst met behulp van een opwaartse waterstroom geëxpandeerd tot 10% expansie. Hierna wordt het filterbed langzaam teruggebracht naar een gepakte toestand. Wanneer de gepakte toestand is bereikt wordt de waterstroom in neerwaartse richting ingesteld. Deze wordt gedurende het experiment gevarieerd en de volgende gegevens worden gemeten.

- Het drukverschil.
- De doorstromingsnelheid.
- De bedhoogte van het gepakte bed.
- De temperatuur.
- De waterstand boven het filterbed.

Met behulp van deze meetgegevens kunnen de theoretische drukverschillen berekend worden met behulp van de modellen. Omdat viscositeit en de soortelijke massa van watertemperatuur afhankelijk zijn, zullen deze worden berekend. Uiteindelijk kan op basis van de gegevens het best voorspellende model gekozen worden.

5.3 De gebruikte methodes en apparatuur

Voor dit onderzoek is er gebruik gemaakt van verschillende methodes en apparatuur om de soortelijke massa, de zeefdiameter en de bezinkdiameter te bepalen. Daarnaast is er gebruik gemaakt van een filtratie/expansiekolom waarmee de filtratie experimenten en de simulatie van de ETSW zijn uitgevoerd. Alle experimenten zijn uitgevoerd met een representatief genomen monster. Dit representatieve monster wordt met behulp van een splitter genomen (zie Figuur 8). Bij het gebruik van de splitter wordt het gehele monster door de splitter gefractioneerd totdat de gewenste hoeveelheid monster is bereikt. Hierna kunnen de experimenten uitgevoerd worden. De gebruikte apparatuur en de methodes worden verder onderbouwd.



Figuur 8. De splitter.

5.3.1 De soortelijke massabepaling

Voor het berekenen van de porositeit is het van belang dat de soortelijke massa van de materialen bekend is. Deze wordt daarom vastgesteld met behulp van een 200 ml maatkolf, een weegschaal, een thermometer en water.

Voorafgaand het experiment wordt de massa van de droge maatkolf vastgesteld. Hierna wordt deze maatkolf gevuld met het te testen materiaal. De massa van de maatkolf en de korrels wordt hierna genoteerd. De maatkolf wordt aangevuld tot 200 ml en de massa van de maatkolf, met water en het materiaal en de temperatuur van het water worden genoteerd.

Door de massa van de maatkolf en het materiaal van de totale massa af te trekken is de massa van het toegevoegde water bekend. De soortelijke massa van water is afhankelijk van de temperatuur en kan berekend worden met behulp van formule 25

$$\frac{999.83953 + (16.945176 \cdot T) - 7.9870401 \cdot 10^{-3} \cdot T^2 - 4.6170461 \cdot 10^{-6} \cdot T^3 + 105.56302 \cdot 10^{-9} \cdot T^4 - 280.54253 \cdot 10^{-12} \cdot T^5}{1 + 16.87985 \cdot 10^{-3} \cdot T} = \rho_w \quad (25)$$

Met behulp van de massa van het water en de soortelijke massa kan het volume water berekend worden. Doordat het volume van de maatkolf bekend is, kan het volume van het materiaal vastgesteld worden. De massa van de korrels kan berekend worden door de lege massa van de maatkolf van de massa van de maatkolf en materiaal af te trekken. Hierna kan de soortelijke massa van het materiaal bepaald worden door de massa te delen door het volume.

5.3.2 De zeefanalyse

De zeefdiameter wordt bepaald met behulp van een zeefmachine.

Voor de zeefanalyse wordt een zeefreeks opgesteld rondom de geschatte gemiddelde diameter. Hierna wordt een representatief monster van circa 200 g genomen van het materiaal. Hierna wordt het monster op de bovenste zeef, met de grootste zeefwijdte, geladen. De zeefmachine wordt naar behoefte ingesteld en de zeefanalyse wordt gestart. Na afloop worden de gewichten, achtergebleven op de individuele zeven, bepaald. Door de procentuele massa achtergebleven op de individuele zeven te bepalen en deze cumulatief uit te zetten kan de gewichtsgemiddelde diameter vastgesteld worden.

De aantalsgemiddelde diameter wordt berekend door de diameter van het materiaal die de zeef niet passeert om te rekenen naar de massa. Hierna kan de achtergebleven massa gedeeld worden door de berekende massa van een deeltje. Het aantal deeltjes op de zeef kan hier mee bepaald worden en door deze cumulatief uit te zetten wordt de aantalsgemiddelde diameter berekend.

5.3.3 De bezinkdiameter vaststellen

De gemiddelde bezinkdiameter wordt met behulp van terminale bezinking vastgesteld. Hierbij wordt de tijd waarmee één deeltje van het materiaal in een kolom, gevuld met water, over een bekende weglengte gemeten. Wanneer de tijd, afgelegde weg en temperatuur van het water bekend zijn kan de bezinksnelheid berekend worden. Met behulp van de temperatuur en formule 26 kan de viscositeit berekend worden

$$\eta = \frac{-3,7188 + \frac{578,919}{-137,546 + (T+273)}}{1000} \quad (26)$$

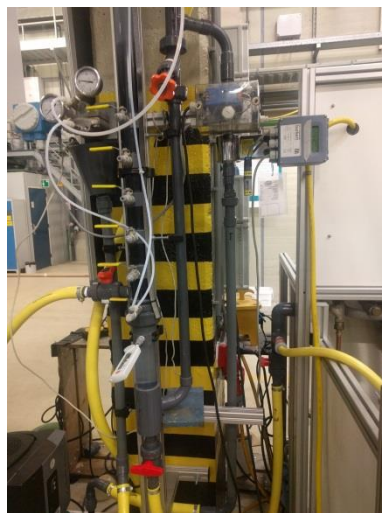
Hierna kan met behulp van formules 5, 6 en 7 de bezinkdiameter van een korrel berekend worden.

5.3.4 De expansie/filtratiekolom

De expansie/filtratiekolom bestaat uit een kolom van 4 meter met een binnendiameter van 5.7 cm. Deze is met behulp van een centrifugaalpomp aangesloten op een buffervat gevuld met 1 m³ water. De temperatuur van het water in het buffervat is regelbaar met behulp van een koeler en boiler aangesloten op een extern rondpompsysteem. De doorstromingsnelheid is zowel opwaarts als neerwaarts regelbaar. Het is mogelijk de temperatuur in de kolom en het drukverschil over het filterbed bij verschillende hoogte te meten.



Figuur 9. De Expansie/Filtratie kolom.



Figuur 10. De regeling van de kolom.

6 Resultaten

In dit hoofdstuk worden de resultaten van de ondersteunende soortelijke gewichtsbepalingen en diameteranalyses van het snelfilterzand en de glasparsels beschreven. Alle metingen zijn uitgevoerd op een representatief monster verkregen met een fractiesplitter. De resultaten van de filtratiemetingen met snelfilterzand worden hierna vergeleken met de modellen waaruit het best beschrijvende model wordt gekozen. De simulatie van de ETSW wordt grafisch weergegeven waarmee hypothesen 4 en 5 onderbouwd worden en een simpel model wordt hiervoor opgesteld.

6.1 Ondersteunende experimenten

Bij het gebruik van de modellen wordt gebruik gemaakt van de soortelijke massa van de filtermaterialen. Daarnaast moet het materiaal een bekende diameter hebben. Omdat verschillende soortelijke gewichten voor snelfilterzand en glasparsels in de theorie worden vermeld zijn deze, ter ondersteuning van simulatie en de filtratiemetingen, empirisch bepaald. De gemiddelde diameter van het snelfilterzand en de glasparsels wordt door de leveranciers meegeleverd. Echter is dit een benadering afkomstig uit een batch. Om deze met zekerheid vast te stellen worden de diameters empirisch bepaald. Dit gebeurt met behulp van de zeefanalyse en terminale bezinking.

6.1.1 Soortelijke massabepaling

De soortelijke massabepaling voor het snelfilterzand en de glasparsels is beide in tienvoud uitgevoerd. Door de meting in tienvoud uit te voeren is het statistisch toegestaan de gemiddelde soortelijke massa vast te stellen en de afwijking op te stellen. De resultaten van de soortelijke massabepaling staan weergegeven in de onderstaande tabel.

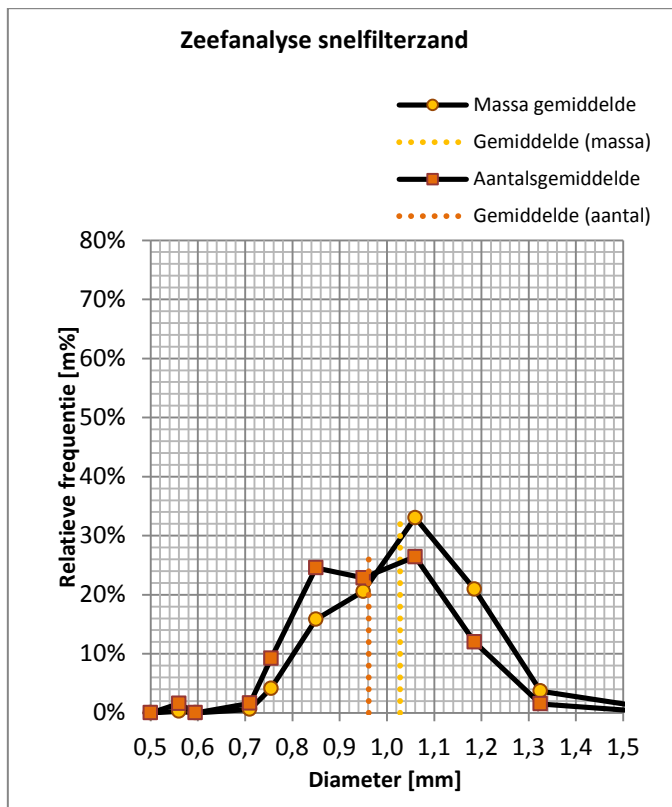
Tabel 1. Empirisch bepaalde soortelijke massa's voor snelfilterzand en glasparsels.

Materiaal	Diameter deeltjes [mm]	gemeten soortelijke massa [kg/m ³]	Afwijking [%]
Snelfilterzand	0,8-1,25	2.665	7%
Glasparels	1,0	2.430	1%

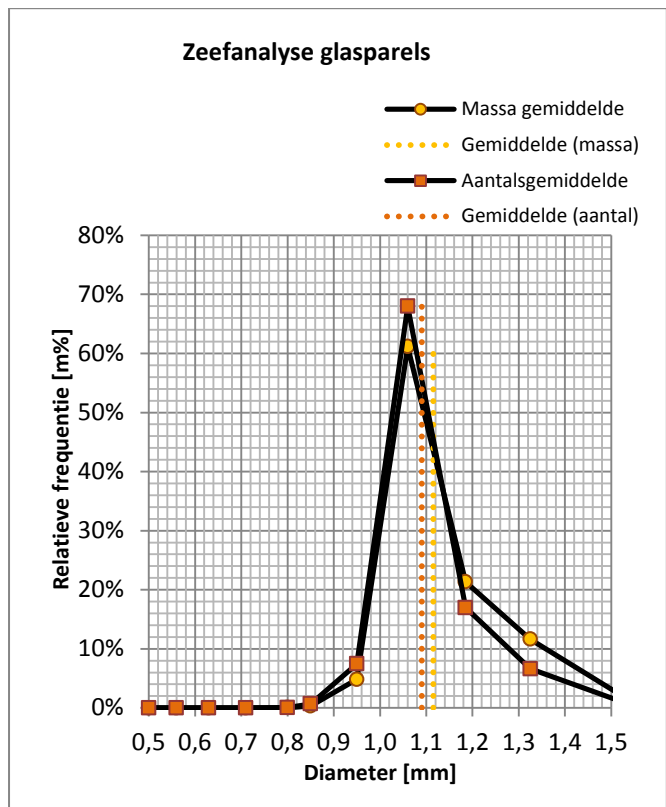
Beide gemeten soortelijke massa's vallen binnen de soortelijke massa's weergegeven uit de theorie. De afwijking van 7% bij de soortelijke massabepaling van snelfilterzand is te wijden aan de grote spreiding in de diameter en de vorm van het zand. De metingen blijven binnen een afwijking van 10% welke als acceptabel wordt beschouwd naar de standaarden geleverd bij Waternet.

6.1.2 Bepaling van de zeefdiameter

De modellen gebruikt in dit onderzoek om het drukverschil te voorspellen maken gebruik van de gemiddelde diameter van de korrels. Om deze vast te stellen is van beide onderzochte materialen een zeefanalyse uitgevoerd. Aan de hand van de verkregen data zijn de massa gemiddelde diameter en de aantalsgemiddelde diameter vastgesteld. Deze zijn grafisch weergegeven in Figuur 11A & B.



Figuur 11A. Zeeffanalyse van het snelfilterzand.



Figuur 11B. Zeeffanalyse van de glaspereels.

Opvallend uit de zeeffanalyse blijkt de gemiddelde diameter van de glaskorrels hoger te zijn dan aangegeven door de leverancier. Dit kan verklaard worden doordat deze glaspereels machinaal gevormd worden. Hierdoor zal het eindproduct altijd een afwijking kunnen vertonen. Het snelfilterzand was geleverd met een bekende zeeffractie grootte tussen de 0.8 en 1.25 mm. Uit de zeeffanalyse blijkt deze zeeffractie correct te zijn. De gewichtsgemiddelde en aantalsgemiddelde diameter van het snelfilterzand en de glaspereels staan weergegeven in Tabel 2.

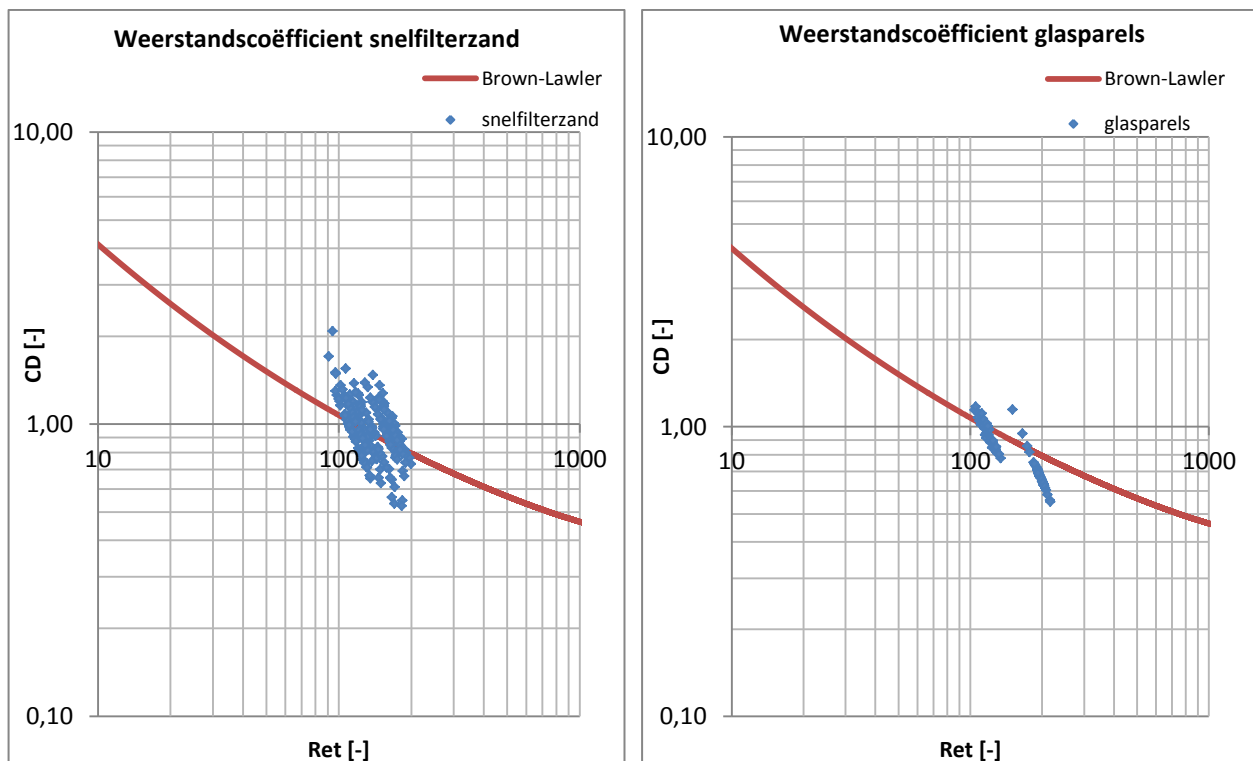
Tabel 2. De bepaalde gewichtsgemiddelde en aantalsgemiddelde diameter van snelfilterzand en glaspereels.

	Gewichtsgemiddelde diameter [mm]	Aantalsgemiddelde diameter [mm]
Snelfilterzand	1.03	0.96
Glasparels	1.12	1.09

Voor de berekeningen met behulp van de modellen wordt verder gerekend met de gewichtsgemiddelde diameter, omdat deze als standaard wordt gebruikt om korrels te definiëren. De aantalsgemiddelde diameter wordt gebruikt bij het berekenen van de weerstandscoefficiënt bij terminale bezinking, omdat de aantalsgemiddelde diameter statistisch gezien de grootste kans heeft om geselecteerd te worden bij een steekproef.

6.1.3 Bepaling van de Brown-Lawler bezinkdiameter met terminale bezinking

Om de gemiddelde hydraulische bezinkdiameter van het snelfilterzand en de glaspereels vast te stellen zijn terminale bezinkproeven uitgevoerd. De terminale bezinking van het materiaal werd in 40-voud uitgevoerd bij elke onderzochte temperatuur. De keuze voor deze grote dataset is gebaseerd op het artikel van Radoicic^[17]. Deze stelt dat een minimum van 100 metingen moet worden uitgevoerd om een statistisch correcte bezinkdiameter vast te stellen^[17]. Met behulp van formule 6 wordt voor elke meting een weerstandscoefficient bepaald. Hieruit wordt met behulp van formule 7 de Brown-Lawler bezinkdiameter bepaald. In Figuur 12 staan de experimenteel bepaalde weerstandscoefficienten, berekend met formule 7 waarbij de diameter gelijk is gesteld aan de aantalsgemiddelde diameter, uitgezet tegen de theoretische Brown-Lawler weerstandscoefficient.



Figuur 12. Experimentele bepaalde weerstandscoefficient tegen Brown-Lawler weerstandscoefficient uitgezet.

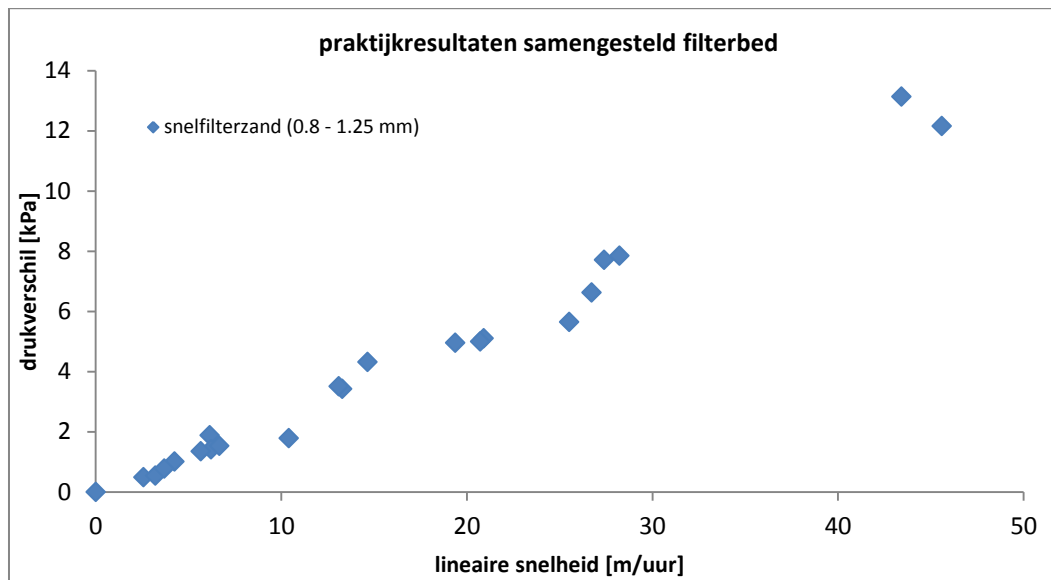
Van alle terminale bezinkproeven zijn de weerstandscoefficienten bepaald met behulp van de formule van Brown-Lawler (Formule 6). Op basis van deze gegevens is de gemiddelde bezinkdiameter vastgesteld. De gemiddelde bezinkdiameter voor snelfilterzand en de glaspereels staat weergegeven in tabel Tabel 3.

Tabel 3. De vastgestelde gewichtsgemiddelde en aantalsgemiddelde diameter van snelfilterzand en glaspereels.

	Gemiddelde bezinkdiameter [mm]	Afwijking [mm]
Snelfilterzand	0.96	+/- 0.12
Glasparels	1.31	+/- 0.10

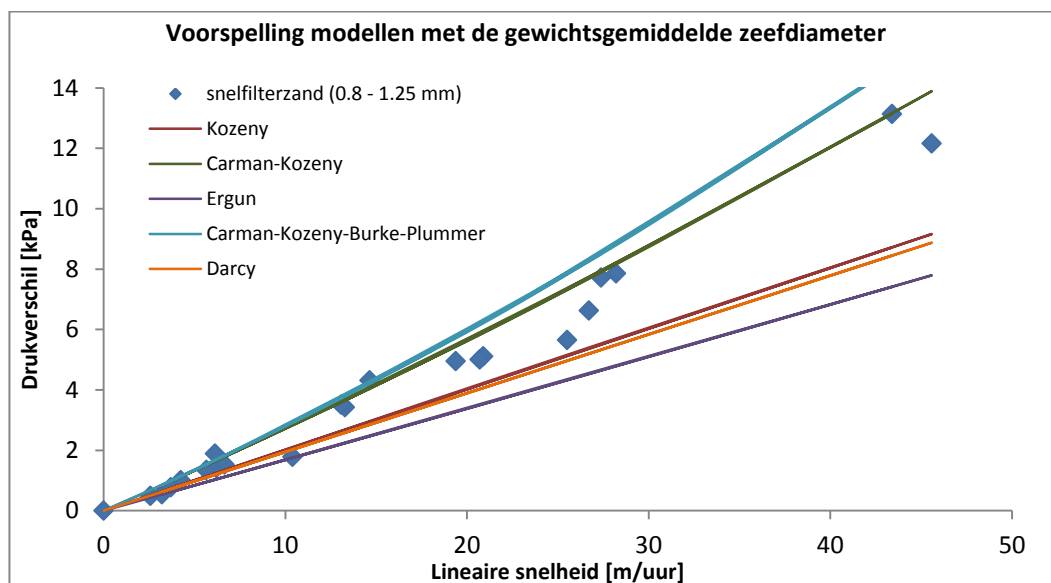
6.2 Modelvergelijking bij het filtratieproces

Om de modellen, besproken in de theorie, te vergelijken met de praktijk zijn filtratiemetingen uitgevoerd met een samengesteld snelfilterzand bed bestaande uit een fractie tussen 0,8 en 1,25 mm. Tijdens de filtratie zijn de doorstroomsnelheden gevarieerd. Dit experiment is herhaald bij 5, 10, 15 en 20 °C. Een voorbeeld van deze metingen is weergegeven in Figuur 13.

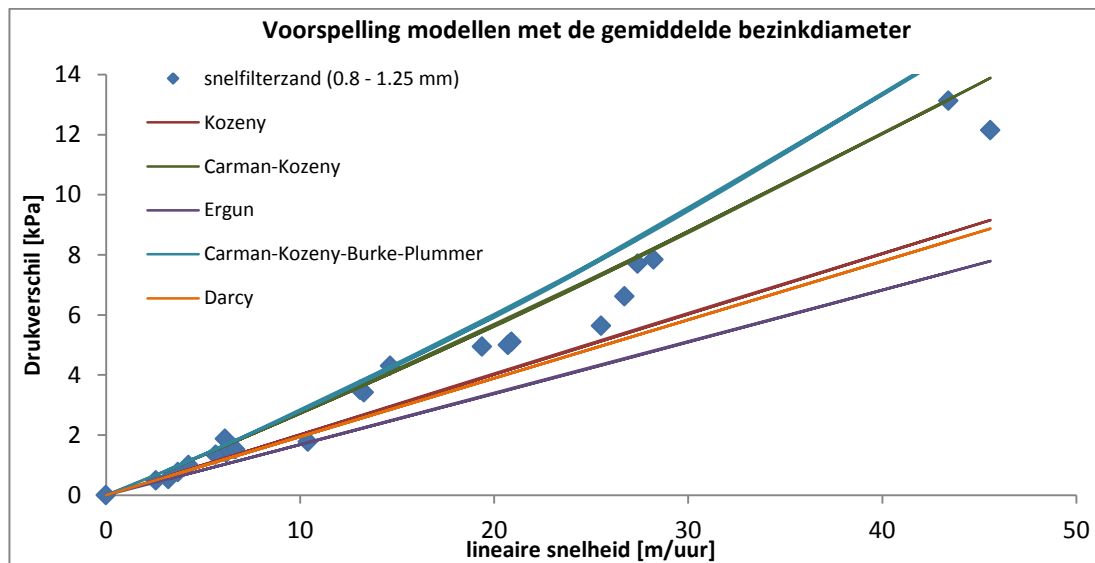


Figuur 13. Drukverschillen over het samengestelde filterbed bij 15 °C.

Met behulp van de meetgegevens is een gemiddelde doorlatendheidscoëfficiënt uitgerekend voor de formule van Darcy. Deze is hierna, samen met de andere modellen genoemd in de theorie, vergeleken met de praktijk. Hierbij is zowel de gewichtsgemiddelde zeefdiameter als de gemiddelde bezinkdiameter bij de modellen gebruikt. Deze staan weergegeven in Figuur 14 en Figuur 15.



Figuur 14. Voorspelling van het drukverschil door de modellen met de gewichtsgemiddelde zeefdiameter bij 15 °C.



Figuur 15. Voorspelling van het drukverschil door de modellen met de gemiddelde bezinkdiameter bij 15 °C.

De voorspelling met de gewichtsgemiddelde zeefdiameter of de gemiddelde bezinkdiameter maakt geen significant verschil. Wanneer de gemiddelde afwijking van de modellen voor het voorspellen van het drukverschil met de verschillende diameters worden vergeleken met elkaar is dit een procentueel klein verschil. Deze gemiddelde afwijkingen staan weergegeven in Tabel 4.

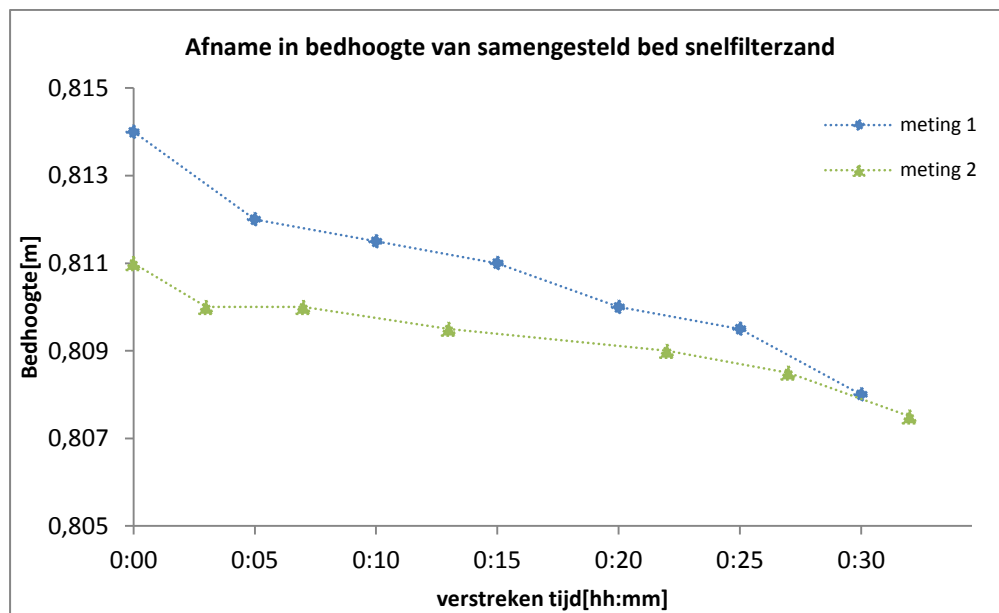
Tabel 4. Gemiddelde afwijking van de modellen tegenover de praktijk over de gehele temperatuurbereik.

	Kozeny	Carman-Kozeny	Ergun	Carman-Kozeny-Burke-Plummer	Darcy
Gewichtsgemiddelde Zeefdiameter.	28%	26%	32%	29%	33%
Brown-Lawler Bezinkdiameter.	31%	29%	37%	33%	33%

Uit de resultaten kan worden geconcludeerd dat het model van Carman-Kozeny het drukverschil met de minste afwijking voorspelt bij lineaire snelheden tussen 0 tot 50 m/uur. Omdat de formule van Darcy onafhankelijk is van de diameter van het filtermateriaal geeft deze dezelfde afwijking. Bij de andere modellen wijkt de gemiddelde bezinkdiameter meer af van de werkelijkheid dan de gewichtsgemiddelde zeefdiameter. Dit kan worden verklaard doordat de bezinkdiameter uit gaat van beweging van een deeltje door een vloeistof. Bij filtratie is dit niet het geval en zal deze diameter hierdoor kunnen afwijken. De afwijking van de modellen zal geen invloed hebben de simulatie van de ETSW. Echter zal dit wel invloed hebben op de voorspelling van de toename in het drukverschil na de ETSW procedure. Hierom is het van belang om vervolgonderzoek naar een modelverbetering voor de voorspelling van het drukverschil tijdens filtratie uit te voeren.

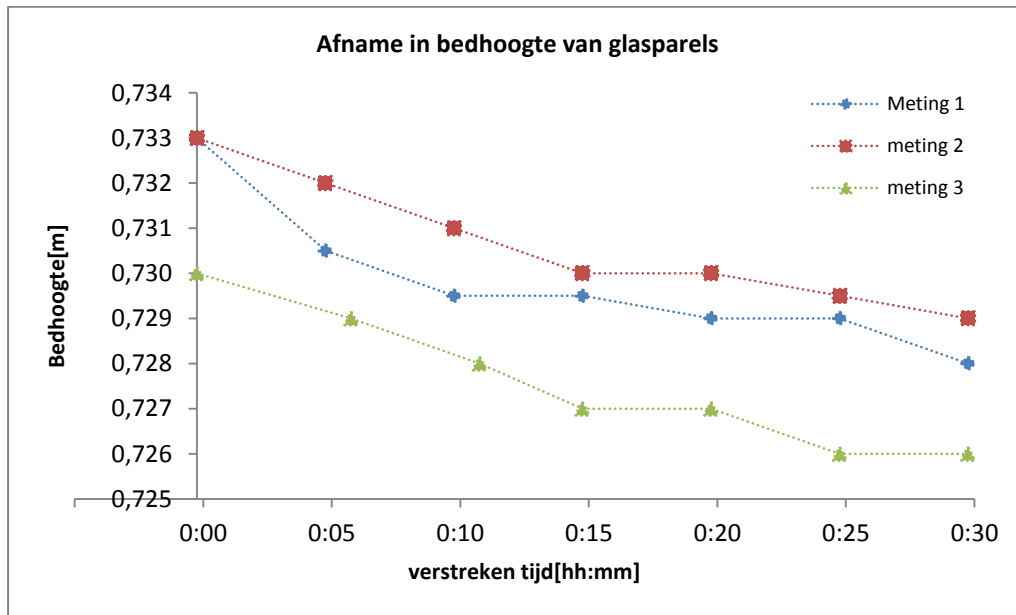
6.3 Simulatie van de ETSW procedure

Voor de simulatie van de ETSW procedure werd een samengesteld snelfilterzandbed gebruikt, bestaande uit een fractie van 0,8 tot 1,25 mm met een gemiddelde diameter van 1,03 mm. Dit filterbed werd vanuit gepakte toestand voor de metingen geïnfundiseerd tot een expansie van 10%. Hierna werd het filterbed met langzaam afnemende snelheid terug gebracht tot een gepakte toestand waarna met een snelheid van circa 5 m/uur het filterbed opwaarts doorstroomd werd. Wanneer deze snelheid was bereikt werd de eerste meting uitgevoerd, waarna gedurende een half uur iedere vijf minuten een meting plaatsvond. Tijdens deze metingen werd een afname van de bedhoogte van het gepakte bed waargenomen. Dit staat weergegeven in Figuur 16.



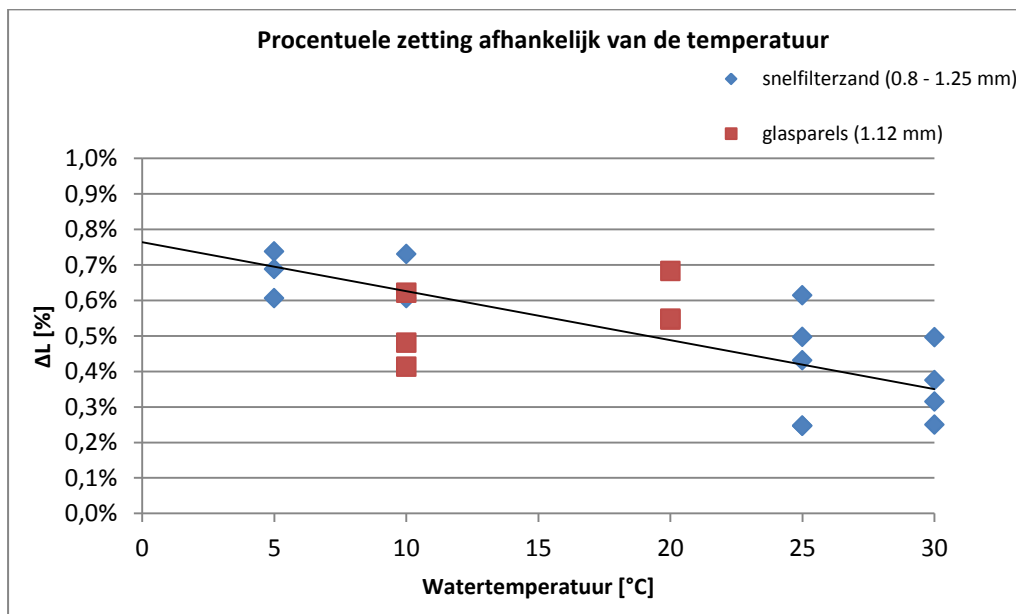
Figuur 16. Afname van de bedhoogte met behulp van de ETSW bij 10 °C (snelfilterzand 0,8 – 1,25 mm). Waarbij de groene en blauwe meetpunten verschillende herhalingen van het experiment zijn.

De simulatie van de ETSW procedure werd bij verschillende temperaturen uitgevoerd om het effect hiervan op de zetting van het bed vast te stellen. Hieruit blijkt zetting bij elke temperatuur plaats te vinden. Om vast te stellen of de ruwheid van de korrels een rol spelen op de zettingsgraad van het gepakte bed is het experiment hierna uitgevoerd met glasparsels met een gemiddelde diameter van 1,12 mm. Deze resultaten staan weergegeven in Figuur 17.



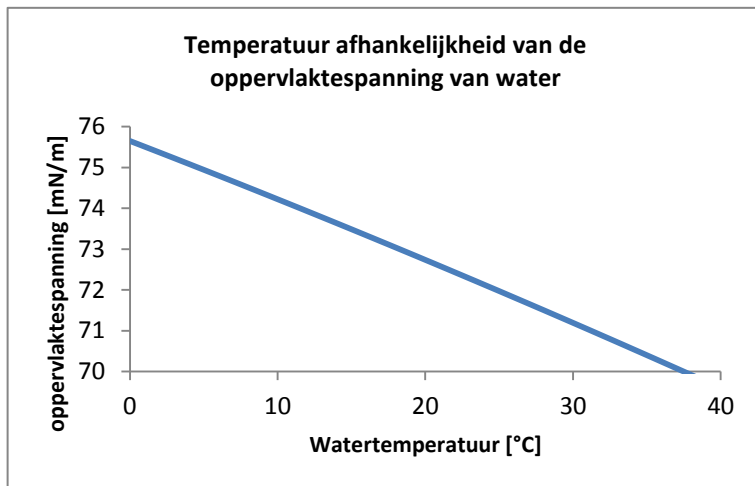
Figuur 17. Afname van de bedhoogte door middel van de ETSW bij 20 °C (glaspereels 1,12 mm)
Waarbij de groene, rode en blauwe meetpunten herhalingen van het experiment zijn.

De afname van de bedhoogte lijkt niet afhankelijk te zijn van de ruwheid van het korrelmateriaal. Het gepakte filterbed met glaspereels vertoont hetzelfde gedrag als het filterbed met samengesteld snelfilterzand. Uit de resultaten bij verschillende temperaturen is een verband zichtbaar tussen de temperatuur en de afname van de bedhoogte. De procentuele zetting van het filterbed, per temperatuur, staat weergegeven in Figuur 18.

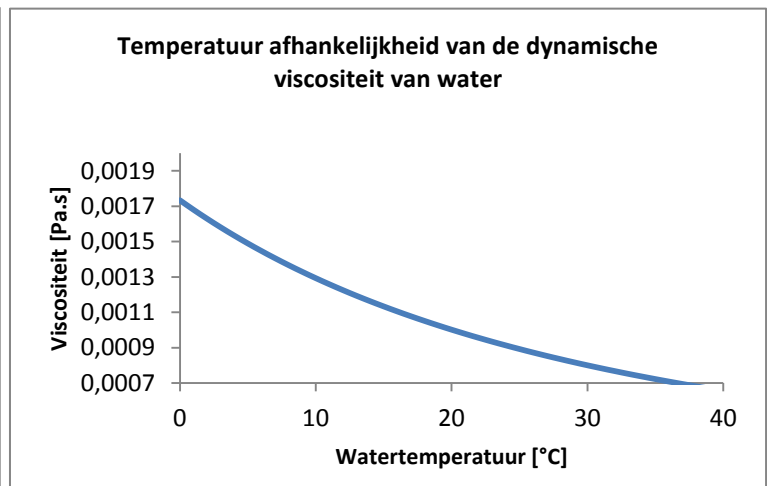


Figuur 18. Effect van de temperatuur op de zetting van het filterbed.

Uit de resultaten blijkt dat de procentuele afname van de bedhoogte afhankelijk is van de temperatuur. Dit is een lineair verband bestaande uit zettingsgraad [%] = $-0,0001 * T[^\circ\text{C}] + 0,0072$. De temperatuurafhankelijkheid van de zetting komt door de verandering in viscositeit en oppervlaktespanning van het water, die als wrijvingskrachten het filterbed beïnvloeden. Zowel de oppervlaktespanning als de viscositeit van het water zijn afhankelijk van de temperatuur. Wanneer de temperatuur toeneemt, zullen de viscositeit en de oppervlaktespanning afnemen zoals weergegeven in Figuur 19 en Figuur 20.



Figuur 19. Temperatuur afhankelijkheid van de oppervlaktespanning van water.



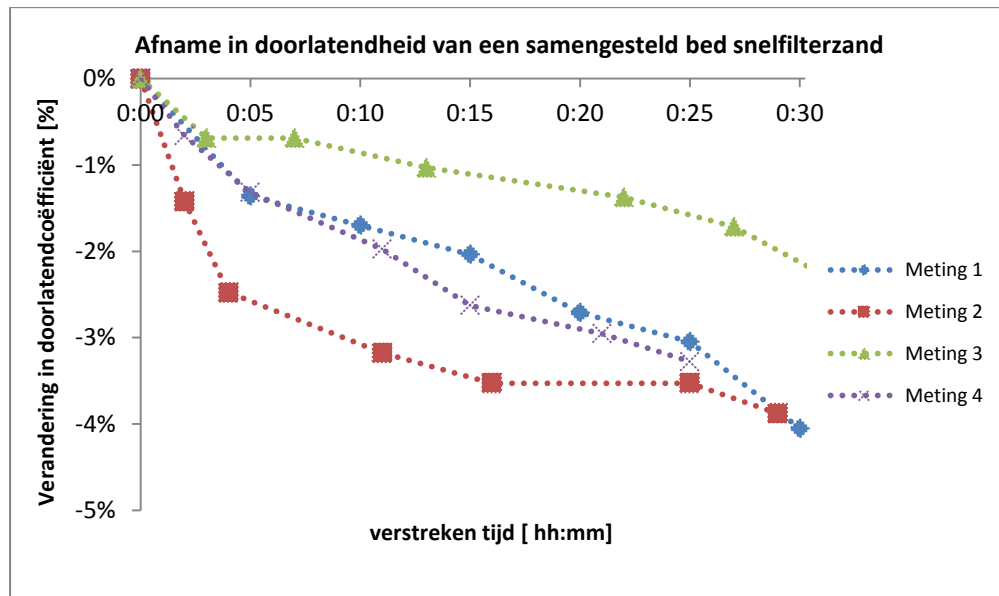
Figuur 20. Temperatuur afhankelijkheid van de viscositeit van water.

Door de afname in oppervlaktespanning en viscositeit door de stijging van de temperatuur zal de wrijving tussen het water en de korrels lager zijn, zoals zichtbaar in Figuur 19 en Figuur 20. Hierdoor zal de aanwezige energie en impulsen om het filterbed te heroriënteren lager zijn. Het verband tussen de watertemperatuur en de procentuele zetting kan statistisch onderbouwd worden met behulp van formule 27 ^[6].

$$\left[\frac{r^2}{(1-r^2)} * (N - 2) \right]^{0.5} = \text{verband wanneer} > 2.13 \quad (27)$$

Waarin de r^2 vastgesteld wordt uit de grafiek en n het aantal meetpunten is. Wanneer deze waardes bekend zijn kunnen deze worden gebruikt in formule 27. Als het berekende getal groter is dan 2,13 kan statistisch worden geconcludeerd dat er een verband is tussen de watertemperatuur en de zettingsgraad van het gepakte filterbed. Met de verkregen meetgegevens wordt het getal 3,93 vastgesteld. Uitgaande van deze waarde kan geconcludeerd worden dat het verband tussen de watertemperatuur en de zettingsgraad aanwezig is. De berekening voor het statistisch verband staat weergegeven in bijlage II.

Vanuit de mate van zetting kan de afname in porositeit bepaald worden. Deze afname kan hierna met behulp van formules 9 en 10 de verandering in doorlatendheid voorspellen. Dit staat weergegeven in



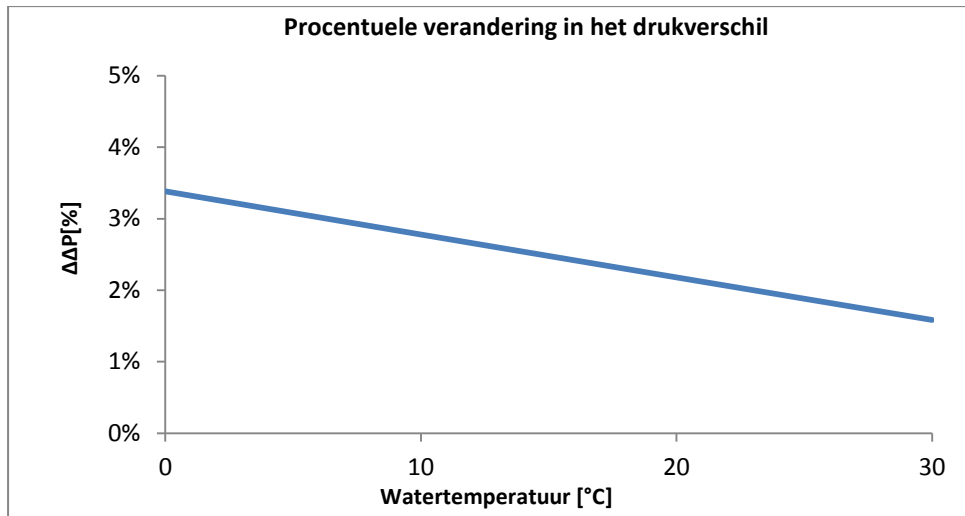
Figuur 21. Afname van doorlatendheid door middel van de ETSW bij 5 °C (snelfilterzand 0,8 -1,25 mm) waarbij de groene, rode, blauwe en paarse meetpunten herhalingen van het experiment zijn.

Op basis van deze resultaten kan geconcludeerd worden dat een gemiddelde zetting van 1% een verlaging van de doorlatendheid van gemiddeld 4% veroorzaakt.

6.3.1 Invloeden van verschillende factoren op de zettingsgraad

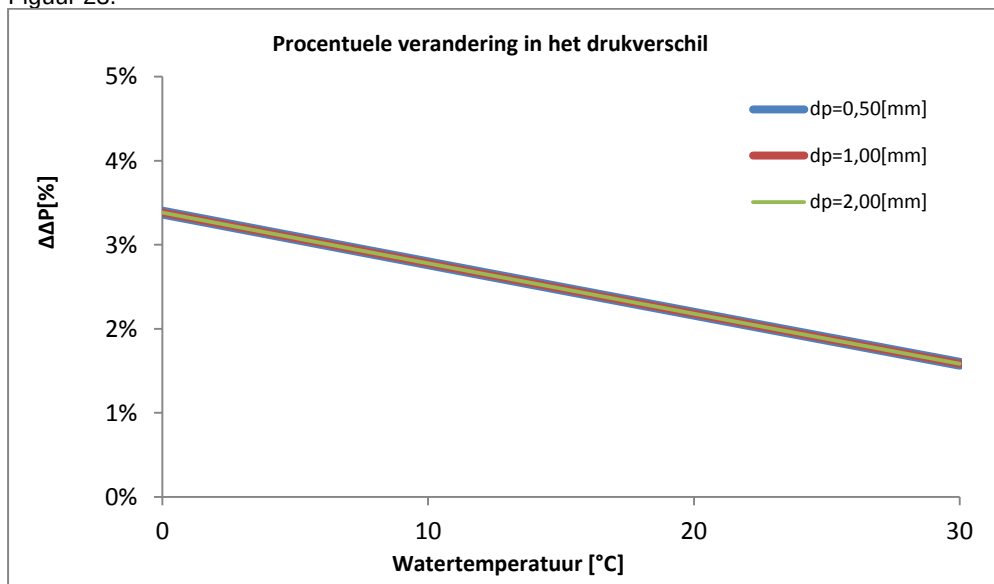
Vanuit de resultaten verkregen met de simulaties van ETSW kan geconcludeerd worden dat de mate van zetting afhankelijk is van de viscositeit en oppervlaktespanning van het spoelwater. Randvoorwaarden aan de zetting van het gepakte filterbed door de ETSW zijn de expansie van het filterbed vóór de ETSW procedure. Deze expansie zorgt voor de vorming van de specifiek grotere kanalen in het filterbed waardoor de zetting kan optreden. Daarnaast moet de lineaire doorstroomsnelheid tijdens de ETSW lager zijn dan de minimale fluïdisatie snelheid maar groter dan 0, oftewel $0 < v_s < v_{MF}$. Wanneer de minimale fluïdisatie snelheid wordt overschreden zal het filterbed gaan expanderen waardoor zetting niet meer plaats kan vinden. Als het gepakte filterbed niet doorstroomd wordt zullen er geen wrijvingskrachten ontstaan en zal het filterbed niet gaan zetten.

Tijdens dit onderzoek is er gebruik gemaakt van twee filterbedden met bijna overeenkomende gemiddelde korreldiameters. Hierdoor kan de afhankelijkheid van de mate van zetting niet gekoppeld worden aan de korreldiameter. Om een uitspraak te doen over de afhankelijkheid van de korreldiameter is met behulp van de formule van Kozeny (Formule 17) een model opgesteld om het drukverschil vóór de ETSW en na de ETSW te voorspellen. Hierbij wordt het verschil in deze drukverschillen procentueel berekend. Het model is eerst gebruikt om de procentuele verandering van de verschildruk door middel van zetting op basis van de watertemperatuur te berekenen. Dit staat weergegeven in Figuur 22.



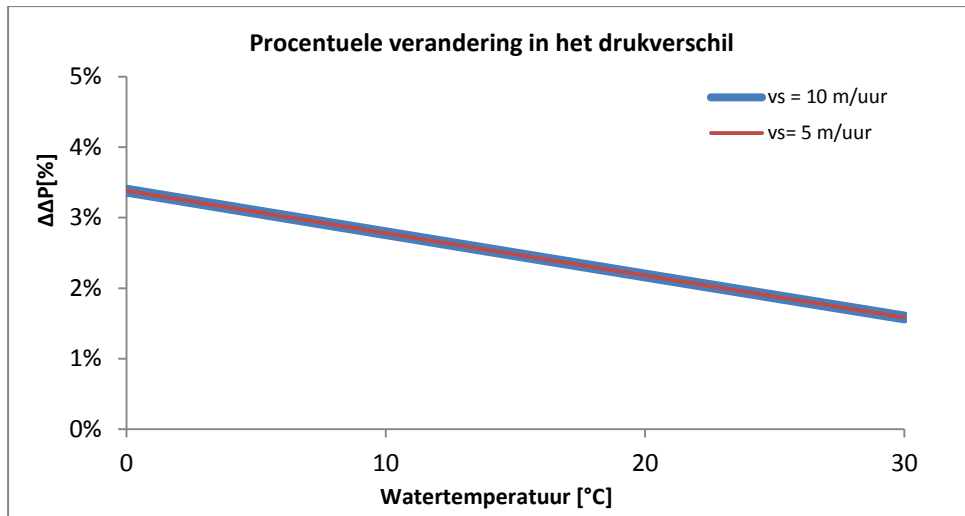
Figuur 22. Procentuele toename van het drukverschil over het gepakte bed door middel van de ETSW.

Het drukverschil over het gepakte filterbed zal bij afname van de bedhoogte toenemen. Doordat bij lagere temperaturen een hogere zettingsgraad wordt bereikt en dus het bed verder zal inzakken, zal bij deze temperaturen een groter verschil in verschildruk ontstaan. Omdat de porositeit niet afhankelijk is van de korreldiameter van een gepakt filterbed, zoals weergegeven in formule 2, kan de invloed van de korreldiameter alleen vastgesteld worden door het verschil in verschildrukken te berekenen. Deze procentuele verandering van het drukverschil, afhankelijk van de watertemperatuur, kan hierna worden voorspeld bij verschillende diameters van het korrelmateriaal. De resultaten hiervan staan weergegeven in Figuur 23.



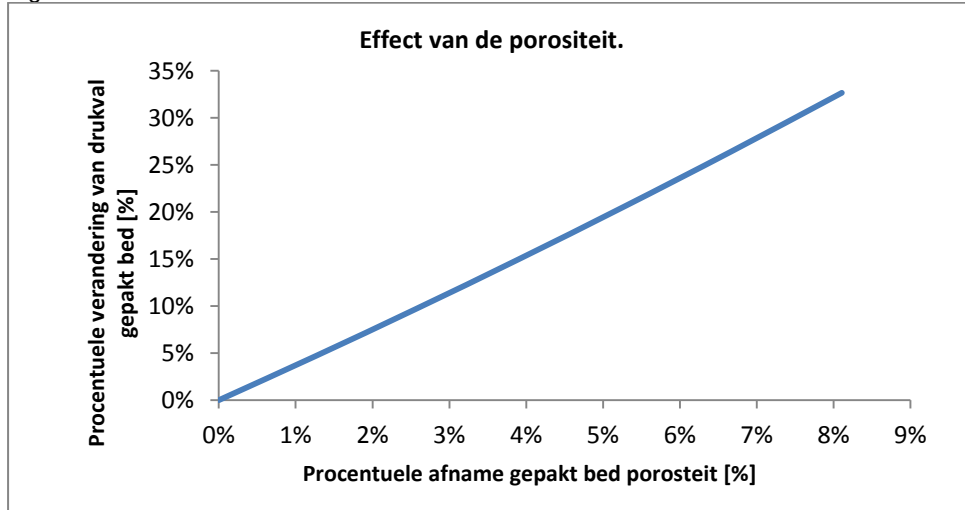
Figuur 23. Procentuele toename van het drukverschil over het gepakte bed door middel van de ETSW afhankelijk van de korreldiameter.

Op basis van het voorspelde verschil in verschildrukken kan gesteld worden dat de korreldiameter geen invloed heeft op het verschil in verschildrukken. Omdat de verschildruk wordt gebruikt om het verschil vóór en na de ETSW te simuleren is deze niet gemodelleerd. Wanneer de lineaire doorstroomsnelheid wordt gevarieerd zal dit, net als de korreldiameter, geen invloed hebben op het verschil in verschildruk, zoals weergegeven in Figuur 24.



Figuur 24. Procentuele toename van het drukverschil over het gepakte bed door middel van de ETSW afhankelijk van de lineair doorstroomde snelheid.

Alleen de wrijvingskrachten, ontstaan door de viscositeit en de oppervlaktespanning van het water, hebben effect op de mate van zetting en het verschil in verschildruk. De zetting van het gepakte filterbed veroorzaakt een afname in de porositeit. Wanneer de theoretische procentuele afname van de porositeit wordt uitgezet tegen het verschil in verschildruk kan de invloed van deze afname op de verschildruk worden gekwantificeerd. Dit is weergegeven in Figuur 25.



Figuur 25. Procentuele toename van het verschil in verschildruk, afhankelijk van de procentuele afname van de porositeit.

Op basis van deze resultaten is het mogelijk een model op te stellen om het effect van de zetting op de filterkwaliteit te voorspellen. Dit model wordt beschreven in hoofdstuk 6.3.2 en verder uitgewerkt in bijlage III. Naast de modellering is een kostenanalyse voor de lozing van het eerste filtraat en een Kosten, Kwaliteit, Kwantiteit, Bedrijfszekerheid, Milieu en Imago-analyse (KKKBMI-analyse) uitgevoerd. Deze analyses staan weergegeven in Bijlage IV en V.

6.3.2 Voorspellend model van de vuillast

Op basis van de resultaten is het mogelijk een model op te stellen om het effect van de zetting op de doorlatendheid op te stellen. Dit model is gebaseerd op de formule van Hagen-Poiseuille, stroming door een capillaire buis, en maakt gebruik van een aantal aannames. In het model wordt het aangenomen dat het bed bestaat uit capillaire buizen waarvan 99% een binnendiameter van 0,1 mm heeft en 1% een binnendiameter van 2 mm. De aanname voor de kleinste diameter is gebaseerd op de bolstapeling van een korrelbed waarin de open ruimte tussen de korrels 1/10 is van de korreldiameter. De diameter van de grote kanalen is een benadering waarin de gevormde vlokken, met een diameter tussen de 1 en 10 mm door het filterbed kunnen passeren. Op basis hiervan is de diameter van deze grotere kanalen geschat op 2 mm. De capillaire buizen van 2 mm zullen al het vuil van de vuillast doorlaten, terwijl de buizen met een binnendiameter van 0,1 mm 10% van de vuillast doorlaten. De doorlaatbaarheid van de kleine kanalen is gebaseerd op gegevens uit de praktijk, waarbij een snel-zandfilter de concentratie vervuiling met een factor 10 verlaagd. De ETSW doet alle capillaire buizen van 2 mm instorten waarna deze ook 0,1 mm worden en hierna de toegestane vervuiling door zullen laten. Op basis van deze aannames kan het model opgesteld worden.

Wanneer dit model wordt toegepast op een gepakt bed met een oppervlakte van 1 m² en een hoogte van 1 m wordt dit op de volgende manier berekend. Uitgaande dat het filterbed in oppervlakte niet kan veranderen heeft de zetting alleen invloed op de bedhoogte. We stellen de porositeit voor de ETSW gelijk aan 0,4, wat een volume van 0,4 m³ open ruimte, of water, oplevert. Uitgaande van een capillaire buis met een binnendiameter van 0,1 mm kan het volume van 1 capillaire buis worden uitgerekend. Deze berekening kan ook worden uitgevoerd voor de capillaire buizen met een diameter van 2 mm. De aantallen buizen van 2 mm en 0,1 mm kunnen worden berekend op basis van de verhouding eerder als aanname genomen. Het verschil in volume van de capillaire buis van 0,1 mm en 2 mm kan worden bepaald. Wanneer dit verschil wordt vermenigvuldigd met het aantal capillaire buizen van 2 mm is de afname in volume door middel van de ETSW bekend. Dit is gelijk aan de afname in porositeit, waaruit de afname in hoogte kan worden berekend met behulp van formule 28.

$$L_{\text{nieuwe hoogte}} = \frac{(1-\varepsilon_{\text{oud}})}{(1-\varepsilon_{\text{nieuw}})} * L_{\text{oud}} \quad (28)$$

De vuillast wordt berekend met behulp van de doorstroom door het filterbed. Wanneer hetzelfde filterbed wordt gebruikt als bij het vorige voorbeeld, zijn de aantal capillaire buizen met een binnendiameter 0,1 en 2 mm bekend. Wanneer het debiet bekend is kan het debiet per capillaire buis worden uitgerekend. Hiermee kan de bijdrage van de doorstroom per soort capillaire buis worden berekend. Als, zoals eerder gesteld, de capillaire buizen met een binnendiameter van 2 mm al de vuillast doorlaten en de capillaire buizen van 0,1 mm 10% van de vuillast, kan de vuillast na de filtratie worden uitgerekend. Hiermee kan de bijdrage van de vervuiling door de grotere capillaire buizen worden bepaald.

Uitgaande van het model, waarin alle capillaire buizen van 2 mm instorten door de wrijvingskrachten opgewekt door de ETSW procedure, zal na de ETSW deze vuillast teruggebracht worden tot 10% van de beginvervuiling. Uitgaande van het model zal een gepakt bed van 1 m³ met een porositeit van 0,4 waarin 1 % van alle kanalen bestaat uit de grote kanalen 85% meer vuil doorlaten dan een gepakt bed na de ETSW. Wanneer de vuillast wordt gesteld op 10 mg/L zal zonder ETSW circa 8,1 mg/L gedurende een half uur doorslaan. Wanneer de ETSW wordt toegepast zal deze doorslag voorkomen worden en de vervuiling aan de start van de filtratie de gewenste 1 mg/L bedragen.

Dit rekenvoorbeeld staat beschreven in bijlage III.

7 Ter discussie stelling van de simulatie

In dit hoofdstuk zal de aanleiding tot de simulatie van de ETSW onderbouwd worden en de toegepaste methode wordt beschreven.

Voorafgaand aan het praktische onderzoek is vastgesteld dat fysieke beïnvloeding van de pakking van het filterbed een positief effect kan hebben op de doorlaatbaarheid van het filter. Dit effect kan opgewekt worden door fysiek energie in het filterbed te stoppen door deze met bijvoorbeeld trillingen in beweging te zetten. Tijdens deze externe impulsen zal het bed inzakken en zal de doorlatendheid afnemen. De hypothese dat grotere kanalen vormen door de expansie van het filterbed en deze met behulp van wrijvingskrachten in zullen storten wordt hiermee onderbouwd. Uitgaande van deze hypothese is het onderzoek gestart waarbij de mate van zetting als belangrijkste parameter is onderzocht.

Tijdens het praktische onderzoek bleek de hoogte waarop het filterbed, na expansie, terugkeerde geen vaste waarde te zijn. De hoogte van het filterbed na de expansie was ook niet beïnvloedbaar met een versnelde of langzame afnemende lineaire snelheid. Dit zorgt ervoor dat het gepakte filterbed na expansie elke keer een andere porositeit bezit. Tijdens dit onderzoek is geen oplossing gevonden om het gepakte filterbed consequent op dezelfde hoogte te laten terugkeren. Het is aanbevolen hier verder onderzoek naar te doen. De bedhoogte na de expansie heeft echter geen invloed op de mate van zetting. Gedurende de experimenten nam de bedhoogte met gemiddeld 1% af. Opvallend is het wanneer externe energie door het stoten tegen de kolom of door trillingen van apparatuur de mate van zetting toenam. Dit is zichtbaar in Figuur 39, waarbij externe trillingen tijdens meting 2, het gepakte bed verder deed inzakken. Ook bleek de zetting plaats te vinden wanneer het filterbed voor enkele uren niet bedreven wordt. Dit is een punt dat zeker verder moet worden onderzocht, maar echter tijdens dit onderzoek niet nader is onderzocht.

Voor de modelopbouw is gekozen voor de formule van Hagen-Poiseuille. Deze keuze is gemaakt omdat de mate van zetting niet afhankelijk is van de korreldiameter. In de formule van Hagen-Poiseuille wordt deze niet als variabele meegenomen. De mate van zetting wordt berekend door de afname in volume door het instorten van de kanalen. De concentratie doorgelaten vuil wordt gebaseerd op de aanname dat 1% van de kanalen een grotere diameter heeft. Wanneer een grotere dataset beschikbaar is zal deze modelbenadering geoptimaliseerd moeten worden.

Tijdens het onderzoek zijn de resultaten uit de praktijk verkregen van de snelfiltratie in Loenderveen buiten beschouwing gehouden. Deze resultaten zijn buiten beschouwing gehouden omdat deze zowel met de hydraulische effecten van de ETSW als met de vuillast van het water te maken hebben. Een bezoek aan de snelfiltratie te Loenderveen heeft wel plaatsgevonden. Foto's van spoelprocedure staan weergegeven in bijlage X. Tijdens de expansie van het filterbed lijken kanalen te vormen in het filterbed. Deze kanalen zijn gefotografeerd en staan weergegeven in Figuur 49 en Figuur 50. Op basis van deze waarneming kan de hypothese van voorkeurstromen en kanalenvorming worden onderbouwd. Door een fout in de automatische sturing is de ETSW procedure tijdens het bezoek aan de snelfiltratie niet uitgevoerd. Het was hierdoor niet mogelijk om de instorting van deze kanalen waar te nemen. Het is daarom aanbevolen op basis van dit rapport vervolgonderzoek uit te voeren naar hydraulische effecten van de ETSW in de praktijksituatie.

8 Conclusies

Op basis van de vergelijking van de modellen met de praktijk kan worden geconcludeerd dat het model van Carman-Kozeny het best voorspellende model is voor het snelfiltratieproces bij snelheden tussen de 0 en 50 m/uur. De afwijking van alle modellen is echter meer dan 20%, waardoor de voorspelling altijd significant van de werkelijkheid zal afwijken. Door deze afwijking van de modellen maakt het gebruik van de gewichtsgemiddelde diameter of Brown-Lawler bezinkdiameter een insignificant verschil. De afwijking van in de voorspelling van het drukverschil door de modellen zal voor de werking van de ETSW geen problemen opleveren. Echter is het niet mogelijk op basis van de modellen het drukverschil tijdens de filtratie te voorspellen.

De ETSW kan hydraulisch worden verklaard met behulp van de hypothese van de instorting van de grote kanalen in het gepakte filterbed. Het ontstaan van kanalen met een specifiek grotere diameter zal de doorlatendheid van het gepakte filterbed doen verlagen. Door de ETSW zal zetting optreden en zullen door wrijvingskrachten deze grotere kanalen instorten. Zetting door middel van de ETSW is niet afhankelijk van de korreldiameter en de vorm van het materiaal. Dit komt doordat de zetting na de expansie van het filterbed een instabiele korrelstapeling oplevert, ongeacht de vorm van de korrels. De wrijvingskrachten worden opgewekt door de viscositeit en de oppervlaktetension van het water. Deze zijn temperatuurafhankelijk waardoor lagere temperatuur een hogere zettingsgraad bereiken.

Met behulp van de resultaten is een model opgesteld waarmee de totale zettingsgraad van het filterbed en de doorlaatbaarheid van de vuillast kan worden voorspeld.

Op basis van de resultaten kan worden geconcludeerd dat hydraulica een significante invloed levert op de werking van de ETSW. Wanneer een gepakt filterbed door middel van de ETSW met 1 % zal zetten zal dit de doorlatendheid met 4 % doen afnemen en de doorslag van de vuillast tijdens de start van de filtratie met 85% verlagen waarmee de eerste filtraatpiek wordt voorkomen.

9 Aanbevelingen

Op basis van de experimenten en de modelbeschrijving worden enkele aanbevelingen voor de proefopstelling en vervolgonderzoek gedaan.

De meetopstelling.

- Het is aanbevolen een extra overstort op de expansie/filtratiekolom te installeren. Doordat de kolom alleen een overstort op 4 meter hoogte heeft is het ingewikkeld een stabiele bovenwaterstand tijdens de filtratie te creëren. Met plaatsing van een extra overstort op een lager niveau zal dit probleem verholpen worden.
- Wanneer metingen bij een lage lineaire snelheid worden uitgevoerd is het aanbevolen de regeling hiervan te vervangen met een gevoeliger regelknop, zoals een membraamafsluiter. Lage snelheden zijn met de aanwezige regelknop moeilijk in te stellen. Als gevolg hiervan zullen deze lage snelheden fluctueren.

Procesoptimalisatie.

- Met de focus op de koolfiltratie, aanwezig op locatie Weesperkarspel, is het aanbevolen 'filter resting' te onderzoeken als onderdeel van de spoelprocedure. Doordat het spoelwater reservoir op locatie Weesperkarspel niet de capaciteit heeft om de ETSW toe te passen op de koolfilters zal hiervoor een andere techniek gebruikt moeten worden. Vanuit de literatuur^[3] blijkt 'filter resting' een veelbelovende techniek waarmee de eerste filtraatpiek voorkomen kan worden. Hierbij wordt na de expansie het filterbed voor enkele uren met rust gelaten, waardoor het de tijd krijgt te zetten. Dit kan een oplossing zijn tegen de eerste filtraatpiek.
- Het is aanbevolen het ontwikkelde model te testen op de resultaten uit de praktijk. Hierbij kan gebruik gemaakt worden van de gegevens gegenereerd bij de snelfiltratie te Loenderveen.

Vervolgonderzoek.

- Omdat de zetting van het gepakte filterbed door wrijvingskrachten wordt opgewekt is het aanbevolen onderzoek te verrichten naar de mogelijkheid lucht als impulsenergie te gebruiken. Door lucht met een lage lineaire snelheid door het filterbed te laten stromen zal dit wrijvingskrachten met zich mee brengen, waardoor zetting kan plaatsvinden. Of het gebruik van lucht een mogelijke vervanging is voor het spoelwater moet echter verder onderzocht worden.
- Het is aanbevolen om het model om de doorlaatbaarheid en de zetting van het filterbed te voorspellen verder uit te werken. Wanneer deze verder wordt onderbouwd en uitgewerkt zal dit model in de toekomst tot een optimalisatie van de ETSW procedure kunnen komen.
- Uit de resultaten, verkregen bij de terminale bezinking, blijkt de bezinkdiameter een afhankelijkheid van de temperatuur te vertonen. Omdat dit tijdens dit onderzoek, in verband met de kaders van het onderzoek, niet verder is onderzocht is het aanbevolen vervolgonderzoek naar de bezinkdiameter uit te voeren.
- Op basis van de waarneming van kanaalvorming tijdens de expansie van het filterbed is het aanbevolen een bezoek aan de snelfiltratie in Loenderveen uit te voeren en het instorten van de kanalen door de ETSW vast te leggen.

10 Symbolenlijst

Symbol	Beschrijving	Eenheid.
C_D	Wrijvingscoëfficiënt	[-]
D_h	Hydraulische diameter van een buis	[m]
d_{bl}	Diameter van deeltje bepaald met Brown-Lawler	[m]
d_k	Diameter van de expansiekolom	[m]
d_p	Diameter van een deeltje	[m]
ε	Porositeit	[m ³ /m ³]
g	Gravitatie constante	[m/s ²]
K	Doorlatendheid	[m/s]
κ	Permeabiliteit	[m ²]
L	Bedhoogte van het filterbed	[m]
L_0	Bedhoogte in gepakte toestand	[m]
L_E	Bedhoogte tijdens spoeling	[m]
m	Massa van de korrels	[kg]
N	Aantal meetpunten	[#]
ρ_l	Soortelijke massa van de vloeistof	[kg/m ³]
ρ_s	Soortelijke massa van de korrel	[kg/m ³]
ρ_w	Soortelijke massa van water	[kg/m ³]
Re	Reynoldsgetal van een buis	[-]
Re_ε	Reynoldsgetal van een deeltje	[-]
Re_t	Terminale bezinking Reynoldsgetal	[-]
η	Viscositeit van de vloeistof	[Pa.s]
r_p	Straal van een deeltje	[m]
r^2	r-kwadraat uit de grafiek	[-]
v_s	Superficiële snelheid	[m/s]
v_i	interstitiële snelheid	[m/s]
v_t	Terminale bezinksnelheid	[m/s]
v_{MF}	Minimale fluïdisatie snelheid	[m/s]
V_T	Volume Totaal	[m ³]
V_P	Volume van de korrels	[m ³]
V_W	Volume van het water	[m ³]

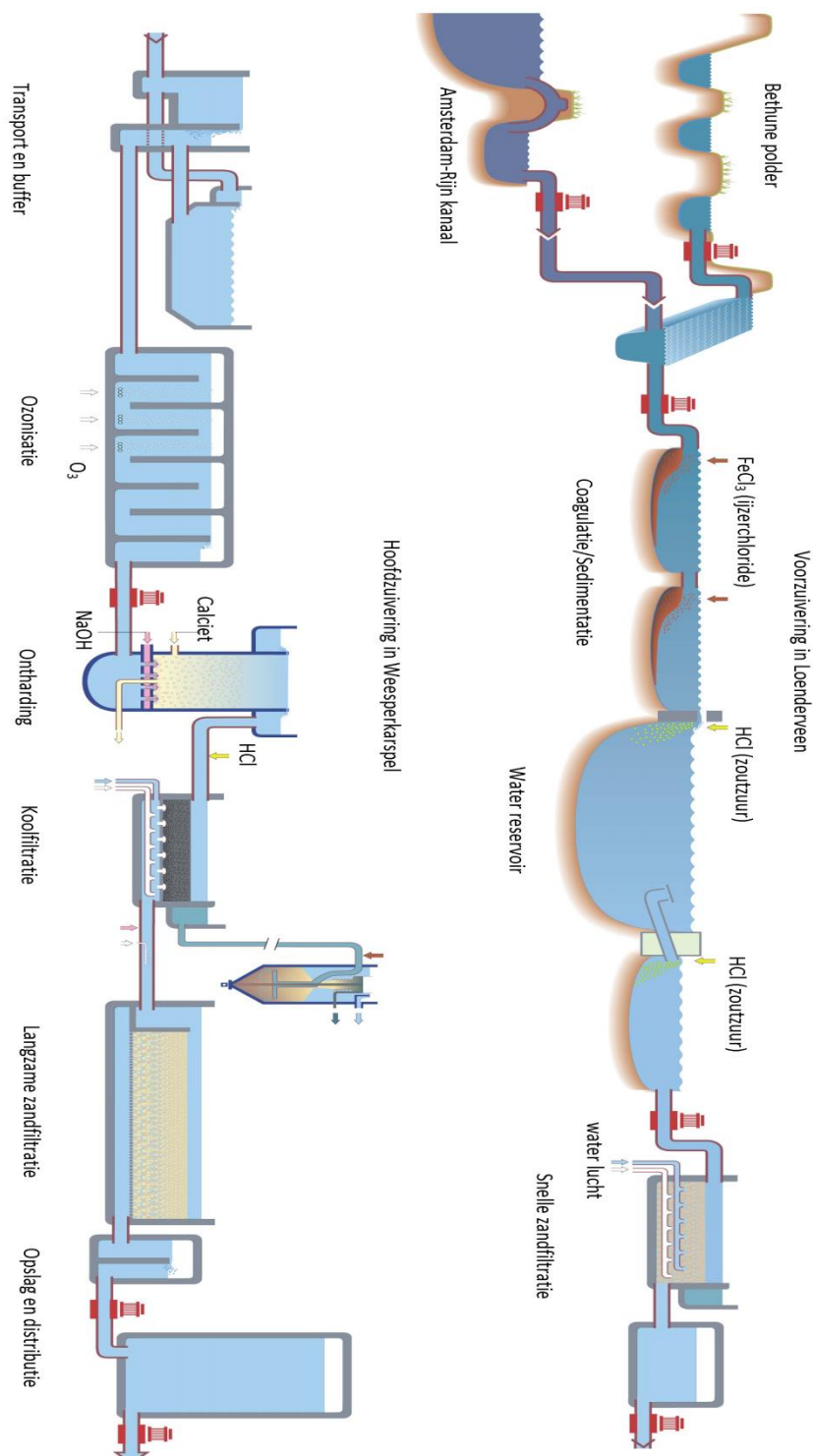
11 Literatuur

- [1] Amburgey, J.E., (2005), Optimization of extended terminal Sub-fluidisation Wash (ETSW) filter backwashing procedure. *Elsevier, Water Research*, no. 39, pp. 314-330.
- [2] Amburgey, J.E., & Amirtharajah, A. (2005), Strategic filter backwashing techniques and resulting particle passage, *Journal of environmental engineering*, pp. 535-547.
- [3] Bonini, D., (2015). Evaluation of techniques to control filter ripening turbidity spikes at south Australian water filtration plants, pp. 1-8.
- [4] Carmen, P., (1937). Fluid flow through granular beds, *Institution of Chemical Engineers*, pp. 32-48.
- [5] Crittenden, J.C., Rhodes Truessell, R., Hand, D.W., Howe, K.J., Tchobanoglous, G., (2012), *Water treatment principles and design*, 3^e ed, NJ, John Wiley & Sons Inc.
- [6] Field, A., (2009), *Discovering statistics using SPSS*. London, SAGE Publication Ltd.
- [7] Gregory, J., (2006), *Particles in Water properties and processes*, FL, CRC Press, Taylor & Francis Group.
- [8] Haas, A.M., (1967), *Snelfiltratie*, Den Haag, Moormans periodieke Pers, Syllabus.
- [9] Hout, L. van den, (2016), *Modellering van de hardheidsreductie*, Hogeschool Utrecht, Institute for Life Science and Chemistry, Afstudeerverslag.
- [10] Huisman, L., (2004), *Rapid filtration*, TU Delft, Syllabus.
- [11] Jobse, M.A., (2013), *Modellering van de fluïdisatie bij korrelreactoren*. Hogeschool Utrecht, Institute for Life Science and Chemistry, Afstudeerverslag.
- [12] Kors, L., Sierkstra, A., van Dam, R., van der Steen, R., (2016), *Snelfilters, eerste filtraatpiek(troebelheid)*, Amsterdam, intern rapport, Waternet.
- [13] Koster, I.W., (2004). *Handboek Zandboek*. Ede: CROW.
- [14] Kramer, O.J.I., (2017), *Hydraulic modelling of liquid-solid fluidisation in drinking water treatment processes*, Ph.D. agreement.
- [15] Kramer, O.J.I., Jobse, M.A., Baars, E.T., Helm, A.W.C., van der, Colin, M.G., Kors, L.J., & Vugt, W.H., van, (2015), *Model-based prediction of fluid bed state in full-scale drinking water pellet softening reactors*, *IWA congress, "New Developments in IT & Water Conference"*, *Conference paper*, pp. 1-26.
- [16] Moel, P.J. de, Verberk, J.Q.J.C., Dijk, J.C. van, (2012), *Drinkwater Principes en praktijk*, 3^e ed, Delft, Water Management Academic Press.
- [17] Radiocic, T.K., Duris, M., Garic-Grulovic, R., Arsenijevic, Z., Grbavcic, Z., (2014), Particle characterization of polydisperse quartz sand, *Elsevier, Powder Technology*, no. 254, pp. 63–71.

- [18] Rietema, K., (1976), Fysische transport- en overdrachts- verschijnselen. Utrecht, Het spectrum.
- [19] Salkar, V., & Tembhurkar, A. (2016). Experimental evaluation of ripening behavior: Down-flow vs Up-flow rapid sand filters. *Journal of Civil Engineering*, pp. 1221-1227.
- [20] Smedt, F. de., (2013), Grondmechanica, Vrije universiteit Brussel, Syllabus.
- [21] Teunissen, K., Abrahamse, A., Leijssen, H., Rietveld, L., Dijk, H, van,. (2008), Removal of both dissolved and particulate iron from groundwater, Delft, Copernicus Publications.
- [22] Wijnstra, G., Latbouwer, A. de, Sollman, M. (1965), Richtlijnen ten dienste van het ontwerpen en de behandeling van snelfilters, Den Haag, Drukkerij trio.
- [23] Yang, W-C., (2003) Handbook of fluidization and fluid-particle systems. NY: Marcel Dekker, Inc.

12 Bijlagen

I. Schematische weergave van de drinkwaterproductie Loenderveen/Weesperkarspel



Figuur 26. Grafisch schematische weergave van de drinkwaterproductie op locaties Loenderveen en Weesperkarspel.

II. Statistische verklaring voor het verband tussen de watertemperatuur en de zetting

Tabel 5. Procentuele zettingsgraden van snelfilterzand en glaspereels.

T [°C]	ΔL [%]
5	0,74%
5	0,69%
5	0,61%
10	0,73%
10	0,61%
25	0,50%
25	0,61%
25	0,25%
25	0,25%
25	0,43%
30	0,50%
30	0,37%
30	0,31%
30	0,25%
10	0,48%
10	0,62%
10	0,41%
20	0,68%
20	0,55%
20	0,55%

Tabel 6. Aantal meetpunten en de r^2 van alle metingen.

Aantal meetpunten (N)	r^2
20	0,4615

$$\left[\frac{0.4615}{(1 - 0.4615)} * (20 - 2) \right]^{0.5} = 3.928$$

3,93 > 2,13 dus er is een verband tussen de watertemperatuur en de zettingsgraad.

III. Voorbeeldberekening ontwikkeld model

Voorbeeldberekening zettingsgraad.

Wanneer er wordt gesteld dat een filterbed bestaat uit een oppervlakte van 1 m^2 met een hoogte van 1 meter met een porositeit van 0.4, bestaat dit filterbed voor 0.4 m^3 uit open ruimte, of te wel water. Gesteld is dat de diameter van de gewilde kanalen $1/10$ is van de diameter van de korrels, en de korrels gemiddeld 1 mm zijn, is dit kanaal 0.1 mm. Aangenomen is dat de kanalen met de grotere diameter 20 keer zo groot zijn. Dit leidt er toe dat deze kanalen 2 mm in diameter zijn. Het volume van beide soorten kanalen kan uitgerekend worden met behulp van formule

$$V_{\text{kanaal}} = \frac{\pi}{4} * d_{\text{kanaal}}^2 * L \quad (29)$$

Dit levert voor de kanalen de volgende volumes:

- 0,1 mm $7,85 \cdot 10^{-9} \text{ m}^3$
- 2 mm $3,14 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3$

Uitgaande van de verhouding grote kanalen tegenover kleine kanalen 1:99 kan het aantal kanalen berekend worden.

$$\frac{V_{\text{open ruimte}}}{\text{fractie kanalen}} / V_{\text{kanaal}} = N_{\text{kanalen}} \quad (30)$$

Dit levert het aantal kanalen:

- 0,1 mm 50.420.286
- 2 mm 1.273

Het verschil in volume van de tuinslangen kan berekend worden door de kleine tuinslang van de grote tuinslang af te trekken. Dit levert het verschil van $3,13 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3$. Na de ETSW zullen alle grote kanalen van 2 mm ingestort zijn en zal een nieuw open volume aanwezig zijn. De afname in volume wordt berekend door het aantal grote kanalen te vermenigvuldigen met het verschil in volume.

$$\Delta V = N_{\text{kanalen}} * V_{\text{verschil}} = 1.273 * 3,13 * 10^{-6} = 0,00399 \text{ m}^3$$

Door deze afname in open volume van de beginsituatie af te trekken wordt het nieuwe volume bereikt. Dit volume is $0,3957 \text{ m}^3$. We gaan er van uit dat het oppervlakte van de filter niet veranderbaar is. Hiermee kan de zetting gelijk worden gesteld aan de afname in open ruimte. Dit levert een zettingsgraad van 1 %.

Voorbeeld vuil doorlatendheid.

Wanneer het drukverschil over het bed, de bedhoogte van het filterbed en viscositeit van het water bekend zijn kan de lineaire snelheid per groot en klein kanaal berekend worden.

Al het aantal kanalen berekend met formule 30 wordt uitgerekend kan de lineaire snelheid per soort kanaal uitgerekend worden. Wanneer er wordt gesteld dat de kleine kanalen $1/10$ van het vuil doorlaten, terwijl de grote kanalen al het vuil doorlaten en de vuillast op 10 mg/L wordt gesteld, kan de bijdrage aan vuillast worden berekend.

$$\frac{\text{lineaire snelheid per soort kanaal}}{\text{totale lineaire snelheid}} * \text{vuillast doorgelaten} = \text{doorgelaten vervuiling [mg]} \quad (31)$$

Wanneer dit wordt berekend, uitgaande van de verhouding 0,1 mm tegenover 2 mm, zullen de grote kanalen 98% van de overgebleven vuillast doorlaten en een concentratie van 8,2 mg/L als eerste filtraatpiek veroorzaken. Na de instorting van deze kanalen zal de vuillast na de filtratie 1 mg/L bedragen.

[illegible]

IV. Rudimentaire kostenanalyse van het lozen van het 1^e filtraat

De invoering van de ETSW maakt het mogelijk de 1^e filtraatpiek te voorkomen, waardoor de lozing van het eerste filtraat gedurende een half uur voorkomen kan worden. Het extra water verbruikt bij de ETSW wordt teruggeleid naar de waterleidingplas, waarna dit het filtratieproces weer doorloopt. Op basis hiervan kan een kostenanalyse opgesteld worden voor wanneer het 1^e filtraat wel geloosd wordt. Locatie Loenderveen vormt het uitgangspunt van deze analyse. Omdat het water verbruikt tijdens de ETSW wordt teruggeleid naar de waterleidingplas brengt dit geen extra kosten met zich mee. Energieverbruik van de pompen gebruikt voor de ETSW en de filtratie worden niet in de kosten analyse meegenomen, omdat deze een gelijk verbruik zullen hebben.

Locatie Loenderveen beschikt over 24 filters met een effectief oppervlakte van 48 m². Deze worden bedreven met een snelheid van maximaal 5 m/uur gedurende de filtratie. Alle filters worden in periodes van 14 dagen gespoeld, waarna de 1^e filtraatpiek optreedt. Wanneer deze 1^e filtraatpiek optreedt, zal gedurende een half uur het gefiltreerde water geloosd moeten worden. Dit wordt gezien als verlies aan water. Per spoeling van één filter zal ongeveer 120 m³ geloosd worden in verband met de 1^e filtraatpiek. Uitgaande van een spoeling iedere 14 dagen wordt circa 3.100 m³ op jaarbasis water per filter geloosd. Wanneer dit voor alle filters wordt uitgerekend wordt op jaarbasis circa 75.000 m³ water geloosd. Uitgaande van een kostprijs van € 0,20 per m³ water afkomstig uit Loenderveen zal dit € 15.000 verlies op jaarbasis veroorzaken. Ook hoeven er geen aanpassingen gemaakt te worden aan het proces wanneer de ETSW wordt geïntroduceerd, omdat dit alleen een verlenging is van de spoelprocedure. Wanneer Waternet de 1^e filtraatpiek op locatie Loenderveen wil lozen zal hiervoor een omleiding van de snelfilters gebouwd moeten worden. Dit zal minimaal € 50.000 eenmalige uitgave met zich meebrengen.

Uitgaande van deze berekening zal op jaarbasis de ETSW ongeveer € 15.000 besparen en de eenmalige uitgave voor een lozingsnetwerk, van minimaal € 50.000, voorkomen.

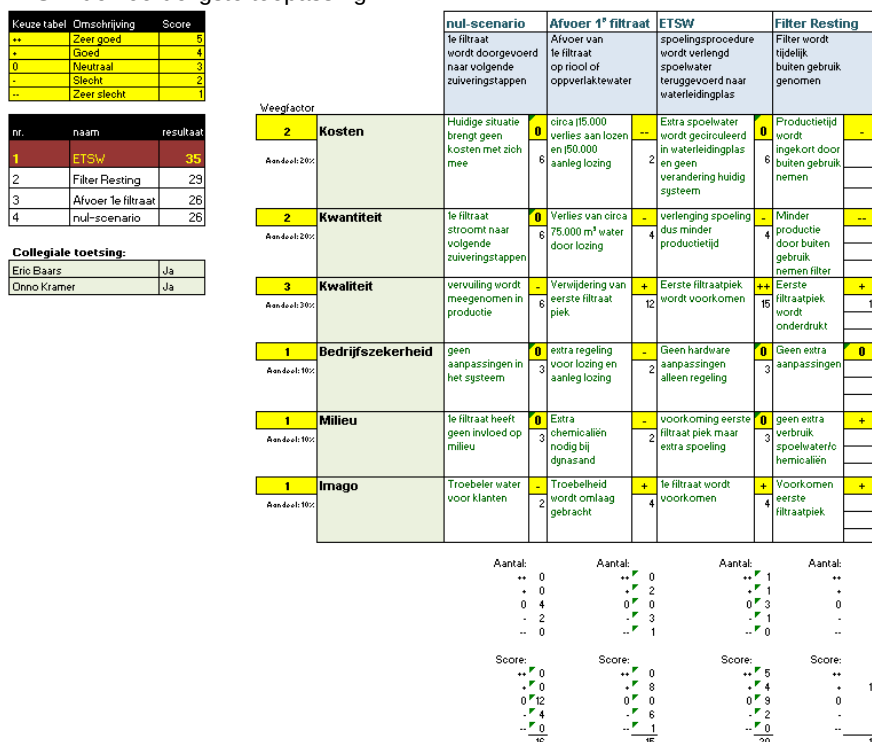
waterverlies lozing eerste filtraat kostenberekening					
Filteroppervlakte	48	[m ²]			
Aantal filters	24	[#]			
filtratiesnelheid	5	[m/h]			
spoeling per keer	14	[dagen]			
Tijd lozing 1 ^e filtraat	0,5	[uur]			
Dagen per jaar	365	[-]			
lozing kosten per m ³	0,2	€			
Debiet Qw [m ³ /h]	Volume 1 ^e filtraat [m ³]	Aantal totaal spoeling per jaar	Volume 1 ^e filtraat [m ³ /jaar]	Volume 1 ^e filtraat n=24 [m ³ /jaar]	kosten per jaar [€]
240	120	26	3129	7,5E+04	15017

Figuur 28. Kostenanalyse lozen van eerste filtraat.

V. KKKBMI-Analyse van de spoelprocedures

Op basis van de resultaten gevonden in de praktijk en de theorie is een kosten, kwantiteit, kwaliteit, bedrijfszekerheid, milieu en imago analyse opgesteld van de mogelijke opties om de spoelprocedure te optimaliseren. Bij deze analyse zijn de nul-situatie, de afvoer van het 1^e filtraat, de ETSW en filter resting als scenario's meegenomen. Kwaliteit wordt gezien als belangrijkste parameter voor deze analyse. Kosten en Kwantiteit zijn hierna de belangrijkste parameters. Bedrijfszekerheid, Milieu en Imago worden als minst belangrijke parameters gezien.

Voor de ETSW procedure hoeven de filters niet omgebouwd te worden. Dit leidt er toe dat de kosten neutraal zullen zijn. De kwantiteit zal afnemen doordat de spoelprocedure verlengd wordt. Vergeleken de afvoer van het 1^e filtraat, waarbij op jaarbasis circa 75.000 m³ water wordt geloosd en filter resting waar de filters gedurende enkele uren buiten gebruik worden genomen zal dit een geringe afname in productie zijn. De kwaliteit van het eerste filtraat zal toenemen door de volledige verwijdering van de 1^e filtraatpiek. Deze zal bij de afvoer van het 1^e filtraat gedurende een half uur ook verwijderd worden, echter zal deze doorslag langer dan een uur kunnen optreden waardoor het effect in mindere mate zal optreden. Filter resting onderdrukt de 1^e filtraatpiek, maar verwijdert deze niet volledig. Hierdoor zal de kwaliteit toenemen maar niet in de mate met het gebruik van de ETSW. Voor de bedrijfszekerheid en het milieu zal de ETSW neutraal zijn. Omdat de ETSW een verlenging is op de spoelprocedure zal dit alleen aanpassingen in de regeling met zich meebrengen. Wanneer de afvoer van het 1^e filtraat wordt geïnstalleerd zal hiervoor een nieuw leidingsysteem op het systeemmoeten worden aangesloten en de regeling moet in grote mate worden aangepast. Filter resting zal ten goede zijn voor het milieu, doordat deze geen gebruik maakt van extra spoelwater of chemicaliën, echter wordt dit niet meegenomen als belangrijkste parameter. Voor het imago zullen alle aanpassingen een positief effect hebben. Door de verwijdering of onderdrukking van de 1^e filtraatpiek zal de troebelheid van het water afnemen. Dit zal een positief effect hebben voor de klantgerichtheid van Waternet. Uitgaande van deze analyse waarbij de weegfactoren van de parameters meegenomen wordt is de invoering van de ETSW de voordeligste toepassing.



Figuur 29. KKKBMI-analyse aanpassingen van de spoelprocedure.

VI. Afleiding voor het bereken van de porositeit

De porositeit is de verhouding lege ruimte in een poreus bed. Deze wordt bepaald met de volgende formule.

$$\varepsilon = \frac{V_w}{V_T} \quad (32)$$

Waarin V_w het volume van de lege ruimte is. En V_T het totaal volume. Het volume lege ruimte is gelijk aan de totale ruimte min het volume vaste stof (V_p).

$$V_w = V_T - V_p \quad (33)$$

Doordat de porositeit een fractie betreft kan de verhouding vaste stof in het totaal volume van 1 afgetrokken worden om de porositeit te bepalen. Dit levert:

$$\varepsilon = 1 - \frac{V_p}{V_T} \quad (34)$$

Het totaal volume van een poreus bed kan berekend worden door de oppervlakte te vermenigvuldigen met de lengte/hoogte van het bed. Dit wordt berekend op de volgende manier

$$V_T = \frac{\pi}{4} * d^2 * L \quad (35)$$

Het volume vaste stof kan worden bepaald uit de massa en de dichtheid. Dit gaat als volgt.

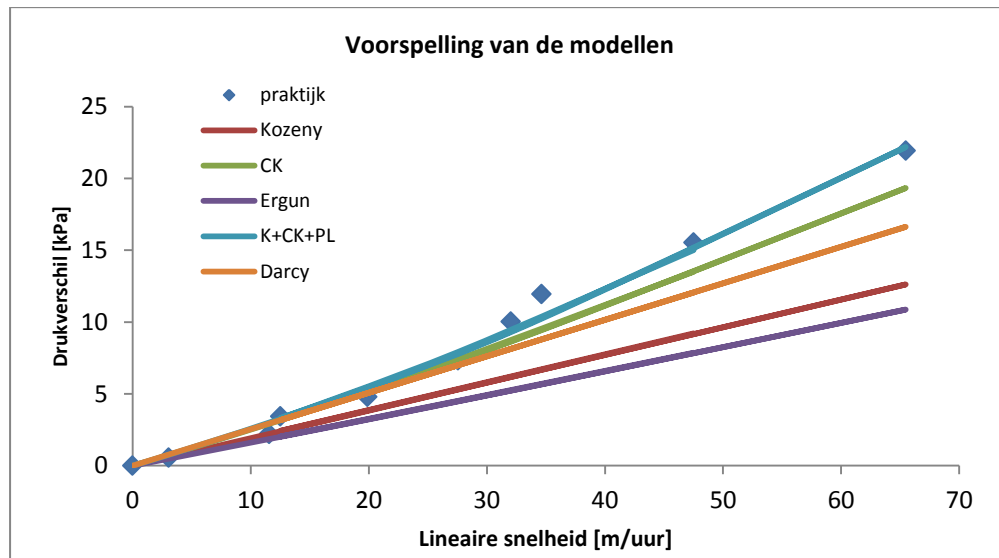
$$V_p = \frac{m}{\rho_s} \quad (36)$$

Wanneer formules 35 en 36 in formule 34 worden geïmplementeerd ontstaat de volgende formule.

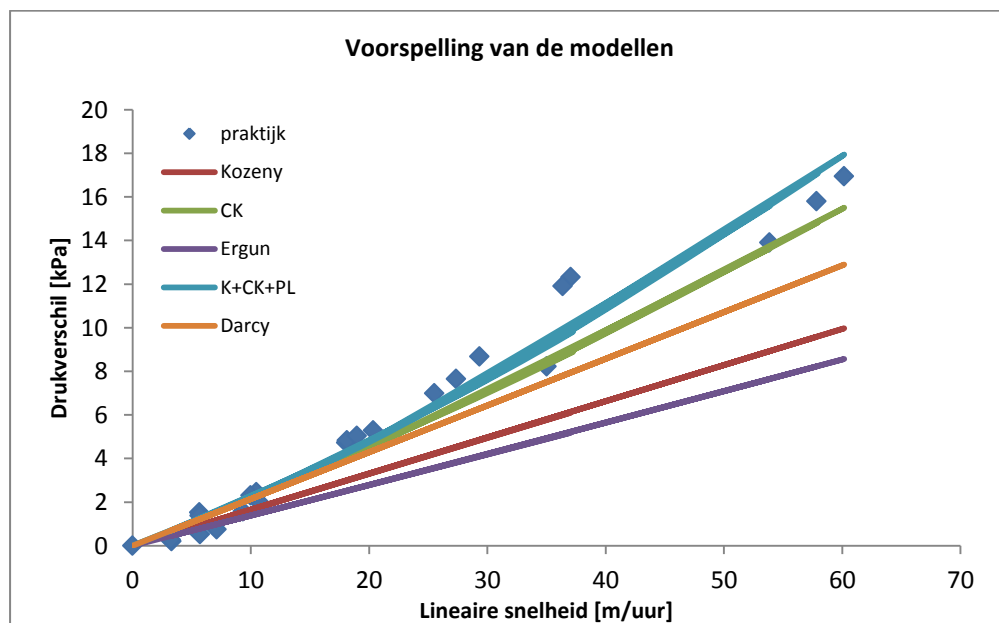
$$\varepsilon = 1 - \frac{4 * m}{\rho_s * \pi * d_k^2 * L} \quad (37)$$

VII. Filtratieresultaten

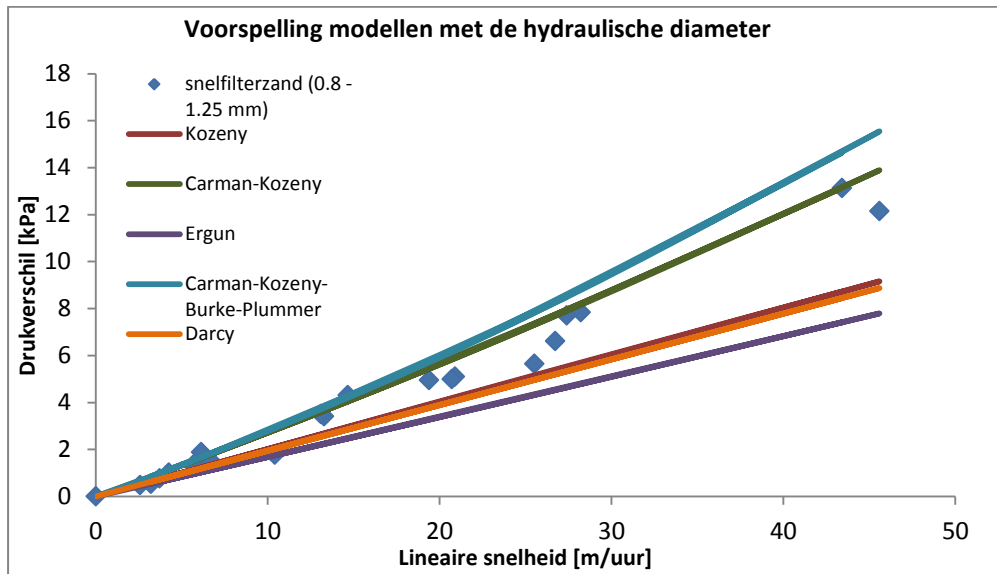
Gewichtsgemiddelde diameter.



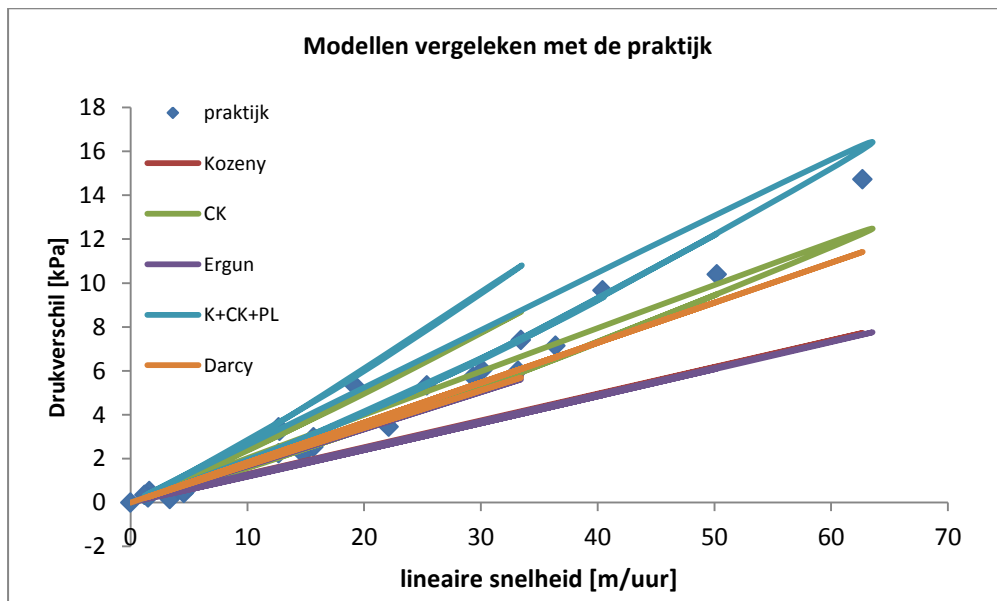
Figuur 30. Modelvergelijking filtratieproeven snelfilterzand 0,8-1,25 mm 5°C met gewichtsgemiddelde diameter.



Figuur 31. Modelvergelijking filtratieproeven snelfilterzand 0,8-1,25 mm 10°C met gewichtsgemiddelde diameter.

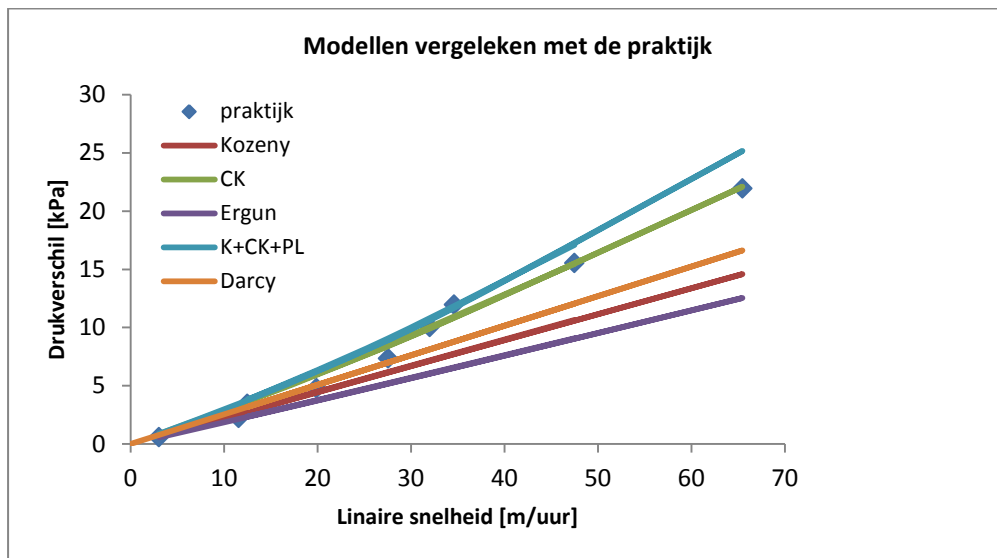


Figuur 32. Modelvergelijking filtratieproeven snelfilterzand 0,8-1,25 mm 15°C met gewichtsgemiddelde diameter.

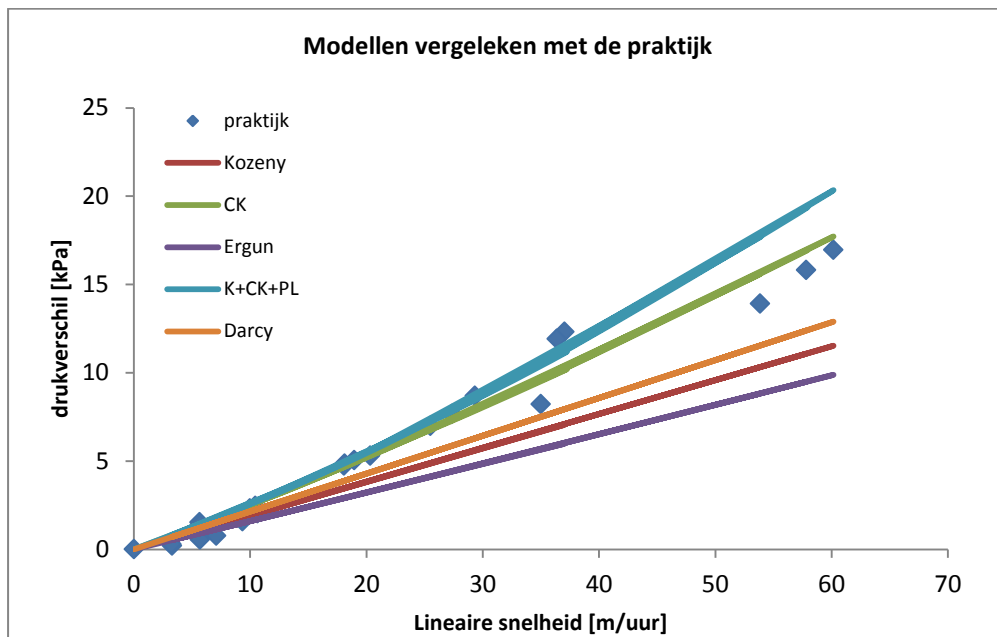


Figuur 33. Modelvergelijking filtratieproeven snelfilterzand 0,8-1,25 mm 20°C met gewichtsgemiddelde diameter.

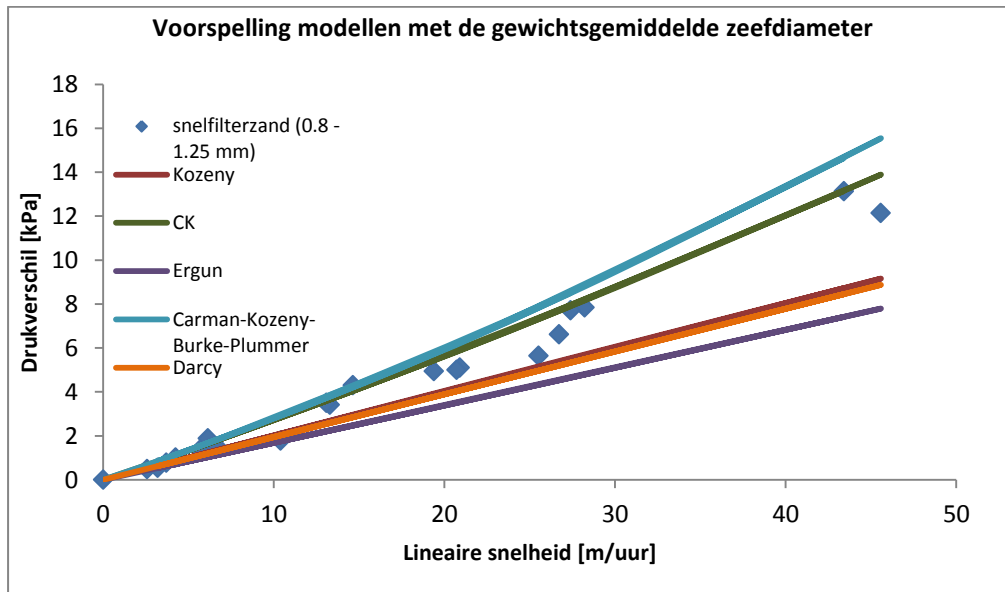
Brown-Lawler bezinkdiameter.



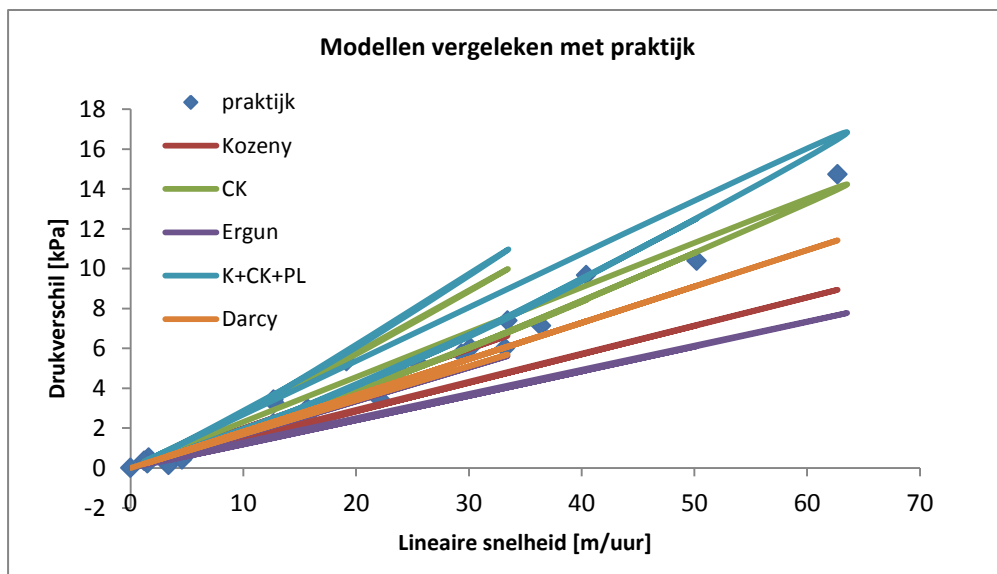
Figuur 34. Modelvergelijking filtratieproeven snelfilterzand 0,8-1,25 mm 5°C met bezinkdiameter.



Figuur 35. Modelvergelijking filtratieproeven snelfilterzand 0,8-1,25 mm 10°C met bezinkdiameter.



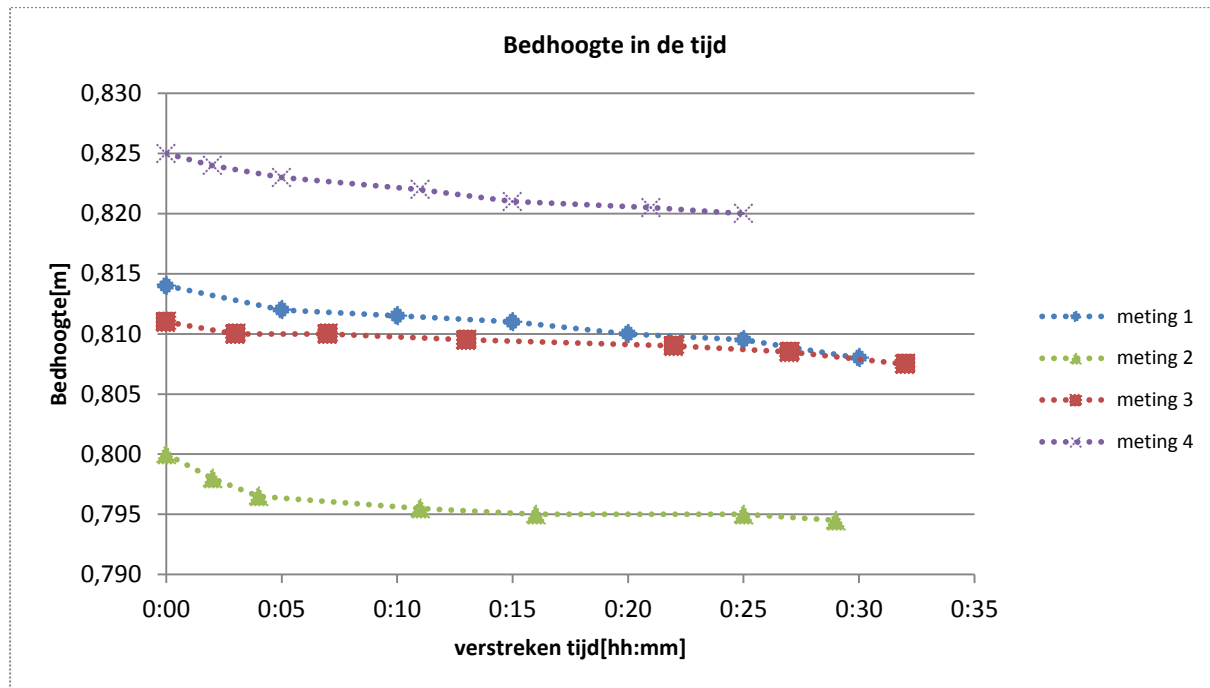
Figuur 36. Modelvergelijking filtratieproeven snelfilterzand 0,8-1,25 mm 15°C met bezinkdiameter.



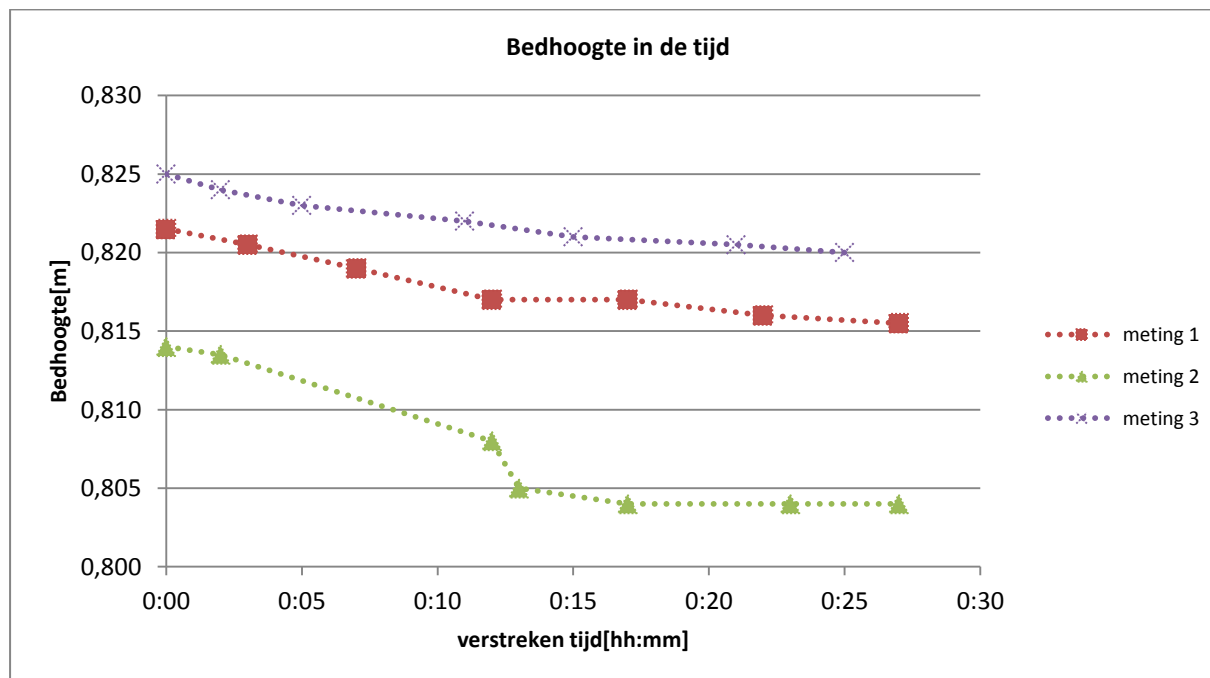
Figuur 37. Modelvergelijking filtratieproeven snelfilterzand 0,8-1,25 mm 20°C met bezinkdiameter.

VIII. Resultaten simulatie ETSW

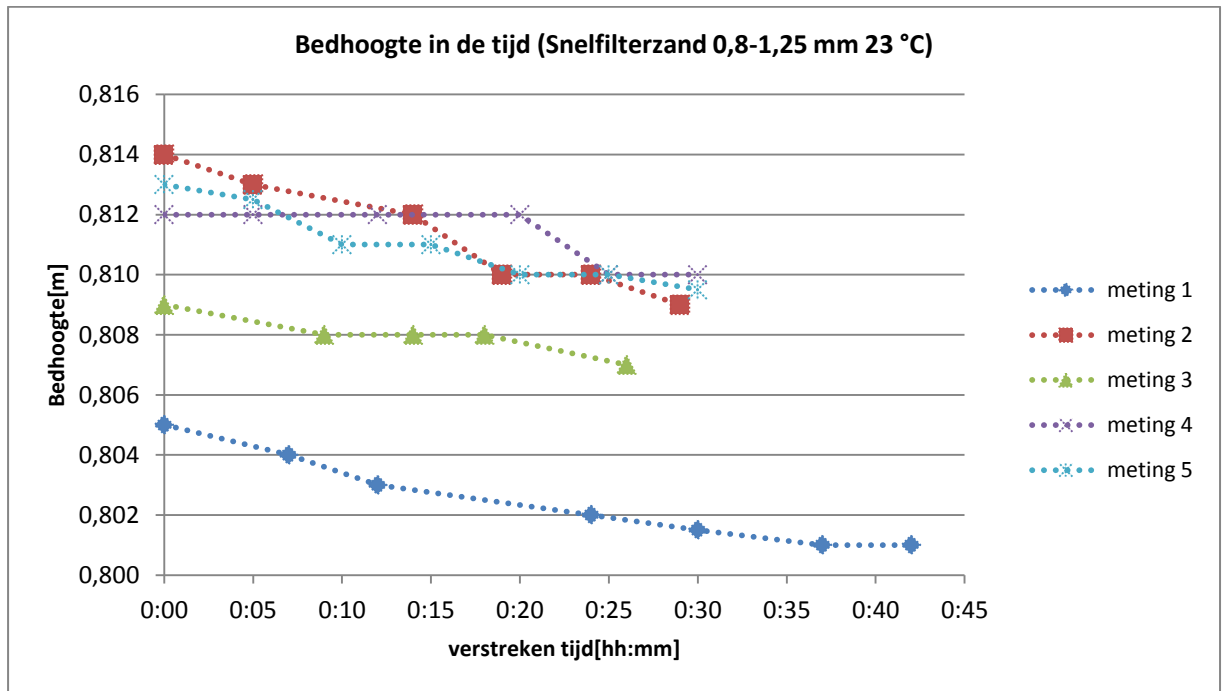
Snelfilterzand



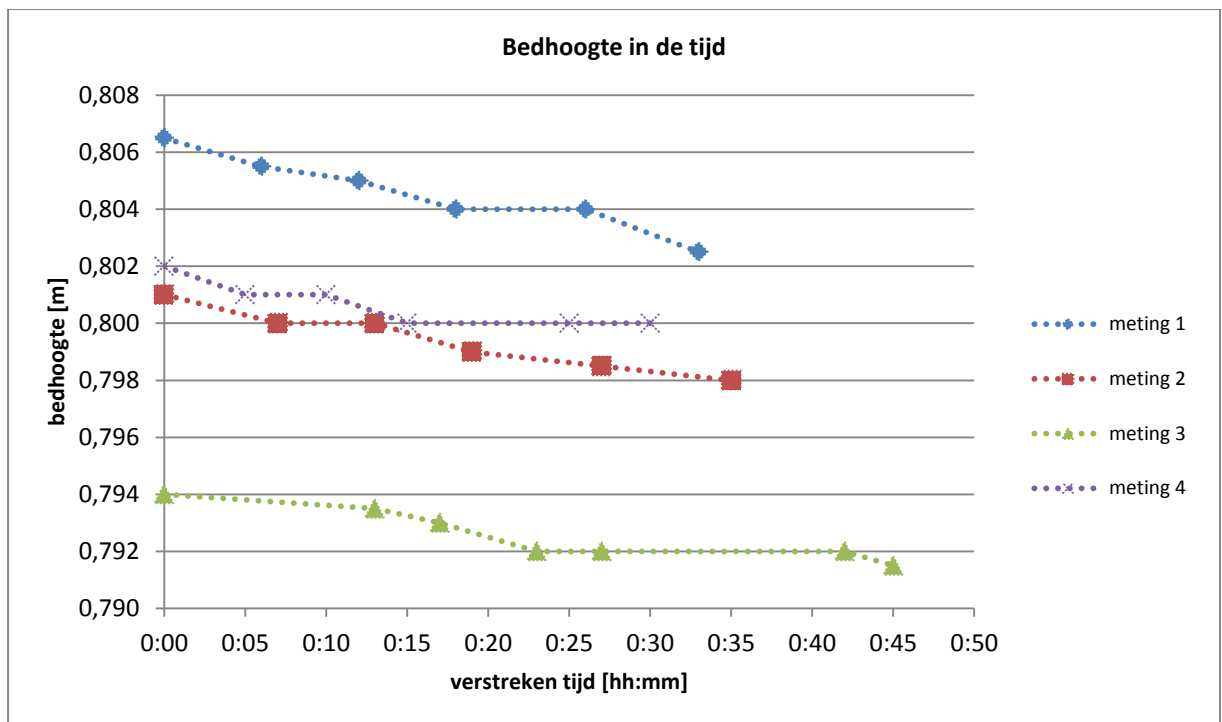
Figuur 38. De mate van zetting van snelfilterzand 0,8-1,25 mm bij 5 °C.



Figuur 39. De mate van zetting van snelfilterzand 0,8-1,25 mm bij 10 °C.

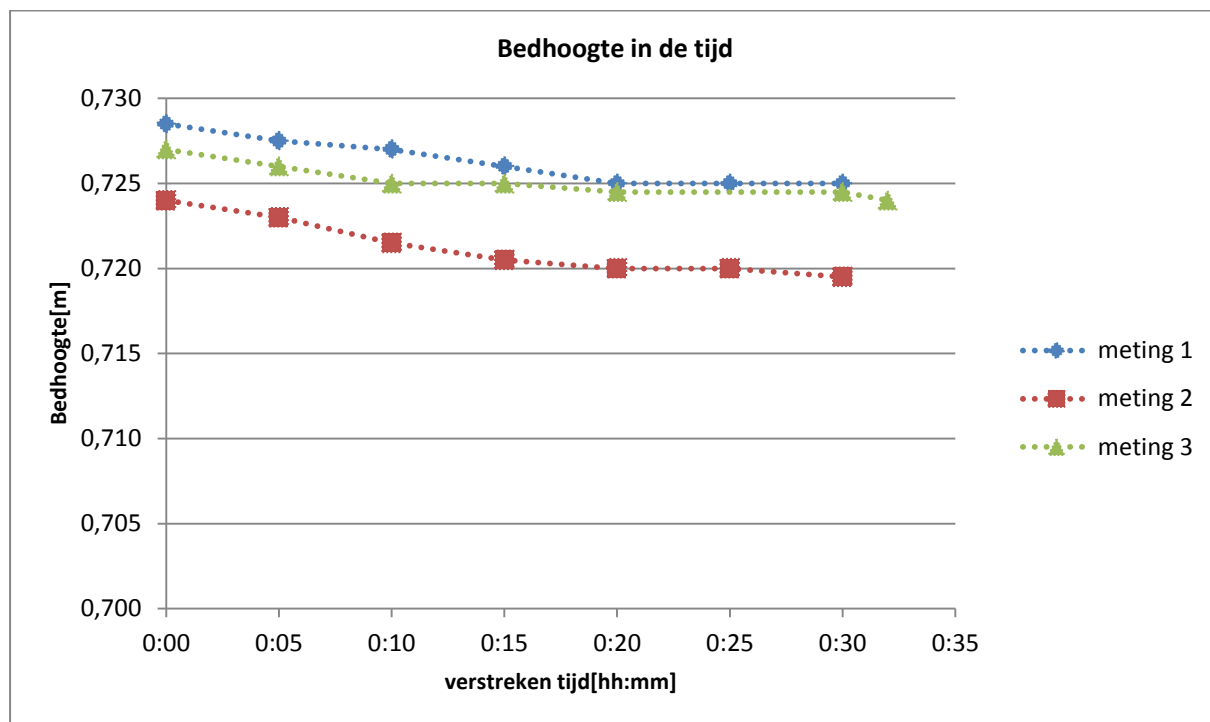


Figuur 40. De mate van zetting van snelfilterzand 0,8-1,25 mm bij 25 °C.

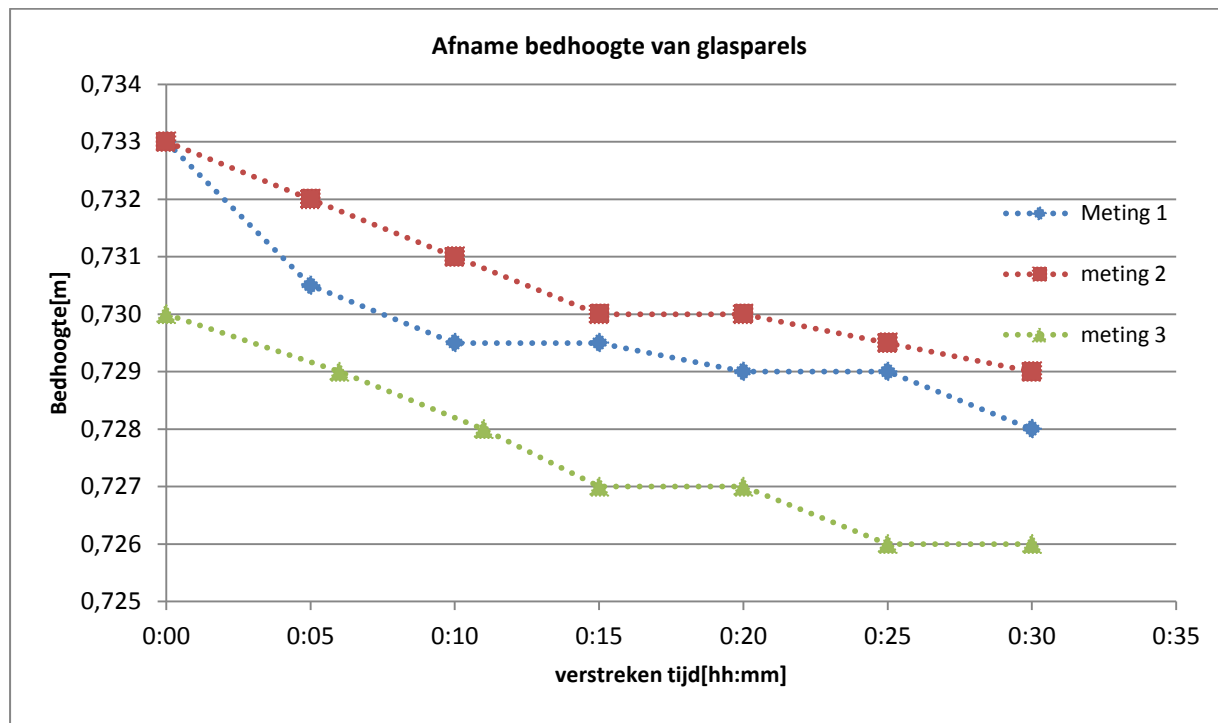


Figuur 41. De mate van zetting van snelfilterzand 0,8-1,25 mm bij 30 °C.

Glasparels

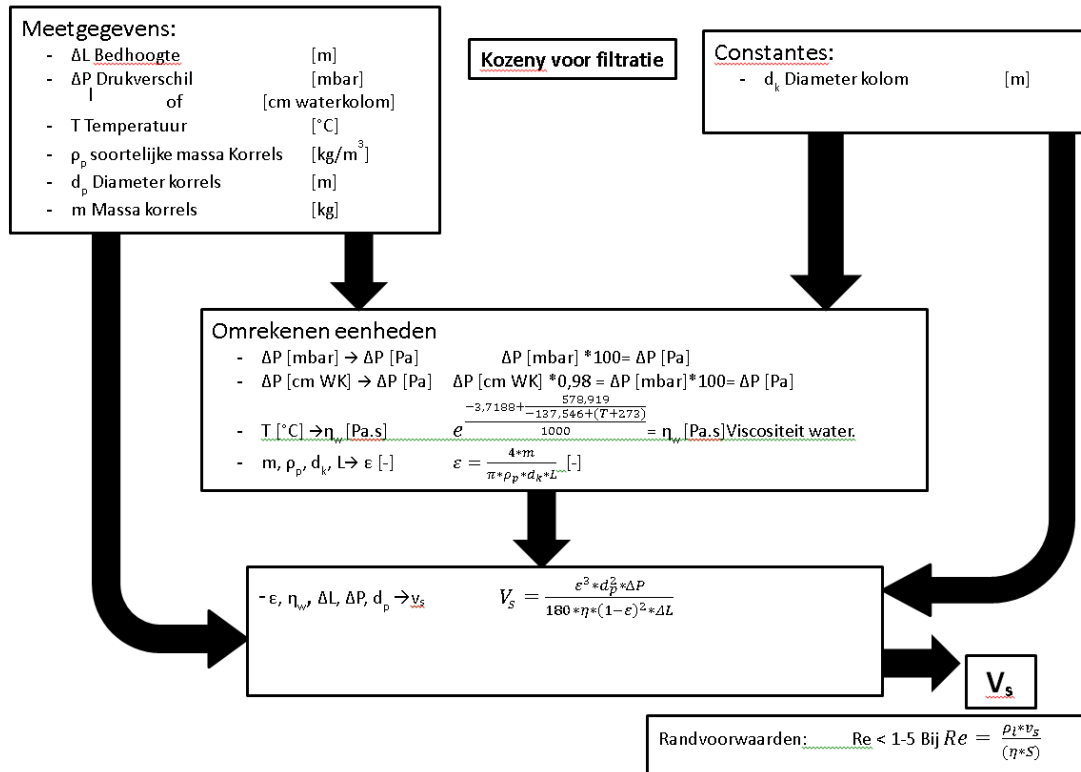


Figuur 42. De mate van zetting van glasparels 1.12 mm bij 10 °C.

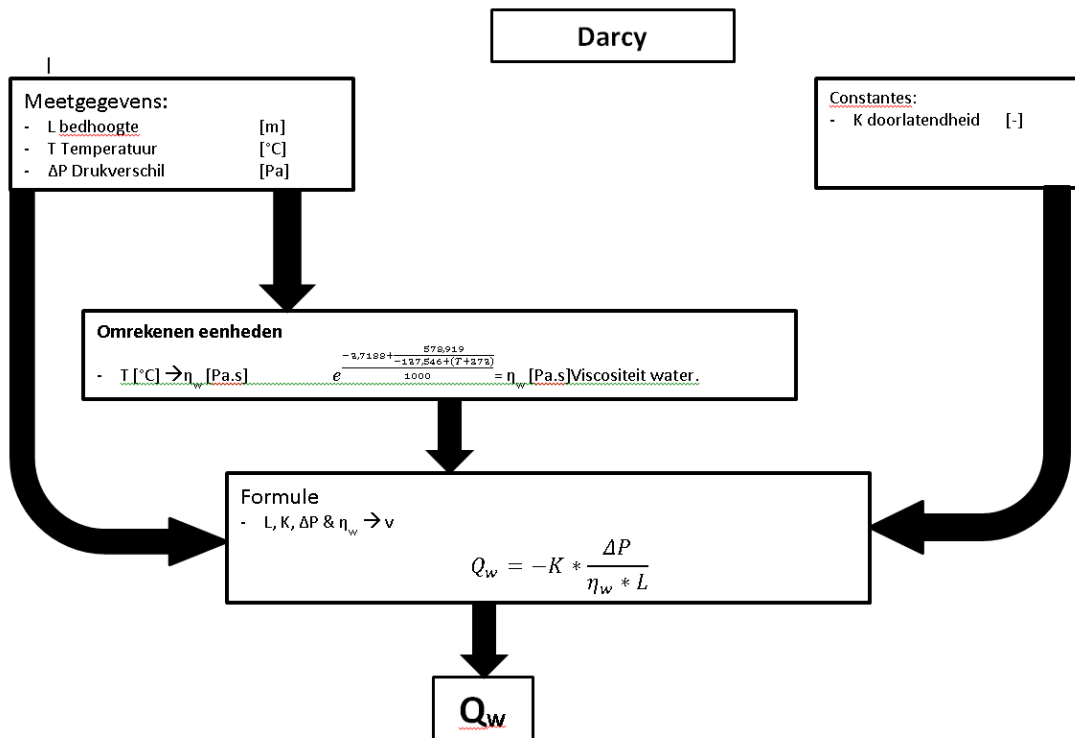


Figuur 43. De mate van zetting van glasparels 1.12 mm bij 20 °C.

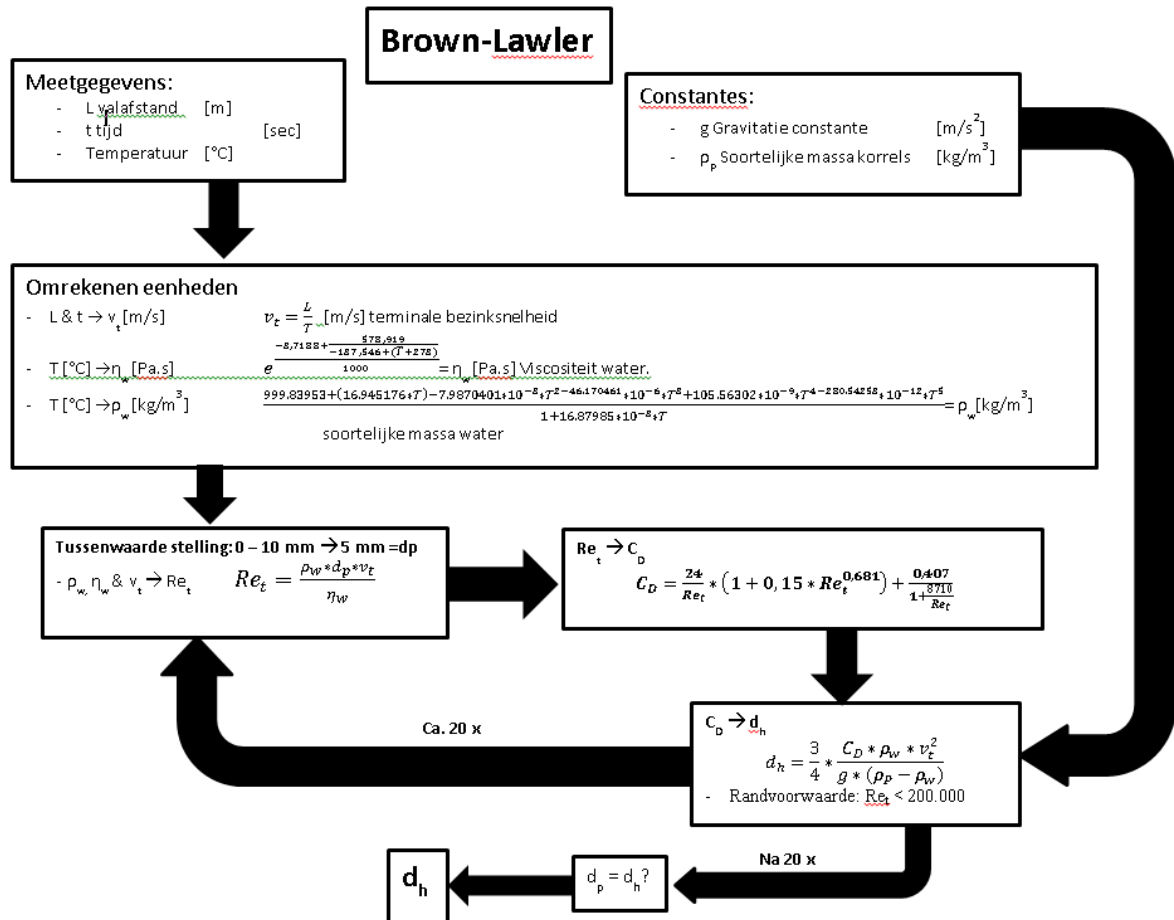
IX. Road maps voor het gebruik van de modellen



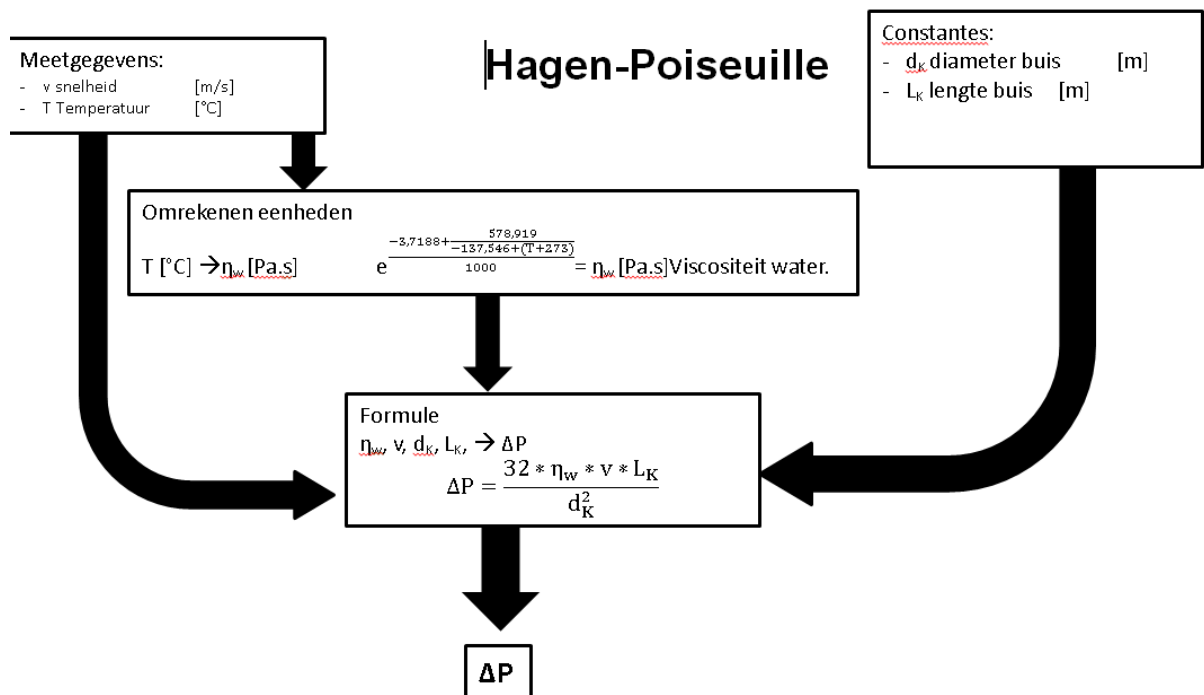
Figuur 44. Roadmap voor de formule van Carman-Kozeny gebruikt om de doorstroomsnelheid te berekenen bij filtratie.



Figuur 45. Roadmap berekening uitvoeren met de formule van Darcy.



Figuur 46. Roadmap om de formules voor terminale bezinking te gebruiken.



Figuur 47. Roadmap om de formule van Hagen-Poiseuille te gebruiken.

X. Foto's van de spoeling van de snelfilters te Loenderveen



Figuur 48. Collapse pulsing van het snelfilter.



Figuur 49. Expansie tijdens de terugspoelprocedure.



Figuur 50. Kanaalvorming tijdens de expansie van het filterbed.