



Marco Kapteijn, Visser & Smit Hanab
Ruben Rothuizen, Visser & Smit Hanab
Nico Wortel, Pharmafilter
Ruud van Dalen, Waterschap Veluwe

Nieuwe inzichten leiden tot optimalisatie ABWF op rwzi Harderwijk

Door aanscherping van de lozingseisen vanuit de Kaderrichtlijn Water wordt steeds vaker gebruik gemaakt van nageschakelde technieken om het effluent van rioolwaterzuiveringsinstallaties verder te zuiveren. Voor verdere verwijdering van fosfor op rwzi Harderwijk tot concentraties lager dan 0,20 mg P/l kwam Waterschap Veluwe op basis van een UAV-GC aanbestedingsprocedure uit op het Automatic BackWash Filter (ABWF). Sinds het in bedrijf stellen van het ABWF te Harderwijk op 17 juni 2009 zijn enkele technische verbeteringen geïmplementeerd. Daarnaast zijn experimenten uitgevoerd voor het opstellen van een hydraulisch model. De experimenten en het model hebben tot verbeterde inzichten in het filtratie- en spoelgedrag van het ABWF geleid en kunnen in de toekomst samen met de opgedane praktijkervaring leiden tot een verdere optimalisatie van het ABWF in Harderwijk en van het ontwerp van toekomstige installaties.

Vergelijkende studies en een uitgebreid pilotonderzoek gingen aan de keuze van het waterschap vooraf^(1),2),3). Bij het ontwerp van het ABWF is rekening gehouden met bekende tekortkomingen op installaties in Engeland. In 2006 werd dit type filter door STOWA⁽⁴⁾ geïdentificeerd als interessante toekomstmogelijkheid. Het ABWF bestaat uit een filterbed, dat opgedeeld is in cellen, die afzonderlijk schoongespoeld kunnen worden. De belasting van het systeem wordt gelijkmatig verdeeld over de cellen doordat de bovenwaterstand voor elke cel gelijk is en alle cellen met dezelfde frequentie gespoeld worden. De bovenwaterstand in Harderwijk wordt constant gehouden door het drukverschil over het filterbed te regelen met een schuif in de filtraatgoot. Het ABWF wordt neerwaarts doorstroomd met na te behandelen effluent. Het ABWF heeft een aantal voordelen, zoals het gebruik van een klein spoelwatervolume per cel, het ontbreken van grote spoelwaterbuffers, -pompen en -leidingen evenals een lager energieverbruik⁽⁴⁾. Op de klassieke ontwerpen is een tiental principiële verbeteringen toegepast bij het ontwerp van het ABWF op rwzi Harderwijk.

Hoofddoel van een filterbed is het efficiënt verwijderen van fosfor. De installatie is zo

uitgelegd dat bij maximale aanvoer het optimum voor de mengenergie en reactietijd (G- en GT-waarde) voor het gedoseerde metaalzout (ijzer of aluminium) bereikt wordt⁽⁵⁾. Tijdens het pilotonderzoek op rwzi Harderwijk⁽¹⁾ is een goede samenstelling van het dubbellaags filterbed voor het filtreren van fosfaatvlokken bepaald. De toplaag van het bed bestaat uit het grovere hydroantraciet (met een doorsnede van 1,4 tot 2,5 mm), zodat het filter een grote vuilbergende capaciteit krijgt. De bodemlaag bestaat uit middelgrof zand (met een doorsnede van 0,7 tot 1,25 mm), zodat ook kleinere vlokken afgevangen kunnen worden door het filter. In het ontwerp voor Harderwijk is een ruime veiligheidsmarge in de laagdiktes aangehouden om het risico van doorslag te minimaliseren.

Optimalisatie

Bestaande ABWF's in Engeland hebben te maken met verschillende problemen^(2),6). Oplossingen hiervoor zijn toegepast in het ontwerp voor rwzi Harderwijk (zie de tabel). Daarnaast zijn sinds het in bedrijf stellen van de ABWF nieuwe verbeteringen doorgevoerd. Zo hebben de bestaande ABWF's poreuze en zwakke bodems, hetgeen tot lekkage van zand leidt. In Harderwijk is gekozen voor een constructie van roestvast

staal met filterdoppen om voldoende stevigheid te krijgen, terwijl de uitstroom naar de filtraatgoot eenvoudig toegankelijk gemaakt kan worden voor onderhoud. Tijdens de opstart bleek de afsluiting van de filterbodem op de betonopleggingen onvoldoende, waardoor in een aantal cellen toch lekkage van zand optrad. Deze afsluiting is in alle cellen verbeterd.

Door affiltratie van zwevende stof en vuil in het bed neemt de weerstand van het filterbed toe. Als gevolg hiervan is er een groter drukverschil (ΔH) nodig om voldoende debiet door het filter te laten stromen. Deze extra druk wordt verkregen door de benedenwaterstand in de filtraatgoot automatisch te laten zakken door een schuif, terwijl de bovenwaterstand constant en gelijk blijft voor alle cellen. Zodra de benodigde druk te groot wordt en de schuif op een vastgestelde laagste stand staat, is het spoelcriterium bereikt en start de spoelinstallatie met het schoonspoelen van de filtercellen, die één voor één door de spoelinstallatie worden geïsoleerd van de rest van het filter. De andere cellen blijven daarbij in bedrijf en daarmee 95 procent van de filtercapaciteit. De spoelinstallatie maakt automatisch een keuze voor spoeling van een filtercel met of

alleen filtraatwater of soms met water, lucht en vervolgens weer water. De luchtspoeling is een essentieel onderdeel in een goede bedrijfsvoering om aangroei van teveel vuil in het filterbed te voorkomen. Door een spoeling wordt een individuele cel echter relatief schoon, waardoor een ongelijkmatige belasting van het filter ontstaat, met risico op doorslag van fosfor. De concentratie fosfor als P_{totaal} in het filtraat is tijdens de ongelijkmatige belasting echter op de gewenste 0,2 mg P/l gebleven bij een aanvoerconcentratie van 1,0 mg P/l, hetgeen eerdere calculaties bevestigt⁵⁾.

Omdat het filter per cel wordt gespoeld en de aanvoer van vers filtraat niet onderbroken wordt, kan zonder filtraatbuffer gewerkt worden. Door een lage bovenwaterstand en afsluiting van een filtercel met een kap wordt het spoelwater efficiënt ingezet en is het spoelwater volume minimaal. Bij een spoeling met water, lucht en nogmaals water bleek hydroantraciet weggespoeld te worden. Aanpassingen in het hydraulisch ontwerp van de spoelkap en het spoelprogramma hebben de uitspoeling met ten minste 98 procent teruggebracht tot acceptabele hoeveelheden.

Toepassing van rails sluit scheeffrekken van de rijdende spoelinstallatie niet uit²⁾. Daarom is de rijdende spoelinstallatie uitgerust met sensoren die de positie van de brug ten opzichte van de civiele constructie constant bepalen. Software bepaalt noodzakelijke stuurcorrecties tijdens het rijden. Sneeuwschuivers zorgen voor goede grip van de aandrijfwielen tijdens winterse omstandigheden.

Bedrijfsresultaten

Analyses van onbehandeld en gefiltreerd effluent toonden aan dat het ABWF fosfor als

P_{totaal} verwijderde tot 0,07 mg P/l bij een influentconcentratie van 0,76 mg P/l. Daarnaast verlaagt het filter het gehalte zwevende stof van gemiddeld 37 mg/l tot onder de rapportagegrens van 5 mg/l. Omdat de concentraties P_{totaal} in alle geanalyseerde filtraatmonsters lager liggen dan de geëiste 0,2 mg P/l, werd de setpointdosering van vlokmiddel verlaagd van 2,0 naar 1,5 mg Al/l.

Het ABWF in Harderwijk is ontworpen voor een netto debiet over twee filters van 1.900 kubieke meter per uur bij een veilig gekozen ontwerpfiltraatsnelheid van 6,5 m/h (950 kubieke meter per uur per filter). Een filter blijkt echter in staat om netto 1.400 kubieke meter per uur te verwerken met behoud van de gewenste filtraatkwaliteit bij een aangepast spoelprogramma. Bij een gemiddeld netto totaal filtratiedebiet van 1.200 kubieke meter per uur worden de concentraties zwevende stof en fosfor als P_{ortho} teruggebracht tot respectievelijk onder de rapportagegrens van 5 mg zwevende stof/l en 0,02 mg P/l bij een aluminiumion-dosering van 1,5 mg Al/l. Uit berekeningen volgt dat er onder gemiddelde omstandigheden per uur 4,5 kg zwevende stof en 149 g P_{totaal} wordt verwijderd. De spoelfrequentie is dan gemiddeld 1,5 keer per dag. Verdere optimalisatie van de metaalzoutdosering staat op het programma van het waterschap.

Visueel is waargenomen dat soms koekfiltratie (grote weerstandsopbouw in de toplaag van het bed) op lijkt te treden in plaats van de gewenste diepbedfiltratie. Daarnaast zijn mogelijkheden voor optimalisatie in energieverbruik geïdentificeerd. Dit én de zeer goede kwaliteit filtraat hebben geleid tot nader onderzoek naar grover filtermateriaal, optimalisatie van de spoelcyclus en maximaal haalbaar drukverschil. Doel was

onder meer het vaststellen van de maximaal haalbare filtersnelheid onder bedrijfsomstandigheden.

Experimenten

Een *full scale* proef en kolomproeven hebben meer inzicht gegeven in de werking van het ABWF en hebben data verschaft voor het opstellen van een hydraulisch model. De proef is uitgevoerd in een individuele filtercel van het ABWF om op realistische schaal de vergelijking te kunnen maken tussen weerstandsopbouw in het filter bij een normale vuilbelasting en bij een hoge vuilbelasting. De kolomproeven zijn uitgevoerd om de relatie vast te stellen tussen het type filtermateriaal, korrelgrootte en filterend vermogen. Voor het simuleren van continu piekbelastingen zijn extra fosfor en zwevende stof aan de afloop van de nabezinker toegevoegd.

De geteste filtercel in de *full scale*-proef is gevuld met een laag zand van 70 cm met een korrelgrootte van 0,7 tot 1,25 mm en daar boven een laag hydroantraciet van 50 cm met een korrelgrootte van 1,4 tot 2,5 mm. De capaciteit van de cel is continue bepaald met een debietmeter. Uit drukmetingen in sondes, die op verschillende dieptes in het filterbed zijn geplaatst, is de weerstandsopbouw over de hoogte van het filterbed bepaald. Afbeelding 1 laat het weerstandsverloop in het filterbed zien over de tijd bij een hoge vuilbelasting. De sondes van 0 tot en met 45 cm vanaf bovenkant filterbed zijn geplaatst in het antraciet, terwijl de sondes van 55 cm tot en met 105 cm geplaatst zijn in het zand. De grootste weerstandstoename is te zien in de bovenste 5 cm van het antraciet en op de grenslaag van het antraciet en zand. De overige lagen van het bed toonden niet tot nauwelijks stijging in de weerstand,

Overzicht van de verbeteringen van het ABWF Harderwijk ten opzichte van ABWF in Engeland.

onderwerp	ABWF Engeland	ontwerp ABWF Harderwijk	praktijkervaring
rendement zwevende stof en fosforverwijdering	laag	juiste dosering van vlokmiddel en berekende toestroom naar het filter	vlokkings werkt zeer goed
breukgevoeligheid kabels in de winter	over de grond	door de lucht	
spoelen van het filter	problemen met turbulentie van water en ongelijkmatige spoeling	filtraatgat gedimensioneerd om gelijkmatige spoeling te verkrijgen	gelijkmatig terugspoeling
	spoelprogramma met water	spoelprogramma met water en lucht	goede verwijdering vuil in filterbed
filterbodem	poreus, zwak	stevig met filterdoppen	verbeterde afdichting na lekkage
scheeffrekken brug bij ijsvorming	gladde rails	automatisch bijsturing en sneeuwschuivers	frequentere positiebepaling en betere sneeuwschuivers
pompverstopping door blad en twijgen	open filters	overdeken aanvoergoten	geen pompverstopping
onderhoud kabelgeleiders	nauwelijks	onderhoudsbordes in ontwerp	
onderhoudskosten (per m ³ gefiltreerd water) relatief hoog	lage filtersnelheid resulteert in zeer groot filteroppervlak	4 tot 5 maal hogere filtratiesnelheid toepassen, betere filterbodems	lage onderhoudskosten in contract
algen en drijfvuil in aanvoerkanaal	handmatig verwijderen	voorkomen door plaatsing van grofvuilrooster voor instroom	plaatsing rolcontainer voor opvang meer vuil

terwijl de filtratiesnelheid was gedaald tot een meter per uur bij een ΔH van 0,7 meter. Uit deze resultaten volgt dat, zoals verwacht en eerder getest¹⁾, in het bed meer koek- dan bedfiltratie plaatsvindt. Het filtermateriaal is dus relatief fijn. Of het flocculatieproces dient beter te worden afgestemd op een fijnere vlok (hogere G-waarde door lagere bovenwaterstand) of er kan grover filtermateriaal toegepast worden, wel onder behoud van goede filtraatkwaliteit. Dit kan door een debietsafhankelijke bovenwaterstand te hanteren, zodat de standtijd wordt genormaliseerd.

Tijdens de kolomproeven zijn de filtereigenschappen van grovere filtermaterialen vergeleken met de huidige gebruikte, middelgrove materialen. Zowel de middelgrove als de grovere filtermaterialen blijken de gewenste kwaliteit filtraat te geven. De looptijd van de grovere materialen is langer, wat veroorzaakt wordt door een betere berging van zwevende stof. Hierdoor loopt de weerstand in het bed langzamer en gelijkmatiger op, wat resulteert in een langere looptijd. Ondanks de hoge waargenomen filtratiesnelheden tot 20 meter per uur in zeer schone filterbedden is geen doorslag van fosfor gemeten voordat het filter dichtgeslagen was. Toepassing van grover filtermateriaal lijkt daarom een geschikte optimalisatie voor het ABWF.

Modellering filtratie

Aan de hand van de experimenten die zijn uitgevoerd in Harderwijk, is een hydraulisch model opgesteld. De functie van het model is het minimaliseren van het energieverbruik en de spoelfrequentie en de optimalisatie van het filterontwerp op basis van de kwaliteitsgegevens van de afloop van de nabezinker. Daarnaast kan het spoelwaterverlies worden geminimaliseerd, zodat het ABWF zo efficiënt mogelijk wordt ingezet. Het energieverbruik is afhankelijk van de spoelfrequentie, maar vooral van de ΔH (het verschil tussen de boven- en benedenwaterstand in het ABWF) en daarvoor benodigde opvoerhoogte, aangezien het in stand houden hiervan een hogere pompcapaciteit vergt. Minimaliseren van zowel ΔH als spoelfrequentie is dus noodzakelijk voor een energiezuinig ontwerp.

Het Automatic Back Wash Filter (ABWF) in Harderwijk.



Het model is gebaseerd op dubbel-laagsfiltratie. De bovenwaterstand op de cellen wordt constant gehouden door de benedenwaterstand in de filtraatgoot te regelen, zoals in de praktijk ook wordt gedaan met behulp van een schuif. Aan de hand van de Wet van Darcy, die de relatie tussen debiet, weerstand, oppervlak en drukverschil geeft (zie kader), wordt het debiet door de individuele cellen berekend. Het verschil tussen het inkomende debiet en het debiet dat door het bed stroomt, zorgt voor een stijging of daling van de bovenwaterstand. Zodra de marge voor de bovenwaterstand wordt overschreden, daalt of stijgt de benedenwaterstand, zodat de bovenwaterstand op het streefpeil blijft en er evenveel water door het ABWF stroomt als er binnenkomt.

Naarmate de tijd vordert, stijgt de weerstand in het bed door verstopping van de poriën. Het verloop van de weerstand over de tijd is gekalibreerd aan de hand van de meetgegevens van diverse experimenten. Het verschil tussen het gemodelleerde en gemeten debiet is weergegeven in afbeelding 2. Het weerstandsverloop over de tijd is afhankelijk van het aanvoerdebiet en de vuilgraad. Het verschil in weerstandsverloop tussen middelgrof en grof materiaal is bepaald aan de hand van de kolomproeven die uitgevoerd zijn bij verschillende korrelgroottes. Daarnaast is een verschil gemaakt tussen een hoge vuillast om extreme situaties te kunnen inschatten en een normale belasting om een gemiddelde spoelfrequentie te kunnen berekenen. Hieruit kan een gemiddeld spoelwaterdebiet en energieverbruik worden berekend.

Om het model te valideren is een modelberekening uitgevoerd voor het gehele filter van het ABWF Harderwijk. Er is voor een andere periode gekozen dan de periode waar de kalibratie op is gebaseerd. Afbeelding 3 geeft de gemodelleerde en gemeten boven- en benedenwaterstand van het ABWF Harderwijk weer. De gemodelleerde bovenwaterstand is redelijk constant en komt goed overeen met de gemeten bovenwaterstand. Het is goed te zien dat de benedenwaterstand afneemt zolang de weerstand van het bed toeneemt. Zodra de benedenwaterstand op het laagste punt is, begint de spoelinstal-

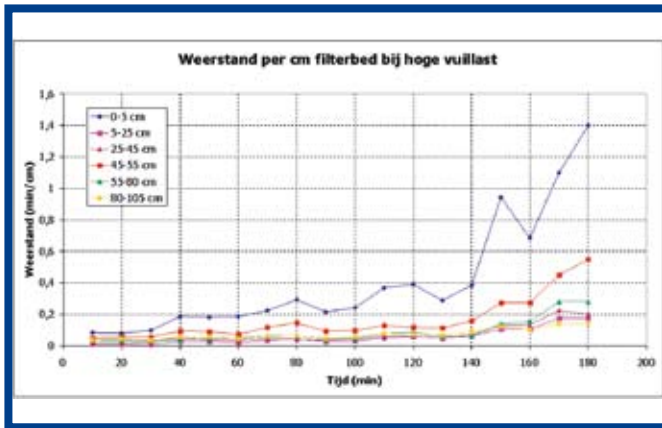
latie te spoelen, waardoor de benedenwaterstand weer oploopt. De gemodelleerde en gemeten benedenwaterstand komen redelijk overeen. De spoeltijd in het model lijkt iets langer te zijn dan in de praktijk, terwijl de weerstand van het filter na spoelen te laag lijkt te zijn.

Afbeelding 4 laat de spoelfrequentie van het ABWF Harderwijk zien voor verschillende aanvoerdebieten aan de hand van een gemiddelde ΔH , zoals berekend met het model. Hierbij is uitgegaan van een hoge vuillast om extreme situaties door te rekenen. Bij 500 kubieke meter per uur (laag debiet) is te zien dat er weinig marge is voor ΔH . De maximaal mogelijke ΔH is ongeveer 0,3 m, omdat een groter verschil een te snelle filtratie veroorzaakt. Ook is te zien dat slechts één of twee maal per dag gespoeld hoeft te worden. Dit betekent dat bij 500 kubieke meter per uur en een hoge vuillast zoals verwacht weinig energieverbruik optreedt door zowel een minimaal te handhaven ΔH als een minimale spoelfrequentie. Een dergelijk laag debiet en hoge vuillast is een situatie die in de praktijk vrijwel nooit voorkomt. Dit betekent dat bij 500 kubieke meter per uur en een normale vuilbelasting de spoelfrequentie zelfs een stuk lager zal liggen.

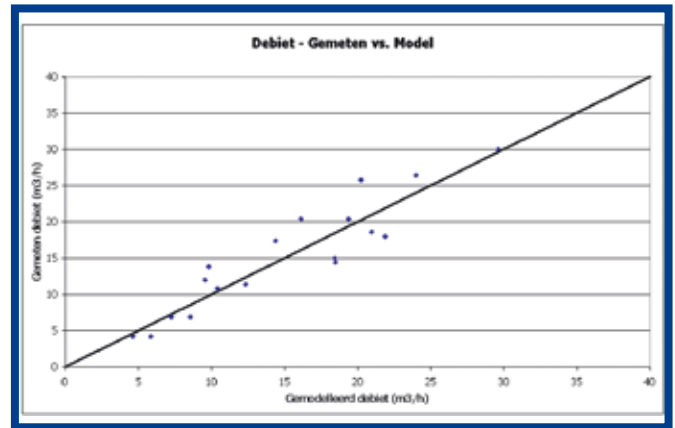
Het debiet van 2.000 kubieke meter per uur is een situatie die bijvoorbeeld voorkomt bij regenval. Het ABWF is ontworpen om deze hoeveelheid water te kunnen verwerken. Met behulp van deze grafiek kan een optimale combinatie van spoelfrequentie en ΔH gevonden worden, waarbij het energieverbruik wordt geminimaliseerd. De minimaal benodigde ΔH wordt gelimiteerd door de maximale spoelfrequentie van acht maal per dag en is in dit geval ongeveer 0,6 meter. Vanaf een ΔH van een meter is geen significante verlaging te zien in spoelfrequentie. Het minimale ontwerpcriterium bij een hoog zwevendstofgehalte is dus een gemiddelde ΔH van ongeveer een meter, waarbij ongeveer vijf maal per dag gespoeld moet worden. Er moet wel rekening mee gehouden worden dat het hier een gemiddelde ΔH betreft. Door instantane verhoging van het debiet kan er een piek ontstaan in de ΔH . De piek kan in dit geval oplopen tot twee meter. Dit betekent dat óf de benedenwaterstand moet kunnen zakken óf de bovenwaterstand ver kan stijgen, wat betekent dat meer ruimte gecreëerd moet worden om de bovenwaterstand zo ver te laten stijgen en dus meer bouwvolume in het ontwerp moet komen. Er kan nu gemakkelijk een economische afweging gemaakt worden tussen bouwvolume en energieverbruik voor vaker spoelen.

Conclusies

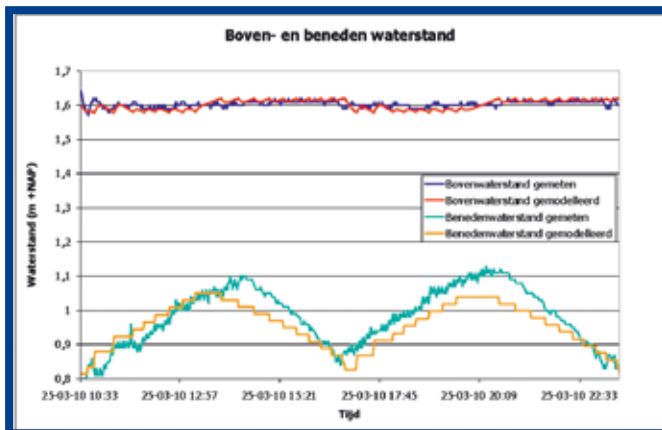
De keuze van Waterschap Veluwe om bij de aanbesteding van de nabehandeling op rwzi Harderwijk innovatieve technologie toe te staan met duidelijke eisen naar filterbelasting en capaciteit heeft geleid tot een filtratiestap die aan de technische en kwalitatieve randvoorwaarden voldoet. De aanbiedingen zijn gedaan zonder onduidelijke discussies over filterbelasting en capaciteit. Hierdoor



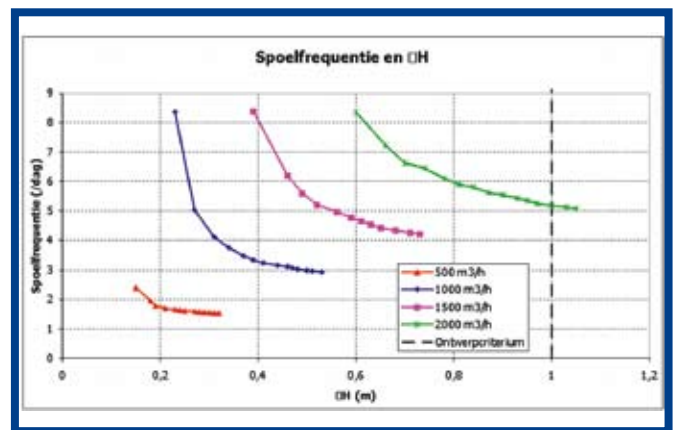
Afb. 1: Het weerstandsverloop in het filterbed over de tijd bij een hoge vuilbelasting voor sondes op verschillende dieptes in het filterbed.



Afb. 2: Kalibratie van het gemodelleerde debiet per filtercel aan de hand werkelijk gemeten waarden.



Afb. 3: Validatie van de modeluitkomsten per filter aan de hand van gelogde waterstanden.



Afb. 4: Door het model berekende spoelfrequentie voor verschillende aanvoerdebiëten aan de hand van een gemiddelde ΔH. Het ontwerpcriterium is bepaald door bij piekbelasting het energieverbruik te optimaliseren door verschillende combinaties van spoelfrequentie en ΔH toe te passen.

Berekeningen model

Wet van Darcy (uit 1856): $Q = k \cdot A \cdot i$
 Q = debiet
 k = hydraulische conductiviteit
 A = stroomoppervlak
 i = drukverhang

Voor elke cel in het ABWF is een k -waarde gedefinieerd, die afloopt in de tijd. Na elke tijdstap (één minuut in dit model) wordt het debiet door elke cel berekend.
 $Q(s,t) = k(s,t) \cdot A(s) \cdot i(t)$
 s = celnummer
 t = tijd

De som van deze celdebieten is de filtercapaciteit van het ABWF.

$$Q(t) = \sum Q(s,t)$$

Het verschil tussen het aanvoerdebiet en doorstroomdebiet bepaalt de verandering van de bovenwaterstand voor de volgende tijdstap.

$$h_b(t) = h_b(t-1) + Q(t-1) - Q_s(t-1)$$

h_b = bovenwaterstand

Q_a = aanvoerdebiet

Zodra de bovenwaterstand te ver afwijkt van het streefpeil, zakt of stijgt de benedenwaterstand, waardoor het drukverhang toe- of afneemt en de bovenwaterstand weer dichterbij het streefpeil komt.

kon een innovatief filter gebouwd worden dat competitief is met andere filtertechnologieën. De aannemer heeft zich kunnen richten op de realisatie en de kinderziekten en het waterschap heeft nu een nabehandelingsinstallatie die, mede door de behoorlijke overcapaciteit, de verwachtingen betreft de kwantiteit en kwaliteit van het te behandelen water overtreft.

Zoals in het verleden geleerd is van de bestaande installaties in Engeland, kan ook nu weer doorontwikkeld worden op de keuzes die voor het ontwerp in Harderwijk gemaakt zijn. Optimalisaties zitten daarbij maar voor een klein deel in de innovaties. Juist de verbetering van de constructie van de filterbodem en het beter benutten van de capaciteit door de optimale afstemming van filtermateriaal en flocculatie leveren nog betere resultaten op.

Met behulp van het hydraulisch model kan eenvoudig en goedkoop gezocht worden naar verdere optimalisaties in het bedrijf van bestaande filters en het ontwerp van nieuwe installaties. Aangetoond is dat met het model onder andere een combinatie van een debietsafhankelijke ΔH en een bepaalde spoelfrequentie gekozen kan worden die het energieverbruik minimaliseert. Deze kan weer gerelateerd worden aan het benodigde bouwvolume om een buffer voor de maximale ΔH te creëren.

Naast het optimaliseren van het energieverbruik en de spoelfrequentie kan ook met verschillende invoerparameters van

het model geëxperimenteerd worden. Zo kunnen de afmetingen van het ABWF en de dikte en korrelgrootte van het filterbed aangepast worden. Door verschillende combinaties door te rekenen kunnen verbeterde ontwerpen gemaakt worden die hydraulisch voldoen aan de ontwerpeisen, onder de randvoorwaarde dat de verwijdering van fosfor en zwevende stof dan nog voldoende is. Daarom zal het model ook ingezet worden voor toekomstig onderzoek naar de uitbreiding van de functionaliteit van het filter met bijvoorbeeld absorptieprocessen of biologische afbraakprocessen.

LITERATUUR

- 1) Wortel N. en R. van Dalen (2007). Zandfiltratie op rwzi Harderwijk; een innovatief onderzoek. Neerslag nr. 1, pag. 47-57.
- 2) Wortel N., R. van Dalen en L. Schoenmakers (2007). Automatic backwash filtratie voor polishing van de afloop van de nabezinktanks, oftevel: Oude wijn in nieuwe zakken bij filtratie op rwzi's. Neerslag nr. 3, pag. 11.
- 3) Wortel N. (2007). Vierde trapsfiltratie rwzi Harderwijk; ontwerp, kostenramingen drie systemen en multicriteria-analyse. Grontmij.
- 4) STOWA (2006). Filtratietechnieken rwzi's: stand van zaken en ervaringen met zandfiltratie. Rapport 2006-1.
- 5) Wortel N., R. van Dalen en P. van Alphen (2009). Eerste Nederlandse Automatic Backwash Filter in Harderwijk. H₂O nr. 10, pag. 33-35.
- 6) Waterforum online (2007). Goede resultaten backwash-filter voor nabehandeling effluent.