



Filtratie-eigenschappen van rwzi-effluent tijdens dead-end ultrafiltratie

J. ROORDA, TU DELFT, THANS GRONTMIJ WATER & RESTSTOFFEN

J. KRAMER, WITTEVEEN+BOS

J. BOOM, ROSSMARK WATERBEHANDELING

J. VAN DER GRAAF, TU DELFT

Communaal afvalwater wordt in Nederland de laatste tientallen jaren beter gezuiverd en levert schooner rwzi-effluent op. Daarnaast neemt de vraag naar schoon water steeds meer toe, maar neemt ook de kennis van technieken om dit effluent nog verder te behandelen toe waardoor de kosten daarvan dalen. Gezuiverd afvalwater wordt daardoor steeds vaker beschouwd als een bron voor hergebruik. Membraanfiltratie zal hierin een belangrijke rol spelen. De resultaten van het promotie-onderzoek dat in dit artikel gepresenteerd wordt, gaan in op de toepassing van ultrafiltratie voor vergaande behandeling van afvalwater afkomstig van communale rioolwaterzuiveringsinstallaties. De filtratie-eigenschappen van rwzi-effluent zijn nog onbekend en de mechanismen die een rol spelen in het vervuilen van de membranen (en daarmee het afnemen van de prestaties) onduidelijk. Het doel van het hier gepresenteerde onderzoek was om de filtratie-eigenschappen te bepalen van rwzi-effluent tijdens dead-end ultrafiltratie.

Sinds 1996 wordt aan de TU Delft bij de onderzoeksgroep van prof.ir. J. van der Graaf onderzoek uitgevoerd naar de vergaande behandeling van communaal gezuiverd afvalwater. Daarbij ligt de nadruk op de ontwikkeling van technieken die tegen lage kosten kunnen worden ingezet maar wel een goede verbetering laten zien. Op dit moment is gekeken naar snelfiltratie (meerdaagse zandfiltratie met snelheden van 10 tot 30 m/h) en naar

membraanfiltratie (micro- en ultrafiltratie).

Membraanvervuiling: korte versus lange termijn

In het onderzoek is een duidelijk onderscheid gemaakt tussen membraanvervuiling die optreedt op de korte termijn en die optreedt op de lange termijn. Te vaak worden deze twee niet van elkaar gescheiden, maar worden ze integraal beschouwd. Om echt

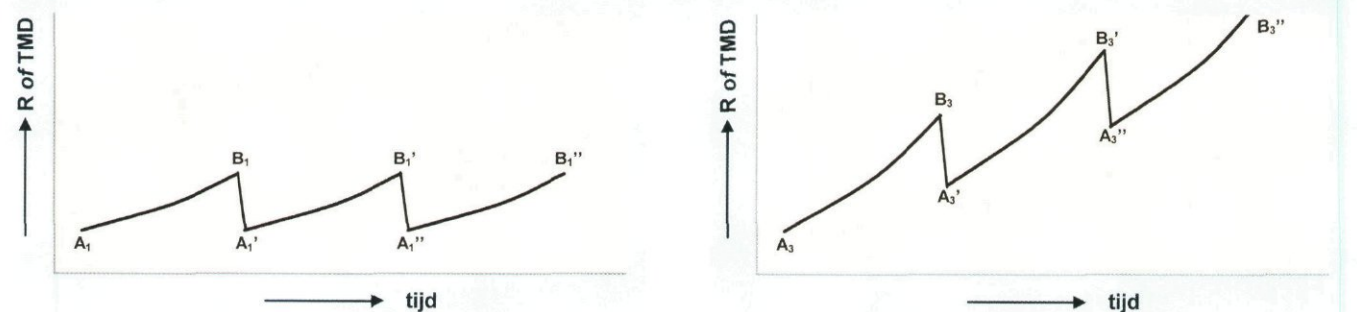
In 1998 zijn Witteveen+Bos en Rossmark Waterbehandeling (onderdeel van Veolia Water) en de TU Delft een langlopend onderzoek gestart naar de vergaande behandeling van communaal gezuiverd afvalwater. Sindsdien is op een aantal locaties in Nederland semi full-scale onderzoek uitgevoerd. Op pagina 36 van dit nummer worden bijvoorbeeld de resultaten van praktijkonderzoek op rwzi Hoek van Holland gepresenteerd. De komende jaren zal het onderzoek gecontinueerd worden, op dit moment vindt praktijkonderzoek plaats op rwzi Utrecht.

Het onderstaande artikel behandelt in vogelvlucht de onderzoeksresultaten waarover Jelle Roorda het proefschrift 'Filtration characteristics in dead-end ultrafiltration of wwtp-effluent' schreef. Hij is hierop op 19 april j.l. aan de TU Delft gepromoveerd⁴⁾.

inzicht in de vervuiling te krijgen, is het noodzakelijk die twee te scheiden. Dit wordt geïllustreerd aan de hand van twee grafieken (afbeelding 1). De weerstand over het membraan en de weerstandstoename direct daarna bepalen de flux die gerealiseerd kan worden. Als de weerstandstoename in deze eerste fase klein is (dat wil zeggen een hoge filtreerbaarheid), dan zal de toe te passen flux hoger kunnen zijn. Is deze weerstandstoename groot (d.i. een lage filtreerbaarheid), dan zul je bij een lagere flux de installatie moeten bedienen. Deze membraanvervuiling op de korte termijn, dus tussen twee reinigingscycli in, bepaalt de hoogte van de flux die in eerste instantie toegepast kan worden.

De verwijderbaarheid van de vervuiling, dus de mate waarin de ontstane vervuiling kan worden verwijderd, bepaalt de hoogte van de flux op de langere termijn. In afbeelding 1 is dat de afname van de weerstand door een reinigingsprocedure, bijvoorbeeld B¹ naar A¹'. Als

Afb. 1: De twee grafieken tonen de weerstandopbouw (of TMD toename bij constante flux) over het membraan tijdens filtratie. De rechter grafiek laat het ideaalbeeld zien: de weerstand neemt toe van A¹ naar B¹ tijdens filtratie, na verloop van tijd wordt het membraan gereinigd en wordt deze weerstandstoename volledig weggenomen (B¹ naar A¹'). De linker grafiek laat het beeld zien zoals dat vaak gevonden wordt in de praktijk: de weerstand neemt toe (A³ naar B³), maar tijdens de reiniging kan de vuilafzetting niet volledig worden verwijderd (B³ naar A³') en is de totale weerstand A³ hoger dan de weerstand bij het begin van filtratie (A³).



de vuillaag gemakkelijk te verwijderen is, zal het beeld uit de rechter grafiek in afbeelding 1 te zien zijn. Is de vervuiling niet gemakkelijk te verwijderen (slechte verwijderbaarheid), dan zal een profiel als in de linkse grafiek te zien zijn.

Onderzoek op pilotschaal

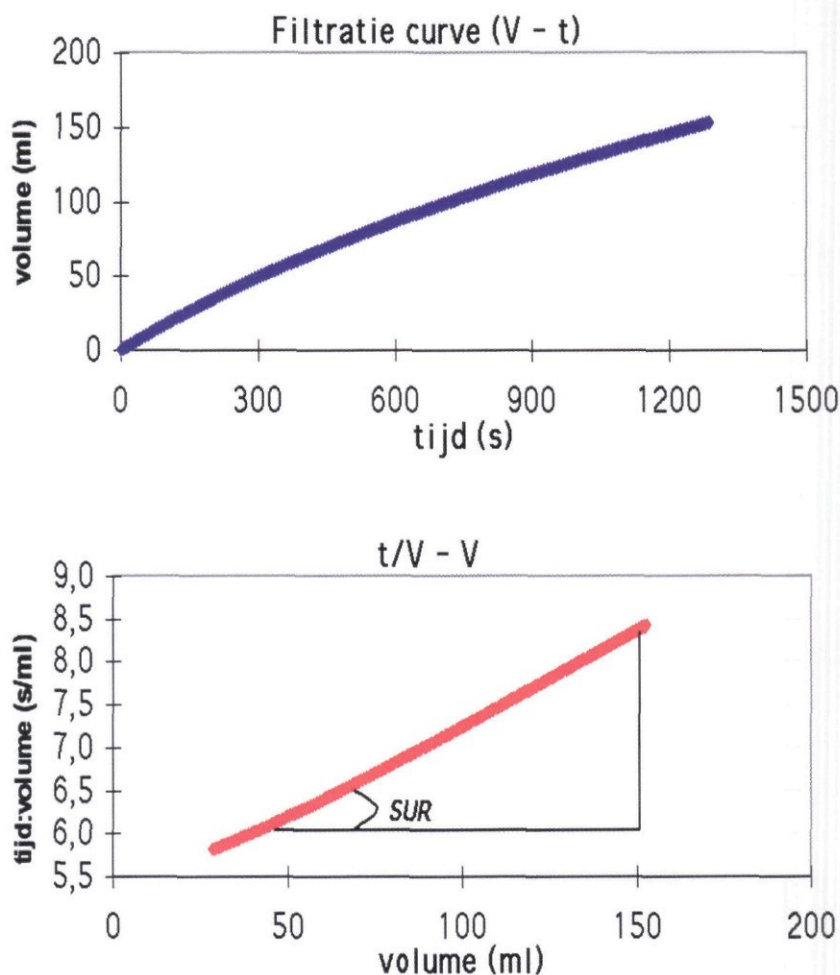
Het onderzoek is deels uitgevoerd op pilotschaal, waarbij de schaal zo gekozen is dat de resultaten eenvoudig gebruikt kunnen worden voor het ontwerp van een praktijkinstallatie. Praktijkonderzoek vond per locatie plaats voor een periode van minimaal zes maanden. De meeste aandacht ging daarbij uit naar de installaties voor snelfiltratie en ultrafiltratie, maar ook coagulatie (als voorbehandeling), continue zandfiltratie, microfiltratie, nanofiltratie en reverse osmosis zijn beproefd. Uit dit deel van het onderzoek bleek dat een stabiele bedrijfsvoering van de dead-end ultrafiltratie-installatie mogelijk is met een flux van 60-100 l/m².h, afhankelijk van de locatie en de mate van voorbehandeling. Het bleek dat per locatie de samenstelling van het rwzi-effluent en daarmee de bedrijfsvoering van de ultrafiltratie-installatie varieerde. Meer details over deze praktische kant van dit onderzoek zijn te vinden in Roorda⁴.

Op pilotschaal zijn experimenten uitgevoerd om inzicht te verkrijgen in de processen die bedrijfsvoering beïnvloeden. Een kort, goed gedefinieerd experiment waarbij de filterbaarheid van het rwzi-effluent en de interactie tussen het effluent en het membraan is op pilotschaal uitgevoerd.

Daarnaast is de verwijderbaarheid van de vervuiling op en in het membraan gekwantificeerd. Deze experimenten wezen uit dat de toegepaste voorbehandeling van het rwzi-effluent met in-line coagulatie en snelfiltratie slechts een beperkte invloed heeft op de filterbaarheid. Daaruit is geconcludeerd dat de filtratie-eigenschappen worden bepaald door deeltjes die door deze technieken niet of nauwelijks beïnvloed worden. Uit de literatuur blijkt dat deze deeltjes daarom kleiner dan 5-10 µm moeten zijn. De verwijderbaarheid van de vervuiling werd wel positief beïnvloed, maar de betere verwijderbaarheid bleek niet in staat de vervuiling die ontstaat door slecht filterbaar effluent in voldoende mate te verwijderen.

Parameter om filterbaarheid te bepalen (SUR)

Op laboratoriumschaal is een parameter ontwikkeld om de filterbaarheid te kunnen meten. Een voorwaarde voor deze parameter is dat deze een betrouwbare uitkomst geeft binnen een beperkte meettijd. De ontwikkelde parameter is de zogeheten specifieke ultrafil-



Afb. 2: Bepaling van de specifieke ultrafiltratieweerstand uit de filtratiecurve. In de bovenste grafiek is de filtratiecurve weergegeven als volume tegen de tijd; in de onderste grafiek is de getransformeerde filtratiecurve weergegeven, waaruit de SUR af te leiden is als de helling van de curve.

tratieweerstand (SUR). Deze wordt bepaald door met een kleine, zelfgemaakte membraan-module gedurende 30 minuten de filtratiecurve van rwzi-effluent (al dan niet voorbehandeld) te meten bij een transmembraandruk van 0,5 bar. De theorie achter de meting gaat terug tot de theorie voor koekfiltratie die ook aan de basis ligt van de MFI⁶, maar die in het kader van het hier beschreven onderzoek verder is uitgewerkt en een meer theoretische onderbouwing heeft gekregen. De SUR is het product van de gemiddelde specifieke koekweerstand en de concentratie deeltjes in het voedingswater en wordt uitgedrukt als de weerstand per meter gefiltreerd water. Deze wordt verkregen uit de helling van de filtratiecurve.

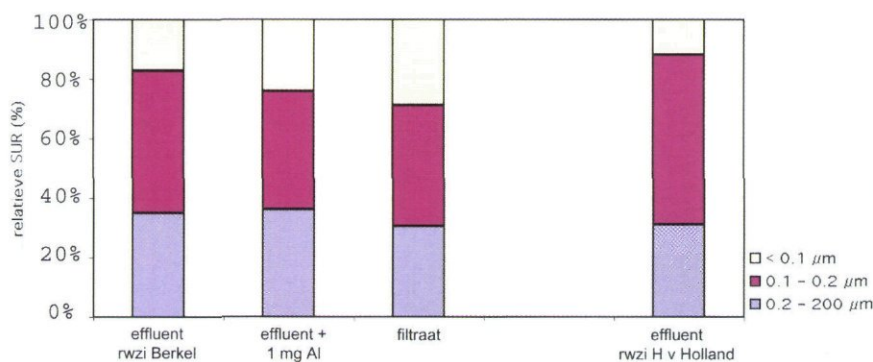
Dit wordt getoond in afbeelding 2, waarbij in de bovenste grafiek het gefiltreerde volume uitgezet is tegen de tijd. In de onderste grafiek wordt de tijd per volume-eenheid uitgezet tegen het gefiltreerde volume. De richtingscoëfficiënt geeft de SUR volgens onderstaande formule (zie ook⁵).

$$SUR = \alpha_{av} \cdot c_v = \frac{\left(\frac{t_2}{V_2} - \frac{t_1}{V_1}\right)}{(V_2 - V_1)} \cdot \frac{2 \cdot \Delta P \cdot A_{m^2}}{\eta_T}$$

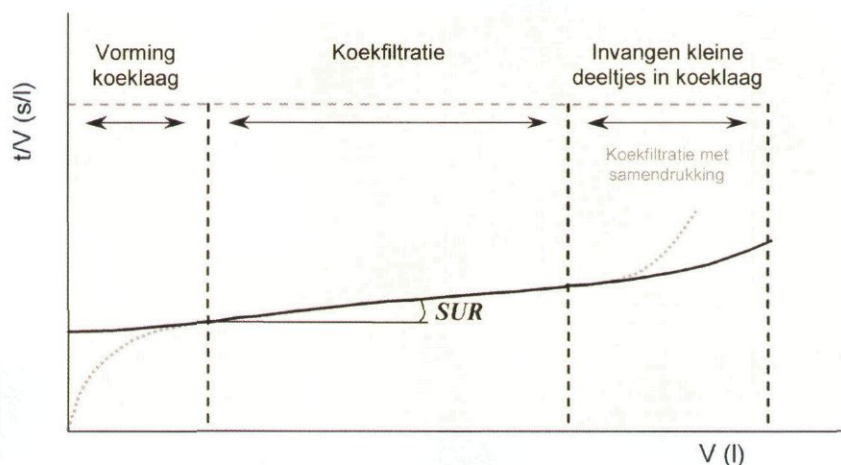
- SUR = weerstand per meter gefiltreerd voedingswater (m⁻²)
- α_{av} = gemiddelde specifieke koekweerstand (m/kg)
- c_v = concentratie van deeltjes in het voedingswater (kg/m³)
- t = tijd (s)
- V = gefiltreerd volume (m³)
- A_{memb} = membraanoppervlak (m²)
- ΔP = transmembraandruk (N/m², Pa)
- η_T = dynamische viscositeit (N.s/m², Pa.s), gerelateerd aan de voedingswatertemperatuur T (°C) volgens:

$$\eta_T = \frac{497 \cdot 10^{-3}}{(T + 42.5)^{1.5}}$$

De filterbaarheid van het rwzi-effluent is bepaald als SUR in de range van 5x10¹² tot 30x10¹² m⁻². Een lage waarde wordt gevonden voor goed filterbaar water; bij een hogere waarde neemt de filterbaarheid af. De transmembraandruk



Afb. 3: De relatieve SUR per deeltjesgroottefractie. De fractie 0,1 μm tot 0,2 μm draagt voor 39 tot 57 procent bij aan de filtreerbaarheid van het (voorbehandelde) rwzi-effluent.



Afb. 4: Filtratiecurve gevonden voor dead-end ultrafiltratie van rwzi-effluent. De gestippelde lijn geeft het mechanisme dat veelal verondersteld wordt⁶⁾, maar in het hier gepresenteerde onderzoek is altijd de zwarte lijn gevonden.

beïnvloedde de SUR, wat veroorzaakt wordt door samendrukking van de vuillaag (de compressiecoëfficiënt was 0,61 tot 0,75).

De SUR is bepaald van het effluent van de verschillende rwzi's waar ook praktijkonderzoek is uitgevoerd. Uit een analyse van deze gegevens en de resultaten van het praktijkonderzoek zelf, kwam naar voren dat bij rwzi-effluent met een slechte filtreerbaarheid (een hoge SUR) de voorbehandeling en membraanreiniging slechts een kleine verbetering van de bedrijfsvoering bewerkstelligen. Uit deze resultaten blijkt dat een hoge initiële filtreerbaarheid (lage SUR) van het rwzi-effluent een voorwaarde is voor een stabiele bedrijfsvoering met fluxen hoger dan 100 l/m².h. Een praktijkvoorbeeld van een succesvolle toepassing van de SUR wordt beschreven in het artikel op pagina 36, waarin de SUR is gebruikt als optimalisatieparameter in pilotonderzoek op rwzi Nieuwe Waterweg (Hoek van Holland).

Invloed van deeltjesgrootte op de filtreerbaarheid

Tenslotte is de invloed van de deeltjesgrootte van componenten van rwzi-effluent op

de filtreerbaarheid bepaald met behulp van fractioneringsexperimenten. Hierbij werd effluent gefiltreerd over filters met verschillende poriegrootten, waarna van het filtraat de SUR is bepaald. Hieruit bleek dat de fractie van deeltjes die worden tegengehouden door een 0,1 μm filter, maar die door een 0,2 μm filter worden doorgelaten voor 39 tot 57 procent de filtreerbaarheid bepalen. Dit wordt getoond in afbeelding 3, waarin van twee soorten effluent de filtreerbaarheid uitgedrukt als SUR per fractie is weergegeven. De toegepaste voorbehandelingsmethoden (coagulatie en snelfiltratie) zijn nauwelijks van invloed op deze fractie. Deze fractie is vijf tot 20 maal groter dan de diameter van de poriën van de onderzochte ultrafiltratiemembranen.

Nieuw filtratiemechanisme

De resultaten uit de fractioneringsexperimenten tonen aan dat koekfiltratie het belangrijkste filtratie mechanisme is. Aanvullend onderzoek naar het filtratiemechanisme toonde aan dat een nog niet eerder beschreven mechanisme verantwoordelijk is voor de gevonden resultaten: het filtratiemechanisme

is de vorming van een vuillaag op het membraan, waarin continu kleinere deeltjes in worden ingevangen. Dit leidt tot een continue toename van de weerstand over het membraan. In afbeelding 4 wordt dit mechanisme schematisch als filtratiecurve weergegeven. Daarbij is ook het mechanisme weergegeven wat veelal verondersteld wordt (porieverstopping - koekfiltratie - samendrukking koek). In dit onderzoek is voor dead-end ultrafiltratie van rwzi-effluent het volgende mechanisme gevonden: vorming van een koeklaag - koekfiltratie - invangen van deeltjes in de koeklaag.

Evaluatie

Verder onderzoek naar de verwijderbaarheid van deze fractie is van groot belang. Dit is het onderwerp van het vervolgonderzoek aan de TU Delft wat uitgevoerd wordt door Sandy te Poele, in samenwerking met onder andere leveranciers van reinigingsmiddelen⁷⁾.

De filtreerbaarheid van rwzi-effluent kan positief beïnvloed worden door de 0,1-0,2 μm fractie aan te passen. Mogelijkheden daartoe kunnen gevonden worden in het aanbrengen van een chemische pre-coat²⁾, maar ook biologische methoden lijken in staat om de invloed van deze fractie te verkleinen. Daarbij is vooral het onderzoek van Kampf et al.³⁾ naar water-vlooiën van belang. Ook voorbehandeling door middel van actief kool of poederkool kan van belang zijn¹⁾. Daarbij is het noodzakelijk om de kosten in oog te houden.

LITERATUUR

- 1) Clark M., I. Baudin en C. Anselme (1996). Membrane-powdered activated carbon reactors (Ch.15). In: Water Treatment Membrane Processes. McGraw-Hill.
- 2) Galjaard G., P. Buijs, E. Beerenndonk, F. Schoonenberg en J. Schippers (2001). Pre-coating (EPCE) UF membranes for direct treatment of surface water. Desalination nr. 139, pag. 305-316.
- 3) Kampf R., J. Graansma, H. van Dokkum, E. Foekema en Th. Claassen (2003). Increasing the natural values of treated wastewater on the island of Texel, the Netherlands. Proceedings 'Efficient use and management of water for urban supply'.
- 4) Roorda J. (2004). Filtration characteristics in dead-end ultrafiltration of wwtp-effluent. Proefschrift, TU Delft.
- 5) Roorda J. en J. van der Graaf (2004). De Specifieke Ultrafiltratie weerstand (SUR): parameter voor beschrijving van de filtratie-eigenschappen van rwzi-effluent tijdens dead-end ultrafiltratie. Afvalwaterwetenschap (in druk).
- 6) Schippers J. en J. Verdouw (1979). De membraanfiltratie-index als kenmerk voor de filtreerbaarheid van water. H₂O nr. 5.
- 7) Poele S. te, J. Roorda en J. van der Graaf (2003). Influence of the size of foulants on the filterability of wwtp-effluent. Proceedings IWA International Conference 'Nano and microparticles in water and wastewater treatment'.