



KWR PCD 23 | november 2025

**Membraanfiltratie
van water ten
behoefte van de
bereiding van
drinkwater**

Membraanfiltratie van water ten behoeve van de bereiding van drinkwater

KWR | PCD 23 | november 2025

Opdrachtgever

Platform Bedrijfsvoering

Auteurs

T.P.H. (Tessa) van den Brand en D.J.H. (Danny) Harmsen

Jaar van publicatie
2026

Meer informatie
Tessa van den Brand
T (030) 60 69 629
E Tessa.van.den.Brand@kwrwater.nl

PO Box 1072
3430 BB Nieuwegein
The Netherlands

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

KWR

KWR PCD 23 | november 2025 ©

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

Praktijkcode Drinkwater

Status

De Nederlandse drinkwaterbedrijven maken in de dagelijkse bedrijfsvoering gebruik van richtlijnen met als doel het (hoge) kwaliteitsniveau van de bedrijfsvoering te handhaven en waar mogelijk verder te verbeteren, en/of de efficiëntie van de bedrijfsvoering te verhogen en bij te dragen aan het verder uniformeren van de werkwijzen binnen de drinkwatersector. Deze richtlijnen hebben doorgaans het karakter van een ‘aanbeveling van een te volgen gedrag of handelswijze’ en niet van een ‘bindend voorschrift’¹. Het gaat om privaatrechtelijke richtlijnen voor de ondersteuning in de dagelijkse praktijk van de bedrijfsvoering (‘best practices’) in het gehele traject van bron tot tap. De richtlijnen (soms ook aangeduid als ‘leidraad’) worden sinds 2008 opgesteld en hebben in 2015 de aanduiding ‘Praktijkcode Drinkwater’ (PCD) gekregen.

Verantwoording

Praktijkcodes worden doorgaans opgesteld in opdracht van het Platform Bedrijfsvoering, waarin vertegenwoordigers van alle Nederlandse drinkwaterbedrijven en het Vlaamse bedrijf Pidpa participeren. Ook in opdracht van andere gremia kunnen praktijkcodes worden opgesteld. Dit Platform heeft het beheer van praktijkcodes gedelegeerd aan de Begeleidingsgroep Praktijkcodes, die de ‘eigenaarsrol’ vervult. Ook in die groep participeert in beginsel één vertegenwoordiger per bedrijf. De voorzittersrol wordt vervuld door een van deze vertegenwoordigers, terwijl KWR Water Research Institute dat doet ten aanzien van de rol van secretaris.

Totstandkoming en kwaliteitsborging

Een specifieke praktijkcode of een revisie daarvan (zie onder) komt met inhoudelijke bijdragen van deskundigen van drinkwaterbedrijven en onderzoekers van KWR Water Research Institute interactief tot stand onder begeleiding van een projectgroep bestaande uit deskundigen van de drinkwaterbedrijven en/of –laboratoria. De leden van die projectgroep worden aangezocht vanwege hun specifieke kennis en/of vaardigheden die noodzakelijk is/zijn voor het betreffende onderwerp. Het voorzitterschap wordt in beginsel ingevuld door een vertegenwoordiger van de drinkwaterbedrijven; KWR Water Research Institute vervult het secretariaat en rapporteert de voortgang aan de Begeleidingsgroep Praktijkcodes. Soms maken drinkwaterbedrijven gebruik van de mogelijkheid om zich als agendalid van een projectgroep te laten registreren.

Na vaststelling van een praktijkcode door de begeleidende projectgroep wordt die ter formele vaststelling voorgelegd aan de Begeleidingsgroep Praktijkcodes.

Openbaarheid

Praktijkcodes Drinkwater zijn openbaar. Een actueel overzicht van alle praktijkcodes is te vinden op de website www.PraktijkcodesDrinkwater.nl.

Periodieke actualisatie

Bestaande praktijkcodes worden periodiek geëvalueerd. In beginsel is er sprake van een ‘vijfjaarsrevisie’: primair wordt de vraag gesteld en bediscussieerd of actualisatie gewenst dan wel noodzakelijk is en als dat het geval blijkt te zijn, wordt die volgens een afgesproken procedure projectmatig geactualiseerd. De vorige editie van een praktijkcode is daarbij uitgangspunt. Als actualisatie niet gewenst of noodzakelijk blijkt te zijn, wordt een praktijkcode in principe opnieuw voor een periode van vijf jaar vastgesteld.

¹ Beide omschrijvingen zijn afkomstig uit ‘Van Dale’.

Voorwoord

Editie

Dit is de eerste editie van een praktijkcode op het gebied van membraanfiltratie van water ten behoeve van de bereiding van drinkwater. Uitgangspunten voor de totstandkoming daarvan waren met name:

- de opbrengsten van een in 2023 uitgevoerd 'voortraject', waarbij een inventarisatie heeft plaatsgevonden met betrekking tot binnen de drinkwatersector in de achterliggende decennia opgestelde rapporten en andere publicaties op dat gebied;
- relevante documenten zoals documenten ((beleids)voorschriften) van de drinkwaterbedrijven die in de projectgroep participeerden;
- ervaringen van drinkwaterbedrijven die in de projectgroep participeerden;
- de Nederlandse vertaling van relevante delen van het Duitse werkblad ('Arbeitsblatt') W 213-5² [41].

Status

Deze praktijkcode PCD 23 op het gebied van de membraanfiltratie van water is 'voorschrijvend' van karakter, dat wil zeggen dat het gaat om een richtlijn in de zin van een vakinhoudelijke aanbeveling van een te volgen gedrag of handelswijze, of 'best practice'. Voor (een korte beschrijving van) de vier verschillende statussen die bij praktijkcodes worden onderscheiden, wordt verwezen naar de webpagina Introductie praktijkcodes - Praktijkcodes Drinkwater van de website www.PraktijkcodesDrinkwater.nl

Begrippen

Op het gebied van membraanfiltratie specifieke begrippen met hun bijbehorende omschrijving zijn opgenomen in Bijlage I. Voor (de omschrijving van) algemene begrippen op het gebied van de drinkwatervoorziening wordt verwezen naar de webpagina Begrippenlijst - Praktijkcodes Drinkwater van de website www.PraktijkcodesDrinkwater.nl In genoemde Bijlage I zijn tevens de in voorliggende praktijkcode gehanteerde afkortingen opgenomen met de bijbehorende betekenis. Die betekenis is (daarom) in de hoofdttekst weggelaten.

Samenstelling projectgroep

De samenstelling van de projectgroep die de totstandkoming van deze praktijkcode heeft begeleid, is hieronder weergegeven. De deelnemers zijn per bedrijf in alfabetische volgorde vermeld.

² In dit document zijn enkelvoudig onderstreepte zaken van een hyperlink voorzien, bij dubbel onderstreepte zaken gaat het om het leggen van nadruk.

Drinkwaterbedrijf of –laboratorium

Brabant Water

Dunea

Evides Waterbedrijf

KWR Water Research Institute

Oasen

Pidpa

PWN

Vitens

Waterbedrijf Groningen

Waternet

WMD Drinkwater

WML

Vertegenwoordiger(s)

Tim van Dijk

Timon Rijnaarts

Franca Kramer

Bor Jansen

Peter Vollaard

Tessa van den Brand (secretaris)

Danny Harmsen

Morez Jafari

Koen Joris (agendalid)

Aisha Malik

Herman Smit

Bas Rietman (voorzitter)

Astrid Mous (WLN)

Rob van Ewijk

Astrid Mous (WLN)

geen

Vaststelling praktijkcode

Deze praktijkcode is vastgesteld door de Begeleidingsgroep Praktijkcodes in de vergadering van 11 december 2025.

Beheer van de praktijkcode

Commentaar of opmerkingen betreffende de opzet en/of de inhoud van deze praktijkcode kunnen per e-mail worden verzonden aan KWR Water Research Institute: pcd@kwrwater.nl Indien van toepassing zal een en ander worden gebruikt als input voor een volgende editie van het document.

Inhoud

Inhoud	6
1 Inleiding	8
1.1 Introductie	8
1.2 Doel	8
1.3 Leeswijzer	8
2 Introductie membraanfiltratie	9
2.1 Membraanfiltratie (algemeen)	9
2.2 Terminologie	11
2.3 Bedrijfsvoering	12
2.4 Moduledesign	13
2.4.1 Inleiding tot membraantechnologie	13
2.4.2 Membraanmateriaal	13
2.4.3 Membraanmodules	13
2.5 Bedrijfsvoering membraanfiltratie	17
2.5.1 Voor- en nabehandeling	17
2.5.2 Vervuiling	17
2.5.3 Reiniging	21
2.5.4 Kosten en energieverbruik	22
2.6 Het kiezen van een methode	22
2.7 Algehele instructies op basis van (verschillende) internationale normen	23
3 Micro- en ultrafiltratie	24
3.1 Introductie	24
3.1.1 Microfiltratie	24
3.1.2 Ultrafiltratie	24
3.2 Toepassingen	24
3.3 Ontwerp	25
3.4 Bedrijfsvoering	25
3.4.1 Voorbehandeling	26
3.4.2 Reiniging	27
3.4.3 Integriteitsbewaking	28
3.5 Casussen	29
3.6 Ontwikkelingen	29
3.6.1 Keramische MF/UF (laatste 10 – 15 jaar)	29
3.6.2 Bedrijfsvoering	29
3.6.3 Overige ontwikkelingen	29
4 Nanofiltratie en omgekeerde osmose	30
4.1 Introductie	30
4.1.1 Nanofiltratie	30
4.1.2 Omgekeerde osmose	30

4.2	Toepassing	31
4.3	Ontwerp	33
4.4	Bedrijfsvoering	34
4.4.1	Voorbehandeling/nabehandeling	34
4.4.2	(Beheersen) vervuiling	35
4.4.3	Integriteitsbewaking	36
4.4.4	Reststromen	38
4.5	Casussen	39
4.6	Ontwikkelingen	39
4.6.1	Nieuwe membranen	39
4.6.2	Nieuwe configuraties	40
5	Regelgeving	41
5.1	Introductie	41
5.2	Publiek rechtelijke regelgeving: gezondheidskundige aspecten	41
5.2.1	Op materialen gebaseerde producten ten behoeve van installaties	42
5.2.2	Op chemicaliën gebaseerde producten ten behoeve van reiniging en desinfectie van installaties, en van de zuivering	42
5.3	Privaatrechtelijke regelgeving	43
5.3.1	Op chemicaliën gebaseerde producten	43
5.3.2	Optimale samenstelling van drinkwater	43
6	Literatuur	44
I	Begrippen met bijbehorende omschrijving en afkortingen inclusief acroniemen met bijbehorende betekenis	48
II	Aanbevolen bronnen voor extra informatie	54
III	In deze praktijkcode genoemde en daarvoor relevante normen	55
IV	In deze praktijkcode genoemde en daarvoor relevante beoordelingsrichtlijnen	56
V	Overzicht van overige KIWA/Kiwa/KWR documenten/publicaties op het gebied van membraanfiltratie (opbrengsten voortraject)	57
VI	Casussen op het gebied van MF, UF, NF en RO	66

1 Inleiding

1.1 Introductie

Membraanfiltratie wordt sinds het einde van de jaren negentig van de vorige eeuw toegepast bij de bereiding van drinkwater in Nederland [12, 21]. Zo worden microfiltratie (MF) en ultrafiltratie (UF) toegepast voor de productie van een specifieke waterkwaliteit. Dit water wordt bijvoorbeeld geleverd aan consumenten met specifieke wensen of wordt verder behandeld met omgekeerde osmose (RO). MF en UF worden ook ingezet voor de behandeling van spoelwater. Nanofiltratie (NF) en RO toepassingen bij de bereiding van drinkwater zijn ontzouting, ontharding en verwijdering van organische microverontreinigingen. Ook kunnen die dienen als een (extra) barrière tegen bacteriën en virussen [12, 21].

1.2 Doel

In deze praktijkcode worden de volgende druk gedreven membraantechnieken behandeld:

- microfiltratie (MF);
- ultrafiltratie (UF);
- nanofiltratie (NF);
- omgekeerde osmose (RO).

1.3 Leeswijzer

Na dit inleidende hoofdstuk volgt een hoofdstuk met een introductie op het gebied van membraanfiltratie. Vervolgens wordt in de hoofdstukken 3 en 4 nader inhoudelijk ingegaan op micro- en ultrafiltratie respectievelijk nanofiltratie en omgekeerde osmose. In hoofdstuk 5 komt het assetmanagement van membraanfiltratie-installaties aan de orde. Hoofdstuk 6 beschrijft de publiek- en privaatrechtelijke regelgeving op het gebied van membraanfiltratie van water ten behoeve van de bereiding van drinkwater. Ten slotte geeft hoofdstuk 7 een overzicht met literatuurbronnen waaraan in deze praktijkcode wordt gerefereerd.

Bijlage I van deze praktijkcode is in het bovenstaande Voorwoord al ge- en benoemd. In Bijlage II zijn aanbevolen referenties voor extra informatie op het gebied van membraanfiltratie opgenomen. De in de voorliggende praktijkcode expliciet genoemde (inter)nationale normen van het nationale normalisatie-instituut NEN zijn niet opgenomen in hoofdstuk 7 'Literatuur', maar worden overzichtelijk (op nummer) genoemd in Bijlage III. Europese normen voor chemicaliën ten behoeve van de bereiding van drinkwater worden niet expliciet genoemd in deze praktijkcode. Voor een overzicht van die normen wordt verwezen naar praktijkcode PCD 17 [39] en dan met name Bijlage II daarvan. Voor membraanfiltratie zijn vooral antiscalants, reinigingsmiddelen³ en desinfectiemiddelen relevant. Bijlage IV bevat een overzicht van in de voorliggende praktijkcode expliciet genoemde beoordelingsrichtlijnen van certificatie-instelling Kiwa Nederland. Ten slotte wordt in Bijlage V een overzicht gegeven van documenten en publicaties op het gebied van membraanfiltratie zoals die in de achterliggende decennia zijn geschreven door (en verschenen bij) 'het Keuringsinstituut voor Waterleidingartikelen KIWA N.V.', Kiwa Onderzoek en Advies, Kiwa Water Research (eerdere entiteiten van het huidige onderzoeksinstituut) en KWR Water(cycle) Research Institute, en die niet zijn opgenomen in hoofdstuk 7 'Literatuur'.

³ Op basis van de definitie van 'chemicaliën' in de publiekrechtelijke regelgeving voor drinkwater behoren reinigingsmiddelen in formele zin niet tot die groep, zie verder.

2 Introductie membraanfiltratie

2.1 Membraanfiltratie (algemeen)

Membraanfiltratie is een technologie waarbij water wordt gezuiverd door het onder druk door een semipermeabel membraan te persen. Dit membraan laat water door, maar houdt ongewenste stoffen zoals deeltjes, bacteriën, virussen, organische stoffen en zouten tegen. De werking is gebaseerd op de grootte van de poriën in het membraan.

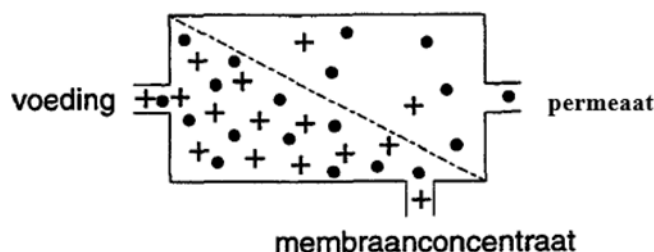
In deze praktijkcode wordt uitsluitend drukgedreven membraanfiltratie behandeld. Andere vormen, zoals elektrodialyse (aangedreven door elektrische spanning) vallen buiten de scope.

Afhankelijk van het type membraan worden verschillende stoffen tegengehouden. De membraantechnieken worden doorgaans ingedeeld op basis van hun poriegrootte of de zogenaamde *molecular weight cut-off* (MWCO): het molecuulgewicht waarbij 90% van de stoffen wordt tegengehouden. Van groot naar klein porieformaat worden onderscheiden:

- *microfiltratie (MF)*;
- *ultrafiltratie (UF)*;
- *nanofiltratie (NF)*;
- *omgekeerde osmose (RO)*.

Membraanfiltratie waarbij druk als drijvende kracht wordt gebruikt, kan schematisch volgens Figuur 2-1 worden weergegeven. In dit proces wordt het voedingswater onder druk langs of door het membraan geleid. Het membraan laat uitsluitend watermoleculen door (en eventueel enkele opgeloste stoffen, afhankelijk van het type membraan), terwijl de meeste ongewenste stoffen zoals deeltjes, micro-organismen, zouten en organisch materiaal worden tegengehouden. Deze geconcentreerde reststroom wordt aangeduid als het concentraat. Deze stroom moet doorgaans worden afgevoerd of verder worden behandeld. Het gefilterde water dat door het membraan is gegaan, wordt het permeaat genoemd. Zo ontstaat er een scheiding tussen gezuiverd water en de achtergebleven verontreinigingen [1].

Bij membraantechnieken kunnen dus altijd drie waterstromen worden onderscheiden, namelijk de *voeding*, het *permeaat* en het *concentraat*.



Figuur 2-1 Drukgedreven membraanfiltratieproces.

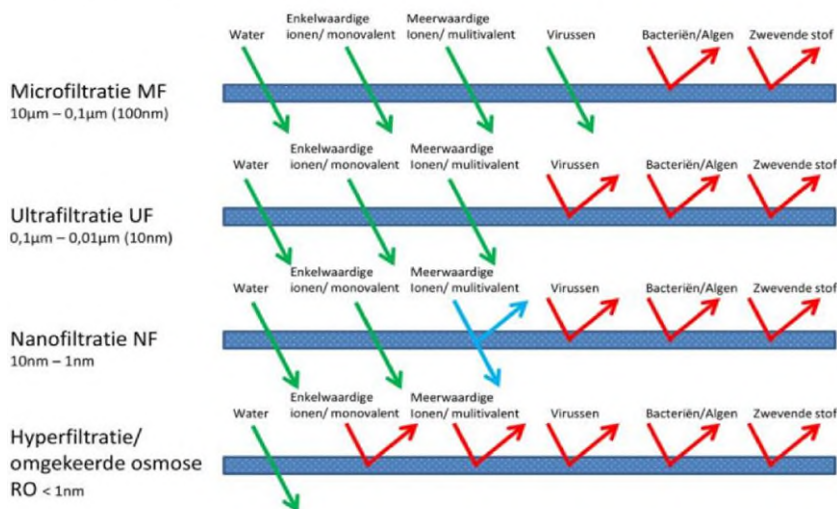
Tabel 2-1 geeft een overzicht van enkele karakteristieke eigenschappen van genoemde membraantechnieken. Omdat micro- en ultrafiltratie veel gelijkenissen kennen (evenals NF en RO) zullen deze twee groepen gezamenlijk

worden behandeld. *Figuur 2-2* geeft een weergave van welke deeltjes/stoffen per techniek worden tegengehouden [2].

Tabel 2-1 Karakterisering van verschillende membraanfiltratietechnieken [3, 4].

Membrantechniek	Toegepaste voedingsdruk (kPa)	MWCO (vanaf circa) (Da)	Minimum deeltjesgrootte verwijdering	Toepassing(en)
MF	30 – 500	100.000	0,1 – 3 µm	Verwijderen deeltjes/troebelheid Verwijdering van bacteriën en protozoa
UF	30 – 500	1.000	0,1 – 3 µm > 1.000 (log 3)	Verwijderen deeltjes/troebelheid Desinfectie
NF	500 – 1.000	250	200 – 400 Da Multivalente ionen	Desinfectie Ontharding Precursor en verwijdering SOC Verwijdering bestrijdingsmiddelen
RO	700 – 8.000	50	> 50 – 200 Da In principe alle ionen	Desinfectie Ontharding Precursor en verwijdering SOC Verwijdering bestrijdingsmiddelen Ontzouting

Vergelijking membraan technieken



Figuur 2-2 Verschillende membraantechnieken en hun scheidend vermogen (retentie) voor diverse componenten in het voedingswater [2].

2.2 Terminologie

Bij de toepassing van membraantechnieken wordt er specifieke terminologie gebruikt. De belangrijkste termen worden in het onderstaande beknopt beschreven. Voor de overige begrippen wordt verwezen naar Bijlage I.

Zoals al in § 2.1 is vermeld, is membraanfiltratie een technologie waarbij voedingswater (de aangevoerde, nog te zuiveren waterstroom) onder druk door een membraan wordt geleid. Dit membraan is semipermeabel, wat betekent dat het bepaalde stoffen zoals verontreinigingen, micro-organismen of zouten tegenhoudt, terwijl gezuiverd water gedeeltelijk het membraan passeert.

De prestaties van een membraan worden onder meer bepaald door (zie [5]) de *waterflux* oftewel de hoeveelheid water die per vierkante meter membraanoppervlak per uur wordt doorgelaten ($\text{l/m}^2 \cdot \text{h}$). Deze waterflux is afhankelijk van de *Trans Membraan Druk* (TMP) en de *waterpermeabiliteit* of massatransportcoëfficiënt (MTC), die de verhouding tussen flux en druk weergeeft ($\text{l/m}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{kPa}$).

De Trans Membraan Druk (TMP) is de druk die nodig is om water door een membraan te persen. De TMP wordt gedefinieerd als de drukgradiënt van het membraan oftewel de gemiddelde voedingsdruk minus de permeaatdruk. De voedingsdruk wordt vaak gemeten op het beginpunt van een membraanmodule. De TMP wordt weergegeven in bar.

Voor NF en RO wordt naast de TMP ook de *netto drijvende kracht* (NDP) gebruikt. De NDP is de effectieve kracht waarmee water door het membraan wordt gedrukt. Deze wordt bepaald door het verschil tussen de voedingsdruk enerzijds en de permeaatdruk plus de *osmotische druk* aan de voedingszijde anderzijds. Een voldoende NDP is essentieel voor een goede flux.

De retentie is het percentage van een specifieke stof dat door het membraan wordt tegengehouden. De zoutpassage is het omgekeerde: het deel dat door het membraan heen gaat. Beide parameters zijn belangrijk bij het beoordelen van de effectiviteit van een membraan voor specifieke verontreinigingen.

Naast hydraulische eigenschappen is ook de *selectiviteit* van een membraan van belang oftewel de mate waarin het membraan onderscheid maakt tussen stoffen die het doorlaat en stoffen die het tegenhoudt. Dit wordt vaak uitgedrukt als *retentie*, bijvoorbeeld het percentage zout dat wordt tegengehouden. De *A-* en *B-factoren* zijn

kenmerkende parameters van een membraan die de waterdoorlaatbaarheid (A) respectievelijk de zoutdoorlaatbaarheid (B) beschrijven. Een hoge A/B-verhouding duidt op een goed selectief membraan. Bij NF en RO membranen is de zoutdoorlaatbaarheid vaak ion-specifiek en is er een retentie per ion/zout te bepalen. Het is zelfs mogelijk (vooral bij nanofiltratie, in mindere mate bij RO) dat de zoutdoorlaatbaarheid afhankelijk is van de concentratie van verschillende zouten in de voeding naar het membraan.

De daadwerkelijke overdracht van opgeloste stoffen door het membraan wordt verder beïnvloed door de '*mass transfer coefficient*' (MTC). Deze parameter beschrijft hoe snel water of opgeloste stoffen door het membraanoppervlak bewegen en wordt beïnvloed door de flux, NPD en temperatuur.

Bij een lagere flux neemt de *zoutpassage* per eenheid gepasseerd volume toe en de kwaliteit van het permeaat af. Dit komt omdat de zoutpassage wordt gedreven door diffusie en redelijk onafhankelijk is van de flux. Bij een lagere flux zal ongeveer evenveel zout het membraan passeren per tijdseenheid in een kleiner volume water, waardoor de zoutconcentratie in het permeaat toeneemt (bij een hogere flux passeert meer water, waardoor het permeaat minder zout bevat per volume eenheid en daarom wordt dit het '*dilution effect*' dan wel een verdunningseffect genoemd).

Bij het ontwerpen en monitoren van een membraansysteem is ook de *drukval over het voedingskanaal* een belangrijke parameter. Een toename van de drukval tussen de inlaat en de uitlaat van het voedingskanaal in de tijd kan duiden op vervuiling of verstopping van het membraan.

Tot slot is de *recovery* een belangrijke prestatie-indicator of ontwerpkeuze: dit is het percentage van het voedingswater dat wordt omgezet in permeaat. Hoe hoger de recovery, hoe efficiënter het systeem omgaat met het voedingswater, maar er zijn grenzen vanwege het risico op scaling of *concentratiepolarisatie* bij te hoge concentraties in het concentraat.

Om de performance van verschillende membranen met elkaar te vergelijken, dienen de TMP, flux, permeabiliteit en drukval over het voedingskanaal te worden genormaliseerd voor onder andere de temperatuur. Dit geldt ook voor de osmotische druk (uitsluitend bij NF en RO). De gebruikte formules en verdere uitleg over alle bovengenoemde parameters met inbegrip van de genormaliseerde parameters zijn uitgebreid beschreven in het rapport SWI 99.166 [5].

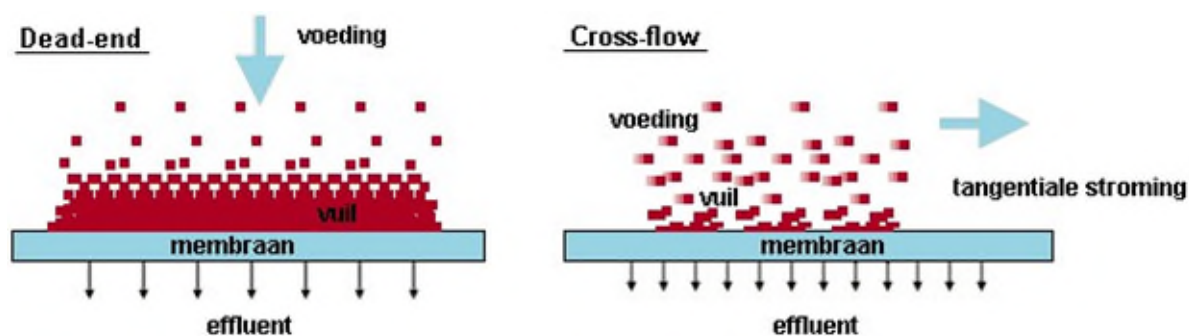
2.3 Bedrijfsvoering

Membraanfiltratie kan op verschillende manieren worden bedreven, afhankelijk van het gewenste product, de toegepaste membraantechniek en de karakteristieken van het voedingswater. De twee meest voorkomende bedrijfsmodi zijn *cross-flow* en *dead-end* filtratie (zie Figuur 2-3 en [1]). Bij *cross-flow* stroomt het voedingswater langs het membraanoppervlak. Een deel van het water passeert het membraan als permeaat, terwijl de rest als concentraat wordt afgevoerd. Dit proces is continu en helpt vervuiling tegen te gaan doordat de stroming langs het membraan de afzetting van deeltjes beperkt. Bij *dead-end* filtratie wordt daarentegen al het voedingswater door het membraan geperst. Er is geen constante concentraatvoer: de vervuiling bouwt zich op aan het membraanoppervlak en wordt periodiek verwijderd via een terugspoeling (*backwash*, BW). Deze werkwijze is discontinu van aard.

Uit de praktijk blijkt dat *dead-end* filtratie doorgaans energiezuiniger is en leidt tot minder spoelwaterverlies, wat resulteert in een hoger waterhergebruik. *Dead-end* wordt uitsluitend toegepast bij MF en UF, omdat deze systemen kunnen worden teruggespoeld. Bij NF en RO is dat niet mogelijk.

Naast deze twee methoden bestaat ook de *feed-and-bleed* bedrijfsvoering. Hierbij wordt een deel van het voedingswater continu gerecirculeerd over het membraan, terwijl gelijktijdig een even grote hoeveelheid permeaat en concentraat wordt afgevoerd. Dit creëert een zogenaamde *steady-state*-situatie, waarbij het voedingswater

meerdere keren wordt geconcentreerd (bijvoorbeeld twee- tot viervoudig), wat gunstig kan zijn voor het verhogen van de recovery.



Figuur 2-3 Schematische weergave dead-end en cross-flow filtratie.

2.4 Moduledesign

2.4.1 Inleiding tot membraantechnologie

Er zijn verschillende soorten membranen en *modules* die elk hun eigen voordelen bieden, afhankelijk van het type water dat moet worden gefilterd en de specifieke eisen van de installatie. In dit onderdeel worden de verschillende soorten membranen besproken en de wijze waarop die in modules worden verwerkt om efficiënt water te zuiveren. Een uitgebreide beschrijving van de historie met betrekking tot de ontwikkeling van membranen is terug te vinden in [6].

2.4.2 Membraanmateriaal

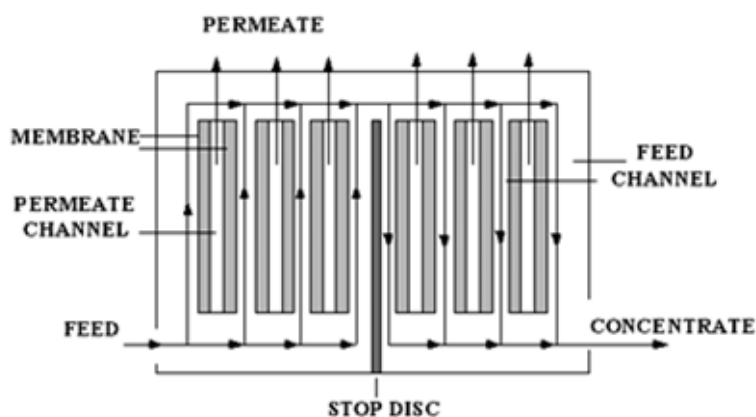
Membranen kunnen uit verschillende materialen worden gemaakt, bijvoorbeeld uit polymeren of keramiek. Polymeer membranen zijn vaak goedkoper en ruimte besparend. Keramische membranen staan bekend om hun uitzonderlijke chemische en fysische stabiliteit, wat zorgt voor een langere levensduur. De laatste jaren worden steeds vaker composietmembranen (polymeer) toegepast. Hierin zijn voor spiraalgewonden membranen twee mogelijkheden. De eerste is een tweelaags UF of MF membraan, bestaande uit een microporeuze laag (50 – 75 μm), gedragen door een poreus draagvlak (120 – 150 μm) dat is samengesteld uit polyester. De tweede mogelijkheid is een drielaags NF of RO membraan waarbij op het UF membraan een dunne selectieve top laag (0,1 μm) van polyamide of gesulfoneerde polymeren is aangebracht. Deze membranen bieden betere prestaties dan traditionele membranen, zoals een hogere flux en een betere filtratiecapaciteit [6]. Ook zijn ze niet samendrukbaar en niet biologisch afbreekbaar, en is er geen sprake van hydrolyse. Waarschijnlijk pakken de kosten voor dergelijke membranen wel hoger uit.

2.4.3 Membraanmodules

De membranen worden in modules verwerkt om ze efficiënt te kunnen gebruiken. Er zijn vier verschillende typen modules, die elk geschikt zijn voor verschillende toepassingen [7]. Hieronder worden de belangrijkste types beschreven.

Plate-and-frame modules

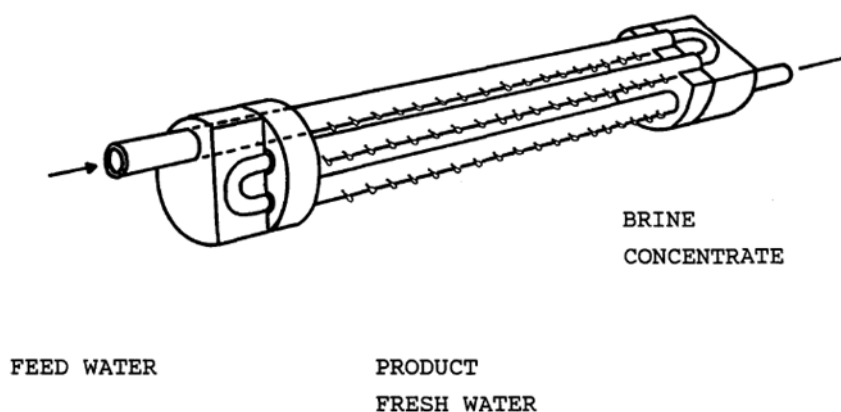
Plate-and-frame modules bestaan uit platte membranen die in een soort sandwichstructuur zijn geplaatst. Tussen de membranen zitten poreuze lagen die zorgen voor de doorstroming van water. Dit type module heeft een lage oppervlakte-per-volume-verhouding en wordt vaak gebruikt voor kleinere toepassingen. Ze zijn ideaal voor nichetoepassingen, zoals de toepassing van vlakke plaat keramische membranen bij spoelwaterhergebruik. Voor grootschalige waterbehandelingssystemen zijn ze minder geschikt, omdat deze modules een lage verhouding tussen oppervlakte en volume hebben. Een schematische weergave van een plate-and-frame module is weergegeven in Figuur 2-4.



Figuur 2-4 Schematische weergave van een plate-and-frame module [42].

Tubulaire modules

Tubulaire membranen worden geplaatst in een buis (vaak van RVS, keramiek of kunststof). De buisdiameter is groter dan 5 mm. Het water stroomt door het midden van de buis, terwijl het gezuiverde water door de buiswand naar buiten komt. Een schematische weergave van een tubulair systeem is weergegeven in *Figuur 2-5*. Deze modules zijn goed geschikt voor situaties waarbij het water veel onzuiverheden bevat, zoals grote hoeveelheden gesuspendeerde deeltjes. Ze kunnen goed omgaan met turbulente stromingsomstandigheden en kunnen worden gereinigd met schuimballen (momenteel niet toegepast in Nederland).



Figuur 2-5 Schematische weergave tubulair membraansysteem [3].

Holle rietjes en capillaire modules

Holle rietjes en capillaire modules zijn bijzonder compact en hebben doorgaans een diameter die ligt tussen 0,5 – 1,0 mm. Ze bestaan uit duizenden dunne rietjes die in een bundel zijn geplaatst en aan de vrije uiteinden zijn ingesloten door bijvoorbeeld epoxy. Het voedingswater kan door deze rietjes stromen, terwijl het gezuiverde water aan de andere kant wordt opgevangen (inside - out bedrijfsvoering, zie *Figuur 3-2*). Dit type module heeft de hoogste pakdichtheid van alle types, wat betekent dat ze erg efficiënt zijn in termen van ruimtegebruik. Een schematische weergave van een holle rietjes module is weergegeven in *Figuur 2-6*.



Figuur 2-6 Schematische weergave holle rietjes module (zie de webpagina [Wat is een holvezelmembraan? - Leverancier van waterbehandeling](#)).

Spiraalgewonden modules

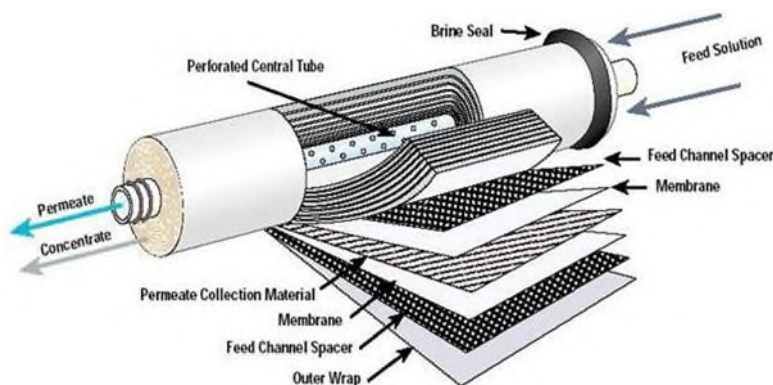
Het meeste onderzoek op het gebied van membranen heeft plaatsgevonden met *spiraalgewonden* modules en hierover zijn (dus) de meeste gegevens beschikbaar. Bij spiraalgewonden membranen worden de membraanvellen als een zogenaamde gevouwen envelop bevestigd. Deze enveloppen worden gescheiden door 'voedingsspacers'. Bij een spiraalgewonden module wordt een membraanvel gewikkeld rond een centrale verzamelbuis (permeaatbuis) waarin gaatjes zijn aangebracht.

De membranen worden langs drie zijden gelijmd om enveloppen te vormen die zijn bevestigd aan een permeaatbuis langs de niet-afgedichte rand van het vel. Een envelop is als volgt opgebouwd (Figuur 2-7). Het eerste membraanvel is met de voedingszijde gericht naar de voedingsspacer. Aan de permeatzijde van het membraanvel wordt een permeaatspacer geplaatst. De permeaatspacer zorgt voor ondersteuning van het membraan. Deze permeaatspacer is poreus en leidt het permeaat naar de permeaatbuis. Vervolgens wordt er een tweede membraanvel bevestigd waarbij de permeatzijde in de richting van de permeaatspacer wijst en de voedingszijde in de richting van een voedingsspacer (een netachtig vel). Een voedingsspacer wordt tussen de membraanvellen geplaatst om de kanaalhoogte (doorgaans 1 tot 2 mm) van de voedingskanalen te bepalen.

De hoogte van spacers wordt uitgedrukt in mill (= duizendste inch, bijvoorbeeld 28 mill = 0,7 mm). De hoogte van de spacers kan variëren en typische hoogtes zijn 28 – 34 mill. Een hogere spacer verstopt minder snel (dus minder schoonmaken), maar heeft ook minder membraanoppervlak (dus minder productie).

Met betrekking tot spacers zijn er zijn verschillende vormen: ruitvormige en parallel-spacers. De laatste wordt toegepast voor sterk vuilafzettende stromen. Een meer gedetailleerde omschrijving over spacers is terug te vinden in 'Review, Optimal design of spacers in reverse osmosis' [8].

De enveloppen worden om de permeaatbuis gewikkeld en van een buitenmantel (Figuur 2-7) voorzien. Dit ontwerp zorgt voor een hoge pakkingsdichtheid ($300 - 1.000 \text{ m}^2/\text{m}^3$).



Figuur 2-7 Spiraalgewonden module.

Vergelijking van de verschillende modules

De keuze van het type module hangt af van verschillende factoren, zoals het type water dat moet worden gefilterd. Dat geldt verder voor de vereiste kwaliteit van het permeaat, de kosten voor energie en onderhoud, en de mogelijke vervuiling van het membraan. In

Tabel 2-2 wordt een overzicht gegeven van de belangrijkste eigenschappen van de verschillende moduletypes. Deze tabel biedt een gedetailleerde vergelijking van de modules op basis van vier belangrijke criteria: pakdichtheid, investering, vervuilingstendens en reinigingsgemak. Daarnaast wordt er gekeken naar de mate van standaardisatie van de moduletypen.

- Pakdichtheid (m^2/m^3)
Dit geeft aan hoeveel membraanoppervlak er in een kubieke meter module kan worden verpakt.
- Investering
De initiële kosten voor de aanschaf en installatie van de modules worden hierin weergegeven. Tubulaire modules vereisen een hogere investering door de complexe opzet, terwijl holle rietjes modules over het algemeen goedkoper zijn om te implementeren. Plate-and-frame modules liggen hier tussenin, met een gemiddelde investering.
- Vervuilingstendens
Dit geeft aan hoe snel het membraan vervuult tijdens het gebruik. Tubulaire modules hebben de laagste vervuilingstendens, waardoor die ideaal zijn voor toepassingen met vervuilende stoffen in het water, zoals bij hoge concentraties deeltjes. Aan de andere kant hebben holle rietjes modules een zeer hoge vervuilingstendens, waardoor ze sneller moeten worden gereinigd en mogelijk vaker onderhoud vereisen.
- Reiniging
De mogelijkheid om het membraan effectief te reinigen, speelt een grote rol in de keuze voor een type module. Tubulaire modules scoren goed op dit gebied, aangezien die eenvoudig kunnen worden gereinigd. Spiraalgewonden modules daarentegen hebben een minder efficiënte reiniging.
- Standaardisatie
Dit verwijst naar de mate waarin de modules zijn gestandaardiseerd voor productieprocessen. Voor spiraalgewonden modules is dat het geval. De modules zijn uitwisselbaar, onafhankelijk van de fabrikant. Een installatie (drukbuizen) hoeft niet te worden aangepast. Andere types zoals tubulaire, plate-and-frame en capillaire modules, zijn niet gestandaardiseerd. Dat betekent dat het membraan van fabrikant A niet kan worden geplaatst in het systeem van fabrikant B en in dergelijke gevallen kan daarom meer maatwerk noodzakelijk zijn. In sommige gevallen bieden leveranciers ombouwsets om een ander type membraan op de plek van een concurrent in te kunnen bouwen.

Op basis van deze eigenschappen kunnen verschillende moduletypes geschikt zijn voor specifieke toepassingen. Bij MF en UF worden vaak tubulaire, holle rietjes en capillaire modules gebruikt, aangezien deze goed presteren bij relatief vervuilde voedingen. Voor NF en RO daarentegen worden vooral spiraalgewonden membranen gekozen vanwege hun hoge efficiëntie en standaardisatie.

Tabel 2-2 Vergelijking van verschillende type modules (deze tabel is gebaseerd op gegevens [7] en aangevuld door Thom van Harten van KWR Water Research Institute).

Type Module	Tubulair	Plate and Frame	Spiraalgewonden	Capillair	Holle rietjes
pakdichtheid (m ² /m ³)	laag (70 – 400)	(200 – 500)	(500 – 1.000)	(500 – 1.200)	zeer hoog (500 – 5.000)
investering	hoog	middel	laag	laag	
vervuilingstendens	laag	laag	zeer hoog	zeer hoog	
reiniging (terugspoeling)	goed	goed	zeer slecht	goed	goed
reiniging (CIP)	slecht/re- delijk	slecht/rede- lijk	goed	slecht/redelijk	slecht/redelijk
standaardisatie	nee	nee	ja	nee	nee

2.5 Bedrijfsvoering membraanfiltratie

Bij de implementatie van membraanfiltratie spelen verschillende belangrijke aspecten een rol die verder gaan dan het filtratieproces zelf. Naast de keuze van het type membraan en de configuratie van de modules zijn ook de voorbehandeling van het water en het beheer van vervuiling en de reiniging van de membranen cruciaal voor een efficiënte werking van het systeem. Elk van deze aspecten draagt bij aan de algehele prestaties, levensduur en kosten van het membraansysteem, de zogenoemde bedrijfsvoering aspecten. In de subparagrafen van deze paragraaf worden deze aspecten verder besproken.

2.5.1 Voor- en nabehandeling

Een goede voorbehandeling van het water is cruciaal voor een efficiënte werking van membraanfiltratiesystemen. De voorbehandeling is afhankelijk van de specifieke techniek die wordt toegepast. Daarnaast zullen er altijd reststromen ontstaan tijdens het proces, waarvoor een geschikte nabehandeling nodig is. De specifieke voor- en nabehandelingstechnieken die kunnen worden toegepast, worden verder besproken in de desbetreffende hoofdstukken van deze praktijkcode over de verschillende membraanfiltratietechnieken.

2.5.2 Vervuiling

Vervuiling van membranen is een onvermijdelijk proces bij de toepassing van membraanfiltratie en kan leiden tot een verminderde efficiëntie van het systeem. Het gevolg van vervuiling is een afname van de doorstroming (flux), een toename van de drukval over de membranen en/of een verslechtering van de productkwaliteit. Dit leidt uiteindelijk tot hogere energie- en onderhoudskosten. Vervuiling kan op verschillende manieren optreden, afhankelijk van het type water dat wordt gefilterd en de aard van de stoffen in het water. Er zijn verschillende mechanismen die bijdragen aan membraanvervuiling.

- Vervuiling door Natuurlijk Organisch Materiaal (NOM)
Organische stoffen in het water kunnen zich hechten aan het membraanoppervlak, wat leidt tot gelvorming

(gellaagvorming) en cakevorming (koekvorming) op het membraan. Deze stoffen kunnen tevens als voedingsbron dienen voor micro-organismen, wat de kans op biofouling vergroot. NOM bestaat voornamelijk uit biopolymeren, humuszuren en kleine organische moleculen, en uit calcium-NOM-complexen.

- Colloïdale vervuiling

Colloïden zijn fijne deeltjes die tussen de 1 nm en 1 μm groot zijn. Deze deeltjes komen veel voor in natuurlijk water, maar ook in industrieel en afvalwater. Colloïdale vervuiling kan bestaan uit anorganische deeltjes zoals klei, silica en metaaloxiden.

- Biofouling

Biofouling is de ophoping van micro-organismen (meestal bacteriën, maar ook algen en schimmels) op het membraanoppervlak en met name in de voedingsspace. Dit gebeurt in twee fasen: hechting en groei. In de hechtingsfase hechten de micro-organismen zich aan het membraanoppervlak of aan een bestaande biofilm. Vervolgens groeien de micro-organismen exponentieel, waarbij ze biomassa produceren die zich op het membraanoppervlak ophoopt. Deze biofilm versterkt de vervuiling door de cellen vast te houden en de menging van water op het membraanoppervlak te beperken.

- Scaling (afzetting)

Scaling ontstaat wanneer anorganische stoffen in het water hun oplosbaarheid overschrijden en neerslaan op het membraanoppervlak. Dit gebeurt bijvoorbeeld bij zouten zoals carbonaten, sulfaten en fosfaten. Scaling kan worden verminderd door het toevoegen van een antiscalant, pH-verlaging (toevoegen zuur), verhogen cross-flow langs het membraan of door de recovery van het systeem te verlagen, zodat er geen oververzadiging van de zouten kan plaatsvinden.

Membraanvervuiling kan meerdere oorzaken hebben die vaak tegelijk optreden en is daardoor erg complex. Colloïdale vervuiling, organische vervuiling, scaling en biofouling kunnen elkaar zelfs versterken. Daarnaast spelen chemische vervuiling, oxidatieve beschadiging en temperatuur ook een belangrijke rol bij membraanvervuiling [43, 44, 45, 46, 47]. De specifieke vervuiling die optreedt, is sterk afhankelijk van de waterkwaliteit, de toegepaste voorbehandeling en de operationele omstandigheden van het systeem. Elke membraanfiltratietechniek heeft zijn eigen specifieke vervuilingsmechanismen en vereist specifieke strategieën voor het beheersen van de vervuiling. Dit wordt verder uitgewerkt in de volgende hoofdstukken over de verschillende membraanfiltratietechnieken.

In

Tabel 2-3 zijn de mogelijke oorzaken van vervuilingen, de locatie in de membraaninstallatie en de effecten op de bedrijfsvoering voor RO installaties weergegeven. Tabel 2-4 bevat de voorgestelde reinigingsprocessen voor RO installaties. Deze zijn afkomstig van de firma Hydranautics en vertaald in het Nederlands. Beide tabellen zijn ook van toepassing op NF installaties met spiraalgewonden membranen.

Tabel 2-3: RO troubleshooting (uit Table 1, TSB107.27 van Hydranautics, zie de webpagina <https://membranes.com/wp-content/uploads/Documents/TSB/TSB107.pdf>).

Mogelijke oorzaak	Mogelijke locatie	Effect op drukval	Effect op voedingsdruk	Effect op zoutpassage
Metaaloxide vervuiling (bijvoorbeeld Fe, Mn, Cu, Ni, Zn)	1 ^e trap, 1 ^e element(en)	Snelle toename	Snelle toename	Snelle toename
Colloïdale vervuiling	1 ^e trap, 1 ^e element(en)	Geleidelijke toename	Geleidelijke toename	lichte toename
Minerale afzetting	Laatste trap, laatste element(en)	Matige toename	lichte toename	Duidelijk start van toename
Gepolymeriseerde silica	Laatste trap, laatste element(en)	Normaal of toename	Toename	Normaal of toename
Biologische vervuiling	Kan in elke trap voorkomen, waarschijnlijk 1 ^e elementen	Duidelijk start van toename	Duidelijk start van toename	Normaal tot lichte toename
Organische vervuiling (opgeloste NOM)	Alle trappen	Geleidelijke toename	Toename	Afname
Antiscalant vervuiling	Met name laatste trap	Normaal tot lichte toename	Toename	Normaal tot lichte toename
Schade door oxidanten (Cl ₂ , O ₃ , KMnO ₄)	Met name de 1 ^e trap	Normaal tot afname	Afname	Toename
Schade door Hydrolyse (pH buiten tolerantie)	Alle trappen	Normaal tot afname	Afname	Toename
Schade door schuren (fines van actieve-koolfiltratie, zand, et cetera)	Met name 1 ^e trap	Normaal tot afname	afname	Toename
O-ring lekkage (interconnectoren of adapters)	Kan overal optreden	Normaal tot afname	Normaal tot afname	Toename
Lijmrand lekkage door permeaat back pressure tijdens bedrijf of 'standby'	Met name 1 ^e trap	Normaal tot afname	Normaal tot afname	Toename
Lijmrand lekkage door gesloten permeaat afvoer tijdens reiniging of spoelen	Laatste element(en) van een trap.	Toename (Gebaseerd op eerdere vervuiling & hoge dP)	Toename (Gebaseerd op eerdere vervuiling & hoge dP)	Toename

Tabel 2-4 Voorgestelde reinigungsoplossingen (uit Table 3 TSB107.27 van Hydranautics).

Nummer	Bulkingrediënten	Hoeveelheden benodigd ten behoefte van 1 m ³ oplossing	Bijstellen pH	Temperatuur (°C)
1	citroenzuur (als 100% poeder)	20 kg	niet	40
2	STPP (natriumtripolyfosfaat, als 100% poeder)	20 kg	op pH = 10 brengen met HCl of H ₂ SO ₄	40
	Na-EDTA (Versene 220 of gelijkwaardig, als 100% poeder)	8,4 kg		
3	STPP (natriumtripolyfosfaat, als 100% poeder)	20 kg	op pH = 10 brengen met HCl of H ₂ SO ₄	40
	Na-DDBS (natriumdodecylbenzeensulfonaat, poeder)	0,26 kg		
4	HCl (voorkeur als 30 – 36%)	4,7 – 5 l	met HCl pH verlagen tot 2,5 met NaOH pH verhogen tot 2,5	35
5	natriumhydrosulfiet (als 100% poeder)	10,2 kg	niet	35
6	NaOH (als 100% poeder) (als 25 – 50% oplossing)	1,0 kg 1,3 – 2,6 l	met NaOH pH verhogen tot 11,5 met HCl pH verlagen tot 11,5	30
	SDS (natriumdodecylsulfaat, als poeder)	0,29 kg		
7	NaOH (als 100% poeder) (als 25 – 50% oplossing)	1,0 kg 1,3 – 2,6 l	met NaOH pH verhogen tot 11,5 met HCl pH verlagen tot 11,5	30

Een vergelijkbaar document is te vinden op de website van Dupont, zie [FilmTec™ Troubleshooting Grid Technical Manual Excerpt](#).

WLN heeft een intern document met een tabel (Tabel 2-5), waarin is aangegeven welke vervuiling mogelijk op welke locatie in de membraaninstallatie voorkomt en de effecten hiervan op de bedrijfsvoering voor RO installaties. Dit document is ook van toepassing op NF installaties.

Tabel 2-5 Interne tabel WLN voor RO troubleshooting.

Vervuiling	Mogelijke locatie	NpD	MTC	Zoutpassage
Metaaloxiden	1 ^e trap	normaal/verhoging	verlaging	normaal/verhoging
Colloïdale vervuiling	1 ^e trap	normaal/verhoging	verlaging	normaal/verhoging
Scaling	laatste trap	verhoging	verlaging	verhoging
Biofouling	elke trap	normaal/verhoging	verlaging	normaal/verhoging
Organische vervuiling	alle trappen	normaal	verlaging	verlaging/verhoging
Oxidatie (bijvoorbeeld Cl ₂)	1 ^e trap	normaal/verlaging	verhoging	verhoging
Slijtage	1 ^e trap	verlaging	verhoging	verhoging
Lekkage (bijvoorbeeld O-ring)	overal	normaal/verlaging	normaal/verhoging	verhoging
Te hoge recovery	alle trappen	verlaging	normaal/verlaging	verhoging

2.5.3 Reiniging

Reiniging van membranen kan op verschillende manieren plaatsvinden, afhankelijk van het type vervuiling en het gebruikte membraan. Onder meer de volgende reinigingsmethoden zijn beschikbaar.

- Chemische reiniging (CIP - Cleaning in Place)
Dit is een veelgebruikte methode waarbij *chemicaliën* zoals zuren, alkaliën of detergenten (reinigingsmiddelen) bij een verhoogde temperatuur door het membraansysteem worden gepompt om de vervuiling op te lossen. De concentratie van de gebruikte chemicaliën en de duur van het reinigingsproces zijn belangrijke factoren. De compatibiliteit van het membraan met de gekozen chemicaliën moet altijd worden gecontroleerd.
- Mechanische reiniging
Dit kan bijvoorbeeld door het gebruik van sponsballen die door de membranen worden gepompt, trillingen of sonificatie. Deze methoden helpen bij het verwijderen van de grotere deeltjes die zich op het membraan hebben opgehoopt.
- Hydraulische reiniging
Dit wordt gedaan door (afhankelijk van het membraan/moduletype) bijvoorbeeld een backwash (omkeren van de waterstroom) of forward flush (spoelen met water onder druk langs het membraanoppervlak).
Lucht/CO₂/water-spoeling wordt soms ook ingezet om het membraanoppervlak te reinigen door turbulentie te creëren die de vervuiling losmaakt en afvoert.

Naast deze reinigingsmethoden kunnen ook desinfectiemiddelen aan het water worden toegevoegd of worden ingezet om biofouling te voorkomen respectievelijk te bestrijden. In sommige gevallen wordt een continue lage dosis desinfectiemiddel toegevoegd om de groei van micro-organismen te beperken. Tot op heden wordt het preventief toevoegen van desinfectiemiddelen niet toegepast in Nederland en/of Vlaanderen.

Voorbeeld chemische reiniging

Een veelgebruikte procedure voor NF en RO membranen ten behoeve van reiniging bestaat uit 30 min recirculatie, gevolgd door een inwektijd van 2 uur, waarna opnieuw 30 min wordt gerecirculeerd. De effectiviteit van deze reiniging hangt sterk af van de concentratie van de toegepaste chemicaliën, de pH, temperatuur en de duur van het reinigingsproces. Voor bij verschillende drinkwaterbedrijven toegepaste procedures wordt verwezen naar de vijfde paragraaf van de hoofdstukken 3 en 4 met verschillende casussen waarin ook de procedures ten behoeve van

reiniging zijn meegenomen.

Het is essentieel om vooraf de compatibiliteit van het membraan met de gekozen chemicaliën te verifiëren. Zo zijn sommige membranen bijvoorbeeld uitsluitend bestand tegen zeer lage concentraties vrij chloor (minder dan 0,1 ppm) [7].

Fabrikanten van membranen verstrekken doorgaans een specifiek protocol ten behoeve van reiniging, dat is afgestemd op hun product(en). Afhankelijk van het type vervuiling worden verschillende klassen van chemicaliën ingezet, waaronder [7]:

- zuren zoals fosforzuur (sterk), citroenzuur (zwak) of oxaalzuur voor het oplossen van anorganische aanslag;
- alkalische middelen zoals natriumhydroxide (NaOH), voor het verwijderen van organisch materiaal;
- detergenten (zowel alkalisch als niet-ionisch) ter ondersteuning van de reiniging;
- enzymen zoals proteasen, amylasen en glucanasen ten behoeve van het afbreken van biologische verontreinigingen;
- complexvormers waaronder EDTA, polyacrylaten en natriumhexametafosfaat om metaalionen te binden;
- desinfectiemiddelen zoals waterstofperoxide (H_2O_2) en natriumhypochloriet (NaOCl) tegen microbiële vervuiling;
- sterilisatiemiddelen (bijvoorbeeld ethyleenoxide) voor een volledige ontsmetting (indien nodig).

De keuze en combinatie van deze middelen is afhankelijk van het vervuilingstype, het membraanmateriaal en de operationele condities. Daarbij geldt dat alle chemicaliën die worden ingezet bij de bereiding van drinkwater over een erkende kwaliteitsverklaring volgens de Regeling [37] dienen te beschikken.

2.5.4 Kosten en energieverbruik

Het is belangrijk om ook de kosten en het energieverbruik van membraanfiltratie mee te nemen in de overwegingen voor de toepassing van deze technologie. De initiële investering in de daarvoor benodigde apparatuur evenals de operationele kosten kunnen variëren, afhankelijk van het type membraan, de benodigde energie voor het pompen van water door de membranen en de kosten van chemicaliën voor reiniging. Efficiëntie in zowel energieverbruik als onderhoud kan de kosten op de lange termijn aanzienlijk beïnvloeden.

2.6 Het kiezen van een methode

Het kiezen van een membraansysteem voor een specifieke toepassing is een specialistische klus. Er zijn veel parameters om te overwegen voordat een type membraan systeem kan worden ontworpen, aangeschaft en in gebruik genomen. Zie Tabel 2-3 voor een aantal beknopte vuistregels om in gedachten te houden.

Tabel 2-6 Verschillende membranen en het gebruik, met voor- en nadelen.

Membraantype	Overwegingen
MF	- Veel gebruikt in de voedsel industrie en als voorzuivering voor waterbereiding. - Voordeel: hoge permeabiliteit en verwijdt alleen deeltjes (waaronder bacteriën). - Nadeel: poriën kunnen verstopt raken, verwijdt geen zouten, NOM en organische microverontreinigingen
UF	- Veel gebruikt als voorzuivering van NF/RO en als membraan in de afvalwaterzuivering. - Voordeel: hoge permeabiliteit en verwijdt alleen deeltjes (waaronder virussen en bacteriën). - Nadeel: poriën kunnen verstopt raken, verwijdt geen zouten, alleen grote NOM en geen organische microverontreinigingen.
NF	- Veel gebruikt als hoofdzuivering voor ontharding, en selectieve verwijdering NOM en organische microverontreinigingen . - Voordeel: gemiddelde permeabiliteit, en selectief voor grotere/geladen moleculen. - Nadeel: geen 100% verwijdering organische microverontreinigingen en zouten, en vaak voorbehandeling van het voedingswater nodig.
RO	- Veel gebruikt als hoofd (drink)waterzuivering en voor zeewater ontzouting. - Nodig bij toepassing van brak water als bron - Voordeel: houdt bijna alle stoffen tegen, maar niet voor 100%, zeer hoge zout retentie. - Nadeel: lage permeabiliteit (hoog energieverbruik), hoog chemieverbruik, antiscalants en bijna altijd voorbehandeling van het voedingswater nodig. Er blijft een complexe reststroom (bijna alle verontreinigingen zitten in het concentraat) over. De RO verwijdt geen kleine, ongebonden gassen (zoals ammoniak, waterstofsulfide, chloor, zuurstof, kooldioxide) of zeer kleine koolstofverbindingen (zoals vluchtige organische stoffen)

2.7 Algehele instructies op basis van (verschillende) internationale normen

Een leverancier moet een membraan dat het (af)levert van een certificaat voorzien waaruit blijkt dat het product aan de beoordelingsrichtlijn [BRL-K14037](#) 'Membrane filtration elements for the treatment and/or production of drinking water' van certificatie-instelling Kiwa Nederland voldoet.

3 Micro- en ultrafiltratie

3.1 Introductie

MF en UF zijn membraanfiltratietechnieken die worden toegepast voor het verwijderen van deeltjes uit water. Beide technieken maken gebruik van een fysische en/of fysieke barrière, waarbij het water onder druk door een membraan wordt geleid. Het belangrijkste verschil tussen MF en UF ligt in de poriegrootte van de membranen: MF verwijdert voornamelijk grotere deeltjes zoals zwevende stoffen en sommige bacteriën (poriegrootte circa 0,1 – 1 µm), terwijl UF ook kleinere deeltjes zoals virussen en colloïden tegenhoudt (poriegrootte circa 0,01 – 0,1 µm). Omdat MF en UF gelijk van aard zijn (ook in bedrijfsvoering) worden deze technieken samen besproken. Wel worden de principes van beide membraanfiltratietechnieken in de subparagrafen 3.1.1 en 3.1.2 apart beschreven.

Voor een uitgebreide toelichting wordt verwezen naar de handleiding van firma Dow [9], waarin alle in dit hoofdstuk beschreven onderwerpen gedetailleerd worden behandeld. Daarnaast is er op de websites van andere membraanleveranciers zoals Pentair, Toray, en Hydranautics [10, 11] ook uitgebreide informatie te vinden over MF/UF membranen/systemen.

Ook biedt het rapport 'Inventarisatie UF installaties in Nederland' [12] waardevolle informatie over de praktijktoepassingen van UF binnen de drinkwatersector tot 2004. Voor extra informatie met betrekking tot de procesvoering, reiniging, waterkwaliteit, membraanintegriteit, problemen en ontwikkelingen van UF installaties wordt naar dit document verwezen.

3.1.1 Microfiltratie

MF is een membraanfiltratietechniek waarbij deeltjes groter dan ongeveer 1 µm worden tegengehouden. Kleinere deeltjes zoals die kleiner dan 0,1 µm (wel afhankelijk van de specificaties met betrekking tot poriegrootte van het toegepaste membraan), kunnen grotendeels het membraan passeren [13]. MF is vooral geschikt voor het verwijderen van zwevende stof en (in beperkte mate) colloïdale deeltjes [3]. Het proces werkt bij relatief lage druk en is daardoor energiezuinig. Bacteriën (1 – 10 µm) worden in principe goed verwijderd met MF, maar virussen zijn veel kleiner (0,01 – 0,1 µm) en kunnen deels het membraan passeren. MF membranen hebben in de regel een ruw oppervlak waardoor de vervuiling het membraan in stroomt en de filtratie ook wel dieptefiltratie wordt genoemd (aangeduid als 'plugging', vervuiling zet zich af in de poriën). Dit betekent tegelijk dat de vervuiling in het membraan achterblijft en lastig is te verwijderen.

3.1.2 Ultrafiltratie

UF is een geavanceerde membraanfiltratietechniek waarbij deeltjes met een grootte van 0,02 tot 0,03 µm met minimaal 99,99% efficiëntie worden verwijderd [13]. De poriën van UF membranen zijn veel fijner dan die van MF en liggen doorgaans tussen de 0,01 en 0,1 µm [3]. Hierdoor kan UF niet alleen zwevende stoffen en bacteriën verwijderen, maar ook kleinere deeltjes zoals cysten en virussen, en een deel organische stof (biopolymeren). UF membranen hebben vaak een ruw oppervlak waardoor de vervuiling het membraan in stroomt en de filtratie ook wel dieptefiltratie wordt genoemd. Dit betekent tegelijk dat de vervuiling in het membraan achterblijft en lastig is te verwijderen. Er zijn ook UF membranen met een glad oppervlak die gebruik maken van het concept oppervlaktescheiding, waar de vervuiling op het oppervlak achterblijft en gemakkelijker is te verwijderen.

3.2 Toepassingen

MF en UF worden op verschillende manieren ingezet binnen de waterbehandeling. Een veelvoorkomende toepassing is als voorzuivering vóór NF of RO. Door MF of UF als eerste stap toe te passen, worden grotere deeltjes

en micro-organismen uit het water verwijderd. Dit vermindert de kans op vervuiling van de NF/RO membranen, waardoor de installatie efficiënter werkt en minder onderhoud nodig heeft.

Een andere toepassing is het indikken van spoelwater dat vrijkomt bij snelfilters. Door gebruik te maken van MF of UF kan het volume van dit spoelwater worden verkleind, wat voordelig is voor zowel waterhergebruik als slibverwerking. Deze toepassingen worden onder andere beschreven in rapporten zoals [1] en [12].

3.3 Ontwerp

Bij MF en UF worden verschillende typen modules toegepast. De meest gebruikte configuraties zijn tubulaire, holle rietjes en capillaire membranen. Daarnaast worden vlakke plaatmodules vooral ingezet bij keramische systemen voor MF en UF. Ook spiraalgewonden membranen zoals die van de firma Synder zijn beschikbaar voor zowel MF als UF. Daarnaast heeft de firma Mann + Hummel een SpiraSep, een submerged en terugspoelbaar spiraalgewonden module.

Materiaalsamenstelling van membranen

Voor polymere membranen worden diverse kunststoffen gebruikt waaronder cellulose, polyethersulfon (PES), polyvinylideenfluoride (PVDF), polyvinylpyrrolidon (PVP) en polypropyleen (PP) [12]. Deze materialen zijn flexibel, chemisch bestendig en geschikt voor toepassingen in de drinkwatersector. Keramische membranen zijn opgebouwd uit anorganische materialen zoals aluminiumoxide (Al_2O_3), titaniumdioxide (TiO_2), zirconiumdioxide (ZrO_2) en siliciumdioxide (SiO_2). Deze membranen zijn robuust en bestand tegen hoge temperaturen en agressieve reinigingsmiddelen.

Configuratie van grootschalige membraaninstallaties

In full scale toepassingen met holle rietjes of capillaire membranen worden de membranen samengebracht in zogeheten *stacks*. Elke stack bevat meerdere drukbuizen die parallel naast elkaar zijn geplaatst. Binnen elke drukbuis kunnen vervolgens meerdere membraanmodules worden gemonteerd. Deze modulaire opbouw maakt het mogelijk om installaties efficiënt op te schalen. Een voorbeeld van een UF installatie met meerdere stacks is weergegeven in *Figuur 3-1*.



Figuur 3-1 Voorbeeld UF installaties met meerdere stacks: links drinkwaterproductielocatie Ouddorp (Evides Waterbedrijf) [12] en rechts drinkwaterproductielocatie Heemskerk (PWN).

3.4 Bedrijfsvoering

MF en UF membranen worden meestal bedreven in semi-dead-end modus. Dit betekent dat gedurende een filtratiecyclus al het voedingswater door het membraan wordt geperst (recovery = 100%). De vaste deeltjes blijven hierbij aan de voedingszijde van het membraan achter. Na verloop van tijd hopen deze deeltjes zich op, waardoor

reiniging nodig is. Omdat er geen constante afvoer van geconcentreerd restwater is, wordt dit bedrijfsprincipe aangeduid als *semi-dead-end*. De verwijdering van het opgehoopte vuil gebeurt doorgaans via hydraulische reiniging (zoals backwash, forward flush en/of luchtspoeling), eventueel aangevuld met chemische reiniging (CIP) of een backwash met chemie (CEB).

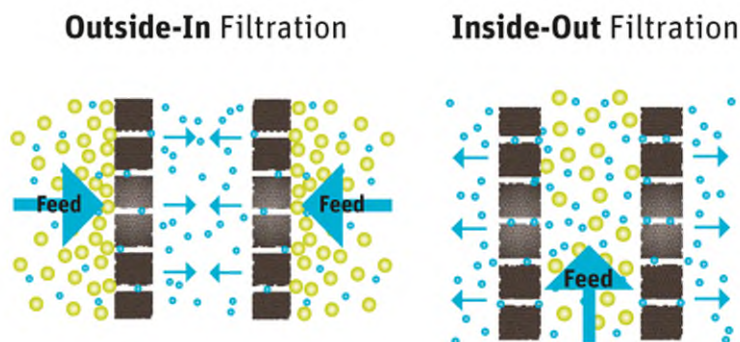
Alle spiraalgewonden (met uitzondering van de SpiraSep) en sommige holle rietjes UF membranen worden niet in *semi-dead-end*, maar in *cross-flow* modus bedreven. Hierbij stroomt het voedingswater parallel langs het membraanoppervlak, waarbij een deel als permeaat door het membraan gaat en de rest als concentraat wordt afgevoerd. Dit vermindert de opbouw van vervuiling op het membraan omdat het vuil niet ophoopt op het oppervlak, maar van het oppervlak wordt weggespoeld. Tot op heden worden spiraalgewonden UF membranen niet toegepast bij Nederlandse en Vlaamse drinkwaterbedrijven.

Filtratierichting: inside-out en outside-in

MF en UF membranen kunnen op twee manieren worden bedreven, afhankelijk van de oriëntatie van de actieve laag:

- **Inside-out**
De actieve laag bevindt zich aan de binnenzijde van de vezel. Het voedingswater stroomt van binnen naar buiten. De backwash gebeurt dan van buiten naar binnen.
- **Outside-in**
De actieve laag zit aan de buitenkant van de vezel. Het voedingswater stroomt van buiten naar binnen. De backwash verloopt van binnen naar buiten.

De keuze voor inside-out of outside-in hangt af van de membraanleverancier van de membraanmodule, de vervuilingsgraad van het water en de specifieke toepassing. In *Figuur 3-2* is de bedrijfsvoering van zowel inside-out als outside-in weergegeven.



Figuur 3-2 Bedrijfsvoering van outside-in en inside-out bij UF membranen (zie webpagina [Technology for wastewater treatment - Berghof Membrane](#)).

3.4.1 Voorbehandeling

Een goede voorzuivering is essentieel voor een betrouwbare en efficiënte werking van MF en UF membraansystemen. In het rapport 'Inventarisatie UF installaties in Nederland' [12] worden verschillende voorbehandelingsstappen beschreven die in de praktijk (op dat moment, dat wil zeggen 2004) werden toegepast.

Een eenvoudige voorbehandeling kan bestaan uit een grof voorfilter (met poriegrootte tussen 25 en 200 µm), gevolgd door dosering van ijzerchloride (FeCl_3), polyaluminiumchloride (PAC)⁴ of ozon bij de toepassing van keramische membranen. Soms wordt aanvullend een zuur of loog toegevoegd om de pH te corrigeren. De

⁴ In het geval MF/UF wordt ingezet als voorzuivering van NF/RO wordt PAC meestal afgeraden in verband met irreversibele verontreiniging met aluminium als de voorzuivering niet in staat is om het vlokmiddel volledig te verwijderen.

gevormde vlokken binden verontreinigingen en zijn beter te verwijderen tijdens de hydraulische reiniging van de membranen.

In veel gevallen wordt gekozen voor een uitgebreidere voorbehandeling bestaande uit coagulatie, vlokafscheiding (flotatie of lamellenbezinker), snelfiltratie en actieve-koolfiltratie om de belasting op de membranen verder te beperken en de waterkwaliteit te verbeteren. Het gebruik van cross-flow UF membraansystemen in combinatie met holle rietjes UF membranen vermindert de voorbehandelingsbehoefte, omdat de vervuiling in suspensie blijft door het continue mixen van de stroom. Dit vermindert ook het verbruik van chemicaliën, maar heeft in de meeste gevallen een uitgebreidere installatie met een circulatiepomp.

3.4.2 Reiniging

Om vervuiling van membranen te voorkomen of te beheersen, worden bij MF en UF installaties naast de voorbehandeling doorgaans drie typen reiniging toegepast. Deze worden hieronder beschreven in volgorde van frequentie en toepassing.

Hydraulische reiniging (na elke filtratiecyclus)

Na elke filtratiecyclus (meestal om de 20 tot 60 min, afhankelijk van de samenstelling van het voedingswater en de installatie) wordt een backwash uitgevoerd. Hierbij wordt permeaat of drinkwater met verhoogd debiet (bij voorkeur twee tot drie keer het filtratiedebiet, afhankelijk van type membraan en wat de leverancier voorschrijft) gedurende korte tijd (30 tot 90 s) in omgekeerde richting door het membraan gepompt. Dit spoelt deeltjes uit de voedingszijde en de poriën van het membraan.

In het geval van outside-in bedrijfsvoering wordt er ook een tankdrain toegepast om de bak te verversen, aangezien de vervuiling in de tijd opbouwt in de bak omdat het schone water wordt onttrokken door de membranen.

Andere vormen van hydraulische reiniging zijn:

- Forward flush
Voedingswater wordt met hoge snelheid (anderhalf tot twee keer het filtratiedebiet, afhankelijk van type membraan en wat de leverancier voorschrijft) langs het membraanoppervlak geleid zonder door het membraan te dringen. Dit verwijdert loszittend vuil aan het oppervlak.
- Luchtspoeling
Deze spoeling kan worden gecombineerd met forward flush om de reiniging te versterken.

Chemische reiniging (periodiek, na meerdere BW-cycli)

Na een aantal filtratie- en BW-cycli (bijvoorbeeld na twintig cycli of afhankelijk van vervuilingsgraad) worden de membranen chemisch gereinigd. Dit wordt een *Chemical Enhanced Backwash (CEB)* genoemd. Hierbij worden aan het permeaat of drinkwater reinigingsmiddelen/chemicaliën gedoseerd. De keuze van de chemicaliën hangt af van het type vervuiling en het type membraanmateriaal:

- organisch/biofouling: natriumhydroxide (NaOH), natriumhypochloriet (NaOCl);
- anorganisch (bijvoorbeeld calcium, ijzer): zoutzuur (HCl), waterstofperoxide (H₂O₂).

De installatie wordt een tijd (inweken) stilgezet, zodat het met reinigingsmiddelen/chemicaliën verrijkt permeaat/drinkwater kan reageren met de vervuiling op het membraan. Vervolgens vindt er weer backwash plaats om het vuil te verwijderen. Vaak worden deze stappen (spoelen – inweken – spoelen) een aantal keren herhaald voor een zo goed mogelijke reiniging van het membraan.

De exacte procedure en concentraties verschillen per installatie en zijn beschreven in het rapport 'Inventarisatie UF installaties in Nederland' [12].

Grondige chemische reiniging (incidenteel, bij ernstige vervuiling)

Bij zware of langdurige vervuiling (vaak een keer per jaar) is een intensieve reiniging nodig (CIP). Hierbij worden sterkere of gecombineerde reinigingsmiddelen ingezet, soms met verwarming.

- organisch: industriële reinigers (zoals) industriële zepen, natriumhydroxide, natriumhypochloriet;
- anorganisch: industriële zuren (zoals zoutzuur, citroenzuur of ascorbinezuur).

Bij het gebruik van zuren en logen moet altijd rekening worden gehouden met de specificaties van het geïnstalleerde membraanmateriaal. Deze worden vermeld in de datasheets van de fabrikant en geven aan welke chemicaliën en pH-waarden zijn toegestaan. Voor uitgebreide informatie over reinigingsprotocollen inclusief contacttijden en concentraties wordt verwezen naar het rapport 'Inventarisatie UF installaties in Nederland' [12].

Afvoer van spoelwater

Het spoelwater van BW en chemische reiniging wordt meestal afgevoerd (na neutralisatie en/of behandeling) naar het riool of naar een spoelwatervijver. Indien nodig wordt vooraf slib afgescheiden via een slibbezinker [12].

3.4.3 Integriteitsbewaking

Het is essentieel om de werking van de installatie zo goed mogelijk te volgen. Door de werking van de installatie te volgen, kunnen eventuele defecten (zoals vezelbreuk) vroegtijdig worden opgespoord en passende maatregelen worden genomen om een stabiele bedrijfsvoering en waterkwaliteit te garanderen. Om te checken of er een stabiele bedrijfsvoering is, dient er een goede en zo continu mogelijke monitoring van UF en MF membraaninstallaties plaats te vinden.

Monitoring van de membraanintegriteit

Voor UF worden verschillende technieken ingezet om de integriteit van de membranen te bewaken:

- Continue technieken:
 - Troebelheidsmeting
Het permeaat (gefilterd water) wordt continu gemonitord op troebelheid. Een plotselinge toename kan wijzen op een defect in het membraan (wordt niet toegepast bij de Nederlandse drinkwaterbedrijven).
 - Deeltjestelling
Kleine deeltjes ($< 0,05 \mu\text{m}$) in het permeaat worden geteld. Een stijging van het aantal deeltjes kan duiden op lekkage.
- Discontinue technieken:
 - MFI-meting (Modified Fouling Index)
Geeft inzicht in de mate van vervuiling van het permeaat en wordt soms als aanvullende controle gebruikt. Deze wordt op dit moment niet toegepast in Nederland en/of Vlaanderen.

Daarnaast zijn plotselinge veranderingen in de permeaatstroom tijdens de bedrijfsvoering bij constante druk of ongebruikelijke drukdalingen signalen die kunnen wijzen op de breuk van rietjes.

Periodieke integriteitstesten

Naast de continue metingen worden er ook periodiek specifieke testen uitgevoerd die zijn gericht op het opsporen van beschadigingen. Concreet gaat het dan om lekdetectie-, bubbel- en druktesten. Daarbij wordt het membraan kortdurend onder druk gezet of blootgesteld aan lucht. Deze methoden kunnen kleine lekkages of breuken in de holle rietjes van het membraan opsporen, maar kunnen niet continu worden toegepast.

Als blijkt dat een membraan lek is, kan het in veel gevallen worden gerepareerd. Dit gebeurt door het betreffende vezeltje ('rietje') af te sluiten met een plug of pin. Deze herstelwerkzaamheden worden doorgaans uitgevoerd door de leverancier van het membraan.

Toekomstige methode: natuurlijke virussen (NV-methode)

De afgelopen jaren is er onderzoek gedaan naar de inzet van natuurlijke virussen (NV-methode) als een nauwkeurige en gevoelige manier om de integriteit van MF en UF membranen te bewaken. Deze methode lijkt

veelbelovend [14], vooral voor toepassingen in de drinkwatersector. Op dit moment wordt de NV-methode nog niet operationeel ingezet als standaard monitoringstechniek.

3.5 Casussen

Voor casussen op het gebied van MF en UF, zie Bijlage VI.

3.6 Ontwikkelingen

3.6.1 Keramische MF/UF (laatste 10 – 15 jaar)

De laatste jaren stappen steeds meer drinkwaterbedrijven over van polymere UF membranen naar keramische membraanfiltratie bij de behandeling van spoelwater (met het doel de recovery van drinkwater te verhogen). In een aantal gevallen is er nog sprake van proefinstallatieonderzoek met als doel om op korte termijn te komen tot bouw en implementatie. Er is al een aantal keramische membraanfiltratiesystemen in gebruik (ondergedompeld/vlakke plaat). Daarnaast wordt een dergelijk systeem ook toegepast in de zuivering (drinkwaterbedrijf PWN op productielocatie Andijk, CeraMac® 10 jaar in bedrijf).

3.6.2 Bedrijfsvoering

Monitoring van capillaire UF/MF membranen is vol in ontwikkeling voor alle onderdelen van de performance van de membranen. Een voorbeeld is het onderzoek naar natuurlijke virussen van KWR Water Research Institute, waarin online integriteit monitoring wordt bestudeerd. Ook zijn er ontwikkelingen gaande in online monitoring van vervuiling en de beïnvloeding op de performance door waterkwaliteit en de bedrijfsvoering [15].

3.6.3 Overige ontwikkelingen

Op dit moment zijn er meerdere ontwikkelingen op het gebied van membraanfiltratie gaande. Die worden niet allemaal behandeld. Een kleine selectie van de ontwikkelingen wordt hieronder benoemd.

Spiraal gewonden membranen bevatten spacers om vervuiling tegen te gaan. Deze spacers bestaan uit een gaasachtige structuur (mesh) en hebben een patroon om de waterstroom in beweging/turbulent te houden. Dit betekent extra productiestappen en complexiteit, en dus kosten in de productie. Er wordt onderzoek gedaan om een 3d patroon te integreren in het membraan en zo hetzelfde concept te bereiken zonder feed spacer [16].

Op dit moment is er veel onderzoek gaande naar verbetering van membranen. De opbrengsten daarvan zijn vooralsnog niet beschikbaar. In ontwikkeling zijn membranen waarin nanodeeltjes (nano particles) zijn verwerkt. Deze nanodeeltjes absorberen microvervuiling of zetten microvervuiling om in andere (minder schadelijke) stoffen [17].

Door poederkool te doseren in de voeding van een UF installatie kan met die installatie meer vervuiling worden verwijderd. Het is een proces dat aan twee kanten helpt: de poederkool verwijdert microverontreinigingen én NOM die vervuiling veroorzaakt. De combinatie van technieken kan een robuustere en betere (voor)zuivering tot gevolg hebben [18].

4 Nanofiltratie en omgekeerde osmose

4.1 Introductie

NF en RO zijn membraanfiltratietechnieken die worden gebruikt om zouten en bestrijdingsmiddelen en andere organische microverontreinigingen uit water te verwijderen. Beide technieken werken met een fysische barrière: water wordt onder druk door een membraan geperst.

Het belangrijkste verschil tussen NF en RO zit in de grootte van de poriën in het membraan:

- NF houdt onder andere tweewaardige zouten en grotere organische microverontreinigingen tegen (moleculair gewichtsniveau ongeveer 200 – 1.000 Da);
- RO verwijdert ook eenwaardige zouten en kleinere organische stoffen (moleculair gewichtsniveau: ongeveer 50 – 200 Da).

Omdat NF en RO qua werking en bedrijfsvoering sterk op elkaar lijken, worden die in dit hoofdstuk samen besproken. Wel worden de principes van beide membraanfiltratie technieken apart beschreven en wel in de subparagrafen 4.1.1 en 4.1.2.

Voor meer technische details wordt verwezen naar het DOW Filmtec Reverse Osmosis Membranes Technical Manual [19]. Dit handboek behandelt uitgebreid alle in dit hoofdstuk genoemde onderwerpen. Daarnaast is er op de websites van andere membraanleveranciers zoals Pentair, Toray, en Hydranautics [10, 11, 20] ook uitgebreide informatie te vinden over de NF/RO membranen/systemen. Tevens biedt het rapport 'NF- en RO-installaties in beheer bij Nederlandse waterbedrijven' [21] waardevolle praktijkinformatie over het gebruik van NF en RO in de Nederlandse drinkwatersector tot 2005. In dit rapport komen onder andere ontwerp, procesvoering, reiniging, waterkwaliteit, membraanintegriteit, problemen en technologische ontwikkelingen aan de orde.

4.1.1 Nanofiltratie

NF membranen worden ingezet om opgeloste tweewaardige ionen (zoals Ca^{2+}), kleurstoffen, hardheid, bestrijdingsmiddelen en andere organische microverontreinigingen te verwijderen. De organische stoffen die door NF worden tegengehouden, hebben meestal een molecuulgewicht tussen 200 en 1.000 g/mol (oftewel 200 – 1.000 Da), afhankelijk van het type NF membraan. Eenwaardige ionen (zoals Na^+ of Cl^-) worden slechts gedeeltelijk verwijderd [1, 3, 4]. Bovendien draagt NF bij aan de desinfectie van het water, omdat ook bacteriën en virussen worden tegengehouden.

Het werkingsprincipe van NF berust op drie scheidingsmechanismen:

- deeltjesgrootte: kleinere moleculen gaan gemakkelijker door het membraan dan grotere;
- interacties tussen opgeloste stoffen en het membraanmateriaal: het zogenaamde *oplos-diffusiemechanisme*;
- elektrostatische interacties: ladingeffecten tussen opgeloste (geladen) stoffen en het membraanoppervlak.

Het proces wordt aangedreven door een hydraulisch drukverschil over het NF membraan, waarbij de osmotische druk van de invoeroplossing moet worden overwonnen.

NF bevindt zich qua scheidend vermogen tussen UF en RO. NF membranen verwijderen doorgaans [22]:

- meer dan 90% van het organisch materiaal en multivalente (tweewaardige of meerwaardige) ionen;
- ongeveer 15 – 70% van de monovalente (eenwaardige) ionen;
- een groot deel van de organische microverontreinigingen.

4.1.2 Omgekeerde osmose

RO wordt toegepast in het geval het nodig is om eenwaardige ionen (zoals Na^+ , Cl^- en NO_3^-) en kleine organische stoffen uit water te verwijderen, naast de stoffen die ook al met NF worden verwijderd (maar dan met een hogere retentie). Dit maakt RO bij uitstek geschikt voor ontzouting van water. Er zijn NF membranen op de markt met een

vergelijkbare chemie van de membraancompositie. Dit maakt dat een NF membraan met een hoge retentie vergelijkbaar is als een RO membraan met lage retentie.

Een belangrijk voordeel van RO is dat het in één processtap zorgt voor de verwijdering van zouten, hardheid én organische microverontreinigingen [1].

Het werkingsprincipe van RO berust volgens het onderzoek uit [22] op:

- deeltjesgrootte: kleinere moleculen gaan gemakkelijker door het membraan dan grotere;
- interacties tussen opgeloste stoffen en het membraanmateriaal: het zogenaamde *oplos-diffusiemechanisme*;
- elektrostatische interacties: ladingeffecten tussen opgeloste (geladen) stoffen en het membraanoppervlak.

Het proces wordt aangedreven door een hydraulisch drukverschil over het RO membraan. Daarbij moet de osmotische druk van het voedingswater worden overwonnen.

RO membranen verwijderen 98 – 99,8% van het natriumchloride (NaCl) uit het behandelde water.

4.2 Toepassing

NF wordt in de drinkwatervoorziening onder meer toegepast bij de behandeling van grondwater, met name voor de gecombineerde verwijdering van hardheid en kleur. Dit is vooral relevant wanneer naast calcium en magnesium ook andere ongewenste componenten zoals kleur, sulfaat, nitraat, chloride en bestrijdingsmiddelen moeten worden verwijderd [1]. Ook wordt NF in de drinkwatervoorziening toegepast bij de behandeling van oppervlaktewater. NF membranen spelen een belangrijke rol in de verbetering van de waterkwaliteit. Ze verwijderen multivalente zouten, zwevende deeltjes, pathogene micro-organismen (zoals virussen en bacteriën), natuurlijk organisch materiaal (NOM) en diverse organische microverontreinigingen, waaronder pesticiden, hormoonverstorende stoffen, geneesmiddelen en cyanotoxines. Een bijkomend voordeel is de verbetering van de biologische stabiliteit van drinkwater [22].

Het grootste onderscheid tussen NF en RO is de scheiding van zouten. RO kent over het algemeen hogere verwijderingsrendementen dan NF. Zo varieert bijvoorbeeld de verwijdering van natriumchloride van 15 – 70% bij NF tot 98 – 99,8% bij RO, afhankelijk van het gekozen membraantype [4, 22]. Hierdoor is NF geschikt voor gedeeltelijke ontzouting en RO voor volledige ontzouting. *Tabel 4-1* geeft een versimpelt overzicht van de toepassingen voor NF en RO [4].

Tabel 4-1 Vereenvoudigd overzicht van de toepassingen voor NF en RO [4].

NF	RO
ontharding + verwijdering meerwaardige ionen	ontzouting
verwijdering van kleur en groot deel bestrijdingsmiddelen en organische microverontreinigingen afhankelijk van MWCO en lading	verwijdering van alle organische microverontreinigingen afhankelijk van polariteit
desinfectie	desinfectie

Een uitgebreide beschrijving van toepassingen, verwijderingsrendementen en praktijklocaties is opgenomen in het rapport BTO 2009.039 [6]. Volgens dit rapport worden NF en RO processen toegepast voor onder andere ontzilting

(verwijdering van totaal opgeloste stoffen, TDS), ontharding, kleurverwijdering, NOM-verwijdering en de verwijdering van anorganische en organische verontreinigingen, en pathogene micro-organismen. De ontziltingstoepassing is het meest gangbaar en dan vooral bij zeewater, brakwater, oppervlaktewater, industrieel proceswater en gezuiverd afvalwater. Het type membraan bepaalt zowel het rendement als het energieverbruik: hoe hoger de retentie-eis, hoe hoger de benodigde druk en dus het energieverbruik (uitgedrukt als SEC = specific energy consumption in kWh/m³, zie *Figuur 4-2* die is gebaseerd op 'Reverse Osmosis Software Analysis' van membraanproducent Filmtec [6]). De meeste RO membranen zijn 'thin-film composite' (TFC) membranen (zie ook § 4.3) en het meeste onderzoek in relatie tot rendement en energiegebruik gaat over rejectie, druk, flux, zoutpassage en de invloed hiervan op SEC van verschillende TFC membranen en systemen. Voor een duidelijk beeld, zie [23]. In het betreffende artikel wordt het effect van de prestaties van RO membraanelementen (onder andere retentie, druk, flux, zoutpassage) op de kosten van RO processen en dan met name het specifieke energieverbruik besproken. Het gaat daarin niet alleen om conventionele RO-processen, maar ook de 'Closed-circuit reverse osmosis' (CCRO) en andere batch RO processen (zie subparagraaf 4.6.2).

Ook voor de verwijdering van NOM zijn NF en RO membranen zeer effectief. Met NF kan bijvoorbeeld meer dan 95% van gekleurd NOM uit grondwater worden verwijderd. RO reduceert de concentratie TOC (de te meten parameter om NOM te duiden) vaak tot onder de 0,5 mg/l.

NF biedt daarnaast een chemie-arm alternatief voor ontharding. Het verlaagt de concentraties calcium en magnesium zonder de samenstelling van de monovalente zouten/ionen wezenlijk te veranderen. RO kan eveneens ontharden, maar vereist hogere drukken vanwege de bredere ionenretentie en het permeaat dient te worden geremineraliseerd alvorens het geschikt is voor consumptie.

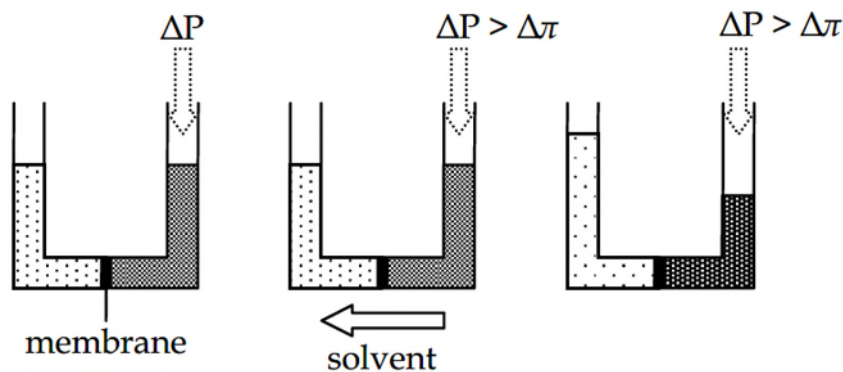
Voor de verwijdering van specifieke anorganische stoffen (eenwaardige ionen zoals nitraat, fluoride, lithium, boor, ammonium en arseen) is vooral RO geschikt. Dit geldt ook voor NF, maar deze membraantechniek is minder effectief voor deze toepassingen vanwege lagere retentiewaarden. De effectiviteit van de verwijdering is afhankelijk van onder andere pH, ionsterkte en de samenstelling van het voedingswater. Producenten bieden hiervoor modelleringssoftware aan, waarmee de prestaties van het membraan onder specifieke omstandigheden kunnen worden voorspeld [6].

Ook organische microverontreinigingen zoals pesticiden, hormoonverstorende stoffen, farmaceutisch actieve stoffen en persoonlijke verzorgingsproducten worden met NF en RO doorgaans effectief verwijderd. De verwijdering hangt af van de stoffeigenschappen, membraaneigenschappen en procescondities [24]. Voor een inschatting van de verwijdering van bekende en nieuwe microverontreinigingen via RO is de KWR-webapplicatie AquaPriori [24] beschikbaar (zie [AquaPriori - KWR](#)). Deze binnen het onderzoeksprogramma ontwikkelde tool ondersteunt bij proceskeuzes bij de bereiding van drinkwater en bij de afvalwaterzuivering. Hoewel AquaPriori primair is ontwikkeld voor RO kan het ook (zij het minder nauwkeurig) worden gebruikt voor NF. In *Tabel 4-2* zijn de verwijderingsrendementen voor NF en RO van verschillende stoffen opgenomen, zoals die hierboven zijn vermeld.

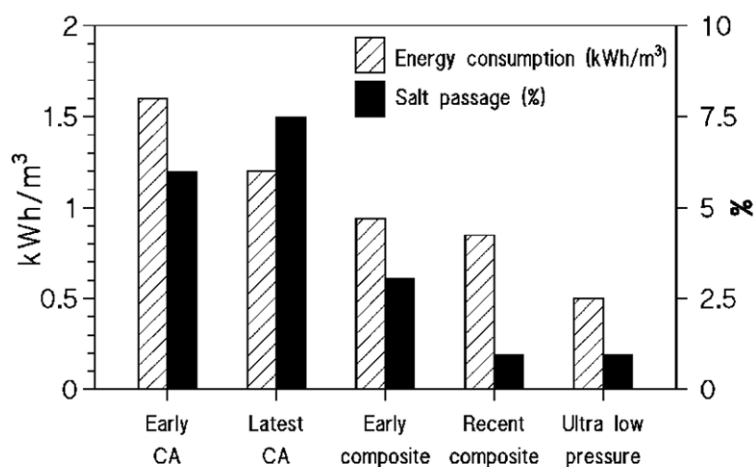
Tabel 4-2 Verwijderingsrendement voor NF en RO van verschillende stoffen (zoals hierboven is vermeld).

parameter	NF	RO
NaCl	15 – 70%	98 – 99,8%
multivalente zouten	> 90%	> 99%
NOM (TOC)	> 95%	>> 95%

Bij NF en RO wordt een halfdoorlatend membraan gebruikt om het oplosmiddel (bijvoorbeeld water) uit een oplossing te persen. Dit gebeurt door druk uit te oefenen aan de zijde van de geconcentreerde oplossing. Voordat er een stroming van het oplosmiddel ontstaat, moet eerst de osmotische druk worden overwonnen (de osmotische druk van zeewater bedraagt bijvoorbeeld ongeveer 25 bar). *Figuur 4-1* laat dit principe zien. De stroming van het oplosmiddel is afhankelijk van het drukverschil over het membraan [7].



Figuur 4-1 Schematische weergave van het RO proces (ΔP is drukverschil, $\Delta \pi$ is osmotisch drukverschil).



Figuur 4-2 Energieverbruik en zoutpassage van verschillende RO membranen (CA staat voor celluloseacetaat) [6].

4.3 Ontwerp

Bij NF en RO worden verschillende types membraanmodules toegepast. De meest gebruikte configuratie bij de bereiding van drinkwater is de spiraalgewonden module, naast andere typen zoals vlakke plaat-, tubulaire, holle rietjes en capillaire modules [6].

Materiaalsamenstelling van membranen

De eerste commerciële membranen waren gemaakt van celluloseacetaat (CA) met een asymmetrische structuur. CA membranen zijn gevoelig voor hydrolyse (onder meer door enzymen van micro-organismen), wat kan leiden tot verlies van retentie. Tegenwoordig zijn vooral composietmembranen in gebruik. Deze bestaan uit een ultradunne

actieve laag (0,1 – 1,0 μm) die zorgt voor de scheidende werking, ondersteund door een dikkere sponsachtige dragerlaag (80 – 100 μm) voor mechanische stevigheid.

De moderne TFC membranen worden gemaakt via grensvlakpolymerisatie op een microporeuze polysulfonlaag. Ze bestaan uit polyamiden (zoals arylalkylpolyamiden en polyurea voor RO en gemodificeerde polyamiden of piperazineamiden voor NF). TFC membranen hebben een hogere waterdoorlaatbaarheid en betere afstoting bij lagere werkdrukken dan CA membranen. Ze zijn bovendien chemisch stabiel in een breed pH-bereik en resistent tegen biologische afbraak, maar wel gevoelig voor oxidatiemiddelen wat de afstotingscapaciteit kan aantasten [6].

Samengevat worden NF en RO membranen vervaardigd uit [3]:

- celluloseacetaat (CA);
- polyvinylalcohol-derivaten (PVA);
- composietmaterialen op basis van polyamide (PA);
- ultra-laagdrukcomposiet (ULP).

Systeemconfiguratie in grootschalige installaties

In grote installaties worden vooral spiraalgewonden modules toegepast in standaarddiameters (2,5, 4 en 8 inch) die passen in drukvaten. Meestal bevat een drukvat zes modules, in serie verbonden via een centrale permeaatbuis met O-ringen.

Installaties zijn vaak opgebouwd volgens een ‘kerstboomstructuur’, waarbij het concentraat van de eerste trap (meerdere drukvaten) als voeding dient voor de tweede trap (minder drukvaten), enzovoort. Dit verhoogt de recovery [7]. Dit zorgt ervoor dat de langstroomsnelheid van het voedingswater langs het membraanoppervlak niet te laag wordt, met als gevolg dat concentratiepolarisatie wordt voorkomen.

Toepassing: volstroom versus deelstroom

Membraanfiltratie kan bij de bereiding van drinkwater zowel in volstroom als in deelstroom worden toegepast:

- Deelstroom
Een gedeelte van het bereide drinkwater wordt behandeld met RO en gemengd met conventioneel behandeld water. Dit kan al voldoende zijn om te voldoen aan de drinkwaterkwaliteitseisen volgens het Drinkwaterbesluit [25].
- Volstroom
De volledige waterstroom wordt met RO behandeld. Door de zeer grondige verwijdering van zouten en mineralen is nabehandeling essentieel. Het permeaat wordt daarom gereconditioneerd door remineralisatie, om (i) te voldoen aan de drinkwaterkwaliteitseisen volgens het Drinkwaterbesluit en (ii) corrosie in het leidingnet te voorkomen.

4.4 Bedrijfsvoering

4.4.1 Voorbehandeling/nabehandeling

Een typisch NF/RO systeem kan worden onderverdeeld in drie onderdelen: de voorbehandeling, het membraanfiltratieproces en de nabehandeling [6].

De voorbehandeling is essentieel om vervuiling en schade aan de membranen te voorkomen. Meestal worden hiervoor (preventief) zuur en/of antiscalant toegevoegd aan de voedingsstroom om te voorkomen dat zouten in de membraaninstallatie oververzadigd raken en kunnen neerslaan (scaling). Daarnaast worden vaak kaarsenfilters toegepast (meestal met filters van 5 – 20 μm) om vaste deeltjes uit het voedingswater te verwijderen. Deze filters kunnen echter een broedplaats vormen voor biologische groei, waardoor ze onder andere regelmatig moeten worden vervangen of gereinigd. Afhankelijk van de waterkwaliteit kunnen aanvullende voorbehandelingsstappen nodig zijn voor een stabiele werking van het NF/RO proces (zie hoofdstuk 2 van [6] voor voorbeelden).

Tijdens membraanfiltratie wordt het voedingswater gescheiden in twee stromen: permeaat en concentraat. Dit concentraat wordt meestal geloosd op oppervlaktewater (afhankelijk van de vergunning en locatie-specifieke omstandigheden), in een haven of via een rioolwaterzuiveringsinstallatie (RWZI), zie ook subparagraaf 4.4.4.

De nabehandeling van het permeaat hangt af van de eisen die aan het drinkwater worden gesteld. Veelgebruikte processen zijn remineralisatie, beluchting, ontgassing, pH-correctie en desinfectie (zoals chloordosering of UV-behandeling). Ook kan menging (deelstroom toepassing) met andere waterstromen worden toegepast om aan de gewenste drinkwaterkwaliteit te voldoen.

In Tabel 4-3 wordt een aantal voorbehandelingsstappen gegeven met het type membraanvervuiling dat daarmee wordt tegengegaan bij de toepassing van NF/RO membraanfiltratie.

Tabel 4-3 Overzicht welke voorbehandeling welk type vervuiling tegengaat voor NF en RO (Integrated Membrane Systems Table 1.7 [3]).

Voorbehandeling	Type vervuiling
scaling remmende zuur en/of antiscalant toevoegingen	scaling
ionenwisseling	scaling
kaarsenfilters	deeltjes afzetting
bodempassage	deeltjes afzetting + biofilmvorming
MF	deeltjes afzetting
UF	deeltjes afzetting + biofilmvorming
coagulatie-sedimentatie filtratie	deeltjes afzetting + biofilmvorming
biologisch actieve kool filtratie	deeltjes afzetting + biofilmvorming
langzame-zandfiltratie	deeltjes afzetting + biofilmvorming

In Integrated Membrane Systems Table 2.1 [3] staat een overzicht van de voorzuivering voor NF en RO systemen in Nederland, waarbij ook de toegepaste membranen (type en fabrikant) zijn weergegeven. Daarbij wordt aangetekend dat het gaat om een overzicht uit 2004 en (dus) niet actueel is.

4.4.2 (Beheersen) vervuiling

Om vervuiling van membranen bij NF en RO installaties te voorkomen of te beheersen, zijn doorgaans drie manieren geschikt. Deze worden in het navolgende beschreven in volgorde van frequentie en toepassing.

1. Hydraulische reiniging

Om biofouling te voorkomen of te beheersen kan gebruik worden gemaakt van lucht/water-spoeling, ook wel aangeduid als AiRO. Deze methode is oorspronkelijk ontwikkeld voor RO installaties, maar is ook toepasbaar op andere systemen met spiraalgewonden membranen. Door het gecombineerd inbrengen van lucht en water wordt verstopping van het voedingskanaal tegengegaan, wat helpt om de doorstroming te verbeteren en de mate van vervuiling te beperken. Bij lucht/water-spoeling worden de drukvaten van de eerste stack verticaal geplaatst. Uit onderzoek blijkt dat lucht/water-spoeling slechts een beperkte invloed heeft op de daling van de permeabiliteit van een membraan. Er is veel documentatie beschikbaar die deze bevindingen ondersteunt (onder andere [26, 27,

28])). In Nederland wordt deze techniek momenteel uitsluitend toegepast op de DWP Botlek-installatie van Evides Industrie [28] waar het wordt ingezet bij de productie van demiwater.

Een alternatieve methode voor het beheersen van biofouling is CO₂-spoeling, waarbij kooldioxide wordt gebruikt om de groei van biologische vervuiling en deeltjesvervuiling te remmen. Bij toepassing van CO₂-spoeling kunnen de drukvaten van de eerste stack gewoon horizontaal worden gepositioneerd.

2. Chemische reiniging (CIP)

Na verloop van tijd dienen alle NF en RO membranen te worden gereinigd via een chemische reiniging (CIP). Het moment waarop deze reiniging plaatsvindt, is doorgaans gebaseerd op praktijkervaring met membraaninstallaties of wordt aangegeven door de membraanleverancier [29].

In de praktijk worden meestal de volgende algemene criteria gehanteerd om het tijdstip van reiniging te bepalen [29]:

- 10% afname van de MTC bij constante TMP;
- 10% toename van de TMP bij constante MTC;
- 10% toename van de zoutpassage;
- 50% toename van de NPD.

Deze drempelwaarden gaan uit van een constante waterkwaliteit en een stabiele recovery van de installatie.

In Nederland hanteren drinkwaterbedrijven daarnaast aanvullende of aangepaste criteria [29]. Zo wordt bij sommige NF/RO installaties een daling van de MTC met 15% aangehouden als reinigingsmoment. Ook wordt vaak gewerkt met een maximale TMP-waarde die afhankelijk is van het ontwerp van de installatie. Daarnaast geldt een stijging van 10 – 15% in NPD als criterium voor het starten van een reinigingscyclus.

Tijdens CIP worden verschillende typen chemicaliën ingezet, afhankelijk van het type vervuiling. Voor uitgebreide informatie over reinigingsprotocollen inclusief aanbevolen contacttijden en chemische concentraties wordt verwezen naar het rapport waarin het beheer van NF en RO installaties bij de Nederlandse drinkwaterbedrijven wordt beschreven [21]. Verdere informatie over de inzet van specifieke reinigingsmiddelen is te vinden in literatuurbronnen [5, 19, 29].

Daarnaast heeft een flush met uitsluitend permeaat ook een (tijdelijk) positief effect. Ook een lagere flux heeft een positief effect op de snelheid waarmee biofouling wordt gevormd. De verlaging van de flux heeft tot gevolg dat de kwaliteit van het permeaat verslechtert (zie § 2.2).

4.4.3 Integriteitsbewaking

Net als bij UF en MF installaties is een betrouwbare en zo continu mogelijke monitoring van NF en RO membraaninstallaties cruciaal voor een stabiele werking en het garanderen van de drinkwaterkwaliteit. Door de prestaties van de installatie nauwkeurig te volgen, kunnen eventuele defecten (zoals kapotte O-ringen, lekkende lijmverbindingen of beschadigingen aan het membraanoppervlak) vroegtijdig worden opgespoord, waardoor snel passende maatregelen kunnen worden genomen. Voor het bewaken van de membraanintegriteit zijn zowel directe als indirecte methoden beschikbaar. Rapport [30] gaat dieper in op de eisen waaraan een integriteitsmonitor moet voldoen en geeft een uitgebreid overzicht van toepasbare methoden voor integriteitsbewaking van RO installaties.

Monitoring van de membraanintegriteit

Continue integriteitstesten

Voor NF/RO worden verschillende technieken ingezet om de integriteit van de membranen continu te bewaken:

- Sulfaatmeting:
Het permeaat wordt continu gemonitord op sulfaat (toegepast bij RO installatie op drinkwaterproductielocatie Heemskerk van PWN). Een plotselinge toename kan wijzen op een defect in het membraan.
- Conductiviteitsmeting:
Het permeaat wordt continu gemonitord op conductiviteit.

Daarnaast zijn plotselinge veranderingen in de permeaatstroom tijdens de bedrijfsvoering bij constante druk of ongebruikelijke drukdalingen signalen die kunnen wijzen op kanaalvorming. Ook plotselinge veranderingen in de pH kunnen duiden op membraandegradatie of bypass.

Periodieke integriteitstesten

Naast (dis)continue monitoring kunnen periodiek aanvullende testen worden uitgevoerd om de integriteit van een membraaninstallatie te beoordelen. Deze testen zijn vooral bedoeld om te lokaliseren waar in het systeem zich eventuele problemen voordoen, bijvoorbeeld in een specifiek membraanelement of in de aansluitingen tussen elementen.

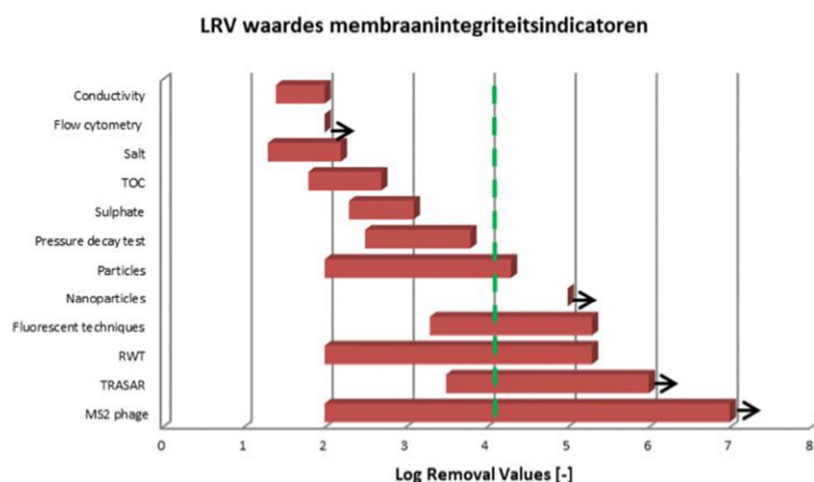
Bij deze periodieke, vaak indirecte methoden wordt niet het membraan zelf getest, maar wordt gekeken naar veranderingen in de kwaliteit van het bereide water. Dit geeft inzicht in mogelijke lekkages of defecten.

Voorbeelden van dergelijke integriteitstests zijn [30]:

- Meten van conductiviteitsprofielen
Afwijkingen in de geleidbaarheid kunnen duiden op lekkages of verminderde membraanwerking.
- Metingen met UV 254 nm sensoren
Om organische stoffen (onverzadigde of aromatische stoffen) in het water te detecteren die normaal door het membraan worden verwijderd.
- TOC-metingen ('Total Organic Carbon')
Een verhoogde TOC-waarde in het permeaat kan wijzen op membraanschade.
- Vacuum decay- of pressure decay-tests:
Hierbij wordt aan één zijde van het membraan een vacuüm of druk aangebracht, waarna drukverlies of een volumeverplaatsing van lucht of water wordt gemonitord. Als deze waarden binnen een bepaalde tijd een drempelwaarde overschrijden, wijst dit op een mogelijke lekkage of beschadiging van het membraan.
- Challenge-tests
Hierbij wordt een bekende hoeveelheid kleurstof, microdeeltjes of MS2-fagen aan het influent toegevoegd. Vervolgens wordt geanalyseerd hoeveel van deze stoffen in het permeaat terechtkomen. Een hogere doorbraak dan verwacht duidt op een verminderde membraanintegriteit.
- Deeltjestelling
Kleine deeltjes ($< 0,05 \mu\text{m}$) in het permeaat worden geteld. Een stijging van het aantal deeltjes kan duiden op lekkage.

Deze periodieke testen vormen een waardevolle aanvulling op de dagelijkse monitoring en helpen bij het tijdig opsporen van afwijkingen in prestaties van membranen.

In Figuur 4-3 is een overzicht opgenomen van de logverwijdering die met de verschillende integriteitstechnieken kunnen worden aangetoond.



Figuur 4-3 LRV-waarden voor verschillende (RO) membraanintegriteitsindicatoren ($\rightarrow \geq$) [30].

Toekomstige methode: natuurlijke virussen (NV-methode)

De afgelopen jaren is onderzoek gedaan naar het gebruik van natuurlijke virussen (de zogeheten NV-methode) als een nauwkeurige en gevoelige techniek om de integriteit van NF en RO membranen te controleren. Omdat deze virussen doorgaans al in een eerder stadium van de zuivering worden verwijderd (nog voordat het water de RO installatie bereikt), is de methode niet direct toepasbaar als routinematige integriteitscontrole bij full scale installaties. Toch biedt de NV-methode wel mogelijkheden om beschadigingen aan membranen of aan de behuizing op te sporen. Denk hierbij aan defecte O-ringen, lekkende lijmverbindingen of schade aan het membraanoppervlak zelf. Om dergelijke defecten op te sporen, moet de te testen membraanmodule worden losgekoppeld van de reguliere installatie en afzonderlijk worden getest.

4.4.4 Reststromen

Bij de toepassing van NF en RO ontstaan onvermijdelijk reststromen. De belangrijkste hiervan is het concentraat: een waterstroom waarin de stoffen die door het membraan zijn tegengehouden (zoals zouten, organisch materiaal en microverontreinigingen) zijn geconcentreerd. Daarnaast ontstaan er spoel- en reinigingsstromen, bijvoorbeeld afkomstig van chemische reiniging (CIP), die afhankelijk van de toegepaste middelen ook aandacht vragen in het beheer.

In de praktijk wordt het concentraat in Nederland doorgaans geloosd op oppervlaktewater, in een haven of via een RWZI. In sommige gevallen wordt het concentraat eerst voorbehandeld, bijvoorbeeld door middel van ontijzing of zandfiltratie, of wordt een deel ervan teruggevoerd naar de voedingsstroom van de installatie. De afvalstromen die vrijkomen bij chemische reiniging worden meestal direct afgevoerd naar het riool of een AWZI, meestal na een neutralisatiestap [1, 2, 21, 22].

Hoewel deze werkwijzen gangbaar zijn, groeit de aandacht voor duurzamer reststroombeheer. Dit komt mede door strengere lozingsnormen en de wens om de milieu-impact van de bereiding van drinkwater te beperken. In recente studies en praktijkprojecten worden daarom alternatieve strategieën onderzocht. Hierbij moet worden gedacht aan technieken zoals verdamping (bijvoorbeeld in het kader van 'Zero Liquid Discharge' (ZLD) [48]), hergebruik van concentraat in industriële processen of aanvullende zuiveringsstappen met actieve kool of ionenwisselaars, of oxidatieve processen.

Een andere ontwikkeling is de inzet van gesloten systemen, zoals CCRO (zie subparagraaf 4.6.2). Daarmee wordt de terugwinning van water verhoogd en de hoeveelheid reststroom beperkt. Ook configuraties met hogere recovery en aangepaste voorbehandeling (zoals verwijdering van calcium of silica) dragen bij aan een efficiënter gebruik van water en chemicaliën.

4.5 Casussen

Voor casussen op het gebied van NF en RO, zie Bijlage VI.

4.6 Ontwikkelingen

4.6.1 Nieuwe membranen

Bij het ontwikkelen van nieuwe type membranen wordt vooral gekeken naar membranen die minder vervuילend zijn, bijvoorbeeld een alternatief voor spiraalgewonden NF membranen:

- Capillaire NF/directe nanofiltratie (NX Filtration, Pentair)
Deze membranen worden bedreven met een crossflow feed en bleed systeem. Dit beperkt de vervuiling en reduceert de inzet van antiscalants en reinigingen. Door de selectiviteit kan een hogere recovery worden bereikt dan bij een RO membraan zonder kans op scaling [31, 32].
- Capillaire keramische NF membranen (Inopor)
Deze membranen op basis van keramiek beloven een hoge chemische, mechanische en thermische stabiliteit. Ze beloven een lange levensduur, hoge flux, en duurzaamheid en zouden bij toepassing interessant zijn voor de zuivering [33].

Daarnaast worden er membranen ontwikkeld voor de verwijdering van specifieke stoffen (op basis van bijvoorbeeld lading). Dit gebeurt onder andere door het aanbrengen van speciale lagen op het membraanoppervlak. Hiervan zijn de capillaire NF/directe nanofiltratie een voorbeeld:

- 'Layer by Layer' (LBL) membranen
Anders dan de huidige standaard TFC membranen zijn deze membranen opgebouwd uit verschillende laagjes op een basis membraan. Door de chemie van de verschillende laagjes aan te passen, kunnen verschillende membraaneigenschappen worden beïnvloed. De laagjes zijn vaak van verschillende lading waardoor ze 'gestapeld' kunnen worden aangebracht. Op dit moment worden deze membranen toegepast in de capillaire NF van NX Filtration [31].
- Grafeenoxide membranen
Dit zijn membranen waarin grafeenoxide is verwerkt. Dat geeft een verbeterde selectiviteit en maakt absorptie in het membraan (en adsorptie aan het grafeenoxide) mogelijk bij een hogere permeabiliteit.
- Op dit moment is er veel onderzoek gaande naar verbetering van membranen. De opbrengsten daarvan zijn nu nog niet beschikbaar. In ontwikkeling zijn membranen waarin nanodeeltjes zijn verwerkt. Deze nanodeeltjes absorberen microvervuiling of zetten microvervuiling om in andere (minder schadelijke) stoffen [17].
- Positief geladen nanofiltratie membranen
Anders dan de meeste membranen hebben deze nanofiltratie membranen een positieve in plaats van een negatieve oppervlaktelading. Door de positieve oppervlaktelading kan een andere selectiviteit worden veroorzaakt dan mogelijk bij negatief geladen membranen. Dit kan een positief effect hebben bij het scheiden van kationen in een voedingsstroom of bijvoorbeeld bij het scheiden van magnesium en lithium [34].

Module ontwerp is een ander veld waar ontwikkelingen plaatsvinden. Hierbij kan nog van alles worden geoptimaliseerd, bijvoorbeeld de spacers en de drukbestendigheid:

- Spiraal gewonden membranen bevatten spacers om vervuiling tegen te gaan. Deze spacers bestaan uit een gaasachtige structuur en hebben een patroon om de waterstroom in beweging/turbulent te houden. Dit betekent extra productiestappen en complexiteit, en dus kosten in de productie. Er wordt onderzoek gedaan om een 3d patroon te integreren in het membraan en zo hetzelfde concept te bereiken zonder feed spacer [16].
- '(Ultra) High Recovery Reverse Osmosis' ((U)HRRO)
Dit is een groep technieken op basis van RO die zijn ontwikkeld met als doel een hogere recovery van het voedingswater. De technieken werken tot een hogere transmembraandruk dan een normaal zeewater RO membraan door een stevigere membraanconstructie. Hierdoor kan een hogere recovery worden bereikt en is de osmotische druk van zeewater minder een probleem.

4.6.2 Nieuwe configuraties

De systeemconfiguratie wordt aangepast zodat de recovery van de membraaninstallatie omhoog kan. Dit gebeurt deels door het aanpassen van de bedrijfsvoering en deels door het aanpassen van de voorbehandelingen (verwijderen Ca en Si door ionenwisselaar):

- ‘Closed-circuit reverse osmosis’ (CCRO)
Dit is een techniek die is ontwikkeld om RO toe te passen voor een hoge recovery dan een traditioneel RO proces. CCRO werkt op het principe van inductietijd van scaling. Dit is de tijd die een oververzadigd zout (meer zout in het water dan kan oplossen in het water) nodig heeft om neer te slaan (scaling). Door de RO periodes dead-end met een crossflow te bedrijven en dit af te wisselen met periodes waarin het concentraat wordt vervangen door vers (onderverzadigd) voedingswater, wordt voorkomen dat scaling optreedt. Doordat de periode van oververzadiging kortdurend is (in tegenstelling tot normaal RO), kan een hogere recovery worden bereikt en wordt er hierdoor minder concentraat geproduceerd. Het proces is gepatenteerd door DuPont en het patent [35] loopt medio 2026 af.
- ‘Flow Reversal Reverse Osmosis’ (FRRO)
Het betreft een concept dat is ontwikkeld om een hogere recovery te bereiken met een RO installatie. De techniek is gepatenteerd door ROTEX [36]. Het werkt op het principe van over en onderverzadiging van water in een RO stack. Een multistage RO installatie heeft meerdere drukbuizen in serie met een aflopend aantal drukbuizen per stage (bijvoorbeeld een 3-stage installatie met 8-4-2 drukbuizen per stage, met een oplopende oververzadiging van het voedingswater). Door de volgorde van de drukbuizen te wisselen gedurende operatie wordt een membraan afwisselend toegepast op over- en onderverzadigd voedingswater, en wordt eventuele scaling uit een periode met oververzadigd voedingswater opgelost tijdens een periode met onderverzadigd voedingswater.
- Periodieke Permeaat Circulatie (PPC)
Dit is een techniek die als doel heeft de recovery van een RO te verhogen tot een niveau hoger dan een standaard RO proces. Het werkt in zekere zin vergelijkbaar met CCRO en FRRO op basis van over- en onderverzadiging. Periodiek wordt de voeding van de RO periodiek gewisseld van voedingswater met zouten, naar zoutloos permeaat. Omdat het permeaat zoutloos is, is het agressief en lost het de ontstane scaling op in de voedingskant van het membraan waarmee verdere scaling wordt voorkomen. Dit wordt reeds toegepast op drinkwaterproductielocatie Beilen van WMD Drinkwater.
- ‘Zero liquid Discharge’ (ZLD)
Het gaat om een strategie om te voorkomen dat er concentraat ontstaat en die volop in onderzoek is. De strategie bestaat vaak uit het gebruik van diverse technieken voor ontharding, nanofiltratie, hoge recovery RO en verdere concentratie met membraandestillatie, en wordt vaak afgesloten met bipolaire elektrolyse of een thermische kristallisor. Monitoring van capillaire UF/MF membranen is vol in ontwikkeling, voor alle onderdelen van de performance van de membranen. Een voorbeeld is het onderzoek naar natuurlijke virussen van KWR Water Research Institute waarin online integriteit monitoring wordt bestudeerd. Ook zijn er ontwikkelingen gaande in online monitoring van vervuiling en de beïnvloeding op de performance door water kwaliteit en de bedrijfsvoering [15].

5 Regelgeving

5.1 Introductie

De beschikking over drinkwater vervult in een eerste levensbehoefte. Het drinkwater dient daarom schoon en veilig te zijn voor directe consumptie. De overheden, Europees en landelijk, nemen daarom maatregelen om de kwaliteit en leveringszekerheid van het drinkwater te beschermen en reguleren. Dit is in de praktijk gedaan in de Drinkwaterwet en het Drinkwaterbesluit; beiden zijn voortgevloeid uit de Europese Drinkwaterrichtlijn. In dit hoofdstuk is de regelgeving met betrekking tot membraanfiltratie in Nederland opgenomen, hierbij is onderscheid gemaakt in publiekrechtelijke en privaatrechtelijke regelgeving. De eerste twee paragrafen gaan over de publiekrechtelijke regelgeving voor producten in contact met (drink)water, gevolgd door de relevante waterkwaliteitsparameters. De voorlaatste paragraaf gaat over de privaatrechtelijke regelgeving voor de te doseren chemicaliën. De laatste paragraaf gaat in op de optimale samenstelling van drinkwater.

Bij het reguleren van de veiligheid van drinkwater, spelen gezondheidkundige aspecten (zie verder) een belangrijke rol. Het water dient in overeenstemming met de norm volgens Bijlage A van het Drinkwaterbesluit te worden gezuiverd. Membraanfiltratie is een van de technieken die daarbij kan worden ingezet. Membraanfiltratie vormt een unieke barrière, waardoor veel verontreinigingen nagenoeg volledig worden tegengehouden. Membraanfiltratie kan als een voorstap worden ingezet, om vervuiling in nastappen te voorkomen. Meestal wordt het als een van de laatste zuiveringsstappen bij de bereiding van drinkwater ingezet. Wanneer membraanfiltratie als laatste zuiveringsstap wordt ingezet, kan het bijdragen aan de verwijdering van stoffen zodat de concentratie van deze stoffen onder de maximaal toegestane waarde wordt gebracht. De waterkwaliteitseisen dienen als uitgangspunt voor het ontwerp van deze zuiveringsstap en zijn opgenomen in Bijlage A van het Drinkwaterbesluit [25]. In het geval membraanfiltratie niet de laatste zuiveringstap is en de genoemde parameters niet worden beïnvloed door navolgende processen, dient het effluent aan deze eisen te voldoen.

Membraanfiltratie heeft een sterk verwijderende potentie en daarom dient ervoor te worden gewaakt dat voor andere componenten (mineralen) de concentratie niet juist te laag is geworden (gedemineraliseerd). Conform Bijlage A van het Drinkwaterbesluit [25] kunnen minimumconcentraties gelden, bijvoorbeeld voor de parameter totale hardheid (calcium en magnesium) of het totaal aan opgeloste vaste stoffen. Wanneer er sprake is van een te lage concentratie kan dit worden opgelost met een remineralisatie stap of door mengstromen te gebruiken.

5.2 Publiek rechtelijke regelgeving: gezondheidkundige aspecten

Op materialen of chemicaliën gebaseerde producten en middelen die in contact (kunnen) komen met drinkwater of het daarvoor bestemde water mogen geen stoffen afgeven in hoeveelheden die schadelijk kunnen zijn voor de gezondheid van de consument of anderszins de (drink)waterkwaliteit aantasten. Daartoe dienen die producten te voldoen aan de voorwaarden voor toxicologische, microbiologische en organoleptische aspecten⁵, die zijn vastgelegd in de van kracht zijnde ministeriële ‘Regeling materialen en chemicaliën drink- en warm tapwatervoorziening’⁶ [37]. Dit betekent dat de procedure voor het verkrijgen van een erkende kwaliteitsverklaring volgens die Regeling met positief resultaat dient te zijn afgerond. Een en ander wordt in de twee navolgende subparagrafen uitgewerkt voor de betreffende onderdelen van de zuivering (materialen voor de installatie) en voor

⁵ Verder aan te duiden als ‘gezondheidkundige aspecten’. Binnen de Europese Unie is daarvoor de term ‘hygienic aspects’ gangbaar, maar ‘hygiënische aspecten’ zou voor de Nederlandse situatie verwarring (kunnen) geven met het ‘hygiënisch werken’ volgens de ‘Hygiëncode Drinkwater’ in verband met de winning, bereiding, de opslag en het transport en de distributie van (drink)water zonder desinfectiemiddel.

⁶ Verder aan te duiden als de ‘regeling’

de daarbij toegepaste chemicaliën⁷. In die subparagrafen wordt de wet- en regelgeving beschreven voor de gezondheidkundige aspecten van onderdelen van installaties, die in contact (kunnen) komen met drinkwater of het daarvoor bestemde water.

5.2.1 Op materialen gebaseerde producten ten behoeve van installaties

Voor de publiekrechtelijke regelgeving voor installaties die gebruikt worden bij membraanfiltratie wordt verwezen naar de praktijkcode PCD 4 [49] en dan met name § 4.2. Voor een gedetailleerde beschrijving van de wet- en regelgeving voor metalen en kunststof producten en materialen wordt verwezen naar de praktijkcode PCD 12 [50]. Het gaat daarin weliswaar om een toelichting op de Regeling voor onderdelen van leidingen en leidingnetten voor het transport en de distributie van (drink)water, maar de beoordeling en de toelaatbaarheid voor metalen en (in situ) kunststof materialen ten behoeve van installaties voor de bereiding van (drink)water (waaronder coatings) zijn niet wezenlijk anders.

In het geval van membranen gaat het om een *samengesteld product* en is dit ook als zodanig specifiek opgenomen in de Regeling. Hierin wordt sterk aanbevolen dat een membraanfiltratiemodule als geheel (zoals het in praktijk zal worden gebruikt) getest dient te worden volgens de Europese norm [NEN-EN 12873-4](#). Bij een positief resultaat wordt er een kwaliteitsverklaring afgegeven voor de gehele module. Hier mag uitsluitend van worden afgeweken na beoordeling door de Commissie van Deskundigen Materialen en Chemicaliën. In dat geval dienen onderdelen afzonderlijk getest te worden volgens de Europese norm [NEN-EN 12873-1](#). Aanvullend dienen de instructies van de fabrikant of leverancier ten aanzien van de voorbehandeling van membraanfiltratiemodule in acht te worden genomen. Uitsluitend onderdelen die in direct contact komen met het te behandelen water in aanmerking voor een zogenoemde *migratietest*. De beoordeling van een dergelijk membraanfiltratiemodule vindt vervolgens plaats op basis van de gehele som (totale effect) van de verschillende onderdelen.

5.2.2 Op chemicaliën gebaseerde producten ten behoeve van reiniging en desinfectie van installaties, en van de zuivering

Volgens de definitie in Artikel 1 van het Drinkwaterbesluit [[25] zijn ‘chemicaliën’ stoffen of daaruit samengestelde producten die ten behoeve van de bereiding van drinkwater in contact worden gebracht met te behandelen water of drinkwater, dan wel daaraan worden toegevoegd met doel een kwaliteitsverandering van het water te bewerkstelligen. Hieruit zou kunnen worden geconcludeerd dat membranen ten behoeve van de bereiding van drinkwater in de groep chemicaliën worden geplaatst.

In § 3.3.2 ‘Chemicaliën’ van § 3.3 ‘Publiekrechtelijke regelgeving’ van de praktijkcode PCD 1-1 [38] wordt nader ingegaan op de publiekrechtelijke regelgeving voor filtermaterialen en waterbehandelingschemicaliën. Europese normen voor chemicaliën vormen de grondslag voor de beoordeling van gezondheidkundige aspecten volgens de Regeling [37], die enkele (normen van) chemicaliën expliciet noemt. Deze normen zijn opgenomen in een overzicht in praktijkcode PCD 17 [39]. Per geval is daarbij tevens een hyperlink opgenomen naar bedrijven en producten met een erkende kwaliteitsverklaring volgens de Regeling, beschikbaar op de webpagina [Overzicht gecertificeerde producten - Praktijkcodes Drinkwater](#) van de website www.PraktijkcodesDrinkwater.nl, zoals die op dit moment zijn afgegeven door de ‘erkende certificatie-instelling’ Kiwa Nederland.

Op basis van Artikel 19 en Artikel 20A van het Drinkwaterbesluit [25] moet in het algemeen worden gesteld dat waterbehandelingschemicaliën en filtermaterialen doeltreffend, veilig en goed moeten worden beheerd. Dit voorkomt mogelijke schadelijke gevolgen voor de gezondheid van consumenten. Er dient derhalve te worden gecontroleerd op hun kenmerken, hygiënevoorschriften en zuiverheid. Het is belangrijk dat het microbiële groei in

⁷ Zowel ‘waterbehandelingschemicaliën’ (die worden gedoseerd) als filtermaterialen worden volgens de begripsomschrijving in Artikel 1 van het Drinkwaterbesluit [1] als ‘chemicaliën’ beschouwd, omdat die met het water in contact worden gebracht met het doel een kwaliteitsverandering te bewerkstelligen

water niet versterkt, tenzij die het specifieke doel is van de dosering. Ook mag er strikt niet meer worden gebruikt dan noodzakelijk is.

5.3 Privaatrechtelijke regelgeving

5.3.1 Op chemicaliën gebaseerde producten

Belangrijke aspecten die een rol spelen bij de kwaliteitsborging van gebruikte chemicaliën zijn beschreven in praktijkcode PCD 17 [39]. Een erkende kwaliteitsverklaring op producten in contact met (drink)water volgens de Regeling (gezondheidskundige aspecten, zie § 6.2) is uitsluitend van toepassing voor de productielocatie van een 'certificaathouder' (letterlijk: tot aan de poort). Voor de kwaliteitsborging van de toe te passen chemicaliën in het traject van die productielocatie tot op het terrein van het drinkwaterproductiebedrijf kan van certificatie gebruik worden gemaakt (op basis van vrijwilligheid) en wel op basis van relevante 'beoordelingsrichtlijnen' (BRL's) van certificatie-instelling Kiwa Nederland (zie Bijlage III). Certificatie van het transport van chemicaliën is mogelijk op basis van Kiwa-beoordelingsrichtlijn [BRL-K15001](#) en een overzicht van de op basis van die richtlijn gecertificeerde bedrijven is beschikbaar via [deze link](#) naar een pagina van de Kiwa-website.

5.3.2 Optimale samenstelling van drinkwater

Uiteindelijk dient de membraanfiltratie bij te dragen aan een optimale samenstelling van het drinkwater. In het rapport KWR 2013.069 [40] zijn verschillende aanbevelingen gedaan voor de optimale samenstelling van drinkwater. Die aanbevelingen hebben als doel:

- De afgifte van de metalen chroom, koper, lood en nikkel vanuit het leidingnet en drinkwaterinstallaties zoveel mogelijk te beperken, met als uitgangspunt dat de maximumwaarden volgens het Drinkwaterbesluit niet worden overschreden.
- De aantasting van leidingmaterialen te beperken en de vorming van beschermende deklagen te bevorderen.
- Kalkafzetting te beperken.
- Sterke veranderingen van de pH in het leidingnet te beperken.

6 Literatuur

- [1] Sombekke, H.D.M., en Kappelhof, J.W.N.M. (1996): 'Membraanconcentraat; Verwijderingsmogelijkheden een verkenning', rapport SWE 96.011, KIWA Onderzoek en Advies in opdracht van VEWIN, Nieuwegein.
- [2] Waal, L. de (2020): 'Huidige en toekomstige praktijk van NF/RO concentraat management', rapport [BTO 2020.019](#), KWR Watercycle Research Institute, Nieuwegein.
- [3] Schippers, J., Kruithof, J., Nederlof, M., en Hofman, J. (2004): 'Integrated Membrane Systems', order number 90899, Awwa Research Foundation/EPA.
zie [Membrane Processes](#) (pagina 5)
- [4] Huiting, H., en Bosklopper, Th.G.J. (1998): 'Workshop Membraantechnologie – NF en Omgekeerde Osmose', rapport KOA 98.207, KIWA Onderzoek en Advies in opdracht van N.V. Watermaatschappij Zuid-Holland Oost, Nieuwegein.
- [5] Huiting, H., Koning, M. de, en Beerendonk, E.F. (1999): 'Normalisatie van gegevens bij nanofiltratie en omgekeerde osmose', rapport SWI 99.166, KIWA Onderzoek en Advies in opdracht van bedrijfstak Waterleidingbedrijven, Nieuwegein.
- [6] Kooij, D. van der, Hijnen, W.A.M., en Cornelissen, E.R. (2009): 'Biofouling of spiral-wound membranes in water treatment', rapport BTO 2009.039, KWR Watercycle Research Institute, Nieuwegein.
- [7] Arnault, S.F. (2009): 'Biofouling and particulate fouling of reverse osmosis spiral wound membrane elements', rapport (geen nummer), KWR Watercycle Research Institute, Nieuwegein.
- [8] Haidaria, A.H., Heijman, S.G.J., en Meer, W.G.J. van der (2018): 'Optimal design of spacers in reverse osmosis', Separation and Purification Technology, Volume 192, pages 441 – 456.
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1383586617324188>
- [9] Lenntech Water & Process Solutions and Dow Water & Process Solutions (2011): 'Ultrafiltration; Product Manual', version 3.
<https://www.lenntech.com/Data-sheets/Dow-Ultrafiltration-L.pdf>
- [10] Diverse Toray product manuals, zie webpagina <https://www.water.toray/knowledge/manual/>
- [11] Diverse Hydranautics product manuals, zie webpagina <https://membranes.com/knowledge-center/technical-papers/>
- [12] Gijsbertsen, A. (2004): 'Inventarisatie UF-installaties in Nederland', rapport BTO 2004.016, Kiwa Water Research, Nieuwegein.
- [13] DVGW (2019): 'Filtrationsverfahren zur Partikelentfernung; Teil 5: Membranfiltration', Arbeitsblatt W 213-5, 3. Auflage, DVGW, Bonn.
[DVGW-Arbeitsblatt W 213-5: Membranfiltrationsanlagen](#)
- [14]] Harmsen, D., Hommes, A., Heijnen, L., en Cornelissen, E. (2024): 'Natuurlijke virussen voor bewaking integriteit membraanfiltratie systemen', rapport [KWR 2024.039](#), KWR Water Research Institute, Nieuwegein.

[15] Li, X., Mo, Y., Li, J., Guo, W., and Ngo, H.H. (2017): 'In-situ monitoring techniques for membrane fouling and local filtration characteristics in hollow fiber membrane processes: A critical review', Journal of Membrane Science, Volume 528, pages 187 – 200.

<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0376738816324437>

[16] Baitalow, K., Wypysek, D., Leuthold, M., Weisshaar, S., Lölsberg, J., en Wessling, M. (2021): 'A mini-module with built-in spacers for high-throughput ultrafiltration', Journal of Membrane Science, Volume 637, pages 1 – 5.

<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0376738821005470>

[17] Shoshaa, R., Ashfaq, M.Y., Al-Ghouti, M.A. (2023): 'Recent developments in ultrafiltration membrane technology for the removal of potentially toxic elements, and enhanced antifouling performance: A review', Environmental Technology & Innovation, Volume 31.

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S235218642300158X>

[18] Budiningsih, S., Laksono, S., Adityosulindro, S., and Suciningsih, L. (2024): 'Combination of activated carbon/ultrafiltration as pre-treatment for seawater reverse osmosis plants', The 7th Environmental Technology and Management Conference (ETMC 2023), Issue E3S Web of Conf., Volume 485.

https://www.e3s-conferences.org/articles/e3sconf/pdf/2024/15/e3sconf_etmc2024_02011.pdf

[19] DuPont (2024): 'FilmTec™ Reverse Osmosis Membranes Technical Manual', Version 17

<https://www.dupont.com/content/dam/water/amer/us/en/water/public/documents/en/RO-NF-FilmTec-Manual-45-D01504-en.pdf>

[20] Toray (2025): 'Toray RO Handling Manual', 06-G-MB1-250728.

[Toray RO Operation, Maintenance, and Handling Manual](#)

[21] Cornelissen, E.R. (2005): 'NF- en RO-installaties in beheer bij Nederlandse waterbedrijven', rapport BTO 2005.028, Kiwa Water Research, Nieuwegein.

[22] Hofs, B., Cornelissen, E.R., Vries, D., Huiting, H., Nederlof, M.M., en Post, J.W. (2014): 'Geconcentreerde zoute reststromen' rapport [BTO 2012.014](#), KWR Watercycle Research Institute, Nieuwegein.

[23] Okamoto, Y., and Lienhard, J.H. (2019): 'How RO membrane permeability and other performance factors affect process cost and energy use: A review', Desalination, volume 470, pages 48 – 49.

[How RO membrane permeability and other performance factors affect process cost and energy use: A review - ScienceDirect](#)

[24] Vries, D., Wols, B., Korevaar, M., en Vonk, E. (2017): 'AquaPriori: a priori het verwijderingsrendement bepalen', rapport [KWR 2017.027](#), KWR Watercycle Research Institute, Nieuwegein.

[25] Staatsblad (2011): Drinkwaterbesluit van 23 mei 2011, Staatsblad van het Koninkrijk der Nederlanden, nummer 293, 21 juni 2011 ([oorspronkelijke editie](#))

vigerend vanaf 1 januari 2024: [Drinkwaterbesluit](#)

[26] Cornelissen, E.R., Vrouwenvelder, J.S., Heijman, S.G.J., Viallefont, X.D., Kooij, D. van der, en Wessels, L.P. (2007): 'Periodic air/water cleaning for control of biofouling in spiral wound membrane elements' Journal of Membrane Science, Volume 287, Issue 1, pages 94 – 101.

[Periodic air/water cleaning for control of biofouling in spiral wound membrane elements - ScienceDirect](#)

[27] Wessels, P., Heijman, B., Viallefont, X, en Cornelissen, E. (2006): 'Nieuwe aanpak membraanvervuiling: reinigen met lucht en water', H₂O, nummer 12, pagina 38 – 40.

407983

[28] Harmsen, D., Cornelissen, E., Beerendonk, E., Pot, M., en Agtmaal, S. van (2014): 'Periodiek spoelen met lucht en water (AiRO) voorkomt membraanvervuiling in hogedrukfiltratie-membranen', H₂O-Online 29 oktober 2014.

Periodiek spoelen met lucht en water (AiRO) voorkomt membraanvervuiling in hogedrukfiltratie-membranen

[29] Cornelissen, E. (2005): 'Membraanreiniging van NF/RO-installaties; Een literatuurstudie', rapport BTO 2005.060, Kiwa N.V. Water Research, Nieuwegein.

[30] Harmsen, D., Bertelkamp, C., Waal, L. de, Hornstra, L., en Cornelissen, E. (2018): 'Integriteitsbewaking RO', rapport KWR 2018.126, KWR Watercycle Research Institute, Nieuwegein.

[31] NX Filtration: 'Hollow Fiber Nanofiltration membranes', webpagina <https://nxfiltration.com/products/nano/>

[32] Pentair X-Flow (2022): 'HFNano for the production of drinking water', Enschede.
<https://www.pentair.com/assets/xf-br-hfnano-10085-en.pdf>

[33] webpagina <https://www.inopor.com/en/products/ceramic-nanofiltration.html>

[34] Liu, Y., Matsuyama, H., Liu, Y., Li, Y., Zheng, J., Dai, Z., en Bruggen, B. van der (2025): 'Advances in positively charged nanofiltration membranes: targeted strategies for optimized water treatment', Desalination, Volume 600.
Advances in positively charged nanofiltration membranes: targeted strategies for optimized water treatment - ScienceDirect

[35] DuPont Water Solutions: 'DesaliTec™ CCRO High Efficiency Smart Reverse Osmosis Systems', webpagina <https://www.dupont.com/brands/desalitec-ccro-high-efficiency-ro.html>

[36] ROTEC: 'How the flow reversal technology has revolutionized water desalination', webpagina <https://rotec-water.com/knowledge/flow-reversal-technology-water-desalination>

[37] Staatscourant (2011): 'Regeling materialen en chemicaliën drink- en warm tapwatervoorziening' van 29 juni 2011, nr. 11911, 18 juli 2011 (oorspronkelijke editie).
vigerend vanaf 1 januari 2024: Regeling materialen en chemicaliën drink- en warm tapwatervoorziening

[38] Meerkerk, M.A. (2024): 'Hygiëncode Drinkwater; *Deel 1: Algemeen*', praktijkcode PCD 1-1:2024, KWR Water Research Institute, Nieuwegein.

[39] Meerkerk, M.A., en Brand, T.P.H. van den (2022): 'Richtlijn voor de kwaliteitsborging van chemicaliën ten behoeve van de bereiding van drinkwater; In het volledige traject van productie tot en met gebruik', praktijkcode PCD 17:2022, KWR Water Research Institute, Nieuwegein.

[40] Slaats, P.G.G., Meerkerk, M.A., en Hofman-Caris, C.H.M (2013): 'Conditionering: de optimale samenstelling van drinkwater; Kiwa-Mededeling 100 – Update 2013', rapport KWR 2013.069, KWR Watercycle Research Institute, Nieuwegein.

[41] DVGW (2019): 'Filtrationsverfahren zur Partikelentfernung; Teil 5: Membranfiltration', Arbeitsblatt W 213-5, april 2019, Deutsche Verein des Gas- und Wasserfaches e.V., Bonn.

[42] Bismark Singh (2011): 'Mathematical Modeling and Simulation of Gas Permeation Membrane Modules', thesis Bismark Singh, University of Southampton, Southampton.

<https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/plate-and-frame-module>

[43] Flemming, H.-C. (2002): 'Biofouling in water systems – cases, causes and countermeasures', Applied Microbiology and Biotechnology, volume 59, issue 6, pages 629 – 640.

[\(PDF\) Biofouling in water systems - Cases, causes and countermeasures](#)

[44] Le-Clech, P., Chen, V., and Fane, T.A.G. (2006): 'Fouling in membrane bioreactors used in wastewater treatment', Journal of Membrane Science, volume 284, issues 1 – 2, pages 17 – 53.

[Fouling in membrane bioreactors used in wastewater treatment - ScienceDirect](#)

[45] Matin, A., Khan, Z., Zaidi, S.M.J., and Boyce, M.C. (2011): 'Biofouling in reverse osmosis membranes for seawater desalination: Phenomena and prevention', Desalination, volume 281, pages 1 – 16.

[Biofouling in reverse osmosis membranes for seawater desalination: Phenomena and prevention - ScienceDirect](#)

[46] Bruggen, B. van der, and Vandecasteele, C. (2003): 'Removal of pollutants from surface water and groundwater by nanofiltration: overview of possible applications in the drinking water industry', Environmental Pollution, volume 122, issue 3, pages 435 – 445.

[Removal of pollutants from surface water and groundwater by nanofiltration: overview of possible applications in the drinking water industry - ScienceDirect](#)

[47] BinAhmed, S., Hozalski, R.M., and Romero-Vargas Castrillón, S. (2021): 'Feed Temperature Effects on Organic Fouling of Reverse Osmosis Membranes', Environmental Science & Technology Engineering, volume 5, pages 1 – 12.

[2016_06b_rpt_bin_ahmed_etal_2021_manuscript.pdf](#)

[48] Vlaski, A. (2024): 'Concentraat/brijnproblematiek bij toepassing van ontziltingstechnologie', Arcadis Nederland B.V. in opdracht van het Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat, Rotterdam (vertrouwelijk).

[49] Meerkerk, M.A. (2020): 'Richtlijn voor systemen voor de opslag van drinkwater; *Ontwerp, aanleg en beheer (gebaseerd op NEN-EN 1508:1998)*', praktijkcode [PCD 4:2020](#), KWR Water Research Institute, Nieuwegein.

[50] Meerkerk, M.A. (2018): 'Wet- en regelgeving in Nederland voor onderdelen van drinkwaterleidingnetten; *Een toelichting op de 'Regeling materialen en chemicaliën drink- en warm tapwatervoorziening' (versie 1 juli 2017)*', praktijkcode [PCD 12:2018](#), KWR Watercycle Research Institute, Nieuwegein.

I Begrippen met bijbehorende omschrijving en afkortingen inclusief acroniemen met bijbehorende betekenis

Om membraanfiltratie goed te kunnen begrijpen en toepassen, is het belangrijk vertrouwd te zijn met een aantal kernbegrippen, procesparameters en afkortingen. Deze termen en afkortingen zijn in het navolgende als zodanig onderscheiden en op alfabetische volgorde gerangschikt, en worden omschreven of toegelicht.

A/B-factoren

Deze twee parameters beschrijven de prestaties van een membraan:

- **A-factor:** geeft de waterdoorlaatbaarheid aan. Hoe hoger deze waarde, hoe beter het membraan water doorlaat bij een bepaalde druk.
- **B-factor:** beschrijft hoe snel zouten door het membraan diffunderen. Een lage B-waarde betekent dat het membraan beter zouten tegenhoudt.

De verhouding tussen deze factoren (A/B) zegt iets over de **selectiviteit** van een membraan.

backwash

Tijdens een backwash of terugspoeling wordt de waterstroom omgedraaid, zodat het schone water (dat normaliter door het membraan wordt gevoerd) teruggaat richting de voedingszijde. Een backwash wordt uitgevoerd om de vervuiling die zich heeft opgehoopt op het membraanoppervlak en in de poriën te verwijderen.

Chemical Enhanced Backwash

Een 'Chemical Enhanced Backwash' is een uitgebreide BW die wordt uitgevoerd na een aantal filtratie- en BW-cycli. Hierbij worden aan het permeaat of drinkwater reinigingsmiddelen/chemicaliën gedoseerd. De keuze van de chemicaliën hangt af van het type vervuiling en het type membraanmateriaal.

chemicaliën

Stoffen of daaruit samengestelde producten, niet zijnde biociden als bedoeld in artikel 1 van de Wet gewasbeschermingsmiddelen en biociden, die ten behoeve van de bereiding van drinkwater in contact worden gebracht met te behandelen water of drinkwater, dan wel daaraan worden toegevoegd met het doel een kwaliteitsverandering van dat water te bewerkstelligen (Artikel 1 van het Drinkwaterbesluit [25]; in de Kiwa-beoordelingsrichtlijn [BRL-K15001](#) wordt de aanduiding 'drinkwaterchemicaliën' gehanteerd).

Cleaning in Place

CIP is een veelgebruikte methode waarbij chemicaliën zoals zuren, alkaliën of detergenten (reinigingsmiddelen) bij een verhoogde temperatuur door een membraansysteem worden gepompt om de vervuiling op te lossen. De concentratie van de gebruikte chemicaliën en de duur van het reinigingsproces zijn belangrijke factoren. De compatibiliteit van het membraan met de gekozen chemicaliën moet altijd worden gecontroleerd.

concentraat

Het concentraat (ook wel retentaat of brijn (ontzouting) genoemd) is de reststroom die de stoffen bevat die door het membraan zijn tegengehouden. Deze stroom is geconcentreerder dan de oorspronkelijke voeding en moet vaak worden afgevoerd of worden nabehandeld.

concentratiepolarisatie

Tijdens filtratie hopen opgeloste stoffen zich op aan het membraanoppervlak, waardoor daar een hogere concentratie ontstaat dan in de bulkstroom. Dit verhoogt de osmotische druk, verlaagt de flux en kan vervuiling (zoals scaling) bevorderen. Dit fenomeen is omkeerbaar en kan worden beperkt door het verhogen van de stroomsnelheid of het gebruik van spacers.

cross flow

Cross-flow is een bedrijfswijze bij membraanfiltratie waarbij het voedingswater parallel langs het membraanoppervlak stroomt in plaats van er loodrecht doorheen. Hierbij wordt slechts een deel van het water als permeaat afgevangen; de rest stroomt als concentraat langs het membraan en wordt afgevoerd of hergebruikt. Deze stroming helpt vervuiling tegen te gaan, omdat de deeltjes aan het membraanoppervlak worden meegevoerd in plaats van dat ze zich daar ophopen. Cross-flow wordt vooral toegepast bij membranen die gevoelig zijn voor vervuiling, zoals spiraalgewonden membranen bij NF en RO.

dead-end

Dead-end is een bedrijfswijze bij membraanfiltratie waarbij het volledige voedingswater door het membraan wordt geperst. Alle deeltjes die niet door het membraan kunnen, blijven aan het oppervlak achter. Er is geen aparte concentraatstroom; vervuiling wordt periodiek verwijderd door terugspoelen (backwash). Dead-end filtratie is relatief eenvoudig en energiezuinig, en wordt vooral toegepast bij micro- en ultrafiltratie, zoals bij holle rietjes of capillaire membranen.

drukval over het voedingskanaal

Bij spiraalgewonden membranen is de druk aan het begin en het eind van het voedingskanaal verschillend. De drukval over het voedingskanaal van een membraan is gelijk aan de druk aan de concentraatzijde van het membraan minus de druk aan de voedingszijde van het membraan. Deze drukval (in bar) is een belangrijke indicator voor vervuiling in het systeem en moet worden genormaliseerd voor onder meer de temperatuur en de osmotische druk.

feed-and-bleed

Een bedrijfsmodus waarbij een deel van het water wordt gerecirculeerd over de membranen, terwijl tegelijkertijd een deel van het permeaat en concentraat wordt afgevoerd. Dit zorgt voor een stabiele balans en constante concentratiegradiënt in het systeem.

forward flush

Tijdens een forward flush (langspoeling) wordt het water onder druk en met hogere langstroomsnelheid langs het membraanoppervlak, zonder permeatie, geleid. Daardoor zal de zich op het membraanoppervlak opgehoopte vervuiling worden verwijderd.

holle rietjes en capillaire module

Holle rietjes en capillaire modules zijn zelfdragend. De diameters van de rietjes liggen in het bereik van 0,5 tot 1,0 mm en de modules bevatten duizenden rietjes die in een bundel zijn gerangschikt en waarvan de vrije uiteinden zijn ingegoten in bijvoorbeeld epoxy. De voedingsoplossing kan binnen of buiten de rietjes passeren en het permeaat wordt vervolgens afhankelijk van de toepassing aan de andere kant opgevangen (hoge drukken kunnen worden gebruikt als de voeding via/langs de buitenkant passeert). Deze modules hebben de hoogste pakdichtheid van alle toegepaste modules. Bij MF en UF worden vaak holle rietjes en capillaire modules gebruikt, aangezien deze goed presteren bij relatief vervuilde voedingen.

lucht/CO₂/water-spoeling

Door het gecombineerd inbrengen van lucht/CO₂ en water tijdens een hydraulische reiniging, wordt verstopping

van het voedingskanaal tegengegaan. Dat helpt om de doorstroming te verbeteren en de mate van vervuiling te beperken.

Mass Transfer Coëfficiënt

De MTC beschrijft de het gemak waarmee water of opgeloste stoffen door het membraanoppervlak bewegen en wordt beïnvloed door de flux, NPD en temperatuur.

membraanfiltratie

Membraanfiltratie is een technologie waarbij water wordt gezuiverd door het onder druk door een semipermeabel membraan te persen. Dit membraan laat water door, maar houdt ongewenste stoffen zoals deeltjes, bacteriën, virussen, organische stoffen en zouten tegen. De werking is gebaseerd op de grootte van de poriën in het membraan.

(membraan)selectiviteit

De mate waarin een membraan onderscheid maakt tussen verschillende componenten. Deze wordt vaak uitgedrukt in de retentie (hoeveelheid tegengehouden stof in %) en hangt af van het membraantype en de combinatie van A- en B-factoren.

microfiltratie

MF is een membraanfiltratietechniek waarbij deeltjes groter dan ongeveer 1 µm worden tegengehouden. Kleinere deeltjes zoals die kleiner dan 0,1 µm (wel afhankelijk van de specificaties met betrekking tot poriegrootte van het toegepaste membraan) kunnen grotendeels het membraan passeren. MF is vooral geschikt voor het verwijderen van zwevende stoffen en (in beperkte mate) colloïdale deeltjes, en voor de verwijdering van bacteriën.

migratietest

Een test om te onderzoeken of na contacttijd (met bijvoorbeeld membraan) de concentratie in het water boven een maximale concentratie (grenswaarde) uitkomt.

module

De kleinste eenheid waarin het membraanoppervlak is verpakt. Er zijn vier verschillende module ontwerpen bekend: plate and frame, tubulair, holle rietjes, capillaire en spiraalgewonden membraanmodules.

Molecular Weight Cut-Off

De MWCO geeft aan welk molecuulgewicht (in Dalton) voor 90% wordt tegengehouden door een membraan. Het is daarmee een maat voor de fijnheid van het membraan en bepaalt welke stoffen wel of niet het membraan kunnen passeren. Hoe lager de MWCO, hoe kleiner de poriën en hoe fijner de filtratie.

nanofiltratie

NF is een membraanfiltratietechniek waarbij stoffen tot 200 – 400 Da en multivalente ionen worden tegengehouden. NF is vooral geschikt voor het verwijderen zouten, bestrijdingsmiddelen en andere organische microverontreinigingen uit water. NF houdt onder andere tweewaardige zouten en grotere organische microverontreinigingen tegen (tussen 200 – 1.000 Da). Eenwaardige ionen (zoals Na⁺ of Cl⁻) worden slechts gedeeltelijk verwijderd. Bacteriën en virussen worden via nanofiltratie verwijderd, waardoor deze techniek ook voor desinfectie kan worden ingezet.

netto drijvende kracht

De NDP is de effectieve kracht waarmee water door het membraan wordt gedrukt. Dit is het verschil tussen de voedingsdruk en de som van de permeaatdruk en de osmotische druk aan de voedingszijde. Een voldoende NDP is essentieel voor een goede flux.

omgekeerde osmose

RO (omgekeerde osmose, in het verleden ook wel aangeduid als hyperfiltratie) is een membraanfiltratietechniek waarbij stoffen met een molecuulgewicht $> 50 - 200$ Da en in principe alle ionen worden tegengehouden. De techniek wordt toegepast wanneer het nodig is om eenwaardige ionen (zoals Na^+ , Cl^- en NO_3^-) en kleine organische stoffen uit water te verwijderen. RO zorgt voor de verwijdering van zouten, hardheid en organische microverontreinigingen. Bovendien draagt RO bij aan de desinfectie van het water, omdat ook bacteriën en virussen grotendeels worden tegengehouden.

osmotische druk

De osmotische druk is de druk die een oplossing uitoefent op een semipermeabel membraan en is de druk die nodig is om de natuurlijke waterbeweging (osmose) te stoppen. Osmose is een natuurlijk proces waarbij watermoleculen door een semipermeabel membraan bewegen van een gebied met een lage concentratie opgeloste stoffen naar een gebied met een hoge concentratie opgeloste stoffen.

permeaat (product)

Het water dat door een membraan is gegaan en daarmee grotendeels is ontdaan van de meeste verontreinigingen. Dit is het gewenste, gezuiverde eindproduct. Permeaat wordt ook wel product genoemd.

plate-and-frame

Plate-and-frame-modules zijn samengesteld uit vlakke plaatmembranen die op een sandwichachtige manier zijn geplaatst, samen met poreuze steunen voor de permeaattuitlaat en gaasachtige kanaalspacers voor de voeding- en concentraatstromen. Deze modules hebben een lage oppervlakte-per-volume-karakteristiek. Ze worden gebruikt voor kleine tot middelgrote toepassingen in nichegebieden.

recovery

Dit is het percentage van het voedingswater dat wordt omgezet in permeaat. Een recovery van 80% betekent dat 80% van het invoerwater wordt gezuiverd, terwijl 20% als concentraat overblijft. Recovery is beperkt door onder meer scaling en de oplosbaarheid van zouten.

retentie/zoutpassage

Retentie is het percentage van een specifieke stof dat door het membraan wordt tegengehouden. Zoutpassage is het omgekeerde: het deel dat door het membraan heen gaat. Beide parameters zijn belangrijk bij het beoordelen van de effectiviteit van een membraan voor specifieke verontreinigingen.

samengesteld product

Bestaat uit twee of meer onderdelen die van verschillende materialen zijn gemaakt, zoals membraanmodules, watermeters, kranen, douchekoppen en boilers met kunststof en metalen onderdelen.

spacer

Een afstandhouder tussen de membraanvellen die zorgt voor stroming van het voedingswater over het membraanoppervlak. Het houdt de membraanveloppen uit elkaar en zorgt voor mechanische ondersteuning wanneer de membraanveloppen onder (hoge) druk komen te staan. Spacers verbeteren menging en beperken vervuiling. Tegelijkertijd kan het door drukverhoging leiden tot extra biofouling. Er zijn ook permeaatspacers aan de andere zijde, die het gefilterde water geleiden naar de centrale afvoerbuiss.

spiraalgewonden module

Bij spiraalgewonden membranen worden de membraanvellen als een zogenaamde gevouwen envelop bevestigd. Deze enveloppen worden gescheiden door 'voedingsspacers'. Bij een spiraalgewonden module wordt een membraanvel gewikkeld rond een centrale verzamelbuis (permeaatbuis) waarin gaatjes zijn aangebracht.

Spiraalgewonden modules hebben een hoge pakdichtheid. Voor NF en RO daarentegen worden vooral spiraalgewonden membranen gekozen vanwege hun hoge efficiëntie en standaardisatie.

stacks

In full-scale toepassingen met holle rietjes of capillaire membranen worden de membranen samengebracht in zogeheten stacks. Elke stack bevat meerdere drukbuizen die parallel naast elkaar zijn geplaatst. Binnen elke drukbuis kunnen vervolgens meerdere membraanmodules worden gemonteerd. Deze modulaire opbouw maakt het mogelijk om installaties efficiënt op te schalen.

transmembraandruk

De druk die nodig is om water door een membraan te persen. De TMP wordt gedefinieerd als de drukgradiënt van het membraan oftewel de gemiddelde voedingsdruk minus de permeaatdruk. De voedingsdruk wordt vaak gemeten op het beginpunt van een membraanmodule. De TMP wordt weergegeven in bar.

tubulair

Tubulaire membranen worden aan de binnenkant van een poreuze RVS, keramische of kunststof buis geplaatst waarvan de diameter in het algemeen groter is dan 5 mm. De voedingsoplossing stroomt door het midden van de buizen, terwijl het permeaat door de poreuze ondersteunende buis in de modulebehuizing stroomt. Dit soort modules zijn het beste voor hoogbelaste voedingsstromen (bijvoorbeeld gesuspendeerde stoffen) die kunnen worden bedreven bij turbulente stromingsregimes. Bovendien kunnen ze fysiek worden gereinigd met behulp van schuimballen.

ultrafiltratie

UF is een geavanceerde membraanfiltratietechniek waarbij deeltjes met een grootte van 0,02 tot 0,03 μm met minimaal 99,99% efficiëntie worden verwijderd. De poriën van UF membranen zijn veel fijner dan die van MF en liggen doorgaans tussen de 0,01 en 0,1 μm [3]. Hierdoor kan UF niet alleen zwevende stoffen en bacteriën verwijderen, maar ook kleinere deeltjes zoals cysten en virussen, en een deel organische stof (biopolymeren).

voeding

Het water dat nog moet worden gezuiverd en aan de membraaninstallatie wordt toegevoerd. Tijdens het filtratieproces wordt het voedingswater gescheiden in twee stromen namelijk permeaat en concentraat.

(water)flux

Waterflux wordt vaak afgekort tot flux. De waterflux is de hoeveelheid water die per vierkante meter membraanoppervlak per uur wordt doorgelaten ($\text{l/m}^2\cdot\text{h}$). Deze waterflux is afhankelijk van de transmembraandruk (TMP) en de waterpermeabiliteit, die de verhouding tussen flux en druk weergeeft ($\text{l/m}^2\cdot\text{h}\cdot\text{bar}$).

(water)permeabiliteit

De waterpermeabiliteit wordt vaak afgekort tot permeabiliteit. De waterpermeabiliteit geeft aan hoeveel water er per tijdseenheid door een membraan stroomt bij een bepaalde druk. Het is de verhouding tussen de waterflux en de transmembraandruk (TMP), en wordt uitgedrukt in liter per vierkante meter per uur per bar ($\text{l/m}^2\cdot\text{h}\cdot\text{bar}$). Deze parameter is een maat voor de doorlaatbaarheid van het membraan en wordt gebruikt om de prestaties van verschillende membranen onder vergelijkbare omstandigheden te vergelijken.

Afkortingen

De volgende afkortingen komen voor in deze praktijkcode, inclusief de betekenis (voor een omschrijving wordt verwezen naar het eerste deel van deze bijlage):

- AWZI AfvalWaterZuiveringsInstallatie
- BW 'Backwash', terugspoeling
- CCRO 'Closed-circuit reverse osmosis', zie subparagraaf 4.6.2
- CEB 'Chemical Enhanced Backwash', zie eerder in deze bijlage
- CIP 'Cleaning in Place', zie eerder in deze bijlage
- FRRO Flow Reversal Reverse Osmosis', zie subparagraaf 4.6.2
- LBL 'Layer by Layer' (membrane), zie subparagraaf 4.6.1
- MF MicroFiltratie
- MTC 'Mass Transfer Coëfficiënt', massatransportcoëfficiënt
- MWCO 'Molecular Weight CutOff', zie eerder in deze bijlage
- NF NanoFiltratie
- NDP 'Net Driven Pressure', netto drijvende kracht
- NOM Natuurlijk Organisch Materiaal
- NV Natuurlijke Virussen
- PCD PraktijkCode Drinkwater
- PPC Periodieke Permeaat Circulatie, zie subparagraaf 4.6.2
- RO 'Reverse Osmosis', omgekeerde osmose
- RWZI RioolWaterZuiveringsInstallatie
- SEC 'Specific Energy Consumption', het specifieke energieverbruik (de hoeveelheid energie die nodig is om een bepaalde hoeveelheid product te maken of om een eenheid van iets te verplaatsen)
- SOC 'Soil Organic Carbon', bodemorganisch koolstof
- TDS 'Total Dissolved Solids', het totaal aan opgeloste vaste stoffen
- TFC 'Thin Film Composite', dunne laag composiet (membranen)
- TMP 'Trans Membrane Pressure', transmembraandruk
- TOC 'Total Organic Carbon', het totaal aan organische stoffen
- UF UltraFiltratie
- (U)HRRO '(Ultra) High Recovery Reverse Osmosis', zie subparagraaf 4.6.1
- ZLD 'Zero liquid Discharge', zie subparagraaf 4.6.2

II Aanbevolen bronnen voor extra informatie

Een aanrader is het boek 'Basic Principles of Membrane Technology' van Marcel Mulder (2^e editie van 1996, Kluwer Academic Publishers, ISBN 0792342488). In dit boek is alles op het gebied van membraanfiltratie uitgebreid beschreven. Zie bijvoorbeeld [Basic Principles Of Membrane Technology | 9780792342489 | Marcel Mulder | Boeken | bol](#)

Met betrekking tot het ontwerpen van membraaninstallaties zijn de volgende boeken een aanrader:

- Via de hyperlink [Desalination | IHE Delft Institute for Water Education \(open access books\): Seawater Reverse Osmosis Desalination: Assessment and Pre-treatment of Fouling and Scaling | eBooks Gateway | IWA Publishing](#)
Hoofdstuk 9 daarvan gaat over procesontwerp van RO. Ook andere hoofdstukken kunnen interessant zijn: hoofdstuk 8 gaat over scaling, hoofdstuk 7 over anorganische fouling en hoofdstuk 5 over organische fouling.
- [Experimental Methods for Membrane Applications in Desalination and Water Treatment | eBooks Gateway | IWA Publishing](#)

Hierin zijn onder andere de basics van membraanfiltratie goed beschreven: hoofdstuk 2 gaat over UF/MF en hoofdstuk 3 over NF/RO.

III In deze praktijkcode genoemde en daarvoor relevante normen

NEN-EN 12873-1:2014: 'Invloed van materialen op water bestemd voor menselijke consumptie – Invloed ten gevolge van migratie – Deel 1: Beproevingmethode voor fabrieksmatig vervaardigde producten, gemaakt van of bevattend organische of glasachtige (porselein/email) materialen', 1 juli 2014

NEN-EN 12873-4:2021: 'Invloed van materialen op water bestemd voor menselijke consumptie – Invloed als gevolg van migratie – Deel 4: Beproevingmethode voor waterbehandelingsmembranen', 1 november 2021

IV In deze praktijkcode genoemde en daarvoor relevante beoordelingsrichtlijnen

Kiwa Nederland B.V. (2018): 'Evaluation Guideline for the Kiwa product certificate for membrane filtration elements for the treatment and/or production of drinking water', Kiwa-beoordelingsrichtlijn [BRL-K14037](#), versie 1, 21 november 2017, Rijswijk

Kiwa Nederland B.V. (2018): 'Beoordelingsrichtlijn kwaliteit leveringsketen chemicaliën drinkwatervoorziening voor het Kiwa procescertificaat voor het transport van drinkwaterchemicaliën, aan te duiden als het Kiwa ATD', Kiwa-beoordelingsrichtlijn [BRL-K15001](#), versie 2, 26 september 2018, Rijswijk

V Overzicht van overige KIWA/Kiwa/KWR documenten/publicaties op het gebied van membraanfiltratie (opbrengsten voortraject)

Opmerking vooraf: Opbrengsten uit het eerder uitgevoerde voortraject die al zijn opgenomen in hoofdstuk 7 'Literatuur' zijn in het navolgende ~~doorgeslagen~~ **doorgehaald**.

Het doel van het project is om te komen tot een zo compleet mogelijk overzicht van binnen de drinkwatersector beschikbare documenten die verband houden met de selectie, de integriteit en de reiniging van membranen die zijn bedoeld voor de bereiding van drinkwater. In deze notitie zijn alle documenten (rapporten en publicaties) verzameld die zijn gevonden via de digitale bibliotheek (openbaar en niet-openbaar) van KIWA/Kiwa/KWR Water(cycle) Research Institute⁸. Per 'hoofdonderwerp' (algemeen/selectie/integriteit/reiniging) zijn die documenten verder onderverdeeld in MF/UF (inclusief keramisch) en NF/RO (inclusief capillaire NF en spiraalgewonden), en in chronologische volgorde weergegeven. Het jaartal waarin een document is verschenen, blijkt doorgaans uit het nummer van het rapport⁹ (voor de '.'). Als dat niet het geval is, is het jaartal tussenhaakjes toegevoegd.

Voor wat betreft de aanduidingen van de verschillende navolgende rapporten:

- Mededelingen
In het verleden werden onderzoekstrajecten van meerdere jaren doorgaans afgesloten met de publicatie van een 'KIWA/Kiwa-Mededeling' over een bepaald onderwerp.
- SWI, 'Speurwerk Intern'
Het onderzoeksprogramma dat KIWA/Kiwa in het verleden in opdracht van de gezamenlijke drinkwaterbedrijven uitvoerde, werd aangeduid als 'speurwerk' (vergelijk het huidige BTO, BedrijfsTakOnderzoek). Zoals bij de vorige bullet is opgemerkt, werden dergelijke trajecten afgesloten met een 'Mededeling'. Tussentijds werd er gerapporteerd over de voortgang door middel van een of meer interne rapporten. Ook andere zaken konden in een SWI worden vastgelegd, bijvoorbeeld handleidingen en instructies.
- SWO, 'Speurwerk Opdracht'
Het speurwerk (onderzoek) leidde destijds soms tot specifieke klussen bij drinkwaterbedrijven. Die werden dan gerapporteerd in een SWO.
- KOA, 'Kiwa Onderzoek en Advies'
In het meer recente verleden kregen rapporten in de adviessfeer en opdrachten van derden deze aanduiding mee.
- KWR
Tegenwoordig worden opdrachten (buiten het onderzoeksprogramma en van drinkwaterbedrijven en derden) door middel van KWR-rapporten gerapporteerd.

⁸ In 1948 is 'Het Keuringsinstituut voor WaterleidingArtikelen KIWA N.V.' opgericht door de toenmalige meerdere honderden Nederlandse drinkwaterbedrijven (afgekort KIWA). Ergens begin jaren negentig is dit gewijzigd in Kiwa (met 'Certificatie en Keuringen' in Rijswijk en 'Onderzoek en Advies' in Nieuwegein). Medio 2006 is de Rijswijkse vestiging door de aandeelhouders (drinkwaterbedrijven) verkocht aan een investeringsmaatschappij en verdergegaan als certificatie-instelling 'Kiwa Nederland'. 'Nieuwegein' bestaat nu 'Kiwa Water Research' en 'KWR Watercycle Research Institute' inmiddels als 'KWR Water Research Institute'.

⁹ Tegenwoordig wordt het volledige jaartal gehanteerd; in het verleden waren dat uitsluitend de laatste twee cijfers van het jaar.

- BTO

Onderzoek en de opbrengsten daarvan worden tegenwoordig gerapporteerd in BTO-rapporten.

Voor wat betreft de navolgende rapporten maken sommigen deel uit van de digitale bibliotheek van KWR (zie [The library of KWR \(kwrwater.nl\)](https://www.kwrwater.nl)) met op dit moment bijna 5.000 documenten. In de betreffende gevallen is een hyperlink daarnaar opgenomen. Op een uitzondering na gaat het uitsluitend om BTO-rapporten (interne rapporten waren/zijn sowieso niet openbaar).

Ook een belangrijk deel van de vermelde wetenschappelijke publicaties is voorzien van een hyperlink.

V.I Algemeen

1. Kruithof, Schippers en Van Dijk: 'De drinkwaterbereiding uit oppervlaktewater in de jaren negentig', H₂O, 24 (1991) 17, p. 468 – 475, 489
2. Verdouw en Schippers: 'Membraanfiltratie; De theoretische achtergronden' (rapport in opdracht van N.V. Watertransportmaatschappij Rijn-Kennemerland)
3. Schippers: 'Overview of membrane applications in drinking water production', Berichte aus dem IWW Rheinische-Westfälisches Institut für Wasserforschung gemeinnützige GmbH, Band 16, Mülheim an der Ruhr (1996), ISSN 0941-0961
4. ~~KOA 98.207: 'Workshop Membraantechnologie – Nanofiltratie en Omgekeerde Osmose'~~
5. BTO 2003.031: 'Onderzoek membraanfiltratie'
6. Gijsbertsen en Hofman: 'Stand van zaken rond membraanfiltratie', H₂O, #21 (2004)
7. ~~Schippers, Kruithof, Nederlof en Hofman: 'Integrated Membrane Systems', 90899, Awwa Research Foundation/EPA 2004 (gezamenlijk boek/rapport Awwa en BTO)~~
8. BTO 2007.001: 'Membraanfiltratie in BTO 2007-2011'
9. Juijn: 'Meer inzicht in zuiverende werking membranen bij drinkwaterbereiding', interview A. Verliefe, Contact (2008), nr.2, p.14 – 15
10. BTO 2012.014: 'Geconcentreerde zoute reststromen rapport over wat te doen/hoe gaan DWB om met concentraatstromen?'
11. Raat, Kooiman, Groenendijk en Oosterhof: 'Pleidooi voor gebruik brak grondwater voor productie drinkwater', H₂O, 45 (2012) 12, p. 11 – 13

MF/UF

12. ~~BTO 2004.016: 'Inventarisatie UF installaties in Nederland' (à la ontharding)~~
13. Gijsbertsen, Van der Meer en Heijman: 'Inventarisatie van ultrafiltratie-installaties', H₂O, #23 (2004)
14. BTO 2006.022: 'Optimaliseren van ultrafiltratie met neurale netwerken'
15. BTO 2007.041: 'Workshop on ceramic membranes'
16. De Ridder, Heijman en Hofman: 'Keramische membranen bieden nieuwe mogelijkheden in de drinkwaterproductie', H₂O, #21 (2007)

NF/RO

17. Kiwa-Mededeeling 53: 'De verwijdering van zouten en organische verbindingen met behulp van celluloseacetaat-membranen'
18. Hofman, Taylor, Schippers en Kruithof: 'Vereenvoudigd model voor de beschrijving van de werking van nano- en hyperfiltratie-installaties', H₂O, 1 (1995) 13, p. 2 – 6 en 9
19. ~~SWI 99.166: 'Normalisatie van gegevens bij nanofiltratie en omgekeerde osmose'~~
20. BTO 2000.176 (s): 'Bepaling maximale conversie nanofiltratie Oldeholtspade'
21. BTO 2014.035: 'High recovery reverse osmosis; samenvatting van vijf jaar onderzoek'
22. Siegers, Abusultan, Van Leenen et al.: 'Eerst eruit, dan weer erin; remineralisatie van RO-permeaat', H₂O-online (2019), 13 november
Eerst eruit, dan weer erin - remineralisatie van RO-permeaat (h2owaternetwerk.nl)
23. BTO 2020.019: 'Huidige en toekomstige praktijk van NF-RO concentraat management'

V.II Membraanselectie

24. Kruithof, Schippers, Kamp, Folmer en Hofman: 'Integrated multi-objective membrane systems for surface water treatment; pretreatment of reverse osmosis by conventional treatment and ultrafiltration', *Desalination*, 117 (1998) 37 – 48
[Integrated multi-objective membrane systems for surface water treatment: pretreatment of reverse osmosis by conventional treatment and ultrafiltration - ScienceDirect](#)
25. BTO 2006.004: 'Technische haalbaarheid van Q21-kwaliteit voor drinkwater uit anoxisch grondwater'
26. Van de Sandt: 'Betere membranen maken zuivering met zout mogelijk', interview Cornelisse, Technisch Weekblad, 39 (2008) 16, p. 5
27. Oosterhof, Wolthek, Van der Meer, Groenendijk, Van de Wetering, Boukes, Raat en Eerhart: 'Doorbraak voor gebruik van brak grondwater als alternatieve bron voor drinkwatervoorziening', *H₂O*, 42 (2009) 14 – 15, p. 14 – 17
28. BTO 2012.230 (s): 'Karakterisatie en testen van "thin film nanocomposite" en "thin film composite" RO membranen'
29. KWR 2015.113: 'Roadmap Multi Source, One Step volstroom RO'
30. Harmsen, Cornelissen, Wessels, Van der Meer: 'Zuivering van oppervlaktewater met minimale voorbehandeling', *H₂O-online* (2019), 23 oktober
[Zuivering van oppervlaktewater met minimale voorbehandeling \(h2owaternetwerk.nl\)](#)

MF/UF

31. SWI 97.119: 'Ultrafiltratie-onderzoek op IJsselmeerwater na microzeven; Periode oktober 1995 – december 1996'
32. BTO 2007.044: 'Ceramic microfiltration as the first step in surface water treatment'
33. BTO 2007.045: 'Toepassing keramische membranen voor grootschalige waterbehandeling'
34. Schippers, Heijman en Bakker: 'Oppervlaktewaterzuivering door middel van keramische membranen', *H₂O*, #15 (2008)
35. Cornelissen, Hofs, Muller, Beerendonk en Heijman: 'Direct and hybrid ceramic membrane filtration in water treatment', *Techneau Safe Drinking Water from Source to Tap*, IWA Publishing, 2009, p. 83 – 97
36. Hofs en Cornelissen: 'Coagulation and ceramic microfiltration/ultrafiltration for the treatment of drinking water', *NPT procestechnologie*, 16 (2009) 4, p. 30 – 31
37. Hofs, Ogier, Vries, Beerendonk en Cornelissen: 'Comparison of ceramic and polymeric membrane permeability and fouling using surface water', *Separation and Purification Technology*, 79 (2011) 3, p. 365 – 374
[Comparison of ceramic and polymeric membrane permeability and fouling using surface water - ScienceDirect](#)

NF/RO

38. SWO 92.213: 'Nanofiltratie Nij Beets'
39. SWO 93.253: 'Onderzoek met hyperfiltratie-installatie t.b.v. pompstation Heemskerk'
40. KOA 96.148: 'Criteria for RO membrane selection for water treatment plant Heemskerk'
41. SWI 96.138: 'Start onderzoek nanofiltratie Hammerflier; een waardevolle ervaring of een kostbaar fiasco?'
42. KOA 97.128: 'Haalbaarheidsstudie nanofiltratie ps. Empel WOB'
43. KOA 97.134: 'Hyperfiltratie onderzoek pompstation Wehl (WOG); Deel 1: Membraankeuze'
44. KOA 98.026: 'Proefinstallatieonderzoek hyperfiltratie op pompstation Druten (WG)'
45. KOA 98.077: 'Nano-hyperfiltratie onderzoek Nuland WOB; Deel 1: Membraankeuze'
46. BTO 2000.113 (c): 'Drinkwaterbereiding uit brak of zout grondwater; Een verkenning'
47. Van der Bruggen, Hawrijk, Cornelissen en Vandecasteele: 'Direct nanofiltration of surface water using capillary membranes; Comparison with flat sheet membranes', *Separation and Purification Technology*, 31 (2003), 193 – 201
[Direct nanofiltration of surface water using capillary membranes: comparison with flat sheet membranes - ScienceDirect](#)
48. Heijman, Li, Wessels en Van Dijk: 'Nieuwe zuiveringsopzet voor directe behandeling oppervlaktewater tot drinkwater (ZLD)', *H₂O*, #27 (2008)

49. Heijman en Li: 'Is een nullozing voor nanofiltratie en omgekeerde osmose haalbaar? (ZLD)', H₂O, #30 (2008)
50. Heijman, Guo, Van Dijk en Wessels: 'Zero liquid discharge; Heading for 99% recovery in nanofiltration and reverse osmosis', Desalination, 236 (2009) 1/3, p. 357 – 362
[Zero liquid discharge: Heading for 99% recovery in nanofiltration and reverse osmosis - ScienceDirect](#)
51. BTO 2011.048: 'Brak grondwater: niet mijden, maar gebruiken!'
52. BTO 2012.224(s): 'De prestatie van het Pervatech Keramische NF membraan'
53. BTO 2012.230(s): 'Karakterisatie en testen van "thin film nanocomposite" en "thin film composite" RO membranen'

V.III Membraanintegriteit

54. Schippers en Verdouw: 'De membraanfiltratie-index als kenmerk voor de filtreerbaarheid van water', H₂O, 12 (1979) 5, 104 – 109
55. Schippers en Verdouw: 'The modified fouling index; a method of determining the fouling characteristics of water', Desalination, 32 (1980), p. 137 – 148
[The modified fouling index, a method of determining the fouling characteristics of water - ScienceDirect](#)
56. SWI 99.150: 'Bewaking van de desinfectiecapaciteit van membraanfiltratie-installaties'
57. BTO 2002.135: 'Literatuuronderzoek naar de integriteitsbewaking van membranen (2000-2002)'
58. Heijman, Van de Baan en Schippers: 'Betrouwbaarheid membraanfiltratie-index sterk vergroot', H₂O, #25/26 (2002)
59. Gijsbertsen-Abrahamse, Schmidt, Chorus en Heijman: 'Removal of cyanotoxins by ultrafiltration and nanofiltration' (testen uitgevoerd in Duitsland), JMS, 276 (2006) 252 – 259
[Removal of cyanotoxins by ultrafiltration and nanofiltration - ScienceDirect](#)
60. Verliefde, Cornelissen, Verberk en Van Dijk: 'Zijn membranen een waterdichte oplossing voor organische microverontreinigingen?', H₂O, 41 (2008) 21, p. 32 – 35
61. Hofman-Caris en Hofman: 'Lek membraan met meerdere methoden te ontdekken', Land + Water, 50 (2010) 9, p. 38 – 39
62. BTO 2017.037: 'Prestaties van op nanotechnologie gebaseerde membranen voor de verwijdering van organische microverontreinigingen'
63. KWR 2018.041: 'Oppervlaktewater RO met minimale voorzuivering'
64. KWR 2018.090: 'Oppervlaktewater RO te Kamerik met minimale voorzuivering'
65. KWR 2019.006: 'Evaluation of membrane integrity testing at Roetgen treatment plant' (vertrouwelijk)
66. KWR 2019.020: 'Natuurlijke virusmarkers voor virusverwijdering in zuiveringsprocessen bij Andijk' (vertrouwelijk?)
67. Schurer, Schippers et al.: 'Enhancing biological stability of disinfectant-free drinking water by reducing high molecular weight organic compounds with ultrafiltration posttreatment', Water Research, 164 (2019) 114927
[Enhancing biological stability of disinfectant-free drinking water by reducing high molecular weight organic compounds with ultrafiltration posttreatment - PubMed \(nih.gov\)](#)
68. Sim, Suwarno, Lee, Cornelissen, Fane, Chong: 'Online monitoring of transparent exopolymer particles (TEP) by a novel membrane-based spectrophotometric method', Chemosphere, 220 (2019) 107 – 115
[Online monitoring of transparent exopolymer particles \(TEP\) by a novel membrane-based spectrophotometric method - ScienceDirect](#)
69. BTO 2020.009: 'Natuurlijke virussen om de verwijdering van virussen door zuiveringsprocessen te bepalen'
70. BTO 2021.006: 'Additionele zuiveringsinspanning voor verwijdering van opkomende stoffen'

MF/UF

71. KOA 96.157: 'Holle vezel nanofiltratiemembranen van TNO en X-Flow (Fase 1B en 1C); Verwijdering van bestrijdingsmiddelen'
72. BTO 2001.181(c): 'Optimalisatie UF met EPCE; Quick-scan proeven Meerhoven'
73. BTO 2004.069: 'Integriteit van holle vezel membranen; Vezelbreuk: frequentie en oorzaken'

74. Gijsbertsen-Abrahamse, Cornelissen en Hofman: 'Fiber failure frequency and causes of hollow fiber integrity loss', *Desalination*, 194 (2006) 251 – 258
[doi:10.1016/j.desal.2005.11.010](https://doi.org/10.1016/j.desal.2005.11.010) ([sciencedirectassets.com](https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0011916905001010))
75. Siegers, Van de Wetering, Van Dinther en Van der Kooij: 'Verwijdering deeltjes met ultrafiltratie verlaagt snelheid van biofilmvorming', *H₂O*, 44 (2011) 3, p. 37 – 39
76. BTO 2012.030: 'Het effect van ultrafiltratie, actieve-koolfiltratie en ionenwisseling op de biologische stabiliteit van drinkwater'
77. BTO 2013.022 'Onderzoek naar de veroudering van MF-UF membranen'
78. Floris, Moser, Nijmeijers en Cornelissen: 'Effect of multicomponent fouling during microfiltration of natural surface waters containing nC₆₀ fullerene nanoparticles', *Environmental Science Water Res. and Technol.*, 3 (2017) 4, p. 744 – 756
[Effect of multicomponent fouling during microfiltration of natural surface waters containing nC60 fullerene nanoparticles - Environmental Science: Water Research & Technology \(RSC Publishing\)](#)

NF/RO

79. Hofman, Noij, Kruithof en Schippers: 'Removal of pesticides with nanofiltration', *AWWA proceedings Membrane Technology Conference* (1993)
80. Hofman, Noij, Kruithof en Schippers: 'Verwijdering van bestrijdingsmiddelen en andere organische micro-verontreinigingen met nanofiltratie', *H₂O*, 26 (1993) 13, p. 359 – 365
81. SWI 96.137: 'Bepaling van de temperatuursinvloed bij membraanfiltratie; Drukval en verwijdering van zouten en bestrijdingsmiddelen'
82. SWI 96.197: 'Temperatuurinvloed bij membraanfiltratie (deel 3); Verwijdering van EGV, calcium en chloride'
83. SWI 97.101: 'Verwijdering van bestrijdingsmiddelen door nano- en hyperfiltratie; invloed van sorptie, diffusie en desorptie'
84. Hiemstra, Van Paassen, Rietman, Nederlof en Verdouw: 'Reduction of color and hardness of groundwater with nanofiltration', *MTC* (1997) February 23 – 26, New Orleans
85. Van Paassen, Verdouw, Rietman en Nederlof: 'Verlaging van kleur en hardheid met nanofiltratie op pompstation Hammerflier (WMO)', *H₂O*, 30 (1997) 11, p. 362 – 365, 361
86. Verdouw en Folmer: 'Effect of water temperature on the normalized flux for RO-membranes', *MTC* (1997) February 23 – 26, New Orleans
87. SWI 99.188: 'Monitoring van scaling bij omgekeerde osmose PWN Andijk; Toepassing ScaleGuard'
88. SWI 99.222: 'Productiebedrijf Heemskerk; Consequenties verhogen recovery omgekeerde osmose'
89. SWI 00.123: 'Optimalisatie bedrijfsvoering RO PWN-productiebedrijf Jan Lagrand'
90. BTO 2004.078: 'Verwijdering van laag-moleculaire bacteriegroeibevorderende organische verbindingen door nanofiltratie'
91. Vrouwenvelder, Beerendonk, Verdouw, Van der Kooij: 'Removal of AOC and NOM from water with Nanofiltration Leading Edge', *Conference on Water and Wastewater Treatment* (2004)
92. Cornelissen, Verdouw, Gijsbertsen en Hofman: 'A nanofiltration retention model for trace contaminants in drinking water sources', *Desalination*, 178 (2005) 179 – 192
[A nanofiltration retention model for trace contaminants in drinking water sources - ScienceDirect](#)
93. Van der Bruggen, Verliefde, Braeken, Cornelissen, Moons, Verberk, Van Dijk en Amy: 'Assessment of a semi-quantitative method for estimation of the rejection of organic compounds in aqueous solution in nanofiltration', *J Chem Technol Biotechnol*, 81 (2006) 1166 – 1176
[Assessment of a semi-quantitative method for estimation of the rejection of organic compounds in aqueous solution in nanofiltration - Van der Bruggen - 2006 - Journal of Chemical Technology & Biotechnology - Wiley Online Library](#)
94. Heijman, Verliefde, Cornelissen, Amy en Van Dijk: 'Influence of natural organic matter (NOM) fouling on the removal of pharmaceuticals by nanofiltration and activated carbon filtration, WS&T: Water Supply, Volume 7, number 4, (2007) pp 17 – 23
[\(PDF\) Influence of Natural Organic Matter \(NOM\) Fouling on the Removal of Pharmaceuticals by Nanofiltration and Activated Carbon Filtration \(researchgate.net\)](#)
95. Verliefde, Cornelissen, Amy, Van der Bruggen en Van Dijk: 'Priority organic micropollutants in water sources in Flanders and the Netherlands and assessment of removal possibilities with nanofiltration',

- Environmental Pollution, 146 (2007) 281 – 289
Priority organic micropollutants in water sources in Flanders and the Netherlands and assessment of removal possibilities with nanofiltration - ScienceDirect
96. Verliefde, Heijman, Cornelissen, Amy, Van der Bruggen en Van Dijk: 'Influence of electrostatic interactions on the rejection with NF and assessment of the removal efficiency during NF/GAC treatment of pharmaceutically active compounds in surface water', Water Research, 41 (2007) 3227 – 3240
Influence of electrostatic interactions on the rejection with NF and assessment of the removal efficiency during NF/GAC treatment of pharmaceutically active compounds in surface water - PubMed (nih.gov)
97. Verliefde, Heijman, Amy, Van der Bruggen en Van Dijk: 'Influence of hydrophobicity and charge on removal of trace organic pollutants with high pressure membranes', Engineering, published 1 October 2007
98. Verliefde, Heijman, Cornelissen, Amy, Van der Bruggen en Van Dijk: 'Rejection of trace organic pollutants with high pressure membranes (NF/RO)', Wiley InterScience, 12 may 2008 DOI 10.1002/ep. 10272
Rejection of trace organic pollutants with high pressure membranes (NF/RO) | Request PDF (researchgate.net)
99. Verliefde, Cornelissen, Heijman, Verberk, Amy, Van der Bruggen en Van Dijk: 'The role of electrostatic interactions on the rejection of organic solutes in aqueous solutions with nanofiltration', JMS, 322 (2008) 52 – 66
The role of electrostatic interactions on the rejection of organic solutes in aqueous solutions with nanofiltration | Request PDF (researchgate.net)
100. Verliefde, Cornelissen en Heijman: 'Construction and validation of a full-scale model for rejection of organic micropollutants by NF membranes', Journal of Membrane Science 339 (2009) 1/2, p. 10 – 20
Construction and validation of a full-scale model for rejection of organic micropollutants by NF membranes - ScienceDirect
101. Verliefde, Cornelissen en Heijman: 'Influence of membrane fouling by (pretreated) surface water on rejection of pharmaceutically active compounds (PhACs) by nanofiltration membranes', Journal of Membrane Science, 330 (2009) p. 90 – 103
Influence of membrane fouling by (pretreated) surface water on rejection of pharmaceutically active compounds (PhACs) by nanofiltration membranes - ScienceDirect
102. Verliefde, Cornelissen en Heijman: 'Influence of Solute-Membrane Affinity on Rejection of Uncharged Organic Solutes by Nanofiltration Membranes', Environmental Science & Technology, 43 (2009) 7, p. 2400 – 2406
Influence of Solute-Membrane Affinity on Rejection of Uncharged Organic Solutes by Nanofiltration Membranes | Environmental Science & Technology (acs.org)
103. BTO 2012.008 (s): 'Removal efficiency of pharmaceuticals in drinking water production'
104. BTO 2012.025: 'Dealing with pharmaceuticals in drinking water production'
105. BTO 2013.023: 'Permeabiliteitdaling bij NF-RO membraaninstallaties'
106. KWR 2014.026 'Verwijdering OMPs met NF-RO en AOP en gebruik van antiscalants in NF-RO - Ondersteuning onderzoeksvisie H2020 Evides'
107. Salvador Cob, Yeme, Hofs, Cornelissen, Vries, Genceli, Güner en Witkamp: 'Towards zero liquid discharge in the presence of silica Stable 98 recovery in nanofiltration and reverse osmosis', Separation and Purification Tech, 140 (2015), p. 23 – 31
Towards zero liquid discharge in the presence of silica: Stable 98% recovery in nanofiltration and reverse osmosis - ScienceDirect
108. Hornstra, Rodrigues da Silva, Blankert, Heijnen, Beerendonk, Cornelissen, Medema: 'Monitoring the integrity of reverse osmosis membranes using novel indigenous freshwater viruses and bacteriophages', ESWRT, 5 (2019) 9, p. 1535 – 1544
Monitoring the integrity of reverse osmosis membranes using novel indigenous freshwater viruses and bacteriophages - Environmental Science: Water Research & Technology (RSC Publishing)
109. Roman, Van Dijk, Gutierrez et al.: 'Key physicochemical characteristics governing organic micropollutant adsorption and transport in ion-exchange membranes during reverse electrodialysis', Desalination, 468 (2019) 114084 ED
Key physicochemical characteristics governing organic micropollutant adsorption and transport in ion-exchange membranes during reverse electrodialysis - ScienceDirect

110. BTO 2020.066: 'Voorspelling en validatie van de verwijdering van organische microverontreinigingen uit water; Deel 3: Membraanprocessen'
111. Albergamo, Blankert, Van der Meer, De Voogt en Cornelissen: 'Removal of polar organic micropollutants by mixed-matrix reverse osmosis membranes', *Desalination* 479 (2020) 114337
[Removal of polar organic micropollutants by mixed-matrix reverse osmosis membranes - ScienceDirect](#)
112. KWR 2022.013: 'PFAS verwijdering door NF270 membranen' (vertrouwelijk)

V.IV Membraanreiniging

113. Vrouwenfelder, Van Paassen, Folmer, Hofman, Nederlof en Van der Kooij: 'Biofouling of membranes for drinking water production', *Desalination*, 118 (1998) 157 – 166
[Biofouling of membranes for drinking water production - ScienceDirect](#)
114. BTO 2011.015(s): 'Biologische stabiliteit, biofilms en biofouling; Publicaties over onderzoek 2000 – 2010'

MF/UF

115. Galjaard, Kruithof, Scheerman, Verdouw en Schippers: 'Enhanced pre-coat engineering (EPCE) for micro- and ultrafiltration', *Berichte aus dem IWW Rheinische-Westfälisches Institut für Wasserforschung gemeinnützige GmbH, Band 37a, Mülheim an der Ruhr* (2002), ISSN 0941 – 0961
116. Raktoe, Heijman, Verberk en Van Dijk: 'Nieuw vervuilmingsmechanisme voor dead-end bedreven ultrafiltratiemembranen; Spoelen leidt tot verstopping', *H₂O*, #4, 2004
117. Kennedy, Chun, Heijman en Schippers: 'Natural organic matter (NOM) fouling of ultrafiltration membranes fractionation of NOM in surface water and characterisation by LC-OCD', *Desalination*, 178 (2005), 73 – 83
[Natural organic matter \(NOM\) fouling of ultrafiltration membranes: fractionation of NOM in surface water and characterisation by LC-OCD - ScienceDirect](#)
118. Heijman, Vantighem, Raktoe, Verberk en Van Dijk: 'Blocking of capillaries as fouling mechanisms for dead-end ultrafiltration', *Journal of Membrane Science*, 287 (1) (2007), 119 – 125
[Blocking of capillaries as fouling mechanism for dead-end ultrafiltration - ScienceDirect](#)
119. Abrahamse, Lipreau en Heijman: 'Removal of divalent cations reduces fouling of ultrafiltration membranes', *JMS* 323 (2008), 153 – 158
[Removal of divalent cations reduces fouling of ultrafiltration membranes | Request PDF \(researchgate.net\)](#)
120. Kennedy, Kamanyi, Heijman en Amy: 'Colloidal organic matter fouling of UF membranes role of NOM composition & size', *Desalination*, 220 (2008) 1-3, p. 200 – 213
[Colloidal organic matter fouling of UF membranes: role of NOM composition & size - ScienceDirect](#)
121. Wessels, Heijman, Viallefont en Cornelissen: 'Nieuwe aanpak membraanvervuiling; reinigen met lucht en water', *H₂O*, #23 (2008)
122. BTO 2011.005: 'Vervuiling bij en prestaties van keramische membraanfiltratie van grondwater en oppervlaktewater'
123. Ahmad, Rutten, De Waal, et al.: 'Mechanisms of arsenate removal and membrane fouling in ferric based coprecipitation – low pressure membrane filtration systems', *Separation and Purification Technology*, 241 (2020) 116644
[Mechanisms of arsenate removal and membrane fouling in ferric based coprecipitation–low pressure membrane filtration systems - ScienceDirect](#)

NF/RO

124. Schippers: 'Vervuiling van hyperfiltratiemembranen en verstopping van infiltratieputten', 1989 (proefschrift Jan Schippers)
125. SWI 98.214: 'Biofouling in RO membraanelementen voor en na reiniging; Andijk'
126. SWI 99.151: '(Bio)fouling van RO membranen; Oorzaken en bestrijding' (concept 17 september 1999)
127. Van de Lisdonk, Van Paassen en Schippers: 'Scaleguard signaleert vroegtijdig scaling bij nanofiltratie en omgekeerde osmose', *H₂O*, 33 (2000) 6, p. 29 – 32
128. Vrouwenfelder, Kappelhof, Heijman, Schippers en Van der Kooij: 'Tools for fouling diagnosis of NF and RO membranes and assessment of the fouling potential of feed water', *Desalination*, 157 (2003) 361 – 365
[PFI: S0011-9164\(03\)00417-X \(sciencedirectassets.com\)](#)

129. BTO 2005.028: 'NF- en RO-installaties in beheer bij Nederlandse waterbedrijven; Overzicht ontwerpgegevens, bedrijfsvoering en membraanreiniging'
130. BTO 2005.030: 'Vervuiling NF membranen met NOM'
131. BTO 2005.041: 'Nanofiltration membrane fouling by Natural Organic Matter'
132. BTO 2005.060: 'Membraanreiniging van NF/RO-installaties'; Een literatuurstudie'
133. Cornelissen, Siegers, Ogier en Beerendonk: 'Influence of calcium-NOM complexes on fouling of nanofiltration membranes in drinking water production', *Water Supply*, (2006) 6 (4): 171 – 178
[Influence of calcium-NOM complexes on fouling of nanofiltration membranes in drinking water production | Water Supply | IWA Publishing \(iwaponline.com\)](#)
134. BTO 2007.022: 'Biofouling of spiral-wound membranes in water treatment'
135. Cornelissen, Vrouwenfelder, Heijman, Viallefont, Van der Kooij en Wessels: 'Air Water cleaning for biofouling control in spiral wound membrane elements', *Desalination*, 204 (2007) 145 – 147
[Air/water cleaning for biofouling control in spiral wound membrane elements - ScienceDirect](#)
136. Cornelissen, Vrouwenfelder, Heijman, Viallefont, Van der Kooij en Wessels: 'Periodic air/water cleaning for control of biofouling in spiral wound membrane elements', *JMS*, 287 (2008) 94 – 101
[Air/water cleaning for biofouling control in spiral wound membrane elements | Request PDF \(researchgate.net\)](#)
137. Wessels, Heijman, Viallefont en Cornelissen: 'Nieuwe aanpak membraanvervuiling; reinigen met lucht en water', *H₂O*, #23 (2008)
138. BTO 2010.008: 'Karakterisering, effecten en verwijdering van NOM'
139. BTO 2010.047: 'Ontwikkeling van een laboratoriumtest ter bepaling van de effectiviteit van reinigingsmiddelen en procedures om biofilms te verwijderen'
140. BTO 2011.024 (s): 'Verwijdering van biofilm van oppervlakten; Resultaten van vrije ruimte project DWB'
141. BTO 2011.056: 'Assessment of the biofilm removal efficiency of cleaning agents and procedures for RO/NF membranes' (zie ook managementsamenvatting, onderdeel Resultaten)
142. Cornelissen, Berteloot, Harmsen, Beerendonk en Van der Kooij: 'The influence of particles on Biofouling behavior in spiral wound membrane elements', *Desalination and Water Treatment*, 34 (2011) 1-3, p. 112 – 116
[The influence of particles on biofouling behavior in spiral wound membrane elements: Desalination and Water Treatment: Vol 34, No 1-3 \(tandfonline.com\)](#)
143. Hijnen, Cornelissen, Prummel en Van der Kooij: 'Biofouling spiraalgewonden membranen al bij lage concentraties afbreekbare stoffen in voedingswater', *H₂O*. 44 (2011) 1, p. 38 – 41
144. BTO 2012.231(s): 'Effectiviteit van reinigingsprocedures voor het beheersen van biofouling van spiraalgewonden membranen'
145. Harmsen, Cornelissen, Beerendonk, Pot en Van Agtmaal: 'Periodiek spoelen met lucht en water (AiRO) voorkomt membraanvervuiling in hogedrukfiltratie membranen', *H₂O online* (2014) 14 oktober
[Periodiek spoelen met lucht en water \(AiRO\) voorkomt membraanvervuiling in hogedrukfiltratie membranen \(h2owaternetwerk.nl\)](#)
146. Wibisono, Ahmad, Cornelissen et al.: 'Dominant factors controlling the efficiency of two-phase flow cleaning in spiral-wound membrane elements', *Desalination and Water Treatment*, 57 (2016) 38, p. 17625 – 17636
[Dominant factors controlling the efficiency of two-phase flow cleaning in spiral-wound membrane elements: Desalination and Water Treatment: Vol 57, No 38 \(tandfonline.com\)](#)
147. Yin, Li, Suwarno, Cornelissen en Chong: 'Fouling behavior of isolated dissolved organic fractions from seawater in reverse osmosis (RO) desalination process', *Water Research*, 159 (2019) p. 385 – 396
[Fouling behavior of isolated dissolved organic fractions from seawater in reverse osmosis \(RO\) desalination process - ScienceDirect](#)
148. Jafari, D'haese, Zlopasa, Cornelissen et al.: 'A comparison between chemical cleaning efficiency in lab-scale and full-scale reverse osmosis membranes', *Journal of Membrane Science*, 609 (2020) 118189
[A comparison between chemical cleaning efficiency in lab-scale and full-scale reverse osmosis membranes: Role of extracellular polymeric substances \(EPS\) - ScienceDirect](#)
149. Yin, Ho, Cornelissen en Chong: 'Impact of isolated dissolved organic fractions from seawater on biofouling in reverse osmosis (RO) desalination process', *Water Research*, 168 (2020) 115198

Impact of isolated dissolved organic fractions from seawater on biofouling in reverse osmosis (RO) desalination process - ScienceDirect

150.Jafari, et al.: 'Cost of fouling in full-scale reverse osmosis and nanofiltration installations in the Netherlands', Desalination, 500 (2021) 114865

Cost of fouling in full-scale reverse osmosis and nanofiltration installations in the Netherlands - ScienceDirect

VI Casussen op het gebied van MF, UF, NF en RO

Deze casussen van de drinkwaterbedrijven zijn beschikbaar via een separaat Excel bestand.