

Membranfiltrering för dricksvattenberedning - en kunskaps- sammanställning

Angelica Lidén



Svenskt Vatten Utveckling

Svenskt Vatten Utveckling (SVU) är kommunernas eget FoU-program om kommunal VA-teknik. Programmet finansieras i sin helhet av kommunerna. Programmet lägger tonvikten på tillämpad forskning och utveckling inom det kommunala VA-området.

Författaren är ensam ansvarig för rapportens innehåll, varför detta ej kan åberopas såsom representerande Svenskt Vattens ståndpunkt.

Svenskt Vatten Utveckling

Svenskt Vatten AB

Box 14057

167 14 Bromma

Tfn 08-506 002 00

Fax 08-506 002 10

svensktvatten@svensktvatten.se

www.svensktvatten.se

Svenskt Vatten AB är servicebolag till föreningen Svenskt Vatten.

Rapportens titel:	Membranfiltrering för dricksvattenberedning – en kunskapssammanställning
Title of the report:	Membrane filtration for drinking water treatment – a knowledge compilation
Författare:	Angelica Lidén, Avd. för Teknisk Vattenresurslära, LTH
Rapportnummer:	2020-4
Antal sidor:	76
Sammandrag:	Rapporten sammanställer kunskap om membranfiltrering för dricksvattenproduktion. Den ska hjälpa dricksvattenproducenterna att förstå hur membranfiltrering fungerar och när det är lämpligt att använda olika filtertyper: mikrofilter, ultrafilter, nanofilter och omvänd osmos. Rapporten är också en nulägesbeskrivning av membranbaserade anläggningar i drift, dels större svenska anläggningar, dels några intressanta exempel från andra länder.
Abstract:	This report is a handbook about membrane filtration for drinking water production. It is written as a tool for drinking water producers to increase their understanding of the process of membrane filtration, and explains when the different types of filter are suitable. Membrane filters are generally divided into four groups: microfilters, ultrafilters, nanofilters and reverse osmosis filters. This report also includes a description of several membrane processes for drinking water production currently in operation. It includes several Swedish plants, but also presents interesting examples from other countries.
Sökord:	Ultrafilter, nanofilter, omvänd osmos, vattenverk
Keywords:	Ultrafiltration, nanofiltration, reverse osmosis, drinking water treatment
Målgrupper:	Processingenjörer, projektingenjörer, VA-ansvariga, driftansvariga
Omslagsbild:	Mörbylånga kommuns avsaltningsverk/recirkuleringsverk, foto: Angelica Lidén
Rapport:	Finns att hämta hem som PDF-fil från Svenskt Vattens webbplats www.svensktvatten.se
Utgivningsår:	2020
Utgivare:	Svenskt Vatten AB © Svenskt Vatten AB
Om projektet	
Projektnummer:	17-103
Projektets namn:	Fantastiska membran – och hur man använder dem
Projektets finansiering:	Svenskt Vatten Utveckling

Förord

Intresset för membranbaserade dricksvattenprocesser har ökat kraftigt under de senaste åren. Det beror i stor utsträckning på den ökade medvetenheten om behovet av tillräcklig barriärverkan för mikroorganismer i dricksvattenproduktionen, men kanske i ännu högre utsträckning på att nya produktionsmetoder har gjort membran till ett mer ekonomiskt rimligt alternativ. Den här rapporten har tagits fram som en kunskapssammanställning för dricksvattenproducenter och andra inom VA-branschen som är intresserade av membranläggningar. Den är baserad på inhämtad kunskap från litteratur samt egen och andras erfarenheter.

Rapporten berör i huvudsak ultrafilter, nanofilter och omvänd osmos. Mikrofilter skiljer sig i stor utsträckning från de andra membranprocesserna genom dess låga komplexitet. Mikrofilter är i huvudsak mekaniska filter vilka har använts inom dricksvattenrening under lång tid, och har därför inte ansetts behövs presenteras i detalj, utan berörs endast kortfattat.

Författaren vill passa på att rikta ett tack till de dricksvattenproducenter som har delat med sig av sina erfarenheter: Vivab, Kungälv kommun, Göteborg Kretslopp och vatten, Scottish Water, Mörbylånga kommun, Borgholm energi, Region Gotland, Ystad kommun och Gästrike vatten (information om övriga internationella producenter har hämtats från litteratur och hemsidor). Tack till Daniel Hellström (Norrvatten, tidigare på SVU) och Anna Norström (SVU) samt Kenneth M. Persson (bl.a. Sweden Water Research) för att de har gjort det möjligt att genomföra denna rapport. Dessutom ett varmt tack till Tobias Persson och Oliva Söderman, processingenjörer på Sydvatten som har bidragit med sina erfarenheter och har granskat denna rapport.

Innehåll

Förord	3
Sammanfattning	6
Summary	7
Läsanvisning	8
Viktigt att komma ihåg	8
1 Inledning	9
1.1 Syfte och mål	9
1.2 Metod	9
2 Översikt och teori	11
2.1 Grundläggande begrepp	12
2.2 Typer av moduler	18
2.3 Membranets uppbyggnad	19
2.4 Driftparametrar	20
2.5 Behov av rening och passande membranlösning	24
2.6 Förslag till tillvägagångssätt för att bygga en membranprocess	27
3 Ultrafilter	29
3.1 Så fungerar det	30
3.2 Material	35
3.3 Processens delar	37
3.4 Exempel från Sverige och Skottland	44
3.5 Membran på marknaden	47
4 Nanofilter och omvänd osmos	49
4.1 Så fungerar det	50
4.2 Material	56
4.3 Processens delar	57
4.4 Exempel från Sverige och utomlands	62
4.5 Membran på marknaden	68
5 Referenser	70

Sammanfattning

Rapporten sammanställer kunskap om membranfiltrering för dricksvattenproduktion. Den ska hjälpa dricksvattenproducenterna att förstå hur membranfiltrering fungerar och när det är lämpligt att använda olika filtertyper: mikrofilter, ultrafilter, nanofilter och omvänd osmos. Rapporten är också en nulägesbeskrivning av membranbaserade anläggningar i drift, dels större svenska anläggningar, dels några intressanta exempel från andra länder.

Intresset för membranbaserade dricksvattenprocesser har ökat kraftigt de senaste åren. Det beror dels på att medvetenheten har ökat om behovet av bra barriärer mot mikroorganismer, dels på att nya produktionsmetoder har gjort membran till ett ekonomiskt rimligt alternativ. Membran kan användas för att lösa de allra flesta kvalitetsproblem inom dricksvattenberedning. Allt fler leverantörer vill ta del av marknaden, och det utvecklas alternativ som är lämpliga för nästan alla typer av vattenprocesser.

Beroende på behov och vilket råvatten som finns tillgängligt kan membran användas på flera olika sätt. Vissa lösningar är relativt lätta att styra och bevaka, medan andra kräver mer av driftpersonalen. För att hantera den stora bredden är rapporten indelad utifrån membranens täthet. De minst täta membranen, mikrofilter (MF), har porer som är större än 0,1 μm och fungerar ungefär som traditionella silar. Mikrofilter behandlas bara kortfattat i rapporten eftersom de har använts länge inom dricksvattenberedning. Nästa täthet är ultrafilter (UF) som har membran med porstorlek från cirka 1 nm till 100 nm. UF beskrivs i ett eget kapitel. Tätare membran, nanofilter (NF) och omvänd-osmosfilter (RO), definieras utifrån hur mycket salter som reduceras. NF och RO har flera likheter och beskrivs därför i ett gemensamt kapitel.

Rapporten går igenom vilka membran som finns på marknaden från många olika leverantörer. Den som intresserar sig för membran i sin processlösning kommer troligen att möta motstridiga teorier och ”sanningar” som cirkulerar inom branschen. Vissa sanningar är baserade på många års erfarenhet och kan ha bekräftats av drifterfarenheter och forskning. Andra kan vara felaktiga eftersom marknaden har genomgått en relativt snabb utveckling det senaste decenniet. Sanningar varierar också mellan olika leverantörer. Det kan vara bra att prata med flera olika leverantörer och producenter, och med dricksvattenproducenter som har erfarenhet av membranprocesser. Alla situationer är unika, och det krävs alltid pilotstudier för att bygga en väl fungerande membranprocess. Det gäller både för att avgöra vilken typ av process som är intressant, och för att bestämma och optimera olika driftparametrar.

Rapporten är till stor del baserad på en litteraturstudie som har kompletterats med lärdomar från det tidigare SVU-projektet *GenoMembran* (SVU-rapport 2015-20). När det gäller ultrafilter ges exempel från Sverige och Skottland. För nanofilter och omvänd osmos presenteras exempel från bland annat Sverige, Skottland, Singapore och Namibia.

Summary

This report is a handbook about membrane filtration for drinking water production. It is written as a tool for drinking water producers to increase their understanding of the process of membrane filtration, and explains when the different types of filter are suitable. Membrane filters are generally divided into four groups: microfilters, ultrafilters, nanofilters and reverse osmosis filters. This report also includes a description of several membrane processes for drinking water production currently in operation. It includes several Swedish plants, but also presents interesting examples from other countries.

The interest to incorporate membrane processes in drinking water treatment trains has increased the past decade. It can, in part, be explained by the increased need for reliable microbiological barriers, and by the improved production methods by the membrane producers, which has led to membrane filtration being an economically feasible option in an increasing number of applications. The diversity in membrane applications means that most water quality problems can be solved by some type of membrane filter. Membrane producers are frequently releasing new innovations to get a bigger share of the market, thus alternatives have been developed for most types of water processes.

Depending on the need of the producer and the available raw water source, a membrane process can be designed in several ways. Some solutions are highly automated and digitally monitored, while others require more attention from the operators. Due to high diversity of processes, this report has been divided into chapters based on the membranes pore size/rejection capacity. The membranes with biggest pores, microfilter i.e. membrane filters with pore sizes over 0.1 μm , are mainly mechanical filters with similar operational aspects as tight strainers. Thus, microfilters are only briefly presented in the first chapter. The somewhat tighter ultrafilter (UF) is defined by pore size, that ranges from around 1 nm to 100 nm (0.1 μm). Even tighter membranes, nanofilters (NF) and reverse osmosis (RO), are usually defined by their ability to reduce salts rather than their pore size. The transition between NF and RO is not universally fixed, but it is defined by the reduction of inorganic substances and ions.

The report aims to present the current available range of membranes on the market. However, those who are interested to incorporate a membrane solution into their process may hear contradicting “truths” that circulates. Some of these truths are based on years of experience, confirmed by operators and research. Others might no longer be true, since the market has gone through a quick development during the past decade. It may also vary between different membrane producers. It is recommended to contact different operators of membrane processes and several membrane producers to learn more before designing a membrane process. Every treatment process is unique, and pilot studies are needed to confirm collected infor-

mation. It is also needed for the design of the process and for optimisation of the same.

This report is mostly based on literature in combination with knowledge collected within the finalised SVU financed project *GenoMembran* (SVU report 2015-20). Regarding ultrafiltration, examples are collected from Sweden and Scotland. Examples of nanofiltration and reverse osmosis come from Sweden, Scotland, Singapore and Namibia.

Läsanvisning

Efter en inledning i kapitel 1 börjar rapporten med en överblick över vilka lösningar som kan användas vid specifika behov för en reningsprocess i Kapitel 2. Den innehåller även viktiga begrepp och ger en allmän teoretisk bakgrund i kortfattat format. Kapitel 3 handlar om ultrafilter, följt av Kapitel 4 om nanofilter och omvänd osmos.

Kapitlen och de flesta underrubriker är fristående från varandra och är tänkta att kunna läsas separat eller i valfri ordning. Det betyder dock att viss information återupprepas. Förklaringar till begrepp som dyker upp i senare kapitel finns troligen i kapitel 2, där de är presenterade i bokstavsordning.

Notera att denna rapport vänder sig till de som arbetar med dricksvattenrening. Mycket av informationen som presenteras gäller i allmänhet för membran även i andra tillämpningar, men informationen är dock riktad mot dricksvattenproduktion.

Viktigt att komma ihåg

De som intresserar sig för membran i sin processlösning kommer troligen att möta motstridiga teorier och ”sanningar” som cirkulerar inom branschen. Det beror i mångt och mycket på att olika aktörer som har gjort entré i olika skeden av utvecklingen. En produkt som inte möter förväntningar eller problem för tidiga användare, som inte alls behöver uppstå för andra, påverkar olika industrier och beroende på vilken leverantör som har lyckats göra sig stark på marknaden kan åsikter om olika processlösningar skilja sig åt mellan olika nationella marknader. Vissa sanningar är baserade på många års erfarenhet och kan ha bekräftats av driftserfarenheter och forskning. Andra kan vara ogiltiga eftersom marknaden har genomgått en relativt snabb utveckling det senaste decenniet. Sanningar varierar också mellan olika leverantörer, som såklart tror mest på sina egna lösningar – vilket de förväntas göra, så det kan vara bra att prata med ett flertal olika leverantörer och producenter.

Alla situationer är unika, och det krävs alltid pilotstudier för att bygga en väl fungerande membranprocess. Det gäller både för att avgöra vilken typ av process som är intressant, och för att bestämma och optimera driftsparametrar så som behov av förbehandling, tänkt flux och tvättbehov o.s.v. Samtidigt är det väl värt tiden att höra sig för med andra dricksvattenproducenter, i Sverige och i världen, hur de gör och varför. Denna rapport är en hjälp på vägen, för att ge en bild av möjligheter som finns, men är tänkt som ett första stöd och hör därför vidare med kollegor. De som sitter på erfarenhet visar ofta gärna upp sina vattenverk för att dela med sig av sina lärdomar.

1 Inledning

Allt mer har intresset från svenska dricksvattenproducenter riktats mot membran. Det ökade intresset beror i många fall på membranens funktion som bra mikrobiologiska barriärer, men i andra fall för att det är möjligt att utforma en automatiserad process, för att bli av med slamhantering eller för att lösa hotande vattenbrist. Beroende på behov och vilket råvatten som finns tillgängligt kan membran användas på fler olika sätt. Det finns de lösningar som är relativt lätta att styra och bevaka, medan andra kräver mer av driftspersonalen. För att hantera denna stora bredd är denna rapport indelad utifrån membranens täthet. De minst täta membranen, som kallas mikrofilter (MF) behandlas endast kortfattat inom ramen för Kapitel 2. Det är membran som har porer som är större än 0,1 μm , och de fungerar mer eller mindre som traditionella silar, men täta sådana. Nästa täthet är ultrafilter (UF) som har lite olika definitioner, men brukar generellt användas för membran med porstorlek från ca 1 nm till 100 nm. Tätare membran, nanofilter (NF) och omvänd-osmosfilter (RO) definieras utifrån hur mycket salter som reduceras. För att ett membran ska kunna anses vara ett RO måste den kunna reducera salter (monovalenta) med upp till 90 %. Övergången mellan NF och UF är inte helt fastställd, men den beror på reduktion av oorganiska ämnen och reduktionen av bivalenta joner.

1.1 Syfte och mål

Syfte med rapporten är att ge en hjälp till att förstå hur membran fungerar, vad som skiljer olika tätheter åt (ultrafilter, nanofilter och omvänd osmos) och när det är lämpligt att använda de olika varianterna. Den riktar sig till drifttekniker, processingenjörer, VA-ansvariga eller andra som arbetar med dricksvattenproduktion, och som söker mer information om membran. Den är tänkt att ge en förståelse för hur membranfiltrering fungerar, som kan vara till grund för att inhämta mer detaljerad information. Den är dessutom till för att underlätta vid utformning och driftplanering av membranprocesser

Rapporten är även en nulägesrapport med en sammanställning över membranbaserade anläggningar som kan vara intressanta att veta mer om vid utformning av en ny anläggning. Alla de större membranbaserade dricksvattenanläggningar i drift i Sverige idag har inkluderats, liksom några exempel från andra länder som kan vara särskilt intressanta för svenska producenter.

1.2 Metod

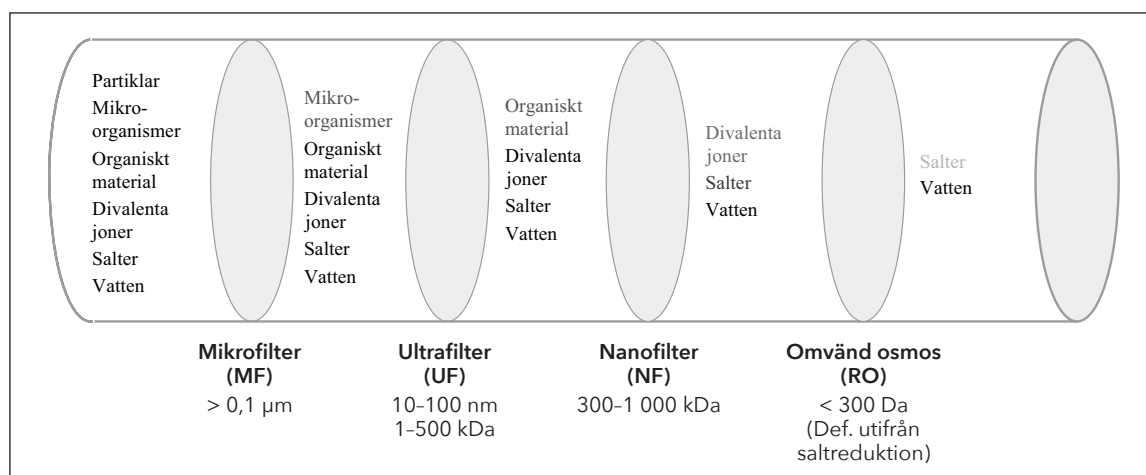
Rapporten är till stor del baserad på en litteraturstudie, som kompletterats med lärdomar inhämtade under det tidigare SVU-projektet *GenoMembran* (SVU-rapport 2015-20). Kunskap har inhämtats från internationella tid-

skrifter, liksom i kontakt med leverantörer. En viktig källa för den presenterade teorin är Baker RW (2012). *Membrane Technology and Applications*. John Wiley & Sons.

Information om dricksvattenanläggningarna har inhämtats från producenterernas egna uppgifter, i de flesta fall genom kommunikation med deras representanter.

2 Översikt och teori

Membran kan användas för att lösa de allra flesta kvalitetsproblem för dricksvattenrening. Det handlar om att välja den mest lämpliga – såklart också i relation till andra typer av processlösningar. Det finns allt fler olika alternativ eftersom intresset har ökat allt mer inom alla typer av vattenrening. Det betyder att allt fler leverantörer vill ta del av marknaden och parallellt med det utvecklas alternativ som är lämpliga för nästan alla typer av vattenprocesser. Samtidigt är inte membrantechnik endast en lösning, utan den stora mängd möjligheter som finns gör också att olika processer måste betraktas olika och de olika tätheterna behöver nästan ses som en typ av processlösning i sig själv. De olika definitionerna på membranen är illustrerad i Figur 2.1, med en förenklad förklaring till vilken typ av rening de olika tätheterna för membran kan användas till. Observera att reduktionen av ämnena i grått beror på vilken täthet inom membranklassen som används. (Mikrofilter kommer endast kortfattat beröras, och beskrivningarna i rapporten gäller överlag de andra tre typerna av membran.)



Figur 2.1 Överblick över olika membrans selektivitet. Grå text indikerar att ämnet delvis avskiljs – det beror i stor utsträckning på hur tät membranet är. Ju ljusare färg, desto mer kan tas bort av de tätaste membranerna.

Mikrofilter (MF) är ett finmaskigt mekaniskt filter, men ju tätare membran blir, desto mer inverkar andra typer av egenskaper hos membranen än endast storlek på maskor/porer. Redan tätare ultrafilter (UF) är i de flesta fall så täta att det inte endast är hydrauliska och mekaniska egenskaper som har betydelse för processen. När de blir tillräckligt täta inverkar även ytans kemiska egenskaper på vilka möjligheter och begränsningar som finns. Denna ytkemiska och fysikaliska funktion hos membranet får ännu större betydelse när tätheten övergår till nanofilter (NF) och omvänd-osmosfilter (RO). Dessutom, eftersom trycken ökar för tätare membran behöver processerna utformas på annat sätt än för de mindre täta membran (UF) jämfört med de täta membran (NF och RO).

Övergångarna mellan membranen är dock inte alltid så tydliga. Eftersom nanofilter är den senaste typen av membran är det framförallt övergången till och från denna som inte är fullständigt enad. För att använda NF som klassificering används ofta avskiljningsgrad av joner – framförallt divalenta joner mellan UF och NF och monovalenta mellan NF och RO. Dessutom blir själva membranytan allt mer kompakt. Ett NF beskrivs normalt inte längre som ett membran med porer, vilket UF är, där porer går att se i ett mikroskop. I NF och RO transporteras vattnet genom membranet p.g.a. diffusion, vilket sker med hjälp av det höga trycket. När membranet blir så tätt att det osmotiska trycket är den dominerande faktorn för behovet av tryck (högre än för att övervinna membranets motstånd) brukar membranet vara RO. Det finns alltså olika sätt att definiera ett NF (och RO), men förutom precis i övergångarna är det ofta lätt att särskilja NF från de andra två.

Även övergången mellan mikrofilter och UF klassificeras lite olika beroende på källa, men en relativt vedertagen skiljelinje är en portstorlek på 0,1 μm . En annan indelning som har förekommit görs utifrån förmågan att avskilja virus. Enligt den kan ett UF förväntas ha en virusreduktion på minst 4-log [1]. Det är dock viktigt att vara uppmärksam på specifikationen för ett membrans virusreduktion, då denna definition inte är allmän-giltig.

Beroende på hur tätt ett membran är uppges tätheten på olika sätt. MF och UF beskrivs utifrån porstorlek, vilket alltså uppges i μm eller nm. Tätare UF och NF beskrivs ofta i Dalton (Da), vilket egentligen är en viktenhet för molekyler (den minsta atomen (väte) har en vikt på ca 1 Da) se molekylärvikts cut-off nedan för förklaring. Ännu tätare NF samt RO beskrivs alltså utifrån reduktion av joner. Eftersom joner är laddade interagerar de med membranytan, och det är inte bara storlek på ämnena som har betydelse, utan dess laddning, form och yttaktivitet.

Mikrofilter benämns också som en typ av membran, men kommer inte att diskuteras djupare i denna rapport. Mikrofilter är så pass porösa att de främst verkar som filter för fina partiklar och avskiljning av ämnen är nästan uteslutande mekaniskt – medan de tätare membranerna ofta påverkar av kemifysikaliska krafter. Det fungerar därför oftast som ett förfilter, eftersom varje mikrofilter kan klara stora flöden med små tryckförluster över membranet. Det är möjligt att använda mikrofilter i kombination med fällning för att minska organiskt material. Denna kombination kan även ha effekt på log-reduktionen av virus, i samma storleksordning som traditionell fällning, men däremot är effekten liten på virus om ingen fällningskemikalie används [2]. Mikrofilter behöver backspolas regelbundet och tvättas kemiskt vid behov, men är för övrigt lättskötta.

2.1 Grundläggande begrepp

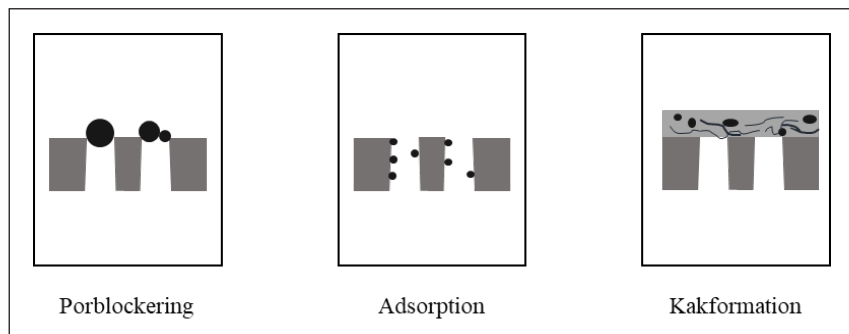
Nedan följer en del begrepp som är bra att känna till vid läsning av denna rapport, och när membran beskrivs generellt. Många av dem återkommer i rapporten med ytterligare förklaring. Den är organiserad i bokstavsordning för att lätta kunna hitta begrepp.

Beläggning (fouling)

Beläggning är begreppet för igensättning av membran. Det engelska begreppet, fouling, används ofta som dess benämning även i Sverige. Beläggning är den huvudsakliga orsaken till att elanvändning per producerad volym vatten ökar över tid, vilket beror på att tryckbehovet ökar över tid, d.v.s. vid bibehållet flux, vilket ofta används inom vattenrening. Vid bibehållet tryck minskar istället fluxet men det sättet att drifva en process förekommer sällan inom dricksvattenrening.

Det finns olika typer av beläggning. Organisk och biologisk beläggning är de vanligaste problemen för alla typer av membran, oberoende av tätet. Kalkavlagringar förekommer också, samt att metaller i råvattnet eller från fällningskemikalier ger beläggningar på membranytan. Det finns tre kategorier av beläggning (Figur 2.2). Den första är att molekyler eller partiklar sätter sig i en por och blockerar flödet genom den helt, vilket kan ske om partiklarna eller ämnena är lika stora som porerna. En annan typ av beläggning är adsorbering av ämnen, vilket både kan ske på ytan av membran och inuti membranets porer, vilket resulterar i en minskning av porstorleken. En tredje, vanlig typ av beläggning sker på grund av den så kallade koncentrationspolarisationen (se teori nedan) som kan övergå till en mer kompakt kaka ovan membranytan med ansamlad material från matarvattnet. Den kallas därför för kakbeläggning eller gelformation.

Beläggningar kan antingen vara reversibel eller irreversibel, beroende på om den kan åtgärdas genom spolning och backspolning, eller kräver kemikalier för att åtgärdas. Ibland är beläggningen så irreversibel att den inte längre går att åtgärda. Detta ska såklart undvikas, och är ofta en viktig del vid utformningen av en membranprocess.



Figur 2.2 Olika varianter av beläggning

CEB - chemically enhanced backwash (kemiskt förstärkt backspolning)

CEB är en typ av membran tvätt som främst används för hålfibermembran. Detta görs ofta som två typer – en syratvätt för att bli av med kalkavlagringar eller igensättningar av andra metaller, och en alkalisk tvätt för att tvätta det organiska materialet, gärna med natriumhypoklorit för en bättre effekt samt en desinficerande effekt.

CIP - cleaning in place (tvätt på plats)

CIP används för alla typer av membran, där membranen får stå under en förutbestämd tid, beroende på membrantyp och tvättkemikalier, och sedan spolas. Dessa kan också göras av två typer, en syratvätt och en alkalisk tvätt.

Flux

När det handlar om membran syftar flux alltid på det flöde som passerar genom membranet, och uppges i liter per membranyta och timme som standard (l/m²h). Det kan ibland uppges som brutto- eller nettoflux, se underrubrik nedan om utbyte för en förklaring. Flux brukar förkortas med J och beräknas genom:

$$J = \frac{Q_{\text{permeat}} [\text{l/h}]}{A_{\text{membran}} [\text{m}^2]}$$

Beräkningen kan därför enkelt göras för enskilda membran eller för hela systemet. Genom att bestämma vilket flux som ska användas, beräknas behov av membranyta från dimensionerande produktionsflöde och förväntat utbyte. Därifrån kan sedan antal membranmoduler beräknas.

Friktionstryckfall (eller bara tryckfall)

Friktionstryckfallet uppstår om ett tvärströmsflöde används. Det är den tryckförlust som uppstår av skjuvspänningen mellan membranytan och vattenflödet. Vid ett cirkulationsflöde är trycket lägre i koncentratet när det lämnar modulen än vad trycket är i matarvattnet, och det är den skillnaden som är friktionstryckfallet. Bra att notera är att på engelska kallas det för "pressure drop" vilket inte ska blandas ihop med transmembrantrycket. Tryckfallet används som en metod att följa upp beläggningar, tillsammans med TMP (se nedan)

Koncentrat/Lake

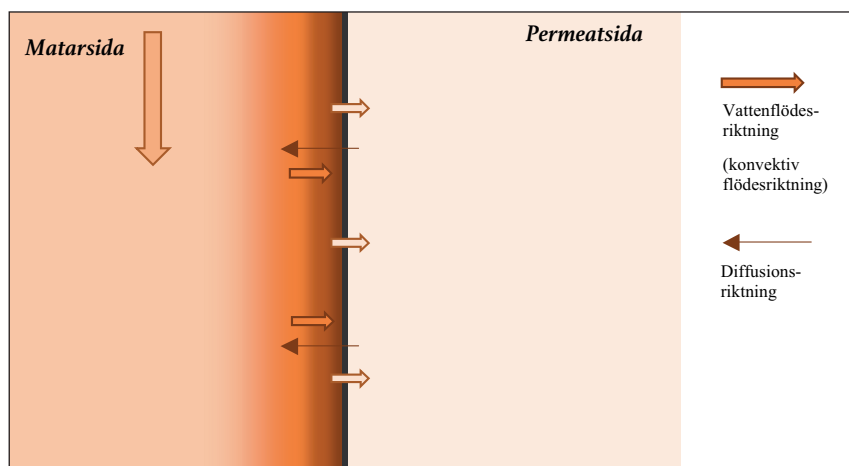
Finns i processer som tillämpar ett tvärströmsflöde på matarsidan. Det är den ström som har en anrikning av de ämnen som inte passerar genom membranet. Eftersom koncentrationerna fördubblas, eller mer, behöver denna ström kontinuerligt helt eller delvis tappas av efter att ha passerat genom membranmodulen. Andel som behöver tappas av beror på koncentrationerna i matarvattnet och membranets avskiljning, i många fall går hela strömmen av koncentrat till avlopp.

Vid avsaltningsanläggningar kan begreppet lake användas, för att indikera att det är ett koncentrat som innehåller en hög saltkoncentration och därför behöver hanteras med det i åtanke.

Koncentrationspolarisation

Vid filtration genom ett membran ansamlas de ämnen som är för stora eller har en laddning som hindrar dem från att passera genom membranet på matarsidan. Under tiden som filtrationen sker kommer därför koncentrationen att öka allra närmast membranytan, med en avtagande

koncentration mot bulken. Det kallas för en polarisation då transporten av ämnen mot ytan är högre än rörelsen av ämnen tillbaka i bulken. En förenklad illustration av koncentrationspolarisationen visas i Figur 2.3. Den högre koncentrationen påverkar motståndet för vattnet att passera genom membranet eftersom det skapas ett lager av högkoncentrerade ämnen. Det påverkar också det osmotiska trycket, som ger ett ökande mottryck med högre koncentration (se ekvation under membranmotstånd nedan). Därför har koncentrationspolarisationen allra störst betydelse vid avskiljning av joner, och inte minst för avsaltning.



Figur 2.3 Koncentrationspolarisation - (konvektivt) flöde mot membran-ytan bygger upp en högre koncentration ovan membranytan än i bulken (matarvattnet).

Koncentrationspolarisationen motverkas delvis av att introducera ett tvärströmflöde. Genom att skapa skjuvspänning ovan ytan kan diffusionen, d.v.s. transporten, öka från ytan tillbaka till bulken (matarvattnet). Därmed minskar tvärströmsflödet problem med beläggning på membranytan.

Matarvatten (feed)

Matarvatten är den ström av vatten som kommer in till membranet. Det engelska begreppet "feed" används även ofta i Sverige. När tvärströmsflöde/återcirkulation används finns det två typer av matarvatten – ett inkommande ("rå-")vatten och ett där inkommande vatten har blandats med det koncentrat som har återcirkulerats. Allra oftast är det inkommande flöde utan cirkulationsflödet som åsyftas.

Membran

Membran används ofta lite slarvigt, och felaktigt, som benämning på själva produkten. I själva verket är det den aktiva ytan med avskiljande egenskaper. Det är porstorleken, eller om inga porer finns packningen, av membranet som bestämmer vilka ämnen som avskiljs.

Modul

Ibland även kallat element, är en eller flera ark av membran alt. rör/fibrer som har packats till en enhet. De finns av olika typer (spirallindade,

hålfiber-, tub- eller plattmembran) och typerna är olika kompakta och har olika egenskaper, se förklaring nedan. Varje modul uppges ha en storlek på membranytan, vilket är den aktiva filtrationsytan i modulen. Yttre dimensioner har mestadels standardiserats för spirallindade membran, men andra typer har inte kommit dit än.

Molekylärvikts-cut-off (MWCO)

MWCO används för att uppge membranets avskiljningsförmåga (förkortning från engelskans molecular weight cut off). Det används för täta UF och NF istället för porstorlek (tätheten av ett RO uppges generellt i saltreduktion). MWCO bestäms för ett membran vid den storlek på molekyler som membranet filtrerar bort till 90 % – större molekyler avskiljs i större utsträckning, och mindre molekyler i lägre. Gränsen är inte exakt utan de flesta membran avskiljer även en andel av mindre molekyler än dess MWCO, men avskiljningen minskar kraftigt med att molekylerna blir mindre.

Permeabilitet

Permeabilitet är en operativ parameter som talar om fluxet i relation till det applicerade trycket. Denna parameter kan användas för att utvärdera utvecklingen av beläggning över tid, och avgöra om tvättrutinerna är korrekt inställda. Det är inversen av resistansen (multiplicerad med en faktor för korrekt enhet), som i sin tur uppger motståndet för vattnet att passera genom membranet. Det är både membranets egen resistans, samt resistans orsakad av beläggning.

Permeat

Det vatten som har passerat membranet och filtrerats, d.v.s. ett annat namn för filtrat, men detta är den benämning som används.

Resistans

Motståndet, eller i driftsammanhang kallat resistansen, är egentligen summan av flera olika motstånd. Membranet står för en egen resistans (R_m), som motsvarar det teoretiska motstånd som skulle upplevas ifall helt rent vatten skulle filtreras genom membranet. Utöver det ökar motståndet då ämnen adsorberar till membranet självt, antingen på ytan eller i porerna, ökning p.g.a. av ett högre motstånd ovan ytan (kallas koncentrationspolarisation, se ovan), eller av ämnen som ansamlas som en kaka ovan ytan. Vad exakt en motståndsökning beror på av dessa kan i viss mån avgöras av hur väl motståndet återställs av olika tvättar (reversibel eller irreversibel), men i tillämpade sammanhang spelar typ sällan roll, bara den går att rengöra. Det är rekommenderat att utvärdera tryckutveckling och påverkan av tvättarna över tid för att anpassa sitt tvättprogram på bästa sätt.

Retention

Retentionen, när man pratar om membran, är den andel av ett eller flera ämnen som hålls tillbaka av membranet och blir kvar på matarsidan. Kan också förklaras som reningsgrad av ett specifikt ämne. Det finns både sann

och observerade retention, där den senare oftast är den som syftas på med retention (eftersom sann retention är omöjlig att mäta), d.v.s.

$$\text{Retention} = 1 - \frac{\text{koncentration i permeat}}{\text{koncentration i matarvatten}}$$

Silt Density Index (SDI)

Silt Density Index (silt kan från engelskan översättas med ”ämne som orsakar igenslamning”) är en analysmetod som undersöker hur mycket partiklar och ämne som kan orsaka beläggning som finns i vattnet som ska renas. SDI används oftast för att fastställa behov av förbehandling före RO eller täta NF. För mer information hur det görs, se kapitel 4.3.5.

Transmembrantryck (TMP)

Tryckskillnaden mellan matarsidan och permeatsidan av membranet kallas för transmembrantrycket. Det brukar användas för processbevakning istället för matartryck eftersom den är kopplad till den drivande kraften i membranfiltreringen. Det är ofta den viktigaste driftparameterns att följa upp.

Tryckrör (housing)

Tryckrör (på engelska housing) används för alla trycksatta membran. De kan antingen vara sammanhängande med modulen, vilket inte är ovanligt för ultrafilter, eller vara en egen entitet. När själva modulen är producerad fastmonterad i tryckröret, byts tryckrör tillsammans med resten av modulen när membranet är uttjänt. I kontrast kan tomma tryckrören fyllas med moduler (vanligt för spirallindade membran), som byts ut vid behov men tryckröret kan behållas. Tryckrören innehåller då oftast flera moduler/element som har kopplingar tätade med o-ringar emellan.

Typ av modul

Det finns flera olika sätt att utforma en membranmodul. De är utförda för att den aktiva membranytan ska klara behov av tryck, minska energiförluster från friktion och ta så liten golvyta som möjligt. Mer förklaring hittas i kapitel 2.2.

Tvärströmsflöde och -hastighet

Täta membran, NF och RO behöver ofta ha ett tvärströmsflöde för att fungera väl. Det kan också kallas för *cirkulationsflöde* i de fall då koncentrationen får återcirkulera i systemet. En cirkulationspump används för att skapa ett flöde ovan membranytan, som på så sätt håller koncentrationen nere ovan membranytan. Den uppges generellt som en hastighet istället för ett flöde, för att kunna avgöra vilken inverkan den har ovan membranet, men båda varianter förekommer. Det koncentrerade vattnet ut ur membranen kan antingen helt eller delvis gå till avlopp, vilket håller nere koncentrationen av ämnen på membranets matarsida.

2.2 *Typ*er av moduler

Det finns ett flertal olika typer av moduler; spirallindade moduler, plattmoduler, hålfibermoduler och tubmoduler är de mest vedertagna. Dessa typer av membran har utvecklats i olika skeden och deras olika fördelar och nackdelar har styrt vilka typer som har blivit vanliga inom olika tillämpningar. Det är faktorer såsom kostnad, packningsgrad (membranyta/golvyta) och tvättmöjligheter som har varit de mest pådrivande för utvecklingen, och har därför styrt tillverkarna i olika riktningar beroende på vad de har valt att fokusera på.

Den tidigaste formen av membran var plattmoduler. I en plattmodul sitter membranark samlade i en kassett oftast i flera lager med distansnät emellan. Det skapar en stabil formation som klarar relativt höga tryck. Det är även lätt att byta ut enstaka membranark om ett av dem går sönder och det är i sammanhanget ett billigt sätt att tillverka membran. Plattmoduler har dock en mycket låg packningstäthet och används i många fall för att det är enkelt att byta ut enskilda enheter. Däremot kan det vara svårt att upptäcka vilket ark som är sönder i en packe med plattmoduler. De är monterade flera på en ram, med t.ex. motsvarande distansnät emellan för att klara tryck, och kan antingen användas individuellt, eller så packas de i ett tryckrör. Det finns också exempel på flera plattmoduler efter varandra med ökande täthet, men den utformningen är inte använd i någon större utsträckning. Plattmodul kan vara fördelaktigt för andra typer av applikationer, och det finns därför ett antal på marknaden, men inom användningsområdet vattenrening är de ovanliga.

Spirallindade moduler var från början en utveckling av plattmoduler för att skapa ett mer utrymmeseffektivt alternativ. Spirallindade moduler består av stora ark med den aktiva membranytan, avgränsade av täta ark mellan matarsida och permeatsida. De fästs och sluts i ena änden, medan permeatsidan är öppen åt andra sidan, som fästs mot en kanal i mitten av röret, och arken rullas ihop till cylindrar. Mellan de olika arken finns även distansnät, för att skapa flödeskanaler för matarvatten och permeat. Distansnäten mellan membranarken gör att modulerna blir stabila, och generellt klarar de höga tryck. Eftersom det är en viktig egenskap för membran för omvänd osmos har spirallindade moduler varit den dominerande typen för dessa membran under lång tid (se kapitel 4). Samtidigt kan inte spirallindade membran backspolas, och dessutom är många varianter av spirallindade moduler gjorda av polyamid, som är känsligt mot klor. Distansnäten skapar ett hinder för spolningen av membranerna och det finns därför risk för att tvätten inte kommer åt överallt. På så sätt kan små områden skapas där organiskt material kan ansamlas och skapa förutsättningar för bakterietillväxt. Dessutom skapar distansnäten ytor för bakterierna att fästa vid och klibbiga biofilmer kan bildas. Dessa egenskaper har gjort UF som spirallindade moduler mindre attraktiva för vattenrening, eftersom ultrafiltrering inte kräver högre tryck.

För användandet av UF inom dricksvattenproduktion har istället hålfibermodulen utvecklats till att bli den vanligaste typen av modul. Hålfibermodulen är, som namnet antyder, långa, tunna (ofta mindre än 1 mm i



Figur 2.4
En uppskuren spirallindad modul med kanalen i mitten som samlar in permeatet.

diameter) rör som är ihåliga i mitten. Själva membranet sitter antingen på insidan eller på utsidan av rören, och filtreringen sker genom att vattnet passerar igenom väggen. Dessa fibrer är samlade i grupper, och är antingen inneslutna i en cylinder av plast eller samlade i kassetter där fibrerna sänks ner för att få direktkontakt med vattnet. Hålfibermembran kan backspolas och dessutom använder många membranproducenter material som klarar av att komma i kontakt med klor och ett större spann av pH.

En ytterligare variant på modul som förekommer är tubmembran. Den har färre kanaler än ett hålfibermembran med större diameter, och är oftast packade i en cylinder. Jämfört med hålfibermembran är tubmembran ofta mer hållbara och klarar högre belastning av t.ex. turbiditet, men har avsevärt lägre packningsgrad och kräver större golvutrymmen för att nå upp till samma membranyta och produktionskapacitet. Tubmembran har i de allra flesta fall samma goda tvättegenskaper som hålfibermembran, och på grund av deras hållbarhet har vissa producenter av tubmembran kunnat ta fram egna, hårdare tvättmetoder, såsom att använda små skumbollar som spolas genom tuberna för att fysiskt tvätta membranytan. Tuberna är dessutom mer hållbara än vad fibrerna är, och problemet med fiberbrott [3] är återkommande bland hålfibermembran, men sker sällan, om någonsin, i tubmembran.

Ett relativt nytt alternativ är en kombination mellan hålfibermembran och tubmembran, vilket är större fibrer som innehåller flera kanaler (Figur 2.6). Det ger en bättre hållbarhet än fibrerna och minskar på så sätt risken för brott, samtidigt som de har en bättre packningsgrad än tubmembran.

Ett ovanligt men existerande alternativ är diskutubmembran. I denna är membranerna ordnade i ett tryckrör där matarvattnet passerar olika diskar av membran, genom vilka vattnet filtreras och sedan samlas i en separat kanal. Dessa varianter kan vara möjliga att öppna och inspektera för att byta ut enskilda diskar.

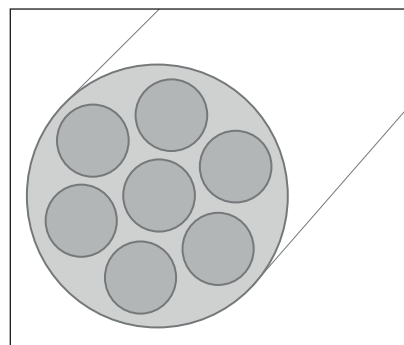
2.3 Membranets uppbyggnad

De allra flesta membran är idag så kallade tunnfilms kompositmembran (thin-film composite, förkortas TFC). Det betyder att den aktiva ytan, självaste membranet, är en mycket tunn hinna ovanpå ett stabiliserande lager. Den tunna hinnan bestämmer avskiljningsgraden, medan det underliggande lagret är mer poröst. Det var när framställningen av denna typ av membran upptäcktes som membran användningen blev mer ekonomisk då motståndet från membranet minskade avsevärt. Innan hade hela tvärsnittet haft samma membranegenskaper, och det krävdes därför (mycket) högre tryck för att få igenom vattnet. Både aktiv yta och stabiliserande material kan vara gjorda av antingen polymerer eller keramik. Det finns varianter av membran där membranytan är gjord av en polymer, och stabiliseras av ett keramiskt lager.

Olika varianter av placeringen av den aktiva ytan finns. Membranytan kan antingen finnas på matarsidan, permeatsidan eller både och. Den absolut vanligaste är att den aktiva ytan sitter på matarsidan, d.v.s. att vattnet



Figur 2.5
Änden på ett hålfibermembran.



Figur 2.6.
Princip för ett fiber med 7 kanaler.
Ungefärliga dimensioner för kanaler
och utvändiga fiberdiameter ligger
runt 1 mm respektive en halv cm.

passerar den avskiljande ytan innan den passerar stödmaterialet. Det har i många studier funnits vara den med bäst egenskaper för avskiljning och motverkan av beläggning.

2.4 Driftparametrar

Förståelse för de driftparametrar som används är till nytta för tolkning av driftdata vid uppföljning.

Membranmotstånd (resistens) och flux

Transmembrantrycket är en av källorna till energianvändningen, och för UF och RO är det den huvudsakliga energianvändningen. Tryckets relation till fluxet genom membranet beror på vattnets viskositet och resistansen, en term som används för att representera motståndet:

$$J = \frac{\Delta P - \Delta \Pi}{\mu_T \cdot R}$$

J = flux ($\text{l}/\text{m}^2\text{s}$)

ΔP = TMP (Pa)

$\Delta \Pi$ = osmotiskt tryck (Pa)

(används nästan enbart vid avsaltning, i andra fall avrundas den till 0)

μ_T = viskositeten ($\text{Pa} \cdot \text{s}$)

R = resistans, eller motstånd (m^{-1})

R är uppdelad i R_m , vilket är membranets egna motstånd, samt tre typer av beläggningsmotstånd: R_c (kakmotstånd), R_a (motstånd från adsorberat material) och R_{pb} (blockerade porer). Se förklaring av beläggning ovan. De tre typerna är ingenting som används i praktiken. Vid tillämpning så används ett totalt R och dess utveckling följs över tid (genom övervakning av TMP och permeatflöde) för att utvärdera processen, till exempel hur förbehandlingen fungerar (om den kan varieras) och om tvättarna fungerar bra. Istället för motstånd kan permeabilitet användas för samma sak. Det går även att följa transmembrantrycket, men eftersom viskositeten ökar med minskad temperatur är transmembrantrycket temperaturberoende, och för att normalisera för temperatur kan det underlätta att beräkna resistansen för utvärdering.

På grund av koncentrationspolarisationen ökar det osmotiska trycket närmast ytan vilket medför att behöver ökas kraftigt med ökande saltkoncentration för att uppnå önskat flux.

Utbyte och nettoflux

Alla membran har ofta ett begränsat utbyte av vatten, vilket generellt är lägre än med mer konventionella processlösningar. För lågtrycksmembran, som inte använder tvärströmsflöde, är det spolnings- och backspolningsvattnet som gör att utbytet blir lägre. Utan recirkulering av backspolningsvattnet är normalt utbyte ca 85–95 %, men beror på förutsättningarna. För att enkelt beräkna hur stor membranyta och antal membranmoduler som behövs brukar nettoflux användas som begrepp. Den beräknas genom

att det producerade vattenflödet (efter förlust av backspolnings- och tvättvatten) används istället för det totala flödet vid beräkning av flux. När det totala flödet som även inkluderar förluster för spolning används vid beräkning, kallas det för flux, eller ibland bruttoflux för tydlighets skull.

Nanofilter och omvänd osmos har generellt lägre utbyte än UF. Det beror på att en andel, eller hela flödet, av koncentratet släpps till avlopp. Det är begränsat av hur stort utbyte modulerna klarar, för avsaltningsmoduler är normalt ca 15 % per modul, liksom tryckfallet av matarvattnet när de passerar genom modulerna. Med en bra utformning, t.ex. genom att sätta olika täta moduler efter varandra i samma tryckrör, kan ett utbyte på strax över 50 % uppnås även för avsaltningsverk, men vanligt uppges möjligt utbyte på 35–50 % eftersom det beror på koncentrationen av joner i vattnet. Avsaltning av bräckt vatten kan variera mellan 50–75 % eller mer, beroende på saltkoncentration. Nanofilter har normalt en förlust av vatten på 50–85 %, i vilket det utökade utbytet kommer från en utformning med steg som filtrerar koncentratet från det föregående steget, dock med sämre permeatkvalitet som resultat.

Retention - sann och observerad

Det finns i realiteten två olika typer av retentioner för membran. Den som används är den observerade retentionen som är intressant vid drift, d.v.s. hur stor andel av koncentrationen i råvatten (eller annat inkommande vatten) som avskiljs. Den sanna retentionen är hur stor del som avskiljs med utgångspunkt i koncentrationen ovan membranytan. Eftersom den koncentrationen i de allra flesta fall är okänd (se koncentrationspolarisationen) och är svår att beräkna används den sällan, och aldrig i operativa sammanhang. I forskning kan den dock vara användbar i studier av beläggning. Den observerade retentionen beräknas genom:

$$\text{Ret} = 1 - \frac{c_{\text{ut}}}{c_{\text{in}}}$$

Där c_{in} är koncentrationen i matarvattnet och c_{ut} koncentrationen i permeatet. Retentionen är enhetslös och uttrycks oftast i procent.

Beräkning av driftkostnader (tryck)

Den huvudsakliga kostnaden för nanofilter och avsaltning är kostnad för energianvändningen. För ultrafilter uppstår ofta en högre kostnad för energianvändningen än för konventionella metoder. Däremot är kostnaden för tryck inte lika dominerande som för de täta membranen, utan kemikalier för tvätt utgör ofta en stor del av kostnaden. Dock är inte energianvändningen för ultrafiltreringen försumbar. Vid nanofiltrering med cirkulationsflöde är det ofta kostnaden för tvärströmsflödet som dominerar, medan för avsaltning är det det drivande trycket genom membranytan som orsakar störst kostnad. Ungefär hälften av tryckbehovet kommer vid avsaltning från att motverka det osmotiska trycket – beroende på salthalt och hur tätt membran som används. För att beräkna tryckbehovet för transmembrantrycket, d.v.s. tryckskillnad mellan matarvatten och permeat, används ekvationen:

$$\Delta P = \frac{J - \Delta \Pi}{\mu_T \cdot R_{\text{tot}}}$$

J = flux (l/m²s)

ΔP = TMP (Pa)

$\Delta \Pi$ = osmotiskt tryck (Pa)

(används nästan enbart vid avsaltning, i andra fall avrundas den till 0)

μ_T = viskositeten (Pa · s)

R_{tot} = resistans, eller motstånd (m⁻¹)

Det osmotiska trycket är försumbar för UF och i de allra flesta fall för NF (förutom när de används för avsaltning av bräckt vatten). Det osmotiska trycket kan räknas ut genom ekvationen (förenklad):

$$\Delta \Pi = i \cdot c \cdot R \cdot T$$

i = van't Hoffs faktor (sätts till 2 för natriumklorid)

c = koncentrationen i mol/m³

R = den allmänna gaskonstanten (8,31 kg m² · s⁻² · K⁻¹ · mol⁻¹)

så ej samma som resistansen ovan

T = temperaturen i Kelvin

I havsvatten är saltkoncentrationen ca 0,6 mol/l, och i Östersjön varierar den beroende på plats. Med en medelkoncentration av salt i världshaven är det osmotiska trycket ca 28 bar (2 800 000 Pa). Det osmotiska trycket ökar också allteftersom i tryckrören, eftersom koncentrationen ökar när vattnet filtreras.

Utifrån transmembrantrycket kan energikonsumtionen per producerad vattenvolym beräknas genom:

$$W_{\text{tryck}} = \frac{\Delta P}{\eta \cdot VR}$$

Den beräknade energiförbrukningen (W_{tryck}) får enheten J/m³ genom denna ekvation. Där är pumpens verkningsgrad och VR är utbytet av vatten efter avdrag av förluster från tvätt och koncentrat. SI-enheter används, och resultatet av ekvationen får enheten Ws/m³ producerat permeat.

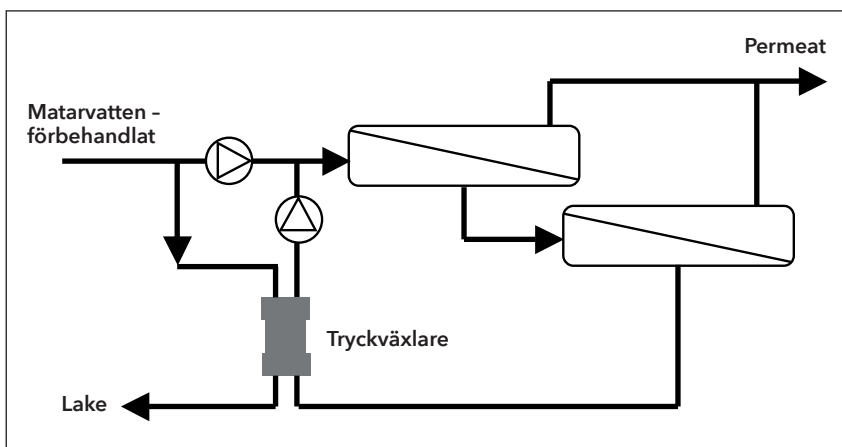
Notera dock att för ultrafilter kan även mottrycket i systemet efter filtrering medföra att energianvändningen blir högre än vad som beräknas med denna ekvation, liksom att energianvändning från backspolning och tvätt tillkommer. Enligt beräkning i ekvationen ovan hamnar normala tryck för ultrafilter på 0,01–0,03 kWh/m³, dock kan den totala energianvändningen, med de andra faktorerna inkluderade, hamna på ca 0,1 kWh/m³.

Energianvändningen från ett cirkulationsflöde kräver fler specifika uppgifter för beräkning. För att kunna beräkna det behövs information om friktionstryckfallet i koncentratet, d.v.s. skillnad i tryck mellan ingående matarflöde och utgående koncentrat. När det är mätt (eller beräknat) går det att beräkna cirkulationsflödet genom ekvationen (OBS! använd endast då en separat cirkulationspump används och koncentrat återcirkuleras):

$$W_{\text{cirk}} = \frac{\Delta p_f \cdot Q_{\text{modul}}}{\eta \cdot J \cdot A_{\text{modul}}}$$

Den beräknade energiförbrukningen (W_{cirk}) får enheten J/m³ genom denna ekvation. Där Δp_f är friktionstryckfallet, Q_{modul} flödet i en modul, J medelfluxet och A_{modul} membranarean på en modul. SI-enheter används, och resultatet av ekvationen får enheten Ws/m³ producerat permeat.

För att spara in tryckkostnader använder många avsaltningsverk tryckåteranvändning, eller tryckväxlare, så kallad Pressure Exchanger (Figur 2.7). Överföringen av tryck är från koncentratströmmen till matarströmmen, och det ska kunna spara upp till ca 60 % av energibehovet. Andelen som sparar beror på hur stort utbyte som används, då endast ca 97 % av tryckenergin i koncentratet/laken kan återutnyttjas. Det gäller även främst högtrycksanläggningar som avsaltning av havsvatten.



Figur 2.7 En avsaltningsprocess där energi sparas genom att utnyttja trycket i utgående lake för att trycksätta en delström av matarvatten. Pumpen efter tryckväxlaren är en cirkulationspump, medan vattnet som inte passerar tryckväxlaren måste trycksättas av en kraftig tryckpump.

Utöver energianvändning behövs kemikalier. Vanligt behov av kemikalier i en process med nanofilter eller omvänd-osmosfilter är syra (citronsyra eller saltsyra vanligt), lut, beläggningshämmare (finns idag fyra godkända sorter från två tillverkare), i vissa fall natriumhypoklorit samt tensider. Dessutom behövs oftast tillsats av kalcium i form av alkalisk massa, släckt kalk eller kalciumklorid. Vad som behövs är alltid beroende på situation, och behovet undersöks för en viss process innan den kan beräknas.

Det finns flera gratis modellverktyg från membranproducenter. De kan ge en viss information om vilken konsumtion som kan förväntas, men ofta behövs resultat från pilotstudie för att kunna göra en realistisk uppskattning.

2.5 Behov av rening och passande membranlösning

Beroende på vad som ska renas är olika membran lämpliga. I Tabell 2.1 ges en överblick över vilka olika ämnen som de olika membranerna kan ta bort. Därefter följer förklaringar i text, och hänvisningar till exempel på den typen av processer.

Tabell 2.1 Membranens användningsområden och ämnen de kan ta bort, avskiljnings halterna klassificeras (0) inte alls, (+) viss avskiljning, (++) bra avskiljning, (+++) mycket bra avskiljning

	Turbiditet	Mikroorganismer	TOC	Främmande ämnen	Avhärdning	Avsaltning
MF	++	+ till ++ ^b	0	0	0	0
UF	+++	+ till +++	0 till +	0	0	0
NF	(+++) ^a	+++	++ till +++	+ (++) ^d	+ till ++	0 (+) ^f
RO	(+++) ^a	+++	(+++) ^c	++ ^e	+++	+++

^a NF och RO är täta nog att ta bort turbiditet, men de flesta moduler bör ej matas med vatten med hög turbiditet eftersom det kan skada membranerna.

^b Reducerar bakterier och parasiter, men låg reduktion av virus.

^c Organiskt material avskiljs i mycket stor utsträckning av RO, men höga TOC-koncentrationer i matarvattnet skapar samtidigt stora problem med igensättning.

^d Det finns fortfarande ett kunskapsglapp för membran möjligheter som kemisk barriär, men forskning har visat på potential

^e Vissa läkemedelsrester, samt små opolära ämnen reduceras sämre av RO. Denna fråga forskas det mycket på.

^f Täta varianter kan ta bort en relativt stor andel salt.

Mikrobiologisk barriär

Det blir allt vanligare att använda membran för att försäkra en mikrobiologisk barriär i processen. Alla membran tätare än 4 mikrometer filtrerar bort Giardia och Cryptosporidium, och alla ultrafilter filtrerar bort de allra flesta bakterier. För ett skydd mot norovirus och andra typer av virus är ett ultrafilter med porstorlekt 30 nm eller tätare att rekommendera eftersom storleken på norovirus är ca 38 nm. Det finns sjukdomsbringande virus i storlek ner mot ca 20 nm, men de minsta är mindre vanliga än norovirus.

På Lackarebäck vattenverk i Göteborg har processen kompletterats med ett UF-steg i slutet av processen för att försäkra en mikrobiologisk barriär. Det är beskrivet i Kapitel 3.

Organisk avskiljning

Den stora utmaningen för ytvattenrening är organiskt material och att minska TOC-koncentrationerna till rimliga nivåer. Det har därför skett en utveckling av typer av membran som är specifikt anpassade för att avskilja färg och TOC. Denna utveckling har drivits på av behovet av förbehandling innan RO-filtreringen, som av tekniska skäl kräver låga koncentrationer av TOC.

Det finns membran, täta UF eller NF, som är täta nog att avskilja organiskt material men kan bibehålla konduktiviteten i vattnet. Dessa membran är på flera håll fortfarande under utveckling, och producenterna försöker balansera kostnaden, d.v.s. ytbehov, flux och energianvändning,

mot kapaciteten att avskilja. Dessutom kräver dessa typer av membran ett cirkulationsflöde med avtappning, vilket medför att processen har högre vattenförluster än många andra typer av processalternativ, inklusive ultrafiltrering.

Alternativ till ett tätt UF eller ett NF är att använda UF med förfällning, motsvarande att membranet skulle ersätta sedimentering och snabbfilter i en konventionell vattenverksprocess (kallas för direktfiltrering på UF). Dessa kräver att vattenkemin hanteras och följs upp, med rätt koncentration av fällningskemikalie samt balanserad pH. De membranprocesser som avskiljer organiskt material bidrar med en bra mikrobiologisk barriär då de nästan alltid är täta varianter.

Scottish Water har många dricksvattenanläggningar med membran. De har nästan 100 membranläggningar, av varierande storlek. Eftersom organiskt material är den allra största utmaningen i Skottland, särskilt i de norra delarna, är verken i huvudsak anpassade för att få bort färg. Samtidigt förväntas de vara mikrobiologisk barriär, och vara ett absolut skydd mot *Cryptosporidium*. Tre exempel från deras verksamhet är beskriven under Kapitel 3, UF, och ett exempel under Kapitel 4, NF.

Det finns också fårska exempel på hur svenska producenter har valt att använda membran inom deras process med avsikt att få ner koncentrationen av TOC. Kvarnagården i Varberg och Kungälv har valt ultrafilter medan Gästrike vatten och Fårösund har valt olika nanofilterprocesser. De presenteras i Kapitel 3 respektive Kapitel 4.

Kemisk barriär

Vid indirekt återanvändning av avloppsvatten, d.v.s. påverkat av avloppsutsläpp uppströms, eller när sjöar som är hårt påverkade av jordbruk används som råvatten kan det vara intressant att använda membran för att minska eller nästan helt reducera koncentrationen av främmande ämnen. Många av mänskligt orsakade föroreningar kan fångas av NF, beroende på storlek och form på ämnet. Vid risk för föroreningar i råvattenkällan av t.ex. PFAS kan ett NF vara tillräckligt, om det är tillräckligt tätt (ett membran med tätheten 300 Da har visats avskilja de minsta PFAS [4]). RO-membran tar bort mer, vilket följer av att de är tätare. Samtidigt är inte RO en absolut barriär mot alla ämnen, och beroende på täthet finns det några ämnen som kan ta sig igenom. Därför måste möjligheten att använda membran som kemisk barriär utredas för specifika fall.

Än så länge finns det inga exempel från Sverige med membranfiltrering som installeras endast för att fungera som en kemisk barriär. Däremot är den kemiska barriären en viktig del för Mörbylångas vattenverk, som presenteras i Kapitel 4, för att säkerställa att ämnen i processvattnet tas bort.

Membrans funktion som kemiska barriärer är ett område som det fortfarande forskas mycket på. Ett syfte är att sätta upp kriterier för membran som ska agera som kemiska barriärer. Viss avskiljning av de minsta typerna av föroreningar har kunnat visas med NF med en MWCO på ca 200 Da samtidigt som de största ämnena renats bort helt [5]. Det är troligt att

membran med MWCO på 1 000 Da renar bort en andel av föroreningar, eftersom studier har kunnat se att även ämnen mindre än detta minskade i koncentration [6] samtidigt behövs fler studier för att avgöra vad som krävs för att rena olika typer av föroreningar.

Recirkulering av avloppsvatten

Med hjälp av omvänd osmos är det idag fullt möjligt att återanvända avloppsvatten för dricksvattenproduktion, och få ett rent och säkert vatten. Ett välfungerande omvänd osmosmembran tar bort det allra flest ämnen från vattnet med mycket låga till inga kvarvarande koncentrationer, inklusive mikroföroreningar såsom läkemedelsrester. Beroende på membranets täthet kan vissa läkemedel gå igenom de membran som används (ofta motsvarade membran som används för bräckt vatten). Därför kombinera omvänd-osmosfilter ofta med en avancerad oxidationsprocess.

I Singapore filtreras avloppsvatten för konsumtion, även om det till vardags inte går direkt ut till nätet – endast om situationen kräver det. Oftast används det till industrier (inklusive livsmedelsindustrier) eller till att fylla på landets råvattenreservoarer under torra perioder. Återanvänt vatten står för 30 % av landets vattenkonsumtion. Recirkuleringsverken i Singapore tar emot redan behandlat avloppsvatten. Det har ett första steg med ultrafilter för att ta bort bakterier, partikulärt material och övrigt som avskiljs. Därefter passeras omvänd osmosmembran, och innan det lämnar verket strålas det med UV-ljus.

I Windhoek, Namibia, återanvänds avloppsvatten utan att använda omvänd osmos. Avloppsvatten har återanvänts i staden ända sedan 1969, men 2011 kompletterade verket med ultrafilter. Inkommande avloppsvatten behandlas genom flockning, flotation, snabbsandfilter, ozonering, biologiska aktiva kolfiler, sedan ultrafiltren innan en klororering. Idag har återanvänt vatten används i nästan 50 år framgångsrikt, d.v.s. utan några sjukdomsutbrott som kunnat relateras till kranvattnet.

Hur läkemedel renas och vatten återcirkuleras på bästa sätt är ett hett pågående diskussionsämne. Det har visats att RO kan ha svårt att ta bort riktigt små och opolära ämnen, d.v.s. sådana som är väldigt lika vatten. Studier har också visat på läkemedel som passerat genom RO-membran, men det beror givetvis på täthet. Därför kan det vara aktuellt att komplettera med ozonering eller annan typ av nedbrytande behandling. Det är viktigt att de som är intresserade av recirkulering i dagsläget gör noga förstudier med piloter för att säkerställa att vattnet renas till önskad kvalitet.

Avhärdning

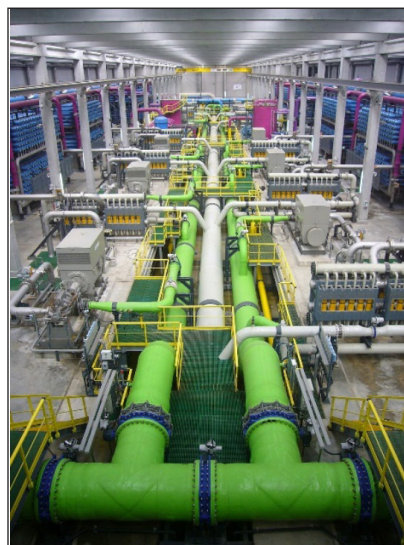
Som alternativ till kemisk avhärdning kan ett NF användas för att minska koncentrationen av kalk i vattnet. Membranets ytegenskaper, ofta av material som visar på svaga laddningar vid olika pH, gör att det är en process som kräver uppföljning. Kalcium och magnesiums laddning som joner gör att de kan orsaka problem med igensättning av membranet, om det vanligt förekommande negativt laddade membran används.

Eftersom hårt vatten är ett relativt ovanligt problem är avhärtningsanläggningar för dricksvatten inte ofta förekommande. Det finns exempel från södra Skåne på ett vattenverk som använder spirallindade nanofilter för att avhärtna vattnet, Glemmingebro. Verket använder grundvatten, som förbehandlas för att minska risken för igensättning. Det görs genom att minska koncentrationen av järn och mangan i vattnet innan filtrering och pH kontrolleras. Dessutom filtreras endast halva flödet genom verket, då avhärtning av halva mängden räcker för att nå önskad hårdhet. Det finns andra avhärtningsanläggningar, men det är vanligare bland industrier, för t.ex. kylvatten, än för dricksvattenproduktion i Sverige.

Avsaltning

Membran har länge använts för att avsalta bräckt- eller havsvatten. I Europa är t.ex. Spanien i stor utsträckning beroende av avsaltning för sin dricksvattenförsörjning, bl.a. har Barcelona en stor avsaltningsanläggning vid Llobregat (Figur 2.8). Det är idag den minst energikrävande metoden, dock är typen av energi som krävs annorlunda då det är tryckskillnad som driver avsaltning i membran, medan andra utbredda metoder använder värmeenergi. Jämfört med att rena andra råvattenkällor är det en dyr lösning att avsalta vattnet. Höga tryck krävs för att motverka det osmotiska trycket, och många membranmoduler krävs i jämförelse med exempelvis ultrafiltrering för samma produktionsflöden, då en stor del av inkommande vatten måste släpps ut igen som koncentrat (även kallat lake).

Vattenbrist kan dock medföra att avsaltning blir ett reellt alternativ. Det är därför vanligast i arida eller semiarida länder som har de ekonomiska resurser som krävs. I Sverige har vattenbristen på Gotland och Öland medfört att de har behövt förstärka sin dricksvattenproduktion med avsaltningsverk. Det finns i skrivandets stund fyra avsaltningsverk i drift, två på vardera ön, varav de två senaste togs i drift sommaren 2019, också på vardera ö. Det bräckta vattnet i Östersjön innebär att avsaltningen medför lägre driftkostnader jämfört med avsaltning av havsvatten, vilket innebär att erfarenheter av avsaltning i första hand har hämtats från avsaltning av brunnar med bräckt vatten – vilket är vanligt i USA – vid utformningen av dessa.



Figur 2.8

Llobregat avsaltningsverk som förser Barcelona med dricksvatten

(A view across a reverse osmosis desalination plant, av James Grel-lier, Tillgänglig enligt Creative Commons Attribution Licence 3.0: en.wikipedia.org/wiki/Desalination)

2.6 Förslag till tillvägagångssätt för att bygga en membranprocess

Nedan följer ett förslag på tillvägagångssätt för att besluta ifall membran är en bra lösning, vilket membran som är aktuellt och hur det ska användas. Det absolut viktigaste är att lära känna sitt råvatten och att göra pilotstudie. Utan det blir resultatet från membranfiltreringen en gissningslek, ofta med välgrundade antaganden men med många osäkerheter.

1. Börja med syftet: vad är det för råvattenkälla och vad vill ni uppnå med membranet? För ytvatten rekommenderas karakterisering av det organiska materialet, och data för inorganiska ämnen bör också finnas.
2. Se över vilken täthet som därmed är intressant. Prata med vattenverk som använder liknande membrantyper.

3. Tidig pilotstudie kan vara intressant. Finns tankar om olika möjliga placeringar i processkedjan kan det utredas genom att under en kortare tid (ett par månader) testa att mata piloten med de olika vattnen. Finns inte vattenverket än och annat än råvatten ska användas kan det simuleras i labbskala.
4. Processutredning med kostnadsuppskattning som beslutsunderlag med jämförelse för andra alternativ.
5. Längre pilotstudie med vald metod och matarvatten (kan givetvis kombineras med den första pilotstudien). Denna är till för att säkerställa, optimera och utreda (parallellt och inte i någon särskild ordning):
 - a. Möjligt flux
 - b. Filtrationstid (spolnings-/backspolningsfrekvens)
 - c. Tvättfrekvens och tvättsekvens – d.v.s. vilka och hur ofta kemikalier ska användas
 - d. Behov av förbehandling: ex. förfilter (ofta specificerad av membranleverantör), fällningskemikalie, antibeläggningskemikalie eller pH-justering
 - e. Vattenkvalitet som uppnås
 - f. Energianvändning

Leverantörer av pilotanläggningen har ofta förslag på var ni kan börja med dessa inställningar, och sedan justerar ni dem efterhand. Det är viktigt att ha en bra kommunikation med leverantör av piloten/membranmodulen för att få ut det bästa ur studien. Samtidigt är det inte fel att på eget initiativ prova andra inställningar än vad som föreslås eftersom chansen är stor att ni känner er råvattenkälla bäst. Generellt är det värsta som kan hända att ni får betala extra för en ny membranmodul, så länge hanteringen för övrigt görs på ett säkert sätt.
6. Denna pilotstudie bör pågå under minst ett år (framförallt om ytvatten används som råvatten, oavsett förbehandling) för att utreda hur processen påverkas av förändringar under året – både temperatur och kemiska förändringar.

Beslutsunderlag och beslut, förfrågningsunderlag upphandling o.s.v. Det är rekommenderat att ta hjälp av andra som har erfarenhet av upphandling av membranprocesser sedan tidigare, så att underlaget och kravspecifikationerna utformas på bästa sätt.

Att lägga resurser på utredning i förväg kan i längden spara pengar eftersom processen är bättre optimerad och anpassad till era förutsättningar. Det ger bra underlag för dimensionering av membranytan, förbehandling och annan kringutrustning. När driftpersonalen tar över finns det också erfarenheter inom organisationen de kan använda för att hantera problem som uppstår, och på så sätt blir processen säkrare.

3 Ultrafilter

I korthet

- Ultrafilter (UF) tätare än 40 nm är en god mikrobiologisk barriär – membran tätare än 30 nm är en fysisk barriär för alla patogener (notera att membranets skavanker (gäller främst virus), samt skador p.g.a. användningen kan släppa igenom patogener).
- UF bör därför kompletteras med en metod för att mäta dess integritet (d.v.s. dess status) och det behövs möjlighet att utföra integritets-test. Det kan göras som indirekta eller direkta metoder. De indirekta göra oftast online, medan de direkta kräver manuellt arbete och ofta stopp i produktionen. De direkta metoderna kan dock ofta hitta vilket fiber som läcker.
- Ultrafilter reducerar normalt inte joner. Mycket täta UF kan ge en viss reduktion av divalenta joner (t.ex. kalcium och magnesium), med upptill 30 % (dessa UF kan dock nästan definieras som NF).
- Vanliga ultrafilter som används för dricksvattenproduktion har en porstorlek på 20–30 nm. 20 nm motsvarar ungefär en molekylär-vikt på 150 kDa, vilket är i storleksordning med de största ämnena i naturligt organiskt material, d.v.s. avskiljningen av organiskt material är mycket begränsad utan fällningskemikalie.
- När fällningskemikalie tillsätts före UF uppnås färgreduktion. Det kallas för direktfällning på UF. Viss tillsats kan krävas även för att undvika beläggning av membranen.
- Placering av UF i en processlösning varierar och beror på valet av dess huvudsakliga funktion (som förbehandling, del i huvudavskiljningen i processen, eller som slutbehandling för desinfektion).
- De flesta typer av UF för dricksvattenproduktion är lågtrycks-membran av hålfibertyp. Hålfibermembran kan backspolas.
- Backspolning (inkl. spolning) och tvätt av membranen medför en högre vattenförlust än för konventionella snabbsandfilter. Avlopps-strömmar från UF är i stor utsträckning backspolningsvattnet – hög turbiditet och innehåller fällningskemikalie om det används (likställs då med slam, men har låg TS-halt). En mindre volym är tvättvattnet – som ofta har ett pH som måste justeras, och innehåller klor (om membranmaterialet tillåter det).
- Membranmaterialens klortålighet och beständighet vid olika pH varierar. Hur de ska tvättas beror därför på valet av membran. Ofta görs en alkalisk tvätt regelbundet (2 ggr/dag till 2 ggr/v) med innehåll av klor. Om en fällningskemikalie används (direktfällning) görs en syratvätt lika ofta. Den görs också ofta om vattnet innehåller hög koncentration av hårdhetsgivande joner, annars görs det mer sällan (men behöver kunna göras).

Ultrafilter (UF) har en allt ökande popularitet i Sverige, vilket till stor del beror på tillräckligt täta membrans egenskaper som en bra barriär mot patogener. Ultrafilter är porösa membran, och tillhör gruppen med lågtrycksmembran, där också mikrofilter ingår. Gränsen mellan MF och UF avgörs av porstorleken, och övergången ligger vid 100 nm. Denna gräns är en allmän vedertagen skiljelinje mellan MF och UF men den undre gränsen till NF är däremot inte lika strikt och det finns flera olika definitioner för hur tätt ett UF kan vara. Vanligtvis uppges den ligga på ca 1 nm, eller 10 Å [1, 7], men åsikterna går isär, och i det tätare skiktet (från ca 10 nm och mindre) överlappar olika definitioner och det finns membran med liknande egenskaper som klassas som tätt UF av en producent men som NF av en annan.

De allra flesta UF är en bra barriär mot vattenburna patogener. Parasiter, såsom *Cryptosporidium* och *Giardia*, och de flesta bakterier är så pass stora att de inte passerar någon typ av UF, medan en tätare variant av UF måste användas för att garantera en reduktion av virus. Den minsta typen av mänskligt patogena virus har en storlek på strax under 20 nm, och den vanligt förekommande, vattenburna noroviruset har en storlek på 38 nm. UF med porstorlekar på 20–30 nm är därför ofta förekommande inom dricksvattenrening, och särskilt i de fall då mikrobiologisk barriär har haft en betydande roll för införandet av ett membransteg.

Membran av denna täthet har däremot en dålig avskiljning av organiskt material, och ger därför liten, om någon, effekt på koncentrationen av totalt organiskt kol (TOC) och färg. Molekyler som väger ca 150 kDa har ungefär en storlek på 20 nm, och alla som är mindre än så passerar genom membranet, vilket är de allra flesta ämnen i naturligt organiskt material (NOM). Däremot passerar inte partiklar genom membranet, men när det gäller lösta ämnen är det endast de största proteinerna och andra typer av långa organiska molekyllängder som förhindras att passera. Därför krävs ett tätare membran eller en fällningskemikalie för att uppnå organisk avskiljning med ett UF.

3.1 *Så fungerar det*

UF fungerar i första hand som ett mekaniskt filter, med mycket små porer (i kontrast till nanofilter och omvänd osmos som fungerar annorlunda). Det medför att porstorleken har betydelse för funktionen hos UF, och därför bör den väljas utifrån behovet hos användaren. Avskiljningen som åstadkoms av ett UF avgörs därför främst av storleken på ämnena. Precis som i rör flödar vatten genom porerna relativt obehindrat, och det är friktionen mot porväggen som ger det huvudsakliga motståndet.

UF väljs oftast som en så kallad ”dead end”-process, eller på svenska en normalfiltration. Detta begrepp används i motsats till en tvärströmsfiltration, där ett extra högre flöde används i systemet och som passerar över membranytan, vilket kan minska konzentrationspolarisationen. För de allra flesta typer av UF brukar detta endast anses som en onödig kostnad, och oftast är det bättre att använda en normalfiltration. För den som vill veta mer om cirkulationsflöde beskrivs det i Kapitel 2 och 4.

Normalfiltration innebär att allt vatten som trycks in i membranmodulen också ska passera genom membranet. Samtidigt ackumuleras alla partiklar och ämnen som inte kan passera genom membranytan på matarsidan. Vid normalfiltrering är det därför stor risk att en "kaka" byggs upp ovan membranytan av de ämnen som inte kunnat passera membranytan. Denna kaka är en form av reversibel beläggning, det vill säga den kan spolras och backspolas bort. Denna kaka ger ett extra lager för vattnet att passera – vilket ger ett ökat tryckbehov, men kan också ge en extra filtrerande effekt. Dock finns risken att kakan kompakteras om det inte underhålls frekvent. Därför behöver spolning och backspolning göras ofta vid normalfiltrering, då en kompakt kaka skapar onödigt höga tryck och kan bli allt mer krävande att tvätta bort. Ett vanligt intervall för spolningen är ca 2 gånger/h, men det är beroende på hur mycket ämnen som ansamlas på matarsidan. Det i sin tur beror på membrantyp, ämnen i matarvattnet och vilken förbehandling som används.

Kakfiltrering är bara en av flera olika typer av beläggning. Andra sätt som ett membran beläggs på är genom att ämnen sätter sig som korkar i porerna, fastnar på väggarna i porerna eller adsorberar till ämnen i membranytan. De har stor inverkan på membranets effektivitet i längden, och kräver att membranet tvättas med kemikalier för att minimera. Beläggningarna medför att motståndet för att passera genom membranet ökar, vilket ses på ett stigande tryckbehov hos matarvattnet, eller minskat flux beroende på vilken processmodell som används. De beläggningar som kan spolras och backspolas bort, främst kakfiltrering och porblockering, kallas för reversibla, medan de som behöver kemikalier för att få loss är irreversibla. Mer om beläggningars inverkan på processen finns beskrivet nedan.

Tvätt och typ av kemikalier beror på vilket materialet membranet är gjort av och vilka ämnen som har orsakat beläggningen. Det som orsakar mest problem hos membran av alla tätheter inom vattenrening och -beredning är beläggning av organiskt material, inte minst inom ytvattenrening. För att tvätta bort det behövs ett basiskt och helst oxiderande tvättvatten. Vid beläggning av kalcium, vanligare inom grundvattenrening eller om ytvattnet är hårt, tvättas det bort med en syratvätt. Syratvätten behövs också om fällningskemikalie används, för att få bort eventuella beläggningar av järn eller aluminium.

Hålfibermembran

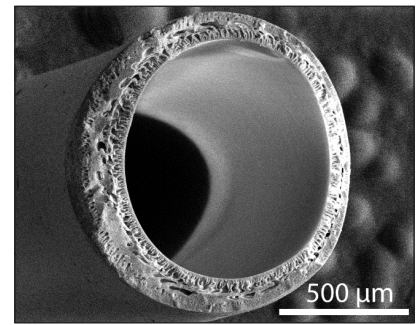
I de vattenverk som använder ultrafilter är hålfibermembran mycket vanliga. Fördelarna med backspolningsbarhet och möjlighet till klorering gör att det är huvudalternativ eftersom trycktåligheten hos spirallindade membran inte behövs och därför väljs ofta hålfiber för att få motsvarande packningsgrad. Hålfibermembran är också vanlig inom avloppsrening, och det finns därför ett stort antal producenter av dessa ultrafilter av hålfibertyp (Tabell 3.2).

Hålfibermembran har två huvudsakliga konstruktioner: en variant där den aktiva membranytan sitter på utsidan av hålfibrerna, för vilka riktningen för filtrationsflödet är från utsidan av hålfibrerna, och den andra

varianten är motsatsen, d.v.s. den aktiva membranytan sitter på insidan av hålfibrerna och flödesriktningen är inifrån-ut. Det har även gjorts några membran som har aktiva membranytor på båda sidor av hålfibrerna, men få har valt att göra den typen av membranmoduler då de inte har upplevt några större fördelar med tanke på att de är dyrare att producera och medför viss ökning i tryckebehov.

Det finns också två metoder för att skapa tryckskillnaden mellan matar- och permeatsidan. För inifrån-ut moduler används trycksättning av membranet på matarsidan. Hålfibrerna är i den typen av modul sammanhållna i grupper, och samlade i ett stort antal i en tryckbehållare. Matar-sidan trycksätts för att skapa transmembrantrycket, och permeatsidan håller ca atmosfärstryck – eller visst mottryck om situationen kräver det. Denna variant finns även för utifrån-in moduler. Det är dock vanligt för utifrån-in moduler att istället vakuumpumpa, d.v.s. vatten från permeatsidan pumpas så att undertryck uppstår. Dessa typer av moduler är ofta formade som kassetter – d.v.s. membranerna är i direktkontakt med vatten i bassänger. Nackdelen för vakuumpumpning är att möjlighet till TMP blir mer begränsat, eftersom matarsidan alltid håller atmosfärstryck med ett par meters vattenpelare som mest, och permeatsidan inte kan nå 0 i tryck, vilket medför att TMP endast kan uppgå till ca 0,9 bar. Det är dock inte vanligt att ett ultrafilter körs med ett högre TMP än så – men det kan förekomma.

Det finns två alternativ för orienteringen av modulerna. Modulerna ska under drift antingen vara placerade vertikalt eller horisontellt. Den vanligaste orienteringen är att placera dem vertikalt (Figur 3.2), men horisontellt förekommer. Den senare är dominerande bland spirallindade moduler och för tubmoduler. Horisontella moduler brukar kopplas ihop flera i rad i ett tryckrör och vid normalfiltreringen kan tryckbehållaren matas med vatten antingen från ett eller från båda hållen. Det finns en risk med sammankopplade moduler, eftersom kopplingar, ex. slitna o-ringar, kan orsaka



Figur 3.1
Närbild av en hålfiber från ett UF. Den porösa bärarstrukturen syns tydligt i bilden
(Tillgänglig enligt Creative Commons Attribution Licence 4.0 en.wikipedia.org/wiki/Hollow_fiber_membrane)



Figur 3.2 Rack vid Kungälv's nya vattenverk - tryckrören innehåller horisontella hålfibers-UF (foto tillhör Kungälv's kommun).

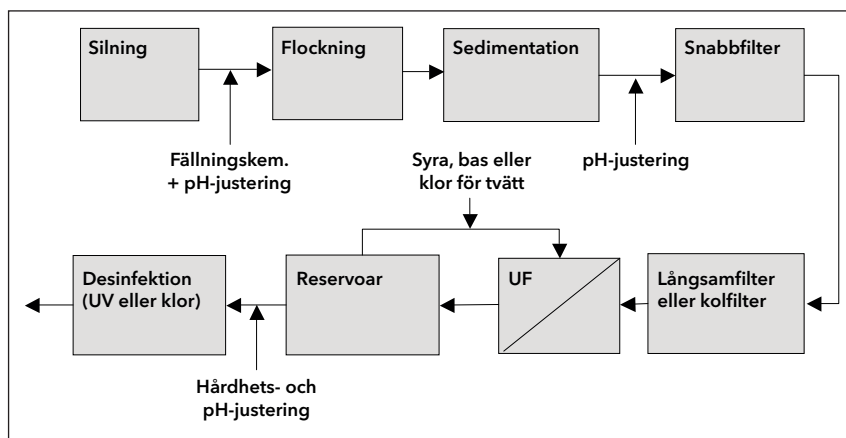
läckage mellan matarvatten och permeat. Med god kontroll av processen är det ett överkomligt problem, och vid val av orienteringen är det påverkan på tryckfall, belastning (ex. turbiditet), mottryck och lokalens utrymme som bör vara vägledande i beslutet. Vertikala matas uppifrån och ner eller tvärtom. Det är förekommande att vertikalas matningen alternerar varannan filtrering (d.v.s. byter riktning efter varje backspolning). Att alternera eller att mata från båda hållen medför att membranytan har en jämnare belastning, och membranet utnyttjas bättre över hela hålfibrernas längd.

Det pågår en diskussion bland producenter och användare av de lika typerna av hålfibermoduler. Hur de är konstruerade påverkar deras hydrauliska egenskaper, vilket i sin tur påverkar bl.a. resultat av olika tvättmetoder. Även vilken kvalitet matarvattnet måste hålla för att kunna belasta membranen diskuteras. Vilka argument som är starkast beror i dagsläget mycket på geografi, och olika typer av hålfibermoduler dominerar olika nationella marknader. Med det ökade intresset samlas allt mer erfarenhet, och med tiden kommer det finnas mer underlag för att fatta beslut för specifika tillämpningar.

Processens utformning

Med utgångspunkt i varför ett membransteg införs är det viktigt att veta var membransteget är tänkt att placeras i reningsprocessen. Placeringen är avgörande för valet av membran: täthet, material och typ. Det i sin tur beror på vad målet med membransteget är och vilken typ av barriär den ska verka som. När det gäller UF väljs den oftast för något av dessa tre huvudsakliga syften: 1) att fungera som mikrobiologisk barriär; 2) som förbehandling till ett efterföljande membransteg med tätare membran och/eller 3) organisk avskiljning som alternativ till konventionella metoder.

1. Ett membransteg som har som enda krav att den ska verka som mikrobiologiskt steg bör placeras i slutet av processen efter att organiskt material har avskilts. Det ger goda förutsättningar för membranen och minskar tvättbehovet. Används den på grundvatten med lågt innehåll av organiskt kol kan den användas utan tidigare avskiljning av organiskt kol. En låg belastningen av organiskt material och suspenderat material minskar risken för att membranet ska gå sönder och beläggningen bromsas. Det är dock viktigt att kloreringen (särskilt med natriumhypoklorit) är placerad efter membranen, eftersom även de typer av membran som är beständiga mot klor bryts ner av klor över tid. Förslag på utformning visas i blockschemat i Figur 3.3 på nästa sida.
2. Ultrafilter är vanliga som förbehandling innan omvänd osmos, och används även innan nanofilter. De används i dessa sammanhang för att minska turbiditet, som omvänd osmosmembran är mycket känsliga för, och för att få bort mikroorganismer, proteiner och annat organiskt material som kan orsaka beläggning. Därför är ofta detta steg specifikt anpassat för att ta bort organiskt material, d.v.s. antingen ett mycket tätt UF eller ett mindre tätt membran med en fällningskemikalie. Att endast filtrera med ett normaltätt UF (20–30 nm) kan skapa problem med beläggning redan på detta försteg. Flera studier har visat på att

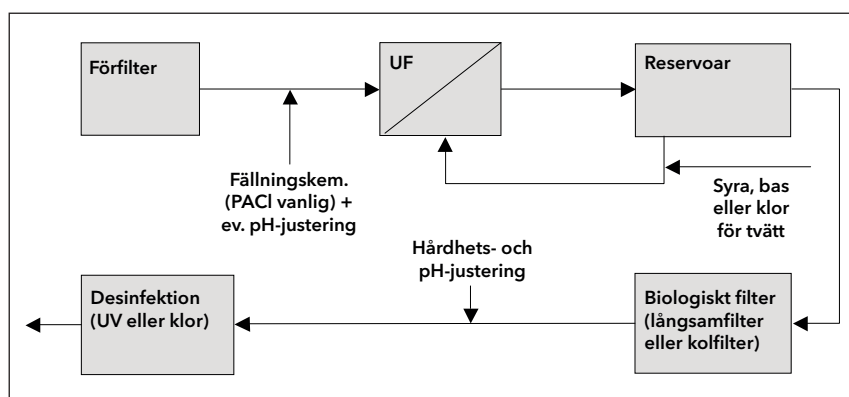


Figur 3.3 Exempel på en konventionell process som har kompletterats med ett ultrafilter.

under dessa förhållanden kan de organiska ämnena av mindre storlek ta sig in i membranets porer och fastna på dess väggar. Det skapar ett förhöjt tryckbehov och kräver kemisk tvätt oftare – denna typ av beläggning kan vara svår att få bort genom spolning och backspolning.

3. Det räcker alltså inte med en porstorlek på 20–30 nm för att minska koncentrationen av organiskt kol, och endast stora proteiner och de allra största humussyrorna avskiljs av membran med porstorlek 20 nm. Det behövs därför en fällningskemikalie eller ett membran som ligger närmre nanofilter för att åstadkomma en avskiljning. Tillsätts en fällningskemikalie innan ett UF på 20 nm kan koncentrationen av TOC förväntas minska med 50–80 % [8–11], beroende på dos, pH samt koncentration och karaktär av det organiska materialet i råvattnet. I vissa fall har det gått att förbättra avskiljningen något, men generellt sett hamnar avskiljningen av organiskt material på samma nivå som konventionell rening, d.v.s. flockning, sedimentering och snabbsandfilter. Skillnaden är att den är mer utrymmeseffektiv och det finns möjlighet till en annan flexibilitet i start och stopp för att anpassa produktionsflödet. Uppehållstiden som krävs mellan dosering och filtrering är mycket kortare än konventionell rening och ett par minuter räcker. Det medför att vid förändringar i kvaliteten av råvattnet tar det också samma korta tid för processen att svara på förändringar i inställningar av dosering och flux. Notera att det för många fall endast gäller små justeringar – i en process med optimerad dosering med relativt höga koncentrationer (som referensvärde på hög dos: 10 mg metalljon/l, men det varierar mellan membran och råvatten) kan endast små förändringar göras. För hög dos av fällningskemikalie kan orsaka problem med minskat flux/ökat tryck och ökat tvättbehov, eller i längden till och med igensättning av membranet. Så även om snabba förändringar kan göras är det begränsade i sin omfattning.

Tätare membran kan ge bra rening utan att fällningskemikalie behövs. Det ger en liten ekonomisk vinst av den minskade konsumtionen av kemikalier, men membranerna och energianvändningen blir dyrare. Tätare membran kräver högre tryck och med tätheten minskar också deras maximala



Figur 3.4 Förslag på en process med fällning på UF. Det är förenklat och ordning beror på situation.

flux. Lägre flux samt cirkulationsflöden med avtappning eller mer frekvent spolning på grund av den större mängden material som avskiljs medför att utbytet för processen blir lägre. Det lägre fluxet leder också till att den membranyta som krävs för att hantera flöden ökar d.v.s. fler moduler krävs i processen vilket i sin tur har konsekvenser för investeringskostnaden. Mikrobiologiskt görs en mycket liten vinst med tätare membran, eftersom de flesta patogener avskiljs av de UF som har porstorlek 20–30 nm. Där emot har tätare membran visats ta bort en annan typ av organiskt material än vad som avskiljs när fällningskemikalier används – som motsvarar de ämnen som avskiljs i konventionell fällning/sedimentering/snabbfiltrering [6]. En del av de ämnen som avskiljs av tätare membran är mindre än de som avskiljs vid fällning, och de kan relateras till desinfektionsbiprodukter, samtidigt som annan effekt på den slutgiltiga vattenkvaliteten inte är fullt klarlagt. T.ex. tros mindre molekyler av organiskt material vara mer tillgänglig för bakterier att tillgodogöra sig.

Ett annat alternativ, som ännu inte är vanlig, är att behålla flockning och sedimenteringen men byta ut de konventionella sandfiltren mot ultrafilter på ca 20–30 nm. Den huvudsakliga vinsten med det jämfört med sandfilter är den extra mikrobiologiska barriären som fås av UF – som är en bättre barriär mot alla patogener än sandfilter. Dessutom är turbiditetsreduktionen bättre. Vid höga koncentrationer av organiskt material i råvattnet kan det vara ett rimligare alternativ för att få en tillräcklig reduktion, då ultrafilter i stor utsträckning tar små flockar som inte sedimenteras, men blir inte lika utsatta för de relativt aggressiva fällningskemikalierna, inte minst om järnklorid används.

Det är dock inte klarlagt vilken skillnad det blir jämfört med direktfällningen då utformningen ännu inte finns i Sverige. Pilotstudier (opublicerade) på ett par vattenverk har dock visat på positiva resultat.

3.2 Material

De allra flesta ultrafiltermembran och dess stödmaterial är gjorda av olika slags polymerer. De två typer av material som har blivit de vanligaste är polyetersulfon (PES) och polyvinylidenfluorid (PVDF). Till skillnad mot

cellulosaacetat och polyamid, som tidigare har dominerat marknaden, är PES och PVDF motståndskraftiga mot oxiderande ämnen, och då inte minst klorerande ämnen. PES membran är i allmänhet tåliga inom ett brett pH-spänn (1–13), medan PVDF är tåliga inom ett något mindre spann (2–10). Å andra sidan är PES-membran känsliga för organiska lösningsmedel. Det finns ett antal producenter av membran gjorda av andra material såsom polysulfon (PS) som klarar klor, relativt höga temperaturer och tålig i ett brett pH-spänn (1–13), samt polyeten (PE) som inte tål oxiderande ämnen. Det finns även några enstaka UF-membran av de kemiskt lite känsligare polyamid, som dock klarar höga tryck, samt cellulosaacetat, som också klarar klor.

Det huvudsakliga materialet är det som utgör den aktiva membranytan, vilket är ett mycket tunt lager. Det är det som ofta är gjort av PES och PVDF. Det stöttas sedan av ett mer poröst lager under ytan, för att på så sätt skapa ett mindre motstånd för vattenflödet, men samtidigt stötta membranytan så att den klarar de tryck som krävs.

Membranytan kan modifierats med andra polymerer för att den ska bli hydrofil och negativt laddad – vilket ger minskat tryck och mindre risk för beläggningar från organiskt material. Det gör att membranytan kan bestå av flera olika polymerer.

Hålfibermembran gjorda av polymerer är ofta limmade i ändarna – för att fästa fibrerna och för att täta mellan matarvatten och permeat. Även detta material kan vara känsligt för högt eller lågt pH, klor eller andra ämnen och det är därför viktigt att diskutera användandet av tvättkemikalier med membranleverantören – om man önskar avvika från det som rekommenderats sedan tidigare.

Keramiska membran har än så länge använts mycket lite inom dricksvattenrening. Detta beror på att kostnaden för keramiska membran är många gånger högre än för polymera membran. Å andra sidan är de membranerna mycket tåligare, vilket kan ses från deras huvudsakliga användningsområden som är inom kemikalieindustrin, eller livsmedelsindustri där membranerna i många fall behöver kunna tvättas kraftigt för att undvika tillväxt. Inom livsmedelsindustrin är deras fördel även att de är temperaturtåliga. Det finns alternativ anpassade för vattenrening, men på grund av kostnaden väljs de mycket ofta bort. Keramiska membran har längre livslängd än polymera membran eftersom de inte bryts ner på samma sätt av kemikalier. De är dessutom ofta konstruerade så att en del av en modul kan tas loss och hanteras separat från övriga delar, för att t.ex. bytas ut eller tvättas. Packningsgraden kan dock vara lägre än för de polymera – då de polymera innehåller fler fibrer per modul.

Vilket material och typ av membran som är mest lämpad beror på situation. Det är därför värt att testa olika membran i pilotstudier, för att lära sig vilka ämnen i matarvattnet som orsakar beläggning och vad som krävs för att tvätta dem. Resultaten från pilotstudierna kan därefter användas för att bestämma vilken pH-tålighet och övriga materialegenskaper som krävs. Rätt anpassade membran ger längre livslängd, vilket skapar bättre ekono-

miska förutsättningar, och kan ge mindre problem med beläggning och behov av extra tvättar.

Viktigt att komma ihåg är att membranets avskiljningsförmåga kan ändras över tid av regelbunden utsättning för klor och olika pH. Även membran som kan tvättas med klor blir i längden negativt påverkade. Pilotförsök kan endast svara på hur membranen påverkas på kort sikt – med en möjlig förändring av de första tvättarna. Det är svårare att uppskatta hur membranen påverkas över tid och det är upptill membranleverantörer att uppge och garantera en viss livslängd. Hur många tvättar de klarar brukar uppges i ppm·h – som beräknas utifrån koncentrationen av klor i tvättvattnet gånger hur lång tid tvättvattnet är i kontakt med membranytan. En kortare tvätt (kemiskt förstärkt backspolning) brukar röra sig om ca 10–15 min kontakttid per tvätt, och en längre tvätt brukar vara runt 2 h.

3.3 *Processens delar*

För att skapa en välfungerande och säker process finns ett antal faktorer att tänka på. Det går främst ut på att underhålla membranen och att få bästa möjliga livslängd under gällande förutsättningar. Samtidigt finns det även processdelar som kan ingå för att garantera ett säkert dricksvatten.

Tvätt

Tvättfrekvens och tvättsekvens är bland det viktigaste att optimera och anpassa för att bibehålla en stabil och långsiktigt fungerande process. Det är också på så sätt som den mest ekonomiska driften hittas. Genom att optimera intervallen mellan spolningar och backspolningar, samt kemiska tvättar, kan ett högre flux bli möjligt, vilket minskar investeringskostnaderna om det kan uppnås redan i pilotskedet.

En vanlig metod för att tvätta ultrafiltermembran av hålfibertyp är frekventa hydrauliska tvättar i en sekvens som tar runt två minuter från stopp av filtration till start av ny filtration. Denna spolning är ofta uppdelad i olika steg, där ett steg ofta innebär en spolning (på engelska kallad forwardflush) av matarsidan, och ett annat steg är backspolningen. Backspolningen kan också göras i två separata steg med tömning av backspolningsvolymen i vardera änden (uppe eller nere för en vertikal modul, eller vardera sida för horisontella) för att komma åt hela membranets yta på bästa sätt. Det är inte ovanligt att backspolningen dessutom är förstärkt med luft. Ordning på spolningssekvensen kan variera.

Nedsänkta hålfibertyper (ej i tryckrör) har nästan alltid förstärkning av luftbubblor vid spolning och backspolning, där luftbubblornas ytspänning hjälper till att lösgöra material som ansamlats på membranytan.

Tvättfrekvensen påverkar vattenekonomin (utbytet), vilken i sin tur påverkar kostnader per producerad vattenvolym. Vanliga intervall för spolning/backspolning varierar för enskilda membran, men för trycksatta hålfibermoduler är det vanligt att de rekommenderade intervallen ligger på 20–90 min (ofta 20–45 min), till viss del beroende på producent av modulen, men allra mest på vattenkvaliteten på matarvattnet.

Som komplement till den hydrauliska tvätten används även kemiska tvättar. För ultrafilter av hålfibertyp är det vanligt att en kemiskt förstärkt backspolning (CEB – en allmänt vedertagen förkortning för detta, från engelskans Chemically Enhanced Backwash) ingår i tvättprogrammet, efter ett förutbestämt antal filtrationscykler. (En cykel är filtration av fastställd längd, följt av en hydraulisk tvätt, förutom för den sista innan CEB.) Noteras bör att det finns leverantörer som kallar den typ av tvätt för något annat, men funktionen är densamma, även om utformningen kan vara annorlunda. I en CEB fylls membranmodulerna och berörda kringliggande rördelar med permeat som innehåller tvättkemikalie. Den får stå och dra några minuter, varefter systemet backspolas, och sedan spolas för att försäkra att tvättkemikalien inte finns kvar vid återstart. Hur ofta en sådan tvätt görs bestäms utifrån förutsättningarna. Hög belastning från matarvattnet av organiskt material, hårdhet eller fällningskemikalie medför oftast att tvätt behövs relativt frekvent, och det är inte ovanligt att en CEB görs en eller två gånger om dagen. Andra verk fungerar bra med ett par dagar mellan sina CEB. Att det kan variera är en av orsakerna till att det är viktigt att optimera för varje individuell process. Som alternativ till att ha ett bestämt tidsintervall mellan olika CEB är att tvätta utifrån den producerade volymen. Ett tredje alternativ är att låta transmembrantrycket (eller permeabiliteten som beräknas utifrån TMP, flux och temperatur) bestämma när det är dags. Det medför viss nackdel i och med att produktionsvolymen per dygn inte är förutbestämt utan beror på hur ofta tvätten startas, men kan ge fördelar med en mer optimerad tvättsekvens, då membranet kommer att tvättas oftare eller mer sällan beroende på matarvattnets kvalitet (framförallt i processer med ytvatten).

En annan form av tvätt är en längre, mer statisk tvätt, i vilken membranmodulen och kringliggande rördelar fylls med permeat innehållande tvättkemikalie som sedan får stå i en eller flera timmar (CIP, från engelskans Cleaning In Place). Därefter spolas membranen ordentligt. Denna metod kan även användas för spirallindade moduler. Det finns också ett alternativ att plocka ut modulen från dess plats i processen och sänka ner i ett kar med tvättkemikalierna (COP från engelskans Cleaning Out of Place). Av dessa två är det egentligen bara CIP som används idag, eftersom COP är opraktiskt, och används därför endast i undantagsfall. Även moduler som tvättas regelbundet enligt CEB har ofta CIP med i tvättprogrammet – men med långa mellanrum, beroende på igensättning. Som med dem andra tvättmetoderna avgörs intervallen mellan ett par CIP av matarvattnet och hur mycket membranen belastas. Det är inte ovanligt att dessa intervall handlar om månader, medan andra har valt kortare tvättar med tätare mellanrum på några dagar.

Det finns två varianter av de kemiska tvättarna: en sur tvätt, som används för att få bort metaller, antingen hårdhetsgivande metaller, järn och mangan samt metaller från fällningskemikalien, eller en alkalisk tvätt, som löser upp organiskt material och dödar mikroorganismer, vilket inte sällan förstärks av att natriumhypoklorit tillsätts. Det finns också ett flertal alternativ av blandningar av tvättkemikalier, specifikt framtagna för en viss

typ av beläggning eller ett specifikt membran. Det är dock för de frekventa tvättarna vanligt att använda vanliga syror och baser, såsom saltsyra, svavelsyra och citronsyra samt natriumhydroxid, medan grövre tvättar (CIP) kan förstärkas av specifika tvättkemikalier. Kemikalier som används är t.ex. etylendiamintetraättiksyra (EDTA) och natriumdodecylsulfat (SDS). Det finns också kombinerade kemikaliemixar (ex. SDS i kombination med syra/bas) som kan användas, vilket kan göras på inrådan av leverantörer eller entreprenörer.

Sammanfattande översikt över tvätt för UF presenteras i Tabell 3.1.

Tabell 3.1 Beskrivning av hur ultrafilter ofta tvättas och vanliga tidsintervaller.

Typ av tvätt	Kemikalier	Tidsåtgång	Steg	Frekvens
Hydraulisk tvätt	Inga	Ca 1,5–2 min	1) Nedstängning 2) Spolning av membranytan 3) Spolning och backspolning 4) Uppstart	Var 20–90 min
Kemiskt förstärkt backspolning (Chemically enhanced backwash CEB)	Natriumhydroxid och/eller natriumhypoklorit, (t.ex. pH 11, 250 ppm klor) Svavel-/saltsyra, (pH 2)	15 min för vardera	1) Fyllning av rent vattnet blandat med kemikalie 2) 10 min stillastående 3) Backspolning 4) Spolning för att försäkra att alla kemikalier är borta	0,5–2 ggr/dygn
Kemisk tvätt (Cleaning in Place CIP)	Beror på behov. Kan vara samma som CEB eller andra ämnen såsom EDTA ¹ , SDS ² eller citronsyra.	1–2 h för en kemikalietyvätt	1) Fyllning med rent vatten blandat med kemikalie 2) Blandningen får rotera över modulerna 1–2 h 3) Spolning 4) Backspolning	Några gånger per år

¹ EDTA = etylendiamintetraättiksyra

² SDS = Natriumdodecylsulfat

Viktigt för dessa tvättar är det pH som används. En sur tvätt blir mer effektiv ju lägre den kan gå, och därför är det vanligt med pH 2 för tåliga membran. Den alkaliska tvätten ska i motsats vara hög – särskilt om klor tillsätts. Vid höga pH är klor mindre ”aggressivt” gentemot membranet, och klorerande tvätt på neutralt eller under är skadligt för membranet även kortsiktigt, även för PES och PVDF-membran. Vid högt pH (ca pH 11) klarar ett PES membran att tvättas med klorhalter på ca 200 mg/l. Det ger en desinfektion av modulerna och är dessutom ett bra sätt att komma åt att tvätta ledningarna runt membranerna.

Integritetstest

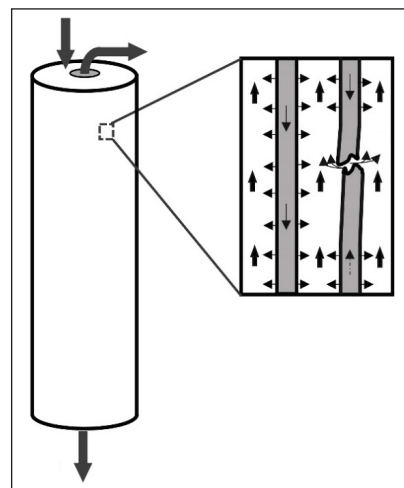
Även med de tätaste membranerna finns det en risk för läckage av matarvatten till permeatet. Risker varierar dock mellan olika processer, och risken beror på faktorer såsom typ av membran, material, tvättintervall, producerad volym och matarvattnets kvalitet. Dock finns det läckagerisk även i processer med mycket hållbara moduler, för vilka äldre kopplingar och tätningar kan orsaka en hälsorisk. I vissa moduler kan det gå hål på själva membranet, vilket är ett känt problem framförallt för hålfibermembran, som kan bli allt skörare med tiden och spricka vid spolning eller höga

tryck [12]. En annan risk, som inte är exklusiv för någon typ av membran (dock ej för keramiska) är att limmet släpper [13]. Bristande integritet hos membranmoduler, d.v.s. att de inte är hela och har läckande partier, är därför en riskfaktor för konsumenternas hälsa, och den bör testas regelbundet, eller t.o.m. online när det är ekonomiskt motiverat.

Test av integriteten kan göras på ett flertal olika sätt. Vilken variant som är aktuell beror på hur fort ett läckage behöver upptäckas, vilken retention membranet har av olika ämnen och partiklar samt vilken typ av modul som används. Det finns både direkta och indirekta integritetstest. De direkta metoderna kan identifiera vilken modul eller fiber/tub som orsakat läckaget, men kräver att modulerna som ska kontrolleras tas ur drift, töms på vatten och testas, och vissa typer kräver även manuellt arbete. De indirekta metoderna kan göras online och mäter olika parametrar i permeatet för att plötsliga förändringar ska upptäckas. Det är därför de kallas för indirekta – de ger en indikation på att något har hänt i processen, men visar inte var eller varför.

Det finns några olika direkta integritetstest som är mer eller mindre varianter på samma lösning. De kallas ofta för någon variant av luftintegritetstest. För att identifiera den läckande modulen töms ena sidan av membranet, antingen matar- och/eller permeatsidan beroende på vilken variant som används. Sedan trycksätts den tömda sidan med luft varpå en parameter mäts för att avgöra hur fort luften läcker ut – antingen som ett tryck eller ett vatten- eller luftflöde. Det jämförs sedan mot förutbestämda/uppmätta värden för intakta moduler. En sådan metod kan hitta ett läckande fiber bland miljontals, vilket innebär att hela rack av moduler kan testats samtidigt. Förändringar i luft- eller vattenflöde vid öppning och stängning av olika ventiler som separerar de olika modulerna kan jämföras, och på det viset inringas den läckande modulen. För att hitta läckande fiber i en hålfibermodul måste det plockas bort och undersökas individuellt. Är det har hittats kan det pluggas igen, och modulen sätts tillbaka i processen.

Bland de indirekta metoderna är det svårare att hitta ett lämpligt alternativ som är säkert och ger en tydlig indikation vid läckage. Möjligheten till applikation som integritetstest beror på membranets förmåga att reducera olika ämnen. För att testa integriteten hos ett UF är partikelräknare eller turbiditetsmätare möjliga att använda för övervakning. Eftersom UF tar bort partiklar och turbiditet i hög utsträckning är en koncentrationsökning i permeatet möjliga att koppla till läckage. Å andra sidan har dessa metoder svårt att upptäcka mindre läckage. Partikelräknare som kan uppfatta partiklar i tillräckligt små storlekar för att hitta små läckage är dyra och en enskild mätare används därför för att övervaka blandat permeat från många moduler. De läckande partiklarna är ofta små, och på grund av utspädningen så blir koncentrationen för partiklarna sällan tillräckligt hög för att ge en signal om läckage. Liknande problem gäller turbiditeten – om många moduler bevakas av samma mätare ges sällan tillräckligt tydliga utslag vid läckage. Det finns också nya metoder med spektrofotometri som har visat goda potential, men som ännu inte har blivit allmänt använt.



Figur 3.5.

En beskrivning av ett fiberbrott. Vatten läcker ut ur den trasiga fibern, och vid högre tryck kan en stor del av flödet passerat ofiltrerat [14].

Fiberbrott behöver inte vara fullständigt såsom på bilden. Andra typer av fiberbrott är en spricka eller en uttöjning av en fiber, som orsakar läckage.

Ett annat alternativ att göra online är så kallade stresstest på membranen. Då tillsätts en typ av liten, inert partikel eller en ofarlig bakteriofag, varefter koncentrationen i permeatet mäts. På så sätt ges tydligare genomslag vid läckage. Det är dock en manuell metod som inte ger tydligare resultat än de direkta metoderna, men kan vara ett alternativ för de som inte kan testas genom luftintegritetstest, och kan göras med modulerna på plats i processen.

Oavsett om en indirekt metod används eller inte, är det rekommenderat att i processen inkludera ett direkt integritetstest om det är möjligt för modultypen. Det är det allra bästa sättet att försäkra att membransteget fungerar som det ska. Indirekta metoder kan i dagsläget främst användas som ett komplement. Om en indirekt metod används kan det vara värt att hitta en som kan användas för styrning av processen – värden som även kan användas för ex. dosering av fällningskemikalien eller för att anpassa flux och tvättintervall. Turbiditet före och efter membranet kan vara en sådan metod, eller någon form av uppföljning av färg och absorbans kan ge information både om integriteten hos membranet samt hur effektiv processen är.

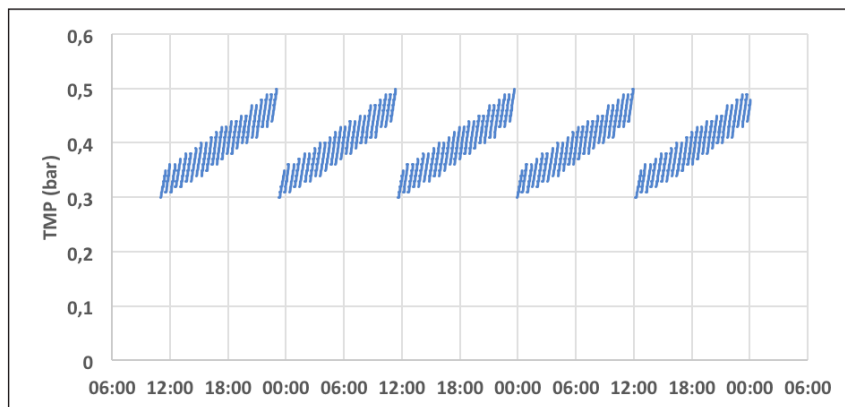
Beläggningar och tryckutveckling

Beläggningar på membranytan är ett av de huvudsakliga bekymren i en membranprocess. Mycket forskning fokuserar på att identifiera varför membran beläggs, vilken typ av ämnen som orsakar den och inte minst hur den kan undvikas eller motverkas. Beläggningar på ytan ökar motståndet för vattnet att passera genom membranet, vilket i sin tur ökar energikostnaden för trycksättning genom pumpning. För användare av omvänd osmos är det därför väldigt viktigt att minimera beläggningen, men det är inte oviktigt för användare av ultrafilter. De lägre trycken gör att energikostnaderna inte behöver skena iväg, men beläggningarna har även andra nackdelar.

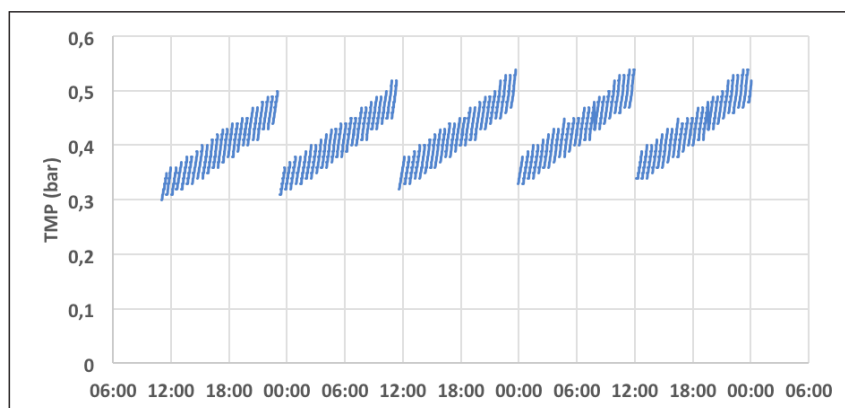
Ett problem är att det kan förkorta ett membrans livslängd, som i normalfallet ligger på 7–10 år för polymera membran. Med mer igensättning, som inte kan hanteras av den hydrauliska tvätten, behövs kemisk tvätt oftare. Kemikalierna i tvätten har liten effekt på membranets polymerer kortsiktigt, om instruktioner följs, men även de mest resistenta material bryts ner av frekvent tvätt. Igensättningar kan även leda till fler problem med läckande membran [15], och kan påverka avskiljningsgraden. Beläggningar på membranytan kan leda till att ytegenskaperna förändras, eller att matarflödet i och mellan enskilda moduler fördelas felaktigt, vilket påverkar dess förmåga som kemisk och mikrobiologisk barriär.

Beläggningar på ytan följs lättast genom någon parameter baserad på tryckskillnad mellan matarsida och permeatsida. Lättast är att följa upp transmembrantrycket (TMP), vilket är just den nämnda skillnaden, ofta uppgett i bar. För ett UF är det normalt att TMP ligger på ca 0,2–1 bar, men det beror på vilket membran som används, förbehandling och matarvattnet. TMP är temperaturberoende eftersom det beror på viskositeten (se Kapitel 2), och för att jämföra olika situationer eller olika processer

behöver TMP justeras till en gemensam temperatur som hanterar den ökade viskositeten med lägre temperatur. Exempel på tryckkurvor visas i Figur 3.6 (en bra anpassad process) och Figur 3.7 (som inte har tillräckligt tvättprogram).



Figur 3.6 Fiktiv tryckutvecklingskurva för ett UF med ett tvättprogram som fungerar bra. Sänkningen varje halvtimme är effekten från backspolning och återställningen ca 2 ggr per dygn är den kemiska tvätten. En riktig tryckkurva är sällan så stabil att den ser exakt likadan ut efter varje tvätt, som i detta exempel, men ska eftersträvas.



Figur 3.7 Fiktiv tryckutvecklingskurva för ett UF. Trycket återställs inte efter kemiska tvätten, och något behöver förbättras (tvätt oftare, lägre flux, annan kemikalie eller dylikt). Detta kan hända kortvarigt då matarvattnet förändras kemiskt (eller temperatur), men en långvarig förändring måste åtgärdas.

Andra alternativ till TMP för att detektera nedsmutsning av membranet är parametrarna resistans och permeabilitet. Dessa båda är, med en korrigerande faktor, varandras inverser och är därför likvärdiga. Resistansen kommer från den grundläggande ekvationen för membranflux, och uppger en grad av motstånd för vattnet att flöda igenom membranet. Vid rent vatten och rent membran är det möjligt att hitta det så kallade membranmotståndet, vilket är det absolut lägsta motståndet som just det membranet har. Detta motstånd ökar när en kaka byggs upp ovan membranytan och när andra typer av beläggningar fastnar på ytan och i porer. Den beräknas från TMP och temperatur, och går därför lätt att följa.

Ytterligare en anledning att följa dessa parametrar är att övervaka när livslängden börjar nå sitt slut. Trots att ett lågt motstånd, resistans, är ekonomiskt positivt bör en operatör också reagera då resistansen sjunker jämfört med tidigare år. Det kan bero på en förändring i råvattnet som ger mindre beläggningar, men det kan också beror på att de kemiska tvättarna har påverkar membranet och den har fått sämre retentionsförmåga, vilket indikerar att livslängden börjar nå sitt slut.

Avlopp och återanvändning av backspolning

En process som använder ett UF bildar huvudsakligen två typer av avloppsvatten. Den första typen är vatten från spolning och backspolning, medan den andra är från kemtvätten. Dessa båda typer av avlopp skapar därför två olika förutsättningar, och de kräver inte samma typ av hantering.

Avloppsvattnet efter spolning och backspolning är ett vatten där permeat, och ibland ofiltrerat vatten är blandat med de ämnen som har filtrerats bort av membranet. Det resulterande avloppsvattnet kan därför i praktiken anses vara ett koncentrerat råvatten eller motsvarande, med en hög koncentration av fällningskemikalie om en sådan används. Det är därmed ett ofarligt slam som kan gå till reningsverk, om ett närliggande verk har möjlighet att hantera det. Alternativt behövs en slamhanteringsprocess, med avvattning och bortforsling om inget annat alternativ finns. Används ingen fällningskemikalie kan vattnet i praktiken gå ut till naturen igen, men beslut om hanteringen görs i samråd med miljöansvarig på kommunen. Å andra sidan, en direkt kassering av detta avloppsvatten leder till en stor förlust av råvatten, och det kan uppgå till 10–15 % av inkommande vatten.

Beroende på vattenverkets placering i förhållande till vattenkällan, dess begränsning för uttag eller membranstegets placering i processen, kan det därför vara önskvärt att använda en större andel av det vatten som transporterats, eller att undvika kostnader för avloppsreningen av så stora mängder. Därför har vattenverk börjat inkludera sätt att återanvända spolavloppsvattnet. Ett smidigt sätt är att införa ett andra steg av UF, där det backspolade vattnet filtreras i en separat del av membranläggningen. Detta vatten har ofta sämre kemisk kvalitet, så de leds ofta tillbaka till inkommande vatten, men det sparar stora mängder – och förlusterna kan minskas till ca 2–3 % i en optimerad process. Avloppet efter backspolningen i det andra steget måste gå till avlopp, så liten förlust görs fortfarande.

Det andra avloppet, det som bildas i de kemiska tvättarna, behöver hanteras innan det går till reningsverk eller motsvarande. Det finns för detta avloppsvatten inget alternativ för återanvändning, men det går heller inte att skicka det direkt till reningsverk. För att inte förstöra ledningarna måste pH neutraliseras innan det pumpas vidare, liksom att de höga halterna av klor bör hanteras. Hur det görs mer exakt beror på vilka pH som används i tvätten. pH neutraliseras lättast genom justering av olika syror och baser. För att neutralisera kloreten kan natriumtiosulfat eller natrium-

bisulfit användas – dock måste den stå ventilerat då hälsofarlig klorgas bildas vid tillsats av de ämnena.

3.4 Exempel från Sverige och Skottland

Kvarnagården, Vivab¹

Hösten 2017 driftsattes ett totalrenoverat vattenverk, Kvarnagården, för dricksvattenförsörjningen i Varberg. Vattenverket hade efter lång tids förstudier designats som Sveriges första ultrafilterverk med förfällning. Tidigare bestod vattenverket av pH-justering, snabbfilter och klorering med kloramin. Förändrade förutsättning i råvattenkällan, sjön Neden (som blandas med ca 10 % grundvatten) hade under tidigare år gett försämrad dricksvattenkvalitet, med förändringar i färg och smak som konsumenterna hade reagerat på.

Verket har idag en maxkapacitet på 26 000 m³/dygn. Processen består av snabbfiltren, som behållits, följt av en tillsats av polyaluminiumklorid (PACl) innan ultrafiltren. Vattnet justeras sedan kemiskt och kloreras innan lågreservoarerna som sedan distribueras till konsumenterna. Dessutom finns ett andra steg av ultrafilter som filtrerar spolvattnet från första steget av ultrafilter. Permeatet återförs sedan till inkommande vatten för att på så sätt förbättra utbytet från processen.

Två olika membran används i processen. Det första steget är horisontella Xiga membran från Pentair X-flow, 336 moduler fördelade över 4 rack, med 4 moduler per tryckbehållare. Andra steget är från samma producent, av typen Aquaflex, 34 moduler fördelade över 2 rack. Båda stegen får plats på en yta om ca 350 m². Båda typerna av membran är hålfibermembran med en yta om 55 m² per modul, men Aquaflex är vertikal medan Xiga är en horisontell typ. På verket finns dessutom utrymme att öka kapaciteten med 15 % genom att sätta in fler moduler.

Första ultrafiltersteget körs med ett bruttoflux på 64,5 l/m² h och spolas och backspolas med 40 min mellanrum. Andra steget körs med ett bruttoflux på 44 l/m² h med samma backspolningsintervall. Det lägre fluxet beror på den högre belastningen, med betydligt högre turbiditet. Membrantvätten görs som två steg, ett surt steg med svavelsyra och ett alkaliskt steg med lut och natriumhypoklorit.

Inkommande vatten till processen har en koncentration av TOC på 2,3 mg/l i medel, men har varit så hög som 8,9 mg/l. Färg ligger i medel på 14 mg Pt/l. Vattnet är relativt mjukt och ligger strax under 2 °dH

Investeringskostnader för utbyggnaden av verket hamnade på 108 miljoner kronor, varav UF-entreprenaden kostade ca 44,5 miljoner. Årlig driftkostnad för membransteget beräknas uppgå till ca 1,9 miljoner per år.

Kungälv²

Under 2018 har ett nytt vattenverk i Kungälv driftsatts med en kapacitet på 26 000 m³/dygn, med en process som ska inkludera ett ultrafiltersteg.

¹ www.vivab.se

² www.kungalv.se

Råvattenkällan Götaälv har en varierande vattenkvalitet, och färgen varierar mellan 10 till 70 mg Pt/l, och turbiditeten mellan 3–50 FNU. Utsläpp från avloppsreningsverk uppströms medför höga halter av mikroorganismer. Processen har likheter med Kvarnagårdens nya process.

Det första som händer är en luftning av inkommande vatten. De passerar sedan snabbfilter med Filtralite, som också ska fungera som ett biologiskt filter med 30 min kontakttid. Därefter följer tillsats av fällningskemikalie och sedan filtreringen genom ultrafilter – samma typ som på Kvarnagården. Därefter följer aktivtkolfilter, en kontakttank med möjlighet för dosering av klor när det behövs en extra barriär samt UV-desinfektion. Även här filtreras spolvattnet från första membransteget i ett andra steg och återförs till inkommande vatten.

Investeringskostnaden beräknas till ca 270 miljoner för hela det nya verket, och driftkostnaden har uppskattats till 6 kr/m³ dricksvatten.

Erfarenheten från projektet visar att en liknande utbyggnad tar tid, och det har tagit 6 år från idé till driftsättningen. Första åren bör användas för att jämföra olika processalternativ, sedan rekommenderas ett års pilotstudie. Efter godkännande av en ny investering tar sedan byggnationen ett år, följt av en intrimning och optimering av processen under ett års tid.



Figur 3.8 Kungälvs nya vattenverk (foto tillhör Kungälvs kommun).

Lackarebäck³

Det första vattenverket i Sverige som i stor skala införde ultrafilter i sitt vattenverk var Lackarebäck vattenverk, som ägs och drivs av Göteborg kretslopp och vatten. Verket tar sitt råvatten från Götaälv och de såg ett behov för en extra mikrobiologisk barriär, som skulle klara avskiljning av virus. Det är idag den största ultrafilteranläggningen i Norden och finns bland de 20 största UF-anläggningarna i Europa. Maxkapaciteten på verket är 186 000 m³/h, vilket möts av 2 200 moduler med en membranarea på 40 m² i varje modul.

Ultrafiltren kommer från Pentair X-flow, och är av typen Xiga. De är vertikala hålfibermembran av PES. Tillbyggnationen började med en pilot-

³ www.goteborg.se

studie över flera års tid innan utformning, projektering och byggnation startade. Idag är anläggningen i drift och används som ett polerande steg innan slutgiltig justering. Innan ultrafiltret har vattnet renats med fällning (aluminiumsulfat) följt av sedimentering och filtrering genom aktivt kol. Därefter passerar vattnet ultrafiltren och kloreras för residualeffekt sedan med klor och klordioxid.

Backspolning sker en gång i timmen, och en kemisk tvätt (CEB) görs en gång om dagen. Ultrafiltren undersöks rutinmässigt med ett luftintegritetstest, som har visat att den kan hitta ett läckande fiber i praktiken. Avloppet från backspolningen går till dagvattennätet eftersom den håller likvärdig kvalitet.

Ett problem som har uppstått för Göteborg Kretslopp och vatten är bildandet av iskristaller. Vattnet i Götaälv kan ligga på en temperatur under 0 °C under vintern. Även om de låga temperaturerna påverkar membranens tryck är det inte ett problem i sig, utan det är igensättningen på grund av kristallerna som kan orsaka problem.

Scottish Water⁴

Scottish Water ansvarar för dricksvattenförsörjningen för de flesta invånarna i Skottland. De driver knappt 250 anläggningar, som förser både större tätorter och många mindre landsbygdsorter. Många typer av reningsprocesser används i de olika anläggningarna, men membran utgör en viktig del i nästan 100 av dem. De är främst i de större verken som Scottish Water har valt UF som alternativ, och även om de i antal utgör knappt 13 % av membranläggningarna, producerar de nästan 90 % av den totala volymen membranfiltrerat dricksvatten. Av dessa anläggningar använder 8 ett UF från Evoqua, och 4 UF från Pentair. Processerna exemplifieras nedan genom de två beskrivningar av anläggningar: Aviemore och Inverness.

Aviemore

På turistorten Aviemore i norra Skottland finns en ultrafilteranläggning med membramoduler från Evoqua. Vattnet kommer från borrhål på stranden av floden Spey – och första reningssteget är därför inducerad infiltration. Membranet är ett PVDF hålfibermembran, med riktning utifrån och in. Anläggningen producerar 9 000 m³ per dag. Valet av ett UF var för att säkerställa barriär mot *Cryptosporidium*. Använt flux ligger på 40 l/m² h. De backspolas var 4:e timme, och de har haft liten problem med beläggning. Kemisk tvätt styrs av TMP och genomförs då den har ökat till höga nivåer tvättas de med bas följt av syra.

Inverness plant

I anläggningen i Inverness används membran från Pentair X-flow, Xiga, ett horisontellt hålfibermembran, inifrån-ut, med porstorlek 20 nm (MWCO ca 150 kDa). Råvattnet kommer från sjön Ashie och filtreras genom ett filter på 80 µm. Därefter följer en tillsats av polyaluminiumklorid för att

⁴ www.scottishwater.co.uk

fälla på membranet. De använder ett flux på ca 70 l/m² h och har ett vattenutbyte på 98,5 %, vilket ger en total produktion på 38 Ml/dag. Det relativt höga utbytet beror på att backspolningsvattnet från huvudlinjen filtreras i ett andra steg av UF membran. Permeat från de båda stegen blandas för utgående vatten. Backspolningen från det andra steget går till avlopp tillsammans med avloppet från CEB, efter neutralisering.

Övriga Europa

Ultrafilter är en relativt vanlig metod som återfinns på ytvattenverk runtom Europa. Det finns flera stora verk i Tyskland och i Nederländerna. En del har valt att kombinera med direktfällning innan membranen, men andra alternativ finns också. I södra Europa, såsom Spanien, används UF i stor utsträckning som ett försteg innan omvänd-osmosfilter. Det används både för ytvattenrening och för avsaltning.

3.5 Membran på marknaden

Allt fler olika typer av membran designas. De blir allt mer specialiserade på olika utmaningar. Det finns därför utrymme för användare att välja olika typer. Nedan följer en lista på tillverkare. Med en snabbt utvecklande marknad är listan tänkt som en assistans och behöver uppdateras ofta för att hållas aktuell.

Tabell 3.2 En förteckning över tillgängliga moduler på marknaden som är vanliga inom dricksvattenrening. Notera att tabellen troligen inte är uttömmande då membranproducenterna blir allt fler.

Företag	Membran	Tillgängliga porstorlekar eller MWCO	Material och positionering	Hemsida
Asahi Kasei	UNA, hålfibermembran, utifrån-in	3-80 kDa	PAN, PS, vertikal	www.asahi-kasei.co.jp
Berghof Membranes	HyperFlux, tubmembran	30 nm, till 5 000 Da	PES eller PVDF	www.berghofmembranes.com
DuPont (tidigare DOW)	IPD, och SFD serierna, alla hålfibermembran, utifrån-in i tryckbehållare	30 nm	PVDF, vertikal	www.dow.com
	Dizzer L-serien (f.d. Inge), hålfibermembran med 7 kanaler, inifrån-ut	20 nm	PES, vertikal	
Hydra-nautics	HYDRAcap, hålfibermembran, inifrån-ut i tryckbehållare	20-25 nm	PES, vertikal	membranes.com
Koch	PURON HF, hålfibermembran, utifrån-in, kassetter/TARGA II, hålfibermembran, inifrån-ut i tryckbehållare	30 nm/TARGA saknar specifikation, men garanterar 4-log red för virus	PVDF (PURON HF) PES (TARGA II)	www.kochmembrane.com
Membrana (3M)	Liqui-Flux, hålfibermembran, inifrån-ut	80 kDa	PES, vertikal	www.membrana.com
Memcor, Evoqua	CP, XP, hålfibermembran, utifrån-in	40 nm	PVDF, vertikal	www.evoqua.com/en
Memtech	AMT-UF-50F och 100F plattmembran	50 kDa resp. 100 kDa	PS	memtech-water.com
Microdyn-Nadir	Aquadyn, hålfibermembran, utifrån-in eller inifrån-ut;	25 nm (utifrån-in HF) 10 nm (inifrån-ut HF);	PAN eller PES (utifrån-in HF), cellulostriacetat (inifrån-ut HF);	www.microdyn-nadir.com eller www.oltremaremembrane.com
	Maxidyn, tubmembran	20 kDa- 150 kDa		
	Oltremare, hålfibermembran, utifrån-in eller inifrån-ut	(4 av Tub) 75 nm eller 45 kDa	PVDF eller PES (tubmembran) PVDF eller PE.	



Företag	Membran	Tillgängliga porstorlekar eller MWCO	Material och positionering	Hemsida
Mitsubishi	Sterapore, hålfibermembran, inifrån-ut, finns både som kassett och i tryckbehållare	30 nm eller 100 nm	PE (trycksatta) PVDF (nedsänkta)	www.m-chemical.co.jp/en
Nanostone	Segmenterat keramiskt kanalmembran	30 nm	Al ₂ O ₃	nanostone.com
Pall Water	Ultra60, utifrån-in	150 kDa (ca 20 nm)	PVDF Vertikal	www.pallwater.se
PCI membranes,	A, B och C serier, tubmembran	2-200 kDa	Täta i huvudsak av PES och mindre täta i PVDF, men finns olika varianter	www.pcimembranes.pl
Permionics	HFUF, ARUF, UFG, Spirallindade	5, 10, 30 and 50 kDa	PES	permionics.com
Suez	Aquasource: Hålfiber med 7 kanaler per fiber. Finns som inifrån-ut och utifrån-in, i tryckbehållare; ZeeWeed: Hålfibermembran, utifrån-in, finns både som kassetter (nedsänks i bassäng) eller i tryckbehållare	20-40 nm	PES (Inifrån-ut), PVDF (Utifrån-in), vertikal	www.aquasource-membrane.com
Toray	HFU/HFS series: Utifrån-in hålfibermembran, i tryckbehållare	20 nm	PVDF, vertikal	www.toraywater.com
X-flow, Pentair	Aquaflex och Xiga, hålfibermembran, inifrån-ut i tryckbehållare	20 nm	PES/PVP, vertikal (Aquaflex) och horisontell (Xiga)	xflow.pentair.com/en

4 Nanofilter och omvänd osmos

I korthet

- Nanofilter (NF) och omvänd-osmosfilter (RO) är mycket täta typer av filter som i mindre eller större utsträckning avskiljer joner. De är goda mikrobiologiska barriärer, och risken för brister i barriären beror i första hand på läckage mellan kopplingar, tätningar eller limmade sammanfogningar.
- NF och RO har därför många användningsområden. NF används i första hand vid avhärdning eller avskiljning av organiskt material. De kan även användas som kemisk barriär då tillräckligt täta NF reducerar t.ex. PFAS. Marknaden för RO är stor, och växer fortfarande, och det finns därför många olika tätheter att välja mellan. De används vid avskiljning av besvärliga joner (t.ex. bor), vid recirkulering av avloppsvatten och vid avsaltning.
- Modultyp för NF och RO för dricksvattenproduktion är oftast spirallindade.
- Stora vattenförluster görs ofta i processen (särskilt för RO), då en del av vattnet måste släppas som rejekt/koncentrat (en ström med allt avskilt material). Vattenförluster för RO-steget är ofta 30–60 % (det senare gäller avsaltning av havsvatten). För NF rör det sig oftare omkring 15–25 %.
- Eftersom membranen är så täta och kräver höga tryck behöver de förbehandling. Minimum förbehandling är att reducera det suspenderade materialet, och turbiditeten bör begränsas. De spirallindade modulerna är också svåra att hålla rena från organiskt material – och det finns risk för igenslamning samt för biologisk tillväxt i modulerna om inkommande mängd organiskt material är stor. Finns denna risk bör vattnet därför förbehandlas med organisk avskiljning.
- Ofta måste beläggningshämmare tillsättas före dessa membran för att förhindra oorganisk beläggning ("scaling"). Joner som kan orsaka beläggning är kalcium, magnesium, barium, strontium, karbonat och sulfat. Beläggningshämmare består av polymerer. Annat sätt att minska denna typ av beläggning är genom att sänka pH före membranet. Saltsyra kan behöva användas för det (eftersom sulfaten i svavelsyra orsakar beläggning) vilket kan medföra att det blir ett dyrt alternativ.
- Både investeringskostnad och driftkostnad kan vara höga vid användning av dessa täta membran.
- Spirallindade moduler tvättas ofta i så kallad CIP, d.v.s. de tas ur drift och tvättas med kemikalier som rekommenderats av leverantör. Det görs några gånger per år, utifrån behov.
- Alger är generellt ett problem för dessa membran då de producerar ämnen som sätter igen membranen. Finns risk för algblooming i råvattnet måste det finnas med i åtanke vid processutformningen.

Utvecklingen av membran-tekniken – material, konfigurationer och olika typer av förbehandlings- – har framförallt drivits av behovet av minskad energianvändning för avsaltning. Det är balansen mellan bra avsaltning och minimering av energiförluster som i många fall har medfört nya lösningar, varav tunnfilmsmembranet är en av de absolut största innovationerna. Genom att den aktiva membranytan kunde göras mycket tunn ovanpå ett starkt och mer poröst material, kunde ett lägre tryckbehov uppnås. Det totala motståndet för vattnet att flöda genom membranet minskade, samtidigt som förmågan att avskilja salt inte påverkades negativt. Efter det accelererade forskningen och användning av omvänd osmos industriellt. Fortsatt utveckling av olika sätt att forma membran, olika material och olika kemiska lösningar (som förbehandling eller för tvätt av membranen) har gjort att omvänd-osmosfilter (RO) har blivit den huvudsakliga tekniken som väljs för nya avsaltningsprocesser, och den har knappt in snabbt på de termiska metoderna – som fortfarande är vanliga när det finns spillvärme från en industri att tillgå.

Under utvecklingen av nya membran, bl.a. för att vinindustrin skulle kunna avskilja oönskade ämnen, dök en ny typ av membran upp som inte riktigt passade in som omvänd osmosmembran, eller som ultrafilter. Den tog partiellt bort joner och i stor utsträckning lösta ämnen, vilket hamnade mellan de två existerande typerna. Efter att de en tid kallats för lösa RO-membran introducerades begreppet nanofilter (NF). De två olika typerna känns framförallt igen på hur avskiljningen av ämnen beskrivs. Ultrafilters kapacitet för avskiljning uppges nästan alltid genom att mäta porstorlek (dock används även molekylär avskiljningsgrad, MWCO, parallellt), medan nanofilter framförallt definieras utifrån dess MWCO, då porstorlek inte kan bestämmas på samma sätt som för UF, och i viss utsträckning utifrån avskiljning av bivalenta joner. RO-membrans täthet uppges i reduktion av salthalt i procent, och det är generellt reduktionen av NaCl som uppges. Definitionen är inte strikt, och täta NF brukar också ha förteckning över saltreduktion i produktspecifikationen – och är ibland tillräcklig för avsaltning av bräckt vatten. Gränsen för att definieras som ett RO är att den ska ha en saltretention på minst 90 % [16]. Övergången mellan UF och NF är otydlig eftersom den överlappar runt MWCO på 1 000 Da (vilket kan sägas vara en porstorlek runt ca 1 nm, men det är inte exakt och används generellt inte som definition). Vissa av delarna i detta kapitel kan därför vara relevant för processer med täta UF.

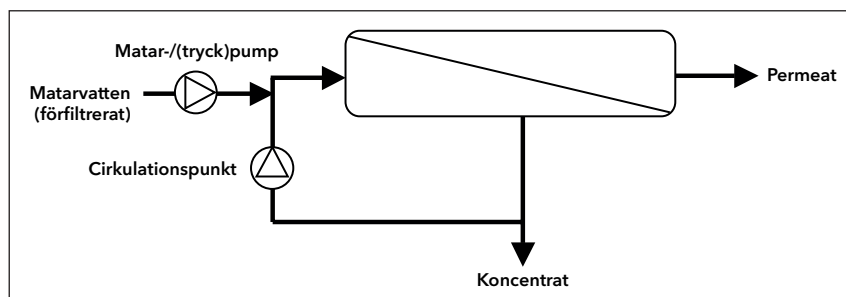
4.1 *Så fungerar det*

RO-membran och de flesta NF-membran har inga porer. Istället sker flödet av vatten i mellanrummen mellan sammanlänkade molekylkedjor (ofta polymerer) som utgör membranytan. Det gör att resistansen blir många gånger högre än för porösa membran för att uppnå filtration. Det gör också att beroende på hur kompakt eller löst kedjorna ligger och hur de är laddade så kan olika mängder av joner gå igenom, och saltavskiljningen varierar genom materialtillverkningen. För de mindre täta NF, som har porer, är hålen så pass små att det inte längre endast är en mekanisk

rening (vilket är den dominerande funktionen för UF, med undantag för de tätaste). Avskiljningen i så täta porer påverkas också av elektrofysiska krafter, både av lösta organiska ämnen, och inorganiska salter och joner. Därför är inte längre porstorleken intressant, utan avskiljningsgraden av olika typer av ämnen mäts av producenten och uppges som information.

RO-membran avskiljer alltså det mesta. Det finns några ovanliga ämnen som är opolära och fullständigt lösta som kan gå igenom. Det finns också väldigt många olika typer av RO, vilket innebär att i studier har vissa läkemedelsrester avskilts sämre än andra. Dessutom finns en viss risk, vid dåligt underhåll, att läckage sker p.g.a. av mindre defekter i membran-ytan eller otäta kopplingar, men det allra mesta reduceras. Det innebär att risken för algtoxiner, bekämpningsmedel och läkemedelsrester är minimal, för att inte tala om större föroreningar som mikroplaster. Det är därför vanligt att RO-membran används i laboratorium för att producera så kallat ultrarent vatten, vilket, namnet till trots, inte har något samband med ultrafilter. Huruvida NF avskiljer de här typerna av ämnen är inte helt klarlagt. De tätaste NF-membranen avskiljer nästan fullständigt lösta organiska ämnen och stor andel av salter i vattnet, så därför är det troligt att de här ämnena inte går igenom. Tätare NF har visats reducera ex. PFAS, även den minsta typen⁴. Det är ännu inte klarlagt vid vilken MWCO som föroreningarna helt eller delvis avskiljs. Eftersom avskiljningen av specifika ämnen beror på hur ett ämne är format (avlångt eller förgrenat) och vilken laddning det har går det inte att enbart utgå ifrån dess vikt och jämföra mot MWCO, utan i osäkra fall måste reduktionen av enskilda ämnen studeras.

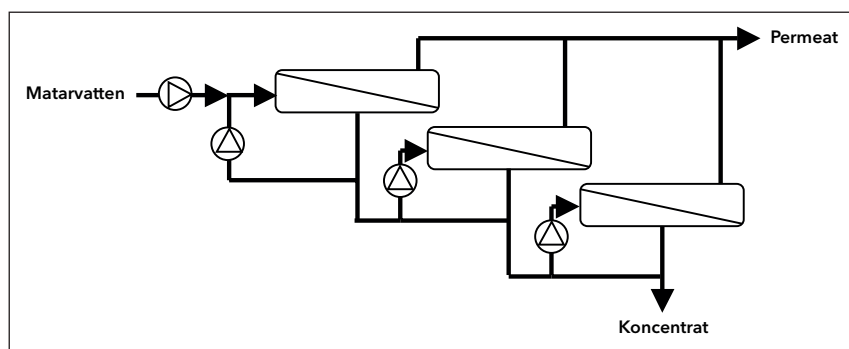
Eftersom trycken är höga och avskiljningen stor för NF och RO byggs en koncentrationspolarisation upp (se Kapitel 2). Det skapar ytterligare ett motstånd mot filtrationen. Det beror delvis på att det blir "tjockare" vid ytan, och att de packade ämnen är i vägen. Motståndet mot filtration beror för RO minst lika mycket på det osmotiska trycket, när en saltkoncentration byggs upp ovan membranytan. Högre saltkoncentration skapar ett högre osmotiskt tryck från permeatsidan som måste övervinnas av tryck på matarsidan. Därför används tvärströmsflöden, med ett högre flöde genom modulen än produktionsflödet.



Figur 4.1 En membranprocess med intern cirkulation.

Tvärströmsflödet uppfyller två funktioner. Den ena är att skapa en rörelse ovan membranytan för att färre ämnen ska tryckas mot dess yta, och istäl-

let följer de med flödet. Det andra är att tappa av en del eller hela mängden av det avskilda och koncentrerade materialet. Beroende på hur tätt membranet är kan antingen tvärströmsflödet delvis återcirkuleras (intern cirkulering) och blandas med inkommande vatten från tidigare processteg (vanligt för NF, se Figur 4.1), eller så går hela koncentratströmmen till avlopp (vanligt vid avsättning). Även för den återcirkulerande strömmen går delar till avlopp. Koncentratet kan passera flera efterföljande membranmoduler innan det går till avlopp för att minska vattenförlusten. Hur stor andel som ska gå till avloppet, eller hur många moduler som kan passeras utan att få oönskad försämring av vattenkvalitet bör utredas i förväg för bästa optimering.



Figur 4.2 Exempel på flerstegslösning med intern cirkulation.
Det är en vanligare utformning för NF och täta UF än för RO.

RO och NF har generellt ett stort behov av bra förbehandling av matarvattnet. Minimum krav för ett löst NF är ett partikelfilter, men tätare NF och, ännu viktigare RO, kräver förbehandling. Förbehandlingarna syftar till att minska belägningsproblemen, (se Kapitel 2). För de allra flesta processer kan det organiska materialet i matarvatten skapa problem (undantaget är jonavskiljning ur ej ytvattenpåverkat grundvatten). Det är därför ofta väsentligt att innehållet av organiskt material i matarvattnet kontrolleras, och ofta bör det avskiljas innan filtreringen genom NF eller RO. Allra störst problem tycks proteiner och andra typer av långa biopolymerer ha. Deras längd och svaga laddning skapar en bindning till molekylerna i membranytan, vilket gör dem svåra att tvätta bort, även med kemikalier. Dessutom kan det påverka membranets egenskaper och leda till ytterligare beläggning av andra ämnen.

Energikostnaden för att möta tryckbehovet är i relation till andra vattenreningsprocesser hög för NF- och RO-processer. I havsvatten är det osmotiska trycket ca 28 bar (3 % salt), och därför kräver avsättning av havsvatten tryck runt 60 bar, för att överkomma det samt membranets resistens. För bräckt vatten krävs lägre tryck. I Östersjön är det osmotiska trycket knappt en tredjedel av havsvattnets (beroende på plats), och dessutom krävs mindre täta membran eftersom lägre saltreduktion ska uppnås. Därför är bräckt vatten mindre energikrävande att avsalta, väldigt förenklat uppskattat som i proportion till salthalten (men ej en exakt korrelation).

Andra typer av rening med NF och RO är därför inte heller lika energikrävande. Rening av avloppsvatten genom RO-membran kräver runt 10 bar, och för NF, beroende på typ av membran som väljs, krävs tryck i storleksordning 5–10 bar.

Typer av moduler

Spirallindade moduler är den dominerande typen av modul för RO- och NF-membran. Modulerna placeras i tryckrör, ofta fler i samma rör med kopplingar emellan. Trots deras stabilitet är det inte möjligt att backspola dem då stort tryck och flöde i motsatt riktning förstör membranen. De kan därför endast spolas med högt flöde och tvättas med kemikalier som materialet klarar av. Distansnäten skapar extra hydraulisk turbiditet på matarsidan, vilket är bra för att minska koncentrationspolarisationen, men ökar risken för att partiklar i matarvattnet har sönder membranytan. Det medför att spirallindade moduler kräver en bra förbehandling mot partiklar.

Hålfibermoduler var vanligare förr, men finns fortfarande som alternativ för RO, och mer nyligen för NF. En hålfibermodul är ett tunt rör på ca 1 mm, med en kanal i mitten, och filtreringen sker genom väggarna. Eftersom trycken är höga är fibrerna placerade i en tryckbehållare. I en variant av RO har fibrerna båda öppningarna riktade åt samma håll och därmed ligger fibrerna som en ögla i andra änden av behållaren. Vanligare idag är de som ser ut som ultrafiltren av hålfibertyp – med en ände i varje ända. Öppningarna är ingjutna i tryckbehållarens ände/-ar, och därför hålls den rena strömmen separat från den ofiltrerade. Hålfibermoduler kan backspolas, vilket de ovan nämnda typerna inte klarar. Nackdelen är att för att klara de höga trycken som behövs vid RO, behöver de tunna fibrerna ha tjocka väggar. Det gör att kanalen i mitten blir smal vilket kan skapa problem med tryckfall över fibrerna och skapa en ojämn belastning på dem [17].

Det finns även så kallade tubmoduler för RO och NF, och keramiska moduler är ofta tubmoduler. De är hållbarare än hålfibermoduler, och i vissa utföranden är de lätta att hålla hygieniska och de kan klara svårare kvalitet på matarvattnet. Samtidigt är packningstätheten låg och det är därför ofta ett dyrare alternativ än hålfibermoduler eller spirallindade moduler.

De olika modulerna har utformats för att möta olika typer av behov, såsom kostnad i produktion, packningstäthet, samt stabilitet och hygien vid användning. RO-membran för avsaltning behöver bra fysisk stöttning då trycken som krävs blir mycket höga, särskilt för havsvatten. För det har spirallindade modulerna en stor fördel, då deras utformning ger bra stabilitet med hjälp av distansnäten. Plattmoduler har liknande fördelar, men deras packningstäthet är generellt mycket låg. Hålfibermoduler har generellt den absolut största packningstätheten, men de saknar den stabilitet som kan uppnås med de andra. Tubmoduler klarar generellt högre belastning med avseende på partiklar i vattnet, men har låg packningstäthet.

Processens utformning

Utformningen anpassas till vilken applikation som en RO- eller NF-process är avsedd för. Alla lösningar kräver någon form av förbehandling för att reducera partiklar och igensättande ämnen. Eftersom dessa täta membran medför en reduktion av små molekyler eller joner kan många av dessa ämnen ställa till med problem genom igensättning och beläggning (se Beläggningar nedan). Det är därför inte ovanligt att nanofilter sitter sent i en reningsprocess, och RO förses ofta med ett förbehandlingssteg med UF, även om andra typer av rening förekommer. Ett partikelfilter krävs före ett NF eller RO eftersom de höga trycken och flödena kan medföra att partiklar i vattnet orsakar skador på membranen. Avhärdning innan ett RO görs ibland med jonbytare, för att minska risken för kristallisering och utfällning av kalcium på membranyta, om det har ansetts ekonomiskt.

Ett NF eller RO som används för grundvatten, vilket ofta är avhärdning eller reduktion av för höga koncentrationer av t.ex. fluor, behöver en relativt liten förbehandling. Vid avhärdning med membran behöver inte pH höjas, vilket sparar kemikalier. Å andra sidan kan pH behöva sänkas eftersom det skapar en mindre risk för beläggning av kalcium på membranytan. Lägre pH gör att en mindre ansamling av joner sker på membranytan, men kan även medföra en viss försämring av reduktionsförmågan av kalcium och magnesium. För att minska problem med beläggning är det möjligt att dosera en beläggningshämmare som interagerar med kalcium i vattnet och minskar risken för beständiga utfällningar på membranet. I skrivandets stund finns fyra godkända varianter på beläggningshämmare för RO och NF, och de finns att hitta i SLVFS 2001:30, bilaga 1 (enligt förändringar från LIVSFS 2017:2).

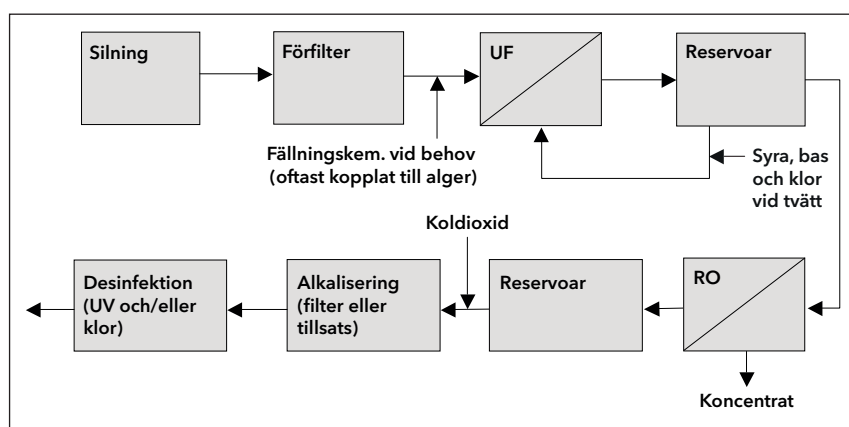
Mangan och järn i vattnet kan också orsaka problem med beläggning. Dessa ämnen kan falla ut på membranytan och skapa irreversibla beläggningar som är svår att få bort även med starka syror. Om där finns mangan och järn i vattnet är det ännu viktigare att göra pilotförsök. I en sådan studie kan behov av tillsats av kaliumpermanganat för oxidering kontrolleras. För en välfungerande process kan doseringen göras t.ex. före ett förbehandlande UF, som därmed kan användas som filter för de oxiderade metallerna. Det finns dock beläggningshämmare som även förbättrar beläggningen av järn – medan andra beläggningshämmare kan försvåra (se Beläggningar nedan).

Fritt klor i vattnet är negativt för alla polymera membranmaterial, då det orsakar en gradvis nedbrytning av membranets polymerer. Det gäller i första hand polyamidmembran, men även de mer klorresistenta materialen bryts ner men långsammare, och därför påverkas de negativt av en långvarig exponering. Fritt klor kan behandlas genom tillsats av natriummetabisulfit som reagerar med det fria klorret. Ett annat alternativ är filtrering genom aktivt kol. Problemet är framförallt förekommande vid rening av lakvatten, och är sällan aktuellt för dricksvattenproduktion. Det är dock bra att ha det i åtanke då ingen klorering bör göras av vattnet före ett membran utan möjlighet till reduktion innan filtreringen.



Figur 4.3
RO på Mörbylångas vattenverk
(för avsaltning och recirkulering)

Vid ytvattenrening och vid avsaltning är det organiska kolet, för avsaltning framförallt ämnen från alger, viktiga att ha kontroll på då de orsakar olika typer av beläggningar och igensättningar. Eftersom de flesta NF och RO är spirallindade membran bidrar organiskt kol till problemet med tillväxt på distansnät. Används NF med fokus på reduktion av organiskt kol är det möjligt att hantera det genom spol- och tvättfrekvensen. Fördelen med NF eller RO jämfört med UF är att de små porerna, de som överhuvudtaget har några, inte kommer i kontakt med organiska ämnen i samma utsträckning. De flesta ämnen kan ta sig in i porer på ett UF, med risk för att där fastna på porväggarna, medan i ett NF eller RO sker kontakten endast på membranytan. Nackdelen är den stora ansamlingen på yta, och de höga trycken kan i de värsta fall orsaka bindningar mellan membranet och de lösta ämnena. Det motverkas genom tvärströmsflödet, men det är ofta inte tillräckligt. De långa biopolymerer som alger producerar kan vara "klistriga", d.v.s. de kan binda till membranytan och därför vara svåra att tvätta bort. Den totala halten behöver därför inte vara så hög för att organiska ämnen ska orsaka problem med beläggning, t.ex. vid avsaltning. Förbehandling med ultrafilter, ofta med en tillsats av fällningskemikalie vid behov, är ett bra sätt att motverka den risken, och är den vanligaste förbehandlingen globalt före ett NF eller RO. Givetvis går alla typer av reduktion av organiskt material bra, såsom fällning/sedimentering, snabbsandfilter o.s.v., bara förbehandlingen klarar de krav som ställs för det specifika membranet (ofta benämnd silt density index, SDI, se nedan).



Figur 4.4 Ett typiskt processchema för avsaltningsanläggningar. Ett verk för recirkulering som bygger på RO utformas på liknande sätt men med fler steg.

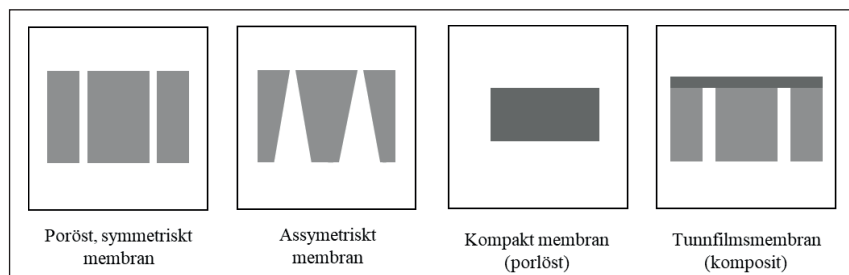
Skulle behov uppstå att desinficera vatten innan ett membran, t.ex. om det är nödvändigt att hämma tillväxt, bör det göras med försiktighet. För att undvika hög koncentration av fritt klor är kloramin att föredra, men även då kan ex. tillsats av bisulfid behövas för att garantera att inget fritt klor förekommer. Ozonering innan membran av polymer är inte rekommenderat då radikaler som skapas av ozonering är nedbrytande och förstör membran. Dessutom slås det organiska materialet sönder till mindre ämnen – vilket minskar reduktionen och samtidigt gör det mer biologiskt tillgängligt – vilket gynnar oönskad tillväxt i membranmodulen.

4.2 Material

Utvecklingen av RO membran har pågått under många decennier, och därför finns idag olika material var popularitet har varierat över tid. En del av de material som har framkommit har inte varit möjliga att kommersialisera, eftersom ett konkurrensmässigt alternativ behöver möta många olika kriterier. Ett bra RO ska ha hög saltretention samtidigt som den ska klara ett brett spann på pH och mer eller mindre aggressiva joner. Eftersom RO är mycket energikrävande att ha i drift är det även önskvärt att tryckbehovet för att få igenom vattnet minimeras. Dessutom ska materialet hålla sin ursprungliga form under många år och inte kompakteras eller svälla under drift. Utöver det måste givetvis tillverkningskostnaden hållas nere, och produktionen bör därför vara relativt lätt att genomföra i stor skala.

Historiskt var den första typen av RO som utvecklades gjorda i cellulosacetat (CA). Det finns fortfarande alternativ på marknaden gjorda i CA, till stor del för att de har en högre tolerans mot klor. Samtidigt kan sådana membran kompakteras av de höga trycken de utsätts för i drift, vilket minskar en redan relativt låg permeabilitet ytterligare.

Sedan 1980-talet har polyamid (PA) dominerat som material i den aktiva membranytan i RO. Vid denna tid började en tillverkningsmetod användas för ett membran med bra saltretention samtidigt som flödet genom membranet förbättrades jämfört med CA. Det var så kallade tunnfilmsmembran (se Figur 4.5). Tillsammans med en möjlighet att klara ett relativt brett spann av pH gav dessa egenskaper ett bra material för RO-membran. Som stabiliserande material, under membranytan, finns ett mer poröst skikt, ofta gjort av polyetersulfon, polysulfon eller liknande, som klarar högre tryck och ofta mer tåliga mot kemikalier.



Figur 4.5 Olika utformning av membran och dess stödstruktur.

Det finns idag några typer av RO och NF som är gjorda i de klortåligare sulfonerad polyetersulfon eller polysulfon. Det finns både som spirallindade och som hålfibermembran. Utbudet är dock fortfarande ganska begränsat med andra material än cellulosacetat eller polyamid för tätare membran.

En relativt ny form av tunnfilmsmembran är en konstruerad av polymerer men med nanopartiklar ingjutna för att öka permeabiliteten utan att minska retentionen. Partiklarna kan vara gjorda av nanotuber, zeoliter eller metalloxider. Detta är fortfarande under utvecklingsfas, men det är en

vidareutveckling som ger en möjlighet att förbättra energianvändningen av täta membran [18].

Det finns även keramiska membran med NF-täthet. De är ännu inte så vanliga och svåra att få tag på på den europeiska marknaden. De är dyrare, både för att varje enhet är dyrare och för att de har en lägre packningsgrad än polymera moduler (d.v.s. polymera membran som är spirallindade eller av hålfibertyp). Keramiska membran är använda inom annan typ av produktion, såsom livsmedelsindustri och kemikalieindustri. Det finns dock ett växande antal alternativ för dricksvatten, men de är i Europa ovanliga inom vår sektor.

Vilket alternativ som är bäst beror på situation och önskemål. Polyamid membranerna är fortfarande vanligast och det finns därför mycket erfarenhet från användningen av dem, både för NF och RO, men andra alternativ är växande.

4.3 Processens delar

Tvätt

Det är i allmänhet svårare att tvätta spirallindade membran än hålfiber-membran, vilket medför att det blir ännu viktigare att minimera tvättbe-hovet. Spirallindade membran kan inte backspolas, vilket förstör mem-branen, och därför består den "hydrauliska tvätten" av att de spolas de på matarsidan. Spolningarna kan styras på tid eller på trycknivåer, och det anpassas till det driftsmässiga behovet på plats. Hur ofta spolningen sker beror även det på belastning, spolningar kan göras med alltifrån en eller ett par timmars mellanrum, till att göras med flera dagars mellanrum. Det mer frekventa alternativet kan användas för att hålla nere energian-vändningen i och med att membranytan hålls relativt ren. I motsats är det möjligt att välja att inte tvätta lika ofta, ifall ett bättre utbyte är viktigt. Det ger ökad membranmotstånd på grund av beläggningar, men sparar på stopp och start (som kräver acceleration av tvärströmsflödet) och ger större andel tid för membranerna i drift.

Membranerna kan spolas med antingen permeat eller matarvatten. Det beror på situationen och sammansättning i matarvatten eller permeat. Det är mer ekonomiskt att spola med matarvatten, men vid stor belastning av ex. organiskt material kan det vara rekommenderat med permeat.

Det är möjligt att tvätta spirallindade membran kemiskt, men många material som RO är gjorda av är känsliga mot högt pH eller höga klor-halter. Den vanligaste, polyamid, bör inte tvättas med klor alls. Ofta tillämpas cleaning in place (CIP) som metod för tvätt av nanofilter och omvänd osmosmembran. Under detta program blandas aktuell kemikalie in i permeat (eller annat renvatten) som sedan matas in i modulerna. Efter det får membranerna stå en stund i kemikalieblandningen (1–2 timmar eller mer) för att sedan spolas. Det går också att välja att värma vid rengöringen för ännu bättre effekt. Vilket som väljs är ofta sammankopplat med vilka rekommendationer och garantier som leverantörer av membran lämnar, och påverkas i slutänden ofta av dem.

Kemiska tvättar delas upp i två olika typer: alkalisk tvätt (høgt pH) eller sur tvätt (låg pH). Den sura tvätten är ofta lämplig för tvätt av NF och RO då den lösgör metaller som belagt membranytan. Kalciumjoner i vattnet påverkar särskilt NF-processer som används för jonavskiljning och avhärdning, men är ofta också ett problem vid avsättning. De membran som klarar det bör också regelbundet tvättas med høgt pH, då de lösgör organiskt material och ger en reduktion av biofilm (som består av bakterier och långa, organiska kedjor). Om inget annat uppges av membranproducenten ska klor undvikas. Tvättas membranet med klor är det viktigt att pH hålls över neutralt, och gärna ännu høgre, då klore blir mer aggressivt gentemot membranet vid neutrala och låga pH, och membranet kan försämrast fort av felaktiga tvättar.

Det går bra att tvätta med vanliga syror, och citronsyra, saltsyra eller svavelsyra är ofta använt. pH-højande är nästan uteslutande natriumhydroxid. Även etylendiamintetraättisyra (EDTA) och natriumdodecylsulfat (SDS) är vanliga bland tvättrekommendationer från producenter. En annan typ är kombinerade kemikaliemixar som ofta har tagits fram för att rengöra specifika membran. De kombinerar olika typer av kemikalier (syror och baser) för att få bästa effekt. Det är vanligare att använda denna typ av tvättkemikalier för NF och RO än vad det är för UF. Dock är de inte alltid ett bättre alternativ än oblandade syror eller baser. Vid en pilotstudie är det bra att testa olika metoder, särskilt om leverantøren har flera olika godkända tvättkemikalier. Ibland kan det vara värt att prova tvättkemikalier som inte har rekommenderats av membranproducenten i en pilotstudie, men det görs då utanför garantier. Det är aldrig rekommenderat att testa en ny tvättkemikalie i fullskala utan rekommendation från leverantör då det riskerar både garantier och konsumenters hälsa.

Integritetstest

För att garantera att membran inte har minskat i avskiljningsförmåga behöver dess integritet testas, vilket är ett begrepp för att reduktionen är som förväntat. Integriteten för spirallindade moduler testas ofta av producerade membran innan de levereras, men det är svårt att testa dem på plats i processen. Till skillnad mot hålfibermembran är det främst indirekta metoder som kan användas – vilken visar om reduktionen är som förväntad (alternativ specifikt för hålfibermembran finns beskrivet i Kapitel 3).

För NF och RO är det absolut vanligast att bevaka konduktiviteten online, då den reduceras över membranet. Det är en enkel metod, men den är inte helt säker. Andra parametrar som kan användas online är TOC, turbiditet eller partikelhalt (partikelräknare). Beroende på hur många moduler som bevakas med samma mätare och hur høg koncentrationen är i matarvattnet kan även dessa parametrar vara osäkra, men det är ändå viktigt att ha någon form av bevakning av membranens reduktion. Ju färre moduler, desto viktigare är det då ett läckande membran har större inverkan på det producerade vattnet, vilket å andra sidan gör det lättare att upptäcka med dessa metoder. Regelbunden provtagning kan också användas för bevakning, men det kan ta lång tid att upptäcka fel, t.ex. sker en fördrøjning då ovanliga värden uppmätts (oftast är en økad koncentration i permeat

viktig att notera), vilket ofta helst bekräftas av kommande provtagning för att se om det endast var tillfälligt. Givetvis är det alltid viktigt att följa upp funktion genom provtagning, även när mätare finns online.

För att komma ifrån osäkerheten i dessa metoder går det att använda en regelbunden stresstestning av membranen. Det innebär att ett ämne tillsätts i matarvattnet och reduktionen över membranen mäts med ex. partikelräknare. Ämnet som tillsätts måste givetvis vara inert och ofarligt. Vanligt internationellt är att använda MS2-bakteriofager som har samma storlek som många mänskliga virus men som är ofarliga för människor. Det krävs dock manuellt arbete för att genomföra denna metod, och permeat brukar få gå till avlopp.

Om spirallindade membran börjar visa tecken på läckage är det i första hand kopplingar mellan de olika membranmoduler i samma tryckrör som bör kontrolleras då de har kortare livslängd än vad membran förväntas ha. Det är först när alla andra orsaker till läckage kan uteslutas som det är rimligt att byta ut själva membranmodulerna, då de inte går att åtgärda ett läckande spirallindat membran. Det kan vara svårt att hitta vilken modul som orsakar problemen och flera moduler kan behöva bytas samtidigt. Genom bevakning av ett begränsat antal moduler kan det vara lättare att hitta rätt, men många gånger är det inte värt kostnaden för mätare eller arbetsinsats för att ringa in rätt modul.

Beläggningar

För nanofilter och omvänd-osmosfilter används mycket höga tryck. Då finns det stor risk för problem med beläggningar. Ansamlingen av joner och molekyler genom koncentrationspolarisationen (se Kapitel 2) ovan membranytan leder till större risker, både från organiska och oorganiska ämnen.

Det höga flödet genom membranet skapar en ansamling av organiskt material på ytan. Det kan skapa en mer eller mindre kompakt ”kaka” som ger ett större motstånd för vidare filtrering. Det största, långsiktiga problemet med beläggningar är dessutom biologisk tillväxt, som kan vara svår att tvätta bort från distansnäten i spirallindade membran, då biofilmer ofta är väldigt ”klibbiga”. Det är därför viktigt att vattnet förbehandlas innan det matas till nanofilter och omvänd-osmosfilter. Det är generellt lättare att få bort bakterier och andra mikroorganismer i en förbehandling än att avskilja de molekyler som förser dem med näring, eftersom små molekyler ofta är mer biotillgängliga för mikroorganismer. Därför behöver membran tvättas med biocider för att motverka uppbyggandet. Eftersom fritt klor också är skadligt för membranet kan det vara svårt att hitta ett effektivt alternativ och det är därför viktigt att ha en bra förbehandling.

Oorganisk beläggning, så kallad ”scaling”, uppstår när ämnen som övermättas i den höga koncentrationen i matarvattnet bildar kristaller. Kristallerna ansamlas på membranytan och bygger upp ett motstånd för filtrering. De vanligaste ämnens om orsakar problem med oorganisk beläggning är [19]:

1. Kalciumkarbonat (CaCO_3)
2. Kalciumsulfat (CaSO_4)
3. Strontiumsulfat (SrSO_4)
4. Bariumsulfat (BaSO_4)

Några mindre vanliga ämnen är:

1. Kalciumfosfat [$\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$]
2. Kalciumfluorid (CaF_2)

Utfällningar och oorganisk beläggning kan därför ofta motverkas genom att använda ett lägre pH vid filtrering, för att göra katjonerna mer lösliga. Ofta användas dessutom beläggningshämmare (i dagligt tal kallat för det engelska ordet antiscalant). Kemikalierna är ofta gjorda av akrylbaserade ämnen, och de fyra produkter (tre för nanofilter) som i skrivandets stund är godkänd för svensk dricksvattenproduktion innehåller alla det ämnet. Polymeren förhindrar kristalliseringen av de oorganiska ämnena genom att själv bilda kristaller med dem, som sedan inte växer till. Det gör kristallerna mindre och förhindrar dem från att fällas ut från vattenfasen [20]. De förhindrar inte kristalliseringen fullständigt, men det förlänger tiden innan membranet behöver tvättas med en syra. Polyakrylsyra kan skapa problem med järnbeläggning om koncentrationen är hög i vattnet, t.ex. om järn har använts för fällning tidigare i processen. Av de fyra typerna finns det dock varianter som är bättre i de situationerna, och är gjorda för att förhindra beläggning av järn. Akrylsyra är nedbrytbart i naturen, men långa polymerkedjor kan ta lång tid att bryta ner fullständigt [21]. Det anses internationellt att det går att släppa det med koncentratet.

Avlopp och rejekt

En process med nanofilter eller omvänd osmos innebär alltid olika typer av avloppsvatten. Precis som för ultrafilter uppstår en kemisk ström som kan behöva tas om hand på ett bra sätt. I den kemiska avloppsströmmen är ofta pH antingen surt eller basiskt, beroende på hur det har tvättats. Därför behövs lokalt en anläggning som kan neutralisera tvättavloppsvattnet. Det kan enklast göras i samma tank som används för att tillsätta kemikalier innan tvätt. I de fall då klor används för tvätt behöver den också neutraliseras. Ett sätt att göra det på är att tillsätta natriumtiosulfat eller natriumbisulfid. Det är dock viktigt att ventilationen är god då giftig klorgas uppstår av reaktionen. Avloppet kan därefter gå till avloppsreningsverk.

Om membranet spolas är det ett relativt inert avloppsvatten och innehåller normalt inga farliga ämnen. Hur det kan släppas ut eller tas om hand måste diskuteras med miljöansvarig på kommunen. Det är sällan intressant för avloppsreningsverk att ta emot spolvattnet.

En tredje typ som uppstår när ett tvärströmflöde används är det som kallas för rejekt, eller koncentrat. För nanofilter som används för reduktion av organiskt material är rejektet relativt ofarligt. Ofta är det endast en högre koncentration av de ämnen som förekommer naturligt i vattnet. Det behöver släppas ut på ett sätt som inte påverkar ekologin, men innehåller normalt inga miljöskadliga ämnen. Rejektet från avsaltning är däremot

annorlunda. Det kallas lake och innehåller en hög koncentration av salt som, om det släpps ut direkt till havet, i vissa fall är så hög att den har svårt att blandas med omkringliggande vattenmassa. Det finns exempel från olika delar av världen där sådan lake har ansamlats på botten i närheten av utsläppspunkten, vilket har påverkat ekosystemet. Det enklaste sättet för att slippa det problemet är att blanda vattnet med utgående renat avloppsvatten från ett närliggande avloppsreningsverk. Finns inte det som alternativ är det lämpligt att titta på om utsläppet kan göras turbulent, med snabb inblandning i den mottaganden vattenmassan. En annan typ av rejekt som kan anses vara miljöskadligt är när nanofilter har använts för ex. rening av PFAS, eller om tätare membran är använts för recirkulering. Rejektet kommer då att ha höga halter av PFAS eller läkemedelsrester, och kan behöva genomgå ytterligare en avancerad rening innan det kan släppas.

Silt Density Index, SDI

Ett sätt att utvärdera vilken typ av förbehandlingen som krävs innan pilotförsök görs är att mäta vattnets silt density index (SDI). Silt i det här sammanhanget ska översättas till "slam" och det är en metod för att undersöka risken för ett NF eller RO att slammas igen av ett visst vatten. Det genomförs genom att mäta tiden för vattnet att filtreras genom ett cellulosamembran, med tätheten 0,45 µm och ett tryck på 2 bar. SDI kan beräknas för 100 ml och 500 ml. Testet genomförs normalt under 15 min. När filtreringen startas genom ett rent cellulosamembran tas tiden för hur lång tid det tar att filtrera 100 ml respektive 500 ml. Tidtagningen upprepas efter 5, 10 eller 15 min. Alternativt görs upprepningen endast efter 15 min. SDI kan sedan beräknas genom ekvationen nedan, och det görs för 100 ml och 500 ml separat:

$$SDI = \frac{100 \left(1 - \frac{T_i}{T_f} \right)}{T_t}$$

T_i är tiden det tog att filtrera mängden vid start (100 ml eller 500 ml)

T_f är tiden det tog att filtrera samma mängd (100 ml eller 500 ml) efter tiden T_i har förflutit.

Det går därför att beräkna 6 stycken olika SDI efter ett test, om tidtagningen även görs efter 5 och 10 min. Ofta, när krav specificeras för vilket SDI ett vatten får ha som mest innan det filtreras, gäller det den som beräknas efter 15 min med ett prov på 500 ml, om inget annat anges. Testet kan ofta genomföras av membranleverantörer eller maskinentreprenörer om det behövs. Normalt är kravet för ett RO att SDI_{500} ska vara under 5, men det är generellt önskvärt att den ligger under 3.

4.4 Exempel från Sverige och utomlands

Öland

Efter några år med stor vattenbrist har båda kommunerna på Öland valt att bygga nya vattenverk för att säkra vattenförsörjningen. Borgholm⁵ var först med ett avsaltningsverk i Sandvik som avsaltar vatten från Östersjön. Det har en produktionskapacitet på 3 000 m³/dygn och togs i drift 2017. Efter intagsledningen silas vattnet och sedan görs en förbehandling genom ultrafilter, med tillsats av fällningskemikalie innan för att kunna reducera alger, små partiklar och organiskt material. Efter omvänd-osmosfilter tillsätts koldioxid och vattnet passerar alkaliska filter, varefter vattnet desinficeras med UV. Kostnad för vattenverket blev ca 85 miljoner kronor, och den rörliga produktionskostnaden beräknades till ca 5 kronor/m³.

Mörbylånga kommun⁶ såg en möjlighet för bättre vattenhushållning genom att blanda två typer av vattenkällor i sitt nya vattenverk. En del av råvattnet till vattenverket kommer från Kalmarsund. Vattnet konstaterades ha för dålig kvalitet för att ta som råvatten direkt från sundet, så istället tas vattnet in genom inducerad infiltration av havsvatten i strandbrunnar. Den största andelen av vattnet som pumpas från brunnarna är därför havsvatten, men det är också en andel grundvattens som tas in. Vattnet innehåller mangan och järn, och därför tillsätts permanganat till vattnet när det kommer in till vattenverket.

Parallellt med vatten från brunnarna kommer en del från ett industrireningsverk som tar emot vatten från en livsmedelsindustri – som också är kommunens största enskilda vattenkonsument. Industrins avlopp från toaletter m.m. går till det vanliga avloppsreningsverket, medan industrireningsverket tar emot tvättvatten och liknande från processen. Processavloppet genomgår flera reningssteg innan det når det nya vattenverket. Först görs en rening med flockning och flotation i industrins regi, sedan går det till det kommunala reningsverket endast avsett för processavloppet. Där renas det i en satsbioreaktor, följt av tillsats av polyaluminiumklorid och filtrering genom dynasandfilter. Efter det har ett förbehandlingsverk byggts som utgörs av ultrafilter (flerkanalshålfiber från Inge) med en liten tillsats av fällningskemikalie följt av UV-desinficering.

I vattenverket blandas sedan vattnen från industrireningsverket och brunnarna i en matarreservoar. Det blandade vattnet renas genom ultrafilter (samma som förbehandlingsverket) och omvänd-osmosfilter, tillsats av koldioxid, stabilisering genom alkaliska filter och UV-desinfektion. Dessutom finns möjlighet till nödklorering vid behov. Vattenverket är det första i sitt slag i Europa och fick 2019 en europeisk utmärkelse för innovation i recirkulering. Det kommer att ha en produktionskapacitet på 4 000 m³/dygn, och vid full drift ska ca en fjärdedel av råvattnet komma från industrin.



Figur 4.6

Inuti Mörbylångas nya vattenverk.
UF till höger och RO till vänster.

⁵ www.borgholmenergi.se

⁶ www.morbylanga.se

Glemmingebro⁷

I Ystad används på ena vattenverken nanofilter för avhårdning av grundvattnet. Hälften av vattenflödet får passera ett tätt nanofilter. På det sättet minskas hårdheten till önskad grad genom att den reduceras i mycket hög utsträckning i den del som passerar nanofiltret. Eftersom endast hälften av vattnet passerar nanofiltren kan de därmed inte räknas som en mikrobiologisk barriär (vilket inte behövs här). Det är en relativt vanlig metod för avhårdning att använda täta nanofilter, men i Sverige är det vanligare industriellt än för kommunal dricksvattenförsörjning.

Gotland⁸

Avsaltningsverk – Herrvik och Kvarnåkershamn

På Gotland finns två avsaltningsverk i drift, varav det nyaste togs i drift under sommaren 2019. Båda är baserade på omvänd osmos.

Avsaltningsverket i Herrvik har varit i drift sedan sommaren 2016, då som enda svenska avsaltningsverk för dricksvattenförsörjning. Verket dimensionerades för en produktionskapacitet på 20 m³/h. Vattnet kommer från en intagsledning i Östersjön och intaget är försett med en intagssil, och genom självfall tas vatten in till en pumpbrunn. Ett partikelfilter på 200 µm sitter som skydd före två rack med ultrafilter, som består av 6 st. moduler vardera. Ultrafiltren är av hålfibertyp och klarar upp till 3 bars tryck. Efter UF följer RO med en täthet anpassad för bräckt vatten. Även RO är fördelade över två rack med fyra tryckbehållare vardera – som innehåller flera enheter. Tryckbehovet för dessa membran är ca 12–15 bar. Vattnet desinficeras sedan med UV innan det återmineraliseras med kalciumklorid och natriumvätekarbonat. Därefter finns möjlighet att tillsätta natriumhypoklorit vid behov.

Vattenverket tog ungefär ett år att bygga. Investeringskostnad var 35 miljoner kronor, varav 7,5 Mkr var kostnad för intagsledningen. Verket är försett med solceller, som dock inte är tillräckliga för att försörja hela produktionen men som förser vattenverket med delar av sitt energibehov. Vattenverket är även försett med reservkraft. Driftkostnader är svåra att uppskatta eftersom det ännu endast varit i drift i tre år, och produktionen varierar under året utifrån det lokala behovet. Viktiga faktorer som påverkar produktionskostnaderna är livslängden på membranen (vilket ännu inte har uppnåtts), placering (påverkar kostnad för personal) och total producerad vattenmängd per år (påverkar avskrivningarnas storlek). För jämförelser har Region Gotland beräknat ca 6–7 kr/m³ i rörliga kostnader (d.v.s. utan avskrivningar m.m.), tills fler år av erfarenhet har samlats.

Kvarnåkerhamns bräcktwaterverk har samma processlösning, men i större skala. Skillnaden mot Herrvik är att återmineraliseringen görs genom alkaliska filter istället för tillsats. Dessutom har tätare RO-membran valts än i Herrvik, vilket innebär ett tryckbehov på ca 25–30 bar. Kvarnåkershamn har dimensionerats för en produktionskapacitet på 7 500 m³/dygn

⁷ www.ystad.se

⁸ www.gotland.se

och är därmed norra Europas största avsaltningsverk. Vattnet ska i möjlig utsträckning blandas med grundvatten utifrån tillgång för att höja hårdheten ytterligare och minska skillnaden mot det vatten som tidigare distribuerats. Slutlig investeringskostnad är ännu inte fastställd.

Nanofilterverk, Fårösund

Fårösunds vattenverk på norra Gotland är ett ytvattenverk som tar vatten från sjön Bästeträsk. Den är dimensionerad för en vattenproduktion på 30 m³/h. Vattenverket har membranfilter i två steg – först ultrafilter och därefter nanofilter. Ultrafiltren tar bort partiklar och organiskt material som en förbehandling innan nanofiltren, för att minska risken för igensättning. Ultrafiltren är hålfibermembran som körs med normalflöde. Förbehandlingen ska skydda nanofiltren, som är spirallindade, mot igensättande ämnen. Nanofiltren är fördelade på tre linjer för att kunna styra kapaciteten. Beläggningshämmare används innan nanofiltren. Vattnet desinficeras med UV-aggregat och natriumhypoklorit innan distribution.

Valet av process föll på nanofilter för att få en så automatiserad process som möjligt, och för att undvika det behov av kontinuerlig tillsyn som ett vattenverk baserat på fällning kräver. Vattenverket är försett med solceller för att minska behovet från elnätet. Sedan driftsättningen 2015 har vattenverket fungerat utan oplanerade driftstopp. Det ska dock noteras att gotländska sjöar inte har någon algblooming, vilket kan vara viktigt att ha i åtanke om ett liknande vattenverk planeras i annan del av Sverige.

Investeringskostnaden för vattenverket, utan intagsledning, hamnade på ca 30 Mkr. Dock har byggnaden överdimensionerats i relation till dagens produktionskapacitet, för att i ett senare skede kunna utöka genom att ställa in fler membranrack. Driftkostnad (rörlig) för denna UF+NF lösning är uppskattad till 3–4 kr/m³.

Gävle⁹

Gästrike vatten använder vatten från Valboåsen för att förse Gävles invånare med dricksvatten. För att förbättra kvaliteten och säkerställa att mängden vatten är tillräcklig har Gästrike vatten byggt en membranläggning. Vatten tas från Gavleån och förbehandlas med ett mikrofilter med en täthet på 100 µm. Därefter passerar vattnet ultrafilter med tätheten 30 nm, följt av nanofiltren. Nanofiltren kommer från Filmtec och används huvudsakligen för att minska koncentrationen av organiska ämnen. Vattnet pumpas sedan till en infiltrationsanläggning till Valboåsen. Vattenverket har en kapacitet på knappt 9 000 m³/dygn, vilket är lite under en tredjedel av uttaget av grundvatten från Valboåsen.

Perth¹⁰

Water corporation of Western Australia är ansvarig för vattenförsörjning i Perth, m.m. Australiens klimat skapar stora begränsningar för deras vattenförsörjning, och förutsättningarna varierar mycket mellan olika månader

⁹ www.gastrikevatten.se

¹⁰ www.watercorporation.com.au

och olika år. Det är därför vanligt med återanvändning av avloppsvatten, men det är vanligen för bevattning eller andra typer av icke drickbart vatten, t.ex. för toalettspolning. Sedan 2017, efter fler års pilotkörningar och arbete för att få acceptans från medborgare, renas avloppsvattnet från ett av Perths fem avloppsreningsverk till dricksvattenkvalitet. Det görs genom filtrering genom ultrafilter på 100 nm, följt av omvänd osmos. Det desinficeras med UV-aggregat innan det injiceras till grundvattnet på fyra olika platser. Det tar många år för grundvattnet att flöda från injektionspunkterna till uttag, och det finns därför ingen risk för spridning av patogener. Andra ämnen, såsom läkemedelsrester analyseras och kontrolleras för att säkerställa att de inte sprids till grundvattnet.

Namibia¹¹

Sedan 1968 har recirkulering, d.v.s. rening av avloppsvatten, använts som en del i Namibias huvudstad Windhoeks vattenförsörjning. De var då först i världen med att använda renat avloppsvatten som fick gå in direkt på distributionsnätet, då de införde det för att andra vattenresurser inte räckte till, och de hade möjlighet att rena mer vatten i ett nybyggt vattenverk. De var enda plats i världen med direkt recirkulering (direkt till kran) in på 10-talet. Från början kom ca. 10 % av stadens vattenförsörjning från det återcirkulerade vattnet, som blandades med renat vatten från magasin/dammar. Efter fler olika utbyggnationer, inte minst en total ombyggnation som stod klar 2002, kommer ca 22 % av vattnet som distribueras i staden från det renade avloppsvattnet som blandas med renat konventionellt råvatten (uppdämningar och grundvatten) [22].

Innan 2002 var vattenverket i stor utsträckning utformad för att rena konventionellt ytvatten. För att kunna kontrollera det återvunna vattnet noga renades det på en separat linje från annat råvatten. Därför användes flockning med flotation som avskiljning följt av snabbsandfilter. Vattnet filtrerades sedan genom aktiv kol och klorerades två gånger. Trots den relativt enkla reningsmetoden har inga uppenbara sjukdomsutbrott setts i staden.

Efter moderniseringen gjordes många förändringar. Membranfiltrering, som då var relativt nytt och fortfarande en mycket dyr metod, var det uppenbara valet för att säkerställa mikrobiologisk barriär. Idag blandas avloppsvatten med vatten från dammen innan reningen. De olika stegen är:

- Pulveriserat kol tillsätts i kammaren där de två råvattnen blandas.
- En första ozonering som en första desinfektion.
- Fällning med järnklorid och polymer vid lågt pH, som avskiljs genom flotation.
- Snabbsandfilter
- Ozonering
- Biologisk aktiva kolfilter (BAK)

¹¹ www.wingoc.com.na

- Aktiverat kol (adsorption)
- Ultrafilter
- Klorering i kontaktbassäng, pH-justering med lut

Därefter är vattnet redo att distribueras. Klara förbättringar har setts när det gäll turbiditet, organiskt material, bakterier m.m. jämfört med det tidigare vattenverket.

Hade utformningen gjorts 10 år senare hade de sannolikt valt en annorlunda processkedja [22]. Med tanke på den utveckling som har gjorts av membran sen dess hade det troligen varit intressant att byta ut fällningen mot en membranbaserad lösning, eftersom alla studier de genomfört visat att det gav det mest pålitliga resultatet. Ozon, BAK och GAK hade troligen ändå använts då det är en vanlig metod för att minska föroreningar i vattnet. De hade egentligen helst haft RO-filtrering på åtminstone en delström, för att klara saltreduktion, och ta bort föroreningar och mikroorganismer.

Deras lösning har alltså fungerat bra, men de som utformade processen skulle idag ha rekommenderat andra varianter än vad som ansågs rimligast och mest ekonomiskt då.

Scottish Water¹²

Scottish Water ansvarar för dricksvattenförsörjningen för majoriteten av Skottlands invånare. De driver knappt 250 anläggningar, både för större tätorter och för små landsbygdsorter. I nordvästra Skottland bor endast 5 % av befolkningen, samtidigt som 50 % av dricksvattenanläggningarna finns i samma del av landet. De har många typer av reningsprocesser, men i nästan 100 anläggningar utgör membran en viktig del av processen.

15 av deras anläggningar använder Koch spirallindade NF, vilket är membran anpassade för avhärdning. De används i relativt små processer, med liten produktionskapacitet. Ett exempel finns på Mallaigh vattenverk med produktionskapacitet på knappt 1 800 m³/dygn. Nanofiltren används på ytvatten som har mycket höga färgtal, vilket ger en reduktion från ca 200 Hazen till mindre än 5 Hazen. Råvattnet filtreras genom ett förfilter med tätheten 10 µm som huvudsaklig förbehandling. Dessutom sänks pH med koldioxid innan vattnet matar membranen. Nanofiltren körs med tvärströmsflöde för att undvika beläggning. Vid behov spolas membranen med tillsats av en låg koncentration av natriumhypoklorit. De tvättas genom en CIP när behov uppstår med anpassad tvättkemikalie. Fem punkter kontrolleras genom partikelräknare, vilket används för att kontrollera membranens integritet genom att värdena jämförs med de värden som mättes vid uppstart av anläggningen. Vattnet pH-justeras innan distribution och natriumfosfat tillsätts för att undvika att bly löses ut i distributionsnätet.

På Shetlandsöarna har vattenförsörjningen lösts genom en kombination av ytvatten (uppsamlat regnvatten med hög påverkan från organisk tillrinning) och borrhål, som delvis är påverkat från havsvatten. Vattnet pumpas

¹² www.scottishwater.co.uk

genom nanofilter av tubmembrantyp från PCI membran. Processen kräver ett högt tvärströmsflöde för att inte riskera igensättningar. En del av koncentratet återcirkulerar, medan en del tappas av kontinuerligt. En del av permeatet från nanofiltren (40 %) får sedan passera ett omvänd osmosmembran för att få bort den höga halten av salt, varefter de två strömmarna blandas. Vattnet filtreras genom ett alkaliskt filter för mineralisering och klor tillsätts som en sekundär desinficering innan distribution.

Singapore¹³

Få länder är så beroende av processer med membranfiltrering som Singapore. Totalt står RO-verk för 70 % av Singapores vattenförsörjning, och andelen ska utökas ytterligare till 2060. Eftersom Singapore är världens mest tätbefolkade land och de har en mycket centraliserad vattenproduktion, i stor utsträckning placerade i centralorten och huvudstaden Singapore. Alla verken drivs av det statliga företaget PUB corporation. För att minska beroendet av importerat vatten från grannlandet Malaysia har Singapore byggt stora vattenverk för avsaltning och recirkulering.

Ca 40 % av vattnet som distribueras i Singapore kommer från vad de kallar för NEWater, d.v.s. recirkulerat vatten. I fem olika vattenverk renas vatten från deras fyra avloppsreningsverk. Det renade vatten går huvudsakligen till industrier, där fabriker som gör halvledare är viktiga användare, liksom kylanläggningar på andra industrier. Dessa användare kräver mycket rena vatten och det är därför lämpligt att använda vatten som har renats med RO. Under torra delar av året används NEWater även för att fylla på landets 17 råvattenreservoarer, som samlar upp stora delar av landavrinningen i landet.

Vattnet renas först i ett ARV som har primär och sekundär rening. NEWater-verken tar sedan emot vattnet. De består av mikrofilter, RO-filter samt UV-desinfektion. Eftersom vattnet inte distribueras direkt till konsumenter justeras endast pH innan distribution, och ingen mineralisering görs.

Avsaltningsanläggningarna står för ca 30 % av dagens produktion fördelade på tre vattenverk (ytterligare två avsaltningsverk är under uppbyggnad). Alla verken använder samma typ av process och finns i samma del av huvudstaden. Efter stora silar vid intaget går vattnet till flockning och flotationsbassänger. Därefter filtreras vattnet genom UF som har en täthet på 10 nm. Vattnet filtreras sedan två gånger genom RO. Första filtreringen är själva avsaltningen, medan andra filtreringen är till för att minska koncentrationen av bor. Efter det tillsätts koldioxid till vattnet, följt av kalk innan det distribueras.

Eftersom membran är så använt i Singapore görs det också väldigt mycket forskning i landet. Det finns därför mycket erfarenheter att hämta härifrån.

¹³ www.pub.gov.sg/watersupply

Andra intressanta platser

Den som är intresserad av reduktion av organiskt material genom NF behöver inte resa längre än till Norge. Norge har haft problem med höga färgtal, som dessutom varit ökande de senaste decennierna. De har under ett par decennier använt sig av spirallindade membran på många mindre vattenverk.

Avsaltning görs på många platser globalt. I Europa finns det i medelhavsländerna, inte minst Spanien, ett stort antal avsaltningsverk [23]. I USA har också avsaltning vuxit. Där har det länge varit vanligt att avsalta vatten från brunnar med bräckt vatten, men avsaltning av havsvatten har ökat, inte minst i Kalifornien (se t.ex. Carlsbad Desalination Plant¹⁴). Dessutom finns i USA även vattenverk som renar avloppsvatten för att djupinfiltrera till akvifärer²⁴. I Spanien görs också mycket recirkulering, men inget av det används för mänsklig konsumtion [23]. Samma sak gäller Israel, som använder nästan allt sitt avlopp för bevattning. I Kalifornien, liksom i viss utsträckning även i Spanien, görs injektion av renat avloppsvatten till grundvatten, för att fylla på magasin och förhindra saltvatteninträngning. För det finns rigida regler för vattenkvaliteten.¹⁵

4.5 Membran på marknaden

Nedan presenteras membranmoduler som hittas på marknaden. Den är tänkt för hjälp och överblick över möjliga alternativ, men det är möjligt att fler finns eller är på väg in på marknaden.

¹⁴ www.carlsbaddesal.com/

¹⁵ www.waterboards.ca.gov/drinking_water/certlic/drinkingwater/RecycledWater.html

Tabell 4.1 *Producenter av NF och RO*
(notera dock att den troligen inte är uttömmande då det ofta tillkommer nya producenter)

Företag	Membran	Användningsområde och material	Hemsida
DuPont	Filmtec, NF och RO, spirallindade	NF membranen har en MWCO på 200-400 Da, RO för bräckt vatten samt för havsvatten. Gjort av PA.	www.dupont.com
Hydranautics	ESNA, NANO-BW, NANO-SW, HYDRACoRe, SWC, CPA, ESPA, LFC, spirallindade.	Finns från NF till RO för havsvatten. Alla gjorda av PA, utom HYDRACoRe (SPES)	membranes.com
Koch Membrane systems	Fluid Systems TFC, NF- och RO-serier, spirallindade	NF med MWCO på 200 Da och RO för bräckt vatten och havsvatten. Gjort av PA.	www.kochmembrane.com
Microdyn-Nadir	Microdyn-, Nadir-, Trisepmembran, spirallindade. Oltremare, spirallindade	Finns nanofilter med MWCO på 2000 Da, RO för bräckt vatten och havsvatten. Gjorda i antingen CA eller PA.	www.microdyn-nadir.com eller http://www.oltremaremembrane.com/
Novasep	Applexion NF 150 och NF 300, spirallindade	Mestadels använt inom andra typer av industrier, PA	www.novasep.com
Pall	Disc Tube, plattmembran, ordnade som dukar i en tryckbehållare	NF och RO, 100-500 Da	www.pallwater.com
PCI membranes	B och C serierna, tubmembran	Finns för avsaltning eller mindre täta NF och RO. Gjorda av PA	www.pcimembranes.pl
Permionics	HFT, HPA, ARN, ARG, spirallindade	NF finns från 50 Da till 1 000 Da, har även RO membran. Gjorda av PA, utom ett som är gjort av PES.	permionics.com
Suez Water Technologies & Solutions	PRO, RO, spirallindade	Finns lösningar både för bräckt vatten och för havsvatten. Gjort av PA.	www.gewater.com
Toray	SU/TM serierna: RO, spirallindade. Storlekar från 4" till 16"	SU och TM finns både för bräckt vatten och saltare havsvatten, PA.	www.toray.com
Toyobo	HA, HR, HM, HB, HJ och HL serierna, hålfibermembran (öppen i ena änden).	Finns för bräckt vatten eller havsvatten, gjorda av cellulosatriacetat	www.toyobo-global.com
X-flow, Pentair	HFW 1000, hålfibermembra, inifrån-ut i tryckbehållare.	Har en MWCO på 1 000 Da, gjord för ytvatten. Gjort av PES.	xflow.pentair.com/en
Veolia	VRO, de flesta modeller spirallindat	Finns olika typer av RO beroende på vad som ska optimeras (energi, avskiljning), gjorda av PA.	technomaps.veoliawatertechnologies.com

5 Referenser

- [1] Schrotter J-C, Bozkaya-Schrotter B. Current and Emerging Membrane Processes for Water Treatment. In: *Membrane Technology*. Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA; 2010: 53–91. doi:10.1002/9783527631407.ch3
- [2] Zhu B, Clifford DA, Chellam S. Virus removal by iron coagulation – microfiltration. *Water Res.* 2005;39(20): 5153–5161. doi:10.1016/j.watres.2005.09.035
- [3] Guo H, Wyart Y, Perot J, Nauleau F, Moulin P. Low-pressure membrane integrity tests for drinking water treatment: A review. *Water Res.* 2010;44(1): 41–57. doi:10.1016/j.watres.2009.09.032
- [4] Lindegren K. *Evaluation of the Removal Efficiency of Per- and Polyfluoroalkyl Substances in Drinking Water Using Nanofiltration Membranes, Active Carbon and Anion Exchange*. Examensarbete, SLU, Uppsala; 2015.
- [5] Zazouli MA, Susanto H, Nasser S, Ulbricht M. Influences of solution chemistry and polymeric natural organic matter on the removal of aquatic pharmaceutical residuals by nanofiltration. *Water Res.* 2009;43(13): 3270–3280. doi:10.1016/j.watres.2009.04.038
- [6] Köhler SJ, Lavonen E, Keucken A, Schmitt-Kopplin P, Spanjer T, Persson K. Upgrading coagulation with hollow-fibre nanofiltration for improved organic matter removal during surface water treatment. *Water Res.* 2016;89: 232–240. doi:10.1016/j.watres.2015.11.048
- [7] Baker RW. Ultrafiltration. In: *Membrane Technology and Applications*. John Wiley & Sons, Ltd; 2012: 253–302. doi:10.1002/9781118359686.ch6
- [8] Lidén A. Safe drinking water in a changing environment: Membrane filtration in a Swedish context. 2016.
- [9] Lidén A, Keucken A, Persson KM. *GenoMembran*. Slutrapport från Projekt 2012–2015 (SVU-Rapport Nr 2015-20). Bromma; 2015.
- [10] Kabsch-Korbutowicz M. Removal of natural organic matter from water by in-line coagulation/ultrafiltration process. *Desalination*. 2006; 200(1–3): 421–423. doi:10.1016/j.desal.2006.03.389
- [11] Guigui C, Rouch JC, Durand-Bourlier L, Bonnelye V, Aptel P. Impact of coagulation conditions on the in-line coagulation/UF process for drinking water production. *Desalination*. 2002; 147(1–3): 95–100. doi:10.1016/S0011-9164(02)00582-9
- [12] Gijsbertsen-Abrahamse AJ, Cornelissen ER, Hofman JAMH. Fiber failure frequency and causes of hollow fiber integrity loss. *Desalination*. 2006; 194(1): 251–258. doi:10.1016/j.desal.2005.11.010

- [13] Antony A, Blackbeard J, Leslie G. Removal Efficiency and Integrity Monitoring Techniques for Virus Removal by Membrane Processes. *Crit Rev Environ Sci Technol*. 2012;42(9): 891–933. doi:10.1080/10643389.2011.556539
- [14] Lidén A, Lavonen E, Persson KM, Larson M. Integrity breaches in a hollow fiber nanofilter – Effects on natural organic matter and virus-like particle removal. *Water Res*. 2016; 105. doi:10.1016/j.watres.2016.08.056
- [15] Huisman IH, Williams K. Autopsy and failure analysis of ultrafiltration membranes from a waste-water treatment system. *Desalination*. 2004; 165: 161–164. doi:10.1016/j.desal.2004.06.052
- [16] Baker RW. Reverse Osmosis. In: *Membrane Technology and Applications*. John Wiley & Sons, Ltd; 2012: 207–251. doi:10.1002/9781118359686.ch5
- [17] Baker RW. Membranes and Modules. In: *Membrane Technology and Applications*. John Wiley & Sons, Ltd; 2012: 97–178. doi:10.1002/9781118359686.ch3
- [18] Lau WJ, Gray S, Matsuura T, Emadzadeh D, Paul Chen J, Ismail AF. A review on polyamide thin film nanocomposite (TFN) membranes: History, applications, challenges and approaches. *Water Res*. 2015; 80: 306–324. doi:10.1016/j.watres.2015.04.037
- [19] Ismail AF, Khulbe KC, Matsuura T, Ismail AF, Khulbe KC, Matsuura T. RO Membrane Fouling. *Reverse Osmosis*. January 2019: 189–220. doi:10.1016/B978-0-12-811468-1.00008-6
- [20] Singh R, Singh R. Water and membrane treatment. *Hybrid Membr Syst Water Purif*. January 2005: 57–130. doi:10.1016/B978-185617442-8/50003-8
- [21] Larson RJ, Bookland EA, Williams RT, et al. Biodegradation of acrylic acid polymers and oligomers by mixed microbial communities in activated sludge. *J Environ Polym Degrad*. 1997; 5(1): 41–48. doi:10.1007/BF02763567
- [22] du Pisani P, Menge JG. Direct potable reclamation in Windhoek: a critical review of the design philosophy of new Goreangab drinking water reclamation plant. *Water Supply*. 2013; 13(2): 214–226. doi:10.2166/ws.2013.009
- [23] Navarro T. Water reuse and desalination in Spain – challenges and opportunities. *J Water Reuse Desalin*. 2018; 8(2): 153–168. doi:10.2166/wrd.2018.043
- [24] Lahnsteiner J, van Rensburg P, Esterhuizen J. Direct potable reuse – a feasible water management option. *J Water Reuse Desalin*. 2017; 8(1): 14–28. doi:10.2166/wrd.2017.172



Box 14057 • 167 14 Bromma
Tfn 08 506 002 00
Fax 08 506 002 10
svensktvatten@svensktvatten.se
www.svensktvatten.se