

GenoMembran

Slutrapport från projekt 2012–2015

Angelica Lidén
Alexander Keucken
Kenneth M Persson



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. Projekt bedrivs inom hela det VA-tekniska fältet under huvudrubrikerna:

Dricksvatten
Rörsnät & Klimat
Avlopp & Miljö
Management

SVU styrs av en kommitté, som utses av styrelsen för Svenskt Vatten AB. För närvarande har kommittén följande sammansättning:

Anna Linusson, Ordförande
Daniel Hellström, Utvecklingsledare
Per Ericsson
Tove Göthner
Tage Hägerman
Stefan Johansson
Kristina Laurell
Annika Malm
Lisa Osterman
Kenneth M. Persson
Carl-Olof Zetterman

Svenskt Vatten
Svenskt Vatten
Norrsvatten
Sveriges Kommuner och Landsting
Smedjebacken
Skellefteå kommun
Formas
Kretslopp och vatten, Göteborgs Stad
Örebro kommun
Sydvatten AB
SYVAB

Författarna är ensamt ansvariga 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:	GenoMembran. Slutrapport från projekt 2012–2015
Title of the report:	GenoMembran. Final report from the project 2012–2015
Författare:	Angelica Lidén, Alexander Keucken och Kenneth M Persson
Rapportnummer:	2015-20
Antal sidor:	84
Sammandrag:	Rapporten sammanfattar erfarenheter och resultat från en studie under åren 2012–2015 som bedrivits vid fyra vattenverk i Sverige för att med hjälp av membranteknik avskilja organiskt material och öka den mikrobiella barriärverkan vid beredning av dricksvatten
Abstract:	The report summarises experiences and results from a study during the years 2012 – 2015 which took place at four waterworks in Sweden where membrane technology was used to remove organic material and to increase the microbiological barrier when treating drinking water
Sökord:	Membranteknik, nanofiltrering, ultrafiltrering, naturligt organiskt material, dricksvatten, mikrobiell barriär, ytvatten
Keywords:	Membrane technology, nanofiltration, ultrafiltration, natural organic matter, drinking water, microbiological barrier, surface water
Målgrupper:	Dricksvattentekniker, konsulter, entreprenörer, forskare, tillsynsmyndigheter
Omslagsbild:	Nanofiltrering vid Ringsjöverket, Angelica Lidén, Sydvatten
Rapport:	Finns att hämta hem som PDF-fil från Svenskt Vattens hemsida www.svensktvatten.se
Utgivningsår:	2015
Utgivare:	Svenskt Vatten AB © Svenskt Vatten AB
Om projektet	
Projektnummer:	SVU 11-112
Projektets namn:	GenoMembran
Projektets finansiering:	Svenskt Vatten Utveckling, Sydvatten, VIVAB, Norrvatten, Tekniska verken i Linköping AB (publ.), Stockholm Vatten, Göteborg Kretslopp och Vatten, Gästrike vatten AB, Purac AB

Förord

I ett brett upplagt projekt mellan Gästrike Vatten, Norrvatten, Tekniska Verken i Linköping, Vatten i Väst AB och Sydvatten, med tekniskt stöd av Göteborg Kretslopp och Vatten samt Stockholm Vatten, samt tillsammans med Sintef i Trondheim, Purac AB i Lund och Pentair i Nederländerna och Lunds universitet, Sveriges lantbruksuniversitet i Ultuna och Chalmers Tekniska Högskola i Göteborg och med värdefullt ekonomiskt stöd från SVU, har undersökts hur väl ultrafilter och nanofilter fungerar för att avskilja NOM från ytvatten i Sverige. Projektet har pågått 2012–2015 och genererat många vetenskapliga publikationer, rapporter, föredrag, radiointervjuer och dessutom värdskapet för IWA NOM6, en IWA-konferens för specialintresserade av NOM vilken genomförs i Malmö 7–10 september 2015.

Personer som direkt verkat i GenoMembranprojektet är (i bokstavsordning):

Malin Asplund, Tekniska Verken i Linköping AB (publ)
Olof Bergstedt, Göteborg Kretslopp och Vatten
Kristina Dahlberg, Norrvatten
Malin Dehlin, Gästrike Vatten
Björnar Eikebrokk, Sinteff
Per Ericsson, Norrvatten
Ingemar Heidfors, Purac AB
Andrew Holmes, Purac AB
Ann-Sofi Jönsson, Lunds tekniska högskola
Stephan Köhler, Sveriges lantbruksuniversitet
Elin Lavonen, Sveriges lantbruksuniversitet
Anna Lövsén, Tekniska Verken i Linköping AB (publ)
Thomas Pettersson, Chalmers tekniska högskola
Britt-Marie Pott, Sydvatten AB
Henrik Rydberg, Göteborg Kretslopp och Vatten
David Starnberg, Gästrike Vatten
Helena Stavklint, Tekniska Verken i Linköping AB (publ)
Karolina Stenroth, Gästrike Vatten

Till alla medverkande framföres ett varmt tack för mycket gott samarbete.
Detta måste vi göra om!

Lund och Varberg, Palmsöndagen 2015

Innehåll

Förord.....	3
Sammanfattning.....	6
Abstract	7
1 Bakgrund.....	9
2 Vattenverken.....	12
2.1 Berggårdens vattenverk	12
2.2 Ringsjöverket	12
2.3 Görvälverket	14
2.4 Kvarngårdens vattenverk	16
2.5 Råberga vattenverk	20
3 Använda membran	21
3.1 HFNF: Pentair HFW 1000	21
3.2 UF: Pentair Aquaflex.....	21
3.3 UF: Koch PMPW™-10.....	22
3.4 Spirallindad NF: Dow NF 270-4040.....	22
4 Pilotanläggningar	23
4.1 UF/HFNF-pilot	23
4.2 UF-pilot	25
4.3 QuickScan	26
4.4 UF-pilot (Kvarngården)	27
4.5 NF-pilot (Kvarngården)	29
4.6 Spirallindad NF-pilot.....	29
5 Resultat	31
5.1 Berggårdens vattenverk	31
5.2 Görvälverket	32
5.3 Kvarngårdens vattenverk	41
5.4 Ringsjöverket	52
5.5 Råberga.....	65
5.6 Summering av alla vattenverk	72
6 Slutsatser	77
7 Referenser och läs vidare	79

Sammanfattning

Projektet Genomembran har pågått i tre år i samarbete mellan Lunds tekniska högskola, SLU, Chalmers, Purac, Pentair, Tekniska verken, Norrvatten, Vivab, Sydvatten, Göteborg Kretslopp och vatten samt Gästrik Vatten. Projektet har studerat organiskt kol (naturligt organiskt material, NOM) som är ett växande problem i vattenverken beroende på bland annat minskat svavelnedfall från regn. Nuvarande beredningsprocesser kan bara ta bort en viss typ av organiskt kol. Men den ganska nya membrantechniken (ultrafilter och nanofilter) kan användas för ändamålet. Den här rapporten fokuserar på resultat från studier av membrantechnik vid fyra vattenverk – med syftet att avskilja organiskt material och öka den mikrobiella barriärverkan.

Ultrafiltrering måste kombineras med förfällning eller direktfällning för att NOM-halten ska minska. Den kombinationen ger ungefär samma resthalt av NOM som kemisk fällning, men kräver mindre fällningskemikalier och ger därför mindre slam. Även uppehållstiden kan minskas jämfört med konventionell kemisk beredning. Det behövs ytterligare försök för att hitta en fungerande fällningskemikalie för fällning på ultrafilter. Nanofiltrering fungerar även utan kemisk fällning. Nanofiltrering reducerar halten organiskt kol med upp till 90 procent, medan fällning sällan avskiljer mer än 50 procent. Medan fällning och flockning nästan enbart tar bort humus från mark lyckas nanofiltrering ta bort ett mycket bredare spektrum av humusämnen. Endast lågmolekylärt organiskt material passerar genom nanofilter.

Ultrafilter kan drivas vid mycket högt vattenutbyte och bara låga spolvattenförluster, lägre än 4 procent, medan nanofiltrering behöver drivas med tvärströmsfiltrering för att fungera. För nanofilter kan vattenförlusterna bedömas uppgå till 15–20 procent av totalflödet in till vattenverket. Ultrafilter har högre kapacitet än nanofilter eftersom mera vatten kan beredas per kvadratmeter membranarea. Typiska flöden är 100 liter per kvadratmeter och timme för ultrafilter och 20 liter för nanofilter. Ultrafilter och nanofilter kan uppföras i mycket kompakta anläggningar eftersom membranerna kan packas i yteffektiva moduler.

Både nanofilter och ultrafilter ger en god mikrobiell barriär, även för virus. Om det finns bristningar i membranet minskar barriärverkan snabbt. Det finns viss tendens till återväxt av bakterier på den sida där vattnet har passerat membranet (permeatet). Kemisk desinfektion vid returspolning ger ökad mikrobiell säkerhet för permeatet. Permeatet kan också göras biostabilt med aktivt kol, långsamfilter eller UV-ljus.

Membrantechnik måste trycksättas. Det krävs elenergi till pumparna, såvida inte trycket kan åstadkommas från en högt belägen vattentäkt. Kallt vatten vintertid ger betydligt lägre flöde (30–40 procent mindre) än varmt vatten sommartid. Om processen ska köras med bibehållet flöde behöver tryckstegringen ökas. Innan membranerna kan börja användas i ett vattenverk bör pilotförsök göras för det aktuella vattnet.

Abstract

The project Genomembran has been running for three years in a broad collaboration between, among others, Lund University, Swedish University of Agricultural Sciences, Chalmers University of Technology, Purac AB, Pentair, Tekniska verken i Linköping AB (publ), Norrvatten, VIVAB, Syd-vatten, Göteborg Kretslopp och Vatten and Gästrike vatten AB.

In the project, different raw water qualities with respect to organic carbon have been studied. The effectiveness of different treatment steps in the waterworks with regard to the separation of organic material and types of organic material have also been investigated. Particularly membrane filtration methods have been tested at four different waterworks in Sweden. This report focuses on the results from the membrane studies. In parallel, a report on natural organic matter in drinking water has also been published as a result of GenoMembran (SVU 2015-13).

Current treatment methods in the waterworks can only remove a certain type of organic carbon, and not even fully. Membrane filtration is a fairly new group of separation processes that can be used to separate the organic carbon from water. Prior investment in membrane treatment systems, pilot tests should be conducted to determine operational information and to assess much organic carbon that can be removed at a given set-up.

Flocculation and sedimentation or floatation removes mostly the terrestrial humus fraction of the organic material. Nanofiltration removes a much broader spectrum of humic substances. Nanofiltration reduces the organic carbon content of up to 90 percent, while flocculation and sedimentation rarely removes more than 50 percent. Membrane technology may be used to reduce NOM in drinking water. Ultrafiltration (UF) must be combined with pre-coagulation, or direct coagulation on the membrane surface to decrease the NOM content. The combination of UF and pre-coagulation / direct coagulation requires much lower coagulant dose than ordinary chemical treatment. This reduces the sludge production. UF with pre-coagulation / direct coagulation treats the drinking water to approximately the same residual content of NOM as conventional chemical flocculation. Nanofiltration (NF) works without chemical precipitation. The NOM-reduction is high and only low molecular weight organic material passes through the nanofiltration membranes. NF retain however divalent ions such as calcium and magnesium, which needs to be considered. UF can be operated at very high yields and only low losses of rinse water, less than 4 %. NF needs to be operated in a cross-flow mode for best performance. For NF, the water yield may amount to 80 % of total feed flow.

Both NF and UF provides a good microbial barrier and produces generally a reduction better than 4-log from the studies. Even for viruses, the reduction is often near 6-log. Would rupture or breakage of the membrane exist, the microbial barrier effect is reduced substantially. There is a certain tendency to regrowth of bacteria on the permeate side of the membrane. This regrowth is probably due to a passage of organic material through the

membrane without bacteria accompanying feeding bacterial growth downstream. The UF- capacity is higher than the NF-capacity. A typical flux is 100 l/m²h for UF and 20 l/m²h for NF. Both UF and NF can be built in very compact systems, since the membranes can be closely packed in compact modules.

Membrane technology must be pressurized to work and therefore requires electricity for pumps unless pressure can be achieved hydrostatically from a pressure gradient. The specific energy consumption per produced drinking water volume is approximately 0.05 kWh/m³ for UF and 0.5 kWh/m³ for NF. The seasonal variations need to be considered in the operation of membrane plants. Cold water in winter provides significantly lower flux (30–40 % lower) than warm water in summer. To obtain constant flux throughout the year, additional pressure increase is needed during winter. The different raw waters of the tested waterworks gave very different operational conditions, but still the same permeate water quality. Flocculation prior UF reduces the need for residence time and chemical dose compared with conventional water treatment processes. Under labile operational conditions, iron may cause problems with flocculation and is not always the optimal choice even though it offers better NOM reduction in lab-scale. To ensure the microbial barrier effects, frequent integrity tests must be conducted across the membrane modules. The integrity tests show if there are any leaking membranes in the plant.

Although the membranes are intact, sometimes regrowth of microorganisms in the water downstream permeate may take place. Chemical disinfection during backwash provides an increased microbial safety of permeate. Alternatively, permeate can be treated to biological stability through biologically active carbon, slow-sand filter or UV disinfection.

1 Bakgrund

Av allt dricksvatten som produceras i Sverige bereds drygt hälften av ytvatten och en fjärdedel av infiltrerat ytvatten vid konstgjord grundvattenbildning, där särskilt de större vattentjänstbolagen har omfattande beredning av ytvatten. Sammanlagt får minst 6 miljoner människor i Sverige sitt dricksvatten direkt eller indirekt från humusrika ytvatten.

Brunifiering av ytvatten har blivit en allt större fråga för vattentjänstföretag då så mycket av råvattnet kommer från ytvattentäkter. Brunifiering beror på att det finns naturligt förekommande organiska kolföreningar (NOM, natural organic matter) i vattnet. Dessa föreningar kan absorbera ljus och därmed färga vattnet. NOM innehåller kol, syre och väte och ibland också kväve, svavel eller fosfor i varierande grad. De bildas ytterst av organismer i marken eller i ytvatten, men kan ofta vara nedbrytningsprodukter från kemiska, fysikaliska eller biologiska reaktioner. Genom fotosyntesen bildas komplexa organiska molekyler som är instabila under naturliga förhållanden. De omsätts successivt till mindre enheter och bryts i vissa fall ned fullständigt till koldioxid och vatten (mineralisering). Man skiljer på humus från marken (alloktont NOM) och humus från biologiska processer i ytvatten (autoktont NOM). Humus från marken är urlakningsprodukter från markmiljöer inklusive våtmarker eller strandzoner i skogs- eller lantbruksområden. Ett ofta använt mått för humus är SUVA, den specifika absorbansen av ljus vid 254 nm våglängd dividerat med koncentrationen organiskt kol i provet.

Humus kan brytas ner under inverkan av ljus, så kallad fotolytisk omsättning, eller även tas upp och bryts ned mikrobiellt. Humus kan binda metalljoner som aluminium, krom eller järn. När metalljonhalterna ökar händer det att humusmolekyler komplexbinds till större aggregat. Detta förhållande används i ytvattenverken när aluminium- eller järnjoner doseras som flockningsmedel i vattnet. Humusföreningar flockas då ut och med dem olika andra lösta och suspenderade ämnen som virus och bakterier. En liten andel av humus från mark kan härröra från utsöndringsprodukter av marklevande organismer, typiskt som små, lågmolekylära föreningar. Dessa är oftast instabila eller kan metaboliseras av andra organismer. Innehåller råvattnet mycket humus från ytliga markskikt är SUVA-värdet över 4 absorbansenheter per milligram organiskt kol. Ytvatten som innehåller mycket autoktont organiskt kol, det vill säga har låg absorbans men likväl hög halt organiskt kol, har låg SUVA och är mycket svårfällt.

Höga NOM-värden förekommer allmänt i ytvatten i södra och mellersta Sverige där vattnets omsättningshastighet är högre, medan de är ovanligare i inlandet i norra Sverige, norr om Dalälven, där vattnets omsättningshastighet är lägre. Medelhalt av organiskt kol, vilket kan anses som ett bra mått på humus, i svenska sjöar ligger runt 7 mg/L kol men halter upp till 15 mg/L kol förekommer i flera delar av landet. Gränsvärden för organiskt material i dricksvatten saknas i nuvarande dricksvattenföreskrifter. För CODMn ligger gränsvärdet för tjänligt med anmärkning vid 4 mg/L mätt som perman-

ganatindex i mg/L syre. Det betyder att halten organiskt material ofta måste mer än halveras från råvattnet till dricksvattnet. NOM-rening är därför en av de viktigaste kemiska utmaningar vid beredning av dricksvatten från ytvattentäkter.

Organiskt material kan ge upphov till missfärgning av vatten och lukt- och smakstörningar. Det organiska materialet kan fungera som substrat för mikrobiell efterväxt i ledningsnät, vilket kan leda till hygieniska problem. Desinfektion med klor orsakar trihalometanbildning (THM) och många andra klorerade föreningar, som i några fall misstänks ge upphov till carcinogena ämnen i dricksvatten. Dessa är dock bara en del av de 600 kända ämnen som tillhör den stora gruppen av desinfektionsbiprodukter (DBP). Ju högre halt vattnet har av organiskt material, desto större risk föreligger för THM-bildning. Humusämnenas förmåga att komplexbinda andra ämnen, speciellt metaller, medför på samma sätt en risk för ökad metalltransport eller transport av organiska spårämnen såsom persistenta föreningar. Ökande halter av humusämnen i inkommande råvatten vid ytvattenverk stör kraftigt verkens beredningsprocesser. Skyddet mot mikrobiella föroreningar minskar då desinfektionen störs av ökad klorförbrukning respektive absorptionsförluster av UV-ljus. Skyddet mot kemiska föroreningar vid de vattenverk som tillämpar aktivt kolfiltrering minskar eftersom kolets reningsförmåga snabbt blockeras av adsorberade humusämnen.

Också utomlands är humus och NOM en stor utmaning. Snart sagt alla länder med ytvattenverk i tempererat klimat (dvs Estland, Ryssland, Finland, Kina, Korea, Japan, Kanada, norra USA, Island, Skottland, Irland och Norge) har rapporterat stigande NOM-halter och stigande halt TOC i vatten. Vattnet blir allt brunare. De exakta mekanismerna bakom förändringarna är inte helt klarlagda än. Höga färgtal eller humushalter har förekommit även historiskt, vilket styrks av paleolimnologiska mätningar av organiskt kol i sjöarnas bottensediment. Dessa visar att ytvatten från 1800-talet och tidigare hade högt färgtal och innehöll höga halter organiskt material. Ökningen av färgtal i ytvatten beror på en kombination av klimatiska faktorer, förändrad markanvändning och återhämtning från tidigare försurning.

Metoder för att bereda brunfärgade och NOM-rika råvatten blir allt viktigare att känna till för vattentjänstföretagen i Sverige eftersom inte mycket tyder på att de accelererande brunfärgningsprocesserna som observerats de senaste 30 åren skulle gå tillbaka. En grupp av metoder som kan användas för att hantera stigande NOM-halter i råvatten är membran teknik. Såväl ultrafilter (UF) som nanofilter (NF) kan komma ifråga som beredningsmetoder för att minska NOM-halten i dricksvatten.

Vid varje vattenverk som ingått i GenoMembranprojektet har ultrafilter och/eller nanofilter provats i pilotskala under några eller flera månader. Råvatten, behandlat vatten och dricksvatten har vidare karaktäriserats kemiskt, mikrobiellt och fysikaliskt med hjälp av kvalificerade analysmetoder. Till Svenskt vatten utveckling har presenterats två slutrapporter: Löst organiskt kol i dricksvatten – En syntes av erfarenheter av GenoMembranprojektet (SVU 2015-13) samt föreliggande rapport GenoMembran. Slutrapport från projekt 2012–2015 (SVU 2015-20).

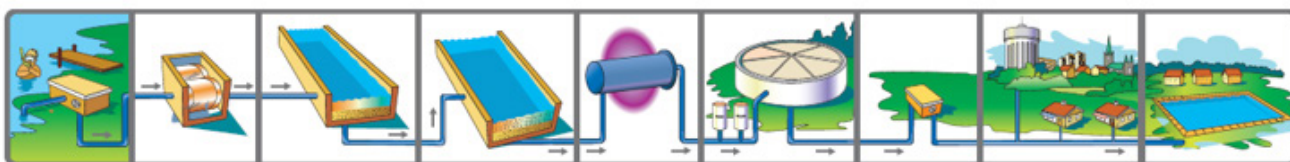
För detaljerad kunskap om vad som sker på molekylär nivå med olika organiska fraktioner i råvatten och dricksvatten hänvisas till SVU 2015-13. För tekniska erfarenheter och praktiska iakttagelser om hur membranteknik fungerar för avskiljning av NOM i dricksvatten förordas denna rapport (SVU 2015-20).

2 Vattenverken

2.1 Berggårdens vattenverk

Berggårdens vattenverk är ett av två ytvattenverk som förser Linköpings invånare med dricksvatten. Råvattnet hämtas i Motala Ström på fyra meters djup och pumpas sedan 14 km för att nå vattenverket. Vattenverket byggdes 1968 och idag produceras ca 30 000 – 40 000 m³ dricksvatten/dygn. Anläggningen ägs och drivs av Tekniska verken i Linköping AB (publ).

Inledningsvis passerar vattnet skivfilter med maskvidd 30 µm. Syftet med dessa är att avlägsna föremål såsom löv, alger och andra större partiklar ur vattnet. Därefter passerar vattnet snabbfilter för att avlägsna partiklar ur vattnet, samt långsamfilter som biologiskt renar vattnet genom den biofilm som finns i sandbädden. Långsamfiltreringen bidrar också till en reducering av vattnets lukt och smak. Efter långsamfiltrering behandlas vattnet med UV-ljus som ytterligare mikrobiologisk barriär. Därefter sker en alkalisering med kalk som pH-justerare. Slutligen tillsätts natriumhypoklorit för desinfektion.



Figur 2.1 Processen vid Berggårdens vattenverk (Tekniska verken i Linköping AB, www.tekniskaverken.se)

2.1.1 Motala ström

Motala ström börjar i Vättern och flyter sedan österut tills den når Östersjön i Bråviken. På sin väg hinner den passera sjöarna Boren, Roxen och Glan, samt några mindre sjöar. Vattnet till Berggårdens vattenverk hämtas vid Ljung, innan Roxens inlopp. I avrinningsområdet är skogsmark den vanligaste förekommande markanvändningen (48 %), men också vanligt är våtmark (15 %), åkermark (13 %) och öppen mark (12 %) (Motala ströms vattenvårdsförbund 2014).

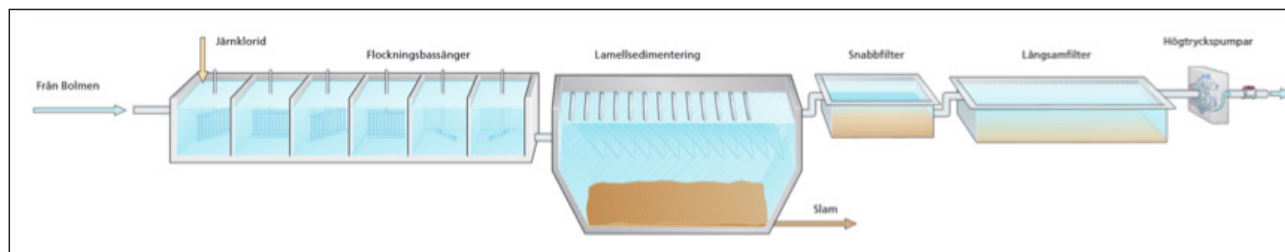
2.2 Ringsjöverket

Ringsjöverket är en av Sydvattens två dricksvattenverk. Tillsammans förser de två vattenverken en knapp miljon människor i västra Skåne med dricksvatten. Vattenverket togs i drift 1963. Det är beläget i Stehag strax väster om Västra Ringsjön. De första tjugo åren drev Helsingborgs stad vattenverket, men 1983 övergick det i Sydvattens regi, som en del av förberedelserna inför driftsättningen av Bolmentunneln. Denna 8 mil långa tunnel med efterföljande råvattenledning (2,5 mil) stod klar 1987, och sedan dess har Ringsjön endast använts som reservvattentäkt. I och med tunneln kunde även kapaciteten på Ringsjöverket ökas och i mitten av 1990-talet byggdes

därför ett andra block, likvärdigt det första och idag producerar vattenverket runt 1 500 l/s (130 000 m³/d).

Vid tunnelns inlopp mikrosilas (500 µm) råvattnet innan transport. Det tar ungefär en vecka för vattnet att transporteras genom tunneln, som endast har självfall ända fram till råvattenledningen. I tunneln sker ett visst läckage av grundvatten, och ca 8 % av det vatten som når vattenverket är grundvatten. På vattenverket justeras först pH innan fällningskemikalie tillsätts, i dagsläget järnklorid. Vattnet flockas varpå flockarna avskiljs genom lamellsedimentering. För att bli av med restjärn höjs vattnets pH av kalktillsats innan det går genom snabbfiltren, bestående av sand. Dessa följs av långsamfilter som ger en märkbar minskning av lukt och smak på vattnet. Efter långsamfiltreringen tillsätts koldioxid för att öka Bolmenvattnets alkalinitet, vattnet desinficeras med natriumhypoklorit och pH-justeras ytterligare uppåt. I dagsläget är även en UV-anläggning under konstruktion.

Vid de tillfällen då reservvattentäkten måste användas justeras processen något. Ringsjön har högre alkalinitet och därför faller det med aluminiumsulfat och ingen koldioxid tillsätts. Av samma anledning är pH högre i alla steg i processen. Dessutom har detta intag ingen mikrosil.



Figur 2.2 Ringsjöverket (Sydvatten AB)

2.2.1 Sjön Bolmen

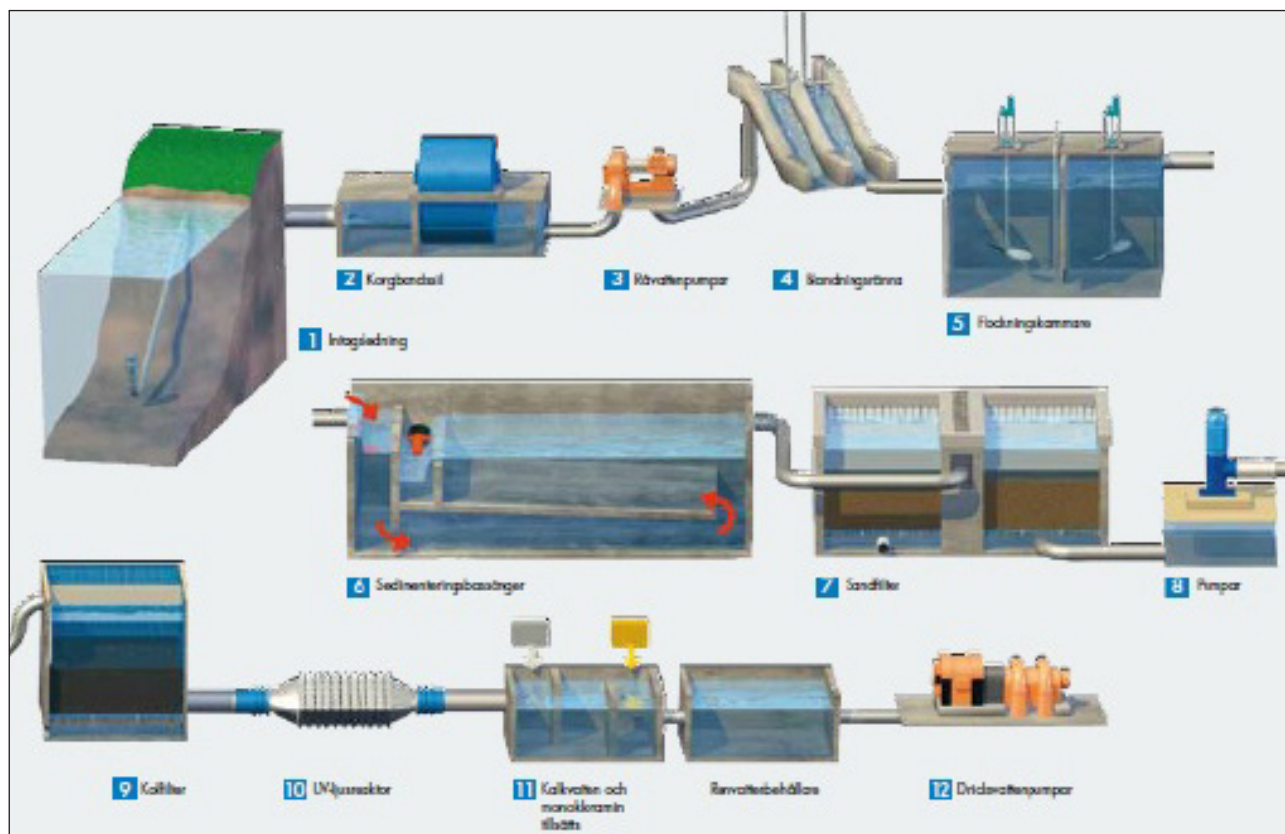
Bolmen är Sveriges tionde största sjö. Den är del i Lagans avrinningsområde och ligger på gränsen mellan Kronobergs, Hallands och Jönköpings län. Bolmen har relativt liten påverkan från mänsklig aktivitet, och en stor del (48 %) består av skogsmark våtmarker (22 %) eller sjöar (20 %). Endast en liten del är kultiverad land (9 %). Inloppet till tunneln ligger i Skeen, i sjöns södra spets. Den har låg alkalinitet men en allt mer ökande koncentration av NOM.

2.2.2 Ringsjön

Skånes näst största sjö, Ringsjön, brukar oftast delas in i två: Västra och Östra Ringsjön. Den är mycket påverkad av jordbruk, som är den absolut största markanvändningen i avrinningsområdet. Intaget, som fortfarande kan användas vid behov, finns i Västra Ringsjön. Sjön är mycket näringsrik och har återkommande algblooming. Den skiljer sig även på andra sätt från Bolmen. Trots att den har ungefär samma koncentration av NOM (mätt i TOC) är färgtalet lägre, samtidigt som alkalinitet och hårdhet är märkbart högre.

2.3 Görvålverket

Kommunalförbundet Norrvatten, Sveriges fjärde största dricksvattenproducent, producerar och distribuerar dricksvatten till omkring 550 000 människor i 14 medlemskommuner norr om Stockholm. Norrvattens stora ytvattenverk, Görvålverket, ligger i Järfälla med råvattenintag från Görvålnfjärden i Östra Mälaren. Vattenverket är dimensionerat för maximal 200 000 m³/d med en genomsnittlig dygnsproduktion på drygt 120 000 m³/d. Råvattenintaget sker från två olika djup (4 m eller 22 m) beroende av den aktuella vattenkvaliteten vid olika årstider. Under större delen av året tas råvattnet från 22 m djup, men under vintermånaderna vid isbildning och salthaltsskiktning höjs intaget till 4 m. Görvålverkets beredningsprocess omfattas av mikrosilning (200 mikrometers maskvidd), fällning med aluminiumsulfat (ALG) och vattenglas, sedimentering (flödesfördelning: 1/3 via pulsator och 2/3 passerar konventionella flocknings- och sedimenteringsbassänger), snabbfiltrering genom sandfilter, adsorption via aktiv kolfilter, UV-desinfektion, tillsats av färdigberedd monokloramin samt pH-justeringsmed släckt kalk. Vid låga halter av petroleumprodukter i ytvattnet doseras även aktivt pulverkolk till inkommande råvatten efter grovreningen. Riskvärderingar av beredningsprocessen enligt GDP-metoden och MRA-modellen tyder på en välfungerande mikrobiologisk barriärverkan i förhållande till rådande råvattenkvalitet. Enligt beräkningar nås den nödvändiga barriärhöjden med marginal för samtliga typer av patogener (Dahlberg 2011). Däremot har det konstaterats en begränsning av den kemiska barriärverkan i befintliga aktivkolfilter då NOM adsorberas av kolet, vilket leder till



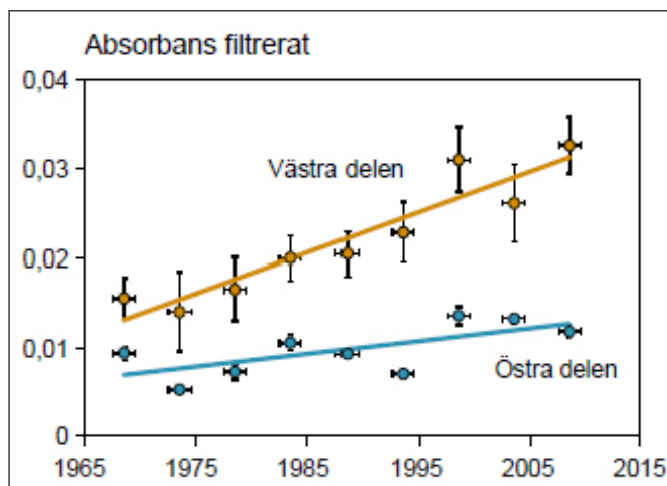
Figur 2.3 Översiktsschema för beredningsprocessen på Görvålverket

minskad avskiljningsförmåga för störande kemiska ämnen (t.ex. låga halter av petroleumprodukter) och miljögifter (t.ex. perfluorerande substanser, PFAS, läkemedelsrester etc). Mot denna bakgrund har Norrvatten valt att utvärdera membrantechniken för selektiv NOM-avskiljning med syfte att öka och säkerställa den kemiska barriärverkan i befintlig beredningsprocess.

2.3.1 Mälaren och Görvål

Mälaren är med sin yta på 1 120 km² Sveriges tredje största sjö och sträcker sig från Köping och Kungör i väster till Stockholm och Södertälje i öster. Avrinningsområdet består av ungefär 60 % skogsmark, 20 % åker- och ängsmark, 11 % sjöar och resten är så kallad övrig mark. Ungefär en åttondel av Sveriges befolkning är bosatta inom avrinningsområdet och påverkar Mälaren genom olika utsläpp (bland annat, från avloppsreningsverk, enskilda avlopp, dagvattenbrunnar, industrier, båttrafik och så vidare). Mälarens vattenkvalitet har förbättrats sedan början av 1970-talet till dels för att avloppsreningsverken runt Mälaren har inför och förbättrat reningen.

En utvärdering av miljötillståndet och utvecklingen i Mälaren och dess tillflöden under perioden 1965–2011, indikerar dock att vattenfärgen (mätt som absorbans vid 420 nm i filtrerat vatten) i både västra och östra delarna av Mälaren har ökat signifikant under de senaste 50 åren (se Figur 2.4). Denna observation är i enlighet med resultat från tidsserier i andra svenska sjöar och vattendrag, där man har konstaterat en brunifiering av vattnet på grund av ökande halter av både humus och järn (SLU rapport 2013:1). Den ökade vattenfärgen medför en försämring av råvattenkvaliteten med bland annat ökad kemikalieåtgång i Görvålverket för att minska halten lösta organiska ämnen i dricksvattnet.



Västra delen: Blacken, Galten, Västeråsfjärden;
Östra delen: Görvål, N. Prästfjärden, S. Björkfjärden

Figur 2.4 Vattenfärgen mätt som absorbans i de västra resp. östra delarna av Mälaren. Varje punkt i figuren baserar sig på 5-årsmedelvärden.

Görvål, som är en del av ett fjärdsystem i nordöstra Mälaren, har sedan 1929 tjänat som råvattentäkt för några av Stockholms nordvästra grannkommuner. Görvål gränsar i norr via Stäkesundet till Skarven, i sydväst och söder till Näsfjärden respektive Lövstafjärden. Görvål har en total vattenyta av 16 km² och ett medeldjup av 12 m. Det största djupet på 53 m

ligger rakt väster om vattenverket. Fjärden är vanligen istäckt från januari till april. Vattenkvalitetsutvecklingen i Görvåln präglas av starka fluktuationer på grund av det komplicerade blandningsförhållandet som råder mellan vattenmassor av olika kvalitet från norr respektive söder. I Görvåln blandas vatten från nordöstra Mälaren, som tillförs via Stäkesundet, med vatten som har sitt ursprung från Mälarens centrala delar vilket tillförs via Ormsundet och Skeppsbackasundet till Brofjärden-Näsfjärden. Vattnet från norr är rikt på lösta salter, inklusive närsalter, samt har betydligt högre färgvärde, grumlighet och halt av organiskt material jämfört med vattnet från centrala Mälaren. Blandningsförhållanden av dessa båda vattentyper är helt avgörande för vattenkvaliteten i Görvåln. Långtidsundersökningar visar att råvattnet till Görvålnverket består i medeltal av 1/3 del Skarven-vatten och 2/3 delar av vatten från centrala Mälaren.

Vattensammansättningen i Görvåln påverkas, förutom av vattenföringen i inkommande strömmar, också i hög grad av vattenmassans skiktning i fjärden. Under vintern bildar det saltfattiga vattnet från centrala Mälaren (Norra Björkfjärden) ett väl avgränsat skikt omedelbart under isen. Under detta skikt samlas vatten från centrala Mälaren och Skarven i varierande proportioner. Andelen Skarven-vatten ökar under den islagda perioden och representerar på senvintern 50 % av blandvattnet. Efter vårcirkulationen består vattenmassan i Görvåln av i medeltal 40 % vatten från Skarven och 60 % från centrala Mälaren. Detta blandningsförhållande varierar dock år från år beroende på komplex samverkan mellan isperiodens längd, vattenföring under vinter och vår samt blandningsförhållanden under vårcirkulationen. Så orsakas densitetsskillnad mellan inkommande strömmar vintertid huvudsakligen av temperaturskillnader när isläggning i de öppna centrala fjärdarna i Mälaren sker senare vilket medför att vattnet kyla ned mer än i den norra strömmen där fjärdarna är mindre, täcks med is tidigare och är mer vindskyddade. Temperaturskillnaden är mycket liten, bara 1 grad ungefär, men räcker för att ge upphov till densitetsskillnader mellan inkommande vattenmassor. Klimatiskt betingade faktorer får därmed stor inverkan på råvattenkvaliteten till Görvålnverket.

För att få bästa möjliga kvalitet på råvattnet förläggs intaget till 4 m under den islagda perioden och till 22 m under resten av året. Intagsdjupet varieras för att undvika störningar av algutvecklingar i epilimnion. Dessutom sjunker vätekarbonathalten i råvattnet successivt under vintern allteftersom det vätekarbonatfattigare vattnet från centrala Mälaren skiktas in. I de djupare skikten föreligger ännu efter vårcirkulationen en betydande andel Skarven-vatten som omsätts först vid höstcirkulationen. Under lågvattenföringsperioden på sommaren omsätts ytvattnet endast långsamt.

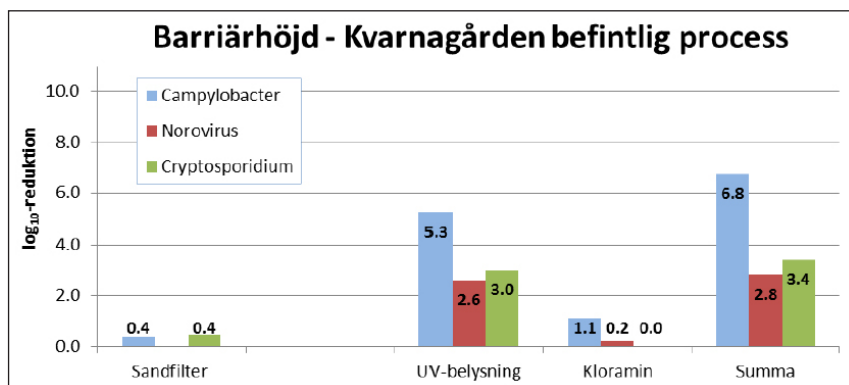
2.4 Kvarngårdens vattenverk

Vatten & Miljö i Väst AB (VIVAB) ansvarar för vatten, avlopp och avfallshantering i Varberg och Falkenberg. Med 150 anställda och en omsättning på 300 mkr driver VIVAB en verksamhet som berör runt 100 000 personer och utgör därmed ett av landets större kommunala miljöföretag. Årligen

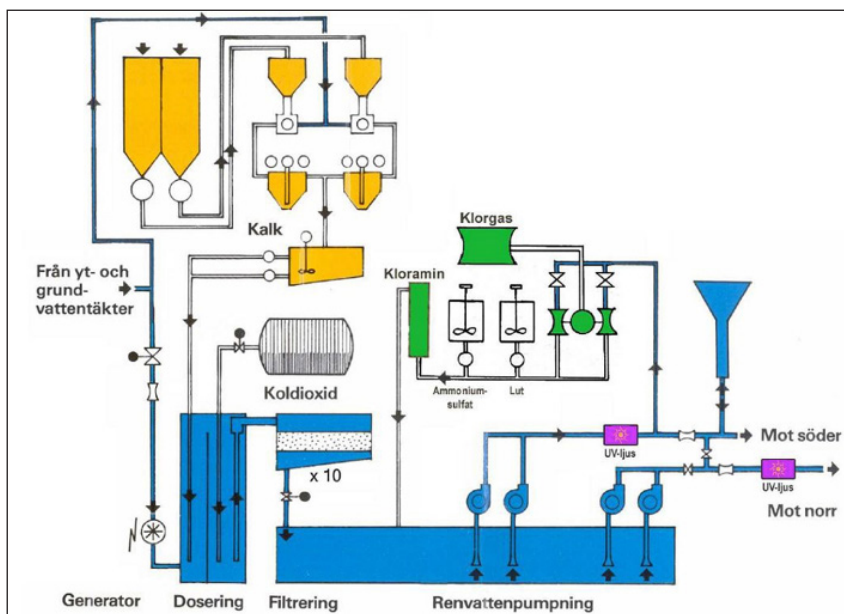
produceras drygt 9 miljoner kubikmeter dricksvatten som levereras av totalt 20 vattenverk av varierande storlek med både yt- och grundvattentäkter.

Kvarnagårdens vattenverk ligger i Varberg och står för 90 % av vattendistribution till anslutna VA-abonnenter inom Varbergs kommun. Vattenverket försörjer drygt 45 000 personer med dricksvatten och är dimensionerat för maximal 25 000 m³/d med en genomsnittlig dygnsproduktion på ca. 13 000 m³/d under större delen av året. Kvarnagårdens vattenverk klassas som ytvattenverk och ska enligt dricksvattenföreskrifterna ha minst två mikrobiologiska barriärer för att reducera antalet sjukdomsalstrande mikroorganismer i råvattnet som beredas till dricksvatten. Inkommande råvatten består av ytvatten (80 %) från sjön Stora Neden och grundvatten (20 %) från Ragnhilds källa. Blandningen av råvattnet sker främst för att balansera mineralinnehållet i dricksvattnet, på så sätt minskas behovet av att tillsätta kalk. Vidare erfordras grundvattenuttag vid Ragnhilds källa (artesisisk brunn) för att säkerställa fortlöpande dränering av det lokala området (översvämningrisk för närboende).

Inkommande råvatten leds genom en turbin och passerar sedan ett blandningsschakt, där kalkvatten och kolsyra tillsätts (Figur 2.6). Beredningens huvudprocess består idag av snabbfiltrering genom sandfilter. I filtratet från sandfiltren tillsätts kloramin och sedan sker desinfektion med UV-ljus före distribution till konsumenterna. Bortsett från UV-behandling som bygger på principen inaktivering saknas i dagsläge ytterligare en godkänd mikrobiologisk barriär i beredningsprocessen. Aktuella riskanalyser enligt GDP och MRA visar tydligt att nuvarande beredning har för låg barriärhöjd mot samtliga patogenklasser, dvs. bakterier, virus och patogena protozoer (se Figur 2.5).



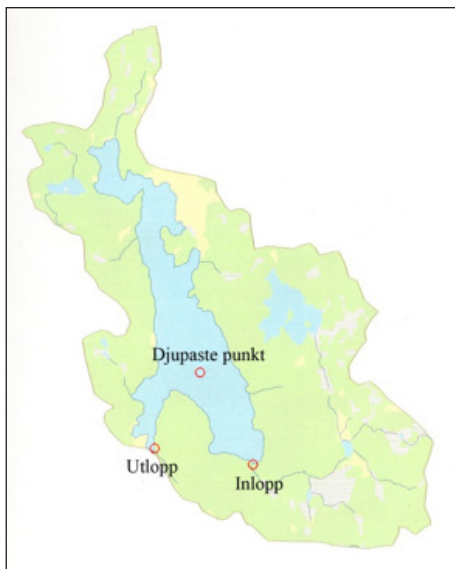
Figur 2.5 Kvarnagårdens vattenverk har två barriärer mot mikrobiell påverkan, där UV-ljuset kräver låg absorbans i dricksvattnet för att fungera optimalt. Mot bakgrund av ökade halter organiskt material i råvattnet och fördjupade kunskaper om mikrobiologiska risker avser VIVAB att undersöka hur antalet barriärer kan öka i beredningen.



Figur 2.6 Processbild över Kvarnagårdens vattenverk

2.4.1 Sjön Stora Neden

Inlandsjön Stora Neden ligger 20 km från Kvarnagårdens vattenverk och är omgiven främst av skogsområden med blandskog. Sjöns avrinningsområde motsvarar runt 17,5 km². Sjön består av en grundare, nordlig del och en djupare, sydlig del (medeldjup: 19,3 m, maxdjup: 57,0 m). Både in- och utlopp ligger i sjöns södra delar (se Figur 2.7).

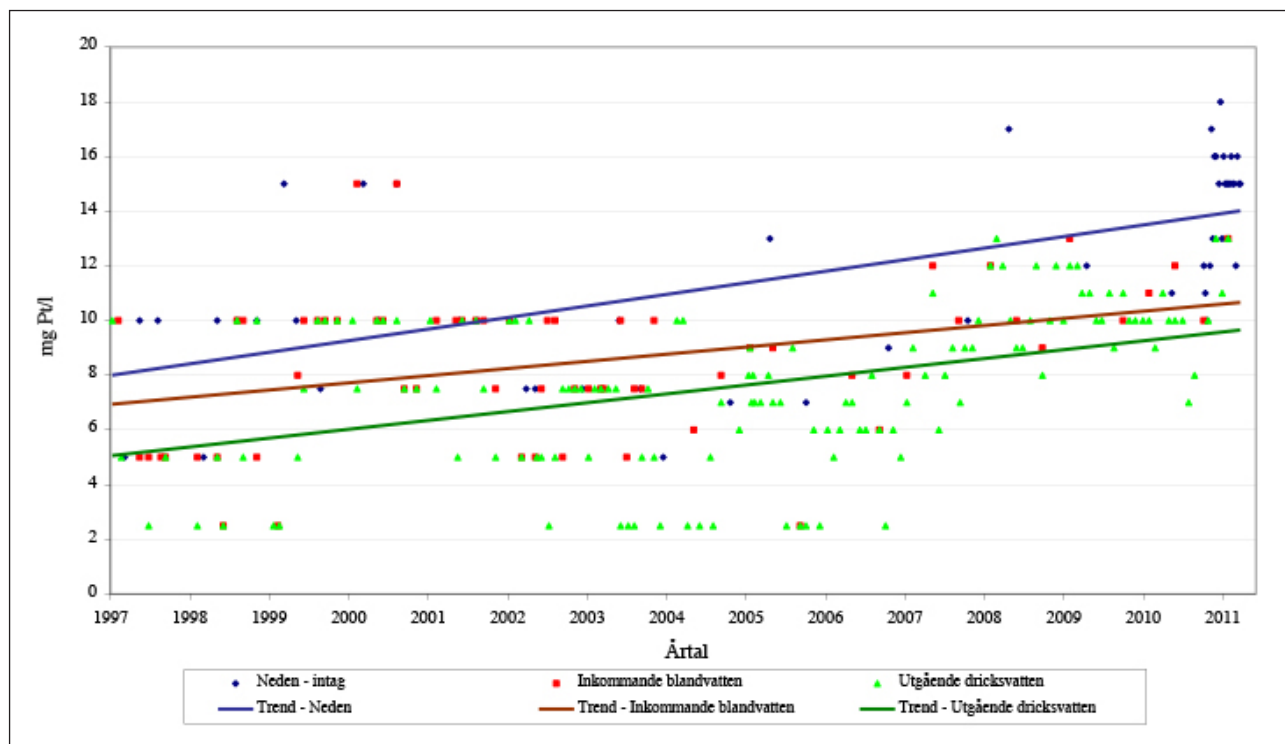


Figur 2.7

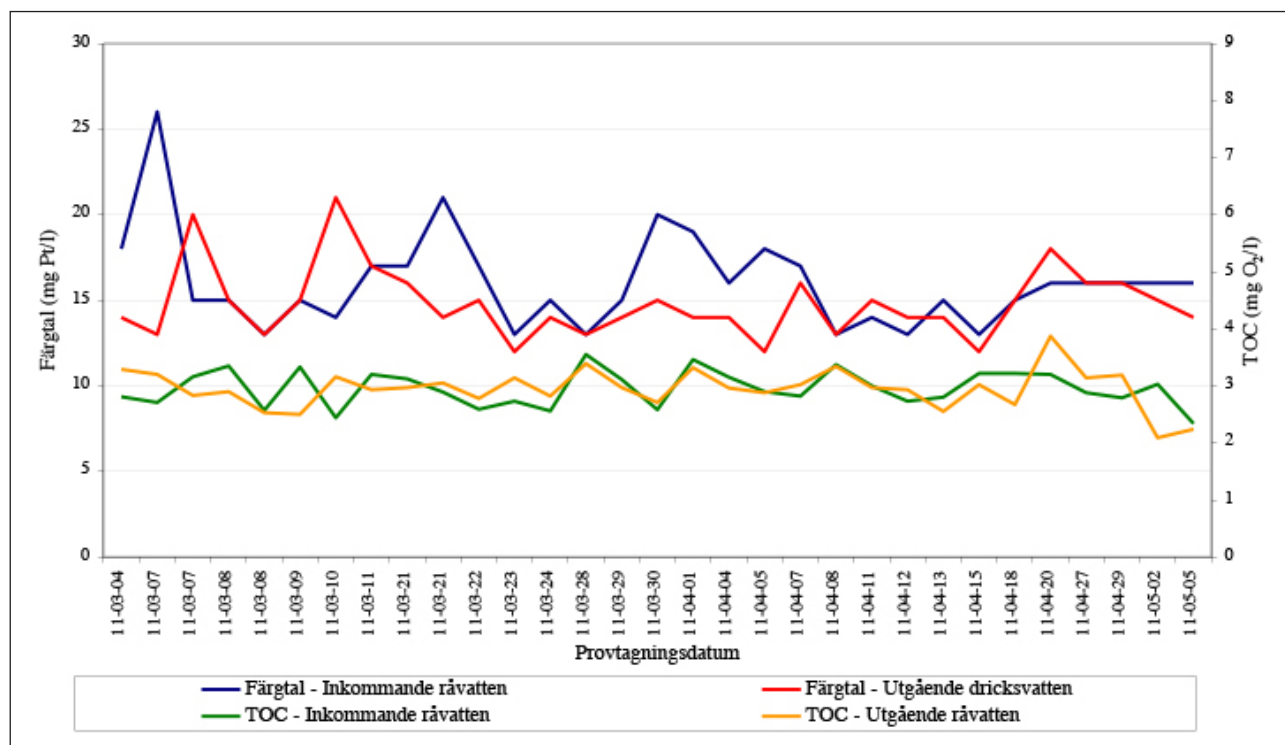
Karta över Stora Neden med in- och utlopp samt djupaste punkt markerade (Wilander & Willén, 2002).

Med en totalvattenvolym på 61,1 Mm³ ligger den teoretiska omsättnings-tiden av vattenmassorna på 7,4 år. Stora Neden klassificeras som oligotrof sjö och den långa uppehållstiden har hittills inneburit låga halter av naturligt organiskt material (NOM), som främst består av färglösa fulvosyror. I samband med den pågående brunifieringen av vattendrag i större delar av Skandinavien, har det även noterats en stigande trend av färgtal och COD i ytvattentäkten för Kvarnagårdens vattenverk. En sammanställning av his-

toriska mätvärden för Stora Neden indikerar en stigande trend på färgtal och COD i ytvattnet. Under tidsperiodsperioden 1997 till 2011 (se Figur 2.8) har t.ex. färgtalet ökat från i medel 8 till 14 mg Pt/l, vilket motsvarar en ökning på 75 %. Med nuvarande dricksvattenberedning uppnås ingen nämnvärd reduktion av humusämnen (se Figur 2.9).



Figur 2.8 Diagram över trender av färgtal, 1997–2011



Figur 2.9 Reduktion av färgtal och TOC med befintlig beredning på Kvarnagårdens vattenverk

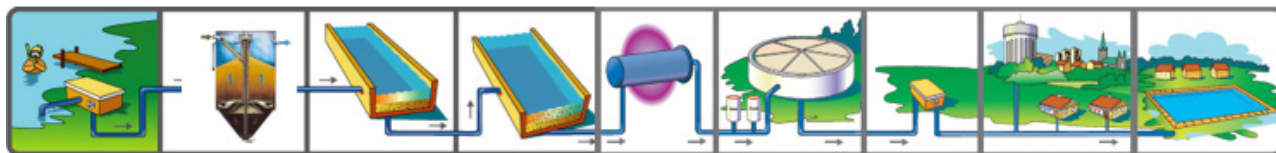
2.5 Råberga vattenverk

Råberga vattenverk är det andra av Linköpings två ytvattenverk (Figur 2.10). Verket byggdes 1920 men har kontinuerligt byggts ut och byggts om under årens lopp. Vattenverket producerar ca 10 000 m³ dricksvatten/dygn i nuläget, men genomgår en ombyggnation som tillåter verket att producera upp till 45 000 m³ dricksvatten/dygn. Genom denna kan Berggårdens vattenverk och Råberga vattenverk uppnå full redundans, d.v.s. ersätta varandra helt om behov skulle uppstå.

Vattenverket är beläget strax intill Stångån, som också är råvattentäkt. Inledningsvis renas vattnet genom kemisk fällning. Vattnet har tidigare pumpats till fällningssteget där aluminiumsulfat och vattenglas har doserats. De kemiska flockar som har bildats efter kemikalietillsatsen har sedimenterat i sedimentationsbassänger och avskilts på detta sätt (vilket var läget under försöken på vattenverket). Reningsprocessen har numera byggts om till kontinuerliga kontaktfilter, men den ursprungliga sedimentationsdelen finns kvar och ska rustas upp för att kunna användas vid krav på högre produktionskapacitet.

Vattnet filtreras sedan genom snabbfilter (i skrivande stund ej i drift). Sanden i dessa kommer i framtiden att ersättas med granulerat aktivt kol (GAC) för bättre lukt- och smakavskiljning. Därefter kommer snabbfiltren åter att tas i drift.

Vattnet pumpas sedan till långsamfiltren. En förstärkning av antalet mikrobiologiska barriärer genom tillbyggnad av UV-behandling efter långsamfiltreringen kommer att ske under det närmaste året. Därefter sker en slutalkalisering med lut och en klorering med natriumhypoklorit innan dricksvattnet pumpas ut på ledningsnätet som är gemensamt för Linköpings båda vattenverk.



Figur 2.10 Råberga vattenverk (Tekniska verken i Linköping AB, www.tekniskaverken.se)

2.5.1 Stångån

Stångån börjar i norra Småland och flyter norrut tills den når Roxen. Vattendraget rinner genom skogsmarker med en del inslag av jordbruk. Den rinner genom delar av Linköping innan den når fram till vattenverket. Stångån är påverkad av dagvattenutlopp och påverkan av det omkringliggande jordbrukslandskapet med lerjordar gör att kraftiga men oftast kortvariga färg- och turbiditetsvariationer i råvattnet förekommer, oftast i samband med nederbörd eller snösmältning.

3 Använda membran

Inom ramen för GenoMembran har fyra olika membranmoduler används för pilotförsök på vattenverken. Nedan följer först specifikationer av dessa och sedan beskrivningar av de olika pilotanläggningarna. För mer ingående bakgrundsinformation om membran finns beskrivning av UF i SVU rapporter Nr 2009-11 och Nr 2011-05.

3.1 HFNF: Pentair HFW 1000

HFW 1000 (Color Removal Package, membrankoncept utvecklat av Pentair X-Flow) är ett nytt nanofilter av hålfibertyp; till skillnad från traditionella spirallindade membran kan detta backspolas. Dessutom är membranet konstruerat av ett material som inte oxideras av klor, och kan därför tvättas och desinficeras med natriumhypoklorit. Denna modul släpptes på marknaden under 2013. Den är framtagen för att reducera färg i ytvatten utan att påverka hårdheten i någon större utsträckning. Membranet består av modifierat polyetersulfon (SPES) och är hydrofilt.

HFW 1000 består av ca 10 000 spagettliknande fibrer med en inre diameter på 0,8 mm. Den totala membranytan uppgår till 40 m², samtidigt som själva modulen är 1,5 m lång och 0,2 m i diameter. Det är ett vertikalt membran, och cirkulationsflödet pumpas uppifrån och ner. Den har en molekylär ”cut off” (nominal molecular weight cut-off, MWCO), det vill säga minsta storlek som membranet avskiljer på 1 000 Dalton, (1 kDa), ungefär motsvarande en molekylvikt på 1 000 g/mol. Virusavskiljningen är enligt producenten 4 log, och bakterieavskiljningen ligger på 6 log. Varje enskild modul bör ha ett rejektflöde av samma storlek som permeatflödet, men vattenutbytet kan utökas genom en så kallad julgransprocess (rejektflödet från första steget av membran blir matarvatten till nästa).

3.2 UF: Pentair Aquaflex

Aquaflex (Pentair X-flow) är på många sätt lik HFW 1000. Det som skiljer dem åt är att den har ca 14 000 fibrer vilket ökar dess membranyta till 55 m². MWCO för detta ultrafilter är 150 kDa vilket medför att den inte avskiljer NOM utan tillsatts av fällningskemikalie. Den kräver däremot inget rejektflöde, utan körs i direktfiltreringsläge (eng. dead-end), med vattenförlust endast vid backspolning och kemisk tvätt. Bakterie- och virusavskiljningen ligger på samma nivå som för HFW 1000 medan materialets egenskaper är något annorlunda då själva membranytan är tillverkad av en annan typ av polyetersulfon (PES).

3.3 UF: Koch PMPW™-10

Membranmodulen 10-48-35-PMPW består av semi-permeabla hållrumsmembran av typ polysulfon med en MWCO på 100 kDa och en total membranarea på 52,4 m². Den kommersiella testmodulen är ca 270 mm i diameter, 1,2 m lång och innehåller drygt 20 000 fiber med en innerdiameter på 0,9 mm. Specifierade transmembrantryck (TMP) för bästa bruttoflux (≤ 115 l/m²h) ligger på 2,4 bar, medan maximal TMP vid backspolningar inte får överskrida 1,4 bar. UF-membranet är godkänt som mikrobiologisk barriär enligt amerikanska standardkrav (Safe Drinking Water Act) gällande 4-logreduktion av *Cryptosporidium*, *Giardia* och virus. Membranmaterialet är dessutom kemikalieresistent och tål pH-variationer (pH 1,5–13) samt exponering med klor (maximal 200 ppm vid pH 9,5 eller högre i samband med tvättar).

3.4 Spirallindad NF: Dow NF 270-4040

NF 270-4040 är ett spirallindat membran. De saknar därmed de fördelar som hålfiber har. Det är en relativt välanvänd process på grund av dess goda avskiljning av organiskt material (MWCO på 0,3 kDa). Det innebär att den även är en god mikrobiell barriär, men den tar även bort en stor del av metallinnehållet.

4 Pilotanläggningar

Tre pilotanläggningar från Pentair (Pentair NF Pilot 80, QuickScan och Water Miracle) och en UF-pilot från Björks rostfria användes vid försöken med hålfibermembran, och en anläggning som konstruerats av Veolia Water användes vid försöken med spiralmembranet. Pentair Water Miracle och UF-piloten från Björks rostfria är anläggningar som arbetar enligt dead-end princip, vilket innebär att man inte har ett kontinuerligt uttag av retentat (rejekt), utan att koncentrat intermittent förträngs genom backspolning av membranet. QuickScan har en liknande uppbyggnad som Water Miracle, men liksom anläggningen från Veolia Water arbetar den med tvärströmsflöde vilket begränsar koncentrationspolarisationen vid membranet. Pentair NF Pilot 80 är en flexibel anläggning, och båda typer av processer kördes i denna.

4.1 UF/HFNF-pilot

UF/HFNF pilot (Pentair NF Pilot 80) har byggts i en 20 fots (2,4 m x 6,1 m) isolerad container. Denna typ av konstruktion medger att den lätt kan installeras där den önskas, och kan flyttas med hjälp av lastbil. Endast trycksatt inflöde (1–2 bar), avloppsledningar och elanslutning behövs innan den kan sättas igång. Den har byggts och ägs av Pentair X-flow från Nederländerna (svenska Purac är deras samarbetspartner). Endast ett förfilter på 300 µm används som förbehandling i piloten, och denna grovsil möjliggör matning med vatten direkt från en ytvattenkälla.

Piloten är ett komplett system med styrdator som dessutom kan kontrolleras och styrs på avstånd genom en GSM-anslutning. I anläggningen (se Figur 4.1) finns också alla tankar som behövs: matartank (med omrörare), permeattank och fyra kemikalietankar som skyddas i ett skåp. Tre av kemikalierne kan doseras i matartanken: fällningskemikalie (varierades), syra (saltsyra) och bas (natriumhydroxid). Tre av kemikalierne kan doseras in i permeatflödet vid kemikalietvätt: syran, basen och natriumhypoklorit. Det finns två tvättrutiner beroende på vilken modul som används. Dessutom tvättas modulerna regelbundet i en så kallad hydraulisk tvätt. Anläggningen är försedd med fyra olika pumpar; matarpump, permeat- och backspolningspump, cirkulationspump och en mindre pump för tvätt.

Systemet har plats för att ansluta en membranmodul, antingen en HFW 1000 eller en Aquaflex. Det går att byta enkelt mellan dessa, eftersom skalen har samma storlek och dessutom finns det två olika program i styrsystemet som hanterar skillnaderna i processerna mellan de båda modulerna.

Den största skillnaden mellan processen för HFW 1000 jämfört med Aquaflex är tvärströmsflödet för HFW 1000. Det används för att minska koncentrationspolariseringen vid membranets yta och på så sätt förhindra en förhöjd koncentration av ämnena som ska avskiljas vid membranets yta. Det är därmed ett flöde som cirkulerar över membranet, och det är en del av denna som släpps ut som rejekt (samma mängd som permeat) och som

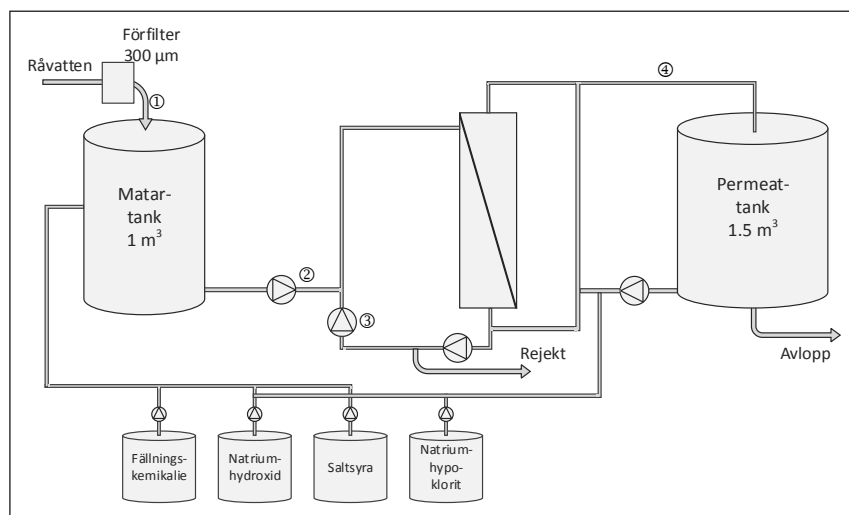
fills på med råvatten innan det pumpas in i membranmodulen. På grund av dess låga MWCO klarar den även att avskilja organiskt material i tillräcklig utsträckning för att det inte ska krävas fällningskemikalie för att minska färgen. För att lyckas med färgreduktion av Aquaflex krävs någon form av fällningskemikalie, men å andra sidan kan detta membran köras utan tvärström och rejekt.

Piloten är försedd med diverse mätare på de olika strömmarna: flöden och tryck mäts före och efter membran, i cirkulation och blödarflöde. Den har även nivå- och temperaturmätare, mätare för konduktivitet, pH samt turbiditet på olika platser i processen.

Det finns totalt fyra provpunkter i piloten för kemiska och bakteriella prover:

1. Råvatten efter grovsil
2. Matarvatten efter tank
3. Koncentrat/recirkulation
4. Permeat

Endast max tre punkter har provtagits samtidigt: vid körning med Aquaflex användes inte provpunkt 3 eftersom det inte finns någons cirkulation; vid körning med HFW 1000 (eller Aquaflex utan kemikalie) togs inte provpunkt 2 eftersom det då inte är någon skillnad mot inkommande vatten.



Figur 4.1 Schematisk ritning över UF/HFNF-piloten. Siffrorna anger provpunkter

4.1.1 Hydraulisk tvätt

Den hydrauliska tvätten är i tre steg: den spolas uppifrån och ner, spolas nerifrån och upp med assistans av luft, varpå den backspolas samtidigt som den spolas på matarsidan. Detta gjordes var 20e till 30e minut för Aquaflex och en gång i timmen för HFW 1000.

4.1.2 CEFF – Chemical Enhanced Forward Flush

CEFF användes för HFW 1000. Denna tvätt finns både som en A-variant och en B-variant. CEFF A tvättar membranet med ca 200 ppm klor i form av natriumhypoklorit samtidigt som pH höjs till ca 12 med hjälp av natri-

umhydroxid. CEFF B är en syratvätt för vilken pH sänks till ca 2 med hjälp av saltsyra. Med den generellt låga hårdheten i svenska råvatten behöver CEFF B sällan användas, utan det räcker som regel med en CEFF A regelbundet. HFW 1000 behöver tvättas varje till varannan dag beroende på belastning.

CEFF (båda varianterna) börjar med att membranet och cirkulations-systemet fylls med permeat blandat med aktuell kemikalie. Det cirkuleras sedan långsamt av en fjärde mindre pump i en timme. Efter det töms allt kemikalieblandat vatten ut innan membranet spolas och backspolas under totalt ett par minuter.

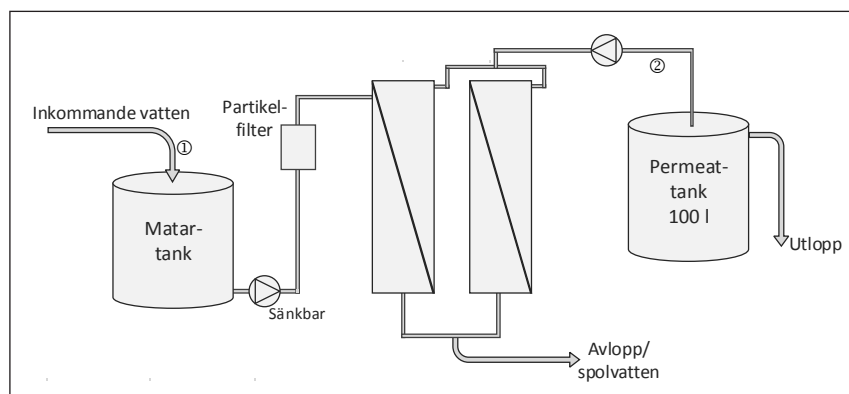
4.1.3 CEB – Chemically Enhanced Backwash

Denna tvätt användes för Aquaflex. CEB skiljer sig från CEFF i två avseenden: kemikalien cirkuleras inte, och tiden för tvätten är kortare. Även denna har en A- och en B-variant (se ovan). Permeat med inblandade kemikalier pumpas in i membranet som får stå i tio minuter. Efter det spolas och backspolas membranet. Detta behövs oftare än CEFF, ca 1–2 ggr om dagen. Vid fällning på membranet behövs båda typer av tvätt eftersom det då belastas med en metall (kräver syratvätt).

4.2 UF-pilot

Denna UF-pilot, med produktnamnet Water Miracle, också från Pentair, är monterad på en glasfiberställning (1,2 m x 0,8 m x 2,2 m) vilket ger en oskyddad anläggning och den placeras därför inomhus i det svenska klimatet. Piloten är bestyckad med två Aquaflex membran, som är något mindre än de ovan nämnda, med en membranarea på 40 m².

Membranen matas med vatten från en sänkbar pump, med ett extra filter innan membranerna för att ta bort eventuella partiklar i matarvattnet (Figur 4.2). Permeatet samlas upp i en 100-literstank. Från denna kan backspolningspumpen använda permeat vid backspolning, vilket görs med önskat intervall, upp till var 99:e minut är möjligt, men fabriksinställningen ligger på 10 min. Det går även att ändra backspolningstiden, som från början låg på 15 s. Membranen kan kemtvättas, men det görs manuellt genom



Figur 4.2 Schematisk skiss över Water Miracle respektive QuickScan. I QuickScanmodulen sitter endast ett membran. Siffrorna anger provpunkter

att tillsätta önskad kemikalie (basisk/oxiderande eller syra) i permeattan-
ken och därefter starta ett tvättprogram. En mindre rejektström från mem-
branen ingår i den levererade piloten, för möjligheter att använda piloten
för behandling direkt av en ytvattenkälla.

Den har två provtagningskranar i metall för matarvatten (1) och permeat
(2). Den mäter även flöde, temperatur och tryck före (matarvattnet) och
efter membranen (permeatet). Dessa sparar av en PC-logger från Intab.

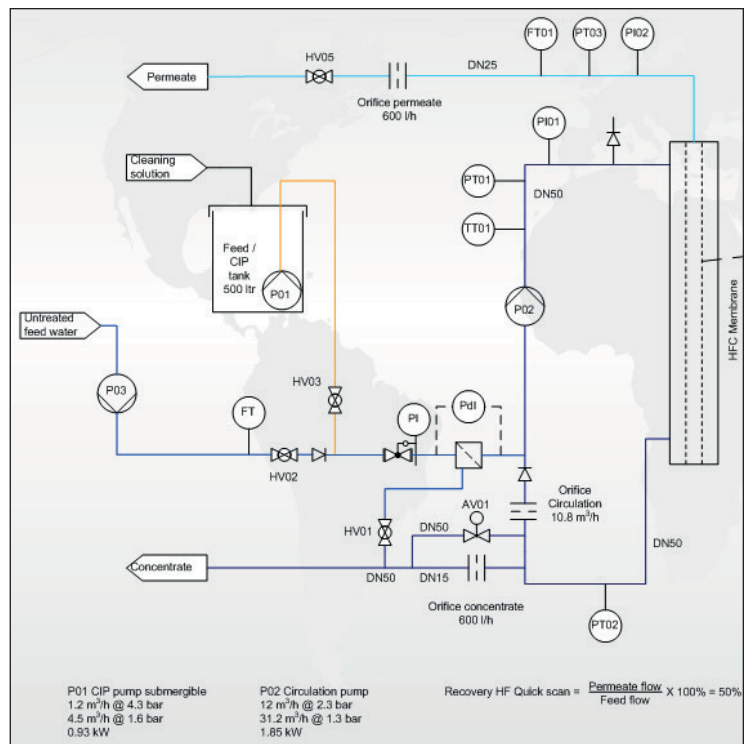
4.3 QuickScan

För indikativa testkörningar på Görvälverket och Kvarnagårdens vatten-
verk användes en förenklad pilotanläggning av typ QuickScan som lever-
rades av Pentair X-Flow. Pilotanläggningen har tagits fram för två syften: 1)
Robust och enkel nödvattenförsörjning i katastrofområden och 2) Oriente-
rande fältstudier av olika membranmoduler.

Pilotanläggningen är byggt på en öppen lättviktsram i glasfiber (300 kg)
med processledningar i PVC och består av följande komponenter:

- Matarvattenpump
- Grovsil med manuell rengöringsfunktion
- Automatisk ventil för intermittент framspolning
- Recirkulationspump
- Tryck- och temperaturgivare
- Styrskåp med modem
- Fullskalig 8-tum membranmodul

Principflödesschemat framgår av Figur 4.2 och en detaljerad processbild
redovisas i Figur 4.3. Pilotanläggningen har kapacitet på 600 l/h (permeat-

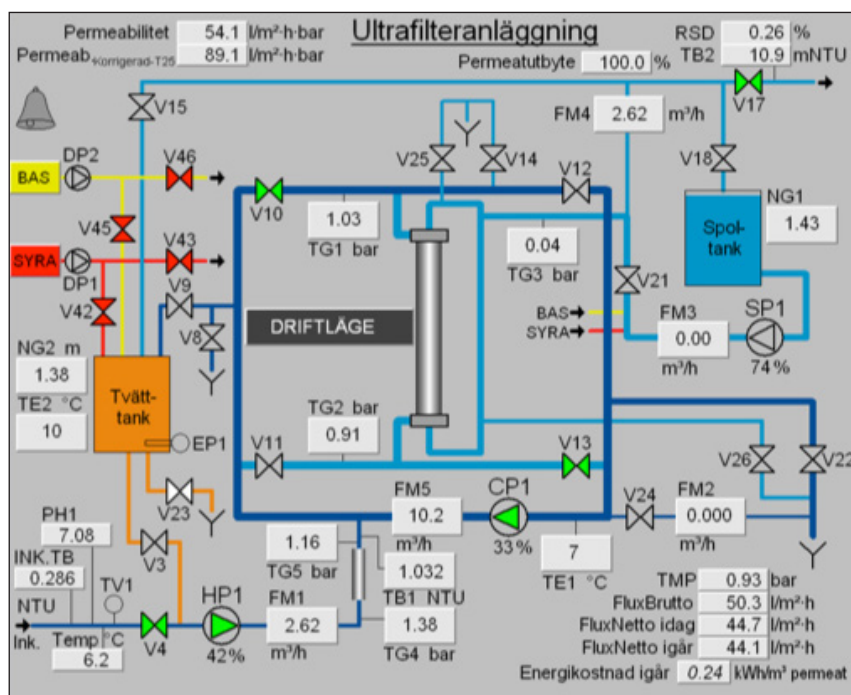


Figur 4.3 QuickScan-pilot (tv) och processflödesschema (th)

produktion). Den hydrauliska belastningen med avseende på flux och utbyte är mekanisk inställbar genom olika strypflänsar som kan bytas på recirkulations-, koncentrat och permeatledningar. Anläggning drivs med tvärströmsfiltrering i kombination med kontinuerligt flödesproportionellt koncentratuttag och intermittent framspolning. Automatisk backspolningsfunktion fanns ej utan membranvättar genomfördes manuellt via en extern tank där olika tvättlösningar blandades och sedan recirkulerades i pilotanläggningen via en extraanslutning på matarvattenledningen (se Figur 4.3).

4.4 UF-pilot (Kvarnagården)

Vid olika långtidsförsök med ultrafilter under tidsperioden juni 2010 till september 2011, användes en fullautomatiserad pilotanläggning som levererades av Björks Rostfria AB. Under försöksperioden kompletterades anläggningen med omfattande mätutrustning för kontinuerlig processövervakning, bland annat en högupplöst turbiditetsmätare (lasernefelometer) för detektion av mycket små turbiditetsförändringar i permeatet (mätområde: 0,001–5,0 mNTU). Pilotanläggningen omfattade tre processsteg: 1) in-line koagulering, 2) förfiltrering och 3) UF-membranfiltrering. Insamling av mätvärden, processövervakning och fjärrstyrning skedde via vattenverkets befintliga datoriserade styr- och reglersystem. Processuppföljning av olika testkörningar omfattade bl.a. följande kategorier: Membranprestanda, vattenkvalitet och energiförbrukning (se Figur 4.4).



Figur 4.4 Flödesschema: UF-pilotanläggning (processövervakning)

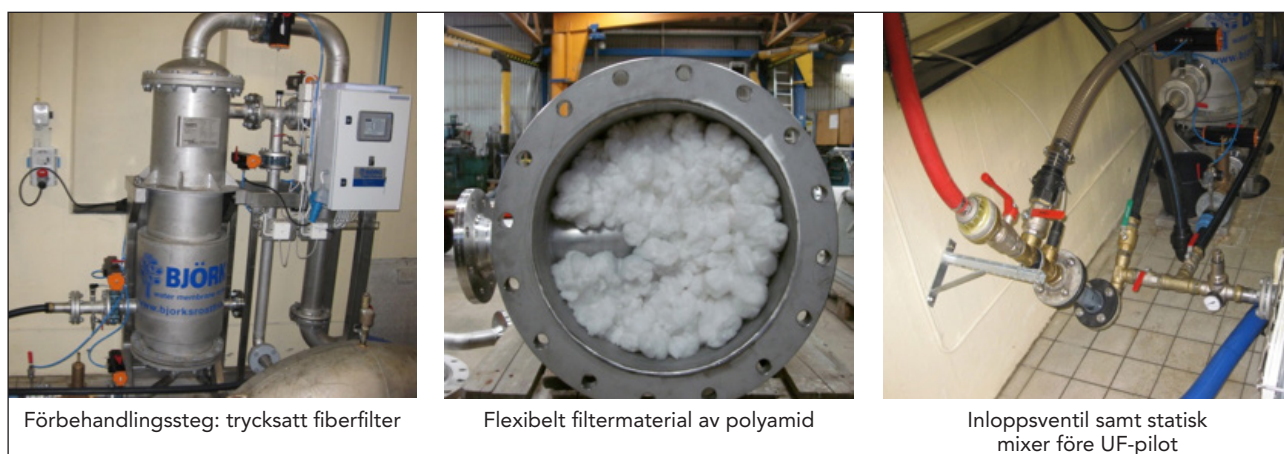
Matarvattnet till pilotanläggningen leddes direkt från inkommande råvattenledningar på vattenverket för att uppnå representativa driftförhållanden avseende rådande vattenkvalitet och tryckförhållanden. Valbar tillsats av koagulanter skedde flödesproportionell med efterföljande statisk mixer på

inkommande matarvattenledning till piloten. Förbehandlingssteget bestod av ett trycksatt fiberfilter 3FM® (Flexible Fiber Filter Module) med en cut-off på 5–10 µm. Detta fiberfilter backspolades med råvatten och trycksatt luft efter förinställda intervaller. Det fanns även möjlighet att förbigå förbehandlingssteget för att leda matarvattnet direkt till UF-pilotanläggningen. Filtratet från fiberfiltret eller matarvatten utan förbehandling passerade sedan ett patronfilter (150 µm) innan det leddes till en trycksatt ultrafiltermembranmodul. Både förbehandlingssteget och UF-piloten var dimensionerade för en maximal kapacitet på 6 m³/h, vilket motsvarande 1 % av det genomsnittliga dygnsflödet på Kvarnagårdens vattenverk.

Pilotanläggningen kunde köras med tre olika driftfall för membranfiltrering:

1. Direktfiltrering (dead-end)
2. Tvärströmsfiltrering med kontinuerlig konzentratuttag och
3. Tvärströmsfiltrering med intermittent framspolning.

Vid driftfall 2 och 3 recirkulerades råvattnet i membranmodulen för att höja flödes hastigheten över membranytan. Membranmodulen backspolades automatisk med eller utan kemikalier vid inställbara tidsintervaller och/eller tryckfall över membranmodulen. För CEBs (Chemically Enhanced Backwash, kemiskt förstärkt backspolning) och CIPs (Cleaning in Place, membranrengöring på plats) användes citronsyra, natronlut och natrium-



Figur 4.5 Förbehandling med partikelfilter (vänster, mitten) före UF-anläggning, samt ventil för flödesreglering (till höger)



Figur 4.6 UF-pilot samt utrustning för CEB

hypklorit. Ett typiskt intervall för CEBs låg på 60 min med alternerande backspolningar med syra (pH ~3) och alkali (pH: ~12, Cl: ~150 ppm). CIPs användes främst vid kritiska driftförhållanden (kraftig stigande TMP) eller efter specifika testkörningar för att rekonditionering och återställning av membranfunktionen.

4.5 NF-pilot (Kvarnagården)

Under tidsperioden november 2011 till maj 2012 genomfördes testkörningar med en QuickScan-pilotanläggning som levererades av Pentair X-Flow. Syfte var att utvärdera ett nytt koncept för kemikaliefri NOM-avskiljning via direkt nanofiltrering av råvattnet. Pilotanläggningen var bestyckad med en HFc-modul och filtreringen skedde med cross-flow och kontinuerlig koncentratuttag (50%) med intermittent framspolning (var 60:e minut).

Tabell 4.1 QuickScan-pilot: Direkt nanofiltrering på Kvarnagården

Testmodul	8" HFc (500 – 1 000 Da)
Membranyta	40 m ²
Fiber diameter	0,8
Inflöde	1,2 m ³ /h
Drifttryck	2–6 bar
Flux	15 l/m ² h
Permeabilitet	20–25 l/m ² h·bar
Permeatutbyte	50 %–78 %

4.6 Spirallindad NF-pilot

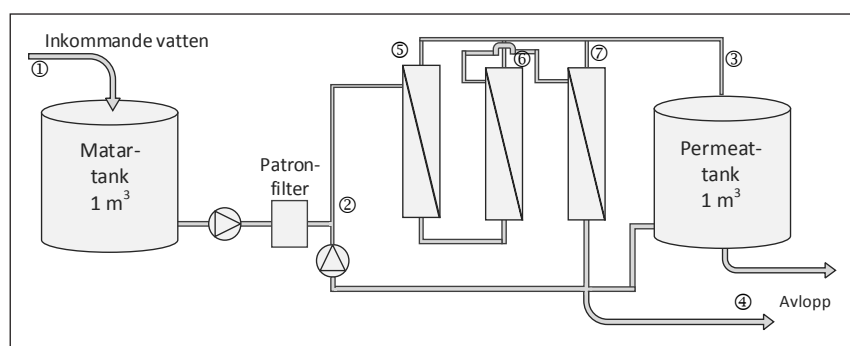
Göteborg vatten (numer Göteborgs stad, Förvaltningen kretslopp och vatten) köpte i början av 2000-talet ett par pilotanläggningar som användes inom doktorandprojekt vid Chalmers. De konstruerades av Veolia 2003. De är försedda med tre seriekopplade tryckrör som är anpassade för Dow-membran (NF 270-4040). Matarpumpen tar vatten från en tank (komplett med en nivåvipa som torrkörningsskydd), filtrerar inkommande vatten genom ett patronfilter på 10 µm innan den når cirkulationen. Permeatet samlas upp i en tank efter membranen, från vilken vatten kan tas för spolning av membranen. Även denna tank är försedd med en nivåvipa. Anläggningen är försedd med en cirkulationspump som med hjälp av ventiler även kan användas som pump för spolning av membranen. Spolningen ställs in med automatiskt mellanrum, men spolningen uteblir om vattennivån i permeat-tanken är för låg.

Eftersom dessa membran är spirallindade kan ingen backspolning göras, utan det spolas på matarsidan. Tvätt görs med sur eller basisk lösning, ingen kemikalie som innehåller klor får användas på dessa membran. Däremot finns möjlighet att tvätta med andra kommersiella rengöringsmedel, men inget sådant användes inom ramarna för detta försök. Tvätt görs med hjälp av en 100 liter tank som sitter ihop med resten av anläggningen på dess stomme. pH justeras till pH 2 eller pH 11, sedan tvättas membranen under önskad tid (t.ex. tre omgångar under ca 2 h).

Dessa täta membran kräver en god förbehandling av ytvattnet. Partiklar och större flockar måste avskiljas, och nivåerna av lösta ämnen måste minskas för att inte membranerna omedelbart ska sättas igen. Detta täta NF-membran avskiljer väldigt mycket NOM och även en relativt stor andel mineraljoner.

På denna pilot finns ett flertal möjliga provpunkter, och alla nedan nämnda användes vid tillfällena:

1. Långsamfiltrat
2. Cirkulation (matarvatten till första modul)
3. Permeat från alla tre moduler, blandat
4. Retentat efter tredje modulen/avblödning
5. Permeat från första modulen
6. Permeat från andra modulen
7. Permeat från tredje modulen



Figur 4.7 Schematisk ritning av spirallindade NF-piloterna. Siffrorna anger provpunkter

5 Resultat

5.1 Berggårdens vattenverk

5.1.1 Försöksupplägg

UF-piloten (se Figur 4.2 ovan) placerades i en kulvert på Berggårdens vattenverk, under långsamfiltrena. Vatten från långsamfiltrena (innan UV-desinficeringen) leddes till en öppen tank från vilken sedan den sänkbara pumpen matade in vattnet i anläggningen. Försöket inleddes i februari 2014 och avslutades i maj samma år.

Huvudsyftet med försöket på Berggården var att undersöka huruvida UF kunde vara ett alternativ som kompletterande mikrobiologisk barriär. Anläggningens placering var därför anpassad till behovet. Endast marginell avskiljning av annat förväntades eftersom partiklar och NOM redan till stor del avskilt tidigare i processen och UF fångar inte upp de mindre lösta ämnena som återstår. Försöket utvärderades också till stor del utifrån ett operativt perspektiv, därför har driftserfarenheterna fått en central roll.

I början av försöket var ett rejektutlopp anslutet till membranen eftersom det ingick i fabrikationen. Det släppte ut en liten del på matarsidan, längst ner i membranen som matades uppifrån, men detta utlopp stängdes så småningom eftersom det inte behövdes med så pass rent matarvatten till ett UF. Ett förinställt flöde för membranet var $2 \text{ m}^3/\text{h}$, d.v.s. ett flux på $25 \text{ l}/(\text{m}^2\text{h})$ vilket är mycket lägre än vad ett UF förväntas kunna klara. Det förinställda backspolningsintervallet på 15 min förlängdes allteftersom, tills det nådde det maximala på 99 min och backspolningstiden var alltid 15 s. Membranet tvättades med 100 ppm fritt klor ungefär en gång i månaden, men vid ett tillfälle genomfördes desinfektionen tätare då de bakteriella proverna antydde att det fortfarande växte på permeatsidan efter en tvätt.

5.1.2 Labbanalyser

Alla analyser som var möjliga att göra på plats gjordes i Tekniska verkens eget ackrediterade laboratorium. När de inte hade möjlighet eller tid fick de skickas till annan instans. De parametrar som analyserades under försöket var (annat laboratorium i parentes):

- Odlingsbara bakterier, 24 h, 3 och 7 dagar (vissa prover skickades till Eurofins)
- VLP och totalt antal celler (Göteborg stad, Kretslopp och Vatten)
- Transmittans, $UV_{254} \text{ nm}$
- Turbiditet
- Färg, okulärt bedömt mot referens
- Hårdhet genom koncentration av Ca och Mg
- Lukt och smak
- Konduktivitet
- pH
- Alkalinitet
- TOC

5.1.3 Erfarenhet från pilotförsöket

Detta försök genomfördes i samband med ett examensarbete, och resultaten hittas mer utförligt beskrivna i arbetet från Linköpings universitet.¹

Eftersom ultrafiltret inte hade någon inverkan på den kemiska sammansättningen i vattnet presenteras inte resultaten från dessa analyser. Vattnet hade renats till dricksvattenkvalitet innan det leddes in i membranpiloten, och filtret har därför inte verkat som en kemisk barriär, endast som en mikrobiell.

5.1.4 Mikrobiologiska resultat

Liksom i övriga försök, kunde det påvisas lyckade resultat med ultrafilter som en mikrobiell barriär. Försöket har visat på en reduktion av celler på 3 log och av virus på 4,5 log. Anledningen att reduktionen av celler inte varit större och att den var mindre än för virus beror främst på mängden i matarvattnet och den lägre gränsen för mätvärde från analyser (se Tabell 5.1). Den mikrobiella reduktionen diskuteras i detalj i kapitel 6 nedan.

Tabell 5.1 Resultat för den mikrobiologiska barriären av UF-piloten

	Feed	Permeat
Totalt antal celler (antal/ml)	100 000	< 100
VLP (antal/ml)	5 500 000	< 100
Bakterier (3 d, 22° C) (cfu/ml)	55	17
Bakterier (7 d, 22° C) (cfu/ml)	97	40

5.1.5 Driftserfarenheter

Möjligheten att ändra längden på en filtration var begränsad av pilotens konstruktion. Även om en längre filtrationscykel hade varit möjlig var den längsta tiden som användes mellan backspolningar 96 min. TMP ökade väldigt lite under försöken, endast marginellt, och som mest steg det med 0,02 bar från början av en filtration tills nästa backspolning startades. Detta redan relativt rena vatten hade kunnat köras med ett högre flux, men det var inte heller möjligt för denna pilot.

Piloten behövde tvättas med ett visst intervall på några veckor. Det berodde inte någon förändring i TMP, utan för att de bakteriella proverna visade på en stor ökning av odlingsbara bakterier i permeatet, vilket tydde på en kontaminering av permeatsidan. Vid ett tillfälle var kontamineringen rätt bred, och piloten behövde tvättas två gånger med natriumhydroxid och natriumhypoklorit två gånger för att få kontroll över de odlingsbara bakterierna.

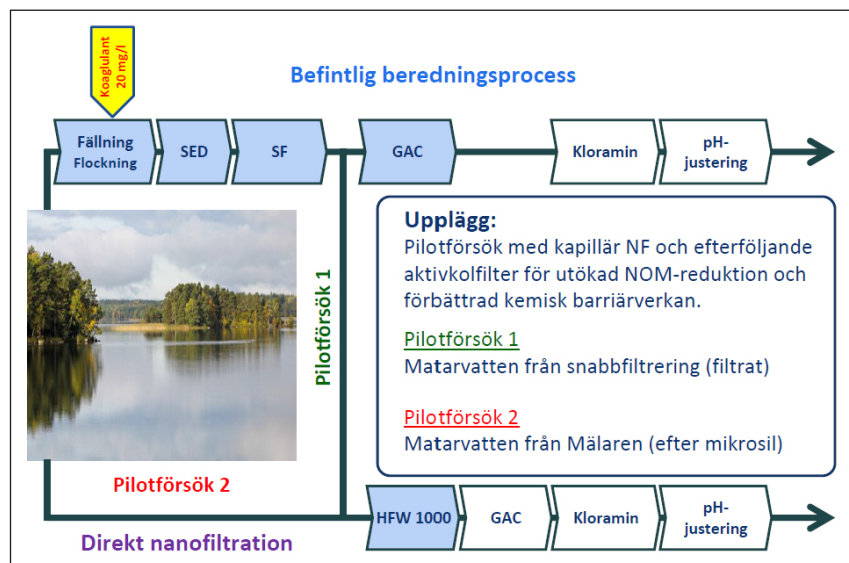
5.2 Görvälverket

5.2.1 Försöksupplägg

Ultrafiltrering provades inte vid Görvälverket. Under tidsperioden juni 2012 till juli 2014 utfördes testkörningar för nanofiltrering med olika generationer av HFW-modulen som sedan juni 2013 finns som kommersiell

¹ Einarsson, Erika 2014 Membrane Technology at Berggården's Water Treatment Plant – a pilot study, Institutionen för fysik, kemi och biologi, Linköpings universitet, Handedare: Helena Stavklint, Tekniska verken i Linköping och Robert Gustavsson, Linköpings universitet

produkt på marknaden. Långtidsförsöken genomfördes med två pilotanläggningar: QuickScan-pilot och UF/HFNF-piloten (se Figur 5.1).

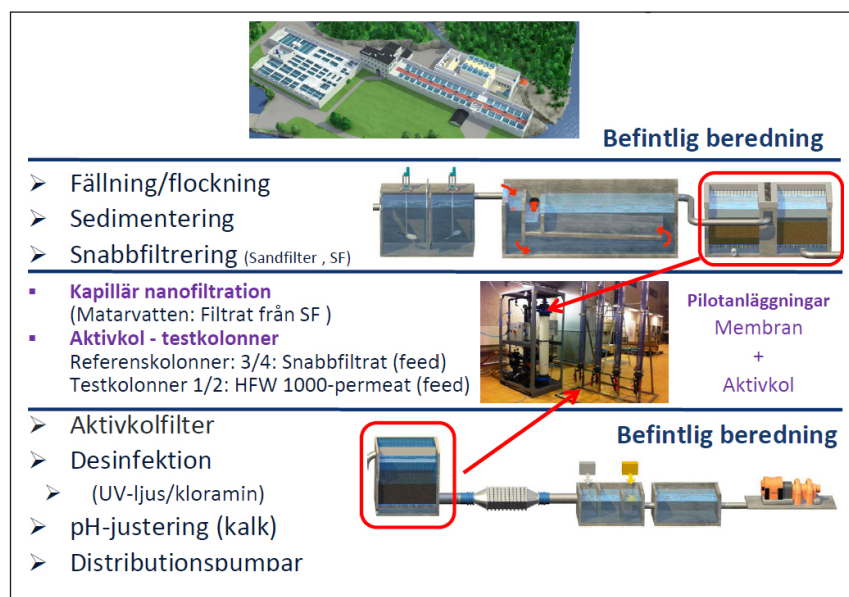


Efter fällning och flockning sedimenteras bildade flockar i SED, sedimenteringsbassänger. Därefter filtreras vattnet i snabbsandfilter, SF, före biologisk rening i kolfilter (granulerat aktivt kol, GAC).

Vid pilotförsök 1 användes filtrat från snabbsfiltren, medan sjövattnet från Mälaren användes i pilotförsök 2.

Figur 5.1 Upplägg för pilotförsök med kapillär NF på Görvälnverket.

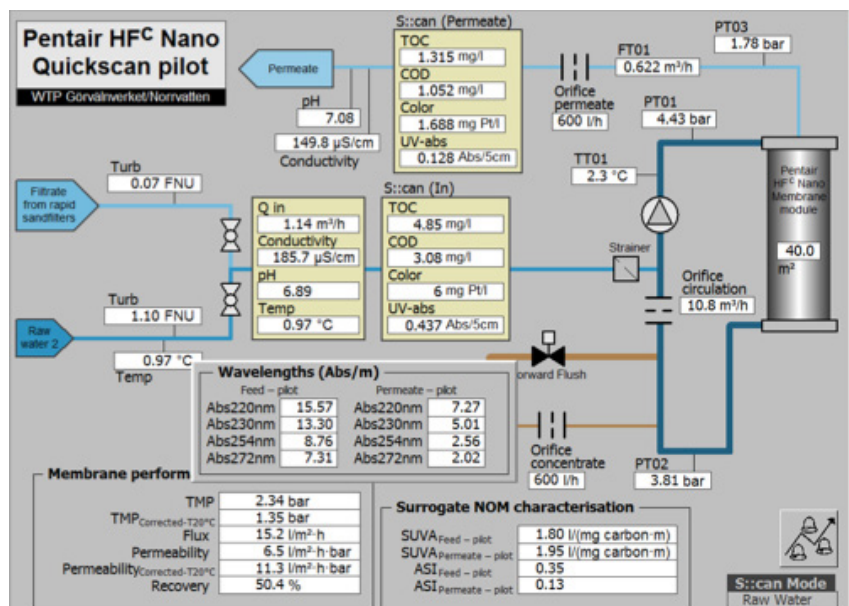
Fältstudier med QuickScan-piloten kombinerades med testkolonner för aktivkol. Både membranpiloten och referenskolonnerna för aktivkol matades med snabbsfiltrat från fullskaleprocessen. Testkolonnerna för aktivkol matades med permeat från membranpiloten. Syftet var att studera både retentionsförmågan av membranmodulen och adsorptionsförmågan på efterföljande aktivkol (se Figur 5.2).



Figur 5.2 Försöksupplägg: QuickScan-pilot

QuickScan-piloten kompletterades med diverse on-line mätare och ett övervakningssystem för att skapa en större transparens av rådande driftförhållanden. För uppföljning av NOM-retentionen i testmodulen installerades avancerade spektrofotometrar, som kan mäta absorptions i ett brett

våglängdsområde från ultraviolett ljus till långvågigt synligt ljus, både i matarvatten- och permeattanken. Insamling av mätvärden för membranprestanda och NOM-reduktion skedde via en skraddasydd undercentral kopplad till VIVAB:s övervakningssystem (se Figur 5.3).



Figur 5.3 QuickScan NF-pilot: Processövervakning

Tabell 5.2 QuickScan-pilot: Direkt nanofiltrering på Görvälnverket

Testmodul	8" HFC (prototyp) och HFW1000 (kommersiell)
Membranyta	40 m²
Fiber diameter	0,8
Inflöde	1,2 m³/h
Drifttryck	2–6 bar
Flux	15 l/m²h
Permeabilitet	10–15 l/m²h · bar
Permeatutbyte	50 %

Under tidsperioden januari till maj 2014 utfördes testkörningar med den fullautomatiserad UF/HFNF-piloten för att utvärdera direkt nanofiltrering med HFW-modulen på inkommande råvatten från Mälaren. Försöksverksamheten omfattade en låglastperiod (flux: 15 l/m²h), experiment för prognos av permeatkvalitet vid olika driftförhållanden och testkörningar för simulering av beläggning vid olika permeatutbyten.

Labbanalyser

Veckovisa stickprover på råvattnet och olika processvatten från pilotanläggningen analyserades av ackrediterat labb (Norrvatten och ALS) samt forskningslabb på SLU med avseende på:

- Färgtal
- Turbiditet
- Kemisk syreförbrukning (COD), totalhalt organiskt kol (TOC), löst organiskt kol (DOC), UV absorbans (254 nm)
- SUVA (UV absorbans/DOC) som beräknat indexvärde
- Konduktivitet

- Alkalinitet
- Hårdhet
- Luktanalyser
- Sulfat
- Långsamväxande bakterier
- 3D-EEM fluorescens

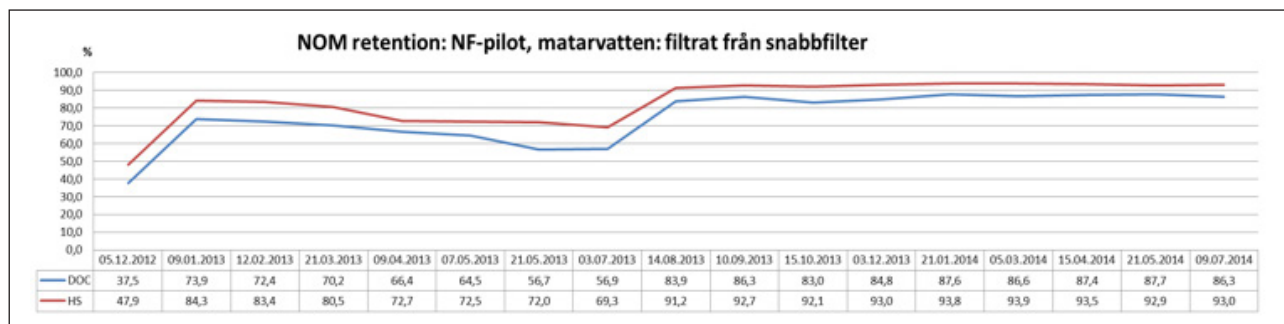
Provtagningsprogrammet fokuserade särskilt på utvärdering av NOM-retention och därför utfördes omfattande karaktärisering av NOM-fraktioner för både den befintlig beredningen och pilotanläggningarna vid totalt 18 tillfällen under hela försöksperioden med QuickScan-piloten. Vattenproverna analyserades av DOC-Labor Dr. Huber (Tyskland) med vätskekromatografi (LC-OCD, Liquid chromatography – Organic Carbon Detection) med avseende på olika storleksfraktioner och jonegenskaper:

- Biopolymerer (Biopolymers)
- Humus (Humic Substances)
- Humusbyggstenar (Building Blocks)
- Lågmolekylära organiska syror (Low Molecular-weight Acids)
- Neutrala lågmolekylära föreningar (Low Molecular-weight neutrals)
- Hydrofoba organiska föreningar (Hydrophobic Organic Carbon)

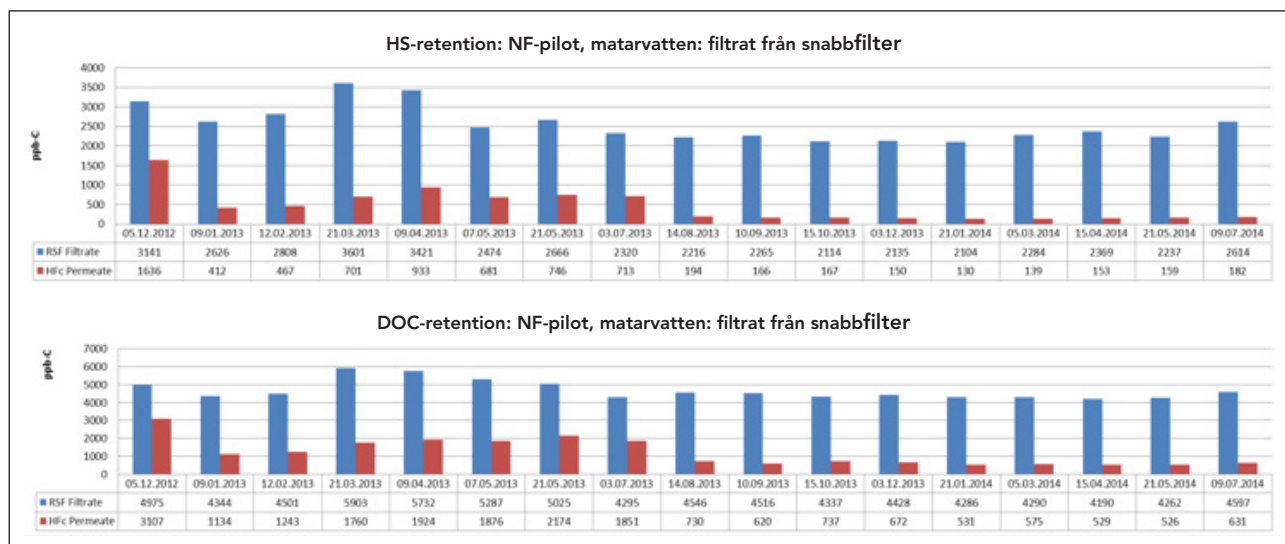
5.2.2 NOM-karakterisering – NF-Görvälverket

Långtgående NOM-karakterisering av ytvatten, inkommande råvatten och olika processvatten från pilotanläggningarna indikerar att en DOC-reduktion på 58 % (vid permeatutbyte: 50 %) uppnåddes med en kraftig minskning av biopolymerer och humus.

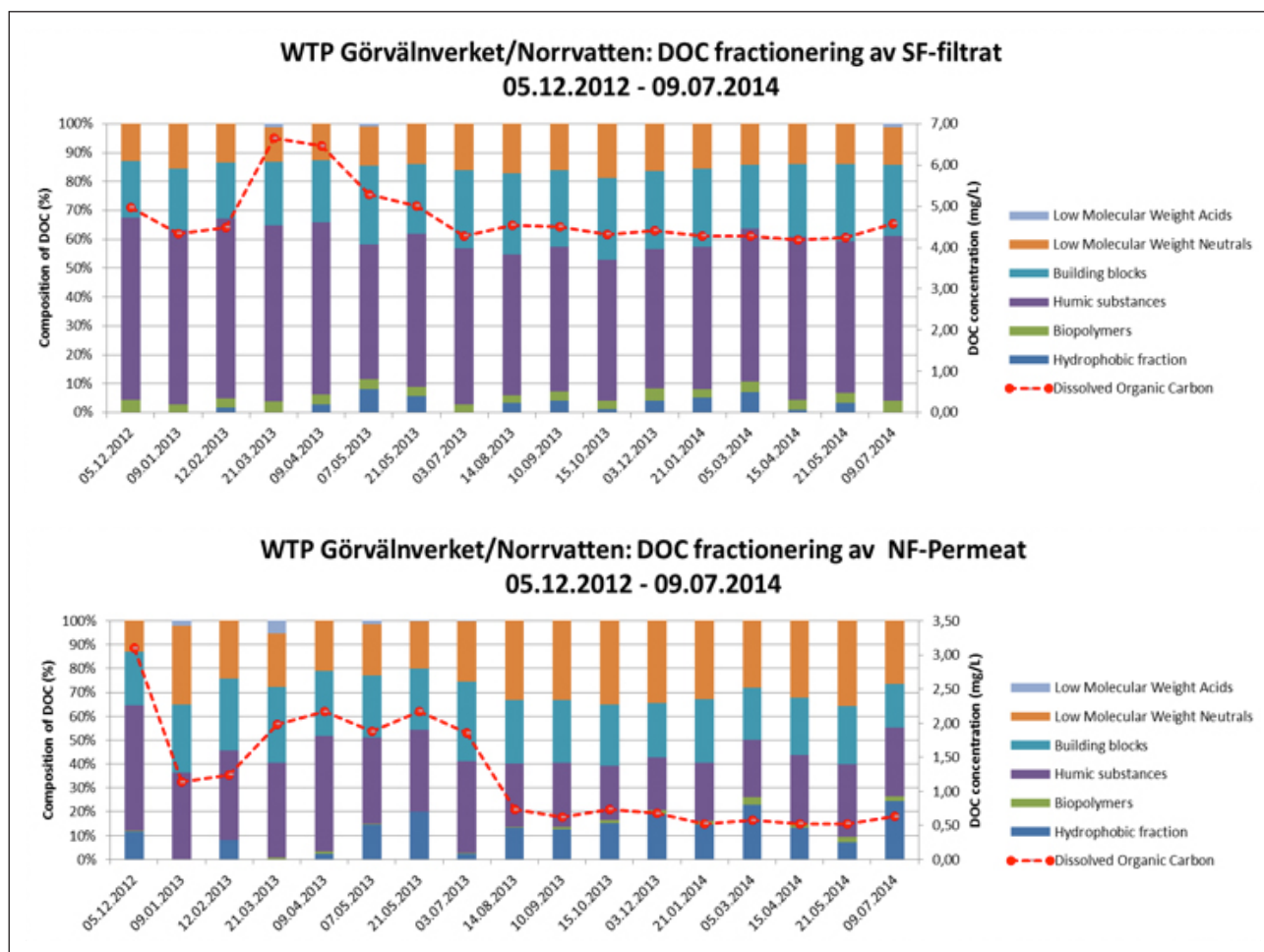
Vid testkörningar med QuickScan-piloten användes totalt tre olika testmoduler av typen HFW1000. De första två modulerna betraktades som prototyper (prototyp A: juni 12 – december 12, prototyp B: januari 13 – juni 13), medan den tredje modulen klassades som en kommersiell produkt (HFW1000: juli 13 – juli 2014). Som framgår av Figur 5.4 visade prototyperna A och B en tydlig varierande avskiljningsförmåga med reduktionsgrader för DOC mellan 37,5 till 73,9 %. Nedsatt retentionsförmåga berodde främst på användning av olämpliga rengöringskemikalier och felaktiga rutiner vid membrantvättar vilket resulterade i försämrade membranegenskaper. Däremot visade den kommersiella testmodulen stabila och höga reduktionsgrader av DOC och humussubstanser under hela testperioden (DOC-reduktion: 83,9 – 87,7 %).



Figur 5.4 Uppmätt NOM-halt efter NF-pilot (röda staplar) jämfört med filtrat från snabbfilter (blåa staplar), (QuickScan)

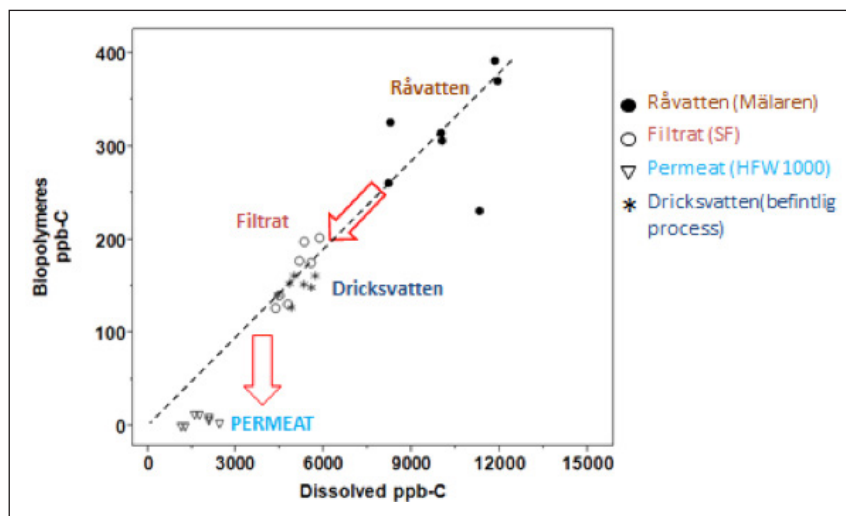


Figur 5.4 Uppmätt NOM-halt efter NF-pilot (röda staplar) jämfört med filtrat från snabbfilter (blåa staplar), (QuickScan) (fortsättning)



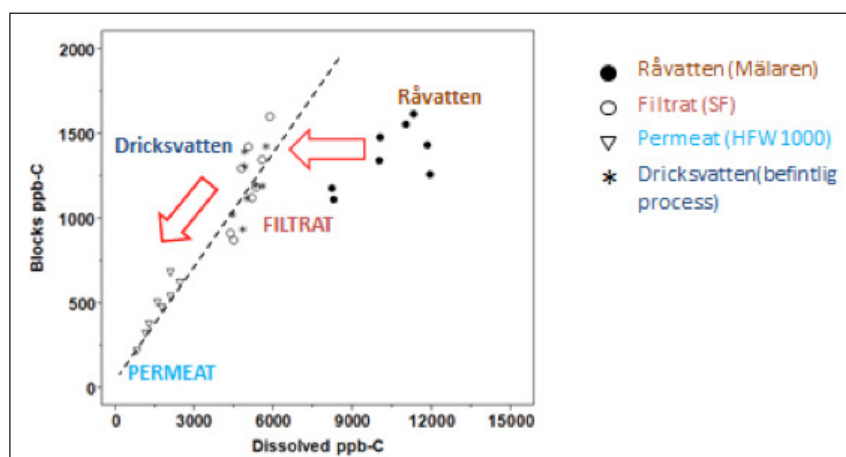
Figur 5.5 NOM-retention av NF-pilot (QuickScan.) Av figuren framgår dels säsongsmässiga variationer av DOC, löst organiskt kol, i filtratet från sandfiltren (röd linje, övre), samt att DOC i filtratet är omkring 4–5 mg/l; dels att nanofiltret kunde avskilja kol ned till 0,5–0,6 mg/l (röd linje, nedre) sedan driftförhållandena stabiliserats. Av fraktioneringen framgår att merparten av det högmolekylära kolet avskiljdes i nanofiltret (biopolymerer och humus) medan lågmolekylära organiska syror och neutrala lågmolekylära föreningar passerade genom membranet i större omfattning.

Den omfattande NOM-karakteriseringen av den befintliga beredningsprocessen indikerade ett samband mellan biopolymerer och DOC dvs. att de större biopolymererna avskiljdes proportionellt över sandfiltren efter föregående fällning, medan det skedde en nästan komplett retention över membranmodulen (se Figur 5.6).



Figur 5.6 Förhållande mellan biopolymerer och DOC

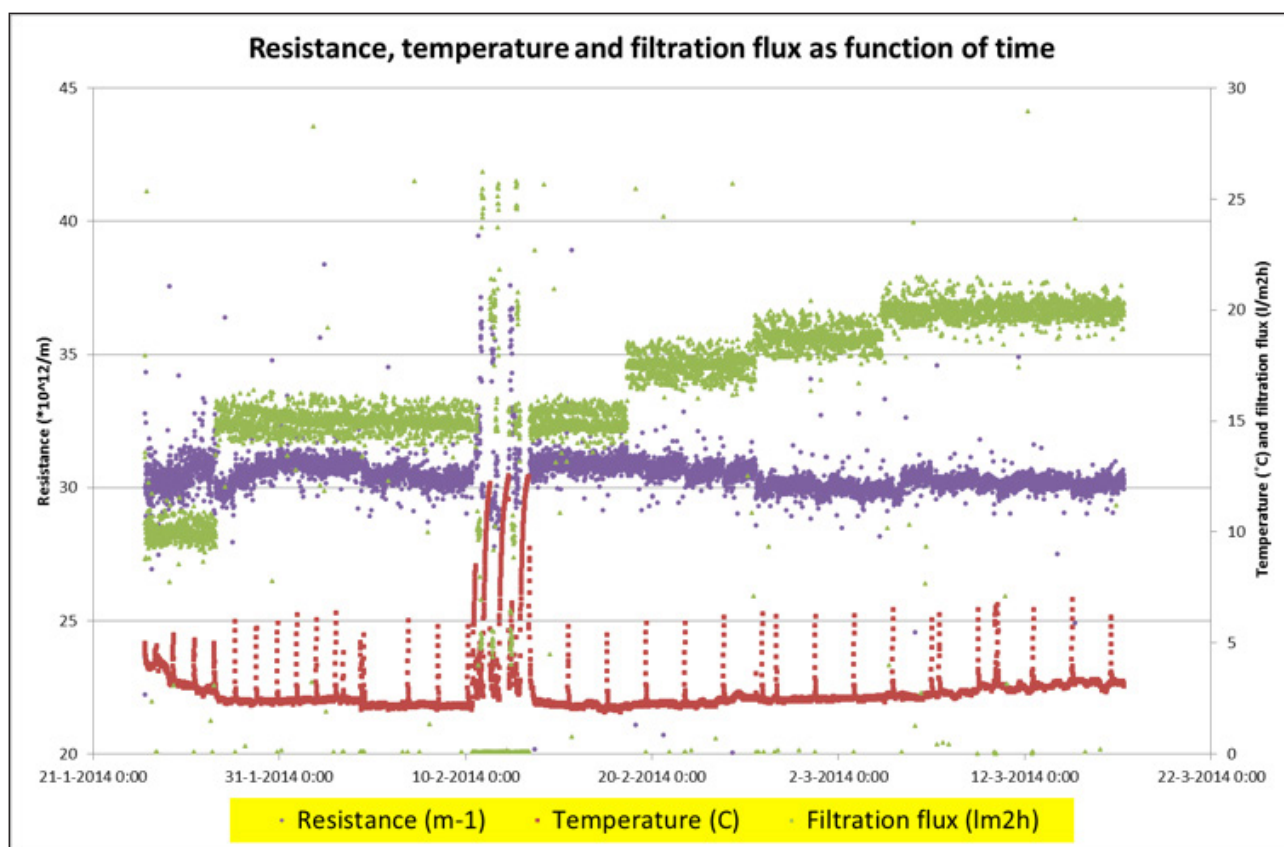
Å andra sidan konstaterades att building blocks inte kunde avskiljas med fällning och snabbfiltrering, men däremot korresponderar den proportionella avskiljningsgraden i NF-piloten väl med membranets specificerade cut-off. Det är alltså möjligt att följa hur mycket biopolymerer som finns kvar i vattnet genom att följa variationer i DOC-halten i filtrat efter snabbfiltren. Minskande DOC korrelerar med minskande halt biopolymer i snabbfiltratet och vice versa. Det är också möjligt att följa hur mycket building blocks som återstår i permeat från membran genom att följa DOC-halten i permeatet. Ökande halt DOC i permeatet motsvarar en ökande halt building blocks i permeatet och tvärtom.



Figur 5.7 Förhållande mellan building blocks och DOC

5.2.3 Driftserfarenheter – Direkt nanofiltrering

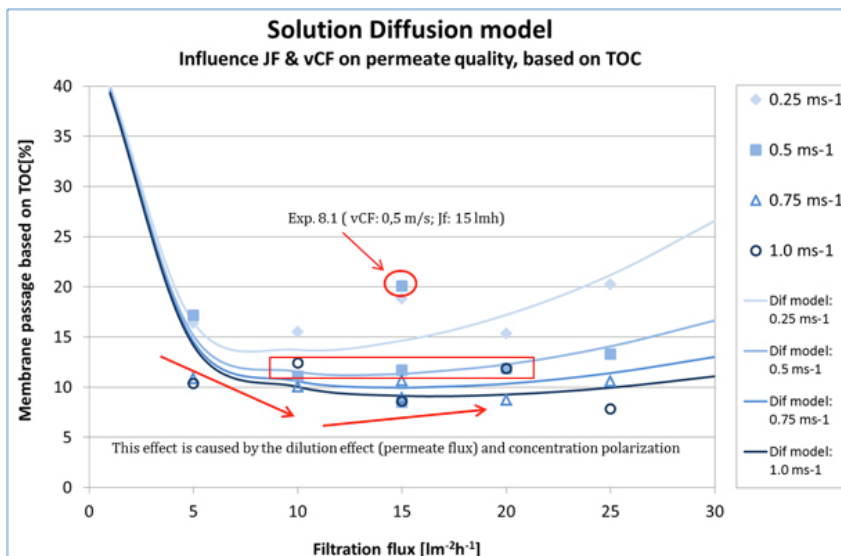
Inledningsvis valdes en låg belastningsstrategi för direkt nanofiltrering av ytvatten från Mälaren för att undvika reversibel beläggning av hålrumsmembranen. De första två veckorna tillämpades en flux på 15 l/m²h med en tvärströmshastighet på 0,5 m/s och återkommande backspolningsintervaller (hydraulisk backspolning varje 60:e min, CEBs: 48 h – 72 h). Sedan genomfördes experiment för prognos av permeatkvaliteten och därefter ökades den hydrauliska belastningen stegvis (17,5 – 18,75 – 20 l/m²h). Som framgår av figur 5.3, ökade filtrationsmotståndet under filtrationscykeln, men frekventa backspolningar med kemikalier återställde membranfunktionen. Försök med att minska CEB-intervallen ledde till temporär beläggningsökning. Därför tillämpades en CEB frekvensen på 48 h vid en flux på 20 l/m²h, vilket resulterade i en stabil membranprestanda.



Figur 5.8 Membranprestanda vid direkt nanofiltrering av vatten från Mälaren. Röd linje är vattentemperaturen, höger Y-axel. Grön linje är membranflux, höger Y-axel. Lila linje är membranresistansen, det vill säga hur mycket beläggning som byggs upp på membranet under drift, vänster Y-axel. Flux stiger med temperaturen. Membranresistansen är svagt avtagande, vilket berättar att det inte sker någon permanent uppbyggnad av beläggningar på membranytan.

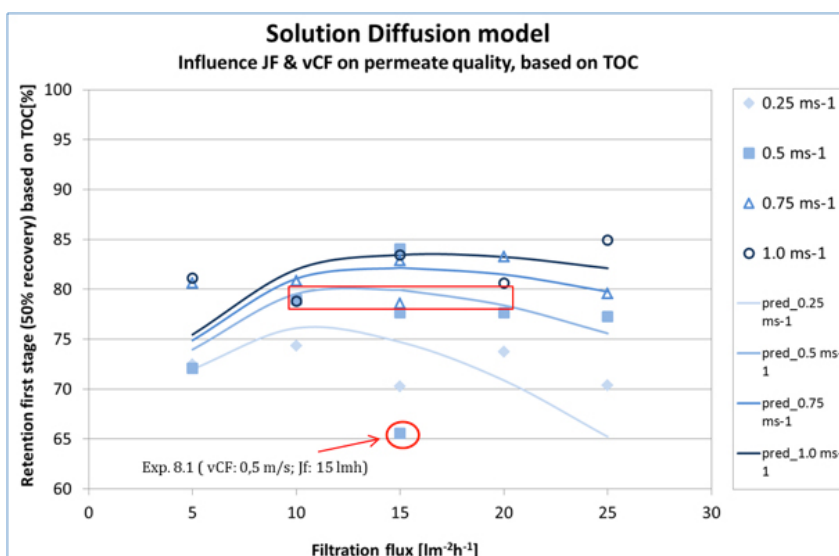
Under tidsperioden 10–12.02.2014 utfördes experiment för beräkning av diffusions- och permeabilitetskoefficienter, vilket innebar att totalt 20 olika testkörningar med varierande flux (5 – 25 l m⁻² h⁻¹) och tvärströmshastigheter (0,25 till 1,0 ms⁻¹) genomfördes i slumpvis ordning. Vid varje testkörningar togs vattenprover från matarvatten, recirkulationsflöde, koncentrat och permeat. Vattenproverna analyserades med avseende på TOC och UV₂₅₄.

I Figur 5.9 visas resultaten av uppmätta och prognostiserade nivåer av TOC som passerar membranet. Dessa stämmer väl överens förutom några enstaka avvikande värden. Det konstaterades att vid en viss tvärströmshastighet minskade först TOC-retentionen vid ökning av flux. Efter en ytterligare höjning av flux ökades TOC-passagen återigen. Denna effekt var liknande för UV-retentionen och orsakades av en utspädningseffekt (permeat flux) och koncentrationspolarisation. Utifrån ett driftsperspektiv visade det sig en tvärströmshastighet på 0,5 m/s och en fluxintervall på 8–22 l/m²h vara de optimala inställningarna för retention och energiförbrukning.



Figur 5.9 Inverkan av flux och tvärströmshastighet på avskiljningsförmågan för TOC

I Figur 5.10 visas de uppmätta retentionsgrader (matarvatten och permeat) och de beräknade avskiljningsgrader. Det syns en tydlig överensstämmelse mellan beräknade och uppmätta retention av TOC (Figur 5.10). Beräk-

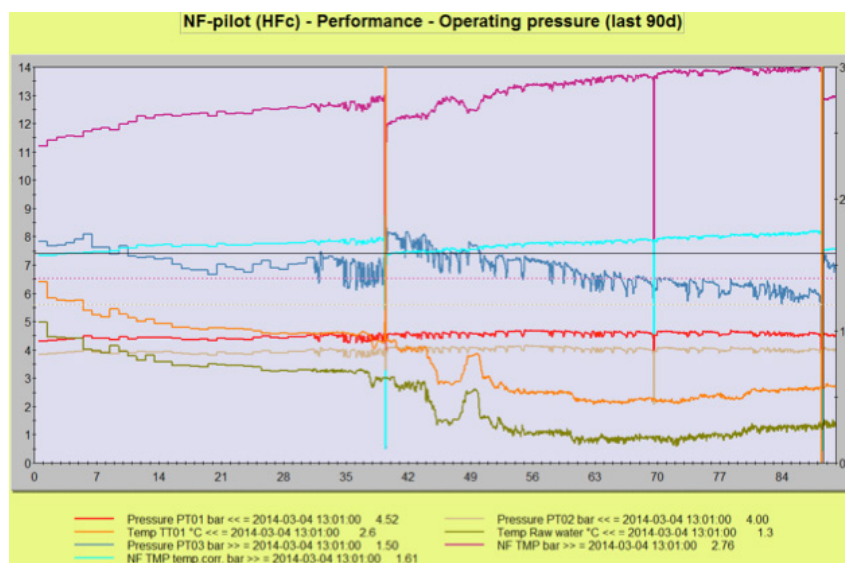


Figur 5.10 Inverkan av flux och tvärströmshastighet på TOC-retention (ett stegs process: 50 % utbyte)

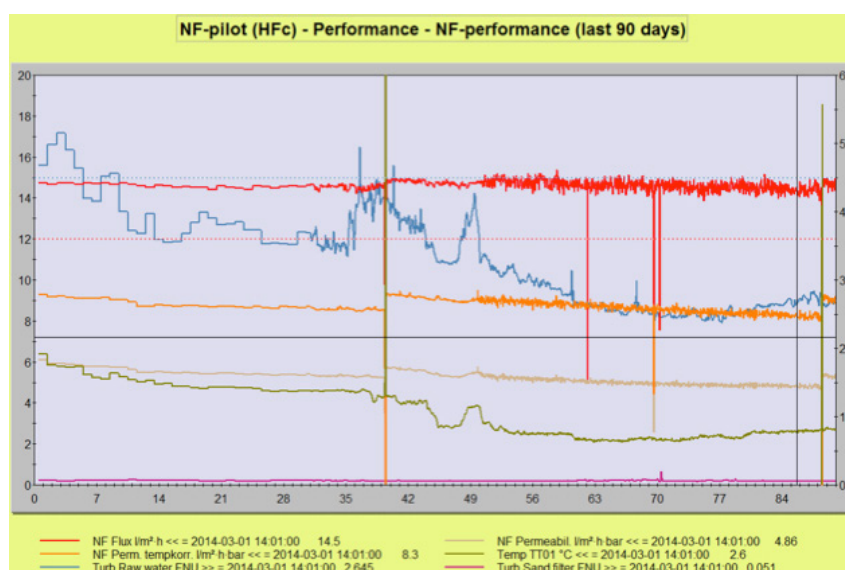
ningarna visar även att en förväntad TOC-retention vid enstegs process ligger i en intervall på 78–80 % vid en tvärströmshastighet på 0,5 m/s och en fluxintervall på 10–20 l/m²h. Retentionen i enstegs processen skulle kunna ökas ytterligare till 83 % genom ökning av tvärströmshastigheten till 1 m/s.

5.2.4 Driftserfarenheter –Nanofiltrering (SF)

Nanofiltrering av snabbfilterfiltrat tillät långa driftcykler utan risk för irreversibel membranfouling. Vid en flux på 15 l/m²h, tvärströmshastighet på 0,5 m/s, intermittert framspolning var 60:e minut och ett permeatubyte på 50 %, tillämpades en manuell CEB-intervall efter 40 till 50 dygn kontinuerlig drift. Av figur 5.6 framgår att TMP ökades under 42 dagar med 0,17 bar (1,58–1,75 bar) och permeabiliteten minskades med 1,0 l/(m²h · bar) (9,4–8,4 l/(m²h · bar)) vid låga vattentemperaturer (1–3° C).



Figur 5.11 QuickScan-pilot: tryckförluster över membranytan



Figur 5.12 QuickScan-pilot: Permeabilitet

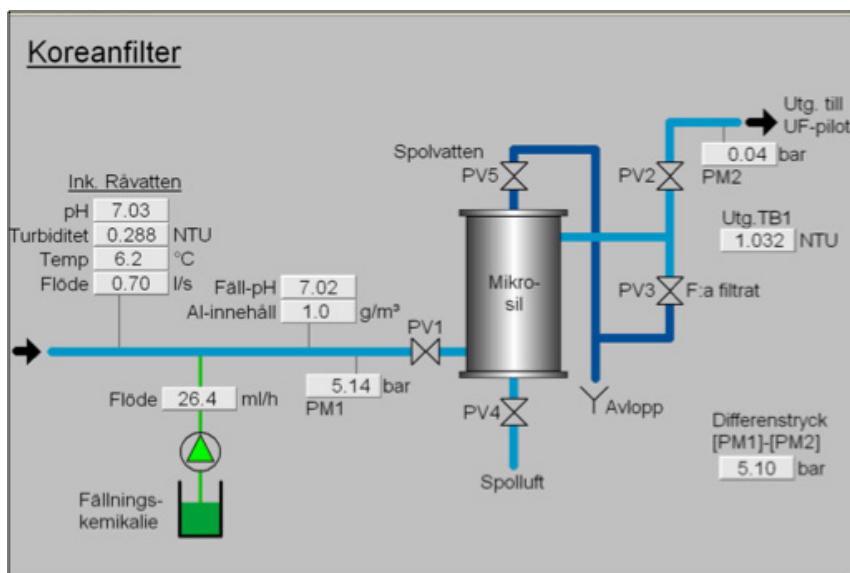
5.3 Kvarngårdens vattenverk

5.3.1 Försöksupplägg

Under försöksperioden juni 2010 till september 2011 utfördes testkörningar med olika driftfall för membranfiltrering i kombination med direktfällning. Inledande testkörningar indikerade tidigt och tydligt att driftfall 3 var det mest lovande driftsättet. Dead- end filtrering (1) ledde till snabb ökning av tryckförlusten. Cross-flow med kontinuerlig konzentratuttag (2) var ett effektivt sätt att minska igensättningar, men resulterade i dåligt vattenutbyte, vilket innebar att ca 20 % av råvattenflödet kvarstod som konzentrat, vilket kräver ett särskilt omhändertagande eller ytterligare behandling genom t.ex. flerstegs membranprocesser. Mot denna bakgrund fokuserades testkörningar på driftfall 3 (Cross-flow med intermittent framspolning) enligt följande:

- Driftfall 3 utan förbehandling och utan direktfällning
- Driftfall 3 med förbehandling och utan direktfällning
- Driftfall 3 utan förbehandling och med direktfällning.

Baserad på bågareförsök (floculatorer) valdes polyaluminiumklorid (PAC) som koagulant vid direktfällning över membranytan. Under försöksperioden användes en doseringsmängd för koagulanter motsvarande 1 g Al/m³ matarvatten. Vid fällningsförsök tillämpades in-line dosering i matarvattenledningen med statisk omrörare och en uppehållstid kring 1 minut före membranmodulen. Det fanns inget behov av pH-justering av matarvattnet före tillsats av koagulanterna, men däremot skedde en kontinuerlig pH-mätning efter doserpunkten för att kontrollera och säkerställa rätt doseringsnivå.



Figur 5.13 Flödesschema: Förbehandling och tillsats av koagulanter (SRÖ-processövervakning)

Labbanalyser

Veckovisa stickprover på råvattnet och olika processvatten från pilotanläggningen analyserades av ackrediterat externt labb m.a.p.:

- Färgtal
- Turbiditet
- COD, TOC, DOC, UV absorbans (254 nm)
- SUVA (UV absorbans/DOC) som beräknat indexvärde
- Järn och Mangan

Vid tre tillfällen under försöksperioden utfördes en provtagningsprofil (ytvattentäkt, befintlig beredning och UF-pilotanläggning) för avancerad NOM-karakterisering. Provtagningsstillfällen valdes utifrån årstidsberoende förhållanden i ytvattentäkten och olika testsekvenser i pilotanläggningen. Vattenproverna skickades till DOC-Labor Dr. Huber (Tyskland) för vätskekromatografi (LC-OCD, Liquid chromatography – Organic Carbon Detection) och analyserades på samma sätt som för Mälarvattnet med avseende på:

- Biopolymerer (Biopolymers)
- Humus (Humic Substances)
- Humusbyggstenar (Building Blocks)
- Lågmolekylära organiska syror (Low Molecular-weight Acids)
- Neutrala lågmolekylära föreningar (Low Molecular-weight neutrals)
- Hydrofoba organiska föreningar (Hydrophobic Organic Carbon)

Membranets barriärverkan och integritet vid olika driftförhållanden kontrollerades med både kontinuerlig mätning och mikrobiologiska standardmetoder enligt följande:

- Lågturbiditetsmätare: Övervakning av fiberbrott och defekta modulkomponenter
- Viruslika partiklar (VLPs): Detektion av defekta hållrumsmembran eller långsam förändring/ökning av porstorleken
- Totalantal celler: Kontroll av ev. återväxt på permeatsidan

5.3.2 Kemiska resultat – UF/NF-Kvarnagården

Råvattnet innehåller måttliga halter av naturligt organiskt material som återspeglas i låga mätvärden för färgtal, kemisk syreförbrukning (CODMn) och totalt organisk kol, TOC (Tabell 5.3). Turbiditeten är låg för ett ytvatten. Värdena visar att råvattnet vid enstaka tillfällen kan påverkas av partikulär förorening, t.ex. variationerna i totalt organiskt kol (TOC) och löst organiskt kol (DOC, dvs. TOC analys på filtrerat prov). Även enstaka höga värden för de optiskt mätta parametrarna färg och UV-absorption samt därav beräknade absorptionskoefficient SUVA kan delvis ha orsakats av partiklar.

Tabell 5.3 Kvalitet på blandat råvatten inkommande till försöksanläggning 2011. Värderna under detektionsgränsen har antagits vara halva av detektionsgränsen.

Parameter	Råvatten				
	Min	Median	Medel	Max	N
COD _{Mn} (mg/l)	1,9	2,2	2,2	2,6	15
TOC (mg/l)	2,4	2,6	3,0	8,3	15
DOC (mg/l)	2,1	2,6	3,1	8,1	15
UV ₂₅₄ (1/m)	7,9	8,7	8,9	9,7	15
SUVA (l/mg, m)	1,1	3,6	3,3	4,3	15
Färg _{405 nm} (mg Pt/l)	12,0	14,0	13,9	17,0	15
Turbiditet (FNU)	0,15	0,21	0,22	0,38	15
Järn, Fe (mg/l)	0,01	0,04	0,04	0,06	15
Mangan, Mn	0,005	0,028	0,024	0,039	15
pH	7,4	7,6	7,6	7,8	15
Kalcium, Ca (mg/l)	8,1	9,8	9,4	10,0	10
Magnesium, Mg (mg/l)	2,2	2,8	2,7	2,9	10

Vattenverket har i nuläget inte någon process som nämnvärt påverkar halten organiskt material. Färgen (median 13 mg Pt/l) är nästan uppe vid gränsvärdet för ”tjänligt med anmärkning”, medan riktvärdet på 5 mg Pt/l överskrids vid alla provtagningstillfällen (Tabell 5.4).

Tabell 5.4 Kvalitet på utgående dricksvatten 2011.09.20–2012.04.24. Värderna under detektionsgränsen har antagits vara halva av detektionsgränsen.

Parameter	Dricksvatten				
	Min	Median	Medel	Max	N
COD _{Mn} (mg/l)	1,9	2,1	2,1	2,7	27
TOC (mg/l)	2,3	2,7	3,4	15,0	27
DOC (mg/l)	2,0	2,4	3,3	15,0	27
UV ₂₅₄ (1/m)	7,4	8,1	8,2	9,1	27
SUVA (l/mg, m)	0,5	3,3	3,2	4,4	27
Färg _{405 nm} (mg Pt/l)	10,0	13,0	12,9	15,0	27
Turbiditet (FNU)	0,13	0,22	0,22	0,34	27
Järn, Fe (mg/l)	0,01	0,03	0,02	0,04	27
Mangan, Mn	0,005	0,005	0,005	0,014	27
pH	8,0	8,1	8,2	8,6	25
Kalcium, Ca (mg/l)	21,0	22,0	22,2	24,0	10
Magnesium, Mg (mg/l)	2,0	2,5	2,4	2,7	10

Långtidsförsök med UF-membran har genererat en stor mängd mätdata. För försöksutvärderingen valdes representativa tidsintervaller, där UF-piloten kördes under realistiska driftförhållanden och med stabil anläggningsfunktion. Framförallt tidsperioder med relativt svåra förutsättningar (t.ex. låga vattentemperaturer i matarvattnet) inkluderades i sammanställningen av representativa driftfall enligt nedan:

- UF utan kemisk fällning på blandat råvatten: 2011.01.04 till 2011.02.22
- UF med kemisk fällning på blandat råvatten: 2011.03.01 till 2011.03.22 och 2011.04.05 till 2011.08.02

Vattenkvaliteten i UF permeat i de utvalda perioderna sammanfattas i Tabell 5.5 och Tabell 5.6.

Tabell 5.5 Kvalitet på UF-permeat utan kemfällning, matat med blandat råvatten. Värden under detektionsgränsen har antagits vara halva av detektionsgränsen.

UF permeat utan koagulanter					
Parameter	Min	Median	Medel	Max	N
COD _{Mn} (mg/l)	1,9	2,1	2,1	2,2	8
TOC (mg/l)	2,5	2,5	2,6	2,9	8
DOC (mg/l)	2,2	2,3	2,3	2,3	8
UV ₂₅₄ (1/m)	6,9	7,3	7,3	7,7	8
SUVA (l/mg, m)	3,1	3,3	3,2	3,4	8
Färg _{405 nm} (mg Pt/l)	9	10	9,75	11	8
Turbiditet (FNU)	0,05	0,05	0,07	0,17	8
Järn, Fe (mg/l)	0,01	0,01	0,01	0,01	8*
Mangan, Mn	0,005	0,005	0,005	0,005	8*

*Alla värden under detektionsgräns (<0,02 mg/l för järn, <0,01 mg/l för mangan).

Tabell 5.6 Kvalitet på UF-permeat med kemfällning, matat med blandat råvatten. Värden under detektionsgränsen har antagits vara halva av detektionsgränsen.

UF permeat med koagulanter					
Parameter	Min	Median	Medel	Max	N
COD _{Mn} (mg/l)	1,0	1,3	1,3	1,8	20
TOC (mg/l)	2,0	2,1	2,3	2,9	20
DOC (mg/l)	1,7	2,0	2,1	3,8	20
UV ₂₅₄ (1/m)	3,4	3,7	3,9	5,3	20
SUVA (l/mg, m)	1,2	1,8	1,9	2,8	20
Färg _{405 nm} (mg Pt/l)	2,5	2,5	3,2	6,0	20
Turbiditet (FNU)	0,05	0,05	0,06	0,14	20
Järn, Fe (mg/l)	0,01	0,01	0,01	0,01	20*
Mangan, Mn	0,005	0,036	0,033	0,046	20
Aluminiumtotal (mg/l)	0,009	0,018	0,034	0,160	18

*Alla järnvärden under detektionsgräns (<0,02 mg/l)

Direkt nanofiltrering av blandat råvatten vid ett vattenutbyte på 50% utvärderades för tidsperioden: 2012.01.17 till 2012.03.06

Permeatkvaliteten från NF-pilotanläggningen redovisas i Tabell 5.7.

Tabell 5.7 Kvalitet på NF-permeat vid 50 % recovery, matarvatten: blandat råvatten. Värden under detektionsgränsen har antagits vara halva av detektionsgränsen.

Parameter	NF 50% permeat				
	Min	Median	Medel	Max	N
COD _{Mn} (mg/l)	0,7	0,9	1,0	2,0	6
TOC (mg/l)	1,0	1,0	1,3	2,7	6
DOC (mg/l)	1,0	1,0	1,5	3,9	6
UV ₂₅₄ (1/m)	2,7	2,8	2,8	3,0	7
SUVA (l/mg, m)	0,7	3,0	2,7	3,1	6
Färg _{405 nm} (mg Pt/l)	0,0	2,0	1,4	2,0	7
Turbiditet (FNU)	0,04	0,04	0,04	0,06	7
Järn, Fe (mg/l)	0,01	0,01	0,01	0,01	6*
Mangan, Mn	0,014	0,021	0,020	0,022	6
Aluminiumtotal (mg/l)					
pH	7,2	7,4	7,4	7,5	6
Kalcium, Ca (mg/l)	5,9	6,5	6,4	6,7	3
Magnesium, Mg (mg/l)	1,8	1,9	1,9	1,9	3

*Alla järnvärden under detektionsgräns (<0,02 mg/l)

Vid utvärdering av analysresultaten fokuserades på vattenkvalitet och drift-egenskaper för respektive pilotanläggning. Testkörningarna gjordes vid olika årstider med varierande temperatur och sammansättning i råvattnet. Dessutom förändrades andelen yt- och grundvatten i inkommande blandvatt-net till Kvarnagårdens vattenverk under försöksperioden. Vid jämförelsen av testkörningarna valdes tidsintervaller både med stabila driftförhållanden (optimerad anläggningsdrift avseende kemikaliedosering och hydraulisk belastning) och med representativa samt kritiska betingelser som är rele-vanta vid dimensionering av fullskaledesign (t.ex. låga vattentemperaturer).

Dricksvattnet från nuvarande beredningsprocess överskrider normalt Livsmedelsverkets riktvärden för turbiditet och för färgtal, även om gäl-lande gränsvärden för ”Tjänlig med anmärkning” klaras. Ultrafiltrering utan kemisk fällning sänker turbiditeten till under riktvärdet på 0,1 FNU,

Tabell 5.8 Jämförelse av vattenkvalitet för befintlig beredning och pilotanläggningar (medianvärden).

Parameter	Råvatten	Dricks-vatten	UF utan kemdos	UF med kemdos	NF _{50 %}	Krav
COD _{Mn} (mg/l)	2,2	2,1	2,1	1,3	0,9	<4
TOC (mg/l)	2,6	2,7	2,5	2,1	1,0	
DOC (mg/l)	2,6	2,4	2,3	2,0	1,0	
UV ₂₅₄ (1/m)	8,7	8,1	7,3	3,7	2,8	
SUVA (l/mg, m)	3,6	3,3	3,3	1,8	3,0	
Färg _{405 nm} (mg Pt/l)	14,0	13,0	10,0	2,5	2,0	<5riktv.
Turbiditet (FNU)	0,21	0,22	0,05	0,05	0,04	<0,1riktv.
Järn, Fe (mg/l)	0,04	0,03	0,01	0,01	0,01	<0,1
Mangan, Mn	0,03	0,01	0,01	0,04	0,02	<0,05
Aluminiumtotal (mg/l)				0,02	0,00	<0,1
pH	7,6	8,1			7,4	7,5–9
Kalcium, Ca (mg/l)	9,8	22,0			6,5	20–60
Magnesium, Mn	2,8	2,5			1,9	
	Färgat vatten			Färg mindre än riktvärdet		

medan färgtalet inte minskas avsevärt (Tabell 5.8). För att uppnå en effektiv NOM-reduktion med ett färgtal under 5 krävs antingen direktfällning i kombination med UF-membran eller tätare membran (nanofiltrering).

5.3.3 NOM-karakterisering – UF/NF-Kvarnagården

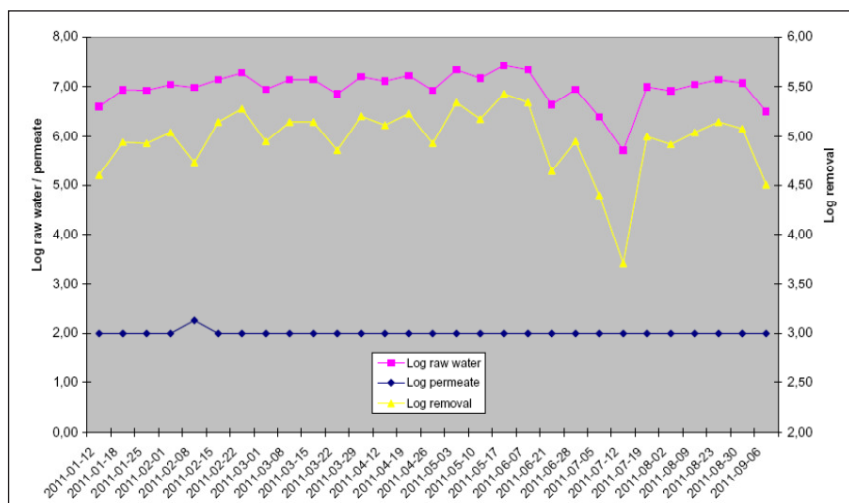
Långtgående NOM-karakterisering av ytvatten, inkommande råvatten och olika processvatten från pilotanläggningarna indikerar följande:

- Vid UF-filtrering med förbehandling sker ingen nämnvärd NOM-reduktion
- UF-filtrering med koagulanter medför en reduktion av DOC på 33 % varav biopolymerer och humussubstanter avskiljs i större omfattning i relation till membranets cut-off
- Vid direkt nanofiltrering uppnåddes en DOC-reduktion på 58 % (permeatutbyte: 50 %) med en kraftig minskning av biopolymerer och humussubstanter.

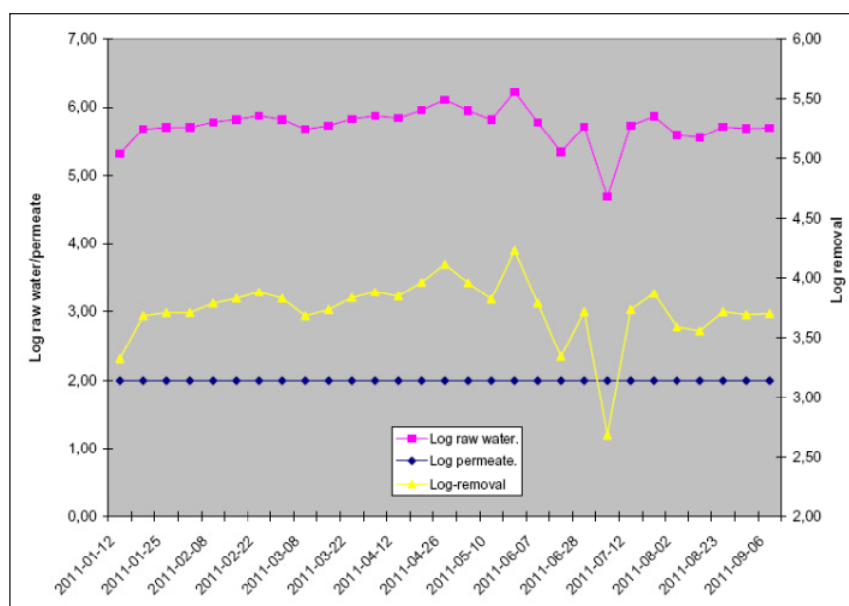
UF pilot trials: Kvarnagården WTP, Varberg			Operating conditions: Ultrafiltration with pre-treatment (pressurized fiber-filter)														
Sampling date: 16.11.2010			Cross-flow, dead-end filtration, intermittent forward flushing, recovery rate: 80%														
			Flux: 70 l/m ² *h, permeability corrected T-20°: 200 - 150 l/m ² *h*bar														
Partitioning of Organic Carbon (OC)			Chromatographic Fractionation of Organic Carbon (CDOC)													(UV@254 nm)	
Approx. Molecular Weights in g/mol:																	
DOC ↓ dissolved ppb-C % DOC	HOC ↓ hydrophob. ppb-C % DOC	CDOC ↓ hydrophil. ppb-C % DOC															
Sample A: Surface water - Lake Neden (Water source to Kvarnagården WTP)																	
3019	95	2924	85	13	0,16	47	1865	47	0,03	4,62	744	A	541	411	22	0,17	3,42
100,0	3,1	96,9	2,8	--	--	--	61,8	--	--	--	--	--	17,9	13,6	0,7	--	--
Sample C: Raw water (mixed) - Inlet WTP (80% surface water / 20% groundwater)																	
2512	156	2356	69	10	0,14	41	1498	37	0,02	4,47	704	C	427	341	21	0,11	3,22
100,0	6,2	93,8	2,8	--	--	--	59,6	--	--	--	--	--	17,0	13,6	0,8	--	--
Sample F: Feed water - UF-pilot trials (Pre-filtration with pressurized fiber filter: cut-off ~5-10 microns)																	
2581	109	2472	66	10	0,15	45	1572	37	0,02	4,34	728	F	451	363	20	0,12	3,25
100,0	4,2	95,8	2,5	--	--	--	60,9	--	--	--	--	--	17,5	14,1	0,8	--	--
Sample G: Permeate - UF-pilot trials (Hollow fiber UF membrane module: Koch HF 10-48-35-PMPW, MWCO: ~100 kDa)																	
2604	128	2476	50	5	0,10	31	1551	35	0,02	4,38	706	G	428	426	20	0,08	3,16
100,0	4,9	95,1	1,9	--	--	--	59,6	--	--	--	--	--	16,5	16,4	0,8	--	--
Sample J: Drinking water - outlet WTP (After disinfection with UV irradiation: 254 nm)																	
2513	12	2501	80	9	0,11	34	1602	39	0,02	4,14	725	J	438	357	24	0,08	3,72
100,0	0,5	99,5	3,2	--	--	--	63,7	--	--	--	--	--	17,4	14,2	0,9	--	--

Figur 5.14 UF-membran med förbehandling

UF pilot trials: Kvarnagården WTP, Varberg				Operating conditions: Ultrafiltration with pretreatment (pressurized fiber-filter) and coagulation (1g Al/m ³ raw water)													
Sampling date: 18.04.2011				Cross-flow, dead-end filtration, intermittent forward flushing, recovery rate: 80%, low water temp. ~4.5 °C													
Flux: 50 l/m ² *h, permeability corrected T-20: 200 - 150 l/m ² *h*bar																	
Partitioning of Organic Carbon (OC)				Chromatographic Fractionation of Organic Carbon (CDOC)												(UV@254 nm)	
Approx. Molecular Weights in g/mol:																	



Figur 5.17 VLP-analyser för UF-membran: barriärverkan på virusnivå



Figur 5.18 Totalantal celler: Barriärverkan och ev. återväxt på permeatsidan

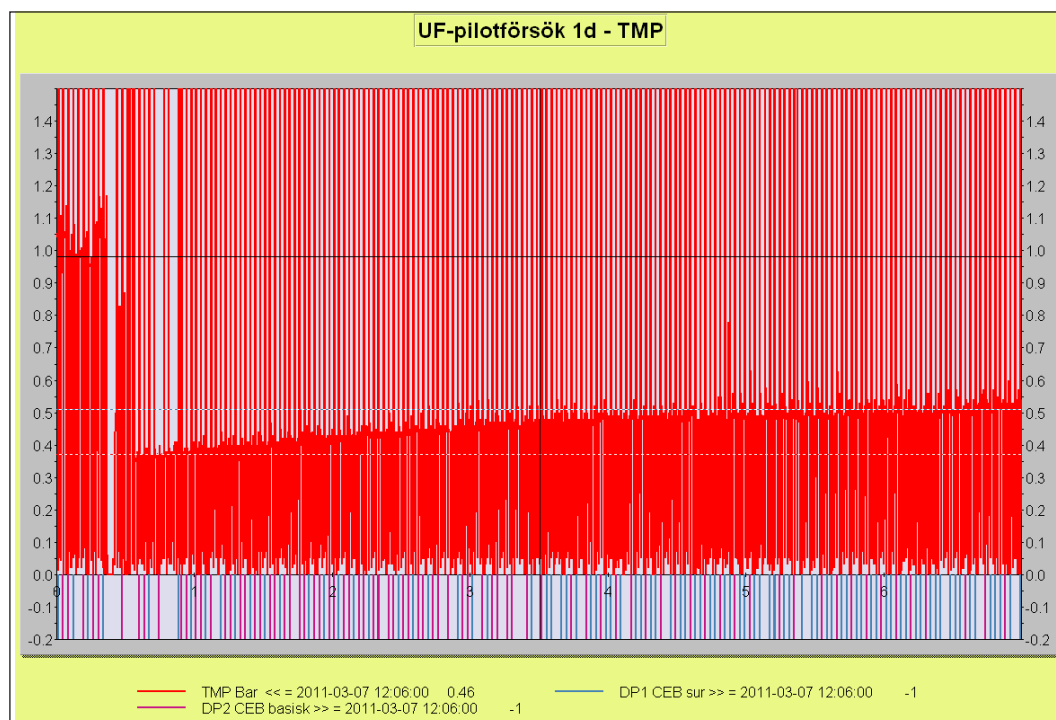
5.3.5 Driftserfarenheter – UF-Kvarnagården

I samband med försök av direktfällning över UF-membran följdes en test-matris som framgår av Tabell 5.9

Vid fas 1 med stabil flux, fällning och förbehandling, uppmättes en TMP-ökning med 0,14 bar under 7 d kontinuerlig drift vid en vattentemperatur runt 4,2 grader Celsius, se Figur 5.19 TMP-kurva för fas 1 (fällning med förbehandling vid stabil flux 50l/m²h)

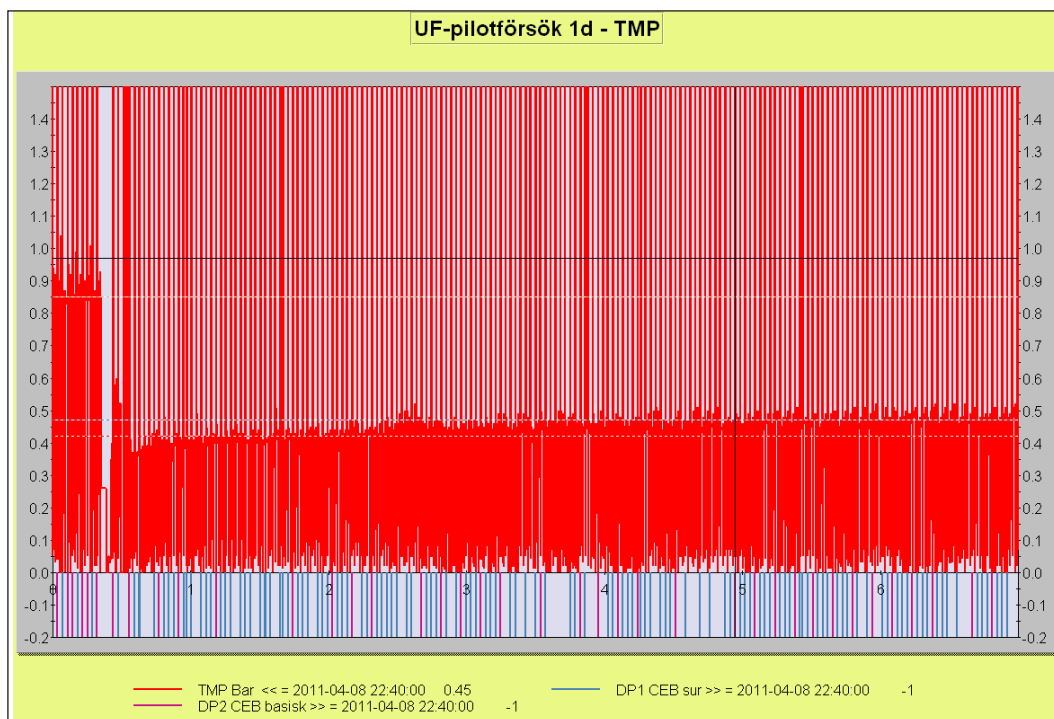
Tabell 5.9 Testmatris för försöket på Kvarnagården

Försöks-moment	Beskrivning	Antal dygn	Al-dos [g Al/m ³]	Förbe-handling	Flux [lmh]	CEB	Frekvens/takt-ning 50 min
1	Fällning med förbehandling och med stabil flux	14	1	Mikrosil	50	Sur/basisk	3/1
2	Fällning med förbehandling och varierande flux	8	1	Mikrosil	50 – 80 – 50	Sur/basisk	3/1 – 1/3
3	Variande flux utan fällning med förbehandling	6	0	Mikrosil	50 – 70 – 50	Sur/basisk	1/2
4	Fällning utan förbehandling och med stabil flux	7	1	Ingen	50	Sur/basisk	3/1
5	Fällning utan förbehandling och CEB pur	7	1	Ingen	50	Enbart permeat	0/0
6	Fällning utan förbehandling och CEB pur	7	1	Ingen	70	Sur/basisk	1/1



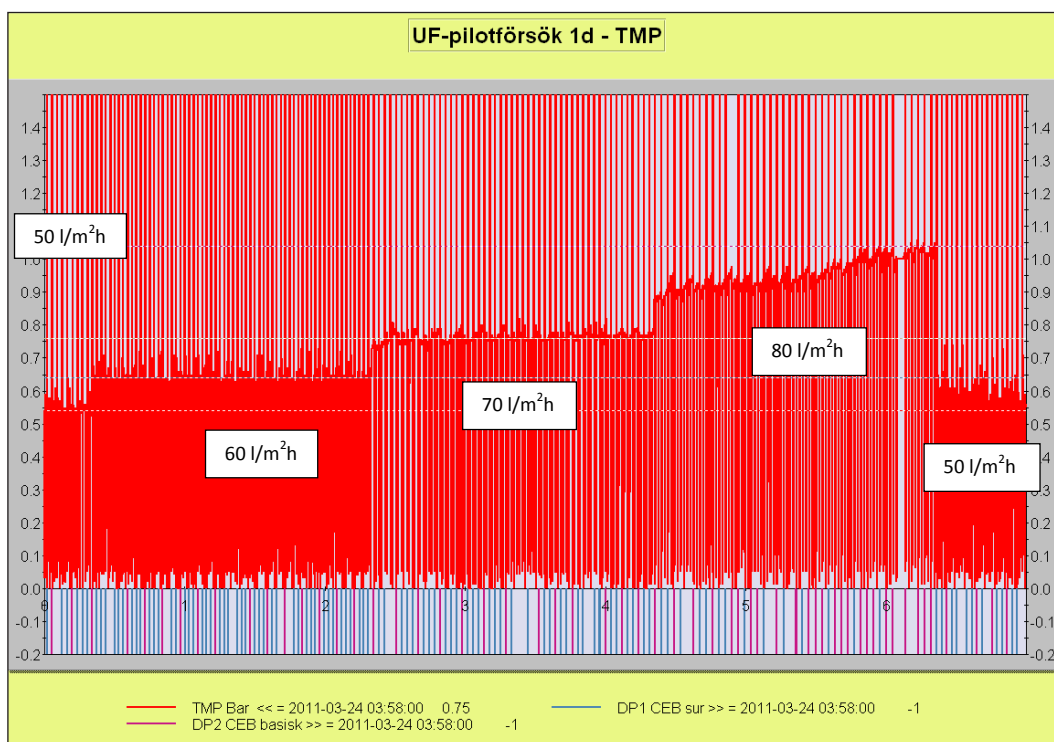
Figur 5.19 TMP-kurva för fas 1 (fällning med förbehandling vid stabil flux 50 l/m²h)

I jämförelse med fas 1 indikerade fas 4 med direktfällning över membranet utan förbehandling vid stabil flux (50 l/m²h) inga nämnvärda skillnader avseende TMP-profilen.



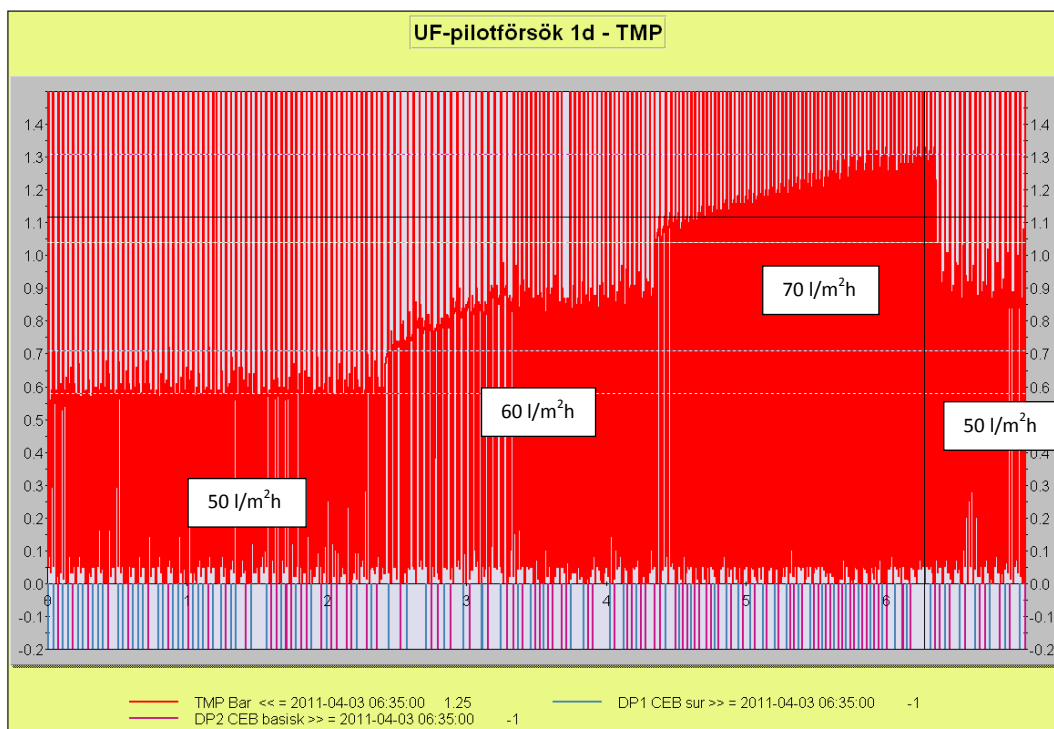
Figur 5.20 TMP-kurva för fas 4 (direktfällning utan förbehandling vid stabil flux 50 l/m²h)

I fas 2 varierades den hydrauliska belastningen stegvis efter 48 h med flux-intervall på 50 – 60 – 70 – 80 – 50 l/m²h. Som framgår av figur 5.21 ökade TMP-kurvan tydligt vid 80 l/m²h medan den planade ut den jämförbara tryckförhållanden vid försökets början vilket tyder på att ingen irreversibel fouling inträffade under höglastkörningen.

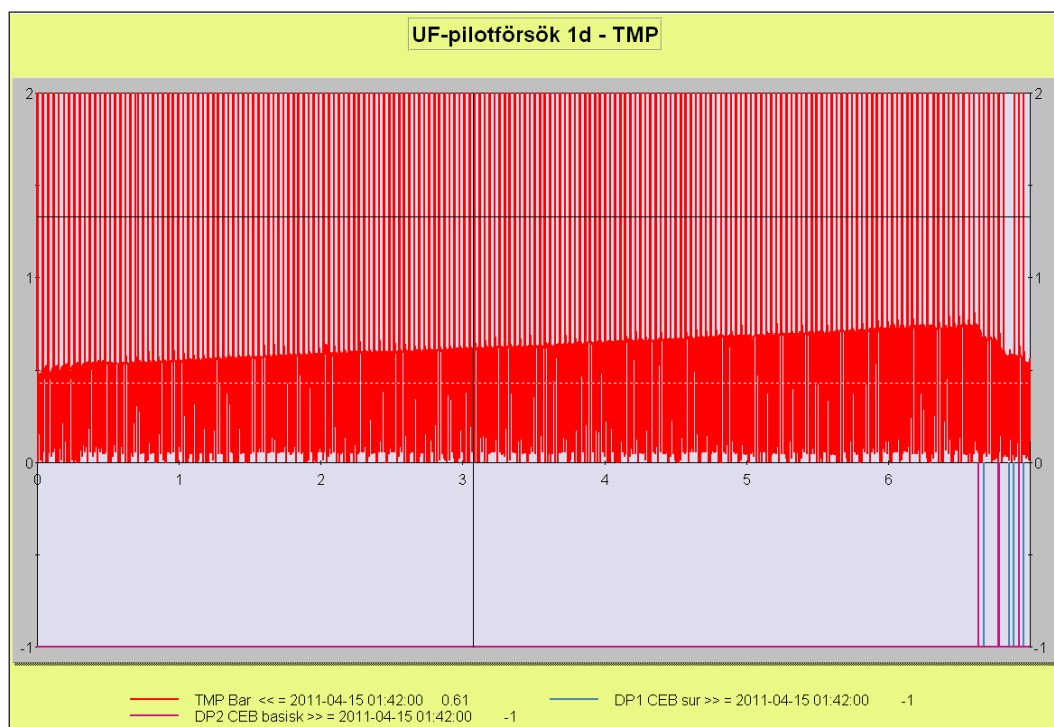


Figur 5.21 TMP-kurva för fas 2 (direktfällning med förbehandling och varierande flux)

I fas 3 avbröts testkörningar vid en flux på 70 l/m²h pga. kraftig stigande tryckförluster. Efterföljande kontroll med lågbelastningen visade att TMP-nivån var tydlig högre vid en referensflux på 50 l/m²h vilket indikerade en fouling av testmodulen. (Figur 5.22)



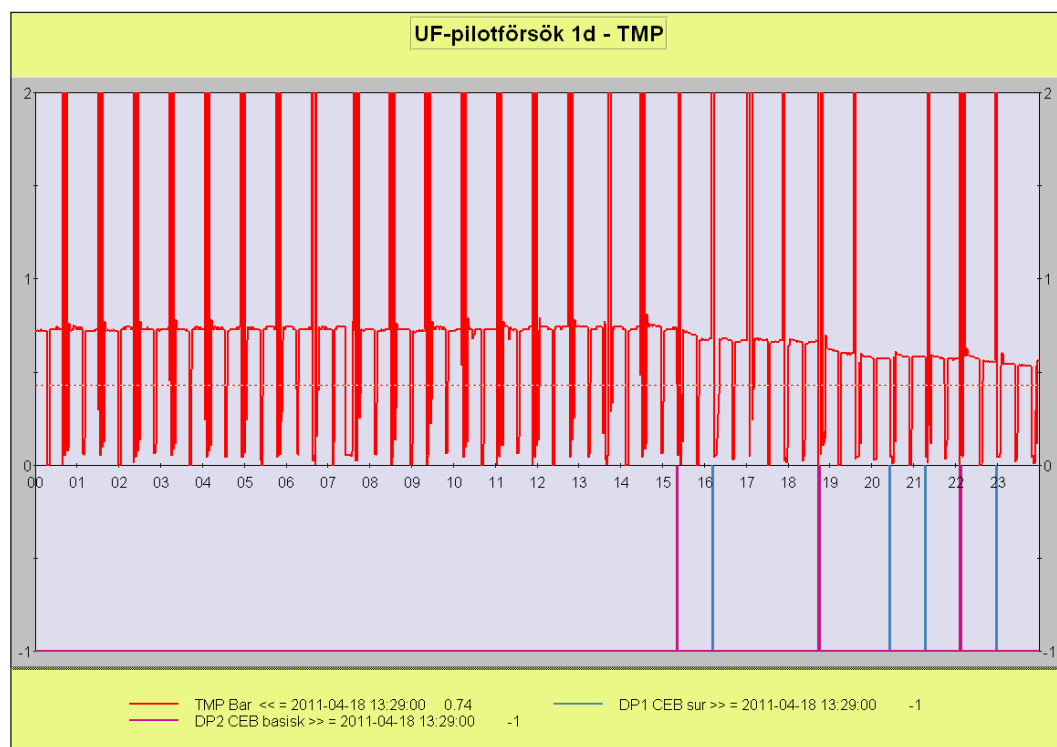
Figur 5.22 TMP-kurva för fas 3 (utan fällning med förbehandling och varierande flux)



Figur 5.23 TMP-kurva för fas 5 (direktfällning med enbart hydraulisk backspolning)

I fas 5 testades direktfällning med enbart hydraulisk backspolning, vilket medförde en tydlig ökning av TMP-kurvan under 7 dygns kontinuerlig drift. (Figur 5.23)

I fas 6 tillämpades direktfällning med sura och alkaliska backspolningar vilket innebar en tydlig sänkning av TMP-kurvan.



Figur 5.24 TMP-kurva för fas 6 (direktfällning med sura och alkaliska backspolningar)

5.4 Ringsjöverket

5.4.1 Försöksupplägg

UF/HFNF-piloten

Försöket med UF/HFNF-piloten på Ringsjöverket startade i mitten av juli 2013 och avslutades i början av januari 2014. Den ställdes på pumpstationen i Ringsjöholm för att det därifrån var möjligt att komma åt vatten från både huvud- och reservvattentäkt.

I första etappen matades piloten med vatten från Bolmen som renades genom HFW 1000 modulen. Den kördes med ett flux på 20 l/m²h och en tvärströmshastighet på 0,5 m/s. Retentionen låg på 50 %, en filtrationscykel innebar backspolning var 60:e minut och kemikalietytt var 36:e timma; efter att under den första månaden ha testat lite olika intervall var detta det optimala intervallet. De nämnda inställningarna användes fram till andra halvan av oktober. Då byttes inflödet till vatten från Ringsjön. Till en början genomfördes 20-punktstestet – med fem flux (5–25 l/(m²h)) och fyra tvärströmshastigheter (0,25–1 m/s). Därefter följde fyra veckor med samma inställningar som tidigare (20 l/(m²h) och 0,5 m/s) men nu från Ringsjön.

Efter det byttes vattenkällan tillbaka till Bolmen. Därefter genomfördes en vecka med 20 olika inställningar igen, men denna gång begränsades högsta fluxet till 23 l/(m²h) eftersom anläggningen inte klarade högre, troligen på grund av den typ av NOM som finns i vatten från Bolmen. En vecka med ett lite lägre flux, 15 l/(m²h) för att se om det blev någon effekt på tryck etc.

I början av december byttes modulen, och istället sattes en Aquaflex in. Den kompletterades med fällningskemikalie. Här användes aluminiumsulfat (Kemira ALG) eftersom den fanns tillgänglig på vattenverket och gav god avskiljning i bägartest. Flux men även frekvensen av backspolning och kemikalietytt ökades succesivt under försökets gång.

Spirallindad NF-pilot

Under vår och sommar 2014 startade försök med den ena av de spirallindade NF-piloterna. Den ena var upprustad och var i skick att användas redan under våren, medan den andra renoverades under sommaren. Den första av dem matades med vatten från långsamfiltren – innan addering av koldioxid, slutkalkning och klorering.

Den kördes först under ett par månader med olika flux, 15–22 (l/m²h) och tvärströmsflöden (1 500–2 200 l/h), och ca 25 % retention. Dessvärre blev det problem med en av pumparna i anläggningen som användes, och därför kunde inte anläggningen spolas som planerat. Under sommaren fortsatte försöken under några veckor, nu med högre tvärströmsflöden (2 500 l/h) p.g.a. begränsningar på grund av problemet med pumpen.

Labbanalyser

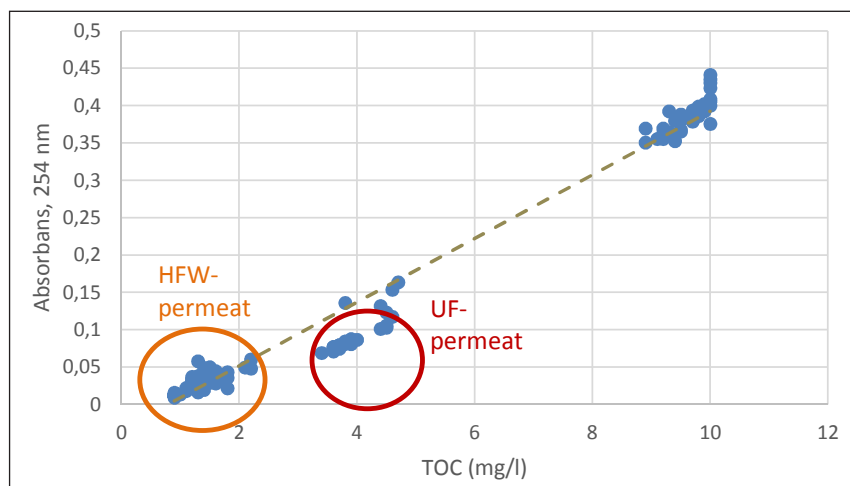
På Ringsjöverket finns ett driftslaboratorium i vilket vissa analyser kan göras. De som inte kan göras där skickas till VA-syds ackrediterade laboratorium i Malmö. Vissa av mätningarna gjordes online i UF/HFNF-piloten, men behövde göras manuellt för den spirallindade NF-piloten.

- VLP och totalt antal celler (Göteborg stad, Kretslopp och Vatten)
- Transmittans, UV_{254 nm} (Ringsjöverket)
- Turbiditet (UF/HFNF-piloten)
- Färg, spektrofotometer 436 nm (Ringsjöverket)
- Hårdhet genom koncentration av Ca och Mg (VA-syd)
- Konduktivitet (UF/HFNF-piloten eller Ringsjöverket)
- pH (UF/HFNF-piloten eller Ringsjöverket)
- TOC (VA-syd)
- COD, endast för tidiga prover från UF/HFNF-piloten (VA-syd)
- Odlingsbara bakterier, 3 dagar (vid ett par tillfällen på Ringsjöverket)
- Snabbtest av aluminium (Ringsjöverket)

5.4.2 Kemiska resultat – Bolmen

Figur 5.25 visar relationen mellan TOC i proverna mot absorbansen vid 254 nm. I grafen visas en hjälplinje som tyder på att även för Bolmen finns en relation mellan minskningen av TOC och absorbans, dock minskar de inte i samma utsträckning. Data för UF-permeatet hamnar nedanför en linje (linjär regression i Excel) som går mellan råvatten och permeat från HFW 1000. På denna linje hittas även punkter tagna när förutsättningarna

för HFW 1000 varit dåliga (precis efter en CEFF) och dessa verka följa en linjär minskning. Att det är annorlunda för UF-permeatet beror troligen på att pH har ändrats och fällningskemikalie har tillsatts vid försöket. Detta har ändrat sammansättningen av de olika typerna av NOM i vattnet. Vad som har påverkats och hur det kommer sig går inte att avgöra utifrån dessa data, däremot finns en skillnad mot endast separation baserat på molekylernas storlek d.v.s. vid försöken med HFW 1000.



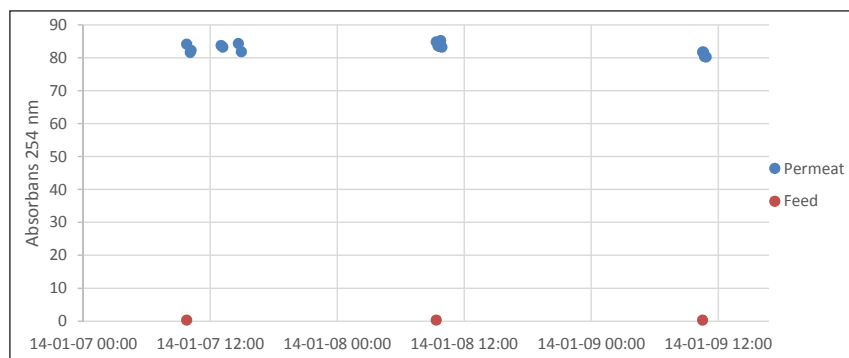
Figur 5.25 Relation mellan absorbans vid 254 nm och TOC i membranrenat Bolmenvatten (permeat). Vattnet renades med NF-membranet HFW 1000 och UF-membranet Aquaflex

För en jämförelse med karaktären på de andra råvattenkällorna och tillhörande permeat, se Figur 5.54.

UF – Aquaflex

Vid stabila förhållanden uppnåddes en god reduktion av NOM-parametrarna. Koncentrationen av TOC i permeatet minskade till 3,7 mg/l (från 9,5 mg/l) och absorbansen vid 254 nm reducerades till 0,082 (från 0,39). I Figur 5.26 visas absorbansen vid olika provtillfällen. Fastän proverna togs vid olika tidpunkter under filtreringscykeln (precis efter tvätt, backspolning, samt i mitten och slutet av filtreringen innan backspolning) var absorbansen ungefär densamma över hela filtreringen. Under den här perioden låg dosen av aluminsulfat på 2,8 mg Al/l och pH 5,9. En liten ökning av absorbansen i permeatet kan ses den 9 januari. Detta kan bero på att flux ökades denna morgon, men det kan också vara en tillfällighet.

Olika doser testades, och förbättringar av permeatet sågs när doseringen ökade från 2,5 mg Al/l till 3,0 mg Al/l, men ytterligare dosering av fällningskemikalie gav ingen signifikant minskning av absorbans eller TOC. pH varierades endast inom begränsat ett intervall, som mest pH 6,3 och som lägst pH 5,7. Inom detta intervall syntes ingen förändring av absorbansen i permeatet i relation till pH.



Figur 5.26 Absorbans i permeatet vid direktfiltrering av råvatten från Bolmen med UF-membranet Aquaflex

Tabell 5.10 Medelvärden för permeatkvaliteten vid UF-försöket med Aquaflex

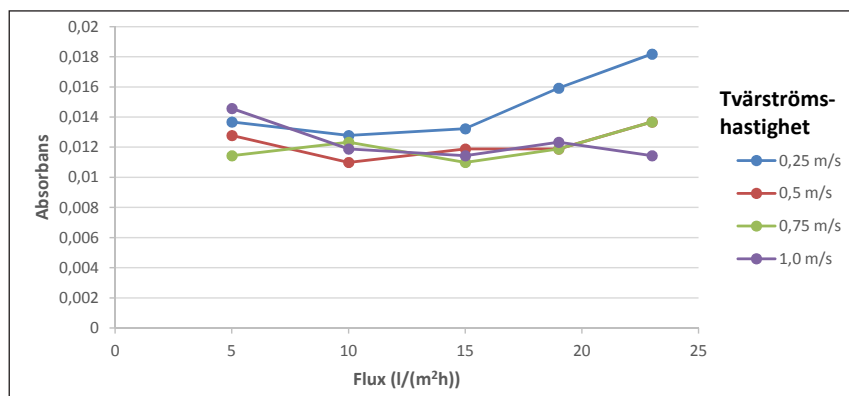
	Abs	TOC mg/l	Hårdhet (dH)	Ca (mg/l)
Bolmen-permeat	0,084 ($\pm 0,011$)	3,3 ($\pm 0,3$)	1,3 ($\pm 0,09$)	7,0 ($\pm 0,3$)

Noteras bör att storleken på dosen till viss del är osäker eftersom den är baserad på beräkningar och inga faktiska analyser av aluminiuminnehållet i matarvattnet. Dessa beräkningar är baserad på procenten aluminium i granulatet, hur mycket granulatet späddes och en kalibrering av doseringspumpen. Storleksordningen är korrekt, men med detta i åtanke finns en stor osäkerhet i den exakta dosen, eftersom det rör sig om 2–3 mg/l. Däremot så varierades dosen inom ett litet intervall så det låga beroendet av dosstorleken bör vara gällande för dessa omständigheter.

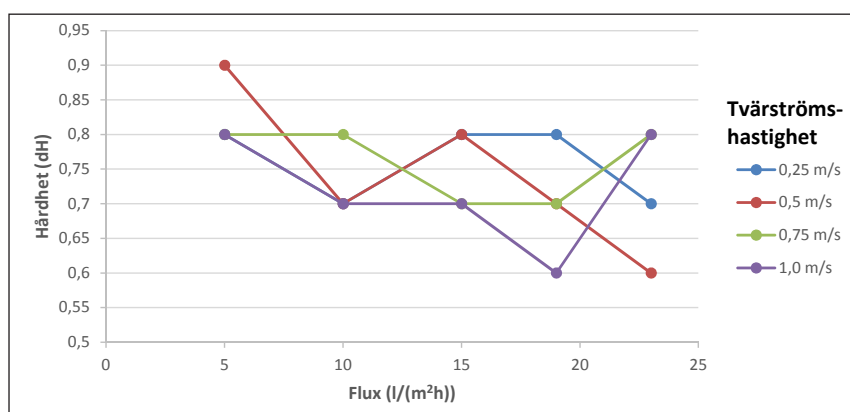
NF – HFW 1000

Experimentet med 20 olika kombinationerna av flux och tvärströmshastighet gav liten inverkan när dessa ändrades (Figur 5.27). Alla ligger på goda nivåer för NOM-avskiljning på samma sätt som diskuterades i sektionen om resultat från Råberga vattenverk. Noterbart är ökningen i absorbans för en tvärströmshastighet på 0,25 m/s, vilket är samma mönster som för Råberga ovan. Det går även att se att för resten är beroendet mellan flux, tvärströmshastighet och NOM-avskiljning mycket liten.

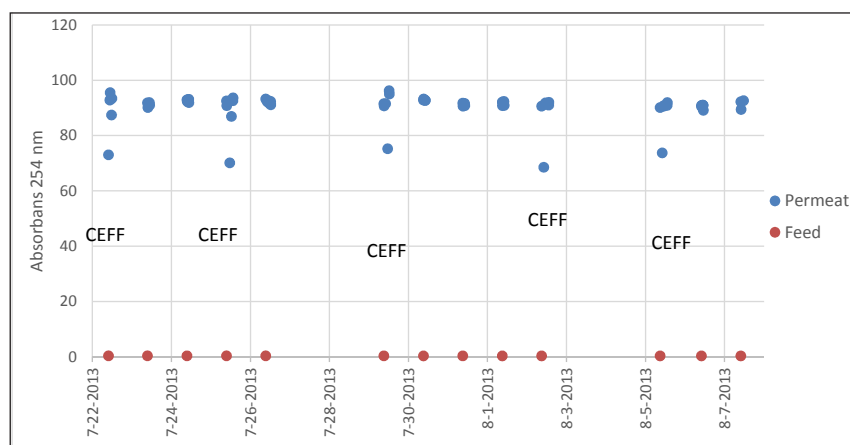
Under första tiden av försöket togs prover ofta och vid olika tillfällen i en filtreringscykel för att se hur retentionen av NOM såg ut under processens utveckling. Inte oväntat var absorbansen avsevärt högre efter en CEFF (Figur 5.29) men den återställdes relativt snabbt till låga nivåer. TOC vid dessa tillfällen ökade till över 4,5 mg/l, men även det återställdes snart efter att filtreringen påbörjades. Den kemiska tvätten verkar ha stabiliserat beläggningen, och efter första backspolningen efter en CEFF steg absorbansen i permeatet efter denna backspolning för vissa prover.



Figur 5.27 Absorbans i permeatet för de 20 olika flux och tvärströmskombinationerna vid NF av Bolmenvatten med HFW 1000



Figur 5.28 Hårdhet i permeatet för de 20 olika flux och tvärströmskombinationerna med HFW 1000 och råvatten från Bolmen



Figur 5.29 Absorbans i permeat och råvatten från Bolmen under försökets första del med HFW 1000

Under försöket konstaterades att en ventil i piloten gått sönder. Den var av betydelse vid spolning av membranet, samt då den skulle fyllas med vatten. Det kan ha medfört att systemet inte tömdes på luft, vilket kan ha orsakat tryckslag. Detta är en trolig orsak till läckande fibrer konstaterades vid några tillfällen. Detta har påverkat resultaten för vattenkvaliteten, och vid tillfällena med läckande fibrer har också absorbansen och TOC ökat i permeatet.

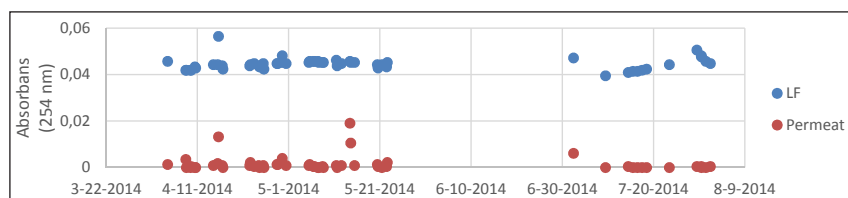
Genom att undersöka insamlad operationell data har tillfällen då vattenkvaliteten varit påverkad av läckande fibrer kunnat konstateras, och data som har antytt viss osäkerhet har lämnats utanför medelvärdesberäkningarna för permeatets vattenkvalitet som presenteras i Tabell 5.11.

Tabell 5.11 Medelvärden för HFW 1000 permeatet över tremånadersförsök (tillfällen med läckande fiber exkluderade)

	Abs	TOC mg/l	Hårdhet (dH)	Ca (mg/l)
Bolmen-permeat	0,013 ($\pm 0,002$)	<1,0	0,8 ($\pm 0,1$)	4,2 ($\pm 0,5$)

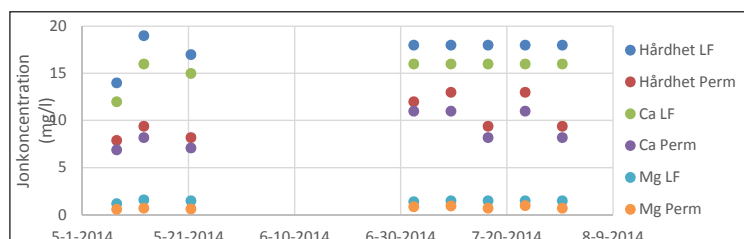
NF – NF270

Under försöken med det spirallindade NF-membranet NF270 med Bolmenvatten var NOM-avskiljningen mycket hög. Alla analyser av permeatet gav TOC på nivåer under 1 mg/l och absorbansen var generellt nästan eller lika låg som för det milli-Q-vatten som användes som nolla i spektrofotometern (Figur 5.30). Eftersom värdena var så låga kunde heller ingen inverkan från förändringar av flux eller tvärströmsflöde ses på NOM-avskiljningen.

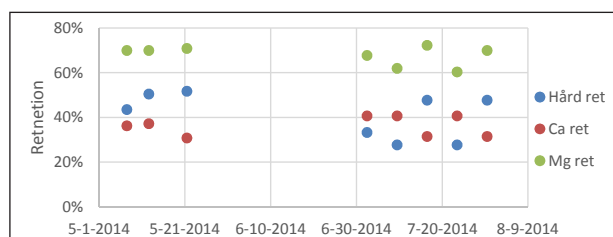


Figur 5.30 UV-absorbans vid 254 nm, från långsamfiltrat och permeat från NF270 vid filtrering av Bolmenvatten

Däremot hade dessa båda faktorer viss inverkan på avskiljningen av joner/hårdhet. Som kan ses i Figur 5.31 är koncentrationen av magnesium så pass låg att majoriteten av förändringen av hårdheten beror på minskningen av kalciumjoner. Samtidigt är retentionen av magnesiumjoner procentuellt betydligt större (Figur 5.32) och det beror troligtvis på att det är en större jon.

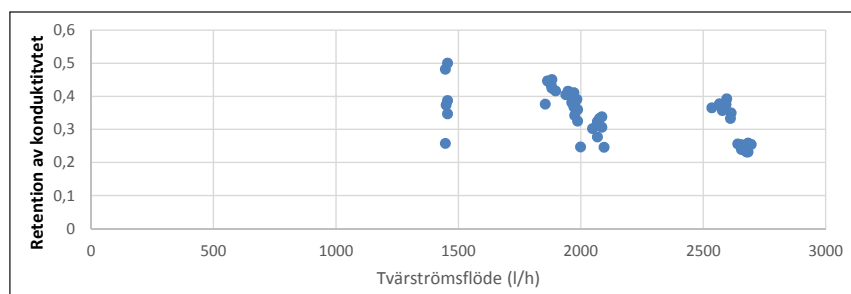


Figur 5.31 Hårdhet och koncentration av jonerna i långsamfiltrat och permeat från NF270 (hårdhet i mg Ca/l)



Figur 5.32 Retention av konduktivitet för NF270 vid behandling av Bolmenvatten

Ingen uppenbar inverkan av förändring i flux kunde ses på retentionen av konduktivitet mellan långsamfiltrat och permeat. Däremot tycks det finnas ett samband mellan storleken på tvärströmsflödet och retentionen (Figur 5.33). Med ökad tvärströmshastighet tycks retentionen minska markant. Mellan stora språng i tvärströmshastigheten är inte minskningen lika tydlig, utan verkar vara någorlunda desamma. Minskningen inom de olika områdena (runt 2 000 l/h och drygt 2 500 l/h) ser liknanden ut. Det indikerar att tvärströmshastigheten har betydelse, men det är möjligt att andra faktorer har minst lika stor inverkan. Liknande mönster har inte kunnat ses för aktuellt flux, men det är troligt att förändring av flux har påverkat utseendet av Figur 5.33.



Figur 5.33 Faktoriell minskning av konduktiviteten från långsamfiltrat till permeat mot tvärströmsflödet

Vid ett tillfälle i slutet av maj påverkades försöket av att vattenverket stängdes ner för underhåll. När verket återstartades var koncentrationerna av organiskt material förhöjt i långsamfiltratet. Detta påverkade även permeatet, och dessa värden har därför inte tagits med i beräkningarna i Tabell 5.12. De visas heller inte i Figur 5.30 för tydlighetsskull.

Tabell 5.12 Medelvärden för vattenanalyser med det spirallindade membranet NF270 för, alla flöden med Bolmenvatten, men tillfällen med påverkat LF borttagna

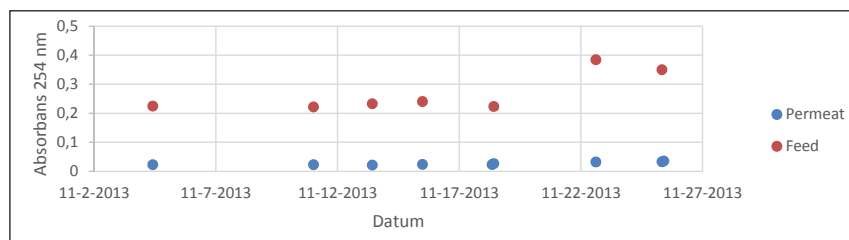
	Abs	TOC mg/l	Hårdhet (dH)	Ca (mg/l)
Spirallindad NF-permeat	0,0015 ($\pm 0,003$)	< 1,0 (± 0)*	1,4 ($\pm 0,3$)	9,0 ($\pm 1,8$)

*Alla resultat var <1 mg/l

5.4.3 Kemiska resultat – HFW 1000 med råvatten från Ringsjön

Dessvärre stormade det strax innan 20-punktsexperimentet genomfördes med råvatten från Ringsjön, och därför är inte de data som togs fram den veckan tillförlitliga. Troligen har råvattenintaget påverkats av vatten från Bolmen i närheten eftersom piloten stod på pumpstationen där även Bolmenvatten pumpas upp till vattenverket. Råvattendata liksom data för permeatet motsvarar normala värden från Bolmen, och de avvek starkt från normala värden för Ringsjön. Liknande resultat sågs under dessa 20 experiment som för Bolmen och Stångån, men det är inte lika hög signifikans eftersom råvattnet inte varit detsamma över tid.

Figur 5.34 visar att absorbansen i permeatet var låg genom hela försöket med Ringsjövatten. De förhöjda värdena i råvattnet i slutet av försöket kan bero på att vatten från Bolmen återigen blandades in vid intaget.



Figur 5.34 Absorbans i permeat från HFW 1000 och råvatten under försöken med Ringsjövatten

I Tabell 5.13 presenteras medelvärden för olika parametrar i råvatten från Ringsjön och HFW 1000-permeat. De visar på en mycket god reduktion av NOM, och även viss för hårdheten (som för Ringsjön är 5,5 dH). NOM är svårt att reducera med fällning av Ringsjövatten på grund av den mycket höga alkaliniteten, vilket gör HFW 1000 till ett önskvärt alternativ för behandling av Ringsjövatten. Permeatkvaliteten för Ringsjön är något sämre än för Bolmen vilket troligen beror på att NOM-fraktionerna närvarande i vattnet skiljer sig mellan dessa båda sjöar. Ringsjön tros innehålla mindre fraktioner än Bolmen, vilket har betydelse för membranrening eftersom den beror på molekylernas storlek.

Tabell 5.13 Medelvärden för permeatet från HFW 1000 vid tremånaders-försöket med Ringsjövatten (läckande fiber exkluderade)

	Abs	TOC mg/l	Hårdhet (dH)	Ca (mg/l)
Ringsjön-permeat	0,024 ($\pm 0,003$)	1,15 ($\pm 0,17$)	4,5 ($\pm 0,4$)	27,8 ($\pm 2,9$)

5.4.4 Mikrobiologiska resultat

De mikrobiologiska testerna som genomfördes ger en indikation på membranets barriärverkan. Vid försöken med råvatten från Bolmen togs, av praktiska skäl, prov endast under försöken med HFW 1000 eftersom Aqua-flex-försöken pågick till stor del under jultid, vilket förhindrade möjligheten att genomföra dessa analyser.

Tabell 5.14 VLP och totalt antal celler i råvatten från Bolmen och permeat från HFW 1000

	Matarvatten		Permeat	
	VLP	Tot celler	VLP	Tot celler
2013-08-14	2 500 000	1 200 000	<100	4 400
2013-08-28	1 700 000	680 000	<100	4 500
2013-09-18	28 000 000	1 500 000	130	160
2013-09-25	29 000 000	21 000 000	870	650

På variationerna i råvattnet från Bolmen i Tabell 5.14 syns det att virus ökar under hösten i råvattenkällan. Samtidigt verkar membranet klara av den högre belastningen av virus, och VLP i permeatet ökar endast marginellt

när det ökar i råvattnet. Av dessa resultat att döma lyckas membranet med en 5 log-reduktion av virus. Det tycks finnas celler i permeatet, men dessa har troligen sitt ursprung på permeat-sidan i piloten, eftersom de är större än membranets porer. Dessutom nåddes inte rör på permeatsidan av tvätt-kemikalierna, och därmed blev inte den delen desinficerad.

Tabell 5.15 VLP och totalt antal celler i råvatten från Ringsjön och permeat från HFW 1000

	Matarvatten		Permeat	
	VLP	Tot celler	VLP	Tot celler
2013-11-04	160 000 000	4 600 000	<100	110
2013-11-11	190 000 000	3 300 000	120	340
2013-11-18	220 000 000	5 000 000	210	410

VLP och totalt antal celler höll sig stabilare under försöken med Ringsjövatten (Tabell 5.15) än för Bolmenvatten. Det beror troligen på att försöket gjordes under ett kortare tidsspänn. En mindre ökning av virus i källan kan möjligen utläsas. Dock visar dessa data på att membranet avskiljer virusen bra, och reduktionen ligger enligt detta runt 6 log.

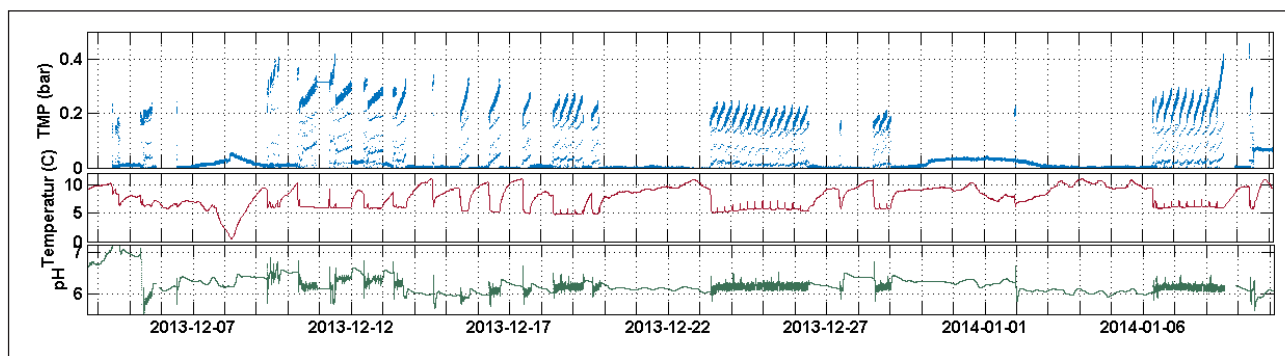
5.4.5 Driftserfarenheter – Bolmen

UF – Aquaflex

Försöket med UF och aluminiumsulfat var relativt stabilt utifrån ökningen av TMP över tid. Däremot var inverkan från vanlig backspolning liten, och TMP var snabbt uppe i samma nivå som innan backspolningen. Däremot återställdes TMP nästan helt och hållet för varje CEB A+B som genomfördes. Trots det blev det ofta avbrott i försöket på grund av problem vid backspolningen när filtreringen skulle återupptas.

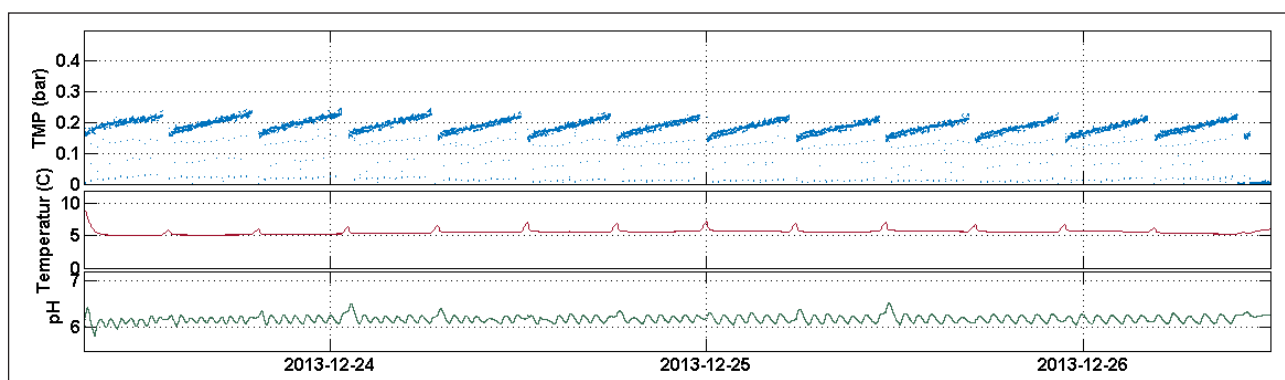
Fällningskemikalien hämtades ur vattenverkets cistern, där den förvarats sedan Ringsjön senast användes som källa (2011) och sedan löstes upp i kranvatten (från Ringsjöverket, d.v.s. Bolmen). Detta kan ha påverkat processen om granulaten inte blev helt upplösta trots att det verkade så. Ett annat alternativ är möjligheten att det fortfarande fanns järn kvar i doseringen. Dock återställdes alltid processen igen av en extra tvätt, vilket inte var fallet då järn skapade problem för ultrafiltreringen (se försöket på Råberga).

I Figur 5.35 presenteras TMP för UF-försöket på Ringsjöverket. Som grafen visar fanns det svårighet att hålla filtrationen stabil, och under de längre perioderna genomfördes backspolning var 20 min och en CEB A+B ungefär fyra gånger per dygn. Varje CEB återställde TMP till samma nivå som tidigare filtration, medan backspolningen inte gav någon större skillnad för TMP. Detta kan vara förklaringen till varför fel uppstod, och trycket blev för högt efter en backspolning för att piloten skulle kunna fortsätta det var alltid vid detta tillfälle som felet uppstod.



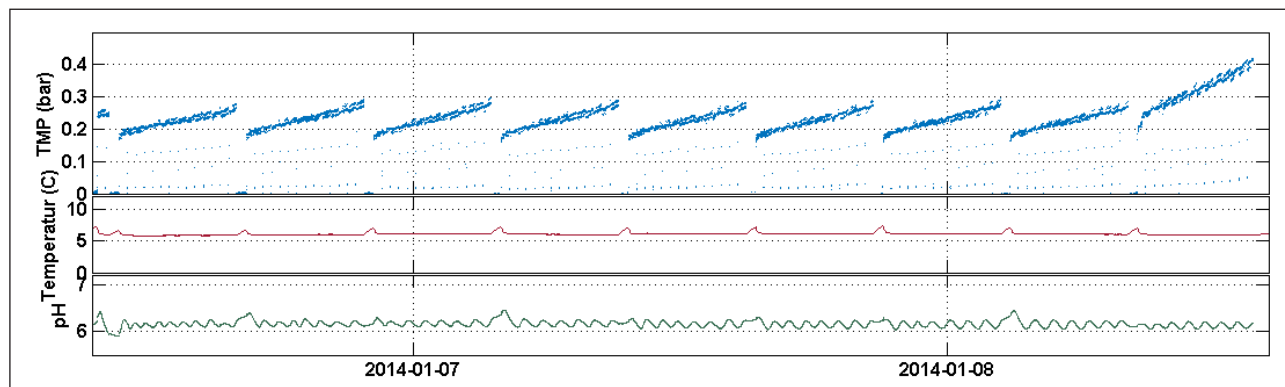
Figur 5.35 TMP, temperatur och pH för UF-försöket med Aquaflex och Bolmenvatten

Som kan ses i Figur 5.36 var TMP relativt lågt under hela filtrationscykeln, och var inte ens i närheten av 0,3 bar när det blev som högst under dessa juldagar. Flux var dock relativt lågt under denna period, och låg på 50 l/m²h.



Figur 5.36 TMP, temperatur och pH för en kontinuerlig bit av försöken över tre dygn med UF (Aquaflex) av Bolmenvatten vid ett flux av 50 l/m²h

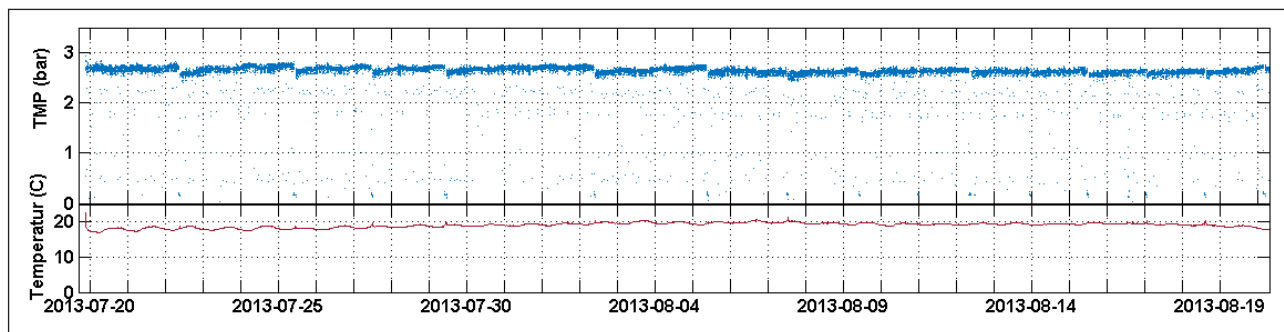
I början av januari höjdes flux till 60 l/m²h istället för 50 l/m²h. Detta gav en marginell höjning av det lägsta TMP, d.v.s. TMP efter en tvätt, men TMP steg hastigare under filtrationen och nådde nu nästan 0,3 bar (Figur 5.37). Ytterligare en ökning av flux till 76,5 l/m²h gjordes strax innan försöket avslutades helt på Ringsjöverket. Detta är den sista filtrationen i Figur 5.37, där TMP stiger till över 0,4 bar.



Figur 5.37 TMP, temperatur och pH för sista dagarna i försöket med UF av Bolmenvatten vid fluxen 60 l/m²h och 76,5 l/m²h

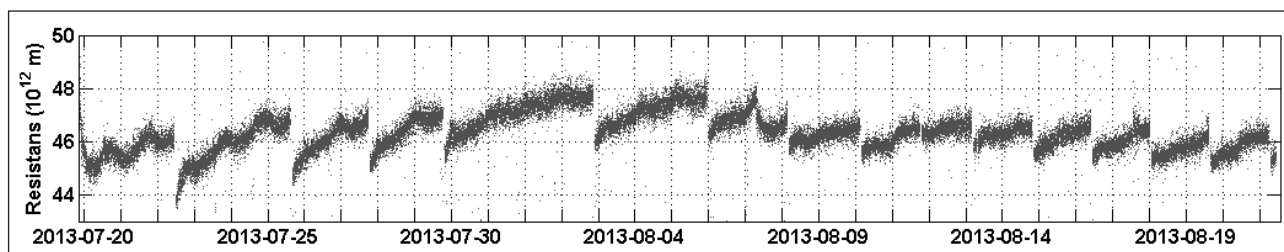
NF – HFW 1000

Vid försöken som redovisas i de tre figurerna nedan (Figur 5.38, Figur 5.39, Figur 5.40 och Figur 5.41) var fluxet 20 l/m²h och tvärströmshastigheten 0,5 m/s.



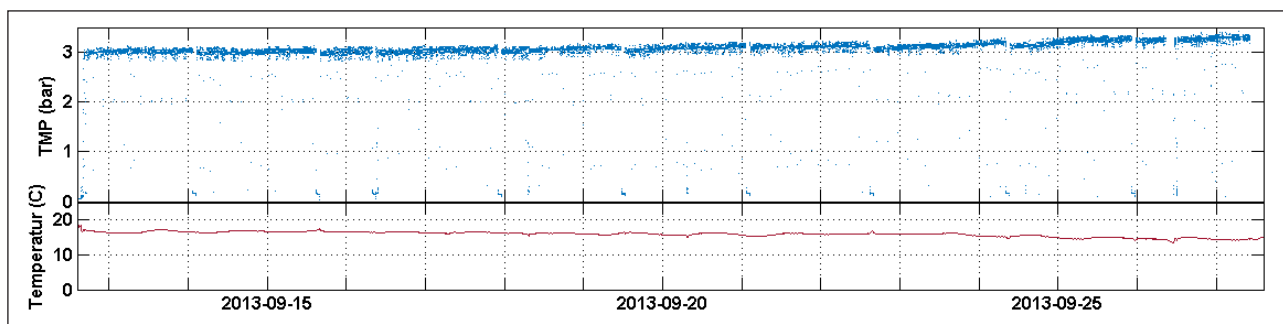
Figur 5.38 TMP och temperatur under sommaren (juli-augusti 2013) vid NF av Bolmenvatten med HFW 1000

Tvättarna varierar i frekvens i Figur 5.38 eftersom inverkan av att variera längden undersöktes, med maximalt fyra dagars mellanrum. TMP var relativt stabilt under denna period, med en temperatur som ändrades mycket lite, och generellt låg TMP kring 2,7 bar. Frekvensen av CEFF hade uppenbar betydelse för hur bra membranet återställdes. Som kan ses i Figur 5.6 återställdes inte membranets motstånd då CEFF utfördes med för långa mellanrum. Utifrån det konstaterades att ungefär 36 timmars mellanrum vore att föredra, vilket är fallet för de 5 sista tvättarna i Figur 5.39, och där går att se att motståndet är detsamma som tidigare filtrationscykels start, eller till och med något lägre, när filtrationen startas på nytt efter en tvätt.



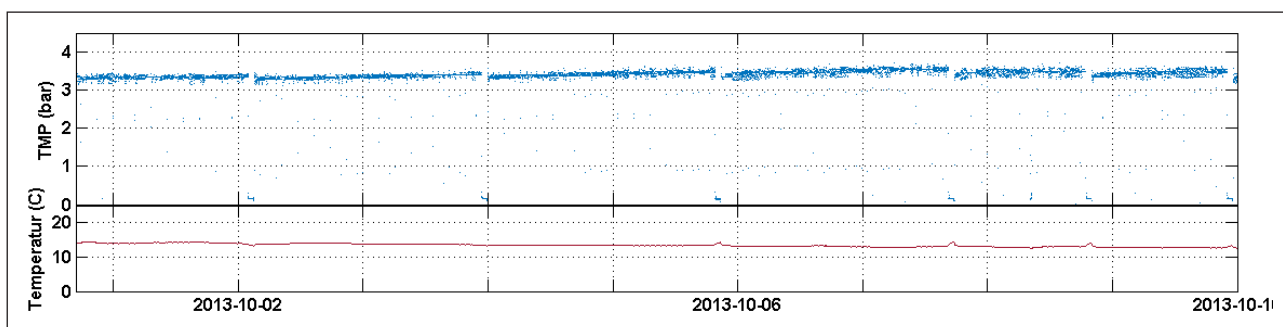
Figur 5.39 Resistans/membranets motstånd under samma period som i figur 5.8

Figur 5.40 och Figur 5.41 är fortsättningar på försöket. På grund av de tidigare nämnda tryckslagen fick försöket pausas ett flertal gånger för att de läckande fibrerna inte skulle orsaka problem för den kemiska tvätten, liksom att tid behövdes för att lokalisera de läckande fibrerna som sedan pluggades igen. CEFF-frekvensen under denna tid var fortsatt ca 36 timmar.



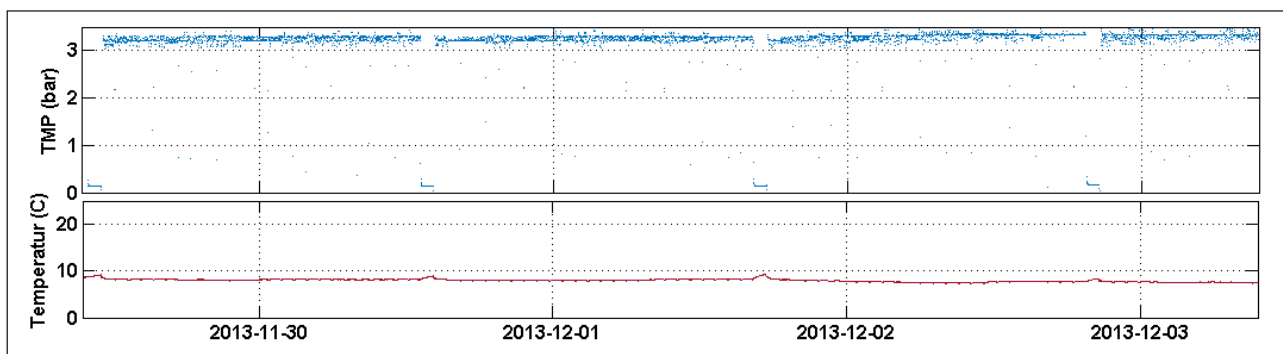
Figur 5.40 TMP och temperatur i slutet av september vid NF av Bolmenvatten med HFW 1000

Eftersom temperaturen i matarvattnet sjönk under höstens gång, steg TMP parallellt med detta. Det går både att se i Figur 5.40 och genom en tydlig ökning mellan figurerna. När temperaturen nådde som högst i månads-skiftet mellan juli och augusti hamnade TMP på runt 2,7 bar (Figur 5.38). När den var som lägst i detta försök hade den stigit till 3,5 bar (Figur 5.41). Då hade temperaturen sjunkit med 7° C, till 12,5° C. Under experimentet med 20 olika inställningar genomfördes en filtration (ca 1,5 h) med samma inställningar. Då var temperaturen 7,5° C och TMP hade ökat till 4,0 bar av denna minskning med 5° C.



Figur 5.41 TMP och temperatur i början av oktober vid NF av Bolmenvatten med HFW 1000

Ett lägre flux testades under några dagar för Bolmenvatten (Figur 5.42). Skillnaden på permeatkvaliteten var försumbar, om någon (absorbans på 0,12). Detta påbörjades strax efter experimentet med 20 inställningar, och detta gav ett TMP på 3,3 bar vid rådande temperatur (7° C). Räknas detta

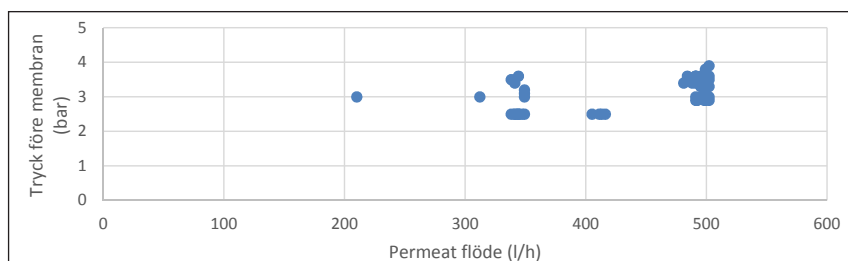


Figur 5.42 TMP och temperatur för Bolmen med lägre flux (15 l/m²h)

om för en viskositet vid 25° C ger det ett TMPTC på 2,4 bar. Detta är relativt nära sommarens resultat för TMP på 2,7 bar (drygt 2,6 bar omräknat till 25° C). Detta är dock bara en matematisk omvandling, och aspekter som skillnaden i matarvattnets kemi och suspenderat material är inte inräknat.

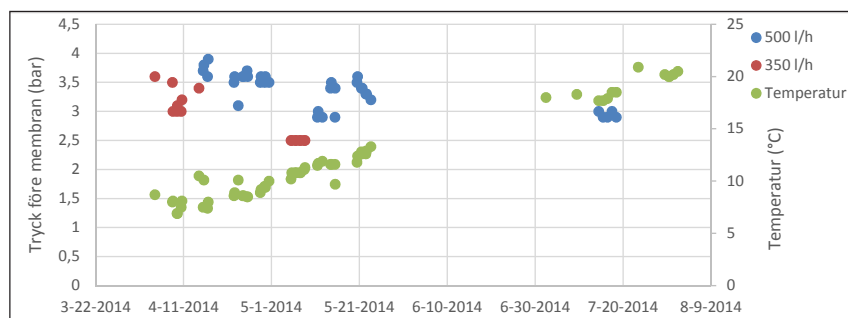
NF – NF270

Veolia-piloten är försedd med tre moduler med spirallindade membran som tillsammans har en membranyta på 7,6 m². Detta innebär att ett genomsnittligt flux var 15–22 l/m²h (350–500 l/h) under detta försök. Producenten av membranet uppger att det dubbla flödet är möjligt för membranet medan konstruktören av pilotanläggningen föreslog flux runt denna nivå. Det är i samma nivå som för HFW 1000. En viktig skillnad är dock att i försöken med hålfibermembranen (Aquaflex och HFW 1000) behandlades råvatten, medan i försöken med det spirallindade membranet NF270 användes långsamfiltrat. Med flux av ungefär samma storlek är också trycket som krävs någorlunda detsamma. Tryck vid olika flux presenteras i Figur 5.43. För ett högre flux krävs en viss ökning av trycket, men detta är temperaturberoende, vilket påverkar jämförelsen mellan dessa två flux.



Figur 5.43 Tryck före första membranenheten i relation till flöde av permeat vid NF med NF270 av långsamfiltrat av Bolmenvatten. TMP är 1 bar lägre än trycket före membranet

Tryckets påverkan av driften illustreras vidare i Figur 5.44 där det går att se en skillnad mellan dessa båda flux. När temperaturen är densamma i matarvattnet är trycket lägre för ett lägre flux. Däremot är det uppenbart att temperaturen har en viss inverkan på vilket tryck som krävs för processen.

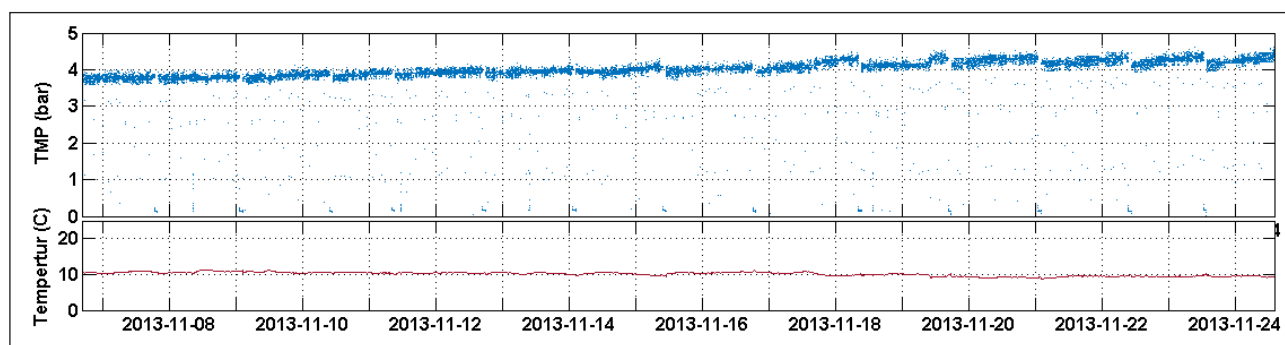


Figur 5.44 Tryck före den första membranenheten över tid som den kördes med NF270 och långsamfiltrat av Bolmenvatten

5.4.6 Driftserfarenheter – NF med HFW 1000 Ringsjövatten

Efter att experimentet med 20 olika inställningar avslutats blev det strömavbrott under helgen, och därmed blev försöket med NF av råvatten från Ringsjön med HFW 1000 pausas ett par dagar. Dock genomfördes det under knappt tre veckor utan några andra incidenter. Som kan ses i Figur 5.45 steg TMP under försökets gång, trots att minskningen av temperaturen var liten. Ökningen gick från 3,7 bar till 4,5 bar med en temperaturminskning på 1° C. Detta hade möjligen kunnat motverkas med mer frekventa CEFF. Dock valdes att hålla förhållandena identiska under denna försöksperiod.

Jämförs detta TMP med det för Bolmen, vid ungefär samma temperatur och samma flux (Figur 5.41) är TMP högre. Räknas TMP vid försökets början om till TMPTC blir det 2,9 bar vid 25° C. För perioden i Figur 5.41 var TMPTC 2,8 bar för Bolmen och med dessa olika förutsättningar är denna skillnad för liten för att dra några slutsatser om att de olika vattenkällornas skulle förändra förutsättningar och kostnaderna för ett membran av HFW 1000-typ. Eftersom Ringsjövatten innehåller en högre koncentration av joner skulle det kunna ha möjlig påverkan på beläggningen av membranet, men ingen egentlig skillnad kan konstateras mellan de båda vattenkällorna.



Figur 5.45 TMP och temperatur under försöken med råvatten från Ringsjön med HFW 1000

5.5 Råberga

5.5.1 Försöksupplägg

Försöken med UF/HFNF-piloten på Råberga vattenverk påbörjades i mitten av oktober 2012 och avslutades i slutet av mars 2013. Piloten matades direkt från råvattenkällan Stångån med hjälp av en sänkbar pump i vattenverkets intag. Aquaflex valdes för den första tidens försök eftersom UF är mest intressant för vattenverket, dock skulle den vid en eventuell utbyggnad placeras annorlunda i processen. Järnklorid (FeCl_3 men FeCl används nedan) från Feralco används som fällningskemikalie på vattenverket, och därför valdes den till en början även för pilotförsöket. Fällningen förde med sig problem med metallbeläggning på membranytan, och att hitta en balans mellan bra operationella omständigheter och fällningskemi visade sig svårt. Bland annat var det svårt att få ett stabilt pH med FeCl i det lågalkaliska vattnet från Stångån. Membranmodulen fick vid ett tillfälle bytas ut mot en ny efter att det konstaterats utfällt järn i fibrerna som blockerade mem-

branytan. Dosen av järnklorid var därefter alldeles för låg för att ge någon märkbar effekt på NOM-avskiljningen. Flux varierades till viss del över tid men generellt låg den mellan 40 l/m²h och 50 l/m²h. Backspolning gjordes en gång i halvtimmen och CEB A+B två gånger per dygn.

Efter ett genomfört bägartest med tre olika alternativ för fällningskemikalie valdes istället polyaluminiumklorid (PACl), Feralco Ekoflock 90, för en tid. Denna fanns sedan tidigare försök på Råberga vattenverk. Till en början valdes ett flux på 45 l/m²h, med backspolning var 30e minut och CEBA + B två gånger per dygn. Flux ökades i två steg till först 60 l/m²h och sedan 75 l/m²h inom en vecka efter förändringen av fällningskemikalie. Dessutom kunde CEB-frekvensen minskas till en gång per dygn. Under den månad som PACl användes varierades dosen av kemikalien och pH för att hitta optimala omständigheter. Dosen varierades mellan 4,0 och 6,0 ppm (Al) och pH mellan 5,6 och 7,6.

Eftersom det hade varit svårt att lyckas skapa en stabil process med FeCl genomfördes ett nytt försök med denna fällningskemikalie p.g.a. det goda resultatet i bägartestet. Förhoppningen var att få till ett stabilare pH under fällningen. Doseringen sattes till 7 ppm (Fe) denna gång och målet för pH var 5,0. Dock uppstod återigen problem med järnet och doseringen sänktes till 2 ppm och flux sänktes åter till 50 l/m²h.

Sista månaden användes en HFW 1000 modul. Till en början provades under en knapp veckas tid korta intervall (ca 1,5 h) med olika inställningar, totalt 20 stycken med 5 olika flux (5, 10, 15, 20 och 25 l/m²h) och 4 olika tvärströmshastigheter (0,25, 0,5, 0,75 och 1,0 m/s). Därefter kördes piloten en tid med flux 15 l/(m²h) och tvärströmshastighet 0,35 m/s, 90 min filtrationstid, d.v.s. mellan två hydrauliska tvättar, och 50 % av feed släpptes som rejekt. Flux ändrades till 20 l/(m²h) och tvärströmshastigheten till 0,5 m/s och filtrationstiden till 120 min. Kortare perioder (3–4 dagar) med försök med en mindre rejektandel utfördes (25 % och 12,5 %), för att utvärdera effekten av en ”julgransstruktur” på membranprocessen. Sedan återställdes rejektnivån till 50 % under resterande tid.

Labbanalyser

Alla analyser som var möjliga att göra på plats gjordes i Tekniska verkens eget ackrediterade laboratorium. När de inte hade möjlighet eller tid fick de skickas till annan instans. Vissa parametrar mättes också online av UF/HFNF-pilot. De parametrar som analyserades under försöket var (om inget annat nämns utfördes de på Tekniska verken egna laboratorium)

- Odlingsbara bakterier, 3 dagar och koliforma bakterier (Alcontrol)
- VLP och totalt antal celler (Göteborg stad, Kretslopp och Vatten)
- Transmittans, UV_{254 nm}
- Turbiditet
- Färg, okulärt bedömt mot referens
- Hårdhet genom koncentration av Ca och Mg
- Al eller Fe beroende på aktuell fällningskemikalie
- Konduktivitet (UF/HFNF-pilot)
- pH (UF/HFNF-pilot)
- Alkalinitet
- TOC

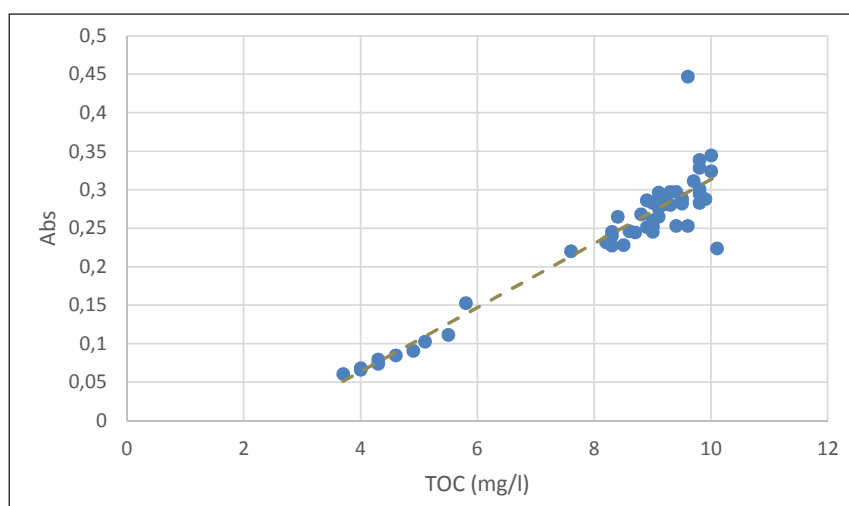
5.5.2 Kemiska resultat

UF

UF – Aquaflex

Eftersom det inte syntes någon märkbar förändring på den kemiska sammansättningen av ett UF utan förbehandling presenteras inga resultat från tiden då ingen fällningskemikalie doserades i systemet.

Figur 5.46 visar på att mätningarna av absorbans och TOC ger ungefär samma indikation på retentionen av NOM i processen. Däremot avskiljs de i olika utsträckning, men båda kan var för sig användas för att uppskatta hur NOM-avskiljningen påverkas när processen förändras eftersom de minskar parallellt.



Figur 5.46 TOC mot absorbans i alla prover från Aquaflex vid UF av vatten vid Råberga vattenverk

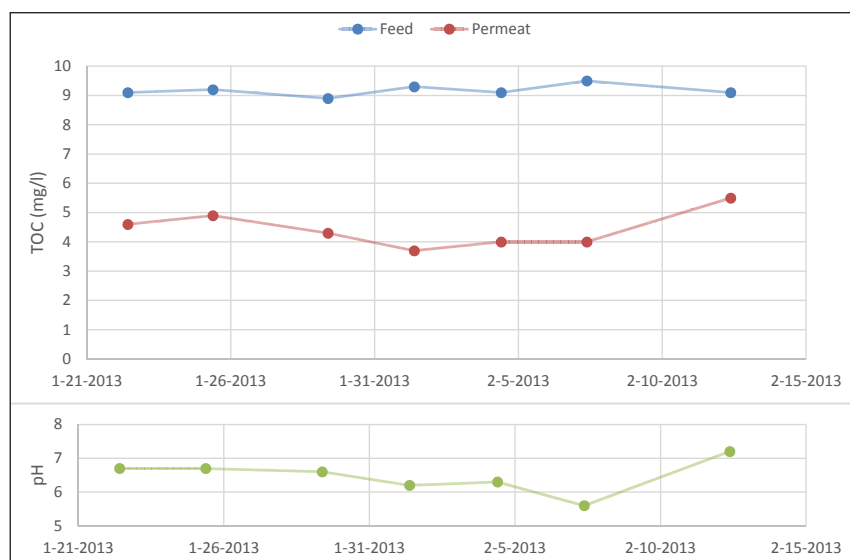
Tabell 5.16 visar medelvärden för de analyser som gjorts av permeatet under UF-försöken. Eftersom förutsättningarna skiljde sig under försökets gång, med förändrade inställningar, kan detta endast ge en indikation på vilka resultat som kan uppnås under längre tid. PACl gav under denna tid mer stabila förhållanden än FeCl vilket kan ha varit bidragande till det generellt bättre resultatet. Eftersom pH varierade mycket under försöken med FeCl₃ är det troligt att resultaten hade kunnat vara bättre för denna fällningskemikalie. Dock medförde FeCl₃ även vissa operationella problem (se försöksupplägg ovan).

Tabell 5.16 Medelvärden av olika parametrar i permeatprov från Aquaflex vid UF i Råberga vattenverk

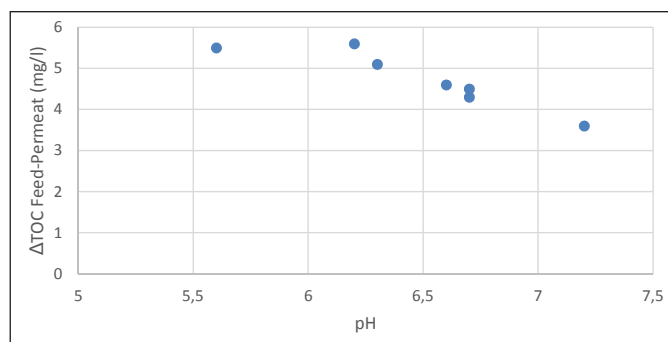
Fällningskem	Alk (mg/l)	Färg (mg/l Pt)	Turb (FNU)	TOC (mg/l)	Abs
FeCl	12 (±2,9)	5 (±7)	0,16 (±0,13)	5,1 (±0,8)	0,10 (±0,05)
PACl	26 (±7,3)	<5 (±1)	0,10 (±0,02)	4,3 (±0,4)	0,07 (±0,01)

I Figur 5.47 visas TOC i permeatet för alla provpunkter med PACl. I den undre grafen visas pH vid samma tidpunkter, eftersom pH hade en tydlig inverkan på NOM-avskiljningen när den ändrades. Ännu tydligare kan det ses i Figur 5.48 där TOC-reduktionen visas i relation till pH (med tillsatt fällningskemikalie). Trots att PACl ska ha ett lågt pH-beroende syns det att

mellan pH 6–7,5 existerar just ett sådant beroende. Därmed kan processen optimeras genom att hitta ett fungerande pH. Samtidigt måste även pHs inverkan på driften tas i beaktande (se nedan). Däremot hade dosen av fällningskemikalie mindre betydelse för hur effektiv NOM avskildes, vilket bland annat kan ses vid pH 6,7 i Figur 5.48 där två olika doser gett en i sammanhanget liten skillnad i reduktionen jämfört med att minska pH till 6,2.



Figur 5.47 TOC i matarvatten och permeat, och fällnings-pH vid samma tillfälle vid försök med UF-membranet Aquaflex vid Råberga vattenverk

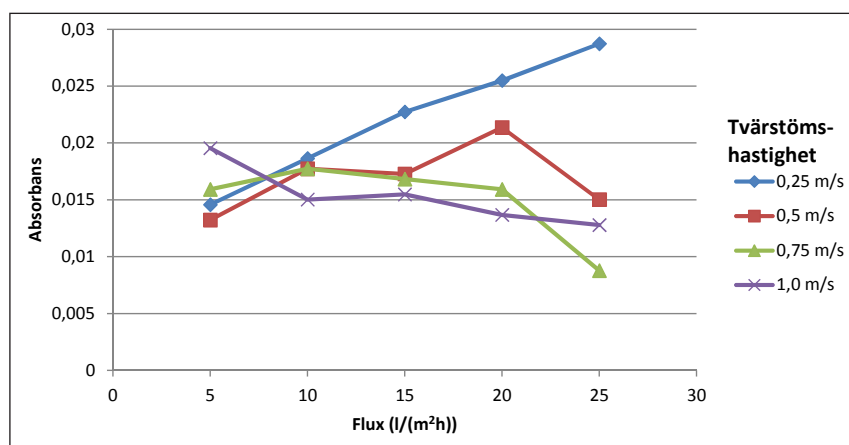


Figur 5.48 Reduktion av TOC över membranet beroende på pH (PACI) vid försök med UF-membranet Aquaflex vid Råberga vattenverk

NF – HFW 1000

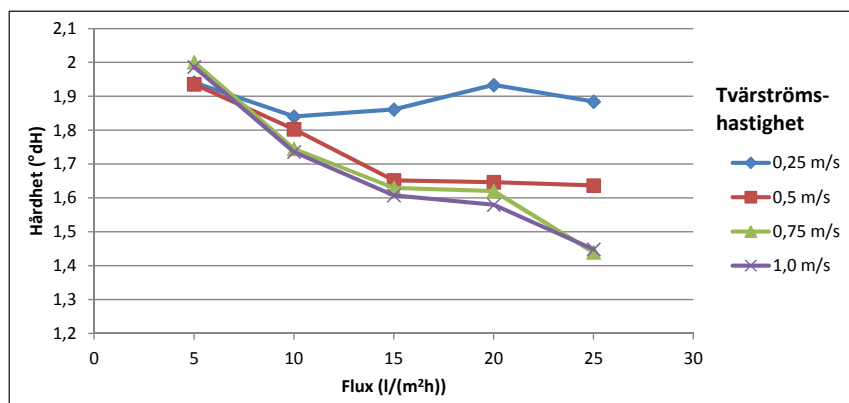
20-punktsexperimenten med NF-membranet HFW 1000 med olika inställningar för flux och tvärströmshastighet gav relativt likvärdiga resultat. De högsta resultaten för permeatet, d.v.s. de med sämst vattenkvalitet, låg på 0,03 i absorbans och TOC koncentration på 1,6 mg/l. Förändringar av inställningar påverkade vattenkemin i permeatet i liten utsträckning mellan olika flux och tvärströmshastigheter, Figur 5.49. Eftersom TOC många gånger understeg 1 mg/l (minsta rapporterade värde) illustrerar variationen av absorbansen bättre skillnaden i reduktion. Intressant att notera är att för en låg tvärströmshastighet (0,25 m/s) så ökar absorbansen i permeatet med ökat flux, men det är inte fallet för de högre tvärströmshastigheterna.

Detta kan bero på hög koncentration på matarsidan vilket kan ha resulterat i en ansamling av ämnen på membranytan vid låga hastigheter. Dock ger alla inställningar mer än acceptabel dricksvattenkvalitet, och i detta fall bör operationella aspekter vara ledande i valet av flux och tvärströmshastighet.



Figur 5.49 Absorbans i permeatet för olika inställningar på flux och tvärströmshastighet (20 olika experiment) vid NF i Råberga vattenverk med HFW 1000

Även avskiljningen av joner påverkas av val av flödenas storlek. Högre flux innebär generellt lägre koncentration av joner i permeatet (Figur 5.50). Detta är givetvis en nackdel för ett redan relativt mjukt vatten. Minskningen av hårdheten är inte stor men uppenbar med ökat flux, förutom vid 0,25 m/s som inte beror märkbart på valt flux.



Figur 5.50 Hårdhet i permeatet för olika inställningar av flux och tvärströmshastighet (notera att skalan börjar på 1,2° dH) vid NF i Råberga vattenverk med HFW 1000

Att minska rejektutloppet till 25 % gav ingen större effekt på kvaliteten på permeatet. I Tabell 18 visas resultaten för de olika rejektnivåerna, och med ett bruttoutbyte på 75 % är avskiljningen av organiskt material ungefär densamma som vid 50 %, utifrån TOC och absorbans i permeatet. Ytterligare en minskning av avblödningen gav däremot viss minskning av avskiljningen, och TOC och absorbans i permeatet mer än fördubblades. Detta tyder på att ett ökat utbyte skulle kunna vara möjligt, men eftersom

försöken gjordes under kort tid med de olika rejektnivåerna går det inte att utvärdera den operationella inverkan, och huruvida den kommer att öka risken för beläggning.

Tabell 5.17 Resultat vid olika utbyten/rejektnivåer vid NF av vatten vid Råberga vattenverk med HFW 1000

Utbyte	TOC (mg/l)		Absorbans		Färg (mg Pt/l)		Hårdhet (dH)	
	Rå	Perm	Rå	Perm	Rå	Perm	Rå	Perm
50 %	9,3	1,4	0,28	0,031	30	5	2,6	1,8
75 %	9,2	1,4	0,28	0,032	30	<5	2,4	1,8
87,5 %	9,2	3,2	0,28	0,078	30	5	2,3	1,9

5.5.3 Mikrobiologiska resultat

I början av 2013 påbörjades provtagningar för mikrobiologiska analyser. Resultaten kan ses i Tabell 5.18 som visar resultat för både matarvatten och permeat. Resultat för UF bekräftar tydligt att den fungerar bra som mikrobiologisk barriär. Dessvärre är resultaten för HFW 1000 missvisande efter denna studie. Vid först provtagningstillfället togs provet medan 20-punkts-experimentet genomfördes, vilket innebär att processen inte var stabil. De två efterföljande resultaten tyder på någon form av integritetsproblem. Det visade sig senare att två fibrer i membranet läckte, troligen på grund av tryckstötter, och därför kontaminerade dessa partiklar i virusstorlek permeatet.

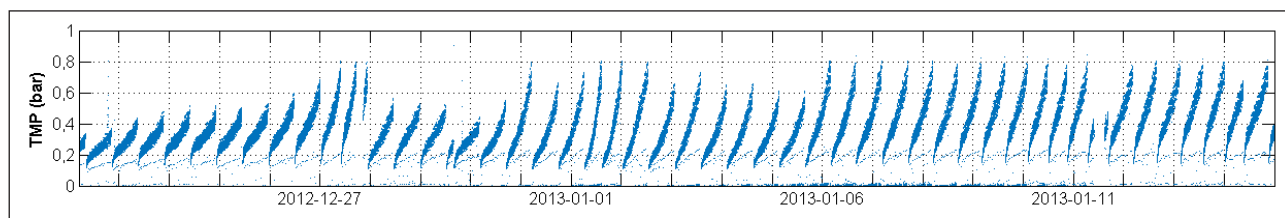
Tabell 5.18 Resultat av mikrobiologiska prover från Råberga vattenverk vid UF med Aquaflex och NF med HFW 1000

	Matarvatten					Permeat			
	Fällnings-kemikalie	Mikroorg. 3 d, 22° C	Colif. bact 35° C	Celler tot (antal/ml)	VLP (antal/ml)	Mikroorg 3 d, 22° C	Colif. bact 35° C	Celler tot (antal/ml)	VLP (antal/ml)
2013-01-15	UF + PACI	1 000	20	8 400 000	16 000 000	<10	<1	<100	<100
2013-01-22	UF + PACI	250	9	7 100 000	26 000 000	<10	<1	<100	<100
2013-01-29	UF + PACI	400	13	1 500 000	18 000 000	<10	<1	<100	<100
2013-02-04	UF + PACI	>3 000	51	1 700 000	49 000 000	<10	<1	200	<100
2013-02-12	UF + PACI	520	17	1 200 000	38 000 000	<10	<1	<100	<100
2013-02-18	UF + FeCl	1 300	36	1 700 000	40 000 000	<10	<1	2 300	670
2013-02-26	UF + FeCl	--	--	1 300 000	37 000 000	--	--	190	<100
2013-03-05	HFW 1000	20	12	790 000	97 000 000	570	<1	2 color0	800
2013-03-12	HFW 1000	200	5	1 700 000	20 000 000	100	<1	73 000	920 000
2013-03-18	HFW 1000	620	13	2 000 000	40 000 000	200	1	270 000	1 000 000

5.5.4 Driftserfarenheter

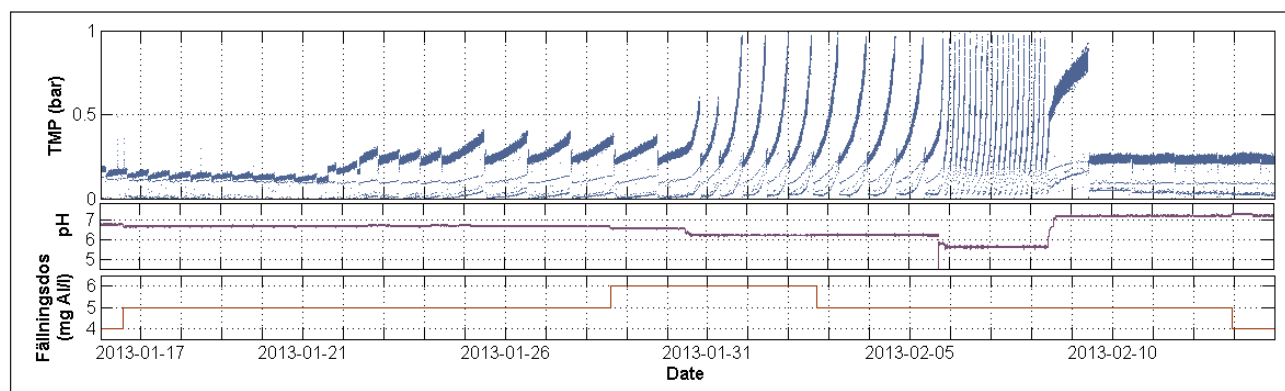
UF – Aquaflex

För att bibehålla ett konstant flux måste transmembrantrycket (TMP) öka under filtreringen. Hur snabbt TMP ökar visar hur ofta membranet behöver rengöras. Utan någon tillsats av fällningskemikalie påverkades TMP genom att öka snabbare än vad som noterades vid användandet av fällningskemikalie. I Figur 5.51 stiger TMP hastigare än för goda förutsättningar med PACI (Figur 5.2).



Figur 5.51 TMP vid försök med Aquaflex vid Råberga och ingen fällningskemikalie

När PACl användes som fällningskemikalie gick det att se ett tydligt beroende av pH för driften. Vid lägre pH var TMP relativt stabilt och det var rimligt att öka tiden mellan två CEB jämfört med försöket innan – då ingen fällningskemikalie användes. Däremot, om pH sänktes till 6,2 eller lägre (Figur 5.52) började TMP stiga betydligt snabbare och vid pH under 6,0 (pH 5,6) steg TMP snabbt och CEB initierades automatiskt oftare på grund av att maximalt TMP (1 bar) uppnåddes. När pH översteg pH 7 uppstod istället bra förhållanden, och TMP steg minimalt mellan tvättarna. Hastigheten med vilken TMP stiger är därför motsatt kvalitetsförbättringen av permeatet. Ett pH på 5,6 gav ingen förbättringen, men däremot innebär detta att vid användandet av PACl på UF måste en avvägning göras mellan att hålla trycket nere eller att uppnå en högre reduktion av NOM, vilket båda styrs av valet av pH.



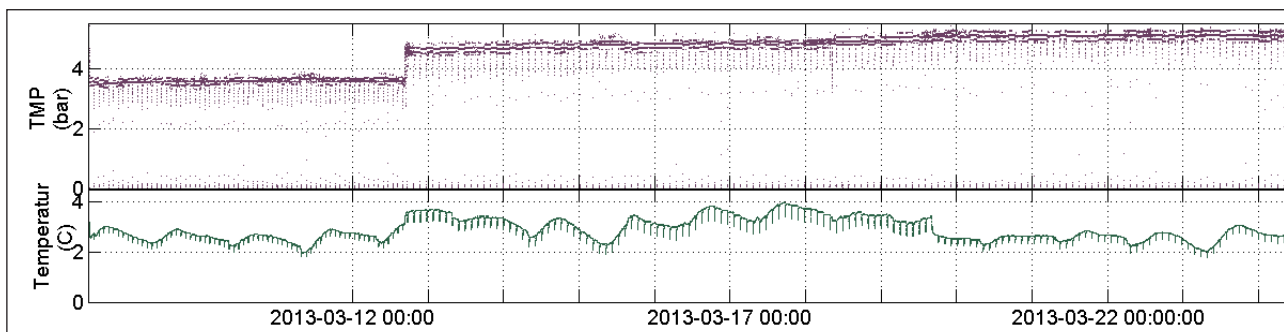
Figur 5.52 TMP under försök med Aquaflex och PACl och pH i matarvattnet. Den 22 januari ökades fluxet till 75 l/m²h och den 24 januari ökades CEB intervallet till ett dygn.

Jämfört med att inte använda fällningskemikalie blev TMP mer stabilt av att tillsätta PACl. Detta tyder på att flockningen av NOM gör att den inte längre är lika benägen att belägga membranytan, och inte interagerar med membranet på samma sätt. Det kan bero på att det inte når ner i porerna, eftersom de lösta ämnena har blivit större, och att det inte fastnar på porernas väggar i samma utsträckning.

När järnklorid användes var driften inte lika stabil, utan TMP steg, och återställdes inte med vanlig CEB. Eftersom råvattnet har så låg alkalinitet var pH svårt att justera. Därmed kan även detta ha haft betydelse för driften eftersom flockarna inte kunde stabiliseras.

NF – HFW 1000

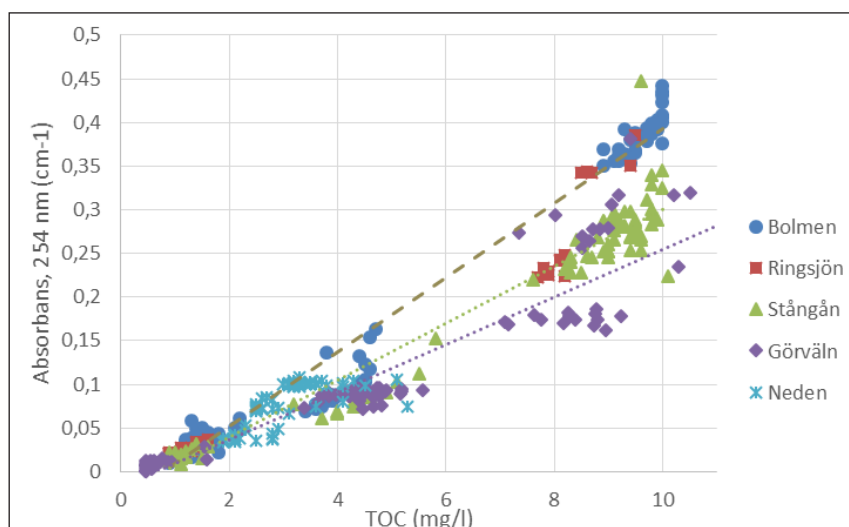
Försöket med HFW 1000 på Råberga vattenverk utfördes i slutet av vintern när utomhustemperaturen var låg och långt under fryspunkten. Därför är TMP högt under denna testperiod och steg över 5 bar (Figur 5.53). Dessutom utfördes ingen kemisk tvätt förrän efter försökets slut vilket innebar att trycket ökade hela tiden genom försöket. Skulle trycket korrigeras matematiskt för 25° C medför det ett TMPTC på drygt 3 bar under de två veckorna. För det lägre fluxet och tvärströmshastigheten, d.v.s. 15 l/m²h och 0,35 m/s var TMP lägre och var ca 3,6 bar istället (2,1 bar i TMPTC). Denna förändring innebar därför en 40 % ökning i behovet av tryckenergi.



Figur 5.53 TMP och temperatur under försöket med HFW 1000 på Råberga (den kraftiga ökningen av TMP är relaterat till ökningen av fluxet)

5.6 Summering av alla vattenverk

Som nämndes i försöket från både Råberga vattenverk och Ringsjöverket syns en uppenbar relation mellan TOC och absorbans i vattenproverna. Detta är illustrerat i Figur 5.54 där data från samtliga råvatten har lagts in i samma graf. Det finns en linjär korrelation mellan TOC och absorbans för alla vattentäkter. På det stora hela verkar HFW 1000 ge ungefär samma förhållanden mellan ämnen som absorberar vid 254 nm och organiskt innehåll generellt. Däremot verkar vatten från Bolmen skilja sig i karaktären från de



Figur 5.54 Absorbans som funktion av TOC för råvatten (höger), UF-permeat (mitten) och NF-permeat (vänster) från alla vattenverk

andra råvattnen. Några provtagningar av Ringsjövatten indikerar att detta vatten har samma typ av relation som Bolmenvatten. Detta kan vara en bekräftelse på att Bolmenvatten av någon anledning kommit in i intaget från Ringsjön, tillsammans med den avvikande hårdheten vid dessa tillfällen. Även resultaten från Stångån ger en annorlunda relation mellan TOC och absorptions efter att det har behandlats med kemikalier (de kan ses som punkterna för TOC vid 3–6 mg/l i Figur 5.53). Däremot verkar råvattnet för både Stångån och Ringsjön ha ett lägre innehåll av ämnen som absorberar vid 254 nm än vad Bolmen har. Intressant nog är de kemiska egenskaperna hos råvattnet i Stångån mer likt Bolmen för de övriga parametrarna.

Liksom Ringsjön varierar råvattnet från Görväln i karaktär, och relationen mellan TOC och absorptions skiljer sig åt beroende på årstid. Görvälns vattenverk tar in vatten på olika djup som varierar under året. Däremot är karaktären mycket lik de andra vattenverken både för den konventionella reningen, liksom för HFW 1000. Neden har lägre koncentrationer av organiskt material i råvattnet, som dessutom har en stor inblandning av grundvatten. Därför ser dessa data annorlunda ut. TOC-värdena för UF-permeat hamnar nära TOC-värdena för råvattnet och ingen tydlig gräns syns.

5.6.1 Inställningar av driftsparametrar

Baserat på de erfarenheter som samlats i detta projekt följer nedan två tabeller (Tabell 5.19 och Tabell 5.20) med information om vad de olika modulerna har för dimensioner på de inställningar som krävs. Dessa båda tabeller utgår ifrån de data som framkommit av försöken på råvatten i UF/HFNF-piloten. Dessa bör bara användas som vägledning, eftersom alla situationer är unika, och för att kunna anpassa metoden till en specifik vattenreningsprocess krävs försök för just det vattnet.

Tabell 5.19 Förslag till inställning av olika driftsparametrar baserat på resultat från försöken med hålfibermembranen HFW 1000 (NF) och Aquaflex (UF)

	Flux (l/m ² h)	Tvärströms- hastighet (m/s)	Intervall backspolning	Intervall kemisk tvätt	Fällnings- kemikalie	pH
HFW 1000	20	0,5	60 min	36–48 h	--	Råvattnets
Aquaflex (PACI)	60–75	0	20–30 min	8–24 h	50 g/m ³	6,3–6,5

Tabell 5.20 Kostnader och förluster för de föreslagna inställningarna

	Energianvändning (kWh/m ³)	Vattenutbyte för en modul (återanvänd backspolning)	Vattenutbyte för en serie med tre moduler (återan- vänd backspolning)	Andel tid membranet är taget ur processen p.g.a. tvätt	Antal moduler för 1 000 m ³ /h (inklu- sive redundans för tvättavbrott)
HFW 1000	0,39 ^a (0,34–0,5) ^b	46,5 % (49 %)	83 % (86 %)	5–6 %	1 400
Aquaflex (PACI)	0,03 ^a	80–87 % (97–98%)	---	8–12 %	233–420

a Vattenförluster och energianvändning för backspolning är inkluderat i beräkningen.

b Medel för perioden, spannet i parentes kommer från skillnaden i temperatur under sommar och vinter, medeltalet uppges, men energianvändningen ökar betydligt under vintern.

Många av kostnaderna och behoven kan troligen reduceras och effektiviseras. Detta är baserat på de förluster som uppstod i pilotanläggningen, och vid en fullskala skulle vatten vid exempelvis spolning av membranlytan kunna användas mer effektivt för flera moduler samtidigt.

Energiförbrukningen är baserad på det medeltryck som krävs, och för NF uppges energiförbrukning vid sommartemperaturer ($0,34 \text{ kWh/m}^3$) och vid kalla vintertemperaturer ($0,5 \text{ kWh/m}^3$). Beräkningarna har utgått från de tryck och flöden som krävs i modulen, och utgår ifrån en verkningsgrad på 80 % för pumparna. Energianvändningen för produktionen från Sydvatten är ungefär $0,3 \text{ kWh/m}^3$ i dagsläget, vilket innebär att en införande av HFW 1000 så gott som skulle fördubbla energianvändningen eftersom råvatten pumpas och liknande fortfarande kommer att behövas. Å andra sidan kan en sådan extra energianvändning vara motiverat för ett bättre dricksvatten. Dessutom är denna användning fortfarande låg om det exempelvis jämförs med den energi som behövs för att värma upp vatten ($1,2 \text{ kWh}$ per 1 m^3 och 1°C).

Det som inte syns i tabellen är skillnaden mellan permeatkvaliteten från de olika modulerna. Eftersom permeatet från HFW 1000-membranet inte kräver någon ytterligare reduktion av organiskt material, medan vidare behandling behövs för permeatet från UF-membranet Aquaflex. Å andra sidan reducerar HFW 1000-membranet en viss del av hårdheten som behöver ersättas. Kostnaden för att öka hårdheten i vattnet med kalk ökar dock bara marginellt för dessa mjuka vatten som redan kräver kalktillsats.

Ytterligare en aspekt är de kemikalier som används för tvätt (syra, bas och natriumhypoklorit). I Tabell 5.20 framgår av skillnaden i tid då modulerna inte kan användas att UF-membranet Aquaflex måste tas ur drift för de olika tvättvarianterna oftare. Mer frekvent kemisk tvätt medför att mer kemikalier förbrukas med detta membran. Detta är utöver den förbrukning som beror på fällningen och pH justeringen, som krävs vid en process med UF men inte för NF. Tvättarna innebär också att procentuellt behövs en större redundans för UF än NF.

5.6.2 Från pilot till fullskaleprocess

Görvälnverket – direkt nanofiltrering av ytvatten från Mälaren

Baserad på resultaten av pågående pilotförsök genomfördes en förstudie med syftet att ta fram en preliminär fullskaledesign för direkt nanofiltrering på Görvälnverket. För detta ändamål definierades förväntad råvattensammansättning, erforderlig permeatkvalitet och minimum av permeatutbyte. För beräkning av massbalanser användes aktuella mätvärden från pilotförsök och specificerade krav av verksamhetsutövaren enligt Tabell 5.21:

Tabell 5.21 Designkriterier för preliminär fullskaleprocess på Görvälnverket

Designparameter	Design value
Totala retention av NOM, baserad på UV_{254}	80%
Totala permeatutbyte, baserad matarvattenmängd	85 %
Genomsnittlig vattentemperatur	$5,73^\circ \text{C}$
Permeabilitet av membran	$10 \text{ l/m}^2 \cdot \text{bar}$
Max. flux vid filtrering	$20 \text{ l/m}^2 \cdot \text{h}$
Max. interval för CEB kombinerat med framspolning	2 dygn
Tvärströmshastighet (I slutet på den andra modulen)	$0,5 \text{ m/s}$

I samråd med processansvariga på Görvälnverket rangordnades de viktigaste designkriterierna enligt följande: 1) Permeatkvalitet, 2) Permeatutbyte och 3) Driftskostnader (inklusive energiförbrukning) samt investeringsnivåer.

Preliminära beräkningar indikerade att det erfordras en total membranarea på mellan 314 480 till 542 120 m² för att kunna matcha vattenverkets nuvarande hydrauliska kapacitet. För att kunna möta designkriterierna föreslås en fyrastegs membranprocess som omfattar 7 862 moduler vid en dricksvattenproduktion på 120 000 m³/d respektive 13 103 moduler vid en maximal kapacitet på 200 000 m³/d. Med en uppskattad fördelning av membranmoduler motsvarande kvot på 10 – 5 – 3 – 2 för processteg 1 till 4, skulle en membranskid i fullskaledesign omfatta 160 moduler (80 – 40 – 24 – 16). Det förutsattes att två moduler drivs i serie i varje processteg.

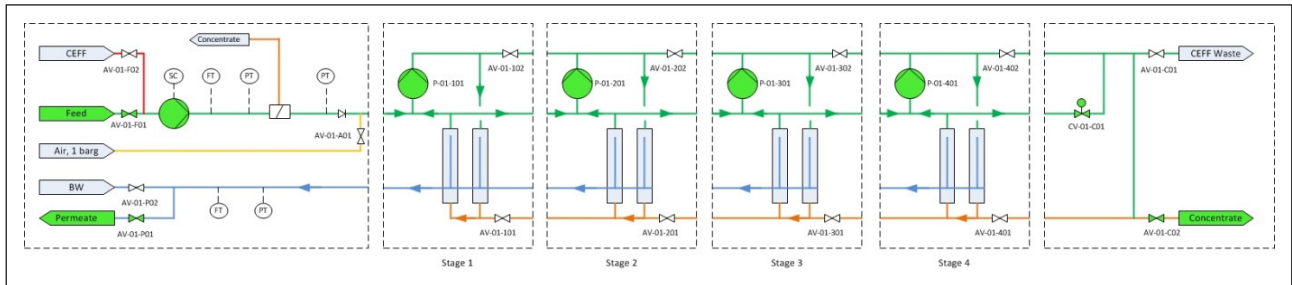
Vald processdesign möjliggör en ”double-pass loop” vilket innebär att koncentratet från den första modulen utgör matarvattnet till den andra modulen. Både recirkulationspumpen och trycksatta ledningar för matarvatten och koncentrat har anslutningar mellan den andra och första modulen. Å ena sidan medför vald konstruktion att recirkulationsflödet halveras då en seriekoppling av modulerna resulterar i mindre processledningar och anslutningsflänsar. Å andra sidan medför denna processkonfiguration olika TMP-förhållanden för båda modulerna pga. tryckfallet över de två modulerna. Föreslagen installation orsakar en skillnad av filtreringsflux mellan den första och andra modulen beroende av membranets permeabilitet, flux och tvärströmshastighet. Vald design innebär att den första modulen drivs vid det högsta flödet och begränsar därmed den totala processdesignen baserad på filtreringsflux. De beräknade designparametrarna för direkt nanofiltrering på Görvälnverket är baserade på interna Pentairs projekteringsverktyg och sammanfattas i Tabell 5.22.

Tabell 5.22 Beräknade designparameter för NF-ombyggnad av Görvälnverket

Designparameter	Beräknade processvärden
Totala retention av NOM, baserad på UV ₂₅₄	80,0 %
Totala permeatutbyte, baserad matarvattenmängd	85,1 %
Nettoflux av permeat	15,9 l/m ² h
Utbyte vid filtrering i första steget	45,1 %
Utbyte vid filtrering i andra steget	67,6 %
Utbyte vid filtrering i tredje steget	81,2 %
Utbyte vid filtrering i fjärde steget	90,2 %
Membranets permeability	10 l/m ² h · bar
Genomsnittlig tryckfall, TMP (@5,73° C)	2,65 bar
Tryckfall över två moduler i ”double-pass loop” (@5,73° C)	1,27 bar
Filtreringsflux, första modul i ”double-pass loop”	20,0 l/m ² h
Filtreringsflux, andra modul i ”double-pass loop”	15,7 l/m ² h
Genomsnittlig tvärströmshastighet	0,53 m/s
Totala verkningsgrad av pumparna	75 %
Tryckfall över en membranskid	0,2 bar
Ytterligare tryckfall i recirkulationsledningar	0,2 bar
Energiförbrukning för trycksättning*	0,12 kWh/m ³ permeat
Energiförbrukning för recirkulation*	0,42 kWh/m ³ permeat
Totala energiförbrukning*	0,54 kWh/m ³ permeat

*Korrigerad beräkning för tillkommande tryckfall och verkningsgrader av pumputrustning

Flerstegsprocessen för direkt nanofiltrering illustreras i Figur 5.55 och förväntad permeatkvalitet för respektive membransteg redovisas i Tabell 5.23.



Figur 5.55 Preliminär fullskaledesign för direkt nanofiltrering på Görvälnverket

Tabell 5.23 Beräknade designparametrar för flerstegsprocessen för direkt nanofiltrering på Görvälnverket

Parameter	Enhet	Steg 1	Steg 2	Steg 3	Steg 4	Totalt
Antal moduler	(n)	3931–6551	1965–3276	1179–1965	786–1310	7862–13103
Matarvatten	(m ³ /h)	5490–9150	2990–4983	1740–2900	990–1650	11210–18683
Tvärströmshastighet	(m/s)	0,53	0,53	0,53	0,53	–
Recirkulationsflöde	(m ³ /h)	40236–67060	20118–33530	12071–20118	8047–13412	–
Koncentratflöde	(m ³ /h)	2990–4983	1740–2900	990–1650	490–817	490–817
Permeatflöde	(m ³ /h)	2500–4167	1250–2083	750–1250	500–833,3	5000–8333
Andel permeat	(%)	50	25	15	10	100
Permeatkvalitet	(% UV ₂₅₄ ret.)	88,7	81,8	70,1	45,9	80,0

6 Slutsatser

Membranteknik kan användas för att reducera NOM i dricksvatten.

Ultrafiltrering måste kombineras med förfällning eller direktfällning för att NOM-halten skall minska. Kombinationen UF och förfällning/direktfällning kräver lägre fällningskemikaliedos än bara kemisk fällning, vilket minskar slamproduktionen. UF med förfällning/direktfällning ger ungefär samma resthalt av NOM som kemisk fällning.

Nanofiltrering fungerar även utan kemisk fällning. NOM-reduktionen blir hög och endast lågmolekylärt organiskt material passerar genom nanofiltermembranen. Retentionen av kalcium och magnesium behöver beaktas.

Ultrafilter kan drivas vid mycket högt vattenutbyte och bara låga spolvattenförluster, lägre än 4 %, medan nanofiltrering behöver drivas med tvärströmsfiltrering för att fungera. För nanofilter kan spolvatten- och retentatförlusterna bedömas uppgå till 15–20 % av totalflödet in till vattenverket.

Såväl nanofilter som ultrafilter ger en god mikrobiell barriär och har som regel en reduktion bättre än 4-log i alla undersökningar. Ofta är reduktionen nära 6-log också för virus. Skulle bristningar eller brott i membranet föreligga minskar barriärverkan snabbt.

Det finns en viss tendens till återväxt av bakterier på permeatsidan av membranen. Denna återväxt beror troligen på att kol passerat igenom membranet utan att bakterier följt med. De få bakterier som då finns kvar eller kontaminerat anläggningen kan tillväxa med hjälp av kolkällan och brist på konkurrenter.

Kapaciteten i ultrafilter är högre än i nanofilter, då mera vatten kan beredas per kvadratmeter membranyta i ultrafilter än i nanofilter. Typiska flux är 100 l/m²h för ultrafilter och 20 l/m²h för nanofilter.

Både ultrafilter och nanofilter kan uppföras i mycket kompakta anläggningar, eftersom membranen kan packas i yteffektiva moduler.

Membranteknik måste trycksättas för att fungera och därmed krävs elenergi till pumpdriften om inte trycket kan åstadkommas hydrostatiskt från en högt belägen vattentäkt. Den specifika elförbrukningen per producerad dricksvattenvolym är ungefär 0,05 kWh/m³ för ultrafilter och 0,5 kWh/m³ för nanofilter.

De säsongsmässiga variationerna behöver beaktas vid driften av membranläggningar. Kallt vatten vintertid ger betydligt (30–40 % lägre) flux än varmt vatten sommartid. Om processen ska köras med bibehållet flux behövs en analog ökning av tryckstegringen.

I jämförelse mellan de olika vattenverken där membranteknik testades i projektet visade det sig att råvattenkvaliteten har stor betydelse för hur länge membranläggningen kunde drivas mellan returspolningscyklerna, men permeatkvaliteten var snarlik efter beredning.

Vid fällning på ultrafilter krävs försök för att hitta en effektiv fällningskemikalie och dos för de specifika kemiska förutsättningarna. Uppehållstid och kemikaliedos kan båda minskas jämfört med konventionell kemisk beredning. Vid instabila förhållanden kan järn ge problem med beläggning

och är inte alltid ett lämpligt val trots att den ger bättre NOM-retention i bägarförsök.

För att säkerställa den mikrobiella barriärverkan behöver integritetstester genomföras regelbundet över membranmodulerna. Integritetstesterna visar om det finns läckande membran i anläggningen.

Även om membranen är intakta kan ibland återväxt av mikroorganismer ske i vattnet efter att permeatet samlats upp. Kemiskt desinfektion vid returspolning ger en ökad mikrobiell säkerhet för permeatet. Alternativt kan permeatet behandlas med biologiskt aktivt kol, i långsamfilter eller med UV-desinfektion.

Vid design och dimensionering av membrantechnik för dricksvattenbehandling finns numera förhållandevis mycket erfarenheter på ett generellt plan. Det är dock värdefullt att genomföra pilotkörningar för det specifika vattenverket om membrantechnik övervägs som metod.

7 Referenser och läs vidare

- Kristina Dahlberg, 2011, Mikrobiologisk riskanalys för dricksvattenrening vid Görvälnverket, Examensarbete på SLU, UPTECW11016
- Kristofer Dahlberg, Jesper Knutsson och Gerald Heinicke, Råvattenkarakterisering med inriktning på igensättningar av membran och avskiljning av organiskt material i kemisk fällning, SVU-rapport 2009-10
- Erika Einarsson, 2014, Membrane Technology at Berggården's Water Treatment Plant – a pilot study, Linköpings Universitet, Mastersuppsats LITH-IFM-A-EX 14/2950-SE
- Per Ericsson, Susanna Hajdu, Eva Willén, Vattenkvaliteten i Görväln, en dynamisk Mälarfjärd, Tidsskrift VATTEN 40:193-211, Lund 1984
- Heinicke (2012) Utvärdering av pilotförsök hos Kvarnagårdens vattenverk, DHI-uppdragsrapport
- Heinicke (2012) Riskanalyser med GDP/MRA för Kvarnagårdens vattenverk, DHI-uppdragsrapport
- Gerald Heinicke, Charlotte Lindstedt, Petra Viklund, Helena Almqvist och Olof Bergstedt, Upphandling av ultrafilter (UF), SVU-rapport 2011-05
- Keucken (2014) Evaluation of Color Removal Package (CRP) for drinking water based on novel hollow fiber nanofiltration, 9th Nordic Drinking Water Conference, Helsinki (FIN), 02.–04.06.2014, Conference Proceedings
- Keucken (2012) Study of biopolymer retention, NOM fouling and microbial barrier effects in pilot scale with ultrafiltration and combined coagulation IWA World Water Congress & Exhibition, Busan (Korea), 16.–20.09.2012, Conference Proceedings
- Keucken, Heinicke, (2011) NOM Characterization and Removal by Water Treatment Processes for Drinking Water and Ultra Pure Process Water, Fourth IWA Speciality Conference on NOM, Costa Mesa (USA), 28.07.2011, Conference Proceedings
- Motala ströms vattenvårdsförbund, 2014, 50 år för renare vatten, Motala ströms vattenvårdsförbund.
- Pentair, www.x-flow.com
- Karin Rask (2011), Karakterisering av råvattenkvalitet och dess konsekvenser på Kvarnagårdens dricksvattenberedning, Examensarbete på Högskolan i Borås, Nr.7/2011
- Sydvatten AB, www.sydvatten.se
- Sweden Water Research, www.swedenwaterresearch.se
- Tekniska verken i Linköping AB, www.tekniskaverken.se



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