

# Dynamisk mikrofiltrering for Tolga Vannforsyning

Av Torleiv Bilstad, Svein Gamman og Johannes Wiik.

Torleiv Bilstad er 1. amanuensis ved Høgskolesenteret i Rogaland.

Svein Gamman er ingeniør og ansatt i Norwell A/S.

Johannes Wiik er avd.dir. i Helsedirektoratet.

## INNLEDNING

Tolga Vannforsyning A/L forsyner tettstedet Tolga med drikkevann fra Store Tallsjøen. Råvannskvaliteten er varierende og spesielt i den varme årstiden er konsentrasjoner av koliforme bakterier flere hundre pr. 100 ml vann.

Det skal bygges et renseanlegg for råvann fra Store Tallsjøen. Anlegget skal betjene ca. 1000 mennesker, et meieri, diverse småindustrier, et sykehjem, et hotell og tap i transportnettet.

Våren 1988 ble brukt til å gjøre forsøk med mikrofiltrering av vann fra Store Tallsjøen. Rapporten viser at separasjonseffekten av bakterier var 100%, selv ved forsøksvis iblanding av rensed kjoakk i fødevannet.

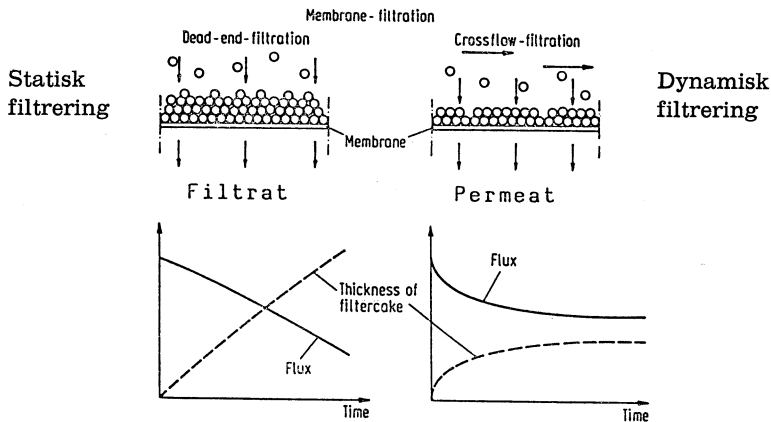
Første del av rapporten definerer prinsippet dynamisk mikrofiltrering og utforming av anlegg basert på denne teknologi. Tolga resultatene gir klare indikasjoner på at membranfiltrering av norsk drikkevann, spesielt for mindre anlegg, har investerings- og driftsmessige fordeler. Anleggene er helautomatiske, og forsøkene viser at produktvannet er bakteriologisk tilfredsstillende. Det er imidlertid ikke målt på virus i forsøket. Vurdert ut fra porestørrel-

sen alene, vil virus kunne passere filteret.

## TEORI

Filtrering er en av mange metoder for å separere tørrstoffpartikler og væske. Figur 1 illustrerer forskjellen mellom statisk filtrering (kakefiltrering) og dynamisk filtrering (tverrstrømsfiltrering). Produktvæskestrømmene, filtrat eller permeat, varierer over tid p.g.a. trykkforandringer, væskeviskositet og filter- og kakemotstand. Ved statisk filtrering øker stadig tykkelsen av filterkaken og filtratstrømmen går mot null.

Ved dynamisk filtrering strømmer fødevæskan parallelt med filterflaten (membranen) mens permeat strømmer på tvers, tverrstrømning, gjennom filteret. Dynamisk filtrering medfører skjærkrefter og turbulens langs membranflaten og dette begrenser tykkelsen av kakelaget. Denne aktiviteten resulterer i transport av partikler fra kaken og tilbake i fødevæskan. Det poengteres at fødevæskan strømmer kontinuerlig langs membranflaten og at partiklene i suspensjon og i kakelaget er i likevekt. Skjematisk er dette fenomenet kalt konsentrasjons polarisering og vist i figur 2.

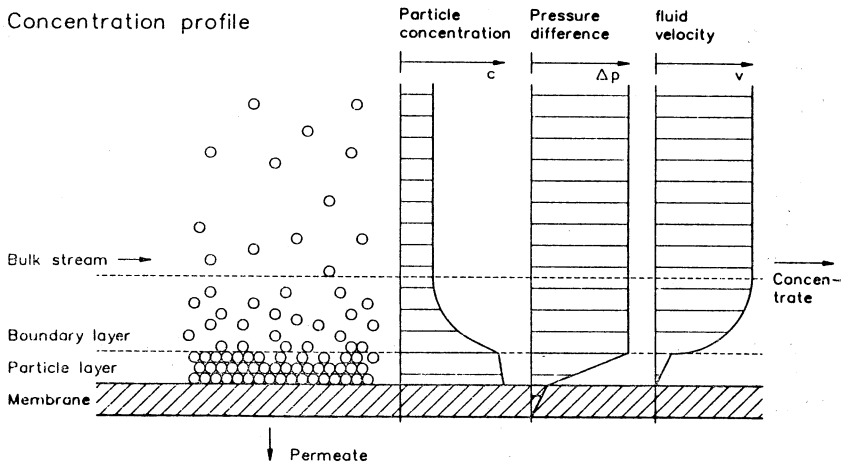


Figur 1. Statisk og dynamisk separasjon.

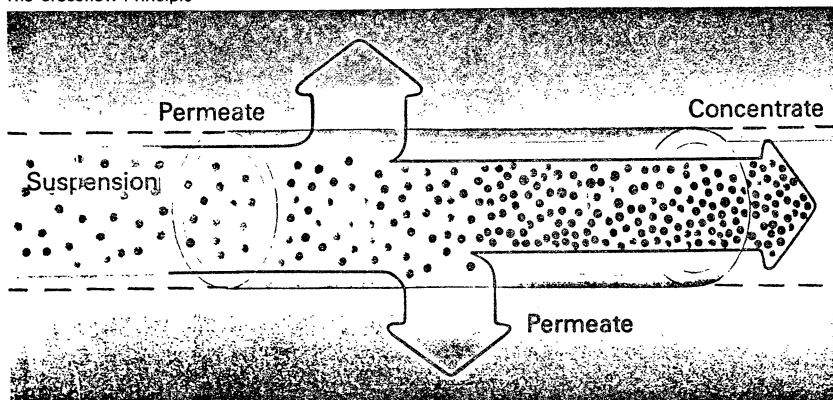
Partikkelkaken er ofte komprimerbar og porositeten avtar med økende trykk. Dette medfører økende hydraulisk motstand i kaken og denne kan bli betydelig større enn motstanden i selve membranen.

Filtreringsmodeller øker forståelsen for mekanismene ved dynamisk

mikrofiltrering. Derimot er ikke teoretiske beregninger i seg selv nok for å beregne permeat-rater. Partikkeltransporten påvirkes av diffusjonsegenskaper, væsketurbulens, partikkelstruktur og partikkelmateriale. I tillegg til den hydrauliske kakemotstand kommer også fenome-



Figur 2. Konsentrasjonspolarisering på membranflaten.



Figur 3. *Dynamisk membranfiltrering.*

ner som adsorpsjon og kjemiske og fysiske reaksjoner i kaken. Dette betyr at småskala filtreringsforsøk må utføres før det dimensjoneres fullskala membranlegg.

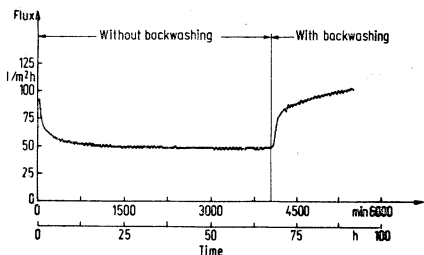
Ved statisk filtrering vil tilnærmet all væske gjenvinnes som filtrat. Dette trenger ikke være tilfelle ved dynamisk filtrering. Konsentratet i figur 3, hvor membranflaten er rørformet, strømmer til avløp. Gjenvinningen av permeat kan imidlertid økes til nærmere 100% ved at konsentratet resirkuleres; blandes med fødevæsken.

Fordelene med statisk filtrering kan kombineres med dynamisk filtrering. Dette gjøres ved at konsentratstrømmen i figur 3 stenges og all væskestrømning fra prosessen er permeat, d.v.s. 100% gjenvinning. Konsentratet slippes ut som en puls når trykkfallet eller tidsautomatikken tilsier dette. Kombinasjonen statisk og dynamisk filtrering kalles kvasi-tverrstrømning (semicross-

flow) og egner seg f.eks. utmerket til filtrering av drikkevann.

Nødvendig differentialtrykk fra fødevæske til permeat ved dynamisk mikrofiltrering er ca.  $1 \text{ kg/cm}^2$ . Membranrøret i figur 3 kan trykkbelastes i begge retninger. Denne egenskapen er vesentlig og nyttes til å rengjøre membranen når kakelaget resulterer i nedsatt permeatproduksjon. Figur 4 viser effekten på permeatproduksjonen ved tilbakespyling. Både ved tverrstrømning og kvasi-tverrstrømning tilbakespyles membranflaten uten at driften avbrytes. I beste fall separeres partikkelbelegget fullstendig fra membranflaten slik at partiklene strømmer med konsentratet til avløp. I verste fall vil tilbakespylingen gjøre partikkelbelegget mer porøst og minske den hydrauliske motstand gjennom dette.

Hydraulisk tilbakespyling av membranflaten må stundom suppleres med kjemisk og fysisk rengjøring.



Figur 4. Permeatproduksjon med og uten tilbakespyling.

Det er vanlig å bruke varmt vann med såpe, syre og/eller lut for å løse partikkelkaken.

#### Driftskontroll:

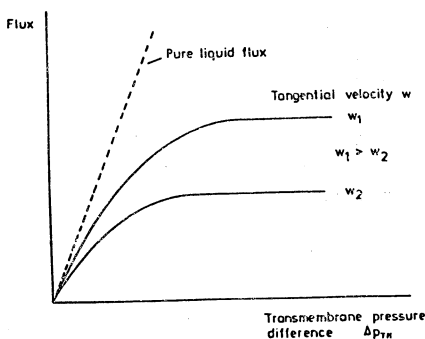
De viktigste driftsparametre ved dynamisk mikrofiltrering er differentialtrykk, væskehastighet, temperatur og partikkelkonsentrasjon.

Forskjellen i trykk fra fødeside til permeat påvirker både permeatproduksjonshastighet og partikkelkonsentrasjon på membranflaten. Produksjon av permeat øker derfor ikke lineært med økende differentialtrykk. Hovedgrunnen er at økende trykk resulterer i en mer kompakt partikkelkake og en økende netto partikkelansamling på membranen.

Den hydrauliske motstand i membran og partikkelkake kan sammenlignes med motstanden i bare membran ved å filtrere væske uten partikler. Figur 5 viser også effekten av fødevæskens hastighet parallelt med membranflaten. Høye hastigheter øker skjærkreftene på partikkelkaken og opprettholder derfor en høy permeatrate over tid. Den optimale tangentielle hastighet er av-

hengig av fødevæske og membranflate utforming. For rør-membraner, f.eks., med 5.5 mm diameter, varierer den optimale hastighet fra 2,5 til 5 m/s.

Permeatproduksjonen øker generelt med økende temperatur p.g.a. redusert væskeviskositet. Oppløses derimot partiklene, eventuelt felles ved temperaturforandringer, vil permeat-ratene påvirkes i samsvar med dette.



Figur 5.

Virkinger av differentialtrykk og fødevæskeshastighet på permeaten.

Partikkelkonsentrasjonen i fødevæsken påvirker massetransport av partikler til og fra membranflaten. Påvirkningen er flerfoldig sammensatt, men permeat-ratene kan generelt sies å avta med økende partikkelkonsentrasjon.

#### Membranutforming:

Membranflaten har liten variasjon i porestørrelser. Dette er selvsagt også et nødvendig kriterium for en effektiv separasjon av en gitt minimum partikkelstørrelse. I praksis

brukes mikromembraner med gjennomsnittlig porestørrelser fra 0,05 til 0,8 mikrometer (*my*). Mikromembraner har generelt en høy porøsitet som bidrar til høye permeat-hastigheter ved lave differentialtrykk. Flere typer mikromembraner er på markedet, utformet som flate eller spiralbundne membraner, rør eller kapilærmembraner. Alle har god mekanisk styrke og er temperatur-stabile.

Fordeler med rørmembraner er bl.a. at fødevæsken kan være viskøs og inneholde høye konsentrasjoner av suspenderte partikler. Kapilærmembraner har store membranflater pr. volumenhet. Dette er tilfelle også for spiralformede membraner. Disse tettes derimot raskt av suspenderte partikler. Spiralformede membraner brukes lite til mikrofiltrering.

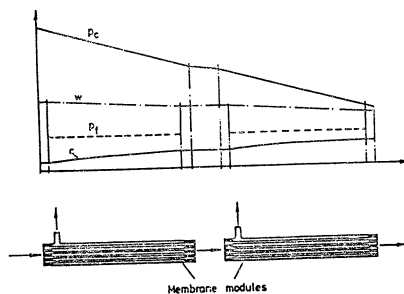
Membranegenskapene er stort sett avhengig av materialvalg og tilberedningsprosess. Polymerer er det mest vanlige membranmateriale selv om uorganiske mikromembraner også brukes. Uorganiske materialer har til sammenligning liten porøsitet, men høy termisk stabilitet.

Rørmembraner har indre diameter mellom 4 og 20 mm, mens kapilær membraner varierer mellom 0,5 og 2 mm. Begge membrantyper er dimensjonert til å drives med kontinuerlige trykkvariasjoner og med trykkfall både fra innsiden og fra utsiden. Fødevæsken strømmer på innsiden av både rør- og kapilærmembranene. Flere membraner ligger vanligvis parallelt samlet i en

bunt inne i en sylindrisk kapsel. Innsiden av membranene har felles inn- og utgang i respektive ender av kapselen. Permeatet samles inne i kapselhuset og ledes til utløp i kapselveggen. Kapselen er vanligvis lagd av polypropylen eller stål.

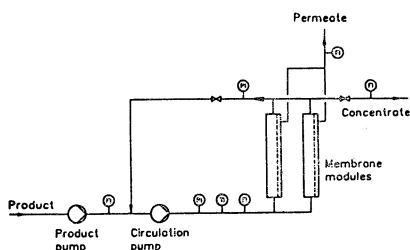
### Anleggsutforming:

Det enkleste oppsett for mikrofiltrering med tverrstrømning er vist i figur 6, hvor en eller flere membrankapsler er forbundet i serie. Fødetrykket reduseres i lengderetning fra innløp til utløp gjennom enkeltmembranene mens tørrstoff konsentrasjonen øker. Fødehastigheten avtar litt i lengderetning gjennom membranen. Hovedgrunnen for disse variasjonene er at noe av fødevæsket volumet blir til permeat. Det er helt vanlig å resirkulere konsentratet både for å øke konsentrasjonen av tørrstoff ytterligere, og for å øke gjenvinning av permeat. Uten resirkulering er gjenvinningsgraden ca. 5%.



Figur 6.

Profiler av fødetrykk ( $p_f$ ), fødehastighet ( $w$ ), permeattrykk ( $p_c$ ) og partikkelkonsentrasjon ( $c$ ) i avløp fra dynamisk mikrofiltrering.



Figur 7.

*Typisk strømnings skjema for dynamisk membranseparasjon.*

Et typisk tverrstrømningsanlegg er vist i figur 7. Nødvendig instrumentering er også vist. Sirkulasjons-pumpen og strupeventilen/rotamæret F1 påvirker strømningsforholdene i membranene og differentialtrykket som er trykkforskjellen mellom fødevæske/konsentrat ( $p_c$ ) og permeat ( $p_p$ ).

## TOLGA UTPRØVING

Til forsøkene ble det brukt et mobilt membranlegg som i prinsipp er bygd som i figur 7. De to sylinderkapslene er hver 612 mm lange og 126 mm ytre diameter og inneholder hver 2600 kapilærmembraner av typen Accurel hvor innvendig diameter er 0,6 mm og nominell og maksimum porestørrelse er henholdsvis 0,2 my og 0,6 my. Hver kapsel har 2,2 m<sup>2</sup> effektiv membranflate. Kapslene er av syrefast stål, mens mebranene er lagd av polypropylen med 75% porøsitet.

Accurel membranene er sertifisert av HIMA, Health Industry Manufactureres Association, for bruk i næringsmiddelindustrien (1982).

Sertifiseringsprosessen for 0,2 my nominell porestørrelse betyr at permeatet er bakteriefritt etter en opprinnelig konsentrasjon på 10 millioner/cm<sup>2</sup> *Pseudomonas Diminuta* i fødevannet. Vurdert ut fra porestørrelsen på dette filter, vil virus kunne passere.

Membrananlegget er montert i rustfri stålramme med målene 600 mm, 500 mm og 1300 mm for henholdsvis lengde, bredde og høyde. Ventiler og måleutstyr er inkludert i anlegget for kontroll og styring. På Tolga ble anlegget drevet manuelt, men det kan kjøres helautomatisk. Vekten av anlegget er 60 kg.

Utprøvingen ble gjort i bygget til Tolga kloakkrensseanlegg og koplet til vannforsyningsledningen fra Store Tallsjøen. Fødevann gikk uten forbehandling til mikromembranene. Vanntrykket på ledningsnettet var 5,6 kg/cm<sup>2</sup> som via reduksjonsventil ga 2,8 kg/cm<sup>2</sup> fødevannstrykk. Vanntemperaturen var konstant 3,4°C

Driften av anlegget var todelt. I første periode ble det drevet med kvasi-tverrstrømning, og i siste periode etter prinsippet tverrstrømning. Tolga Vannforsyning ønsket å drive anlegget ubemannet over lengre perioder og siden automatikk ikke skulle brukes, medførte dette at tverrstrømning ble nyttet det meste av tiden. Fordi anlegget ble kjørt manuelt ble driften avbrutt i helgene. Total driftstid var 178,4 timer med 165,3 m<sup>3</sup> produktvann som var fritt for kolibakterier og kintall basert på analyser utført etter Norsk Standard.

## RESULTATER OG DISKUSJON

### Kvasi-tverrstrømning:

Gjennomsnittlig permeatrate var 401 l/m<sup>2</sup>-h med minimum og maksimum produksjoner på henholdsvis 295 og 614 l/m<sup>2</sup>-h. Gjenvinningsgraden var ca. 90%.

Produksjonsraten sank etter få timer fra ca. 2 m<sup>3</sup>/h til ca. 1,4 m<sup>3</sup>/h for så å holde seg konstant. Dette er et helt vanlig forløp idet massetransport av partikler til og fra membranflaten etablerer en likevekt i denne tiden (se figurene 1 og 4 for spesifikk permeatrate). Ved utspyling av konsentrat og tilbakespyling gjennom membranflaten opprettholdes denne likevekten ofte i mange døgn. Spyletiden er hver gang av ett par sekunders varighet. Etter en tid bygges imidlertid tørrstoffpartiklene opp på membranen til tross for spyling. Permeatraten synker da ytterligere. På Tolga kom det aldri til dette punktet, men kjemisk rengjøring av membranene ble likevel utført for å demonstrere effekten. Umiddelbart etter å ha vasket membranene i 5% NaOH løsning, økte permeatraten til utgangsverdien, d.v.s. 2 m<sup>3</sup>/h.

Det ble aldri påvist kolibakterier eller kimtall i permeatet selv etter iblanding av spillvann fra kloakkrenseanlegget i fødevannet. Analyser av fødevannet ga konsentrasjoner for koliforme bakterier og kimtall på henholdsvis 340 og 1800 pr. 100 ml fødevann. Fysisk/kjemiske analyser viste at pH var 7,4, fargetallet 5 mg Pt/l og turbiditet 0,75 FTU. Tilsvarende verdier i permeatet var pH 7,3, fargetall 5 mg Pt/l

og turbiditet 0,2 FTU. Resultatene er i samsvar med erfaringer fra farmasøytisk industri hvor denne membrantypen brukes til filtrering for bakteriefrihet.

### Tverrstrømning:

Dynamisk filtrering uten resirkulering eller struping av konsentrat er sjelden interessant. Uten struping/resirkulering er gjenvinningsgraden bare ca. 5%. På Tolga ble fire forskjellige gjenvinningsgrader prøvd, 40%, 50%, 60% og 80%.

Permeatproduksjonen er stort sett stabil for hver av gjenvinningsgradene. Det ble likevel foretatt en kjemisk rengjøring for å se virkningen av denne. Effekten var umiddelbar idet permeatraten økte betraktelig; fra 0,75 m<sup>3</sup>/h (170 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>/h) til 1,35 m<sup>3</sup>/h (307 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>/h). Det må også bemerkes at 307 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>-h vedvarte over 21 timer uten tilbakespyling.

Tabell 1 viser gjennomsnittlig permeatrate for alle forsøkene på Tolga. Resultatene viser at permeatraten øker fra 157 l/m<sup>2</sup>-h ved 40% gjenvinning til over 400 l/m<sup>2</sup>-h ved 90% gjenvinning (kvasitverrstrømning).

Tabell 1.

*Gjennomsnittlige permeatrate fra membranfiltrering.*

Gjenvinning	Permeat
40%	157 l/m <sup>2</sup> -h
50%	199 l/m <sup>2</sup> -h
60%	219 l/m <sup>2</sup> -h
80%	291 l/m <sup>2</sup> -h
90%	401 l/m <sup>2</sup> -h

Flere bakterieanalyser ble utført på permeatet og alle viste at permeatet var null for både kolibakterier og kimtall.

Fødevannstemperaturen var 3,4°C under hele forsøksperioden og blir ikke særlig lavere ved andre årstider. Permeatratene er svært temperaturavhengig, og er ved et minimum ved lave temperaturer. Vannforbruket på Tolga er til sammenligning ved et maksimum i den kalde årstiden fordi kraner holdes åpne for å hindre isdannelse i ledningsnett.

I hele forsøksperioden viste analyser av råvann fra Store Tallsjøen svært konstante konsentrasjoner for turbiditet, fargetall og pH; henholdsvis 0,2 FTU, 10 mg Pt/l og 7,3. Filtreringsprosessen forandret ikke pH eller fargetallet, men turbiditeten ble halvert.

Forsøkene med mikrofiltrering ble utført i den mest kritiske årstiden med tanke på å bruke resultatene direkte til dimensjonering av fullskala renseanlegg, d.v.s. maksimum forbruk og minimum temperatur. Volumet av et antatt utjevningssjøbasseng vil således sammen med forsøksresultatene bestemme nødvendig membranflate i anlegget.

## KONKLUSJONER

Dynamisk mikrofiltrering har siden 1980 vært en alternativ prosess for industriell partikkelseparasjon. I næringsmiddel- og farmasøytisk industri brukes mikromembraner til bl.a. bakteriefiltrering av prosessvann, mens kjemisk og metallurgisk

industri bl.a. gjenvinner katalysepartikler via membraneparasjon.

Mikrofiltrering er praktisk å bruke både til små og store væskeløsligheter. Det kan vises til flere eksempler hvor membraneparasjon både er økonomisk og kvalitativt fordelaktig sammenlignet med alternative separasjonsprosesser.

Fenomenet konsentrasjonspolarisering med dannelse av et partikkelag på membranflaten betyr bl.a. at optimal dimensjonering av fullskalanlegg baseres på forsøksresultat. Dimensjonering for filtrering av norsk drikkevann vil imidlertid kunne gjøres empirisk i nær framtid. Fysiske filtreringsmodeller vil sammen med erfaringstall gjøre dette mulig.

Dynamisk filtrering av norsk drikkevann bør gjøres etter prinsippet kvasi-tverrstrømning. Tolga resultatene viser at dimensjonerende permeatrate er 400 m<sup>3</sup>·h, og at minst 90% av fødevannet blir produktvann.

Utvidelse av underdimensjonerte membranlegg for filtrering av drikkevann får ofte ikke andre konsekvenser enn at tilleggsmembraner må installeres. På Tolga er det mer enn nok trykk til å utvide et membranlegg nærmest uendelig.

## REFERANSE

Health Industry Manufacturers Association (HIMA), 1030 15th Street N.W., Suite 100, Washington D.C., 20005 USA. Document no. 3, vol. 4, April 1982. Microbiological evaluation of filters for sterilizing liquids.