

Membranteknikk for drikkevanns- behandling

Av Thor Thorsen.

Thor Thorsen er ansatt som forsker ved SINTEF.

Hvorfor membranteknikk?

Enkelt forklart er membranfiltrering en separasjonsprosess der vann og oppløst stoff pluss partikler skiller ved at vannet bringes til å passere en semipermeabel («finperforert») membran. Vannet presses gjennom membranen ved trykk samtidig som den stadig mer konsentrerte oppløsning «spyler» langs membranen og tilslutt ut av anlegget, se figur 1. Det skal altså ikke dannes belegg på membranen, idet alle forurensninger kontinuerlig bringes ut av anlegget via konsentratet. Permeatet blir trykkløst.

De tekniske anleggene er lukket og består i hovedsak av membranmoduler, pumper og rør, samt kontroll og rengjøringsenheter. Anlegget kan helautomatiseres og rensegraden er uavhengig av råvannets kvalitet og den hydrauliske belastning. Membranene må normalt skiftes med 3–4 års mellomrom.

Metodens spesielle fortrinn er:

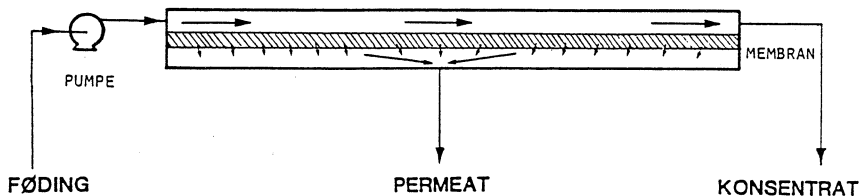
- * Høy og helt stabil renseeffekt.
- * Høy driftsstabilitet og enkel betjening.
- * Renseeffekten kan velges etter behov.
- * Rensing uten bruk av kjemikalier.

Det finnes også ulemper ved metoden, som:

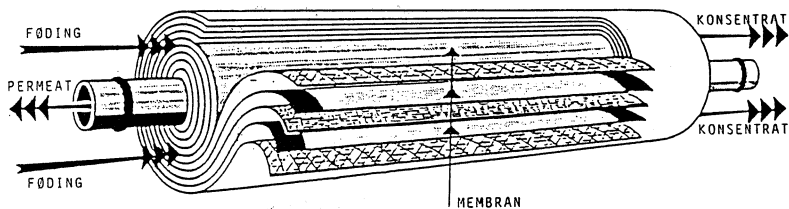
- * Uønsket beleggdannelse på membranen kan redusere kapasiteten.
- * Ikke optimal utforming av anlegg på grunn av manglende erfaring og metodeutvikling.
- * Relativt kostbar metode for store anlegg (>10000 p.e.)

Membranen og dens funksjon

Membranen er den aktive komponent i selve renseprosessen. Den har vanligvis form som en plastfilm, og den ser også ut som det. Men filmen er ikke helt tett. Det finnes et meget stort antall hull, eller porer. Disse porene dannes



Figur 1. Prinsippskisse av membranfiltrering.



Figur 2. *Spiralmembran.*

ved en fysikalsk/kjemisk prosess ved produksjon av membraner. Ved å styre denne prosessen kan porenes diameter varieres over et meget stort område.

Vanlige porediametre er 0.0005 til 5 μm . Porediameteren bestemmer membranens renseeffekt. Beste driftstrykk vil også variere med porediameteren. Det er vanlig å inndele membraner etter porediametre i følgende kategorier:

- * Omvendt osmose (OO):
Porer <0.0008 μm og driftstrykk 10–60 bar
- * Nanofilter (NF):
Porer 0.0008–0.002 μm og driftstrykk 6–15 bar
- * Ultrafilter (UF):
Porer 0.002–0.05 μm og driftstrykk 2–7 bar
- * Mikrofilter (MF):
Porer 0.05–5 μm og driftstrykk 1–5 bar

For omvendt osmose og nanofiltre er separasjonsmekanismen både kjemisk og fysikalsk av natur. Porene er generelt av samme dimensjoner som ioner og molekyler. For ultra- og mikrofiltre vil fysikalske krefter og mekaniske dimensjoner være mer dominerende.

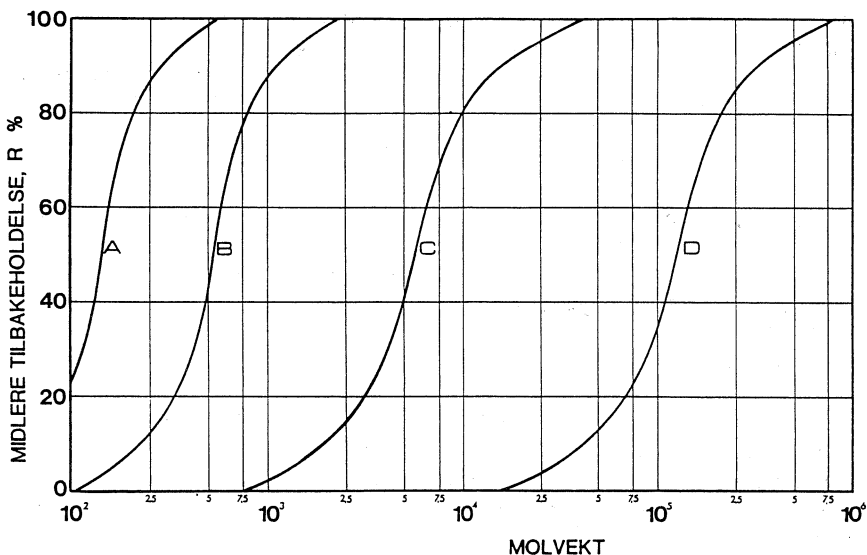
De fleste membraner er asymmetriske ved at porene er koniske med den

minste diameter på overflaten mot trykksiden. Dette medfører at molekyler og partikler ikke så lett setter seg fast i porene. Det bidrar derved til at minst mulig tilført stoff setter seg fast inne i anlegget. Den kontinuerlige «ut-spylingen» er en av metodens kjennetegn.

Membranene kan ha ulik form i makroskopisk forstand. De mest aktuelle typene for vannbehandling er hule fibre (rør) og spiralviklet modulform. Hule fibre kan for eksempel være ca. 2 mm i diameter. Vannet tilføres og strømmer inne i fibre. Fiberveggen er membran og filtrering skjer ut gjennom veggen. Fiberbuntene samles i større rør med ca. 1 meters lengde. Ved spiraltypen vikles flere membranlag med plastnett mellom som en svissroll rundt et sentralt rør der permeatet samles. Vannet tilføres og konsentratet ledes ut gjennom motstående ender av rullen. Figur 2 illustrerer en spiralmembran. For spiraler vil hele rullen ompennes av driftstrykket. Spiraler, normalt 1 m lange, monteres derfor i trykkrør med diametre opp til 25 cm.

Spesifikasjon av egenskaper

Foruten separasjon etter mekaniske dimensjoner, er det vanlig å karakterisere membranene etter hvilke molekylstørrelser som separeres, angitt ved



Figur 3. Midlere tilbakeholdelse som funksjon av molvekt for omvendt osmose (A), nanofilter (B), ultrafilter (C) og tett mikrofilter (D).

molvekt. Med begrepet «molvekt-cutoff» menes den minste molekylvekt-verdi der molekylene separeres effektivt, ca. 95%. Figur 3 angir separasjonskurver for 4 ulike membraner etter molekylvekt.

I figur 3 er størrelsen «tilbakeholdelse», R, brukt for separasjonseffektivitet. R defineres slik:

$$R = \frac{C_k - C_p}{C_k} 100\%$$

der C_k = konsentrasjon av stoffet i konsentratet

C_p = konsentrasjon av stoffet i permeatet.

En vanlig spesifisering av OO-membraner er tilbakeholdelse av NaCl.

Eksempelvis vil en membran med tilbakeholdelse 97% for NaCl ha tilbakeholdelse i området 70—99,9% for de fleste andre uorganiske stoffer. Tilbakeholdelse av organiske forbindelser knyttes gjerne til molvektcuttoff, MWC.

Osmose er en naturlig prosess der vann strømmer gjennom en membran av seg selv på grunn av en forskjell i konsentrasjon av stoff over membranen. Ved omvendt osmose strømmer vannet motsatt veg. Da dette er unaturlig, vil det kreves arbeid i form av driftstrykk for å få til dette. Trykket må overstige en terskelverdi, det osmotiske trykk, for at vannet skal passere membranen.

Det osmotiske trykk i fortynnede løsninger varierer i takt med konsentrasjonen som en ideell gass. For høyere konsentrasjoner fås et stadig større

avvik fra denne sammenheng, og man må innføre korreksjonsfaktoren ϕ :

$$\eta = \phi \cdot C_m \cdot R \cdot T$$

der η = osmotisk trykk
 C_m = mol løst stoff pr. molvolum vann
 R = gasskonstant
 T = absolutt temperatur

Den osmotiske trykkdifferanse over membranen blir da:

$$\eta = \Delta (\phi \cdot C_m) \cdot R \cdot T$$

Hvis man motarbeider det osmotiske trykk med et utvendig trykk, P , på konsentratsiden, vil vi få en strøm F_v , av fortynnet vann gjennom membranen pr. arealenhet.

$$F_v = W_p \cdot (P - \eta)$$

Her er W_p vannets permetasjonskoeffisient. Vi ser $(P - \eta)$ er den drivende kraft for vannets gjennomtrengning av membranen og derved også bestemmende for membranens kapasitet.

Osmotisk trykk har stor betydning ved avsalting av sjøvann og brakkvann. For rensing av bløtt overflatevann har det ingen betydning.

Membrananlegg

Anleggene er i prinsippet bygget opp som vist i figur 4. Men vanligvis er det totale membranareal fordelt på en rekke enheter, moduler, som er koplet dels i parallell, dels i serie på konsentratsiden. Vanligvis er rentvannkapasiteten 100—3000 liter pr. time og modul. For å hindre belegg og konsentrasjonspolarisering (se nedenfor) må fødehastigheten ha en viss størrelse. Dette nødvendiggjør ofte, særlig i små anlegg,

resirkulasjon av konsentrat til føding. Det kan også være nødvendig å benytte en avansert metode som forbehandling for å redusere beleggsdannelsen. I naturlige råvannskilder er det spesielt viktig å fjerne organiske kolloider og silikater. Det er ofte nødvendig med trykkøkningspumpe mellom seriekoplede moduler for å kompensere for hydraulisk trykkfall i konsentratkanalen.

Membranenes levetid begrenses i hovedsak av disse faktorer:

1. Belegg på membranen eller plugging av porene.
2. Kjemisk nedbryting av membranmaterialet.
3. Kompaktering, dvs. sammenpressing av membranen.

Belegg dannes når stoffer/partikler som legger seg på membranen ikke kan fjernes ved vasking med vaskemidler innen membranens toleranseområde. Den indirekte årsak til slikt belegg er ofte konsentrasjonspolarisering. Det vil si en oppkonsentrering av stoffer ved membranoverflaten. Herved kan en få overmettet løsning og mer eller mindre sterke kjemiske eller fysikalske bindinger.

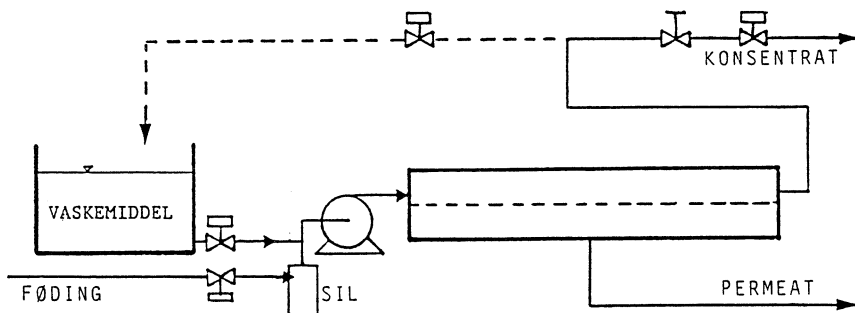
Belegg på membranen er en hyppig årsak til begrensnings i anvendelsen av membranteknikk i vannfiltrering. Derfor bør en betrakte membranvask som en naturlig del av et membrananlegg. Selve vaskingen foregår med tidsstyring eller etter behov. Figur 4 viser i prinsippet hvordan et vaskesystem kan innpasses i et enkelt kontinuerlig membrananlegg.

Kjemisk nedbrytning får en når membranen utsettes for ekstreme kjemiske betingelser som oksydasjonsmidler, meget høy eller lav pH eller

løsningsmidler som angriper, løser opp eller oppløses i membranmaterialet. Kjemisk nedbryting kan oppstå når en må ty til sterke vaskeløsninger for å fjerne belegg.

Kompaktering oppstår ved for høyt

driftstrykk. Kompaktering kan skje helt fra starten med nye membraner, eller som følge av gradvis svekkelse av membranen ved ekstreme kjemiske betingelser. Ved riktig dimensjonering er dette normalt ikke noe problem.



Figur 4. Prinsipiell oppbygning av membranlegg med system for intermittert vask og skylling.

Membraner for drikkevannsrensing

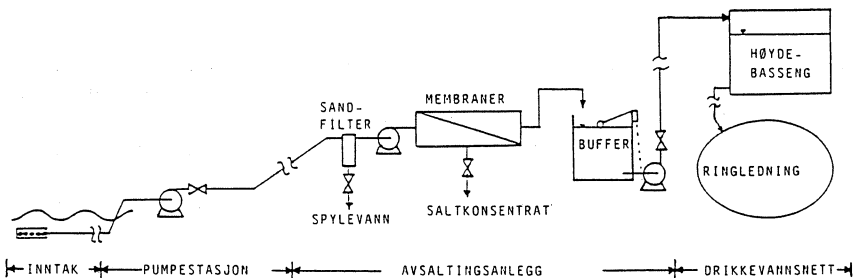
Selv om membranfiltering bør utprøves med tanke på optimalisering, kan renseeffektiviteten forutsies med relativt stor sikkerhet. Tabell 1 gir en pekepinn for viktige parametre i drikkevannssammenheng.

Her har vi listet renseeffektivitet for to typer anlegg: «Humusanlegg» og

«Avsaltingsanlegg». Ved disse anleggstypene er membrantype og driftstrykk de viktigste ulikheter. For humusanlegg legges hovedvekten på fjerning av humus (farge) og så får vi de øvrige data på kjøpet. Avsaltingsanlegg benytter svært tette membraner for å fjerne salter (mineraler). I tabellen er også nevnt driftsparametre.

Tabell 1. Renseeffektivitet, driftsparametre m.m.

Parameter	Humusanlegg	Avsaltingsanlegg
Humus (farge)	Etter behov	ca. 98%
Alger & partikler	100%	100%
Bakterier & virus	100%	100%
Salter & mineraler	10—90%	ca. 99%
Permanganat	Etter behov	ca. 98%
Metode	Nanofilter	Omvendt osmose
driftstrykk	ca. 6 bar	ca. 60 bar
Membranporer	ca. 0.002 μm	ca. 0.0003 μm



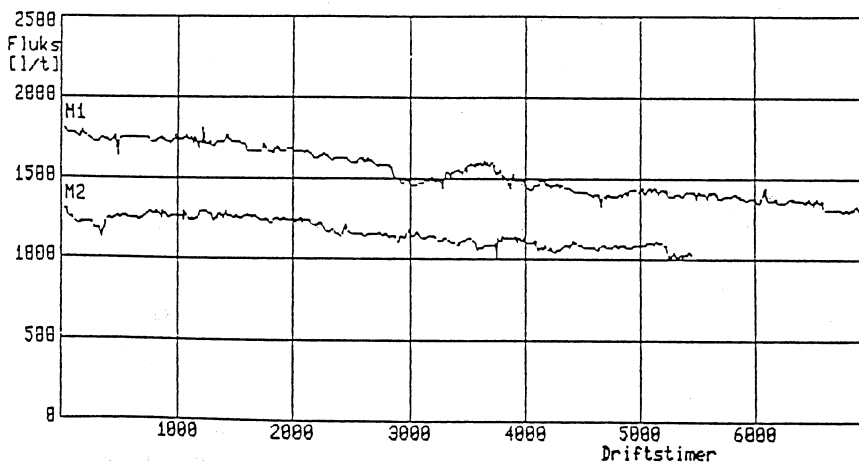
Figur 5. Flytskjema for Selvær-anlegget.

OO benyttes til avsalting av sjøvann til drikkevann i tildels meget store anlegg i tørre strøk i Midt-Østen. For humusfjerning finnes det imidlertid få erfaringer. Ingen fullskalaanlegg er etter vår viten i drift spesielt for råvann med høyt humusinnhold i utlandet, selv om flere anlegg, for eksempel i USA, brukes til behandling av overflatevann som inneholder noe humus. På Trolle utenfor Trondheim er det imidlertid et lite fullskalaanlegg i drift.

Avsalting av sjøvann

I samarbeid med Træna kommune og anleggsleverandøren har SINTEF fulgt den første installasjon av et avsaltingsanlegg for offentlig drikkevannforsyning i Norge. Anlegget har gått i 4 år og står på øya Selvær i Træna kommune. Kapasiteten er ca. 4 m³ pr. time. Prisenivået for et slikt anlegg er ca. 1 mill. kr.

Det første driftsåret var et prøveår og det er utarbeidet en rapport fra prosjektet. Anlegget er enkelt skissert i figur 5.



Figur 6. Anleggets kapasitet som funksjon av driftstid.

Forfilteret består av et sandfilter og et 5 µm patronfilter. Også inkludert i anlegget er et lavtrykks sirkulasjonssystem for vaskeløsning og konserveringsvæske for membranene.

Erfaringene viste problemer først og fremst knyttet til korrosjon på pumper, rør og ventiler på sjøvanns- og drikkevannssiden, samt lekkasjer i den nyanlagte ringledningen. En må ha for øye at drikkevann fra avsalting er mer korrosivt enn vanlig overflatevann. Bruk av vanlige materialer i drikkevannssystemet kan derfor gi overraskelser, som på Selvær. Korrosjonsproblemene er ikke overveldende og det arbeides med en løsning. Forsøk med alkalisering er utført i 1990. Resultatet vil foreligge med det første. De foreløpige resultatene er lovende.

Forøvrig har anlegget vært meget stabilt med tanke på kapasitet og vannkvalitet. Dette anlegget er meget enkelt hva gjelder forbehandling og plassering av sjøvannsinntak. Likevel er ytelsen tilfredsstillende for selve omvendt osmose teknikken. Figur 6 viser kapasiteten for de to identiske parallelle seksjonene i anlegget.

Kloridresten i permeatet avtar med temperaturen og påvirkes også av den vaskeløsning som ble brukt i siste membranvask. Membranvask er trolig ønskelig 2 ganger pr. år. Det er sannsynligvis restsaltkonsentrasjonen som vil begrense membranenes levetid, til ca. 4 år for standardmembraner og 6—8 år for såkalte HR-membraner med retensjon godt over 99%. En veiledning om bruk av avsaltingsanlegg i drikkevannsforsyning blir utarbeidet av SINTEF i løpet av 1990

Humusanlegg

Fullrensing av humusholdig råvann kan gjøres ved membranteknikk. Humusstoffet har en meget kompleks kjemi og består av organiske molekyler med molvekt over et vidt område. En ulempe med humus er at det lett danner belegg på membranen, (3), (4). En god ting er at molekylvektspredningen tillater høy gjenvinningsgrad uten at det går nevneverdig ut over renseseffekten (1).

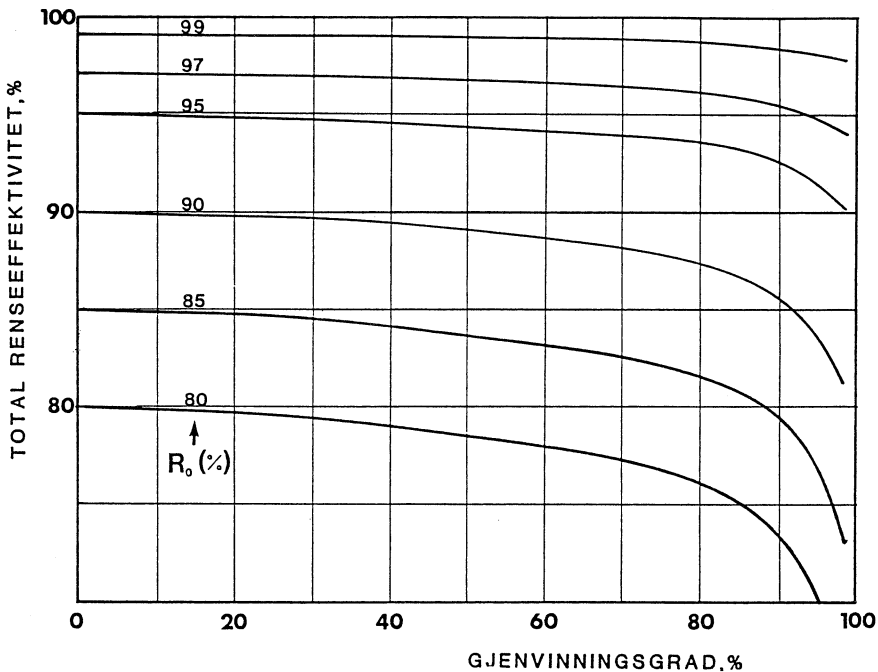
Med gjenvinningsgrad menes her utbyttet av rent vann i forhold til tilført råvann:

$$\text{Gjenvinningsgrad} = \frac{\text{Permeatmengde}}{\text{Råvannsføding}} \times 100\%$$

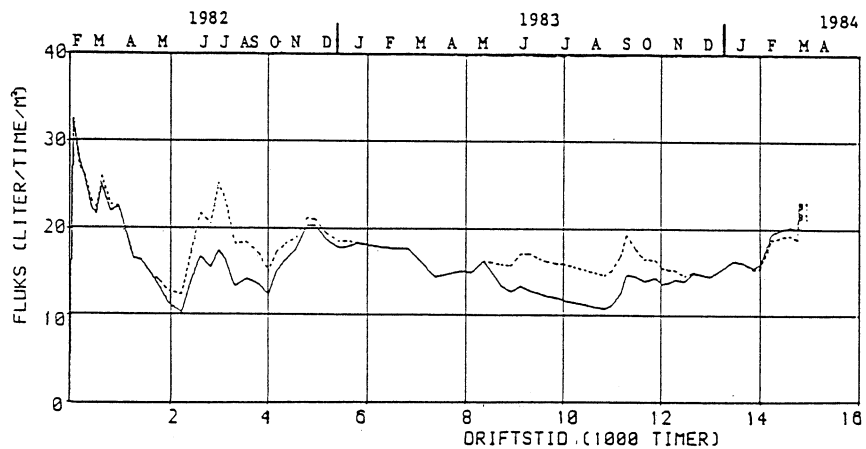
Etterhvert som fødingen passerer gjennom rensenanlegget vil de mest lavmolekylære forbindelser først passere membranen. Tilbakeholdelsesgraden, R , er som kjent høyere for høymolekylære stoffer. Derved vil R_0 øke gjennom anlegget og bli høyere jo høyere gjenvinningsgraden er. Total (akkumulert) renseseffekt vil derfor være gunstigere ved høy gjenvinningsgrad for humus enn for rene kjemiske for-

bindelser. Figur 7 viser total rensegrad for humus for ulike verdier på initiell tilbakeholdelse (gjenvinningsgrad = 0%).

Det store økonomiske spørsmålet er om anleggene fungerer like godt etter noe tid. Hva med beleggsdannelse og nedsatt kapasitet? Det er kjent at større avsaltingsanlegg og anlegg i industri kan gå i mange år før kapasiteten er betydelig redusert, la oss si til 70%. En



Figur 7. Total (akkumulert) rensegrad for humus ved økende gjenvinningsgrad.



Figur 8. Membrankapasitet fra pilotprosjektet på Orkanger (3).

Tabell 2. Oppsummering av metodens status.

METODENS FORDELER	MANGLENDE DATA
1. Ikke tilsats av kjemikalier i renseprosessen.	1. Beleggsdannelse, har bare delvis løsning.
2. Økonomisk konkurrerbar for mer enn 80% av norske vannverk.	2. Effektiv utnyttelse av vaskemidler (unngå tap).
3. Stabil renseeffekt.	3. Nødvendig og tilstrekkelig forbehandling uten å gjøre anlegget for komplisert.
4. All rensing i ett trinn.	4. Øyeblikkelig kapasitetsøkning ved trykkøkning.
5. Høy teknisk driftsstabilitet.	5. Hydrauliske detaljdata for drift av anlegget.
6. Kan erstatte desinfisering.	6. Egenskaper ved membraner av ulike materialer.
7. Eneste sikre og praktiske metode for fjerning av Giardia Lamblia.	7. Energioptimalisering.

leverandør hevder opptil 10 år i membranlevetid med god forbehandling.

Forsøk ved NTH og SINTEF, (2) og (3), viser at beleggsproblemene ved humusvann er store. Man kan prøve å holde belegget i sjakk ved lav kapasitetsutnyttelse eller hyppig vask. Det vil kunne skyve problemet ut i tid. Problemet ytrer seg ved redusert kapasitet. Det finnes etter vår mening bare en fullstendig løsning, og det er tiltak både for begrenning av beleggdannelsens hastighet og en vaskemetode som fjerner belegg nær 100% effektivt. Med bakgrunn i alle positive egenskaper ved denne behandlingsmetode for drikkevann, har SINTEF foreslått undersø-

kelser for å løse dette og andre problemer (jfr. tabell 2).

Figur 8 illustrerer beleggsdannelse med redusert kapasitet. På slutten av forsøksperioden var kapasiteten her økende. Forbruket av vaskemiddel var imidlertid noe høyt i denne perioden. Den langsomme økningen illustrerer at til tross for dette vaskemiddelforbruket var hver vask bare delvis effektiv, men kapasiteten er under kontroll.

Figuren er fra Orkangerforsøket. Resultatet etter 9000 driftstimer på Trolla-anlegget (se ovenfor) bekrefter erfaringene fra Orkanger. Det er samlet mye detaljinformasjon gjennom Orkanger- og Trolla-anleggene. Denne infor-

masjonen gir oss grunn til å tro at det i framtidige anlegg kan oppnås høy og stabil langtidskapasitet. For å få til dette kreves nå en analytisk problemløsningsfase, det vil si et forskningsprosjekt.

Tabell 2 angir i stikkord metodens status med hensyn til rensing av humusholdig råvann.

LITTERATURHENVISNINGER

- (1) T. Thorsen: «Drikkevannsrensing med omvendt osmose». SINTEF-rapport STF21 A81029, 1981-04-10.
- (2) S. Koottatep: «Removal of Humic Substances from natural Waters by Reverse Osmosis» Dr.-avh. Inst. for vassbygging, NTH, Oktober 1979.
- (3) T. Thorsen: «Drikkevannsrensing med omvendt osmose». NTNF, program for VAR-teknikk. Rapport 18/84. 1984-09-13.
- (4) J. Mallevialle et al.: «Effects of Humic Substances on Membrane Processes» i «Aquatic Humic Substances». Am.Chem.Soc. Wash. 1989.

Samfunnsteknikk er et tverrfaglig konsulentfirma med spesialkompetanse innenfor områdene

- **Vannbehandling**
- **Slambehandling**
- **Avløpsrensing**
- **Avfallsbehandling**



SAMFUNNSTEKNIKK A/S
RÅDGIVENDE INGENIØRER OG ARKITEKTER

OSLO - BERGEN - GOL - HAMAR - MOSS - AURLAND

Hovedkontor: Gjerdrumsv. 12 - 0486 Oslo 4. Tlf.: 02 - 18 19 40