

Membranfiltrering av humus – ny viten om beleggdannelse, forfiltrering og modultyper.

Av Thor Thorsen og Harald Fløgstad

Thorsen og Fløgstad er forskere Avd. for vannrensing og VA ved SINTEF i Trondheim.

Innledning.

Denne artikkelen er den siste av tre om fundamentale egenskaper ved membranfiltrering av humusvann. I første artikkel (Thorsen, 2000a) ble størrelser og egenskaper for humuspartikler beskrevet. For membranfiltrering er det viktig å kjenne slike egenskaper, da de bestemmer hvordan humus oppfører seg nær membranen.

Andre artikkel (Thorsen, 2000b) beskrev modeller for partikkelstørrelsesfordelingen og massebalanse i en membrankanale. Den siste sier hvordan humuspartiklene beveger seg i membrankanalen og hvilken overkonsentrasjon de gir på membranoverflaten, såkalt konsentrasjonspolarisering. Denne er viktig for beleggdannelse og til en viss grad renseeffekt.

Denne tredje artikkelen diskuterer hvordan modellene kan brukes til å beskrive hvordan utforming og drift av membranfiltre påvirker ytelse og problemer. Modellene er utviklet i et dr.grads-studium (Thorsen, 1999). Nyere forsøksresultater som vil bli presentert er framkommet i et pågående prosjekt for Forskningsrådet.

Problembeskrivelse.

To problemer har utpekt seg som spesielt viktige i norske anlegg. Det ene er tendenser til nedsatt kapasitet over lang tid på grunn av belegg. Kapasitetsnedgangen gir økt behov for vasking av membranene. Det medfører driftsstopp, mer utslipp til resipient fra anleggene samt økte kostnader. Videre påvirkes dimensjoneringen.

Det andre problemet er forfiltreringen. På de fleste anleggene består den av et selvspykende silfilter på ca. 50 μm . Det har vist seg at disse kan ha problemer med kapasiteten og at dette igjen avhenger av vannkvaliteten og tilbakespylingens effektivitet. Problemet ytrer seg ved hyppig spyling, hvilket kan stjele betydelig anleggskapasitet. Det viser seg også at filtrere har begrenset evne til å takle økt slaminnhold i råvannet, for eksempel etter spyling av vannledninger oppstrøms anlegget. Det kan gi driftsforstyrrelser fordi filtret ikke lenger klarer å redusere trykkfallet ved tilbakespyling.

Beleggdannelse og forfiltrering er nær beslektede tema: Beleggdannelse

skyldes partikler som forfilteret ikke klarer å fjerne. At de vanlige filtertypene også har kapasitetsproblemer under ofte forekommende betingelser, tilsier at disse temaene bør angripes og sees på i sammenheng. Det er viktig at en evaluering av bedre løsninger gjøres med og for typisk norsk humusvann. Erfaringer med andre vann typer kan erfaringsmessig lett feiltolkes.

Partikkelkarakteristikk.

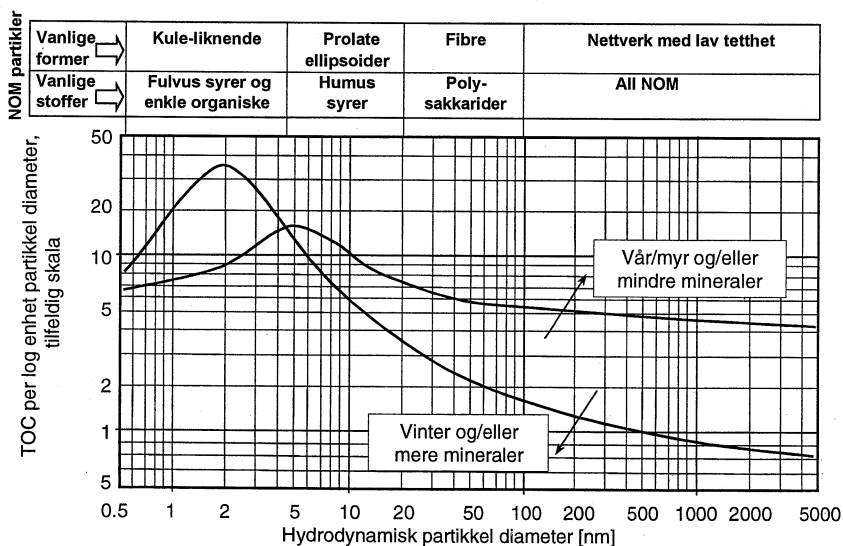
Den første artikkelen presenterte en hypotese for hvordan partikler av ulik størrelse faktisk er bygget opp. Men til tross for svært varierende detaljer i

sammensetning og form, kunne de midlere egenskapene beskrives av en ellipsoide-modell. Den beskriver sammenhenger mellom størrelse, form og molekylvekt. Ut fra målinger verden over av størrelsesfordelingen for humuspartikler, har det vært mulig å utarbeide en matematisk modell for størrelsesfordelingen (Thorsen, 1999):

$$C_{\text{TOC}} = \frac{0,0125 \cdot (K_1 + K_2)}{L^{1,87} + 0,1}$$

$$\text{Der } K_1 = \frac{100 \cdot L^2}{4 + lp \cdot L} \quad [1]$$

$$\text{og } K_2 = [(lp - \sqrt{L})^2 + 0,1]^{-1}$$



Figur 1. Grov oversikt over partikkelstørrelsesfordeling og fysisk og kjemisk karakter for humuspartikler (Thorsen, 2000b).

C_{TOC} er TOC-konsentrasjonen for hvert diameter-segment i prosent av total mengde fra 0,5 til 5000 nm når hele intervallet deles i 400 like segmenter på en logaritmisk skala. lp er logaritmen til midlere partikkel-

diameter i segmentet, uttrykt i nm. L er en faktor som angir vann type. Verdien er 0,08 for typisk norsk vintervann, 0,2 før høstvann og 0,5 for vårvann som er påvirket av myrtilsig. Dessverre var uttrykket for K_2 offer

for en skrivefeil i forrige artikkel, uttrykket ovenfor er korrekt.

Figur 1 viser at humuspartiklene er mindre om vinteren og i vannkilder med mer mineraler. De typiske humussyrene finnes i størrelsesområdet 5 – 20 nm og de største partiklene er vevsformede og har lav romtetthet.

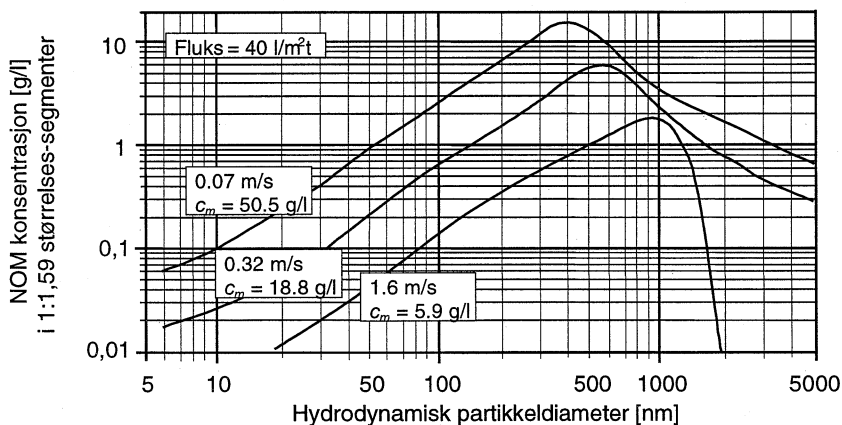
Partikkelstørrelser på membranoverflaten.

Det ble vist i forrige artikkel at et smalt intervall av partikkelstørrelser i området 0,2 til 2 μm er hovedansvarlig for konsentrasjonspolariseringen. Det ble videre vist at de kritiske partikkelstørrelsene ikke varierte med vanntypen og årstiden, men det gjorde den totale overflatekonsentrasjonen.

I figur 2 er vist hvordan tverrstrøms-hastigheten kan påvirke overflatekonsentrasjon og kritisk partikkelstørrelse. Vi ser at de kritiske partiklene er mindre

ved lave hastigheter. Ved 0,32 m/s, som er mest aktuell i tekniske moduler, er de kritiske partiklene i området 0,25 til 1 μm . Den høyeste hastigheten er urealistisk i full skala på grunn av høyt trykkfall og energitap samt skjevfordeling av transmembrantrykket (ujevn fluks i membranenes lengde-retning). Vi ser også at samlet overflatekonsentrasjon øker betraktelig med hastigheten, fra 5,9 g/l ved den høyeste til 50,5 g/l ved laveste hastighet.

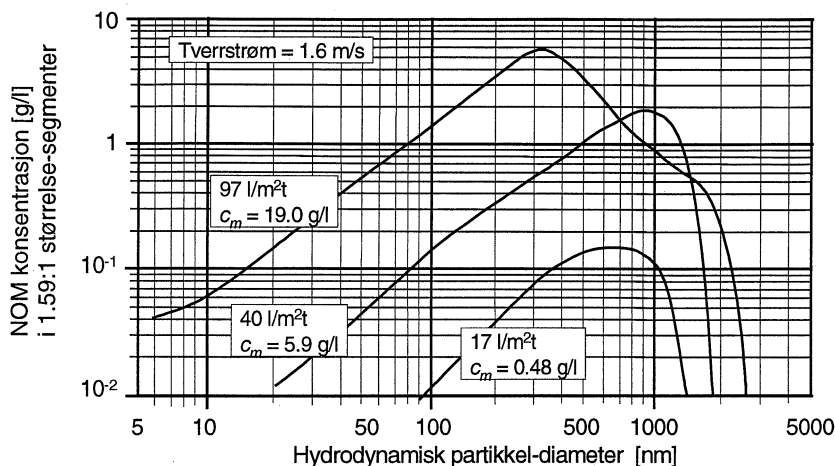
Det er estimert (Thorsen, 1999) at en samlet konsentrasjon over ca. 5 g/l på overflaten er problematisk fordi frie utstrakte humus-partikler i naturlig bløtt vann da vil berøre hverandre på membranoverflaten. Det framgår av ellipsemodellen og stemmer med resultater fra praktiske forsøk. Høyere beregnede konsentrasjoner vil være delvis fiktive og føre til beleggdannelse, og det vil skje forttere dess høyere den beregnede verdien er.



Figur 2. Overflatekonsentrasjoner som funksjon av partikkeldiameter og tverrstrøms-hastighet (åpen flat kanal med høyde 1mm, 50 mm fra innløpet til kanalen, driftsbetingelser er gitt i figuren).

Fluksens betydning er illustrert i figur 3. Vi ser at overflatekonsentrasjonen øker dramatisk med fluksen, omlag med tredje potens. Ved høyere overflatekonsentrasjoner enn 2 – 3 g/l vil skjærkraftdiffusjon redusere fluksens innflytelse, men som nevnt starter beleggproblemene alt ved 5 g/l. Det er en viktig årsak til at humus er så prob-

lematisk. Figuren viser at en akseptabel fluks i dette tilfellet er omlag 40 l/m²t. Men tverrstrøms hastigheten er meget høy her. Ved 0.32 m/s vil konsentrasjonen øke omlag 3 ganger, til 18,8 g/l. Da fluks vil avhenge av konsentrasjonen opphøyd i omlag 1/3, blir akseptabel maksimal-fluks (ved $c_m = 5$ g/l) i så fall $40 \cdot (5/18,8)^{1/3} = 25,7$ l/m²t.



Figur 3. Overflatekonsentrasjon ved ulike fluks (betingelser, se figur 2).

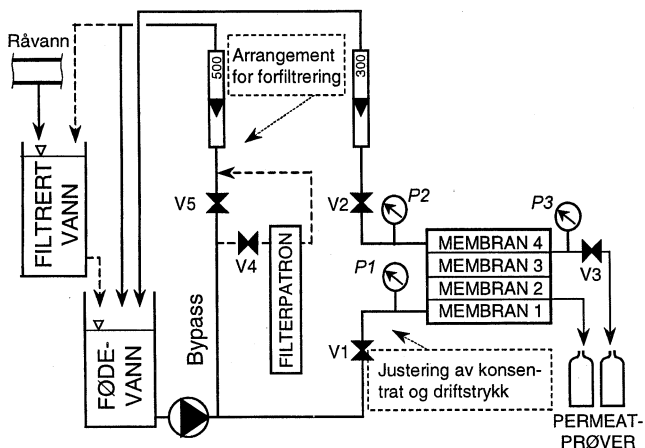
Effekt av ulike forfiltrering.

Høsten 2000 ble det utført forsøk ved SINTEF der endring av membranens permeabilitet over tid på grunn av beleggdannelse ble målt. Permeabilitet er fluks dividert med transmembrantrykk. Patronfiltre med ulike poreåpning ble brukt som forfiltre og forsøksanlegget er vist i figur 4. Målbart belegg over kort tid ble oppnådd ved høy fluks og lav tverrstrøms hastighet. Det ble benyttet rekondisjonert råvann fra Meråker med et fargetall på ca. 100 og fluksverdiene 40 og 60 l/m²t.

Ut fra filterpatronenes separasjonsskarakteristikk ble evnen til partikkelf-

jerning beregnet. Vi ønsket å prøve varierende forfiltrering ned til under 0,1 µm. Partikkelstørrelsen ved 90 % reduksjon ble brukt for karakterisering. Det er naturlig da høy filtereffekt er nødvendig for å gi signifikant reduksjon av beleggdannelsen.

Ved de aktuelle forsøksbetingelsene ble den totale overflatekonsentrasjonen beregnet til 18 og 30 g NOM/l ved henholdsvis 40 og 60 l/m²t i fluks. Det er over det kritiske området rundt 5 g/l som gir beleggdannelse i dette tilfelle. De mest kritiske partikkelstørrelsene ligger rundt 0,5 µm for 40 og 0,3 µm for 60 l/m²t.

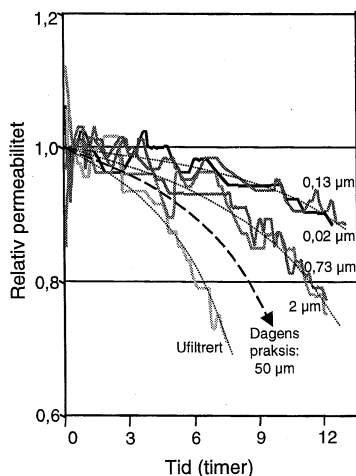


Figur 4. Forsøksapparatet ved forsøk med ulik forfiltrering.

Figur 5 viser utviklingen av permeabiliteten ved 60 l/m²t (også vist i Thorsen, 2001). Kurven viser relativ permeabilitet. Permeabilitet er fluks dividert med transmembrantrykket. Vi ser at det er en klar forbedring ved gradvis finere filtrering. I norske anlegg er det vanlig å benytte 50 µm silfiltre. Disse vil ligge mellom "ufiltrert" og 2 µm i figuren. Det er vanskelig å skille kurvene for 2 og 0,73 µm og for 0,13 og 0,02 µm. Vi ser at selv 0,73 µm forfiltrering ikke gir en fullgod effekt, selv om beleggdannelseshastigheten synker med omlag 30 – 40 % i forhold til dagens praksis. Men hvis vi går til 0,13 µm har vi halvert hastigheten.

Den fineste forfiltreringen, 0,02 µm, synes ikke å gi noen ytterligere reduksjon av beleggdannelsen i forhold til 0,13 µm. Alle nye membraner har en initiell stabiliseringsfase der fluksen kan synke litt. Det kan være en del av forklaringen. Det må kontrolleres i forsøk av lengre varighet, som er planlagt. Permeabiliteten ved 40 l/m²t viste svært liten forskjell mellom de fem forsøkene.

Dagens praksis med forfiltrering med 50 µm silfilter er antydnet med en kurve i figur 6. Forbedringen i forhold til denne gjør at vi kan konkludere at det er en betydelig reduksjon i beleggdannelse å hente ved bedre forfiltrering. Forsøkene viser minst halvering i beleggdannelseshastigheten.



Figur 5. Relativ permeabilitet ved 60 l/m²t og ulike forfiltre.

Resultatene viser at det skal svært fin forfiltrering til for å gi betydelig reduksjon av beleggdannelsen. Det er i overensstemmelse med beregnede størrelser på de kritiske partiklene, som altså ligger i området 0,3 til 0,5 μm for de betingelsene forsøkene er utført under. Den hydrodynamiske modellen synes derfor å være korrekt.

Det ble innledningsvis påpekt at forfiltreringen burde forbedres også av praktiske driftshensyn. Et effektivt forfilter for svært små partikler er ønskelig, men ikke enkelt å finne. Vi på SINTEF har noen ideer, men det kreves nyutvikling.

Modultypens betydning.

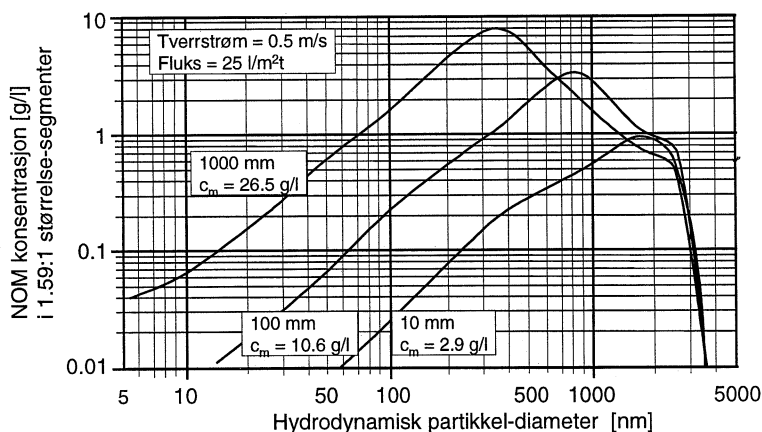
Alle beregninger hittil er gjort for en flat membrankanale med en høyde på 1 mm. De vanligste membranmodulene i drikkevannrensing er kapillære og spiralviklede. De kapillære typene har en indre diameter på 0,7 – 2 mm og innvendig føding. De spiralviklede har en membrankanale som i prinsippet er flat og med en høyde på 0,6 – 1 mm. Men kanalene inneholder en strømningsbryter, et såkalt spacer-nett. Dette har foruten strømningsbrytning også som hensikt å holde en bestemt kanalhøyde.

Av kostnadshensyn er det nesten bare laminær strømming som er aktuelt i drikkevannsbehandling. I kapillære og flate membraner uten strømningsbryter vil det da bygge seg opp en stadig høyere humuskonsentrasjon på membranoverflaten innover i kanalen. Det skyldes at alle steder på membranen tilføres et "glidende" overkonsentrert sjikt fra området oppstrøms. Dette kommer fram av massebalansen som ble presentert tidligere (Thorsen,

2000b). Der inngår avstanden fra kanalens innløp som variabelen x i den dimensjonsløse gruppa B. Figur 6 illustrerer dette. I spiralviklede moduler avhjelpes problemet med spaceren som ble nevnt ovenfor.

I litteraturen er det referert noen få studier av spacerens effekt. Spacer-typen er viktig for effektiviteten. Publiserte data viser at vanlige spacere med to lag parallelle tråder i diagonal orientering i forhold til tverrstrømmen er de gunstigste (Costa et al., 1994). Det er videre generell enighet om at masseoverføringen i spiralviklede membraner tilsvarer at man benytter 50 – 100 % av spacerens maskevidde som typisk "avstand" fra membrankanals innløp. Dette er blitt tolket som at det skjer en full utblanding av det overkonsentrerte sjiktet på membranen én gang for hver maske. Vanlig maskevidde er 3 – 5 mm og med denne x -verdien blir overflatekonsentrasjonen vesentlig mindre enn i gjennomsnitt for åpne kanaler, se figur 6.

Dersom denne forskjellen i beleggdannelsen mellom åpne kanaler og spiraler er korrekt, må også renseeffekten for samme membrantype bli bedre i en spiral enn i en kapillærmembran fordi overflatekonsentrasjonen i en kapillærmembran blir høyere. Membranen kan bare "se" overflatekonsentrasjonen. Med en membran-porediameter på 3 nm og et gjennomsnittlig humusvann vil retensjon bli ca. 68 % for en kapillærmembran og ca. 78 % for en spiralmembran. Effekten av ulik overflatekonsentrasjon på retensjonen er undersøkt i forsøk ved SINTEF i 2000.



Figur 6. Beregnet overflatekonsentrasjon ved ulike avstand fra modulens innløp (se bok-sene) som funksjon av partikkelstørrelse.

Tidligere publiserte målinger (ikke med humusvann) viser at masseoverføringen er omlag fem ganger bedre i en spiralmodul ved samme hastighet. Men på grunn av spacernettet vil trykkfallet i en spacer-kanal være minst 5 ganger høyere enn i en tilsvarende åpen kanal. Ved å øke hastigheten i en åpen kanal kan konsentrasjons-polariseringen reduseres. Men ifølge publiserte data må hastigheten økes så mye at energiforbruket lett blir høyere enn for en spiralmodul ved samme masseoverføring (og beleggpotensial). Spiraler synes derfor å være en gunstig modul-type. Men i noen åpne kanaler, som kapillarer, kan konsentrasjons-polariseringen reduseres ved spesielle tiltak som tilbakespyling eller tilsats av partikler som bryter opp filmen.

Forsøk med spiral og kapillarmoduler.

To forsøksserier er utført med spiral og kapillar-moduler drevet i parallell. Membranen var celluloseacetat med 4

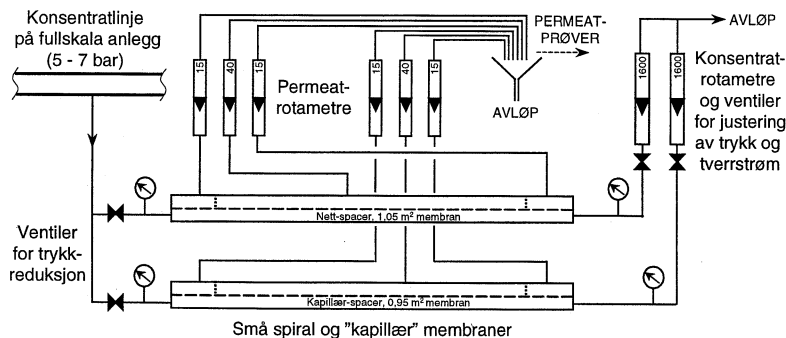
- 5 nm porediameter. Da vil transporten av de partikler som penetrerer membranen og som kan måles som farge og TOC i permeatet domineres av Brownsk diffusjon og konveksjon (Thorsen, 1999). Siden det er den delen av humusen som helt og delvis penetrerer membranen som registreres i analyser av permeatet, må retensjonen, R , tas hensyn til. Det kan gjøres ved en tilnærmet form for R basert på grunnleggende uttrykk for konvektiv og diffusiv transport:

$$R = 1 - \frac{c_p}{c_m} \approx \frac{1 - k_p}{1 + \frac{k_D}{J_w}} \quad [2]$$

Her er c_p og c_m konsentrasjonene i henholdsvis permeatet og ved membranoverflaten. k_p er koeffisient for transport av stoff gjennom membranen ved ren konveksjon mens k_D gjelder transport drevet av konsentrasjonsdifferansen over membranen.

Erfaringsmessig vet vi at tilsynelatende retensjon beregnet fra konsentrasjon i råvann og permeat er praktisk talt uavhengig av fluksen (Thorsen, 1999). Med aktuelle B -verdier kan det vises at c_m er omlag proporsjonal med fluksen for de partikkelstørrelser som penetrerer membranen. Det er derfor grunn til å tro at stofftransporten hovedsakelig er drevet av konsentrasjonsdifferansen og at en kan se bort fra k_p . Koeffisienten k_D må finnes ved et forsøk slik at en kan beregne retensjonen ved et annet forsøk der fluksen er forskjellig.

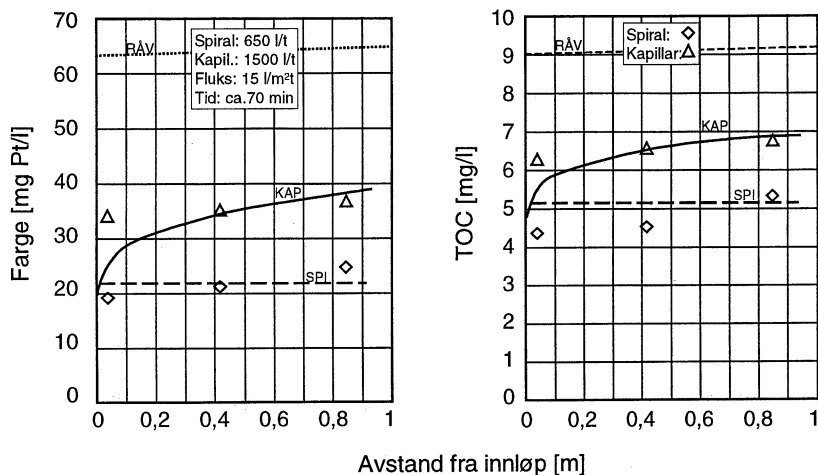
Forsøkene ble utført med små tekniske moduler med ca. 1 m² membranareal. Det ble brukt en spiralmodul med "rørspacer" som representant for kapillarer. Spiralmodulen hadde en standard nett-spacer ("diamond"-type) fra samme leverandør (Osmonics Inc.). Avstanden mellom membranene var 1,5 – 1,8 mm. Fødingen inneholdt én del råvann og ca. to deler konsentrat fra anlegget i Trolla, ikke ulikt det som tilføres modulene i tekniske renseanlegg. Apparaturen er skissert i figur 7.



Figur 7. Flytskjema og forklaring av forsøksanlegget.

Ved hjelp av fysiske sperrer ble permeat utledet fra henholdsvis de første 10%, de midterste 80% og de siste 10 % av membranlengden. Det tilsvarte prøver i henholdsvis 0,04, 0,4 og 0,85 m avstand fra innløpet. Analyser av farge og TOC i råvann og permeat viste hvordan konsentrasjonen av humus på membranoverflaten endret seg langs membranen for de to modulene.

Beregning av permeatkonsentrasjoner er gjort med den hydrodynamiske modellen fra Thorsen (2000b). Figur 8 viser resultatet fra forsøk med lav fluks og samme energitap til tverrstrøm for begge modultypene. R er beregnet ut fra permeat-analysen for den midterste seksjonen i forsøket til 70,5 % for farge og 47 % for TOC. Dette tilsvarer membranporer mellom 5 og 6 nm (Thorsen, 1999).



Figur 8. Beregnede og målte permeat-konsentrasjoner med lav fluks og samme energiforbruk for spiral og kapillære.

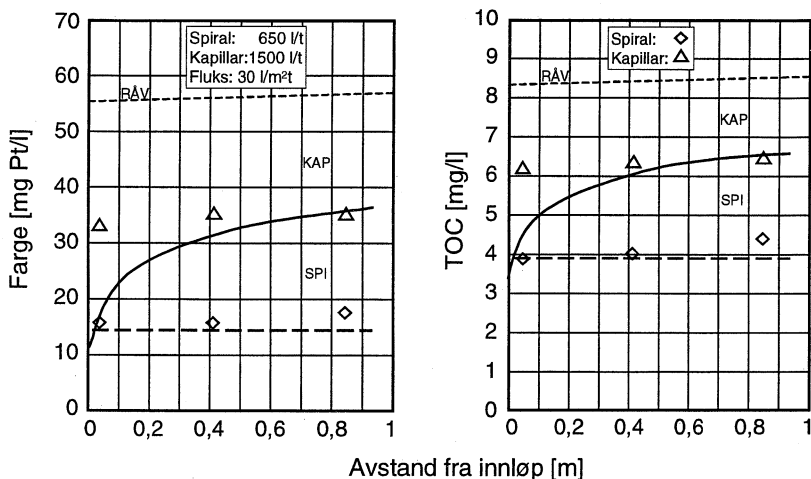
En kan ikke regne med at permeat-prøvene er helt representative for de respektive segmentene langs membranen da permeat-nettene vil gi noe blanding i lengderetningen. Graden av innblanding er håpløs å beregne, men det antas at minst halvparten av ende-prøvene er representative.

Med dette forbehold viser figur 8 et godt samsvar mellom teori og permeatanalysene for kapillarmembranen. En økning i permeatkonsentrasjon og derved redusert renseeffekt er åpenbar langs membranen. For spiralmembranen er det godt samsvar mellom forventet midlere retensjon og analyseresultatet. Det overraskende er at det er en økning i permeatkonsentrasjonen også for spiralen. Dette er i motstrid til teorien om at utblanding skjer i hver maske i spaceren. Vårt resultat viser altså økende konsentrasjon-

spolarisering med membranlengden også i spiraler.

Vi ser at renseeffekten for en spiral er høyere enn for en kapillar med samme membrantype. Den høyere renseeffekten for spiralen må skyldes lavere konsentrasjon på membranoverflaten og derved mindre fare for beleggdannelse, som antatt.

Figur 9 viser resultatet fra et annet forsøk. Her er fluksen dobbelt så høy. Det medfører økt tilførsel av humus til membranoverflaten og høyere overflatekonsentrasjon. På den annen side vil den faktiske retensjonen øke, det framgår av likning [2]. Ved beregning av de teoretiske kurvene i figur 9 er retensjonen omregnet ifølge likningen. Det gav en økning av fargeretensjonen, i samsvar med analyseresultatene. Hadde ikke retensjonen blitt omregnet ville kurvene ligget klart over analyseverdiene.



Figur 9. Beregnede og målte permeat-konsentrasjoner med, høy fluks og volumstrøm tilsvarende samme energitap for kapillarer og spiraler

Kurvene ligger litt lavt i forhold til analysene og det tyder på at koeffisienten k_p i likning [2] har noe innflytelse, men at k_D -leddet dominerer, som antatt. Vi kan derfor slutte at transporten av humus gjennom membranen i stor grad er konsentrasjonsdrevet, men med et lite bidrag av porestrøm. Det er tydelig fra figuren at den tilsynelatende retensjonen har endret seg lite mellom forsøkene.

Flere forsøk ble utført og sett under ett bekrefter resultatene at det er en klar økning i permeatkonsentrasjonen langs membranen både for kapillarer og spiraler. Det kan synes som økningen er relativt sett omlag den samme for begge modulene, men konsentrasjonsnivået er høyere i kapillaren. Den hydrodynamiske beskrivelsen utledet fra massebalansen synes derfor å gjelde.

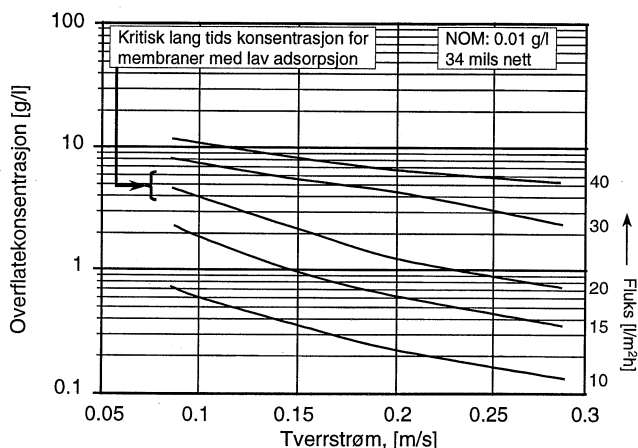
Valg av modultype er altså viktig. Kapillære kan være et alternativ, men det er helt nødvendig at belegget fjernes hyppig ved f.eks. tilbake-

spyling fordi kapillarer ofte er dyrere enn spiraler og beleggdannelsen skjer raskere. Det er påvist, ved forsøk og teoretisk, at spiraler er gunstige, men belegg fjerning kan bare gjøres ved kjemikaliskylling og vask.

Maksimal fluks for kapillære avhenger av tilbakespylingens effektivitet. Uten denne er den meget lav. For spiraler kan vi beregne maksimal fluks. Resultatet er vist i figur 10. Det kan sees at maksimal fluks ved moderat tverrstrøm, ca. 0,17 m/s, er ca. 27 l/m²t. Dette gjelder for ikke-adsorberende membraner, se nedenfor.

Membranmaterialet

Vi har i det foregående diskutert teorier og forsøksresultater basert på en betraktning av frie humuspartiklers egenskaper og oppførsel. Men hva med kjemiske forhold? Partiklene imellom kan de over tid medføre en koagulering på membranoverflaten på grunn av forhøyede konsentrasjoner. For å hindre dette må vi unngå at belegg oppstår.



Figur 10. Relativ permeabilitet ved fluks 60 l/m²t og ulik forfiltrering..

Partiklene kan også adsorberes til membranoverflaten. Effekten avhenger av membranmaterialet og noen typer har en større tilbøyelighet til dette. I en undersøkelse (Dal-Chi et al., 1996) ble ulike typer neddykket i avløp fra treforedlingsindustri til statisk adsorpsjon hadde nådd likevekt. Slikt vann inneholder i stor grad de samme typer kjemiske forbindelser som humusvann. Vannfluksen ble målt før og etter adsorpsjonen. Resultatet er vist i tabell 1.

Vi ser av tabellen at det er stor forskjell på membrantypenes evne til å motstå adsorpsjon. De beste beholder full fluks og dette støtter relevansen i å evaluere membranfiltrering isolert fra adsorpsjon. Adsorptiv beleggdannelse vil da skyldes bruk av en ikke optimal membran. Forbedring kan derfor oppnås i mange tilfelle ved valg av en bedre membran. Det kan sees i tabellen at det kan være stor variasjon selv innen samme type membranmateriale. Så valget er ikke nødvendigvis enkelt.

Tabell 1. Fluksreduksjon etter neddykking i konsentrert avløpsvann fra treforedling (Dal-Chi et al., 1996)

Membran materiale	Fluksreduksjon
Cellulose (CE)	0 %
Polyamid (PA)	0 %
PVDF	5 – 18 %
Celluloseacetat (CA)	9 – 47 %
Polyakrylnitril (PAN)	30 %
Polyeterimid (PEI)	70 %
Polysulfoner (PS etc)	71 %

Oppsummering og konklusjoner

Det framgår av denne artikkelen at det er begrenset hva som kan oppnås ved å øke tverrrørstrømhastigheten. En må huske at det er klare praktiske begrensninger for hastigheten på grunn av økt energiforbruk og trykkfall. Trykkfallet i seg selv medfører ujevnt membranutteltelse (lavere fluks nedstrøms) og økt mekanisk påkjenning på membranen.

Man kunne tenke seg å behandle råvannet kjemisk før membranfiltrering. Det vil imidlertid redusere membranens "kjemikaliefrie" profil og bør utføres slik at kjemikaliene ikke passerer gjennom membranen.

I dag kjøres tekniske anlegg med spiralmembraner med en fluks rundt 20 l/m²t. Ved valg av en god membran og god forfiltrering av kritiske partikkelstørrelser tror vi det i framtida kan være mulig å oppnå rundt 30 l/m²t med lavere kjemikaliebruk enn idag. De økonomiske og praktiske forbedringene ville i så fall bli betydelige.

I tre artikler er det referert resultater fra et studium over fundamentale forhold ved membranfiltrering samt noen resultater fra forsøk ved SINTEF i 2000. Som en oppsummering kan vi sette opp følgende konklusjoner:

- Det er utviklet en matematisk modell for humuspartikler basert på ellipsoider. Den muliggjør en beskrivelse av partiklenes hydrodynamiske egenskaper.
- Den kan også brukes til å beskrive partikkelstørrelsesfordelingen og hvordan den varierer med vanntypen.
- En hydrodynamisk modell er utviklet som beskriver konsentrasjonspolariseringen. Forsøk har sannsynliggjort at den er korrekt.
- Beleggdannelse på membranene skyldes i stor grad partikler med en hydrodynamisk diameter mellom 0,2 og 2 µm.
- Beleggdannelse oppstår ved en humuskonsentrasjon på membranoverflaten over ca. 5 g/l.
- Kapillærmembraner danner lettere belegg enn spiralmembraner og trenger spesielle tiltak for å begrense beleggdannelsen.
- De mest effektive tiltak for høyere fluks og redusert kjemikaliebruk er bruk av egnet membranmateriale og effektiv forfiltrering.

Symboler

<i>B:</i>	<i>dimensjonsløs gruppe</i>
<i>C:</i>	<i>dimensjonsløs konsentrasjon</i>
<i>c:</i>	<i>absolutt konsentrasjon</i>
<i>D:</i>	<i>diffusjonskoeffisient [m²/s]</i>
<i>J_w:</i>	<i>fluks [m/s eller l/m²t]</i>
<i>K og k:</i>	<i>Koeffisienter</i>
<i>d_h:</i>	<i>hydrodynamisk diameter [m]</i>
<i>L:</i>	<i>vanntypefaktor</i>
<i>R:</i>	<i>retensjon</i>
<i>x:</i>	<i>avstand fra modul-innløp [m]</i>
<i>lp:</i>	<i>logaritmen til midl. part.-diam.</i>

Referanser

Costa, A.R., Fane, A.G., og Wiley, D.E. (1994): "Spacer characterisation and pressure drop modelling in spacer-filled channels for ultrafiltration," J. Membr. Sci. 87, 79.

Dal-Cin, M.M., McLellan, F., Striez, C.N., Tam, C.M., Tweddle, T.A. and Kumar, A. (1996) : "Membrane performance with pulp mill effluent: Relative contribution of fouling mechanisms", J. Membr. Sci. 120, 273.

Thorsen, T. (1999): "Fundamentale studier av membranfiltrering av humusholdig drikkevann", dr.grads studium (publ. 2001), Trondheim.

Thorsen, T. (2000a): "En alternativ humuskarakterisering er ønskelig for membranfiltrering av drikkevann", VANN nr2.

Thorsen, T. (2000b): "Partikkelstørrelsesfordelinger for humus og hvordan disse påvirker membranfiltrering.", VANN nr3.

Thorsen, T. (2001): "Muligheter og begrensninger ved membranfiltrering av drikkevann", VANN nr1.