

Norsk Vann

# Rapport



287 | 2024

## Veiledning for design og drift av nanofilteranlegg



# Norsk Vann Rapport

Det utgis tre typer rapporter:

## Rapportserie A

Dette er de opprinnelige hovedrapportene.

Dette kan være:

- Rapportering av prosjekter som er gjennomført innenfor organisasjonens eget prosjektsystem
- Rapportering av spleiselagsprosjekter hvor to eller flere andelseiere i Norsk Vann BA samarbeider for å løse felles utfordringer
- Rapportering av prosjekter som er gjennomført av andelseiere eller andre.  
Rapporten vil i slike tilfeller kunne være en ren kopi av originalrapporten eller noe bearbeidet

Fortløpende nummer xx-årstall

## Rapportserie B

Dette er en serie for «enklere» rapporter, for eksempel forprosjekter, som vil være grunnlag for videre prosjektvirksomhet mm.

Fortløpende nummer Bxx-årstall

## Rapportserie C

Dette er rapporter delfinansiert av Norsk Vann, men som er utgitt av andre.

Fortløpende nummer Cxx-årstall



Prosjektresultatene fra Norsk Vann Rapport (serie A og B) kan fritt benyttes internt i egen organisasjon. Når prosjektresultatene benyttes i skriftlig materiale, må kilde oppgis. Videre salg/formidling av resultatene utover dette er kun tillatt etter skriftlig avtale med Norsk Vann BA.

Norsk Vanns rapporter utarbeides i samspill mellom rådgiver, styringsgruppe og referansegruppe for prosjektet og er ikke behandlet i Norsk Vanns styrende organer. Norsk Vann har ikke ansvar for feil eller ufullstendigheter som måtte forekomme i rapporten og kan ikke stilles økonomisk eller på annen måte til ansvar for problemer som måtte oppstå som følge av bruk av rapporten.



Norsk Vann BA, Vangsvegen 143, 2321 Hamar  
Tlf: 62 55 30 30 E-post: [post@norsk vann.no](mailto:post@norsk vann.no)  
[www.norsk vann.no](http://www.norsk vann.no)

# Norsk Vann Rapport

## Ekstrakt

Erfaringer og kunnskap ifra flere ulike prosjekter om drift av membranlegg (nanofilteranlegg) for drikkevannsbehandling er samlet i denne veiledningen. Rapporten omtaler styringsparametere, ytelsesindikatorer, membranvask, driftsstrategi og ulike driftsproblemer. Videre omtales design av nanofiltreringsanlegg. Rapporten gir et godt grunnlag for personell som skal arbeide med og drifte denne typen vannbehandlingsanlegg.

Som en forlengelse av arbeidet vil det også bli lagt til et eget kapittel om ultrafiltreringsanlegg med koagulering, og det vil utarbeides en veiledning som kan benyttes ved anskaffelse av nye nanofiltreringsanlegg.

Bilder på forsiden:

- Foto: Willy Røstum Thelin, SINTEF.
- Foto: Odd Brekke, Austevoll Vatn og Avløp.

## Norsk Vann BA

Adresse: Vangsvegen 143, 2321 Hamar  
Telefon: 62 55 30 30  
E-post: post@norsk vann.no  
Internettadresse: norsk vann.no

## Rapportens tittel

Veiledning for design og drift  
av nanofilteranlegg

## Forfattere

Willy Røstum Thelin, SINTEF  
Edvard Sivertsen, SINTEF  
Karen Nessler Seglem, SINTEF

**Rapportnummer: 287/2024**

**ISSN 1890-8802** (elektronisk utg.)  
**ISBN 978-82-414-0486-3**

## Emneord, norsk

Vannbehandling, nanofiltreringsanlegg, NF-anlegg,  
membranlegg, drift, design

## Emneord, engelsk

Water treatment, nanofiltration, membrane treatment,  
operation, design.

# Forord

Norsk Vann utga i 2008 rapport 160 «Driftserfaringer med membranfiltrering». Teknologien er i stadig utvikling, og har i de senere år fått fornyet aktualitet grunnet økende fargetall, nye trusler mot vannkildene og god barriereeffekt. Følgelig var tiden moden for en revidering og oppdatering av rapporten.

I 2017 ble prosjektet MEMiNOR igangsatt. Prosjektet ga grunnlag for flere prosjekter rettet mot driftserfaringer med nanofiltreringsanlegg. SINTEF spilte en sentral rolle i arbeidet, hvor flere kommuner var viktige partnere. Prosjektene er omtalt i kap. 2.4. Rapporten som du nå leser, er bygd på kunnskap og erfaringer innhentet gjennom dette arbeidet. Norsk Vann og vannbransjen takker pådriverne og bidragsyterne i disse prosjektene for å ha fremskaffet og tilrettelagt denne kunnskapen. Kunnskap medfører at vi kan drifte anleggene på en tryggere, mer effektiv og bedre måte.

Norske vannverk er fortløpende i prosesser knyttet til å vurdere utvidelse av sine anlegg. Membrananlegg vil kunne være et av flere alternativer. Veiledningen gir oversikt over hvilke forhold som må vurderes ved drift av membranlegg, og således anskaffelse av anlegg. Vi ønsker allikevel å utdype dette noe mer. Følgelig vil det også bli utarbeidet en veiledning som kan benyttes ved anskaffelse av nye nanofiltreringsanlegg. Dette blir en kort veiledning som legges til som et eget avsnitt i rapporten senere i 2024.

I kapittel 1 er målgrupper og hvordan bruke denne rapporten beskrevet.

Kunnskapen fra arbeidet er også formidlet via det såkalte «membrannettverket». Nettverket er omtalt på [norsk vann.no](http://norsk vann.no).

Rapporten er skrevet av Willy Røstum Thelin, Edvard Sivertsen og Karen Nessler Seglem, alle SINTEF. Prosjektleder hos Norsk Vann har vært Kjetil Furuberg.

Styringsgruppen har bestått av Odd Brekke, Austevoll Vatn og Avløp, Per Olimb, Jevnaker kommune, Henning Kletvang, Kirkebygden og Ytre Enebakk vannverk, Torgeir Svensen, Kirkebygden og Ytre Enebakk vannverk og Fernando Perez, AFRY.

Referansegruppen har bestått av Unni S. Lea, IVAR IKS, Andreas Hartz, Noka, Viggo Bjerkelund, Inrigo, Even Buvarp, Overhalla kommune, Stian Hermansen, Dønna kommune og Lars J. Hem, Vann og avløpsetaten, Oslo kommune.

**Rapporten har fokus på drifterfaringer med nanofiltreringsanlegg. Innholdet bygger på MEMiNOR og en rekke anvendte prosjekter, samt tidligere Norsk Vann rapport 160.**

Det rettes en stor takk til alle som har bidratt inn i prosjektet.

Hamar, 19.06.2024  
Kjetil Furuberg, Norsk Vann

# Sammendrag

Membrananlegg for drikkevannrensing benyttes over hele verden, og er i Norge primært brukt for behandling av råvann med høyt innhold av naturlig organisk materiale (NOM). De første norske vannverkene som benytter membraner som renseprosess ble satt i drift mot slutten av 1980-årene og membraner ble raskt en populær renseprosess for små og mellomstore vannverk. Det er ca. 160 vannverk som benytter membraner, der de aller fleste er nanofiltreringsanlegg. Bruk av nanofiltreringsmembraner gir god renseeffekt for NOM (inkludert farge) og er også en effektiv hygienisk barriere. I tillegg gjør den modulære oppbygningen av membrananlegg at de er velegnet for fremtidig økning i produksjonskapasitet.

Denne rapporten er en revidert utgave av Norsk Vann-rapporten "Driftserfaringer med membranfiltrering". Revisjonen tar utgangspunkt i ny kunnskap som er kommet frem i flere forsknings- og utviklingsprosjekter de senere år. Målsetningen er å gi et forenklet teoretisk underlag om vannrensing med membraner, og gi støtte både ved design og drift av vannverk med nanofiltreringsprosess. Den primære målgruppen for rapporten er vannverkseiere og driftsoperatører på membrananlegg med nanofiltrering, men rådgivere og leverandører vil også finne nyttig informasjon i denne veilederen.

Rapporten gir en grundig innføring i drift av nanofiltreringsanlegg og forklarer sammenhengen mellom råvannskvalitet, driftsbetingelser, og hvordan dette påvirker membranen. Viktige begreper som styringsparametere og ytelsesindikatorer blir introdusert og nytteverdien illustreres med eksempler. Permeatfluks, tverrstrømhastighet og gjenvinningsgrad defineres som «styringsparametere». Dette er parametere som påvirker belastning på membranene, og som kan justeres av driftspersonell. Ytelsesindikatorer inkluderer permeabilitet, trykkfall over konsentratkanalen, og renseeffekt. Dette er parametere som angir tilstanden til membranene i anlegget. For å følge utviklingen av membrantilstanden over tid må ytelsesparameterne normaliseres, og formler for dette presenteres.

Videre gir rapporten en oversikt over ulike metoder og verktøy man kan benytte for å utrede driftsutfordringer. For å identifisere bakenforliggende årsaker og hensiktsmessige tiltak er det viktig med en stegvis og systematisk tilnærming.

Til slutt beskriver rapporten hvilke faktorer man bør vurdere i forbindelse med design av et nytt nanofiltreringsanlegg. Blant annet diskuteres valg av råvannskilde, forbehandling, membrantyper, vaskesystem og nødvendig driftsovervåkning.

Det er også utarbeidet sjekklister som gir en rask oversikt og som kan brukes som huskelister. Det er sjekklister for drift av nanofiltreringsanlegg, for utredning av driftsproblemer og for design av anlegg.

# English summary

**This report is published in Norwegian by Norwegian Water BA (Norsk Vann BA).**

Address: Vangsvegen 143, NO-2321 Hamar, Norway  
Phone: + 47 62 55 30 30  
E-mail: [post@norsk vann.no](mailto:post@norsk vann.no)  
Website: [www.norsk vann.no](http://www.norsk vann.no)

Report no: 287/2024  
Report title: Guidance for design and operation of nanofilter systems  
Date of issue: March 2024  
Authors: Willy Røstum Thelin, SINTEF  
Edvard Sivertsen, SINTEF  
Karen Nessler Seglem, SINTEF

## Summary

Membrane facilities for drinking water treatment are used worldwide. In Norway, membranes are primarily used for treatment of raw water with a high content of natural organic matter (NOM). The first Norwegian waterworks using membranes as treatment process were commissioned in the late 1980s and membranes became a popular treatment process for small and medium-sized waterworks. Approximately 160 Norwegian waterworks applies membranes as treatment process, of which the vast majority are nanofiltration facilities. The use of nanofiltration membranes provides a good treatment effect for NOM (including colour) and is also an effective hygienic barrier. In addition, the modular structure of membrane systems makes them suitable for future increases in production capacity.

This report is a revised edition of the Norsk Vann report "Operational experiences with membrane filtration". The revision is based on new knowledge that has been gained during several research and development projects in recent years. The objective is to provide a simplified theoretical basis for water treatment with membranes, and to provide support both in the design and operation of waterworks using a nanofiltration process. The primary target group for the report is waterwork owners and operators of membrane systems with nanofiltration, but consultants and system suppliers will also find useful information in this guideline.

The report provides a thorough introduction to the operation of nanofiltration systems and explains the

relation between raw water quality, operating conditions, and how this affects the membrane. Important concepts such as process control parameters and performance indicators are introduced and illustrated with examples. Permeate flux, crossflow velocity and recovery are defined as process control parameters. These are parameters that affect the foulant loading on the membranes, and which can be adjusted by the plant operators. Performance indicators include permeability, pressure drop across the concentrate channel, and treatment efficiency. These are parameters that indicate the condition of the membranes in the plant. To monitor the development of the membrane condition over time, the performance parameters must be normalized and formulas for this are presented in the report.

The report also provides an overview of various methods and tools that can be used to investigate operational challenges. To identify the underlying causes and appropriate measures, it is important to apply a systematic approach.

Finally, the report describes which factors should be considered in connection with the design of a new nanofiltration plant. Among other things, the choice of raw water source, pre-treatment, membrane types, washing system and operation monitoring system are discussed.

Checklists have also been prepared that provide a quick overview and can be used as to-do lists. There are checklists for both design and operation of NF facilities, and for investigating operational challenges.

# Innhold

Forkortelser, begreper og definisjoner	8	4.5.2. Beregning av ytelsesindikatorer	31
1. Innledning	9	4.5.3. Normalisering av ytelsesindikatorer	32
1.1. Målsetning	9	4.6. Membranvask	33
1.2. Målgruppe for veilederen	9	4.6.1. Døgnskylling	33
1.3. Hvordan bruke denne rapporten?	9	4.6.2. Hovedvask	33
1.4. Begrensning	9	4.6.3. Kompatibilitet membran/vaskeløsning	34
2. Bakgrunn	10	4.6.4. Faktorer som påvirker effekten av membranvask	34
2.1. Membrananlegg i Norge	10	4.6.5. Kriterier for hovedvask	34
2.2. Spørreundersøkelser til vannverk	10	4.7. Driftsstrategi	36
2.3. Noen internasjonale erfaringer	11	4.7.1. Produksjonsnivåer	36
2.4. Relevante FoU-prosjekter	12	4.7.2. Tiltak i perioder med redusert råvannskvalitet	36
3. Enkel innføring i membranfiltrering	13	4.7.3. Biofilmdannelse og konservering av membran ved driftsstans	37
3.1. Sentrale begreper og forkortelser	13	4.7.4. Strategi for utskifting av membraner	38
3.2. Generelt om membranfiltrering	14	4.8. Eksempler - justering av styringsparametere	38
3.2.1. Trykkbaserte membranprosesser og renseeffekt	14	4.8.1. Driftssituasjon med gradvis reduksjon i permeabilitet	38
3.2.2. Strømningskonfigurasjoner	15	4.8.2. Driftssituasjon med gradvis økning i trykkfall	39
3.2.3. Membranmaterialer	16	4.9. Sjekkliste for drift av NF-anlegg	39
3.2.4. Modultyper	16	5. Utredning av driftsproblemer i nanofiltreringsanlegg	41
3.3. Nanofiltrering	17	5.1. Innledning - Utredning av driftsproblemer	41
3.3.1. Generell oppbygning av vannverk med NF	17	5.2. Verktøy for utredning av driftsproblemer	41
3.3.2. Massetransport i nanofiltrering	18	5.2.1. Analyse av driftsdata	41
3.3.3. Kjennetegn ved nanofiltreringsanlegg	18	5.2.2. Simulering av belastningsforhold internt i trykkvær	42
3.3.4. Nanofiltreringsmembraner for drikkevannsrensing	20	5.2.3. Karakterisering av råvann	42
3.4. Vannkvalitet	21	5.2.4. Obduksjon av membranelementer	44
3.4.1. Forventet renseeffekt i NF-anlegg	21	5.3. Eksempler på bruk av verktøy for utredning av driftsproblemer	45
3.4.2. Lukt/smak	21	5.3.1. Analyse av driftsdata	45
3.4.3. Begreingspotensial på nett	21	5.3.2. Simulering av belastningsforhold internt i trykkvær	46
3.5. Beleggdannelse	21	5.3.3. Karakterisering av råvann	46
3.5.1. Hva mener vi med beleggdannelse	21	5.3.4. Obduksjon av membranelementer	48
3.5.2. NOM	22	5.4. Sjekkliste for utredning av driftsproblemer	53
3.5.3. Silt og leirpartikler	22	5.4.1. Sjekkliste - fremskaffelse av dataunderlag	53
3.5.4. Mikroorganismer	22	5.4.2. Sjekkliste ved driftsutfordringer knyttet til redusert membranytelse	54
3.5.5. Utfelling av tungløselige salter	22	6. Design av nanofiltreringsanlegg	55
3.5.6. Silikat	23	6.1. Innledning - Design av NF-anlegg	55
3.5.7. Litt mer om samspillet mellom membran og NOM	23	6.2. Valg av råvannskilde	55
3.5.8. Beleggdannelse på spacer	24	6.2.1. Betydning av råvannskvalitet	55
4. Drift av nanofiltreringsanlegg	26	6.2.2. Metoder for kartlegging av råvannskvalitet	55
4.1. Innledning - Drift av NF-anlegg	26	6.2.3. Laboratorietester og pilotering	56
4.2. Faktorer som påvirker ytelse og levetid på membranene	26	6.3. Design av forbehandlingstrinnet	56
4.3. Driftsovervåking og journalføring	27	6.4. Design av membrantrinnet	57
4.3.1. Registrering av prosessvariabler	27	6.5. Design av vaskesystem	58
4.3.2. Overvåking av vannkvalitet	28	6.6. Driftsovervåking	59
4.3.3. Journalføring av hendelser	28	6.7. Sjekkliste design av anlegg	59
4.4. Styringsparametere	28	Tidligere utgitte rapporter	63
4.4.1. Betydning av styringsparametere	28		
4.4.2. Beregning av styringsparametere	29		
4.4.3. Justering av styringsparametere	29		
4.5. Ytelsesindikatorer (permeabilitet, trykkfall, renseeffekt)	30		
4.5.1. Betydning av ytelsesindikatorer	30		

# 1. Innledning

---

## 1.1. Målsetning

Målsetningen med veilederen er:

- Å gi et forenklet teoretisk underlag om vannrensing med membraner
- Å gi støtte ved drift av vannverk med nanofiltreringsprosess
- Å gi støtte ved anskaffelse av nye membranlegg med nanofiltrering

---

## 1.2. Målgruppe for veilederen

Målgruppen for denne veilederen er primært vannverkseiere og driftsoperatører av membranlegg med nanofiltrering, men rådgivere og leverandører vil også finne nyttig informasjon i denne veilederen.

---

## 1.3. Hvordan bruke denne rapporten?

Rapporten er delt inn i fire hoveddeler:

- Kapitel 2 og 3 gir generell bakgrunnsinformasjon og enkel innføring i membranfiltrering. Hvis man er ukjent med membranprosesser anbefales det å lese disse kapitlene.
- Kapitel 4 gir en grundig innføring i drift av nanofiltreringsanlegg og er på mange måter kjernen i veilederen.
- Kapitel 5 gir en oversikt over ulike metoder/verktøy man kan benytte for å forsøke å identifisere årsaker til driftsutfordringer. Dette kapitlet er først aktuelt dersom driftsproblemer oppstår, og man ønsker å utrede årsaken(e) til problemene for å identifisere hensiktsmessige og effektive tiltak.
- Kapitel 6 gir en gjennomgang av hvilke faktorer man bør vurdere i forbindelse med design av et nanofiltreringsanlegg. Dette kapitlet er mest aktuelt når det skal designes et nytt anlegg eller et gammelt anlegg skal oppgraderes. Det anbefales at kapittel 4 leses først.

---

## 1.4. Begrensning

Rapporten har som hovedmål å gi et vannverkseiere og driftsoperatører et kunnskapsgrunnlag for å forstå hvilke faktorer som påvirker driften av et NF-anlegg og hvilke forhold som må vurderes i forbindelse med design av nye eller ombygging av eksisterende anlegg.

Rapporten er ikke ment som en retningslinje for dimensjonering i forbindelse med design av NF-anlegg.

## 2. Bakgrunn

### 2.1. Membrananlegg i Norge

Membrananlegg for drikkevannsrensing benyttes over hele verden, og er i Norge primært brukt for behandling av råvann med høyt innhold av naturlig organisk materiale (NOM). De første norske vannverkene som benyttet membraner som renseprosess ble satt i drift mot slutten av 1980-årene. Membrananlegg ble raskt en populær prosess for små og mellomstore vannverk og i 2019 var det registrert rundt 160 membranrenseanlegg i Norge (Mattilsynet, 2020). De aller fleste av disse er nanofiltreringsanlegg. Det finnes også en håndfull anlegg som benytter ultrafiltrering med forkoagulering som renseprosess.

Bruk av membraner gir god renseeffekt for NOM, hvilket resulterer i effektiv fjerning av farge fra råvannet. Membraner utgjør også en effektiv hygienisk barriere, noe som er viktig med tanke på at vannverkene skal produsere sikkert drikkevann. Videre gjør den modulære oppbygningen av membrananlegg at de er velegnet for fremtidig økning i produksjonskapasitet.

En stor andel av de 160 vannverkene som benytter membraner som hovedrensetrinn fungerer uten vesentlige driftsproblemer. Imidlertid er det også mange anlegg som opplever betydelig nedgang i ytelse over tid på grunn av beleggdannelse på membranene. Belegg-dannelsen på membranene medfører økte driftskostnader knyttet til økt energiforbruk og hyppigere vaskebehov,

samt økt nedetid og redusert produksjonskapasitet. I tillegg kan beleggdannelse medføre behov for hyppigere utskifting av membranene. Membrankostnaden utgjør i størrelsesorden 30-50% av investeringskostnadene for å bygge membrananlegget, og redusert membranlevetid har derfor stor betydning for den samlede produksjonskostnaden for drikkevannet. Valg av riktig forbehandling, og optimal drift av membrantrinnet vil bidra til å redusere problemet med beleggdannelse. Mengde og type forurensinger i råvannet har stor betydning for i hvilken grad beleggdannelse vil gjøre en driftsutfordring. Det er derfor viktig å kunne fastslå beleggdannelsepotensialet til et gitt råvann før en beslutter å bygge et membrananlegg. Standard analyseparametere som turbiditet, løst organisk karbon, og fargetall gir ikke tilstrekkelig informasjon i så måte.

Gitt riktig valg av membrantype, og gode driftsrutiner tilpasset aktuell råvannskvalitet, er membrananlegg velegnet vannbehandlingsprosess til å håndtere fremtidig økt press på råvannskilder, både i forhold til økt forurensing, og økt fargetall på grunn av klimaendringer. Erfaringer viser likevel at det er behov for mer kunnskap om i hvilken grad belegg-dannelsen på ulike membrantyper avhenger av råvannskvaliteten og driftsbetingelsene, og til slutt hvordan dette totalt sett påvirker det økonomiske bildet i forhold til kostnad på drikkevannet.

### 2.2. Spørreundersøkelser til vannverk

Det er gjennomført to spørreundersøkelser rettet mot norske vannverk med membranrensing, en i 2008 i forbindelse med utarbeidelsen av den første utgaven av denne veilederen, og en i 2018 i forbindelse med gjennomføringen av forskningsprosjektet MEMiNOR.

I studien fra 2008 ble det samlet inn erfaringer knyttet til drift av norske membrananlegg for drikkevannsrensing med spesielt fokus på den hygieniske barriereeffekten til membrantrinnet (Hem og Thorsen, 2008; Hem, 2008). Noen hovedkonklusjoner fra studien er gjengitt her:

- De første anleggene som ble bygget utover 1990-tallet viste god driftsstabilitet og var enkle å drifte, noe som bidro til rask vekst i antall anlegg
- Kvaliteten på rensed vann var god og stabil
- Membranene mister noe kapasitet (ytelse) over tid
- Membranlevetiden er høyere enn først antatt

- Driftsproblemer er først og fremst knyttet til belegg-dannelse på membranene, hvorav årsakene ble rapportert å skyldes blant annet utilstrekkelig membranvask og underdimensjonering av forbehandlingstrinnet for råvann.
- 27 % av 37 vannverk rapporterte at de hadde opplevd en eller flere brudd på den hygieniske barrieren i perioden 2001-2006.

I en ny undersøkelse i forbindelse med forskningsprosjektet MEMiNOR, ble det samlet inn oppdatert informasjon om norske membrananlegg for drikkevannsrensing (Thelin og Sivertsen, 2021). Basert på svar fra 17 anlegg konkluderte spørreundersøkelsen med følgende:

- De fleste av de 160 vannverkene med membranrensing benytter nanofiltreringsmembraner. Kun en håndfull anlegg i Norge benytter ultrafiltrering med forkoagulering

- For nanofiltreringsanlegg er celluloseacetat-baserte membraner om lag like vanlige som sulfonerte polyeter-sulfon-membraner
- Selvrensende trykksiler er den mest benyttede forbehandling av råvann. Typisk lysåpning er 50 µm
- Råvannskilden er typisk overflatevann med moderat til høyt fargetall som skyldes innhold av NOM
- Designkapasiteten har stort spenn og varierer fra i underkant av 5 m<sup>3</sup>/h til 500 m<sup>3</sup>/h
- Mange vannverk observerer redusert membranytelse knyttet til beleggdannelse (fouling)
- Noen vannverk opplever forbigående kvalitetsutfordringer relatert til lukt og smak.
- Energiforbruk og delvis kjemikalieforbruk øker lineært med faktisk produksjon
- Investeringskostnadene øker lineært med økende designkapasitet
- Stillingsandel for driftsoperatør er i mindre grad avhengig av både faktisk produksjon og designkapasitet
- Arealbehovet for etablering av vannverket er i mindre grad avhengig av designkapasiteten til anlegget

---

## 2.3. Noen internasjonale erfaringer

Nanofiltrering er en membranprosess som har egenskaper som ligner både på omvendt osmose og ultrafiltrering. Prosessen benyttes i dag for et bredt spekter av anvendelsesområder innen rensing og separasjon. Utviklingen av nanofiltrering som egen prosess startet på 1980-tallet, slik at de første nanofiltreringsanleggene ble tatt i bruk rundt 1990. For en bred gjennomgang av anvendelsesområdene til nanofiltrering henvises den interesserte leser til for eksempel Schäfer og Fane (2021). Nanofiltrering til drikkevannsproduksjon har hovedsakelig blitt brukt til tre formål; i) å fjerne løst organisk materiale, ii) fjerne organiske miljøgifter og iii) redusere hardhet (Wittman mfl., 2021). For eksempel har vannverket Méry-sur-Oise utenfor Paris i Frankrike, vært i drift siden 1999, der målsetningene er både å fjerne løst organisk materiale, samt spesifike organiske miljøgifter. Anlegget har en kapasitet på 140 000 m<sup>3</sup>/dag. Et annet eksempel er vannverket i Jarny, også det i Frankrike, som startet opp i 1995, der nanofiltrering benyttes for å fjerne sulfat. Et tredje tidlig eksempel er vannverket Debden Road utenfor Saffron Walden i England som startet opp i 1996 med en kapasitet på 3000 m<sup>3</sup>/dag. Her benyttes tre nanofiltreringstrinn i serie for å fjerne organiske miljøgifter, samt redusere hardheten i vannet.

Skottland var i likhet med Norge tidlig ute med å bruke nanofiltrering til drikkevannsproduksjon. I Skottland får ca. 90 % av innbyggerne drikkevann fra store anlegg, mens 10 % av innbyggerne får drikkevann fra omtrent like mange, men mindre, anlegg (Golan, 2019). Drikkevannskildene er i hovedsak overflatevann med høye fargetall, så hovedformålet ved å bruke nanofiltrering i rensesprosessen er å redusere naturlig organisk materiale. I Skottland benyttes det i hovedsak to typer nanofiltreringsprosesser. Den ene prosessen refereres ofte til som Fyne-prosessen og ble utviklet på begynnelsen av

1990-tallet og benytter rørmembraner. Denne prosessen egner seg for vannkilder med særlig dårlig vannkvalitet og har et vaskesystem som bruker en slags svamp for å skrape bort avsetninger på membranveggen. Den andre nanofiltreringsprosessen som er i bruk tilsvarer den "norske" prosessen med bruk av spiralmembraner.

Membranfiltrering, inklusive nanofiltrering, har fått økende anvendelse i Sverige de senere år. Svensk Vatten Utveckling har nylig gitt ut en rapport som gir både teoretisk bakgrunn og presenterer de største svenske anleggene (Lidèn, 2020). Det presenteres anlegg som har tatt i bruk både ultrafiltrering og omvendt osmose til drikkevannsproduksjon, samt flere nanofiltreringsanlegg som er tatt i bruk de siste 10 årene. For eksempel benytter vannverket Glemmingebro i Ystad nanofiltrering til å redusere hardheten, mens vannverket Gästrike i Gälve benytter nanofiltrering for å fjerne organiske miljøgifter. Som et siste eksempel kan vannverket Fårösund i Gotland nevnes. Dette vannverket benytter både ultrafiltrering og nanofiltrering for å fjerne naturlig organisk materiale, der ultrafiltreringstrinnet fungerer som forbehandling for nanofiltreringstrinnet. For mer detaljer og flere eksempler henvises til Lidèn (2020).

---

## 2.4. Relevante FoU-prosjekter

*Membranfiltrering for fjerning av naturlig organisk materiale (MEMiNOR)* var et forskningsprosjekt som ble finansiert som et spleiselag mellom tre norske vannverk (IVAR, Asker og Bærum vannverk, Vestfold Vann) og ett svensk vannverk (VIVAB), samt Norsk Vann. Fra FoU-sektoren deltok SINTEF og Universitetet i Oslo fra Norge, mens øvrige prosjektdeltakere var Cranfield University (Skottland), Swedish University of Agricultural Sciences og Universitetet i Lund (begge fra Sverige), samt Curtin University (Australia). I tillegg til råvannskarakterisering var et av hovedmålene med prosjektet å bidra til mer kunnskapsbasert optimalisering av membranlegg for drikkevannsrensing. Her var det viktig å kartlegge prosessdesign, membranvalg, driftsrutiner og råvannskvalitet og sammenholde dette med erfaringer og driftsdata fra deltagende vannverk. Det har vært spesielt fokus på karakterisering av naturlig organisk materiale i vannkilden, og hvordan bruken av avansert karakteriseringsteknikker kan benyttes som verktøy for optimalisering av design og drift. Prosjektet er oppsummert i en Norsk Vann rapport (Eikebrokk mfl. 2021).

Forskningsprosjektet *Verktøy for beslutningsstøtte og driftsoptimalisering av vannverk med membranrensing* ble avsluttet våren 2023. Dette prosjektet var finansiert av Forskningsrådet og partnerne i prosjektet som var de kommunale vannverkene Konovatnet fellesvannverk i Overhalla og Jevnaker vannverk, og det privateide vannverket Kirkebygden og Ytre Enebakk Vannverk. Alle vannverkene benytter NF som renseprosess. I tillegg deltok Inrigo AS, som er en leverandør av membranlegg, og SINTEF som FoU-partner. En viktig målsetning i prosjektet var å framskaffe ytterligere kunnskap om

sammenhengen mellom driftsstabilitet og råvannskvalitet ved bruk av ulike typer membraner. For å få til dette ble det bygget to pilotanlegg, henholdsvis et for NF og et for UF med forkoagulering, som ble driftet parallelt med eksisterende membranlegg hos de tre deltagende vannverkene. I forbindelse med pilot-forsøkene ble det tatt ut vannprøver som ble analysert for en rekke parametere, med hovedvekt på karakterisering av naturlig organisk materiale (NOM) og partikkelkarakterisering. I tillegg ble det tatt ut brukte membraner fra vannverkene for karakterisering av belegg på membranene.

Forskningsprosjektet *Simuleringsverktøy for optimalisering av design og drift av vannverk med nanofiltrering* ble avsluttet i januar 2024. Prosjektet ble finansiert av Regionalt Forskningsfond Vestland og Austevoll Vatn og Avløp SA, og hadde som målsetning å fremskaffe et kunnskapsgrunnlag for optimalisering av design og drift av NF-anlegg med utgangspunkt i interne driftsparametere som beskriver de faktiske belastningsforholdene på membranen. Det ble utviklet et 2-dimensjonalt-modelleringsverktøy for å simulere den de hydrauliske forholdene fra innløp til utløp av et trykkrør. Verktøyet ble dernest benyttet for å gi støtte til utredning av driftsutfordringer i membranlegget ved Austevoll Vassverk.

Kunnskap og erfaringer fra disse forskningsprosjektene er benyttet som underlag for revideringen av denne rapporten.

# 3. Enkel innføring i membranfiltrering

Dette kapitlet er ment å gi en enkel innføring i membranfiltrering og bruk av NF-membraner for rensing av drikkevann. De ulike temaene som behandles diskuteres på et overordnet nivå, og det henvises til

annen faglitteratur for mer inngående diskusjon om eksempelvis membranmaterialer, transportmekanismer, og beleggdannelse (Wittmann mfl., 2021; Mulder, 2012).

## 3.1. Sentrale begreper og forkortelser

Tabell 3-1 gir forklaring av viktige begreper og forkortelser som benyttes i denne rapporten.

**Tabell 3-1.** Forklaring av sentrale begreper og forkortelser.

Begrep / Forkortelse	Forklaring
Beleggdannelse	I en membranprosess vil forurensinger i råvannet oppkonsentreres og avsettes som belegg på membranoverflaten. Dette omtales som fouling eller beleggdannelse.
Fluks	Fluks, vannfluks og volumfluks er i praksis det samme og brukes litt om hverandre. Med fluks menes vannmengde transportert gjennom membranen per membranareal per tidsenhet og måles i $l/(m^2 \cdot h)$ .
Fouling	Se beleggdannelse.
Gjenvinningsgrad	Angir hvor mye av råvannet som ender opp som drikkevann og måles i prosent.
Globale parametere	Globale parametere angir gjennomsnittsverdier for membrantrinet og kan typisk beregnes med utgangspunkt prosessparametere som måles i anlegget.
Konsentrasjonspolarisering	Angir at konsentrasjonen av forurensinger i sentrum av konsentratkanalen er lavere enn konsentrasjonen inne ved membranen. Den forhøyede konsentrasjonen inne ved membranen skyldes at vann transporteres gjennom membranen, mens andre stoffer holdes tilbake.
Konsentratkanal	Referer til trykksiden av membranen der kombinert fødevann (dvs. en blanding av resirkulert konsentrat og råvann) strømmer langs membranen.
Lokale parametere	Lokale parametere angir verdier internt i trykkrøret. Lokale parametere må typisk beregnes ved å benytte en 2-dimensjonal transportmodell.
MWCO	Molecular Weight Cut Off forteller hvor store molekyler membranen holder tilbake. MWCO oppgis i Dalton (g/mol).
MF	Mikrofiltrering. Trykktbasert membranprosess med en rekke anvendelsesområder innen vannbehandling og prosessindustri.
NF	Nanofiltrering. Trykktbasert membranprosess med anvendelse blant annet for fargefjerning i vannverk.
NOM	Naturlig organisk materiale er en samlebetegnelse for alt organisk materiale som naturlig finnes i vannforekomster. NOM består av et bredt spekter av organiske makromolekyler med ulik størrelse og ulike kjemiske egenskaper.
Permeabilitet	Er en karakteristisk egenskap til membranen og angir produksjonskapasiteten til membranen i $l/(m^2 \cdot h \cdot bar)$ . Permeabiliteten er temperaturavhengig.
Permeatkanal	Referer til innsiden av en membrankonvolutt der permeatet strømmer radielt og samles i senterrøret.
Prosessvariabler	Er størrelser som måles i anlegg, som for eksempel temperatur, trykk, strømningsmengder.
Renseeffekt	Angir hvor mye av et gitt stoff som holdes tilbake av membranen. Angis i prosent.
RO	Omvendt osmose. Trykktbasert membranprosess med anvendelse blant annet for avsalting av sjøvann. RO referer til engelsk terminologi (reverse osmosis).
Spacer	Plastikknett som ligger mellom to membranark og som definerer strømningskanalen på begge sider av membranen og bidrar til bedre masseoverføring.
Styringsparametere	Inkluderer permeatfluks, tverrstrømhastighet og gjenvinningsgrad. Styringsparametere påvirker driftsbetingelsene til membranene. Styringsparametere kan justeres av driftspersonell.
TMP	Står for trans membrane pressure og tilsvarende trykkforskjellen over membranen, altså trykkforskjellen mellom konsentratkanalen og permeatkanalen. TMP er den drivende kraften for transport av vann gjennom membranen.

Trykkfall	Referer til trykkfallet i konsentratkanalen i et trykkrør (som består av flere elementer i serie). Trykkfallet beregnes som differansen mellom trykk inn og ut av trykkrøret.
Tverrstrømhastighet	Refererer til hastigheten i konsentratkanalen målt i m/s og beregnes fra volumstrømmen delt på tverrsnittsarealet til konsentratkanalen. I denne rapporten refereres strømningshastighet alltid i betydningen av strømningshastighet i "tom" kanal. Siden konsentratkanalen er spacerbelagt vil den virkelige strømningshastigheten være høyere.
UF	Ultrafiltrering. Trykkbasert membranprosess med en rekke anvendelsesområder innen vannbehandling og prosessindustri.
Ytelsesindikatorer	Inkluderer størrelsene permeabilitet, trykkfall over konsentratkanalen, og renseeffekt. Normaliserte ytelsesindikatorer angir tilstanden til membranene i anlegget.

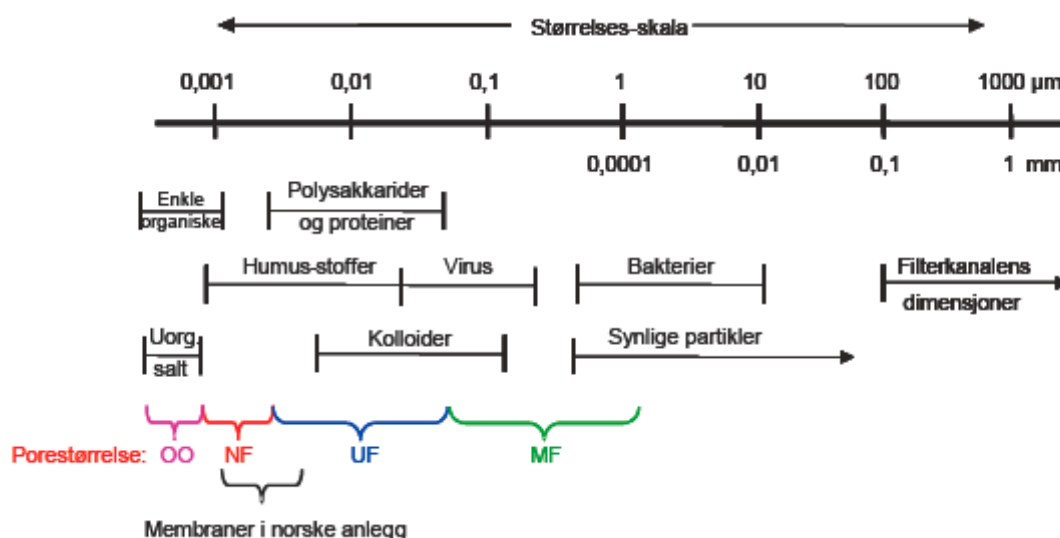
## 3.2. Generelt om membranfiltrering

### 3.2.1. Trykkbaserte membranprosesser og renseeffekt

Det finnes et stort antall membranprosesser som benyttes innenfor et bredt spekter av anvendelsesområder, inklusive rensing av grunnvann, overflatevann og sjøvann for produksjon av drikkevann og prosessvann for industrielle applikasjoner, rensing av sanitært avløpsvann, og rensing av utslipp fra ulike typer industri. De ulike membranprosessene kategoriseres typisk etter hvilken drivende kraft som utnyttes for massetransport gjennom membranen. Den vanligste hovedkategorien omfatter såkalt trykkbaserte membranprosesser, der massetransporten gjennom membranen drives av en trykkforskjell over membranen (trans membranepressure (TMP)). Trykkbaserte membranprosesser kan videre deles inn mikrofiltrering (MF), ultrafiltrering (UF),

nanofiltrering (NF) og omvendt osmose, hvor sistnevnte ofte refereres til som revers osmose (RO).

Figur 3-1 viser porediameteren til de forskjellige trykkbaserte membranprosessene. Samtidig indikeres størrelsen på ulike typer forurensninger som typisk finnes i vannforekomster som benyttes som råvann for drikkevannsrensing. Den viktigste forskjellen mellom de ulike trykkbaserte membranprosessene er størrelsen på porene i membranen, hvilket har betydning for hvilke typer forurensninger i råvannet som vil holdes tilbake av membranen, og hvilke forurensninger som vil slippe gjennom membranen sammen med det rensede vannet. Porestørrelse påvirker også hvor mye trykk som behøves for å presse en viss mengde vann gjennom membranen. Mindre porediameter krever høyere trykkforskjell over membranen for å presse samme mengde vann igjennom.



**Figur 3-1.** Størrelse på ulike forurensninger og porediameter for ulike membranprosesser. "OO" står for omvendt osmose. Med synlige partikler så menes partikler som er synlige i mikroskop.

Rensegraden til en membran oppgis gjerne i MWCO eller retensjon. MWCO står for molecular weight cut off og angir omtrentlig størrelse på molekyler som vil holdes tilbake av membranen. Molekylstørrelse er gitt i Dalton (tilnærmet lik g/mol) og det samme er MWCO.

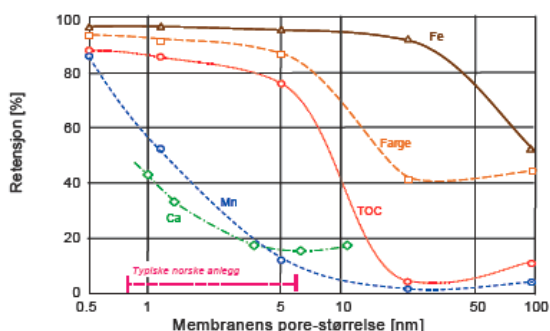
Den relative renseseffekten, også kalt retensjonen  $R$ , beregnes etter formelen:

$$R = \frac{c_f - c_p}{c_f} 100\%$$

der  $c_f$  er konsentrasjonen til et stoff i råvannet og  $c_p$  er konsentrasjonen i permeatet. Retensjonen angir dermed prosentandel av et stoff som holdes tilbake av membranen.

Figur 3-2 viser retensjonen for ulike forbindelser som funksjon av membranens porestørrelse. Forbindelsene er typiske for hva vi finner i norske råvann. Porestørrelsen til membraner som typisk brukes i norske vannverk er også avmerket i figuren. Vi ser av figuren at jern (Fe) fjernes effektivt over et stort porestørrelse-område. Farge og totalt organisk karbon (TOC) fjernes i stor grad, men noe dårligere fordi en stor del av disse forurensningene er mindre enn jernholdige partikler. Mangan (Mn) og kalsium (Ca) fjernes enda dårligere enn de andre stoffene fordi kalsium og mangan finnes i oppløst form som ioner. Skal en fjerne mangan må en velge membraner med veldig små porer.

Når membranen holder tilbake forbindelser samtidig som vann transporteres gjennom membranen, vil konsentrasjonen inne ved membranoverflaten øke. Dette er illustrert i Figur 3-3 der man kan se at det er høyere tetthet av partikler ved membranoverflaten enn ute i kanalen. Dette fenomenet kalles konsentrasjonspolarisering. Dette betyr at membranen på en gitt posisjon i trykkørret opplever en høyere konsentrasjon av forurensninger enn tilsvarende konsentrasjon i bulkfasen i konsentratkanalen.

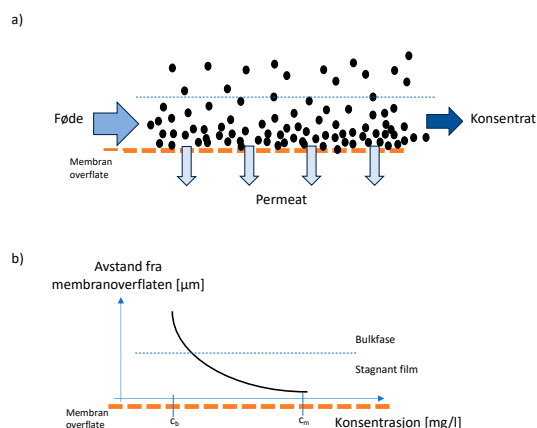


Figur 3-2. Retensjon for ulike parametre som funksjon av membranens porestørrelse.

### 3.2.2. Strømningskonfigurasjoner

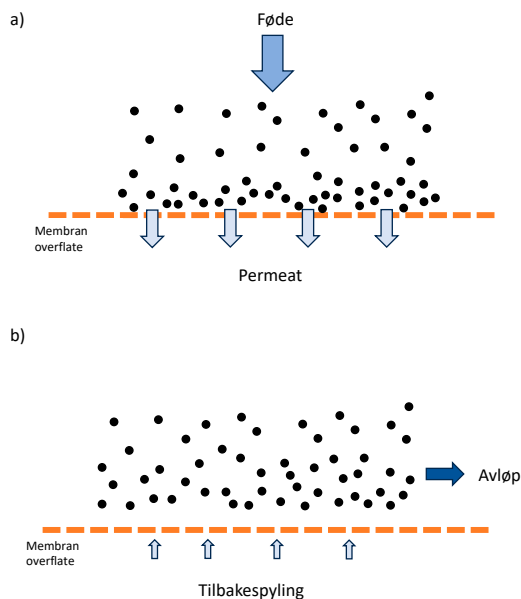
Det grunnleggende prinsippet for vannrensing med trykkbaserte membraner er enkelt og består i at råvann pumpes inn på membrantrinnet hvor forurensninger holdes tilbake og vannet presses gjennom membranen på grunn av trykkforskjellen over membranen (TMP). I praksis så gjøres dette ved å benytte en av to strømningskonfigurasjoner, henholdsvis tverrstrøm (engelsk cross flow) eller dead-end.

Figur 3-3 viser en tverrstrømskonfigurasjon der råvann pumpes inn på membranmodulen og strømmer langs membranoverflaten. Noe vann blir presset gjennom membranen, mens resterende vann forlater membranmodulen som konsentrat. Vannet som presses gjennom membranen kalles for permeat. Siden membranen holder tilbake forurensningsstoffer som har diameter større enn porediameteren vil permeatet inneholde lite forurensningsstoffer. Forurensningene som holdes tilbake vil oppkonsentreres, derav kalles utløpsstrømmen fra fødesiden av membranen for konsentrat.



Figur 3-3. Prinsipp for tverrstrøms membranfiltrering (cross flow) (a) og konsentrasjonsprofil inn mot membranoverflaten.

Figur 3-4 viser strømningsprinsippet for dead-end filtrering. Med denne strømningskonfigurasjonen vil alt vannet som strømmer inn på membranene i prinsippet ende opp som rensert vann. Samtidig vil alle forurensningene i råvannet som er større enn porene i membranen holdes tilbake og avsettes på membranen. Avhengig av mengde og type forurensninger i råvannet innebærer dette at en vil oppleve rask beleggdannelse og tilsvarende behov for hyppige driftsmessige tiltak for å reversere beleggdannelsen.



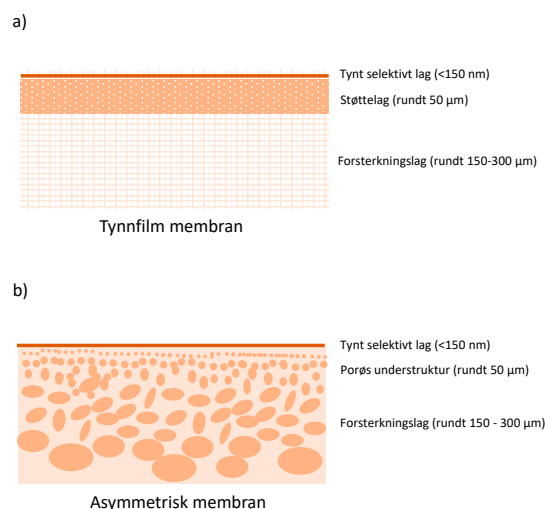
**Figur 3-4.** Strømningsprinsipp i "dead-end"-modul, produksjonsmodus (a) og tilbakespylingsmodus (b).

RO og NF driftes nesten alltid med tverrstrøm, mens MF og UF oftest driftes som dead-end. Den viktigste fordelen med tverrstrøm er at en både vil redusere konsentrasjonspolarisering, som gjør at stoffbelastningen på membranen avtar, samtidig som en oppnår en slags hydraulisk spyleeffekt langs med membranoverflaten. Utblødningen av konsentrat gjør at mye av forurensingene som pumpes inn med råvannet vil slippes ut i stedet for å avsettes på membranen. Samlet bidrar dette til å motvirke beleggdannelse og dermed redusere behovet for membranvask sammenlignet med dead-end. For dead-end vil alle forurensinger i råvannet avsettes på membranen. Dette gjør at en må benytte hyppig tilbakespyling (både med og uten kjemikalier) ved drift av dead-end applikasjoner. Driftsstrategien for de to strømningskonfigurasjonene vil derfor være svært forskjellige.

### 3.2.3. Membranmaterialer

Membraner kan lages av forskjellige materialer. Grovt sett kan en dele inn i to hovedkategorier, henholdsvis polymermembraner og keramiske membraner. Keramiske membraner er aktuelle for bruk i MF-anlegg med forkoagulering, men vi vil i det videre begrense oss til polymerbaserte membraner. Polymerbaserte membraner kan lages i ulike konfigurasjoner, dvs. som ark, fibre eller som rør. De to sistnevnte konfigurasjonene skiller seg fra hverandre ved diameteren på fiberen/røret, der diameteren til fibre typisk er i størrelsesorden 1 mm, og rørmembraner typisk er vesentlig større. Videre kan polymerbaserte membraner lages enten som tynnfilm-

baserte membraner eller som asymmetriske membraner, avhengig av materialvalg og produksjonsmetode. Tynnfilmbaserte membraner består av flere polymerlag som bidrar til mekanisk styrke og utgjør støtte for et meget tynt topplag som bestemmer separasjonsegenskapene til membranen. Asymmetriske membraner består kjemisk sett av ofte av en homogen polymerstruktur, men med en gradvis endring i strukturen fra åpen til tett, der den tette siden gir membranen separasjonsegenskapene. Figur 3-5 viser typisk oppbygning av disse to hovedtypene membran.



**Figur 3-5.** Oppbygning av tynnfilm membraner (a) og asymmetriske membraner (b) (fra Mulder, 2012).

### 3.2.4. Modultyper

For å utnytte membraner i kommersiell skala er det behov for å pakke membranarealet sammen i praktiske enheter som enkelt kan monteres sammen med andre enheter til et større membranlegg. Slike enheter kaller vi elementer eller moduler. En komplett modul består av både det pakkede membranarealet og en ytre innkapsling av membranarealet (housing på engelsk). Dersom en kun referer til selve "membranpakken" så snakker en gjerne om et membranelement. Dersom en referer til den komplette membraninstallasjonen, dvs. både "membranpakken og den ytre innkapslingen, betegnes dette gjerne som en membranmodul, men i praksis vil ofte begrepene modul og element benyttes om hverandre.

Modulkonfigurasjonen, dvs. hvordan membranen praktisk pakkes sammen gjøres noe forskjellig for de tre hovedtypene av polymere membraner (ark, fiber og rør).

Arkmembraner monteres normalt i en konfigurasjon som kalles spiralelementer. Prinsippet og oppbygning av et spiralelement er vist i Figur 3-6. To arkmembraner

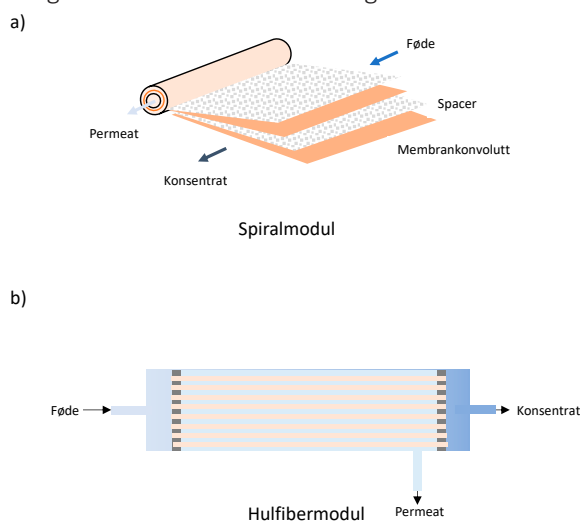
legges med baksiden mot hverandre med en permeat-spacer imellom. Deretter sveises tre av sidene sammen, slik at man får en membrankonvolutt. Den åpne siden på membrankonvolutten monteres på et perforert senterrør sammen med andre membrankonvolutter. For et standard 8" spiralelement er det ofte i størrelsesorden 15-20 membrankonvolutter festet til senterrøret. Videre monteres det en fødespacer mellom alle membrankonvoluttene for å sikre en definert strømningskanal langs membranoverflaten. Til slutt rulles alle membrankonvoluttene sammen til en "spiral". Utsiden av konvoluttene utgjør konsentratkanalen og fødevannet vil strømme i lengderetningen av elementet fra innløp til utløp. Permeatet produseres på innsiden av konvoluttene og strømmer radielt til senterrøret og videre ut av membran-elementet. Spiralelementer plasseres i trykkør som samlet sett utgjør membranmodulen. Trykkørene produseres typisk i glassfiber og har en lengde opp til 7 meter, avhengig av type membranprosess og applikasjon. Membranelementene er utskiftbare.

Fibermembraner monteres i hulfibermoduler der prinsippet og oppbygning er vist i Figur 3-6. En hulfibermodul består typisk av flere tusen fibre med ca 1 mm diameter som buntet sammen ved at mellomrommet mellom hvert fiber i hver ende tettes med lim for å gi to endestykker. Fiberbunten monteres i et rør slik at limet ved hvert endestykke tetter rundt røret og fiberbunten. Fødestrømmen kan enten ledes til utsiden av et av endestykkene og strømme på innsiden av fibre eller ledes til innsiden av røret og strømme på utsiden av fibre. Dette refereres til som henholdsvis innside - ut filtrering og utside-inn filtrering. I hulfibermoduler er membranpakken og innkapslingen (housing) integrert i en

komplett enhet. Dette innebærer at en ved utskifting av membraner må hele modulen byttes ut.

Rørmembraner produseres i likhet med arkmembraner som frittstående elementer (membranpakker). Disse er selv bærende og monteres i et egnet trykkør med egne endestykker. Flere rør kan koples sammen enten i serie eller parallell med slanger. Rørmembraner er ikke brukt i vannverk Norge, så vi vil ikke gå nærmere inn på disse.

De ulike modultypene har forskjellig pakningstetthet, der pakningstettheten er definert som forholdet mellom membranareal per volum element. Pakningsenheten gir således en pekepinn på hvor mye plass (volum) man trenger for å installere en viss mengde membranareal.



**Figur 3-6.** Prinsippet bak en spiralmodul (a) og en hulfibermodul (b) (begge vist med tverrstrøm og hulfibermodulen er innside ut).

### 3.3. Nanofiltrering

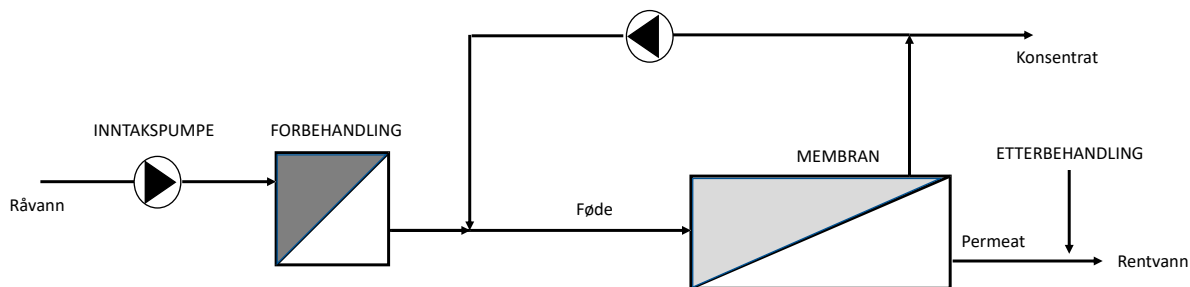
#### 3.3.1. Generell oppbygning av vannverk med NF

Figur 3-7 illustrerer prosessdesignet for et typisk norsk vannverk med NF-prosess, det vil si anlegg som benytter polymerbaserte membraner og resirkulering av konsentrat for å øke tverrstrøms hastigheten langs membranen. Et slikt anlegg består av følgende trinn:

- Vannkilde (innsjø, elv, grunnvann)
- Inntakssystem (Grovsiler på inntak, inntakspumpe eller trykkføde (positiv høydeforskjell til kilden))
- Forbehandling (Ulike typer filterinnretninger inklusive ulike typer selvrensende siler med lysåpning rundt 50 µm)

- Hovedprosess (membrantrinn bestående av trykkør med membraner, system for membranvask/døgn-skylling, instrumentering og styringssystem)
- Korrosjonskontroll (vannglass, kalkfilter, ++)
- Desinfeksjon (Natriumhypokloritt (klor), kloramin, UV, ozon)

De enkelte trinnene må blant annet tilpasses råvannets karakteristikk og valg av membrantype. Det finnes en håndfull systemleverandører i det norske markedet. I tillegg finnes det ulike leverandører/fabrikater av utstyr for forbehandling, membraner, korrosjonskontroll og desinfeksjon.



**Figur 3-7.** Skjematisk fremstilling av et typisk membranlegg med nanofiltreringsmembran med de viktigste komponentene.

Figur 3-7 definerer også hovedstrømmene i et membranlegg. Råvannstrømmen er eneste strømmen inn på prosessanlegget, mens utløpsstrømmene inkluderer både permeatet og konsentratet som bløst ut av anlegget. Et viktig element i prosessdesignet til NF-anlegg for drikkevannsrensing er resirkulering av konsentrat. Resirkulasjonsstrømmen blandes med råvann i forkant av membrantrinnet. Dette gjøres for å øke tverrstrøms-hastigheten, hvilket bidrar til å redusere stoffbelastningen på membranen.

### 3.3.2. Massetransport i nanofiltrering

I trykkbaserte membranprosesser er det trykkdifferansen over membranen som er drivende kraft for vanntransporten gjennom membranen. For nanofiltrering vil det under gitte betingelser kunne virke en osmotisk motkraft som skyldes forskjellig konsentrasjon av oppløst stoff på hver side av membranen. Generelt kan vanntransporten gjennom membranen uttrykkes ved:

$$J_v = P (TMP - \Delta\pi) \quad (2)$$

der  $P$  er vannpermeabiliteten,  $\Delta\pi$  er differansen i osmotisk trykk, og  $TMP$  som står for "trans membrane pressure" er trykkdifferansen over membranen.  $TMP$  beregnes slik:

$$TMP = p_{inn} - (\Delta p_{konsentratkanal})/2 - p_{perm} \quad [\text{bar}]$$

hvor  $p_{inn}$  er innløpsstrykket til membrantrinnet i bar, og  $p_{perm}$  er trykket på permeatsiden av membranen i bar.  $\Delta p_{konsentratkanal}$  er trykkforskjellen mellom innløp og utløp fra membranen i bar.

For norske forhold og bruk av overflatevann med lav konduktivitet kan vi se bort fra det osmotiske bidraget. Ligning 1 kan da forenkles og skrives:

$$J_v = P \cdot TMP \quad (3)$$

Vannpermeabiliteten  $P$  er en karakteristisk egenskap til membranen og vil derfor variere mellom ulike membranprodukter. En må være klar over at permeabiliteten påvirkes av temperatur. Det er derfor viktig at permeabilitet normaliseres, altså relateres til en referansetemperatur, når verdier oppgitt av leverandøren skal sammenlignes med det man måler i et anlegg. Se kapittel 4.5.3 for mer detaljer rundt temperaturnormalisering.

### 3.3.3. Kjennetegn ved nanofiltreringsanlegg

Den primære målsetningen for drift av vannverk er å levere godt og hygienisk sikkert drikkevann innenfor gjeldende krav i regelverk, og samtidig produsere tilstrekkelig mengde vann slik at forsyningssikkerheten til abonnentene ivaretas.

Dersom vannverket benytter nanofiltrering som renseprosess så vil permeatkvaliteten i hovedsak bestemmes av råvannskvaliteten og hvilken type NF-membran som benyttes. Med andre ord så vil selve driften av anlegget i liten grad påvirke kvaliteten på det produserte drikkevannet.

Dette er fundamentalt forskjellig fra øvrige renseprosesser som typisk benyttes i vannverk i Norge. For ulike renseprosesser basert på koagulering etterfulgt av filtrering, inklusive membranprosesser (MF og UF) med forkoagulering vil optimalisering av koaguleringsstrinnet, primært regulering av pH og koagulantdose, i stor grad bestemme kvaliteten på det produserte drikkevannet.

En av de åpenbare fordelene med nanofiltrering er at dette er en robust prosess som leverer stabil vannkvalitet med god renseeffekt av NOM uten at det er behov for hyppig driftstilsyn og optimalisering av driftsparametere for å oppnå ønsket permeatkvalitet. Men i likhet med alle membranprosesser så vil beleggdannelse (som diskutert i kapittel 3.5) medføre at ytelsen til membranen reduseres over tid. Dersom membranytelsen reduseres under et visst nivå (som kan variere fra vannverk til vannverk) må membranene i anlegget helt eller delvis byttes ut for å sikre forsyningssikkerheten til abonnentene. Hvor mye belegg, hvilken type belegg, og ikke minst

hvor raskt beleggdannelsen skjer, varierer imidlertid mye fra vannverk til vannverk.

Beleggdannelse vil bidra til økte driftsutgifter knyttet til økt energibehov og økte kostnader for membranvask, samt redusert membranlevetid. Sistnevnte vil ha betydelig innvirkning på samlede produksjonskostnader siden kostnadene for komplett utskifting av membranene utgjør i størrelsesorden 30-50% av opprinnelig investeringskostnad for selve prosessanlegget. Som tommelfingerregel vil membrankostnaden utgjøre en større andel av total kostnaden jo høyere produksjonskapasiteten til anlegget er.

En viktig forutsetning for at rensing av overflatevann med høyt NOM-innhold med NF-membraner skal fungere effektivt er at membranet designes med tverrstrøm og resirkulering av konsentrat for å øke tverrstrømhastigheten langs membranoverflaten. Økt tverrstrømhastighet bidrar til lavere belastning på membranene gjennom redusert konsentrasjonspolarisering på membranoverflaten, i tillegg til en hydraulisk spyleeffekt. Typisk er resirkulasjonsstrømmen i størrelsesorden 1,5-2,5 ganger større enn råvannsmengden inn på anlegget. Et slikt design med resirkulering av konsentrat har noen prosessrelaterte konsekvenser sammenlignet med en tverrstrømsprosess uten resirkulering av konsentrat (f.eks. avsalting av sjøvann).

Konsentrasjonsprofilen fra innløp til utløp vil være vesentlig brattere i en prosess uten resirkulering der konsentrasjonen av forurensinger gradvis vil øke fra råvannskonsentrasjon ved innløpet til konsentratkonsentrasjonen ved utløpet, der utløpskonsentrasjonen reflekteres av anleggets gjenvinningsgrad. For en NF-prosess med resirkulering vil innløpskonsentrasjonen være vesentlig høyere enn råvannskonsentrasjonen på grunn av at størstedelen av det kombinerte fødevannet inn på membrantrinnet (60-70%) består av konsentrat, og kun 30-40% består av råvann. På den annen side vil konsentrasjonsprofilen gjennom trykkrøret bli langt flatere for NF-prosessen hvilket vil bidra til en jevnere stoffbelastning gjennom trykkrøret.

Som allerede nevnt er hensikten med å benytte resirkulering at en oppnår økt tverrstrømhastighet som reduserer beleggdannelsepotensialet på membranen. En mindre gunstig bieffekt er at økt tverrstrøm samtidig bidrar til økt trykkfall, noe som resulterer i at den prosentvise forskjellen i TMP fra innløp til utløp vil være mye større med resirkulering enn uten. Dette resulterer dernest i bratte fluksp profiler, hvilket er ugunstig både med tanke på beleggdannelse, men også utnyttelse av

#### **Fordeler med NF som vannbehandlingsprosess:**

- Stabil vannkvalitet som i hovedsak bestemmes av råvannskarakteristikk og membranvalg, og som i liten grad påvirkes av driften av anlegget innenfor normale driftsområder.
- Stabil prosess som krever lite driftsoppfølging i den daglige driften. Dette har gjort NF-anlegg attraktivt for små og mellomstore anlegg.
- Gunstig avfallshåndtering siden prosessen ikke har behov for slamhåndtering. Konsentrat kan sendes tilbake til kilde eller nærliggende resipient. Løsning fra døgnskylling som typisk inneholder mindre mengder klor og citrat kan slippes på avløpsnett eller egnet resipient. Det samme gjelder utslipp av vaskeløsning fra hovedvask som typisk utføres 1-3 ganger per år, men her kan det være behov for nøytralisering før utslipp/påslipp.

#### **Ulemper med NF som vannbehandlingsprosess:**

- Den største ulempen med NF-anlegg er beleggdannelse som resulterer i redusert ytelse på membranene. Beleggdannelse er imidlertid håndterbart så lenge dette er tatt høyde for i anleggsdesignet, eksempelvis ved at pumpekapasiteten for trykkføde og sirkulasjon er tilstrekkelig til å drifte anlegget også med forventet beleggdannelse.
- Utskifting av membraner utgjør en stor del av driftskostnaden, og driftsutfordringer som resulterer i utskifting før membranens normallevetid er utløpt, vil fordyre driften vesentlig.
- Moderat energiforbruk knyttet til trykkføde og sirkulasjonspumping. Energiforbruket kan om lag halveres dersom en kan utnytte fallhøyde fra råvannskilde til vannverk for å nå nødvendig innløpsstrykk.

produksjonskapasitet gjennom hele trykkrøret. Dette er effekter som vil gjøre seg mer gjeldende dersom en velger en membran med høy permeabilitet. Årsaken er at den prosentvise forskjellen mellom nødvendig innløpsstrykk og det resulterende trykkfallet over trykkrøret blir liten, noe som betyr at det drivende trykket for massetransport ved utløpet kan bli svært lavt. Ved ugunstig design kan en risikere at det bakerste membranelementet i trykkrøret ikke produserer vann i det hele tatt.

En annen konsekvens av design med resirkulering er at en betydelig del av energiforbruket for pumping er knyttet til sirkulasjonspumpen som skal kompensere for trykkfallet over membrantrinnet. Typisk vil i størrelsesorden 40% av energiforbruket til pumping skyldes sirkulasjonspumping. Resterende ca 60% er knyttet til trykksetting av råvann inn på anlegget. Mange vannverk har en betydelig positiv fallhøyde inn på anlegget som kan sørge for trykksetting av råvann. Dette innebærer at behovet for råvannpumpe bortfaller, noe som mer enn halverer energiforbruket til pumping.

### 3.3.4. Nanofiltreringsmembraner for drikkevannsrensing

Det finnes et bredt utvalg av nanofiltreringsmembraner som er i bruk i vannrensing, der membran ofte er utviklet med tanke på et spesielt bruksområde. Til bruk for fargefjerning i Norge er det i hovedsak membraner laget av cellulose acetat (CA) eller polyetersulfon (PES) som er i bruk. Det finnes flere leverandører og produkter på markedet, en oversikt over noen av disse er gitt i Tabell 3-2. Merk at tabellen er ikke uttømmende.

**Tabell 3-2.** Eksempler på kommersielle membraner brukt til fargefjerning.

Leverandør	Membran	Polymer	Modul	MWCO [Da]	Erfaring fullskala Norge	Referanse
Hydranautics	HYDRACoRe 10	PES	Spiral	3000	Ja	<a href="https://membranes.com/wp-content/uploads/Documents/Element-Specification-Sheets/NF/HYDRACoRe/HYDRACoRe10-and-50-LD-Series.pdf">https://membranes.com/wp-content/uploads/Documents/Element-Specification-Sheets/NF/HYDRACoRe/HYDRACoRe10-and-50-LD-Series.pdf</a>
Hydranautics	HYDRACoRe 50	PES	Spiral	1000	Ja	<a href="https://membranes.com/wp-content/uploads/Documents/Element-Specification-Sheets/NF/HYDRACoRe/HYDRACoRe10-and-50-LD-Series.pdf">https://membranes.com/wp-content/uploads/Documents/Element-Specification-Sheets/NF/HYDRACoRe/HYDRACoRe10-and-50-LD-Series.pdf</a>
Microdyn-Nadir	TRISEP SBNF	CA	Spiral	2000	Ja	<a href="https://water-membrane-solutions.mann-hummel.com/content/dam/water-membrane-solutions/download/technical-data-sheets/trisep/trisep-sbnf-data-sheet.pdf/_jcr_content/renditions/original/trisep-sbnf-data-sheet.pdf">https://water-membrane-solutions.mann-hummel.com/content/dam/water-membrane-solutions/download/technical-data-sheets/trisep/trisep-sbnf-data-sheet.pdf/_jcr_content/renditions/original/trisep-sbnf-data-sheet.pdf</a>
Koch	ROGA 8040-UF-325	CA	Spiral	8000	Ja	(utgått)
Microdyn-Nadir	TRISEP SBUF	CA	Spiral	8000	Ja	(utgått)
Pentair X-flow	HFW 1000	PES	Hulfiber	1000	Kun pilot	<a href="https://xflow.pentair.com/en/products/hfw1000">https://xflow.pentair.com/en/products/hfw1000</a>

Det fremgår fra tabellen at enkelte av membranproduktene har betegnelsen "UF" i produktnavnet. I henhold til MWCO er disse membranene klassifisert som "tette" UF membraner, men for alle praktiske formål kan de regnes som "åpne" NF membraner. F.eks. så er vannverk som har benyttet ROGA 8040-UF-325 designet og driftet på tilsvarende måte som vannverk som benytter membraner med betegnelsen "NF" i produktnavnet. Det kan legges til at det er en glidende overgang når det gjelder egenskaper til de ulike trykkbaserte prosessene (MF, UF, NF og RO), der NF ligger mellom RO der transportmekanismen er basert på løsnings/diffusjon, mens transportmekanismen for UF er basert på hydraulisk transport gjennom definerte porer.

Det kan nevnes at flere membranprodusenter tilbyr NF-membraner laget av polyamid, det samme membranmaterialet som benyttes i RO-membraner for avsalting av sjøvann. Det er ikke kjent at polyamidbaserte membraner har vært i bruk for fargefjerning i vannverk i Norge. En mulig årsak til at polyamidbaserte membraner ikke er vurdert aktuelle for dette formålet er antakelig at membranen ikke kan eksponeres for klor.

---

## 3.4. Vannkvalitet

### 3.4.1. Forventet renseseffekt i NF-anlegg

Nanofiltrering er en robust prosess som leverer stabil vannkvalitet med god renseseffekt. Permeatkvaliteten bestemmes i all hovedsak av råvannskvaliteten og valg av membran, mens selve driften av anlegget vil påvirke produsert vannkvalitet i svært liten grad.

I en veiledning utarbeidet for Folkehelseinstituttet i 1994 oppgis relativ renseseffekt for til sammen 9 vannverk med NF-prosess (Folkehelse (1994)). For fargetall varierer renseseffekten mellom de ulike vannverkene fra 85% til 96% med gjennomsnitt på 91%. For TOC var renseseffekten noe lavere og varierte fra 67% til 80%. For jern varierte renseseffekten mellom 94 og 98% for de fleste anleggene med et unntak av et anlegg der renseseffekten for jern var kun 85%. Samtlige anlegg den gangen benyttet membraner av celluloseacetat. Tallene virker å stemme bra med det en kan forvente av NF-membraner som benyttes i vannverkene i dag.

### 3.4.2. Lukt/smak

Enkelte nanofiltreringsanlegg i Norge har rapportert om lukt- og smaksutfordringer på produsert drikkevann hos enkelte abonnenter. Lukt- og smaksutfordringer i norsk drikkevann studert i Norsk Vann-prosjektet LOSINOR, som nylig ble avsluttet (Eikebrokk mfl., 2023). Dette prosjektet vurderte også årsakene knyttet til lukt og smak på drikkevann produsert med nanofiltreringsanlegg. Eikebrokk mfl. konkluderte med at lukten skyldes dannelse av klorfenoler knyttet til bruken av klor under den daglige vasken av membranlegget, og at dette

stoffet transporteres gjennom membranen og omdannes til trikloranisoler. Trikloranisoler gir en "muggaktig" lukt, og trenger bare være til stede i veldig lave konsentrasjoner før vi kjenner lukten. For mer detaljer rundt lukt og smak, henvises det til Eikebrokk mfl.

### 3.4.3. Begroingspotensial på nett

Bakterievekst kan også oppstå på rentvannssiden av membranen og på distribusjonsnettet. Dette kan skje selv om membranen er intakt og derved hindrer at bakterier som er til stede i råvannet kan ende opp i permeatet. Membranen fjerner i stor grad større NOM-forbindelser, inklusive humusstoffer. Fjerningen av lavmolekylære organiske forbindelser som er lettere tilgjengelig som føde for bakterier er imidlertid dårligere. Det er stilt spørsmål om dette kan medføre et økt innhold av bakterier i rentvannet og på nettet etter membranlegg. Analyser av begroingspotensial målt som biologisk nedbrytbart organisk karbon (BDOC) og assimilerbart organisk karbon (AOC) på rensset vann fra vannverk med ulike typer rensesprosesser viser at det ikke er noen reduksjon av AOC ved membranfiltrering. AOC måler vekst av én eller to typer mikroorganismer, og er et mål på mengden lett biologisk tilgjengelig organisk materiale. BDOC, som angir reduksjon i DOC over 28 dager, inkluderer også noe tyngre nedbrytbart organisk materiale, og denne parameteren reduseres i membranlegg på linje med andre rensemetoder. Det antas at dette har sammenheng med AOC utnytter hovedsakelig lavmolekylært organisk materiale, mens BDOC utnytter NOM over et videre molekylvekt-spekter.

---

## 3.5. Beleggdannelse

### 3.5.1. Hva mener vi med beleggdannelse

Dette kapitlet gir en kort beskrivelse av det som på engelsk heter "fouling" og som egentlig mangler et godt norsk ord på. Vi har valgt å kalle dette fenomenet "beleggdannelse" og i denne sammenheng må "belegg" forstås som en ansamling av løste forbindelser, kolloider og partikler som legger seg på membranoverflaten og bidrar til å redusere vanntransporten gjennom membranen.

Beleggdannelse vil være en utfordring i større eller mindre grad i alle membranprosesser, også i forbindelse med nanofiltrering i forrensing av overflatevann i vannverk. Belegget som dannes på membranen typisk består av ulike forurensinger som forekommer i råvannet. I norske vannverk med nanofiltrering ser vil alltid dannes

et belegg av NOM, hvor ulike typer partikler som leire/silt og mikroorganismer har en tendens å feste seg.

Det er verd å merke seg at det selv i bløtt norsk overflatevann vanligvis er relativt sett mer uorganiske salter enn NOM i typisk råvann. De uorganiske saltene er imidlertid lavmolekylære, og har derved en høy diffusjonshastighet som gjør at de effektivt "transporteres" vekk fra membranoverflaten. Resultatet blir at konsentrasjonen av salter på membranoverflaten blir forholdsvis lave, og faren for utfelling av salter blir liten.

I delkapitlene nedenfor diskuteres de vanligste forurensingene i råvann som bidrar til beleggdannelse i membranprosesser for rensing av overflatevann og grunnvann.

### 3.5.2. NOM

Naturlig organisk materiale (NOM) er en kompleks gruppe organiske makromolekyler som er et resultat av nedbrytningen av biologisk materiale i naturen. NOM forekommer naturlig i alt overflatevann, men både karakteristikken på det organiske materialet og konsentrasjoner kan variere mye fra sted til sted og mellom ulike vannforekomster. Dette skyldes blant annet variasjoner i jordsmonn, nedbør, vannføring/størrelse, vanddybde, klima, osv.

Det finnes en rekke måter å klassifisere NOM, både etter kjemiske og fysikalske egenskaper, samt størrelse (molekylvekt). En mye benyttet klassifisering deler NOM inn i hovedgruppene humussyrer, fulvussyrer og humin. Disse gruppene består igjen av en rekke undergrupper av organiske forbindelser med ulike egenskaper.

Vanlig norsk råvann er spesielt på grunn av det lave innholdet av kalksalter og naturlig oppløst silikat, samtidig som det inneholder betydelige mengder NOM som gir mange vannforekomster den karakteristiske gulbrune fargen. Selv om NOM også er ansett å være en beleggdammer i membranlegg over hele verden, er NOM spesielt viktig som beleggdammer i norsk sammenheng hvor fargetallet på vannkildene er såpass høyt.

I vannbehandlingssammenheng er det spesielt molekylstørrelse og hydrofilisitet som er av betydning for hvor effektivt NOM kan fjernes med ulike renseteknologi. For membranlegg er disse egenskapene ved NOM også avgjørende for potensialet for beleggdannelse og hvor lett det vil være å fjerne belegget med ulike vasketiltak. I tillegg vil hvordan de ulike NOM-fraksjonene påvirkes av pH være av vesentlig betydning.

En NF-membran vil effektivt holde tilbake en stor andel av NOM-forbindelsene i råvannet. NF-membranen vil typisk holde tilbake polysakkarider, humussyrer og organiske fragmenter. De siste omfatter for eksempel polyfenoler, som er rester fra den kjemiske og biologiske nedbrytningen av planter i naturlig råvann. Fargen i råvannet skyldes stort sett humussyrer og polysakkarider, som også danner armeringen i de største NOM-partiklene. Konsentrasjon av store beleggdannende partikler vil være størst sent på våren når jordsmonnet tiner. Dette bør tas hensyn til ved driften av NF-anlegg, og driftsoperatøren bør da vurdere å redusere fluksen for å unngå økt potensial for beleggdannelse sammenlignet med normalsituasjonen uten forhøyede konsentrasjoner av NOM i råvannet.

Se delkapittel 3.5.5 for mer detaljert om samspillet mellom membran og NOM.

### 3.5.3. Silt og leirpartikler

Silt og leirpartikler er små uorganiske partikler med opprinnelse fra mineraler i jordsmonnet. Kjemisk sett er det ingen forskjell mellom silt og leire, og klassifiseringen gjøres kun basert på partikkelstørrelse. Silt har kornstørrelse 2-60  $\mu\text{m}$ , mens leirpartikler har kornstørrelse mindre enn 2  $\mu\text{m}$ .

Enkelte vannkilder kan ha forholdsvis høye konsentrasjoner av silt og leirpartikler. Forekomsten av silt og leire kan også variere en del over året, og vil typisk være høyere i perioder med snøsmelting og mye nedbør, eller i forbindelse med vår- og høstomrøring.

Belegg med mye silt/leirpartikler er typisk vanskelig å fjerne, og høye konsentrasjoner av silt/leirpartikler i råvannet kan utgjøre en driftsutfordring. Silt/leirpartikler kan også bakes inn i et membranbelegg av NOM og medføre at også NOM-belegget blir vanskeligere å fjerne.

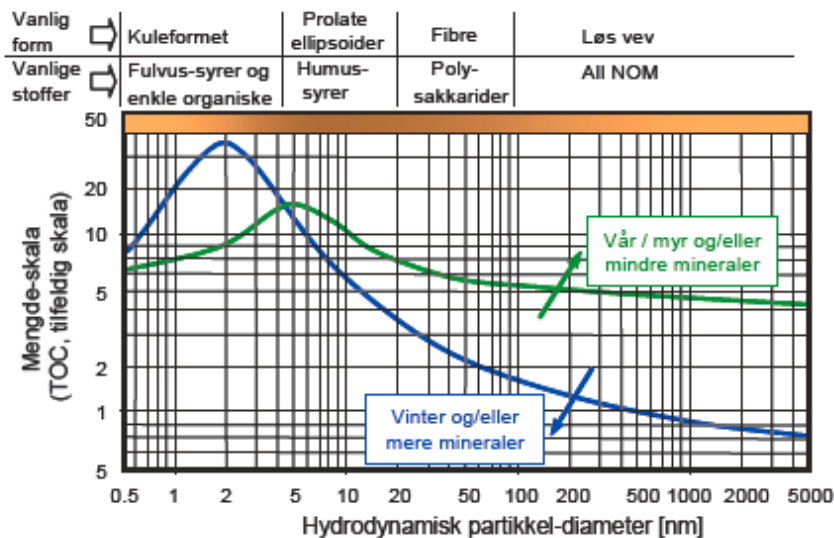
### 3.5.4. Mikroorganismer

Bakterier i råvannet har en tendens å feste seg til overflater. Ved å gjøre dette gis de gode betingelser for å vokse og formere seg (kolonisere) ved at de kan utnytte næringsstoffer (substrat) som tilføres med råvannet inn på membrantrinet. Dersom bakterier gis gode betingelser for vekst, så vil det kunne dannes det vi kaller en biofilm på membranoverflaten.

I NF-anlegg ser en typisk at belegget består av NOM, men der bakterier inkorporeres i det organiske materialet. Det er vanlig å benytte biocider (normalt klor) for å hindre ukontrollert vekst av mikroorganismer. I NF-anlegg tilsettes ofte klor i løsningen som benyttes for døgnskylning. En finner også andre typer mikroorganismer i råvann, slik som hoppekreps og kiselalger. Sistnevnte er små en gruppe mikroorganismer med skall av silisiumoksid med størrelse fra ca 5 og opp til ca 100  $\mu\text{m}$ .

### 3.5.5. Utfelling av tungløselige salter

Utfelling av salter med lav løselighet (engelsk: scaling) oppstår typisk i bakre del av trykkrøret der konsentrasjonen er størst. Slik utfelling er normalt ikke noe problem i forbindelse med nanofiltrering av bløtt norsk overflatevann siden dette inneholder relativt lave konsentrasjoner av salter med utfellingspotensiale. Grunnvannsforekomster kan ha høyere konsentrasjoner av oppløste salter, og en kan oppleve kalkutfelling ( $\text{CaCO}_3$ ) ved membranfiltrering av grunnvann. Karbonat-



**Figur 3-8.** Typiske NOM-partiklers størrelse, form og innbyrdes fordeling.

belegg fjernes enkelt med sitronsyre. Ved avsalting av sjøvann med omvendt osmose vil utfelling av kalk, og sulfatsalter av både kalsium og barium være en potensiell utfordring.

### 3.5.6. Silikat

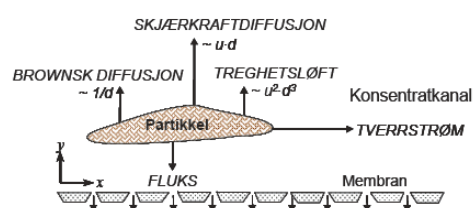
Oppløste silikater finnes i alt naturlig vann. Dersom konsentrasjonen overstiger ca. 4 mg/l vil silikat kunne felle ut. Silikatbelegg på membraner er vanskelig å fjerne. Heldigvis er silikatkonsentrasjonen i overflatevann som benyttes for membranfiltrering i Norge vesentlig lavere enn løseligheten. Silikatfouling utgjør derfor normalt ikke noe problem i vannverk med membranprosess.

### 3.5.7. Litt mer om samspillet mellom membran og NOM

Karakterisering av NOM er vanskelig fordi dette som allerede nevnt er en kompleks gruppe kjemiske forbindelser som dannes ved nedbrytning og dels mikrobiologisk gjenoppbygging av biologisk materiale i naturen, først og fremst plantemateriale. Forbindelsene har ulike størrelse, struktur og sammensetning. I størrelsesområdet under ca 4 nm (0,000004 mm) snakker vi om et stort utvalg enkle organiske forbindelser. Mange av dem er aromatiske, det vil si at de inneholder såkalte benzenringer. Fulvussyrene er en annen viktig gruppe. I området 4 – 20 nm finner vi humussyrene, som er ganske lik fulvussyrene, men er uløselige i syre og mer hydrofobe (vannavvisende). Fulvussyrene og humussyrer kalles ofte polyfenoler og består av forgrenede molekykkjeder. Over disse i størrelse finnes trådformede polysakkarider. Store partiklene over ca 0,1 µm består i stor grad av

sammenvevde nettverk der polysakkarider utgjør rammeverket, men hvor også fulvussyrer og humussyrer er innkapslet. Figur 3-8 viser hvordan NOM-partiklene fordeler seg på størrelse, form og årstidsvariasjon. Det som kanskje er spesielt interessant å merke seg er en forskyvning mot større partikler på sen-våren når avrenningen fra jordsmonnet starter, noe som vanligvis er sammenfallende med omveltning av vannmassene i innsjøene.

Det er altså stor variasjon i egenskapene til NOM-partiklene som bringes med råvannet inn på membrantrinnet. Disse partiklene vil oppleve flere ulike krefter, herunder tverrstrømmen langs strømningskanalen (parallelt med membranoverflaten), vannfluksen som innebærer vanntransport vinkelrett på membranoverflaten, samt ulike diffusjonsmekanismer. Av diffusjonsmekanismer er det særlig brownsk diffusjon, skjærkraftdiffusjon og treghetsløft som bidrar i nanofiltrering. Alle disse kreftene virker på en partikkel og er forsøkt illustrert i Figur 3-9.



**Figur 3-9.** Ulike krefter som virker på en partikkel nær en membranoverflate.

Det er gjennomført en betydelig mengde eksperimentelle forsøk og teoretiske beregninger og for å forstå sammenhengen mellom partikkelstørrelse og belegg-dannelse på membranen (Thorsen, 1999; Thorsen, 2004). Figur 310 viser et eksempel på hvordan konsentrasjonen av NOM-partikler inne ved membranoverflaten varierer med hensyn på størrelsen til partikkelen (størrelsen til partikkelen er gitt ved hydrodynamisk diameter). Beregningene er gjort for typiske driftsbetingelser i norske membranlegg og vi ser at det hovedsakelig er partikler større enn ca. 0,1 µm og mindre enn 3-5 µm som oppkonsentreres nær membranoverflaten og som kan danne belegg. Videre er det vist at for NOM typisk dannes belegg når partikkelkonsentrasjonen overstiger 5 g/l ved overflaten.

Figur 3-10 angir også hvordan ulike variabler bidrar til økt konsentrasjon inne ved membranen for de tre ulike diffusjonsmekanismene, ved å angi uttrykk for konsentrasjonen inne ved membranen. I figuren er  $d_h$  den hydrodynamiske partikkeldiameteren,  $h$  er kanalhøyden,  $J$  er fluksen,  $u$  er tverrstrømhastigheten,  $k$  er en konstant og  $c_0$  er totalkonsentrasjonen av aktuell NOM-partikkelstørrelse. Det disse sammenhengene viser er:

- Høy fluks øker faren for beleggdannelse, spesielt for små partikler.

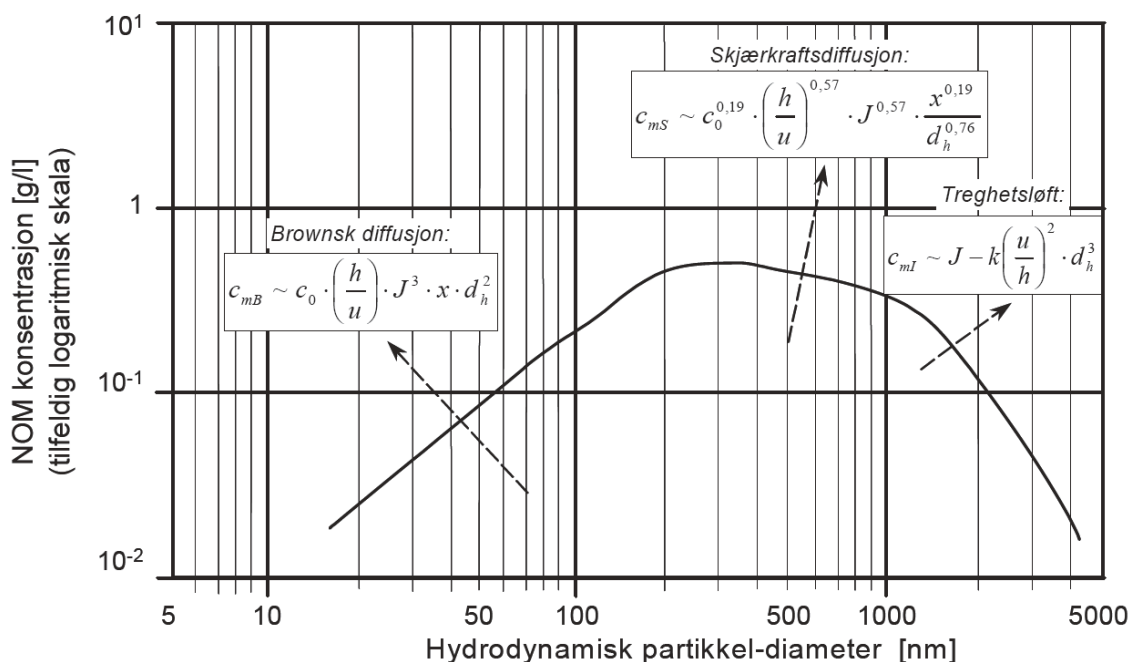
- Høy tverrstrømhastighet reduserer beleggdannelsen, både for små og store partikler.
- Høy NOM-konsentrasjon øker faren for beleggdannelse.
- Brownsk diffusjon hindrer at små partikler er et problem, mens treghetsløft hindrer at store partikler danner belegg.
- Effekten av skjærkraftdiffusjon og treghetsløft øker med tverrstrømhastigheten.

God og stabil membrandrift er derfor avhengig av en balanse mellom disse diffusjonskreftene for å unngå opphopning av partikler på membranen og dermed en gradvis reduksjon i ytelsen til membranen over tid. Og som sammenhengene viser kan man til en viss grad skape denne balansen med aktiv styring av fluks og tverrstrømhastighet. Samtidig er det åpenbart at råvannskvaliteten er av stor betydning.

Mer detaljer rundt drift av membranlegg er gitt i kapittel 4.

### 3.5.8. Beleggdannelse på spacer

Til nå i kapittelet har vi diskutert beleggdannelse på selve membranoverflaten. Belegg på membranoverflaten bidrar til å øke transportmotstanden slik at det må brukes mer energi (i praksis høyere trykk) for å presse vann gjennom membranen. Det er imidlertid ikke bare på membranoverflaten det kan danne seg belegg. Også



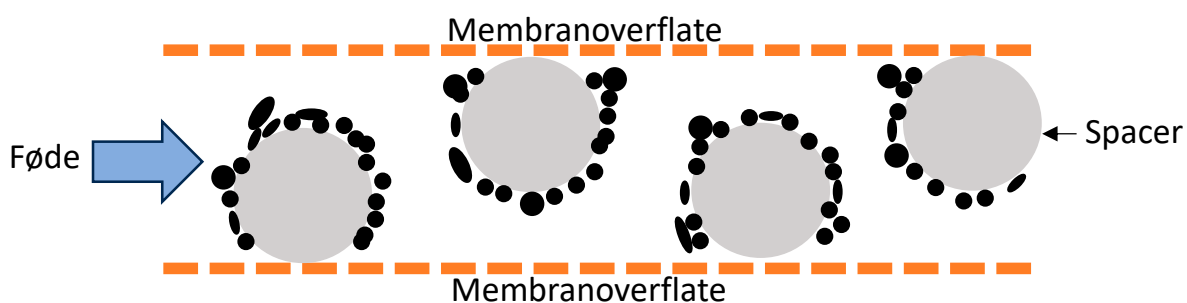
**Figur 3-10.** Konsentrasjon av NOM inne ved membranoverflaten som funksjon av NOM størrelsen målt som hydrodynamisk partikkeldiameter. Eksempelet viser en forhøyet konsentrasjon av partikler med i størrelse fra 50 nm til 2000 nm (2 µm).

på fødespaceren kan det danne seg belegg av ulike typer forurensinger.

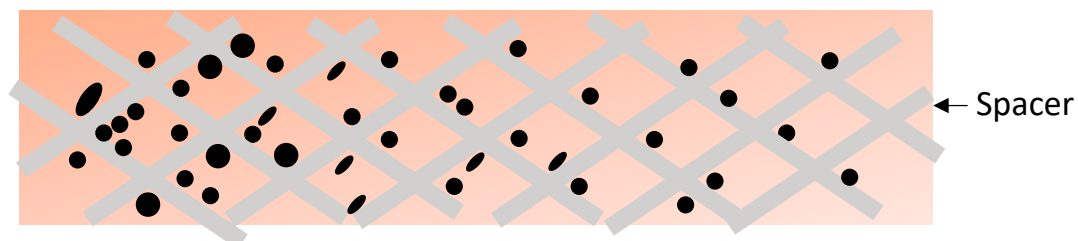
Fødespaceren består av et 2-dimensjonalt vevet nett av plastikktråder som går vekselvis over og under hverandre i et såkalt diamantmønster. Spaceren definerer strømningskanalen mellom to membran-konvolutter, og bidrar i tillegg til å bedre masseoverføringsforholdene på membranoverflaten ved at det oppstår turbulens (små vannvirvler) som bryter opp i den

stagnante diffusjonsfilmen på membranoverflaten. Dette medfører samtidig at det oppstår regelmessige dødsoner med "stagnant" vann der partikler enklere vil feste seg til spaceren og akkumulere. Figur 3-11 viser et enkelt snitt av konsentratkanalen i et spiralelement sett fra siden, og et snitt der vi ser kanalen ovenfra. Når partikler akkumuleres på spaceroverflaten reduseres strømningsstverrsnittet og man vil få økt trykkfall over membranelementet og trykkrøret.

a)



b)



**Figur 3-11.** Illustrasjon av beleggdannelse på spaceren i strømningskanalen på fødesiden av membranen, tverrsnitt (a) og ovenfra (b).

# 4. Drift av nanofiltreringsanlegg

## 4.1. Innledning - Drift av NF-anlegg

Den overordnede strategien for design og drift av nanofiltreringsanlegg bør være å legge til rette for best mulig driftsbetingelser for membranen slik at utfordringene knyttet til beleggdannelse blir minst mulig. Dette vil bidra til å holde løpende driftskostnader lave og samtidig bidra til lang levetid på membranene.

Dette kapitlet omtaler følgende:

- De ulike faktorene som påvirker beleggdannelse, er omtalt i kapittel 4.2.
- En forutsetning for at driftsoperatøren skal kunne overvåke driften av anlegget, er at et minimum av

prosessvariabler overvåkes og registreres. Dette er omtalt i kapittel 4.3.

- Hvordan driftsoperatøren kan påvirke driftsbetingelsene til membranen gjennom innstilling av styringsparametere er diskutert i kapittel 4.4
- Hvordan driftsoperatøren kan overvåke ytelsen til membranen over tid slik at han/hun har et grunnlag for å vurdere hensiktsmessige driftstiltak diskuteres i kapittel 4.5.
- Tiltak og strategier for å redusere beleggdannelse og sikre god og stabil membranytelse over tid diskuteres kapittel 4.6, 4.7, og 4.8.

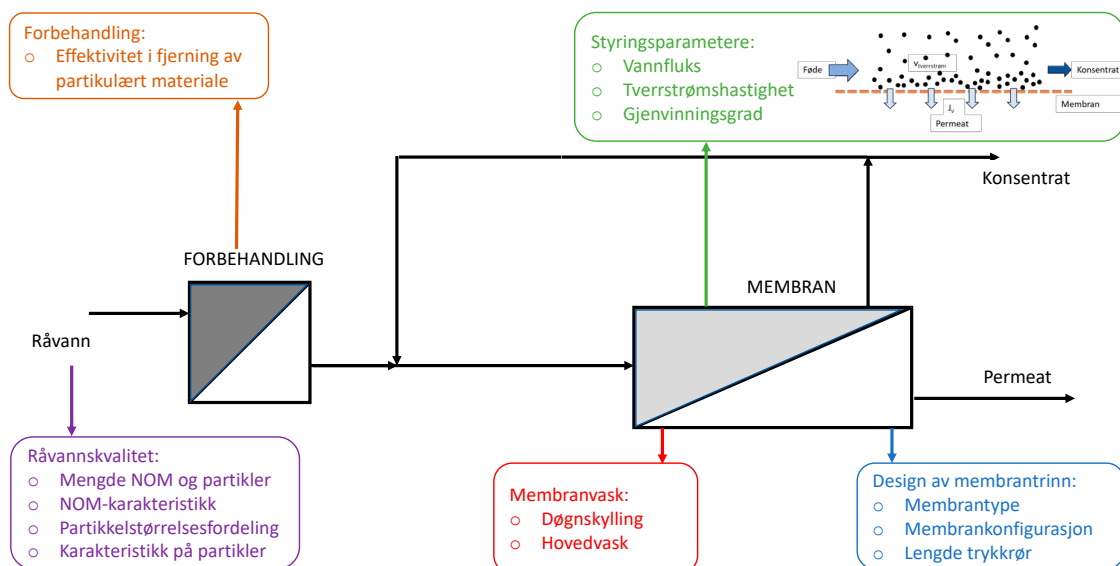
### Viktig - Samspillet mellom anleggsdesign og god drift

Den viktigste suksessfaktoren for god drift av nanofiltreringsanlegg er å redusere sjansen for beleggdannelse. Ved å minimere belegg som ikke kan fjernes ved døgnskylling/hovedvask vil man holde løpende driftskostnader lave, og samtidig bidra til lang levetid på membranene. Derfor må man allerede i planlegging og designfasen ha fokus på hvordan en kan oppnå gunstige driftsbetingelser.

## 4.2. Faktorer som påvirker ytelse og levetid på membranene

For å kunne optimalisere driften av et nanofiltreringsanlegg slik at en oppnår stabil membranytelse over tid er det viktig at både vannverkseier og driftsoperatører har god kjennskap til hvilke faktorer som påvirker

beleggdannelse. Figur 4-1 er en forenklet prinsippskisse av et NF-anlegg der det illustreres hvilke faktorer som kan påvirke membranens driftsbetingelser og dermed også potensialet for beleggdannelse.



**Figur 4-1.** Prinsippskisse av et NF-anlegg som illustrerer hvilke faktorer som kan påvirke membranens driftsbetingelser og dermed potensialet for beleggdannelse.

Det er det viktig å skille mellom designrelaterte og driftsrelaterte faktorer. Designrelaterte faktorer inkluderer:

- Egenskapene til valgt membran
- Membrankonfigurasjon og lengde på trykkrør
- Råvannskvalitet (kilden)
- Effekten av forbehandlingstrinnet

Designrelaterte faktorer er i stor grad prisgitt designvalg og beslutninger som gjøres i prosjekteringsfasen for byggingen eller ombyggingen av vannverket. Hvordan designrelaterte faktorer vil kunne påvirke beleggdannelse og utviklingen av membranytelse over tid er nærmere diskutert i kapittel 6.

Driftsrelaterte faktorer som påvirker utviklingen av beleggdannelse og membranytelse er:

- Innstilling av driftsparametere som påvirker driftsbetingelsene til membranen (styringsparametere). Dette er nærmere diskutert i kapittel 4.4.
- Vedlikeholdstiltak for å motvirke beleggdannelse eller fjerne belegg. Dette er nærmere diskutert i kapittel 4.6.

Vannverkseier og driftsoperatører kan påvirke i hvilken grad disse driftsrelaterte faktorene vil bidra til god drift og stabil membranytelse over tid, eller i motsatt fall beleggdannelse og raskt tap av membranytelse.

## 4.3. Driftsovervåking og journalføring

Systematisk innsamling og registrering av data er avgjørende for at driftsoperatøren skal kunne skaffe seg nødvendig informasjon til å drifte membranlegget på en god måte. Derfor er det viktig at både relevante prosessvariabler, vannkvalitetsdata og informasjon om ulike driftshendelser og driftstiltak registreres/journalføres.

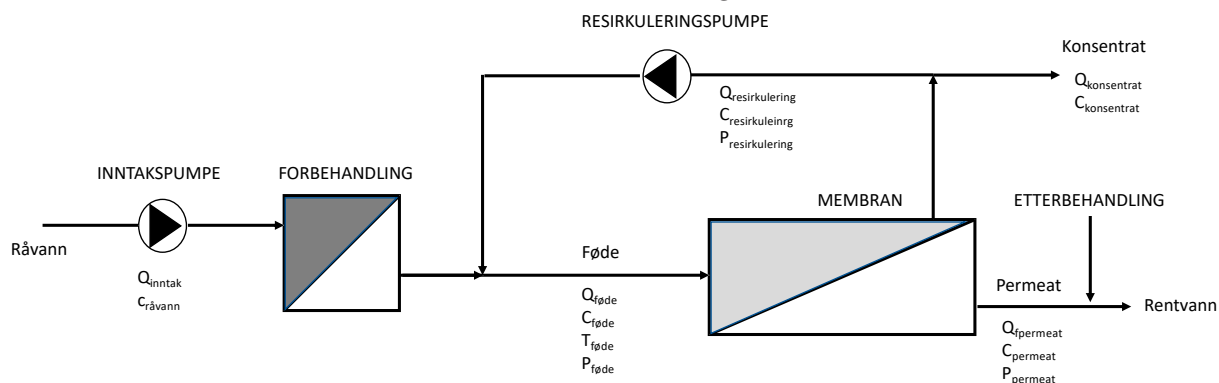
### 4.3.1. Registrering av prosessvariabler

For å kunne vurdere hensiktsmessige driftstiltak er det viktig at driftsoperatøren har muligheten til å overvåke driftsbetingelsene for membrantrinnet og utviklingen av tilstanden til membranene. Både permeabilitet og trykkfall som klassifiseres som ytelsesindikatorer, samt vannfluks, tverrstrømhastighet og gjenvinningsgrad, som omtales som styringsparametere, er parametere som må beregnes med utgangspunkt i målinger av relevante prosessvariabler. Dette innebærer at det er helt avgjørende for å kunne overvåke og følge opp driften av membranlegget at en registrerer et minimum av prosessvariabler. Det anbefales at følgende prosessvariabler måles og registreres, ref. Figur 4-2:

- Trykk i følgende strømmer:
  - Innløp til membran
  - Utløp fra membran
  - Permeat
- Strømningsmengde i følgende strømmer:
  - Råvann
  - Resirkulasjonsstrøm
  - Konsentratutslipp
  - Permeat
- Temperatur i fødevann til membranene

For å overvåke driften av forfiltreringstrinnet anbefales det i tillegg å registrere trykket inn og ut av forfilteret.

I nyere anlegg vil styringsparametere normalt beregnes i anleggets SCADA, men mange anlegg bygget før årtusenskiftet og på tidlig 2000-tall mangler ofte et styringssystem med logging av relevante prosessdata som trykk, strømningsmengde og temperatur. Dette innebærer at vannverket må føre logg der prosessdata avleses manuelt og hvor styringsparametere deretter må beregnes.



**Figur 4-2.** Forenklet skisse av NF-anlegg med angivelse av delstrømmer ( $Q$ ), prosessstrykk ( $p$ ) med respektive konsentrasjoner ( $C$ ). Temperaturmåling ( $T$ ) er vist for fødestrømmen.

### 4.3.2. Overvåking av vannkvalitet

For å kunne overvåke hvorvidt separasjonsegenskapene til membranen endrer seg over tid er det nødvendig å jevnlig registrere egnede vannkvalitetsparametere i permeat og råvann slik at driftsoperatøren kan beregne renseeffekten til aktuelle forurensinger. Fargetall og DOC er eksempler på egnede parametere for å overvåke hvorvidt membranens separasjonsegenskap for fjerning av organisk stoff endrer seg over tid.

Vannverkene skal i henhold til forskriftskrav dokumentere vannkvaliteten på produsert drikkevann et gitt antall ganger i året ved bruk av akkreditert laboratorium. Det er hensiktsmessig å benytte disse analysene til å overvåke en eventuell endring i renseeffekt. Dette forutsetter at laboratoriet mottar både permeat- og råvannsprøver fra vannverket. I tillegg må det spesifiseres ovenfor laboratoriet at de om nødvendig må tilpasse metodene sine slik at de kan levere nødvendig oppløsning på prøvesvarene. Mange analyselaboratorier rapporterer f.eks. fargetallet i permeat som  $< 5 \text{ mg/l}$ , hvilket gjør at analysesvaret ikke har praktisk nytteverdi i vannverkets driftsovervåking siden det ikke kan benyttes til å beregne renseeffekt.

I tillegg til analysene som utføres av akkreditert analyselaboratorium anbefales det at vannverkene selv utfører

supplerende analyser av råvann og permeat. Fargetall er da en velegnet parameter siden denne parameteren er svært enkel og lite tidkrevende å måle.

Det finnes også muligheter for in-line overvåking av vannkvalitetsparametere som f.eks. fargetall, turbiditet og UV254 ved bruk av egnede sensorer. Dette er forholdsvis kostbare innretninger, og er av den grunn antakelig ikke aktuelle for de minste anleggene. Fordelen med kontinuerlig overvåking av råvannparametere som fargetall og turbiditet er at en kan benytte dette som beslutningsunderlag for når en bør gjennom hensiktsmessige driftstiltak ved raske endringer i vannkvaliteten. Dette gjør at driftsoperatøren kan være føre var med tiltakene.

### 4.3.3. Journalføring av hendelser

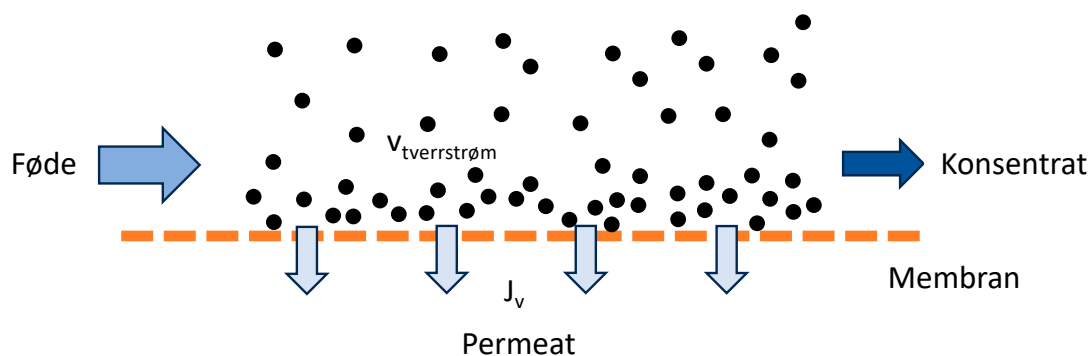
For å i ettertid kunne vurdere effekten av hendelser og driftstiltak er det viktig at driftsoperatøren fører en logg for anlegget. Ikke-kontrollerbare hendelser som kan påvirke driften av anlegget, slik som kraftige nedbørshendelser, snøsmelting, flom, og tidspunkt for vår og høstomrøring bør registreres på lik linje med driftsrelaterte tiltak som utførelse av hovedvask, endring i vaskeresepser for døgnskylling og hovedvask, utskifting/endebytting av membraner, designendringer i forbehandlingstrinn, etc.

## 4.4. Styringsparametere

Permeatfluks, strømningshastighet i konsentratkanalen, og gjenvinningsgrad av permeat er prosessvariabler som i vesentlig grad påvirker driftsbetingelsene til membranene. I denne veiledningen omtales disse som styringsparametere siden driftsoperatøren gjennom hensiktsmessig innstilling av disse parametere kan bidra til å styre mot god drift, dvs. optimalisere driftsbetingelsene til membranene.

### 4.4.1. Betydning av styringsparametere

Figur 4-3 illustrerer hvordan de aktuelle styringsparametere påvirker forholdene lokalt på membranoverflaten i en tverrstrøms-applikasjon. Merk at resirkulasjonsstrømmen som typisk inngår i NF-design for fargefjerning av overflatevann ikke er inntegnet på denne figuren.



Figur 4-3 Illustrasjon av strømningsmønsteret og belastningsforholdene på membranoverflaten i en tverrstrøms-applikasjon.

### Tverrstrømhastighet

Strømningshastigheten i konsentratkanalen  $v_{\text{konsentratkanal}}$  påvirker stoffbelastningen og konsentrasjonen på membranen. Økt tverrstrøm vil bidra til å holde membranoverflaten "ren" ved å redusere tykkelsen på den stagnante vannfilmen på membranoverflaten. I vannfilmen vil forurensinger som holdes tilbake av membranen oppkonsentreres på grunn av et fenomen som kalles konsentrasjonspolarisering, ref. kapittel 3.2.1. Redusert filmtykkelse vil dermed resultere i mindre oppkonsentrering av forurensinger på membranen og dermed bidra til å redusere stoffbelastningen på membranen. Økt strømningshastighet, både under ordinær drift og under membranvask, vil også kunne ha en hydraulisk spyleeffekt ved å "rive løst" belegg som allerede er avsatt på membranoverflaten.

### Vannfluks

Permeatfluksen eller vannfluksen  $J_v$  er den vannmengden som på grunn av den drivende trykkforskjellen presses gjennom membranen per kvadratmeter membran i løpet av en time. Når vann presses gjennom membranen vil mye av forurensingene i vannet holdes tilbake av membranen slik at disse vil oppkonsentreres ved membranoverflaten. Jo høyere fluksen er desto større vil konsentrasjonen av partikler og oppløste forbindelser på membranoverflaten bli, ref. diskusjon om konsentrasjonspolarisering i kapittel 3.2.1. Fluksen vil derfor direkte påvirke stoffbelastningen på membranen.

### Gjenvinningsgrad

Gjenvinningsgraden  $R_{\text{system}}$  påvirker konsentrasjonen av forurensinger i konsentratkanalen. Jo høyere gjenvinningsgrad, jo høyere vil konsentrasjonen av forurensinger i konsentratkanalen være.

#### 4.4.2. Beregning av styringsparametere

De ulike styringsparametere for NF-anlegg beregnes typisk med utgangspunkt i masse- og energi-balanser over hele membrantrinnet. En benytter med andre ord målinger av trykk og strømningsmengder inn og ut av membrantrinnet for å beregne "globale" styringsparametere. Med "global" så menes at den beregnede parameteren representerer en gjennomsnittsverdi for de ulike lokasjonene langs membranen i et trykkrør.

Dette delkapittelet viser hvordan en kan beregne globale driftsparametere som er nyttige for overvåking og drift av membranlegg. For praktiske driftsformål så vurderes globale parametere å være tilstrekkelig underlag for optimalisering av drift.

### Tverrstrømhastighet (v)

Den gjennomsnittlige strømningshastigheten  $v_{\text{konsentratkanal}}$  [m/s] i konsentratkanalen beregnes på følgende måte:

$$v_{\text{konsentratkanal}} = Q_{\text{tverrstrøm}} / (A_{\text{tverrsnitt}} \cdot 3600) \quad [\text{m/s}]$$

der  $Q_{\text{tverrstrøm}}$  er den gjennomsnittlige strømningsmengden i konsentratkanalen i m<sup>3</sup>/time, og  $A_{\text{tverrsnitt}}$  er det totale tverrsnittsarealet i m<sup>2</sup> til konsentratkanalene for samtlige membranrør i anlegget.  $Q_{\text{tverrstrøm}}$  beregnes slik:

$$Q_{\text{tverrstrøm}} = Q_{\text{råvann}} + Q_{\text{resirk}} - (Q_{\text{perm}}) / 2 \quad [\text{m}^3/\text{time}]$$

der  $Q_{\text{resirk}}$  er den delen av konsentratstrømmen ut fra membranen som resirkuleres til innløpet i m<sup>3</sup>/time, og  $Q_{\text{råvann}}$  er strømningsmengden av råvann inn på anlegget i m<sup>3</sup>/time.

### Vannfluks

Vannfluksen  $J_v$  [l/(m<sup>2</sup>·time)] beregnes på følgende måte:

$$J_v = Q_{\text{perm}} / A_{\text{membran}} \quad [\text{l}/(\text{m}^2 \cdot \text{time})]$$

$Q_{\text{perm}}$  er permeatproduksjonen i m<sup>3</sup>/time og  $A_{\text{membran}}$  er totalt effektivt membranareal i anlegget målt i m<sup>2</sup>.

### Gjenvinningsgrad

Gjenvinningsgrad  $G$  [%] beregnes på følgende måte:

$$G = Q_{\text{perm}} / Q_{\text{råvann}} \cdot 100\% \quad [\%]$$

$Q_{\text{råvann}}$  er mengden råvann som pumpes inn på membrantrinnet i m<sup>3</sup>/time, og  $Q_{\text{perm}}$  er permeatproduksjonen i m<sup>3</sup>/time.

#### 4.4.3. Justering av styringsparametere

### Tverrstrømhastighet

Sirkulasjonspumpen i et NF-anlegg kjører normalt på konstant turtall i henhold til valgt sett-punkt. Dersom driftsoperatøren for eksempel ønsker å øke tverrstrømhastigheten gjøres dette ved å øke sett-punktet. Dette vil medføre at turtallet på sirkulasjonspumpen vil øke slik at en oppnår ønsket sirkulasjonsmengde.

### Vannfluks

Den drivende kraften for vanntransporten gjennom membranen bestemmes av trykkdifferensen over membranen (TMP). Gjennomsnittlig TMP over et trykkrør bestemmes slik:

$$TMP = p_{\text{inn}} - (\Delta p_{\text{konsentratkanal}}) / 2 - p_{\text{perm}}$$

Trykkdifferanse over membranen er direkte avhengig av fødestrykket. Dersom fødestrykket økes vil det produseres mer vann, hvilket også innebærer at vannfluksen vil øke. Vanlig praksis er å drifte anlegg med konstant fluks i henhold til ønsket sett-punkt. Dette innebærer at trykket inn på membrantrinnet automatisk reguleres slik at ønsket permeatproduksjon oppnås. I praksis endrer da driftsoperatøren vannfluksen kun ved å endre sett-punkt for vannfluks i anlegget driftskontroll (SCADA).

Dersom anlegget ikke har automatisk styring av produksjonsmengde (fluks) så vil driftsoperatøren måtte regulere turtall på fødepumpe eller justere trykkregule-

ringsventil inn på anlegget, avhengig av om anlegget har tilgjengelig trykkehøyde fra vannkilde, eller ikke.

### Gjenvinningsgrad

Gjenvinningsgraden, altså hvor stor andel av råvannet inn på membrantrinnet som ender opp som permeat, bestemmes i prinsippet ved samtidig regulering av trykket inn på membranene, og strupingen på utløpet av konsentrat fra membrantrinnet. Normalt justeres inntrykket slik at konstant permeatproduksjon oppnås. For å opprettholde uendret gjenvinningsgrad når trykket inn på membranene endres, så vil trykkreguleringsventilen på konsentratutløpet måtte justeres. I de fleste vannverk er dette en manuell operasjon.

---

## 4.5. Ytelsesindikatorer (permeabilitet, trykkfall, renseeffekt)

De sentrale ytelsesindikatorerne som gir informasjon om tilstanden til membranene i et membranlegg, er:

- Permeabilitet
- Trykkfall over konsentratkanalen
- Renseeffekt for viktige vannkvalitetsparametere

Driftsoperatøren bør overvåke utviklingen av de aktuelle ytelsesindikatorerne, og sammenligne mot startverdiene da membranene var nye. Dette gir driftsoperatøren muligheten til å følge med på tilstanden til membranene i vannverket til enhver tid, og med det etablere et grunnlag for å vurdere hvorvidt hensiktsmessige tiltak bør igangsettes. Mulige driftstiltak for å motvirke nedgang i membranytelse vil typisk være å endre en eller flere av styringsparametere, dvs. enten vannfluks, tverrstrømhastighet, eller gjenvinningsgrad. Dette omtales nærmere i kapittel 4.4. Andre driftsmessige tiltak vil typisk være å iverksette membranvask, hvilket diskuteres i kapittel 4.6.

### 4.5.1. Betydning av ytelsesindikatorer

#### Permeabilitet

Med permeabilitet så mener vi vannpermeabilitet. Dette er en karakteristisk egenskap til membranen som beskriver den "innebygde" motstanden mot vanntransport gjennom den aktuelle membranen, dvs. hvor mye vann som kan presses gjennom en m<sup>2</sup> membran per time ved 1 bar trykk. Dannelsen av belegg på membranoverflaten resulterer i en ekstra transportmotstand, noe som vil påvirke den målte (observerte) permeabiliteten i et membranlegg. Den generelle trenden ved drift av et membranlegg vil derfor være at permeabiliteten avtar gradvis etter hvert som det dannes mer belegg på

membranene. Dette resulterer igjen i at driftstrykket må økes for å opprettholde produksjonen.

En må også være klar over at permeabiliteten er avhengig av vanntemperaturen. I praksis vil derfor driftsoperatøren kunne observere både at permeabiliteten avtar og øker som følge av temperaturendringer uten at dette trenger å være relatert til beleggdannelse. Mange vannverk har råvannskilder med betydelig sesongvariasjoner i vanntemperatur, og opplever eksempelvis at permeabiliteten avtar utover høsten som følge av kaldere vann. For å skille mellom temperatur- og beleggrelaterte endringer i permeabilitet er det nødvendig å normalisere driftsdataene. Dette omtales nedenfor i kapittel 4.5.3.

Driftsoperatøren må også være klar over at skade på membranen kan resultere i reduksjon i observert permeabilitet. Membranen kan skades fysisk av negativ TMP, dvs. at permatttrykket overstiger driftstrykket. Dette vil kunne resultere i at limfugene i membran-konvoluttene løsner og slik at membranintegriteten ødelegges. Hensiktsmessig design av anlegget gjør at det ikke skal være mulig å reversere trykkforskjellen over membranen. Det er blant annet svært viktig at det ikke installeres ventiler mellom membranrigg og rentvannstank(er) siden stenging av permeatutløpet vil kunne medføre akkumulering av trykk på permeatsiden dersom ventilen stenges på feil tidspunkt. Negativ TMP skal derfor i praksis ikke kunne inntreffe gitt korrekt anleggsdesign. Membranen kan også ta skade dersom den utsettes for høye temperaturer, høy pH eller høye konsentrasjoner av klor, i forbindelse med membranvask. Ulike membranprodukter har ulike grenseverdier

for nevnte parametere som må overholdes. Det er viktig at driften planlegges slik at, membranene ikke utsettes for ugunstige driftsbetingelser. En bør være oppmerksom på at skade på membranen normalt vil resultere i umiddelbar nedgang i renseeffekt.

Optimalisering av styringsparametere vil ha som mål å bedre driftsbetingelsene til membranen for å redusere beleggdannelse og opprettholde mest mulig stabil permeabilitet. Både døgnskylning og hovedvask har som mål å fjerne belegg på membranen. Driftsoperatøren kan vurdere hvor god effekten av membranvask har vært ved å sammenligne den normaliserte permeabiliteten før og etter vask.

### Trykkfall

Med trykkfall menes friksjonstapet knyttet til vanntransporten i konsentratkanalen fra innløpet til utløpet av et trykkør. Belegg på membranoverflaten vil påvirke trykkfallet ved at tykkere belegg resulterer i redusert høyde i strømningskanalen. Men også såkalt spacerfouling, dvs. partikler som avsettes i selve strømningskanalen, vil påvirke trykkfallet fra innløp til utløp i betydelig grad. Det er særlig litt større partikler (5-50  $\mu\text{m}$ ) som slipper gjennom forfilteret som bidrar til økt trykkfall. Generelt så vil råvann med høyt partikkelinnhold i nevnte partikkelstørrelsesområde kunne resultere i rask økning i trykkfall dersom ikke forbehandlingen fjerner større partikler effektivt.

Resultatet av økt trykkfall er todelt. For det første vil driftstrykket måtte økes for å opprettholde produksjonen. I tillegg påvirker økt trykkfall profilet for det drivende trykket for vanntransport (TMP) gjennom trykkørret. Økt trykkfall resulterer i at første membran vil produsere forholdsvis mer vann og siste membran tilsvarende mindre. Dette gir en brattere fluksprofil, hvilket er ugunstig med tanke på beleggdannelse og permeabilitetsnedgang.

Trykkfallet er avhengig av både temperatur og strømningsmengde. Økt temperatur bidrar til å redusere viskositeten til vann slik at friksjonstapet og også trykkfallet over trykkørret blir mindre. Tilsvarende vil økt strømningsmengde medføre økt trykkfall. Strømningsmengden påvirker friksjonstapet i enda større grad enn temperaturen. Dette innebærer at dersom driftsoperatøren skal kunne vurdere hvorvidt trykktapet på grunn av beleggdannelse og spacerfouling faktisk har endret seg, eller om det er et resultat av enten temperatur eller strømningsmengde (eller en kombinasjon), må trykkfallsdataene normaliseres. Normalisering av trykkfall og permeabilitet er omtalt i kapittel 4.5.3.

Døgnskylling og hovedvask vil også ha som formål å redusere membranbelegg og spacerfouling og dermed bidra til å redusere trykkfallet. Effekten av hovedvask kan vurderes ved å ved å sammenligne det normaliserte trykkfallet før og etter vask. Det er normalt vanskelig å observere effekten av en enkelt døgnskylning. Forskjellen mellom effektiv og mindre effektiv resept for døgnskylning vil imidlertid kunne observeres over tid.

### Renseeffekt

Renseeffekten av en gitt forurensningsparameter angir hvor mye konsentrasjonen reduseres fra råvann til permeat. For driftsoperatøren er det nyttig å følge med på renseeffekten av en eller flere forurensinger. Ved å overvåke utviklingen av målt renseeffekt og sammenligne med målt renseeffekt når membranen var nye vil en kunne avdekke hvorvidt det er endringer i renseeffekt. Vesentlige endringer kan indikere at membranene renses dårligere, hvilket også kan bety at den hygieniske barrieren er svekket. Stabil renseeffekt over tid indikerer at separasjonsegenskapene til membranen er intakte. Driftsoperatøren må være klar over at variasjoner i råvannskvalitet påvirker observert renseeffekt.

#### 4.5.2. Beregning av ytelsesindikatorer

Tilsvarende som for styringsparametere kan en ved hjelp av masse og energibalanser over hele membrantrinnet beregne globale ytelsesindikatorer som representerer gjennomsnittsverdier for membrantrinnet sett under ett.

### Trykkfall ( $\Delta p$ )

Trykkfallet  $\Delta p_{\text{konsentratkanal}}$  er knyttet til friksjonstapet langs konsentratkanalen og tilsvarer differansen i trykket mellom innløpet og utløpet fra membrantrinnet.

$\Delta p_{\text{konsentratkanal}}$  beregnes slik:

$$\Delta p_{\text{konsentratkanal}} = p_{\text{inn}} - p_{\text{ut}} \quad [\text{bar}]$$

hvor  $p_{\text{inn}}$  er innløpstrykket til membrantrinnet i bar, og  $p_{\text{ut}}$  er utløpstrykket fra membrantrinnet i bar.

### Permeabilitet (P)

Den observerte permeabiliteten beregnes på følgende måte:

$$P = J_{\text{vann}} / TMP \quad [l / (m^2 \cdot \text{time} \cdot \text{bar})]$$

hvor  $J_v$  er vannfluksen i  $l / (m^2 \cdot \text{time})$ , og  $TMP$  [bar] er den drivende kraften for vanntransporten gjennom en membran, og tilsvarer midlere trykkforskjellen mellom fødesiden og permeatsiden av membranen.

TMP beregnes som beskrevet i kapittel 3.3.2:

$$TMP = p_{inn} - (\Delta p_{konsentratkanal})/2 - p_{perm} \quad [\text{bar}]$$

hvor  $p_{inn}$  er innløpstrykket til membrantrinnet i bar, og  $p_{perm}$  er trykket på permeatsiden av membranen i bar.  $\Delta p_{konsentratkanal}$  er trykkforskjellen mellom innløp og utløp fra membranen i bar.

#### Viktig - for korrekt beregning av differansetrykk

Når målte prosessstrykk benyttes for å beregne differansetrykk, eksempelvis TMP eller trykkfall over konsentratkanalen, så må en korrigere målt trykk for eventuelle høydeforskjeller i plasseringen av trykkmålere for at beregningen skal bli nøyaktig. For å sikre at beregningen av differansetrykk skal bli korrekt kan det være hensiktsmessig å regne om målte prosessstrykk til en gitt referansehøyde, f.eks. gulvnivå.

#### Renseeffekt

Renseeffekten til membranen beregnes slik:

$$R_{membran} = \frac{c_f - c_p}{c_f} 100\%$$

Hvor  $c_f$  er konsentrasjonen av en gitt vannkvalitetsparameter i kombinert fødevann (råvann og konsentratstrøm) inn på membrantrinnet, og  $c_p$  er konsentrasjonen i permeatet (renset vann).

Dersom en benytter konsentrasjonen av råvann ( $c_r$ ) i stedet for  $c_p$ , så kan en i stedet beregne renseeffekten til hele membrantrinnet:

$$R_{system} = \frac{c_r - c_p}{c_r} 100\%$$

#### 4.5.3. Normalisering av ytelsesindikatorer

Både permeabilitet og trykkfallet over konsentratkanalen er avhengige av temperatur. Trykkfallet er i tillegg avhengig av strømningshastigheten i konsentratkanalen. For å kunne sammenligne driftsparametere som er avhengige av temperatur og strømningshastighet må dataene normaliseres. Normalisering innebærer å regne om fra målinger foretatt ved aktuell driftstemperatur (og eventuelt strømningshastighet) til valgte referansebetingelser. En velger ofte referansebetingelser som er innenfor typiske driftsbetingelser for det aktuelle anlegget.

#### Viktig - Normalisering av ytelsesindikatorer

For at ytelsesindikatorer som benyttes for å vurdere tilstanden til membrantrinnet skal kunne brukes i praksis må driftsoperatøren normalisere dataene. Dette innebærer at målte verdier på et gitt tidspunkt regnes om til en valgt referansebetingelse slik at alle målinger blir direkte sammenlignbare. Normalisering gjør dermed at driftsoperatøren vil ha mulighet til å vurdere om den observerte endringen i ytelsesindikatoren kun skyldes endringer i driftsbetingelser, eller om det skyldes skade på membranen (inntreffer sjeldent) eller om det skyldes beleggdannelse på membranen.

#### Normalisert permeabilitet

Generelt for membranprosesser så påvirkes permeabiliteten av både endringer i temperatur og endringer i netto effektivt trykk over membranen. Netto effektivt trykk kan beregnes som  $TMP - \Delta\pi$ , der  $\Delta\pi$  tilsvarer den osmotiske trykkforskjellen over membranen. Som diskutert i kapittel 3.3 vil det osmotiske trykket i typisk råvann for norske vannverk være meget lavt. En vil derfor kunne utelate det osmotiske bidraget uten å introdusere vesentlige feil. Dette innebærer at det for NF-anlegg for fargefjerning fra innsjøer og elver vil være tilstrekkelig å normalisere målt permeabilitet med hensyn på temperatur. Effekten som temperaturen har på permeabiliteten, er knyttet til temperaturavhengigheten til vannpermeabilitetskonstanten til membranen. Selv om denne konstanten er membranspesifikk, og varierer fra membran til membran, er det lite variasjon i temperaturavhengigheten til konstanten for ulike membraner som er aktuelle for vannverk med nanofiltrering.

Standarden ASTM D 4516 beskriver normalisering av driftsparametere for omvendt osmose-membraner. Beregningsmetodikken har gyldighet også for NF-membraner. I henhold til ASTM D 4516 kan normalisert permeabilitet beregnes som følger

$$P_{normalisert} = P_{målt} \cdot \frac{TF_{referanse}}{TF_i}$$

hvor  $TF_{referanse}$  er beregnet temperaturkorreksjonsfaktor ved referansetemperatur og  $TF_i$  er temperaturkorreksjonsfaktor tilsvarende temperaturen ved en gitt måling  $i$ . Temperaturkorreksjonsfaktoren som benyttes for NF-membraner kan bestemmes slik

$$TF_i = e^{\left(K \cdot \left(\frac{1}{298}\right)^{-\left(\frac{1}{273+temp_i}\right)}\right)}$$

hvor  $K$  er en membranspesifikk konstant som kan bestemmes eksperimentelt. Typisk benyttes  $K = 2700$  for NF-membraner (ASTM D4516-19a;2019). Mindre variasjoner i  $K$  mellom ulike membranprodukter er av liten betydning.  $temp_i$  er den aktuelle temperaturen i fødevannet for måling nr.  $i$  målt i Kelvin. Den membranspesifikke konstanten  $K$ , kan ved behov bestemmes eksperimentelt for aktuell membran ved å utføre relevante forsøk i lab.

### Normalisert trykkfall i konsentratkanal

Ved normalisering av trykkfall over membranen må en korrigere for effekter knyttet til endringer i både strømningshastighet og temperatur. Temperatureffekten er knyttet til endringen i viskositet. ASTM D 4516 beskriver ikke normalisering av trykkfall. Det er publisert en del normaliseringsuttrykk for trykkfall som ikke inkluderer temperatur. Siden temperatureffekten på trykkfall er betydelig, så blir slike normaliseringsuttrykk lite egnet for anlegg der det er store sesongvariasjoner i temperaturen i vannkilden.

Følgende uttrykk for temperaturnormalisering av trykkfall for NF-membraner inkluderer korreksjon både for endringer i temperatur og strømningshastighet (Hiemstra mfl., 1999).

$$\Delta p_{\text{konsentrat,normalisert}} = \Delta p_{\text{konsentrat,målt}} \cdot \left(\frac{Q_{\text{ref}}}{Q_{\text{målt}}}\right)^{1,6} \left(1,03^{(t_{\text{målt}}-t_{\text{ref}})}\right)^{0,4}$$

Der  $Q_{\text{ref}}$  er midlere strømningsmengde i konsentratkanal ved referansebetingelser,  $Q_{\text{målt}}$  er målt midlere strømningsmengde i konsentratkanalen på aktuelt tidspunkt.  $t_{\text{målt}}$  og  $t_{\text{ref}}$  er henholdsvis målt temperatur og temperatur ved referansebetingelser oppgitt som °C.

Det anbefales å benytte dette uttrykket for trykkfalls-korreksjon som utgangspunkt. Men en må være oppmerksom på at en kan kalibrere modellen for aktuelt membranprodukt. Siden hastighetsleddet relativt sett vil ha størst betydning innenfor normale variasjonsområder for sirkulasjon og vanntemperatur så vil det være viktigst å ta opp målinger av trykkfall ved ulike sirkulasjonsmengder for å bestemme eksponenten på hastighetsleddet. Dette må i tilfelle gjøres når membranen er ny slik at kalibreringen ikke påvirkes av beleggdannelse.

## 4.6. Membranvask

På grunn av stoffbelastningen som membranene utsettes for vil det over tid dannes et belegg av forurenser på membranoverflaten. I kapittel 4.2 diskuteres ulike faktorer som påvirker beleggdannelse. Membranvask er et vedlikeholdstiltak der membranene eksponeres for en vaskeløsning der hensikten er at kjemikalier i vaskeløsningen skal bidra til å løse opp belegg som er avsatt på membranen. I tillegg skal sirkulasjonen gi en hydraulisk spyleeffekt for å bidra til at oppløst belegg transporteres ut av membranelementene. I vannverk med NF-prosess benyttes både døgnskylling og utvidet membranvask.

### 4.6.1. Døgnskylling

Døgnskylling utføres typisk med en svakt basisk vaskeløsning som består av anioniske tensider (såpe) og kan også inneholde klor. Prosessen styres automatisk og starter med at en tar ned produksjonstrykket og stenger innløpet av råvann. Deretter pumpes vaskeløsning fra en blandetank og inn på sirkulasjonssløyfen. Sirkulasjonspumpen sørger for sirkulasjon og innblanding av vaskemiddel. Typisk benyttes vekselvis sirkulasjon, gjerne med høyere sirkulasjonshastighet enn under normal produksjon, og eksponering av vaskeløsning uten sirkulasjon. Etter samlet virketid på om lag en time

med og uten sirkulasjon så pumpes vaskeløsningen til avløp. Samtidig åpnes det for råvannstilførsel som gradvis fortrenger vaskeløsningen. Etter noen minutter med råvannstilførsel økes fødetrykket gradvis til normalt produksjonsnivå. De første minuttene med permeatproduksjon etter vask sendes også til avløp, før permeat igjen produseres til rentvannstank.

Vaskemiddelet produseres satsvis direkte i blandetanken ved å tilsette såpe (typisk pulverform) og eventuelt klor (vanligvis i form av natriumhypokloritt). Klorløsning og vaskemiddel kan blandes eller produseres i separate tanker. Deretter fylles ønsket volum med vann (normalt benyttes permeat). Det benyttes mekanisk omrøring for å sikre at såpepulveret løser seg opp.

### 4.6.2. Hovedvask

Utvidet membranvask, ofte omtalt som hovedvask, har vesentlig lengre varighet (typisk 10-12 timer), og det benyttes både høyere konsentrasjoner og andre typer vaskekjemikalier. I tillegg til høyere konsentrasjon av såpe så tilsettes også andre virkestoffer som kompleksbindere (EDTA, citrat), syrer, men også lut for å heve pH, samt høyere konsentrasjoner av klor, blant annet for å oksidere (spalte) organiske forbindelser og bidra med

desinfiserende effekt. Hvor effektivt utvidet membranvask vil bidra til å fjerne belegg er blant annet avhengig av temperaturen, hvor økt temperatur vil være positivt. For å øke temperaturen (typisk til ca. 35 °C) benyttes enten varmeelement, eller en utnytter varmeproduksjonen knyttet til friksjonstapet i sirkulasjonspumpen. Utvidet membranvask utføres langt sjeldnere enn døgnvask, typisk en til et fåtall ganger per år.

#### 4.6.3. Kompatibilitet membran/vaskeløsning

I norske vannverk med NF-prosess er det i hovedsak to membranmaterialer som benyttes, henholdsvis celluloseacetat og sulfonert polyetersulfon. Disse to membranmaterialene har svært forskjellige egenskaper med tanke på toleranse for ulike vaskekjemikalier. Membranprodusentene oppgir gjerne grenseverdier for temperatur, pH og konsentrasjon av klor som ikke må overskrides for at produktgarantien skal gjelde. Det er svært viktig at vannverkens vaskeprotokoller og bruk av vaskekjemikalier er kompatible med membranen de benytter, samt at driftsbetingelsene for øvrig ikke er utenfor anbefalte grenseverdier.

I Tabell 4-1 gjengis informasjon om grenseverdier for de to membranproduktene som er mest benyttet i vannverk i Norge i dag.

**Tabell 4-1.** Grenseverdier for driftsbetingelser for to utvalgte membranprodukter som benyttes i utstrakt grad i norske vannverk i dag.

Membranprodukt	Tricep SBNF	Hydracore 10/50
Maksimum driftstemperatur	32° C	45° C
Maksimal kontinuerlig klordose	0,5 mg/l	10 mg/l
Maksimum klordose under membranvask	1,0 mg/l	100 mg/l
pH range (kontinuerlig drift)	2,0 - 7,5	2-11
pH range (vask med temperatur < 35 °C)	-	1-12

Dersom en opererer med driftsbetingelser utenfor disse grenseverdiene vil membranen kunne ta skade. Typisk vil tilbakeholdelsen av visse forurensinger bli dårligere fordi separasjonssjiktet på membranen gradvis løses opp. Samtidig vil permeabiliteten øke. Dersom membranen har tatt skade på grunn av at de har blitt utsatt for betingelser de ikke tåler kan resultatet kunne være at alle membranene må byttes ut.

Vær imidlertid oppmerksom på at enkelte anleggsleverandører har opparbeidet erfaringsgrunnlag over flere

tiår med drift av NF-anlegg som tilsier at det kan doseres betydelig høyere konsentrasjoner av klor enn det anbefalingen for CA-membraner tilsier. Årsaken til at denne praksisen ser ut til å fungere er ikke nødvendigvis knyttet til at membranprodusentens garantigrenser er "feil". Forklaringen er antakelig mer relatert til praktiske forhold. Vanlig praksis er at vaskeløsning for døgnskylling tilsettes konsentratet som sirkuleres i membrantrinnet, dvs. at konsentrat ikke erstattes av permeat før oppstart av døgnskylling. Klor vil dermed reagere med NOM i konsentratet, noe som vil redusere den effektive klorkonsentrasjonen i vaskeløsningen. Hvor mye konsentrasjonen reduseres vil avhenge av konsentrasjonen av NOM i konsentratet. Et annet forhold som antakelig har betydning er at NOM-belegget som dannes på membranoverflaten beskytter selve membranen mot direkte eksponering for vaskeløsningen, noe som nok medfører at en kan benytte høyere klordoser enn de anbefalte grenseverdiene fra membranprodusenten. En må imidlertid være klar over at ved slik praksis så vil ikke nødvendigvis membranprodusentens garantier gjelde lengre.

#### 4.6.4. Faktorer som påvirker effekten av membranvask

Effekten av vasketiltak påvirkes av en rekke faktorer inklusive:

- Hyppighet (tiden mellom to membranvasker)
- Varighet på vasken (samlet eksponeringstid)
- Tverrstrømhastighet ved sirkulasjon av vaskeløsning
- Eksponeringstid uten sirkulasjon
- Type vaskekjemikalier og konsentrasjon av disse
- Temperatur på vaskeløsning
- pH og ionestyrke

Generelt vil hyppigere og lengere vask virke positivt på å fjerne belegg og gjenvinne membranytelse. Den hydrauliske effekten ved å øke strømningshastigheten over membranen (hvert fall i perioder) vil også være positivt. Det samme vil høyere temperatur, men operatøren må passe på at maksimumstemperaturen som membranprodusenten har oppgitt ikke blir overskredet. Når det gjelder vaskekjemikalier, konsentrasjoner og pH, så vil optimalt valg avhenge av karakteristikken på belegget. Også her er det viktig å påse at vaskeløsningen og de konsentrasjoner og pH som benyttes er kompatible med membranen som benyttes.

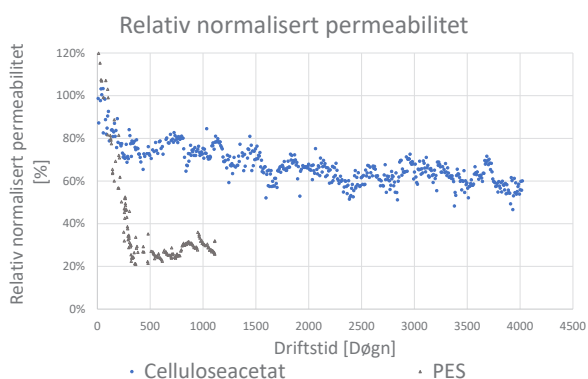
#### 4.6.5. Kriterier for hovedvask

Hvor raskt ytelsen til membranene i et vannverk avtar under ordinær drift er avhengig av en rekke forhold knyttet til råvannskvalitet, design og drift av membran-

anlegget, ref. kapittel 4.2. Erfaringer viser at det er viktig å sette inn tiltak i form av hovedvask før ytelsen reduseres for mye. Årsaken er at belegget på membranene blir vanskeligere å fjerne både jo eldre det er og jo mer belegg som dannes. Membranprodusenter anbefaler typisk følgende kriterier for å iverksette hovedvask (MicrodynNadir, 2020; Nitto Group Company, 2020):

- Reduksjon i normalisert permeabilitet på 10-15%
- Økning i normalisert trykkfall på 10-15%

Overnevnte anbefaling er forholdsvis "grov", og det er ikke nødvendigvis hensiktsmessig å følge anbefalingen i den første driftsperioden etter at det er satt inn nye membraner. I løpet av de første 6-12 månedene med drift med nye membraner så vil en typisk oppleve et raskt fall i permeabilitet. Figur 44 viser eksempel på utvikling av normalisert permeabilitet som funksjon av driftstid for to vannverk med NF-prosess med forskjellig type membran, henholdsvis celluloseacetat og sulfonert polyetersulfon (PES).



**Figur 4-4.** Utvikling av normalisert permeabilitet (25 °C) for to norske vannverk med membraner av henholdsvis celluloseacetat (CA) og sulfonert polyetersulfon (PES). 100% tilsvarer produsentens oppgitte permeabilitet for ny membran ved 25 °C (Kilde: SINTEF).

Dette innledende fallet i permeabilitet er i stor grad knyttet til adsorpsjon av organisk materiale på membranoverflaten og er for praktiske formål ikke mulig å gardere seg mot. Dersom en forsøker å fjerne adsorbent belegg med hyppige vasketiltak vil en etter vask oppleve at NOM igjen adsorberes på membranoverflaten.

Etter en innledende periode med raskt permeabilitetsfall knyttet til adsorpsjon av NOM vil trenden etter hvert flate ut. Hvor lang tid dette tar er avhengig av konsentrasjonen av organisk materiale i råvannskilden. Jo mer organisk materiale i råvannet jo raskere vil en nå en tilnærmet "platåfase" og visa versa. Ved å sørge for

effektiv døgnskylling og hovedvask tilpasset aktuell membran og råvannskvalitet kan vannverket klare å opprettholde stabil permeabilitet over lang tid. En ser også at den forventede nedgangen i permeabilitet før en når platåfasen er større for membraner av PES enn for membraner av celluloseacetat. Tilsvarende trender er observert for flere andre norske vannverk.

Flertallet av norske vannverk med NF-prosess ser ut til å utføre intervallbasert hovedvask, ofte en gang per år. For enkelte vannverk kan dette fungere godt, men det beror på belastningen som membranen i det enkelte vannverk utsettes for. Generelt vil anlegg med "dårlig" råvannskvalitet måtte påregnes å vaskes hyppigere enn anlegg med "god" råvannskvalitet. Generelt anbefales det å etablere en mer behovsstyrt strategi for hovedvask.

Følgende anbefalinger kan gis for vannverk med PES-membraner:

- Bortsett fra den første driftsperiode med rask reduksjon i normalisert permeabilitet bør hovedvask utføres innen trykkfallet øker mer enn 10-15% fra forrige vask, eller dersom permeabiliteten avtar med mer enn 10-15%.
- I den første driftsperioden inntil et år etter oppstart med nye membraner kan en tillate større endring i normaliserte ytelsesindikator enn skissert i foregående punkt, men endringen bør ikke overstige 30% før hovedvask igangsettes.

Følgende anbefalinger kan gis for vannverk med CA-membraner:

- Hovedvask utføres senest innen trykkfallet øker mer enn 10-15% fra forrige vask, eller dersom permeabiliteten avtar med mer enn 10-15%.

Generelle anbefalinger uavhengig av membrantype:

- Generelt bør en benytte høy temperatur (35 °C) og lang virketid under hovedvask.
- Det anbefales at vannverket planlegger gjennomføring av hovedvask slik at en i størst mulig grad unngår nedetid for vask i perioder der en vet at en vil være presset på produksjonskapasitet. Men dersom membrantilstanden tilsier at en bør utføre hovedvask i en periode med høyt vannbehov der en ikke kan tillate nedetid på 12-15 timer, så vil det allikevel være effektivt av å utføre hovedvask selv om virketiden må være kortere for å opprettholde forsyningssikkerheten.

---

## 4.7. Driftsstrategi

### 4.7.1. Produksjonsnivåer

Vannverket skal sørge for å produsere tilstrekkelig med vann til å dekke abonnementenes behov til enhver tid. Kapasiteten på rentvannstanken(e) ved vannverket og evt. i høydebassenger på distribusjonsnettet utgjør bufferkapasiteten med tilgjengelig drikkevann. Driften av vannverket vil typisk ha som mål å opprettholde et tilstrekkelig buffernivå i rentvannstanker og høydebassenger slik at forsyning fra reservkilde eller nødvannforsyning vil være på plass tidsnok dersom vannverket eller hovedkilden av ulike grunner settes ut av drift.

Vannverk med NF-prosess har en driftsfilosofi basert på "konstant-fluks-prinsippet", dvs. at membrananlegget alltid produserer samme vannmengde i henhold til valgt sett-punkt for vannfluks, uavhengig av øvrige driftsbetingelser. Siden vannforbruket hos abonnentene varierer med tidspunkt på døgnet er det viktig at anlegget har tilstrekkelig bufferkapasitet til å håndtere svingningene i vannforbruket over et døgn uten at membrananlegget justerer produksjonen opp og ned i henhold til dette.

Derom døgnforbruket var identisk hver dag hele året ville et NF-anlegg i teorien kunne driftes over tid uten å endre innstillinger av sett-punkt for vannfluks. Imidlertid vil det i realiteten kunne være både betydelige ukevariasjoner og sesongvariasjoner i vannbehovet til abonnentene, noe som innebærer at det vil være behov for å endre produksjonen i takt med behovet. I perioder med redusert vannforbruk må en sikre at det ikke produseres for mye vann, slik at rentvann går i overløp. I perioder med høyt forbruk må en sikre at det produseres tilstrekkelig med vann slik at forsyningssikkerheten ikke kompromitteres.

En utbredt praksis blant vannverk med NF-prosess er å løse overnevnte reguleringsutfordring ved å benytte to eller tre ulike produksjonsnivåer. Eksempelvis kan anlegget stilles inn for "høy produksjon" om nivået i rentvannstankene er under en nedre definert grense og "lav produksjon" når nivået er over en gitt øvre grense. På denne måten driftes anlegget med tilnærmet "konstant-fluks-filosofi", men det veksles mellom ulike sett-punkt for å tilpasse produksjonen til behovet.

Reguleringsmessig er en slik driftsstrategi med to eller tre driftsnivåer velegnet. Fra et driftsperspektiv der en vektlegger best mulig driftsbetingelser for membranene så er det ønskelig å ha kun ett produksjonsnivå, med driftsfluks som er så lavt som mulig, uten at dette går på bekostning av forsyningssikkerheten. Årsaken er at

belastningen av membranene vil øke progressivt med økende fluks. Det betyr at en vil "tape" mer på å drifte med en fluks høyere enn det som tilsvarer gjennomsnittsbehovet enn det det en "vinner" ved å drifte med en fluks lavere enn gjennomsnittsnivået.

Følgende strategi anbefales derfor for å unngå å belaste membranene mer enn nødvendig:

- Det bør tilstrebes at normalt produksjonsnivå settes så lavt som mulig. Dette innebærer for eksempel at det vil være gunstigere for membranen å driftes med konstant fluks på 12,5 (l/m<sup>2</sup>·h) sammenlignet med å drifte halvparten av tiden med 10 (l/m<sup>2</sup>·h) og halvparten av tiden med 15 (l/m<sup>2</sup>·h). Dette vil redusere toppbelastningen på membranene og bidra til bedre driftsbetingelser for membranene.
  - I praksis så kan driftsoperatøren ta utgangspunkt i at sett-punkt (vannfluks) for normalt produksjonsnivå skal settes så lavt at driftstiden med lavt produksjonsnivå blir så liten som mulig. En driftstid på 1-2 timer per døgn ved lavt produksjonsnivå vurderes hensiktsmessig.
  - Sett-punkt for lavt produksjonsnivå settes så høyt som mulig, men ikke så høyt at det blir vanskelig å regulere vannnivået i rentvannstank(er) innenfor ønsket nivå.
  - Driftsoperatøren må sikre at fyllingsgraden i rentvannstank(er) tilfredsstiller vannverkets interne krav til forsyningssikkerhet.
- Dersom det er periodiske/sesongmessige variasjoner i vannbehovet så anbefales det å gjøre en sesongmessig tilpasning av sett-punkter som ivaretar abonnentens vannbehov.
- Dersom vannverket benytter tre produksjonsnivåer, gir dette muligheten til å ha et høyt produksjonsnivå i tillegg til normalt og lavt nivå. Høyt produksjonsnivå ønsker en å unngå å benytte. Imidlertid gir dette en ekstra sikkerhet dersom vannforbruket øker raskt slik at produksjonene ved normalt nivå ikke blir tilstrekkelig til å dekke behovet.

### 4.7.2. Tiltak i perioder med redusert råvannskvalitet

Konsentrasjonen av forurensinger i råvannskilden er svært avgjørende for beleggdannelsespotensialet til membranene i vannverk med NF-prosess. Generelt så ønsker en at vannkilden har lave konsentrasjoner av både partikulært og oppløst materiale. Det er også ønskelig å ha en kilde med relativt stabil vannkvalitet over tid. Mange råvannskilder har forholdsvis uendret vannkvalitet over året, mens andre kilder er mer utsatt

for årstidsvariasjoner. Både størrelse på kilde, hvor dyp den er, og dybde på vanninntaket til vannverket kan ha betydning for hvor mye endringer en kan forvente i vannkvaliteten over året. Også jordsmonn og aktivitet i nedbørsfeltet vil påvirke i hvilken grad vannkvaliteten i kilden varierer over året.

I forhold til variasjoner i vannkvaliteten i kilden bør driftsoperatører være spesielt oppmerksomme ved større nedbørshendelser og flom, samt ved omrøring av kilden (årssirkulasjon). Begge deler kan medføre forverret vannkvalitet inn på anlegget. Kraftig regnvær og flom kan resultere forringet vannkvalitet på grunn av økt tilførsel av NOM fra nedbørsfelt og økt tilførsel av kolloidalt og partikulært materiale fra elver/bekker. Omrøring av kilden medfører at overflatevann, som ofte er av dårligere kvalitet med mer partikler og mikroorganismer, blir blandet med øvrige vannmasser. Dette kan påvirke kvaliteten ved inntakspunktet til vannverket. Omrøring av vannmassene i en innsjø skjer to ganger per år (vår og høst) og er styrt av temperaturrendringer og resulterende endringer i egenveksten til vannet.

Vannverket bør ha kunnskap om hvordan vannkvaliteten i kilden påvirkes av nedbørshendelser/flom og årssirkulasjon. Derneft bør vannverket etablere en strategi hvordan de skal håndtere perioder med vesentlig forverret råvannskvalitet. Hvilke tiltak som er hensiktsmessig, vil variere fra vannverk til vannverk avhengig av hvor mye råvannskvaliteten påvirkes. Likevel kan det gis noen generelle anbefalinger.

- Skaff kunnskap om hvordan kvaliteten på råvannet endres ved flom/nedbørshendelser og våromrøring/høstomrøring. Ha spesielt fokus på konsentrasjonen av partikler i ulike størrelsesområder.
- Ved redusert vannkvalitet er den mest effektive strategien å redusere vannfluksen. I den grad det er mulig så bør vannverket øke nivå i rentvanntanker/høydebassenger i forkant av forventede hendelser som reduserer råvannskvaliteten. Dette gir rom for å redusere produksjonen i en begrenset periode med redusert råvannskvalitet.
- Dersom konsentrasjonen av partikler/forurensinger øker betydelig ved nevnte hendelser bør vannverket vurdere å installere egent sensor for å overvåke kvaliteten på vannet som tas inn til anlegget. Dette gir bedre mulighet for å iverksette tiltak raskt nok.
- Dersom vannverket kan forsynes av flere kilder, kan det være aktuelt å bytte kilde. Dette forutsetter selvsagt at vannverket faktisk har en alternativ kilde, og at den alternative vannkilden på det aktuelle tids-

punktet har bedre råvannskvalitet enn den ordinære kilden.

- Driftsoperatøren bør følge ekstra nøye med på utviklingen av ytelsesindikatorer i forbindelse med hendelser som forringer råvannskvaliteten. Dersom permeabiliteten reduseres, eller trykkfallet øker vesentlig som følge av f.eks. omrøring eller nedbørshendelse, bør det iverksettes hovedvask. Se anbefalinger om vaskestrategi under kapittel 4.6.5.
- Driftsoperatøren kan også vurdere å øke varighet (eller hyppighet) av døgnskyllingen i perioder med forverret vannkvalitet.

#### 4.7.3. Biofilmdannelse og konservering av membran ved driftsstans

Bakterier som tilføres med råvannet kan som nevnt danne biofilm på membranoverflaten. Kontroll av biofilmdannelse ved bruk av desinfeksjonsmiddel er normalt et nødvendig driftstiltak ved membranfiltrering av overflatevann. Dersom bakterier får gode vekstbetingelser kan de i siste instans "spise" hull på membranen, hvilket resulterer i nedsatt renseeffekt og i verstefall kan det gå ut over barriereeffekten til membranen. En slik situasjon kan inntreffe ved lengre tids drift uten noen desinfeksjon, men vil kunne skje mye raskere dersom produksjonen i anlegget stenges ned i perioder. Kortere driftsstans som avlaster belastningen på membranen er i utgangspunktet vurdert å være gunstig for å redusere beleggdannelse på membranen, men nedetiden bør ikke vare mer enn noen få timer. Tverrstrømmen hindrer bakteriene i å etablere seg på fødesiden av membranen under ordinær drift. I motsatt fall vil mangel på tverrstrøm når anlegget stenges ned kunne bidra til at vekstbetingelsene for bakterier blir svært gode. Økt temperatur når forsyning av kjølig råvann uteblir vil ytterligere bidra til dette.

Dersom anlegget av ulike grunner skal tas ut av produksjon for en periode er det viktig å konservere membranen. Normalt gjøres dette ved å introdusere en løsning bestående av 1% natriumhydrogensulfitt (Nitro Group Company, 2020). Denne løsningen vil ha en bakteriehemmende effekt, uten at det kan forårsake oksidasjonsskader på membranen, og vil bidra til at membranene unngår skade fra biofilmdannelse når anlegget er nedstengt. Dersom anlegget er nedstengt i flere uker bør konserveringsløsningene skiftes ut på jevnlig basis etter dialog med anleggsleverandør.

Ved igangkjøring etter konservering må membranene skylles (gjennomstrømning av råvann uten produksjon) i minimum 30 minutter eller til konsentrasjonen av natriumhydrogensulfitt i renvannet ikke er målbar.

#### 4.7.4. Strategi for utskifting av membraner

Ytelsen til membranene vil reduseres over tid som følge av beleggdannelse, men som nevnt er det betydelig variasjon fra vannverk til vannverk hvor mye og hvor raskt ytelsen til membranene reduseres. Enkelte vannverk kan erfare at ytelsen til membranene blir redusert såpass mye at det er vanskelig for vannverket å opprettholde nødvendig produksjon for å dekke abonnentenes behov. Når andre tiltak for å forsøke å gjenvinne ytelse ikke har tilstrekkelig effekt så er siste utvei å bytte membranene for å sikre forsyningssikkerheten til abonnentene. Hvorvidt, og eventuelt når, en slik situasjon inntreffer er avhengig av en rekke forhold knyttet til design og drift av anlegget, og vi skal ikke gå inn på disse her. En del vannverk opplever ingen utfordringer knyttet til forsyningskapasiteten og foretar utskifting av membraner etter at de har vært i bruk i 10-12 år.

Når et vannverk har besluttet utbytting av membraner har det vært vanlig å bytte ut alle membranene samtidig, med unntak av vannverk som har flere separate rigger, der det har vært vanlig å bytte ut alle membranene i samme rigg. Hvorvidt dette er en hensiktsmessig strategi beror i førsterekke på tilstanden til membranene som byttes ut.

Belastningen som membranelementene i et trykkrør blir utsatt for vil være avhengig av plasseringen. Dette innebærer at reduksjonen i permeabilitet og økningen i spesifikt trykkfall vil være størst for det fremste elementet som mottar størst belastning, og deretter gradvis avta mot utløpet av trykkrøret. Dersom forskjellen i ytelse for første og siste element er betydelig, noe som ofte vil være tilfelle, så vil de bakerste elementene kunne "ha igjen" ytelse som ikke er utnyttet enda.

En alternativ strategi til å bytte ut alle membranene i et trykkrør vil være å kun bytte innbyrdes plassering av membranelementene. Dette omtales som "endebytting" og innebærer at det bakerste elementet settes fremst, det nest bakerste settes nest forrest, osv., inntil det fremste elementet plasseres bakerst i trykkrøret. Resultatet etter endebytting blir da at den relative produksjonen øker noe for de tre fremste elementene, og avtar noe for de tre bakerste elementene. Totalt sett vil innløpstrykket gå noe ned for en gitt produksjonsmengde. Et slikt alternativ er rimelig, men effekten (i redusert innløpstrykk) er ikke særlig stor, og effekten vil ofte være kortvarig på grunn av ugunstig fluksprofil etter endebytting.

Et mer gunstig alternativ vil være å utføre en delvis utskifting med endebytting. Dette innebærer at de forreste membranene kastes. De bakerste membranene beholdes, men disse endebyttes og plasseres fremst i trykkrøret. De nye membraner plasseres i de bakre posisjonene i trykkrøret. En vil da oppnå et flatere fluksprofil sammenlignet med både full utskifting og full endebytting, hvilket vil være gunstig med tanke på utviklingen av beleggdannelse etter membranbytte. Innløpstrykket vil reduseres mer jo flere membraner som skiftes ut. Med tanke på fluksprofil vil et optimum innebære at en bytter ut 2 til 4 membraner, hvilket vil avhenge av membrantype og aktuell tilstand på membranene som beholdes.

For å vurdere tilstanden til membranene i et trykkrør er det hensiktsmessig å obduere første og siste element. Dette gjør at en kan utføre hensiktsmessige målinger og beregninger for å estimere "gjenværende ytelse", dvs. permeabilitet og spesifikt trykkfall for de to membran-elementene. Med denne informasjonen vil en også ha muligheten til å simulere effekten av ulike utskiftingsalternativer ved å benytte en hydraulisk transportmodell.

---

## 4.8. Eksempler – justering av styringsparametere

Til en viss grad vil "reguleringsvinduet" for styringsparametere bestemmes i designfasen. Det vil likevel være et betydelig styringsrom for optimalisering av styringsparametere i anleggets driftsfase, og optimalisering av styringsparametere er derfor et av driftsoperatørens viktigste virkemidler for å bidra til god drift av membran-anlegget. Her gis anbefalinger av driftsstrategi for to konkrete eksempler på driftssituasjoner som er relevante for vannverk med NF-prosess.

### 4.8.1. Driftssituasjon med gradvis reduksjon i permeabilitet

Endringer i observert permeabilitet og observert trykkfall kan skyldes både beleggdannelse og/eller temperaturendringer. Reguleringen av fødestrykk for å oppnå konstant fluks skiller ikke på årsaken. Med andre ord vil anleggets styring sikre at en opprettholder konstant produksjon og konstant vannfluks uavhengig av om endringen i fødestrykk skyldes beleggdannelse eller temperaturendringer eller en kombinasjon disse

faktorene. I henhold til vanlig driftsfilosofi for NF-anlegg vil fødestrykket automatisk økes for å kompensere for redusert permeabilitet og/eller økt trykkfall. Dette bidrar til at produksjonen, og dermed også vannfluksen, vil holdes konstant.

Dersom reduksjonen i permeabilitet helt eller delvis er årsaken til økningen i fødestrykk, så innebærer dette at trykket ut av membranene også vil øke. Dette medfører dernest at utblødningen av konsentrat vil øke, og gjenvinningsgraden vil derfor reduseres.

Konsekvensen av redusert gjenvinningsgrad er i utgangspunktet gunstig for driftsbetingelsene til membranen siden konsentrasjonen av forurensinger i fødevannet vil reduseres. Imidlertid vil redusert gjenvinningsgrad resultere i økt råvannstilførsel til anlegget, noe som innebærer at kostnader knyttet til forbehandling og trykksetting av fødevann vil øke. I tillegg vil belastning på partikkelfjerningstrinnet foran membranen også øke, hvilket både reduserer syklustid og også kan medføre dårligere separasjonseffekt. En vil derfor typisk etterstrebe og holde gjenvinningsgraden uendret ved normal drift. Imidlertid, i perioder med forringet kvalitet på råvannet kan det være aktuelt å redusere gjenvinningsgraden for en kortere periode for å redusere belastning på membranene.

For å opprettholde konstant gjenvinningsgrad ved gradvis avtagende permeabilitet må driftsoperatøren gradvis øke strupingen av konsentratutløpet. I de fleste anlegg gjøres dette med justering av manuell reguleringsventil på konsentratutløpet slik at konsentratutblødningen over tid holdes uendret. For at driftsoperatøren skal kunne vurdere behov for driftsmessige tiltak som diskutert her må han/hun følge med på hvordan utviklingen av gjenvinningsgraden. I praksis kan driftsoperatøren også overvåke gjenvinningsgraden ved å følge med på strømningsmålingen av konsentratutløp. Øker konsentratutblødningen samtidig som permeatproduksjonen er uendret så er dette en indikasjon på at gjenvinningsgraden avtar.

Ved normale driftssituasjoner så vil utviklingen av membranbelegg og tilhørende reduksjon i membran- ytelse i NF-anlegg være en forholdsvis langsom prosess. Dette innebærer at det ikke vil være behov for hyppig justering konsentratutblødningen. Dersom driftsoperatøren overvåker og eventuelt justerer konsentratutblødningen på ukentlig basis vil dette være normalt være mer enn tilstrekkelig.

#### 4.8.2. Driftssituasjon med gradvis økning i trykkfall

Ved økt trykkfall må fødestrykket økes for å opprettholde konstant produksjon. Selv om innløpstrykket gradvis økes så vil utløpstrykket forbli uendret, forutsatt at en ikke samtidig observerer en reduksjon i permeabiliteten. Dette innebærer at utblødningen av konsentrat, og dermed også gjenvinningsgraden, vil holde seg uendret.

Økt trykkfall vil altså ikke påvirke gjenvinningsgraden. Men økt trykkfall vil derimot påvirke sirkulasjonsmengden og dermed også tverrstrømhastigheten over membranen. Ved økt trykkfall vil trykkøkningen som sirkulasjonspumpen må kompensere for også økes. For sentrifugalpumper som typisk benyttes til formålet innebærer dette at leveransen går ned dersom turtallet holdes uendret. Konsekvensen av redusert tverrstrømhastighet er at stoffbelastningen på membranoverflaten vil øke, noe som vil bidra til økt beleggdannelse.

For å opprettholde en konstant tverrstrømhastighet over membranen må driftsoperatøren gradvis justere opp turtallet på sirkulasjonspumpen for å kompensere for en gradvis økning i trykkfallet fra innløp til utløp i membrantrinnet.

Merk at i en normal driftssituasjon vil en ofte oppleve en kombinasjon av permeabilitetsfall og økning i trykkfall over tid. Driftsoperatøren må derfor følge med på begge disse ytelsesindikatorerne for å vurdere hvilke driftstiltak som til enhver tid er aktuelle.

---

## 4.9. Sjekkliste for drift av NF-anlegg

- 1) Journalfør prosessdata som grunnlag for å beregne styringsparametere og normaliserte ytelsesindikatorer:
  - a. Vannproduksjon, m<sup>3</sup>/time
  - b. Mengde råvann, m<sup>3</sup>/time
  - c. Sirkulasjonsmengde, m<sup>3</sup>/time
  - d. Konsentratmengde, m<sup>3</sup>/time
  - e. Driftstrykk inn på trykkørerne, bar
  - f. Driftstrykk ut fra trykkørerne, bar
  - g. Trykk på permeatsiden, bar
  - h. Vanntemperatur. °C
  - i. Journal for hovedvask
  - j. Journal for hendelser av ulike slag

- 2) Overvåke styringsparametere (vannfluks, tverrstrøms hastighet og gjenvinningsgrad) og normaliserte ytelsesindikatorer (trykkfall, permeabilitet og renseeffekt), helst ikke sjeldnere enn på ukentlig basis.
- 3) Utføre membranvask etter behov, ikke basert på fast intervall. anbefalte kriterier er å iverksette membranvask innen følgende inntreffer:
  - a. Reduksjon i normalisert permeabilitet på 10-15%
  - b. Økning i normalisert trykkfall på 10-15%
- 4) Ved redusert råvannskvalitet er følgende tiltak aktuelle for å redusere belastningen på membranene:
  - a. Reduser vannfluksen (produksjonen) dersom dette er mulig, samt øk tverrstrøms hastigheten
  - b. Reduser gjenvinningsgraden
  - c. Er det etablert råvannsinntak fra reservekilde bør en i den grad det er mulig bytte råvannskilde inntil kvaliteten i hovedkilden bedrer seg, og forutsatt at reservekilden har bedre kvalitet
  - d. Vurder å øke varighet (eller hyppighet) av døgnskyllingen i perioder med forverret vannkvalitet.
- 5) Følg ekstra nøye med på utviklingen av ytelsesindikatorer i forbindelse med hendelser som forringer råvannskvaliteten:
  - a. Dersom permeabiliteten reduseres eller trykkfallet øker vesentlig som følge av f.eks. omrøring eller nedbørshendelse bør det iverksettes hovedvask.
- 6) For å opprettholde en konstant tverrstrøms hastighet ved gradvis økning i trykkfallet fra innløpet til utløpet av membrantrinnet må driftsoperatøren gradvis justere opp turtallet på sirkulasjonspumpen.
- 7) Fra et perspektiv der en vil oppnå mest mulig skånsom drift av membrantrinnet bør størst mulig del av produksjonen foregå ved "middels" produksjonsnivå, og i den grad det er mulig bør en unngå drift ved "høyt produksjonsnivå":
  - a. Dersom det er sesongvariasjoner i vannbehovet så bør driftsoperatøren vurdere å endre sett-punkt for henholdsvis "lavt" middels" og "høyt" nivå.
- 8) Ha en indikator på membranfiltrering som hygienisk barriere, og følg opp denne jevnlig.
- 9) Anlegget bør ha vannproduksjon størstedelen av døgnet, med unntak av perioder med membranvask, dvs. at en må unngå at anlegget står lenge i ro om natten.
  - a. Dersom anlegget stanses mer enn et døgn må membranene konserveres.

# 5. Utredning av driftsproblemer i nanofiltreringsanlegg

## 5.1. Innledning - Utredning av driftsproblemer

Dersom det oppleves utfordringer med driften av NF-anlegget bør vannverket kontakte anleggsleverandøren (alternativt foretaket som vannverket har inngått serviceavtale med) for å få innspill til hvilke tiltak som kan/bør iverksettes. I enkelte tilfeller kan det være vanskelig å fastslå årsaken til driftsutfordringene, og dermed også vanskelig å foreslå hensiktsmessige tiltak.

Dette kapitlet presenterer en utredningsmetodikk for å avdekke de underliggende årsakene til driftsproblemer i nanofiltreringsanlegg, som igjen vil gi grunnlag for å foreslå målrettede tiltak. Metodikken består av fire hovedtrinn der vi anbefaler å starte med en detaljert analyse av driftsdata som kan suppleres med simulering av driftsdata for å få kunnskap om interne belastningsforhold i trykkørret. Deretter gir det ofte nyttig informasjon å utføre en utvidet karakterisering av råvann og forbeholdt råvann, og eventuelt utføre obduksjon av brukte membranelementer fra vannverket. Disse fire hovedtrinnene er gjennom flere FoU-prosjekter (ref. 2.4) utviklet som "verktøy" som vannverk kan benytte seg av ved behov.

I kapittel 5.2 gis en kort presentasjon av de 4 verktøyene. I kapittel 5.3 vises noen eksempler på bruken av verktøyene fra tidligere utredninger. En oppsummering av de viktigste hovedpunkter er gitt i kapittel 5.4.

Som diskutert i kapittel 4 anbefales det at vannverkene utfører nødvendig journalføring og datafangst, samt overvåker utvikling av ytelsesindikatorer og styringsparametere som en del av den daglige driften. Ved å gjøre dette har vannverket gode forutsetninger for å ivareta det første trinnet i den foreslåtte utredningsmetodikken (analyse av driftsdata).

Det andre trinnet som innebærer simulering av interne belastningsforhold i trykkørret, må normalt ivaretas av et foretak med kompetanse på transportmodellering av membranprosesser.

Det tredje trinnet (karakterisering av råvann) innebærer at det utføres ulike vannanalyser. Standardparametere kan bestilles ved de fleste analyselaboratorier som tilbyr vannanalyser. En del av analysene er mer avanserte og tilbys ikke nødvendigvis av kommersielle laboratorier, men må utføres av spesialiserte laboratorier hos forskningsinstitutter eller universiteter. Vannverket kan selv bestille analyser og nyttiggjøre seg av resultatene i samråd med anleggsleverandør. Alternativt kan vannverkene kontakte egnet kompetansemiljø for å kartlegge hvilke analyser som er hensiktsmessig å utføre, hvilke laboratorier som kan gjøre dette, samt få bistand til å vurdere resultatene.

Membranobduksjon må utføres av egnet kompetansemiljø og innebærer bruk av avanserte analyseinstrumenter som normalt kun er tilgjengelige hos forskningsinstitutter og universiteter. Det gjøres oppmerksom på at enkelte membranprodusenter også tilbyr membranobduksjon for å bistå i utredning av driftsutfordringer i membranlegg.

For å fremskaffe tilstrekkelig underlag til å kunne fastslå både årsaken til driftsutfordringer og hvilke tiltak som kan iverksettes for å bedre driftssituasjonen vil det ofte være nødvendig å kombinere informasjon som fremskaffes ved å utføre flere av trinnene i den foreslåtte utredningsmetodikken.

## 5.2. Verktøy for utredning av driftsproblemer

### 5.2.1. Analyse av driftsdata

Kapitel 4 gir en detaljert innføring av drift av nanofiltreringsanlegg og beskriver hvilke prosessvariabler som bør monitoreres og hvilke størrelser som bør beregnes fra loggførte prosessdata. Når man skal analysere driftsdata for å lete etter årsaker til driftsproblemer anbefales det å få visualisert så mye som mulig av informasjon grafisk langs en tidslinje. I tillegg til styringsparametere

og ytelsesindikatorer kan det være hensiktsmessige å markere tidspunkt for hovedvask og hendelser som kan tenkes å påvirke driften. Aktuelle hendelser kan være skifte av råvannskilde, vår-/høstomrøring, kraftig regnvær, flom, skifte av vaskejemikalier osv. Når alt er visualisert grafisk kan man begynne å lete etter sammenhenger mellom ytelsesindikatorer, driftsparametere og hendelser.

### 5.2.2. Simulering av belastningsforhold internt i trykkør

Styringsparametere kan beregnes basert på målte driftsdata og plottes som tidsserier som representerer gjennomsnittsverdier for hele membrantrinnet. Siden driftsbetingelsene for membranen endrer seg fra innløp til utløp av et trykkør, vil eksempelvis ikke anleggets gjennomsnittlige fluks gi et fullstendig bilde av belastningen som membranen har vært utsatt for. Det kan derfor være nyttig å beregne såkalte fluksprofiler og trykkprofiler som reflekterer den faktiske belastningen på membranen for ulike posisjoner i trykkøret. Dette innebærer at driftsdata må modelleres ved å benytte en hydraulisk transportmodell. Det vil også være mulig å simulere hvordan innløpstrykket påvirkes av temperaturendringer, endringer i sirkulasjonsmengde, endringer i produksjonsmengde, etc. Vannverket vil da få bedre kunnskap om hvordan årstidsvariasjoner og ulike driftsinnstillinger vil påvirke nødvendig innløpstrykk

Modellering av fluks og trykkprofiler forutsetter at en kjenner tilstanden til membranen i de ulike posisjonene i trykkøret. Dette er kun tilfelle ved oppstart når membranene er nye, og ved en eventuell obduksjon, forutsatt

at en gjør nødvendige målinger og beregninger for å estimere permeabilitet og spesifikt trykkfall til de obduserte membranene. En må da som minimum obdusere to membraner fra ulike posisjoner i samme trykkør, fortrinnsvis første og siste element.

### 5.2.3. Karakterisering av råvann

Vi har tidligere presentert hvordan råvannskvaliteten påvirker dannelsen av membranbelegg, se kapittel 6. Selv om man har gjort en kartlegging av råvannskaraktistikken i planleggingsfasen for byggingen av vannverket kan råvannskaraktistikken endre seg over tid. Det kan også være at det finnes andre og bedre karakteriseringsmetoder som kan gi supplerende informasjon om kvaliteten på råvannet. Derfor anbefales det å gjøre en ny analyse av råvannet dersom man opplever driftsproblemer. Det anbefales å analysere råvannet både før og etter forfilter for å vurdere effekten av forbehandlingen.

I tillegg til å analysere for standard vannkvalitetsparametere er det anbefalt å gjøre en utvidet karakterisering av NOM og partikler i vannet. Tabell 5-1 viser en oversikt over aktuelle analyser, og hvilket formål analysen har.

**Tabell 5-1:** Oversikt over metoder for å karakterisere råvann.

Nr	Metode	Formål
<b>Standardparametere</b>		
1	ICP-MS (Inductively coupled plasma mass spectroscopy)	Kvantitativ bestemmelse av metaller og enkelte ikke-metalliske grunnstoffer
2	pH alkalitet ledningsevne	Standardmetoder som gir informasjon om generell vannkjemi
<b>Karakterisering av naturlig organisk materiale (NOM)</b>		
3	UV254, TOC (total organisk karbon DOC (løst organisk karbon) fargetall	Standardmetoder som gir informasjon om mengde organisk stoff i prøve, samt i hvilken grad det organisk stoffet forekommer på løst form eller i partikler.
4	LC-OCD (Liquid Chromatography – Organic Carbon Detection)	Identifisering og kvantifisering av NOM-fraksjoner basert på størrelse og ved bruk av ulike detektorer (organisk karbon, UV, og nitrogen). Følgende fraksjoner bestemmes: <ul style="list-style-type: none"> <li>• DOC: løst organisk karbon etter 0,45µm-forfiltrering</li> <li>• HOC: hydrofobt organisk karbon</li> <li>• CDOC: total organisk karbon</li> <li>• Biopolymerer (BP): denne fraksjonen har høy molekylvekt (&gt; 100 000 g/mol), er hydrofil, er ikke UV-absorberende, og inneholder nitrogen. Fraksjonen inkluderer polysakkarider. Fraksjonen finnes kun i overflatevann og er biologisk nedbrytbar.</li> <li>• Humic substances (HS): fraksjon som inneholder humusforbindelser.</li> <li>• Building blocks: dette er en underkategori av HS med molekylvekter på 300-450 g/mol. Byggeklosser er naturlige nedbrytningsprodukter av humus. De kan ikke fjernes i flokkuleringsprosesser. Også di- og triprotiske syrer (oksalsyre, sitronsyre) inngår i denne fraksjonen</li> <li>• LMW acids: denne fraksjonen inkluderer alle alifatiske, lavmolekylære monoprotiske syrer.</li> <li>• LMW neutrals: denne fraksjonen inkluderer lavmolekylære forbindelser. Disse er enten er svakt ladede eller uladete hydrofile forbindelser, eller svakt hydrofobe ("amfifile") forbindelser.</li> </ul>
5	NOM-fraksjonering	Kvantifisering av ulike fraksjoner av NOM etter hvor hydrofile/hydrofobe forbindelsene er. Følgende fraksjoner som til sammen tilsvarer innholdet av TOC i prøven, blir bestemt: <ul style="list-style-type: none"> <li>• VHA (very hydrophobic acids)</li> <li>• SHA (slightly hydrophobic acids)</li> <li>• CHA (charged hydrophilic compounds)</li> <li>• NEU (Hydrophilic neutrals)</li> </ul>
<b>Partikkelkarakterisering</b>		
6	Turbiditet	Standardmetode som gir indikasjoner på partikkelinnholdet i prøven.
7	SDI (Silt density index)  MFI (Modified fouling index)	Generell evaluering av beleggdannelsespotensialet i råvann som skyldes kolloid/partikulært materiale. Testen er basert på ASTM standard D4189.  MFI (Modified Fouling Index) er basert på måling av tap av membranpermeabilitet over tid ved bruk av filtre med ulike porestørrelse. Mengden av permeat er målt kontinuerlig og MFI beregnes som stigningstallet for kurven for filtrert volum vs. tid/volum. Resultatene kan gi informasjon om hvilke partikkelstørrelsesfraksjoner prøven inneholder.
8	Partikkelstørrelsesanalyse	Gir informasjon om størrelsesfordeling av partikler i en vannprøve basert på laser-diffraksjonsmetode.
9	Partikkelkarakterisering fraksjonert filtrering	Kvantifisering av ulike partikkelfraksjoner i råvann ved filtrering av prøve med ulike filterstørrelser og påfølgende gravimetrisk analyse for bestemmelse av organisk/uorganisk sammensetning.
10	SEM-EDS av belegg på filtre fra fraksjonert filtrering.	SEM gir høyoppløselige bilder av belegg og partikler avsatt på filterene som er benyttet i partikkelkarakteriseringen beskrevet ovenfor. EDS benyttes til å bestemme hvilke elementer belegget består av.

#### 5.2.4. Obduksjon av membranelementer

For å fremskaffe kunnskap om hvor mye belegg som er avsatt på membranene i et anlegg, og ikke minst hva belegget består av så kan det være nyttig å utføre en membranobduksjon. Dette innebærer at en tar ut ett eller flere membranelementer fra anlegget og sender disse til et kompetent laboratorium hvor membranelementene åpnes (obduseres), og avsatt belegg på membranen blir karakterisert. Det anbefales å ta ut det forreste og det bakerste membranelementet fra det

samme trykkørret i anlegget for å få informasjon om eventuelle forskjeller i tilstand på membranene som følge av ulike driftsbetingelser ved inn- og utløp i membrantrinnet.

Tabell 5-2 gir en oversikt over hvilke analyser som kan utføres på brukte membranelementene fra et vannverk med driftsproblemer. Tabellen beskriver også formålet med de ulike analysene.

**Tabell 5-2:** Oversikt over analyser av membranbelegg.

Metode	Formål
<b>Innledende inspeksjon</b>	
Visuell inspeksjon/fotografering	Dokumentasjon av tilstanden til membranelementet
<b>Analyse av belegg</b>	
Billedanalyse	Dekningsgrad av belegg
Gravimetrisk analyse	Total spesifikk masse av belegg og masse% organisk og uorganisk materiale
ICP-MS av oppsluttet belegg (Inductively coupled plasma mass spectroscopy)	Masse av ulike elementer i belegget og variasjoner internt på membrankonvolutt
TOC-analyse av oppsluttet belegg (Total organic carbon)	Masse av organisk materiale i belegget og variasjoner internt på membran-konvolutt
SEM (Scanning electron microscopy)	Høyoppløselige bilder som viser topografi, størrelse og form på partikler
SEM-EDS (SEM + Energy dispersive spectroscopy)	Elementsammensetning av partikler

#### Visuell bedømmelse og prøveuttak

Når man starter obduksjonen av et brukt membranelement, er det første man gjør en visuell bedømmelse av tilstanden til elementet. Typisk vil man se etter følgende:

- 1) Er det belegg/partikler ved innløpet og utløpet på membranelementet?
- 2) Er det beleggvariasjoner over membranarket, eventuelt samme mønster på alle membranarkene?
- 3) Er det belegg på både membranen og spaceren?
- 4) Er det lett å tørke av belegget fra membranen med fuktet papir?

Etter den visuelle bedømmelsen gjøres prøveuttak for de ulike metodene for karakterisering av belegg, samt prøveuttak for permeabilitetsforsøk og screening vaskeforsøk.

#### Screening vaskeforsøk

Et supplement til den visuelle bedømmelsen og permeabilitetsforsøk er å ta ut et større antall mindre membranprøver fra membranarket og teste disse i ulike vaskeløsninger. I FORKMEM ble det utviklet en metode

der en tester effekten av 24 ulike vaskeløsninger. Det benyttes både kommersielle produkter for membranvask og vaskeløsninger laget av ulike kjemiske forbindelser, inklusive syrer, baser, oksidasjonsmidler, overflateaktive stoffer og kompleksbindere. For å vurdere effekten av vaskeløsningene sammenlignes de vaskede prøvene med en uvasket referanseprøve ved visuell bedømmelse. Vaskeeffekt angis ved bruk av en skala fra 1-10. Selve bedømmelsen skjer anonymt og utføres av tre dommere.

En slik screening gir en indikasjon på hvilke vaskeløsninger som kan egne seg i anlegget for å fjerne belegg og bidra til å gjenvinne ytelse. I praksis vil man starte med en screening av vaskeløsninger og deretter teste de mest lovende løsningene i in-line vaskeforsøk i laboratorieskala. Dersom disse testene er lovende, kan man teste vaskeløsningene i fullskala anlegget.

#### Permeabilitetsforsøk

Når man først åpner et membranelement, vil det ofte være hensiktsmessig å ta ut mindre prøver av membranen fra forskjellige steder på membranarket og teste disse i standardiserte tester i laboratoriet. Det er særlig måling

av permeabilitet som er aktuelt. Permeabiliteten kan også testes etter at ulike vaskerutiner og bruk av ulike vaskekjemikalier er utført in-line i laboratorieoppsettet. Dette vil gi informasjon om effekten av ulike vaskekjemikalier eller vaskeprosedyrer.

Permeabilitetsforsøk av membranprøver fra membran-elementer med ulik plassering i et og samme trykkør vil gi informasjon om i hvilken grad ytelsen til membranene

endrer seg gjennom trykkørret. Dette er informasjon som kan benyttes for å modellere trykk- og fluksprofiler i membranlegget på tidspunktet da membranene ble tatt ut. Måling av permeabiliteten før og etter vaskeforsøk gir indikasjon på om den aktuelle vaskeløsningen kan egne seg for å gjenvinne ytelsen i anlegget.

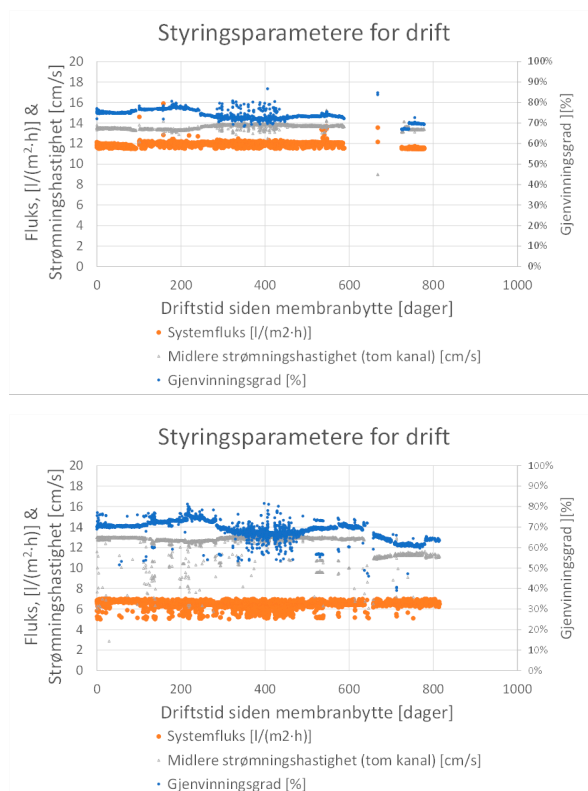
### 5.3. Eksempler på bruk av verktøy for utredning av driftsproblemer

I dette kapitlet vises et eksempel på utredning av driftsproblemer ved et vannverk. Utredningen er utført av SINTEF i 2023. Eksempelet er forenklet, men viser utvalgte resultater ved å benytte verktøyene beskrevet i kapittel 5.2.

Merk at eksemplene er inkludert for å illustrere mulig nytteverdi av de enkelte analyser/beregninger. Denne rapporten omtaler ikke detaljert hvordan informasjon kan trekkes ut fra de enkelte analysene/beregningene for å fastslå årsak til driftsutfordringene. Rapporten gir heller ikke en uttømmende veiledning for hvilke tiltak som bør utføres i forbindelse med ulike driftsutfordringer.

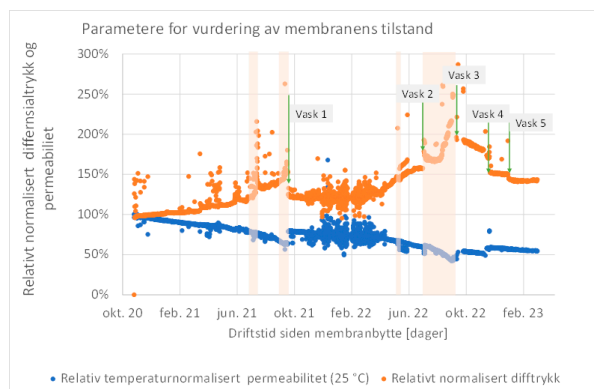
#### 5.3.1. Analyse av driftsdata

Vannverket som var gjenstand for utredning har logget prosessdata ble benyttet til å plote styringsparametere som funksjon av tid. Figur 5-1 viser utviklingen av styringsparametere etter siste membranbytte for drift ved høyt fluksnivå (a) og lavt fluksnivå (b). Vi ser at fluks, tverrstrømhastigheten og gjenvinningsgrad innenfor hvert regime har vært stabil. Basert på dataene kan man også beregne at anlegget driftes 60 % av tiden på lavt fluksnivå og 40% ved høyt fluksnivå. Gjenvinningsgraden er i perioder noe høyere enn det man normalt vil anbefale.



**Figur 5-1.** Styringsparametere for vannverket i perioden november 2020 – april 2023, høyt driftsnivå (a), og lavt driftsnivå (b). Kilde: SINTEF.

Videre kan man fra prosessdata beregne normaliserte ytelsesindikatorer som forteller noe om tilstanden til membranene. I eksemplet mangler vi data for å beregne renseeffekt, men permeabilitet og trykkfall over konsentratkanalen er beregnet som vist i Figur 5-2. I figuren har vi også markert tilleggsinformasjon som kan ha betydning for ytelsen til membranene, som for eksempel når hovedvask er gjennomført og perioder der anlegget har benyttet reservevannkilden (rosa felter i

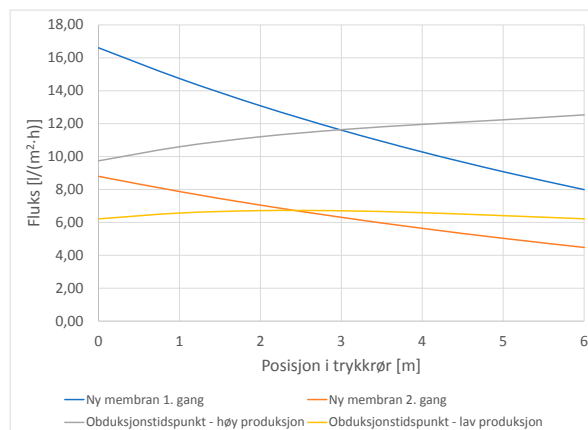


**Figur 5-2.** Ytelsesparametere for vannverk med indikasjon av tidspunkt for hovedvask (grønne piler) og perioder med bruk av reservevannkilde (rosa felter). Kilde: SINTEF.

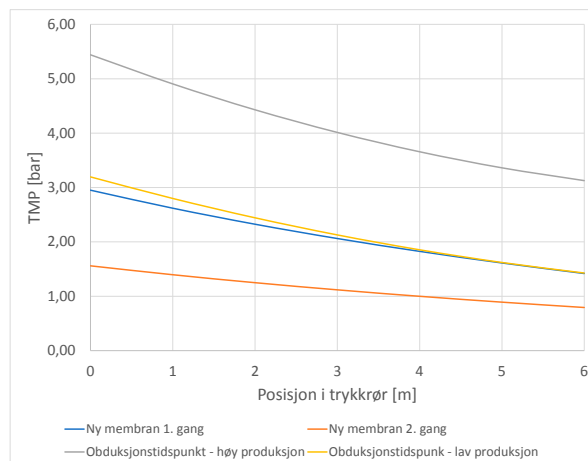
### 5.3.2. Simulering av belastningsforhold internt i trykkrør

For å undersøke hvorvidt membranene i et trykkrør utnyttes effektivt kan vi beregne fluksprofil og trykkprofil, dvs. hvordan fluks og trykk endres fra innløpet til utløpet av et trykkrør. Generelt vil det være gunstig å oppnå mest mulig flate trykkprofiler og fluksprofiler. Dette vil gi jevn belastning på alle membranelementene i trykkrøret. I motsatt fall, ved bratte trykk- og fluksprofiler vil membranen ved innløpet ha mye høyere belastning enn det siste elementet. Dette bidrar til raskere permeabilitetsnedgang for de forreste elementene. Samtidig opplever påfølgende membraner mindre belastning, men dette resulterer også dårligere utnyttelse (dvs. lav produksjon) for de bakerste elementene.

I eksemplet har vi beregnet profiler for oppstart med nye membraner, og for tidspunktet for uttak av membraner for obduksjon. Fluks- og trykkprofilene for både lavt og høyt produksjonsnivå er beregnet. Fluksprofilene er vist i Figur 5-3, mens trykkprofilene er vist i Figur 5-4. Vi ser at fluksprofilene er moderat bratt ved oppstart, mens ved obduksjonstidspunktet er fluksprofilen nærmest flatt ved lavt driftsnivå og stigende fra innløp til utløp ved høyt driftsnivå.



**Figur 5-3.** Fluksprofiler for nye membraner og ved ulike produksjonsnivåer på tidspunktet for uttak av membraner for obduksjon. Kilde: SINTEF.



**Figur 5-4.** Trykkprofiler (TMP) for nye membraner og ved ulike produksjonsnivåer i henholdsvis november 2020 da membranen var ny og i april 2023 på tidspunktet for uttak av membraner for obduksjon. Kilde: SINTEF.

### 5.3.3. Karakterisering av råvann

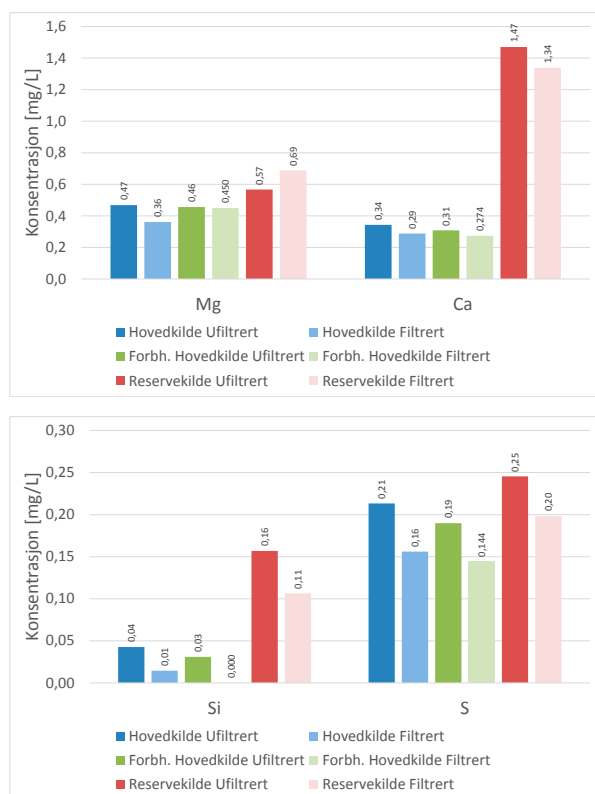
De følgende tabellene og figurene viser resultatene fra en utvidet karakterisering av vannet i hovedkilden og reservekilden til vannverket i eksempelet.

Tabell 5-3 viser resultater fra standard vannanalyser og viser blant annet at det er høyere pH, ledningsevne og alkalitet i reservekilden sammenlignet med hovedkilden. Videre er det høye SUVA-verdier for begge prøver, hvilket antyder høy konsentrasjon av polyaromatiske NOM forbindelser, mens fargetallet er helt likt for de to vannkildene på prøvetakingstidspunktet.

**Tabell 5-3:** Standard vannanalyseparametere for prøver fra forbehandlet hovedkilde og reservkilde. Kilde: SINTEF.

Prøve	pH	Fargetall [mg Pt/L]	Alkalitet [mmol/L]	Turbiditet [NTU]	Ledningsevne [ $\mu$ S/cm]	SUVA254 [L/mgC.m]
Forbehandlet hovedkilde	6,39	17,7	0,072	0,33	42,2	3,96
Reservkilde	6,86	17,6	0,238	0,1	75,7	3,64

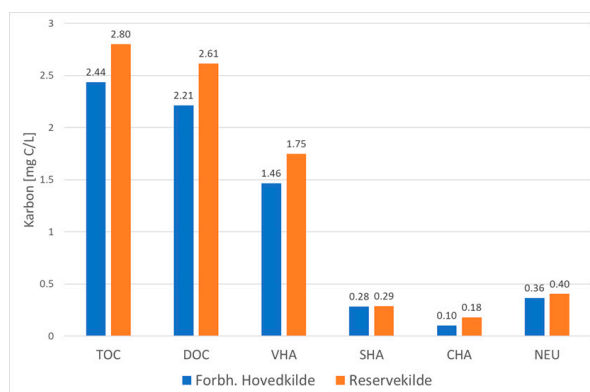
Figur 5-5 viser utvalgte elementer fra en ICP-MS analyser. Her ser vi at reservekilden har høyere konsentrasjon av silisium og kalsium sammenlignet med hovedkilden.



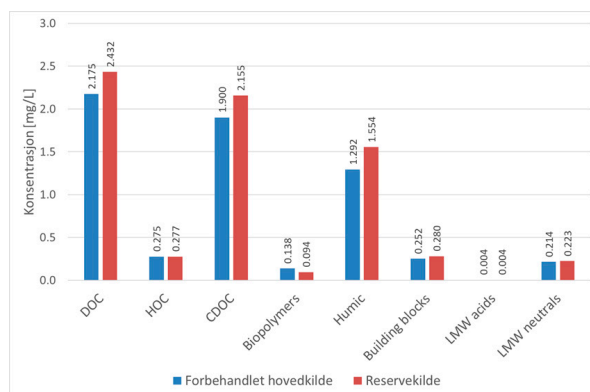
**Figur 5-5.** Konsentrasjon av utvalgte elementer i ulike vannfraksjoner av hovedkilden og reservkilden. Kilde: SINTEF.

Figur 5-6 og Figur 5-7 viser resultater fra to ulike karakteriseringsmetoder av NOM i hovedvannkilden og reservvannkilden. Fra Figur 56 ser vi at reservkilden har høyere konsentrasjon av totalt organisk karbon (TOC) enn hovedkilden, og at organisk karbon forekommer hovedsakelig i form av løst organisk karbon (DOC). Begge vannkildene har lav turbiditet, noe som støttes av at det organiske stoffet er i løst form. Videre ser vi at det er den hydrofobe NOM-fraksjonen (VHA) som dominerende og samsvarer med høye SUVA-verdier for

begge vannprøvene. Denne NOM-fraksjonen har sterk korrelasjon med fargetallet i vannet. Vi finner samsvarende informasjon i Figur 57, i tillegg til noe mer spesifikk informasjon. Blant annet ser vi at det er humusforbindelser som er den dominerende NOM-fraksjonen.



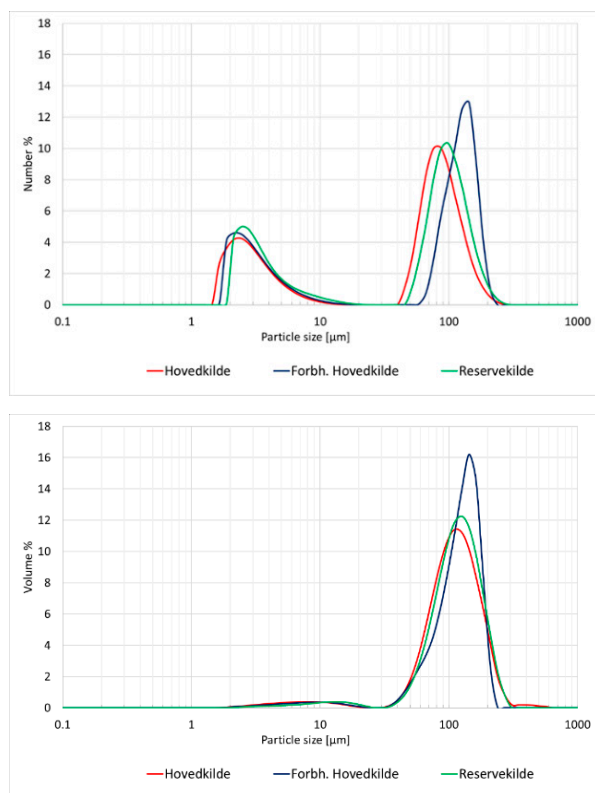
**Figur 5-6.** Resultater fra NOM-fraksjonering av forbehandlet hovedvannkilden og reservvann kilden. Kilde: SINTEF.



**Figur 5-7.** Resultater fra NOM-karakterisering med LC-OCD. Kilde: SINTEF.

Figur 5-8 viser resultatene fra analyse av partikkelstørrelsesfordelingen av ubehandlet vann fra hovedkilden, forbehandlet vann fra hovedkilden og ubehandlet vann fra reservkilden. Fra figuren kan vi se at partikkelstørrelsesfordelingen i de tre vannprøvene er ganske lik. Den viser en polydispers distribusjon med to konsistente toppe for størrelsesfordelinger basert på både antall partikler

og volum av partikler. Toppene er i områdene ~2 µm og ~80-140 µm for størrelsesfordeling basert på antall partikler og i områdene rundt 130-140 µm og rundt 10 µm for størrelsesfordeling basert på volum. Det er viktig å påpeke at resultatene gir bare en relativ konsentrasjon basert på antall partikler som blir målt i en måling og sier ingen ting om faktisk partikkelkonsentrasjon. Resultatene viser at den dominerende partikkelfraksjon er i området ~100 µm for alle tre vannprøver.



**Figur 5-8.** Partikkelstørrelsesfordeling for råvann fra hovedkilde, filtrert vann fra hovedkilde og ufiltrert vann fra reservekilde. Figur a) viser fordelingsfunksjon basert på antall partikler (nummer%), og figur b) viser fordelingsfunksjon basert på volumet av partikler (volum%). Kilde: SINTEF.

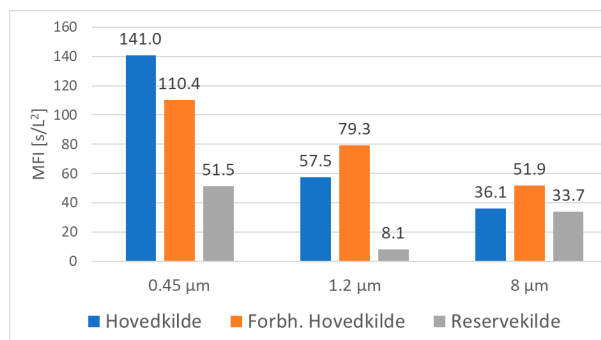
Som nevnt i Tabell 5-1 har man også metoder for indirekte å måle foulingpotensialet i en vannprøve. Figur 5-9 viser resultatene for henholdsvis SDI og MFI. Resultatene viser høye SDI-verdier for alle prøvene, og at filtrene blir tette før det har gått 5 minutter. Dette betyr at for alle målingene oppnås maksimum teoretisk SDI-verdi og den tilhørende tiltetningsfaktoren (plugging factor) (PF) er 100%.

Også med bakgrunn i resultatene fra MFI-målinger vurderes foulingpotensialet til å være høyt for alle vannprøvene. Ufiltrert råvann fra hovedkilden har høyere

MFI enn de andre to vannprøvene, og reservekilden har den laveste MFI-verdien. Dette gjelder for alle porestørrelser. MFI-testen med porestørrelse 0,45 µm viser at forbehandling av hovedkilden fører til forbedring av foulingpotensialet, jf. lavere MFI for forbehandlet hovedkilde enn for ufiltrert råvann fra hovedkilden. Testene med 1,2 og 8 µm porestørrelse viser derimot noe høyere foulingpotensial for forbehandlet vann. Dette kan skyldes fjerning av fraksjoner med større partikler, som videre gir lavere potensial for kakefiltrering.

Tabell 5-4: Resultater fra SDI-analyse. Kilde: SINTEF.

Prøve-ID	SDI5	SDI10	SDI15	PF5	PF10	PF15
Hovedkilde	20	10	6,67	100%	100%	100%
Forbehandlet hovedkilde	20	10	6,67	100%	100%	100%
Reservekilde	20	10	6,67	100%	100%	100%



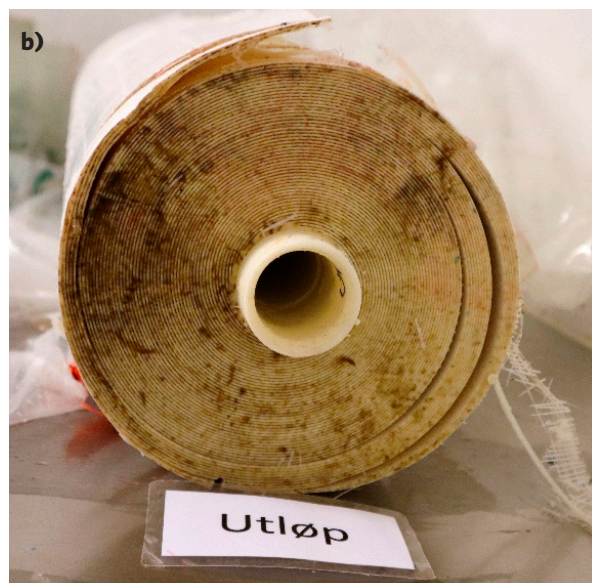
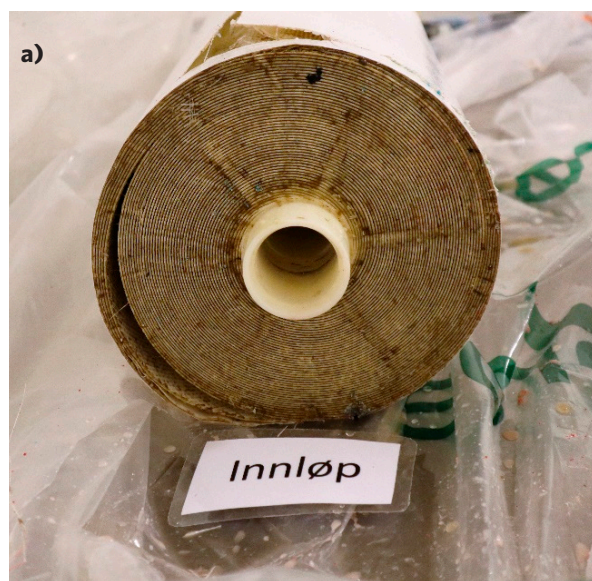
**Figur 5-9:** Foulingpotensial beregnet som MFI for råvann fra hovedkilden, filtrert vann fra hovedkilden og ufiltrert vann fra reservekilden.

### 5.3.4. Obduksjon av membranelementer Visuell bedømmelse

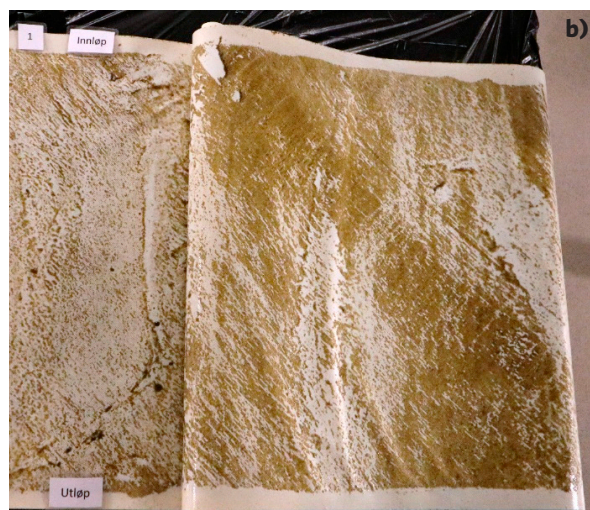
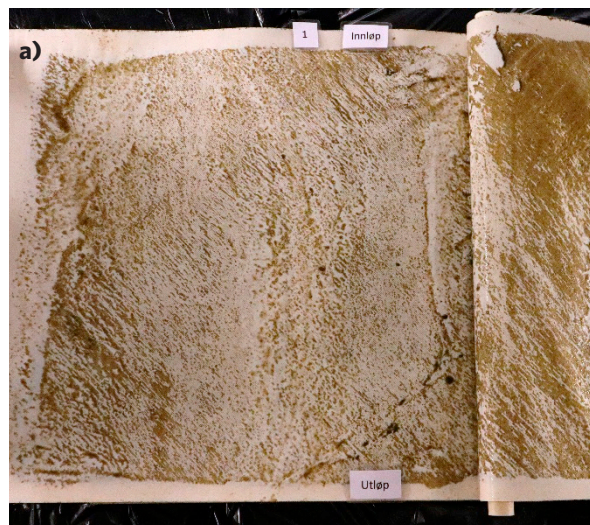
I eksemplet er det obduert to elementer, et element som var plassert først i trykkrøret (referert til som NF1) og et element som var plassert sist i trykkrøret (referert til som NF6). Figur 5-10 viser innløp (a) og utløp (b) av NF1-elementet, mens Figur 5-11 viser fødesiden av en utbrettet membrankonvolutt fra NF1-elementet. Figur 5-12 viser den mellomliggende fødespaceren fra NF1-elementet. Fra disse bildene og tilsvarende bilder fra NF6-element kan vi se at det er en god del synlig avsetninger av belegg på membranen i NF1-elementet, og noe mindre materiale ved utløpet av NF6-elementet. Videre sitter det lite belegg i fødespacer i NF1-elementet, men noe kan sees ved innløpet til elementet. Fødespaceren fra NF6-elementet var tilnærmet rent.

Permeatspaceren var helt ren for begge elementer (ikke vist).

Basert på bilder av hele membran som vist i Figur 5-11, kan det gjøres en billedanalyse der man skiller belegg fra ren membranoverflate, og beregner en dekningsgrad. Figur 5-13 viser dekningsgraden til fire membranark fra henholdsvis NF1- og NF6-elementene, samt gjennomsnittet. Vi ser tydelig at det er betydelig mer belegg på membranen som står nær innløpet til trykkrøret sammenlignet med membranen som står til slutt i trykkrøret.



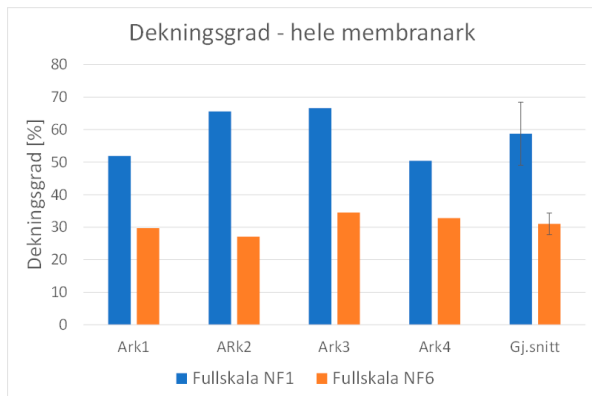
**Figur 5-10:** a) Innløpsenden og b) utløpsenden av NF1-elementet. Foto: SINTEF.



**Figur 5-11:** Begge membranarkene på fødesiden av en membrankonvolutt i NF1- elementet. Foto: SINTEF



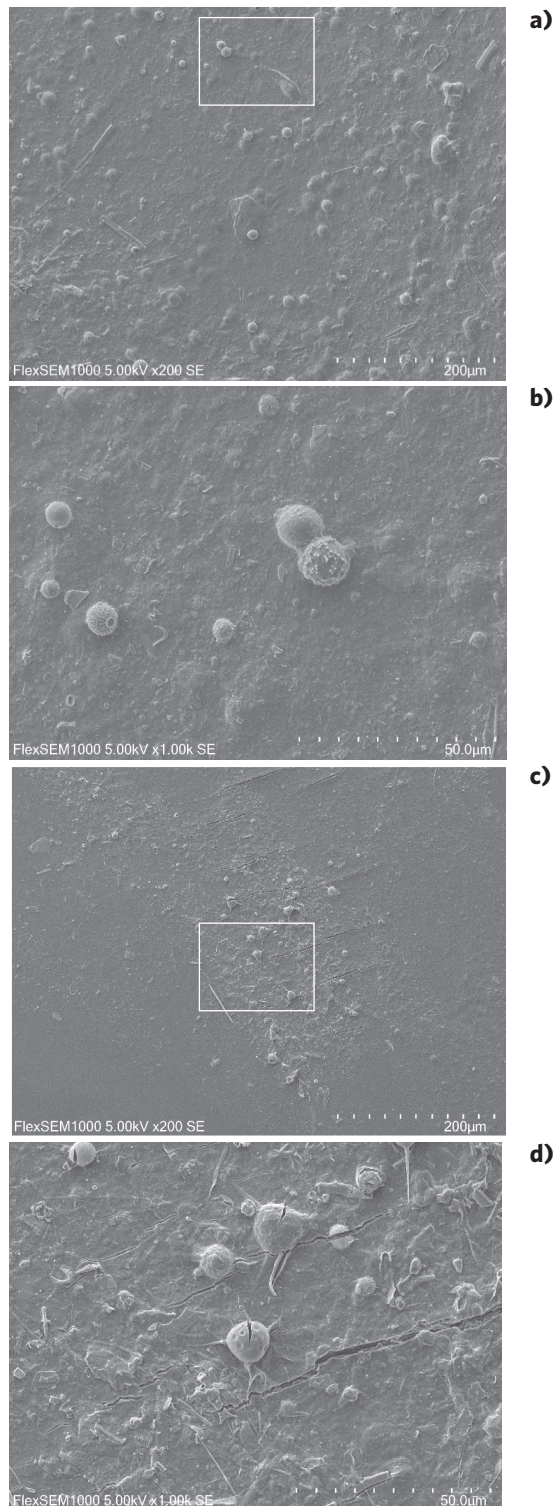
**Figur 5-12:** Fødespacer som har ligget mellom to membranark fra NF1-elementet. Innløpsenden er nederst i bildet. Foto: SINTEF



**Figur 5-13:** Dekningsgrad av belegg på membranprøver fra element NF1 og NF6. Kilde: SINTEF.

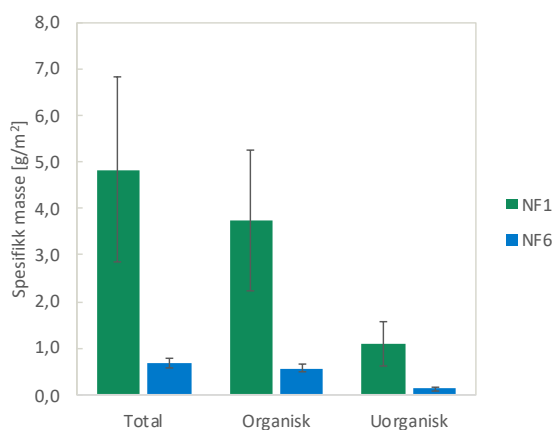
### Analyse av belegg på membran

Membranen og belegget på membran fra elementene kan analyseres videre. Figur 5-14 viser utvalgte SEM-bilder av membranoverflaten fra et vilkårlig membranark fra NF1-elementet (a og b) og fra NF6-elementet (c og d). Vi kan se at membranen fra NF1-elementet er dekket med et belegg med tydelige partikler i og på overflaten av belegget. Til sammenligning ser vi at membranen fra NF6-elementet har langt mindre belegg og at noen områder er tilsynelatende uten belegg. De symmetriske partiklene er kiselalger. Kiselalger er lett gjenkjennelige med sine karakteriske symmetriske mønster, og har et skall av silisiumoksid ( $\text{SiO}_2$ ). Elementanalyse (ikke vist) bekrefter da også at disse partiklene i hovedsak består av silisium (Si) og oksygen (O). Partiklene med rette kanter er mest sannsynlig mineralske, og er partikler av leire eller silt. Eksempler ses spredt på overflaten av belegget og man ser også konturer av slike partikler dekket av belegg. Slike partikler består hovedsakelig av silisium (Si), aluminium (Al) og oksygen (O), med ulike innslag av andre metaller som kalium (K), natrium (Na), magnesium (Mg), kalsium (Ca) og jern (Fe). Dette bekreftes også av elementanalysen. Størrelsen på observerte mineralske partiklene er mellom 0,5 og 60  $\mu\text{m}$ , hvor mesteparten av partiklene er mindre enn 5  $\mu\text{m}$ .



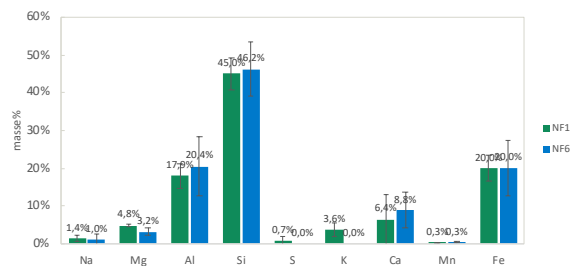
**Figur 5-14:** SEM-bilder av belegg på membranoverflaten fra et utsnitt i senter av et vilkårlig membranark fra NF1-elementet (a) og (b)) og fra NF6-elementet (c) og d)). Utsnittsområdene i (b) og (d) er markert i henholdsvis (a) og (c). Foto: SINTEF.

Videre er det tatt ut en rekke membranprøver på 40 cm x 40 cm der belegget er skrapet av og analysert. Et eksempel på analyse er vist i Figur 5-15, som viser resultatene fra en gravimetrisk analyse. Vi ser at den gjennomsnittlige spesifikke massen fra fem vilkårlige 40x40 cm membranutsnitt fra hvert element viser at det er ca. 4,8 g/m<sup>2</sup> belegg for NF1 og 0,7 g/m<sup>2</sup> belegg for NF6. Det er altså betydelig mer belegg på NF1 enn NF6, som også var tydelig fra den visuelle inspeksjonen. Videre ser vi at belegget fra begge elementene er overveiende organisk, henholdsvis 77% for NF1 og 81% for NF6.



**Figur 5-15:** Spesifikk masse analysert ved gravimetri av belegg fra 40x40 cm membranutsnitt. Kilde: SINTEF.

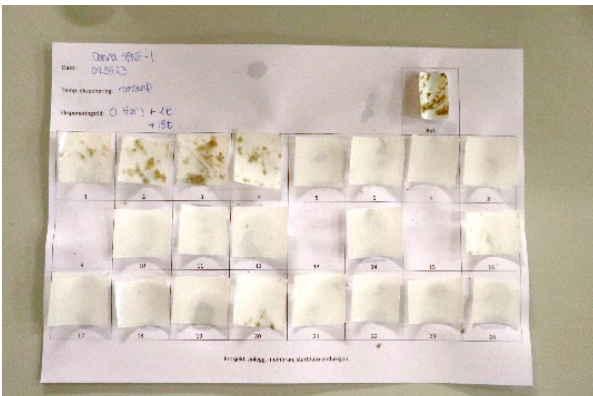
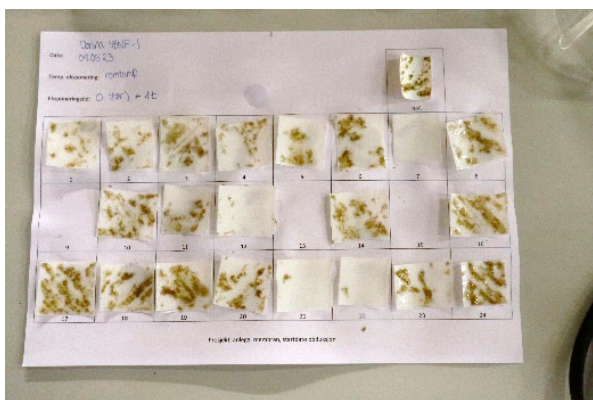
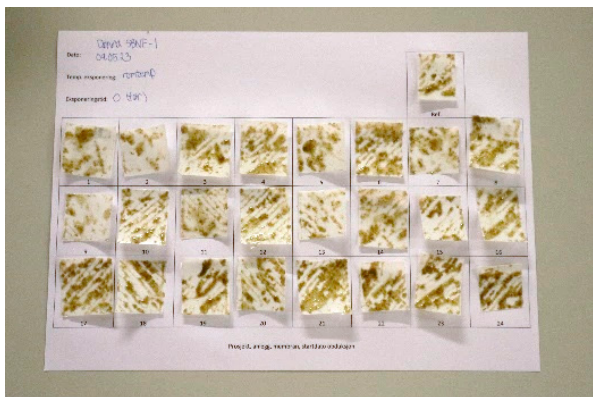
Det er også hentet belegg fra ulike steder på membranarket som kan analyseres i mer detalj for å karakterisere hva belegget består av og om det er variasjoner over membranen. Her skal vi vise gjennomsnittlige resultatene fra elementanalyse, men det vil også være relevant å gjøre andre analyser som beskrevet i kapittel 5.2. Figur 5-16 viser sammensetningen av elementene analysert for ved ICP-MS i belegg fra begge elementer og viser at sammensetningen av den uorganiske fraksjonen av belegget er tilnærmet den samme for begge membran-elementene. Sammensetningen bekrefter også observasjonene og analysene av SEM-bildene og SEM-EDS, som viste tilstedeværelse av kiselalger og silt- og leirpartikler.



**Figur 5-16:** Sammensetning av elementer (bestemt ved ICP-MS) i belegg fra vilkårlig membranark fra NF1- og NF6-elementet. Standardavvik basert på fem membranutsnitt fra ulike steder på membranarkene. Kilde: SINTEF.

### Screening vaskeforsøk ved å bruke brukt membran

Det ble også foretatt en screening av vaskeløsninger etter metoden beskrevet i kapittel 6.2. Membranprøver ble tatt fra to vilkårlig membranark fra NF1-elementet og NF6-elementet. Prøvene ble eksponert for ulike vaskeløsninger ved romtemperatur og effekten av eksponering ble undersøkt etter 1 og 18 timer. Figur 5-17 viser resultatene for NF1-elementet der a) viser prøvene før eksponering, b) viser prøvene etter 1 time eksponering, mens c) viser prøvene etter 18 timer eksponering. Uten å gå i detalj, ser man effekt av både vaskeløsning og eksponeringstid, som vil gi verdifull informasjon når man skal vurdere alternative vaskeregimer.



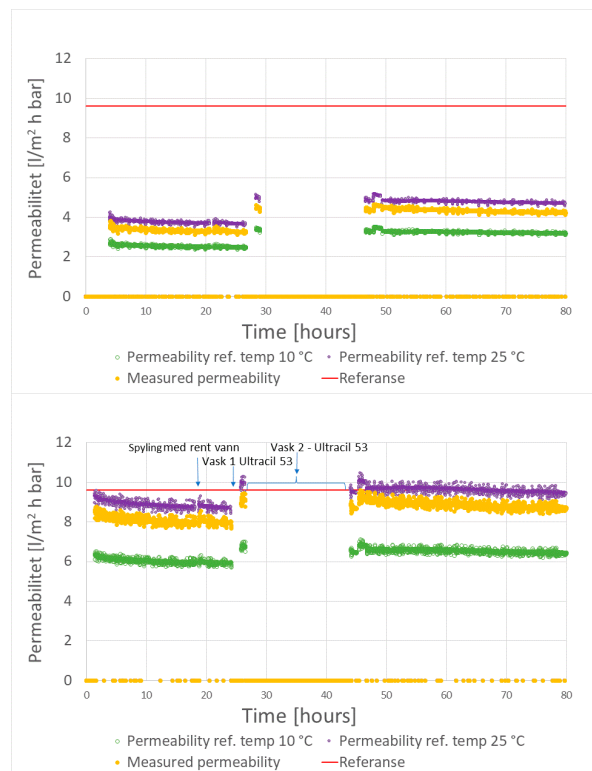
**Figur 5-17:** Membranutsnitt fra NF1-elementet til vurdering av effekt av vaskeløsning a) før eksponering b) etter 1 time eksponering og c) etter 18 timer eksponering ved romtemperatur. Foto: SINTEF

### Permeabilitetsforsøk

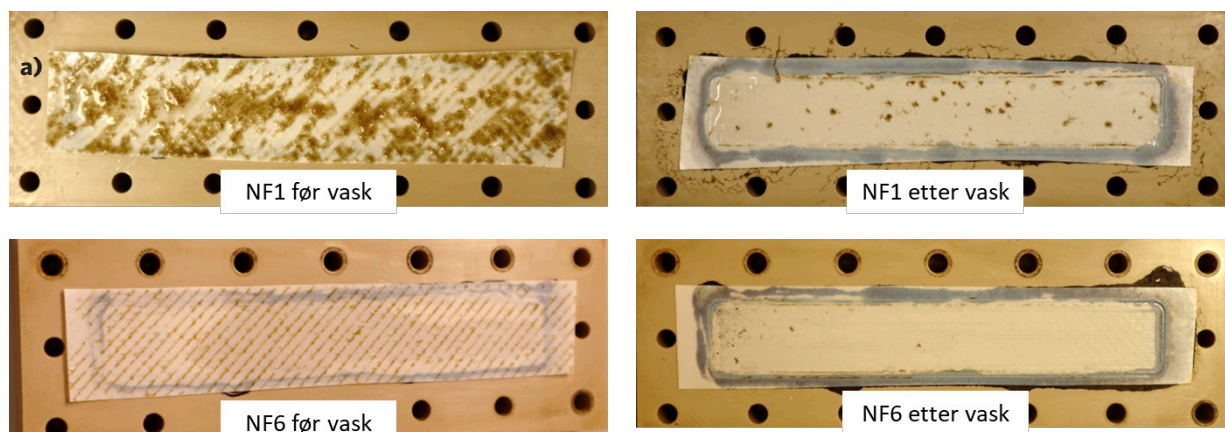
Det er også mulig å bruke membranprøver fra elementene til å utføre permeabilitetsforsøk under kontrollerte betingelser i laboratoriet som beskrevet i kaptiell 6.2. I vårt eksempel ble det tatt ut en membranprøve fra et vilkårlig membranark fra hver av elementene NF1 og NF6. Membranprøvene ble montert i hver sin membran-celle med effektivt areal på 20 x 147 mm. Membran-cellene ble deretter plassert i to identiske test-rigger for

måling av permeabilitet før og etter en gitt membranvask. Figur 5-18 viser målt permeabilitet og normalisert permeabilitet for henholdsvis 10 og 25 °C, der vi kan se at normalisert permeabilitet ved 25 °C for membranprøver fra NF1 og NF 6 ble målt til henholdsvis 3,8 og 8,5 l/(m<sup>2</sup>·time·bar). Dette tilsvarer ca. 40% og 88% av forventet ytelse av en ny membran. Videre kan vi se at det er ingen effekt av spyling med rent vann i 15 minutter med tverrstrømsrate ca 12 cm/s. Vi ser også en moderat effekt av membranvask for membranprøven fra NF1, effekten sees etter vask 1 (eksponering i 1 time) med en økning i permeabilitet fra 3,8 til ca 5 l/(m<sup>2</sup>·time·bar), hvilket tilsvarer ca. 52% av ytelsen til ny membran, mens det ikke ble observert ytterligere effekt av Vask 2 (eksponering i 17 timer) for membranprøven fra NF1. For membranprøven fra NF6 så observerte en at permeabiliteten etter Vask 1 tilsvarer permeabiliteten som forventes for ny membran.

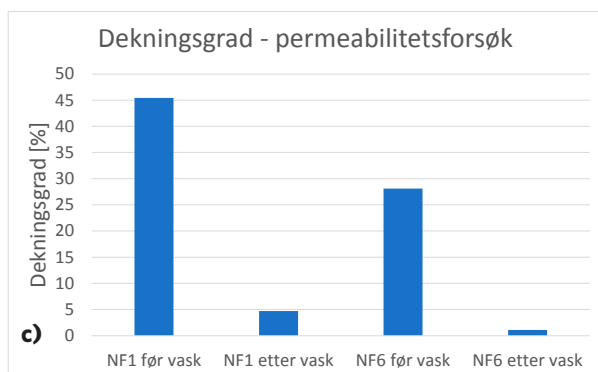
Bilder tatt av membranen før og etter vask er vist i Figur 5-19, og kan brukes til å beregne dekningsgrad av belegget før og etter vask og er et mål på hvor effektiv vasken er. Dekningsgraden er vist i Figur 5-20 og viser at betydelige mengder av belegget er fjernet i vasken.



**Figur 5-18:** Målt permeabilitet og normalisert permeabilitet for henholdsvis 10 og 25 °C for membranprøver fra NF1- og NF6-elementene. Kilde: SINTEF.



**Figur 5-19:** Bilder av membranprøver fra NF1 og NF6 før og etter vask. Foto: SINTEF.



**Figur 5-20:** Beregnet dekningsgrad av belegg på membranprøver før og etter vask i permeabilitetsforsøk. Kilde: SINTEF.

## 5.4. Sjekkliste for utredning av driftsproblemer

### 5.4.1. Sjekkliste - fremskaffelse av dataunderlag

Følgende sjekkliste kan benyttes for å sikre at en fremskaffer relevant informasjon for å utrede årsaks-sammenhenger og foreslå hensiktsmessige tiltak:

- 1) Fremskaff tidsserier fra membranene ble satt inn til dags dato for følgende driftsparametere:
  - a. Styringsparametere:
    - i. Fluks
    - ii. Gjenvinningsgrad
    - iii. Tverrstrømhastighet
  - b. Ytelsesindikatorer:
    - i. Normalisert permeabilitet
    - ii. Normalisert trykkfall
    - iii. Renseeffekt for DOC eller fargetall
- 2) Sammenhold tidsserier fra pkt. 1 med informasjon om driftsrelaterte tiltak og hendelser som omfatter, men ikke begrenses til:
  - a. skifte av råvannskilde
  - b. tidspunkt for hovedvask
  - c. endring i vaskeresepser for hovedvask eller døgn-skylling
  - d. kraftige nedbørshendelser, snøsmelting og flom
  - e. tidspunkt for vår og høstomrøring
- 3) Modeller driftsdata ved oppstart med nye membraner og ved tidspunkt for obduksjon for å fremskaffe profiler fra innløp til utløp for:
  - a. Fluks
  - b. TMP
  - c. Innløpstrykk

- 4) Gjennomfør en utvidet karakterisering av råvannet for å få bedre kunnskap om:
  - a. NOM-karakteristikk
  - b. Mengde og størrelsesfordeling av partikler
  - c. Effekten av forbehandlingstrinnet
  - d. Sesongvariasjoner
  - e. Endringer som følge av vår- og høstomrøring
  
- 5) Utfør obduksjon av det første og bakerste membran-element fra et utvalgt trykkrør for å fremskaffe kunnskap om:
  - a. Mengde belegg og graden av spacerfouling
  - b. Karakteristikk på belegg og partikler som er inkorporert i belegget
  - c. Forskjell i tilstand på membran fra innløp til utløp i samme trykkrør
  - d. Effekt av ulike vaskeløsninger (og prosedyrer) for å fjerne det aktuelle belegget.

#### 5.4.2. Sjekkliste ved driftsutfordringer knyttet til redusert membrantype

Dersom en observerer redusert kapasitet pga. fouling, noe en vil se av utviklingen i normalisert permeabilitet og normalisert trykfall, bør en vurdere:

- 1) Fungerer forfilteret tilfredsstillende?
- 2) Har forfilteret tilstrekkelig kapasitet?
- 3) Er mengde og størrelse på partikler etter forfilteret kartlagt?
- 4) Kan en redusere partikelmengden ved for eksempel å flytte inntaket?
- 5) Er lysåpning på forfilteret tilstrekkelig for aktuell råvannskvalitet?
- 6) Er tverrstrømmen lav?
- 7) Er fluksen for høy?
- 8) Er fluksprofilen bratt, dvs. høye innløpsfluks og lav utløpsfluks?
- 9) Er det mulig å redusere fluksen, enten ved å installere flere membranrør eller ved endre setpunkt for produksjonsnivåer?
- 10) Hva består belegget av, og er vaskekjemikalier for døgnskylling og hovedvask tilpasset karakteristikkene på belegget?

# 6. Design av nanofiltreringsanlegg

## 6.1. Innledning - Design av NF-anlegg

Anleggsdesignet har stor betydning for driftsbetingelsene til membranen, som igjen vil være avgjørende for hvordan membranytelsen vil utvikle seg over tid. Som diskutert i kapittel 4.2 er designvalg knyttet til følgende deler av et vannverk med NF-prosess av stor betydning:

- Råvannskilde
- Forbehandlingstrinn
- Membrantrinn
- Vaske-system
- Styringssystem

I kapittel 6.2-6.6 gis generelle anbefalinger og tips for hva som bør ivaretas i designfasen av et NF-anlegg. Det understrekes at anbefalingene ikke på noen måte er tilstrekkelig underlag for å prosjektere byggingen av et vannverk med NF-prosess.

## 6.2. Valg av råvannskilde

Valg av råvannskilde for et vannverk med NF-prosess bør gjøres med bakgrunn i en kartlegging av karakteristikkene på alternative råvannskilder, beleggdannelsespotensialet til disse, og eventuelle variasjoner i råvannskvalitet i løpet av året.

### 6.2.1. Betydning av råvannskvalitet

Forurensingene i råvann kan grovt sett kategoriseres i følgende hovedgrupper:

- Næringssalter og andre uorganiske salter (oppløste ioner)
- Naturlig organisk materiale (NOM) (løst, kolloidalt og partikulært organisk materiale)
- Silt/leire (uorganisk partikulært materiale)
- Mikroorganismer (bakterier, kiselalger, hoppekreps, m.m.)

Karakteristikken på råvannet vil i stor grad påvirke både potentialet for beleggdannelse på membranen (fouling-potentialet) og kvaliteten på det rensede vannet. Valget av råvannskilde er normalt ikke reversibelt, og er derfor meget viktig. I prinsippet kan råvannskvalitet kun endres ved å endre inntakssted i samme kilde, eller at en bytter vannkilde. Sistnevnte vil ofte innebære bygging av et nytt vannverk. Generelt er det ønskelig å velge en vannkilde der konsentrasjonen av forurensinger er så lav som mulig.

Kartlegging av råvannskarakteristikk i alternative råvannskilder vil konkret gi indikasjon på potentialet for ulike typer membranbelegg, hvilket er viktig med tanke på å vurdere om en membranprosess vil kunne driftes stabilt over tid. Ved å sammenligne mot råvannskvaliteten til eksisterende NF-anlegg hvor en har kjennskap til driftsforløpet så vil en kunne få en god pekepinn på forventet reduksjon i membranytelse.

Karakterisering av råvannet vil også kunne gi kunnskap om blant annet hvor koagulerbart vannet er, hvor god hygienisk kvalitet vannkilden har, potentialet for mikrobiologisk begroing på distribusjonsnettet, potentialet for dannelsen av desinfeksjonsbiprodukter, og innhold av tungmetaller og mikroforurensinger.

Karakterisering av råvannet vil også kunne gi god pekepinn på forventet permeatkvalitet ved valg av renseprosess og eventuelt valg av membrantype.

### 6.2.2. Metoder for kartlegging av råvannskvalitet

Følgende parametere vil være hensiktsmessig å bestemme i forbindelse med utredninger knyttet til valg av råvannskilde:

- Bestemmelse av konsentrasjon av NOM: DOC (konsentrasjon av løst organisk karbon), TOC (konsentrasjon av total organisk karbon), fargetall.
- NOM-karakteristikk: NOM-fraksjonering (konsentrasjonen av ulike NOM fraksjonen), UV254, SUVA, LC-OCD (konsentrasjonen av ulike NOM fraksjonen).
- Bestemmelse av oppløste ioner av metaller: ICP-MS (konsentrasjon av ioner: Al, Si, Fe, Na, K, Ca, Mg, Mn)
- Bestemmelse av næringssalter: spektrofotometri (konsentrasjon av næringssalter).
- Bestemmelse av partikkelinnhold: turbiditet, suspendert stoff (konsentrasjon av partikulært materiale), gløderest (konsentrasjon av uorganisk materiale), SDI (membranspesifikk parameter for beleggdannelse), fraksjonert filtrering med gravimetrisk bestemmelse (bestemmelse av konsentrasjoner av ulike partikkel-fraksjoner, MFI (parameter for bestemmelse av beleggdannelsespotensial knyttet til partikkelstørrelses-fraksjoner)

- Kvalitativ karakterisering av partikler: SEM-EDS (kvalitativ bestemmelse av elementsammensetning av partikler fra SDI eller fraksjonert filtrering.
- Mikrobiologisk begroingspotensiale: BDOC (konsentrasjon av bionedbrytbart organisk karbon),  $ATP_{\text{begroingspotensial}}$  (bestemmelse av mikrobiologisk begroingspotensial)
- Forekomst av patogene organismer: koliforme bakterier, termokoliforme bakterier, E-coli, andre spesifikke patogene mikroorganismer.
- Øvrige parametere: pH, alkalitet og ledningsevne
- Temperaturprofil

Overnevnte parametere vil gi informasjon som kan benyttes til å vurdere forskjeller mellom alternative råvannskilder, variasjoner over året i en vannkilde, samt egnetheten for rensing av råvannet med bruk av ulike renseteknologi, inklusive ulike membranprosesser og membrantyper. Eksempler på resultater og indikasjon av nytteverdi fra overnevnte metoder er illustrert ved bruk av eksempler i kapittel 5.3.3.

### 6.2.3. Laboratorietester og pilotering

Pilottesting innebærer at det utføres testforsøk med aktuelt råvann, normalt ved vannverket. Typisk vil en ved pilotering teste ett fullskala membranelement, og ikke flere elementer i serie som tilfellet vil være i et fullskalaanlegg. Pilottesting vil kunne gi supplerende informasjon til analysen av råvannet. Først og fremst har en mulighet til å få ytterligere informasjon om beleggdannelsepotensialet til det aktuelle råvannet, og et mål på hvor raskt ytelsen vil falle ved å overvåke normalisert permeabilitet og normalisert trykkfall. En kan også få muligheten til å bekrefte effekten av døgnskylling og eventuelt hovedvask om forsøket pågår lenge nok. Pilotering kan også være nyttig for å beslutte hvilken membrantype som er mest velegnet for det aktuelle råvannet. I tillegg til å gi supplerende kunnskap om beleggdannelsepotensialet til råvannet fås en

indikasjon på forventet permeatkvalitet for den membrantypen som blir pilotert.

For at pilotforsøk skal ha god overføringsverdi er det viktig å sikre at valg av styringsparametere er relevante. Fødemengden må være i samme størrelsesorden som i et fullskalaanlegg, selv om det er kun ett element i en pilotrigg, og opp til 6 elementer i serie i et fullskalaanlegg. Dette vil sikre at tverrstrømhastigheten blir den samme i piloten som den vil være i fullskalaanlegget. Gjenvinningsgraden bør ligge i samme område som i fullskalaanlegget. Når det gjelder vannfluks må en ta utgangspunkt i hvilken posisjon i trykkrøret i fullskalaanlegget en ønsker å simulere belastningen for. Dersom en piloterer med samme fluks som gjennomsnittlig designfluks for fullskalaanlegget vil en simulere belastningen for en posisjon ca. midt i trykkrøret i fullskalaanlegget. Dersom en ønsker å simulere belastningen til frontelementet i fullskalaanlegget må en pilotere med høyere fluks. Hvilken fluks som tilsvarer betingelsene fremst i trykkrøret avhenger av blant annet av membrantype, og må beregnes ved bruk av en egent transportmodell.

Et annet viktig aspekt for å sikre god overføringsverdi av pilotforsøk er å etterstrebe at effekten av forbehandlingen før pilotanlegget er tilsvarende som den vil være i fullskalaanlegget. Dette er spesielt viktig for at den observerte utviklingen av normalisert trykkfall under pilotering skal være relevant. Dersom forbehandlings-trinnet før piloten er mer eller mindre effektiv, vil det medføre at partikkelbelastning på membranen ikke vil være representativ for situasjonen i fullskalaanlegget. Dette er normalt ikke en utfordring i forbindelse med pilotering ved eksisterende vannverk der råvannsinntak og forbehandling allerede er etablert.

For å framskaffe mer kunnskap om egnet resept for døgnskylling og hovedvask kan det i tillegg til pilotering være nyttig å utføre langtids lab-tester med små membranprøver der en benytter aktuelt råvann.

## 6.3. Design av forbehandlingstrinnet

Forbehandlingstrinnet i vannverk med NF har typisk som formål å fjerne partikler over en viss størrelse ved bruk av ulike typer selvspylende filtre eller utskiftbare stavfiltre med lysåpning i størrelsesorden 50  $\mu\text{m}$ . Forbehandlingen har da som mål å fjerne partikulære fraksjoner som holdes tilbake av filteret. Mindre partikler vil typisk ikke fjernes, hvilket betyr at forbehandlingstrinnet ikke vil bidra til fjerning av NOM

eller andre forurensinger som finnes i råvannet som løste forbindelser.

En effektiv forbehandling vil derfor primært resultere i en redusert partikkelbelastning inn på membrantrinnet. Lav partikkelbelastning antas å være spesielt viktig for å unngå hurtig trykkfallsøkning som følge av at partikler samler seg i spaceren og bidrar til redusert strømnings-

tverrsnitt. Partikkelbelastningen inn på membrantrinet vil også påvirke belegg-dannelsen på membranoverflaten som bidrar til å redusere permeabiliteten, men her antas NOM å spille en viktigere rolle enn partikler.

Design av forbehandlingstrinet bør sees i direkte sammenheng med kvaliteten på råvannet til den aktuelle kilden. Generelt kan en si at et råvann med mye forurensninger vil kreve mer effektiv forbehandling enn et råvann med lite forurensninger. Som allerede diskutert er det spesielt partikulære fraksjoner over en viss størrelse som det er realistisk å kunne ta ut i et forbehandlingstrinnet en bør ha fokus på. Kartleggingen av råvannskvalitet og innholdet av partikler og størrelse på disse er derfor viktig. Siden konsentrasjonen av partikler i råvann normalt er svært lav, men likevel ikke lavere enn at det kan skape utfordringer i forhold til membrandrift, så kan det være utfordrende å fastslå forventet partikkelbelastning for ulike størrelsesfraksjoner kun basert på råvannskarakterisering. Som diskutert i kapittel 6.2.3 vil pilotforsøk være nyttig for å med større sikkerhet fastslå både potensialet for trykkfallsøkning knyttet til partikkelinnholdet i råvannet, og effekten forbehandlingstrinet gitt alternative valg av forfilter.

I praksis vil det være vanskelig å simulere effekten av forbehandlingstrinet ved pilotering siden en må velge andre filtertyper tilpasset råvannsmengdene i et pilotanlegg. En kan likevel teste effekten av å ta ut ulike

partikkelfraksjoner ved å benytte forfiltere med ulike filtreringsgrad.

Dersom råvannet har lav konsentrasjon av partikler i området under 50  $\mu\text{m}$  vil et standard forbehandlingdesign med selvrensende filtre med lysåpning på 50  $\mu\text{m}$  antakelig fungere godt. Men dersom råvannet inneholder betydelige mengder partikler f.eks. i størrelsesområde 10-50  $\mu\text{m}$  vil disse slippe forbi et standard forfilter og forårsake en raskere økning i trykkfallet over membrantrinet. En bør i et slikt tilfelle velge et forfilter som har bedre separasjonsegenskaper for de aktuelle størrelsesområdet enn et 50  $\mu\text{m}$  filter vil ha. Det finnes selvspykende filtre og utskiftbare stavfiltere med mindre lysåpning som kan være egnet. I Skottland finnes det vannverk med NF-prosess som benytter sandfiltere for å bedre partikkelfjerning i størrelsesområdet <50  $\mu\text{m}$ . Blant annet i Sverige finnes eksempler på at UF benyttes som forbehandling i NF-anlegg.

#### **Designtips**

*Det er spesielt partikulære fraksjoner over en viss størrelse som det er realistisk å kunne ta ut i et forbehandlingstrinnet en bør ha fokus på. Kartleggingen av råvannskvalitet og innholdet av partikler og størrelse på disse er derfor viktig.*

## 6.4. Design av membrantrinet

Prosjektering av membranlegg tar utgangspunkt i en designbasis som igjen avhenger av designverdier for styringsparameterne. Disse designverdiene er blant annet utgangspunkt for å bestemme antall membran-elementer, nødvendig fødetrykk, kapasitet på sirkulasjonspumpen, etc. Valget av designverdier for styringsparameterne vil også ha stor betydning for belastningen som membranen vil utsettes for, og dermed for potensialet for belegg-dannelse. Det er svært viktig at valgt designbasis ikke resulterer i ugunstige driftsbetingelser. Designverdier for styringsparameterne bør være innenfor følgende anbefalinger:

- Fluks: Bør ikke overstige 13 l/(m<sup>2</sup>·h) (i gjennomsnitt for trykkørret) ved normalt driftsnivå. Bør ikke overstige 15 l/(m<sup>2</sup>·h) (i gjennomsnitt for trykkørret) ved høyeste driftsnivå.
- Gjenvinningsgrad: Bør ikke overstige 70%.

- Tverrstrømhastighet: Bør være minimum 12 cm/s (beregnet for åpen kanal).

I forbindelse med drift av NF-anlegg så benyttes globale styringsparametere, det vil si gjennomsnittlige verdier for fluks, gjenvinningsgrad og tverrstrømhastighet som gjelder for hele membrantrinet. Dette er en forenkling som fungerer greit for praktiske formål ved driftsoppfølging, men som kan bli litt for upresis i forbindelse med design av membranlegget. Årsaken er at for NF-prosessen så vil endringen i enkelte av styringsparameterne lokalt langs trykkørret være betydelig. Ved design av NF-anlegg anbefales det å beregne de lokale belastningsforholdene på membranen slik at prosjekterende/vannverkseier kan ta mest mulig gunstige designvalg. Det bør generelt tilstrebes å unngå bratte fluksprofiler fra innløp til utløp siden dette medfører ujevn belastning på membranene og unødig rask reduksjon i ytelse for de fremste elementene i trykkørret. Fluksprofilen i et trykkør

bestemmes i hovedsak av henholdsvis permeabiliteten til valgt membrantype og lengden på trykkrøret.

Generelt kan en si at membranprodukter med høy permeabilitet vil resultere i bratte fluksprofiler og visa versa, gitt at lengden på trykkrøret er den samme. Årsaken er at jo høyere permeabiliteten til membranen er, jo lavere vil det nødvendige innløpstrykket være. Dermed vil høy permeabilitet resultere i at trykkfallet fra innløp fra utløp kan bli relativt stort sammenlignet med innløpstrykket.

For å unngå bratte fluksprofiler kan en i designfasen redusere lengden på trykkrøret dersom det benyttes membraner med høy permeabilitet som i utgangspunktet vil resultere i bratte fluksprofiler dersom en benytter trykkrør med 6 m lengde.

Prinsipielt kan en designe for å benytte ulike membranprodukter i forskjellige posisjoner i et trykkrør. Fordelen med dette ville vært at en ved å velge membraner med gradvis økende permeabilitet bakover i trykkrøret, så kan oppnå en jevnere fluksprofil. Dette skyldes at selv om TMP gradvis reduseres fra innløp til utløp som følge av trykkfallet, så kompenseres dette ved at en benytter membraner med gradvis høyere permeabilitet bakover. En vil da oppnå at produksjonen endres lite fra element til element, altså en relativt flat fluksprofil med jevn belastning på elementene gjennom trykkrøret. En slik strategi er benyttet i omvendt osmoseanlegg for å skreddersy produktkvalitet og optimalisere fluksprofiler ved avsalting av sjøvann. Ulempen med en slik strategi er at det er få membranprodukter for fargefjerning som en kan velge mellom. Spesielt dersom en forutsetter at membranene skal være av samme materiale, noe som bør etterstrebes for å unngå utfordringer med at ulike

membranmaterialer har forskjellig kompatibilitet for vaskekjemikaler.

Et svært sentralt punkt for vellykket design av NF-anlegg er at forventet nedgang i membranytelse legges til grunn ved dimensjonering av både sirkulasjonspumpe og innløpsspumpe. Det er i utgangspunktet ikke utfordrende om permeabiliteten reduseres til 30 % av startverdi dersom dette er tatt høyde for i anleggsdesignet og at driftsoperatøren til enhver tid har tilstrekkelig fødestrykk tilgjengelig til å opprettholde produksjonen selv vinterstid med lav vanntemperatur.

#### **Designtips**

*Et svært sentralt punkt for vellykket design av NF-anlegg er at en legger forventet nedgang i membranytelse til grunn ved dimensjonering av både sirkulasjonspumpe og innløpsspumpe. Dette vil sikre at driftsoperatøren til enhver tid har tilstrekkelig fødestrykk tilgjengelig til å opprettholde produksjonen selv vinterstid med lav vanntemperatur.*

Som diskutert i kapittel 4.6.5 kan permeabiliteten forventes å avta raskere de første 6-12 månedene, noe som skyldes at NOM adsorberes til membranoverflaten. Etter et forholdsvis hurtig fall i permeabilitet innledningsvis vil fallet i ytelse etter hvert stabilisere seg, forutsatt at anlegget driftes under gunstige forhold blant annet med tanke på effektiv døgnskylling og hovedvask, og at hovedvask utføres tidlig nok. Hvor mye og hvor raskt ytelsen til membranen kan forventes å falle vil avhenge av membranmateriale, ref. kapittel 4.6.5.

For å ha muligheten til å overvåke endringer i membranens renseseffekt og hvorvidt den hygieniske barrieren er intakt bør NF-anlegg bygges med muligheten for å ta ut permeatprøve fra hvert enkelt trykkrør.

## 6.5. Design av vaskesystem

På overordnet nivå så består vaskesystemet i et membranlegg av tanken for vaskeløsning, sirkulasjonspumpen, og ventiler for å kunne kjøre vaskeløsning og permeat til avløp, eller eventuelt til nøytraliseringstank om det er behov for det. Vasketanken bør være utstyrt med et omrøringssystem for effektiv innblanding av vaskekjemikalier, og varmelement for å sikre at en kan nå ønsket temperatur for mest effektiv vask (ca 35 °C) selv ved lave vanntemperaturer. En bør også kunne nå ønsket temperatur uten å være avhengig av å benytte sirkulasjon til enhver tid under vask.

Vedrørende sirkulasjonspumpen er det viktig at denne dimensjoneres for å levere ønsket strømningsmengde ved de trykk som kan forventes også når membranene har vært i drift i flere år. Dersom sirkulasjonspumpen underdimensjoneres slik at sirkulasjonshastigheten må reduseres etter hvert som det dannes belegg i konsentratkanalen (både ved ordinær drift og i forbindelse med vask), vil effekten av vask kunne reduseres.

Ved gjennomføring av hovedvask er varigheten til vasken avgjørende for resultatet. Ofte anbefales en

virketid til vaskekjemikaliene på minimum 12 timer. I designfasen er det derfor viktig at en planlegger størrelsen på rentvannstanker slik at en har tilstrekkelig bufferkapasitet til å tåle minimum 12-15 timer nedetid slik at en kan utføre membranvask med lang nok virketid.

#### **Designtips**

*I designfasen er det viktig at en planlegger størrelsen på rentvannstanker slik at en har tilstrekkelig bufferkapasitet til å tåle minimum 12-15 timer nedetid slik at en kan utføre membranvask med lang nok virketid.*

## 6.6. Driftsovervåkning

I tillegg til de ulike hovedtrinnene som NF-anlegget består av må anlegget instrumenteres slik at driftsoperatøren får tilgang til nødvendige driftsdata for å kunne overvåke hvordan ytelsen til membranene utvikler seg over tid. Hvilke prosessvariabler som bør overvåkes i et NF-anlegg er diskutert i kapittel 4.3.

De fleste nye anlegg i dag etableres med en SCADA som ivaretar både styringen av anlegget, logging av prosessdata, samt nødvendig prosessering og visning av disse. Mange, særlig eldre anlegg, mangler logging av prosessvariabler. Dette innebærer at det må føres logg med manuell avlesning av relevante prosessdata. Deretter må avleste prosessdata behandles slik at en får beregnet ytelsesindikatorer og styringsparametere, noe som i lengden kan være forholdsvis tungvint.

Det finnes også eksempler på eldre anlegg som ikke er instrumentert i henhold til anbefalingen i kapittel 4.3.

Driftsoperatøren vil da ha begrenset med muligheter for å kunne overvåke prosessen og utviklingen av ytelsen til membranene. I slike tilfeller bør vannverket bygge om anlegget med tilstrekkelig instrumentering av trykk, strømningsmengder og temperatur slik at tilstandsindikatorer og styringsparametere kan beregnes.

Generelt anbefales det at nye anlegg bygges med SCADA som ivaretar både styring av prosessen, logging av prosessdata og visning av relevante prosessvariabler.

#### **Designtips**

*Det anbefales at nye anlegg bygges med SCADA som ivaretar både styring av prosessen, logging av prosessdata og visning av relevante prosessvariabler.*

## 6.7. Sjekkliste design av anlegg

- 1) Valg av råvannskilde og design av forbehandling
  - a. Råvannskvaliteten må kartlegges for å bestemme variasjonsområdet i kilden over året for standard vannkvalitetsparametere, f.eks. fargetall, TOC, turbiditet, jern, aluminium, silisium.
  - b. Partikkelmengde og ulike størrelsesfraksjoner bør bestemmes for normalforhold og ved hendelser som vår- og høstomrøring i kilden og/eller snøsmelting/flom/kraftig nedbør. f.eks. ved bruk av fraksjonert filtrering og gravimetrisk analyse, måling av MFI ved bruk av filtre med ulike porestørrelser. SEM-analyser av filtre vil gi kvalitativ informasjon om type partikler.
  - c. Det bør utføres en karakterisering av NOM for å skaffe informasjon om relativt innhold av ulike fraksjoner.
  - d. Pilotforsøk har normalt ikke vært noen del av kartleggingen før anskaffelse, delvis fordi det ofte er snakk om små vannbehandlingsanlegg. Pilotforsøk bør vurderes, spesielt dersom råvannskarakteriseringen avdekker at partikler som typisk ikke fjernes av standard forbehandling (50  $\mu\text{m}$  selvspylende filter) kan være en utfordring. Pilottesting må inkludere relevant forbehandling (partikkelfjerning).
  - e. Dersom råvannsanalyser og eventuelt pilottesting indikerer betydelig mengde partikler  $<50 \mu\text{m}$  bør det vurderes å designe for en mer effektiv forbehandling en standard 50  $\mu\text{m}$  selvspylende filter.
- 2) Membrantrinn
  - a. Er designverdier for styringsparametere innenfor anbefalte områder?

- b. Er det tatt høyde for forventet fall i permeabilitet og trykkfall i løpet av membranens levetid? Dvs. er det dimensjonert for tilstrekkelig fødestrykk til å produsere i henhold til designbasis ved laveste vanntemperatur og når membranene har vært i drift i 5-10 år.
- c. Er lengde på trykkrør tilpasset valgt membranprodukt?
- d. Er det tilrettelagt for prøvetaking av permeat fra hvert enkelt trykkrør?

### 3) Vaskesystem

- a. Er det designet med tilstrekkelig rentvannsbuffer til å tillate minimum 12-14 timer nedetid for gjennomføring av hovedvask?
- b. Er det tilrettelagt for effektiv oppvarming av vaske-løsning til ønsket vasketemperatur (35°C)?
- c. Er det tilrettelagt for effektiv innblanding av pulverbaserte vaskekjemikalier?
- d. Har sirkulasjonspumpen tilstrekkelig kapasitet til å sikre ønsket strømningshastighet under vask ved forventet trykkfall i løpet av membranenes levetid?
- e. Er det planlagt for avhending av vaskeløsninger fra døgnskylning og hovedvask?
- f. Er det behov for nøytralisering av vaskeløsning for hovedvask før utslipp til resipient/påslipp til avløpsnett?

### 4) Styringssystem

- a. Måles alle relevante prosessdata (trykk, strømningsmengder og temperatur)
- b. Logges alle relevante prosessdata
- c. Presenteres tidsserier for alle prosessdata og beregnede styringsparametere oversiktlig i en SCADA-løsning?
- d. Presenteres tidsserier for normaliserte ytelsesindikatorer oversiktlig i en SCADA-løsning?
- e. Er det mulighet for å inkludere hensiktsmessige alarmer, f.eks. ved overskridelse av definerte grenseverdier for relevante prosessdata og styringsparametere/ytelsesparametere?

# Referanser

- ASTM D4516-19a, Standard Practice for Standardizing Reverse Osmosis Performance Data** (2019)
- Eikebrokk, B., Thelin, W.R., Sivertsen, E., Zahlsen, K., Hageskal, G. og Vogt, R.D.** (2021) *MEMiNOR*  
- Membranfiltrering for fjerning av Naturlig Organisk Materiale i Nordiske drikkevann, Norsk Vann rapport 265, ISSN 1890-8802, Hamar
- Eikebrokk, B., Zahlsen, K., Hageskal, G., Guldborg, T. og Løvmo, C.** (2023) *LOSiNOR – Lukt- og smaksproblemer i norsk drikkevann*, Norsk Vann rapport 278, ISSN 1890-8802, Hamar
- Folkehelse** (1994), *Membranfiltrering av humusvann – Veiledning og brukserfaring*, Teknisk kjemi – SINTEF
- Golan, D.** (2019) *Robust natural organic matter removal from Scottish water sources of variable DOC content*, PhD-thesis, Cranfield Univeristy
- Heimstra, P., Van Passen, J., Reitman, B. & Verdoou, J.** (1999) *Aerobic versus anaerobic nanofiltration: fouling of membranes*, [Reserarchgate.net](https://www.researchgate.net).
- Hem, L. J.** (2008). *Nanofiltration as a treatment barrier against pathogens*. Techneau-rapport.
- Hem, L. J., & Thorsen, T.** (2008). *Driftserfaringer med membranfiltrering*, Norsk Vann rapport 160, Hamar
- MicrodynNadir** (2020) *Membrane Cleaning Guide – Cellulose Acetate Elements*, Technical service guide, Form no: TSG-C-005, revision date: 02/05/2020
- Mulder, M.** (2012), *Basic Principles of Membrane Technology*, ISBN: 9789400917668, Springer.
- Nitto Group Company** (2020) *Foulants and Cleaning Procedures for composite polyamide RO/NF Membrane Elements*, Technical Service Bulletin, TSB107.27, revision date: May 2020
- Thelin, W.R. og Sivertsen, E.** (2020) *MEMiNOR - Rapportering av membranrelaterte aktiviteter*, SINTEF-rapport 2020:00874, ISBN 978-82-14-06546-6, Trondheim
- Thorsen, T.** (1999). *Fundamental studies on membrane filtration of coloured surface water*. Dr. tech avhandling, NTNU, Tronhheim
- Thorsen, T.** (2004). *Concentration polarization by natural organic matter (NOM) in NF and UF*. Journal of Membrane Science, 233, 79-91.
- Thorsen, T., & Fløgstad, H.** (2006). *Nanofiltration in drinking water treatment - Literature Review*. Techneau-rapport.
- Wittman, E., Sivertsen, E. & Thorsen, T.** (2021). *Water Treatment*. In A. Shaefer and A. G. Fane (Eds.), *Nanofiltration - Principles, Applications and New Materials* (2nd ed.), ISBN: 978-3-527-34690-5Wiley VCH

# TIDLIGERE UTGITTE RAPPORTER

2024	286	Veiledning i bruk av infiltrasjon i vannforsyning	245	Veiledning for tilstandsvurdering av infiltrasjonssystemer	195	Sikkerhet og sårbarhet i driftskontrollsystemer for VA-anlegg	
	285	Kartlegging og inndeling av sprinkleranlegg i farekategorier	244	Veiledning i utarbeidelse av prøvetakingsplan for drikkevann	B19	Varmpumper i drikkevannsforsyningssystem	
	284	Mikroforurensninger i avløpsvann - resultater fra innløp- og utløpsvann fra 19 norske avløpsrenseanlegg	243	Verdiforvaltning av vann- og avløpsinfrastruktur	B18	Kranvannets kokebok for kommunikasjon	
2023	283	Organiske miljøgifter i norsk avløps slam - resultater fra undersøkelsen i 2022/2023	242	Praktiske råd ved valg av ledningsmateriale	B17	Investeringsbehov i vann- og avløpssektoren	
	282	Taknedløp fra kompakte tak - mulighet for utkast til terreng	241	Mapping microplastic in Norwegian drinking water	194	Energiriktig design og prosjektering av avløpsrenseanlegg	
	281	Mulige organisasjonsformer for den kommunale vann- og avløpssektoren	240	UV-desinfeksjon av drikkevann	193	Veiledning i dimensjonering og utforming av VA-transportsystem	
	280	Fremtidens vann- og avløpssystem	B22	Vann og avløp i arealplanlegging og byggesaker	192	Veiledning for valg av riktige sensorer og måleutstyr i VA-teknikken	
	278	LOSINOR - Lukt- og smaksproblemer i norsk drikkevann	239	Beregning av bærekraftig lekkasjenivå	191	Rettigheter til uttak av vann til allmenn vannforsyning	
	C16	Stikkledninger i varerør	238	Informasjonssikkerhet og skybaserte tjenester	190	Klimatilpasningstiltak innen vann og avløp i kommunale planer	
	277	Nasjonal strategi for behandling og disponering av avløpsslam	237	Dataflyt for GIS-informasjon i VA-prosjekter	188	Veiledning for drift av koaguleringsanlegg	
	276	Lange pumpeledninger for avløp på land og i sjø	236	Akseptkriterier - Vurdering av nye og nyrenoverte avløpsledninger ved rørispeksjon	C8	Omdømmeplattform og -strategi	
2022	275	Mikroforurensninger og legemidler i avløpsvann	235	Dataflyt	2011	187	Kommunal overtakelse av vannverk organisert som andelslag eller samvirkeforetak
	274	Korrosjonsbeskyttelse - erfaring og ny kunnskap	234	Rørispeksjon av hovedledninger for vann og avløp		186	Veiledning i omorganisering av andelsvannverk til samvirkeforetak
	273	Veileder i samfunnsøkonomiske analyser for vannbransjen	233	Veiledning for bruk av betongrør og kummer		185	Fett i avløpsnett. Kartlegging og tiltaksforslag
	272	Sikker utforming av åpne overvannsløsninger	232	Plastrør for vannforsyning og avløp: Hvordan skal vi oppnå minst 100 års levetid?		184	Tilsyn med utslipp fra avløpsanlegg innen kommunens myndighetsområde
	271	Åpen fordrøyning - Etablering av anlegg for permanente og midlertidige vannspeil med dybde over 20 cm	231	NOMiNOR: Natural Organic Matter in drinking waters within the Nordic Region		183	Veiledning om regulering av VA-tjenester til næringsmiddelindustri
	C15	Digitalisering av VA-sektoren i Norge - status, utfordringer og behov	230	NOMiNOR: Naturlig Organisk Materiale i Nordiske drikkevann		182	Prøvetaking av avløpsvann og slam
	270	Helsemessig sikker drift av vannledningsnettet - prosedyrer og anbefalinger	229	Sikring av vannforsyning mot tilsiktede uønskede hendelser		181	Veiledning i bygging og drift av drikkevannsbasseng
	269	Risikovurdering av bergsprengte drikkevannsmagasiner	228	Tilførsel av industrielt avløpsvann		180	Fjernavlesning av vannmålere
	268	PFAS i råvann og drikkevann fra Norge	227	Beregning av forurensningsutslipp fra avløpsanlegg		179	Veiledning i utarbeidelse av kommunale gebyrforskrifter for vann og avløp
	267	Veiledning for utarbeidelse av kommunale forskrifter på avløpsområdet	226	Tømming av slam		B16	Veiledning for kartlegging av energibruk i VA-sektoren
2021	266	Vannbransjens erfaringer med kommunesammenslåinger	225	Trykkavløp i spredtbygd og urbane strøk	B15	Vannforskritens økonomiske konsekvenser for kommunesektoren og avløpsanleggene	
	265	MEMiNOR: Membranfiltrering for fjerning av Naturlig Organisk Materiale i Nordiske drikkevann	224	Eierskap til stikkledninger	C7	Forvaltningspraksis ved norsk damsikkerhet	
	264	Alternativ til akkreditert prøvetaking	223	Finansieringsbehov i vannbransjen 2016 - 2040	2010	178	Grunnundersøkelser for infiltrasjon - mindre avløpsanlegg
	263	Trykkoptimalisering på vannledningsnettet - beste praksis	222	Dokumentasjon av utslipp fra avløpsnettet		177	Drikkevannskvalitet og kommende utfordringer - problemoversikt og status
	B27	Forurensning i overvann fra urbane flater - vannmiljø og rensesiltak	221	Smart ledningsfornyelse - bruk av NoDig-metoder		176	Statlige gebyrer og avgifter på de kommunale VAR-tjenestene
	262	Undersøkelser som grunnlag for valg av avløpsløsning	B21	Utvikling av studietilbud i bachelor i vann- og miljøteknikk		175	Vann og avløp for nye i bransjen - læreplan. E-læring og samlinger
	261	Omfillingsmasser	B20	Norske tall for vannforbruk med fokus på husholdningsforbruk		174	Hygienisering av avløpsslam. Langtidslagring og enkel rankekompostering. Resultater fra 3 års valideringstesting
	260	Innovative anskaffelser i vannbransjen	220	Kritiske ledninger for vann og avløp - klassifisering og tiltaksvurdering		173	Veiledning for bruk av støpejernsrør
	259	Kommunalt finansieringsbehov i vannbransjen 2021 - 2040	219	Eksempler på implementering av bærekraft i vannbransjen		B14	Klimatilpasningstiltak i VA-sektoren - forprosjekt
	258	Rekutteringsbehov i vannbransjen - status og prognoser 2020 - 2050	218	Vann til brannsløkking og sprinkleranlegg		B13	Silslam - mengder, behandlingstilstander og bruksområder. Forprosjekt.
257	Etablering og drift av mindre avløpsanlegg	217	Videreutvikling av beregningsmetodikk for gjenanskaffelsesverdi og investeringsbehov	2009		172	Trykktap i avløpsnett
256	Veiledning for dimensjonering av avløpsrenseanlegg	216	Tilbakestrømssikring - veiledning til vannverkseiere			171	Erfaringer med lekkasjekontroll
255	Bærekraftig fremmedvannandel - Modell for vurdering av riktig nivå	214	Forslag til ny sektorlov for vann tjenester		170	Veileder til god desinfeksjonspraksis	
254	Forvaltning av nedbørsfelt for overflatevannkilder	213	Sikkerhetsstyring for vannbransjen		169	Optimal desinfeksjonspraksis fase 2	
B26	Kunnskapsbehov innen overvann og klimatilpasning	212	Veiledning for dimensjonering av vannbehandlingsanlegg		168	Veiledning for dimensjonering av avløpsrenseanlegg	
B25	Forprosjekt - Digital Vannstatistikk	211	Erfaringer med ozon-biofiltrering for behandling av drikkevann		167	Veiledning for kjøp av VA-kjemikalier	
253	Mikroplast i avløpsvann, avløpsslam og jord	210	Veiledning for praktisering av selvkost		166	Tiltak for å bedre fosforfjerningen på kjemiske renseanlegg	
252	Kummer - Klassifisering og tilstandsvurdering	2014	209		Veiledning i mikrobiell barriere analyse	165	Innsamlingsverktøy for vedlikeholdsdata
B24	Primærrens - Status og rensesiltak 10 år etter		208		Sikring av kvalitet på ledningsanlegg	B12	Drikkevann i media
C14	Bærekraftig fornyelse av ledningsnettet		207		Stikkledninger - ansvar og teknisk utforming	2008	164
251	Klimagassutslipp, veiledning for vannbransjen		206	Biostabilitet i drikkevannnett	163		Veiledning for innhenting og evaluering av tilbud på analyseoppdrag
250	Kommunens roller, rettigheter og fremgangsmåter i private utbyggingsområder		205	Bærekraftig forvaltning av VA-tjenestene	162		Veiledning i klimatilpasset overvannshåndtering
249	Veiledning i nødvannforsyning		204	Åpne flomveger i bebygde områder	161		Helsemessig sikkert vannledningsnett
B23	Evaluering av Norsk Vanns prosjektsystem		203	Fra driftsassistanser til regionale vannassistanser	160		Driftserfaringer med membranfiltrering
248	Organic Pollutants in Norwegian Wastewater Sludge		202	Microbial barrier analysis (MBA) - a guideline	159		Håndbok i kildesporing i avløpsssystemet
247	Beste praksis for HMS-arbeid i vannbransjen		201	Anskaffelser i vannbransjen	158		Termoplastrør i Norge - før og nå
246	Regulering og organisering av vann- og avløpssektoren i utvalgte europeiske land		200	Håndtering av overvann fra urbane veger	B11		Økonomiske forhold i interkommunalt VA-samarbeid - praksis og kjøreregler
2018	245	Veiledning for tilstandsvurdering av infiltrasjonssystemer	199	Etablering av gode VA-løsninger i spredt bebyggelse	B10		Vannkilden som hygienisk barriere
	244	Veiledning i utarbeidelse av prøvetakingsplan for drikkevann	198	Organiske miljøgifter i norsk avløpsslam - Resultater fra undersøkelsen i 2012/13	B9		Utvikling av et system for spørreundersøkelser blant VA-kundene
	243	Verdiforvaltning av vann- og avløpsinfrastruktur	197	Avløpsanlegg Vurdering av risiko for ytre miljø			
	242	Praktiske råd ved valg av ledningsmateriale	196	Veiledning i tilstandskartlegging og fornyelse av VA-transportsystemer			



Norsk Vann BA, Vangsvegen 143, 2321 Hamar  
Tlf: 62 55 30 30 E-post: [post@norsk vann.no](mailto:post@norsk vann.no)  
[www.norsk vann.no](http://www.norsk vann.no)