Karakterisering av NOM vid dricksvattenproduktion

Elin Lavonen

Forsknings- och utvecklingsingenjör, kommunalförbundet Norrvatten

Professor of Practice, Aalto-universitetet

Vannprisseminariet 2026
2026-10-22
Oslo

Innehåll

Introduktion

- Vad är NOM?
- Vilka problem kan NOM skapa vid dricksvattenproduktion?
- Hur kan man mäta NOM?

Rening av NOM

- Reningstekniker för borttagning av NOM
- (Selektiv) borttagning av NOM vid fällning och membranfiltrering

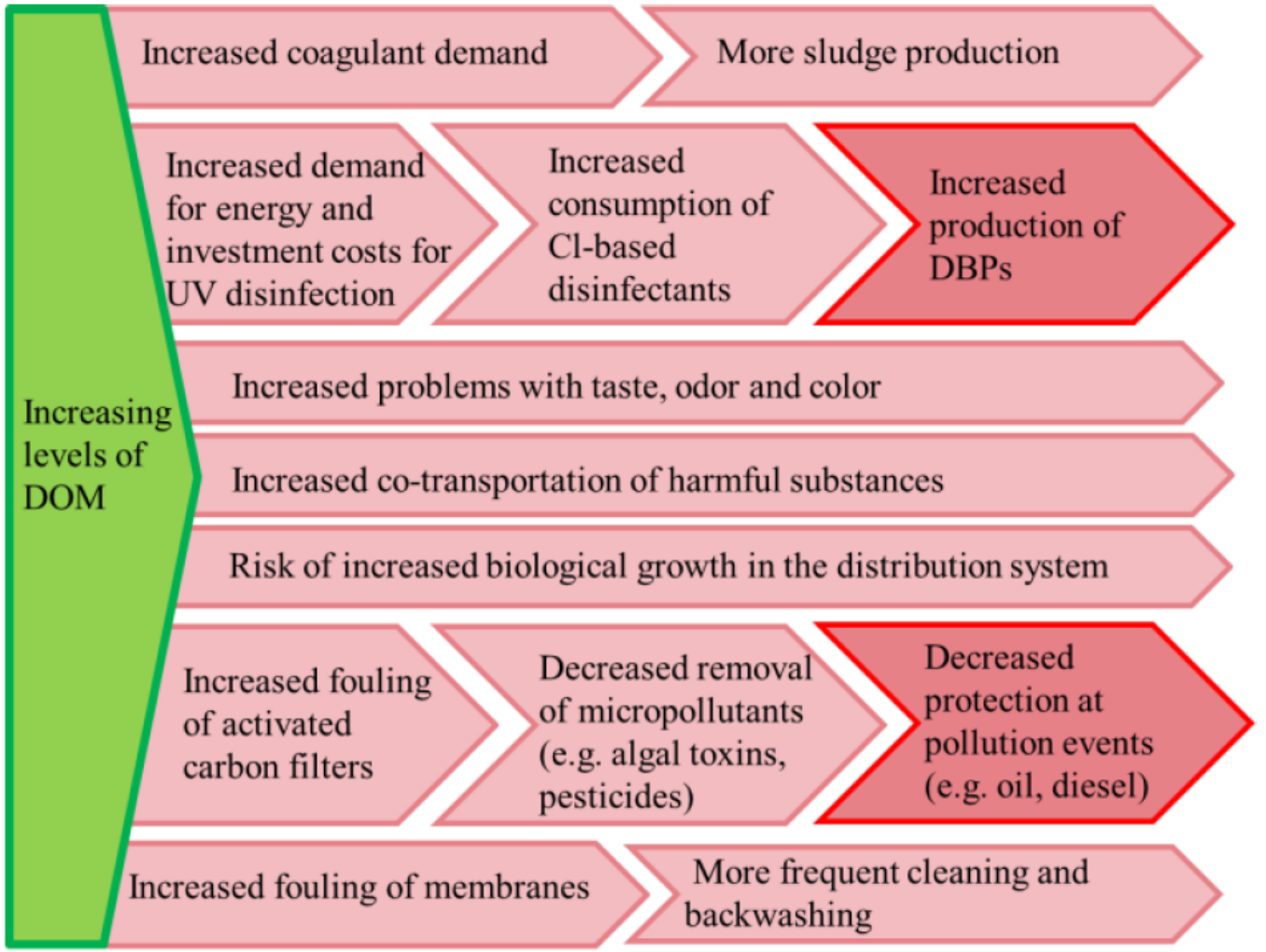
Negativa effekter från NOM

- Fouling av membran
- Biostabilitet
- Bildning av DBPs

Vad är naturligt organiskt material (NOM)?

- Heterogen **komplex blandning** av tusentals olika organiska molekyler (C, H, O, N, P, S)
- **Nedbrytningsprodukter** från växter och djur
- ”Soil organic matter” (SOM) blir lösligt genom oxidation och transporteras till vattendrag och sjöar (terrestert/**alloktont** NOM)
- Produktion av NOM inom sjöar (in-lake produced/algal-derived/**autoktont** NOM)
- **Omvandling** av NOM inom sjöar – (foto)oxidation, selektiv borttagning, produktion/konsumtion/nedbrytning

Effekter av NOM vid dricksvattenproduktion



Lavonen, 2015

Hur kan man mäta NOM?

Mängd – hur mycket tas bort?

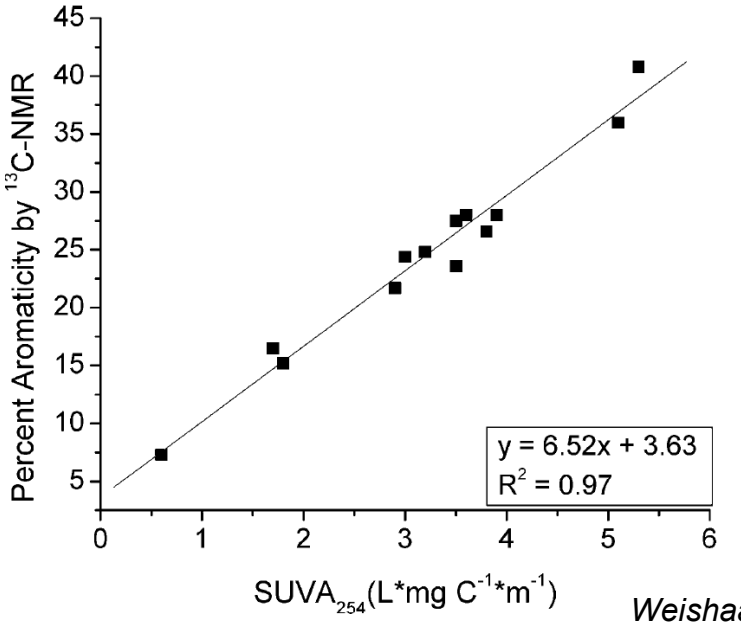
- Organiskt kol (TOC = DOC + POC)

Egenskaper/sammansättning – utvärdera selektiv borttagning

- Optiskt – absorbans och fluorescens
- SUVA – specifik UV-abs (UV254/DOC)
- Fraktionering – ”rapid fractionation”, LC-OCD
- Struktur/funktionella grupper - NMR
- Molekylnivå – FT-ICR-MS

Specifika effekter – negativ påverkan från NOM

- Egenskaper – t.ex. biotillgänglighet (AOC, BDOC m.m.)
- Bildningspotential för desinfektionsbiprodukter (DBPs)



Weishaar et al (2003)

Rening av NOM

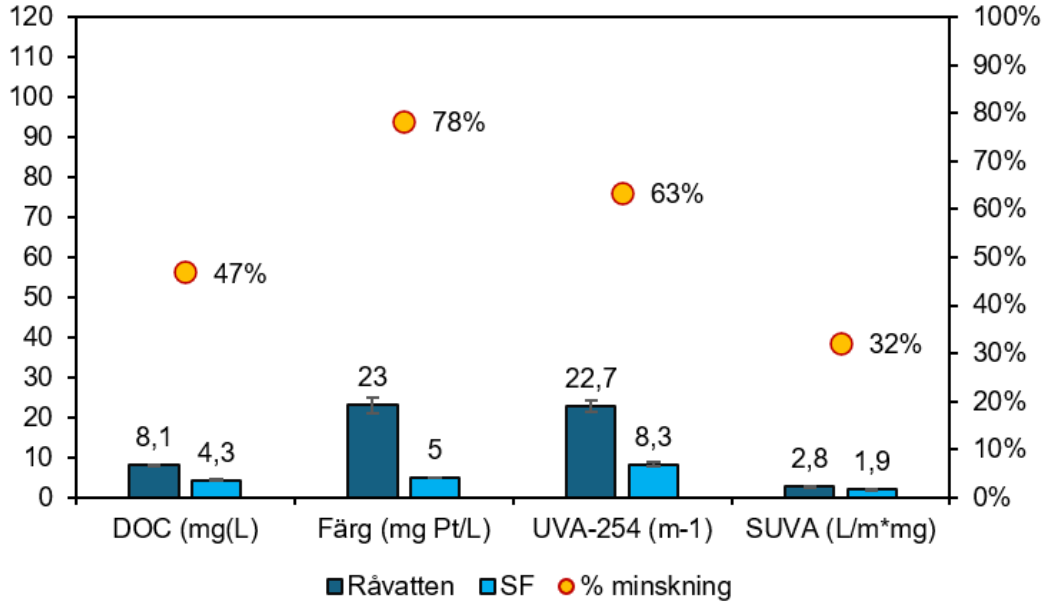
Kemisk fällning, membranfiltrering (NF)

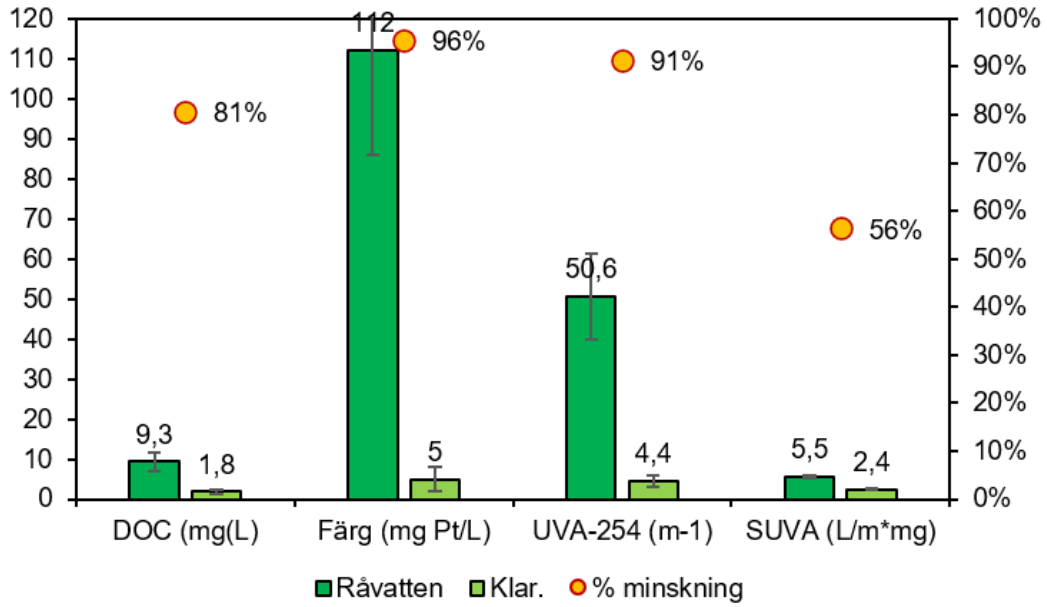
Reningstekniker för borttagning av NOM

- Stor borttagning: kemisk fällning, jonbyte, tajta membran (NF/RO)
  - Ca 40-90% borttagning
- Polering: GAC, biofilter
  - Upp till ca 20% borttagning
- Omvandling: oxidation (ozon, AOP etc.)
  - Vanligtvis ingen mineralisering/borttagning av DOC
  - Stor minskning i UV-absorbans
  - Bildning av biotillgängligt organiskt material (BOM)

NOM vid kemisk fällning

- Selektiv borttagning – **färg, UV-abs, aromaticitet**, hydrofobicitet, molekylvikt, syreinnehåll, oxidationstal (C), humifierat/terrestert/äldre NOM





Data från NOMiNOR, Norsk Vann Rapport 231 (2018)

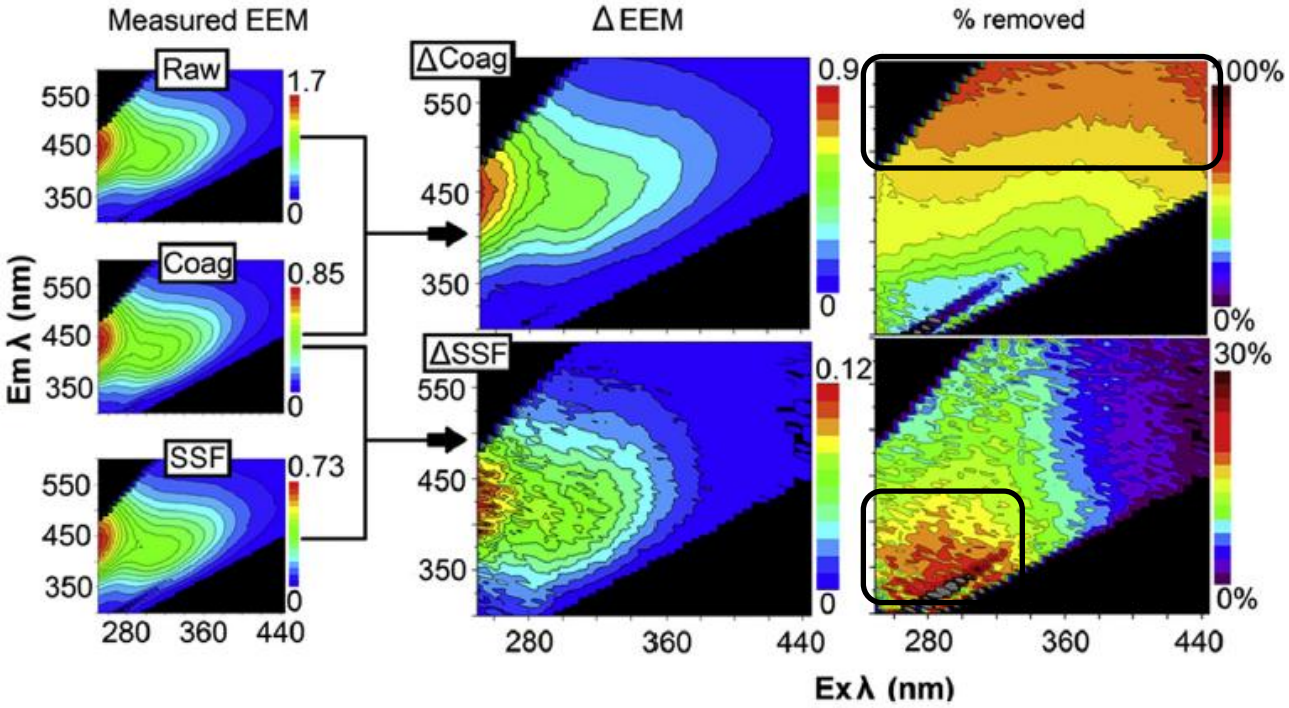
NOM vid kemisk fällning

- Selektiv borttagning – färg, UV-abs, aromaticitet, hydrofobicitet, molekylvikt, syreinnehåll, oxidationstal (C), **humifierat/terrestert/äldre NOM**

Råvatten

Efter fällning och SF

Efter långsam-sandfilter



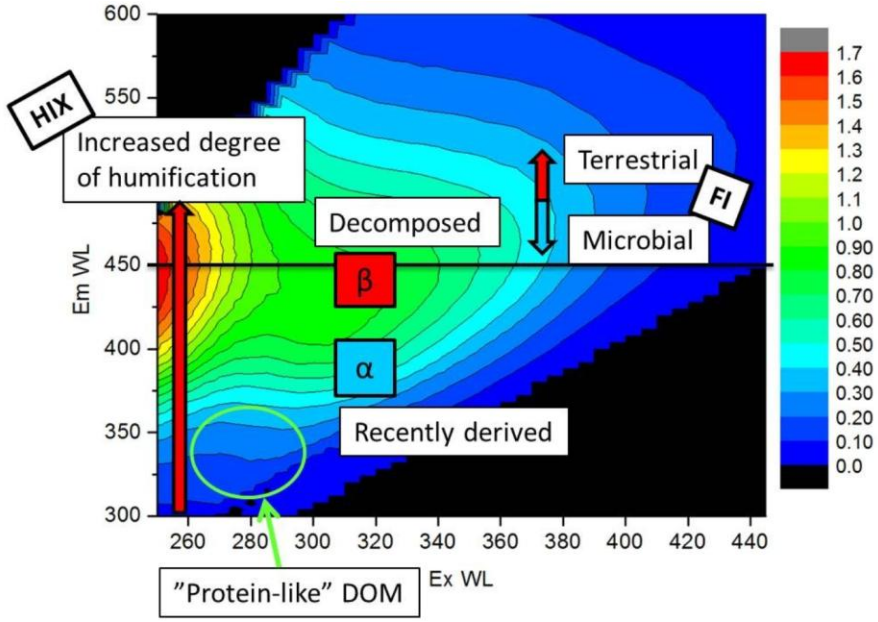
Lavonen et al (2015)
http://dx.doi.org/10.1016/j.watres.2015.08.024

NOM vid kemisk fällning

- Selektiv borttagning – färg, UV-abs, aromaticitet, hydrofobicitet, molekylvikt, syreinnehåll, oxidationstal (C), **humifierat/terrestert/äldre NOM**

Typ av index	Beskrivning
FI = fluorescence index	Låg (~1,3) = terrester NOM Hög (~1,8) = mikrobiell NOM
β:α = freshness index	NOMs ålder – ökar med ökad andel färsk NOM
HIX = humification index	Grad av humifiering, ökar med minskad H/C

McKnight et al (2001)
Parlanti et al (2000)
Zsolnay et al (1999)

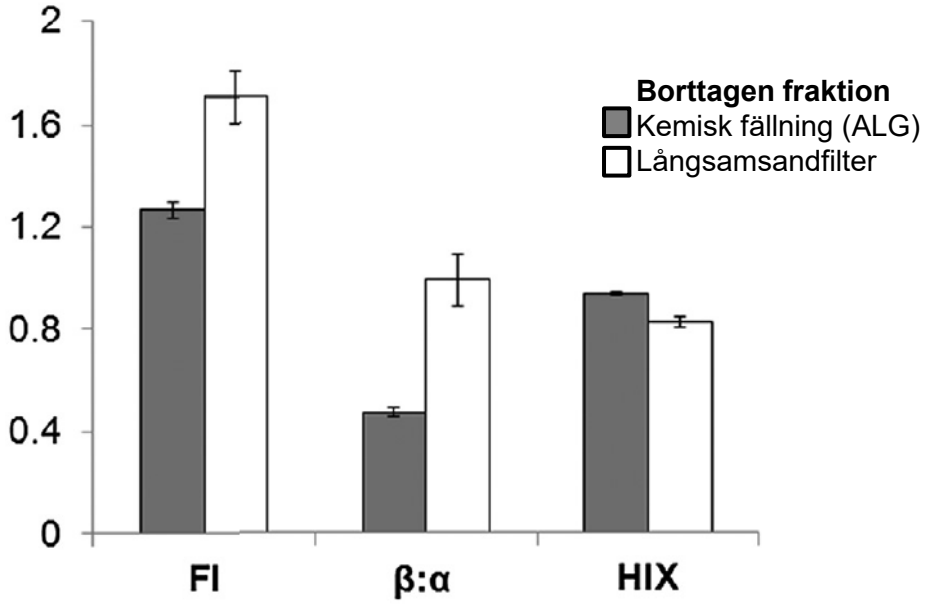


NOM vid kemisk fällning

- Selektiv borttagning – färg, UV-abs, aromaticitet, hydrofobicitet, molekylvikt, syreinnehåll, oxidationstal (C), **humifierat/terrestert/äldre NOM**

Typ av index	Beskrivning
FI = fluorescence index	Låg (~1,3) = terrester NOM Hög (~1,8) = mikrobiell NOM
β:α = freshness index	NOMs ålder – ökar med ökad andel färsk NOM
HIX = humification index	Grad av humifiering, ökar med minskad H/C

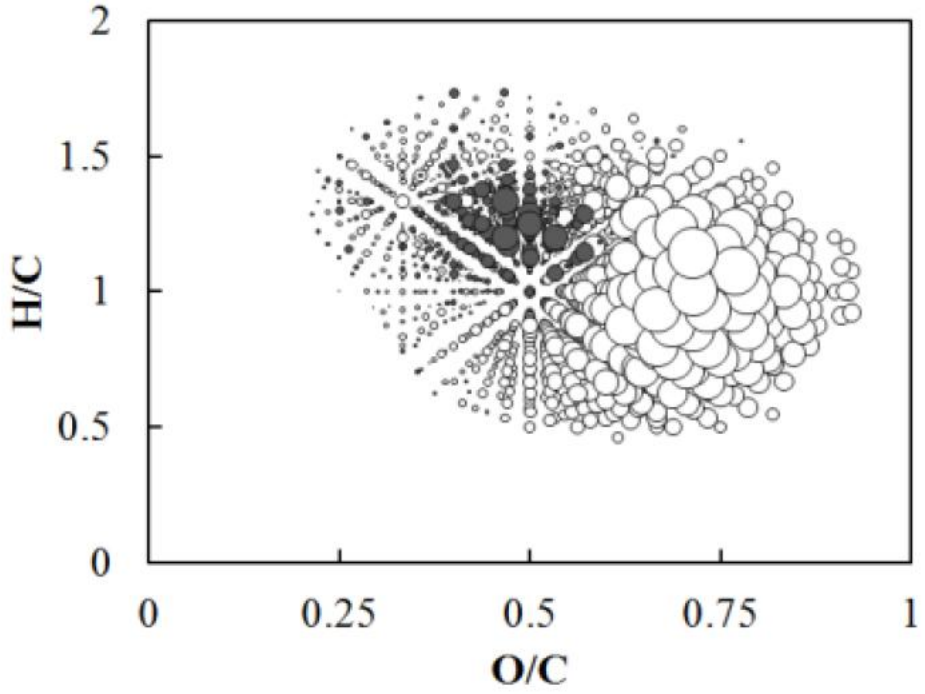
McKnight et al (2001)
Parlanti et al (2000)
Zsolnay et al (1999)

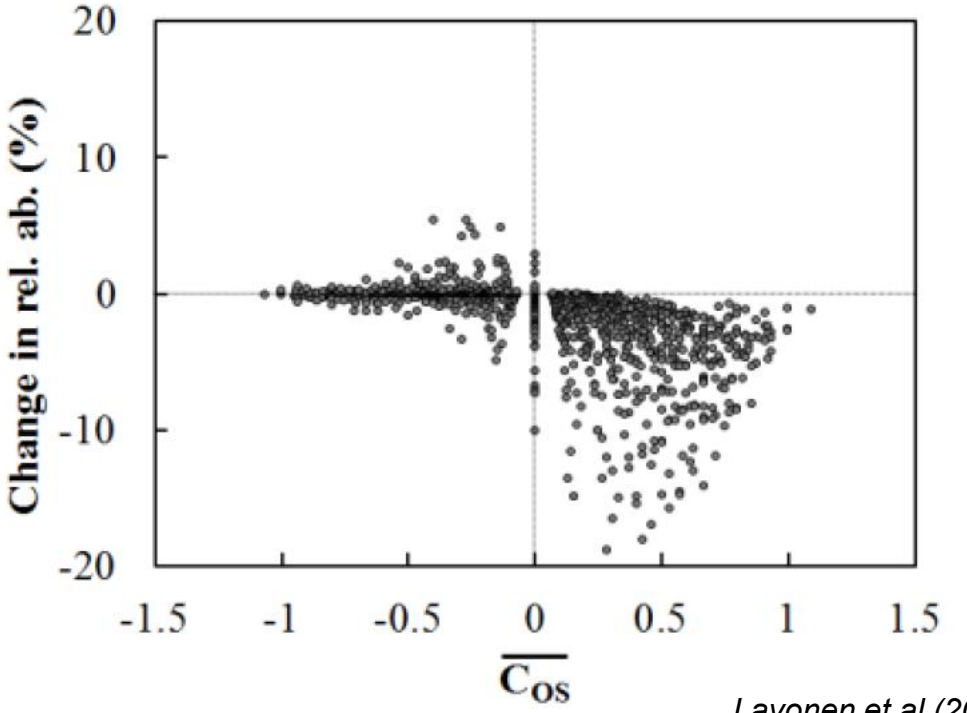


Lavonen et al (2015)
http://dx.doi.org/10.1016/j.watres.2015.08.024

NOM vid kemisk fällning

- Selektiv borttagning – färg, UV-abs, aromaticitet, hydrofobicitet, molekylvikt, **syreinnehåll, oxidationstal (C)**, humifierat/terrestert/äldre NOM





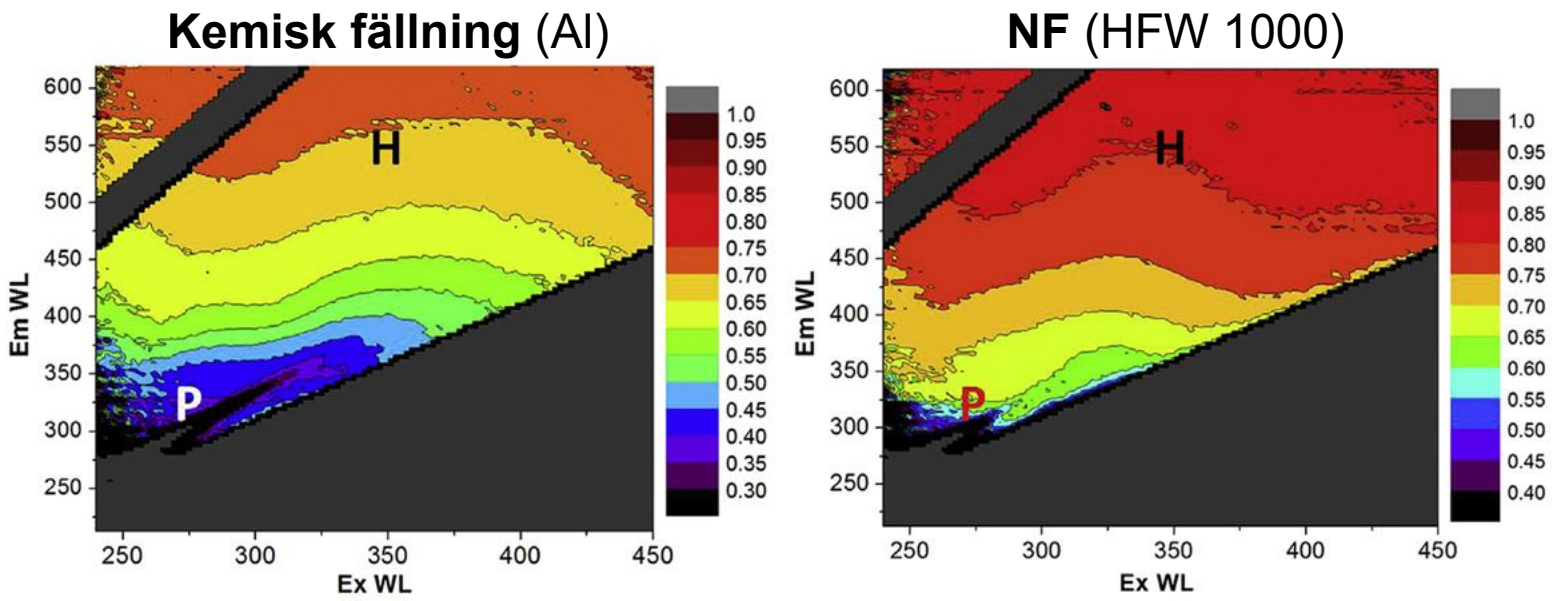
Lavonen et al (2015)
http://dx.doi.org/10.1016/j.watres.2015.08.024

NOM vid membranfiltrering

- Generellt behövs NF/RO, eller direktfällning på UF/MF

  → olika borttagningsmekanismer!

DOC -45%



DOC -90%

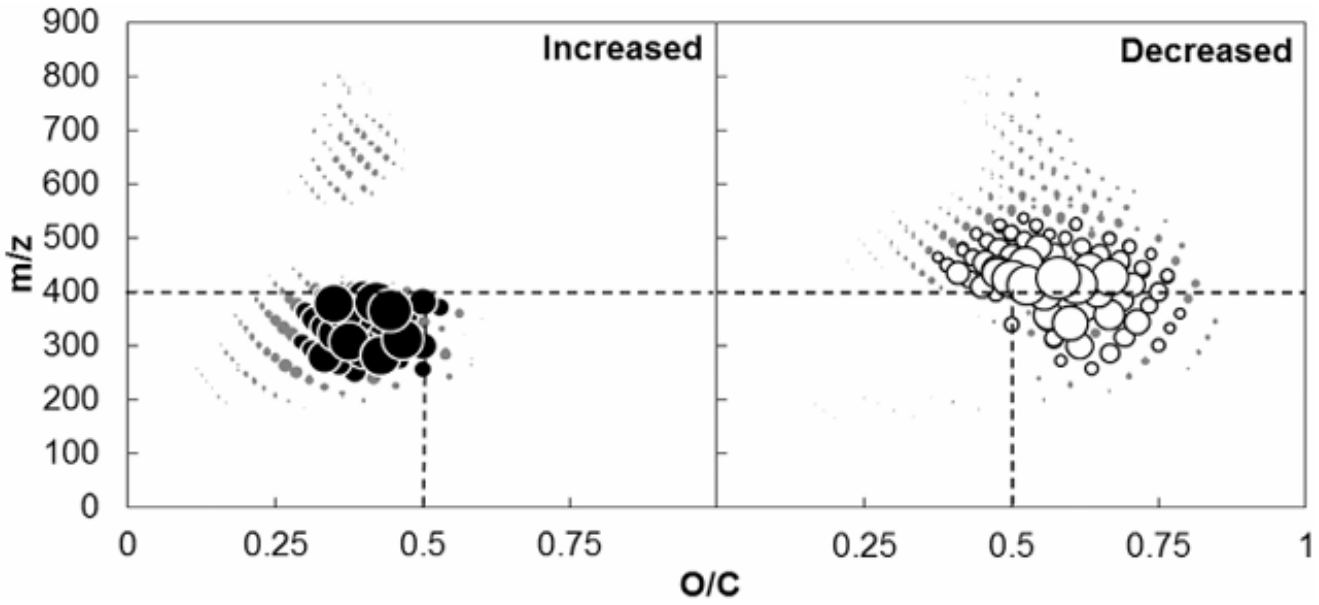
Köhler et al 2016
http://dx.doi.org/10.1016/j.watres.2015.11.048

NOM vid membranfiltrering

- Generellt behövs NF/RO, eller direktfällning på UF/MF

  → olika borttagningsmekanismer!

NF (HFW 1000)



Både storlek och syreinnehåll spelar roll!

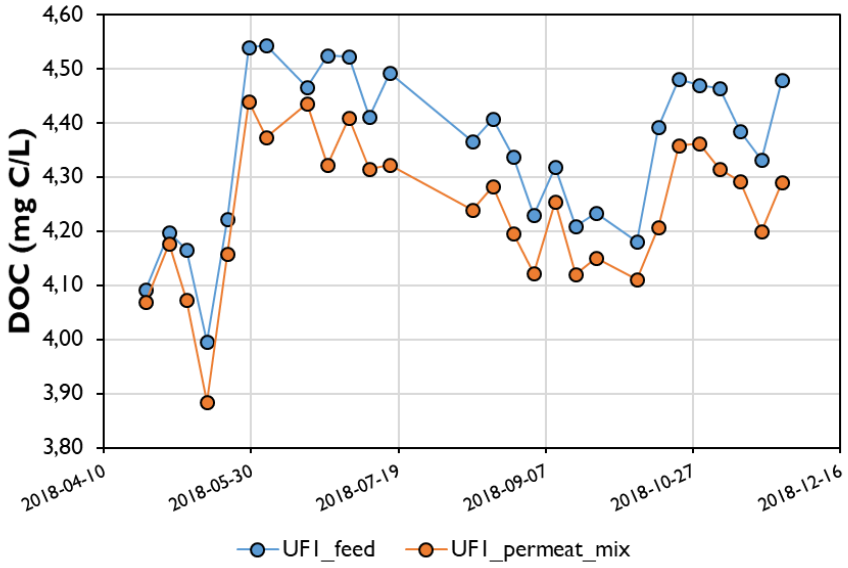
Köhler et al 2016
http://dx.doi.org/10.1016/j.watres.2015.11.048

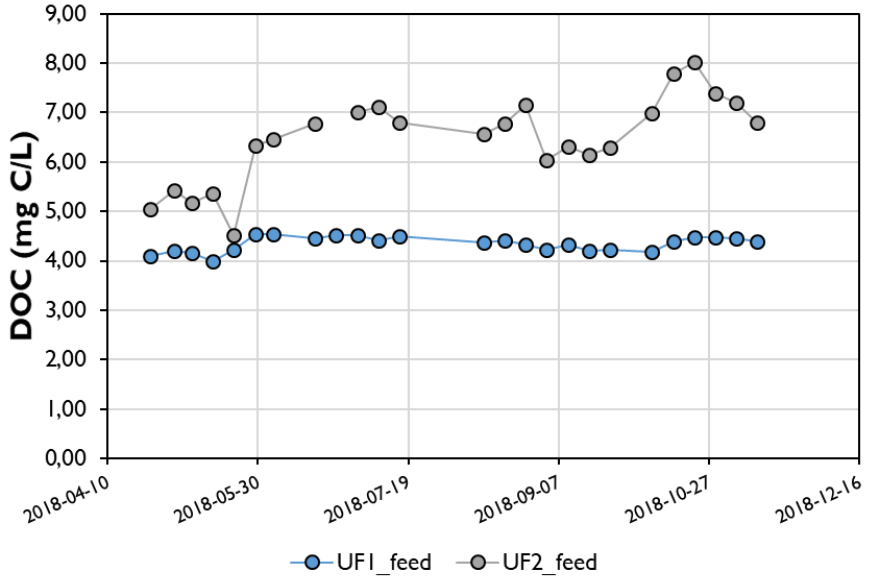
Negativa effekter från NOM

Membranfouling, biostabilitet, desinfektionsbiprodukter (DBPs)

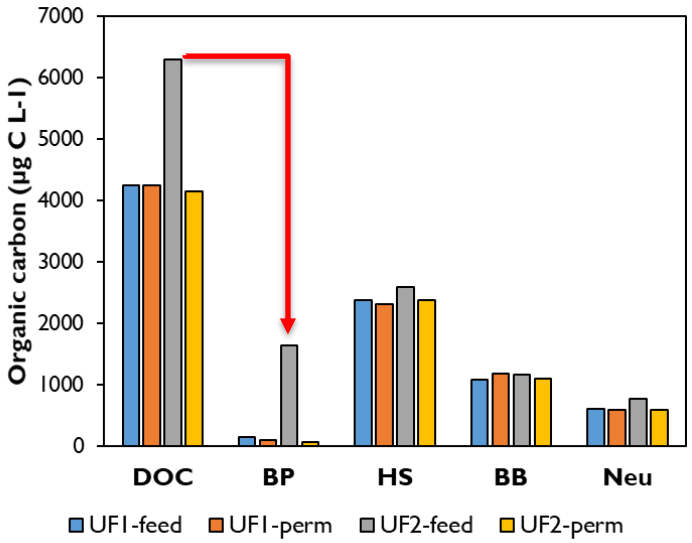
Membranfouling (pilotförsök UF)

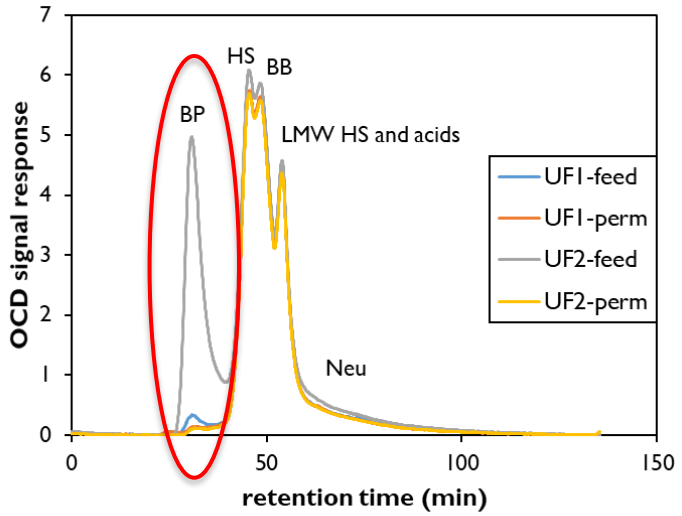
- Fouling av UF-membran – indikeras av liten DOC-borttagning över UF (ca 0,1 mg/L)
- Anrikas i BW-vattnet (UF2_feed)





Membranfouling (pilotförsök UF)

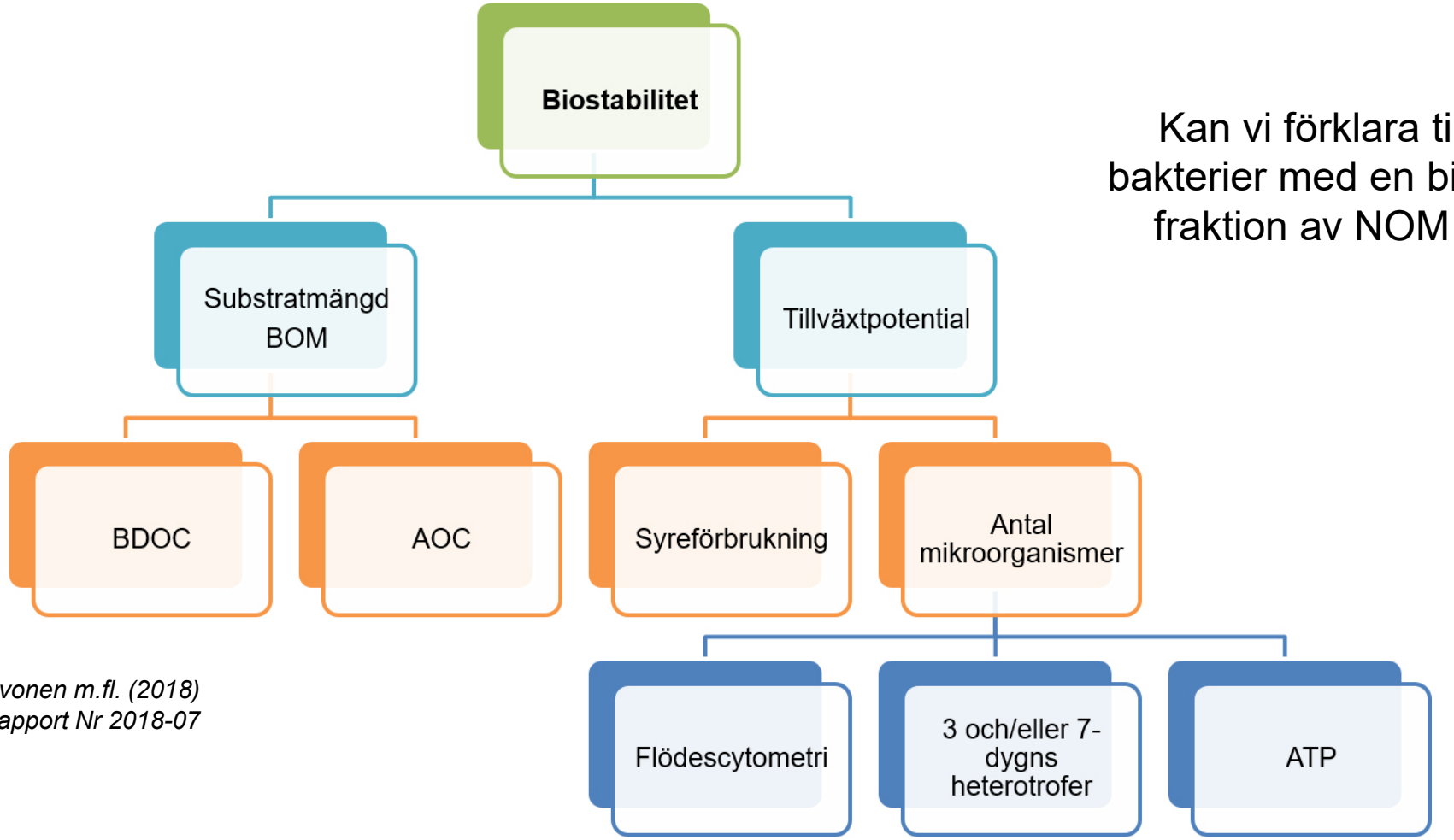




DOC	Dissolved organic carbon (total amount)
BP	Biopolymers
HS	Humic substances
BB	”Building Blocks”
LMW HS and acids	Low molecular weight humic substances and acids
Neu	Neutral compounds

- Vilken typ av NOM binder till membranet? Analys av sammansättningen av NOM med LC-OCD
- Endast *en fraktion*– biopolymerer
  - Tidigare känd ”riskfraktion” för membranfouling
  - Reversibel fouling i detta fall – massbalans indikerar komplett borttagning vid backspolning (utan kemikalier)

Biostabilitet och biotillgängligt organiskt material (BOM)



Lavonen m.fl. (2018)
SVU-rapport Nr 2018-07

Kan vi förklara tillväxt av bakterier med en biotillgänglig fraktion av NOM (BOM)?

Biostabilitet och biotillgängligt organiskt material (BOM)

Hur mycket BOM kan vattnet innehålla utan att bidra till bakterietillväxt?

Definition	Motivation/kommentarer	Källa
AOC <10 µg/L	Gav ingen tillväxt av heterotrofer i klorfritt system	van der Kooij 1982
AOC = 50–100 µg/L	Begränsning av koliform tillväxt vid 3–6 mg/L klorrest	Le Chevallier et al. 1987
BDOC < 0,15 mg/L vid 20° C BDOC < 0,30 mg/L vid 15° C	Också: koliform tillväxt i ledningsnätet begränsad vid BDOC < 0,10–0,15 mg/L	Volk et al. 1994
BDOC < 0,16 mg/L	För klorfritt system	Servais et al. 1993
AOC <50 µg/L	Kontroll av koliform tillväxt	LeChevallier et al. 1991
AOC <10 µg/L	Gav ingen ytterligare konsumtion av AOC	van der Kooij 1992

Lavonen m.fl. (2018)
SVU-rapport Nr 2018-07

Biostabilitet och biotillgängligt organiskt material (BOM)

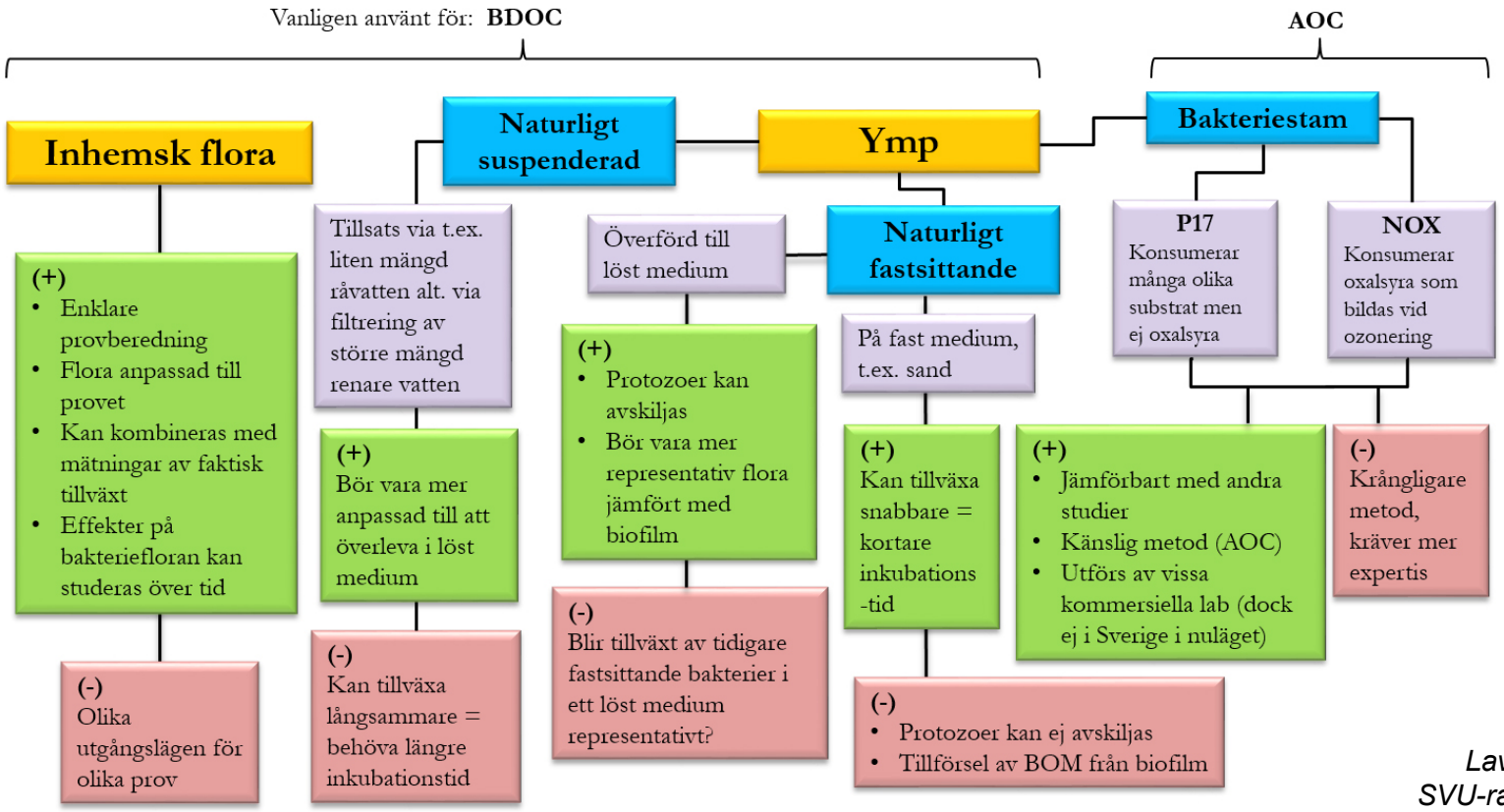
Miljön spelar stor roll både vid mätning av BOM och i de system vi undersöker!

Påverkansfaktor	Tillstånd	Effekt på tillväxt	Effekt på mätning av BOM	Kontrollalternativ
Predatorer	Närvaro	Minskad	Eventuellt ökad tid till jämvikt	Filtrering 1,2 µm
Miljö: pH	Fluktuationer	Behöver vara stabilt pH		Buffert
Miljö: temperatur	Minskad	Ökad tid till jämvikt		Inkubator
Miljö: syre	Brist	Avstannad	Underskattning	Luftning
Miljö: ljus	Närvaro	Tillväxt av alger	Eventuell tillförsel av BOM	Mörker
Oorganiska näringsämnen	Begränsande	Avstannad	Underskattning	Tillsats om kol ej är begränsande
Tillväxthämmare/ desinfektionsmedel	Närvaro	Förskjutning	Ökad tid till jämvikt	Neutralisering av t.ex. klor och ozon

Lavonen m.fl. (2018)
SVU-rapport Nr 2018-07

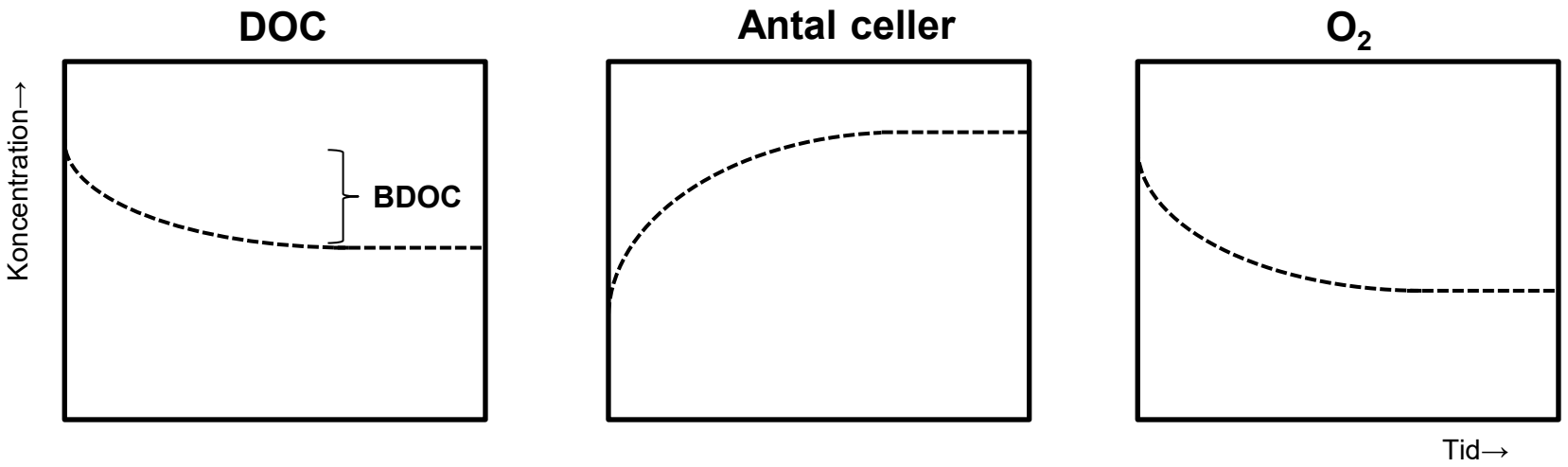
Biostabilitet och biotillgängligt organiskt material (BOM)

Ofta behöver reproducerbarhet i mätning vägas mot hur representativt det blir för det egna systemet!



Lavonen m.fl. (2018)
SVU-rapport Nr 2018-07

BDOC, tillväxt och syreförbrukning



Batchvis inkubation



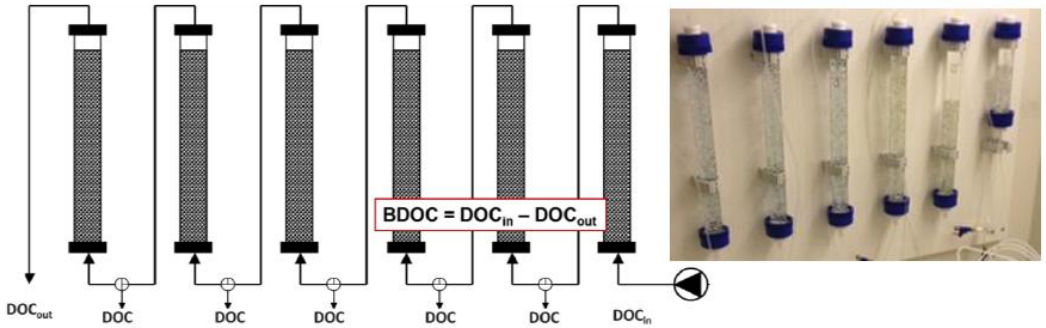
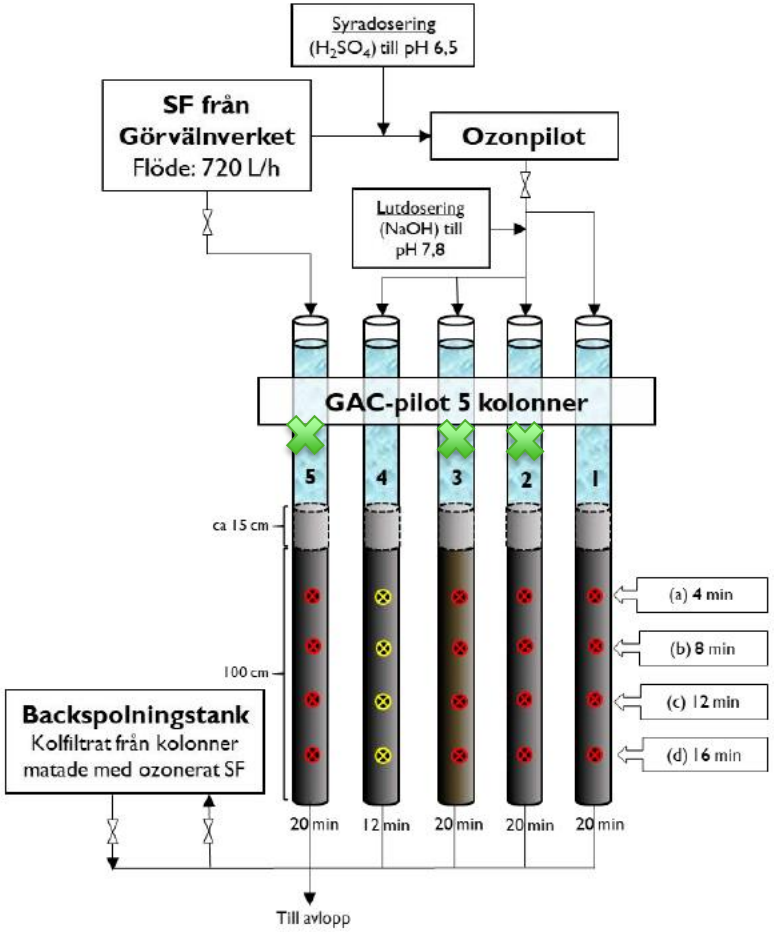


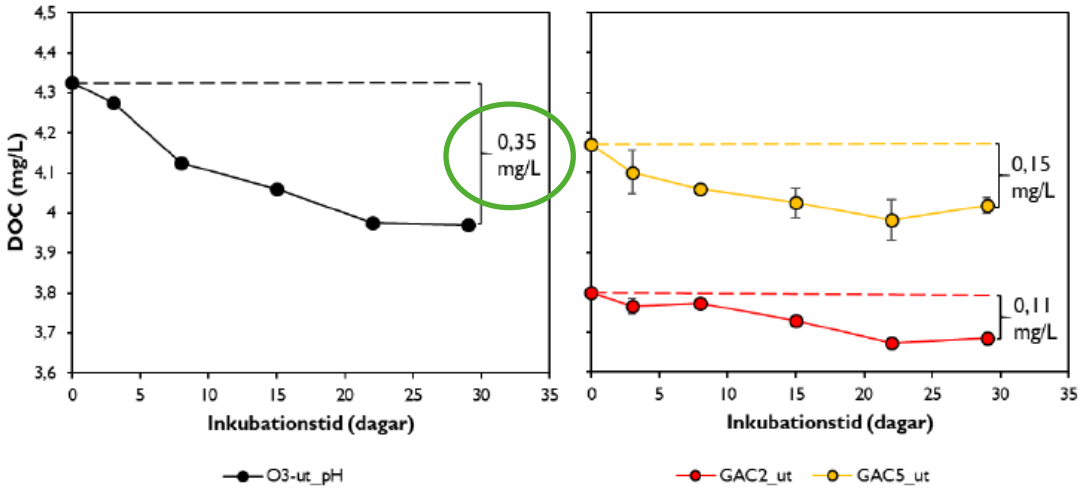
Figure 3-2. Column-based BDOC analytic set-up (Eikebrokk et al. 2007).

Inkubationsförsök – BDOC, bakterietillväxt och konsumtion av AOC

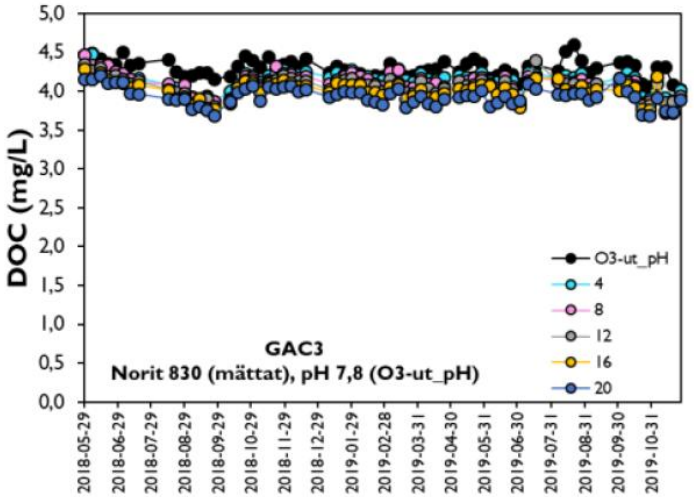
- Batchvis inkubation av dubbelprover i 4 veckor
- DOC och totalantal celler (flödescytometri) mättes dag 0, 3, 7, 14, 21 och 28
  - BDOC = $DOC_{dag0} – DOC_{dag28}$
- AOC (oxalat (NOX), acetat (P17)) dag 0 och dag 28
- Filtrering 1,2 um för borttagning av protozoer
- Inhemsk bakterieflora
- Ingen tillsats av N eller P (ingen begränsning i för-försök)
- Regelbunden syresättning
- Mörker, rumstemperatur

BDOC och bakterietillväxt vid rening med ozon/GAC (pilot)





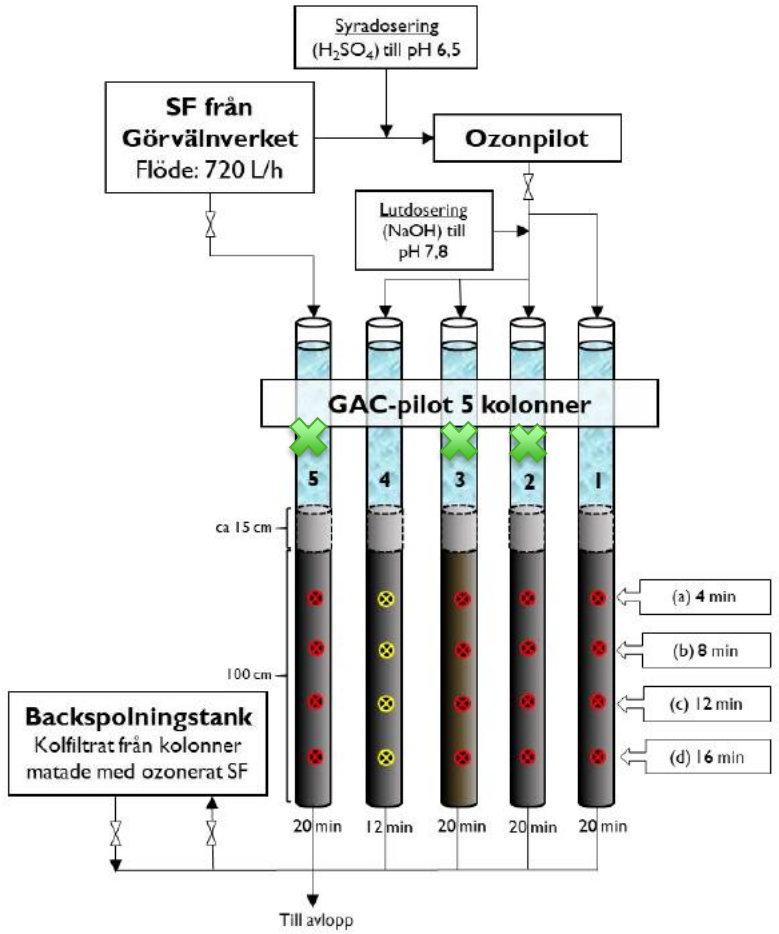
BDOC i ozonerat vatten samt efter 2 GAC-kolonner

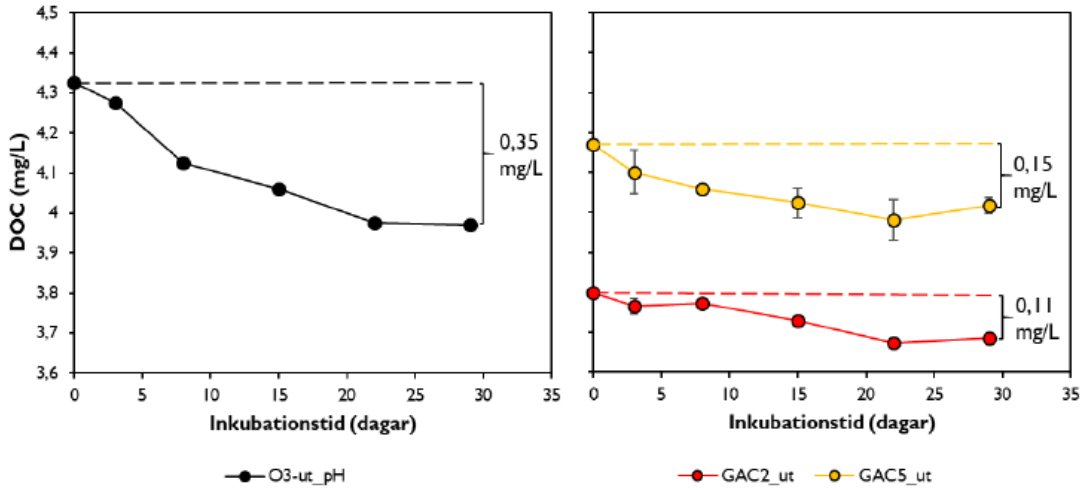


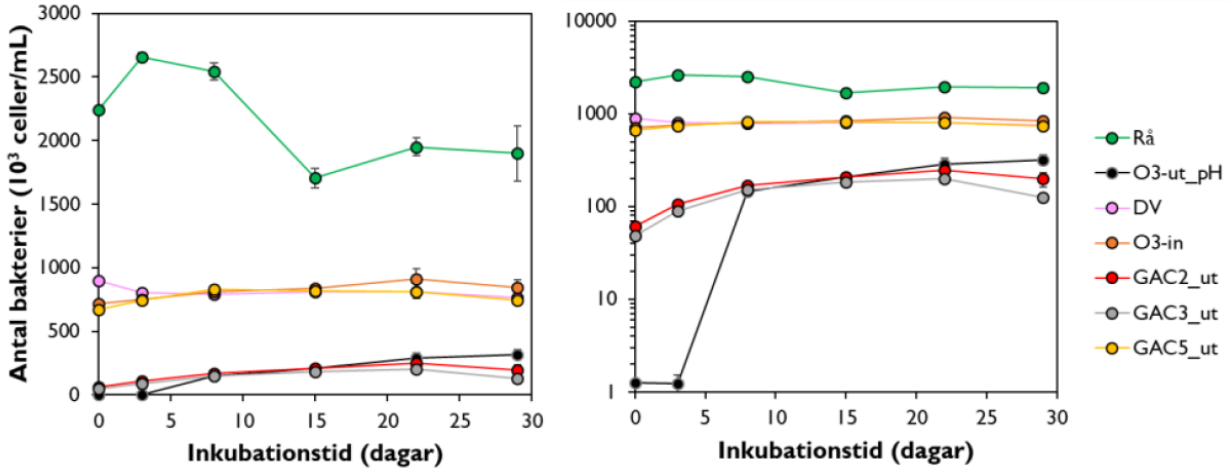
DOC-borttagning i GAC3 (biofilter) 0,36±0,06 mgC/L

Lavonen (2020), NV Rapport 2020-04

BDOC och bakterietillväxt vid rening med ozon/GAC (pilot)







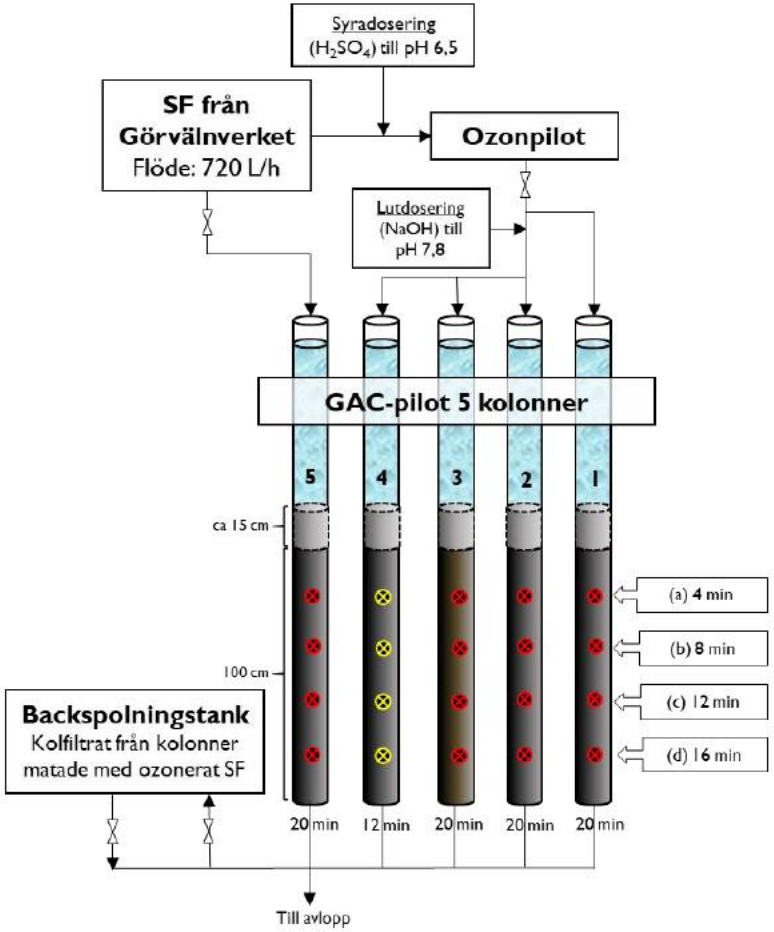
BDOC i ozonerat vatten samt efter 2 GAC-kolonner

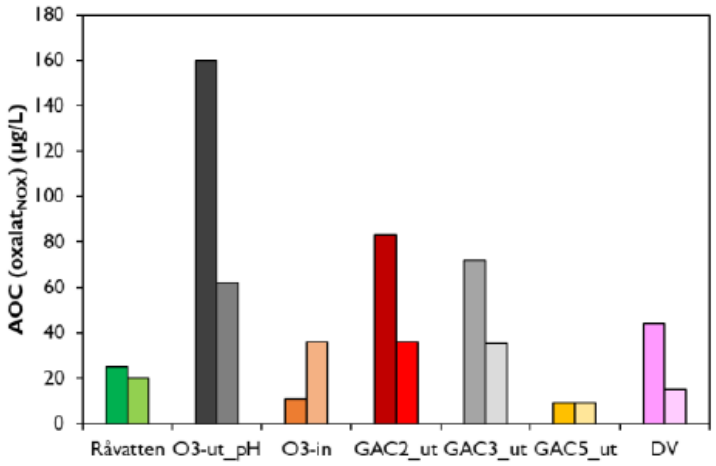
- Störst återväxt i ozonerat vatten
- Viss stabilisering efter GAC
- Återväxt utan BDOC i sandfiltrat och GAC3 (biofilter)

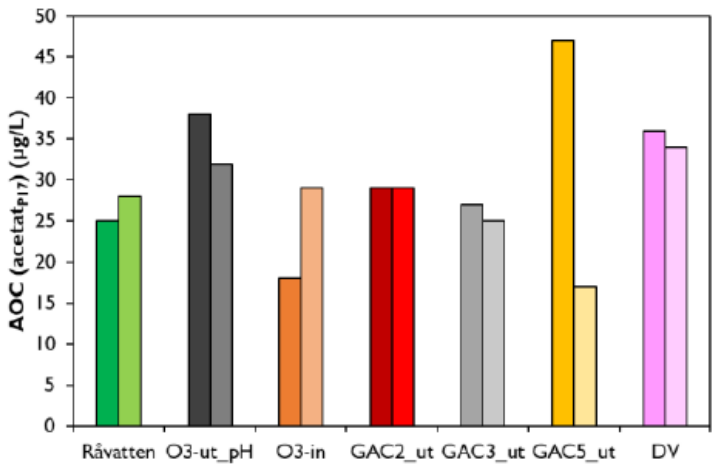
Lavonen (2020), NV Rapport 2020-04

Negativa effekter från NOM

Konsumeras all AOC under inkubation?





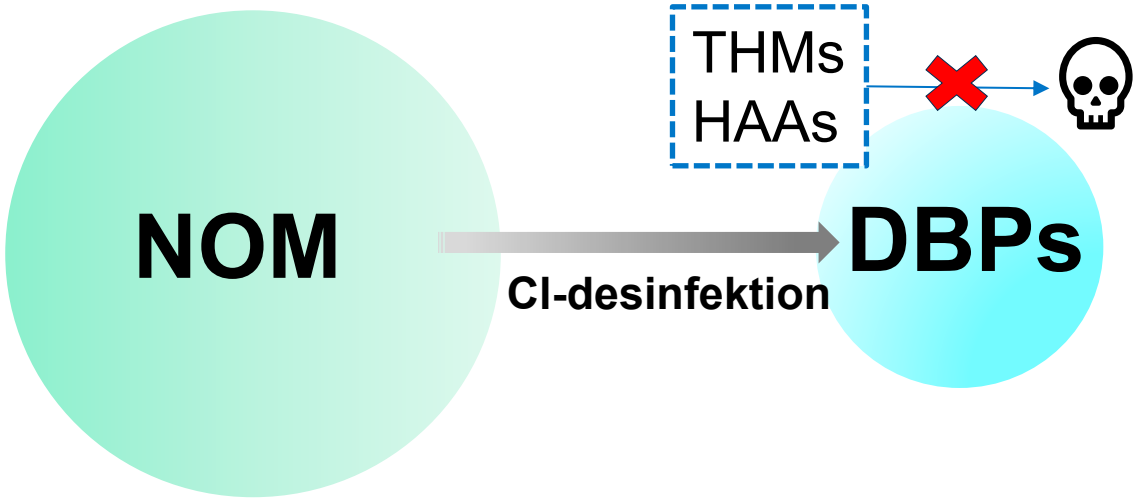


- Generellt minskade AOC_{oxalat}, dock ej direkt samband med bakterietillväxt eller BDOC
- AOC_{acetat} både ökade och minskade

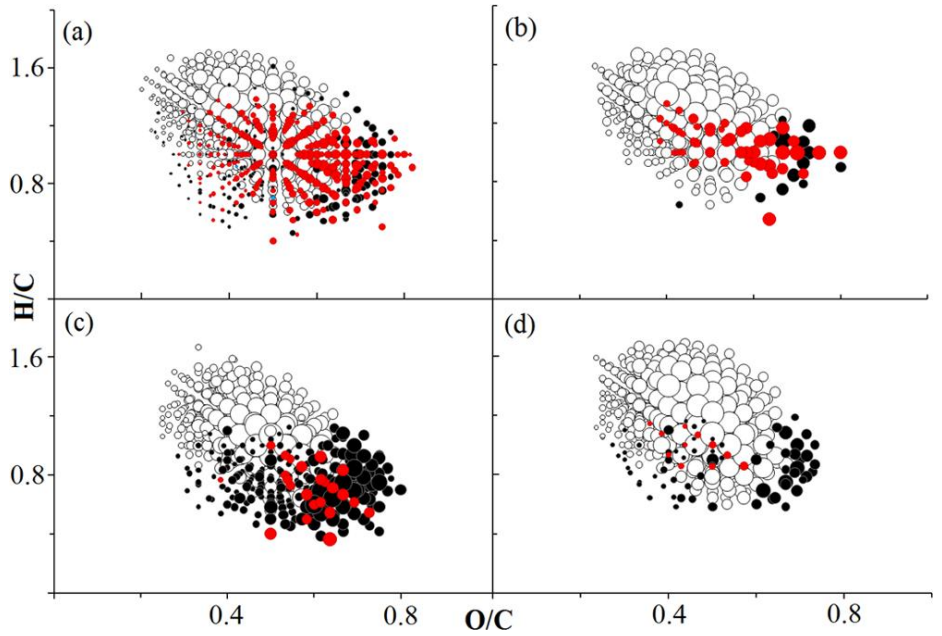
Kan mätningar av BOM indikera biostabilitet eller är biotillgänglighet mer beroende av miljön än en bestämd egenskap hos NOM?

Lavonen (2020), NV Rapport 2020-04

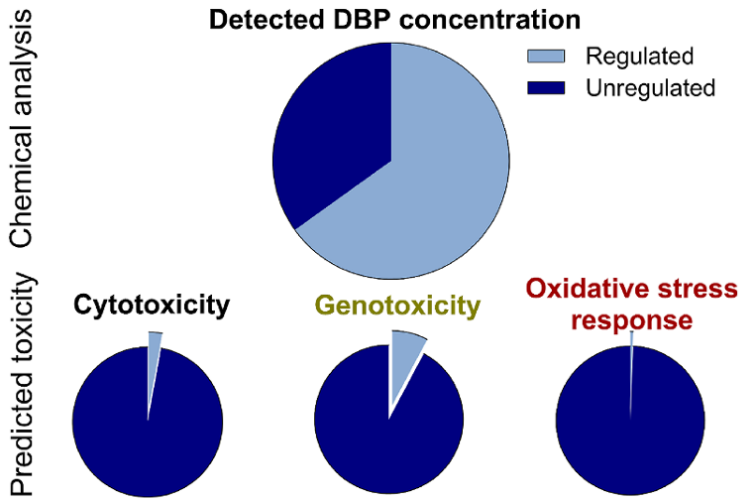
Vilka DBPs är mest toxiska?



Richardsson and Plewa 2020
doi.org/10.1016/j.jece.2020.103939



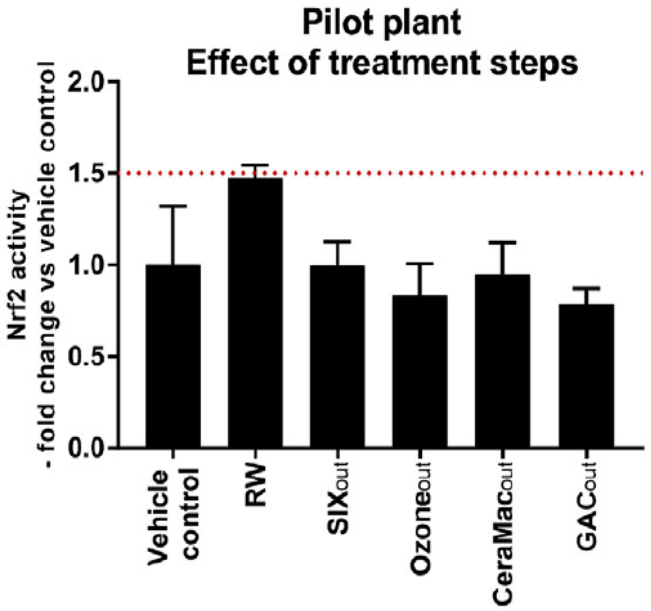
Lavonen *et al* 2013
doi.org/10.1021/es304669p

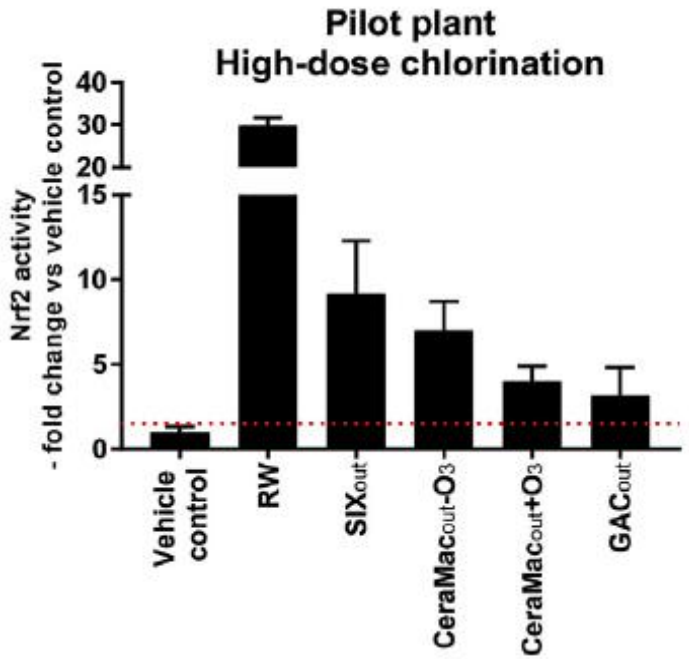


Neale *et al* 2025
doi.org/10.1016/j.coesh.2025.100678

DBPs kan orsaka oxidativ stress

- Klorering med hög dos (10 mgCl_2/L)

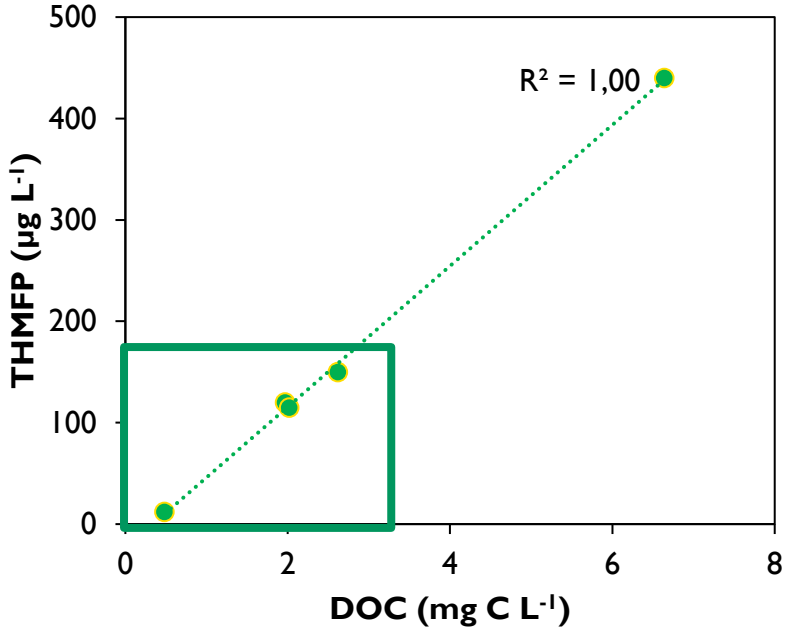


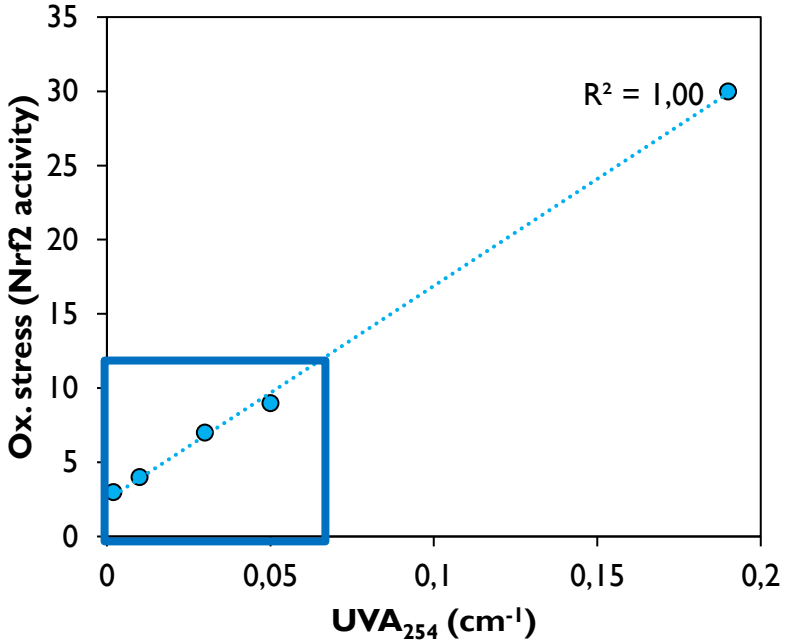


Lundqvist *et al* 2019
doi.org/10.1016/j.watres.2019.02.052

Korrelationer med DOC och UV-absorbans

- THMs korrelerade med koncentrationen DOC, oxidativ stress med UVA_{254}

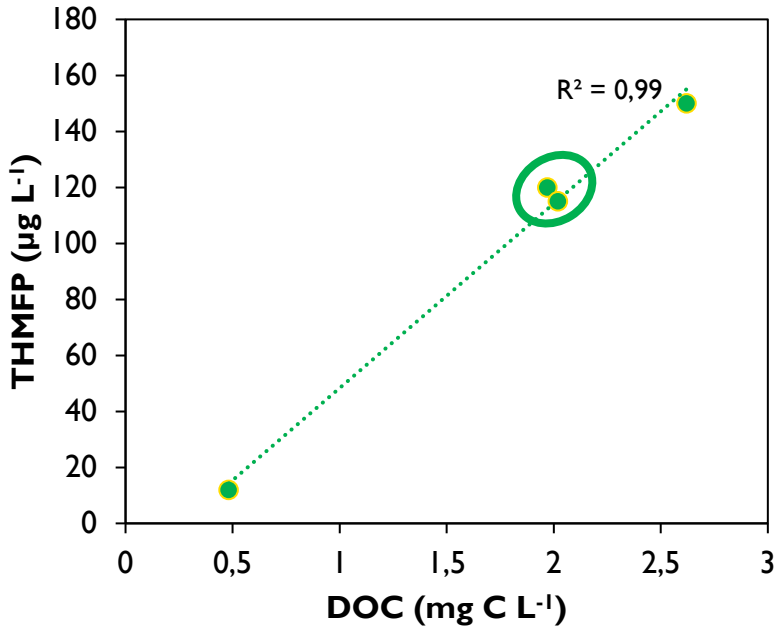


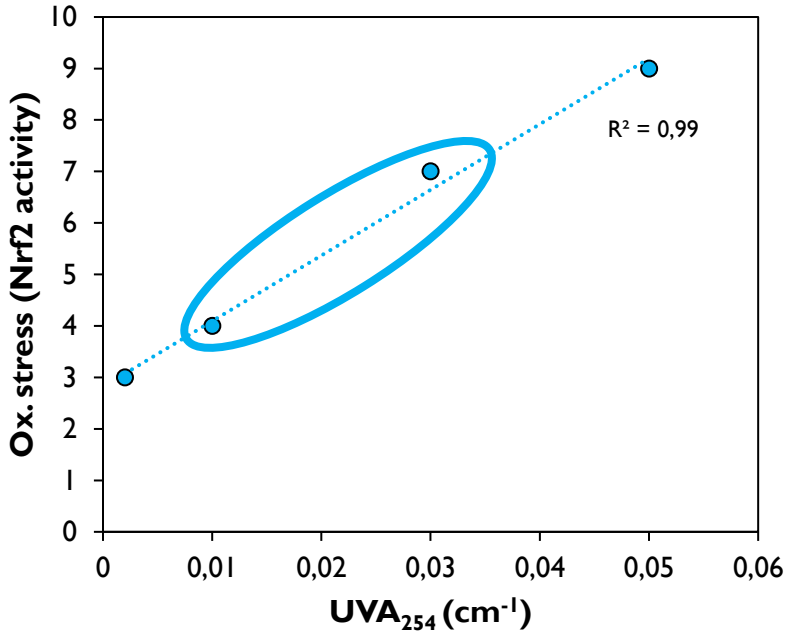


Data from Lundqvist *et al* 2019

Negativa effekter från NOM

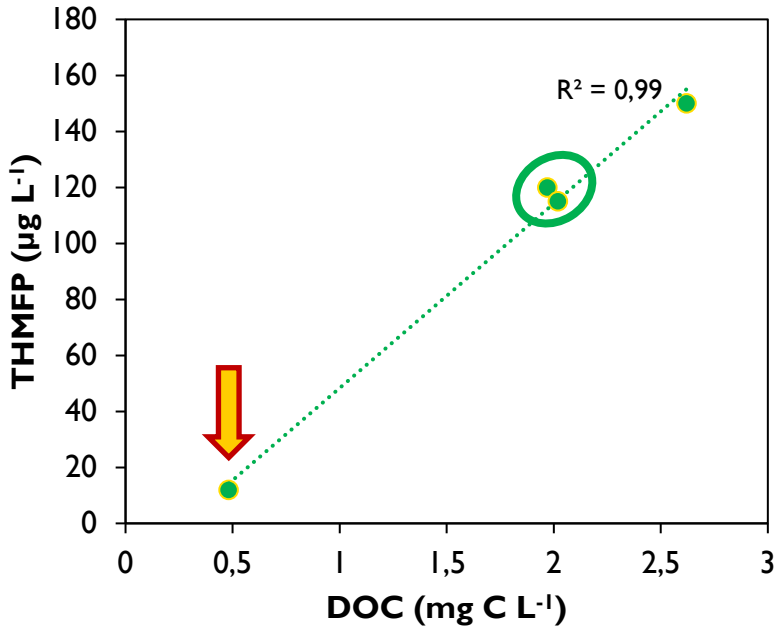
Korrelationer med DOC och UV-absorbans

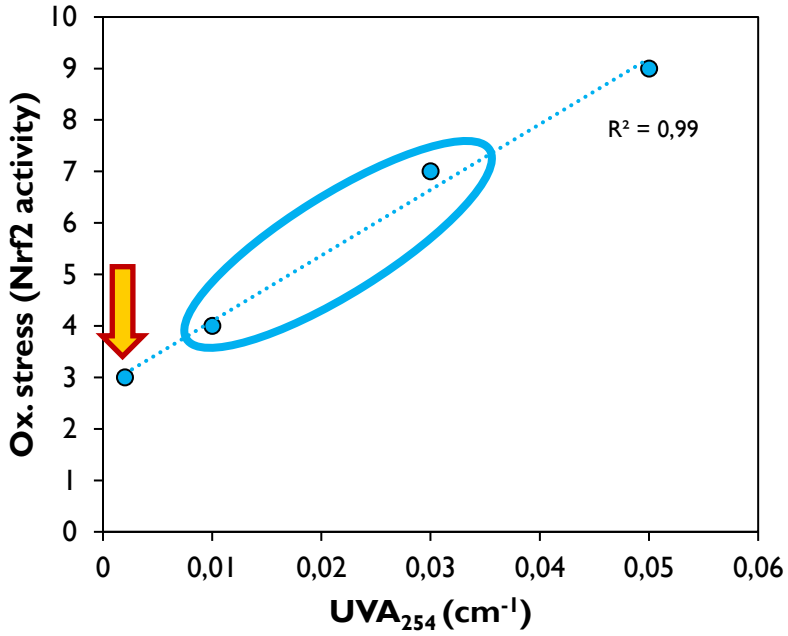




Data from Lundqvist *et al* 2019

Korrelationer med DOC och UV-absorbans

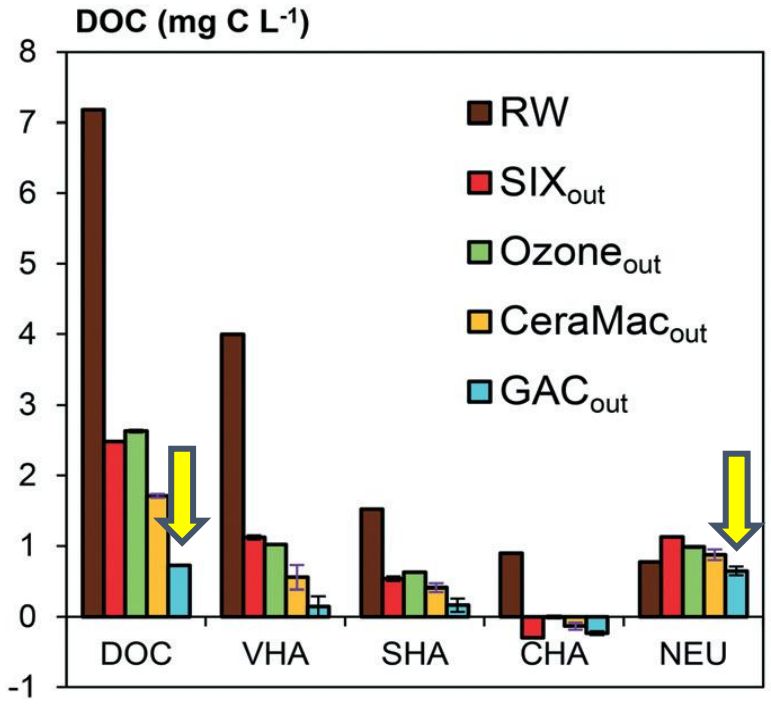




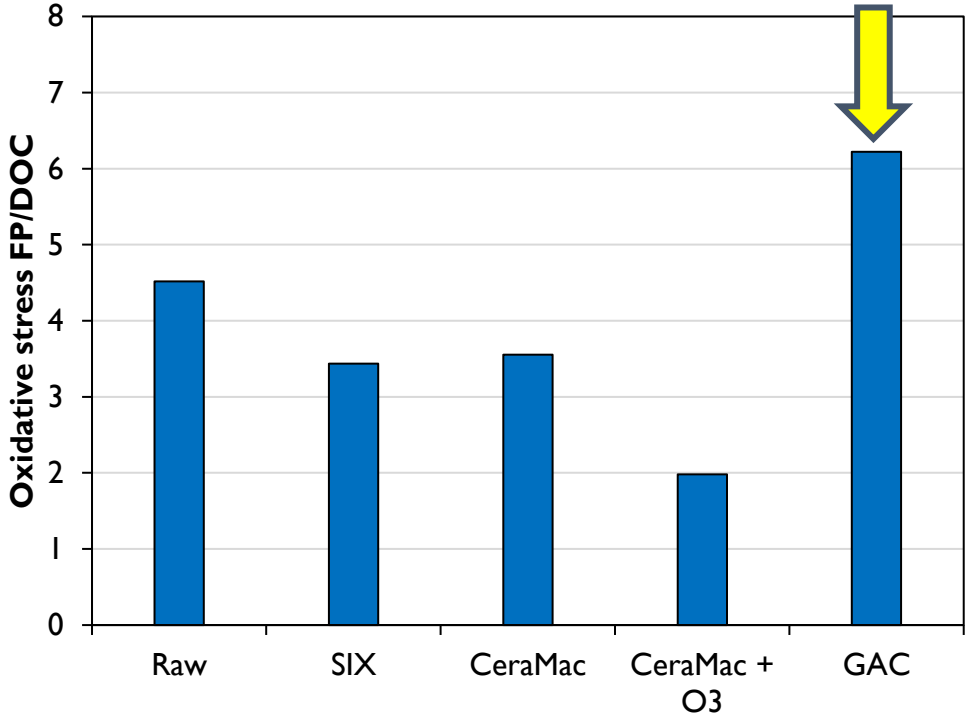
Data from Lundqvist *et al* 2019

DBPs från neutral NOM-fraktion – hög oxidativ stress

- GAC-filtrat bestod av **neutrala ämnen** med hög bildningspotential för **DBPs** som ger **oxidativ stress**



Andersson *et al* 2020
doi.org/10.1039/c9ew00931k



Data from Lundqvist *et al* 2019

Brom-innehållande DBPs

- Hög andel Br-DBPs i GAC-filtrat – möjlig förklaring till hög oxidativ stress/DOC

Experiment 3					
Number of filtered DBP formulae found	RW	SIX_{out}	$CeraMac_{out}$ $-O_3$	$CeraMac_{out}$ $+O_3$	GAC_{out}
n of total Cl- and Br- CHO formulae	1392	1257	1536	1031	774
n of verified Cl- and Br- CHO formulae	847	892	827	696	357
Characteristics of verified DBPs					
average H [%]	38.9	43.4	44.3	43.2	42.5
average C [%]	36.1	35.4	35.0	34.9	35.3
average O [%]	20.6	17.5	17.0	18.0	18.0
average Cl [%]	4.3	3.6	3.6	3.8	3.1
average Br [%]	0.0	0.0	0.1	0.1	1.0

Andersson *et al* 2020

Medskick



Mät inte bara **hur mycket** NOM som finns i vattnet – förstå **vilket** NOM som finns där, vad som **avlägsnas**, vad som **blir kvar** och vilka **effekter** det kan ge.

elin.lavonen@norrvatten.se