

# Historiske og fremtidige endringer i løst organisk karbon i Farrisvann



**Hovedkontor**

Gaustadalléen 21  
0349 Oslo  
Telefon (47) 22 18 51 00  
Telefax (47) 22 18 52 00  
Internett: [www.niva.no](http://www.niva.no)

**NIVA Region Sør**

Jon Lilletuns vei 3  
4879 Grimstad  
Telefon (47) 22 18 51 00  
Telefax (47) 37 04 45 13

**NIVA Region Innlandet**

Sandvikaveien 59  
2312 Ottestad  
Telefon (47) 22 18 51 00  
Telefax (47) 62 57 66 53

**NIVA Region Vest**

Thormøhlensgate 53 D  
5006 Bergen  
Telefon (47) 22 18 51 00  
Telefax (47) 55 31 22 14

Tittel Historiske og fremtidige endringer i løst organisk karbon i Farrisvann	Løpenummer 7111-2017	Dato Januar 2017
Forfatter(e) Salar Valinia, Carolina Olid Garcia (Umeå Universitet), Carsten Meyer-Jacob (Umeå Universitet) & Richard Bindler (Umeå Universitet).	Fagområde Klima	Distribusjon Åpen
	Geografisk område Norge	Utgitt av NIVA

Oppdragsgiver(e) Vestfold IKS	Oppdragsreferanse Tanja Breyholtz
	Hefte nr.:

<p><b>Sammendrag</b></p> <p>I denne rapporten analyserer vi med bruk av sedimenter og modellering historiske og fremtidige trender i organisk karbon Farrisvann. Vi har brukt en historiske sediment-rekonstruksjon fra en representativ referansesjø, lange dataserier for Farrisvann, klimascenarier for den aktuelle regionen i Norge, samt den nyeste vitenskapelige dokumentasjonen på karbondynamikk i nedbørfelter for å modellere fremtidige endringer i konsentrasjoner av organisk karbon frem til 2050. Modellprediksjonene viser at konsentrasjonene av organisk karbon i Farrisvann kan fortsette å øke med den samme takten som overvåkingsdataene har vist fram til i dag. Vi anbefaler de ansvarlige for vannbehandlingsanleggene å forvente videre økning i organisk karbon og vannfarge også i tiden fremover.</p>
--

<p><b>Fire emneord</b></p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Fargeøkning</li> <li>2. Organisk karbon</li> <li>3. Drikkevann</li> <li>4. Klima</li> </ol>	<p><b>Four keywords</b></p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Browning</li> <li>2. Organic carbon</li> <li>3. Drinking water</li> <li>4. Climate</li> </ol>
--	---

*Salar Valinia*

Prosjektleder



*Øyvind Kaste*

Forskningsleder



ISBN 978-82-577-6846-1  
NIVA-rapport ISSN 1894-7948

# **Historiske og fremtidige endringer i løst organisk karbon i Farrisvann**

## Forord

Denne rapporten tar for seg de historiske og fremtidige endringene i konsentrasjoner av løst organisk karbon i Farrisvann. Målsetningen er å bistå drikkevannsanlegget med å skalere driften for å ta høyde for fremtidige økninger i fargen i råvannet. Prosjektet ble initiert av Tanja Breyholtz ved Vestfold Vann. Salar Valinia ved NIVA har vært prosjektleder, Carolina Olid Garcia var ansvarlig for Pb-dateringer, Carsten Meyer Jacob for historiske estimater og Richard Bindler for sediment-geokjemi. Øyvind Kaste har gransket denne rapporten og Palma K Larsen har oversatt fra engelsk til norsk. NIVA har bidratt med tilleggsfinansiering gjennom grunnbevilgningsprosjekt 16018.

Oslo, 13 desember, 2016

Salar Valinia

---

# Innholdsfortegnelse

<b>1 Introduksjon</b> .....	<b>7</b>
1.1 Prosjektets målsetning.....	7
<b>2 Metodikk</b> .....	<b>7</b>
2.1 Karakteristikk Farrisvann.....	7
2.2 Sedimentinnsamling.....	8
2.3 Sedimentanalyser.....	9
2.3.1 Prøveopparbeidelse.....	9
2.3.2 Visible near infrared spectroscopy (VNIRS).....	9
2.3.3 Røntgen fluorecens spektroskopi.....	9
2.3.4 Pb <sup>210</sup> datering av sedimentkjerner.....	9
<b>3 Resultater og diskusjon</b> .....	<b>10</b>
3.1 Nylige trender for OC-konsentrasjoner i Farrisvann.....	10
3.2 XRF-sedimentanalyser og VNIRS-rekonstruksjon.....	10
3.3 Fremtidige prediksjoner om OC-konsentrasjoner i Farrisvann.....	14
<b>4 Konklusjoner</b> .....	<b>16</b>
<b>5 Referanser</b> .....	<b>17</b>

## Sammendrag

Prosjektets målsetning var å lage estimater for historiske og fremtidige endringer i løst organisk karbon (OC) for Farrisvann med bruk av rekonstrueringer basert på innsjøsedimenter og enkle modelleringsverktøy. Sedimentkjerner ble tatt fra innsjøen i 2016 og datert ved å bruke Pb isotoper, og det ble forsøkt å rekonstruere historisk organisk karbon ved hjelp av VNIRS (Visible Near Infrared Spectroscopy) metoden. Sedimentenes geokjemi viste imidlertid at sedimentprofilen var sterkt påvirket av redoks-reaksjoner og at rekonstruksjon av historisk akkumulering av organisk karbon derfor ikke var mulig basert på sedimentkjerner fra selve Farrisvann.

Som et alternativ har vi benyttet rekonstruksjon av historisk organisk karbon i Langtjern, som er en langtidsovervåket referansesjø i Flå kommune, Buskerud fylke. Både Langtjern og Farrisvann har stort innslag av skog innenfor sine respektive nedbørfelter og begge ligger innenfor en region av landet som har hatt en sterk fargeøkning i overflatevann i løpet av de siste 25 år. Det antas derfor at den historiske avsetningen av organisk karbon i Langtjern også i stor grad vil være representativ for utviklingen i Farrisvann.

Vi har brukt den historiske sediment-rekonstruksjonen fra Langtjern, lange dataserier for Farrisvann, klimascenarier for den aktuelle regionen i Norge, samt den nyeste vitenskapelige dokumentasjonen på karbondynamikk i nedbørfelter for å modellere fremtidige endringer i konsentrasjoner av organisk karbon frem til 2050. Modellprediksjonene viser at konsentrasjonene av organisk karbon i Farrisvann kan fortsette å øke med den samme takten som overvåkingsdataene har vist fram til i dag. Vi anbefaler de ansvarlige for vannbehandlingsanleggene å forvente videre økning i organisk karbon og vannfarge også i tiden fremover.

## Summary

Title: Historical and future changes of organic carbon in Farrisvann

Year: 2017

Author: Salar Valinia, Carolina Olid Garcia, Carsten Meyer-Jacob & Richard Bindler

Source: Norwegian Institute for Water Research, ISBN 978-82-577-6846-1

The aim of this project was to provide historical and future changes in organic carbon (OC) for Farrisvann using sediment reconstructions and simple modelling tools. Sediment cores were taken from the lake in 2016 and dated using Pb dating, attempts were made to reconstruct historical OC (VNIRS-method) but sediment geochemistry showed that redox reactions controlled the sediment profile and OC reconstructions could not be trusted.

We used data from another Norwegian lake, long-term monitoring data available for Farrisvann and the most novel scientific knowledge to the model future changes in OC concentrations until 2050. We predicted the future changes in OC using different scenarios based on historical sediment reconstructions, monitoring data, and scientific literature

We predict that concentrations of OC in Farrisvann could continue to increase at the same rate as the monitoring data has shown due to increases in precipitation predicted by the climate models for Norway. It is unlikely that a combined acidification and climate signal will drive OC concentration in the future as the recovery from acidification has been substantial. As we were not able to reconstruct historical OC for Farrisvann, we cannot estimate how much OC changed during acidification. We recommend the water treatment plants to expect further increases and browner waters in Norway in the future.

# 1 Introduksjon

I løpet av de fire siste tiårene har konsentrasjoner av totalt og oppløst organisk karbon (TOC/DOC, heretter referert til som OC) økt i store deler av den boreale regionen, inkludert Fennoskandia, Canada, Storbritannia og det nordøstlige USA (Evans et al., 2005; De Wit et al., 2007; Monteith et al., 2007; Couture et al., 2012; Valinia et al., 2015). OC er avgjørende for økosystemfunksjoner, det globale karbonkretsløpet og er en kritisk parameter for drikkevannsanlegg (Cole et al., 2007; Battin et al., 2009; Tranvik et al., 2009). Økningen i OC-konsentrasjon i verdifullt drikkevann er bekymringsverdig fordi det fører til problemer med (i) smak, farge og lukt på drikkevannet, (ii) medtransport av organiske miljøgifter (Murphy et al., 1990) og tungmetaller (Frimmel and Huber, 1996), (iii) problemer med membraner og aktivt kull (Summers et al., 1989), (iv) biprodukter etter desinfeksjon (Lavonen et al., 2013) og (v) påvekst/belegg i distribusjonssystemet (Camper, 2004).

Det er gjennomført mye forskning for å forstå de underliggende driverene for den nylige økningen i OC-konsentrasjoner i boreale regioner. Det er en allmenn aksept for at historiske endringer i atmosfærisk nedfall og forsuring har redusert mobiliteten til OC i jorden, og dermed er den nylig identifiserte økningen knyttet til redusert forsuring siden reduksjonen av svovel i jorden har mobilisert tidligere tilbakeholdte organiske stoffer (Monteith et al., 2007; Eimers et al., 2008; Evans et al., 2012; Ledesma et al., 2012; Futter et al., 2014; Valinia et al., 2015; Ledesma et al., 2016). Andre studier peker også på effekter av klimaendringer og endret arealbruk (Larsen et al., 2011; Lepistö et al., 2013; Oni et al., 2015).

Effektene på OC-konsentrasjoner av forsuring og den påfølgende gjenhenting etter forsuring er vanskelig å kvantifisere ved å bruke overvåkingsdata, siden mye av den storskala overvåkingen startet etter at effektene av forsuring var identifisert i overflatevann rundt 1970- og 1980-tallet. Metodene for å rekonstruere OC-konsentrasjoner i innsjøer ved hjelp av sedimentkjerner (VNIRS) ble utviklet tidlig på 2000-tallet (Rosen et al., 2000) og videreutviklet i flere trinn (Cunningham et al., 2011; Rouillard et al., 2011; Bragée et al., 2015; Meyer-Jacob et al., 2015) med forbedring av kalibreringssettet og modellusikkerheten.

Denne metoden har blitt benyttet på flere innsjøer i Sverige og for eksempel vist et minimum i OC-konsentrasjonen under forsuringens maksimum (Bragée et al., 2015; Valinia et al., 2015), mens den i et lengre tidsperspektiv har vist at effektene av tidlig bosetting og arealbruk er den mest fremtredende driveren av OC. I noen tilfeller har disse faktorene gitt større absolutte endringer i OC-konsentrasjon enn endringene som er registrert under forsuringperioden (Rosen, 2005; Meyer-Jacob et al., 2015). Metoden Visible Near Infrared Spectroscopy (VNIRS) har blitt brukt for å rekonstruere OC med gode resultater i Sverige og Canada.

## 1.1 Prosjektets målsetning

Prosjektet har som målsetning å rekonstruere OC-konsentrasjoner i Farrisvann, tilbake i tid før det ble samlet inn systematiske overvåkingsdata og samtidig legge grunnlag for prediksjoner av fremtidige OC-trender.

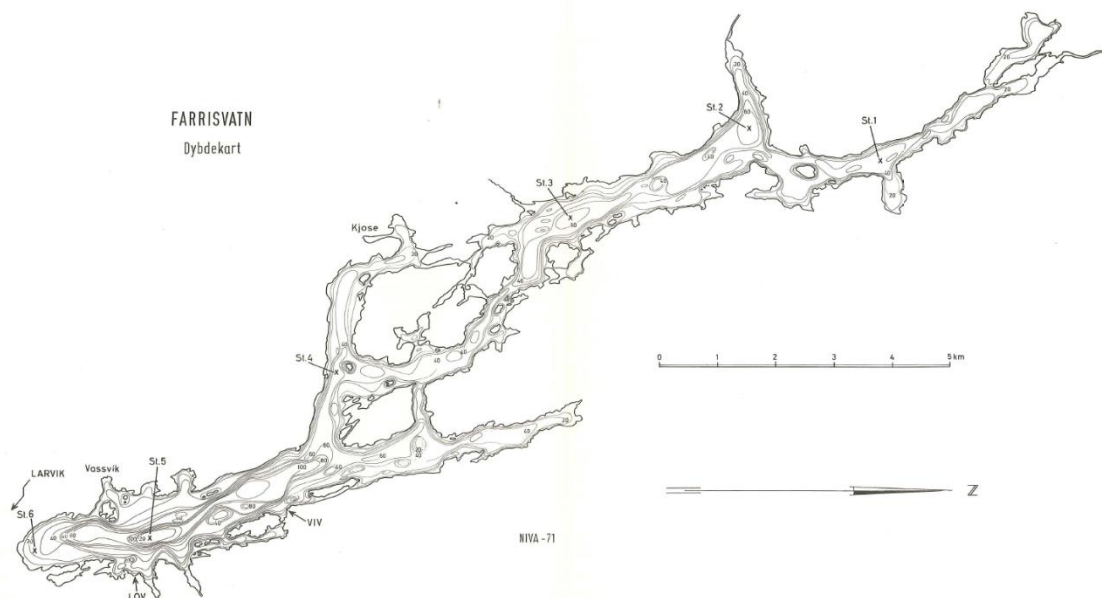
# 2 Metodikk

## 2.1 Karakteristikk Farrisvann

Farrisvann er et stort drikkevannsreservoar nær Larvik i den sørøstlige delen av Norge. Innsjøområdet er 21 km<sup>2</sup> og en del av nedbørsfeltet Siljan med et totalareal på 491 km<sup>2</sup>. Farrisvann er en av de største drikkevannsreservoarene i Norge som leverer drikkevann til ca 160 000 innbyggere. Farrisvann er en dyp, kompleks innsjø med en gjennomsnittlig dybde på 35 m og en maksimumsdybde på 140 m (Figur 1).



Vannets teoretiske oppholdstid er 2,2 år og nedbørsfeltet er hovedsakelig dekket av skog, med noe industri ved den sørligste delen av innsjøen og små, spredte flekker av jordbruksareal.



**Figur 1.** Batymetrisk kart av Farrisvann og de ulike overvåkingsstasjonene. Sedimentkjernene ble tatt nær St. 5 på en utflating rundt 80 meters dyp.

## 2.2 Sedimentinnsamling

Sedimentprøver ble tatt 2. juni 2016 med en Willner gravity-corer. Kjernen ble tatt fra et akkumulasjonsområde rundt 80 meters dyp nær stasjon 5 (Figur 1). Et polyetylenrør (50 cm langt, 6,2 cm indre diameter) ble brukt for å trekke ut hver sedimentkerne (Figur 3). Sedimentprøvene ble skivet med 1 cm intervaller (Figur 3) på stedet for å redusere potensialet for blanding av sedimentene. Sedimentene ble holdt avkjølt (4 °C) i ugjennomsiktige beholdere og lagret for videre laboratorieanalyser. De øverste lagene hadde en ganske klar rust/rødlig farge som indikerer høyt jerninnhold (Figur 2). Lengre ned viste kjernen høy leiredominans.



**Figur 2.** Sedimentinnsamling i juni 2016 på 80m dyp fra båt. Sedimenter ble skivet på stedet med 1 cm intervaller.

## 2.3 Sedimentanalyser

### 2.3.1 Prøveopparbeidelse

Sedimentprøver ble frysetørket i 24 timer på 105°C og veid. Når det var mulig (basert på mengde tilgjengelig materiale) ble prøvene analysert for glødetap (LOI) etter 2 timer på 550 °C for å få frem innholdet av organiske bestanddeler i jorden. Dette ble utført ved NIVAs laboratorium i Oslo.

### 2.3.2 Visible near infrared spectroscopy (VNIRS)

Tidligere konsentrasjoner av TOC i innsjøen ble rekonstruert av visible-near-infrared (VNIR) spectroscopy. Bruk av NIRSystems 6500 instrument utstyrt med en «spinning cup module in diffuse reflectance mode» i bølglengdeområdet fra 400 til 2500 nm med 2-nm intervaller gav 1050 datapunkter. Den målte diffuse refleksjonen (diffuse reflectance; R) ble deretter omdannet til tilsynelatende absorpsjon (apparent absorbance, A) etter ligningen:  $A = \log(1/R)$ .

Før analyse ble sedimentene malt til et fint pulver for å redusere effekter av kornstørrelse og ble lagret i det samme klimakontrollerte rommet som instrumentet for å minimere temperatureffekter. Rekonstruksjonene av TOC i innsjøvann er basert på en overføringsfunksjon mellom VNIR spektra av overflatesedimenter fra innsjøen, det siste akkumulerte materialet og de tilhørende TOC-konsentrasjoner i vannsøylen.

Overføringsfunksjonen ble opprinnelig utviklet av Rosen (2005), videreutviklet av Cunningham et al. (2011) og mer nylig oppdatert av Meyer-Jacob et al. (2015). Den oppdaterte kalibreringsmodellen som ble brukt i denne studien inkluderer overflatesedimenter fra 140 innsjøer fordelt utover Sverige inkludert nemorale, boreale og subarktiske områder og dekker en TOC-gradient fra 0.7 til 22 mg L<sup>-1</sup> i innsjøvann. Den oppdaterte modellen består av 7-PLSR-komponenter og viser en kryssvalidert R<sup>2</sup> på 0.65 og Root mean square error (RMSE) av kryssvalidering (RMSECV) på 3.0 mg L<sup>-1</sup> (Fig. S1 i Meyer-Jacob et al. (2015)). Metoden har blitt anvendt med gode resultater i Sverige og Canada.

### 2.3.3 Røntgen fluorescens spektroskopi

Multi-element geokjemi ved bruk av røntgen fluorescens spektroskopi ble utført for å vurdere de totale konsentrasjonene av makro-elementer og spor-elementer (Rydberg, 2014) inkludert lithogene elementer som Ca, Mg, Zr Al og K, spormetaller Fe, Ni, Cu, Zn, As og Pb og mobile/redoks-elementer som S, P og Mn.

### 2.3.4 Pb<sup>210</sup> datering av sedimentkjerner

For sedimentdatering ble totale <sup>210</sup>Pb aktiviteter bestemt indirekte gjennom analyse av datter-elementet <sup>210</sup>Po ved å følge metoden beskrevet av Sanchez-Cabeza et al. (1998). 150-200 mg frysetørket og oppmalt sediment ble tilsatt <sup>209</sup>Po og totalt oppløst i surt medium ved hjelp av en analytisk mikrobølgeovn. Etter det ble Po isotopen belagt på rene sølvplater og talt via  $\alpha$ -spektrometri med ULTRA-AS Ion-Implanted-Silicon Charged-Particle Detectors (Ortec, Model U-20-450-AS).

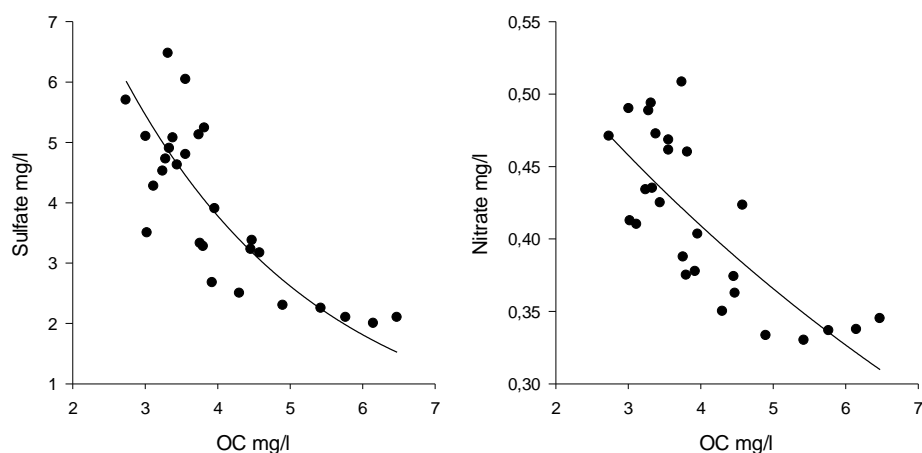
Den vertikale fordelingen av <sup>210</sup>Pb blir ofte brukt for å etablere kronologien i sedimentære avsetninger som er akkumulert i løpet av de siste 100-150 årene (Appleby and Oldfield 1992). For begge kjernene viste <sup>210</sup>Pb avtagende aktiviteter med dybde, etterfulgt av nesten konstante verdier mot kjernebunnen. Sedimentkronologier basert på overskudds <sup>210</sup>Pb (beregnet ved å trekke «supported» <sup>210</sup>Pb fra total <sup>210</sup>Pb) ble estimert ved hjelp av CFSC-modellen (Constant Flux, Constant Sedimentasjon) (Krishnaswamy et al. 1971), som forutsetter en konstant <sup>210</sup>Pb- fluks og en konstant masseakkumuleringshastighet. Sedimentalder og akkumuleringshastighet ble estimert fra helningsvinkelen på minste kvadraters tilpasning for den naturlige logaritmen til <sup>210</sup>Pb-aktiviteten plottet mot dybde. For Langtjern ble den mer generelle CRS-modellen (Constant Rate of Supply) (Appleby and Oldfield 1978) også brukt på grunn av de små variasjonene fra eksponentielt avtak i de øverste lagene. I motsetning til CFCS er denne modellen basert på en antagelse om en konstant <sup>210</sup>Pb fluks, som muliggjør variasjoner i sedimentasjonsratene. Alderen på en viss dybde er avledet fra overskuddet av <sup>210</sup>Pb akkumulert langs hele dybdeprofilen.

## 2.4 Resultater og diskusjon

### 2.5 Nylige trender for OC-konsentrasjoner i Farrisvann

Overvåkingsdata fra Farrisvann viser økning i OC-konsentrasjoner. Konsentrasjonene er doblet i løpet av overvåkingsprogrammet (1982-2014), noe som skaper problemer for vannkvalitet og rensing av drikkevann (Tryland et al 2016). Årlige gjennomsnittskonsentrasjoner viste at både OC og fargemåling har hatt konsistente årlige og sesongmessige mønstre siden midten av 1980-tallet (Tryland et al 2016), og sesongmønsteret fulgte den generelle økende trenden i Farrisvann.

Den mer nylige økningen i OC-konsentrasjoner er nært knyttet til reduksjonen i atmosfærisk avsetning av langtransporterte forurensninger og den påfølgende reduksjonen av svovel- og nitrogeninnholdet i jord og overflatevann (Fig. 3; fra Tryland et al 2016, i trykk). Reduksjon i atmosfærisk nedfall og surhet i overflatevann forklarte 0,68 (svovel) og 0,6 (nitrat) av variasjonen i OC. Økningen i atmosfærisk nedfall har fortrent OC-mobilitet fra jord til overflatevann, og forårsaker dermed en reduksjon av OC-transport fra jord. Konsentrasjonene er redusert i perioden med sur nedbør og den siste økningen er sterkt knyttet til reduksjon av forsuringstrykket og tilbakevending til tilstanden før forsuring (Evans et al., 2012; Valinia et al., 2015).



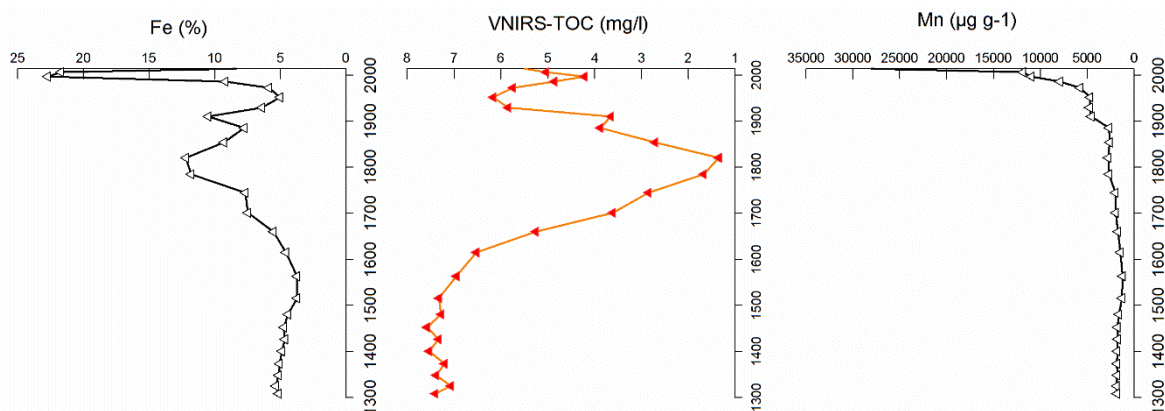
**Figur 3.** Forholdet mellom sulfat, nitrat og OC-konsentrasjoner i løpet av overvåkingsperioden (1985-2014) for Farrisvann. Forholdet ( $r^2$ ) mellom OC og sulfat var 0.68, mens forholdet mellom OC og nitrat var 0.6. (Figur fra Tryland et al 2016, i trykk).

Et stort drikkevannsreservoar i Sverige (Mälaren) som gir drikkevann til Stockholmsområdet (> 1,5 millioner innbyggere) har en lignende bassengkompleksitet og dybde som Farrisvann. Analyser av endring i OC-konsentrasjoner viste en meget sterk kobling til vannets oppholdstid, som indikerer at innsjøen (via mikrobielle aktiviteter og avgassing) endret sammensetningen av OC avhengig av hvor lenge vannet oppholdt seg i sjøen. Forfatterne konkluderte med at i en kompleks innsjø som ligner på Mälaren kan plasseringen av råvannsinntaket være avgjørende i en naturlig rensing fra OC-konsentrasjoner for drikkevannsanlegget, og vurderinger som dette kan gi nyttige retningslinjer og økonomiske fordeler for vannbehandlingsanlegg (Köhler et al., 2013).

### 2.6 XRF-sedimentanalyser og VNIRS-rekonstruksjon

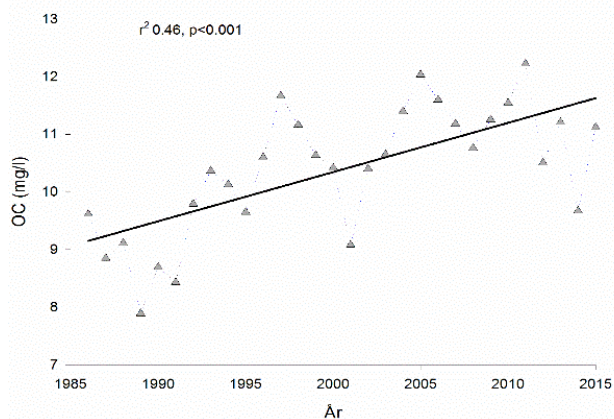
OC-rekonstruksjoner av sedimenter fra Farrisvann var ikke vellykket siden redoksreaksjoner og sediment diagenese dominerte geokjemien i sedimentet. Dette fenomenet kan visualiseres i figur 2 siden sedimentfargen er "rusten", noe som indikerer høy mobilisering av jern (Fe) og mangan (Mn) i de øverste lagene av sedimentkjernen. Mengden av Fe (%) av den totale mengden av sediment øker vesentlig mot de øvre delen av sedimentkjernen, fra 5% til 25% i de øverste 5 cm av kjernen, noe som indikerer en meget sterk redoks- og diagenese-gradient i sedimentkjernen. Dette er ytterligere forsterket av Mn-mønsteret i sedimentkjernen. Stabile Mn-konsentrasjoner (ppm) forekom opp til ca 7 cm av kjernen der Mn økte fra omkring 4000 ppm til 28 000 ppm i det øverste laget av sedimentkjernen.

Den store økningen av Mn-konsentrasjoner mot de øverste lagene i sedimentkjerne indikerer redoks gradient i sediment. Mn-konsentrasjonene i sediment målt i Farrisvann er svært høy for den boreale regionen innsjøen ligger i. Basert på litteraturen vi kjenner til, er det bare i Bajkalsjøen i Sibir som har fått påvist tilsvarende intense redoks-gradienter (Torres et al., 2014). Mn-konsentrasjon i sediment lik de i Farrisvann har blitt identifisert i kalkede norske innsjøer, hvor Mn-anrikningen er sterkt knyttet til den raske økningen i pH etter kalking av innsjøene (Hindar et al., 2015). Denne remobiliseringen av Fe og Mn kan ha en vesentlig påvirkning på karbonsyklus (C) i sedimentet. De svært høye konsentrasjonene av Mn og Fe i sedimentet forårsaker betydelig usikkerhet i VNIRS-rekonstruksjoner og metoden kan derfor ikke benyttes for Farrisvann (Figur 4).



**Figur 4.** Utvalgte parametere for sediment geokjemi og VNIRS – TOC rekonstruksjoner for Farrisvann. NB! TOC-rekonstruksjonen er ikke pålitelig pga. for høye Fe og Mn konsentrasjoner i sedimentet.

Selv om vi ikke var i stand til å rekonstruere TOC-konsentrasjoner for Farrisvann, kan vi gjøre det for en annen norsk innsjø, Langtjern. Langtjern er en velstudert boreal innsjø i et uforstyrret område med hensyn til endringer i arealbruk. Forskning på forurening startet på begynnelsen av 1970-tallet og det er et av de viktigste områdene for langsiktig overvåking i Europa. Langtjern har som Farrisvann opplevd betydelige økninger i OC-konsentrasjoner (figur 5) i løpet av de fire siste tiårene. Økningen av OC i Langtjern er knyttet til reduksjon av atmosfærisk sur nedbør (De Wit et al., 2007). Konsentrasjonene av OC i Farrisvann er litt lavere enn Langtjern, men den relative endringen er lik for begge områdene i overvåkingsperioden. Vi var i stand til å rekonstruere Langtjern siden innsjøen ikke viser noen tegn til en redoks-gradient og konsentrasjoner for Mn og Fe ikke økte vesentlig mot det øverste laget av sedimentkjernen. Mn-konsentrasjonen i Langtjern var  $60 \mu\text{g g}^{-1}$  i det øverste laget av kjernen, sammenlignet med Farrisvann  $28000 \mu\text{g g}^{-1}$ . Betydelige forskjeller er også identifisert for Fe, mens Langtjern viser små endringer i de øverste 10 cm av kjernen (ca. 0,5%), Farrisvann svinger mellom 5 og 22% av Fe i sedimentet.

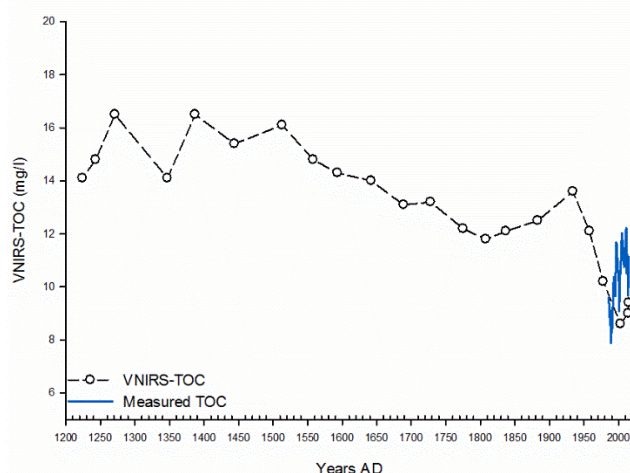


**Figur 5.** Arlige OC-konsentrasjoner for Langtjern for årene 1985-2015

VNIRS-TOC rekonstruksjon av Langtjern viser en vesentlig endring i innsjøvann OC i løpet av de siste par hundre år (figur 6). Den langsiktige rekonstruksjonen i Langtjern viser en gradvis reduksjon i OC-

konsentrasjoner i innsjøvannet fra ca. 1200 e.Kr. (nederst i kjernen). Den langsiktige nedgangen i OC i innsjøvann er knyttet til mengden akkumulert OC i jorda og menneskeskapte endringer, inkludert arealdisponering i nedbørsfeltet, for eksempel dyr på beite, skogforvaltning og aktiv bruk av land rundt innsjøen (fig. 6). Den langsiktige nedgangen i OC-konsentrasjoner følger samme mønster som OC-registreringer som tidligere er rapportert fra Sverige (Cunningham et al., 2011; Rosén et al., 2011; Bragée et al., 2013a; Bragée et al., 2013b; Bragée et al., 2015; Meyer-Jacob et al., 2015; Valinia et al., 2015). På begynnelsen av det 20. århundret startet en gradvis økning i sur nedbør over Fennoskandia, en utvikling som nådde toppen rundt 1970-1980-tallet (Wright et al., 1976; Schopp et al., 2003). Den langsiktige rekonstruksjonen av OC-konsentrasjoner for Langtjern har et minimum i nærheten av toppen for sur nedbør (figur 6). I denne perioden var estimerte OC-konsentrasjonen nesten bare halvparten av konsentrasjonene som rekonstruert ved begynnelsen av det 13. århundre.

Forskjellen mellom overvåkingsdata og rekonstruerte OC-konsentrasjoner for Langtjern er relativt små, noe som indikerer et godt samsvar mellom overvåking og modellering. Det er verdt å merke seg at modellen ikke vil fange den årlige variasjonen som vises i overvåkingsdata.



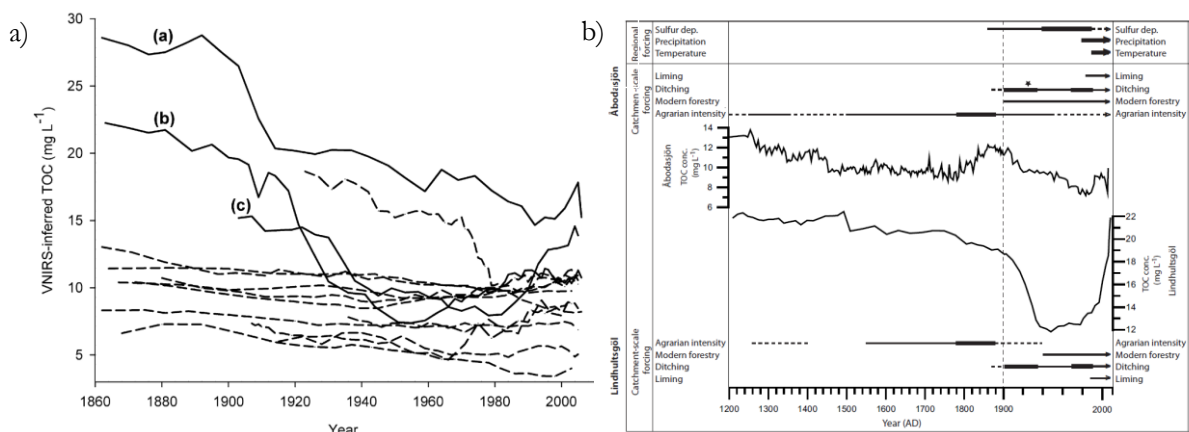
**Figur 6.** Langtids VNIRS-TOC rekonstruksjon (stiplet linje) av Langtjern og samsvaret med årlig overvåkingsdata (blå linje) for årene 1986-2015.

Vanddirektivets definisjon av referanseperioden er knyttet til pre-industrialisering, urbanisering og intensivering av jordbruket. Sammenlignet med år 1200 e.Kr. er OC-konsentrasjonene redusert med ca 35%, der den største nedgangen skjer rundt toppen av forsøringsperioden i 1970-1990. Den relative endringen mellom pre-industrielle forhold (1850-1860) sammenlignet med dagens forhold tilsvarer en 25% nedgang i OC-konsentrasjoner. Dette betyr at den store nedgangen mellom 1950-1990 er i samme størrelsesorden som den langsiktige nedgangen som starter 1200 e.Kr. Det er helt klart at forsuring og økningen i atmosfærisk nedfall var drivere for endringene i OC løpet av forrige århundre, og at den siste økningen identifisert ved hjelp av overvåkingsdata er en oppgang i OC knyttet til redusert forsuring i nedbørsfeltet.

Den første rekonstruksjonen av OC i en norsk innsjø følger det som tidligere er identifisert i flere svenske områder, inkludert over store romlige skalaer og innsjøstørrelser (figur 7). I Langtjern var langsiktig reduksjon av OC knyttet til arealforvaltningen og arealutnyttelse noe større enn effektene av forsuring i løpet av forrige århundre. Mens effektene av arealutnyttelse har skjedd over hundrevis av år, kan effekten av forsuring knyttes til det siste århundret. Dette betyr at forsuring har immobilisert OC i jorda med en mye større rate enn den langsiktige nedgangen, noe som har forårsaket en høyere reduksjonsrate i løpet av det siste århundret.

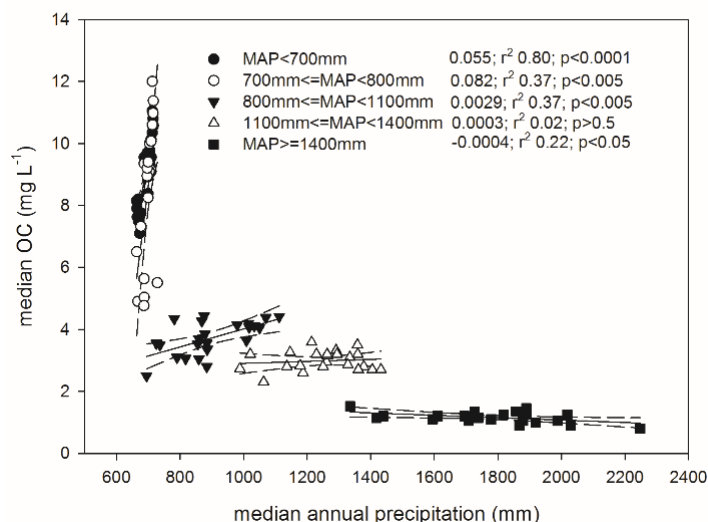
Sammenligningen mellom overvåkingsdata og VNIRS-rekonstruksjoner i Sverige har i mange tilfeller vist at konsentrasjoner av OC nærmer seg konsentrasjonene før forsuring, noe som viser en ekstremt rask respons av OC i innsjøene på ulike romlige og tidsmessige skalaer (Valinia et al., 2015). Dette er også tilfellet for Langtjern, der estimerte OC-konsentrasjoner før forsuring er nær konsentrasjoner som er målt i dagens

overvåkingsdata. Det kan konkluderes med at frigjøringen av OC som har samband med redusert forurening ikke vil ha så sterk effekt i fremtiden, og potensielt vil andre drivere være ansvarlig for ytterligere økning i OC i fremtiden. Vi vil forvente at dette også er tilfelle for Farrisvann, gitt at det ikke skjer store menneskeskapte arealbruksendringer i nedbørfeltet.



**Figur 7.** VNIRS-TOC rekonstruksjoner i flere svenske innsjøer med fokus på det siste århundret. Minima i OC-konsentrasjoner ble nådd nær til toppen av sur nedbør belastningen. Figurer og videre forklaringer finnes i a) Valinia et al 2015 og b) Brageé et al 2015.

I nyere studier for Fennoskandia med 474 lokaliteter, inkludert drikkevannsreservoarer, elver, bekker og innsjøer på tvers av en rekke nedbørfeltstørrelser og arealtyper er det påvist en sammenheng mellom nedbør og økning i OC over en bredt geografisk gradient (de Wit et al., 2016). Undersøkelsen viste at det er en meget sterk positiv sammenheng mellom OC-konsentrasjoner og nedbør i den tørre boreale regionen  $<700$  mm / år og at styrken reduseres når du går til mer fuktige områder. En negativ sammenheng ble påvist i de våteste områdene  $>1400$  mm / år (figur 8). Resultatene viste at en 10% økning i nedbør (basert på fremtidig klimaprediksjonsmodellering) kan føre til en 32-76% økning i OC-konsentrasjoner i Fennoskandia innen 30-50 år på grunn av et våtere klima (de Wit et al., 2016).



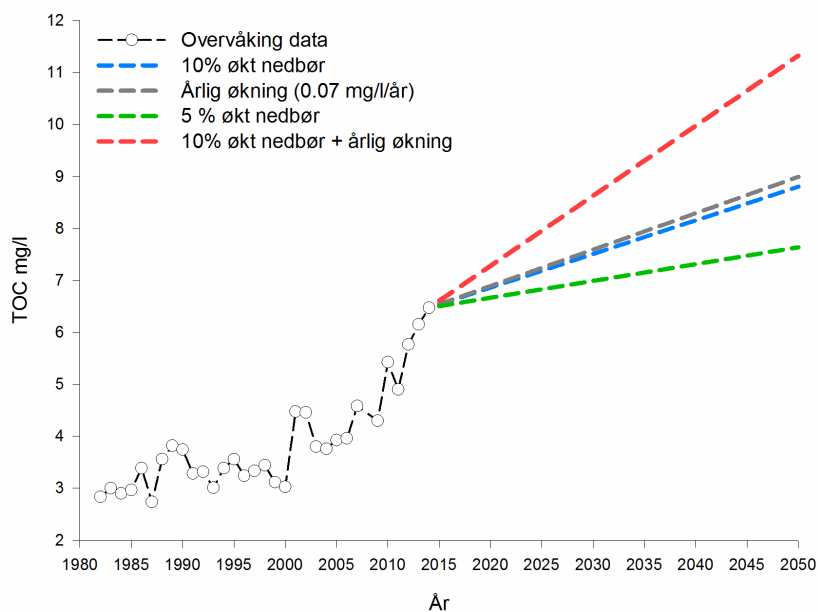
**Figur 8.** Forhold mellom median OC-konsentrasjoner og median årlig nedbør for 474 områder på tvers av Fennoskandia. Figur og forklaringer finnes i de Wit et al 2016.

Den langsiktige mediannedbøren (1970-2015) var 1002 mm/år i Farrisvann noe som faller innenfor den "boreale våte" regionen hvor nedbøren varierer fra 800-1100 mm/år. En 10% økning i nedbør kan, basert på beregningene gitt over, øke OC-konsentrasjonene med 35% fram til 2050.

## 2.7 Fremtidige prediksjoner om OC-konsentrasjoner i Farrisvann

Nedenfor er det gitt en vurdering av hvor mye OC-konsentrasjoner kan øke på grunn av ulike faktorer i Farrisvann. Det er viktig å understreke at disse fremtidige prediksjonene er basert på forenklinger av virkeligheten og at mer komplekse interaksjoner kan oppstå i løpet av denne tiden, eller at det kommer inn andre drivere som vi med dagens kunnskap kan ikke forutsi. Faktorer som stormer og ekstreme hendelser har ikke blitt inkludert i denne analysen på grunn av usikkerheter i både frekvens, intensitet og effekt på OC-dynamikken.

Den enkleste måten å forutsi fremtidige endringer er basert på lineær økning (Mann-Kendall test), som forutsetter ingen endring i drivere i fremtiden eller svekkelse av trenden (figur 9, svart stiplet linje). Den viktigste driveren for den senere tids økning av OC i Farrisvann har vært nedgang i sulfat- og nitrat-konsentrasjoner fra atmosfæriske kilder (figur 3). Konsentrasjoner knyttet til atmosfærisk nedfall nærmer seg nå pre-industrielle nivåer, og det er lite sannsynlig med store endringer i dette mønsteret i fremtiden. Forståelsen av hvilke effekter atmosfærisk forurening hadde på OC-konsentrasjoner styrkes ved hjelp av rekonstruksjonene som er gjennomført i Norge og Sverige. Den årlig økning av OC i Farrisvann var (0,07 mg/l). Sammenlignet med konsentrasjoner i målt i 2014, er det predikert en fortsatt økning i OC-konsentrasjoner med 39% fram til 2050.



**Figur 9.** Fremtidige prediksjoner (2050) av OC-konsentrasjoner i Farrisvann basert på langtidsovervåkingsdata. Den grå linjen representerer Mann-Kendall Sen-slope på 0,07 mg / l basert på tidsserien fra 1980 (Tryland et al, i trykk). De grønne og blå stiplede linjene er basert på forholdet mellom OC og en nedbør-økning på henholdsvis 5 og 10% (de Wit et al 2016).. Den røde linjen er den kombinerte effekten av fortsatt trendøkning (0,07 mg/l) og en nedbørøkning på 10% frem til 2050.

Vi estimerte effekten av fremtidig nedbør på OC-konsentrasjoner med forholdet utviklet av de Wit et al. (2016). Dette indikerer en 35% økning i OC-konsentrasjoner fram mot 2050, gitt en 10% økning av nedbør i samme periode (Figur 8). Vi ser dette scenariet som troverdig siden de fleste klimamodeller viser en betydelig økning i nedbør i Fennoskandia, og i dette området vil økningen i nedbør påvirke hydrologi og

dermed også lateral eksport av OC fra jord til overflatevann. Hvis en regner inn en viss effekt av fortsatt redusert sur nedbør fram mot 2050 og en nedbør-økning på 10% (grå kurve i figur 9) kan man forvente at OC-konsentrasjonen i Farrisvann øker med om lag samme takt fram mot 2050 som den vi opplever i dag.

Vi kombinerte effektene av redusert forsuring og de potensielle effektene av fremtidig økning i nedbør for å utvikle et "worst case scenario", der økningen identifisert i overvåkingsperioden fortsetter med ytterligere press fra framtidens klima. I dette scenariet vil konsentrasjonen øke med 75% fram til 2050, som er dobbelt så mye som identifisert i overvåkingsperioden (Figur 9, rød stiplede linje). Dette scenariet ville gi Farrisvann OC-konsentrasjoner som er fire ganger høyere enn i begynnelsen av overvåkingsperioden. Dette scenariet er potensielt «worst case», mens det har vært vist tidligere at ekstreme hendelser (flom, tørke) kan gi en alvorlig økning av OC-konsentrasjoner i vannsøylen, og at det tar flere år for konsentrasjonene å avta igjen.



### 3 Konklusjoner

- VNIRS-OC rekonstruksjon var upålitelig for Farrisvann siden det var et sterkt redokssignal i sedimentprofilen.
- Historiske rekonstruksjoner basert på en norsk og flere svenske innsjøer viser at forsuring er den viktigste driveren av OC i løpet av det forrige århundret, og at konsentrasjonene i dag har returnert til konsentrasjoner som trolig var typiske før forsuring i Norge og Sverige.
- Dersom økningen i OC fortsetter likt (den overvåking data) 1982-2014, og redusert forsuring er hoveddriveren i fremtiden, kan OC-konsentrasjonen øke med 39% fram til 2050. Dette er ikke sannsynlig som forsuring har falt kraftig siden 90-tal.
- Fremtidige nedbørsøkninger på 5 og 10% i Farrisvann kan føre til opp til en 18- 35% økning i OC-konsentrasjoner frem til 2050, som er like stor som den identifiserte økningen mellom 1985-2014.
- Hvis flere stressorer opptrer samtidig, slik som framtidige klimaendringer og gjenhenting fra forsuring, kan OC-konsentrasjonene øke betydelig fram til 2050. som et «worts case» scenario kan effekten av økt nedbør og gjenhenting fra forsuring føre til opptil 75% økning i OC sammenlignet med dagens konsentrasjoner og om lag en 300% økning siden tidlig på 1980-tallet.
- Vi kan forvente en ytterligere økning i OC-konsentrasjoner i Farrisvann i fremtiden, og planlegging av renseprosesser bør gjøres med hensyn til framtidige klimaendringer som den viktigste driveren av økninger i OC.

## 4 Referanser

- Battin, T.J., Luysaert, S., Kaplan, L.A., Aufdenkampe, A.K., Richter, A. and Tranvik, L.J., 2009. The boundless carbon cycle. *Nature Geoscience* 2(9) 598-600.
- Bragée, P., Choudhary, P., Routh, J., Boyle, J.F. and Hammarlund, D., 2013a. Lake ecosystem responses to catchment disturbance and airborne pollution: an 800-year perspective in southern Sweden. *Journal of Paleolimnology* 50(4) 545-560.
- Bragée, P., Mazier, F., Rosén, P., Fredh, D., Broström, A., Granéli, W. and Hammarlund, D., 2013b. Forcing mechanisms behind variations in total organic carbon (TOC) concentration of lake waters during the past eight centuries—palaeolimnological evidence from southern Sweden. *Biogeosciences Discussions* 10(12) 19969-20003.
- Bragée, P., Mazier, F., Nielsen, A.B., Rosén, P., Fredh, D., Broström, A., Granéli, W. and Hammarlund, D., 2015. Historical TOC concentration minima during peak sulfur deposition in two Swedish lakes. *Biogeosciences* 12(2) 307-322.
- Camper, A.K., 2004. Involvement of humic substances in regrowth. *International journal of food microbiology* 92(3) 355-364.
- Cole, J.J., Prairie, Y.T., Caraco, N.F., McDowell, W.H., Tranvik, L.J., Striegl, R.G., Duarte, C.M., Kortelainen, P., Downing, J.A., Middelburg, J.J. and Melack, J., 2007. Plumbing the Global Carbon Cycle: Integrating Inland Waters into the Terrestrial Carbon Budget. *Ecosystems* 10(1) 172-185. 10.1007/s10021-006-9013-8
- Couture, S., Houle, D. and Gagnon, C., 2012. Increases of dissolved organic carbon in temperate and boreal lakes in Quebec, Canada. *Environmental Science and Pollution Research* 19(2) 361-371.
- Cunningham, L., Bishop, K., Mettavanio, E. and Rosen, P., 2011. Paleoecological evidence of major declines in total organic carbon concentrations since the nineteenth century in four nemoboreal lakes. *Journal of Paleolimnology* 45(4) 507-518. Doi 10.1007/S10933-010-9420-X
- De Wit, H.A., Mulder, J., Hindar, A. and Hole, L., 2007. Long-term increase in dissolved organic carbon in streamwaters in Norway is response to reduced acid deposition. *Environmental Science & Technology* 41(22) 7706-7713.
- de Wit, H.A., Valinia, S., Weyhenmeyer, G.A., Futter, M.N., Kortelainen, P., Austnes, K., Hessen, D.O., Raike, A., Laudon, H. and Vuorenmaa, J., 2016. Current Browning of Surface Waters will be Further Promoted by Wetter Climate. *Environmental Science & Technology Letters*.
- EC 2000. Directive 2000/60/EC of the European Parliament and on the Council of 23 October 2000 establishing a framework for Community action in the field of water policy. (Official Journal L; 327)(1)
- Eimers, M.C., Watmough, S.A., Buttle, J.M. and Dillon, P.J., 2008. Examination of the potential relationship between droughts, sulphate and dissolved organic carbon at a wetland-draining stream. *Global Change Biology* 14(4) 938-948.
- Evans, C.D., Monteith, D.T. and Cooper, D.M., 2005. Long-term increases in surface water dissolved organic carbon: Observations, possible causes and environmental impacts. *Environmental Pollution* 137(1) 55-71. Doi 10.1016/J.Envpol.2004.12.031
- Evans, C.D., Jones, T.G., Burden, A., Ostle, N., Ziełiński, P., Cooper, M.D., Peacock, M., Clark, J.M., Oulehle, F. and Cooper, D., 2012. Acidity controls on dissolved organic carbon mobility in organic soils. *Global Change Biology* 18(11) 3317-3331.
- Frimmel, F. and Huber, L., 1996. Influence of humic substances on the aquatic adsorption of heavy metals on defined mineral phases. *Environment International* 22(5) 507-517.
- Futter, M., N., Valinia, S., Löfgren, S., Köhler, S.J. and Fölster, J., 2014. Long-term trends in water chemistry of acid-sensitive Swedish lakes show slow recovery from historic acidification. *Ambio*. 10.1007/s13280-014-0563-2
- Hindar, A., Couture, R.-M., Eriksen, T.E. and Rognerud, S., 2015. Mechanisms for metal nodule formation on sediment surfaces of limed lakes.
- Köhler, S.J., Kothawala, D., Futter, M.N., Liungman, O. and Tranvik, L., 2013. In-lake processes offset increased terrestrial inputs of dissolved organic carbon and color to lakes. *Plos One* 8(8) e70598.

- Larsen, S., Andersen, T. and Hessen, D.O., 2011. Climate change predicted to cause severe increase of organic carbon in lakes. *Global Change Biology* 17(2) 1186-1192.
- Lavonen, E.E., Gonsior, M., Tranvik, L.J., Schmitt-Kopplin, P. and Kohler, S.J., 2013. Selective chlorination of natural organic matter: Identification of previously unknown disinfection byproducts. *Environmental Science & Technology* 47(5) 2264-2271.
- Ledesma, J.L., Futter, M.N., Laudon, H., Evans, C.D. and Köhler, S.J., 2016. Boreal forest riparian zones regulate stream sulfate and dissolved organic carbon. *Science of the Total Environment* 560 110-122.
- Ledesma, J.L.J., Köhler, S.J. and Futter, M.N., 2012. Long-term dynamics of dissolved organic carbon: Implications for drinking water supply. *Science of the Total Environment* 432(0) 1-11. 10.1016/j.scitotenv.2012.05.071
- Lepistö, A., Futter, M.N. and Kortelainen, P., 2013. Almost 50 years of monitoring shows that climate, not forestry, controls long-term organic carbon fluxes in a large boreal watershed. *Global Change Biology*.
- Meyer-Jacob, C., Tolu, J., Bigler, C., Yang, H. and Bindler, R., 2015. Early land use and centennial scale changes in lake-water organic carbon prior to contemporary monitoring. *Proceedings of the National Academy of Sciences*. 10.1073/pnas.1501505112
- Monteith, D.T., Stoddard, J.L., Evans, C.D., de Wit, H.A., Forsius, M., Høgåsen, T., Wilander, A., Skjelkvåle, B.L., Jeffries, D.S. and Vuorenmaa, J., 2007. Dissolved organic carbon trends resulting from changes in atmospheric deposition chemistry. *Nature* 450(7169) 537-540.
- Murphy, E.M., Zachara, J.M. and Smith, S.C., 1990. Influence of mineral-bound humic substances on the sorption of hydrophobic organic compounds. *Environmental Science & Technology* 24(10) 1507-1516.
- Oni, S.K., Tiwari, T., Ledesma, J.L., Ågren, A.M., Teutschbein, C., Schelker, J., Laudon, H. and Futter, M.N., 2015. Local-and landscape-scale impacts of clear-cuts and climate change on surface water dissolved organic carbon in boreal forests. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences* 120(11) 2402-2426.
- Rosen, P., 2005. Total organic carbon (TOC) of lake water during the Holocene inferred from lake sediments and near-infrared spectroscopy (NIRS) in eight lakes from northern Sweden. *Biogeochemistry* 76(3) 503-516. Doi 10.1007/S10533-005-8829-1

NIVA: Norges ledende kompetansesenter på vannmiljø

NIVA gir offentlig vannforvaltning, næringsliv og allmennheten grunnlag for god vannforvaltning gjennom oppdragsbasert forsknings-, utrednings- og utviklingsarbeid. NIVA kjennetegnes ved stor faglig bredde og godt kontaktnett til fagmiljøer i inn- og utland. Faglig tyngde, tverrfaglig arbeidsform og en helhetlig tilnæringsmåte er vårt grunnlag for å være en god rådgiver for forvaltning og samfunnsniv.



Norsk institutt for vannforskning

Gaustadalléen 21 • 0349 Oslo  
Telefon: 02348 • Faks: 22 18 52 00  
[www.niva.no](http://www.niva.no) • [post@niva.no](mailto:post@niva.no)