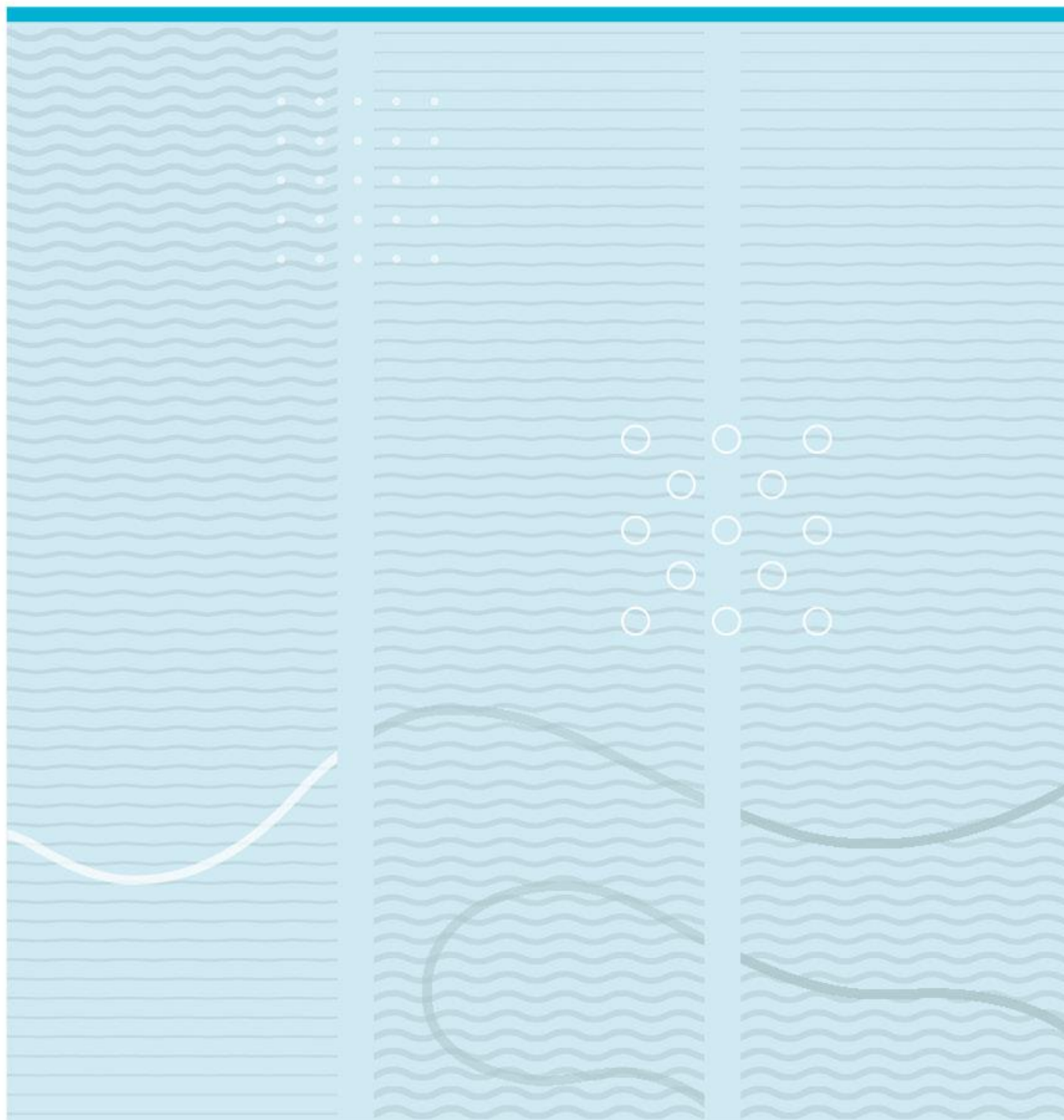


Terje Mo Nordal

# Årsaker til endringer i organisk karboninnhold i boreale innsjøer: En litteraturgjennomgang med fokus på Fennoskandia og Telemark







Universitetet i Sørøst-Norge  
Fakultet for teknologi, naturvitenskap og maritime fag  
Institutt for natur, helse og miljø  
Postboks 235  
3603 Kongsberg

<http://www.usn.no>

© 2022 Terje Mo Nordal

Denne avhandlingen representerer 60 studiepoeng  
Bilde: Vassenden, Notodden. © Terje Mo Nordal 2021

“Water, like religion and ideology, has the power to move millions of people. Since the very birth of human civilization, people have moved to settle close to it. People move when there is too little of it. People move when there is too much of it. People journey down it.

People write, sing and dance about it. People fight over it.

And all people, everywhere and every day, need it.”

- Mikhail Gorbatsjov



## Sammendrag

Boreale innsjøer har endret seg markant i de siste tiår, mengden totalt organisk karbon (TOC) har økt kraftig og innsjøenes rolle i den globale karbonsyklusen har fått økt oppmerksomhet på bakgrunn av endringene. Basert på gjennomgang av tilgjengelig litteratur og innsjødata fra 1000 norske innsjøer for perioden 1995-2019 med søkelys på Telemark, er det vist at TOC-konsentrasjonene i boreale innsjøer har økt kraftig siste 30 år. Mange innsjøer har hatt økning på over 100% mens gjennomsnittso økningen for innsjøer i Telemark er på 27%. Med økte TOC-konsentrasjoner følger også endringer i farge i innsjøene, Fe-konsentrasjonene har økt i samme takt som TOC og sammen danner de sterke lysabsorberende bindinger som har negativ effekt på primærproduksjonen og påvirker varmfordeling og stratifisering i innsjøene. Mekanismene som driver TOC-økningene er sammensatt og inkluderer både reduksjon i sur nedbør og konsekvenser som følge av klimaendringer. En markant nedgang i sulfat-konsentrasjonene er registrert i de fleste boreale områder som følge av reduksjonen i sur nedbør, som et resultat har løseligheten av det organiske materialet i nedbørfeltet økt og deretter ført til at mer TOC har blitt tilgjengelig for eksport til innsjøene. Med klimaendringer opplever vi kraftigere og mer intense nedbørsepisoder, i kombinasjon med hyppigere tørkeperioder kan dette føre til endring i de hydrologiske transportrutene i nedbørfeltet og åpne opp for mer tilførsel av TOC til innsjøene.

Økende temperaturer fører til forlenget vekstsesong og kortere vintre med mindre snø og isdekke, noe som fører til mer eksport av TOC. Dersom effekten av reduksjonen i sur nedbør på sikt avtar, er det ventet at klimaendringer blir en stadig sterkere driver for TOC-økninger i fremtiden.

Boreale innsjøer, i tillegg til oppdemte og regulerte innsjøer, er svært aktive områder hvor store mengder TOC lagres i bunnsedimentene, i tillegg er de fleste innsjøene kilder til utslipp av CO<sub>2</sub> og CH<sub>4</sub> ved at TOC mineraliseres ved hjelp av bakteriell nedbryting. Prosessering av TOC i innsjøene avhenger sterkt av vannets oppholdstid, ved kraftigere og økte mengder med nedbør blir det kortere oppholdstid, mindre tid til prosessering og en økning i TOC-konsentrasjonene. Med hyppigere tørkeperioder og lengre oppholdstid vil mer TOC kunne prosesseres, flokkuleres til POC og lagres i sedimentene i tillegg til økt mineralisering til CO<sub>2</sub> og CH<sub>4</sub>. TOC kan derfor vise store variasjoner gjennom sesong og fra år til år, økt overvåking og tettere prøvetakingsprogram kan være et viktig verktøy for videre kartlegging av TOC i boreale innsjøer.

## Abstract

Lakes in the boreal biome have changed significantly during the last few decades, the amount of TOC (total organic carbon) have increased rapidly and as a result the role of lakes in the global carbon cycle have seen an increase in attention. Based on extensive literature reviews and water chemistry data from 1000 Norwegian lakes during the period 1995-2019, focusing on lakes in the Telemark region, TOC-concentrations have been shown to increase significantly during the past 30 years. Many lakes have seen an increase above 100%, while the average increase of the studied lakes in Telemark has been 27%. Changes in lake color are synonymous with increased TOC-concentrations, concentrations of iron (Fe) in boreal lakes have shown a similar rise as TOC and together they form powerful light-absorbing molecular bindings that implies a negative impact on lake primary productivity as well as in-lake heat circulation and stratification. The mechanisms driving the increase of TOC is complex and includes both reductions in acid rain and climate change impacts. As a result of declining acid rain deposition, a significant decrease in the amount of sulfate ( $\text{SO}_4^{2-}$ ) have been registered in the majority of the boreal lakes, this have led to an increase in the solubility of the organic material in the catchment thus making way for more TOC export. With climate change we are seeing heavier and more intense precipitation, combined with more frequent dry spells this have the potential to alter the hydrological patterns in the catchment and make more TOC accessible for export.

Increasing temperatures extends the growing season and shortens the winter with less ice and snow cover, this in turn can lead to more export and higher concentrations of TOC in lakes. If the effect of reduced acid rain deposition is decreasing, we can expect the effects of climate change to strengthen and become an even bigger contributor to increasing amounts of TOC in the future. Boreal lakes, including reservoirs and regulated lakes, are highly active sites where large amounts of TOC are stored in lake sediments, most boreal lakes are also sources of  $\text{CO}_2$  and  $\text{CH}_4$  to the atmosphere by the process of mineralization of TOC through bacterial respiration. Processing of TOC in boreal lakes are strongly linked to water retention time, with increased precipitation water retention time will decrease and give less time for processing of TOC. More dry spells and longer water retention time will thus lead to an increase in the processing of TOC through flocculation to POC, permanent storage and mineralization to  $\text{CO}_2$  and  $\text{CH}_4$  in lake sediments. Fluxes of TOC-concentrations can vary annually and throughout the seasons, increased surveillance and sampling programs can be an important tool for further investigations on the future fate of TOC in boreal lakes.

# Innholdsfortegnelse

Sammendrag .....	4
Abstract .....	5
Innholdsfortegnelse .....	6
Forord .....	7
1 Innledning.....	8
1.1 Bakgrunn.....	8
1.2 Problemstilling.....	11
2 Metode .....	12
3 Resultater og Diskusjoner .....	13
3.1 Den globale karbonsyklusen .....	13
3.2 TOC i Boreale innsjøer .....	15
3.3 Klimaendringer og TOC-økning.....	25
3.3.1 Nedbør og temperatur .....	25
3.3.2 Tørke .....	27
3.3.2 Temperatur .....	28
3.3.2 Sur nedbør .....	30
3.4 Landskapsendringer og karbon i nedbørfelt .....	35
3.5 TOC og fargeendringer .....	39
3.6 Karbonlagring i innsjøsedimenter .....	43
3.7 Klimagasser, dannelse og utslipp fra boreale innsjøer .....	46
3.8 Regulerte innsjøer .....	51
3.9 Innsjøer i Telemark .....	53
3.3.1 Vassenden .....	59
3.3.2 Totak .....	61
3.3.3 Heddalsvatnet .....	62
4 Konklusjon .....	64
5 Referanser/litteraturliste .....	65
6 Oversikt over tabeller og figurer .....	75
7 Vedlegg .....	77



## Forord

I denne oppgaven er det samlet og presentert kunnskap, informasjon og status om karbonsyklusen i boreale innsjøer. Det fokuseres på de ulike kildene og potensielle drivere for økt tilførsel av karbon, opptak og utslipp fra innsjøene, og hva som regulerer sammensetningen og mengden av disse.

Oppgaven er et resultat av et større litteratursøk om et svært aktuelt tema som det diskuteres og forskes aktivt på, og som opplever økt fokus og oppmerksomhet for sin rolle i den globale karbonsyklusen.

I tillegg til karbonsyklus og karbonkilder settes det søkelys på klimapåvirkning og klimagassutslipp fra boreale innsjøer. Avslutningsvis presenteres innsjøer i Telemark fra Nivas «1000-sjøerundersøkelser» og 3 eksempler er tatt ut for en nærmere gjennomgang.

Jeg vil gjerne takke veileder Hans Renssen for gode råd underveis i arbeidet med et krevende men samtidig spennende og tidsaktuelt tema.

Til slutt vil jeg takke min kone og mine to barn for fantastisk tålmodighet, inspirasjon og motivasjon til å ferdigstille denne oppgaven.

Seljord, 14/5-2022

Terje Mo Nordal

# 1 Innledning

## 1.1 Bakgrunn

Økt utslipp av CO<sub>2</sub> til atmosfæren som følge av forbrenning av fossilt brensel er hoveddriver bak den globale oppvarmingen vi ser i dag, dette har svært alvorlige følger for klimaet på planeten og det er helt avgjørende å redusere CO<sub>2</sub>-innholdet i atmosfæren for å bremse denne utviklingen (Hanssen-Bauer m.fl 2017). FNs klimapanel, også kjent som “The Intergovernmental Panel on Climate Change” (IPCC), slår fast at konservering og forbedring av økosystemer med karbonlagring- og opptaksegenskaper, i tillegg til naturlige karbonlagre, vil være en av de viktigste og mest effektive løsningene i våre forsøk på å bekjempe klimaendringene (Masson-Delmotte m.fl 2021).

Karbon har i de siste tiår blitt et begrep vi i stadig større grad forholder oss til, særlig innen klima og miljødebatten, men også fra økt eksponering gjennom media og politikk. Karbonets ulike former er godt kjent i den globale karbonsyklusen, mens det er først i de senere tiår at jordens innsjøer har fått økt oppmerksomhet for sin rolle. Innsjøer dekker kun 0,5% av jordklodens overflate og har tidligere nærmest blitt oversett og sett på som en ubetydelig aktør (Sobek m.fl 2006), og et «passivt rør» hvor karbon kun passerer på vei videre i den globale syklusen. Dette har derimot endret seg og innsjøene har vist seg å spille en svært viktig rolle som høyst reaktive områder hvor tilført organisk karbon prosesseres, sedimenteres og omdannes til klimagasser (Cole m.fl 2007).

Det er ventet mer nedbør og økte temperaturer i fremtiden i Norge, med fortsatt økte klimagassutslipp er det estimert en økt medianverdi i årsnedbør på 18% frem mot slutten av dette århundre. Dette vil i hovedsak komme av kraftigere og hyppigere episoder med byger og styrtregn (Hanssen-Bauer m.fl 2017). Klimaendringer har forekommet til alle tider og menneskelig aktivitet har i økende grad påvirket klimaet, ifølge FNs klimapanel (IPCC) er menneskelig aktivitet hovedårsaken til den globale oppvarmingen siden 1950 (Hanssen-Bauer m.fl 2017). Vi har gjennom hundrevis år påvirket klimaet på regional og lokal skala på flere måter, for eksempel ved avskoging og jordbruk, men i nyere tid også ved forbrenning av fossilt brensel (Hanssen-Bauer m.fl 2017). Siden den industrielle revolusjonen i 1750 har andelen CO<sub>2</sub> i

atmosfæren økt med 47%, og i 2019 var CO<sub>2</sub>-konsentrasjonene på sitt høyeste målte nivå noensinne (Masson-Delmotte m.fl 2021, Jeppesen m.fl 2021).

Med fortsatt økende utslipp av klimagasser er det ventet en global temperaturøkning fra perioden 1850-1900 og frem til 2100 på ca. 4,5° C (Hanssen-Bauer m.fl 2017).

Klimaendringer som følge av menneskelig aktivitet fører til mer ekstremvær i alle regioner over hele jordkloden, og vises som hyppigere og kraftigere nedbørepisoder, økte tørkeperioder og ekstreme hetebølger (Masson-Delmotte m.fl 2021). Med de estimerte klimaendringene vil de boreale områdene blant annet få en markant endring i vintersesongen, med reduksjon og bortfall av islegging på innsjøene, og vårmelting og flomtopper tidligere på året (Benoy m.fl 2007).

Direkte og indirekte påvirkninger som følge av klimaforandringer endrer innsjøene og flere studier viser at boreale innsjøer, som vi finner i det boreale barskogbeltet fra østlige Russland over til Skandinavia og i de nordlige delene av Nord-Amerika, har gjennomgått drastiske forandringer i de siste tiår (de Wit m.fl 2016). Endringer i innsjøenes økosystem og sammensetning, nedbørfelt med landskapet og vegetasjonen rundt, har en fellesnevner vi kjenner som oppløst organisk karbon, ofte referert til som totalt organisk karbon (TOC).

Kraftig økende konsentrasjoner av TOC er registrert i boreale innsjøer og kan potensielt ha flere negative konsekvenser, som for eksempel redusert primærproduksjon, fargeendringer og utfordrende renseprosesser for drikkevann (Finstad m.fl 2016, de Wit m.fl 2016, Lepisto m.fl 2014, Ravichandran 2004, gjengitt av Ledesma 2011) I mange innsjøer har TOC økt med over 100% i løpet av de siste 30 årene, gjennomsnittet for Norge ligger på ca. 30% økning (Hindar m.fl 2020) og årlig økning har for mange innsjøer i de sørlige delene av Fennoskandia vært på over 2% siden 1990 (se Fig. 1).

Flere drivere og kombinasjoner av disse er pekt ut som bakgrunn for økt TOC, blant annet reduksjon i sur nedbør og klimaendringer som økt og kraftigere nedbør i kombinasjon med økende temperaturer. Disse driverne påvirker prosesser både i innsjøene og i nedbørfeltet og landskapet rundt. Mens effekten av oppvarming og økt nedbør har flere negative effekter, som blant annet økt produksjon og utslipp av CO<sub>2</sub> og CH<sub>4</sub> i innsjøene og økt tilførsel av TOC fra nedbørfelt, har

reduksjonen i sur nedbør en motsatt effekt ved at forsuringen og Sulfat-konsentrasjonene har blitt markant redusert med opptil 70-80% i mange innsjøer (Hindar m.fl 2020).

Bakgrunnen for den markante økningen av TOC er kompleks, studier peker på flere ulike årsaker og kombinasjoner av disse, og ofte i sterk relasjon med de tydelige endringene i klimaet. Denne oppgaven er i hovedsak basert på gjennomgang av tilgjengelig litteratur, på bakgrunn av dette forsøker jeg å besvare følgende spørsmål; a) I hvor stor grad kan endringer i klimaet påvirke karbonsyklusen og mengde TOC i boreale innsjøer gjennom de ulike sesongene, og b) viser endringene i boreale innsjøer at vi er på vei mot en mer «naturlig» før-industriell tilstand, eller vil endringene fortsette selv med avtagende effekt av forsuring?

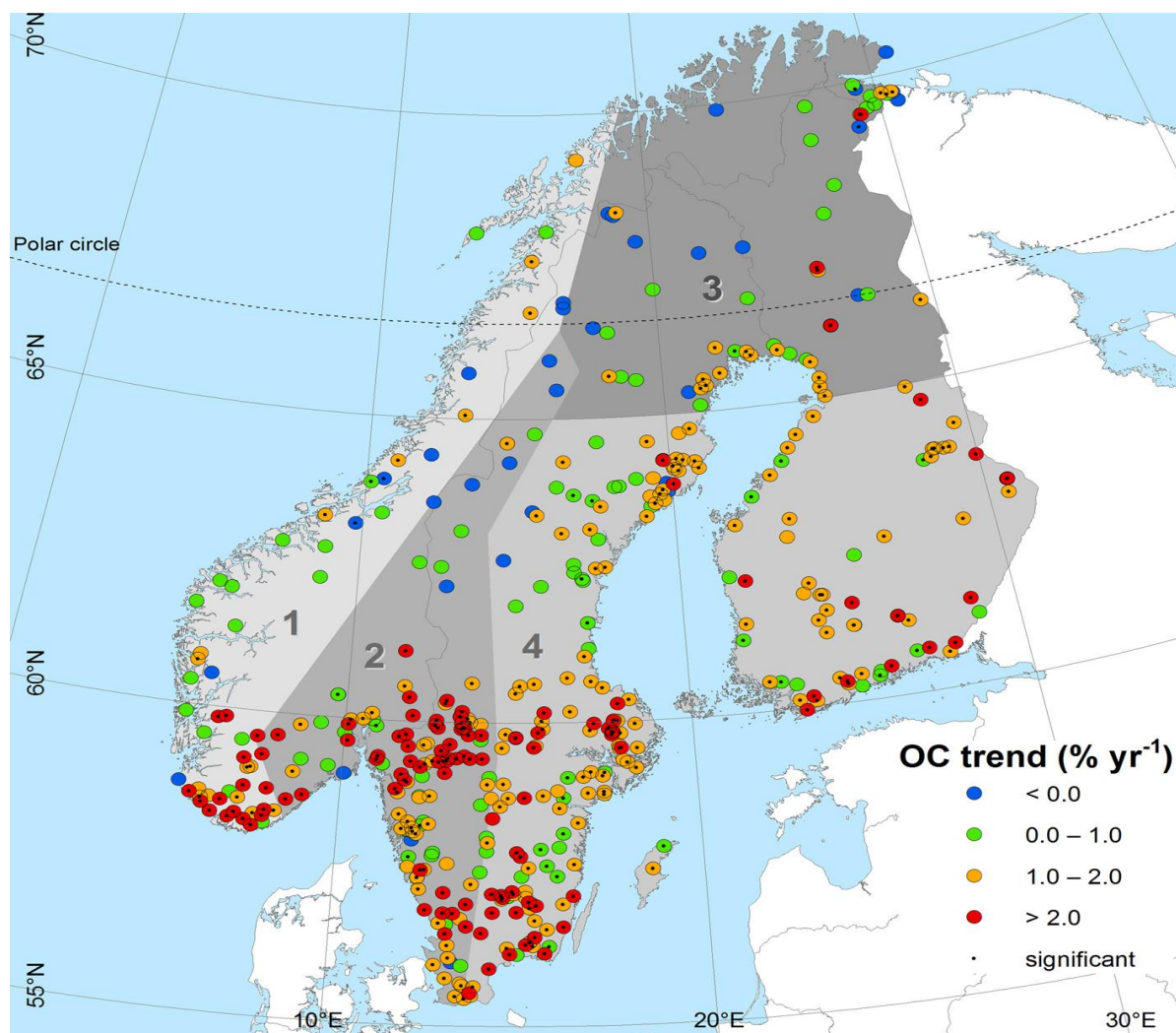


Fig. 1: Årlig % økning for TOC for 4 soner i Fennoskandia 1990-2013. Sone 1: Oseanisk, Sone 2: Boreal våt, Sone 3: Subarktisk, Sone 4: Boreal tørr (Kilde: Hentet fra de Wit m.fl 2016)

## *1.2 Problemstilling*

I løpet av de siste tiår er det målt store endringer i innhold av organisk karbon i boreale innsjøer. Økningen av TOC har flere negative konsekvenser for innsjøene og med et endret klima kan mange innsjøer endres fra å være kilde til lagring av karbon til en kilde for utslipp. Mekanismene og driverne bak økningen er kompleks og henger ofte sammen med prosesser fra atmosfære, land og innsjø. Målet med denne oppgaven har vært å kartlegge karbonsyklusen i boreale innsjøer og redegjøre for hvilke drivere, faktorer og prosesser som potensielt kan stå bak økningen av TOC. Økt kunnskap og forståelse rundt driverne bak økningen er svært viktig, fremtidig forvaltning av de boreale innsjøer avhenger av en forståelse rundt dette i tillegg til mer kunnskap om hva som kontrollerer mengden og variasjonene gjennom de ulike sesongene.

## 2 Metode

Denne oppgaven har blitt til ved hjelp av et større litteratursøk rundt temaet karbon i boreale innsjøer. Ved å benytte ScienceDirect har jeg funnet mye god og relevant litteratur og forskningsmateriale av nyere årgang.

I tillegg er mange rapporter og publikasjoner funnet ved hjelp av Google, Google Scholar, Semantic Scholar, Wiley Online Library, Oria og gjennom e-post korrespondanse med forfattere av relevante artikler og rapporter.

Søkeord som «carbon cycle», «TOC» og «DOC» i kombinasjon med blant annet «lakes», «boreal lakes», «freshwater», «climate change» og «catchment», i tillegg til søkekombinasjoner som «lake browning» og «lake acidification» har gitt mange treff og resultater på relevante artikler.

Vannkjemiske data er mottatt fra NIVA, og med bakgrunn fra NIVAs «1000 – sjøersundersøkelser» fra 1995 og 2019, er dataene blitt brukt til å danne en oversikt over tilstand for innsjøene i Telemark. 3 innsjøer med markante endringer i TOC-konsentrasjonene er plukket ut for en nærmere utredelse og presentasjon.

Klassifisering av innsjøtype for de utvalgte innsjøene er gjort ved hjelp av Veileder 02:2018

Klassifisering av miljøtilstand i vann, utarbeidet av Direktoratgruppen vanndirektivet.

## 3 Resultater og Diskusjoner

### 3.1 Den globale karbonsyklusen

Den globale karbonsyklusen består i hovedsak av utveksling av karbon mellom 3 aktive reservoarer; land, vann og atmosfæren. Karbonsyklusen beskriver kretsløpet til karbon og en rekke reaksjoner der karbonet endres fra en form til en annen, mengden karbon vi har på jorden er fast og kan hverken økes eller reduseres, men syklusen er i konstant bevegelse og karbon både tas opp og slippes ut mellom de ulike reservoarene (Kyrkjeeidet m.fl 2020, Bartlett m.fl 2020). Hav står for det største karbonreservoaret og lagrer karbon i form av oppløst organisk karbon (DOC), partikulært organisk karbon (POC) og oppløst uorganisk karbon som CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> og bikarbonat HCO<sub>3</sub>. (Post m.fl 1990, Friedlingstein m.fl 2019, se Fig. 2). Det samlede begrepet for de organiske karbonformene er TOC og står for totalt organisk karbon. Forskjellen på DOC og POC kan vises ved at DOC er andelen organisk materiale som kan passere gjennom et 0,45 mikrometer filter, mens POC er andelen som blir liggende igjen på filteret (Ledesma 2011).

Atmosfæren inneholder minst med tanke på lagring av karbon med ca. 860 GtC, men er en svært viktig faktor da den fungerer som et bindeledd mellom sjø og land (Post m.fl 1990). Størrelsen på det terrestriske reservoaret er det derimot knyttet langt mer usikkerhet rundt, og de estimerte verdiene varierer stort. Karbon kan lagres over lengre tid i ulike karbonreservoar og der hvor karbonet tas opp eller sedimenteres og begraves, kalles dette et karbonlager. Eksempel på dette er hav- og innsjøsedimenter, permafrost, jordsmonn eller olje, gass og kull under bakken (se Fig. 2).

Alle aktiviteter eller prosesser som slipper ut karbon fra et karbonreservoar til et annet, kan defineres som en karbonkilde (Bartlett m.fl 2020). For å vise forholdet mellom karbon utslipp og karbon opptak kan balansen mellom disse vises i et karbonbudsjett, Friedlingstein m. fl (2019) viste i sitt karbonbudsjett en ubalanse på 0,4 GtC hvor totalt utslipp overgikk totalt opptak i de ulike reservoarene (se Fig 2). Konsentrasjonene av karbon er ofte veldig store tall, når dette estimeres oppgis disse som gram-enheter, som for eksempel Petagram (Pg), hvor 1 Pg karbon tilsvarer 1 milliard tonn karbon (Kyrkjeeidet m.fl 2020, se Vedlegg 1).

Ved å regulere konsentrasjonene av CO<sub>2</sub> i atmosfæren er karbonsyklusen med på å regulere klimaet på planeten, klimagasser som CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> og N<sub>2</sub>O bidrar til drivhuseffekten hvor reflektert varme fra solen holdes tilbake og hindres i å slippe ut gjennom atmosfæren. Karbonsyklusen har både en rask og en sakte syklus, der utslipp og opptak av karbon mellom land, hav og atmosfære står for den raske syklusen. Den sakte syklusen er prosesser der CO<sub>2</sub> utveksles mellom geologiske reservoarer, som for eksempel dypt under havbunnen eller mellom geologiske formasjoner dypt under bakken, og er prosesser som kan ta alt fra titusener til millioner av år (Bruhwiler m.fl 2018).

I tillegg til den naturlige karbonsyklusen har antropogene utslipp, som for eksempel forbrenning av fossilt brensel og landskapsendringer som avskoging og økt jordbruk, bidratt til å øke CO<sub>2</sub>-konsentrasjonene i atmosfæren og skapt en ubalanse i globale karbonbudsjett. De økte klimagassutslippene bidrar til at klimaet endres og den globale temperaturen har økt med ca. 1° C siden den før-industrielle tiden (Kyrkjeeidet m.fl 2020, Friedlingstein m.fl 2019).

## The global carbon cycle

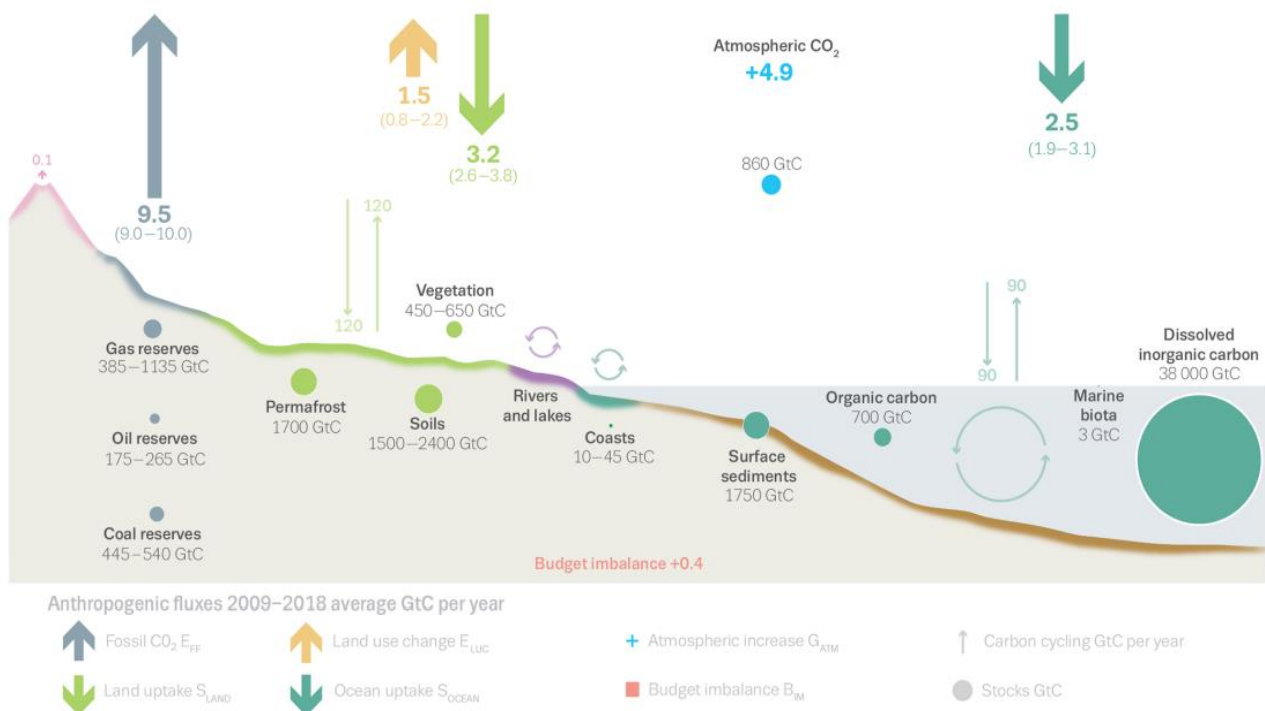


Fig. 2: Global karbonsyklus som viser mengder karbon i de ulike reservoar og utveksling mellom disse (per år) i perioden 2009-2018. Pilene viser opptaks- og utslippsutveksling mellom reservoarene, sirkelene viser de ulike delene av reservoarene med estimerte mengder karbon.

(Kilde: Hentet fra Friedlingstein m.fl 2019)



## 3.2 TOC i Boreale innsjøer

Tidligere ble ofte innsjøer oversett og tildelt en liten og ubetydelig rolle i den globale karbonsyklusen, i de siste tiår har derimot dette endret seg og forskning og studier viser at innsjøer er svært reaktive områder som prosesserer og lagrer store mengder karbon i tillegg til utslipp av klimagasser som CO<sub>2</sub> og CH<sub>4</sub> (Sobek m.fl 2006, Cole m.fl 2007, Kortelainen m.fl 2004).

Digitale verktøy kan være et viktig hjelpemiddel i kartlegging og oversikt over status i innsjøer, Verpoorter m.fl (2014) brukte satellittbilder med høy oppløsning og estimerte at antall innsjøer større enn 0,01 km<sup>2</sup> var omtrent 27 millioner globalt. Regionen som hadde størst tetthet og antall innsjøer, i tillegg til dekning av landområde, var de boreale områdene.

Den boreale sonen dekker omtrent 13% av de kontinentale områdene (Chmiel 2015), og utgjør store deler av Canada, Russland og Fennoskandia (Norge, Sverige og Finland).

Rundt 30% av de boreale områdene består av vandekte landskap hvor mesteparten er våtmarker og myr som lagrer over halvparten av den totale mengden karbon som finnes i de boreale områdene. Innsjøer, tjern, elver og bekker dekker en mindre andel areal enn våtmark, men inneholder ca. 15% av den totale mengden lagret karbon, hvor mye av dette er lagret i innsjøsedimentene (Benoy m.fl 2007).

Karbonlageret i innsjøsedimenter er estimert å inneholde samme mengde karbon som er lagret i sedimentene i alle verdens hav. Dette viser at innsjøer, på tross av lite areal, er særdeles viktige komponenter i den globale karbonsyklusen (Cole m.fl 2007).

Boreale innsjøer er ofte både grunne og små i størrelse, har stort nedbørfelt i forhold til størrelsen, og inneholder ofte store mengder oppløst organisk karbon (Couture m.fl 2015, de Wit m.fl 2018). I tillegg kan de varmes opp raskt og ofte utvikle oksygenfrie bunnlag i sommersesongene (Clayer m.fl 2020).

Konsentrasjonene av TOC i boreale innsjøer har økt kraftig, mekanismene bak endringene og prosessene som driver variasjonene og økningen av TOC er komplekse, og flere årsaker og teorier er blitt fremsatt for å forklare dette. Alt fra økt nedbør og endringer i hydrologiske transportveier (Lepisto m.fl 2014, Kortelainen m.fl 2013, de Wit m.fl 2007), til reduksjon i forsuring (Kritzberg 2017, de Wit m.fl 2018, Lepisto m.fl 2021, Haaland m.fl 2010), økte konsentrasjoner av CO<sub>2</sub> i atmosfæren (Pagano m.fl 2014), klimaforandringer (Starr m.fl 2009, Kellerman m.fl 2014), og

endringer i nedbørfelt og landskap (Hessen 2010, Erlandsson m.fl 2013) er nevnt som mulige drivere.

Økningen i TOC har vært størst i de sørlige delene av Norge, Sverige og Finland, og selv om dette er godt dokumentert (se Fig. 1 og Fig. 3) og mulige faktorer og drivere bak økningen er synliggjort, er det fremdeles usikkerhet rundt mekanismene som driver økningen, og samspillet mellom disse.

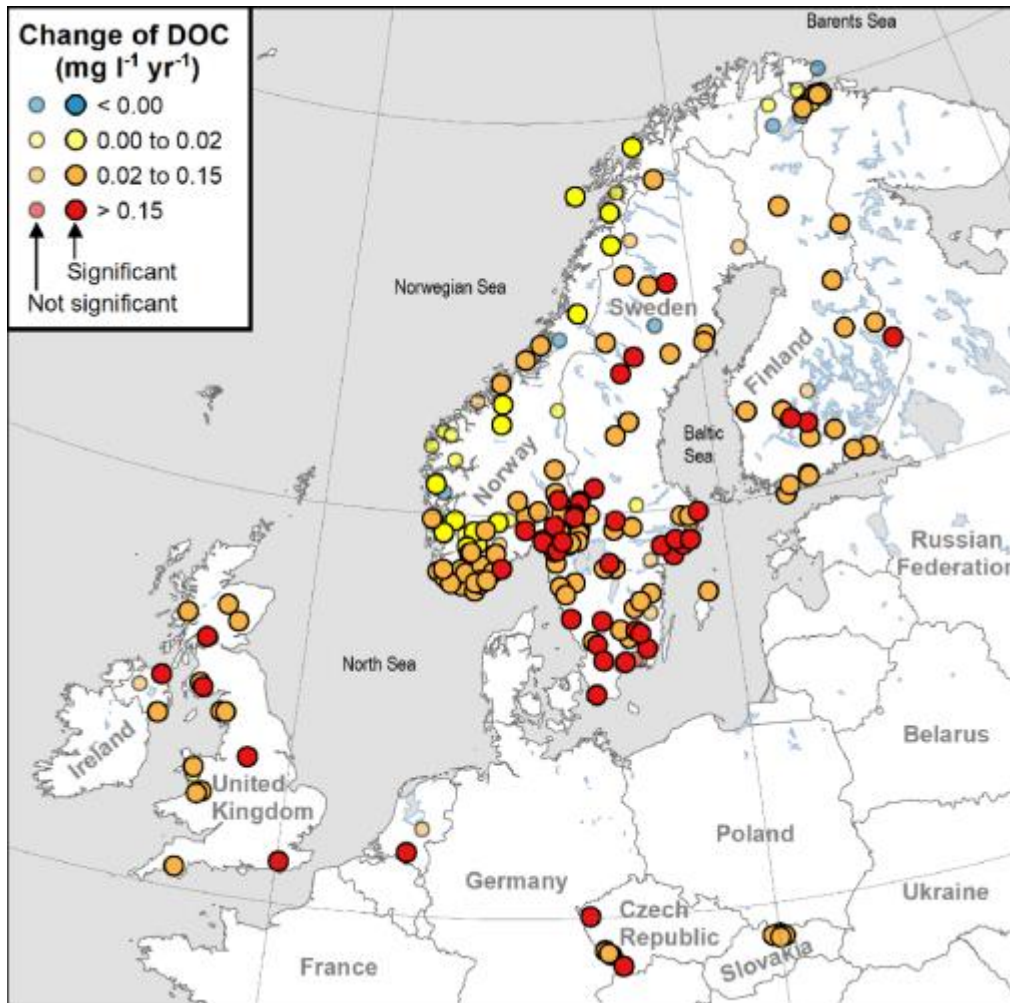


Fig. 3: Endringer i DOC (målt i mg/l per år) for perioden 1990-2016

(Kilde: Hentet fra de Wit m.fl 2021)

Mesteparten av karbon i boreale innsjøer er oppløst organisk karbon av terrestrisk opprinnelse, dette betyr at det har blitt tilført innsjøen fra omkringliggende nedbørfelt og kalles alloktont karbon (Tranvik m.fl 2008). Alloktont organisk karbon i innsjøene er summen av organisk karbon fra alle hydrologiske kilder, dette inkluderer tilførsel fra små bekker og elver, via grunnvann og avrenning fra nedbørfelt rundt innsjøen (Benoy m.fl 2007).

I tillegg til alloktont karbon produseres det også autoktont karbon via primærproduksjonen (Benoy m.fl 2007, de Wit m.fl 2015). Mengden autoktont TOC som produseres i innsjøene avhenger av flere faktorer, blant annet produktiviteten i innsjøen, mengden alger, akvatisk vegetasjon og planter, samt bakterier og organismer. Karbon kan også tas opp direkte av primærprodusenter i innsjøene via atmosfærisk CO<sub>2</sub> (Yasarer 2015).

I boreale innsjøer består TOC av 90% DOC, mens de resterende % i hovedsak består av POC som kan tilføres innsjøene i større mengder i perioder med høy vannføring (Sobek m.fl 2006, Yasarer 2015, Kortelainen m.fl 2004). En liten andel består av DIC i form av CO<sub>2</sub>, karbonat eller bikarbonat, denne andelen regnes ofte som ubetydelig i boreale områder hvor nedbørfelt i hovedsak består av skog og myrlandskap (Rantakari & Kortelainen 2008, gjengitt av Kortelainen m.fl 2013).

Boreale innsjøer får tilført store mengder organisk materiale fra sine nedbørfelt (de Wit m.fl 2015, Anderson m.fl 2020, Leipsto m.fl 2014, Cole m.fl 2007), alloktont organisk materiale består i hovedsak av humøst materiale, som er en mørkfarget blanding av organiske molekyler produsert i jordsmonnet etter nedbryting av vegetasjon. Høye konsentrasjoner av tilført alloktont TOC og humøst materiale kan føre til heterotrofi i innsjøene, både ved å redusere primærproduksjonen og ved å subsidiere den heterotrofe næringskjeden (Kothawala m.fl 2014, gjengitt av Couture m.fl 2015). Dette fører til at respirasjon dominerer over primærproduksjonen og innsjøene kan bli en kilde til utslipp av klimagasser til atmosfæren, noe som spesielt kjennetegner boreale innsjøer (Sobek m.fl 2006), Ekstrøm 2013).

TOC og lystilgang i innsjøene henger tett sammen og har flere negative konsekvenser. Thrane m.fl (2014) analyserte forholdet mellom TOC og lysabsorpsjon fra 75 boreale innsjøer for å kartlegge hvordan dette påvirker primærproduksjon i innsjøene. De viste at TOC påvirket primærproduksjonen negativt, primært på bakgrunn av sine lysabsorberende egenskaper som skygger for lys i den eufotiske sonen og opptak av samme lysbølgelengde som brukes av primærprodusentene. Økte TOC-konsentrasjoner og mer absorbert lys kan også føre til at dybden til termoklinen øker, noe som kan føre til lengre perioder med oksygenfritt vann i hypolimnion (Holmberg m.fl 2014).

Karbonsyklusen for TOC har som regel 3 hovedveier videre i innsjøene. I første omgang transporteres TOC til innsjøene via elver og bekker, ved tilsig fra nedbørfeltet og via tilført grunnvann. DOC kan deretter flokkulere og danne POC, som kan suspenderes til bunnsedimentene i innsjøen. I sedimentene bestemmes det om karbonet permanent lagres eller mineraliseres til CO<sub>2</sub> eller CH<sub>4</sub> via bakteriell nedbryting, dette bestemmes av flere faktorer som blant annet temperatur, mengden og type TOC, trofiske nivå og innsjødybde (Gudasz m.fl 2010, Benoy m.fl 2007, Kortelainen m.fl 2013, Tranvik m.fl 2009, Sahoo m.fl 2016). TOC kan også sirkulere internt i innsjøen og brytes ned ved fotokjemiske og mikrobielle prosesser i vannsøylen, eller passivt føres videre nedstrøms og ut av innsjøene via elver og bekker (Cole m.fl 2007, Benoy m.fl 2007, Tranvik m.fl 2009, Ekstrøm 2013, Chmiel 2015, se Fig. 4).

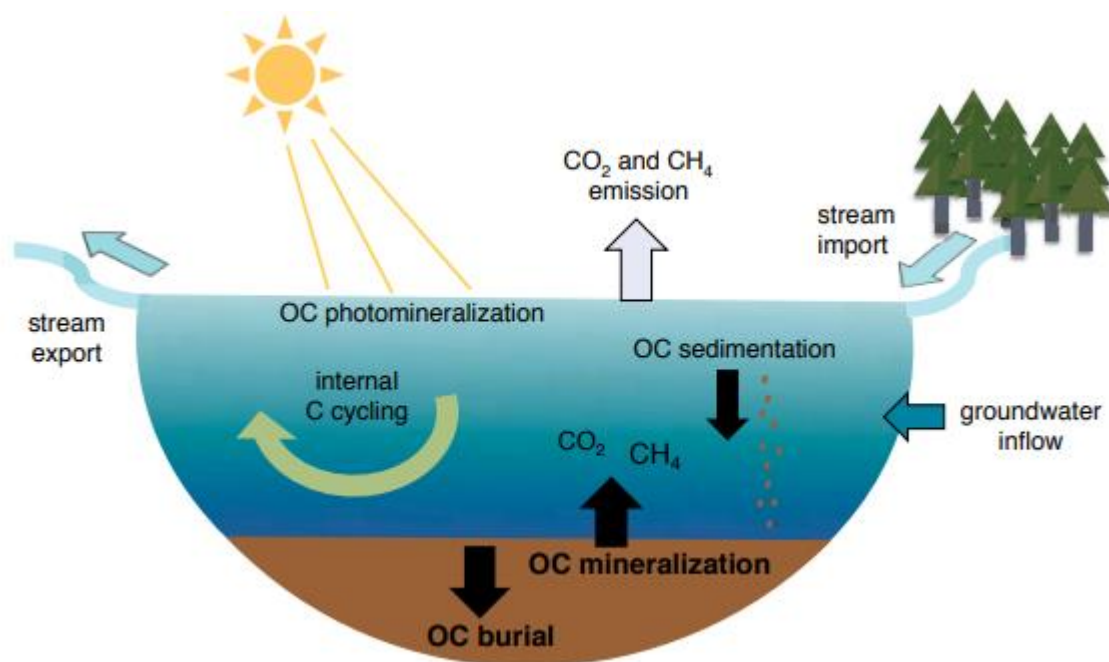


Fig. 4: Forenklet karbonsyklus i innsjøer (Kilde: Hentet fra Chmiel 2015)

Ved estimering av et karbonbudsjett for en innsjø må flere faktorer inkluderes, totalt inntak, totalt utløp og variasjoner mellom luft-vann og sediment-vann (Benoy m.fl 2007). Cole m.fl (2007) samlet tidligere utgitt litteratur og publikasjoner av estimerte verdier for sedimenteringsrate, mengde tilført karbon og utslippsverdier, og kalkulerte på bakgrunn av dette at ferskvannsinnsjøer tilføres 1,9 Pg C/år, av dette blir 0,75 Pg prosessert og omgjort til CO<sub>2</sub> og sluppet ut i atmosfæren, 0,23 Pg blir permanent lagret i sedimentene, mens de resterende 0,9 Pg føres videre nedstrøms (se Fig. 5).

Mengden nedbør og vannets oppholdstid i innsjøene er to viktige faktorer for TOC i innsjøene, i et våtere klima, med større vannføring og mindre oppholdstid, kan dette føre til at små boreale innsjøer fungerer mer som en passiv faktor og prosesserer mindre TOC. de Wit m.fl (2018) brukte et modelleringsverktøy til å kalkulere karbonbudsjett i en humøs boreal innsjø i Sørøst-Norge, de fant at modellering av karbonbudsjettet var svært sensitivt for endringer i nedbør, særlig for mindre innsjøer som finnes i stort antall i boreale områder. Gjennomsnittlig 8% av alloktont tilført TOC ble holdt tilbake og prosessert i innsjøen via sedimentering og lagring, mineralisering eller ved fotooksidering, de resterende 92% sirkuleres i vannsøylen og føres i hovedsak videre nedstrøms. Andelene var derimot sterkt påvirket av mengden nedbør og endringer i oppholdstiden i innsjøen.

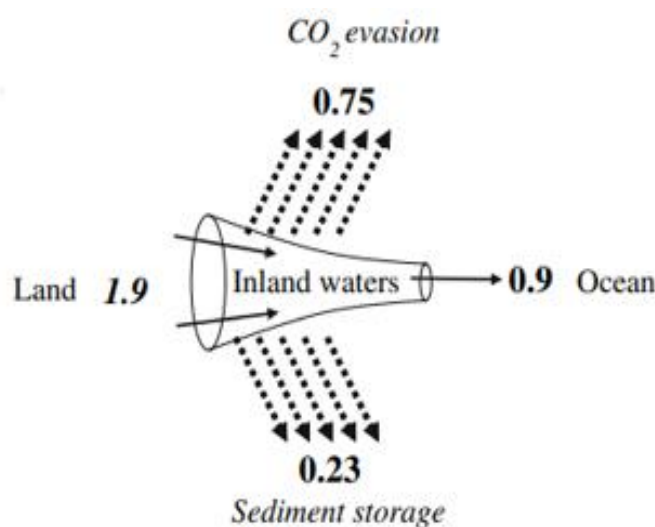


Fig. 5: Estimert karbonbudsjett for innsjøer (Kilde: Hentet fra Cole m.fl 2007)

Store variasjoner av TOC kan forekomme gjennom de ulike årstidene, fra høye verdier etter episoder med intens nedbør, til lavere verdier etter perioder med tørke og lang oppholdstid, eller ved større endringer i landskapet (Benoy m.fl 2007). Maks eksport av TOC fra nedbørfelt forekommer som regel i Mai måned, på samme tid som vårsmelteflommene, mens en annen topp i eksport ofte kommer i løpet av sommermåneden med høyest gjennomsnittlig nedbør (Köhler m.fl 2008). Laudon m.fl (2004) studerte TOC-konsentrasjoner fra 7 boreale nedbørfelt i Sverige for å bedre forstå sesongvariasjoner, resultatene viste at eksporten av TOC var 5-11 ganger høyere tidlig på våren enn i de andre sesongene. I en 4 uker lang periode på våren ble mellom 50 og 68% av total mengde TOC for året eksportert. Dette støttes av Kortelainen m.fl (2013) og Clayer m.fl (2021), som også viste til at mesteparten av årlig tilført TOC fra nedbørfelt transporteres etter snøsmelteperioden på våren og på høsten når det er høy vannføring.

Det hydrauliske regimet i boreale landskap kan ofte karakteriseres ved høy vannføring i forbindelse med vårsmelteflommer og økt nedbørsaktivitet på høsten. Mens vårsmelteflommer vanligvis forekommer i en periode på 4-6 uker i månedene April-Mai, kan innslag av episoder med økt nedbør på sommer og høst variere veldig fra år til år.

TOC-konsentrasjonene i Fennoskandia har de siste tiårene økt markant, i en studie av 474 innsjøer og elver i Norge, Sverige og Finland for perioden 1990-2013 viste de Wit m.fl (2016) en gjennomsnittlig økning i TOC på 1,4% per år (se Fig. 1). 67% av lokasjonene viste markante økninger, noe som indikerer at det er regionale og globale mekanismer som står bak.

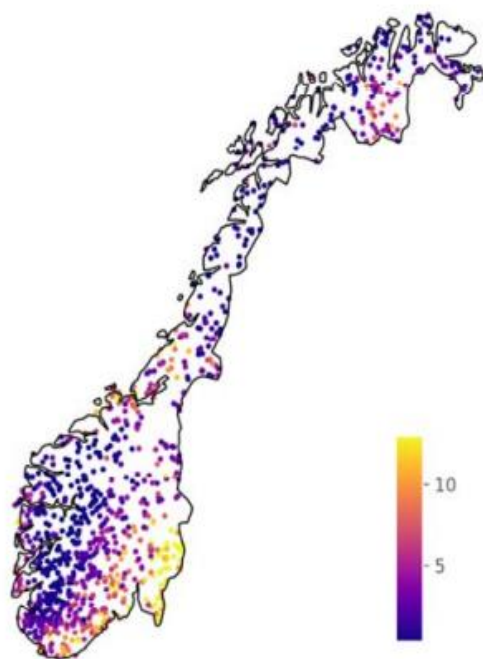
Ulike kombinasjoner av drivere er fremsatt for å forklare økt TOC i innsjøene, Larsen m.fl (2011) analyserte ca. 1000 norske innsjøer og fant ved hjelp av et modelleringsverktøy at vegetasjonstype og andelen myr i nedbørfeltet var faktorene som best forklarte økningen av TOC. I kontrast fant Haaland m.fl (2010) i en studie av vannkvalitet i 4 boreale innsjøer på Østlandet i Norge at økningen av TOC primært var et resultat av redusert forsuring, og at redusert ionestyrke og mer løselig organisk materiale var et direkte resultat som følge av reduksjonen i sur nedbør. I tillegg viste økt nedbør og nedbørintensitet at endringer i hydrologiske transportruter i nedbørfeltet førte til både økt import og eksport av TOC i innsjøene. Dette støttes av de Wit m.fl (2018), som kalkulerte variasjoner i TOC-konsentrasjonene i en innsjø i Sørøst-Norge og kom fram til at redusert forsuring og økt nedbør førte til mer eksport av TOC fra nedbørfelt.

Kartlegging av endringer i nedbørfelt rundt innsjøene er viktig som et ledd for å finne bakgrunnen for TOC-økningene. Finstad m.fl studerte vannkjemiske data og endringer i vegetasjon i 70 boreale innsjøer og nedbørfelt i Norge i perioden 1986-2013, de fant at endringer i forsuring, økt nedbør og temperatur, og endringer i vegetasjon var de sterkeste drivere bak økningen i TOC. Lepisto m.fl (2021) fant, i en tilsvarende studie av 12 boreale innsjøer i Finland, at gjennomsnittlig lufttemperatur og reduksjon i forsuring kunne forklare 83% av TOC-økningen. Den største økningen av TOC ble registrert i perioden April-Mai og de største endringene i temperatur og reduksjon av sulfat ble registrert i samme periode. Høyest økning og variasjon av TOC ble observert i innsjøene i sørlige deler av landet, med gradvis avtagende konsentrasjoner mot nord.

Selv om TOC har økt kraftig de siste tiår er det også registrert at økningene i visse områder kan være i ferd med å avta. I en studie av 164 innsjøer i Sverige fant Eklof m.fl (2021) at etter 2010 ble det observert økning i TOC i færre enn 20% av innsjøene. Mens konsentrasjonene av TOC økte for de fleste lokasjonene mellom 1990 og 2010, har økningen avtatt markant det siste tiåret og TOC-konsentrasjonene har stabilisert seg. Hindar m.fl (2020) viste, i en studie av 1000 norske innsjøer, at TOC har økt i hele Norge og kun et fåtall innsjøer har vist tilbakegang. Studien er basert på prøver tatt i 1995 og 2019 og viser ikke årlige eller sesongbaserte variasjoner i løpet av perioden eller en eventuell stagnasjon i TOC - økningen siste tiår dersom dette har forekommet.

Økningen av TOC har vært størst i de sør-østlige delene av Norge og betydelig lavere lenger nord i landet (se Fig. 6). Dette kan være på grunn av mindre forsuring i nord, siden innsjøene med størst økning, i sør og østlige deler av Norge, er de områdene som har vært utsatt for størst mengde forsuring.

(a) TOC i 2019 (mg C/l; n = 1000)



(b) Verdi 2019 / Verdi 1995

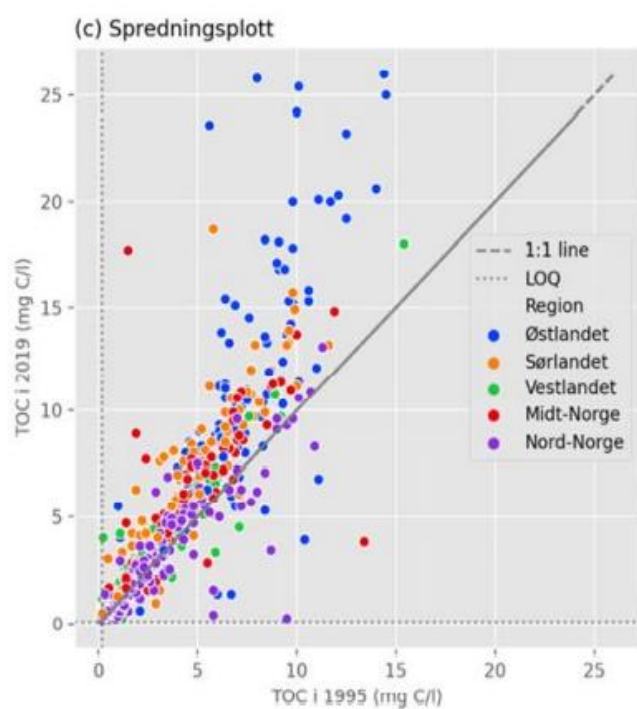
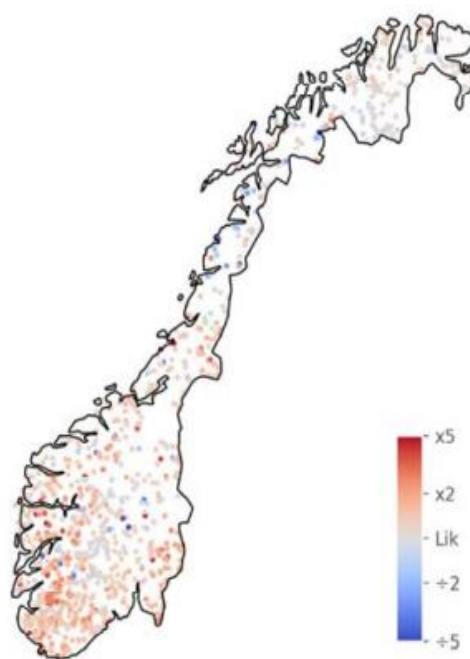


Fig. 6: Økning i TOC 1995-2019, a) Viser TOC-konsentrasjonene i 2019, b) Viser hvor mye TOC har økt fra 1995-2019, c) Spredningsplott med TOC-økning for hver region

(Kilde: Hentet fra Hindar m.fl 2020)



Økning i TOC-konsentrasjonene var sterkt knyttet til innsjøenes størrelse og høyde over havet, konsentrasjonene er tydelig høyest i små innsjøer i lavereliggende terreng, og få innsjøer over 1000 moh eller over 2 km<sup>2</sup> i størrelse har TOC konsentrasjoner over 5 mg C/l (se Fig. 7).

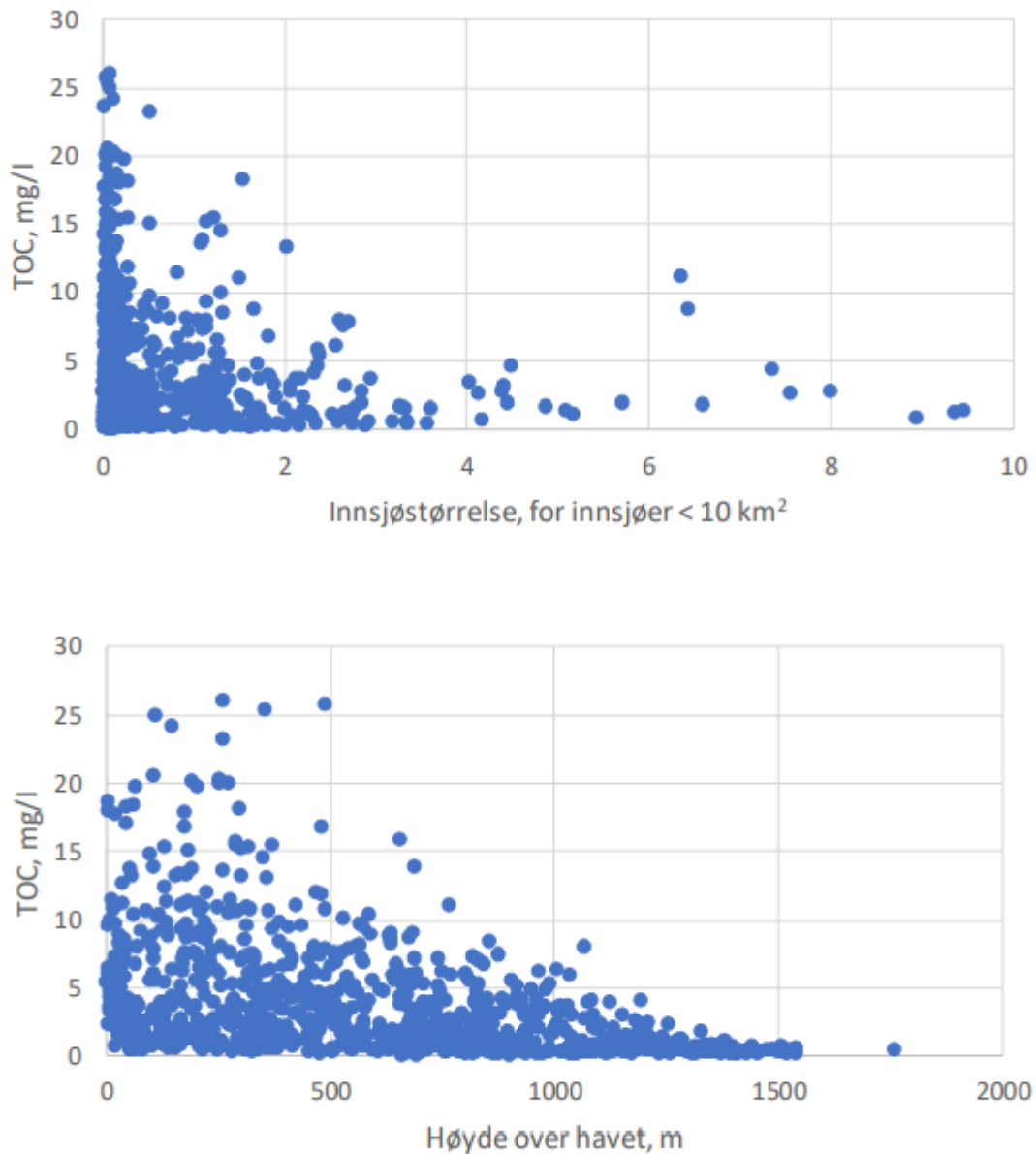


Fig. 7: TOC vs. Innsjøstørrelse (øverst) og moh (nederst) (Kilde: Hentet fra Hindar m.fl 2020)

Karbon kan også tas opp direkte av innsjøene, ved opptak av CO<sub>2</sub> fra atmosfæren hos primærprodusentene og ved oppblomstring av alger. Karbon kan også tilføres i form av planter, løv og dyre- og fuglerester. Hvor mye disse bidrar i det totale karbonbudsjettet er høyst usikkert og antas å være ubetydelige og episodiske (Benoy m.fl 2007).

Nedbryting av TOC er sterkt knyttet til vannets oppholdstid, siden nedbrytingsraten øker med økt oppholdstid kan variasjoner og hyppigheten av nedbør og tørke ha sterke effekt på TOC (Catalán m.fl (2016). Dette støttes av Zwart m.fl (2016) som viste at variasjon og konsentrasjon av TOC ble redusert når vannets oppholdstid økte, og av Larsen m.fl (2011), Attermeyer m.fl (2018), Kellerman m.fl (2014) og Ekstrøm (2013), som i tillegg viste at økt oppholdstid også ga mer tid for prosesser i innsjøene til å bearbeide TOC ved flokkulering, sedimentering og lagring, og fotooksidering. Kortere oppholdstid som følge av økt nedbør og avrenning fører derimot til at andelen TOC som eksporteres videre nedstrøms øker og andelen som prosesseres i innsjøene reduseres (Tranvik m.fl 2009).

Flokkulering av DOC til POC er viktig for om karbonet mineraliseres eller lagres i sedimentene, Attermeyer m.fl (2018) analyserte nedbryting av DOC og POC i 30 innsjøer og elver i Sverige, og viste at mikrobiell nedbryting av POC var 15 ganger høyere enn for DOC. Den høye nedbrytingsraten av POC kan derfor tyde på en stabil tilførsel og produksjon av POC. Ifølge Tranvik m.fl (2018) har innsjøer dominert av alloktont TOC høy sedimenteringsrate, noe som kan tyde på at store mengder DOC flokkulerer med POC i vannsøylen.

Kvaliteten og sammensetningen av TOC har vist seg å spille en viktig rolle for hvor lett nedbrytbart karbonet er i innsjøene, i en analyse av et hundretalls boreale innsjøer, elver og nedbørfelt i Canada viste Lapierre m.fl (2013) at alloktont TOC var lettere biologisk nedbrytbart enn tidligere antatt, og at andelen TOC tilgjengelig for nedbryting økte når andelen alloktont TOC økte.

TOC-økningene og konsentrasjonene vi ser i boreale innsjøer i dag kan være en retur til «naturlige» nivåer vi hadde i den før-industrielle tiden. Dersom sur nedbør derimot er og har vært hoveddriver bør dette avta når nedbørfeltet også returnerer til før-industrielle nivåer, og effektene av klimaforandringer vil da kunne bli den dominerende mekanismen for TOC i fremtiden. Det er derimot vist at TOC-konsentrasjonene har stagnert i visse områder de siste årene, noe som kan tyde på at de største økningene i TOC allerede har vært og at vi i fremtiden vil kunne se en avtagende kurve.

### 3.3 Klimaendringer og TOC-økning

Klimaet i Norge er forventet å endres markant i løpet av det neste århundre, klimaforandringer er en sterk driver bak økningen av TOC i boreale innsjøer og ulike typer ekstremvær kan bidra til å markant endre årlig og sesongvarierte konsentrasjoner av TOC (Kortelainen m.fl 2013).

De forventede klimaendringene kan gi kraftigere og hyppigere nedbørepisoder, økning i gjennomsnittlig årstemperatur og kortere og varmere vintre med redusert snødekke som potensielt kan bidra sterkt til at mengden TOC som tilføres innsjøene fortsetter å øke i fremtiden (Starr m.fl 2009).

#### 3.3.1 Nedbør

Siden 1900 har årsnedbøren i Norge økt ca. 18% og mengden har økt markant siden slutten av 1970-tallet. I perioden 1985-2014 har nedbøren økt mest på Østlandet og Sørlandet med opptil 10% i enkelte områder. Økningen har vært størst på våren, med en liten nedgang på sommeren og høsten. Måten nedbøren kommer på har også endret seg, og kraftigere byger og styrtregn har økt i intensitet og hyppighet (Hanssen-Bauer m.fl 2016).

Nedbør som følge av klimaendringer og global oppvarming kan være kraftigere, mer intens og kan resultere i markante endringer og variasjoner i mengde og innhold av TOC i akvatiske og terrestriske økosystemer (de Wit m.fl 2015).

Frekvensen av intense og langvarige nedbørepisoder har økt betraktelig siden 50-tallet i mange regioner globalt, og menneskelig påvirkning og aktivitet er med høy sannsynlighet hovedårsaken. Episoder med styrtregn er forventet å øke i både omfang og frekvens i de fleste regioner dersom den globale oppvarmingen fortsetter. Masson-Delmotte m.fl (2021) estimerte at for hver °C temperaturen øker vil episoder av ekstremnedbør øke med 7% på global skala.

Episoder med styrtregn, kombinert med innslag av tørkeperioder, kan øke variasjonen og mengden TOC som tilføres innsjøene (Kortelainen m.fl 2013, Jeppesen m.fl 2021). Selv om episodene med ekstremvær kan være kortvarige kan de potensielt føre til langvarige endringer i TOC-konsentrasjonene i innsjøene, og spesielt i innsjøer som til vanlig har lengre oppholdstid (Weyhenmeyer m.fl 2012, gjengitt av Jeppesen m.fl 2021).

Lange perioder med nedbør kan bidra til høyere grunnvannsspeil, flere hydrologiske transportveier nærmere jordoverflaten og dermed økt avrenning og transport av TOC til innsjøene (Lepisto m.fl 2014, Haaland m.fl 2010, Ward m.fl 2017). I en undersøkelse av forsøringsutsatte innsjøer i Norge i perioden 1985-2003 viste derimot de Wit m.fl (2007) at også kortere og mer intense nedbørsperioder har stor betydning. De viste at intervaller på 1-14 dager hadde sterkere effekt på økningen i TOC enn lengre nedbørsperioder, dette kan tyde på at kortere nedbørsepisoder transporterer mer TOC fra det øverste humusrike jordlaget i nedbørfeltet.

Den sterke effekten av nedbør på TOC-konsentrasjonene bekreftes også av Laudon m.fl (2004) og Skerlep m.fl (2020), i tillegg til Zwart m.fl (2016) som viste at 45-58% av årlig tilført TOC i 3 innsjøer i Nord-Amerika kom under ekstreme nedbørsepisoder. Warner m.fl (2020) viste at TOC-konsentrasjonene økte markant etter kraftige og intense nedbørsepisoder i en studie av 6 innsjøer nord-øst i USA, mens Lepisto m.fl (2014) viste at nedbør i sommersesongen i et nedbørfelt i Finland hadde ekstra sterk effekt på mengden eksportert TOC (se Fig. 8), fra et gjennomsnitt på 7,5mg C/l på sommeren med minst nedbør, til 15,5mg C/l for sommeren med mest nedbør.

Økt mengde nedbør i fremtiden kan ha sterk effekt på mengden TOC som tilføres innsjøene, noe Öquist m.fl (2014) viste ved å studere eksport av TOC fra et nedbørfelt i Sverige bestående av 100% skog. De viste at en estimert økning av årlig nedbørsmengde på 10-20% kunne føre til at andelen TOC eksportert fra nedbørfeltet dobles. De viste også at variasjoner i nedbør i perioden 1980-2008 forklarte 90% av andelen tilført alloktont TOC i innsjøen. I en undersøkelse av 474 innsjøer og elver i Norge viste de Wit m.fl (2016) lignende resultater som Öquist m.fl (2014), og estimerte at en økning i nedbør på 10% potensielt kan føre til at 30-50% mer TOC mobiliseres og tilføres fra nedbørfeltet.

TOC kan ha blitt mer sensitivt mot klimaendringer, noe de Wit m.fl (2021) pekte på i en undersøkelse av 426 innsjøer og elver i Europa og Nord-Amerika. Her fant de at økt nedbør ga større utslag på TOC-økning enn reduksjon i sur nedbør i perioden 2002-2016, endringer i nedbørintensitet kan derfor i større grad drive TOC-økningen i fremtiden, da sulfatnivåene i innsjøene er så lave at potensialet for videre nedgang er relativt liten.

Endringer i nedbørintensitet virker til å ha en ekstra sterk effekt på mengden TOC som tilføres innsjøene fra nedbørfeltet og kan få enda sterkere effekt i fremtiden. TOC ser også ut til å ha en rask respons på økt nedbør og høyere vannføring, noe som kan tyde på endringer i hydrologiske transportveier som åpnes opp i nedbørfeltet som følge av kraftig og intens nedbør og et høyere grunnvannsspeil. Som et resultat kan mer TOC transporteres fra de øvre jordlag og ut i innsjøene.

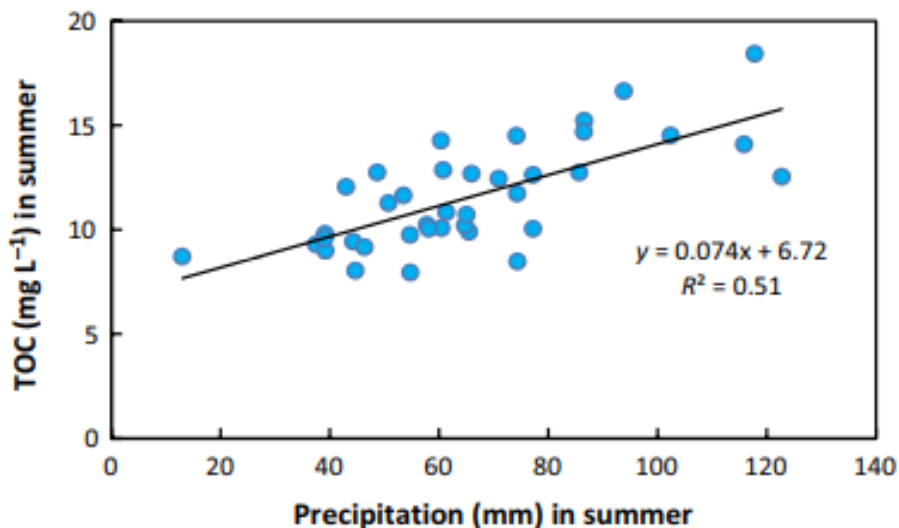


Fig. 8: Økt TOC-konsentrasjon vs. økt nedbør (sommer) i perioden 1971-2008

(Kilde: Hentet fra Lepisto m.fl 2014)

### 3.3.2 Tørke

Tørke kan også spille en viktig rolle i reguleringen av TOC, ved nedbør etter lengre tørkeperioder vil det ofte være endringer i de hydrologiske transportveiene i nedbørfeltet hvor nye ruter åpnes opp og TOC-rike lag gjøres tilgjengelige, på denne måten kan tørkeperioder på sikt bidra til at TOC-konsentrasjonene øker i innsjøene (Worall & Burt 2004, gjengitt av Lepisto m.fl 2014).

I en studie av TOC-variasjoner i to boreale innsjøer i Sverige i perioden 1993-2003 registrerte Köhler m.fl (2008) ingen økning i TOC-konsentrasjonen i tørre år, tørrere klima kan føre til at TOC reduseres, primært på grunn av økt oppholdstid (Tranvik m.fl 2009).

Zielinski m.fl (2009) fant derimot i en studie av effekten av tørke på TOC-konsentrasjonene i elver i Polen, at mengden TOC var 2 ganger høyere i fuktige perioder enn i tørkeperiodene.

TOC transportert i tørkeperioden var mer aromatisert og hadde større lysabsorberende egenskaper enn i periodene med mer nedbør. TOC fra boreale skogsdominerte nedbørfelt har i tillegg vist seg å være mer motstandsdyktig mot nedbryting etter tørkeperioder enn TOC tilført under normale eller mer nedbørdominerte perioder (Zielinski m.fl. 2009).

Tørkeperioder kan også påvirke mengden utslipp av CO<sub>2</sub> og CH<sub>4</sub> fra innsjøer, hyppigere tørkeperioder og redusert avrenning kan resultere i økt eksponering av littorale sedimenter, karbon i disse sedimentene kan på nytt gjøres tilgjengelig ved bølgeaktivitet og føre til større variasjoner i produksjon av CO<sub>2</sub> og CH<sub>4</sub> (Benoy m.fl 2007).

### 3.3.3 Temperatur

Økte temperaturer kan være en viktig driver bak endringene i TOC-konsentrasjonene, blant annet kan det føre til økt produksjon av TOC som følge av økt nedbryting av organisk materiale (Lepisto m.fl 2014), og økt produksjon, nedbryting og transport av TOC fra våtmarker og myr (Lepisto m.fl 2021). Økte vintertemperaturer kan føre til redusert varighet i is og snødekke, noe som kan forlenge perioden TOC transporteres fra nedbørfelt til innsjøene (Ekstrøm 2013, Hanssen-Bauer m.fl 2014, Masson-Delmotte m.fl 2021, Holmberg m.fl 2014), i tillegg kan det føre til en reduksjon i perioden og dybden med frost i jordsmonnet i nedbørfeltet (Kortelainen m.fl 2013).

Lepisto m.fl (2014) viste at mengden tilført TOC fra nedbørfelt var markant høyere etter vintre med lite jordfrost, etter vintre med jordfrost ned til 110-120 cm registrerte de kun normale mengder TOC (se Fig. 10). Temperaturøkninger i vintersesongen kan i kombinasjon med redusert jordfrost ha en sterk effekt på mengden TOC som transporteres til innsjøene påfølgende vår.

En viktig faktor ved økte temperaturer er endringer i snømengde og tidspunkt for vårflommene, Hanssen-Bauer m.fl (2016) viste at de økte temperaturene har ført til at vårflommene har kommet tidligere på året, og snømengden i lavlandet, og spesielt i Sør-Norge, har blitt mindre. Med høyere temperaturer kan også faren for regnflokker senere på høsten og tidlig på vinteren øke. Som følge av økte temperaturer har også veksts sesongen (definert som antall dager i året med gjennomsnittstemperaturer på min. 5° C) har økt i store deler av Norge siden 1970, og totalt areal med veksts sesong over 180 dager har økt fra 37000 til 45000 km<sup>2</sup>. (Hanssen-Bauer m.fl 2016).

Holmberg m.fl (2014) kalkulerte på bakgrunn av forventede temperaturøkninger at den islagte perioden i en boreal innsjø i Finland vil kunne reduseres med 1,5 dag per år, stratifisering av innsjøen vil forekomme tidligere på året og tiden innsjøen forblir stratifisert kan øke med 0,5 dag per år. Kortere islegging av innsjøene, mindre snødekke og hyppigere snøsmeltepisoder, i tillegg til forsinket frost i jordsmonnet om høsten, redusert frostperiode og tidligere vårmelting som følge av økte temperaturer gjennom vinteren kan føre til større variasjonene og økte TOC-konsentrasjoner gjennom årstidene (Laudon m.fl 2004, Kortelainen m.fl 2013, Lepisto m.fl 2021, se Fig. 9 og Fig. 10).

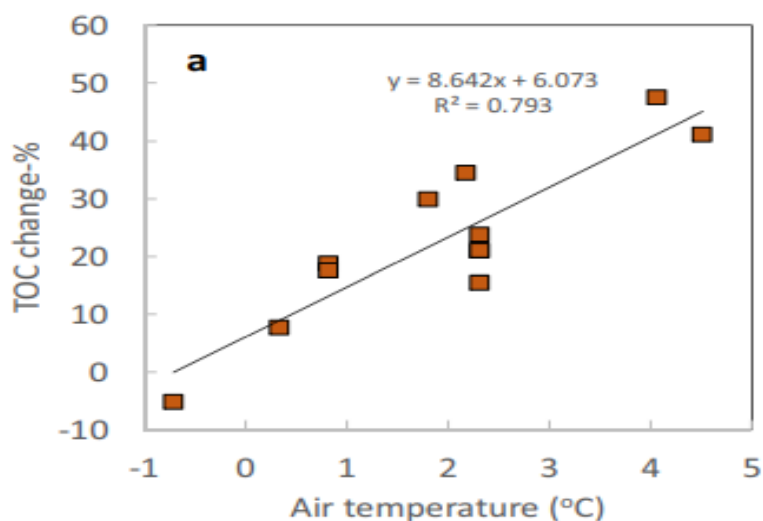


Fig. 9: % økning av TOC vs lufttemperatur 1990-2019, Finland (Kilde: Hentet fra Lepisto m.fl 2021)

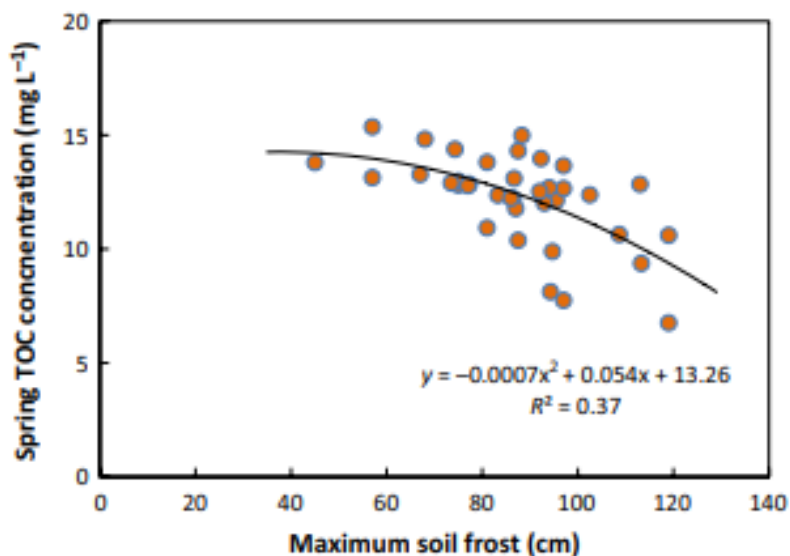


Fig. 10: TOC-konsentrasjon (vår) vs. jordfrost i perioden 1971-2008  
(Kilde: Hentet fra Lepisto m.fl 2014)

Larsen m.fl (2011) brukte data fra over 1000 norske innsjøer og kalkulerte en fremtidig økning i TOC på 65%, fra gjennomsnitt på 2 mg C/l til 3,3 mg C/l. Økt vegetasjon i nedbørfelt som følge av klimaendringer, økt mengde CO<sub>2</sub> i atmosfæren og økte temperaturer ble utpekt som hoveddrivere. Weyhenmeyer m.fl (2009) viste i sine studier av over 1000 boreale innsjøer i Sverige at TOC økte gradvis med økt temperatur og synkende breddegrad. Økningene fulgte antall dager med lufttemperaturer over 0° C, noe som kan tyde på at klimaendringer og økende temperaturer kan påvirke TOC-konsentrasjonene i enda større grad i fremtiden. I undersøkelsen de Wit m.fl (2021) gjorde for å kartlegge TOC-ændringer i Europa og Nord-Amerika for perioden 1990-2016 fant de derimot ingen bevis på at økte temperaturer hadde bidratt til økning i TOC og farge i innsjøene. Derimot hadde høyere sommertemperaturer en dempende effekt på TOC-økningen, noe som kan tyde på at effekten av økte temperaturer er sterkere i visse sesonger dersom det kombineres med flere faktorer, som for eksempel økt nedbør.

Høyere temperaturer kan også føre til økt nedbryting av organisk materiale i nedbørfelt, og kan i kombinasjon med økt vekstsesong føre til at mer TOC kan tilføres innsjøene (Skerlep m.fl 2020, Finstad m.fl 2016, Andersen &Hessen 2011). Boreale områder er sensitive for temperaturforandringer og ved fremtidig økning i temperatur kan dette ha en sterk effekt på TOC-konsentrasjonene i fremtiden (Skerlep m.fl 2020).

### *3.3.4 Sur nedbør*

Reduksjon i sur nedbør er en av de mest nevnte driverne i forbindelse med TOC-økningen i boreale innsjøer, og mange studier viser at sur nedbør har vært en sterk driver for TOC-ændringer over lang tid. Sur nedbør er et resultat av forbrenning av kull og olje som inkluderer svovel, under forbrenningen dannes det svovelsyre som fører til forsuring av nedbøren (Ekstrøm 2013). I tillegg kan salpetersyre i NO<sub>x</sub>-gasser fra eksosutslipp og ammoniakk knyttet til gjødsling i landbruket føre til sur nedbør (Behera m.fl 2013, Kaushik 2006). Klima og utslippstiltak rettet mot forsuring har ført til at svovelutslippene i Europa er redusert med 70% siden 1990, med en forventet nedgang på ytterligere 10% i årene som kommer (de Wit m.fl 2016). Dette bekreftes av Aas m.fl (2019) som analyserte reduksjoner av SO<sub>2</sub> i luft og nedbør i perioden 1990-2015, og fant at nedgangen i Europa siden 1990 var på mellom 70 og 80% (se Fig. 11).



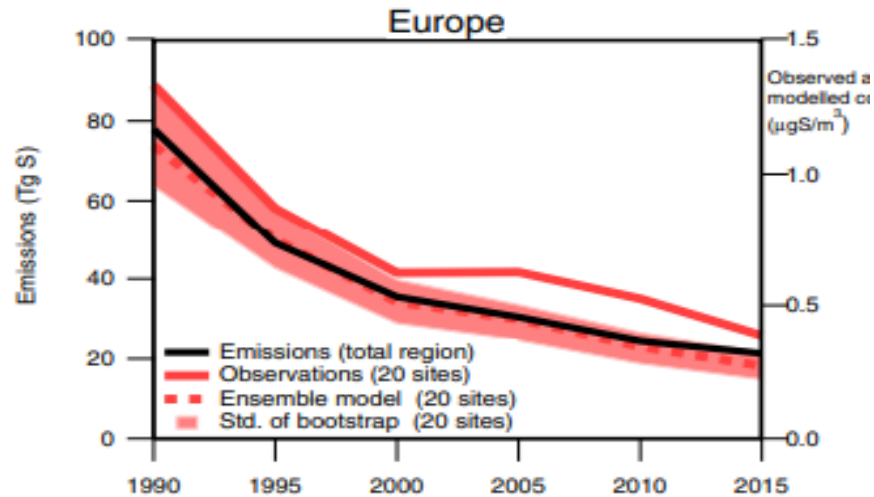


Fig. 11: Trend for SO<sub>2</sub> i Europa i perioden 1990-2015 (Kilde: Hentet fra Aas m.fl 2019)

Hindar m.fl (2020) viste at konsentrasjonene av sulfat og nitrat har gått kraftig ned i Norge i perioden 1995-2019 (se Fig. 12) samtidig som både syrenøytraliserende kapasitet og pH har økt i mange av innsjøene. I tillegg har konsentrasjonen av giftig aluminium, også kalt labilt aluminium, blitt redusert. pH har økt i mange av områdene hvor forsuringen har vært sterk (se Fig. 13), men økningen har ikke vært like markant som nedgangen i forsuring skulle tilsi. Dette kan være fordi TOC inneholder organiske syrer og konsentrasjonene av TOC har økt markant i samme periode.

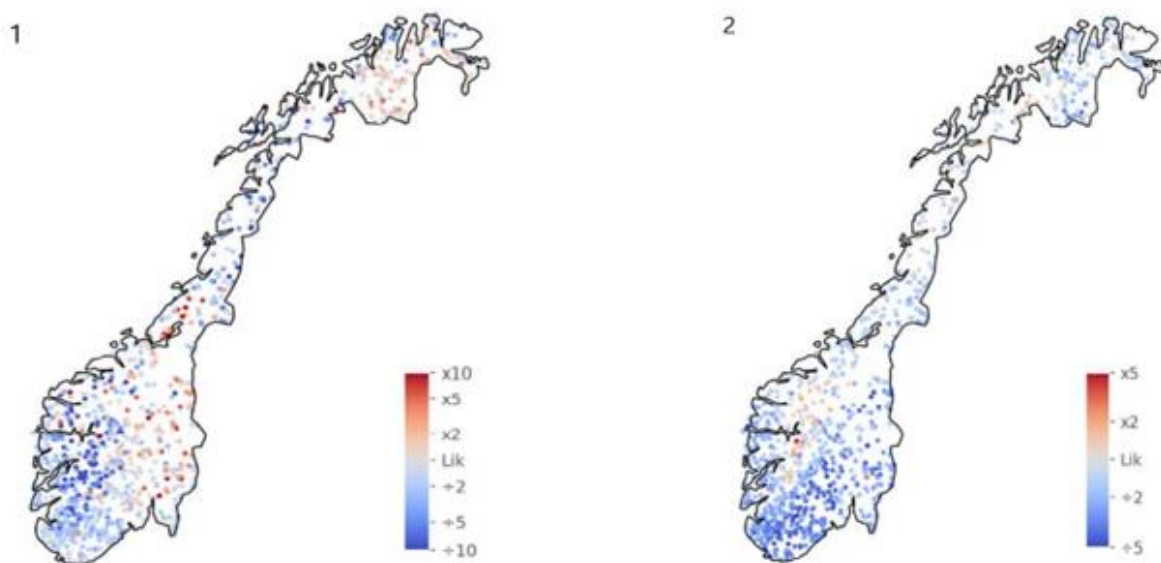


Fig. 12 Økninger og reduksjoner av Nitrat (1) og Sulfat (2) i perioden 1995-2019  
(Kilde: Hentet fra Hindar m.fl 2020)

### pH trends in lakes

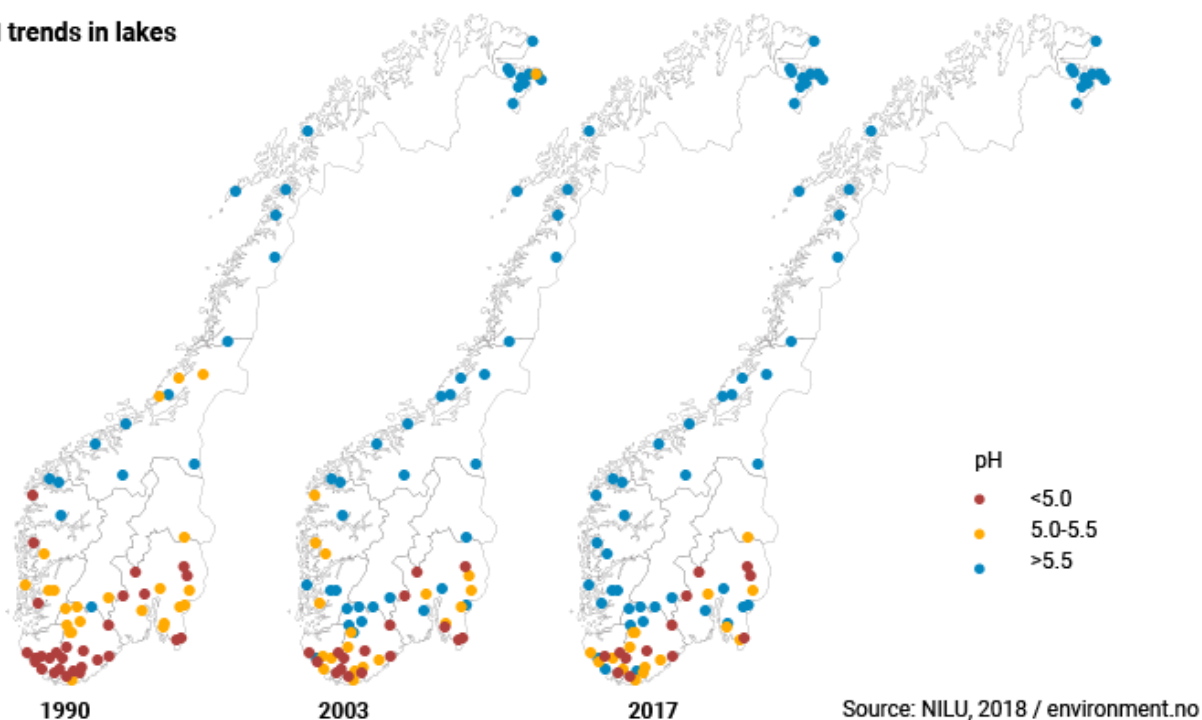


Fig. 13: Endringer i pH i perioden 1990-2017 (Kilde: Hentet fra NILU 2018)

I en studie av 82 boreale innsjøer viste Kortelainen m.fl (2013) at pH var høyere i nord, noe som kunne reflektere både lavere transport av organiske syrer via TOC og lavere forsuring fra nedbørfelt. Berggrunnen i nedbørfeltet spiller en viktig rolle for hvor mye nedbørfeltet kan motvirke forsuringen, kalkrike bergarter fører til en høyere tålegrense og har en sterkere motvirkende effekt på forsuringen, mens grunnfjell er tungt nedbrytbart og fører til en lav tålegrense (Hindar m.fl 2020).

Med økt forsuring av nedbørfeltet får det organiske materialet økt ionestyrke og blir mindre løselig, noe som kan ha holdt tilbake tilførselen av TOC i periodene med høye forsuringnivåer. Med reduksjonen av sur nedbør har dette blitt reversert, og mer TOC blir tilgjengelig for transport til innsjøene som følge av mer løselighet i det organiske materialet (de Wit m.fl 2007). Dette bekreftes av Ekstrøm m.fl (2013), som i et felteksperiment viste at reduksjon i forsuring gjorde det organiske materialet mer løselig, det organiske materialet hadde også sterkere farge og større molekyler enn i perioden med forsuring. I samme eksperiment viste de også at TOC etter redusert

forsuring var mer mottagelig for nedbryting via fotooksidering, men mindre mottagelig for bakteriell nedbryting enn tidligere.

de Wit m.fl (2007) studerte forsurede innsjøer i Sørøst-Norge med økte TOC-nivåer i perioden 1985-2003, her fant de at sesongvariasjoner i TOC var sterkest knyttet til klimaendringer, mens endringer i forsuring best forklarte endringer over tid. Dette viser også Starr m.fl (2009), som fikk lignende resultater for et nedbørfelt i Finland ved hjelp av et modelleringsverktøy. Lepisto m.fl (2021) viste at reduksjon i forsuring kunne forklare ca. 65% av variasjonene i TOC-konsentrasjonen (se Fig. 14), og opptil 85% i kombinasjon med økte temperaturer.

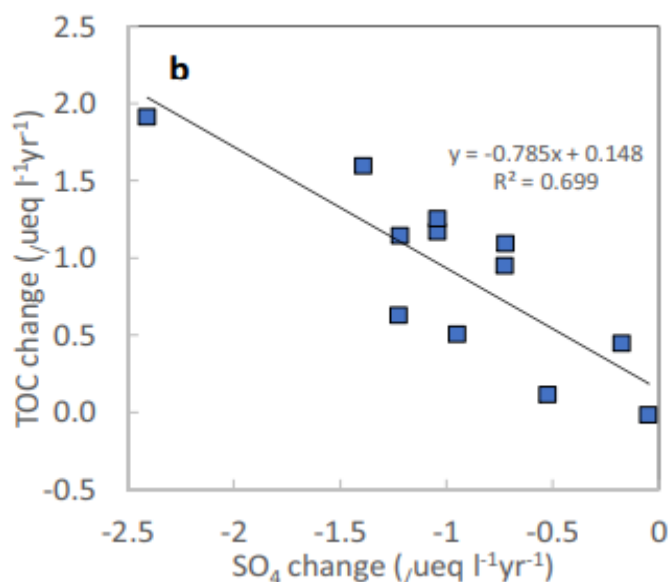


Fig. 14: TOC økning vs. SO<sub>4</sub> nedgang 1990-2019 (Kilde: Hentet fra Lepisto m.fl 2021)

Koblingen mellom økte TOC-konsentrasjoner og graden av forsuring øker fra nord mot sør, Finstad m.fl (2016) viste i en studie av vannkjemiske data fra 70 norske innsjøer og nedbørfelt, at områdene i Sørøst-Norge, hvor økningen i TOC-konsentrasjonene har vært størst, også har hatt størst nedgang i forsuring. Dette viser også de Wit m.fl (2016) i en undersøkelse av 426 innsjøer og elver i Norge, Sverige og Finland. Her viser de at TOC-konsentrasjonene avtar gradvis fra sør mot nord, med størst økning i sør der reduksjon av sur nedbør har vært størst. De viser også at selv om nedgangen i forsuring i de subarktiske områdene i nord er svært liten, er det registrert markante økninger i TOC-konsentrasjonene i mer enn 40% av lokasjonene. Monteith m.fl (2007) viste i sin studie av 522 innsjøer og elver i Nord-Amerika og Europa, at endringer i sur nedbør i perioden 1990-2004 var den eneste regionale faktoren som kunne forklare økningen i TOC.

Ved å klassifisere forsuringstatus i 66 boreale innsjøer i Sverige, viste derimot resultatene til Erlandsson m.fl (2011) at 47% av innsjøene fortsatt var markant forsured, og viste en nedgang i pH på 0,4 eller mer siden 1990.

Et viktig spørsmål rundt reduksjonen i forsuring er om TOC-økningene stopper opp når innsjøene er tilbake til før-industrielle nivåer, Meyer-Jacob m.fl (2019) analyserte data fra boreale innsjøer i Canada og viste at redusert forsuring, med redusert ionestyrke og surhetsgrad i nedbørfelt, har gitt økte mengder TOC. De viste også at TOC-konsentrasjonene i mange innsjøer overskrider de kalkulerte nivåene for den før-industrielle perioden, noe som kan tyde på at klimaendringer har tatt over som hoveddriver bak økningen. Denne teorien støttes av de Wit m.fl (2021), som viste at reduksjon i sur nedbør var hoveddriver i perioden 1990-2004, mens for perioden 2002-2016 var klimaendringer en like stor driver.

I tillegg til reduksjon i sulfat er det også registrert markant nedgang i nitrat, spesielt i sør og vestlige deler av Norge. Nitrat kan dannes ved at NO<sub>x</sub> oksideres i atmosfæren og tilføres via nedbøren (Behera m.fl 2013). Årsakene til reduksjonen skyldes trolig flere faktorer, blant annet mindre utslipp, endringer i klima, og økt vegetasjon. Mer vegetasjon betyr større behov for nitrat, noe som kan føre til at mindre nitrat transporteres til innsjøene (Skerlep m.fl 2020).

Mange områder i sørlige og østlige deler av Norge er fremdeles påvirket av langtransportert forurensing og forsuring (Hindar m.fl 2020), og selv om effekten av redusert forsuring antagelig har sett toppen, vil dette fortsatt være en viktig driver for TOC-økning i nærmeste fremtid.

Endringer som følge av redusert forsuring har med stor sannsynlighet vært en av flere drivere bak økningen i TOC, spesielt i områder som har hatt store reduksjoner i sulfat. Dersom redusert forsuring har vært hoveddriver bør vi kunne se en avtagende trend på økningen i TOC i områdene hvor forsuringen har vært størst, med mindre andre drivere, som for eksempel klimaendringer, har så stor effekt på TOC at økningen fortsetter i fremtiden.

### 3.4 Landskapsendringer og karbon i nedbørfelt

Med klimaendringer og reduksjon i sur nedbør endres også landskapet og sammensetningen og mengden av TOC i nedbørfeltet. I Norge tar skog og våtmark opp 46% av det totale landareal (se Fig. 16) og de boreale skogsområdene, unntatt våtmark og myr, inneholder ca. 25% av det totale terrestriske karbonlageret (IPCC 2000, gjengitt av Benoy m.fl 2007). Konsentrasjonen av karbon lagret i boreale områder er estimert til å være 6 ganger større enn i de mer tempererte områdene (Pregitzer & Euskirchen 2004, gjengitt av Laudon m.fl 2011, noe som viser hvor viktige disse områdene er for karbonsyklusen i de boreale innsjøene.

Boreale nedbørfelt er dominert av skog og 10-20% våtmark og myr (Laudon m.fl 2011), de Wit m.fl (2015) estimerte i et karbonbudsjett for Norge at det største karbonlageret finnes i lavlandskogene. I perioden 1990-2008 akkumulerte norske skoger 40 g C/m<sup>2</sup> i året, siden mesteparten av den produktive skogen finnes i sørøstlige deler av Norge vises dette også ved at karbonlageret i skogene øker fra nord til sør (de Wit m.fl 2015).

Kyrkjeeidet m.fl (2020) estimerte at norske skoger inneholder ca. 1,7 Pg C, hvor ca. 1,2 Pg er lagret i jordsmonnet. Boreale våtmarker og myrlandskap er en av de mest stabile lagringslokasjonene for karbon og har gjennom Holocen-perioden fra siste istid og frem til i dag lagret mellom 2 og 7 g C/m<sup>2</sup> i året (Smith m.fl 2004, gjengitt av Cole m.fl 2007). Grønlund (2013) estimerte, dog med stor usikkerhet, at våtmarker og myr i Norge kan inneholde mellom 943 og 1035 Tg C, men mengden kan potensielt være mye høyere.

Via fotosyntesen akkumulerer trær store mengder karbon gjennom sin levetid og over tid føres karbon videre ned i jordsmonnet hvor det kan lagres over lang tid. Trær kan også tilføre karbon til jordsmonnet via nedfall av løv og barnåler, i tillegg lagres mye karbon i trær også etter trefall og død før det blir en del av jordsmonnet som organisk materiale. I Norge er det gran og furu som dominerer, disse har lang levetid med opptil 500 år for gran og 700 år for furu (Bartlett m.fl 2020).

Med klimaendringer, økte temperaturer og en lengre vekstsesong er det ventet at treveksten også øker, med en gjennomsnittlig økning i temperatur på 2°C i løpet av de neste 100 år, kan opptak av karbon i trær i Norge øke med opptil 75%, fra 4 til 7 Tg C/år (Astrup m.fl 2010, gjengitt av Kyrkjeeidet m.fl 2020).

Klimaendringer kan ha ekstra stor betydning for de sensitive områdene på den nordlige halvkule, og spesielt i de boreale områder (IPCC 2021, Öquist m.fl 2014). Økte temperaturer, økt mengde CO<sub>2</sub> i atmosfæren og forlenget vekstsesong kan stimulere til økt vegetasjon, og i kombinasjon med skogplanting og landskapsendringer kan dette føre til høyere primærproduksjon og økt karboninnhold i jordsmonnet (Skerlep m.fl 2020, Lepisto m.fl 2014, Finstad m.fl 2016). de Wit m.fl 2015 konkluderte derimot i sitt karbonbudsjett at økt mengde og utbredelse av skog har lite potensiale for å øke det terrestriske karbonlageret i Norge.

Lengden på vekstsesongen (definert som antall dager med gjennomsnittstemperaturer over 5° C) kan være en viktig faktor ved estimering av TOC-konsentrasjoner over tid. Ifølge Masson-Delmotte m.fl (2021) har vekstsesongen på den nordlige halvkule i gjennomsnitt økt med to dager hvert tiår siden 50-tallet. Kritzberg (2007) viste i en undersøkelse i Sør-Sverige at antall vekstdager hadde økt med 20 dager siden 1970-tallet. Ved hjelp av satellittdata fra fire boreale skogsområder i Nord-Amerika og Nord-Europa i perioden 1974-2014 viste Pulliainen m.fl (2017) at vekstsesongen på våren har økt med 8 dager. Basert på dette kalkulerte de en økning i opptak av karbon i perioden Januar-Juni på 3,7% per tiår. Finstad m.fl (2016) viste i sin studie av norske innsjøer at økt vekstsesong har hatt stor innflytelse på de økte TOC-konsentrasjonene de siste 30 år. I estimerer for fremtidig klima viste Hanssen-Bauer m.fl (2017) at ved en gjennomsnittlig økning av årstemperaturen på 2,7°C og 4,5°C, kan store deler av Norge få en markant økning i vekstsesongen i fremtiden (se Fig. 15).

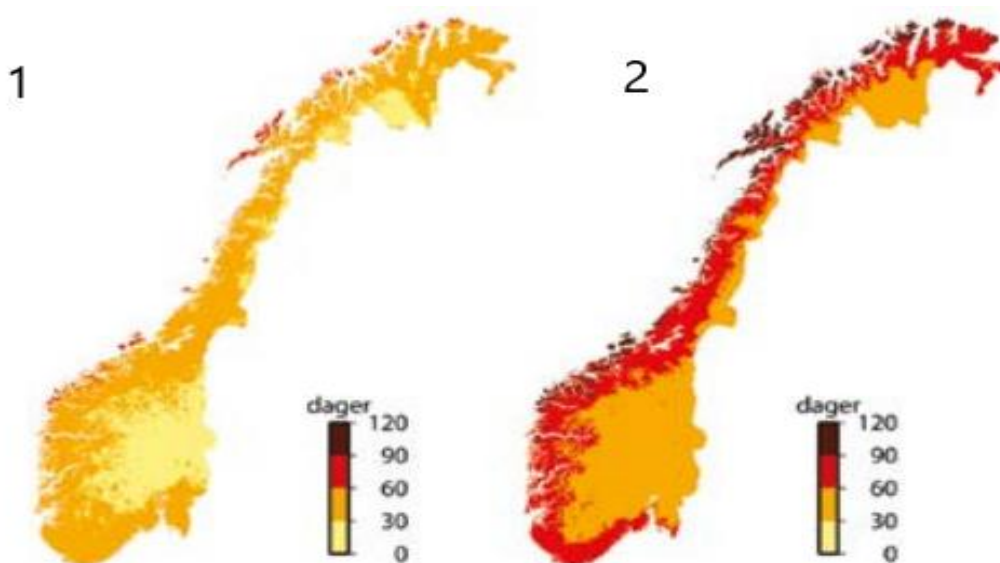


Fig. 15: Estimert økning i vekstsesong for perioden 2071-2100 ved gjennomsnittlig temperaturøkning på 1) 2,7°C og 2) 4,5°C (Kilde: Hentet fra Hanssen-Bauer m.fl 2018)

Skogplanting er ofte brukt som klimatiltak for å øke opptaks- og lagringskapasiteten av karbon, og en endring fra jordbruk til skogplanting kan over tid føre til endringer i karbonsammensetningen i jordsmonnet (Tau Strand m.fl 2021). I en studie av 90 innsjøer i Europa fant Anderson m.fl (2014) at innsjøene sedimenterte og lagret opptil 5 ganger mer enn tidligere ved overgang til jordbruk og kulturlandskap.

Selv om innsjøer er avgrensede økosystemer gjenspeiler de på mange måter egenskapene i sine omkringliggende nedbørfelt, i mange områder der landskapet har gått fra jordbruk til skog kan disse endringene over tid føre til økte TOC-konsentrasjoner (Kritzberg 2017). Tau Strand m.fl (2021) viste imidlertid at ved endring fra jordbrukslandskap til skogplanting reduseres TOC-konsentrasjonene i jordsmonnet i starten da karbonopptaket primært går med til å bygge opp biomassen, men i løpet av 50 år hadde de fremdeles ikke registrert noen markant endring. Det er derfor usikkert om TOC-konsentrasjoner i jordsmonnet i boreale områder vil øke over lengre tid som følge av skogplanting.

Mengden TOC som eksporteres fra nedbørfeltet kan variere med type landskap og klima, Köhler m.fl 2008 viste at i perioder med økt nedbør ble det eksportert mer TOC fra delen av nedbørfeltet som består av skog enn fra myrlandskapet. I år med økt nedbør fikk innsjøen med skoglandskap i nedbørfeltet tilført over 6 ganger mer TOC enn i tørrere år, for innsjøen med myrlandskap ble 4 ganger mer TOC tilført i våtere år enn tørre. TOC som tilføres fra våtmark og myr er ofte mer motstandsdyktig for nedbryting enn TOC tilført fra skoglandskapet, i perioder med lav vannføring vil mesteparten av eksportert TOC stamme fra våtmark og myr, mens det i perioder med høy vannføring primært eksporteres fra andelen av nedbørfeltet bestående av skog (Laudon m.fl 2004, Laudon m.fl 2011).

Både karakteristikker i nedbørfeltet og geografisk lokasjon for innsjøene er viktige faktorer for TOC-konsentrasjonene, noe Kortelainen m.fl (2013) viste i en studie av 82 boreale innsjøer i Finland. Her viste de at de høyeste konsentrasjonene av TOC lå i sørlige deler av landet og i innsjøer med nedbørfelt bestående av skog, myr og jordbrukslandskap. TOC med opphav i skogsdominert nedbørfelt har vist, i motsetning til TOC fra våtmarker og myr, å være lettere nedbrytbar for bakterielle mikroorganismer (Giesler m.fl 2007, gjengitt av Larsen m.fl 2011).

I tillegg er konsentrasjoner av TOC i nedbørfelt bestående av bartrær ofte høyere enn i landskap bestående av løvfellende trær (Anderson m.fl (2020, Skerlep m.fl 2020).

Larsen m.fl (2011) viste at stigning i terreng i nedbørfelt hadde en negativ effekt på TOC, noe som kan indikere at flatere nedbørfelt har større potensiale for lagring av karbon. Brattere terreng har tynnere topplag i jordsmonnet og er mer utsatt for avrenning. Siden nedbørfelt med flatere topografi ofte har tykkere jordlag og jordvannet fordeles bedre, kan disse inneholde markant høyere konsentrasjoner av TOC enn i nedbørfelt med mer skrånende terreng (D'Arcy & Carignan, 1997, gjengitt av Ferland m.fl 2012).

Forvaltning av nedbørfelt kan få en viktigere rolle i fremtiden dersom fokus rettes mot å dempe økningen av TOC, i første omgang kartlegge hvilke tiltak som har potensiale til å bremse økningene og om det er mulig å rehabilitere landskapet i nedbørfeltet. I tillegg vil det være viktig å kartlegge langsiktige virkninger av planting av barskog og finne ut om dette fører til en lineær økning i TOC eller om det på et tidspunkt vil stabiliseres.

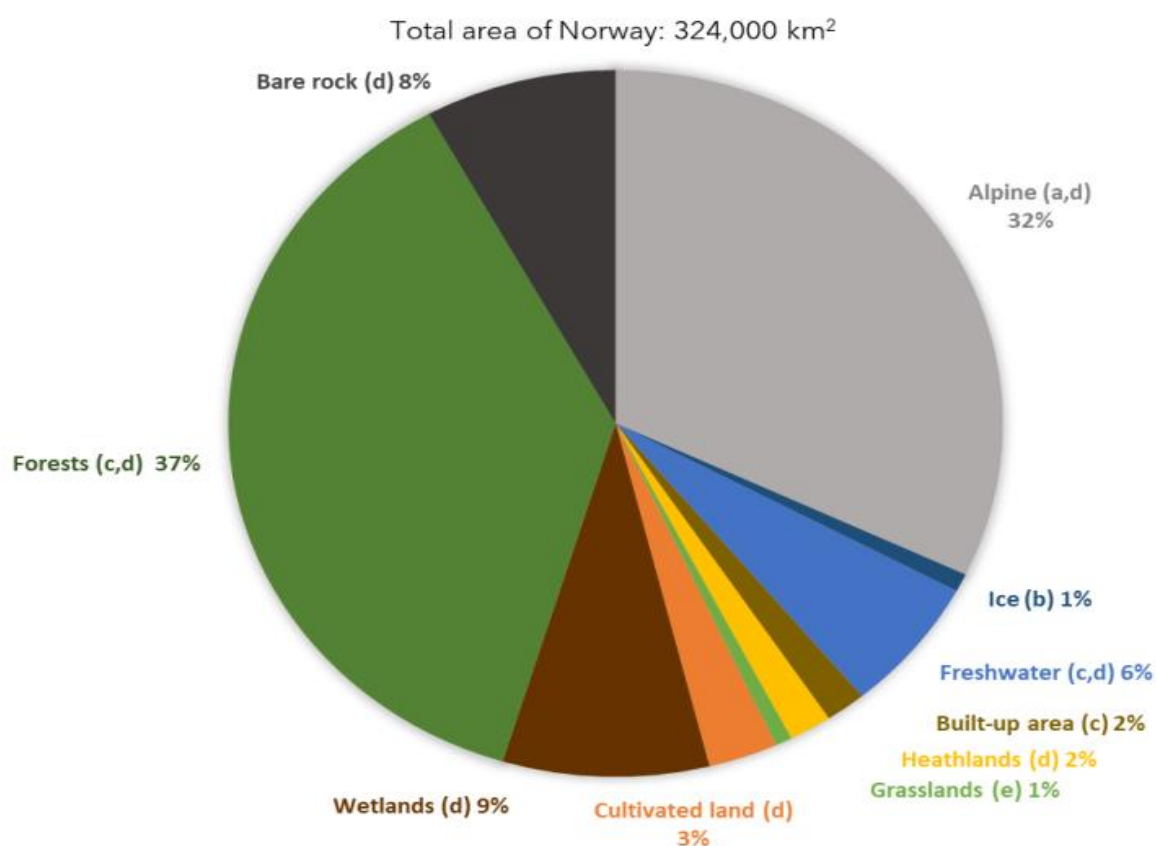


Fig. 16: % lagret karbon i ulike økosystem i Norge (Kilde: Hentet fra Kyrkjeidet m.fl 2020)



### 3.5 TOC og fargeendringer i boreale innsjøer

Innsjøer med brunt vann finnes over hele jordkloden og er spesielt vanlig i nedbørfelt bestående av skoger, våtmarker og myr (Ekstrøm 2013). At innsjøene får en brun farge har helt naturlige årsaker og styres som regel av egenskapene i nedbørfeltet. I de siste tiår har derimot fargetallet i mange boreale innsjøer økt markant, noe som resulterer i redusert lystilgang og sikt for fiskebestander og utfordringer med rensing av vann til drikkevannsformål (Ekstrøm 2013, de Wit m.fl 2016, Eklof m.fl 2021). Fargetallet brukes som en måleenhet på innsjøenes innhold av humusstoffer og kan oppgis som milligram partikler per liter (mg Pt/l). Ved redusert lystilgang påvirkes også primærproduksjonen i innsjøene, og Seekell m.fl (2015) estimerte at økt farge i boreale innsjøer kunne redusere primærproduksjonen med 8,7%. I tillegg kan redusert lystilgang som følge av mørkere farge føre til endring i varmfordelingen i innsjøene, som igjen regulerer sirkulasjonsmønsteret og stratifisering i sommersesongen (Larsen m.fl 2011, de Wit m.fl 2016, Kuhn & Butman 2021).

Det er fremstilt flere teorier for å forklare fargeendringene, blant annet økte konsentrasjoner av TOC som følge av redusert forsuring, forlengelse av vekstsesong, økt nedbør med endringer i hydrologiske transportveier og høyere temperaturer, i tillegg til markant økning av jern (Fe) (Skerlep m.fl 2020, Weyhenmeyer 2014, de Wit m.fl 2021, Finstad m.fl 2016, Lepisto m.fl 2021, Tranvik m.fl 2018). Det er argumentert for at innsjøene har vært unaturlig klare som en konsekvens av at forsuringen har redusert løseligheten av organisk materiale (Kritzberg 2017), men fargetallet har i mange områder økt mer enn konsentrasjonen av TOC, noe som kan tyde på at en kombinasjon av flere drivere står bak (Hongve m.fl 2004, gjengitt av Ekstrøm 2013). Skerlep m.fl (2020) viste at vannfarge i hovedsak ble styrt av økt mengde TOC som følge av økt nedbør og temperatur, men fant derimot ingen reduksjon i vannfarge ved økt forsuring.

Ekstrøm (2013) tilskriver mye av fargeendringene til kombinasjonen av økt TOC og Fe, og at Fe alene kunne forklare i gjennomsnitt 25% av fargeendringene i innsjøer i Sør-Sverige. I innsjøer i nordlige områder, som ikke har vært utsatt for like stor grad av forsuring, kunne Fe forklare opptil 76% av økningen. Dette kan tyde på at fargeendringene i sørlige deler er sterkt knyttet til redusert forsuring og økt transport av TOC fra nedbørfeltet, mens Fe er en sterkere driver i nordlige områder. Bjørnerås m.fl 2017 viste i en undersøkelse av 340 innsjøer med økende trend i Fe at TOC viste lignende økning.

Ved oksygenrike forhold har Fe lav løselighet og er derfor avhengig av TOC for å lage sterke bindinger, dette kan tyde på at høye konsentrasjoner av Fe er sterkt avhengig av høye TOC konsentrasjoner i innsjøene (Maranger & Pullin 2003, gjengitt av Thrane m.fl 2014). Björnerås m.fl 2017 viste i en undersøkelse av 340 innsjøer at den økende trenden i Fe samsvarte med økte TOC-konsentrasjoner.

Flokkulering av Fe og DOC er en prosess som kan føre til at økte mengder TOC tilføres sedimentene, og i kombinasjon med oppholdstid kan dette føre til store variasjoner i TOC-konsentrasjonene gjennom sesongene. Bastviken m.fl (2008) målte flokkulering av TOC i en humøs boreal innsjø og tilhørende myr i Sør-Sverige, resultatene viste at POC økte i takt med en reduksjon i konsentrasjon av Fe, noe som kan tyde på at Fe flokkulerer med TOC og danner POC. Denne teorien støttes av Finstad m.fl (2016), som også viste at Fe flokkulerer lett med TOC og fører til økt farge.

Xiao & Riise (2021) studerte koblingen mellom farge, jern og TOC i 24 boreale innsjøer i Sørøst-Norge, innsjøene viste markante økninger i farge, TOC og Fe, og kombinasjonen av TOC og Fe kunne forklare 89% av økningen i fargetallet. De viste også at TOC og Fe var sterkt knyttet til oppholdstiden i innsjøene, med 25% mer TOC og Fe i fuktige år enn i tørre.

Ved hjelp av Landsat satellitter studerte Kuhn & Butman (2021) lysabsorpsjon i over 400,000 innsjøer i de arktiske og boreale områdene i vestlige deler av Nord-Amerika, her fant de at TOC tar opp lys i korte bølgelengder (250-440 nm) og kan derfor bidra til å endre farge på vannet i innsjøer. Økte konsentrasjoner av TOC og endring i lysabsorpsjonen kan forstyrre innsjøenes primærproduksjon siden TOC tar opp lys i samme bølgelengde som brukes for fotosyntese.

Kohler m.fl 2013 analyserte endringer i farge i Sveriges tredje største innsjø i et forsøk på å kartlegge årsaken til at østlige deler av innsjøen ikke påvirkes av økte mengder TOC og Fe i den vestlige delen. Rundt 60% av fargetapet kunne forklares med reduksjon av Fe og resultatene viste at konsentrasjonen av TOC og Fe avtok kraftig fra vest mot øst. De konkluderte med at vannets oppholdstid hadde en stor påvirkning på fargetallet. Dette støttes av Kohler m.fl (2013) som i en studie av 69 innsjøer i Sverige observerte at innsjøene med størst fargeendring hadde oppholdstid på under 1,5 år. Ved økt oppholdstid vil også primærproduksjonen av autoktont TOC øke, denne

andelen av TOC har som regel mindre farge enn den alloktone andelen, og kan bidra til å redusere fargetallet i innsjøene. Dette avhenger sterkt av mengden alloktont TOC som tilføres innsjøene (Battin m.fl 2009, gjengitt av Kohler m.fl 2013).

Kritzberg (2017) studerte fargeendringer i 50 innsjøer i Sverige med vannkjemiske data over en periode på 80 år og konkluderte med at nedgangen i sur nedbør og redusert forsuring i innsjøene ikke alene har vært nok til å forklare endringene, men at dette i stor grad kan relateres til økt TOC som følge av endringer i landskap fra jordbruk til skogplanting. Innslag av gran økte fra 19% på slutten av 1800-tallet, til 63% i 2017 i områdene hvor studiene ble gjort. Farge fulgte konsentrasjonen av TOC og bygger opp under påstanden om at TOC er en pålitelig faktor for fargeendringen, selv om også Fe og sammensetningen av det organiske materialet fra nedbørfeltet påvirker farge i innsjøene. Kritzberg (2017) viste også at farge i innsjøene var markant høyere i 2015 enn i 1935, registrert endring i farge i innsjøene ble gjort før nedgangen i utslipp av sur nedbør startet, noe som kan argumentere mot at reduksjon av sulfat og sur nedbør ikke alene kan forklare fargeendringene.

Weyhenmeyer m.fl (2014) viste ved hjelp av 58000 vannprøver fra 6339 boreale innsjøer i Sverige og Canada at TOC økte i takt med økningen av jern i innsjøene og at TOC og Fe danner stabile bindinger som fører til en mørkebrun farge med svært lysabsorberende egenskaper. Maloney m.fl 2005 (gjengitt av Weyhenmeyer m.fl 2014) fant at jern når sitt høyeste lysabsorberende potensial når det er bundet til TOC, mens laboratoriestudier har vist at bindinger av Fe og TOC vil flate ut når TOC er mettet på Fe, de lysabsorberende egenskapene slutter da å øke selv om mer jern tilføres innsjøene (Xiao m.fl 2013, gjengitt av Weyhenmeyer m.fl 2014). Skerlep m.fl (2020) analyserte vannkjemiske data fra en elv i Sverige og viste at farge varierte gjennom de ulike sesongene og økte med 84% i perioden 1940-2016. Studien viste en markant økning i totalvolum av gran i nedbørfeltet, og denne faktoren alene kunne forklare 49% av endringene i farge. Når denne variabelen ble kombinert med klimavariabler som nedbør, temperatur og endringer i vekstsesong, kunne dette forklare 63% av variasjonene i farge.

Fargeendringene virker å følge både TOC og Fe-økninger men det er også vist tilfeller hvor økningen i fargetallet har avtatt, og at vi muligens kan se et stabiliserende fargetall i mange innsjøer. I en analyse av 164 innsjøer i Sverige viste Eklof m.fl (2021) at selv om TOC økte i

perioden 1990-2010, så avtok økning i farge i stor grad for 20 år siden og mindre enn 10% av lokasjonene hadde økende mengde TOC og farge. Mange av lokasjonene som fortsatt viste økende trend var lokalisert i sørlige deler av Sverige, og i mange tilfeller tidligere jordbrukslandskap som har blitt endret til skoglandskap bestående av bartrær for ca. ett århundre tilbake.

Det er vanskelig å konkludere om fargeendringene er på nivåer som ikke tidligere har forekommet, eller om dette er en tilbakeføring til før-industrielle nivåer. Med klimaendringer som økt nedbør og temperaturer i kombinasjon med økt løselighet i det organiske materialet i nedbørfeltet, kan farge i innsjøene fortsatt øke, spesielt i områder hvor forsuringen har vært størst. Klimaendringer og økt vegetasjon har økt karbonsammensetningen i nedbørfelt, og økt eksport av TOC til innsjøene kan føre til at farge fortsetter å øke i fremtiden. Den økte fargen i boreale innsjøer virker til å ha flere underliggende drivere, økte konsentrasjoner av TOC og Fe som følge av økt mobilitet og løselighet av organisk materiale etter reduksjon av sur nedbør, promotert av en kombinasjon av klimaendringer med økt nedbør og temperaturer, samt endringer i vekstsesong vil med stor sannsynlighet bidra til fortsatt økning i fargetall i boreale innsjøer.

### 3.6 Karbonlagring i innsjøsedimenter

Ifølge FNs klimapanel vil en bevaring og utbedring av naturlige karbonlagre være en av de beste og mest konstandseffektive metodene for å bekjempe klimaforandringer (Battin m.fl 2020).

Sedimenter i boreale innsjøer prosesserer og lagrer store mengder karbon, enten ved å begrave og permanent lagre karbonet i sedimentene, eller ved å mineralisere og omdanne karbonet til CO<sub>2</sub> eller CH<sub>4</sub>. Innsjøer i de boreale områdene står for 24% av totalt lagret karbon i innsjøsedimenter globalt, primært på grunn av innsjøtettheten og de store områdene innsjøene dekker (Anderson m.fl 2020). Estimerte mengder varierer stort og avhenger blant annet av innsjøtype, morfometri, TOC-konsentrasjoner, temperatur og oksygentilgang i innsjøene (Kortelainen m.fl 2013, Pace & Prairie 2004, Anderson m.fl 2020). Cole m.fl (2007) estimerte at 0,23 Pg C begraves og lagres i sedimentene hvert år mens Battin m.fl (2009) estimerte dette til 0,6 Pg. Kastowski m.fl (2011) estimerte at ferskvannsinnsjøer totalt sedimenterer og lagrer 1,25 Mt C/år. Heathcote m.fl (2015) estimerte at over 20% av totalt sedimentert karbon siden siste istid er lagret i løpet av de siste 100 år.

Innsjøsedimenter inneholder en blanding av alloktont og autoktont organisk karbon, den autoktone andelen TOC som har sitt opphav fra primærproduksjon, blir i hovedsak mineralisert av mikrobielle organismer i sedimentene, mens den alloktone delen ofte er mer resistent for nedbryting og har større sjanse for å lagres permanent i sedimentene Chmiel m.fl 2015, Mulholland & Elwood 2016).

Små innsjøer inneholder ofte mye karbon i sedimentene og både Ferland m.fl (2012) og Kortelainen m.fl (2004) viste at innsjøer med størrelse opptil 1 km<sup>2</sup> hadde størst karbontetthet i sedimentene. de Wit m.fl (2015) brukte et modelleringsverktøy og estimerte mengden karbon i sedimentene i ca. 1000 norske innsjøer til 17,8 +/- 8,2 kg C/m<sup>2</sup>, med en sedimenteringsrate på 1,8 g C/m<sup>2</sup> i året. I en studie fra Finland fant Sobek m.fl (2006) at innsjøsedimenter, med 19 kg C/m<sup>2</sup>, har en mye større karbontetthet enn i jordsmonn i skog, med 7,2 kg C/m<sup>2</sup>.

Endringer i nedbørfelt og graden av eutrofiering i innsjøene kan ha stor betydning for hvor stor andel TOC innsjøene lagrer i sedimentene. Eutrofe innsjøer kan sedimentere og lagre betydelig større mengder TOC enn oligotrofe innsjøer på samme størrelse, og er en av svært få dokumenterte fordeler i denne typen innsjøer (Downing 2009, Anderson m.fl 2014). Bunnforhold i

innsjøene og om sammensetningen av TOC er av alloktont eller autokton opprinnelse, er noen av de viktigste faktorene som bestemmer hvor effektivt TOC sedimenteres og lagres, også kjent som sedimenteringsrate (Sobek m.fl 2009, gjengitt av Anderson m.fl 2014).

I perioder med kraftig nedbør og økt tilførsel av alloktont TOC vil innsjøene få kortere oppholdstid og mindre tid til prosessering av TOC. Dette kan føre innsjøene nærmere «passivt rør»-teorien fremsatt av Cole m.fl (2007), i perioder med tørke eller i perioder hvor oppholdstiden øker kan produksjonen av autokton TOC også øke, og innsjøene kan i større grad bli en kilde til utslipp (se Fig. 17).

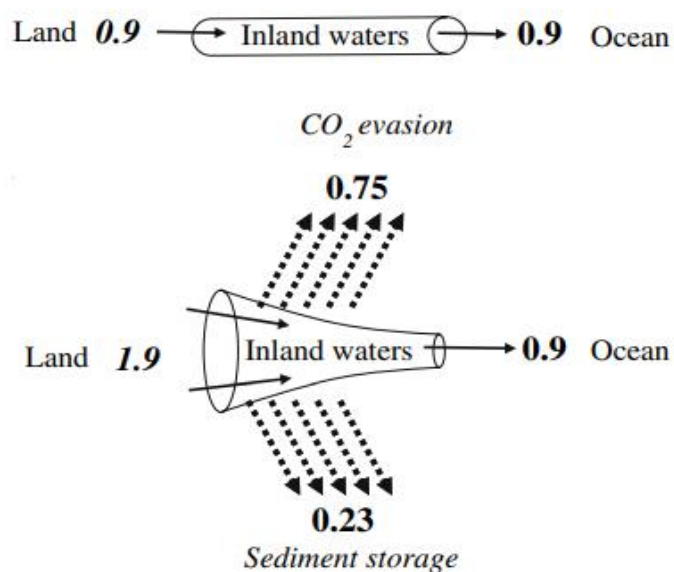


Fig. 17: Passiv (øverst) og aktiv (nederst) rør-teori med estimert karbonbudsjett (Pg C) for innsjøer (Kilde: Hentet fra Cole m.fl 2007)

Flokkulering og suspendering av POC til sedimentene kan ha stor betydning for karbonsyklusen i boreale innsjøer, Bastviken m.fl 2008 målte flokkulering av TOC i en humøs boreal innsjø og tilhørende myr i Sør-Sverige, og viste at 10% av totalt sedimentert TOC er resultat av flokkulering til POC i innsjøen.

Innsjøsedimenter er den eneste delen av innsjøer som permanent lagrer karbon, men mineraliseringsraten av TOC er med på å redusere lagringseffektiviteten (Kortelainen m.fl 2004). Klimaendringer og høyere temperaturer kan være en viktig faktor for karbonlagringen, Chmiel (2015) viste at ved å simulere varmere temperaturer i boreale innsjøer ble sedimentering og

lagring av TOC redusert med opptil 16% avhengig av innsjøenes morfometri. Mer TOC vil da være tilgjengelig for mineralisering i sedimentene og kan potensielt føre til økt utslipp av CO<sub>2</sub> og CH<sub>4</sub>. De grunnere innsjøene viste en sterkere reduksjon i lagringseffektivitet enn de dypere innsjøene, i tillegg viste Chmiel (2015) i en undersøkelse av to små boreale innsjøer at 25% av TOC tilført sedimentene ble permanent lagret. Anderson m.fl (2020) viste derimot at økningen i sedimentering og lagring er markant høyere enn påvirkningen av økt temperatur skulle tilsi, noe som kan tyde på at temperatur spiller en mindre rolle på innsjøenes lagringseffektivitet og at andre drivere spiller en større rolle i kombinasjon med økte temperaturer.

Størrelse på innsjøene og morfometri som dybde og hvor flate innsjøene er kan ha stor betydning for hvor mye TOC som potensielt kan lagres. Kortelainen m.fl (2013) studerte 82 boreale innsjøer i Finland og viste at innsjøareal og morfometri var viktige faktorer for både lagring og utslipp i innsjøene, de mindre og grunnere innsjøene viste både høyere konsentrasjoner av TOC, Fe og farge, i tillegg til større mengde utslipp og sedimentering. Grunne innsjøer med flat morfometri har ofte større mengder sedimenter i littorale soner med høy mikrobiell aktivitet (Sobek m.fl 2002, Pace & Prairie 2004), noe som kan tyde på at respirasjon i sedimentene er en hovedkilde til CO<sub>2</sub> i boreale innsjøer.

Anderson m.fl (2020) viste at mengden karbon som lagres i innsjøer har tredoblet seg siste 100 år, klimaendringer og økning av alloktont TOC i kombinasjon med innsjømorfometri, endringer i stratifisering og bunnforhold i stor grad påvirker hvordan karbon lagres eller prosesseres videre i innsjøene.

### 3.7 Klimagasser, dannelse og utslipp fra boreale innsjøer

Mineralisering er en mikrobiell prosess i de øverste sedimentlagene der bakterier og mikroorganismer bruker TOC til celleånding og omdanner karbon til CO<sub>2</sub> eller CH<sub>4</sub>, prosessen avhenger av flere faktorer som blant annet temperatur, mengden og type TOC, trofiske nivå og innsjødybde (Gudasz m.fl 2010, Benoy m.fl 2007, Kortelainen m.fl 2013, Tranvik m.fl 2009, Sahoo m.fl 2016).

Klimagassene CO<sub>2</sub> og CH<sub>4</sub> er to av de viktigste driverne bak klimaforandringene, CO<sub>2</sub>-konsentrasjonen i atmosfæren var i starten av den industrielle perioden (ca. 1750) ca. 277 ppm (Joos & Spahni 2008, gjengitt av Friedlingstein m.fl 2019), mens i 2018 var denne økt til 407 ppm (Dlugokencky & Tans 2019, gjengitt av Friedlingstein m.fl 2019, se Fig. 18). De antropogene utslippene i den før-industrielle perioden var i hovedsak resultat av avskoging og landskapsendringer, og selv om utslipp av fossilt brensel startet før den industrielle tidsperioden, var det ikke før rundt 1950 at dette ble den største kilden til antropogene utslipp til atmosfæren (Friedlingstein m.fl 2019).

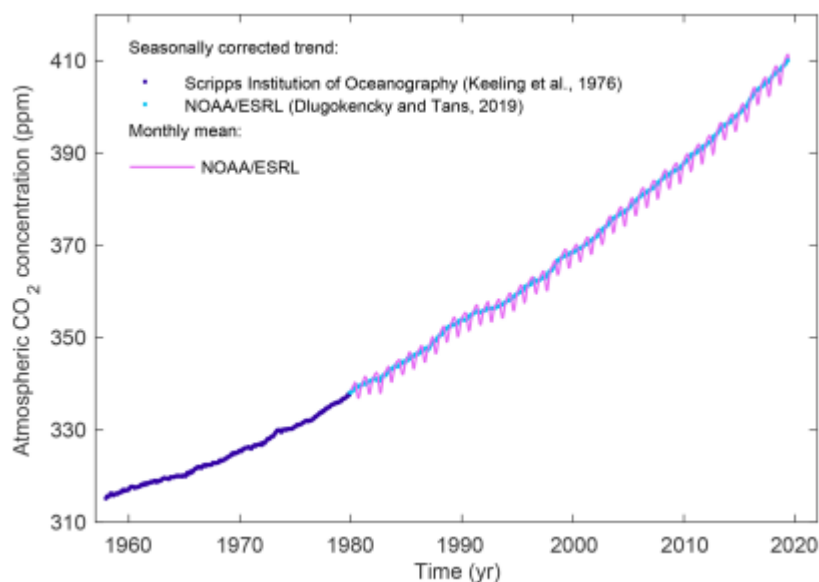


Fig. 18: CO<sub>2</sub>-økning i atmosfæren for perioden 1960-2018

(Kilde: Hentet fra Friedlingstein m.fl 2019)



Boreale innsjøer bidrar med opptak av CO<sub>2</sub> fra atmosfæren og utslipp ved mineralisering av TOC og produksjon av CO<sub>2</sub> og CH<sub>4</sub> i bunnsedimentene. CO<sub>2</sub> kan produseres i vannsøylen, i sedimentene ved hjelp av mikrobiell mineralisering av TOC, og ved fotokjemisk mineralisering (Weyhenmeyer m.fl 2015). I vannsøylen kan CO<sub>2</sub> også omdannes tilbake til organisk materiale av primærprodusenter som for eksempel phytoplankton, hvor stor andel som omdannes avhenger sterkt av mengden alloktont TOC som påvirker fotosyntesen med sine lysabsorberende egenskaper (Karlsson m.fl 2009, gjengitt av Chmiel 2015). Mens CO<sub>2</sub> kan produseres i aerobe forhold er dannelsen av CH<sub>4</sub> en prosess som alltid krever anaerobe forhold i bunnlaget i innsjøene (Rantakari 2010).

Med unntak av skogbrann, våtmark og myr er innsjøer de eneste økosystemene i boreale områder som slipper ut karbon i form av CO<sub>2</sub> og CH<sub>4</sub> til atmosfæren (Benoy m.fl 2007). De fleste boreale innsjøer er overmettet på CO<sub>2</sub>, primært på grunn av høye konsentrasjoner av alloktont TOC som driver innsjøene til heterotrofe tilstander hvor respirasjon dominerer over primærproduksjonen (Sobek m.fl 2006, Anderson m.fl 2020, Clayer m.fl 2021, Kortelainen m.fl 2013, Larsen m.fl 2011). Sobek m.fl (2003) viste i en studie av boreale innsjøer at disse var i gjennomsnitt 4,8 ganger mer mettet på CO<sub>2</sub> enn atmosfæren og konkluderte med at TOC er den desidert største faktoren for mengde CO<sub>2</sub> i innsjøene.

Effekten av TOC på CO<sub>2</sub>-mengden reduseres ved økt innsjøareal og høyde over havet, og Larsen m.fl (2011) viste at TOC i kombinasjon med disse faktorene kunne forklare opptil 79% av variasjonene i CO<sub>2</sub>. Små og grunne innsjøer har ofte vist seg å både lagre og slippe ut mest CO<sub>2</sub>, dette støttes av blant annet Weyhenmeyer m.fl (2015), Kortelainen m.fl (2013) og Raymond m.fl (2013) som alle viste at kombinasjonen av innsjøareal, maksdybde, oppholdstid og høye TOC-konsentrasjoner ga høyere utslippsrate av CO<sub>2</sub> enn i de større innsjøene.

Visse innsjøtyper kan ha større utslippspotensiale enn andre, Huttunen m.fl (2003) viste at regulerte og eutrofierte innsjøer, samt innsjøer med nedbørfelt dominert av myrlandskap hadde de høyeste utslippsmengdene av CO<sub>2</sub>, og viste i tillegg at alle innsjøene var kilde til utslipp av CO<sub>2</sub>. Rantakari (2010) estimerte årlig CO<sub>2</sub>-utslipp fra boreale innsjøer til 47 Tg C/år og viste i samme undersøkelse at de mindre innsjøene hadde et årlig CO<sub>2</sub>-utslipp 40 ganger høyere enn TOC lagret i sedimentene, mens i de større innsjøene var CO<sub>2</sub>-utslippet 20 ganger større en lagringsraten.

CO<sub>2</sub>-konsentrasjonene i innsjøene varierer gjennom sesongene, vintersesongen er særlig utsatt for klimaforandringer og CO<sub>2</sub>-konsentrasjonene kan også påvirkes sterkt av dette. Clayer m.fl (2021) observerte at CO<sub>2</sub>-konsentrasjonene i de boreale innsjøene er på sitt høyeste mot slutten av vinteren mens det fremdeles er isdekke på vannet. Etter vårisgang ble det registrert en nedgang frem mot sommermånedene hvor de laveste konsentrasjonene ble målt, før konsentrasjonene økte igjen utover høsten og gjennom vinteren, men med episodiske toppe ved liten vannføring og økt oppholdstid (se Fig. 19). Ved at CO<sub>2</sub>-konsentrasjonene viser en økning under isdekket gjennom vinteren, kan det tyde på stor bakteriell aktivitet i bunnsedimentene og en sterk kilde til CO<sub>2</sub> i vannsøylen, som for eksempel TOC. Clayer m.fl (2021) viste i tillegg at CO<sub>2</sub>-konsentrasjonene var markant høyere i hypolimnion enn i epilimnion.

Totalt uorganisk karbon (TIC) kan regnes ut fra pH og alkalinitet, sammen med metningsgraden av CO<sub>2</sub> i innsjøen og atmosfæren i tillegg til vindhastighet, kan dette brukes til å estimere CO<sub>2</sub>-utslipp fra en innsjø (Yasarer 2015).

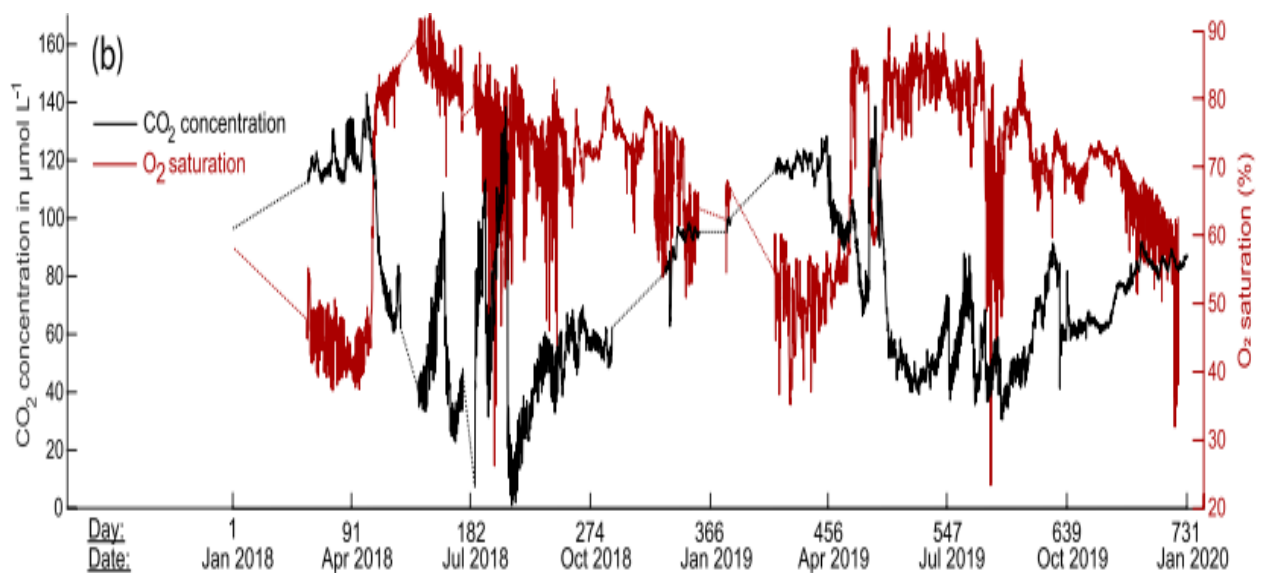


Fig. 19: Sesongmåling av CO<sub>2</sub>-konsentrasjoner og O<sub>2</sub>-metning i Langtjern, Norge i perioden 2018-2020 (Kilde: Clayer m.fl 2021)

Siden mange boreale innsjøer er små og grunne vil en stor del av sedimentene være i kontakt med de sirkulerte vannlagene og mineralisering vil dominere over lagring (Tranvik m.fl 2009).

Oksygentilgang i bunnlagene i innsjøene har en sterk påvirkning på mineraliseringsraten av TOC i sedimentene, hvis bunnlaget har tilstrekkelig oksygentilgang kan mineraliseringsraten i sedimentene være dobbelt så høy som når bunnlaget er oksygenfritt (Isidorova m.fl 2016).

Mineraliseringen av alloktont TOC reduseres ved oksygenfrie tilstander, mens for autoktont TOC er mineraliseringsraten lik i både aerobe og anaerobe forhold (Chmiel 2015). Gudasz m.fl (2012) fant at mineraliseringen i sedimentene i boreale innsjøer i Sør-Sverige økte i takt med økte mengder alloktont TOC opp til 17,5 mg C/l, deretter avtok mineraliseringsraten selv om TOC økte. Mineraliseringsraten for autoktont TOC viste derimot ingen tegn til reduksjon selv om TOC fortsatte å øke.

Den bakterielle produktiviteten ser ut til å være høyere ved omdannelse av autoktont TOC, men dersom tilgangen på autoktont TOC blir lav vil den bakterielle aktiviteten endre kilde til alloktont TOC (del Giorgio & Cole 1998 og Kritzberg m.fl 2004, gjengitt av Benoy m.fl 2007). Sammenlignet med vannsøylen er mengde næring og TOC ofte over 1000-gangen høyere i innsjøsedimenter og et yndet sted for heterotrofe bakterier, og både produksjonsrate og mengden bakterielle mikroorganismer kan ofte være 2-3 ganger høyere i sedimentene enn i vannsøylen (Pace & Prairie, 2004).

Med økte temperaturer kan lagring av TOC i sedimentene i boreale innsjøer reduseres kraftig, samtidig som mineralisering og utslipp av CO<sub>2</sub> og CH<sub>4</sub> kan øke (Chmiel 2015, Gudasz m.fl 2010). Gudasz m.fl (2010) studerte forholdet mellom mineralisering av TOC i sedimenter og endringer i temperatur i boreale innsjøer i Sverige. De konkluderte med at mineralisering er sterkt knyttet til temperatur, og at økt temperatur som følge av klimaendringer vil føre til økt mineralisering og en reduksjon i lagring av TOC i sedimentene på mellom 6 og 15%. TOC i bunnsediment kan være ekstra sårbart for temperaturforandringer, spesielt i littorale soner kan sedimentene ha en rask reaksjon på temperatursvingninger (Benoy m.fl 2007). Couture m.fl (2015) undersøkte en humøs boreal innsjø og viste ved hjelp av et modelleringsverktøy at varmere vann på sensommeren førte til flere og lengre perioder med oksygenfrie tilstander og en økning i mikrobiell nedbryting av TOC, noe som kan indikere økt produksjon av CH<sub>4</sub>. Ferland m.fl (2012) fant derimot ingen sikre tegn på

at TOC i sedimenter utsatt for større temperaturforandringer responderte med økt mineralisering eller nedbryting.

Sammenlignet med CO<sub>2</sub> er andelen CH<sub>4</sub> som slippes ut fra innsjøer relativt lav, men siden CH<sub>4</sub> er en kraftigere klimagass har den en effekt på klimaet som er 20 ganger sterkere enn CO<sub>2</sub> (Bastviken m.fl 2008). CH<sub>4</sub> som produseres i sedimenter som ikke har sterk stratifisering av vannlagene unngår som regel å bli oksidert på vei opp vannsøylen og har større sjanse for å slippes ut til atmosfæren. Sedimenter i epilimnetisk og littoral sone kan derfor være hoveddrivere av CH<sub>4</sub>-utslipp til atmosfæren fra innsjøer (Bastviken m.fl 2008). CH<sub>4</sub> som produseres i hypolimnion, hvor vannlagene er sterkere stratifisert og bunnelaget ikke utsettes for sirkulasjon, kan få en større andel oksidert til CO<sub>2</sub> (Tranvik m.fl 2009), og ifølge Bastviken m.fl (2008) kan mellom 30 og 99% av CH<sub>4</sub> produsert i innsjøer potensielt bli omdannet til CO<sub>2</sub> i vannsøylen ved hjelp av mikrobiell oksidering før det slippes ut i atmosfæren. Grunne innsjøer med lite hydrostatisk press på sedimentene kan også slippe ut mye CH<sub>4</sub> i form av gassbobler, og kan i noen innsjøer være den største kilden til utslipp av CH<sub>4</sub> (Bastviken m.fl 2004, gjengitt av Tranvik m.fl 2008).

Økte konsentrasjoner av TOC med konsekvenser som fargeendringer, sterkere og lengre stratifisering av vannlagene, og større grad av heterotrofi, i tillegg til økte temperaturer, virker til å være den største faktoren for CO<sub>2</sub>-konsentrasjonene, særlig i de mindre innsjøene.

Klimagassutslippene kan derfor forventes å øke i boreale innsjøer dersom trenden for økt TOC og fargeendringer fortsetter i takt med forventede klimaendringer.

### 3.8 Regulerte innsjøer

Ifølge NVE finnes det 961 vannmagasiner som er regulert til kraftproduksjon i Norge, disse kan oppleve store variasjoner i vannstand gjennom sesongene. Reservoarer og oppdemte innsjøer kan lagre store mengder TOC i sedimentene og er en dokumentert kilde til klimagassutslipp (Prairie m.fl 2018). Nøyaktig hvor mye TOC som lagres eller slippes ut er fremdeles usikkert, men Cole m.fl (2007) estimerte at disse innsjøene lagrer mer enn alle naturlige innsjøer til sammen, og opptil 1,5 ganger mer enn alle verdens hav. Ved oppdemning kan reservoarene på sikt slippe ut store mengder CO<sub>2</sub> og CH<sub>4</sub>, dersom det oppdemte området i tillegg inneholder mye organisk materiale og vegetasjon (Yasarer 2015).

I løpet av det første tiåret etter oppdemning slipper reservoarer ofte ut store mengder CO<sub>2</sub> og CH<sub>4</sub> før de gradvis avtar mot utslippsverdier på samme nivå som før oppdemning (Ward m.fl 2017, Prairie m.fl 2018, se Fig. 20). Mellom 2 og 5 år etter oppdemning har innsjøene ofte en topp i mengden utslipp, og de høyeste konsentrasjonene kan være 3-10 ganger høyere enn i naturlige innsjøer (Tranvik m.fl 2009). St Louis m.fl (2000), gjengitt av Yasarer (2015) estimerte at oppdemte innsjøer og reservoarer globalt slipper ut ca. 270 Tg C/år som CO<sub>2</sub>, mens 53 Tg C/år slippes ut som CH<sub>4</sub>.

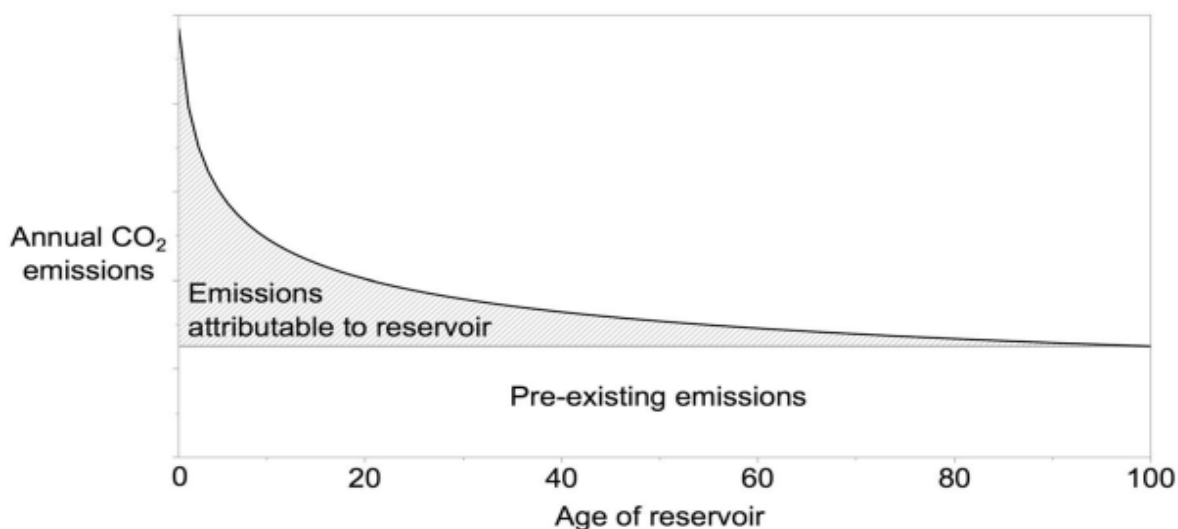


Fig. 20: CO<sub>2</sub>-utslipp fra regulerte innsjøer fra 0-100 år etter oppdemning  
(Kilde: Hentet fra Prairie m.fl 2018)

Bakgrunnen for de økte utslippene kan være økt tilførsel av TOC fra det oppdemte nedbørfeltet (Ward m.fl 2017), etter oppdemning kan det oversvømmende nedbørfeltet vise økt erosjon og raskt tilføre store mengder TOC tilgjengelig for mineralisering (Prairie m.fl 2018). Innsjøene kan fungere som en lagringsplass for TOC tilført oppstrøms ved at vannføringen reguleres, og andelen TOC som lagres permanent i sedimentene kan derfor være mye høyere enn tidligere antatt (Mendonça m.fl 2012). Vannets oppholdstid har også stor påvirkning på prosessene i innsjøer, ved oppdemning av elver og konstruksjon av reservoarer endres oppholdstiden og kan gå fra å være timer og dager til måneder og år (Prairie m.fl 2018). I tillegg til mineralisering av tilført TOC kan det også produseres CH<sub>4</sub> i bunnlaget ved nedbryting av vegetasjon og organisk materiale fra det opprinnelig oppdemte området.

### 3.9 Innsjøer i Telemark

Innsjøer i Telemark er en av regionene i Norge som har hatt store endringer i innsjøene de siste tiår, med blant annet økte mengder TOC og Fe, og store reduksjoner i sulfat. For å gå nærmere inn på ulike faktorer som forbindes med TOC-økningene og finne sammenheng mellom disse, er vannkjemiske data fra NIVAs «1000-sjøersundersøkelser» fra 1995 og 2019 brukt som grunnlag for en statusoversikt over innsjøene i Telemark. De 69 innsjøene fra undersøkelsene er lokalisert mellom breddegrad 58° og 61°N, og spredt over store deler av fylket mellom 9 og 1385 moh (se Fig. 21).

TOC-konsentrasjonene har i perioden 1995-2019 økt med ca. 27%, enkelte innsjøer har hatt over 100% økning mens rundt 9% av innsjøene har hatt en liten nedgang. Økningen har vært størst for innsjøer i lavereliggende strøk, men det er også registrert økning i noen innsjøer over 1000 moh (se Fig. 22). For innsjøene over 1000 moh kan redusert forsuring være hoveddriver, siden nedbørfelt i disse områdene ikke har like mye vegetasjon og jordsmonnet ofte er relativt tynt med mindre organisk materiale og karbonkonsentrasjoner.

Sommeren 2018 var en såkalt tørkesommer med mye sol, lite nedbør og høye temperaturer, dette kan ha påvirket til mindre tilførsel av TOC fra nedbørfelt, økt nedbryting av TOC i innsjøene ved økt oppholdstid og økt fotooksidering, og samtidig bidratt til at noen av innsjøene kan ha vist lavere TOC-konsentrasjoner i 2019 enn i årene før.

Siden prøvetaking kun ble foretatt i 1995 og 2019 er det knyttet stor usikkerhet til hvor store variasjonene har vært fra år til år, med årlige eller 5-årige prøvetakingsintervaller kunne en dannet et mer nyansert bilde av økninger og reduksjoner for de ulike parametrene.

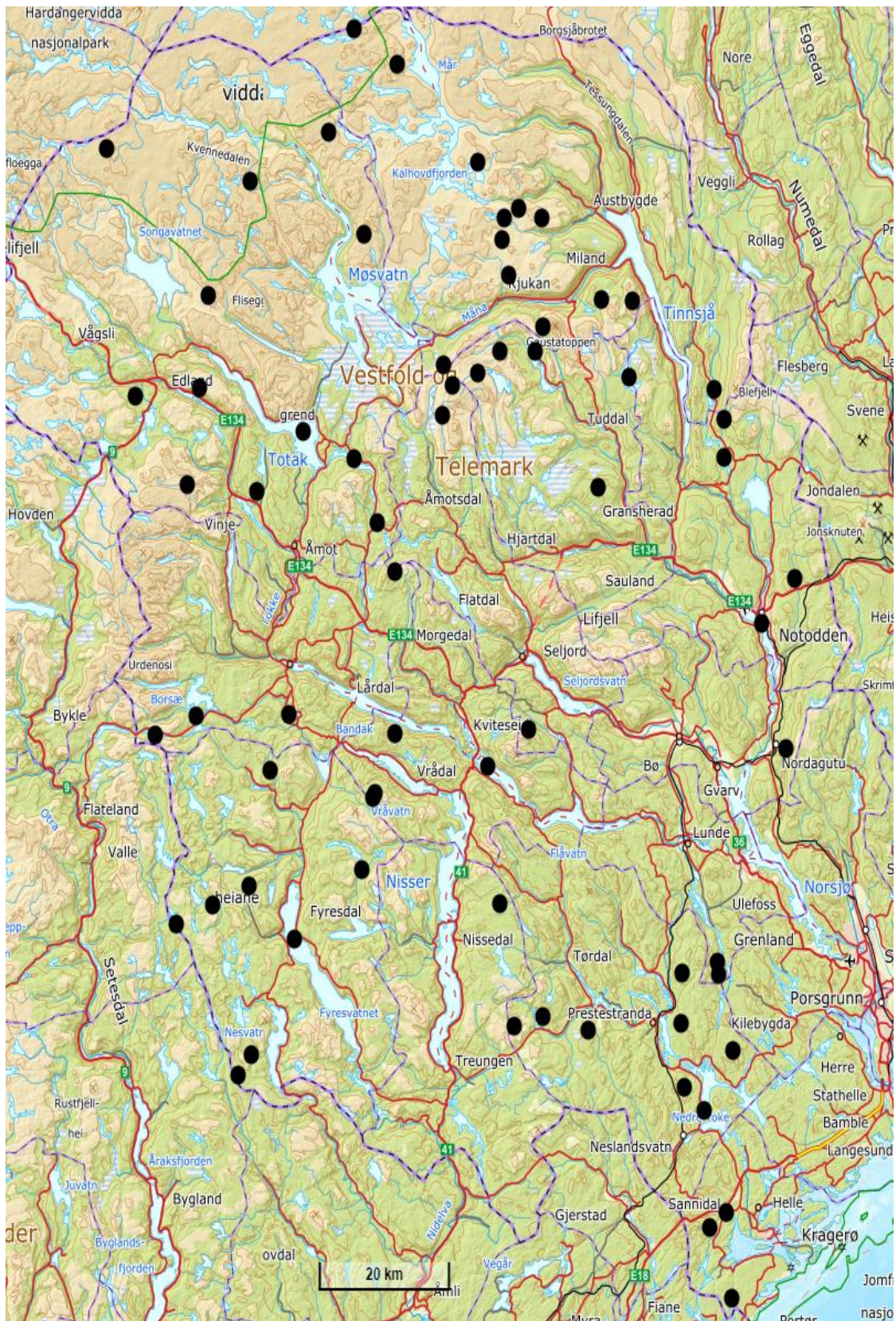


Fig. 21: Innsjølokasjoner i Telemark fra NIVAs «1000-sjøersundersøkelser» i 1995 og 2019



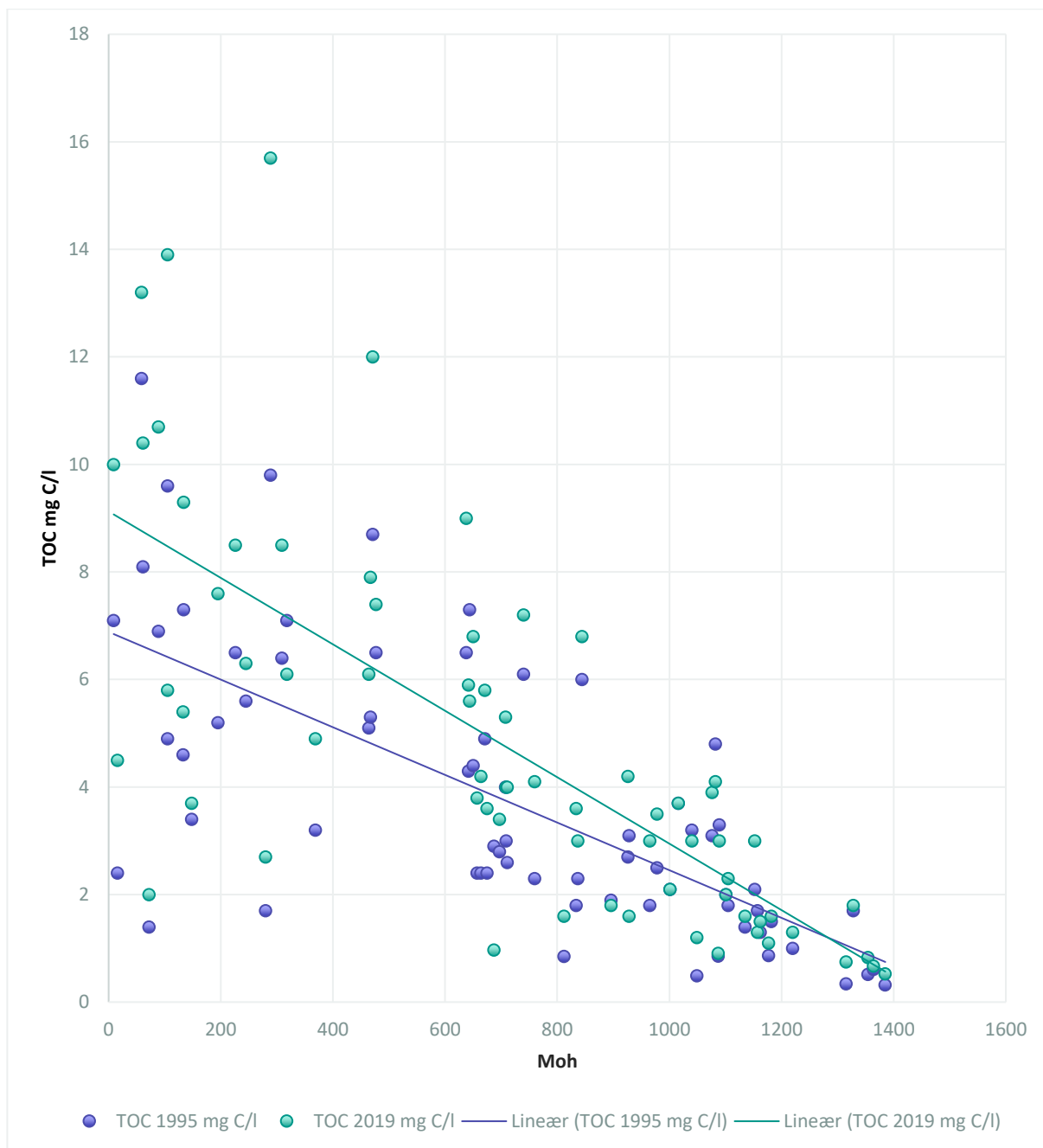


Fig. 22: TOC-konsentrasjoner for innsjøene i Telemark fordelt over Moh for 1995 og 2019

Nedgangen i sulfat ( $\text{SO}_4$ ) har vært svært markant, fra et gjennomsnitt på 2,4 mg/l i 1995 til 0,83 mg/l i 2019, noe som er en nedgang på ca. 65% (se Fig. 23). Dette kan ha vært en av hoveddriverne bak TOC-økningen ved at løseligheten til det organiske materiale i nedbørfeltet har økt. Nedgangen har vært svært tydelig for alle innsjøene, noe som er i tråd med de fleste innsjøer i de boreale områdene.

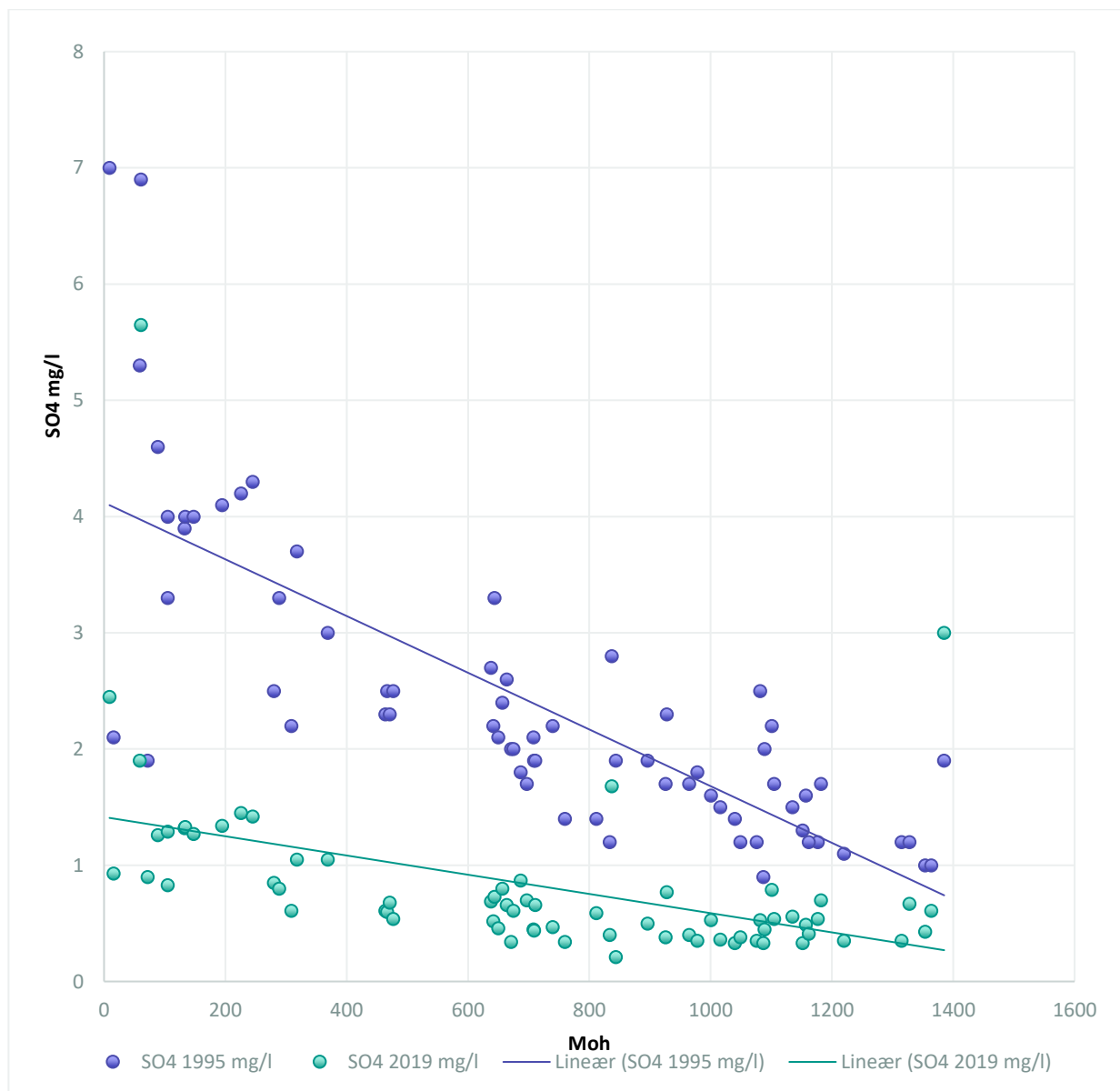


Fig. 23: Sulfat-konsentrasjoner for innsjøene i Telemark fordelt over Moh for 1995 og 2019

Mange innsjøer i boreale områder har hatt en sterk fargeendring, såkalt «Lake Browning», men i motsetning til undersøkelsene i 2019 ble det ikke tatt prøver av fargetall i undersøkelsene fra 1995. TOC og Fe er ofte gode indikatorer på farge i innsjøene og Fe har fulgt trenden til TOC og økt med ca. 30% (se Fig. 24). Noen innsjøer har også hatt en markant reduksjon i Fe-konsentrasjonene, noe som kan være en respons på tørkesommeren 2018. Ved økt oppholdstid får innsjøprosesser mer tid til nedbryting, større mengder TOC og Fe kan ha flokkulert til POC og blitt sedimentert og lagret eller mineralisert, noe som ville resultert i en nedgang i både TOC og Fe-konsentrasjonene i forhold til året før. Et interessant spørsmål vil være i hvor stor grad tørkesommeren bidro til endringene, en lengre tørkeperiode kan ha stor påvirkning på prosessene og nedbryting av TOC, noe som kan vises som større variasjoner fra år til år.

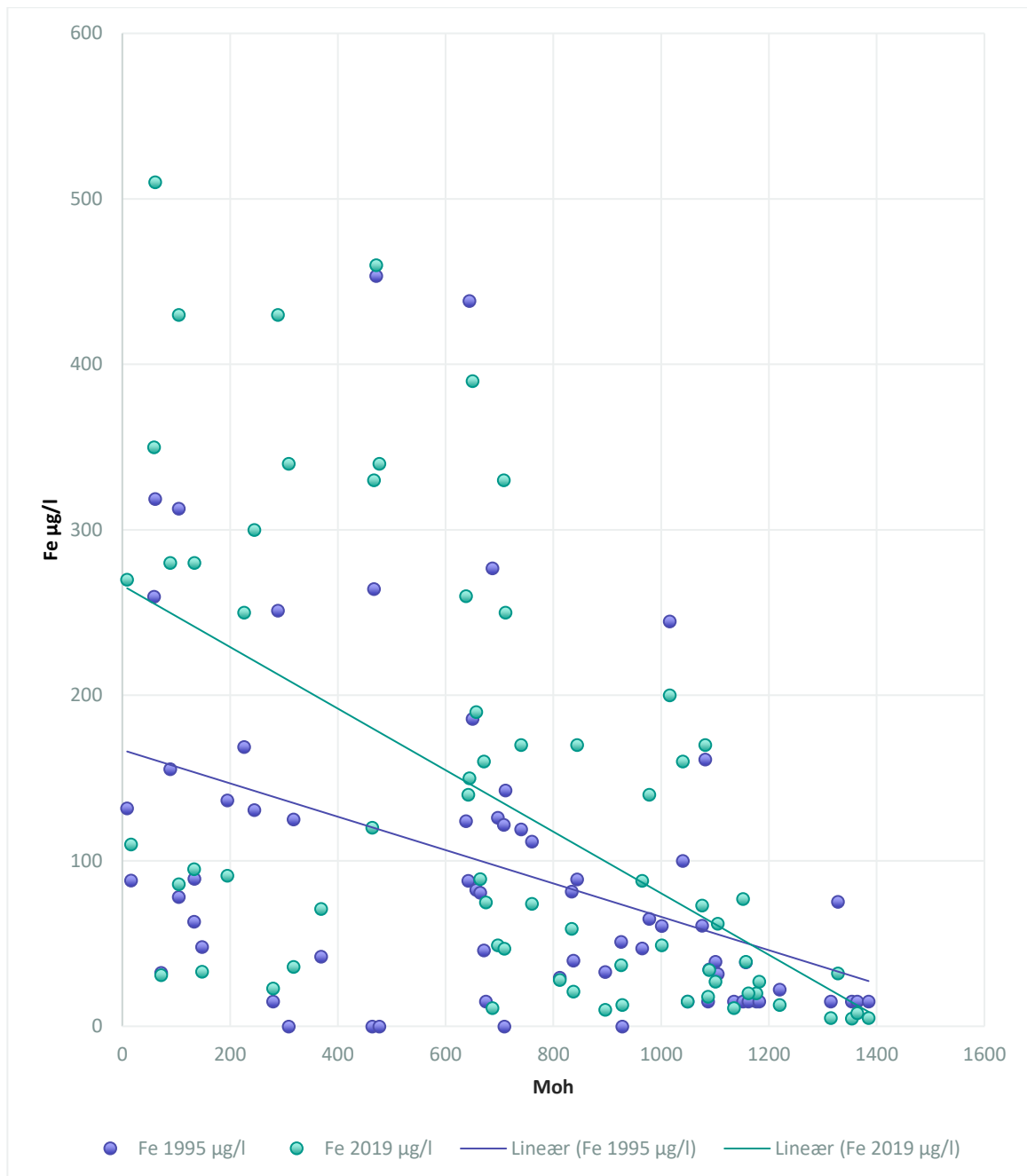


Fig. 24: Fe-konsentrasjoner for innsjøene i Telemark fordelt over Moh for 1995 og 2019

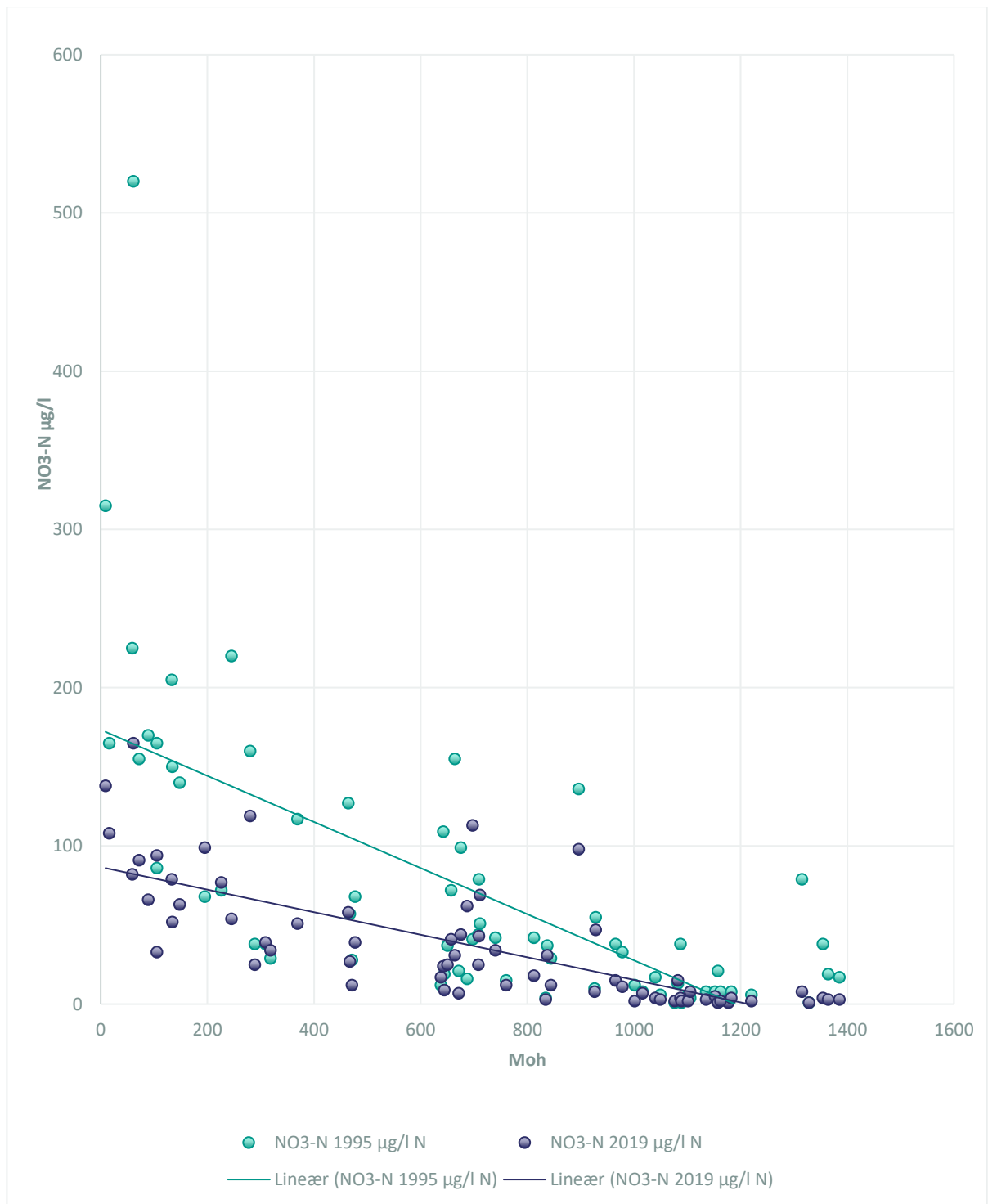


Fig. 25: Nitrat-konsentrasjoner for innsjøene i Telemark fordelt over Moh for 1995 og 2019

### 3.9.1 Vassenden

Vassenden (59,6°N, 9,347°Ø) er en uregulert, kalkfattig og humøs innsjø lokalisert i Notodden kommune på 289 moh. Innsjøen har en størrelse på 0,075 km<sup>2</sup> og et nedbørfeltareal på 14,14 km<sup>2</sup>. Maksdybde ukjent (Hentet fra NVE Innsjødatabase).

Vassenden hadde på prøvetakingstidspunktet i oktober 1995 TOC-nivå på 9,8 mg C/l, frem til prøvetaking på samme tidspunkt i 2019 hadde TOC økt med 60% til 15,7 mg C/l.

Nedbørfeltet rundt Vassenden er preget av barskog og større områder med myr.

Mesteparten av den nordlige delen, i tillegg til nord-vest, nord-øst og sørlige deler av innsjøen, er i direkte kontakt med myrlandskap. Ved prøvetaking i 2019 hadde innsjøen et fargetall på 71 mg Pt/l og sammen med TOC-konsentrasjonen på 15,7 mg C/l plasserer det innsjøen i kategorien «Humøs» ifølge Veileder for klassifisering av miljøtilstand i vann (2018). Fe-konsentrasjonen har økt med 71% fra 251,3 µg/l til 430 µg/l, og Sulfat-konsentrasjonene redusert med ca. 76%, fra 3,3 mg/l til 0,8 mg/l. Tar vi utgangspunkt i TOC-konsentrasjonen alene i 2019 plasseres innsjøen i kategorien «Svært humøs», da fargetallet for denne kategorien må være over 90 mg Pt/l kan innsjøen i fremtiden klassifiseres som «Svært humøs» dersom TOC fortsetter å øke i takt med fargetall og Fe. Selv om reduksjonen i Sulfat har vært markant, har likevel pH i innsjøen blitt redusert fra 6,05 til 5,77, en mulig forklaring kan være at TOC inneholder organiske syrer og at den markante økningen av mengde TOC har påvirket pH negativt. En annen teori som kan påvirke pH



Fig. 26: Vassenden med lokasjoner for bilder markert med X (Kilde: Hentet fra NVE innsjødatabase)

er at økt produksjon av CO<sub>2</sub>, som et resultat av økt mineralisering av TOC i sedimentene, også har en negativ virkning på pH. Vassenden har store områder med myr og våtmark og potensialet for fortsatt økning i TOC kan være stor, reduksjonen i sulfat har vært markant og selv om videre nedgang fortsatt er mulig vil effekten av dette avta på sikt. Klimaendringer med økt nedbør og temperatur kan i økende grad bidra til at trenden fortsetter.



*Bilde 1: Vassenden nord, høst 2021 (Kilde: eget bilde)*



*Bilde 2: Vassenden sør-vest, høst 2021 (Kilde: eget bilde)*

### 3.9.2 Totak

Totak (59,775°N, 7,716°Ø) er en svært kalkfattig og svært klar regulert innsjø lokalisert i Vinje kommune på 687 moh, innsjøen har en størrelse på 37,26 km<sup>2</sup>, maksdybde på 306 m. og et nedbørfeltareal på 550,74 km<sup>2</sup> (Hentet fra NVE Innsjødatabase).

Totak hadde på prøvetakingstidspunktet i oktober 1995 TOC-nivå på 2,9 mg C/l, frem til prøvetaking på samme tidspunkt i 2019 var TOC redusert med 67% til 0,97 mg C/l. Innsjøen hadde et fargetall på 5 mg Pt/l og sammen med den lave konsentrasjonen av TOC klassifiseres innsjøen som «Svært klar». Fe-konsentrasjonen i Totak har også endret seg markant, en nedgang på 97% fra 276,8 µg/l til 11 µg/l, mens Sulfat-

konsentrasjonen er redusert med 52% fra 1,8 mg/l til 0,87 mg/l. Totak får sin tilførsel fra den oppdemte innsjøen Songa i nord-vest, og en interessant teori er om tørkesommeren i 2018 har vært hoveddriver bak reduksjonen i TOC og Fe. Flokkulering av DOC og Fe til POC med påfølgende sedimentering. Dersom tilførsel og regulering fra Songa har vært markant mindre i tørkeperioden kan dette ha ført til en sterk økning i flokkulering av DOC og Fe til POC, med påfølgende økt sedimentering. I kombinasjon med økt oppholdstid, lite nedbør og økt fotooksidering kan dette ha bidratt sterkt til reduksjonene. Totak har i likhet med Vassenden fått en redusert pH i perioden fra 6,61 til 6,53, og en mulig forklaring kan være den økte oppholdstiden som har ført til økt mineralisering og prosessering av TOC til CO<sub>2</sub>. Med klimaendringer som veksler fra økt nedbør og temperatur til hyppigere tørkeperioder, kan dette føre til raske variasjoner og endringer i TOC-konsentrasjonene og utslipp av CO<sub>2</sub> og CH<sub>4</sub> i regulerte innsjøer.

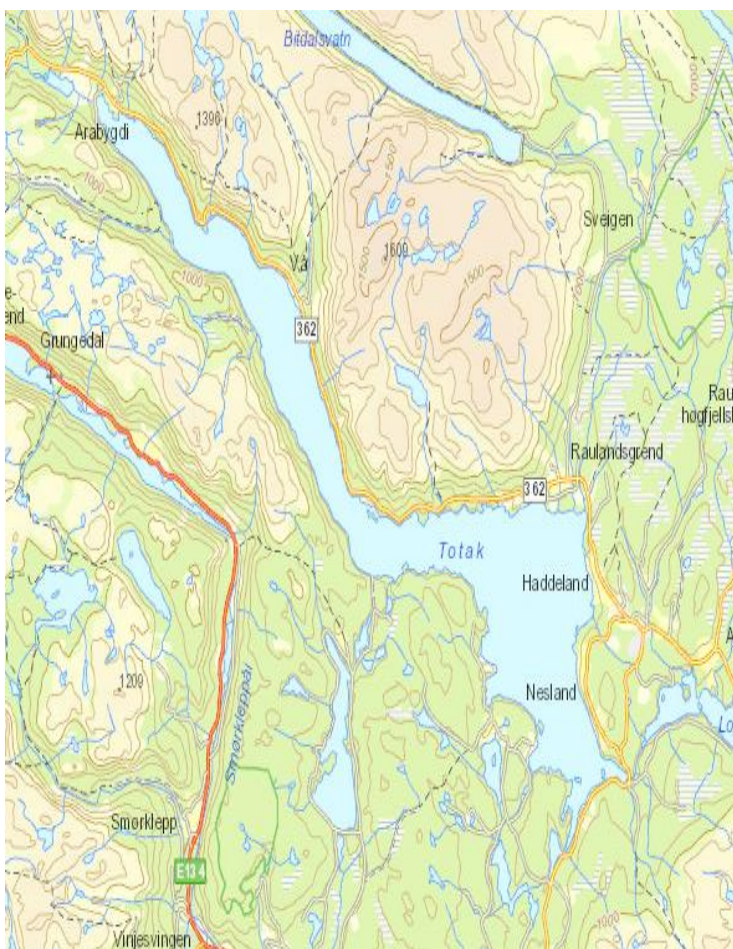


Fig. 27: Totak (Kilde: Hentet fra NVE innsjødatabase)

### 3.9.3 Heddalsvatnet

Heddalsvatnet (59,558°, 9,218°Ø) er en uregulert, kalkfattig og klar innsjø lokalisert i Notodden kommune på 16 moh, innsjøen har en størrelse på 13,2 km<sup>2</sup> og et nedbørfeltareal på 5372,32 km<sup>2</sup>. Maksdybde ukjent (Hentet fra NVE Innsjødatabase).

Områdene rundt Heddalsvatnet har innslag av både vernet våtmark i nord-vest og bybebyggelse i nord, samt nærliggende jordbrukslandskap langs både østre og vestre deler av innsjøen.

Flere små og store elver og bekker munner ut i innsjøen, men preges i hovedsak av de to hovedelvene Tinnåa fra nord og Heddøla fra nord-vest. Heddøla renner gjennom et utstrakt jordbrukslandskap og munner ut i Heddalsvatnet hvor Semsøyene naturreservat er lokalisert (se Bilde 3). Tinnåa reguleres via Svelgfossdammen og Sagafossdammen.

Heddalsvatnet hadde på prøvetakingstidspunktet i oktober 1995 TOC-nivå på 2,4 mg C/l, frem til prøvetaking på samme tidspunkt i 2019 hadde TOC økt med 87% til 4,5 mg C/l. Med et fargetall på 27 mg Pt/l er innsjøen nære grenseverdiene for å karakteriseres som en kalkfattig og humøs innsjøtype i henhold til Veileder for klassifisering av miljøtilstand i vann (2018).

Konsentrasjonen av Fe har økt med 25%, fra 88,2 µg/l til 110 µg/l, mens mengden Sulfat er redusert med 56% fra 2,1 mg/l til 0,93 mg/l.

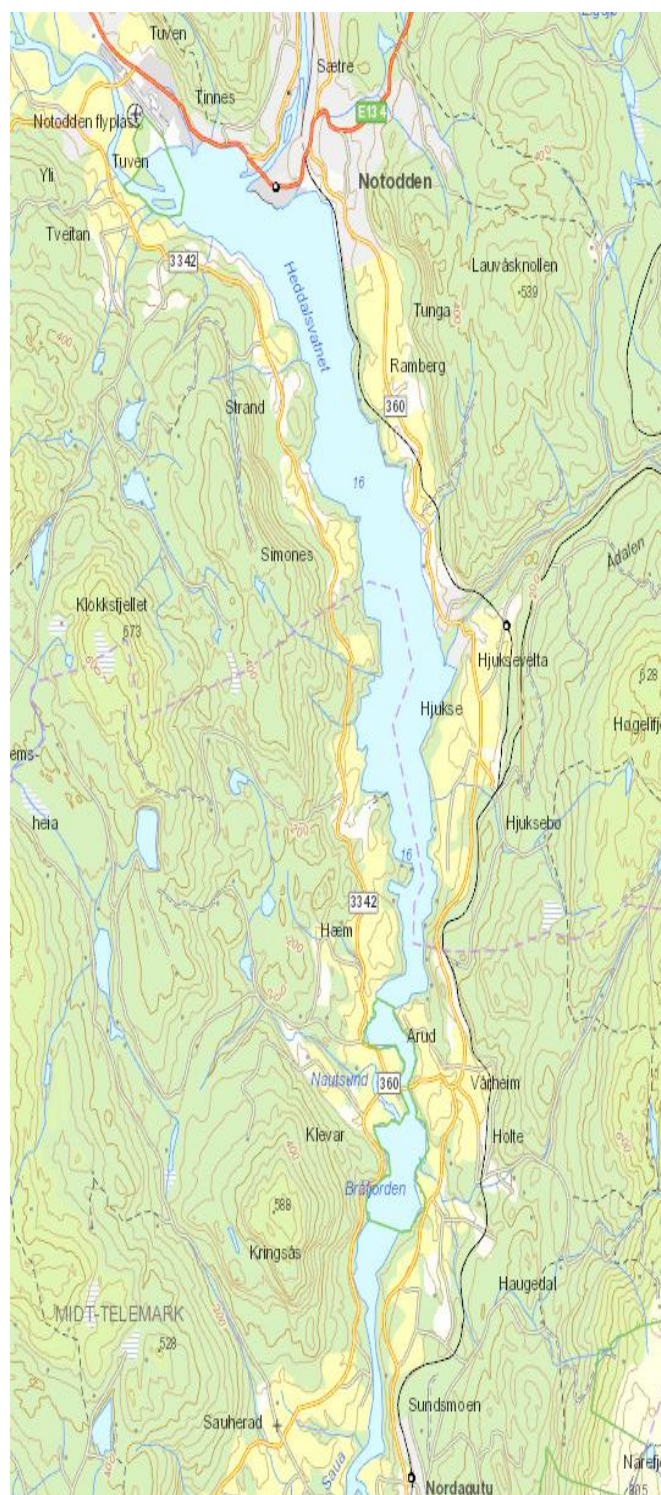


Fig. 28: Heddalsvatnet (Kilde: Hentet fra NVE innsjødatabase)





*Bilde 3: Semsøyene naturreservat i nord-vest, Heddalsvatnet (Kilde: Hentet fra Google Maps)*

## 4 Konklusjon

TOC har økt i innsjøer over store boreale områder og driverne bak opererer derfor på regional skala. Den sterke reduksjonen i sur nedbør har ført til markant nedgang i mengden sulfat, men også ført til at mer TOC har blitt tilført innsjøene. Dette har vært en sterk driver siden nedgangen i utslippene begynte, men med dagens lave verdier er det mest sannsynlig at andre drivere får en større rolle. Klimaendringer med hyppigere og kraftigere nedbør i kombinasjon med økte temperaturer og innslag av ekstreme tørkeperioder har en stadig sterkere effekt på TOC-konsentrasjonene, mildere og våtere vintre vil øke TOC-eksporten og med lavere verdier av sur nedbør er det stor sannsynlighet for at klimaendringer vil være hoveddriver bak TOC-økningen i fremtiden. Forsurningsnivåene i Norge har i mange områder svært lave nivåer, for de sensitive boreale områdene ser det ut til at endringer i TOC vil fortsette å øke i takt med klimaforandringene og på sikt overgå «naturlige» nivåer fra den før-industrielle tiden.

## 5 Referanser/litteraturliste

- Anas M.U.M., Scott, K.A., & Wissel, B. (2015). Carbon budgets of boreal lakes: state of knowledge, challenges, and implications. *Environmental Reviews*, 23(3), 275–287.
- Anderson, N., Heathcote, A. J., & Engstrom, D. R. (2020). Anthropogenic alteration of nutrient supply increases the global freshwater carbon sink. *Sci. Adv.* 6, eaaw2145 (2020).
- Anderson, N. J., Bennion, H., & Lotter, A. F. (2014). Lake eutrophication and its implications for organic carbon sequestration in Europe. *Glob Chang Biol*, 20(9), 2741-2751. doi:10.1111/gcb.12584
- Anderson, N. J., Dietz, R. D., & Engstrom, D. R. (2013). Land-use change, not climate, controls organic carbon burial in lakes. *Proceedings: Biological Sciences*, 280(1769), 1–7.
- Attermeyer, K., Catalán, N., Einarsdottir, K., Freixa, A., Groeneveld, M., Hawkes, J. A., . . . Tranvik, L. J. (2018). Organic Carbon Processing During Transport Through Boreal Inland Waters: Particles as Important Sites. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 123(8), 2412-2428. doi:10.1029/2018jg004500
- Aas, W., Mortier, A., Bowersox, V., Cherian, R., Faluvegi, G., Fagerli, H., . . . Xu, X. (2019). Global and regional trends of atmospheric sulfur. *Sci Rep*, 9(1), 953. doi:10.1038/s41598-018-37304-0
- Balmer, M., & Downing, J. A. (2011). Carbon dioxide concentrations in eutrophic lakes: undersaturation implies atmospheric uptake. *Inland Waters*, 1(2), 125-132. doi:10.5268/iw-1.2.366
- Bartlett, J., Rusch, G. M., Kyrkjeeide, M. O., Sandvik, H., & Nordén, J. (2020). Carbon storage in Norwegian ecosystems. *NINA Report 1774. Norwegian Institute for Nature Research*.
- Bastviken, D., Sobek, S., Tranvik, L. J., & Wachenfeldt, E. V. (2008). Linking allochthonous dissolved organic matter and boreal lake sediment carbon sequestration: The role of light-mediated flocculation. *Limnol. Oceanogr.*, 53(6), 2008, 2416–2426.
- Battin, T. J., Luysaert, S., Kaplan, L. A., Aufdenkampe, A. K., Richter, A., & Tranvik, L. J. (2009). The boundless carbon cycle. *Nature Geoscience*, 2(9), 598-600. doi:10.1038/ngeo618
- Behera, S. N., Sharma, M., Aneja, V. P., & Balasubramanian, R. (2013). Ammonia in the atmosphere: a review on emission sources, atmospheric chemistry and deposition on terrestrial bodies. *Environ Sci Pollut Res Int*, 20(11), 8092-8131. doi:10.1007/s11356-013-2051-9
- Benoy, G., Cash, K., McCauley, E., & Wrona, F. (2007). Carbon dynamics in lakes of the boreal forest under a changing climate. *Environmental Reviews*, 15(NA), 175-189. doi:10.1139/a07-006

- Björnerås, C., Weyhenmeyer, G. A., Evans, C. D., Gessner, M. O., Grossart, H. P., Kangur, K., . . . Kritzberg, E. S. (2017). Widespread Increases in Iron Concentration in European and North American Freshwaters. *Global Biogeochemical Cycles*, *31*(10), 1488-1500. doi:10.1002/2017gb005749
- Bruhwyler, L., Michalak, A. M., Birdsey, R., Huntzinger, D. N., Fisher, J. B., Miller, J., . . . Zhu, Z. (2018). Overview of the Global Carbon Cycle. doi:10.7930/SOCCR2.2018.Ch1
- Catalán, N., Marcé, R., Kothawala, D. N., & Tranvik, L. J. (2016). Organic carbon decomposition rates controlled by water retention time across inland waters. *Nature Geoscience*, *9*(7), 501-504. doi:10.1038/ngeo2720
- Chmiel, H. E. (2015). The role of sediments in the carbon cycle of boreal lakes. *Digital Comprehensive Summaries of Uppsala Dissertations from the Faculty of Science and Technology*, 1279.
- Clayer, F., Thrane, J. E., Brandt, U., Dörsch, P., & Wit, H. A. (2021). Boreal Headwater Catchment as Hot Spot of Carbon Processing From Headwater to Fjord. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, *126*(12). doi:10.1029/2021jg006359
- Clayer, F., Gélinas, Y., Tessier, A., & Gobeil, C. (2020). Mineralization of organic matter in boreal lake sediments: rates, pathways, and nature of the fermenting substrates. *Biogeosciences*, *17*(18), 4571-4589. doi:10.5194/bg-17-4571-2020
- Cole, J. J., Prairie, Y. T., Caraco, N. F., McDowell, W. H., Tranvik, L. J., Striegl, R. G., . . . Melack, J. (2007). Plumbing the Global Carbon Cycle: Integrating Inland Waters into the Terrestrial Carbon Budget. *Ecosystems*, *10*(1), 172-185. doi:10.1007/s10021-006-9013-8
- Couture, R. M., Wit, H. A., Tominaga, K., Kiuru, P., & Markelov, I. (2015). Oxygen dynamics in a boreal lake responds to long-term changes in climate, ice phenology, and DOC inputs. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, *120*(11), 2441-2456. doi:10.1002/2015jg003065
- de Wit, H. A., Austnes, K., Hysten, G., & Dalsgaard, L. (2015). A carbon balance of Norway: terrestrial and aquatic carbon fluxes. *Biogeochemistry*, *123*(1-2), 147-173. doi:10.1007/s10533-014-0060-5
- de Wit, H. A., Couture, R.-M., Jackson-Blake, L., Futter, M. N., Valinia, S., Austnes, K., . . . Lin, Y. (2018). Pipes or chimneys? For carbon cycling in small boreal lakes, precipitation matters most. *Limnology and Oceanography Letters*, *3*(3), 275-284. doi:10.1002/lol2.10077
- de Wit, H. A., Mulder, J., Hindar, A., & Hole, L. (2007). Long-Term Increase in Dissolved Organic Carbon in Streamwaters in Norway Is Response to Reduced Acid Deposition.

- de Wit, H. A., Stoddard, J. L., Monteith, D. T., Sample, J. E., Austnes, K., Couture, S., . . . Evans, C. D. (2021). Cleaner air reveals growing influence of climate on dissolved organic carbon trends in northern headwaters. *Environmental Research Letters*, *16*(10). doi:10.1088/1748-9326/ac2526
- de Wit, H. A., Valinia, S., Weyhenmeyer, G. A., Futter, M. N., Kortelainen, P., Austnes, K., . . . Vuorenmaa, J. (2016). Current Browning of Surface Waters Will Be Further Promoted by Wetter Climate. *Environmental Science & Technology Letters*, *3*(12), 430-435. doi:10.1021/acs.estlett.6b00396
- Direktoratsgruppen vanndirektivet (2018). Veileder 02:2018 Klassifisering av miljøtilstand i vann. Økologisk og kjemisk klassifiseringssystem for kystvann, grunnvann, innsjøer og elver
- Downing, J. A. (2009). Emerging global role of small lakes and ponds little things mean a lot. *Limnetica*(29), 9-24. doi:10.23818/limn.29.02
- Downing, J. A., Cole, J. J., Middelburg, J. J., Striegl, R. G., Duarte, C. M., Kortelainen, P., . . . Laube, K. A. (2008). Sediment organic carbon burial in agriculturally eutrophic impoundments over the last century. *Global Biogeochemical Cycles*, *22*(1), n/a-n/a. doi:10.1029/2006gb002854
- Eklof, K., von Bromssen, C., Amvrosiadi, N., Folster, J., Wallin, M. B., & Bishop, K. (2021). Brownification on hold: What traditional analyses miss in extended surface water records. *Water Res*, *203*, 117544. doi:10.1016/j.watres.2021.117544
- Ekstrøm, S. (2013). Brownification of freshwaters - the role of dissolved organic matter and iron. *Department of Biology, Lund University*.
- Engel, F. (2020). The role of freshwater phytoplankton in the global carbon cycle. *Digital Comprehensive Summaries of Uppsala Dissertations from the Faculty of Science and Technology 1963*.
- Erlandsson, M., Cory, N., Fölster, J., Köhler, S., Laudon, H., Weyhenmeyer, G. A., & Bishop, K. (2011). Increasing Dissolved Organic Carbon Redefines the Extent of Surface Water Acidification and Helps Resolve a Classic Controversy. *BioScience*, *61*(8), 614-618. doi:10.1525/bio.2011.61.8.7
- Evans, C. D., Monteith, D. T., & Cooper, D. M. (2005). Long-term increases in surface water dissolved organic carbon: observations, possible causes and environmental impacts. *Environ Pollut*, *137*(1), 55-71. doi:10.1016/j.envpol.2004.12.031
- Ferland, M. E., Giorgio, P. A., Teodoru, C. R., & Prairie, Y. T. (2012). Long-term C accumulation and total C stocks in boreal lakes in northern Québec. *Global Biogeochemical Cycles*, *26*(4). doi:10.1029/2011gb004241
- Finstad, A. G., Andersen, T., Larsen, S., Tominaga, K., Blumentrath, S., de Wit, H. A., . . . Hessen, D. O. (2016). From greening to browning: Catchment vegetation development and reduced S-deposition promote organic carbon load on decadal time scales in Nordic lakes. *Sci Rep*, *6*, 31944. doi:10.1038/srep31944

- Friedlingstein, P., Jones, M. W., O'Sullivan, M., Andrew, R. M., Hauck, J., Peters, G. P., . . . Zaehle, S. (2019). Global Carbon Budget 2019. *Earth System Science Data*, *11*(4), 1783-1838. doi:10.5194/essd-11-1783-2019
- Grønlund, A. (2010). CO<sub>2</sub>-opptak i jord og vegetasjon i Norge. Lagring, opptak og utslipp av CO<sub>2</sub> og andre klimagasser. *Bioforsk Rapport Bioforsk Report Vol. 5 Nr. 162 2010*.
- Gudasz, C., Bastviken, D., Premke, K., Steger, K., & Tranvik, L. J. (2012). Constrained microbial processing of allochthonous organic carbon in boreal lake sediments. *Limnology and Oceanography*, *57*(1), 163-175. doi:10.4319/lo.2012.57.1.0163
- Gudasz, C., Bastviken, D., Steger, K., Premke, K., Sobek, S., & Tranvik, L. J. (2010). Temperature-controlled organic carbon mineralization in lake sediments. *Nature*, *466*(7305), 478-481. doi:10.1038/nature09186
- Haaland, S., Hongve, D., Laudon, H., Riise, G., & Vogt, R. D. (2010). Quantifying the drivers of the increasing colored organic matter in boreal surface waters. *Environ Sci Technol*, *44*(8), 2975-2980. doi:10.1021/es903179j
- Hanssen-Bauer, I., Førland, E.J., Haddeland, I., Hisdal, H., Mayer, S., Nesje, A., Nilsen, J.E.Ø., Sandven, S., Sandø, A.B., Sorteberg, A., og Ådlandsvik, B. (2016). Klima i Norge 2100 - Kunnskapsgrunnlag for klimatilpasning oppdatert i 2015.
- Heathcote, A. J., Anderson, N. J., Prairie, Y. T., Engstrom, D. R., & del Giorgio, P. A. (2015). Large increases in carbon burial in northern lakes during the Anthropocene. *Nat Commun*, *6*, 10016. doi:10.1038/ncomms10016
- Hessen, D. O. (2010). Fra land til vann - nedbørfelters påvirkning på ferskvann og kyst i et klimaperspektiv.
- Hessen, D. O., Håll, J. P., Thrane, J.-E., & Andersen, T. (2017). Coupling dissolved organic carbon, CO<sub>2</sub> and productivity in boreal lakes. *University of Oslo, Department of Biosciences*.
- Hindar, A., Garmo, Ø., Austnes, K., & Sample, J. E. (2020). Nasjonal innsjøundersøkelse 2019. *NIVA, RAPPORT L.NR. 7530-2020*.
- Holmberg, M., Futter, M. N., Kotamäki, N., Fronzek, S., Forsius, M., Kiuru, P., . . . Vuorenmaa, J. (2014). Effects of changing climate on the hydrology of a boreal catchment and lake DOC - probabilistic assessment of a dynamic model chain. *Boreal Env. Res. 19 (suppl. A): 66-82*.
- Huttunen, J. T., Alm, J., Liikanen, A., Juutinen, S., Larmola, T., Hammar, T., . . . Martikainen, P. J. (2003). Fluxes of methane, carbon dioxide and nitrous oxide in boreal lakes and potential anthropogenic effects on the aquatic greenhouse gas emissions. *Chemosphere*, *52*(3), 609-621. doi:10.1016/s0045-6535(03)00243-1

- Isidorova, A., Bravo, A. G., Riise, G., Bouchet, S., Björn, E., & Sobek, S. (2016). The effect of lake browning and respiration mode on the burial and fate of carbon and mercury in the sediment of two boreal lakes. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, *121*(1), 233-245. doi:10.1002/2015jg003086
- Jeppesen, E., Pierson, D., & Jennings, E. (2021). Effect of Extreme Climate Events on Lake Ecosystems. *Water*, *13*(3). doi:10.3390/w13030282
- Kastowski, M., Hinderer, M., & Vecsei, A. (2011). Long-term carbon burial in European lakes: Analysis and estimate. *Global Biogeochemical Cycles*, *25*(3), n/a-n/a. doi:10.1029/2010gb003874
- Kaushik, M. K. (2006). Acid Rain--A Contemporary World Problem. *Conference: Impact of Science and Technology on Nature Environment and Mankind At: BBSBEC, Fatehgarh Sahib, Punjab*.
- Kellerman, A. M., Dittmar, T., Kothawala, D. N., & Tranvik, L. J. (2014). Chemodiversity of dissolved organic matter in lakes driven by climate and hydrology. *Nat Commun*, *5*, 3804. doi:10.1038/ncomms4804
- Köhler, S. J., Buffam, I., Laudon, H., & Bishop, K. H. (2008). Climate's control of intra-annual and interannual variability of total organic carbon concentration and flux in two contrasting boreal landscape elements. *Journal of Geophysical Research*, *113*(G3). doi:10.1029/2007jg000629
- Kohler, S. J., Kothawala, D., Futter, M. N., Liungman, O., & Tranvik, L. (2013). In-lake processes offset increased terrestrial inputs of dissolved organic carbon and color to lakes. *PLoS One*, *8*(8), e70598. doi:10.1371/journal.pone.0070598
- Kortelainen, P., Pajunen, H., Rantakari, M., & Saarnisto, M. (2004). A large carbon pool and small sink in boreal Holocene lake sediments. *Global Change Biology*, *10*(10), 1648-1653. doi:10.1111/j.1365-2486.2004.00848.x
- Kortelainen, P., Rantakari, M., Pajunen, H., Huttunen, J. T., Mattsson, T., Juutinen, S., . . . Martikainen, P. J. (2013). Carbon evasion/accumulation ratio in boreal lakes is linked to nitrogen. *Global Biogeochemical Cycles*, *27*(2), 363-374. doi:10.1002/gbc.20036
- Kritzberg, E. S. (2017). Centennial-long trends of lake browning show major effect of afforestation. *Limnology and Oceanography Letters*, *2*(4), 105-112. doi:10.1002/lol2.10041
- Kuhn, C., & Butman, D. (2021). Declining greenness in Arctic-boreal lakes. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, *118*(15). doi:10.1073/pnas.2021219118
- Kyrkjeeide, M. O., Bartlett, J., Rusch, G. M., Sandvik, H., & Nordén, J. (2020). Karbonlagring i norske økosystemer. *NINA Temahefte 76*.
- Lapierre, J. F., Guillemette, F., Berggren, M., & del Giorgio, P. A. (2013). Increases in terrestrially derived carbon stimulate organic carbon processing and CO<sub>2</sub> emissions in boreal aquatic ecosystems. *Nat Commun*, *4*, 2972. doi:10.1038/ncomms3972

- Larsen, S., Andersen, T. O. M., & Hessen, D. O. (2011). Climate change predicted to cause severe increase of organic carbon in lakes. *Global Change Biology*, 17(2), 1186-1192. doi:10.1111/j.1365-2486.2010.02257.x
- Larsen, S., Andersen, T., & Hessen, D. O. (2011). Predicting organic carbon in lakes from climate drivers and catchment properties. *Global Biogeochemical Cycles*, 25(3), n/a-n/a. doi:10.1029/2010gb003908
- Larsen, S., Andersen, T., & Hessen, D. O. (2011). The pCO<sub>2</sub> in boreal lakes: Organic carbon as a universal predictor? *Global Biogeochemical Cycles*, 25(2), n/a-n/a. doi:10.1029/2010gb003864
- Laudon, H., Berggren, M., Ågren, A., Buffam, I., Bishop, K., Grabs, T., . . . Köhler, S. (2011). Patterns and Dynamics of Dissolved Organic Carbon (DOC) in Boreal Streams: The Role of Processes, Connectivity, and Scaling. *Ecosystems*, 14(6), 880-893. doi:10.1007/s10021-011-9452-8
- Laudon, H., Kohler, S., & Buffam, I. (2004). Seasonal TOC export from seven boreal catchments in northern Sweden. *Aquatic Sciences - Research Across Boundaries*, 66(2), 223-230. doi:10.1007/s00027-004-0700-2
- Laudon, H., Taberman, I., Ågren, A., Futter, M., Ottosson-Löfvenius, M., & Bishop, K. (2013). The Krycklan Catchment Study-A flagship infrastructure for hydrology, biogeochemistry, and climate research in the boreal landscape. *Water Resources Research*, 49(10), 7154-7158. doi:10.1002/wrcr.20520
- Lazzarino, J. K., Bachmann, R. W., Hoyer, M. V., & Canfield, D. E. (2009). Carbon dioxide supersaturation in Florida lakes. *Hydrobiologia*, 627(1), 169-180. doi:10.1007/s10750-009-9723-y
- Ledesma, J. L. J. (2011). Dynamics of color and organic carbon within the Mälaren catchment – a modeling approach. *Swedish University of Agricultural Sciences, Faculty of Natural Resources and Agricultural Sciences, Department of Aquatic Sciences and Assessment*.
- Lepisto, A., Futter, M. N., & Kortelainen, P. (2014). Almost 50 years of monitoring shows that climate, not forestry, controls long-term organic carbon fluxes in a large boreal watershed. *Glob Chang Biol*, 20(4), 1225-1237. doi:10.1111/gcb.12491
- Lepisto, A., Raike, A., Sallantausta, T., & Finer, L. (2021). Increases in organic carbon and nitrogen concentrations in boreal forested catchments - Changes driven by climate and deposition. *Sci Total Environ*, 780, 146627. doi:10.1016/j.scitotenv.2021.146627
- Lopez Bellido, J., Peltomaa, E., & Ojala, A. (2011). An urban boreal lake basin as a source of CO<sub>2</sub> and CH<sub>4</sub>. *Environ Pollut*, 159(6), 1649-1659. doi:10.1016/j.envpol.2011.02.042



- Masson-Delmotte, V., Zhai, A., Pirani, S. L., Connors, C., Péan, S., Berger, N., . . . Yelekçi, R. (2021). IPCC: Summary for Policymakers. In: Climate Change. (The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change).
- Mendonça, R., Kosten, S., Sobek, S., Barros, N., Cole, J. J., Tranvik, L., & Roland, F. (2012). Hydroelectric carbon sequestration. *Nature Geoscience*, 5(12), 838-840. doi:10.1038/ngeo1653
- Meyer-Jacob, C., Michelutti, N., Paterson, A. M., Cumming, B. F., Keller, W. B., & Smol, J. P. (2019). The browning and re-browning of lakes: Divergent lake-water organic carbon trends linked to acid deposition and climate change. *Sci Rep*, 9(1), 16676. doi:10.1038/s41598-019-52912-0
- Miljødirektoratet. (2018). Direktoratsgruppen vanddirektivet 2018. Veileder 02:2018 Klassifisering av miljøtilstand i vann. *Veileder 02:2018*.
- Monteith, D. T., Stoddard, J. L., Evans, C. D., de Wit, H. A., Forsius, M., Hogasen, T., . . . Vesely, J. (2007). Dissolved organic carbon trends resulting from changes in atmospheric deposition chemistry. *Nature*, 450(7169), 537-540. doi:10.1038/nature06316
- Mulholland, P. J., & Elwood, J. W. (2016). The role of lake and reservoir sediments as sinks in the perturbed global carbon cycle. *Tellus*, 34(5), 490-499. doi:10.3402/tellusa.v34i5.10834
- Ojala, A., Bellido, J. L., Tulonen, T., Kankaala, P., & Huotari, J. (2011). Carbon gas fluxes from a brown-water and a clear-water lake in the boreal zone during a summer with extreme rain events. *Limnology and Oceanography*, 56(1), 61–76.
- Pace, M. L., & Prairie, Y. (2004). Respiration in lakes.
- Pagano, T., Bida, M., & Kenny, J. (2014). Trends in Levels of Allochthonous Dissolved Organic Carbon in Natural Water: A Review of Potential Mechanisms under a Changing Climate. *Water*, 6(10), 2862-2897. doi:10.3390/w6102862
- Post, W., Tsung-Hung, P., Emanuel, W. R., King, A., Dale, V., & Deangelis, D. (1990). The Global Carbon Cycle. *American Scientist*.
- Prairie, Y. T., Alm, J., Beaulieu, J., Barros, N., Battin, T., Cole, J., . . . Vachon, D. (2018). Greenhouse Gas Emissions from Freshwater Reservoirs: What Does the Atmosphere See? *Ecosystems*, 21(5), 1058-1071. doi:10.1007/s10021-017-0198-9
- Pulliainen, J., Aurela, M., Laurila, T., Aalto, T., Takala, M., Salminen, M., . . . Vesala, T. (2017). Early snowmelt significantly enhances boreal springtime carbon uptake. *Proc Natl Acad Sci U S A*, 114(42), 11081-11086. doi:10.1073/pnas.1707889114
- Rantakari, M. (2010). The role of lakes in carbon cycling in boreal catchments. *MONOGRAPHS of The Boreal Environment Research*, 35.

- Rasilo, T., Ojala, A., Huotari, J., Starr, M., & Pumpanen, J. (2015). Concentrations and quality of DOC along the terrestrial–aquatic continuum in a boreal forested catchment. *Freshwater Science*, *34*(2), 440–455.
- Raymond, P. A., Hartmann, J., Lauerwald, R., Sobek, S., McDonald, C., Hoover, M., . . . Guth, P. (2013). Global carbon dioxide emissions from inland waters. *Nature*, *503*(7476), 355–359. doi:10.1038/nature12760
- Sahoo, G. B., Forrest, A. L., Schladow, S. G., Reuter, J. E., Coats, R., & Dettinger, M. (2016). Climate change impacts on lake thermal dynamics and ecosystem vulnerabilities. *Limnology and Oceanography*, *61*(2), 496–507. doi:10.1002/lno.10228
- Schartau, A. K., Mjelde, M., Bækkelie, K.A.E., Dokk, J.G., Moe, T.F., Jensen, T.C., Jenssen, M.S., & Persson, J., Pettersen, O., Saksgård, R., Sandlund, O.T., Skjelbred, B., Thrane, J.E., Walseng, B. (2018). ØKOFERSK delprogram Midt: Basisovervåking av utvalgte innsjøer i 2017. Overvåking og klassifisering av økologisk tilstand. Surveillance monitoring of selected lakes in Central Norway 2017. Monitoring and classification of ecological status.
- Seekell, D. A., Lapierre, J.-F., Ask, J., Bergström, A.-K., Deininger, A., Rodríguez, P., & Karlsson, J. (2015). The influence of dissolved organic carbon on primary production in northern lakes. *Limnology and Oceanography*, *60*(4), 1276–1285. doi:10.1002/lno.10096
- Skerlep, M., Steiner, E., Axelsson, A. L., & Kritzberg, E. S. (2020). Afforestation driving long-term surface water browning. *Glob Chang Biol*, *26*(3), 1390–1399. doi:10.1111/gcb.14891
- Skjelvåke, B. L., Henriksen, A., Faafeng, B., Fjeld, E., Traaen, T., Lien, L., . . . Buan, A. K. (1997). Regional innsjøundersøkelse 1995. En Vannkjemisk undersøkelse av 1500 norske innsjøer.
- Sobek, S., Algesten, G., Bergström, A. K., Jansson, M., & Tranvik, L. J. (2002). The Catchment and Climate regulation of pCO<sub>2</sub> in boreal lakes. *Global Change Biology*, *9*, 630–641.
- Sobek, S., Söderbäck, B., Karlsson, S., Andersson, E., & Brunberg, A. K. (2006). A Carbon Budget of a Small Humic Lake: An Example of the Importance of Lakes for Organic Matter Cycling in Boreal Catchments. *AMBIO: A Journal of the Human Environment*, *35*(8), 469–475. doi:10.1579/0044-7447(2006)35[469:Acboas]2.0.Co;2
- Starr, M., Holmberg, M., Forsius, M., & Futter, M. N. (2009). A long-term simulation of the effects of acidic deposition and climate change on surface water dissolved organic carbon concentrations in a boreal catchment. *Hydrology Research*, *40*(2-3), 291–305. doi:10.2166/nh.2009.101
- Thrane, J.-E., Hessen, D. O., & Andersen, T. (2014). The Absorption of Light in Lakes: Negative Impact of Dissolved Organic Carbon on Primary Productivity. *Ecosystems*, *17*(6), 1040–1052. doi:10.1007/s10021-014-9776-2
- Tranvik, L. J., Cole, J. J., & Prairie, Y. (2018). The study of carbon in inland waters—from isolated ecosystems to players in the global carbon cycle. *Limnology and Oceanography Letters*, *3*(3), 41–48. doi:10.1002/lol2.10068

- Tranvik, L. J., Downing, J. A., Cotner, J. B., Loiselle, S. A., Striegl, R. G., Ballatore, T. J., . . . Weyhenmeyer, G. A. (2009). Lakes and reservoirs as regulators of carbon cycling and climate. *Limnol. Oceanogr*, *54*(6, part 2), 2298–2314.
- Tau Strand, L., Fjellstad, W., Jackson-Blake, L., & De Wit, H. A. (2021). Afforestation of a pasture in Norway did not result in higher soil carbon, 50 years after planting. *Landscape and Urban Planning*, *207*. doi:10.1016/j.landurbplan.2020.104007
- Ward, N. D., Bianchi, T. S., Medeiros, P. M., Seidel, M., Richey, J. E., Keil, R. G., & Sawakuchi, H. O. (2017). Where Carbon Goes When Water Flows: Carbon Cycling across the Aquatic Continuum. *Frontiers in Marine Science*, *4*. doi:10.3389/fmars.2017.00007
- Warner, K. A., Fowler, R. A., & Saros, J. E. (2020). Differences in the Effects of Storms on Dissolved Organic Carbon (DOC) in Boreal Lakes during an Early Summer Storm and an Autumn Storm. *Water*, *12*(5). doi:10.3390/w12051452
- Weyhenmeyer, G. A., & Karlsson, J. (2009). Nonlinear Response of Dissolved Organic Carbon Concentrations in Boreal Lakes to Increasing Temperatures. *Limnology and Oceanography*, *54*(6), 2513–2519.
- Weyhenmeyer, G. A., Kosten, S., Wallin, M. B., Tranvik, L. J., Jeppesen, E., & Roland, F. (2015). Significant fraction of CO<sub>2</sub> emissions from boreal lakes derived from hydrologic inorganic carbon inputs. *Nature Geoscience*, *8*(12), 933–936. doi:10.1038/ngeo2582
- Weyhenmeyer, G. A., Prairie, Y. T., & Tranvik, L. J. (2014). Browning of boreal freshwaters coupled to carbon-iron interactions along the aquatic continuum. *PLoS One*, *9*(2), e88104. doi:10.1371/journal.pone.0088104
- Xiao, Y., & Riise, G. (2021). Coupling between increased lake color and iron in boreal lakes. *Sci Total Environ*, *767*, 145104. doi:10.1016/j.scitotenv.2021.145104
- Yang, H., Andersen, T., Dörsch, P., Tominaga, K., Thrane, J.-E., & Hessen, D. O. (2015). Greenhouse gas metabolism in Nordic boreal lakes. *Biogeochemistry*, *126*(1-2), 211–225. doi:10.1007/s10533-015-0154-8
- Yasarer, L. (2015). Estimating the Carbon Footprint of Lakes and Reservoirs. *NALMS Lakeline Climate Change II*.
- Zielinski, P., & Gorniak, A. (2009). The Effect of Hydrological Drought on Chemical Quality of Water and Dissolved Carbon Concentrations in Lowland Rivers. *Polish Journal of Ecology*.
- Zwart, J. A., Sebestyen, S. D., Solomon, C. T., & Jones, S. E. (2016). The Influence of Hydrologic Residence Time on Lake Carbon Cycling Dynamics Following Extreme Precipitation Events. *Ecosystems*, *20*(5), 1000–1014. doi:10.1007/s10021-016-0088-6

Öquist, M. G., Bishop, K., Grelle, A., Klemedtsson, L., Köhler, S. J., Laudon, H., . . . Nilsson, M. B. (2014). The Full Annual Carbon Balance of Boreal Forests Is Highly Sensitive to Precipitation. *Environmental Science & Technology Letters*, 1(7), 315-319. doi:10.1021/ez500169j

Åberg, J. (2009). Production and emission of CO<sub>2</sub> in two unproductive lakes in northern Sweden.

## 6 Oversikt over tabeller og figurer

Bilde 1: Vassenden nord, høst 2021

Bilde 2: Vassenden sør-vest, høst 2021

Bilde 3: Semsøyene naturreservat i nord-vest, Heddalsvatnet

Fig. 1: Årlig % økning for TOC for 4 soner i Fennoskandia 1990-2013. Sone 1: Oseanisk, Sone 2: Boreal våt, Sone 3: Subarktisk, Sone 4: Boreal tørr

Fig. 2: Global karbonsyklus som viser mengder karbon i de ulike reservoar og utveksling mellom disse (per år) i perioden 2009-2018. Pilene viser opptaks- og utslippsutveksling mellom reservoarene, sirklene viser de ulike delene av reservoarene med estimerte mengder karbon.

Fig. 3: Endringer i DOC (målt i mg/l per år) for perioden 1990-2016

Fig. 4: Forenklet karbonsyklus i innsjøer

Fig. 5: Estimert karbonbudsjett for innsjøer

Fig. 6: Økning i TOC 1995-2019, a) Viser TOC-konsentrasjonene i 2019, b) Viser hvor mye TOC har økt i perioden 1995-2019, c) Spredningsplott av TOC for hver region.

Fig. 7: TOC vs. Innsjøstørrelse (øverst) og moh (nederst)

Fig. 8: Økt TOC-konsentrasjon vs. økt nedbør (sommer) i perioden 1971-2008

Fig. 9: % økning av TOC vs lufttemperatur 1990-2019, Finland

Fig. 10: TOC-konsentrasjon (vår) vs. jordfrost i perioden 1971-2008

Fig. 11: Trend for SO<sub>2</sub> i Europa i perioden 1990-2015

Fig. 12: Økninger og reduksjoner av Nitrat (1) og Sulfat (2) i perioden 1995-2019

Fig. 13: Endringer i pH i perioden 1990-2017

Fig. 14: TOC økning vs. SO<sub>4</sub> nedgang 1990-2019

Fig. 15: Estimert økning i vekstsesong for perioden 2071-2100 ved gjennomsnittlig temperaturøkning på 1) 2,7°C og 2) 4,5°C

Fig. 16: % lagret karbon i ulike økosystem i Norge

Fig. 17: Passiv (øverst) og aktiv (nederst) rør-teori med estimert karbonbudsjett (Pg C) for innsjøer

Fig. 18: CO<sub>2</sub>-økning i atmosfæren for perioden 1960-2018

Fig. 19: Sesongmåling av CO<sub>2</sub>-konsentrasjoner og O<sub>2</sub>-metning i Langtjern, Norge i perioden 2018-2020

Fig. 20: CO<sub>2</sub>-utslipp fra regulerte innsjøer fra 0-100 år etter oppdemning

- Fig. 21: Innsjølokasjoner i Telemark fra NIVAs «1000-sjøersundersøkelser» i 1995 og 2019
- Fig. 22: TOC-konsentrasjoner for innsjøene i Telemark fordelt over Moh for 1995 og 2019
- Fig. 23: Sulfat-konsentrasjoner for innsjøene i Telemark fordelt over Moh for 1995 og 2019
- Fig. 24: Fe-konsentrasjoner for innsjøene i Telemark fordelt over Moh for 1995 og 2019
- Fig. 25: Nitrat-konsentrasjoner for innsjøene i Telemark fordelt over Moh for 1995 og 2019
- Fig. 26: Vassenden med lokasjoner for bilder markert med X
- Fig. 27: Totak
- Fig. 28: Heddalsvatnet

## 7 Vedlegg

Vedlegg 1: Omregning av måleenheter for karbon (Kilde: Hentet fra Kyrkjeeidet 2020)

Enhet	Betydning	Alternativ enhet	Omregning
Mg	megagram	tonn	$1 \text{ Mg} = 10^6 \text{ g} = 1 \text{ t}$
Gg	gigagram	kilotonn	$1 \text{ Gg} = 10^9 \text{ g} = 10^3 \text{ t} = 1 \text{ kt}$
Tg	terragram	megatonn	$1 \text{ Tg} = 10^{12} \text{ g} = 10^6 \text{ t} = 1 \text{ Mt}$
Pg	petagram	gigatonn	$1 \text{ Pg} = 10^{15} \text{ g} = 10^9 \text{ t} = 1 \text{ Gt}$
Eg	exagram	terratonn	$1 \text{ Eg} = 10^{18} \text{ g} = 10^{12} \text{ t} = 1 \text{ Tt}$
$\text{g m}^{-2}$	gram per kvadratmeter	<i>kilogram per hektar</i>	$1 \text{ g m}^{-2} = 10 \text{ kg ha}^{-1} = 1 \text{ t km}^{-2}$
$\text{kg m}^{-2}$	kilogram per kvadratmeter	<i>tonn per hektar</i>	$1 \text{ kg m}^{-2} = 10 \text{ t ha}^{-1} = 1 \text{ kt km}^{-2}$
$\text{Gg år}^{-1}$	gigagram per år	<i>tonn per dag, gram per sekund</i>	$1 \text{ Gg år}^{-1} \approx 2.7 \text{ t d}^{-1} \approx 32 \text{ g s}^{-1}$
g C	gram karbon	<i>gram CO<sub>2</sub></i>	$1 \text{ g C} \approx 3.67 \text{ g CO}_2$
g CO <sub>2</sub>	gram CO <sub>2</sub>	<i>gram karbon</i>	$1 \text{ g CO}_2 \approx 0.273 \text{ g C}$

Vedlegg 2: Endring totalt organisk karbon (TOC) i innsjøer i Telemark 1995-2019

**TOC Innsjøer i Telemark 1995 vs 2019 (Sortert etter moh)**

Innsjø	Breddegrad	Lengdegrad	Moh	TOC 1995 mg C/l	TOC 2019 mg C/l	TOC økt %
Leivatnet	58,787	9,313	9	7,1	10	41 %
Heddalsvatnet	59,558	9,218	16	2,4	4,5	87 %
Eldhustjenna	59,0020095	9,20633988	59	11,6	13,2	14 %
Lofthaugtjenna	58,89	9,284	61	8,1	10,4	28 %
Kviteseidvatnet	59,3497409	8,58064562	72	1,4	2	43 %
Lønstravatnet	58,872	9,243	89	6,9	10,7	55 %
Teksle	59,025	9,147	105	9,6	13,9	45 %
Store Børten	59,159	9,245	105	4,9	5,8	18 %
Bøvatnet	59,158	9,207	133	4,6	5,4	17 %
Store Kyrsvatnet	59,0960036	9,12629622	134	7,3	9,3	27 %
Prestevatnet	59,166	9,211	148	3,4	3,7	9 %
Børtevatn	59,413	9,355	195	5,2	7,6	46 %
Skultrevatnet	59,072	9,27	226	6,5	8,5	31 %
Signevatnet	59,152	9,12	245	5,6	6,3	13 %
Fyresvatn	59,0955582	8,15346035	280	1,7	2,7	59 %
Vassenden	59,603	9,347	289	9,8	15,7	60 %
Sandvatn	59,8039992	9,0929826	309	6,4	8,5	33 %
Sønstevatn	59,727	9,131	318	7,1	6,1	-14 %
Sandvatnet	59,086	8,757	369	3,2	4,9	53 %
Pålbuvatnet	59,4029947	8,65799207	464	5,1	6,1	20 %
Vihusvatnet	59,0763369	8,88201358	467	5,3	7,9	49 %
Surtetjørn	59,7723131	9,12523824	471	8,7	12	38 %
Åmlivatn	59,388	8,019	477	6,5	7,4	14 %
Stestøyltjørni	59,38	8,304	638	6,5	9	38 %
Dei store tjørnane	59,072	8,683	642	4,3	5,9	37 %
Fetveittjørn	59,629	7,879	644	7,3	5,6	-23 %
Grimvatn	59,192	7,949	650	4,4	6,8	55 %
Kråkestøltjørn	59,003	7,992	657	2,4	3,8	58 %
Måvatn	59,206639	8,62249395	664	2,4	4,2	75 %
Tussetjørn	59,164	7,857	671	4,9	5,8	20 %
Sandvatnet	59,224	8,246	675	2,4	3,6	50 %
Totak	59,775	7,716	687	2,9	0,97	-67 %
Lognvikvatn	59,679	8,13	697	2,8	3,4	21 %
Øvre Selbuvatn	58,979	7,965	708	4	5,3	33 %
Mjåvatn	59,3219957	7,97398757	709	3	4	33 %
Vikvatnet	59,612	8,211	711	2,6	4	54 %
Sjausevatnet	59,681	8,801	740	6,1	7,2	18 %
Kambetjørn	59,37	7,768	760	2,3	4,1	78 %
Kjønnesvikvatnet	59,344	7,673	812	0,85	1,6	88 %
Langetjørn	59,716	7,525	834	1,8	3,6	100 %
Heddevatnet	59,824	8,596	837	2,3	3	43 %
Snotjørnane	59,138	7,762	844	6	6,8	13 %



Sjåvatnet	59,802	8,86	896	1,9	1,8	-5 %
Grunntjørn	59,559	8,266	926	2,7	4,2	56 %
Fikstjørn	59,853	8,616	928	3,1	1,6	-93 %
Bjørntjørn	59,305	8,259	965	1,8	3	67 %
Mjåvatn	59,311	8,268	978	2,5	3,5	40 %
Lysetjørn	59,791	8,448	1001	2,1	2,1	0 %
Longetjørn	59,889	8,768	1016	3,7	3,7	0 %
Grotvatni	59,741	8,363	1040	3,2	3	-6 %
Straumstøltjørn	59,734	7,692	1049	0,49	1,2	145 %
Storsteinvatnet	59,796	8,354	1076	3,1	3,9	26 %
Vonevatn	59,839	7,699	1177	0,87	1,1	26 %
Ormetjørn	59,904	8,51	1082	4,8	4,1	-15 %
Midtre Supsavatn	59,626	7,687	1087	0,86	0,91	6 %
Langtjørn	60,025	8,401	1089	3,3	3	-9 %
Langtjønn	59,815	8,455	1101	2	2	0 %
Vesle Flottetjørn	59,981	8,525	1105	1,8	2,3	28 %
Svarttjørn	59,892	8,854	1135	1,4	1,6	14 %
Torjustjørn	59,942	8,487	1152	2,1	3	43 %
Sandtjørni	59,7742054	8,38222965	1157	1,7	1,3	-24 %
Midtre						
Vrengletjønne	59,967	8,489	1162	1,3	1,5	15 %
Grysletjørn	59,972	8,59	1182	1,5	1,6	7 %
Torstjørni	60,037	7,983	1220	1	1,3	30 %
Såtetjørn	59,93	8,11	1315	0,34	0,75	121 %
HOH 1335	60,156	8,032	1328	1,7	1,8	6 %
Viktjørn	60,117	8,134	1354	0,52	0,83	60 %
HOH 1367	59,9695213	7,7877613	1364	0,61	0,67	10 %
HOH 1387	59,986	7,388	1385	0,32	0,53	66 %

**Fe Innsjøer i Telemark 1995 vs 2019 (Sortert etter moh)**

Innsjø	Moh	Fe 1995 µg/l	Fe 2019 µg/l	Økning Fe %
Leivatnet	9	131,8	270	105 %
Heddalsvatnet	16	88,2	110	25 %
Eldhustjenna	59	259,6	350	35 %
Lofthaugtjenna	61	318,6	510	60 %
Kviteseidvatnet	72	32,4	31	-4 %
Lønstravatnet	89	155,4	280	80 %
Teksle	105	312,8	430	37 %
Store Børten	105	78,2	86	10 %
Bøvatnet	133	63,2	95	50 %
Store Kyrsvatnet	134	89,2	280	214 %
Prestevatnet	148	48	33	-31 %
Børtevatn	195	136,6	91	-33 %
Skultrevatnet	226	168,9	250	48 %
Signevatnet	245	130,8	300	129 %
Fyresvatn	280	15	23	53 %
Vassenden	289	251,3	430	71 %
Sandvatn	309	x	340	x
Sønstevatn	318	125,1	36	-71 %
Sandvatnet	369	42,1	71	69 %
Pålbuvatnet	464	x	120	x
Vihusvatnet	467	264,3	330	25 %
Surtetjørn	471	453,5	460	1 %
Åmlivatn	477	x	340	x
Stestøyltjørni	638	124	260	110 %
Dei store tjørnane	642	88	140	59 %
Fetveittjørn	644	438,4	150	-66 %
Grimvatn	650	185,8	390	110 %
Kråkestøltjørn	657	82,5	190	130 %
Måvatn	664	80,7	89	10 %
Tussetjørn	671	45,9	160	249 %
Sandvatnet	675	15	75	400 %
Totak	687	276,8	11	-2416 %
Lognvikvatn	697	126,1	49	-157 %
Øvre Selbuvatn	708	121,8	330	171 %
Mjåvatn	709	x	47	x
Vikvatnet	711	142,6	250	75 %
Sjausetvatnet	740	119,1	170	43 %
Kambetjørn	760	111,7	74	-51 %
Kjønnesvikvatnet	812	29,5	28	-4 %
Langetjørn	834	81,4	59	-38 %
Heddevatnet	837	39,8	21	-90 %
Snotjørnane	844	88,8	170	91 %

Sjåvatnet	896	32,8	10	-228 %
Grunntjørn	926	51,1	37	-38 %
Fikstjørn	928	x	13	x
Bjørntjørn	965	47,1	88	87 %
Mjåvatn	978	65	140	115 %
Lysetjørn	1001	60,6	49	-24 %
Longetjørn	1016	244,7	200	-22 %
Grotvatni	1040	100	160	60 %
Straumstøltjørn	1049	15	15	0 %
Storsteinvatnet	1076	60,8	73	20 %
Vonevatn	1177	15	20	33 %
Ormetjørn	1082	161,2	170	5 %
Midtre Supsavatn	1087	15	18	20 %
Langtjørn	1089	34,5	34	-2 %
Langtjønn	1101	39,1	27	-45 %
Vesle Flottetjørn	1105	31,6	62	96 %
Svarttjørn	1135	15	11	-36 %
Torjustjørn	1152	15	77	413 %
Sandtjørni	1157	38,7	39	1 %
Midtre Vrengletjønn	1162	15	20	33 %
Grysletjørn	1182	15	27	80 %
Torstjørni	1220	22,2	13	-71 %
Såtetjørn	1315	15	5	-200 %
HOH 1335	1328	75,2	32	-135 %
Viktjørn	1354	15	4,7	-219 %
HOH 1367	1364	15	7,9	-90 %
HOH 1387	1385	15	5,1	-194 %

Vedlegg 4: Endring Sulfat (SO4) i innsjøer i Telemark 1995-2019

**SO4 Innsjøer i Telemark 1995 vs 2019 (Sortert etter moh)**

Innsjø	Moh	SO4 1995 mg/l	SO4 2019 mg/l
Leivatnet	9	7	2,45
Heddalsvatnet	16	2,1	0,93
Eldhustjenna	59	5,3	1,9
Lofthaugtjenna	61	6,9	5,65
Kviteseidvatnet	72	1,9	0,9
Lønstravatnet	89	4,6	1,26
Teksle	105	3,3	0,83
Store Børten	105	4	1,29
Bøvatnet	133	3,9	1,32
Store Kyrsvatnet	134	4	1,33
Prestevatnet	148	4	1,27
Børtevatn	195	4,1	1,34
Skultrevatnet	226	4,2	1,45
Signevatnet	245	4,3	1,42
Fyresvatn	280	2,5	0,85
Vassenden	289	3,3	0,8
Sandvatn	309	2,2	0,61
Sønstevatn	318	3,7	1,05
Sandvatnet	369	3	1,05
Pålbuvatnet	464	2,3	0,61
Vihusvatnet	467	2,5	0,6
Surtetjørn	471	2,3	0,68
Åmlivatn	477	2,5	0,54
Stestøyltjørni	638	2,7	0,69
Dei store tjørnane	642	2,2	0,52
Fetveittjørn	644	3,3	0,73
Grimvatn	650	2,1	0,46
Kråkestøltjørn	657	2,4	0,8
Måvatn	664	2,6	0,66
Tussetjørn	671	2	0,34
Sandvatnet	675	2	0,61
Totak	687	1,8	0,87
Lognvikvatn	697	1,7	0,7
Øvre Selbuvatn	708	2,1	0,45
Mjåvatn	709	1,9	0,44
Vikvatnet	711	1,9	0,66
Sjausetvatnet	740	2,2	0,47
Kambetjørn	760	1,4	0,34
Kjønnesvikvatnet	812	1,4	0,59
Langetjørn	834	1,2	0,4
Heddevatnet	837	2,8	1,68
Snotjørnane	844	1,9	0,21

Sjåvatnet	896	1,9	0,5
Grunntjørn	926	1,7	0,38
Fikstjørn	928	2,3	0,77
Bjørntjørn	965	1,7	0,4
Mjåvatn	978	1,8	0,35
Lysetjørn	1001	1,6	0,53
Longetjørn	1016	1,5	0,36
Grotvatni	1040	1,4	0,33
Straumstøltjørn	1049	1,2	0,38
Storsteinvatnet	1076	1,2	0,35
Vonevatn	1177	1,2	0,54
Ormetjørn	1082	2,5	0,53
Midtre Supsavatn	1087	0,9	0,33
Langtjørn	1089	2	0,45
Langetjønn	1101	2,2	0,79
Vesle Flottetjørn	1105	1,7	0,54
Svarttjørn	1135	1,5	0,56
Torjustjørn	1152	1,3	0,33
Sandtjørni	1157	1,6	0,49
Midtre Vrengletjønne	1162	1,2	0,41
Grysletjørn	1182	1,7	0,7
Torstjørni	1220	1,1	0,35
Såtetjørn	1315	1,2	0,35
HOH 1335	1328	1,2	0,67
Viktjørn	1354	1	0,43
HOH 1367	1364	1	0,61
HOH 1387	1385	1,9	3

Vedlegg 5: Endring pH i innsjøer i Telemark 1995-2019

**pH Innsjøer i Telemark 1995 vs 2019 (Sortert etter moh)**

Innsjø	Moh	pH 1995	pH 2019
Leivatnet	9	6,17	5,9
Heddalsvatnet	16	6,39	6,57
Eldhustjenna	59	5,83	5,99
Lofthaugtjenna	61	6,55	6,63
Kviteseidvatnet	72	6,53	6,6
Lønstravatnet	89	6,39	5,24
Teksle	105	5,18	5,37
Store Børten	105	6,48	6,55
Bøvatnet	133	6,6	6,7
Store Kyrsvatnet	134	6,38	6,39
Prestevatnet	148	6,79	6,8
Børtevatn	195	6,97	6,85
Skultrevatnet	226	6,35	6,34
Signevatnet	245	6,69	6,75
Fyresvatn	280	5,47	5,8
Vassenden	289	6,05	5,77
Sandvatn	309	5,92	6,15
Sønstevatn	318	6,48	6,73
Sandvatnet	369	5,16	5,54
Pålbuvatnet	464	5,02	5,3
Vihusvatnet	467	4,91	4,92
Surtetjørn	471	4,84	4,99
Åmlivatn	477	5,97	6,45
Stestøyltjørni	638	5,44	5,32
Dei store tjørnane	642	4,67	5,01
Fetveittjørn	644	7,07	6,75
Grimvatn	650	5,01	5,14
Kråkestøltjørn	657	5,22	5,67
Måvatn	664	5,1	5,67
Tussetjørn	671	5,02	5,26
Sandvatnet	675	5,3	5,54
Totak	687	6,61	6,53
Lognvikvatn	697	6,83	6,76
Øvre Selbuvatn	708	5,14	5,55
Mjåvatn	709	5,74	6
Vikvatnet	711	6,61	6,4
Sjausetvatnet	740	5,81	5,97
Kambetjørn	760	5,59	5,68
Kjønnesvikvatnet	812	6,06	6,07
Langetjørn	834	6,52	6,2
Heddevatnet	837	6,76	6,84
Snotjørnane	844	5,84	5,32

Sjåvatnet	896	6,14	6,38
Grunntjørn	926	6,96	6,9
Fikstjørn	928	7,26	7,25
Bjørntjørn	965	5,29	5,79
Mjåvatn	978	5,39	5,72
Lysetjørn	1001	6,46	6,71
Longetjørn	1016	6,24	6,12
Grotvatni	1040	6,08	6,41
Straumstøltjørn	1049	6,23	6,28
Storsteinvatnet	1076	6,31	6,39
Vonevatn	1177	6,54	6,54
Ormetjørn	1082	6,53	6,73
Midtre Supsavatn	1087	5,98	6,18
Langtjørn	1089	7,08	7,25
Langetjønn	1101	6,55	6,79
Vesle Flottetjørn	1105	6,42	6,52
Svarttjørn	1135	6,43	6,66
Torjustjørn	1152	6,38	6,6
Sandtjørni	1157	6,26	6,52
Midtre Vrengletjønne	1162	6,52	6,55
Grysletjørn	1182	6,31	6,5
Torstjørni	1220	6,25	6,37
Såtetjørn	1315	5,72	6,11
HOH 1335	1328	6,52	6,71
Viktjørn	1354	6,02	6,31
HOH 1367	1364	6,03	6,29
HOH 1387	1385	6,3	6,68