

Er det mulig å enkelt skille effekter av klimaendringer og nedgang i sur nedbør på trender i vannkjemi?

Av Rolf D. Vogt, Øyvind Kaste, Jan-Erik Thrane, Areti Balkoni, François Clayer, Ann Kristin Schartau og Heleen de Wit

Rolf D. Vogt (Ph.D) er biogeokjemiker og sjefsforsker ved Norsk institutt for vannforskning (NIVA).

Øyvind Kaste (Ph.D) er limnolog og seniorforsker ved NIVA.

Jan-Erik Thrane (Ph.D) er limnolog og forsker ved NIVA.

Areti Balkoni (M.Sc) er modellør og forsker ved NIVA.

François Clayer (Ph.D) er modellør og forsker ved NIVA.

Ann Kristin Schartau (M.Sc) er ferskvannøkolog og seniorforsker ved Norsk Institutt for Naturforskning (NINA).

Heleen de Wit (Ph.D) er biogeokjemiker og forsker ved NIVA.

Summary

Is it possible to easily distinguish the effects of climate change and the decline in acid rain on trends in water chemistry? The study investigates whether trends in climate variables such as precipitation, runoff, temperature, and actual evapotranspiration (AET) can explain changes in water chemistry in 78 Norwegian lakes from 1990 to 2020. AET has increased significantly in almost all catchments, but there are large discrepancies between modeled and calculated AET. Temperature has also risen significantly at 79 % of the stations, while precipitation and runoff show significant trends in only 15 and 19 lakes, respectively. This is reflected in the explanatory power of these variables for changes in water chemistry. Differences in climate trends correlate spatially and temporally with the decline in acid rain, making it challenging to distinguish the effects of these drivers in simple correlation analyses. The explanatory power of trends in climate parameters on water chemistry trends is generally weak. However, through multivariate RDA, we find a non-significant indication that

increases in precipitation and runoff may have an opposite effect to temperature increases on water chemistry trends.

Sammendrag

Studien undersøker om trender i klimavariablene nedbør, avrenning, temperatur og faktisk evapotranspirasjon (AET) kan forklare endringer i vannkjemi i 78 norske innsjøer fra 1990 til 2020.

AET har økt signifikant i nesten alle nedbørsfeltene, men det er store avvik mellom modellert og beregnet AET. Temperaturen har også steget signifikant i 79 % av stasjonene, mens nedbør og avrenning kun viser signifikante trender i henholdsvis 15 og 19 innsjøer. Dette reflekteres i betydningen av disse forklaringsvariablene for endringer i vannkjemi. Forskjeller i klimatrender samvarierer i rom og tid med nedgangen i sur nedbør, noe som gjør det utfordrende å skille effektene av disse driverne i enkle korrelasjonsanalyser. Forklaringsverdien av trender i klimaparameterne på trender i vannkjemien er i tillegg svake. Ved bruk av

multivariat RDA finner vi imidlertid en ikke signifikant indikasjon på at økning i nedbør og avrenning kan ha en motsatt effekt av økning i temperatur på trender i vannkjemien.

Innledning

Vannkjemien er i endring

Vannkjemien i norske vann og vassdrag har endret seg siden overvåkingen startet på 1980-tallet (Vogt og Schanke, 2023). Tidligere trender skyldes hovedsakelig nedgangen i sur nedbør (Monteith mfl., 2023). Ifølge den siste ICP Waters-rapporten (Vogt mfl., 2024a) har sulfatkonsentrasjonene falt med 42 % i Sør-Norden og 27 % i Nord-Norden fra perioden 1990–2004 til 2006–2020. Innsjøene i begge regionene har hatt en økning i syrenøytraliserende kapasitet (ANC) (31 % og 62 %), hovedsakelig på grunn av redusert sulfat (SO_4^{2-}) på $-1,91$ og $-0,67$ $\mu\text{ekv/L/år}$ i henholdsvis Sør- og Nord-Norden. Konsentrasjonen av total organisk karbon (TOC) har økt i takt med redusert forsurening, med størst økning i sør der også konsentrasjonene er høyest (Vogt og Skancke, 2023). Konsentrasjonen av H^+ har falt med 34% i sør og 24% i nord, ettersom nedgangen i mineralysyre ikke kompenseres fullt ut av økningen i svake organiske syrer og karbonsyre. Kalsium (Ca^{2+}) har avtatt i sør, men økt litt (3 %) i den mindre sur nedbør påvirkede nordregionen over 30 år. Tilsvarende trender er observert i overvåking av innsjøer (BILOK) fra 1986 til 2018 (Schartau mfl., 2020).

Påvirkningsfaktorene er i endring

Nedgangen i avsetning av svovel- og salpetersyre har flatet ut siden årtusensskiftet, og sur nedbør er derfor ikke lenger en like sterk driver for endringer i vannkjemi. Klimaendringer (Madsen mfl., 2014; de Wit mfl., 2023) og muligens økt biomasse (Kritzberg mfl., 2020) påvirker nå vannkjemien i økende grad. Forskjeller i Ca^{2+} -trender mellom nord og sør skyldes hovedsakelig ulikheter i nedgangen i SO_4^{2-} i forhold til økningen i organiske anioner (Org^-) og bikarbonat (HCO_3^-). Disse forskjellene styres av både nedgangen i sur nedbør og klima-

endringer, men effektene av disse påvirkes av egenskaper ved nedbørsfeltene, som jordsmonnets bufferevne og skogdekke (Vogt mfl., 2024a).

Gjennomsnittstemperaturen i Norge har økt med 1 °C siden 1900 (Ny normal i klimaforskningen, met.no). Siden 1980 har oppvarmingen vært særlig tydelig, og perioden 1991–2020 er den varmeste hittil, både for Norge som helhet og i alle landsdeler. Temperaturøkningen har vært størst i Trøndelag og Nordland/Troms (Hanssen-Bauer mfl., 2017). Gjennomsnittsnedbøren har økt med 20 % siden 1900, og antallet dager med mye nedbør har økt signifikant, spesielt etter 1980 (Lutz mfl., 2024). Selv om økningen i nedbør varierer mellom regioner, har ingen regioner hatt en nedgang (Hanssen-Bauer mfl., 2017). I tillegg har fordelingen endret seg med lengre tørkeperioder og kraftigere nedbørsepisoder (Lutz mfl., 2024).

Avrenningen over et hydrologisk år bestemmes av mengden nedbør minus tap ved faktisk evapotranspirasjon (AET), som øker med fordampning, intersepsjon og transpirasjon fra vegetasjon. Økt AET reduserer dermed effekten av økt nedbør på avrenningen. I det boreale norske klima er AET relativt lav, styrt av lavere temperatur, kortere vekstsesong, lengre vintre og mindre vegetasjon (Zhang mfl., 2021).

Økte temperaturer, spesielt om våren og høsten, har forlenget vekstsesongen (Hanssen-Bauer mfl., 2017), og sammen med økt CO_2 i atmosfæren og akkumulering av reaktivt nitrogen (Piao mfl., 2020) har dette ført til økt plantevekst. Endringer i arealbruk, som nedleggelse av utmarksbeite, har også ført til gjengroing og dermed økt biomasse. Tregrensen har også økt, trolig som følge av skogreestablering etter hogst på 1700- og 1800-tallet i forbindelse med aktiv seterdrift (de Wit mfl., 2014). I tillegg har det vært planting av granskog, blant annet gjennom Klimaskog-prosjektet for CO_2 -binding (Vogt mfl., 2022). Dette har ført til at skogbiomassen i Norge økte med 29 % mellom 1971 og 2000 (de Wit mfl., 2006; 2015).

Teoretiske sammenhenger mellom endringer i klima og vannkjemi

Økning i mengde og intensitet av nedbør fører til endringer i fordelingen av vannets veier gjennom jordsmonnet i nedbørsfeltet og ut i vassdrag. Ved lav vannføring kommer tilsiget av vann hovedsakelig fra grunnvannet. Med mer nedbør og intensitet av nedbør blir mineraljordsmonnet i større grad mettet med vann slik at vannet strømmer mer sub-lateralt gjennom de øvre organisk rike jordlagene (Christophersen mfl., 1990a, Easthouse mfl., 1992). Tilsvarende skjer når nedbørs-intensiteten overstiger infiltrasjonsraten. Da øker avrenningen fra skogbunnen (O- og A-horisontene) direkte ut i bekken, slik at vannet ikke filtreres gjennom mineraljorden. Dette vannet er surere og inneholder mer løst naturlig organisk materiale (DNOM) i forhold til avrenning fra mineraljord og grunnvann, som i stedet har høyere pH samt høyere konsentrasjoner av basekationer (Easthouse mfl., 1992; Vogt og Muniz, 1997). Økt vannføring er derfor forventet å gi mer utvasking av DNOM, målt som økning i TOC og brunere vann (de Wit mfl., 2016) fra nedbørsfelt med mineraljordsprofiler. I nedbørsfelt med mye myr og der det er mye nedbør, slik at jordprofilene vanligvis er vannmettede, vil en økning i mengde nedbør imidlertid kun føre til en økt fortykning (Christophersen mfl., 1990b).

Økt temperatur, lengre vekstsesong og økt biomasse fører til økt primærproduktivitet (Park mfl., 2016), som igjen øker rot- og jordrespirasjon (Högberg mfl., 2001). Økt plantevekst fører til mer dødt strøfall som delvis brytes ned og bidrar til en økt utvasking av DNOM (Finstad mfl., 2016). Økt primærproduksjon øker også konsentrasjonen av CO_2 i rotsonen, som gir høyere nivåer av karbonsyre (H_2CO_3) og kan øke forvittringsrate. Forvitringen forsterkes ytterligere av økt utskillelse av organiske syrer fra røtter og *mykorrhiza* (Drever & Stillings, 1997; van Scholl mfl., 2008). Økt temperatur varmer også jordsmonnet (Jungkvist mfl., 2014), noe som akselererer biogeokjemiske nedbrytningsprosesser og mineralforvitring (Kronnäs mfl., 2023).

Gjennom forvittringsreaksjoner omdannes de svake organiske syrene og karbonsyre til Org^- og HCO_3^- , noe som øker utvaskingen av disse anionene. Dette øker vannets alkalitet og ANC, og dermed gjenhenting fra sur nedbør (Appelo og Postma, 2005). Forvitringseffekten av karbonsyre er imidlertid mindre ved pH nær 5,5 eller lavere, da den svake karbonsyren ($\text{pK}_{\text{a}1} = 6,3$) ikke protolyserer. Svake organiske syrer bidrar også i mindre grad til alkaliteten. Data fra en regional undersøkelse av 1 000 norske innsjøer viser at i snitt protoniseres under 30 % ned til pH 4,5 (Vogt mfl., 2023). Siden HCO_3^- er ubetydelig i vann med pH under 5,5, er økningene merkbare bare i de mindre sure innsjøene i nord, hvor Org^- bidrar mindre til ANC enn bikarbonat. I Sør-Norges innsjøer med pH nær eller under 5,5 oppveies effekten av økning i Org^- av nedgang i SO_4^{2-} og lav basemetning, som begrenser frigjøring av Ca^{2+} fra jordsmonnet.

Siden klimaendringene forventes å intensiveres, med en temperaturøkning på 4,5 °C i Norge mot slutten av århundret (Hanssen-Bauer mfl., 2015), samt mer nedbør og hyppigere ekstremvær (Nikulin mfl., 2011), er det viktig å forstå hvordan dette vil påvirke vannkvaliteten. Målet med denne studien har derfor vært å undersøke om korrelasjonsanalyser og RDA kan identifisere effektene av trender i klimaparametrene nedbør, avrenning, temperatur og AET på vannkjemien i 78 forsurningsfølsomme innsjøer (Tidstrendsjøer), som har vært overvåket årlig siden 1986.

Materiale og metoder

Datagrunnlag

Studien er basert på data fra 78 forsurningsfølsomme innsjøer (Tidstrendsjøer) som inngår i Miljødirektoratets overvåkningsprogram ØkoForsk. Vannkvaliteten i disse innsjøene har blitt overvåket med årlige høstprøver siden 1986 (Vogt og Skancke, 2023). ANC og konsentrasjonene av Org^- og HCO_3^- er beregnet basert på målte kjemiske parametere. Ligninger og modeller som er brukt er beskrevet i Vogt mfl. (2023). Bidrag fra organisk ladning til alkalitet

modelleres som Org.⁷ ut fra målt TOC og pH, basert på en antatt tetthet av svake syrer (Site Density, (SD)) i DNOM (Vogt mfl., 2024b). Estimerer for HCO_3^- kan derved beregnes ut fra alkalitetsmålinger.

Tidstrender (*Theil-Sens slope* (Sen, 1968)) for periodene 1990–2020 og 2006–2020 er hentet fra ICP Waters-rapporten av Vogt mfl. (2024a) og er tilgjengelige på GitHub¹. Denne studien fokuserer på de norske Tidstrendsjøene, som tilhører regionene NoNord (Nord-Norden) og SoNord (Sør-Norden) i ICP Waters-rapporten.

Gridmodellerte klimadata fra 1990 til 2020 for utløpspunktene til hver av Tidstrendsjøene er hentet fra Norges Vassdrags- og energidirektorats (NVE's) GridTimeSeries-data (GTS²). AET og avrenning er beregnet ved bruk av DDD-modellen (Distance Distribution Dynamics, Skaugen og Onof, 2014), som benytter energibalanseregninger og inkluderer snøsublimering. GTS-datasettet er modellert og tilpasset observasjoner. Inngangsdataene for DDD-modellen består av romlige gjennomsnittsverdier for nedbør og temperatur, som er korrigert for å oppnå vannbalanse og mest mulig nøyaktig snødekkeperiode. AET estimeres som en funksjon av potensiell evapotranspirasjon og vannmetning i nedbørsfeltet, og justeres empirisk for å oppnå vannbalanse. Den beregnes ut fra vekstsesongen, basert på en vekst-grad-dag-funksjon (Growing Degree Days, GDD), og er tilpasset den norske versjonen av HBV-modellen (Hydrologiska Byråns Vattenbalansseksjon) (Sælthun, 1996). HBV-modellen er parameterisert med informasjon om terreng, jord og arealbruk, og bruker «griddete» værdatasett som *input*. Det er betydelige usikkerheter knyttet til både modellen og den romlige interpoleringen. Likevel er dette en av de beste hydrologiske modellene, kalibrert med et av verdens beste datasett. Det bør imidlertid bemerkes at DDD-modellen mangler tydelig dokumentasjon om hvilke faktorer som styrer AET, noe som utgjør en svakhet i denne analysen.

¹ https://github.com/JamesSample/icpw2/tree/master/thematic_report_2023

² <http://API.NVE.no>

Statistiske beregninger

Theil-Sens slope for tidstrender i klimaparametere ble beregnet på samme måte som for de kjemiske dataene beskrevet i Vogt mfl. (2024a). Sen's trender for alle kjemiske parametere ble korrelert (to-sidig Pearsons test) mot klimatrendene i Exel. En multivariat Redundansanalyse (RDA) ble gjennomført i R Studio med «vegan»-pakken for å studere sammenhengen mellom trender i klima (forklaringsvariabler) og trender i målte kjemiske verdier (responsvariabler). RDA brukes ofte i miljøforskning for å identifisere og kvantifisere sammenhenger mellom miljøvariabler. Kun stasjonsdata for Sen's trender med signifikante Mann-Kendall-trender ble brukt i korrelasjonsanalysene, mens alle trendene ble inkludert i RDA analysene.

Fire utvalg av de kjemiske trenddataene ble analysert for å undersøke hvordan nedgangen i sur nedbør og klimaendringer, både sammen og hver for seg, påvirker trender i vannkjemien. Målet var å skille effektene av nedgangen i sur nedbør fra klimaendringer:

- I. Alle 78 Tidstrendsjøene for perioden 1990–2020.
- II. Alle sjøer for perioden med liten nedgang i sur nedbør, dvs. 2006–2020.
- III. Halvparten av sjøene med minst nedgang i sur nedbør (sulfattrend $> -1,096 \mu\text{ekv/L/år}$) for hele perioden.
- IV. Sjøer og perioder med minst nedgang i sur nedbør.

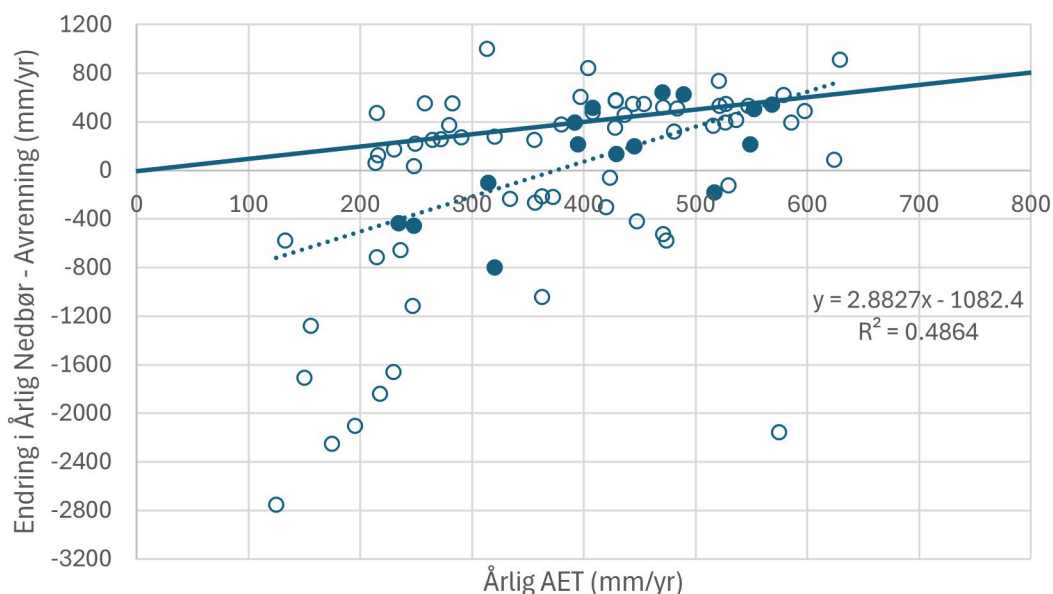
Resultater og diskusjon

Trender i klimaparametere

Temperatur og AET har økt signifikant ved henholdsvis 79 % og 99 % av innsjøene, mens nedbør og avrenning kun har en signifikant økning ved henholdsvis 19 % og 24 % av innsjøene (Tabell 1). Det større antallet signifikante trender for temperatur enn for nedbør antyder at en temperaturøkning på én grad over tretti år har vært en mer markant endring enn en økning på 160 mm nedbør. De mange signifikante AET-trendene kan skyldes en kombinert effekt av økt temperatur og nedbør, samt effekter fra

Tabell 1. Statistiske verdier for Sen's trender i klimaparametere mellom 1990 og 2020 for alle de 78 Tidstrend-sjøene og for kun innsjøer med signifikante Mann-Kendall trender.

Parameter	Enhet	Antall	Minimum	Maksimum	Median	Gjennomsnitt
AET	mm/år	78	0,9124	6,613	3,714	3,667
Nedbør	mm/år	78	-25,51	26,44	5,316	6,290
Avrenning	mm/år	78	-31,05	39,32	4,039	4,953
Temperatur	°C/år	78	0.0042	0.0909	0.038	0.038
Kun innsjøer med signifikante Mann-Kendall trender						
AET	mm/år	77	0,9124	6,613	3,806	3,686
Nedbør	mm/år	15	7,513	26,44	13,24	15,60
Avrenning	mm/år	19	-21,21	25,98	9,518	8,509
Temperatur	°C/år	62	0,020	0,091	0,039	0,042

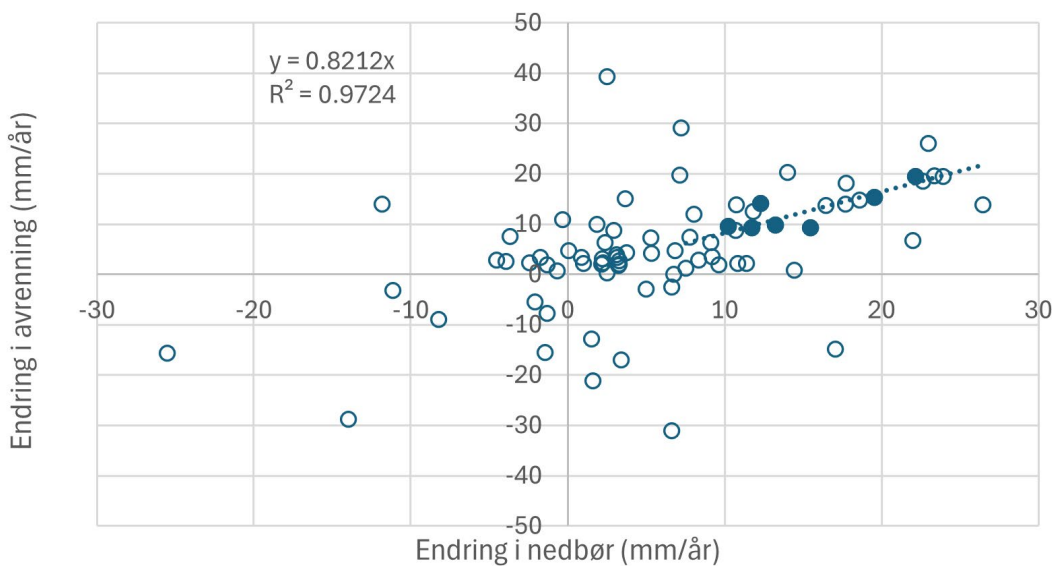


Figur 1. Differansen i median årlig (01.10 – 30.09) nedbør og avrenning fra 1990 til 2020 ved de 78 Tidstrend-sjøene. Trendlinjen viser korrelasjon mellom signifikante Mann-Kendall trender (fylte sirkler) i nedbør og avrenning ($n = 15$). Heltrukken linje viser det teoretiske 1:1 forholdet.

økt intersepsjon og transpirasjon som følge av økt skogbiomasse og lengre vekstsesong.

Differansen i trenden mellom nedbør og avrenning er 1,28 mm/år, som teoretisk skal tilsvare trenden i AET på 3,71 mm/år. Det er imidlertid ingen korrelasjon mellom differansen i trender for nedbør og avrenning og trendene for AET. Teoretisk skal summen av AET over et hydrologisk år tilsvare differansen mellom nedbør og avrenning, men for kun 8

innsjøer forklarer denne differansen mer enn 25 % av variasjonen i AET ($R^2 > 0,25$). Videre viser 36 % av innsjøene større årlige hydrologiske avrenninger enn nedbør, noe som fører til betydelige avvik fra den teoretiske sammenhengen (Figur 1). Avviket øker med økende avrenning ($R^2 = 0,7459$) og høyde over havet ($R^2 = 0,3239$). Likevel viser trender for nedbør og avrenning ved de 78 innsjøene fra 1990 til 2020 en lineær sammenheng, der nedbør forklarer



Figur 2. Tidstrender i nedbør og avrenning ved de 78 Tidstrendsjøene fra 1990 til 2020. Trendlinjen viser korrelasjon mellom signifikante Mann-Kendall trender (fylte sirkler) for avrenning og nedbør ($n = 7$).

97 % av variasjonen i avrenning mellom de 7 innsjøene med signifikante trender (Figur 2). Dette bekrefter at trendene, statistisk beregnet basert på modellerte data, har en viss forklaringskraft. Endringene i nedbør og temperatur samsvarer også med rapporter fra met.no og Hanssen-Bauer mfl. (2017), som rapporterte økt nedbør på 4 % og temperaturøkning på 0,5 °C fra 1971 til 2000 sammenlignet med 1985 til 2014. De rapporterer også at temperaturøkningen har vært minst i sør.

Det er tydelige sør-nord gradienter i årlig endring for nedbør, avrenning (Figur 3a), temperatur og AET (Figur 3b) over 30 år. Medianverdien for endring i nedbør og avrenning er henholdsvis 5,32 og 4,04 mm/år (Tabell 1), med størst endring i sør (Figur 3a). Temperaturøkningen er i snitt 0,038 °C per år, med minst økning i sør, mens AET har økt med 3,71 mm/år, med størst økning i sør (Figur 3b). Det er også en sør-nord gradient i nedgangen av sur nedbør (Figur 3b). Denne samvariasjonen i rom og tid skaper utfordringer i de statistiske analysene. Det er en svak negativ korrelasjon ($R^2 = 0,1387$) mellom AET- og temperaturtrender, da AET øker mest i sør og temperaturen mest i nord (Figur 3b), noe som antyder at temperatur

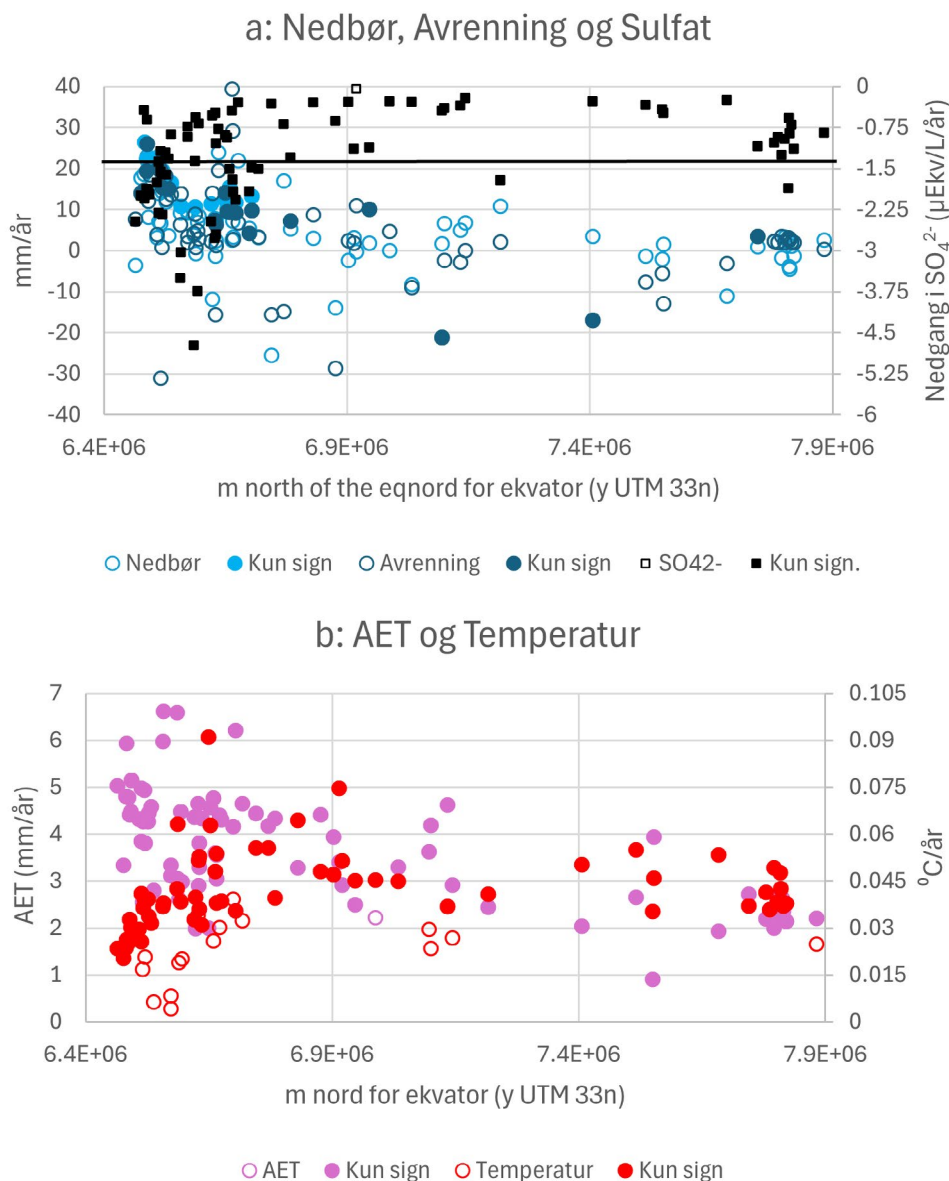
ikke er hovedfaktoren for økningen i AET. Siden AET imidlertid styres av fordampning og vekstsesongen, påvirker temperatur likevel AET indirekte. Den store økningen i AET i sør kan i stedet skyldes økt transpirasjon og intersepsjon fra økt biomasse og lengre vekstsesong.

Alle innsjøer for hele perioden

Korrelasjoner mellom mer enn 10 signifikante klima- og kjemitrender fra alle innsjøene som forklarer mer enn 10 % av variasjonen for hele perioden, er vurdert og presentert i Tabell 2.

Trender i AET viser tilsynelatende høy forklaringsverdi for mange kjemiske trender. Det er imidlertid en tydelig romlig samvariasjon mellom økningen i AET og nedgangen i SO_4^{2-} ($R^2 = 0,3107$). Der økningen i AET er størst, er også nedgangen i SO_4^{2-} størst (Figur 4). Denne samvariasjonen er trolig den viktigste forklaringsfaktoren for endringene i parametrene som er korrelert med AET. For eksempel er trendene i Ca^{2+} og Mg^{2+} , som korrelerer med AET ($R^2 = 0,825$), også sterkt korrelert med sulfat ($R^2 = 0,8444$).

Økt biomasse og lengre vekstsesong øker røttens respirasjon, som igjen genererer mer CO_2 og karbonsyre i vannet. Dette bør teoretisk



Figur 3 a og b. Endringer i klimaparametere i forhold til breddegrad (angitt i UTM 33n). Nedbør (lyseblått) og avrenning (mørkeblått) er vist i Figur a, mens AET (lilla) og temperatur (rødt) er vist i Figur b. Trender i sulfat er markert med firkanter i Figur a. Fylte symboler representerer signifikante Mann-Kendall-trender. Den horisontale linjen i Figur a viser delelinjen for SO_4^{2-} ($-1,096 \mu\text{Eq SO}_4^{2-}/\text{L}/\text{år}$), hvor halvparten av trendene ligger over linjen.

øke forvitringen og dermed øke trendene for HCO_3^- ved økt AET. Imidlertid viser data en nedgang (Figur 5), noe som delvis kan forklares med samvariasjonen med sur nedbør, som senker pH til rundt eller under 5,5, hvor bikarbonat forblir protonert som karbonsyre. Den

markante økningen i Org^- i de sørlige områdene, hvor økningen i AET og nedgangen i sur nedbør er størst, gir en tydelig økning i ANC med økt AET (Figur 6), til tross for en mindre økning i bikarbonat (Figur 5). Samtidig er økende temperaturlender negativt korrelert med ANC

Tabell 2. Korrelasjoner som forklarer minst 10 % av variasjonen ($R^2 > 0,1$) mellom Sen's trender i klima-parametere og kjemiske parametere, der Mann-Kendall-analysen viser signifikante trender for både forklarings- og responsvariablene i mer enn 10 av de 78 innsjøene for hele perioden.

Klima parametere	Kjemiske parametere	Antall sign. Mann- Kendall trender	Retning	R ²
AET	Ca ²⁺	47	Negativ	0,4754
	Mg ²⁺	44		0,3691
	SO ₄ ²⁻	75		0,3107
	K ⁺	47		0,2020
	HCO ₃ ⁻	38		0,1529
	Konduktivitet	56		0,1527
	H ⁺	62		0,1015
	Org. ⁻	62	Positiv	0,3054
	TOC	58		0,3004
	ANC	75		0,1411
Avrenning	SO ₄ ²⁻	19	Negativ	0,1592
	Konduktivitet	15		0,1561
	NO ₃ ⁻	12		0,1117
	Alkalitet	18	Positiv	0,3618
	ANC	18		0,2142
	Org. ⁻	16		0,2023
	K ⁺	13		0,1555
	TOC	16		0,1500
Nedbør	Cl ⁻	11	Negativ	0,5873
	Konduktivitet	15		0,4947
	K ⁺	12		0,1953
	NO ₃ ⁻	11		0,1332
	Alkalitet	15	Positiv	0,1329
Temperatur	ANC	62	Negativ	0,1660
	SO ₄ ²⁻	61	Positiv	0,1079
	Konduktivitet	44		0,1077

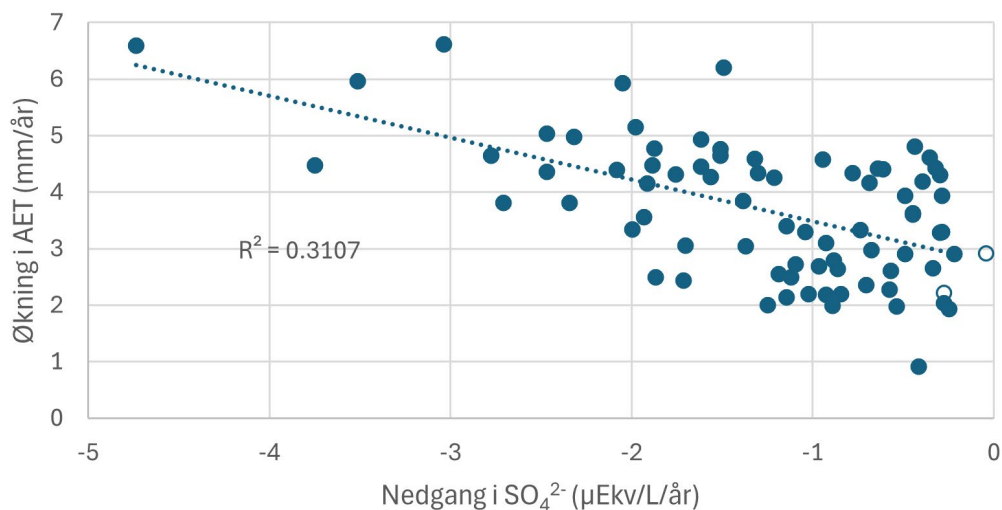
(Tabell 2), da de største økningene i ANC finnes lengst sør, hvor nedgangen i sur nedbør er størst, mens temperaturøkningen er minst (Figur 1b). Økt nedbør og avrenning er negativt korrelert med nedgang i konduktivitet, mens temperaturøkning er positivt korrelert med konduktivitet, noe som kan skyldes henholdsvis økt fortykning og oppkonsentrering.

Økende trender i nedbør og avrenning forklarer henholdsvis 13 % og 36 % av økningen i alkalitet (Tabell 2). Tilsvarende, men ikke signi-

fikante, korrelasjoner ble funnet for TOC, Org.⁻ og ANC (ikke vist). De signifikante korrelasjonene skyldes hovedsakelig ett datapunkt fra en innsjø med stor økning i alkalitet (Sognevatn i Sør-Norge, 1,875 µekv/L/år, Figur 7). Hvis dette datapunktet fjernes, blir korrelasjonene ikke signifikante. Disse korrelasjonene anses derfor som usikre og tillegges ikke stor vekt.

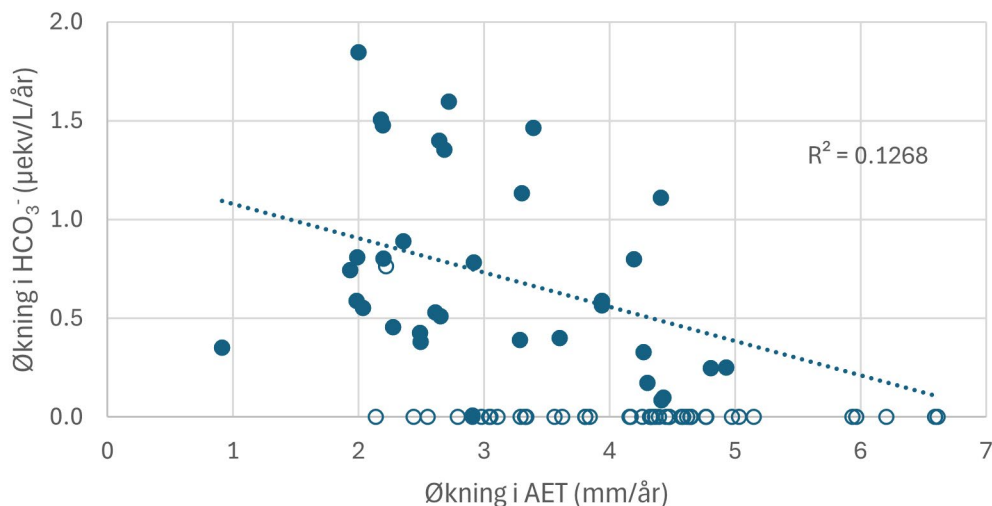
Korrelasjonsanalysen av data fra alle innsjøene over hele perioden viser at sannsynlige endringer i vannkjemi forårsaket av klima-

Alle innsjøer for hele perioden



Figur 4. Tidstrender i økningen i AET samvarierte med nedgangen av SO_4^{2-} -konsentrasjon (et mål for nedgang i sur nedbør) for hele perioden. Trendlinjen viser korrelasjonen mellom 75 innsjøer med signifikante Mann-Kendall-trender (fylte sirkler) for både AET og SO_4^{2-} .

Alle innsjøer for hele perioden

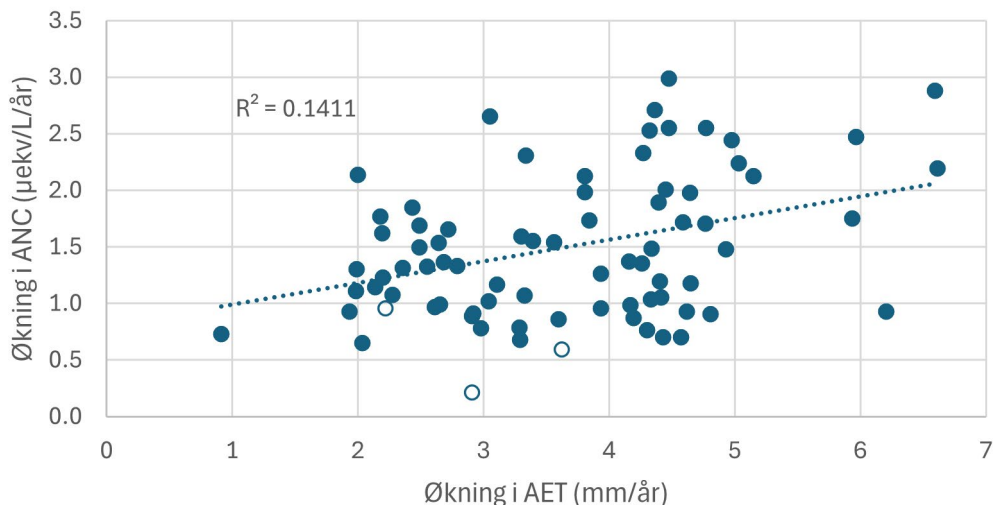


Figur 5. Tidstrender i endring av HCO_3^- -konsentrasjon samvarierte med økning i AET for hele perioden. Trendlinjen viser korrelasjonen mellom 35 innsjøer med signifikante Mann-Kendall-trender (fylte sirkler) for både HCO_3^- og AET.

endringer i stor grad skjules av samvariasjonen med nedgangen i sur nedbør i rom og tid. Derfor er en multivariat redundansanalyse (RDA) brukt for å kartlegge forholdet mellom trender i

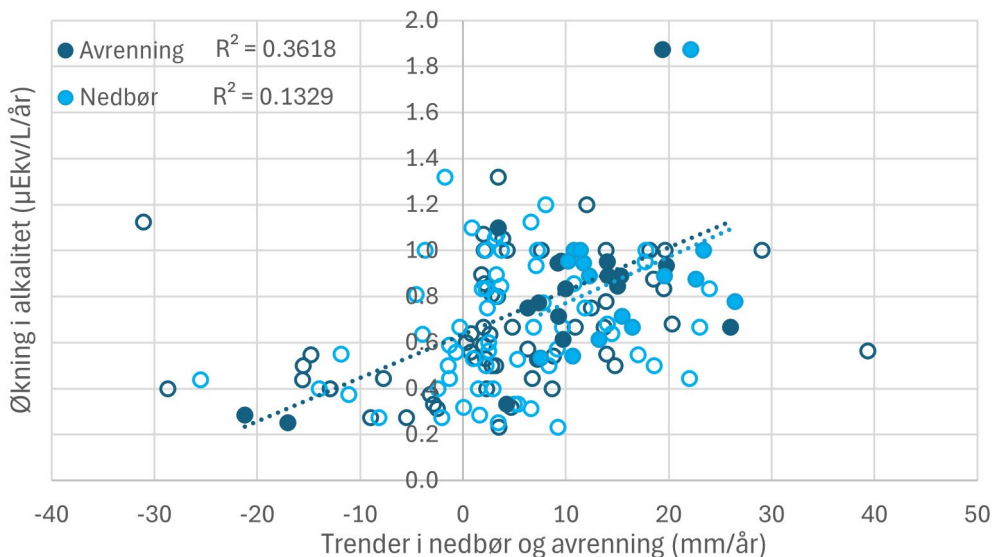
klimaparametere som forklaringsvariabler og trender i kjemiske parametere som responsvariabler.

Alle innsjøer for hele perioden



Figur 6. Tidstrender i endring av ANC samvarierte med økning i AET for hele perioden (mørkeblå sirkler). Trendlinjen viser korrelasjonen mellom 75 innsjøer med signifikante Mann-Kendall-trender (fylte sirkler) for både ANC og AET.

Alle innsjøer for hele perioden



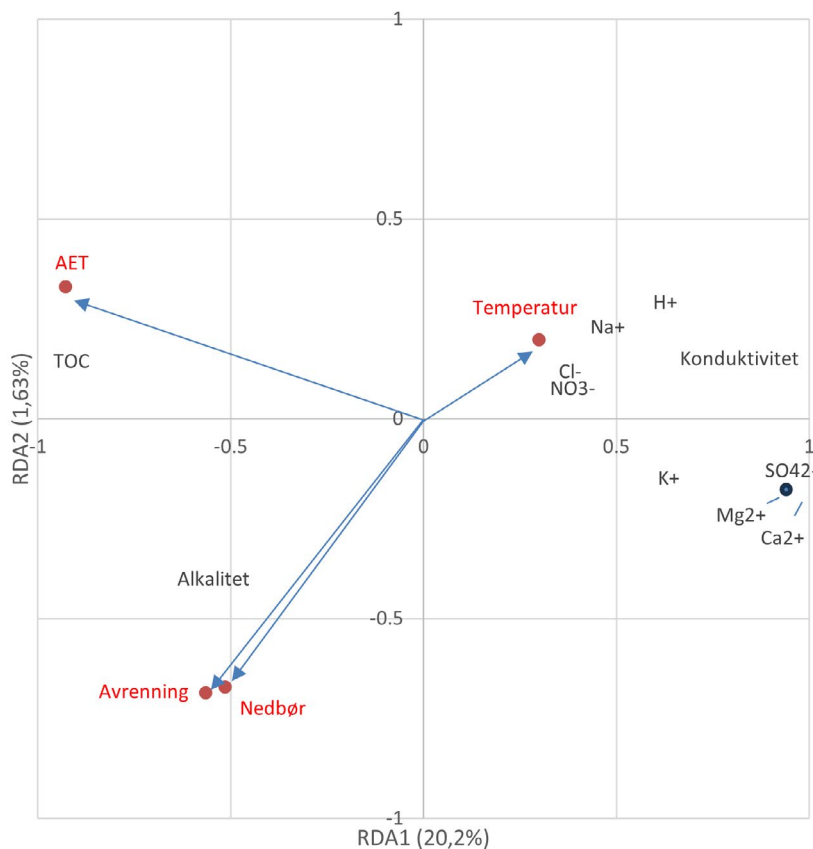
Figur 7. Tidstrender i endring av alkalitet korrelert med økning i nedbør (lyseblå sirkler) og avrenning (mørkeblå sirkler) for hele perioden. Kun resultater fra 19 innsjøer med signifikante Mann-Kendall-trender for avrenning og 15 innsjøer for nedbør (fylte sirkler) er inkludert i korrelasjonene.

RDA-modellen (Figur 8) er statistisk signifikant ($p < 0,001$), men kun AET og avrenning fremstår som signifikante forklaringsvariabler. Den andre RDA-aksen (RDA2) er derimot ikke

signifikant og forklarer kun 1,6 % av variasjonen. AET og avrenning viser sterk motsatt vektning til SO_4^{2-} langs den første RDA-aksen (RDA1), som forklarer 20 % av variasjonen.

RDA av trender i klima og vannkjemi

- Alle stasjoner for hele perioden



Figur 8. Biplot av redundansanalyse (RDA) med trender i klima som forklaringsparametere og trender i vannkjemi som responsparametere. Analysen inkluderer alle de 78 Tidstrendsjøene for hele perioden fra 1990 til 2020.

Dette kan indikere en synergistisk effekt av nedgangen i sur nedbør og økningen i AET og avrenning på vannkjemien, men det kan også bare reflektere geografisk samvariasjon, siden nedgangen i sur nedbør og økningen i AET og avrenning begge er størst i sør (Figur 3a og b). Selv om RDA-analysen ikke klarer å skille effektene av disse påvirkningsfaktorene, er det interessant å merke seg at økning i nedbør og avrenning ser ut til å ha en motsatt effekt på trender i vannkjemien sammenlignet med økning i temperatur.

At kjemitrendene i større grad forklares av nedgangen i sur nedbør enn av klimaendringer skyldes at innsjøene i svært ulik grad har vært påvirket av nedgang i sur nedbør. Perioden med betydelig reduksjon i sur nedbør styrer dermed mye av utviklingen i vannkjemien. Dette data-

settet er derfor mindre egnet til å skille effektene av klimaendringer og sur nedbør ved bruk av korrelasjonsanalyser og RDA.

Alle innsjøer for perioden med liten nedgang i sur nedbør

I perioden 2006 til 2020 har nedgangen i SO_4^{2-} - og NO_3^- -konsentrasjonene vært liten i de nordiske regionene (Vogt mfl., 2024a). Vogt og Skancke (2023) rapporterte også at nedgangen i SO_4^{2-} stagnerte i denne perioden. Gjennhentingen fra forsurende, med økning i pH, ANC og alkalitet, har begynt å flate ut siden 2006. Samtidig har klimaendringene økt i intensitet. Derfor er trenddata fra Tidstrendsjøene i denne perioden forventet å være mindre påvirket av sur nedbør og mer preget av klimaendringer.

I løpet av denne begrensede overvåkningsperioden på 15 år er det imidlertid færre signifikante tidstrender i vannkjemien, og forklaringsverdien av de empiriske korrelasjonene med klimaparametere er lavere. Parametere med 5 eller flere innsjøer med signifikante trender, samt korrelasjoner med klimaparametere som forklarer mer enn 10 % av variasjonen, er vurdert og presentert i Tabell 3.

Trender i SO_4^{2-} over den siste 15-årsperioden er fortsatt negativt korrelert med økningen i AET, samt med nedbør og temperatur. Dette skyldes sannsynligvis fremdeles samvariasjonen mellom nedgangen i sur nedbør og trendene i disse klimaparametere. I 5 innsjøer i Sør-Norge er det en sterk korrelasjon mellom økning i nedbør og økning i ANC (Tabell 3), sannsynligvis på grunn av samvariasjonen mellom økt nedbør og nedgang i sulfat, som begge er mest uttalt i sør (Figur 3a). Nedgangen i SO_4^{2-} er også sterkt negativt korrelert med økningen i TOC og Org.⁻ ($R^2 = 0,3413$ og $0,2593$), men ikke med H^+ . Derimot er økningen i AET negativt korrelert med

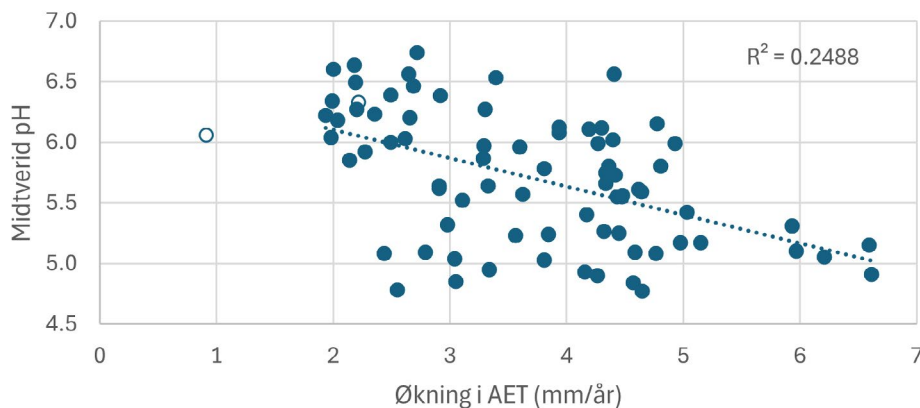
nedgangen i H^+ (Tabell 3), noe som viser at der økningen i AET er størst, er nedgangen i H^+ mest markant. Dette kan være knyttet til romlig samvariasjon mellom AET og forsuring, ettersom pH i innsjøene er negativt korrelert med økningen i AET ($R^2 = 0,2488$) (Figur 9). I innsjøer med pH under 5,5 protolyseres ikke karbonsyre, og den bidrar derfor ikke til å bufre nedgangen i H^+ . En større temperaturøkning har en positiv effekt på økende trender i Ca^{2+} og HCO_3^- (Tabell 3), noe som kan være relatert til økt biologisk aktivitet og mer forvitring, eller økt oppkonsentrering. Temperaturøkning er også en forklaringsvariabel for økt konduktivitet (Tabell 3).

Ved å fokusere på perioden med liten nedgang i sur nedbør (2006–2020), reduseres forklaringsverdien av nedgangen i sur nedbør noe i forhold til endringer i klimaparametere. Samtidig er det imidlertid færre og svakere trender i vannkjemien. Det er fortsatt utfordrende å identifisere rene effekter av klimaendringer, da disse også i dette datasettet samvarierer med nedgangen i sur nedbør. For å kartlegge forholdet mellom

Tabell 3. Korrelasjoner mellom signifikante Mann-Kendall-trender i klimaparametere og kjemiske parametere i 5 eller flere innsjøer, der korrelasjonene forklarer mer enn 10 % av variasjonen ($R^2 > 0,1$) mellom Sen's trender for perioden 2006 til 2020.

Klima parametere	Kjemiske parametere	Antall Mann-Kendall trender	Retning	R ²
AET	H^+	11	Negativ	0,3702
	Ca^{2+}	9		0,2452
	SO_4^{2-}	64		0,1696
	Cl ⁻	10	Positiv	0,7551
	K^+	10		0,3461
	Org. ⁻	24		0,1050
Avrenning	Org. ⁻	5	Positiv	0,9625
	TOC	5		0,1070
Nedbør	SO_4^{2-}	14	Negativ	0,2899
	NO_3^-	5	Positiv	0,9491
	ANC	5		0,8112
Temperatur	Ca^{2+}	8	Positiv	0,5307
	Konduktivitet	10		0,4819
	HCO_3^-	6		0,1802
	SO_4^{2-}	53		0,1404

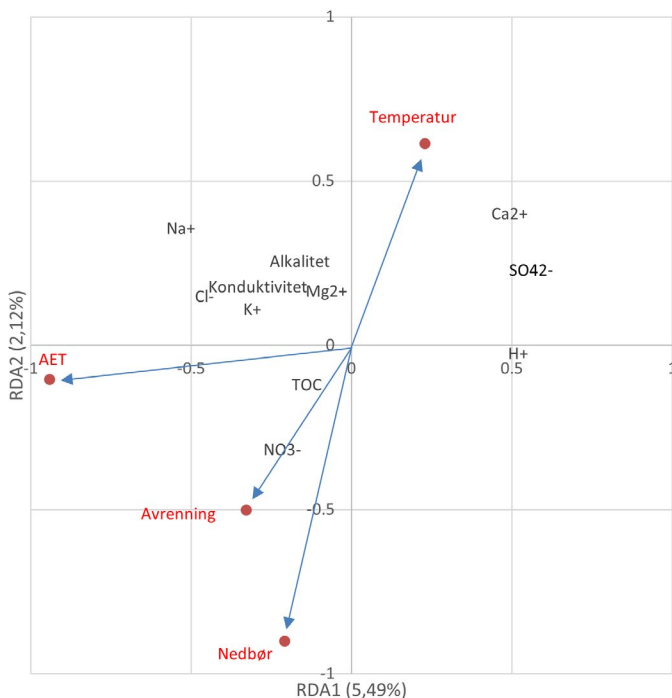
Alle innsjøer for perioden med liten nedgang i sur nedbør



Figur 9. Midtverdi for pH i innsjøer negativt korrelert med økning i AET (mørke blå sirkler) for alle innsjøene i perioden med liten nedgang i sur nedbør (2006–2020). Kun resultater fra 19 innsjøer med signifikante Mann-Kendall-trender for avrenning og 15 innsjøer for nedbør (fylte sirkler) er inkludert i korrelasjonene.

RDA av trender i klima og vannkjemi

- Alle innsjøer for perioden med liten nedgang i sur nedbør



Figur 10. Biplot av redundansanalyse (RDA) som viser trender i klima fra 1990 til 2020 som forklaringsvariabler, og trender i vannkjemidata fra 2006 til 2020 som responsvariabler, for alle de 78 Tidstrendsjøene.

trender i klimaparametere som forklaringsvariabler og trender i kjemiske parametere som responsvariabler, er en RDA-analyse igjen benyttet på klima- og vannkjemitrendene.

RDA-modellen for perioden 2006–2020 er mindre signifikant ($p < 0,1$) enn modellen basert på 30-årige trender, og AET er den eneste signifikante klimaforklaringsvariabelen ($p < 0,01$).

RDA1 forklarer kun 5,49 % av variansen, men er signifikant ($p < 0,05$). Som forventet har klimaendringer en sterkere forklaringsverdi for trender i vannkjemien i dette kortere tidsintervallet. AET spiller en mer dominerende rolle som forklaringsvariabel ($-0,94$), mens vektningen av SO_4^{2-} er nesten halvert ($0,56$) sammenlignet med hele perioden ($0,95$). TOC og alkalitet har imidlertid lav vektning langs RDA1, som betyr at endringen i klima har liten forklaringsverdi, til tross for den begrensede endringen i sur nedbøravsetning.

Ved å fokusere på perioden med liten nedgang i sur nedbør viser økende AET og avrenning en svak, men signifikant, forklaringsverdi for positive trender i Org.⁻ (Tabell 3). Økning i nedbør og temperatur ser også ut til å ha en positiv effekt på økningen i henholdsvis ANC og bikarbonat. Det er imidlertid fortsatt vanskelig å skille effekten av klimaendringer fra effekten av nedgangen i SO_4^{2-} på økningen i alkalitet og TOC i RDA-modellen (Figur 10). Igjen ser vi en ikke-signifikant indikasjon på at økning i nedbør og avrenning kan ha en motsatt effekt av temperaturøkning på trender i vannkjemien.

Kun innsjøer som har minst nedgang i sur nedbør

For å studere effektene av klimatrender på vannkjemi, der påvirkningen fra sur nedbør er minimal, kan man i stedet fokusere på den halvparten av Tidstrendsjøene som er minst påvirket

av nedgangen i sur nedbør. Dette inkluderer de 39 innsjøene med lavest Sen's trend for SO_4^{2-} ($> -1,096 \mu\text{ekv/L/år}$), og som ligger over streken i Figur 3a. Imidlertid er det svært få innsjøer med signifikante trender for nedbør (4) og avrenning (6), mens det er flere signifikante trender for AET (38) og temperatur (30) (Tabell 4). Dette skyldes at disse innsjøene hovedsakelig ligger i Vest-, Midt- og Nord-Norge, hvor økningen i nedbør og avrenning har vært mindre enn i Øst- og Sørlandet (jf. Tabell 1 og Tabell 4).

Parametere med 5 eller flere innsjøer med signifikante trender, samt korrelasjoner med klimavariabler som forklarer mer enn 10 % av variasjonen i vannkjemitrender, er vurdert i denne analysen og inkludert i Tabell 5. Korrelasjonene mellom trender i klimavariabler som forklaringsvariabler og trender i kjemiparametere som responsvariabler er svært få blant stasjonene, spesielt for nedbør og avrenning, siden det er et begrenset antall innsjøer med signifikante trender (Tabell 4).

Nedgangen i sulfat er kun korrelert med trender i avrenning. Blant de seks innsjøene med signifikante avrenningstrender (Tabell 4) viser data at de største økningene i avrenning er korrelert med størst nedgang i sulfat og økning i ANC og alkalitet. Dette kan fremdeles skyldes samvariasjonen mellom økt avrenning og nedgang i sulfat, som er mest uttalt i sør (Figur 3a). For de andre klimaparametrene ser denne tilnærmingen imidlertid ut til å være mer egnet

Tabell 4. Statistiske verdier for Sen's trender i klimaparametere fra 1990 til 2020 for de 39 Tidstrendsjøene med de minste Sen's trender for SO_4^{2-} ($> -1,096 \mu\text{ekv/L/år}$), og kun for innsjøer med signifikante Mann-Kendall-trender.

Parameter	Enhet	Antall	Minimum	Maksimum	Median	Gjennomsnitt
AET	mm/år	39	0,9124	4,805	2,979	3,150
Nedbør	mm/år	39	-25,51	23,92	2,500	3,427
Avrenning	mm/år	39	-28,72	39,32	2,022	1,143
Temperatur	°C/år	39	0,0042	0,0909	0,0386	0,0395
Kun innsjøer med signifikante Mann-Kendall trender						
AET	mm/år	38	0,9124	4,805	3,043	3,174
Nedbør	mm/år	4	7,513	16,44	11,26	11,62
Avrenning	mm/år	6	-21,21	25,98	6,482	2,462
Temperatur	°C/år	30	0,0236	0,0909	0,0451	0,0460

Tabell 5. Korrelasjoner mellom signifikante Mann-Kendall trender i klimaparametere og i kjemiske parametere i 5 eller flere innsjøer, der korrelasjonene forklarer mer enn 10 % av variasjonen ($R^2 > 0,1$) mellom Sen's trender, for den halvdel av innsjøer med de laveste Sen's trender for SO_4^{2-} for hele perioden fra 1990 til 2020.

Klima parametere	Kjemiske parametere	Antall Mann-Kendall trender	Retning	R^2
AET	Mg^{2+}	10	Negativ	0,2906
	Ca^{2+}	16		0,2236
	HCO_3^-	29		0,1590
	H^+	28		0,1426
Avrenning	SO_4^{2-}	6	Negativ	0,3214
	ANC	5	Positiv	0,1704
	Alkalitet	6		0,4612
Temperatur	Ca^{2+}	14	Negativ	0,3426

for å studere effektene av klimaendringer på trender i vannkjemi, uten betydelig interferens fra nedgangen i sur nedbør. Trender i AET er på disse stasjonene negativt korrelert med trender i divalente basekationer (Ca^{2+} og Mg^{2+}) og bikarbonat (Tabell 5). Økt skogsbiomasse kan føre til økt lagring av basekationer. Hvis forskjeller i AET reflekterer forskjeller i biomasseøkning, kan dette forklare korrelasjonen med nedgangen i Ca^{2+} og Mg^{2+} . Hvis AET var en indikator på økt forvitring, ville man imidlertid forventet en positiv korrelasjon med bikarbonat.

En RDA av disse dataene er ikke signifikant ($Pr(>F) = 0,275$), noe som indikerer at klimaendringer ikke har en signifikant forklaringsverdi for endringer i vannkjemi.

Kun innsjøer og perioden med minst nedgang i sur nedbør

Effekten av nedgangen i sur nedbør på vannkjemien er dominerende, både i det samlede datasettet og i perioden med lav nedgang (2006–2020). I datasettet med halvparten av stasjonene som har hatt minst nedgang i sulfatdeposisjon er de negative trendene i sulfat negativt korrelert med økningen i avrenning. Dette gjør det vanskelig å skille effekten av nedgangen i sur nedbør fra effekten av endrede vannveier og fortykning. Dette indikerer at korrelasjonsanalyser og RDA krever et enda større fokus på innsjøene som er minst påvirket av sur nedbør. Vi retter derfor til slutt oppmerksomheten kun

mot den halvparten av innsjøene med minst nedgang i sur nedbør, hvor vi ser kun på perioden med lavest nedgang i sur nedbør.

I dette noe begrensede datasett finner vi en positiv korrelasjon mellom trender i AET og sulfat (Tabell 6). Dette antyder at samvariasjonen ikke lenger skyldes geografisk overlapp mellom nedgangen i sur nedbør, noe som indikerer at nedgangen i sur nedbør ikke er en viktig forklaringsvariabel for endringer i vannkjemi i dette datasettet. Endringene i AET er korrelert med flere vannkjemiske trender (Tabell 6), men med unntak av sulfat og nitrat er korrelasjonene basert på et begrenset antall innsjøer med signifikante trender. Det er en signifikant negativ korrelasjon mellom økende AET og trender i bikarbonat og organiske anioner. Dette er i motsetning til forventningen om at AET, som en indikator på lengre vekstsesong og økt biomasse, ville føre til økt DNOM og rotrespirasjon og dermed mer Org. og HCO_3^- fra forvitring. Konsentrasjonene av TOC er lave og endringene små (gjennomsnittlig 1,4 mg C/L og 0,02 mg C/L/år) i disse innsjøene, så det er hovedsakelig økningen i bikarbonat som styrer trendene i alkalitet og ANC (Vogt mfl., 2024a). Økt temperatur forventes å øke respirasjonen, med økte bikarbonatkonsentrasjoner fra forvitring som den viktigste bidragsyteren til alkalitet og ANC. Imidlertid er temperaturøkningen negativt korrelert med både alkalitet og bikarbonat. Derimot finner vi at både AET og temperatur er

Tabell 6. Korrelasjoner mellom signifikante Mann-Kendall trender i klimaparametere og i kjemiske parametere i 5 eller flere innsjøer, der korrelasjonene forklarer mer enn 10 % av variasjonen ($R^2 > 0,1$) mellom Sen's trender, for den halvdelen av innsjøer med de laveste Sen's trender for SO_4^{2-} for perioden fra 2006 til 2020.

Klima parametere	Kjemiske parametere	Antall Mann-Kendall trender	Retning	R ²
AET	NO ₃ ⁻	17	Negativ	0,2441
	HCO ₃ ⁻	5		0,1281
	Org. ⁻	9		0,1069
	Cl ⁻	6	Positiv	0,5451
	Konduktivitet	7		0,4815
	H ⁺	5		0,2231
	TOT-N	5		0,2107
	SO ₄ ²⁻	30		0,1403
Temperatur	Alkalitet	18	Negativ	0,1478
	ANC	11		0,1336
	NO ₃ ⁻	16		0,1252
	Konduktivitet	5	Positiv	0,8532
	TOT-N	5		0,2955

positivt korrelert med konduktivitet, sannsynligvis på grunn av økt oppkonsentrering, siden signifikante endringer i nedbør bare ble observert i 4 innsjøer (Tabell 4). Dette støttes av korrelasjonen mellom økende trender i AET og Cl⁻, som fungerer som en konservativ tracer.

RDA-modellen for dette datasettet, som er renset for effektene av nedgangen i sur nedbør, men også har begrensede klimaendringer, er ikke signifikant med en p-verdi på Pr(>F) = 0,275.

Konklusjon

Ifølge klimadataene har det vært en signifikant økning i temperatur og AET i nesten alle de studerte innsjøene, mens kun et begrenset antall innsjøer viser signifikante endringer i nedbør og avrenning. Analysen avdekker imidlertid store avvik mellom modellert og beregnet AET, noe som skaper usikkerhet rundt påliteligheten av disse klimadataene.

Utvalget av tidstrenddata for den statistiske analysen av klimaeffekter på vannkjemitrender innebærer en avveining mellom sterk påvirkning fra sur nedbør og redusert signifikans på grunn av begrenset datagrunnlag. Kun i det mest begrensede datasettet, med kjemitrender

fra stasjoner som er lite påvirket av sur nedbør og fra perioden med lavest nedgang i sur nedbør, dominerte klimaendringene i de statistiske korrelasjonsanalysene.

Dette studiet viser at effekten av økende trender i nedbør, avrenning, temperatur og AET på vannkjemitrender fortsatt er relativt svak sammenlignet med effekten av nedgangen i sur nedbør. Ved bruk av RDA ser vi imidlertid en svak indikasjon på at økningen i nedbør og avrenning har en motsatt effekt av temperaturøkningen på vannkjemitrender.

Svaret på om det er enkelt å skille effektene av klimaendringer og nedgangen i sur nedbør på vannkjemitrender i dette datasettet er derfor nei. Det finnes imidlertid faglige grunner til å anta at det skal være mulig i en mer inngående studie ved bruk av avanserte statistiske metoder.

Anbefalinger for videre studier

Som beskrevet i innledningen, finnes det sterke faglige argumenter for at klimaendringer har betydelige effekter på vannkjemien. Direkte korrelasjonsanalyser og redundansanalyser ga imidlertid ikke tilstrekkelig empirisk grunnlag for å skille mellom effektene av klimaendringer

og nedgang i sur nedbør i de undersøkte innsjøene. Det anbefales derfor først å bruke statistiske metoder for å isolere effekten av nedgangen i sur nedbør. Som supplement kan prosessorienterte modeller, som MAGIC (Cosby mfl. 2001), benyttes. Deretter kan effektene av klimatrender undersøkes på de gjenværende trendene i vannkjemien.

Det er sannsynlig at en mer inngående statistisk analyse kan skille effektene av klimatrender på vannkjemitrender. I videre studier anbefales det derfor å teste generaliserte lineære blandede modeller (GLMM), best mulige delmengde-modellering (*Best subsets modeling*), samt maskinlæringsmodellen Random Forest.

GLMM (Generaliserte lineære blandede modeller) kombinerer to statistiske rammeverk: lineære blandede modeller (som inkluderer tilfeldige effekter) og generaliserte lineære modeller (som håndterer ikke-normalfordelte data). GLMM utvider tradisjonelle lineære modeller ved å modellere forholdet mellom en responsvariabel og én eller flere forklaringsvariabler, selv når responsvariabelen ikke følger en normalfordeling (f.eks. binomial, Poisson). Samtidig inkluderer GLMM tilfeldige effekter for å håndtere gruppering eller hierarkiske strukturer i dataene, som gjentatte målinger. Forskjellen fra vanlige lineære modeller er at GLMM kan håndtere både ikke-normalfordelte data og hierarkiske eller gjentatte målinger ved bruk av tilfeldige effekter.

Best subsets modeling tester alle mulige kombinasjoner av prediktorvariabler og genererer en liste over de «beste» modellene basert på statistiske kriterier som Akaikes informasjonskriterium (AIC), som balanserer mellom modellens tilpasningsgrad og enkelhet. I motsetning til stegvis tilnærming, undersøker denne metoden hver mulig modellkombinasjon for å identifisere de mest optimale modellene. Videre dataanalyser kan evaluere bidraget fra ulike forklaringsvariabler ved å sammenligne modeller basert på kriterier som AIC, Bayesiansk informasjonskriterium (BIC) eller justert R^2 , noe som gir innsikt i hvilke variabler som har størst forklaringskraft.

Random Forest er en maskinlæringsmodell bestående av en samling beslutningstrær, brukt både til klassifikasjons- og regresjonsoppgaver. Hvert tre trenes på en tilfeldig prøve av dataene (med tilbakelegging, kjent som "bagging"), og på hvert nivå i treet velges et tilfeldig utvalg av variabler for splitting. Dette reduserer korrelasjonen mellom trærne og forbedrer modellens generaliseringsevne. Random Forest kombinerer prediksjonene fra alle trærne for å øke nøyaktighet og robusthet sammenlignet med individuelle beslutningstrær. Modellen kan også estimere betydningen av ulike forklaringsvariabler, som nedgang i sur nedbør og klima, ved å måle hvordan modellens nøyaktighet påvirkes når disse variablenes verdier forstyrres eller fjernes.

Takk

Studiet er finansiert av Miljødirektoratet (21087345) med litt skrivestøtte fra Norges Forskningsråd (342628/L10 og 323945).

Litteratur

Appelo, C.A.J., Postma, D., 2005. *Geochemistry, groundwater and pollution*. A.A. Balkema Publishers.

Christophersen N., Neal C., Hooper R.P., Vogt R.D., Andersen S. 1990a. Modelling streamwater chemistry as a mixture of soilwater end-members — A step towards second-generation acidification models, *Journal of Hydrology* 116(1):307-20.

Christophersen, N., Vogt, R. D., Neal, C., Anderson, H. A., Ferrier, R. C., Miller, J. D., Seip, H. M. 1990b. Controlling mechanisms for stream water chemistry at the pristine Ingabekken site in mid-Norway: some implications for acidification models [10.1029/WR026i001p00059]. *Water Resour. Res.*, 26(1), 59-67

Cosby, B. J., Ferrier, R. C., Jenkins, A., & Wright, R. F. 2001. Modelling the effects of acid deposition: refinements, adjustments and inclusion of nitrogen dynamics in the MAGIC model. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 5(3), 499-518. DOI: 10.5194/hess-5-499-2001

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, Bryn A, Hofgaard A, Karstensen J, Kvalevåg M.M, Peters G.P. 2014. Climate warming feedback from mountain birch forest expansion: reduced albedo dominates carbon uptake, *Glob Chang Biol.* 20(7): 2344-55, 12483. DOI: 10.1111/gcb
- De Wit, H.A., Garmo, Ø.A., Jackson-Blake, L., Clayer, F., Vogt, R.D., Kaste, Ø., Gundersen, C.B., Guerrero, J.L., Hindar, A. 2023. Changing Water Chemistry in One Thousand Norwegian Lakes During Three Decades of Cleaner Air and Climate Change. *Glob. Biogeochem. Cycles* 37, e2022GB007509. DOI: 10.1029/2022GB007509
- De Wit H.A., Palosuo T., Hysten G., Liski J. 2006. A carbon budget of forest biomass and soils in southeast Norway calculated using a widely applicable method, *Forest Ecology and Management* 225(1):15-26.
- De Wit, H. A., Valinia, S., Weyhenmeyer, G. A., Futter, M. N., Kortelainen, P., Austnes, K., Hessen, D. O., Råike, A., Laudon, H., 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
- Drever, J. I., Stillings, L. L. 1997. The role of organic acids in mineral weathering. *Colloids and Surfaces A-Physico-chemical and Engineering Aspects*, 120(1-3), 167-181, DOI: 10.1016/S0927-7757(96)03720-x
- Easthouse, K. B., Mulder, J., Christophersen, N., Seip, H. M. (1992). Dissolved organic carbon fractions in soil and stream water during variable hydrological conditions at Birkenes, southern Norway [10.1029/92WR00056]. *Water Resour. Res.*, 28(6), 1585-1596. DOI: 10.1029/92WR00056
- Finstad, A. G., Andersen, T., Larsen, S., Tominaga, K., Blumentrath, S., De Wit, H. A., Tømmervik, H., 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. *Scientific reports*, 6(1), 31944. DOI: 10.1038/srep31944
- Hanssen-Bauer, I., Forland, E., Haddeland, I., Hisdal, H., Lawrence, D., Mayer, S., mfl. 2017. Climate in Norway 2100—a knowledge base for climate adaptation. NCCS report, 1.
- Hessen, D. O., Andersen, T., Larsen, S., Skjelkvale, B. L., de Wit, H. A. 2009. Nitrogen deposition, catchment productivity, and climate as determinants of lake stoichiometry, *Limnology & Oceanography*, 54(6), 2520-2528. DOI: 10.4319/lo,2009,54,6_part_2,2520
- Högberg, P., Nordgren, A., Buchmann, N., Taylor, A. F. S., Ekblad, A., Hogberg, M, N., mfl. 2001. Large-scale forest girdling shows that photosynthesis drives soil respiration, *Nature* 411(6839), 749-752.
- Humborg, C., Smedberg, E., Blomqvist, S., Morth, C. M., Brink, J., Rahm, L., mfl. 2004. Nutrient variations in boreal and subarctic Swedish rivers: Landscape control of land-sea fluxes, *Limnology & Oceanography*, 49(5), 1871-1883. DOI: 10.4319/lo,2004,49,5,1871
- Jungqvist, G., Oni, S.K., Teutschbein, C. and Futter, M.N., 2014. Effect of climate change on soil temperature in Swedish boreal forests. *PLoS one*, 9(4), p.e93957.
- Karlton, E., Stendahl, J., Iwald, J. and Löfgren, S., 2022. Forest biomass accumulation is an important source of acidity to forest soils: Data from Swedish inventories of forests and soils 1955 to 2010. *Ambio*, 51(1), pp.199-208.
- Kendall, M.G., 1975. Rank correlation methods. 4th edition, Charles Griffin, London.
- Kritzberg, E. S., Hasselquist, E.M., Škerlep, M., Löfgren, S., Olsson, O., Stadmark, J., Valinia, S., Hansson, L-A., Laudon, H. 2020. Browning of freshwaters: Consequences to ecosystem services, underlying drivers, and potential mitigation measures. *Ambio* 49, 375-390. DOI: 10.1007/s13280-019-01227-5
- Kronnäs, V., Lucander, K., Zanchi, G., Stadlinger, N., Belyazid, S. and Akselsson, C., 2023. Effect of droughts and climate change on future soil weathering rates in Sweden. *Biogeosciences*, 20(10), 365 pp.1879-1899.
- Lutz, J., Hanssen-Bauer, I., Einar, O. 2024. Precipitation variability in Norway 1961-2020. Norwegian Meteorological Institute. METreport 1, ISSN 2387-4201
- Madsen, H., Lawrence, D., Lang, M., Martinkova, M., Kjeldsen, T.R. 2014. Review of trend analysis and climate change projections of extreme precipitation and floods in Europe. *J. Hydrol.* 519, 3634-3650. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2014.11.003
- Mann, H.B., 1945. Nonparametric tests against trend. *Econometrica: Journal of the Econometric Society*, pp.245-259.
- Monteith, D.T., Henrys, P.A., Hruška, J., de Wit, H.A., Krám, P., Moldan, F., Posch, M., Råike, A., Stoddard, J.L., Shilland, E.M. mfl. 2023. Long-term rise in riverine dissolved organic carbon concentration is predicted by electrolyte solubility theory. *Sci. Adv.* 9, eade3491. DOI:10.1126/sciadv.ade3491
- Nikulin, G., Kjellström, E., Hansson, U., Strandberg, G., Ullerstig, A. 2011. Evaluation and future projections of temperature, precipitation and wind extremes over Europe in an ensemble of regional climate simulations. *Tellus A: Dynamic Meteorology and Oceanography* 63(1), 41-55. DOI: 10.1111/j.1600-0870.2010.00466.x

- Park, T., Ganguly, S., Tømmervik, H., Euskirchen, E.S., Høgda, K.A., Karlsen, S.R., Brovkin, V., Nemani, R.R. and Myneni, R.B., 2016. Changes in growing season duration and productivity of northern vegetation inferred from long-term remote sensing data. *Environmental Research Letters*, 11(8), p.084001.
- Piao, S., Wang, X., Park, T., Chen, C., Lian, X.U., He, Y., Bjerke, J.W., Chen, A., Ciais, P., Tømmervik, H. and Nemani, R.R., 2020. Characteristics, drivers and feedbacks of global greening. *Nature Reviews Earth & Environment*, 1(1), pp.14-27.
- Schartau, A.K., Birkeland, I.B., Bodin, C.L., Garmo, Ø., Lie, E.F., Saksgård, R., mfl. 2020. Forsuringstilstand og trender i norske innsjøer og elver med biologisk overvåking. Miljødirektoratet. Overvåkningsrapport M-1823 - 2020.
- Sen, P. K., Estimates of the Regression Coefficient Based on Kendall's Tau. *Journal of the American Statistical Association* 1968, 63, (324), 1379-1389.
- Skaugen T., Onof, C. 2014. A rainfall runoff model parameterized from GIS and runoff data. *Hydrological Processes*. 28, 4529-4542, DOI: 10.1002/hyp.9968
- Sponseller, R. A., Gundale, M. J., Futter, M., Ring, E., Nordin, A., Näsholm, T., Laudon, H. 2016. Nitrogen dynamics in managed boreal forests: Recent advances and future research directions. *Ambio*, 45, 175-187
- Sælthun N.R. 1996. The "Nordic" HBV Model. Description and Documentation of the Model Version Developed for the Project Climate Change and Energy Production. NVE Publication no. 7-1996: Oslo, 26 pp
- van Scholl, L., Kuyper, T. W., Smits, M. M., Landeweert, R., Hoffland, E., van Breemen, N. 2008. Rock-eating mycorrhizas: Their role in plant nutrition and biogeochemical cycles, *Plant and Soil*, 303(1-2), 35-47. DOI: 10.1007/s11104-007-9513-0
- Vogt R.D., Agnieszka K., Arle J., Austnes K., Van Dam H., Futter M., mfl. 2024a. Trends and patterns in surface water chemistry in Europe and North America between 1990 and 2020, with a focus on calcium. Rapport. Oslo, Norway: Norsk Institutt for Vannforskning. 01.2024. Report No.: ICP Waters Report 156/2024.
- Vogt R. D., de Wit H., Koponen K., 2022. Case study on impacts of large-scale re-/afforestation on ecosystem services in Nordic regions, Rapport, negemproject.eu.
- Vogt, R.D., Garmo, Ø.A., Austnes, K., Kaste, Ø., Haaland, S.L., Sample, J.E., mfl. 2024b. Factors Governing Site and Charge Density of Dissolved Natural Organic Matter. *Water* 16(12), 1716. DOI: 10.3390/w16121716
- Vogt R.D., Garmo Ø.A., Schartau A.K., Haaland S.L. 2023. Metoder for beregning av vannets syrenøytraliserende kapasitet (ANC) for klassifisering av forsuringstilstand, *Vann* 02(58):105-17.
- Vogt, R. D., og Muniz, I. P. 1997. Soil and stream water chemistry in a pristine and boggy site in mid-Norway. *Hydrobiologia*, 348, 19-38. DOI: 10.1023/a:1003029031653
- Vogt R.D., Skancke L.B. 2023. Overvåking av langtransportert forurenset luft og nedbør. Årsrapport – Vannkjemiske effekter 2022. Rapport. Miljødirektoratet.
- Zhang, Y., Ma, N., Park, H., Walsh, J.E., Zhang, K. 2021. Evaporation Processes and Changes Over the Northern Regions. In: Yang, D., Kane, D.L. (eds) *Arctic Hydrology, Permafrost and Ecosystems*. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-50930-9_4