

Heidi Rian

KJ2900 Bachelorprosjekt i kjemi

Hvordan vil økt vannmengde i arktiske elvesystemer påvirke de kjemiske prosessene og hvilke hovedkonsekvenser vil det ha for økosystemet?

Bacheloroppgave i Kjemi
Veileder: Øyvind Mikkelsen
April 2023

Heidi Rian

KJ2900 Bachelorprosjekt i kjemi

Hvordan vil økt vannmengde i arktiske elvesystemer påvirke de kjemiske prosessene og hvilke hovedkonsekvenser vil det ha for økosystemet?

Bacheloroppgave i Kjemi
Veileder: Øyvind Mikkelsen
April 2023

Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet
Fakultet for naturvitenskap
Institutt for kjemi



Kunnskap for en bedre verden

Sammendrag

I denne oppgaven blir det sett på de kjemiske prosessene; kjemisk forvitring av overflatebergarter i nedbørsfeltet, kompleksdannelse av metaller, utvasking av organisk materiale og økt tilførsel av utvalgte tungmetaller fra antropogene kilder i elvesystemer på Svalbard. I tillegg blir det sett på hvordan disse kan endres ved en økning i vannmengden grunnet globale klimaendringer. Det blir tatt utgangspunkt i Bayelva på Svalbard. De litterære funnene tyder på at en økning i vannmengdene kan føre til en økning i organisk og uorganisk materiale i elva, som kan gi konsekvenser for fjordsystemene og de kjemiske forholdene i Bayelva. Det kan på bakgrunn av økningen av vannmengdene også forventes en økning i kompleksdannelse mellom det organiske materialet, som humus, og det uorganiske materialet, som metaller og tungmetaller. Økt biotilgjengelig toksiske metaller forventes å føre til negative konsekvenser for det biologiske mangfoldet på Svalbard og gi endringer i økosystemets balanse.

Abstract

In this assignment, the following chemical processes are examined: chemical weathering of surface rocks in the catchment area, complexation of metals, leaching of organic material, and increased input of selected heavy metals from anthropogenic sources in river systems in Svalbard. In addition, the examination is focused on how these processes may change with an increase in water volume due to global climate changes. The study is based on Bayelva in Svalbard. Literature findings suggest that an increase in water volume may lead to an increase in organic and inorganic material in the river, which can have consequences for the fjord systems and the chemical conditions in Bayelva. It can also be expected that the increase in water volume will lead to an increase in complexation between the organic material, such as humus, and the inorganic material, such as metals and heavy metals. The increased bioavailable toxic metals are expected to have negative consequences for the biological diversity in Svalbard and can cause changes in the balance of the ecosystem.

Innhold

Sammendrag	I
1 Introduksjon	1
2 Teori	2
2.1 Tilstedeværelse av uorganisk materiale	2
2.1.1 Tungmetaller i Arktis	2
2.1.2 Kjemisk forvitring av overflatebergarter	2
2.1.3 Speciering av metaller	4
2.2 Tilstedeværelse av organisk materiale	5
2.2.1 Kilder til organisk materiale	5
2.2.2 Kjemisk komposisjon av organisk materiale og reaksjoner med metaller	6
3 Diskusjon	7
3.1 Kraftigere og hyppigere nedbørshendelser i Arktis	7
3.1.1 Utvasking av organisk materiale fra jordsmonnet i nedbørsfeltet til Bayelva	7
3.1.2 Oppløsning av mineraler fra morsbergarter i Bayelva	8
3.2 Økt temperatur i Arktis	8
3.2.1 Økt konsentrasjon av tungmetaller som følge av smelting av isbreer og permafrost	9
3.2.2 Fremtidig lengre sommersesong på Svalbard og økt vanntemperatur i arktiske elver	9
3.3 Kan faktorene utligne hverandre?	10
4 Konklusjon	11
Referanser	14

1 Introduksjon

Den kjemiske sammensetningen i elver varierer i stor grad og påvirkes av en rekke faktorer, som geografiske forutsetninger, vannressursbalansen og antropogen forurensning, i tillegg til geologien og vegetasjonsutbredelsen i nedbørsfeltet til elva. Elver i Arktis, som Bayelva, skiller seg fra andre elvesystemer ved at de er blant de mest urørte økosystemene i verden. Endringer her kan derfor være en god indikator på klimaendringer i resten av verden.

De siste årene har det blitt observert en økning i vannmengder i arktiske elver (Hodson mfl. 2002). I perioden mellom 1971 og 2017 har gjennomsnittstemperaturen på Svalbard økt med omtrent 4 °C, noe som er betydelig høyere enn økningen i den globale gjennomsnittstemperaturen (0,83 °C) i samme tidsrom. Temperaturøkningen kan føre til økt smelting av krytosfæren, som er den frosne delen av jordoverflata, der vann finnes i fast form i form av for eksempel snødekke, isbreer og permafrost. I tillegg predikeres et fremtidig klima med kraftigere og hyppigere nedbørshendelser grunnet globale klimaendringer (Hanssen-Bauer mfl. 2019). Med utgangspunkt i disse to endringene blir det i denne oppgaven sett på hvordan de organiske og uorganiske forholdene i elvesystemer på Svalbard kan endre seg i framtiden. Det blir tatt utgangspunkt i Bayelva, som ligger nord-vest på Svalbard, og renner ut i Kongsfjorden nær Ny-Ålesund. I oppgaven blir det sett på endringer i prosesser som påvirker de uorganiske forholdene, som kjemisk forvitring av moderbergarter i nedbørsfeltet, og tilførsel i elveløpet av fire utvalgte tungmetaller som resultat av smelting av krytosfæren. Endringer i prosesser som påvirker de organiske forholdene som blir sett på i oppgaven er økt utvasking av organisk materiale og vekst i vegetasjon i nedbørsfeltet, som kan føre til ytterligere økt utvasking av organisk materiale. Effekten av tilstedeværelse av de kjemiske komponentene blir vurdert, og mulige reaksjoner mellom metaller og organisk materiale blir sett på. Sannsynlige utfall for ulike kjemiske reaksjoner blir vurdert basert på teori om kjemisk forvitring av overflatebergarter i nedbørsfeltet, kompleksdannelse av metaller, utvasking av organisk materiale og økt tilførsel av utvalgte tungmetaller fra antropogene kilder i Bayelva. I tillegg blir det sett på hvilke konsekvenser disse endringene kan ha, og sannsynligheten av dem.

Akvatisk kjemi er svært kompleks, og det er mange ulike kjemiske og fysiske faktorene som påvirker vannkjemi. Derfor er det enkelte kjemiske prosesser og faktorer som ikke blir inkludert i denne oppgaven. Det blir for eksempel ikke fokusert på adsorpsjon og redoksprosesser, selv om dette er sentralt innenfor fagfeltet. Påvirkning av temperatur og pH på de kjemiske reaksjonene er også mer komplekse enn de blir beskrevet i denne oppgaven. I oppgaven har det blitt valgt å fokusere på kjemiske prosesser som kompleksdannelse og kjemisk forvitring. Det vil også være interessant på sikt å inkludere adsorpsjon og mer komplekse følger av endring i pH og temperatur i den helhetlige vurderingen av vannkjemien, men av hensyn til oppgavens omfang har de blitt utelukket i denne oppgaven.

2 Teori

2.1 Tilstedeværelse av uorganisk materiale

Uorganisk materiale kan forekomme i elver både fra antropogene og naturlige kilder. I denne oppgaven blir det hovedsakelig sett på transport av tungmetaller til Arktis som antropogene kilder og kjemisk forvitring som naturlige kilder. Metaller kan forekomme i ulike faser og kjemisk bundet til andre stoffer. Dette kan påvirke metalllets tilgjengelighet, som blir sett på i dette kapittelet.

2.1.1 Tungmetaller i Arktis

Det er ikke noen formell definisjon av tungmetaller, men de angis vanligvis som grunnstoffer med tetthet større enn 5 g/cm^3 , eller som et toksisk metall (Sarkar 2002; Singh mfl. 2011). De siste årene har det vært økende bekymring rundt tungmetallene på grunn av deres toksiske egenskaper, selv ved lave konsentrasjoner. For noen tungmetaller, som kvikksølv, vil inntak av selv små doser være svært farlige. Samtidig er noen av dem, i små mengder, helt essensielle for dyr, mennesker og planter (Sarkar 2002). Jern er for eksempel et av metallene som er essensielle, og det kreves svært høye konsentrasjoner for å gi en toksisk effekt. Innenfor feltene naturmiljøkjemi og økotoksikologi er tungmetallene svært viktige, og det er vanlig å se på forurensing og påvirkningen av økosystemet forbundet med disse, særlig i sensitive samfunn. I 2020 kom World Health Organisation ut med en liste på ti kjemiske stoffer som er av stor bekymring for folkehelsen i verden. Blant disse er bly, kvikksølv og kadmium (WHO 2020). I denne oppgaven skal jeg derfor ta for meg disse tre tungmetallene fra antropogene kilder.

Det finnes både antropogene og naturlige kilder til forekomst av tungmetaller i arktiske elvesystemer. Antropogene kilder kan for eksempel være utslipp fra metallindustri eller forbrenning av fossilt brensel fra sørligere breddegrader, som blir kondensert på små partikler i atmosfæren og videre blir transportert med atmosfæriske transportveier. Deretter avsettes de i nedbørsfeltet til elvene bundet til nedbør (Chapman 2021). Dette kan være både våt og tørr avsetning med partikler, gasser og kjemiske forbindelser som har blitt løst i vann, og som avsettes som regn og snø. På Svalbard er direkte avsetning av partikulært materiale og gasser i atmosfæren mest vanlig (Chapman 2021). Naturlige kilder til tungmetaller kan være erosjon, forvitring, vulkanutbrudd eller skogbrann. Både antropogene og naturlige kilder er betydelige, men mengden fra antropogene kilder har fremstått som bekymringsverdig de siste tiårene. Mye tyder, ifølge Arctic Monitoring and Assessment Programme, på at antropogene aktiviteter tilfører tungmetaller til naturmiljøet i betydelig høyere rater enn naturlige prosesser gjør, med mulig unntak av områder med påvirkning av vulkanske kilder (AMAP 1997). Det strides likevel noe blant forskere om disse påstandene, særlig angående kvikksølv.

2.1.2 Kjemisk forvitring av overflatebergarter

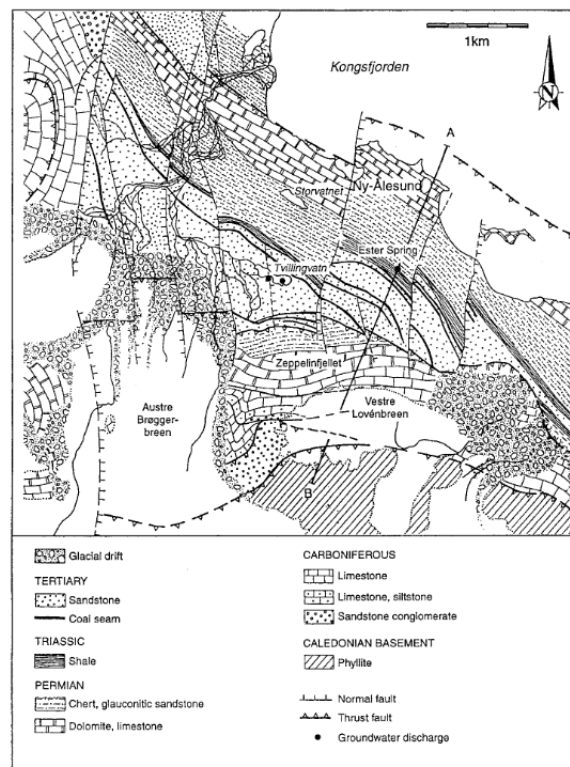
Kjemisk forvitring er en type forvitring hvor fast fjell og underlag brytes ned på grunn av kjemiske reaksjoner med omgivelsene. Denne prosessen påvirker den kjemiske sammensetningen i vannet i elvesystemer i stor grad. Forvitringsprosesser skjer ved at vann med ulik mengde innhold av karbondioksid fungerer som aktiv reaktant mot mineralene i bergartene i underlaget (Kveli 2015). Bergarter er bygget opp av ett eller flere ulike mineraler, og mineralene er igjen bygget opp av grunnstoffer. I forvitringsprosesser trenger vannet inn i små hulrom i mineralene og

bryter opp bindingen mellom grunnstoffene. Dette skjer ved at karbonsyre ($\text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O}$) angriper mineralene, som kan resultere i løse kationer (Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+), løst silisiumoksid (SiO_2) og bikarbonat (HCO_3^-) (Chapman 2021). Det fører til at gitterstrukturen mellom ionene blir ødelagt, og mineralene smuldrer opp. Dermed løsrives ionene og kan transporteres ned elva, der de kan inngå i en rekke kjemiske prosesser (Kveli 2015). Hvilke grunnstoffer som løsrives avhenger av hvilke mineraler berggrunnen inneholder.

Forvittringshastigheten kan påvirkes av forhold som mineralets stabilitet, klima, geografi og sigevannets kjemiske sammensetning (Lasaga mfl. 1994). Det er også vist at forvittringsreaksjoner går raskere ved økende temperaturer ved den såkalte van't Hoffs regel. En forenkling av van't Hoffs regel er gitt i reaksjonsligning 2.1, hvor R_T og R_0 er proseshastighetene ved temperaturer T °C og 0 °C, og B er en konstant (Buchan 2011).

$$R_T = R_0 \exp(BT) \quad (2.1)$$

All forvitring som skjer i nedbørsfeltet til elva vil kunne påvirke den kjemiske sammensetningen i elvesystemet. Nedbørsfeltet til et elvesystem er definert som hele landarealet som bidrar med vann til elva. Det vil derfor inkludere avrenning fra landområdet rundt elva, samt bekker og små smeltevannsbekker fra isbreer, snø og permafrost som munnar ut i hovedelva (Hodson mfl. 2002). Figur 2.1 viser oversiktskart over geologien i området rundt Bayelva.



Figur 2.1: Kart over nedbørsfeltet til Bayelva og geologien i området (Haldorsen og Heim 1999). De ulike mønstrene representerer ulike berggrunn.

Bayelva ligger på sedimentære bergarter som sandstein, kalkstein, en flintaktig kvarts og skifer. Øvre del av elva er dominert av moreneavsetninger som følge av isbreene som er trukket tilbake (Haldorsen og Heim 1999). Elva

ligger også i noen områder på dolomitt ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$), kvartsitt (SiO_4^{4-}) og fyllitt. I tillegg dominerer karbonater grunnfjellet i vestre og nordlige deler av nedbørsfeltet (Hodson mfl. 2002).

Sandstein og skifer er bygget opp av kvarts, som er bygget opp av silikater (SiO_2). Silikater er ofte høyt resistente til kjemisk forvitring, og vil i liten grad oppløses (Manahan 2011). Kalkstein er bygget opp av mineralet kalsitt som i større grad løses opp av karbondioksidholdig vann. I tillegg vil forvitring av karbonatbergarter gi høye konsentrasjoner av HCO_3^- , hvor halvparten stammer fra karbonatminerale og den andre halvparten fra CO_2 i atmosfæren og jorda (Chapman 2021). Fyllitt er også noe utsatt for kjemisk forvitring, består av mineraler som glimmer og har $\text{X}_2\text{Y}_{4-6}\text{Z}_8\text{O}_{20}(\text{OH},\text{F})$ som kjemisk formel. I formelen står X for K, Na eller Ca, og Y står for Al, Mg eller Fe. Z står for Si eller Al (Krawczyk, Lefauconnier og Pettersson 2003). Bergarter og de viktigste kjemiske sammensetningene av mineralene for oppgaven er gitt i tabell 2.1.

Tabell 2.1: Bergarter med viktigste kjemisk sammensetning av mineraler i nedbørsfeltet til Bayelva (Schou Jensen, Sunde og Engen 2006).

Bergart	Mineral	Kjemisk sammensetning
Sandstein	Kvarts	SiO_2
Kalkstein	Kalkspat	CaCO_3
Chert	Finkornet kvarts	SiO_2
Skifer	Leirminerale, muskovitt og kvarts	SiO_2 . Kan inneholde K, Na, Ca, Al, Mg, Fe, Mn, Si
Dolomittbergarter	Dolomitt	CaMgCO_3
Fyllitt	Muskovitt, kloritt og kvarts	$\text{KAl}_2(\text{F}, \text{OH})_2$

Det kan på bakgrunn av berggrunnens resistens til kjemisk forvitring i området forventes å finne metaller og andre kjemiske forbindelser i Bayelva.

2.1.3 Speciering av metaller

Tilstanden til grunnstoffer i vann og sedimenter kalles speciering. Metaller i vann kan forekomme i oppløst og partikulær fase. I oppløst fase kan de for eksempel finnes i et kompleks, og i partikulær fase kan de eksempelvis finnes i et molekyl med andre grunnstoffer. I et molekyl med andre grunnstoffer blir det i denne oppgaven sett på mineraler. Den vanligste tilstanden metaller befinner seg i er som et kompleks i hydrert tilstand. Med hydrert tilstand menes det at ionet er svakt bundet ved en ion-dipolbinding til mellom fire og seks vannmolekyler. Dette komplekset kan protolyseres av et hydrogenatom på grunn av dets svakt sure karakter, og kan dermed inngå i kjemiske reaksjoner med andre forbindelser i elva (Stumm og Morgan 2012). I andre komplekser kan metaller bindes til både organiske og uorganiske ligander. Et ligand er et atom, ion, molekyl eller funksjonell gruppe som er bundet til et sentralatom gjennom kovalente eller elektrostatiske bindinger (Manahan 2011). Dersom ligandet er bundet til metallionet i to eller flere seter, kalles det et chelat (Manahan 2011). Typiske organiske ligander som forekommer i elveløp er humus, glysin og oksalsyre, og typiske uorganiske ligander er OH^- , HCO_3^- og NH_3 (Kveli 2015). Det blir sett nærmere på humusforbindelser og binding mellom organiske forbindelser og metaller i kapittel 2.2.2, som handler om kjemisk komposisjon av organisk materiale og reaksjoner med metaller. Ligning 2.2 uttrykker kompleksdannelse, hvor M er metallet og L er liganden (Kveli 2015).



Metaller bundet i komplekser kan påvirke metallenes adsorpsjon, distribusjon og transport. Kompleksring kan også forårsake endringer i oksidasjonstilstanden til metallet, og kan føre til at metallet løses. De kan også påvirke de kjemiske forholdene i elveløp ved dannelse av uløselige komplekse forbindelser, som fjerner metallioner fra løsningen (Manahan 2011). Speciering kan variere med ulike parametre, som temperatur, pH, redokspotensial og tilgjengeligheten av ligander og adsorberende materialer (Moe 2018).

Kompleksring kan også påvirke biokjemiske effekter som biotilgjengelighet, toksisitet og dyre- og planteopptak (Manahan 2011). Metallens kjemiske egenskaper kan endres når de danner komplekser med andre forbindelser. Tungmetallet kvikksølv kan for eksempel danne komplekser med forskjellige forbindelser som gir ulikt utfall for toksisiteten (Zhao, Campbell og Wilkinson 2016). Organisk kvikksølv, som metylkvikksølv (CH_3Hg), absorberes lett i kroppen og har høy affinitet til tiolgrupper. Dette gjør at de assosieres med reaksjoner med proteiner, og gir dem spesielt egenskapen til å kunne binde seg til aminosyren cystein. Dette kan føre til store forstyrrelser i DNA og proteinsyntesen (Landis, Sofield og Yu 2017). Når et metall blir bundet til et ligand i en kompleksforbindelse, kan det også bli mindre tilgjengelig for interaksjon med biologiske systemer, og dermed redusere toksisiteten. Tungmetallene kan også oppstå i fettløselige forbindelser. Disse forbindelsene kan løses opp og bli lagret i fettvev, og videre bioakkumuleres, som betyr at de oppkonsentreres i næringskjeden. I arktiske strøk, som Svalbard, er dette spesielt bekymringsverdig da topprovdyrene her ofte har større fettlagre enn andre plasser grunnet det kalde klimaet og dermed kan lagre større konsentrasjoner av lipofile metallkomplekser enn arter i andre strøk (Albert mfl. 2021).

2.2 Tilstedeværelse av organisk materiale

Organisk materiale inngår, sammen med mineralkorn og vann, i jord og jordsmonn. Organisk materiale består av plantebiomasse i ulike stadier av nedbrytningsprosesser, og sammensetningen varierer med klima, temperatur, typen nedslagsfelt og lysforhold (Manahan 2011). På Svalbard er produksjonen av plantemasse og tilføring av organisk materiale til jorda liten på grunn av den jevnt lave temperaturen (McGovern mfl. 2020). Oppløst organisk karbon er den oppløste mengden av organisk karbon som er tilstede i en løsning. Mengden organisk karbon, enten det er oppløst eller ikke, refereres ofte til som naturlig organisk karbon eller totalt organisk karbon (Mason 2013). Forskerne James F. Ranville og Donald L. MaCalady definerer naturlig oppløst materiale som alle substanser som dannes under prosessene ved nedbrytning av terrestriske eller akvatiske planter (Ranville og MaCalady 2020). I denne oppgaven refereres organisk materiale til alt naturlig oppløst materiale.

2.2.1 Kilder til organisk materiale

Kilder til organisk materiale i elvesystemer er vanligvis naturlige prosesser som utvasking av humisk materiale eller andre nedbrytningsprosesser av vegetabilsk materiale fra jorda (Kördel mfl. 1997). For at materialet skal vaskes ut til elvesystemet, må det ligge i nedbørsfeltet til elva. Det er kun nedbrytningsproduktene som konsentreres i de øverste sjiktene av jordprofilen som blir vasket ut til elva (Kveli 2015).

I arktiske elver, som Bayelva, er konsentrasjonen av organisk materiale i stor grad sesongavhengig. Fra september til juni er de fleste elvene på Svalbard frosset. Når elvene ikke er frosset, er vannføringen vanligvis stor og kraftig (Chapman 2021). Snøsmeltingen er vanligvis svært intens og perioden er kort. Dette resulterer i at en stor del av avrenningen kommer fra snøsmelting tidlig i sesongen, under den såkalte "vårflommen". Flere studier viser at mengden totalt organisk karbon øker med økende vannmengde i arktiske elvesystemer grunnet snøsmelting, noe som kan forklares ved disse utvaskingsprosessene (Griffin mfl. 2011; McGovern mfl. 2020). Etter denne perioden avhenger vannmengden og vannkvaliteten i elvene av nedbør, sammen med smeltevann fra isbreer og permafrost (Sund 2008).

2.2.2 Kjemisk komposisjon av organisk materiale og reaksjoner med metaller

Organisk materiale består av en rekke kjemiske forbindelser, hvor det både finnes hydrofobe og hydrofile komponenter. Den hydrofobe delen består hovedsakelig av aromatisk karbon, og den hydrofile delen har høyere andel av alifatisk karbon og nitrogenforbindelser (Nordum 2012).

Sammensetningen av oppløst organisk materiale i gjennomsnittlig elvevann består, ifølge Ranville og MaCalady, hovedsakelig av karbohydrater, enkle karboksylsyrer og frie aminosyrer, men domineres i stor grad av humusforbindelser (Ranville og MaCalady 2020). Humus består av humin, fulvosyrer og humussyrer, hvor de to sistnevnte utgjør omtrent 75% av organisk materiale i gjennomsnitt (Alloway mfl. 1995). Humusforbindelser er komplekse blandinger av alifatiske og aromatiske molekyler, og er den viktigste gruppen av naturlige kompleksligander av metaller (Manahan 2011). I tillegg har humusforbindelser en rekke andre egenskaper som kan påvirke løseligheten til metaller, endre fordelingen mellom den reduserte og oksiderte formen til metaller, redusere metalltoksisitet og endre biotilgjengelighet, der noe har blitt forklart tidligere i oppgaven (Nordum 2012). Den funksjonelle gruppen i naturlig organisk materiale avgjør bindingsstyrken i binding med metaller. Dannelseskonstanten ($\log K_f$) for utvalgte metaller i kompleks med EDTA er gitt i tabell 2.2. EDTA er en organisk ligand som kan kompleksere metallioner. Et kompleks med dannelseskonstant på 0 til 1 er ikke sterkt bundet, omtrent 2-13 er middels bundet, og dannelseskonstanten for et kompleks med verdi over 14 er sterkt bundet.

Tabell 2.2: Dannelseskonstant ($\log K_f$) for utvalgte metaller i kompleks med EDTA (Smith, Martell og Motekaitis 2004)

Ion	$\log K_f$
Hg ²⁺	21.5
Cd ²⁺	16.5
Pb ²⁺	18.0
Al ³⁺	16.4
Fe ²⁺	14.3

Forskning av P. Bennett og D. I. Siegel har også vist at forvitring av kvarts i nøytralt vann kan bli påvirket av mengden organisk materiale i vannet (Bennett, Siegel og DI 1987). Grunnen til dette er at organiske syrer kan kompleksere og mobilisere silisiumdioksid (SiO₂), og kvarts består hovedsakelig av dette. Dette kan være grunnen til at mineraler bestående av dette saltet vil forvitte hurtigere i miljøer med høyt innhold av organisk materiale.

3 Diskusjon

Det er hovedsakelig to faktorer som fører til økt vannmengde i elvesystemene; endring i nedbørsmønsteret og økt temperatur i Arktis. Disse kan knyttes opp mot et klima som stadig er i endring. Hvordan de organiske og uorganiske forholdene kan påvirkes av slike endringer er svært komplekst og kan være vanskelig å forutse. I lys av tungmetaller i Arktis, kjemisk forvitring av overflatebergarter, kilder til organisk materiale og kompleksering og reaksjoner mellom organisk materiale og metaller, skal jeg forsøke å se på ulike kjemiske prosesser som er sannsynlig for de organiske og uorganiske forholdene i Bayelva. Først blir de sett på hver for seg, og senere sett i samspill med hverandre. I tillegg blir det sett på hvordan endringer i den kjemiske karakteren kan gi følger for Kongsfjorden og det biologiske mangfoldet der, som bioakkumulasjon av tungmetaller og forstyrrelser på organismer.

3.1 Kraftigere og hyppigere nedbørshendelser i Arktis

Klimaendringer kan resultere i endringer i nedbørsmønsteret. Dette kan være økt frekvens av intense regnskyll eller lengre tørkeperioder, som kan påvirke fordelingen av både organisk og uorganisk materiale. Nyere forskning viser at nedbørsmønsteret i Arktis har endret seg og kommer til å endre seg i framtiden. Værobservasjoner fra Svalbard viser en økning i nedbørsmengde fra 1961 til i dag (Hanssen-Bauer mfl. 2019). En forskningsartikkel av R. Bintanja og O. Andry ser på 37 ulike klimamodeller, og forutser med hensyn på disse en mer regndominert nedbørsform i Arktisområdet for fremtiden. Dette begrunner de med at atmosfærisk oppvarming fører til at en større andel av snøfall smelter før den når overflaten og avsettes som regn. Det har også blitt funnet en betydelig økning i vinterregn (Bintanja og Andry 2017). Det kan være vanskelig å avgjøre hvordan nedbørsmønsteret kommer til å endre seg, men en forskningsartikkel skrevet av Hanssen-Bauer mfl. beregner et fremtidig klima med kraftigere og hyppigere nedbørshendelser basert på eksisterende kunnskap fra vitenskapelig litteratur og modellresultater. I oppgaven blir dette tatt utgangspunkt i (Hanssen-Bauer mfl. 2019). Endringene kan påvirke de kjemiske prosessene, som diskuteres i påfølgende avsnitt.

3.1.1 Utvasking av organisk materiale fra jordsmonnet i nedbørsfeltet til Bayelva

Etter vårfloppen avhenger vannføringen i elvene i stor grad av nedbørsmengden (Chapman 2021). En av faktorene som avgjør mengden organisk materiale i elvesystemene, er utvasking av organisk materiale i jorda. På grunn av endring i nedbørsmønsteret, i form av økt nedbørsmengde i Arktis, er det sannsynlig at mengden organisk materiale som blir vasket ut av jordsmonnet kan øke i sommersesongen, som kan føre til økt tilførsel av organisk materiale i elver som Bayelva.

Følgene av økt mengde organisk materiale i Bayelva kan påvirke Kongsfjorden, som elva renner ut i. En studie gjennomført i 2020 så på hvordan biogeokjemien ble påvirket av økt tilførsel av organisk materiale fra elver i Isfjorden, som er en fjord på Svalbard sør for Kongsfjorden. I denne sammenheng er Kongsfjorden relevant fordi elvene som renner ut i den ligner mye på Bayelva ved at tilførsel av materiale hovedsakelig kommer fra samme kilder, siden de begge er smeltevannselver. Studien fant at fjorden tilføres høye nivåer av organisk materiale, og at dette påvirket de kjemiske forholdene i fjorden. Skjebnen til det terrestriske materialet avhenger av fysiske og biologiske prosesser i det marine systemet, der noen prosesser kan fjerne det organiske materialet og andre kan integrere det i næringskje-

den. Når ferskvann strømmer ut i havet, kan det påvirke vannmassene ved å gjøre dem uklare og hindre fornyelse av næringsrikt, dypt vann. Det kan også hindre fotosyntese, som påvirker balansen mellom autotrofe og heterotrofe organismer i nærheten av kysten, som igjen kan påvirke balansen i økosystemet (McGovern mfl. 2020). Mye tyder på at et slikt utfall er sannsynlig i Kongsfjorden også, da det er svært like forhold her som de som blir beskrevet i artikkelen. Artikkelen legger også vekt på at vi vet lite om hvordan endringene vil påvirke fjordsystemene og hvilken rolle klimaendringer har i problemstillingen. De understreker viktigheten av å fortsette overvåkning og å bygge forståelse for hvordan økt tilførsel av organisk materiale kan påvirke økosystemet i Arktis.

3.1.2 Oppløsning av mineraler fra morsbergarter i Bayelva

Forskning kan vise til en økt nedbørsmengde i form av regn i Arktis. Fra 1971-2000 til 2071-2100 forventes det hyppigere forekomst av hendelser med mer intenst og kraftig nedbør. En artikkel av Hanssen-Bauer mfl. forutser økte regnflommer, som også medfører kraftigere elveføring for fremtiden (Hanssen-Bauer mfl. 2019). Ved et nedbørsmønster som domineres av kraftige regnskyll og opphold med tørkeperioder i ettertid, kan de kjemiske forvitningsprosessene påvirkes. Hodson mfl. beskriver i en artikkel om hydrokjemien i Bayelva at strømningshastigheten i elva assosieres med økt kjemisk forvitring. Høy strømningshastighet i elva øker eksponeringen av stein- og gruspartikler for forvitrende kjemikalier, og kan dermed øke hastigheten på kjemisk forvitring. Dette kan være spesielt viktig i de øvre delene av elven, hvor strømmingen er sterkere og partiklene blir mer utsatt for forvitring (Hodson mfl. 2002). Dette kan igjen føre til økt erosjon, som kan resultere i økt forvitring ved økt eksponering for luft og vann (Chapman 2021).

Hvilke mineraler som blir oppløst avhenger av geologien i nedbørsfeltet til elva og hvor resistente de er for kjemisk forvitring. Basert på redegjørelsen for kjemisk forvitring av overflatebergarter i oppgaven, vil den kjemiske forvitringen i Bayelva være dominert av oppløsning av kalkstein og dolomitt, i tillegg til noe oppløsning av fyllitt og karbonatmineraler. Dette vil resultere i at mineraler, som inneholder blant annet Ca^{2+} , Al^{3+} , CO_3^{2-} og SiO_2^- løsrives og kan transporteres ned elva, hvor de kan inngå i en rekke prosesser. Større mengder av enkelte oppløste ioner kan være giftig for dyrelivet i Kongsfjorden. Oppløst aluminium kan for eksempel koagulere på gjellene til fisk i saltvann, som kan ha en dødelig effekt (Moiseenko 2005).

3.2 Økt temperatur i Arktis

Dersom trenden med temperaturøkningen fortsetter, predikeres det at temperaturen på Svalbard vil øke med mellom 7 og 10 °C frem til 2071-2100 (Hanssen-Bauer mfl. 2019). Dette vil ha flere konsekvenser for elvesystemene. Det kan føre til en økt smelting av krytosfæren, der smeltevannet renner ut i elvesystemene og komponenter i vannet inngår i kjemiske prosesser der. Adsorpsjonsprosesser er svært relevante konkurrerende reaksjoner, men disse er utelatt fra denne diskusjonen. Samtidig kan økt temperatur også resultere i at sommersesongen blir lengre med høyere vanntemperaturer, som blant annet kan påvirke den organiske karakteren i elvesystemene.

3.2.1 Økt konsentrasjon av tungmetaller som følge av smelting av isbreer og permafrost

Som forklart tidligere er antropogene kilder til tungmetaller i Arktis av stor bekymring. Elementene kan bli utsatt for langtransport og blir atmosfærisk deponert på snøen i arktiske strøk, hvor de akkumuleres gjennom vinteren. I smeltesesongen vil dermed metallene transporteres videre med elvesystemet og kan inngå i kjemiske reaksjoner i elva. Ved økt smelting vil større mengder tungmetaller frigis, og det kan forventes større konsentrasjon av dem i elva. Det har blitt funnet høye konsentrasjoner av blant annet kvikksølv, kadmium og bly i marine sedimenter og arter av flora og fauna på Svalbard (Rudnicka-Kępa og Zaborska 2021). Flere forskningsartikler viser til at det kan være en sammenheng mellom økt smelting av permafrost og isbreer, og økende konsentrasjoner av tungmetaller. For eksempel viser forskning gjennomført i Stordalen i Nord-Sverige at permafrost i området er ansvarlig for en økt eksport av kvikksølv til den tilstøtende innsjøen Inre Harrsjön (Rydberg mfl. 2010). Tilsvarende viser nyere studier at prøver tatt på høsten hadde høyere konsentrasjon av de utvalgte tungmetallene enn prøver tatt på våren samme år. I tillegg er konsentrasjonene høyere i prøvene tatt i studiene på våren påfølgende år enn på høsten tidligere år. Dette kan bety at konsentrasjonen av tungmetallene øker, og også at langtransport av atmosfæriske forurensninger til Arktis er større om vinteren, som er konklusjonen i artiklene (Hald 2014; Moe 2018; Stohl 2006). På bakgrunn av dette kan det forventes å finne en økende konsentrasjon av tungmetaller i Bayelva som resultat av økt smelting av isbreer og permafrost.

Økt konsentrasjon av tungmetallene kan resultere i oppkonsentrasjon i næringskjeden og gi skadelige effekter for dyrelivet, der bly, kadmium og kvikksølv er av størst bekymring. Inntak over grenseverdien av for eksempel kadmium kan resultere i skader på nyrene og skjelettet på artene som lever på Svalbard (Hald 2014). På grunn av bioakkumulasjon, altså at tungmetallene akkumuleres oppover i næringsnett, vil konsekvensene være størst for topprovdyrene, som isbjørnen. En endring i en slik populasjon, som en drastisk nedgang, kan ha store konsekvenser for hele økosystemet i Arktis. I tillegg kan tungmetaller hemme mikrobiologiske prosesser, som kan påvirke økosystemene i vann og jord. Økt konsentrasjon av tungmetaller kan også virke som stressfaktorer på bakteriesamfunn og kan føre til utvikling av resistens mot tungmetaller. Utvikling av resistens kan være en måte for bakterier å overleve i miljøer med høye konsentrasjoner av tungmetaller. Mange bakterier utvikler resistens mot tungmetaller gjennom plasmider, som også kan gi resistens mot antibiotika (Kalinowska mfl. 2020). Dette er et økende problem i hele verden (Levy og Marshall 2004).

3.2.2 Fremtidig lengre sommersesong på Svalbard og økt vanntemperatur i arktiske elver

Et resultat av en temperaturøkning i Arktis kan være at vinteren blir kortere og sommeren blir lengre. Dette kan resultere i en vekst i vegetasjon og større tilstedeværelse av organisk materiale. Videre kan dette resultere i utvasking av en større andel vegetabilsk materiale, og dermed økt tilførsel av organisk materiale i elvesystemene.

van't Hoff's regel viser at forvitningsreaksjoner går raskere ved økende temperaturer (Buchan 2011). Ved å bruke ligningen for van't Hoff's regel, kan vi se at prosesshastigheten (R_T) øker når temperaturen (T) øker. Økt gjennomsnittstemperatur kan resultere i økt temperatur i Bayelva, og kan på bakgrunn av van't Hoff's regel derfor føre til økt konsentrasjon av løse ioner i elva. På den andre siden har vi sett at økt temperatur vil resultere i økt smelting av isbreer og permafrost, der smeltevannet renner ut i elva. Temperaturen på dette vannet forventes å være lav, og til-

førsel av det i elva kan resultere i en mindre temperaturendring enn forventet. Det er på bakgrunn av dette vanskelig å predikere hvordan temperaturen i elva kommer til å endre seg ved økt temperatur fordi det da er mulig at kryptosfæren smelter og tilfører vann med lav temperatur. I smeltesesong vil det være vanskelig å si noe om van't Hoff's regel kan benyttes for å se på forvittringsreaksjoner i Bayelva. Utenfor smeltesesongen vil det derimot være sannsynlig at temperaturen i Bayelva kan øke, og da kan van't Hoff's regel være relevant når man ser på forvittringsreaksjonene i Bayelva.

3.3 Kan faktorene utligne hverandre?

Vi har foreløpig sett at en økning i vannmengdene i Bayelva kan resultere i en økning av både organisk og uorganisk materiale. Som følge av dette er sannsynligheten stor for at komponentene inngår i kjemiske reaksjoner med hverandre. De kjemiske reaksjonene som fører til at metaller inngår i komplekser, molekyler eller reagerer med andre grunnstoff, er sentralt for diskusjonen her.

Dannelseskonstanten for enkelte metaller som kan finnes i Bayelva grunnet både antropogene og naturlige kilder i kompleks med EDTA er gitt i tabell 2.2. EDTA ligner kjemisk på organisk materiale som kan bli funnet i elveløp. Vi kan derfor se på EDTA som en representasjon av alt organisk materiale i Bayelva. Samtlige metaller i tabell 2.2, kvikksølv, kadmium, bly, aluminium og jern, har kompleksdannelseskonstanter mellom 14 og 22, som er relativt høyt. Dersom vi tar utgangspunkt i reaksjonslikningen som viser kompleksdannelse gitt i ligning 2.2, kan vi basert på de høye konstantene forutse en forskyvning mot økt kompleksdannelse. Dette vil kunne bety at en økning av organisk og uorganisk materiale i Bayelva vil resultere i økt konsentrasjon av kompleksdannelse mellom dem. Siden dannelseskonstantene viser til at det dannes så sterke komplekser, kan det i tillegg predikeres kompleksdannelse selv om det ikke er store konsentrasjoner av løst uorganisk materiale i elva. Ved en økning av organisk materiale i elva, som humus, kan ioner fra stabile mineraler i berggrunnen trekkes ut og inngå i komplekser (Manahan 2011). Dette kan for eksempel være tungmetaller som har blitt avsatt for lenge siden, men som videre har blitt lagret i sedimenter og dermed ikke gjør noen skade på omgivelsene. Økt kompleksdannelse av metaller kan føre til økt innhold av metaller i vannfasen. Dette vil gjøre dem mer biotilgjengelige, som betyr at nærliggende flora og fauna vil kunne påvirkes på dem.

Mengden organisk materiale kan også påvirke forvitring av kvarts i nøytralt vann (Bennett, Siegel og DI 1987). Flere av bergartene i nedbørsfeltet til Bayelva inneholder kvarts. En økning i organisk materiale vil dermed kunne resultere i en økning av SiO_2 . SiO_2 har en sur karakter, som kan føre til en reduksjon av pH i elva (Manahan 2011). Lavere pH fører generelt til desorpsjon av metaller fra partikler og organisk materiale og kan øke konsentrasjonen av frie ioner i løsningen (AMAP 1997). På den andre siden er det observert det motsatte for kvikksølv, som absorberes sterkere til organisk materiale ved lavere pH (Moe 2018). Det kan derfor forventes å finne økt konsentrasjon av frie ioner, med unntak av kvikksølv, på grunn av økt forvitring av kvarts. Det er også flere faktorer som kan påvirke pH i elva, men det blir ikke diskutert i denne oppgaven.

4 Konklusjon

Det predikeres fremtidige klimaendringer i Arktis som inkluderer en økende gjennomsnittstemperaturendring, i tillegg til en endring i nedbørsmønsteret ved kraftigere og hyppigere nedbørshendelser (Hanssen-Bauer mfl. 2019). Disse endringene kan føre til en endring i vannføringen ved økt vannmengde i arktiske elver som Bayelva, som kan resultere i endringer i de kjemiske prosessene som foregår der. I denne oppgaven har det blitt sett på mulige endringer i utvalgte kjemiske prosesser, som kjemisk forvitring av overflatebergarter i nedbørsfeltet, kompleksdannelse av metaller, utvasking av organisk materiale og økt tilførsel av utvalgte tungmetaller fra antropogene kilder i Bayelva, som resultat av økt vannmengde i elva.

Endringer i nedbørsmønsteret vil kunne føre til økt utvasking av organisk materiale fra nedbørsfeltet i Bayelva. Dette kan resultere i en økt mengde organisk materiale i elva. I tillegg kan det ha konsekvenser for Kongsfjorden, der forskning på lignende systemer har vist endringer som fornying av næringsrikt vann og forstyrrelser i fotosyntese i fjorden. En endring i nedbørsmønsteret vil også kunne føre til økt kjemisk forvitring av mineraler i berggrunnen i nedbørsfeltet til Bayelva. Dette vil kunne føre til økt konsentrasjon av ioner som Ca^{2+} , Al^{3+} , CO_3^{2-} og SiO_2^- , der økt konsentrasjon av noen av dem kan ha konsekvenser for dyrelivet på grunn av deres toksiske effekter. En økning i gjennomsnittstemperaturen i Arktis vil kunne føre til økt vannmengde i elver, som Bayelva, grunnet større mengder smeltevann fra isbreer og permafrost. En økning av konsentrasjonen av tungmetaller i Bayelva kan oppstå som resultat av smelting av krytosfæren på grunn av tidligere avsetning av tungmetaller bundet til nedbør. I oppgaven har det blitt sett på tungmetallene kvikksølv, kadmium, arsen og bly. Konsekvensene ved økt konsentrasjon av disse kan være bioakkumulasjon, som har særlig store konsekvenser for topprovdirene. En økning i temperaturen i Arktis vil også kunne resultere i økt vegetasjon, som sammen med økt utvasking av organisk materiale kan resultere i økt tilførsel av organisk materiale i Bayelva.

Ved hjelp av dannelseskonstanten for utvalgte metaller som kan finnes seg i Bayelva i kompleks med EDTA, blir det i oppgaven predikert at en økning i organisk og uorganisk materiale i Bayelva vil kunne føre til en økt kompleksdannelse mellom dem. Konsekvenser som omhandler høye konsentrasjoner av løse ioner vil dermed være mindre sannsynlig. En økning i kompleksdannelse kan likevel resultere i økt mengde metaller i vannfasen, som kan føre til at metallene blir mer biotilgjengelige, der kompleksering av tungmetaller kanskje er av størst bekymring på grunn av deres toksiske egenskaper i relativt lave konsentrasjoner. Her er konsekvenser for topprovdirene av særlig bekymring, fordi det kan forstyrre balansen i økosystemet (Rudnicka-Kępa og Zaborska 2021).

For å konkludere, kan det være sannsynlig at en økning av vannmengdene i elvesystemene på Svalbard, hvor denne oppgaven har tatt utgangspunkt i Bayelva, kan resultere i en økning i både organisk og uorganisk materiale. Disse økningene kan sannsynligvis også resultere i en økning av kompleksdannelse mellom metaller og organiske ligander som humus, hvor konsekvenser av dette kan være at metaller med toksiske effekter blir mer biotilgjengelige for dyrelivet på Arktis. Det er viktig å presisere at dette er et komplisert fagfelt og at det kan være vanskelig å predikere alle prosessene som kan oppstå. Derfor er det stort behov for videre forskning for å forstå de langsiktige konsekvensene av endringer i arktiske elver, og hvordan endringene kan påvirke både det biologiske mangfoldet i Arktis og mulige konsekvenser for forholdene i fjordsystemene elvene renner ut i.

Referanser

- Albert, C. mfl. (2021). «Seasonal variation of mercury contamination in Arctic seabirds: A pan-Arctic assessment». I: *Science of The Total Environment* 750, s. 142201. ISSN: 0048-9697. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.142201>. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0048969720357302>.
- Alloway, B. mfl. (1995). «Soil processes and the behaviour of metals». I: *Heavy metals in soils* 13, s. 3488.
- AMAP (1997). «Arctic pollution issues: A state of the Arctic environment report». I.
- Bennett, P., Siegel og DI (1987). «Enhanced dissolution of quartz by dissolved organic carbon». I: *Nature* 326.6114, s. 684–686. DOI: <https://doi.org/10.1038/326684a0>.
- Bintanja, R. og O. Andry (2017). «Towards a rain-dominated Arctic». I: *Nature Climate Change* 7.4, s. 263–267. ISSN: 1758-6798. DOI: [10.1038/nclimate3240](https://doi.org/10.1038/nclimate3240). URL: <https://doi.org/10.1038/nclimate3240>.
- Buchan, G. D. (2011). «Temperature effects in soil». I: *Encyclopedia of Agrophysics, Encyclopedia of Earth Sciences Series. Dordrecht, Netherlands: Springer*. DOI: https://doi.org/10.1007/978-90-481-3585-1_170.
- Chapman, D. (2021). *Water quality assessments: a guide to the use of biota, sediments and water in environmental monitoring*. CRC Press. ISBN: 1003062105. DOI: <https://doi.org/10.1201/9781003062103>.
- Griffin, C. G. mfl. (2011). «Spatial and interannual variability of dissolved organic matter in the Kolyma River, East Siberia, observed using satellite imagery». I: *Journal of geophysical research: Biogeosciences* 116.G3. DOI: [10.1029/2010JG001634](https://doi.org/10.1029/2010JG001634).
- Hald, S. J. K. (2014). «Kartlegging og studie av metaller og naturlig organisk materiale i elver på Svalbard». Thesis. DOI: <http://hdl.handle.net/11250/2351949>.
- Haldorsen, S. og M. Heim (1999). «An arctic groundwater system and its dependence upon climatic change: an example from Svalbard». I: *Permafrost and Periglacial Processes* 10.2, s. 137–149. ISSN: 1045-6740. DOI: [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1099-1530\(199904/06\)10:2<137::AID-PPP316>3.0.CO;2-%23](https://doi.org/10.1002/(SICI)1099-1530(199904/06)10:2<137::AID-PPP316>3.0.CO;2-%23).
- Hanssen-Bauer, I. mfl. (2019). «Climate in Svalbard 2100». I: *A knowledge base for climate adaptation*. ISSN: 2387-3027.
- Hodson, A. mfl. (2002). «The hydrochemistry of Bayelva, a high Arctic proglacial stream in Svalbard». I: *Journal of Hydrology* 257.1, s. 91–114. ISSN: 0022-1694. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0022-1694\(01\)00543-1](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(01)00543-1). URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0022169401005431>.
- Kalinowska, A. mfl. (2020). «Heavy metals in a high arctic fiord and their introduction with the wastewater: A case study of adventfjorden-longyearbyen system, svalbard». I: *Water* 12.3, s. 794. DOI: <https://doi.org/10.3390/w12030794>.
- Krawczyk, W. E., B. Lefauconnier og L.-E. Pettersson (2003). «Chemical denudation rates in the Bayelva Catchment, Svalbard, in the Fall of 2000». I: *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C* 28.28, s. 1257–1271. ISSN: 1474-7065. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.pce.2003.08.054>. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1474706503002043>.
- Kveli, S. M. (2015). «Studie av totalt organisk materiale, kvikksølv og andre sporelementer i sedimenter/elveavsetninger i Bayelva og andre elver i Ny Ålesund (Svalbard)». Thesis. DOI: <http://hdl.handle.net/11250/2351970>.
- Kördel, W. mfl. (1997). «The importance of natural organic material for environmental processes in waters and soils (Technical Report)». I: *Pure and Applied Chemistry* 69.7, s. 1571–1600. DOI: [doi:10.1351/pac199769071571](https://doi.org/10.1351/pac199769071571). URL: <https://doi.org/10.1351/pac199769071571>.

- Landis, W., R. Sofield og M.-H. Yu (2017). *Introduction to environmental toxicology: molecular substructures to ecological landscapes*. CRC Press.
- Lasaga, A. C. mfl. (1994). «Chemical weathering rate laws and global geochemical cycles». I: *Geochimica et Cosmochimica Acta* 58.10, s. 2361–2386. DOI: [https://doi.org/10.1016/0016-7037\(94\)90016-7](https://doi.org/10.1016/0016-7037(94)90016-7).
- Levy, S. B. og B. Marshall (2004). «Antibacterial resistance worldwide: causes, challenges and responses». I: *Nature Medicine* 10.12, S122–S129. ISSN: 1546-170X. DOI: 10.1038/nm1145. URL: <https://doi.org/10.1038/nm1145>.
- Manahan, S. E. (2011). *Fundamentals of environmental chemistry*. CRC press. ISBN: 1420052691.
- Mason, R. P. (2013). *Trace metals in aquatic systems*. John Wiley og Sons.
- McGovern, M. mfl. (2020). «Terrestrial inputs drive seasonality in organic matter and nutrient biogeochemistry in a high Arctic fjord system (Isfjorden, Svalbard)». I: *Frontiers in Marine Science* 7, s. 542563. ISSN: 2296-7745. DOI: 10.3389/fmars.2020.542563.
- Moe, B. (2018). «Trace elements in Arctic river water during seasonal transitions». Thesis. DOI: <http://hdl.handle.net/11250/2562305>.
- Moiseenko, T. I. (2005). «Effects of acidification on aquatic ecosystems». I: *Russian Journal of Ecology* 36.2, s. 93–102. ISSN: 1608-3334. DOI: 10.1007/s11184-005-0017-y. URL: <https://doi.org/10.1007/s11184-005-0017-y>.
- Nordum, M. (2012). «Metaller og naturlig organisk materiale i arktiske elver på Svalbard». Thesis. DOI: <http://hdl.handle.net/11250/247775>.
- Ranville, J. F. og D. L. MaCalady (2020). «Natural organic matter in catchments». I: *Geochemical processes, weathering and groundwater recharge in catchments*. CRC Press, s. 263–303.
- Rudnicka-Kępa, P. og A. Zaborska (2021). «Sources, fate and distribution of inorganic contaminants in the Svalbard area, representative of a typical Arctic critical environment—a review». I: *Environmental monitoring and assessment* 193.11, s. 724. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10661-021-09305-6>.
- Rydberg, J. mfl. (2010). «Climate driven release of carbon and mercury from permafrost mires increases mercury loading to sub-arctic lakes». I: *Science of the total environment* 408.20, s. 4778–4783. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2010.06.056>.
- Sarkar, B. (2002). *Heavy metals in the environment*. CRC press. ISBN: 0824744756.
- Schou Jensen, E., B. Sunde og Ø. Engen (2006). *Bergarter og mineraler*.
- Singh, R. mfl. (2011). «Heavy metals and living systems: An overview». I: *Indian J Pharmacol* 43.3. 1998-3751 Singh, Reena Gautam, Neetu Mishra, Anurag Gupta, Rajiv Journal Article India 2011/06/30 Indian J Pharmacol. 2011 May;43(3):246-53. doi: 10.4103/0253-7613.81505., s. 246–53. ISSN: 0253-7613 (Print) 0253-7613. DOI: 10.4103/0253-7613.81505.
- Smith, R., A. Martell og R. Motekaitis (2004). «NIST standard reference database 46». I: *NIST critically selected stability constants of metal complexes database Ver 2*.
- Stohl, A. (2006). «Characteristics of atmospheric transport into the Arctic troposphere». I: *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* 111.D11. DOI: <https://doi.org/10.1029/2005JD006888>.
- Stumm, W. og J. J. Morgan (2012). *Aquatic chemistry: chemical equilibria and rates in natural waters*. John Wiley og Sons. ISBN: 1118591488.
- Sund, M. (2008). «Polar hydrology». I: *Norwegian water resources and Energy Directorate's work in Svalbard. NVE Report 2*.
- WHO (jan. 2020). *10 chemicals of public health concern*. Web Page. URL: <https://www.who.int/news-room/photo-story/photo-story-detail/10-chemicals-of-public-health-concern>.

Zhao, C.-M., P. G. Campbell og K. J. Wilkinson (2016). «When are metal complexes bioavailable?» I: *Environmental Chemistry* 13.3, s. 425–433. DOI: <https://doi.org/10.1071/EN15205>.

