

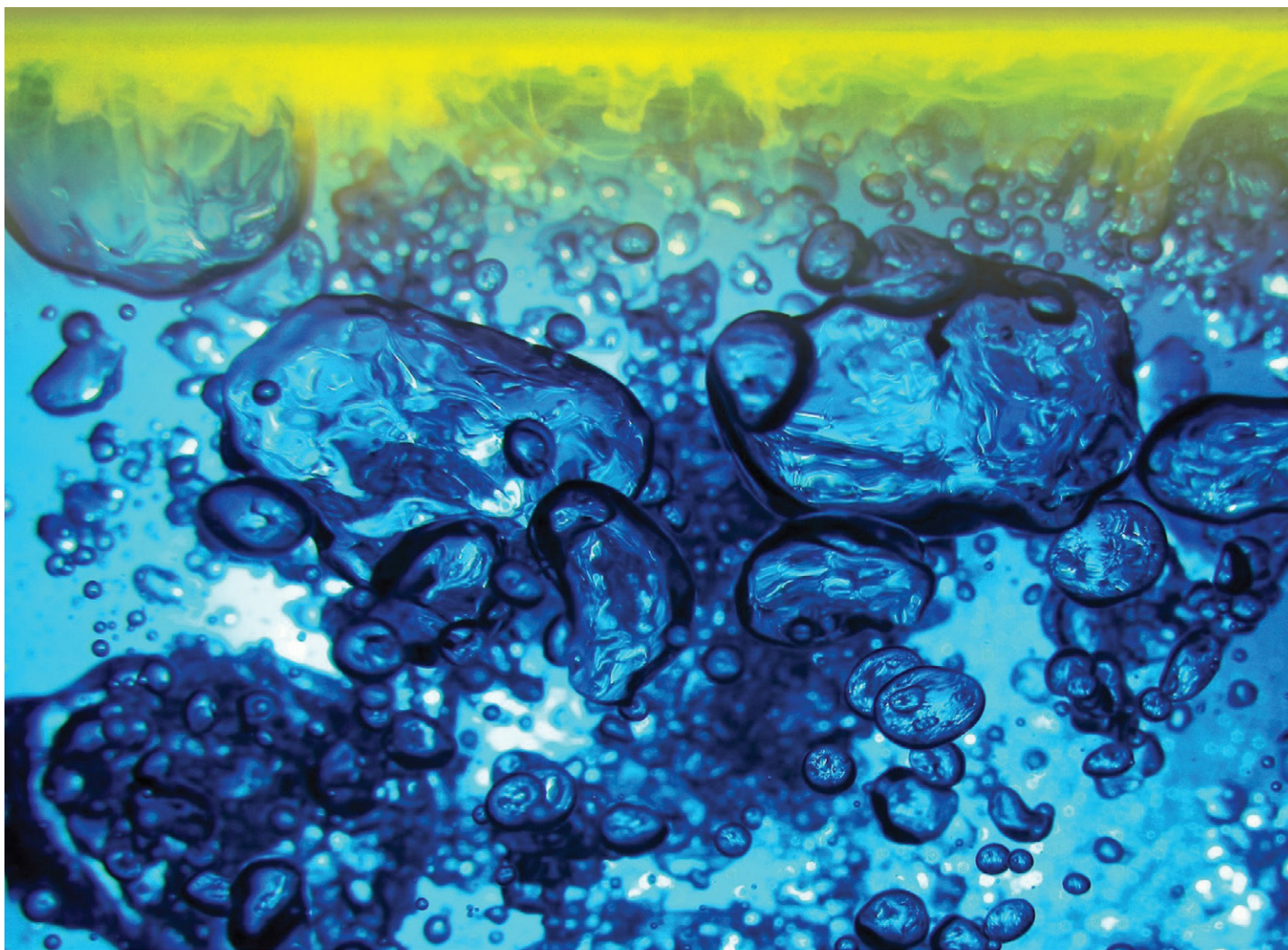


Vegbygging og mulig frigjøring av kvikksølv ved hogst av skog

- En litteraturstudie

STATENS VEGVESENS RAPPORTER

Nr. 405



Tittel

Vegbygging og mulig frigjøring av kvikksølv ved hogst av skog

Undertittel

- En litteraturstudie

Forfatter

Ingvild Marie Dybwad og Mathilde Hauge Skarsjø.

Avdeling

Trafikksikkerhet, miljø- og teknologiavdelingen

Seksjon

Miljø

Prosjektnummer

603019

Rapportnummer

Nr. 405

Prosjektleder

Sondre Meland

Godkjent av

Sondre Meland og Kjersti Wike Kronvall

Emneord

Kvikksølv, skogbruksoperasjoner, bygging av veg

Sammendrag

Skogbunn er et reservoar for atmosfærisk deponert kvikksølv. Tidligere studier gjennomgått i denne rapporten har vist at forstyrrelser av skogbunn kan medføre økt transport av kvikksølv fra jord til vann og dermed medføre økt risiko for eksponering og opptak i biota. I forbindelse med bygging av veg hugger Statens vegvesen (SVV) store arealer med skog, og denne studien tyder på at SVV bør undersøke hvorvidt remobilisering av kvikksølv også er et problem ved anlegging av veg.

Title

Road construction and redistribution of mercury caused by forest operations

Subtitle

- A literature review

Author

Ingvild Marie Dybwad and Mathilde Hauge Skarsjø

Department

Traffic Safety, Environment and Technology Department

Section

Miljø

Project number

603019

Report number

No. 405

Project manager

Sondre Meland

Approved by

Sondre Meland and Kjersti Wike Kronvall

Key words

Mercury, forest operations, road construction

Summary

Atmospherically deposited mercury is retained in the forest floor. Research reviewed in this report, shows that disturbances such as forest operations can imply an increased mobilisation of mercury from the forest floor to waters. This imposes an increased risk of mercury exposure and uptake in biota. In relation to construction of roads, the Norwegian Public Roads Administration (NPRA) are responsible for the logging of large areas of forest and, based on the present report, NPRA should investigate whether mobilisation of mercury is a consequence of this.

Vegbygging og mulig frigjøring av kvikksølv ved hogst av skog

-En litteraturstudie

Forord

Etatsprogrammet Nordic Road Water, NORWAT, er et fireårig forsknings- og utviklingsprogram i Statens vegvesen som startet i januar 2012. NORWAT skal frambringe ny kunnskap og nye metoder slik at Statens vegvesen planlegger, bygger og drifter vegnettet uten å gi uakseptabel skade på vannmiljøet. Hovedformålet med programmet er å lage en verktøykasse som kan brukes under anlegg og drift for å avgjøre når og hvordan forurenset vegvann skal renses. For å oppnå dette skal NORWAT generere kunnskap om nye miljøgifter og effekter av forurenset avrenningsvann på vannmiljøet. Programmet skal også vurdere tiltak for å hindre at forurensning oppstår. I tilfelle der spredning av miljøgifter er uunngåelig, skal det utarbeides tiltak for å redusere risikoen for skader på miljøet.

Arbeidet med denne rapporten ble utført i forbindelse med sommerjobb i Statens vegvesen. Begge forfattere har bidratt likeverdig.

Sammendrag

Kvikksølv transporteres over lange avstander gjennom atmosfæren og deponeres i stor grad i skog. Organisk materiale binder kvikksølv, og skogbunn vil være et reservoar for tidligere og pågående utslipp. Til tross for en reduksjon i norske og europeiske utslipp av kvikksølv vil pågående utslipp fra blant annet Asia medføre et fortsatt atmosfærisk tilsig av kvikksølv til skogområder i Norge. Bygging av ny veg kan medføre hugging av store arealer med skog og videre gi forstyrrelser av skogbunn der kvikksølv ligger lagret. Statens vegvesen ønsker derfor å finne ut hvorvidt bygging av ny veg kan føre til økt transport av kvikksølv fra skog til vann og videre utgjøre en økt risiko for mennesker og biota. Det er i dette litteraturstudiet gjennomgått litteratur knyttet til ulike måter å utføre skogbruk på og effekten det har på utlekking av kvikksølv fra skogbunn. Flere av studiene gjennomgått tyder på at en slik forstyrrelse av skogbunn har bidratt til redistribusjon av kvikksølv fra jord til

vann både ved økt konsentrasjon i vann og ved økt transport av kvikksølv ut av skogsjord og dette vil kunne øke biotilgjengeligheten av kvikksølv. I mange tilfeller er det likevel funnet at effekten hogst har på transport av kvikksølv til vann overskygges av bakenforliggende faktorer som nedbørsmengde, breddegrad, temperatur, helning på skogfeltet og mengde organisk materiale. Disse faktorene har i flere studier blitt funnet å ha større effekt på konsentrasjonen og mengden kvikksølv som transporteres ut av skogsjord enn den effekten som kan tilskrives skogbruksoperasjonene. Disse faktorene kan også forventes å påvirke effekten som hogst, markberedning og stubbefjerning har på transport av kvikksølv til vann. Den observerte påvirkningen skogbruksoperasjoner har på redistribusjon av kvikksølv fra skogsjord gir grunnlag for at Statens vegvesen bør undersøke hvorvidt vegrelatert anleggsarbeid i skog også kan medføre en utlekking av kvikksølv fra jord til vann. Det er foreløpig relativt få publiserte studier som omhandler utlekking av kvikksølv fra skogsjord, det er også lite kunnskap om hvordan disse studiene er relevant for Statens vegvesen, siden anlegging av ny veg innebærer mer enn kun hogst av skog, blant annet stabilisering av grunn og mellomlagring av masser. Statens vegvesen bør gjennomføre måling og dersom det skulle vise seg å være en aktuell problemstilling kan man likevel tenke seg noen tiltak etter føre-var-prinsippet. Det er i de fleste studiene gjennomgått funnet en korrelasjon mellom konsentrasjon av kvikksølv og totalt organisk karbon. I tillegg vet man og at stillestående dammer med vann i områder med høy tilgang på organisk materiale kan gi anaerobe tilstander i skogsjord som er gunstige for produksjon av metylkvikksølv (MeHg), som igjen er skadelig for biota ved høye konsentrasjoner. Enkle grep som å hindre transport av organisk karbon til resipient og forhindre tilstander der produksjon av MeHg kan forekomme er derfor gode konkrete tiltak som kan redusere en potensiell effekt av hogst ved vegutbygging.

Innholdsfortegnelse

1	Introduksjon	7
2	Bakgrunn	9
2.1	Spesiering og toksisitet av kvikksølv	9
2.2	Kilder til kvikksølv	9
2.3	Transport og deponering	11
2.4	Lagring	11
2.5	Biotilgjengelighet og metylering	11
3	Oppsummering av tilgjengelig data	13
3.1	Skogbruksoperasjoner og kvikksølv	13
3.1.1	Konsentrasjon og avrenning av THg, MeHg og TOC	14
3.1.2	Effekter av ulike typer skogbrukssoperasjoner	18
3.1.3	Kantsone med vegetasjon og andel hogst i nedbørsfelt	20
3.1.4	Skogbruk og produksjon av MeHg	21
3.1.5	Effekt av hogst på konsentrasjon av kvikksølv i biota	23
3.2	Variasjoner i Hg-transport som ikke skyldes skogbruk	28
3.2.1	Skogbunn: et reservoar for Hg	28
3.2.2	Bidrag fra våt- og tørrdeponering	29
3.2.3	Stedsspesifikke faktorer: breddegradsplassering, den marine grense, helning og vegetasjonsdekke	29
3.2.4	Respons på temporale endringer	31
4	Vegbygging og kvikksølv	32
4.1	Faktorer som påvirker transport og produksjon av kvikksølv	32
4.2	Er utlekking av kvikksølv et problem ved bygging av veg?	32
4.3	Forslag til videre arbeid	33
	Referanser	35

Appendix..... 41

1 Introduksjon

Statens vegvesen (SVV) har som største fagmiljø innen vegsektoren et sektoransvar. Det vil si at SVV på vegne av samferdselsdepartementet skal bidra til oppfølging av nasjonal politikk ved å redusere miljøbelastningen fra vegtrafikk og jobbe for å nå nasjonale miljø- og klimamål i vegsektoren. Dette gjør SVV blant annet ved å forebygge og redusere negativ miljøpåvirkning i plan-, utbyggings- og drifts-/vedlikeholdsfasen. Klima og forurensningsdirektoratet (Klif), nå Miljødirektoratet, utga i 2010 en handlingsplan for å redusere utslipp av kvikksølv (TA 2684/2010). Kvikksølv er et av 33 stoffer på listen over prioriterte miljøgifter og det er en nasjonal målsetning at utslipp og bruk av kvikksølv skal reduseres kontinuerlig, med mål om å stanse bruk og utslipp innen 2020. En sammenheng mellom skogbruk, utlekking av kvikksølv fra skogbunn til resipient nedstrøms for nedbørsfelt og økte nivåer av kvikksølv i ferskvannsfisk har blitt sett i flere studier (Bishop et al. 2009). Omfattende vegutbygging i årene som kommer vil forstyrre store områder med skog og annet habitat der kvikksølv fra tidligere og pågående utslipp lagres.

Dette litteratursøket er første trinn for å finne ut om økt transport av kvikksølv fra jord til vann i forbindelse med bygging av veg er et problem. Det er gjort søk etter litteratur på Web of Knowledge, Scopus og Google Scholar. Med forbehold om at noen studier kan være oversatt presenteres her et sammendrag av det som er funnet relevant i forhold til skogbruksoperasjoner og kvikksølv.

Målet med dette litteratursøket var å:

- (i) Gi bakgrunnsinformasjon om kvikksølv og lagring i skog, med hensyn til kilder, transport, deponering og lagring.
- (ii) Oppsummere resultater fra tidligere studier som har undersøkt hvordan skogsoperasjoner og andre forstyrrelser påvirker kvikksølv i vann, jord eller biota

- (iii) Sette funnene i dette litteratursøket i sammenheng med bygging av veg og belyse kunnskapshull.

2 Bakgrunn

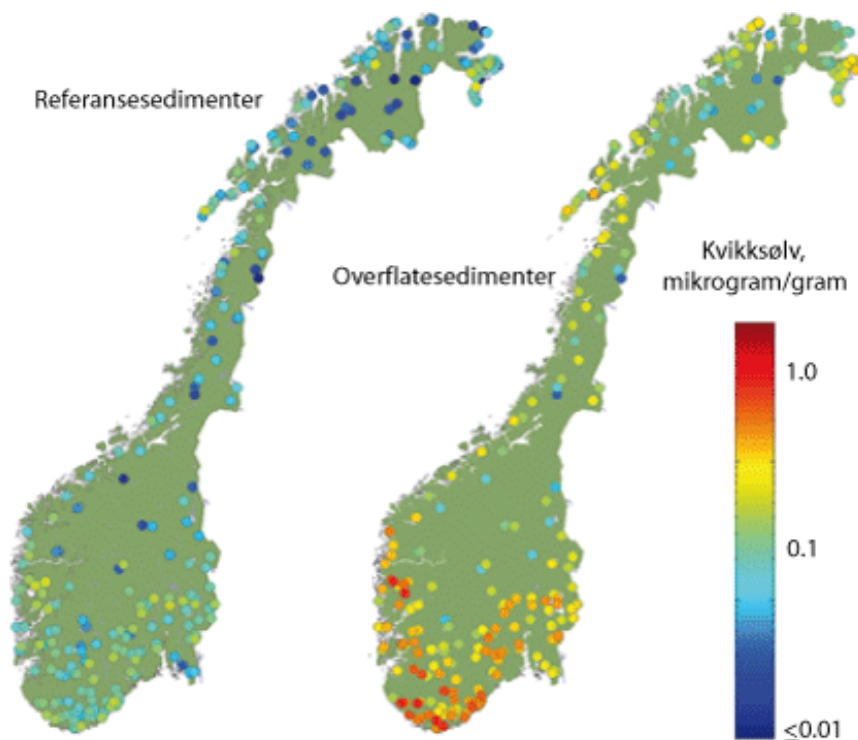
2.1 Spesiering og toksisitet av kvikksølv

Kvikksølv er et tungmetall som kan ha ulike spesiering og finnes i flere tilstandsformer; elementært kvikksølv (Hg^0), uorganisk kvikksølv i to ulike oksidasjonsstadier (Hg^I , Hg^{II}) eller bundet til organiske forbindelser som for eksempel en metylgruppe (Clarkson og Magos 2006). Metylkvikksølv (MeHg) forekommer som oftest i forbindelse med vann. Den er ansett som den mest giftige formen for kvikksølv fordi den har både lipofile og proteinbindende egenskaper som gjør at MeHg lett kan tas opp i organismer, kan krysse placenta (morkake)- og blodhjernebarrieren og føre til nevrotoksisitet (Chang 1977, Aschner og Aschner 1990). I tillegg kan MeHg akkumuleres i indre organer og muskelvev og biomagnifisere gjennom den akvatiske næringskjeden (Clarkson 1993, Watras et al. 1998, Peterson et al. 2007). Uorganiske kvikksølvforbindelser og elementært kvikksølv tas i liten grad opp i levende organismer, men kan også være toksiske ved opptak (Clarkson og Magos 2006). Økt konsentrasjon av kvikksølv i vann vil derfor være en bekymring både med tanke på vannlevende organismer og toppredatorer i akvatiske næringskjeder som fugl og mennesker (Mergler et al. 2007, AMAP 2011). På bakgrunn av toksisitetstester har EU satt en miljøkvalitetsstandard (Environmental Quality Standard, EQS) for kvikksølv, på $0,07 \mu\text{g L}^{-1}$ i vann, og $20 \mu\text{g kg}^{-1}$ våtvekt i fisk (EU 2013). Denne konsentrasjonen i fisk er funnet å være overskredet i mange innsjøer i blant annet Norge, Sverige, Canada og Finland (Håkanson et al. 1990, Lucotte et al. 1995, Rask et al. 1998, Garcia og Carignan 2005, Greipsland 2011, Svae 2011, Fjeld og Rognerud 2012, Mæhlumsveen 2012, Myreng 2013).

2.2 Kilder til kvikksølv

Kvikksølv slippes ut til vann og luft enten fra naturlige eller antropogene kilder. Naturlige kilder til Hg inkluderer forvitring av berggrunn og vulkanutbrudd, og kvikksølv finnes da gjerne som flyktig Hg^0 . Skogbrann fører også til stor frigivning og redistribusjon av Hg^0 (Friedli et al. 2009, Mitchell et al. 2012).

Antropogene kilder til utslipp er forbrenning av fossilt brennstoff, gruvedrift og andre industriprosesser. Globale utslipp av kvikksølv har økt med en faktor på 3 siden førindustriell tid (Bergan et al. 1999). De siste 10 årene har utslippene gått ned i Europa og USA som følge av utslippsreducerende tiltak. I Norge har tiltak mot utslipp fra olje- og gassvirksomhet, metallurgisk industri og regulering av kvikksølv i produkter redusert utslippene med 67 % fra 1995 til 2010. I 2010 slapp Norge ut 0,74 tonn kvikksølv fordelt på industri, olje- og gassvirksomhet, avfall og avløp, trafikk og produkter som inneholder kvikksølv (Sørensen 2012). I Asia, som står for mer enn 50% av de globale utslippene, fortsetter utslippene av kvikksølv å øke (Selin 2009). På grunn av atmosfærisk redistribusjon vil Norge derfor fortsatt få tilførsel av Hg^0 . Konsentrasjonen av kvikksølv vil være høyest nærmere en utslippskilde, og Sør-Norge har derfor hatt de høyeste konsentrasjonene av kvikksølv på grunn av tilførsel fra sør- og midt-Europa (figur 1).



Figur 1. Konsentrasjon av kvikksølv i referansesediment (representerer konsentrasjoner fra før-industriell tid) sammenliknet med overflatesediment, fra den tredje nasjonale sedimentundersøkelsen i Norge fra 2004–2006. Figur fra miljøstatus.no, basert på data fra Rognerud et al. (2008).

Dette bildet er i ferd med å endre seg; med avtakende utslipp fra Europa og økende utslipp fra Asia jevnes konsentrasjonene ut på landsbasis med relativt økende konsentrasjoner i Nord-Norge (Rognerud et al. 2008).

2.3 Transport og deponering

Kvikksølv i form av Hg^0 kan fraktes over lange avstander i atmosfæren. I tillegg til deponering av atmosfærisk kvikksølv med nedbør (våtdeponering) kan deponering skje ved tørre prosesser. Tørrdeponering skjer på overflaten av blader, barnåler og annen vegetasjon. Stort areal av bladverk gir stort areal for interaksjon og avsetning av kvikksølv. En del av kvikksølvet som blir avsatt på trær vaskes senere av med nedbør, og noe deponeres på bakken ved nedfall av blader, kvister og barnåler (Munthe et al. 2007). Mengde nedfall og konsentrasjon av Hg i nedfallet er viktige faktorer som påvirker konsentrasjonen av Hg i skogbunnen (Grigal 2002).

2.4 Lagring

Kvikksølv har høy affinitet for biologisk materiale og lagres i det øvre humuslaget av jord. Der bindes det til halogenider, uorganiske sulfider (HS^- og S^{2-}) og organiske thiolter (RS^-) i organisk materiale. Mengden organisk karbon vil være en avgjørende faktor for tilbakeholdelse av kvikksølv i skog (Obrist et al. 2011), og skogbunn er et globalt reservoar for kvikksølv deponert fra tidligere og pågående utslipp (Grigal 2003). Mer permanent lagring av kvikksølv vil skje ved begravning i dyphavssedimenter, som er en veldig langsom prosess (Selin 2009).

2.5 Biotilgjengelighet og metylering

Kvikksølv kan mobiliseres fra jord til vann, dette øker konsentrasjonen av kvikksølv i vann og dermed tilgjengeligheten av kvikksølv for opptak i biota. Biotilgjengelighet av kvikksølv avhenger også av tilstandsform, som påvirkes av flere faktorer som pH, temperatur, oksygenforhold og tilstedeværelse av organisk materiale. I oksygenrikt vann vil Hg og MeHg i høy grad være bundet til thiolter (Skylberg et al. 2003). Under oksygenfattige forhold økes

løseligheten av Hg og MeHg på grunn av dannelse av løselige sulfidkomplekser (Benoit et al. 1999, Skyllberg et al. 2009). Høy temperatur og kloridkonsentrasjon og lav pH kan også øke løseligheten og dermed biotilgjengelighet av kvikksølvforbindelser i vann (Reimers et al. 1973, Hintelmann og Wilken 1995). Løst organisk materiale kan øke produksjon av MeHg ved å stimulere vekst hos metylerende bakterier som bruker organisk karbon som energikilde. Ved lav pH vil organisk karbon være mindre negativt ladet og dermed mindre egnet til å danne kompleks med kvikksølv, dette gjør at kvikksølv blir mer tilgjengelig for metylerende bakterier. Hg blir mindre tilgjengelig for metylerende bakterier når det danner komplekser med løst organisk materiale, eller ved at løst organisk materiale medierer reduksjon av Hg^{II} til flyktig Hg^0 (Ravichandran 2004). Biotisk metylering foregår som oftest i anaerobe våtmarksområder og i den øvre delen av sedimenter og gjennomføres av sulfat (SRB)- og jernreducerende bakterier (FeRB) (Compeau og Bartha 1985, Kerin et al. 2006). For at sulfatreducerende bakterie skal kunne metylere kvikksølv trenger de organisk materiale som fungerer som elektron donorer, sulfat som fungerer som elektron akseptor, høy temperatur og nøytrale Hg-Sulfid komplekser (Bishop et al. 2009). Abiotisk metylering av kvikksølv ser ut til å være mindre viktig, men kan forekomme i vann med høyt innhold av organisk materiale som kan donere metylgrupper (Weber 1993, Celo et al. 2006).

3 Oppsummering av tilgjengelig data

I dette kapittelet oppsummeres funn fra tidligere studier der det er undersøkt hvordan skogsoperasjoner og andre forstyrrelser i boreale skoger påvirker kvikksølv i vann, jord eller biota. Disse studiene har undersøkt effekter på en eller flere ulike behandlinger, for eksempel skogbruksoperasjonene hogst, markberedning og stubbefjerning, i tillegg til brann. Dette har blitt undersøkt gjennom parvise studier av nedbørsfelt ("Paired catchment studies") der forfatterne har målt avrenning og konsentrasjon av kvikksølv jevnlig gjennom flere år og sammenliknet et eller flere berørte nedbørsfelt med referansefelt med uberørt skog. Slike studier er gjennomført i Finland (Porvari et al. 2003), Sverige (Bernhardsson 2006, Sørensen et al. 2009a, Sørensen et al. 2009b, Kraus 2011, Eklöf et al. 2013, Eklof et al. 2014) og i Norge (de Wit et al. 2012). Andre studier har undersøkt responsen på hogst i mange nedbørsfelt (Skyllberg et al. 2009, Eklöf et al. 2012, Mitchell et al. 2012), ulempen med disse studiene er at målingene kun gir et øyeblikksbilde ettersom det bare er tatt 1–2 prøver per felt. I Sverige er det også gjennomført en studie på produksjon av MeHg i skogsjord, der en har undersøkt forskjeller mellom felt utsatt for flathogst og referansefelt (Kronberg 2014). I Canada er det gjennomført flere studier undersøkt konsentrasjon av kvikksølv i biota i innsjøer som mottar vann fra nedbørsfelt utsatt for hogst eller brann (Garcia og Carignan 1999, 2000, 2005, Desrosiers et al. 2006, Garcia et al. 2007). For detaljer om hvilke endepunkter som er undersøkt, antall nedbørsfelt og hyppighet av prøvetaking i de ulike studiene henvises det til appendix 1. Appendix 1 omfatter også studier og rapporter som tar for seg modellering og estimering av kvikksølvkonsentrasjoner, samt annen relevant litteratur for utlekking av kvikksølv og hogstoperasjoner.

3.1 Skogbruksoperasjoner og kvikksølv

Tilbakeholdelse av kvikksølv i skogsjord forhindrer store deler av atmosfærisk deponert kvikksølv fra å bli tilgjengelig for opptak i biota i det akvatiske miljøet. Likevel kan oppkonsentrering av kvikksølv i jord være en trussel for akvatiske biota på grunn av kontinuerlig utlekking av kvikksølv fra jord til vann

og det har blitt observert alarmerende høye konsentrasjoner av kvikksølv i ferskvannsfisk (Håkanson et al. 1990, Lucotte et al. 1995, Rask et al. 1998, Rognerud og Fjeld 2002, Garcia og Carignan 2005, Fjeld og Rognerud 2012, Mæhlumsveen 2012, Myreng 2013). Skogbruksoperasjoner fører til at overflatejord der kvikksølv ligger lagret forstyrres og det er derfor en fare for økt transport av kvikksølv fra jord til vann på grunn av erosjon og utvasking. Skogbruk kan endre hydrologien i nedbørsfelt av flere grunner. Åpne områder etter hogst kan føre til høyere akkumulering av snø vinterstid og hurtigere snøsmelting om våren (Murray og Buttle 2003). Tap av vegetasjon vil gi redusert transpirasjon (fordamping av vann fra blader på planter og trær), høyere vannstand i skogsjord (Bosch og Hewlett 1982) og det er vist at hogstoperasjoner fører til økt avrenning fra nedbørsfelt (blant annet Rosén et al. (1996)). Bruk av skogsbruksmaskiner kan også føre til mer kompakt skogsjord (Greacen og Sands 1980) som sammen med høyere vannstand i jorda vil kunne føre til strømninger av vann i overflatejord som er rik på organisk materiale. Videre har Hg høy affinitet for organisk materiale (Grigal 2003) og det er funnet økt transport av organisk karbon fra nedbørsfelt etter hogstoperasjoner (Schelker et al. 2012). Økt avrenning og økt konsentrasjon av Hg-TOC forbindelser i vann er derfor en potensiell effekt etter hogstoperasjoner, og kan føre til økt transport av kvikksølv til det akvatiske miljøet. Overmetning av vann i det øvre karbonrike jordlaget kan føre til anoksiske forhold som sammen med økt temperatur i bakken i åpne områder (Bhatti et al. 2000) og frisk tilgang på organisk karbon etter nedbryting av planterester fra hogst kan gi gunstige forhold for metylerende bakterier og gi økt produksjon av metylkvikksølv (Bishop et al. 2009). Skogbruk og hogst kan derfor potensielt påvirke både konsentrasjon av kvikksølv i vann, føre til økt utlekking av kvikksølv på grunn av økt avrenning og føre til ny produksjon av MeHg.

3.1.1 Konsentrasjon og avrenning av THg, MeHg og TOC

Det er målt en økning i konsentrasjoner av THg og/eller MeHg i resipient tilknyttet nedbørsfelt utsatt for hogst eller andre store forstyrrelser i flere

studier, men det er også målt uendrede konsentrasjoner, eller det er sett en nedgang i konsentrasjon (Tabell 1). Gjennomsnittlige konsentrasjoner målt

Tabell 1. Oppsummering av observerte endringer i THg, MeHg og TOC fra skog funnet etter hogstoperasjoner eller andre store inngrep i skog relativt til målinger i referanse. Der det er rapportert en økning i konsentrasjon eller avrenning kan dette bety at det er observert etter én behandling, alle behandlinger eller behandlingene sammenslått, relativt til en referanse. Alle målinger er gjort i vann fra en resipient tilhørende et nedbørsfelt med mindre annet er spesifisert.

Artikkel	Konsentrasjon			Avrenning		
	THg	MeHg	TOC	THg	MeHg	TOC
Eklöf et al. 2014	↑	↑	↔	↑	↑	↑
Kronberg 2014	–	↑	–	–	↑	–
de Wit et al. 2014	↔	↔	↔	↑	↑	↑
Eklöf et al. 2013	↓	↓	↔	–	–	–
Moingt et al. ¹ 2013	↔	–	–	↔	–	–
Eklöf et al. ² 2012	↑	↑	↑ ³	–	–	–
Sørensen et al. 2009a	↑	↔	↔	↑	↔	↑ ⁴
Skyllberg et al. ⁵ 2009	↔	↓	↔	–	–	–
Allan et al. 2009	↔	↔	–	–	–	–
Porvari et al. 2003	↑	↑	↑	↑	↑	↑

Tegnforklaring: ↑=økning, ↓=nedgang, ↔=ingen endring, – = ikke undersøkt. ¹. THg-konsentrasjon målt i sediment i innsjø. Det ble gjort en korrelasjonsanalyse mot ulike antropogene inngrep i nedbørsfelt og det var ingen korrelasjon mellom konsentrasjon i sediment og hogst i nedbørsfelt. ². Det ble funnet økte konsentrasjoner relativt til referanse kun når behandlingene (markberedning og stubbefjerning) ble sammenslått og det i tillegg ble justert for stedsspesifikke faktorer (breddegradsplassering). ³. Siden det ble sett en økt konsentrasjon av MeHg og THg og det var en sterk korrelasjon mellom Hg-TOC og MeHg-TOC, antas det at det ble sett en økning i TOC. ⁴. Høyere avrenning, antar økt transport av TOC. ⁵. Relativt til referanse. Ingen måling gjort før hogst.

i resipient tilknyttet nedbørsfelt (både referansefelt og felt utsatt for hogst) varierer mellom studier, og ligger godt under EUs miljøkvalitetsstandard for kvikksølv i vann på 0,07 µg L⁻¹ (Tabell 2). Transporten av kvikksølv fra nedbørsfelt kan bli påvirket selv når konsentrasjonen av kvikksølv i vann holder seg uendret, fordi den totale transporten av kvikksølv ut av skogsjord vil øke ved økt avrenning, og mange studier har funnet en økt transport av

THg, MeHg og TOC fra nedbørsfelt grunnet en økning i avrenning (Tabell 1). Siden metylering av uorganisk kvikksølv også forekommer i innsjøer, både i sediment og i vannsøylen (Gilmour et al. 1992, Matilainen og Verta 1995), er det argumentert at all redistribusjon av kvikksølv til vann kan være en potensiell trussel for akvatisk biota (for eksempel ferskvannsfisk) (Bishop et al. 2009).

I syv av åtte gjennomgåtte studier ble det rapportert en korrelasjon mellom THg og total organisk karbon (TOC), som tyder på en sterk sammenheng mellom utslipp av TOC og THg fra nedbørsfelt. Denne sammenhengen er ikke like åpenbar mellom TOC og MeHg, men tre av åtte studier har rapportert en korrelasjon mellom disse (Tabell 3). Det er også funnet en korrelasjon mellom løst organisk karbon (DOC) i vann og konsentrasjon av MeHg i biota (Garcia og Carignan 1999, 2005, Garcia et al. 2007) og MeHg i biota blir diskutert mer inngående i et eget avsnitt (3.1.5). Økt konsentrasjon av MeHg etter hogstoperasjoner kan også ha sammenheng med ny produksjon av MeHg etter hogst, og dette vil bli omtalt videre i et eget kapittel (3.1.4).

Tabell 2. Gjennomsnittlige konsentrasjoner av THg og MeHg målt i resipient tilknyttet undersøkte nedbørsfelt.

Artikkel	Nedbørsfelt	Behandling	THg (ng/L)		MeHg (ng/L)		Kommentar
			Før behandling	Etter behandling	Før behandling	Etter behandling	
de Wit et al. 2014	Felt 1	H	5,3	5,0/4,1	0,18	0,22/0,15	Gjennomsnittlig verdi av Hg i vann i perioden 6 måneder før hogst. Periode etter hogst delt inn i to perioder; 0–12 måneder/13–36 måneder. 1–2 målinger per måned.
	Felt 2	Referanse	5	3,8/3,1	0,09	0,08/0,06	
Eklöf et al. 2014 (tall fra støtteinformasjon)	Felt 1 (CC)	H/MB	3,8	4,3/4,8	0,24	0,34/0,44	Gjennomsnitt av målinger 1 år før H, 2 år etter H og 2,5 år etter MB i alle tre felter. 1–2 målinger per måned.
	Felt 2 (North)	H/MB	4,3	5,0/5,6	0,34	0,37/0,48	
	Felt 3	Referanse (H/MB*)	4,3	4,6/4,7	0,27	0,29/0,37	
Eklöf et al. 2013	Felt 1	MB	10,4	9,5	2,00	1,30	Gjennomsnitt av målinger i perioden 1 år før og i 2 år etter behandlingene. 2 målinger per måned.
	Felt 2	SF (lokalitet 1)	9,8	7,0	1,20	0,70	
		SF (lokalitet 2)	6,7	5,5	2,10	1,00	
		Referanse (oppstrøms)	5,9	4,5	1,10	1,70	
	Felt 3	Referanse 1	4,6	5,7	1,00	0,70	
Eklöf et al. 2012	Felt (n=15)	SF	–	10,2/7,5	–	0,63/0,67	Gjennomsnitt av målinger fra samtlige felt (to måling per felt). Målinger fra to ulike år (2009/2010).
	Felt (n=21)	MB	–	8,4/6,3	–	0,72/0,95	
	Felt (n = 18)	Referanse	–	7,6/4,7	–	0,41/0,55	
Povari et al. 2003	Felt 1	H	8,1	12,0	0,15	0,35	Gjennomsnitt målinger i periode 3 år før og 3 år etter hogst. Månedlige målinger.
	Felt 2	Referanse	4,9	4,7	0,33	0,33	

Forkortelser: H= hogst, MB=markberedning, SF= stubbefjerning. * Målinger i referansefeltet er tatt i samme tidsvindu som målingene i de to feltene som ble berørt av hogst og markberedning.

Tabell 3. Funn av korrelasjon mellom TOC og THG, samt mellom TOC og MeHg. Eventuelle korrelasjoner er målt i avrenningsvann fra resipient tilknyttet nedbørsfelt.

Artikkel		THg-TOC	MeHg-TOC
Eklöf et al.	2014	sterk ↑	svak ↑
de Wit et al.	2014	sterk ↑	Ingen – svak ↑
Eklöf et al.	2013	↑	↑
Eklöf et al.	2012	sterk ↑	svak ↑
Sørensen et al.	2009a	↑	↔
Skyllberg et al. ¹	2009	↑	↔
Porvari et al.	2003	↑	↔

Tegnforklaring: ↑ = positiv korrelasjon., ↔ = ingen korrelasjon, – = ikke undersøkt. ¹ Ikke THg-, men Hgⁱⁱ-verdier som er oppgitt i artikkel.

3.1.2 Effekter av ulike typer skogbruksoperasjoner

Hogstoperasjoner inkluderer ulike type inngrep og hvilke type inngrep som bidrar mest til økt transport av kvikksølv fra nedbørsfelt er av interesse når man ønsker å begrense utlekking til resipient. Ulike behandlinger som er sammenliknet er høsting av trestamme (hogst), konvensjonell markberedning og høsting av stubber. Markberedning gjennomføres etter hogst og innebærer vending av jord ved bruk av maskiner. Dette gjøres for å bedre spiregrunnet, bidra til økt overlevelse og vekst, og gi økt verdiskapning i skogbruket. Høstede stubber kan brukes i produksjon av etterspurt biogass som både kan bidra til redusert bruk av fossile brensler og gi en ekstra inntekt til skogeier. Disse fordelene må veies opp mot eventuelle negative konsekvenser av praksisen og man har ønsket å sammenlikne markberedning med stubbefjerning med hensyn til utlekking av kvikksølv fordi stubbefjerning kan føre til økt forstyrrelse og kompaktering av jord sammenliknet med konvensjonell markberedning (Eklöf 2012).

Eklöf et al. (2014) undersøkte transport av kvikksølv fra tre nedbørsfelt (to «behandlede» felt, og ett referansefelt) i et år før tømmerhogst, i to år etter tømmerhogst og i tre år etter markberedning ved å måle mengde avrenning

og konsentrasjon av kvikksølv samt andre relevante parametere i resipientene tilknyttet nedbørsfeltene. Det ble funnet 50–70 % økning i transport av kvikksølv etter tømmerhogst, der økningen hovedsakelig skyldtes økt avrenning. Etter at både hogst og markberedning var gjennomført ble det derimot funnet en 30–50 % økning i konsentrasjon av både THg og MeHg. Økt konsentrasjon etter markberedning, men ikke etter hogst alene kunne forklares av flere faktorer enn kun forskjellen mellom de to behandlingene, fordi årstid og vannføringen var ulik ved gjennomføring av de to operasjonene. Da markberedning ble gjennomført var jorda opptint og det var høy avrenning fra nedbørsfeltet. Hogsten ble imidlertid gjennomført vinterstid da avrenningen generelt var lav og tele beskyttet jorda fra å bli sammenpresset av tunge skogbruksmaskiner. Siden mobilisering av kvikksølv påvirkes av bevegelse av vann gjennom jord (Bishop et al. 2009), og bevegelsen av vann igjen påvirkes av ytre faktorer som forhold i jorda og mengde vann, kan de ytre faktorene ha vært en del av forklaringen på endringen i konsentrasjon av kvikksølv observert etter markberedning.

På tross av dette er det gjennomført andre studier der det ble påført store påkjenninger i skogbunn sommerstid både ved hogst (Allan et al. 2009) og stubbefjerning og markberedning (Eklöf et al. 2013) uten at det ble observert økte konsentrasjoner av kvikksølv i vann. Allen et al (2009) observerte uendrede konsentrasjoner etter hogst, mens Eklöf et al. (2013) observerte at konsentrasjoner av THg og MeHg i resipient hadde gått ned etter stubbefjerning og markberedning sammenliknet med før behandlingene. I det sistnevnte studiet ble det foreslått at tømmerhogsten hadde bidratt til forhøyede konsentrasjoner og at områdene gjennomgikk en gjenoppretting mot normal utlekking i perioden etter at markberedning og stubbefjerning ble gjennomført. Dette kunne imidlertid ikke verifiseres, siden ingen målinger ble gjort før hogsten ble utført. I dette studiet ble det ikke observert noen signifikant forskjell i effekt mellom markberedning og stubbefjerning (Eklöf et al. 2013). Hvorvidt markberedning og stubbefjerning førte til ulike respons ble også undersøkt i 54 nedbørsfelt (Eklöf et al. 2012), hvor det heller ikke ble funnet ulike kvikksølvkonsentrasjoner som resultat av behandlingene.

Dette gir ikke et entydig bilde av hvilken effekt markberedning og stubbefjerning har på utlekking av kvikksølv fra nedbørsfelt, men indikerer at både hvordan og når skogsoperasjoner blir utført kan påvirke transport og konsentrasjoner av kvikksølv i avrenningsvann.

3.1.3 Kantsone med vegetasjon og andel hogst i nedbørsfelt

Retningslinjer for bærekraftig Norsk skogbruk (Norsk PEFC skogstandard) omfatter opprettholdelse av kantsoner med bevart vegetasjon langs myrer, vann og vassdrag for å bevare biologisk mangfold, filtrere tilsig av næring fra hogstfelt og hindre erosjon. Opprettholdelse av kantsoner er også anbefalt blant annet i Sverige (www.svo.se), Finland og Canada (Rask et al. 1998, Porvari et al. 2003, Allan et al. 2009). En slik sone forhindrer tunge maskiner fra å kjøre i områder nær resipient, og kan videre hindre dannelse av dammer med potensielt gunstige forhold for produksjon av MeHg i denne sonen. Kantsonen er gjerne rik på humus og det er vist høyere transport av MeHg per andel område fra slike soner enn fra veldrenert skogsjord (Bishop et al. 2009). Det er derfor foreslått at å redusere mengden forstyrrelser i denne sonen vil redusere innvirkningen skogsdrift har på transport av kvikksølv og produksjon av MeHg.

I Finland ble det etterlatt en kantsone på begge sider av en elv som samlet vann fra et nedbørsfelt, og det ble likevel funnet en økt konsentrasjon av både THg og MeHg i resipient. Dette ble ikke sammenliknet med et felt uten en slik sone, men det er verdt å merke at det til tross for kantsonen ble observert en kraftig økt konsentrasjon av kvikksølv i elva (Porvari et al. 2003). I Sverige ble konsentrasjonen av MeHg sammenliknet i avrenning fra et hogstfelt med og et uten kantsone, der konsentrasjonen av MeHg var mye høyere i vann fra feltet uten en slik sone (Eklof et al. 2014). I dette studiet kunne det dog ikke utelukkes at denne forskjellen skyldtes ulik andel hogst i de to nedbørsfeltene; i feltet uten bufferstripe ble 64 % av skogen hugget ned, mot 40 % i feltet med bufferstripe (Eklof et al. 2014). Andre studier kan hverken bekrefte eller avkrefte hvorvidt andel hogst i et nedbørsfelt påvirker konsentrasjonen av Hg

i resipient. Det har blitt funnet en korrelasjon mellom andel hogst i nedbørsfeltet med konsentrasjon av THg og MeHg i vann (Eklöf et al. 2013), samt en korrelasjon mellom hogstandel og konsentrasjon av kvikksølv i biota (Garcia og Carignan 2005). I motsetning ble det ikke funnet en effekt av andelen hogst på konsentrasjon av kvikksølv i resipient i en studie der hele 54 felt (inkludert referansefelt) ble undersøkt (Eklöf et al. 2012). Den begrensede kunnskapen man har av effekten av en slik kantsone kan likevel tyde på at den har en beskyttende effekt, men dette er ikke avklart.

3.1.4 Skogbruk og produksjon av MeHg

Kronberg (2014) undersøkte produksjon og transport av MeHg i 10 områder med flathogst og 10 referanseområder jevnt fordelt over og under den marine grense¹. Det ble funnet en netto økning i produksjon av MeHg i jord i områder utsatt for flathogst og den observerte økningen var opptil 10 ganger så høy som i referanseområdene. Hogstfelt hadde signifikant høyere absoluttkonsentrasjon av MeHg i jord relativt til referansefelt, i tillegg til høyere % MeHg av total Hg. Det foreslås at dette skyldes ny produksjon i hogstfelt. % MeHg av total Hg økte med mengde vann i jord, som ikke er overaskende siden metylering er en anaerob prosess. Det ble også funnet en økt konsentrasjon av kvikksølv i vann fra nedbørsfelt utsatt for hogst relativt til referansefelt (0.54 ± 0.32 og 0.30 ± 0.092 ng L⁻¹, respektivt) for felt med kupert terreng som var plassert over den marine grense. En slik forskjell var ikke observert i felt under den marine grense, som kan skyldes høye konsentrasjoner av MeHg også i referansefelt i denne sonen. Høye konsentrasjoner i referansefelt kan skyldes at områdene var påvirket av våtmarksområder (myr), og tidligere studier bekrefter at våtmarksområder er en kilde til kvikksølv da høy vannstand og anaerobe forhold er gunstige for metylerende organismer (St. Louis et al. 1994, Tjerngren et al. 2012).

Skyllberg et al. (2009) undersøkte kvikksølvkonsentrasjoner i elver knyttet til skog som var hugget 0–4 år (n=20) og 4–10 år (n=27) før målingene ble

¹ Den marine grense er den høyeste plasseringen av kystlinjen etter sist istid. For mer info se avsnitt 3.2.3.

gjennomført samt i elver knyttet til referansefelt (n=10) med mer enn 70 år gammel uberørt skog. Det ble funnet høyere konsentrasjon av MeHg i elver tilknyttet 0–4 års-gruppen (gjennomsnitt $\sim 0,6 \text{ ng L}^{-1}$)² relativt til et referansefelt (gjennomsnitt $\sim 0,2 \text{ ng L}^{-1}$). De fant korrelasjon mellom THg og TOC, men ikke mellom MeHg og TOC og antyder derfor at andre prosesser enn TOC–MeHg–mobilisering førte til forhøyede MeHg konsentrasjoner. De estimerte at 1/6 av MeHg–konsentrasjonene skyldtes mobilisering, mens hele 5/6 skyldtes ny produksjon.

I motsetning til disse to studiene konkluderte Eklöf et al. (2012) med at økt konsentrasjon av MeHg i vann skyldtes økt mobilisering av organisk karbon og ikke metylering eller andre mobiliseringsmekanismer. Dette var også konklusjonen i et studie der det ble observert en kraftig økning i konsentrasjoner av MeHg i vann i forbindelse med anlegging av en midlertidig veg for skogbruksmaskiner (Munthe og Hultberg 2004). Anlegging av vegen, som ble stabilisert av jord og grener, førte til at en liten elv som rant midt gjennom nedbørsfeltet ble blokkert og det ble dannet en liten dam ($< 50 \text{ m}^2$). Til tross for umiddelbar fjerning av blokaden da den ble oppdaget var de naturlige forholdene i skogbunnen endret og dette førte til at strømningsløpet til elva ble endret. Studien gikk over flere år, og konsentrasjonen av MeHg i vann økte fra et gjennomsnitt på $0,05 \text{ ng L}^{-1}$ i perioden før hogst til et gjennomsnitt på $0,22 \text{ ng L}^{-1}$ i de tre resterende årene undersøkelsene pågikk (konsentrasjonene ble presentert i (Bishop et al. 2009). Siden blokaden ble fjernet relativt hurtig skyldtes økte konsentrasjoner av MeHg trolig remobilisering av kvikksølv fra skogsjord og ikke ny produksjon (se artikkel for detaljer om studiet).

Retningslinjene for bærekraftig norsk skogbruk omtaler også terrengtransport og veg gjennom skogsområder. Skogsveg skal legges lett i landskapet og terrengtransport skal gjøres på en mest mulig skånsom måte slik at terrengskader som kan gi vannavrenning og erosjon unngås. Utdrift av tømmer

² Verdiene oppgitt er omtrentlige og runnet opp, da verdien i artikkelen kun var oppgitt i en figur (Skjellberg et al. 2009).

i områder med dårlig bæreevne skal fortrinnsvis skje på frossen eller godt snødekket mark. Dette kan bidra til å motvirke dannelsen av områder som er gunstige for produksjon av MeHg.

3.1.5 Effekt av hogst på konsentrasjon av kvikksølv i biota

Det har i noen studier blitt undersøkt konsentrasjon av kvikksølv i biota samlet fra resipienter tilknyttet nedbørsfelt utsatt for skogsoperasjoner og andre forstyrrelser, og de observerte endringene i konsentrasjon er oppsummert i Tabell 4. I Canada ble det undersøkt konsentrasjoner av kvikksølv i samleprøver av zooplankton og i flere fiskearter fra sjøer som mottok vann fra nedbørsfelt med hogst, brann samt uberørt skog (referanse) (Garcia og Carignan 1999, 2000, 2005, Garcia et al. 2007). I alle innsjøene sett under ett varierte konsentrasjonene av kvikksølv fra 0,017– 0,38 $\mu\text{g g}^{-1}$ tørrvekt i zooplankton (Garcia og Carignan 1999) og 0,2 – 20,2 $\mu\text{g g}^{-1}$ tørrvekt i fisk (Garcia og Carignan 2005). Fiskene ble samlet inn enten ett eller to år etter at forstyrrelsen (hogst/brann) fant sted. I fisk økte konsentrasjonene av MeHg

Tabell 4. Relativ endring i konsentrasjon av MeHg i biota i resipienter tilknyttet behandlede nedbørsfelt sammenliknet med konsentrasjon av MeHg i biota i referanseområder.

Artikkel		Organisme	Endring MeHg-kons. biota	i Korrelasjon: i DOC og MeHg i biota	Kommentarer
de Wit et al.	2014	Steinfluer ¹	↓	–	Innsamlet 17. oktober 2008, 29. mai og oktober 2009. Skogsoperasjoner 13–16 januar 2009
Garcia et al.	2007	Zooplankton	↑	↑	Brann eller hogst i 1995, zoplankton innsamlet 1996–1998, mai, juli, august/september
Desrosiers et al.	2006	Perifyton	↑	–	Hogst gjennom vinterern, perifyton innsamlet i juni til midten av august påfølgende og neste sommer.
Garcia & Carignan	2005	Flere fiskearter	↔, ↑ ²	↑	Hogst og brann i 1995, innsamling av fisk og vann sommeren 1996 og 1997
Garcia & Carignan	1999	Zooplankton	↑	↑	Hogst og brann i 1995 omtrent et år før innsamling av biota
Rask et al.	1998	Abbor ³	↓	–	Forundersøkelser startet sommeren 1991, hogst vinteren 1992, markberedning tidlig sommer 1993, fisk ble innsamlet årlig i august.

Tegnforklaring: ↑ = økning/positiv korrelasjon, ↓ = nedgang/negativ korrelasjon, ↔ = ingen endring, – = ikke undersøkt/rapportert. ¹ *Nemoura cinerea* og *Nemurella pictetii*. ² Fant en økning etter korrigerings for trofisk nivå og ulikheter i stabile N-isotoper for fisker på høyt, men ikke lavt trofisk nivå. ³ *Perca fluviatilis*

generelt med både lengde og trofisk nivå (målt ved stabile isotoper av nitrogen). Det ble funnet signifikante høyere konsentrasjoner av kvikksølv i fisk fra innsjøer knyttet til nedbørsfelt med hogst relativt til fisk fra referansesjøer og dette gjaldt for fiskearter på høyt, men ikke lavt trofisk nivå. Det ble derimot ikke funnet noen forskjell i konsentrasjon av MeHg mellom fisk fra innsjøer knyttet til nedbørsfelt der all skogen var brent og fisk fra referansesjøer. Fisk med høyest konsentrasjon av kvikksølv ble likevel funnet i to innsjøer knyttet til felt med delvis nedbrent skog. De høyere konsentrasjonene av kvikksølv i fisk fra innsjøer knyttet til hogstfelt kunne ikke knyttes til forskjeller i biomagnifiseringsfaktor, men skyldes trolig høyere biotilgjengelighet av kvikksølv for organismer i bunn av næringskjeden (Garcia og Carignan 2005). Dette ble videre støttet av konsentrasjoner av kvikksølv målt i zooplankton, der konsentrasjonene var signifikant høyere i fisk fra sjøer knyttet til hogstfelt, enn fisk fra referansesjøer (Garcia og Carignan 1999). Den viktigste årsaken til økte konsentrasjoner av kvikksølv i fisk fra sjøer knyttet til hogstfelt var trolig økt eksport av organisk karbon fra nedbørsfeltene og det ble funnet en korrelasjon mellom kvikksølvkonsentrasjoner i fisk og organisk karbon i vann. Etter hogst blir organisk karbon bevart i jorda, og ved endret hydrologi kan dette gi en økt transport av organisk karbon fra nedbørsfelt. Organisk karbon er viktig av flere årsaker: det fungerer som en vektor for Hg-transport (Kalbitz og Wennrich 1998), organisk karbon er viktig ved MeHg produksjon (Matilainen 1995) og det fører til lavere lysgjennomstrømning i vann og dermed lavere fotodegradering av MeHg (Seller et al. 1996). Ved brann kan derimot sterk varme føre til mineralisering av jord, lavere innhold av organisk karbon samt reduksjon av uorganisk Hg til flyktig Hg⁰. Forklaringen på de høye verdiene av kvikksølv i fisk fra sjøer knyttet til delvis nedbrente nedbørsfelt kan forklares med at det ble observert høye konsentrasjoner av sulfat (SO₄²⁻) i sjøene i kombinasjon med høy utlekking av organisk karbon fra disse feltene, og det er mulig dette førte til ny produksjon av MeHg i enten nedbørsfeltene eller innsjøene.

Som nevnt ble det funnet høyere gjennomsnittlig konsentrasjon av kvikksølv i zooplankton i sjøer knyttet til felt med hogst sammenliknet med sjøer med

nylig brent eller uforstyrret skog (Garcia og Carignan 1999). I en senere studie ble sesongvariasjon i kvikksølvkonsentrasjon i zooplankton undersøkt fra de samme innsjøene (Garcia et al. 2007). Konsentrasjonen i zooplankton var lavest om våren, hadde en topp ved midtsommer og sank igjen sent om høsten i alle sjøene. De fant også at zooplankton i sjøer knyttet til hogstfelt hadde en signifikant høyere konsentrasjon av kvikksølv enn referansesjøene og sjøene knyttet til brannfelt ved midtsommer, som kan skyldes økt transport av MeHg fra hogstfelt ved midtsommer. Konsentrasjonene av kvikksølv i zooplankton i sjøene tilknyttet hogstfelt forble forhøyet gjennom treårsperioden, sammenliknet med de to andre gruppene der det ble sett en nedgang (Garcia et al. 2007). Dette indikerer at effektene av hogst på MeHg-konsentrasjon i zooplankton varer over en lengre periode.

Konsentrasjoner av kvikksølv i biota har også blitt undersøkt i matter av perifyton (primærprodusenter) (Desrosiers et al. 2006). Konsentrasjonene målt før hogst varierte i perifyton mellom lokaliteter og lå mellom 15–398 ng g⁻¹ tørrvekt. Resultatene varierte mellom lokalitetene og det ble ikke funnet en samlet effekt på perifyton i alle felter utsatt for hogst relativt til referansefelter. Det ble likevel funnet en nedgang i biomasse og en økning i konsentrasjoner av MeHg i majoriteten av lokalitetene med hogst i nedbørsfeltet. Nedgangen i biomasse varierte mellom 0,6–1,5 ganger, og økning i MeHg varierte mellom 2,5–9,6 ganger i perifyton. Lavere biomasse kan skyldes redusert lysgjennomstrømning etter hogst. Lavere biomasse kan også gi en økt biokonsentrering av MeHg i perifyton. Konsentrasjonen av MeHg var fortsatt økende to år etter hogst.

I motsetning til de nevnte studiene er det gjennomført en studie der det ble funnet en nedgang av kvikksølvkonsentrasjon (Tabell 5) i biota i perioden etter hogst (de Wit et al. 2014). De fant redusert bioakkumulering av kvikksølv etter hogst i primærkonsumenter (Steinfluenymfene *Nemoura cinerea* og *Nemurella pictetii*), en reduksjon som ikke ble sett i referansen. Denne reduksjonen i bioakkumulering skjedde til tross for stabile konsentrasjoner av MeHg i vannet, samt en økt transport av kvikksølv grunnet økt avrenning. Studien

tyder på at et diettbytte ved overgang fra bakterie- til mer algebasert kost førte til redusert akkumulering. Det ble ved visuelle observasjoner funnet økt vekst av alger etter hogst, som faller sammen med økte konsentrasjoner av næringsstoffer som ammonium, nitrat og fosfor i avrenningsvannet. At et diettbytte fra bakterie- til algebasert kost kan ha vært årsaken til redusert akkumulering av MeHg støttes også av diett-biomarkører (de Wit et al. 2014) og av resultatene i studien til de Wit et al. (2012). Redusert akkumulering som følge av et diettbytte kan forklares ved at alger kan være en næringskilde med relativt lave konsentrasjoner av MeHg, eller det kan skyldes en vekstfortynningseffekt. Vekstfortynningseffekten innebærer at økt tilgang på alger kan gi høyere somatisk vekst i konsumenter som igjen kan gi lavere MeHg per andel biomasse (Goedkoop et al. 2007). Et diettbytte er også foreslått av Porvari et al. (2003) som en forklaring på den svake nedgangen i Hg-konsentrasjoner i abbor (*Perca fluviatilis*) observert i en treårsperiode etter hogst i en studie fra Finland (Rask et al. 1998).

Tabell 5. Konsentrasjoner av MeHg (ug/g tørrvekt) i biota. Biota innsamlet ved to anledninger etter hogst; 4/8 måneder etter. I hver gruppe er n=2-5. Gjennomsnittsverdi oppgitt.

Artikkel	Nedbørsfelt	Behandling	Art	MeHg (ng g ⁻¹ dry mass)	
				Før behandling	Etter behandling
de Wit et al. 2014	Felt 1	H	Biofilm	6,2	4,8/4,0
	Felt 2	Referanse		5,9	6,3/2,6
	Felt 1	H	Steinfluer ^{1.}	166	90/120
	Felt 2	Referanse		46	43/ 37
	Felt 1	H	Vårflue ^{2.}	275	233/120
	Felt 2	Referanse		90	90/120

Forkortelser/tegnforklaring: H= hogst. x=ikke undersøkt. ^{1.} Nemoura cinerea og Nemurella pictetii. ^{2.} Plectrocnemia conspersa

Bishop et al. (2009) estimerte at 9–23% av Hg i fisk i Sverige kunne tilskrives økt transport av Hg til vann etter hogstoperasjoner. Til tross for at flere studier har funnet resultater som tyder på en sammenheng mellom hogst og økte konsentrasjoner av MeHg i biota, indikerer studien til de Wit et al. (2014) at

det ikke er nok å se på transport av kvikksølv alene, fordi akkumulering av kvikksølv i biota er en kompleks prosess. Faktorer som økt næring og endring i næringskjeden kan gi en nedgang i akkumulering av kvikksølv, til tross stabile konsentrasjoner av kvikksølv i vann etter hogst og økt transport av kvikksølv fra hogstfelt.

3.2 Variasjoner i Hg-transport som ikke skyldes skogbruk

Transport av kvikksølv fra nedbørsfelt er en kontinuerlig prosess, der skogbunnen er et reservoar for kvikksølv. I dette underkapittelet oppsummeres data som beskriver endringer i transport av kvikksølv, med fokus på hvordan underliggende parametere påvirker den naturlige og kontinuerlige transporten av kvikksølv.

3.2.1 Skogbunn: et reservoar for Hg

Den sterke forbindelsen mellom Hg og organisk materiale, især reduserte svovelgrupper er fundamentalt for å forstå fordelingen av Hg i det terrestriske systemet (Grigal 2003). Alriksson (2001) fant at konsentrasjonen av karbon i det øvre laget av jorda var den viktigste faktoren som forklarte variasjonen i Hg-konsentrasjoner i jord, der karbon forklarte mellom 15 og 64 % av variasjonen i Hg-konsentrasjoner og hvor mer av variasjonen var forklart av karbon i sørlige enn i nordlige områder. En marginal del av variasjonen kunne i noen regioner av Sverige også forklares av bakgrunns-konsentrasjoner av Hg i dypere jordlag ($R^2 = 0.03-0.08$). Siden Hg har høy affinitet for organisk materiale kan dataene fra Alriksson (2001) indikere at mengden Hg som lagres i skog avhenger av organisk materiale i jorda.

Reservoaret av kvikksølv i skogsjord er generelt høyt. Mengden Hg i skogbunnen er funnet å være $1000 \mu\text{g m}^{-2}$ (Grigal 2003). Hvis man tar utgangspunkt i de høye konsentrasjonene av Hg i avrenningsvann funnet av (Eklöf et al. 2013), ser vi at utlekking av kvikksølv over hele perioden i gjennomsnitt var mellom $3-5 \mu\text{g m}^{-2} \text{år}^{-1}$. Tar vi utgangspunkt i at det ikke vil forekomme noen ny deponering og at utlekkingen vil forholde seg konstant ser vi at det med de nåværende verdier av kvikksølv i jord vil ta 200–300 år før

konsentrasjonene av Hg nærmer seg null i henholdsvis skogbunn og mineraljord.

3.2.2 Bidrag fra våt- og tørrdeponering

Munthe og Hultberg (2004) undersøkte om våtdeponering fra atmosfæren bidro til den kontinuerlige transporten av kvikksølv fra nedbørsfelt. Ved å sette opp et tak over et nedbørsfelt kunne de undersøke om dette endret transporten av kvikksølv sammenliknet med et felt som var eksponert for naturlig atmosfærisk deponering. Etter ti år med overvåkning kunne de konkludere at våtdeponering av Hg var ubetydelig for transport av THg og MeHg fra nedbørsfelt. Munthe og Hultberg (2004) observerte heller ingen utarming av Hg fra jord, selv om våtdeponering var forhindret i 10 år. Siden tørrdeponering står for nesten 4 ganger så mye av avsetningen i skog som våtdeponering (Grigal 2002) kan fraværet av kvikksølv-utarming fra skogbunn ved forhindret våtdeponering delvis skyldes kontinuerlig tilførsel av Hg ved tørrdeponering. Tørrdeponering av Hg er generelt et viktigere bidrag enn våtdeponering i skog fordi overflaten for avsetning av Hg på blader er så stor.

3.2.3 Stedsspesifikke faktorer: breddegradsplassering, den marine grense, helning og vegetasjonsdekke

Eklöf et al. (2012) fant ingen signifikant forskjell i transport av THg og MeHg til vann mellom behandlingene hogst og markberedning da 54 felt ble undersøkt. Derimot fant de en signifikant endring i konsentrasjoner av THg og MeHg i vann da de to behandlingene ble undersøkt samlet og sammenliknet med en referanse, og det samtidig ble justert for geografisk plassering (MANOVA). Da man kun tok behandlingen i betraktning ble forskjellen mellom de behandlede feltene og referansen overskygget av variasjonen skapt av breddegradsplassering, og høyere konsentrasjoner av THg og MeHg ble observert i sør (Eklöf et al. 2012). Andre studier har også funnet høyere konsentrasjoner i sørlige enn nordlige områder (Alriksson 2001, Munthe et al. 2007, Eklöf et al. 2012). Selv om kvikksølv kan transporteres opp til titusenvis av kilometer i atmosfæren (Schroeder og Munthe 1998) finner en likevel høyere konsentrasjoner nærmere punktkilder (Grigal 2002). Det meste av kvikksølv

deponert i skog i Skandinavia stammer fra punktkilder i det sørlige Europa og sør-Skandinavia og det vil derfor være høyere konsentrasjoner i sør sammenliknet med nord. Bakgrunnskonsentrasjoner i dypere jordlag har lite å si for konsentrasjonene av kvikksølv i det øvre jordlaget (Alriksson 2001).

En annen stedsspesifikk faktor som kan forklare kvikksølvkonsentrasjoner er plassering over eller under den marine grense. Den marine grense er den høyeste plasseringen av kystlinjen etter siste istid. Jord som ligger i områder under denne grensen har historisk vært utsatt for brakkevann eller marint vann, og slike forhold gir tilførsel av svovel. Svovel er viktig som elektronakseptor ved metylering av kvikksølv, og vil derfor kunne påvirke produksjon av metylkvikksølv. Eklöf et al. (2012) fant høyere konsentrasjoner av MeHg i felt under, enn felt over den marine grense. I motsetning til dette ble det i to studier funnet effekt på MeHg-konsentrasjoner i hogstfelt relativt til referansefelt over, men ikke under den marine grense (Skyllberg et al. 2009, Kronberg 2014). Skylberg et al. (2009) fant høyere konsentrasjoner av svovel under den marine grense, men høyere metyleringshastigheter over. Dette indikerer at svovel ikke var en begrensende faktor for metyleringshastigheten over den marine grense i dette studiet. Som allerede nevnt, forklarte Kronberg (2014) at det ikke ble sett en behandlingsforskjell mellom hogstområder og referanseområder under den marinegrense med allerede høye konsentrasjoner av kvikksølv i referanseområdene på grunn av tilstedeværelse av våtmarksområder under den marine grense (se også kapittel 3.1.4).

Det er også undersøkt om konsentrasjoner av kvikksølv kan sees i sammenheng med type vegetasjonsdekke, jordkarakteristikker og helning i nedbørsfelt. Eklöf et al. (2012) fant at variasjonene av THg og MeHg i vann ikke var avhengig av vegetasjonsdekke og jordkarakteristikker. Moingt et al. (2013) tok prøver av sedimentkjerner i innsjøer i Canada og undersøkte om konsentrasjonen av kvikksølv i sjøene korrelerte med egenskapene til ulike nedbørsfelt. I motsetning til Eklöf et al. (2012), fant de at konsentrasjonen av Hg i sedimentet ble påvirket av egenskaper i nedbørsfeltet som helning og vegetasjonsdekke. I tillegg undersøkte Moingt et al. (2013) sammenheng

mellom Hg og habitatbruk som hogst og gruvedrift, men fant at denne type forstyrrelser ikke ga effekt på konsentrasjon av Hg i sedimentkjerner.

3.2.4 Respons på temporale endringer

Eklof et al. (2014) målte kvikksølvkonsentrasjoner to ganger i måneden i et år før hogst, i to år etter hogst og tre år etter markberedning og fant høyere konsentrasjon av kvikksølv i avrenningsvann etter markberedning, men ikke etter hogst alene. Det ble også funnet en sterk årlig variasjon i konsentrasjon av MeHg og THg, der den temporale endringen i konsentrasjoner var relativt lik i de ulike nedbørsfeltene både før og etter behandlingene ble satt i gang. Forskjellen i konsentrasjoner mellom årene var større enn variasjonen skapt av de ulike behandlingene. Den mellomårlige variasjonen i THg skyldtes hovedsakelig variasjonen i avrenning, mens variasjonen i konsentrasjonene av MeHg var mest påvirket av sesong, der de høyeste konsentrasjonene ble observert da det var høyest temperatur (Eklof et al. 2014). Sørensen et al. (2009a) observerte at konsentrasjonene av MeHg sank om våren og økte ved midtsommer, noe som trolig hadde sammenheng med mengde vann i elva i respons på regnvær, med høyere vannmengde om våren enn ved midtsommer. Også i andre studier tyder resultatene på at konsentrasjonen av MeHg er mer påvirket av sesongvariasjoner i hydrologi og temperatur enn av forstyrrelser etter skogbruksoperasjoner (Garcia et al. 2007, Sørensen et al. 2009a, Kraus 2011, Eklöf et al. 2013).

Endringer i utlekking av kvikksølv som følge av temperatur og hydrologi har også implikasjoner for utlekking av kvikksølv fra skogbunn ved klimaendringer. Transport og mobilitet av forurensning bundet til organisk materiale er vist å øke ved økt temperatur (Zheng et al. 2015). Sammen med økt erosjon og utvasking av organisk materiale ved mer intens nedbør, kan de predikerte klimaendringene medføre en økt tilførsel av kvikksølv til vann. En økt tilførsel av næringsstoffer i akvatiske økosystem er også foreslått å kunne bidra til en økning i metyleringsrate av kvikksølv som følge av klimaendringer (Krabbenhoft og Sunderland 2013).

4 Vegbygging og kvikksølv

4.1 Faktorer som påvirker transport og produksjon av kvikksølv

Flere av studiene gjennomgått her har observert en respons på hogst i både konsentrasjon av kvikksølv og total eksport av kvikksølv på grunn av endring i avrenning fra felt utsatt for hogstoperasjoner. Økt mengde avrenning som konsekvens av tap av vegetasjon og endrede grunnforhold kan føre til en økt total belastning av kvikksølv til resipient. En korrelasjon mellom transport av organisk materiale og både THg og MeHg er blitt observert. Økt mobilisering av kvikksølvforbindelser til vann og økt produksjon av MeHg kan hindres ved å unngå oppdemning av vann og ved å redusere tilførsel av organisk materiale. I tillegg til hogst er det observert mange andre faktorer som påvirker transport av kvikksølv, som gjør det vanskelig å forutsi hvordan et spesifikt nedbørsfelt responderer på hogst. Disse faktorene inkluderer blant annet: breddegradsplassering, nedbørsmengde, avrenningsregime, temperatur, helning, geologiske egenskaper og konsentrasjon av kvikksølv i skogbunnen i nedbørsfeltet. Også fra felt med uberørt skog vil det derfor forventes ulik transport av kvikksølv.

4.2 Er utlekking av kvikksølv et problem ved bygging av veg?

Funn i denne studien tyder på at Statens vegvesen bør være oppmerksomme på at bygging av veg kan medføre økt utlekking av kvikksølv til resipient. Anlegging av ny veg og utvidelse av gammel veg vil medføre mange ulike forstyrrelser av skogsjord; sammenpressing av jord og stabilisering av underlag for å hindre fremtidige setningsskader på veg, lagring av toppmasser som skal brukes til naturlig revegetering, midlertidig lagring av masser som skal gjenbrukes i anleggsområdet eller andre områder, samt midlertidig og permanent deponering av overskuddsmasser. Hvordan masser mellomlagres og hvordan de brukes videre vil potensielt ha en innvirkning på hvor mye kvikksølv som mobiliseres og lekker ut til vann. I tillegg kan økt erosjon og utlekking av partikler påvirke transport av kvikksølv, siden det er funnet en korrelasjon mellom TOC og både THg og MeHg i vann.

Standard for et bærekraftig norsk skogbruk (Norsk PEFC skogstandard) og retningslinjene som følges i blant annet Sverige, kan bidra til å motvirke en økt utlekking av kvikksølv som en følge av hogst. Det omfatter opprettholdelse av kantsoner med bevart vegetasjon langs myrer, vann og vassdrag og å unngå; terrengskader som kan forårsake økt vannavrenning, erosjon, transport av partikler og organisk materiale, oppdemming av vann og kjøring i fuktige områder. Disse retningslinjene vil kunne være med på å forhindre transport og redistribusjon av kvikksølv fra skog til vann og hindre ny produksjon av metylkvikksølv (Bishop et al. 2009, Eklöf et al. 2012).

4.3 Forslag til videre arbeid

Denne litteraturstudien gir grunnlag for at Statens vegvesen bør følge opp hvorvidt det foregår utlekking av kvikksølv i betydelig grad i forbindelse med anleggsarbeid i skog og ved massedeponier. Dersom det er tilfelle bør rutiner for skogsoperasjoner i forbindelse med bygging av veg identifiseres og settes i sammenheng med potensielle effekter disse kan ha på transport av kvikksølv fra skogsjord og mulig produksjon av MeHg.

Spørsmål som bør besvares er:

- Foregår det betydelig utlekking av kvikksølv fra anleggsområder og midlertidige og permanente massedeponier ved byggeplasser i dag?
- Hvis tilfelle, hvordan endres avrenning fra anleggsområder etter stabilisering av grunn og påvirker dette transport av kvikksølv fra skogbunn?
- Hvordan påvirker tiltak som er iverksatt for å beskytte vannforekomster i anleggsområder i dag utlekking/metylering av kvikksølv?
 - For eksempel sedimentasjonsbasseng og siltgardiner som fanger opp partikler og organisk materiale.
- Er det i dag iverksatt tiltak som sørger for at det ikke dannes dammer med stillestående vann i humusrike områder der det er fare for at det oppstår anaerobe forhold og produksjon av MeHg?

Dersom dagens praksis ikke er tilstrekkelige for å forhindre utlekking og metylering av kvikksølv bør en se på om dette kan føre til overskridelser av grenseverdier for kvikksølvkonsentrasjoner satt i vannrammedirektivet.

Man kan i så fall se på hvor vidt retningslinjer for skogbruk vil være anvendbare og tilstrekkelige ved hogst i vegbyggingssammenheng og om man kan ta stilling til at breddegradsplassering, mellomårlige variasjoner i avrenning og sesongvariasjoner i mange tilfeller påvirker transport av Hg og produksjon av MeHg i nedbørsfelt i større grad enn forstyrrelsen feltet er utsatt for.

Referanser

- Allan, C. J., Heyes, A. and Mackereth, R. J. (2009). "Changes to groundwater and surface water Hg transport following clearcut logging: a Canadian case study." Does forestry contribute to mercury in Swedish fish: 50–54.
- Alriksson, A. (2001). "Regional Variability of Cd, Hg, Pb and C Concentrations in Different Horizons of Swedish Forest Soils." Water, Air and Soil Pollution: Focus 1(3–4): 325–341.
- AMAP (2011). "Assessment 2011: mercury in the Arctic." Arctic Monitoring and Assessment Programme (AMAP), Oslo, Norway: 193.
- Aschner, M. and Aschner, J. L. (1990). "Mercury neurotoxicity: Mechanisms of blood–brain barrier transport." Neuroscience & Biobehavioral Reviews 14(2): 169–176.
- Benoit, J. M., Gilmour, C. C., Mason, R. P. and Heyes, A. (1999). "Sulfide Controls on Mercury Speciation and Bioavailability to Methylating Bacteria in Sediment Pore Waters." Environmental Science & Technology 33(6): 951–957.
- Bergan, T., Gallardo, L. and Rodhe, H. (1999). "Mercury in the global troposphere: a three-dimensional model study." Atmospheric Environment 33(10): 1575–1585.
- Bernhardsson, M. (2006). Methylmercury in runoff from forested catchments: Characterisation of three catchments prior to logging, Swedish University of Agricultural Sciences.
- Bhatti, J. S., Fleming, R. L., Foster, N. W., Meng, F. R., Bourque, C. P. A. and Arp, P. A. (2000). "Simulations of pre- and post-harvest soil temperature, soil moisture, and snowpack for jack pine: comparison with field observations." Forest Ecology and Management 138(1–3): 413–426.
- Bishop, K., Allan, C., Bringmark, L., Garcia, E., Hellsten, S., Högbom, L., Johansson, K., Lomander, A., Meili, M., Munthe, J., Nilsson, M., Porvari, P., Skyllberg, U., Sørensen, R., Zetterberg, T. and Åkerblom, S. (2009). "The Effects of Forestry on Hg Bioaccumulation in Nemoral/Boreal Waters and Recommendations for Good Silvicultural Practice." AMBIO: A Journal of the Human Environment 38(7): 373–380.
- Bosch, J. M. and Hewlett, J. D. (1982). "A review of catchment experiments to determine the effect of vegetation changes on water yield and evapotranspiration." Journal of Hydrology 55(1–4): 3–23.
- Celo, V., Lean, D. R. S. and Scott, S. L. (2006). "Abiotic methylation of mercury in the aquatic environment." Science of the Total Environment 368(1): 126–137.
- Chang, L. W. (1977). "Neurotoxic effects of mercury—A review." Environmental Research 14(3): 329–373.
- Clarkson, T. W. (1993). "Mercury: major issues in environmental health." Environmental Health Perspectives 100: 31–38.
- Clarkson, T. W. and Magos, L. (2006). "The toxicology of mercury and its chemical compounds." Critical Reviews in Toxicology 36(8): 609–662.
- Compeau, G. and Bartha, R. (1985). "Sulfate-reducing bacteria: principal methylators of mercury in anoxic estuarine sediment." Applied and Environmental Microbiology 50(2): 498–502.

- de Wit, H. A., Granhus, A., Lindholm, M., Kainz, M. J., Lin, Y., Braaten, H. F. V. and Blaszczyk, J. (2014). "Forest harvest effects on mercury in streams and biota in Norwegian boreal catchments." Forest Ecology and Management **324**: 52–63.
- de Wit, H. A., Kainz, M. J. and Lindholm, M. (2012). "Methylmercury bioaccumulation in invertebrates of boreal streams in Norway: effects of aqueous methylmercury and diet retention." Environmental Pollution **164**: 235–241.
- Desrosiers, M., Planas, D. and Mucci, A. (2006). "Short-term responses to watershed logging on biomass mercury and methylmercury accumulation by periphyton in boreal lakes." Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences **63**(8): 1734–1745.
- Eklof, K., Schelker, J., Sorensen, R., Meili, M., Laudon, H., von Bromssen, C. and Bishop, K. (2014). "Impact of forestry on total and methyl-mercury in surface waters: distinguishing effects of logging and site preparation." Environmental Science & Technology **48**(9): 4690–4698.
- Eklöf, K. (2012). Effects of stump harvesting and site preparation on mercury mobilization and methylation Doctoral thesis, Sveriges lantbruksuniversitet.
- Eklöf, K., Kraus, A., Weyhenmeyer, G. A., Meili, M. and Bishop, K. (2012). "Forestry Influence by Stump Harvest and Site Preparation on Methylmercury, Total Mercury and Other Stream Water Chemistry Parameters Across a Boreal Landscape." Ecosystems **15**(8): 1308–1320.
- Eklöf, K., Meili, M., Åkerblom, S., von Brömssen, C. and Bishop, K. (2013). "Impact of stump harvest on run-off concentrations of total mercury and methylmercury." Forest Ecology and Management **290**: 83–94.
- EU (2013). Directive 2013/39/EU of the European parliament and of the council of 12 August 2013 amending Directives 2000/60/EC and 2008/105/EC as regards priority substances in the field of water policy. Official Journal of the European Union.
- Fjeld, E. and Rognerud, S. (2012). Kvikksølv i abbor og gjedde fra vannområdene Leira-Nitelva og Hurdalsvassdraget/Vorma, Norsk institutt for vannforskning.
- Friedli, H. R., Arellano, A. F., Cinnirella, S. and Pirrone, N. (2009). "Initial Estimates of Mercury Emissions to the Atmosphere from Global Biomass Burning." Environmental Science & Technology **43**(10): 3507–3513.
- Garcia, E. and Carignan, R. (1999). "Impact of wildfire and clear-cutting in the boreal forest on methyl mercury in zooplankton." Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences **56**(2): 339–345.
- Garcia, E. and Carignan, R. (2000). "Mercury concentrations in northern pike (*Esox lucius*) from boreal lakes with logged, burned, or undisturbed catchments." Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences **57**(S2): 129–135.
- Garcia, E. and Carignan, R. (2005). "Mercury concentrations in fish from forest harvesting and fire-impacted Canadian Boreal lakes compared using stable isotopes of nitrogen." Environmental Toxicology and Chemistry **24**(3): 685–693.
- Garcia, E., Carignan, R. and Lean, D. R. (2007). "Seasonal and inter-annual variations in methyl mercury concentrations in zooplankton from boreal lakes impacted by deforestation or natural forest fires." Environmental Monitoring and Assessment **131**(1–3): 1–11.

- Gilmour, C. C., Henry, E. A. and Mitchell, R. (1992). "Sulfate stimulation of mercury methylation in freshwater sediments." Environmental Science & Technology **26**(11): 2281–2287.
- Goedkoop, W., Demandt, M. and Ahlgren, G. (2007). "Interactions between food quantity and quality (long-chain polyunsaturated fatty acid concentrations) effects on growth and development of *Chironomus riparius*." Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences **64**(3): 425–436.
- Greacen, E. L. and Sands, R. (1980). "Compaction of forest soils. A review." Soil Research **18**(2): 163–189.
- Greipsland, I. (2011). Kvikksølv i sediment og mort (*Rutilus rutilus*) fra Øyeren–Fokus på bioakkumulering og biomagnifisering av metylkvikksølv Masteroppgave, Universitetet for miljø- og biovitenskap.
- Grigal, D. F. (2002). "Inputs and outputs of mercury from terrestrial watersheds: a review." Environmental Reviews **10**(1): 1–39.
- Grigal, D. F. (2003). "Mercury Sequestration in Forests and Peatlands." Journal of Environmental Quality **32**(2): 393–405.
- Hintelmann, H. and Wilken, R.–D. (1995). "Levels of total mercury and methylmercury compounds in sediments of the polluted Elbe River: influence of seasonally and spatially varying environmental factors." Science of the Total Environment **166**(1–3): 1–10.
- Håkanson, L., Andersson, T. and Nilsson, Å. (1990). "Mercury in fish in Swedish lakes—linkages to domestic and European sources of emission." Water, Air, and Soil Pollution **50**(1–2): 171–191.
- Kalbitz, K. and Wennrich, R. (1998). "Mobilization of heavy metals and arsenic in polluted wetland soils and its dependence on dissolved organic matter." Science of the Total Environment **209**(1): 27–39.
- Kerin, E. J., Gilmour, C., Roden, E., Suzuki, M., Coates, J. and Mason, R. (2006). "Mercury methylation by dissimilatory iron-reducing bacteria." Applied and Environmental Microbiology **72**(12): 7919–7921.
- Krabbenhoft, D. P. and Sunderland, E. M. (2013). "Global change and mercury." Science **341**(6153): 1457–1458.
- Kraus, A. (2011). Factors controlling the temporal variability of mercury in runoff from seven catchments in Northern and Southern Sweden, Swedish University of Agricultural Sciences.
- Kronberg, R.–M. (2014). The boreal journey of methyl mercury, Swedish University of Agricultural Sciences.
- Lucotte, M., Mucci, A., Killaire–Marcel, C., Pichet, P. and Grondin, A. (1995). Anthropogenic mercury enrichment in remote lakes of northern Quebec (Canada). Mercury as a Global Pollutant, Springer: 467–476.
- Matilainen, T. (1995). Involvement of Bacteria in Methylmercury Formation in Anaerobic Lake Waters. Mercury as a Global Pollutant. D. Porcella, J. Huckabee and B. Wheatley, Springer Netherlands: 757–764.
- Matilainen, T. and Verta, M. (1995). "Mercury methylation and demethylation in aerobic surface waters." Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences **52**(8): 1597–1608.

- Mergler, D., Anderson, H. A., Chan, L. H. M., Mahaffey, K. R., Murray, M., Sakamoto, M. and Stern, A. H. (2007). "Methylmercury exposure and health effects in humans: a worldwide concern." AMBIO: A Journal of the Human Environment **36**(1): 3–11.
- Mitchell, C. P., Kolka, R. K. and Fraver, S. (2012). "Singular and combined effects of blowdown, salvage logging, and wildfire on forest floor and soil mercury pools." Environmental Science & Technology **46**(15): 7963–7970.
- Moingt, M., Lucotte, M., Paquet, S. and Beaulne, J. S. (2013). "The influence of anthropogenic disturbances and watershed morphological characteristics on Hg dynamics in Northern Quebec large boreal lakes." Advances in Environmental Research **2**(2): 81–98.
- Munthe, J. and Hultberg, H. (2004). Mercury and methylmercury in runoff from a forested catchment—concentrations, fluxes, and their response to manipulations. Biogeochemical Investigations of Terrestrial, Freshwater, and Wetland Ecosystems across the Globe, Springer: 607–618.
- Munthe, J., Wängberg, I., Rognerud, S., Fjeld, E., Verta, M., Porvari, P. and Meili, M. (2007). Mercury in Nordic ecosystems, Swedish Environmental Research Institute.
- Murray, C. and Buttle, J. (2003). "Impacts of clearcut harvesting on snow accumulation and melt in a northern hardwood forest." Journal of Hydrology **271**(1): 197–212.
- Myreng, H. (2013). Bioaccumulation and biomagnification of mercury (Hg) to "At Risk Levels" in the fish community in the humic lake Øvre Sandvannet, SE Norway, Master oppgave, UMB—Department of Plant and Environmental Science (IPM).
- Mæhlumsveen, K. (2012). Høye kvikksølvkonsentrasjoner i ørret (Salmo trutta), røye (Salvelinus alpinus) og lake (Lota lota) i Snåsavatnet—trolig et resultat av endring i diett og årlig, individuell vekst etter etablering av Mysis relicta Masteroppgave, Norges miljø- og biovitenskapelige universitet.
- Obrist, D., Johnson, D. W., Lindberg, S. E., Luo, Y., Hararuk, O., Bracho, R., Battles, J. J., Dail, D. B., Edmonds, R. L., Monson, R. K., Ollinger, S. V., Pallardy, S. G., Pregitzer, K. S. and Todd, D. E. (2011). "Mercury distribution across 14 U.S. Forests. Part I: spatial patterns of concentrations in biomass, litter, and soils." Environmental Science & Technology **45**(9): 3974–3981.
- Peterson, S. A., Van Sickle, J., Herlihy, A. T. and Hughes, R. M. (2007). "Mercury Concentration in Fish from Streams and Rivers Throughout the Western United States." Environmental Science & Technology **41**(1): 58–65.
- Porvari, P., Verta, M., Munthe, J. and Haapanen, M. (2003). "Forestry practices increase mercury and methyl mercury output from boreal forest catchments." Environmental Science & Technology **37**(11): 2389–2393.
- Rask, M., Nyberg, K., Markkanen, S.-L. and Ojala, A. (1998). "Forestry in catchments: effects on water quality, plankton, zoobenthos and fish in small lakes." Boreal Environment Research **3**(1): 75–86.
- Ravichandran, M. (2004). "Interactions between mercury and dissolved organic matter—a review." Chemosphere **55**(3): 319–331.
- Reimers, R. S., Krenkel, P. A., Eagle, M. and Tragitt, G. (1973). "Sorption phenomenon in the organics of bottom sediments." Heavy metals in the aquatic environment: 117–129.
- Rognerud, S. and Fjeld, E. (2002). Kvikksølv i fisk fra innsjøer i Hedmark, med hovedvekt på grenseområdene mot Sverige, Norsk institutt for vannforskning.

- Rognerud, S., Fjeld, E., Skjelkvåle, B., Christensen, G. and Røyset, O. (2008). Nasjonal innsjøundersøkelse 2004–2006, del 2: Sedimenter. Forurensning av metaller, PAH og PCB., Norsk institutt for vannforskning.
- Rosén, K., Aronson, J.–A. and Eriksson, H. M. (1996). "Effects of clear-cutting on streamwater quality in forest catchments in central Sweden." Forest Ecology and Management **83**(3): 237–244.
- Schelker, J., Eklöf, K., Bishop, K. and Laudon, H. (2012). "Effects of forestry operations on dissolved organic carbon concentrations and export in boreal first-order streams." Journal of Geophysical Research: Biogeosciences **117**(G1): n/a–n/a.
- Schroeder, W. H. and Munthe, J. (1998). "Atmospheric mercury—an overview." Atmospheric Environment **32**(5): 809–822.
- Selin, N. E. (2009). "Global Biogeochemical Cycling of Mercury: A Review." Annual Review of Environment and Resources **34**(1): 43–63.
- Seller, P., Kelly, C. A., Rudd, J. W. M. and MacHutchon, A. R. (1996). "Photodegradation of methylmercury in lakes." Nature **380**(6576): 694–697.
- Skyllberg, U., Qian, J., Frech, W., Xia, K. and Bleam, W. F. (2003). "Distribution of mercury, methyl mercury and organic sulphur species in soil, soil solution and stream of a boreal forest catchment." Biogeochemistry **64**(1): 53–76.
- Skyllberg, U., Westin, M. B., Meili, M. and Bjorn, E. (2009). "Elevated concentrations of methyl mercury in streams after forest clear-cut: a consequence of mobilization from soil or new methylation?" Environmental Science & Technology **43**(22): 8535–8541.
- St. Louis, V. L., Rudd, J. W., Kelly, C. A., Beaty, K. G., Bloom, N. S. and Flett, R. J. (1994). "Importance of wetlands as sources of methyl mercury to boreal forest ecosystems." Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences **51**(5): 1065–1076.
- Svae, P. S. (2011). Høye kvikksølvkonsentrasjoner i asp (Aspius aspius) fra Øyeren er bestemt av byttfiskvalg, alder og individuell vekstrate Masteroppgave, Universitetet for miljø- og biovitenskap.
- Sørensen, P. (2012). Prioriterte miljøgifter: Nasjonale utslipp-status 2010. KLIF: TA-2981.
- Sørensen, R., Meili, M., Lambertsson, L., von Brömssen, C. and Bishop, K. (2009a). "The Effects of Forest Harvest Operations on Mercury and Methylmercury in Two Boreal Streams: Relatively Small Changes in the First Two Years prior to Site Preparation." AMBIO: A Journal of the Human Environment **38**(7): 364–372.
- Sørensen, R., Ring, E., Meili, M., Högbom, L., Seibert, J., Grabs, T., Laudon, H. and Bishop, K. (2009b). "Forest Harvest Increases Runoff Most during Low Flows in Two Boreal Streams." AMBIO: A Journal of the Human Environment **38**(7): 357–363.
- Tjerngren, I., Meili, M., Björn, E. and Skyllberg, U. (2012). "Eight boreal wetlands as sources and sinks for methyl mercury in relation to soil acidity, C/N ratio, and small-scale flooding." Environmental Science & Technology **46**(15): 8052–8060.
- Watras, C., Back, R., Halvorsen, S., Hudson, R., Morrison, K. and Wentz, S. (1998). "Bioaccumulation of mercury in pelagic freshwater food webs." Science of the Total Environment **219**(2): 183–208.
- Weber, J. H. (1993). "Review of possible paths for abiotic methylation of mercury(II) in the aquatic environment." Chemosphere **26**(11): 2063–2077.

Zheng, Q., Nizzetto, L., Liu, X., Borgå, K., Starrfelt, J., Li, J., Jiang, Y., Liu, X., Jones, K. C. and Zhang, G. (2015). "Elevated Mobility of Persistent Organic Pollutants in the Soil of a Tropical Rainforest." Environmental Science & Technology **49**(7): 4302–4309.

Appendix

Land, område	Koordinater	Over- våknings- periode	Hogst/for- styrrelse	Antall prøver	Antall Ned- børs- felt	Type undersøkelse	Parametre undersøkt	Konsen- trasjon målt i:	Forfatter
Paired catchment studies, Finland									
Finland, sør		jul.1991- 1994	1992 (H), 1993 (MB)	2x4 /år sjø (vann), 1-3 /år (biota)	4 (sjøer)	Undersøkte effekt av hogst på limnologiske karakterestikker, inkludert MeHg kons. i fisk	Kjemisk oksygenforbruk, farge, TOK, O ₂ , TN, TP,IP, K, Fe, pH, alkalinitet, artssammensetning, MeHg-kons. i abbor	Biota	Rask et al. 1998
Finland, sør	61°01'N, 24°45'Ø.	1994-2000	1997 (H), 1998 (MB)	1 per måned (eller oftere)	2	"paired catchment study"	THg, MeHg, TOK	Vann	Povari et al. 2003
Paired catchment studies, Sverige									
Sverige, Gårdsjön		1991-2001	1999 (vei)	Uvisst	2	Undersøkte effekten av våtdeponering av Hg på utlekking av Hg	av Hg på THg, avrenning MeHg,		Munthe og Hultberg 2004
Sverige, Balsjö	64°02'N 18°57'Ø				2	Karakterestikker av område før hogst			Bernhardsson (Master of Sc.) 2006

Sverige; Balsjö	64° 02'N 18° 57'Ø	sep.2004 – Mar. mar.2008	2006	hvert 15. min	3	"paired catchment study"	Avrenningsmengde/ fluks av vann	~	Sørensen et al. 2009b
Sverige; Balsjö	64° 02'N 18° 57'Ø	jan.2004 – Mar. apr.2008	2006	2 per måned	3	"paired catchment study"	THg, MeHg, TOC, TSS	Vann	Sørensen et al. 2009a
Sverige; Balsjö og Örebro	B: 64° 02'N 18° 57'Ø Ö:59° 10' N, 14° 34'Ø	2004–2010		2 per måned eller oftere (vann)	6	Undersøkte hvordan naturlige svingninger i avrenningsregime, temperatur, sesong m.fl. Påvirket utlekking av Hg, TOK m.m.	THg, MeHg, TOK, TC, TN	Vann, jord	Kraus (Master of Sc.) 2011
Sverige, Balsjö og Örebro						Effekt av SF og MB på Hg mobilisering og metylering		Vann	Eklöf (PHD) 2012
Sverige, Örebro	59° 10'N, 14° 34'Ø	Aug. 2006 (H), nov. 2007 (SF), nov.2006 – des. des.2009	2008 (MB)	2 per måned	3	"paired catchment study" (SF vs MB undersøkt)	THg, MeHg, TOC, TSS, avrenning	Vann	Eklöf et al. 2013
Sverige; Balsjö	64° 02'N 18° 57'Ø	Mar. 2006 (H), mar.2005– jan.2011	mai. 2008 (MB)	1–2 per måned	3	"paired catchment study" (H vs MB undersøkt)	THg, MeHg, TOC, TSS, avrenning	Vann	Eklöf et al. 2014
Paired catchment studies, Norge									

Norge, Langtjern	60° 37'N, 09° 73'Ø	2008–2011	jan. 2009	1–2 per måned (vann), 3 ganger (2008–2009) (biota)	2	"paired catchment study"	THg, MeHg, TOC, NH ₄ , NO ₃ ⁻ , P, PK MeHG-kons., δ ¹⁵ N, diett-biomarkører, avrenning	Vann, biota	de Wit et al. 2014
Sammenlikner mange felt									
Sverige, nord- øst		aug. 2007	1998– 2007	1 per lokasjon	47	Felt hugget 0–4, 4–10 år før prøvetaking, og referanse med >70 år gammel skog	Uorganisk Hg, Hg ₂ og MeHg, S, Fe, Mn, Na, and Ca, Cl, NO ₃ , PO ₄ and SO ₄ , TOC, TIC (inorganic), TON	Vann	Skyllberg et al. 2009
USA, Minnesota				6–10 per plot x 2 (MS + Humus) = 478	30	Sammenlikner Hg i innsjøer med ulike forstyrrelser (hogts, brann, nedblåsing i ulike kombinasjoner) samt kontroll	THg, TC,	Mineral-jord og humus/ skog-avfall	Mitchell et al. 2012
Sverige	56° 47'– 65° 31'N	sep.2009– jun.2010	2007– 2009	i periode 2 per felt (sep.2009 og jun.2010)	54	Sammenlikning av effekt av stubbefjerning og tradisjonell markberedning	THg, MeHg, TOK, TSS	Vann	Eklöf et al. 2012
Produksjon av MeHg									
Sverige, nord- øst						Effekt på eksport og produksjon av MeHg		Vann, jord	Kronberg (PHD) 2014
Biota									

Canada, Quebec	ca.48°50' N, 75°00'W	1997–1998	1995	2 per sjø	38 (sjøer)	Konsentrasjon av DOC og MeHg	MeHg, DOC, TSS, K, Ca, Mg, Cl, S, TN, NH ₄ , NO ₃ , H, pH	Vann	Pinheiro (Master of Sc.) 2000
Canada, Quebec	ca.48°50' N, 75°00'W	1996–1998	1995	1–2 (fisk), 1 x 3 år (vann)	20	Konsentrasjon i <i>Esox lucius</i>	THg, δ ¹³ C, δ ¹⁵ N, TN, pH, alkalinitet, sulfate, DOC, "light attenuation", m.fl.	Biota, Vann	Garcia and Carignan 2000
Canada, Quebec	ca.48°50' N, 75°00'W	1996–1998	1995	3 prøver år ⁻¹ sjø ⁻¹	38 (sjøer)	Konsentrasjon av Hg i zooplankton fra innsjøer påvirket av brann og hogst i nedbørsfelt (+referansesjøer).	ZP taxonomy, ZP MeHg-kons., DOK, light extinciton, KF <i>a</i> , SO ₂₄ , TP og TN, pH	Biota	Garcia et al 2007
Canada, Quebec	ca.48°50' N, 75°00'W	1996	1995	3 sjø ⁻¹ (i ZP og vann)	38 (sjøer)	Konsentrasjon av Hg i zooplankton fra innsjøer påvirket av brann og hogst (+referansesjøer).	ZP taxonomi, ZP MeHg-kons, DOK, pH, alkalinitet, KF <i>a</i> , TP, NO ₃ ⁻ , Ca ²⁺ , SO ₄₂ ⁻ , m.fl.	Biota (og innsjø)	Garcia og Carignan 1999
Canada, Quebec	ca.48°50' N, 75°00'W	1996–1997	1995	3 x 3 år / sjø (ZP og vann)	38 (sjøer)	Konsentrasjon i fisk (6–23 individer fra opptill tre arter per innsjø). Brann-, hogstområder og referanse	Fisk MeHg-kons, δN- isotop (døgnflue nymfe), DOK, DOK "loading", pH, alkalinitet, KF <i>a</i> , TP, TN, Ca ²⁺ , SO ₄₂ ⁻ , m.fl.	Biota (og innsjø)	Garcia and Carignan et al. 2005
Canada, Grenville	47°07'– 50°07'N, 73°06'– 76°43'V	2000–2002	2001	2 per sjø	18	Konsentrasjon i biota	DOC, TN, TP, pH, litter, slope KF <i>a</i> m.fl.	Biota	Desrosiers et al. 2006
Annet									

Canada, Quebec				Effekt av DOC på fotoproduksjon av løst organisk Hg i innsjøer: mulig effekt av skogsdrift		O'Driscoll et al. 2004
Sverige				Foreløpige resultater (2008) fra studien i Balsjö, Sverige		Sørensen et al. 2008
Sverige				Estimert andel kvikksølv i fisk som stammer fra forstyrrelser knyttet til hogst (eksport av Hg fra hogstfelt)		Estimert Bishop et i biota al. 2009
Sverige m. fl.				Oppsamlende rapport om funn flere steder i verden. Rapporterer og mulige tiltak som bør undersøkes videre.		Bishop et al. 2009
Sverige, Balån/ Balsjö	2004-2009	?	66	Bruker data fra tidligere undersøkelser til å estimere konsekvenser på økonomi m.m. på eventuelle restriksjoner på N, P, MeHg, DOC, hogst som er nødvendig for å avrenning. møte målene i EUs Økonomiske vannrammedirektiv konsekvenser		Estimate Eriksson et r? al. 2011

Canada

Påvirkning av antropogene forstyrrelser (e.g. hogst, gruvedrift) og karakterestikker av terrenget på Hg_dynamikk i innsjøer i boreal skog

Monigt et al. 2013

Forkortelser: H=Hogst, MB=Markberedning, SF=Stubbefjerning



Statens vegvesen
Vegdirektoratet
Publikasjonsekspedisjonen
Postboks 8142 Dep 0033 OSLO
Tlf: (+47 915) 02030
publvd@vegvesen.no

ISSN: 1893-1162

vegvesen.no

Trygt fram sammen