

RAPPORT 2020/1

Inverkan av skogsbruksåtgärder på kvicksilvers transport, omvandling och upptag i vattenlevande organismer

Kunskapsunderlag



© Skogsstyrelsen, februari 2020

FÖRFATTARE

Andreas Drott
Anja Lomander

OMSLAGSFOTO

Anja Lomander

FOTO

Anja Lomander
Michael Ekstrand,
Skogsstyrelsens bildarkiv

ILLUSTRATIONER

Anja Lomander

PROJEKTGRUPP

Kevin Bishop, SLU
Andreas Drott, Skogsstyrelsen
Karin Eklöf, SLU
Anja Lomander, Skogsstyrelsen
Ulf Skyllberg, SLU

GRAFISK PRODUKTION

Bo Persson

UPPLAGA

Finns endast som pdf-fil för egen utskrift

Innehåll

Förord	4
Sammanfattning	5
Ordlista	7
1 Introduktion till miljögiften kvicksilver	8
1.1 En kortfattad kunskapshistorik	8
1.2 Varifrån kommer kvicksilvret i svensk skogsmark?	8
1.3 På vilket sätt är kvicksilver ett miljöproblem?	9
2 Nyckelprocesser i kvicksilvers kretslopp	11
2.1 Organiskt material fungerar som transportör för kvicksilver och metylkviksilver	11
2.2 Bildning av metylkviksilver	11
2.3 Nedbrytning av metylkviksilver	12
2.4 Reduktion och gasavgång	13
2.5 Upplagring av metylkviksilver i näringskedjor	14
3 Kviksilvers kretslopp i skogslandskapet	15
3.1 Fastmarker	15
3.2 Våtmarker	16
3.3 Sjöar	18
4 Effekter av skogsbruksåtgärder på kvicksilvers transport och omvandling	21
4.1 Effekter av föryngringsavverkning	21
4.1.1 Föryngringsavverkning leder ofta till ökade halter av kvicksilver i fisk	21
4.1.2 Föryngringsavverkning leder ofta till ökad uttransport av metylkviksilver och kvicksilver	23
4.1.3 Bildning av metylkviksilver ökar efter föryngringsavverkning	28
4.2 Effekter av körskador	30
4.3 Effekter av markberedning	32
4.4 Betydelsen av att lämna kantzoner mot vattendrag	33
4.5 Påverkan vid dikesrensning och hänsynsåtgärder vid rensning	34
4.6 Effekter av stubbskörd	37
5 Effekter av våtmarksrestaurering	39
6 Beräkningar av effekten av skogsbruk jämfört med andra källor i landskapet	42
7 Rekommendationer för skogsbruk med syfte att minska halter av kvicksilver i fisk	44
8 Kvarvarande kunskapsluckor	47

Förord

Inom vattenförvaltningen riktas en rad åtgärder till Skogsstyrelsen. En av dessa handlar om att arbeta med utveckling av underlag, information, kunskapsförmedling och återkoppling om åtgärder för att minska läckage av kvicksilver i samband med skogsbruk. Det finns därför behov av en sammanställning av aktuell kunskap om kvicksilver och skogsbruk.

I denna rapport redogörs inledningsvis kortfattat för hur kvicksilver fungerar som miljögift. Sedan beskrivs några viktiga miljöer i landskapet: fastmarker, våtmarker och sjöar, och vad som händer med kvicksilvret där. Därefter behandlas effekter av skogsbruksåtgärder. Rapporten avslutas med ett antal rekommendationer för hur skogsbruk kan anpassas för att minska halter av kvicksilver i fisk.

Vi vill tacka projektgruppen: Anja Lomander, Skogsstyrelsen samt Kevin Bishop, Karin Eklöf och Ulf Skyllberg, SLU för värdefulla synpunkter på rapportutkast och konstruktiva diskussioner under arbetets gång.

Vi vill också tacka Elisabet Andersson och Jonas Bergqvist, Skogsstyrelsen, för synpunkter och John Munthe, IVL, för information.

Göteborg och Umeå i februari 2020

Dan Rydberg
Enhetschef, Skogsstyrelsen

Andreas Drott
Markspecialist, Skogsstyrelsen

Sammanfattning

Denna rapport är en sammanställning av aktuell kunskap om hur skogsbruksåtgärder påverkar kvicksilvers omvandling, transport och upptag i vattenlevande organismer. I rapporten redogörs inledningsvis generellt för hur kvicksilver fungerar som miljögift. Därefter behandlas effekter av skogsbruksåtgärder. Rapporten avslutas med ett antal rekommendationer för hur skogsbruk kan anpassas för att minska halter av kvicksilver i fisk.

Miljöproblem med kvicksilver i fisk har varit kända sedan 1960-talet. I dagsläget är halterna av kvicksilver i fisk i mer än hälften av Sveriges sjöar högre än det gränsvärde som satts upp av Världshälsoorganisationen, WHO. Livsmedelsverkets rekommendation är att begränsa intaget av sådana fiskarter som kan innehålla kvicksilver. De insjöfiskar som rekommendationen gäller är abborre, gädda, gös och lake.

Det mesta av det kvicksilver som återfinns i skogsmark kommer från atmosfäriskt nedfall. Den största källan till kvicksilver är förbränning av fossila bränslen och undersökningar har visat att halten av kvicksilver i skogsmark idag är förhöjd åtminstone fem gånger jämfört med tiden före industrialismen. Skogsbruk är således inte källan till kvicksilvret i marken, utan skogsbruket påverkar kvicksilvers omvandling och transport från landmiljön till sjöar och vattendrag.

I fisk förekommer nästan allt kvicksilver i form av metylkvicksilver. I mark förekommer däremot bara några få procent av kvicksilvret i form av metylkvicksilver. Metylkvicksilver bildas genom biologiska processer som sker i syrefri miljö. Processerna gynnas av tillgång på energirikt organiskt material och av sådana temperaturförhållanden som gynnar biologisk aktivitet. Bildning av metylkvicksilver sker i våtmarker och sjöbottnar, men också i sådan skogsmark som är tillräckligt blöt för att syrefria förhållanden ska uppstå.

Av det metylkvicksilver som transporteras från landmiljön till sjöar och vattendrag kommer ungefär 60 % från skogsmark och 40 % från våtmarker. Både metylkvicksilver och kvicksilver binder mycket starkt till naturligt organiskt material. Detta innebär att en transport av organiskt material också medför en transport av metylkvicksilver och kvicksilver.

Förnygringsavverkning av skog med den intensitet som sker idag har beräknats öka transporten av metylkvicksilver från skogsmark till sjöar och vattendrag med 6-30 %, jämfört med om ingen avverkning hade gjorts. Detta beror dels på att avverkning leder till ökad uttransport av organiskt material och att metylkvicksilver och kvicksilver följer med detta, dels att ökad bildning av metylkvicksilver sker på hyggen, där det blir blötare och nya syrefria miljöer bildas. Storleken på effekten varierar mellan olika lokaler. I de undersökningar som gjorts har transporten av metylkvicksilver i de flesta fall ökat med 60-400 %, 0-4 år efter avverkning (en ökning med 100 % innebär en fördubbling). Förutom effekten av själva avverkningen påverkar körskador, markberedning, dikesrensning och stubbskörd hur mycket metylkvicksilver som bildas och transporteras till sjöar och vattendrag.

Restaurering av våtmarker som gör att större områden som tidigare varit fastmark vattenmättas, har visat sig leda till kraftigt ökad bildning av metylkvicksilver.

Restaurering av våtmarker där höjningen av grundvattenytan är måttlig och där endast sådana områden som tidigare varit våtmark vattenmättas, har i de studier som gjorts inte visat sig leda till ökad bildning av metylkvicksilver. Klibbalkärr har en dokumenterad förmåga att bryta ned metylkvicksilver. Bevarande och återskapande av klibbalkärr i anslutning till sjöar och vattendrag kan därför minska metylkvicksilverbelastningen på vattenmiljöerna.

Ordlista

Kvicksilver: Kvicksilver är en metall och ett grundämne. Kvicksilver är också ett miljögift. På grund av att kvicksilver har unika egenskaper har ämnet använts i ett flertal olika industriella processer.

Metanogener: Metanogener kallas mikroorganismer som lever i syrefri miljö och som i sin ämnesomsättning producerar metan. Detta är en av de grupper av mikroorganismer som har förmåga att bilda metylkvicksilver. Vissa metanogener kan även bryta ned metylkvicksilver.

Metylkvicksilver: Metylkvicksilver är den form av kvicksilver som helt dominerar i fisk och innebär att en organisk grupp (metylgrupp) binder till kvicksilvret. I mark är andelen metylkvicksilver bara några få procent av totalt kvicksilver. Metylkvicksilver bildas genom biologiska processer som sker i syrefri miljö.

Organiskt material: Organiskt material kallas sådant material som har sitt ursprung i levande organismer och där strukturen innehåller kol.

Oxiderande förhållanden: Oxiderande förhållanden är förhållanden där aktiviteten av elektroner är låg. Sådana förhållanden uppstår i miljöer med god tillgång till syre.

Oxidation: avgivande av elektroner.

Oxidationstal: Oxidationstal är ett sätt att beskriva hur oxiderat eller reducerat ett ämne är. Oxidationstalet ökar när ämnet oxideras (avger elektroner) och minskar när det reduceras (tar upp elektroner).

Reducerande förhållanden: Reducerande förhållanden är förhållanden där aktiviteten av elektroner är hög. Sådana förhållanden uppstår i miljöer med begränsad eller ingen tillgång till syre.

Reduktion: upptagande av elektroner.

1 Introduktion till miljögiftet kvicksilver

1.1 En kortfattad kunskapshistorik

Miljöproblem med höga halter av kvicksilver i svensk insjöfisk har varit kända sedan slutet av 1960-talet. Kunskap om problemens orsaker har utvecklats efterhand.

Under 1970- och 1980-talen utvecklades metoder som gjorde att man kunde mäta kvicksilver och metylkvicksilver i fisk, skogsmark, sjöar och vattendrag. Grundläggande kunskap om hur metylkvicksilver bildas och bryts ned utvecklades också. Under 1990-talet började man få kunskap om i vilka typer av sjöar som problemen var störst och man förstod att våtmarker var viktiga källor till metylkvicksilver på landskapsnivå. Man fick också successivt bättre förståelse för kvicksilvers kemi i olika miljöer.

I slutet av 1990-talet kom de första studierna som visade att föryngringsavverkning av skog har betydelse för halterna av kvicksilver i fisk i sjöar och att körskador kan ha betydelse för hur mycket metylkvicksilver som bildas och transporteras till sjöar och vattendrag. Sedan dess har forskning bedrivits för att klargöra vilka effekter avverkning och olika åtgärder i samband med detta (markberedning, dikesrensning, kantzoner, stubbskörd) har. Kunskapen om effekterna av skogsbruk på kvicksilver har alltså utvecklats under ca 25 års tid.

1.2 Varifrån kommer kvicksilvret i svensk skogsmark?

Kvicksilver är en metall som förekommer naturligt, men utsläpp från mänskliga källor har höjt halten i miljön.

Det kvicksilver som släpps ut i atmosfären kan uppehålla sig där i flera år och sprids därför globalt, över hela jorden. De viktigaste mänskliga källorna till utsläpp av kvicksilver är förbränning av fossila bränslen och olika former av metallframställning¹.

Det totala nedfallet av kvicksilver sedan industrialismens början beräknas ha höjt halten i skogsmark och sjösediment i Sverige åtminstone 5 gånger². Skogsbruk är alltså inte källan till kvicksilvret i marken, utan skogsbruket påverkar kvicksilvers omvandling och transport från landmiljön till sjöar och vattendrag. Förutom det kvicksilver som spridits genom diffust atmosfäriskt nedfall förekommer lokalt kraftigt förorenade områden, till exempel sediment i anslutning till tidigare massa- och pappers- och kloralkaliindustrier³.

¹ Pirrone N., Cinnirella S., Feng X., Finkelman R.B., Friedli H.R., Leaner J. m fl 2010. Global mercury emissions to the atmosphere from anthropogenic and natural sources. *Atmospheric Chemistry and Physics* 10:5951-5964.

² Johansson K., Bringmark E., Lindevall L., Wilander A. 1995. Effects of acidification on the concentrations of heavy metals in running waters in Sweden. *Water, Air and Soil Pollution* 85:779-784.

³ Drott A., Lambertsson L., Björn E., Skyllberg U. 2008. Do potential methylation rates reflect accumulated methyl mercury in contaminated sediments? *Environmental Science and Technology* 42:153-158.

1.3 På vilket sätt är kvicksilver ett miljöproblem?

Kvicksilver förekommer i en rad olika kemiska former med varierande giftighet och egenskaper (Figur 1). Den form som sprids via atmosfären är metalliskt kvicksilver (kvicksilver med oxidationstal 0, Hg(0)). Detta är den form av kvicksilver som har använts i till exempel termometrar. Metalliskt kvicksilver avgår lätt som gas till luften. I mark och vatten dominerar oorganiskt kvicksilver med oxidationstal 2, Hg(II). Under vissa förhållanden (se 2.2, Bildning av metylkvicksilver, nedan), omvandlas Hg(II) till metylkvicksilver (ofta betecknat MeHg) genom att en metylgrupp binds till kvicksilvret.

Metylkvicksilver anrikas uppåt i näringskedjan, dvs koncentrationen i organismer blir högre ju högre upp i näringskedjan man kommer. Ofta utgör metylkvicksilver över 90 % av den totala mängden kvicksilver i fisk. I mark och sediment däremot, utgör metylkvicksilver bara några få procent av det totala kvicksilvret.

Genom att metylkvicksilver är fettlösligt kan det orsaka skador på centrala nervsystemet. Metylkvicksilver kan även passera moderkakan och orsaka fosterskador. Nervsystemet är som mest känsligt under fosterutvecklingen vilket sammantaget gör att metylkvicksilver utgör den största toxikologiska risken^{4 5}. Exponering av foster för metylkvicksilver kan medföra negativa effekter på muskelreflexer, finmotorik samt kognitiv och språklig förmåga⁶. För däggdjur, fåglar och fisk kan metylkvicksilver orsaka effekter på nervsystemet, lever, njurar, och på reproduktion^{7 8}.

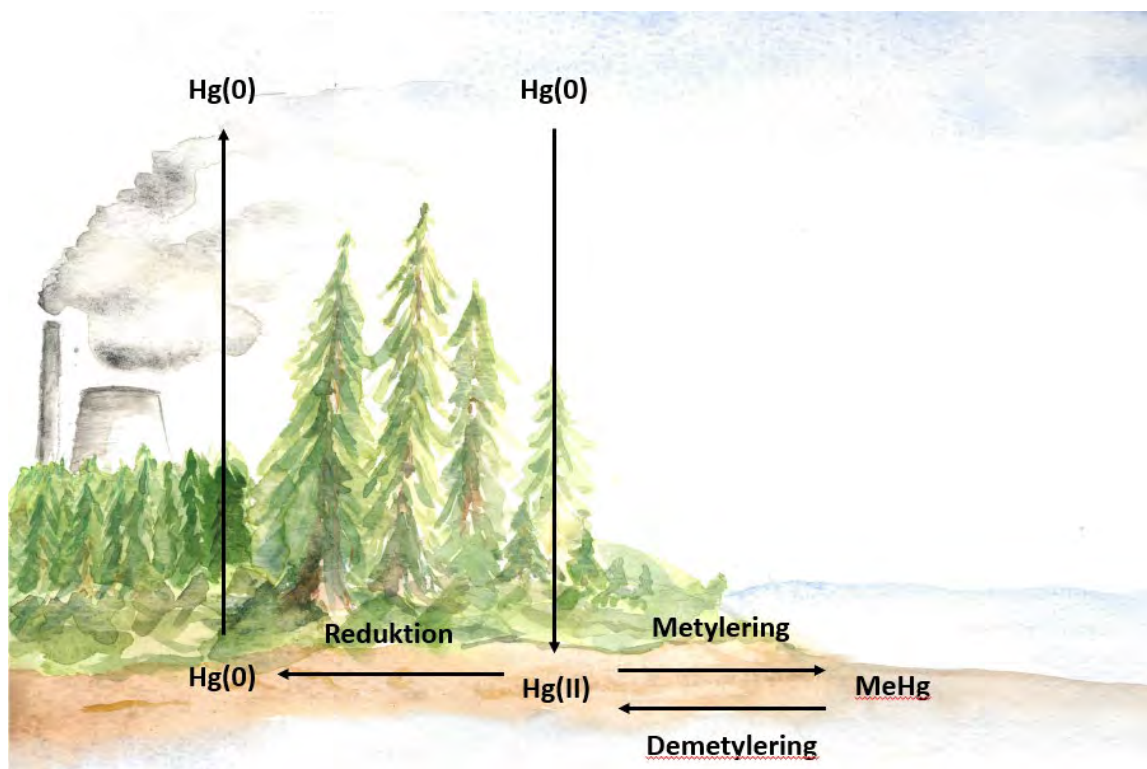
⁴ WHO 1990. Environmental health criteria 101, methylmercury. World health organization.

⁵ Langford N.J., Ferner R.E. 1999. Toxicity of mercury. Journal of Human Hypertension 13:651-656.

⁶ Petersson- Grawè K., Concha G., Ankarberg E. Riskvärdering av metylkvicksilver i fisk. Livsmedelsverket rapport 10 2007.

⁷ Crump. K.L., Trudeau V.L. 2009. Mercury-induced reproductive impairment in fish. Environmental Toxicology and Chemistry 28: 895-907.

⁸ Dietz R. m fl 2013. What are the toxicological effects of mercury in Arctic biota? Science of the Total Environment 443: 775-790.



Figur 1. De vanligaste kemiska formerna av kvicksilver i olika miljöer, samt några centrala processer i kvicksilvers kretslopp. Illustration: Anja Lomander.

I mer än hälften av Sveriges sjöar är halten av kvicksilver i vanliga fiskarter som abborre och gädda högre än Världshälsoorganisationens gränsvärde (0,5 mg/kg torrsvikt) och i större delen av de svenska sjöarna är halten högre än EU:s miljö kvalitetsstandard (0,02 mg/kg våtvikt)⁹. Halterna i fisk har minskat något över tid under de senaste 50 åren, men detta går långsamt¹⁰. Situationen är likartad i Nordamerika och i jämförbara nordiska länder som Finland¹¹.

Livsmedelsverket rekommenderar kvinnor som är gravida, ammar eller planerar att skaffa barn, att begränsa sitt intag av fiskarter som kan innehålla kvicksilver. Enligt rekommendationen bör sådana fiskarter inte ätas oftare än 2-3 gånger per år. De i Sverige förekommande fiskarter som rekommendationen gäller är abborre, gädda, gös och lake. Man rekommenderar också personer som själva fiskar abborre, gädda, gös eller lake att inte äta egenfångad fisk oftare än en gång per vecka¹².

⁹ Directive 2008/105/EC of the European Parliament and the of the Council.

¹⁰ Åkerblom S., Bignert A., Meili M., Sonesten L., Sundbom M. 2014. Half a century of changing mercury levels in Swedish freshwater fish. *Ambio* 43:91-103.

¹¹ Miller A., Bignert A., Porvari P., Danielsson S., Verta M. 2013. Mercury in Perch (*Perca fluviatilis*) from Sweden and Finland. *Water, Air and Soil Pollution* 224:1472.

¹² <https://www.livsmedelsverket.se/livsmedel-och-innehall/oonskade-amnen/metaller1/kvicksilver>, 2019-12-05.

2 Nyckelprocesser i kvicksilvers kretslopp

2.1 Organiskt material fungerar som transportör för kvicksilver och metylkvicksilver

Både oorganiskt kvicksilver¹³ och metylkvicksilver¹⁴ binder till reducerade svavelgrupper på naturligt organiskt material (humus) i mark och vatten. Eftersom bindningen är mycket stark är förekomsten av andra former av kvicksilver och metylkvicksilver försumbar i naturliga vattendrag och i markvatten under syresatta (oxiderande) förhållanden¹⁵ ¹⁶. Under syrefria (reducerande) förhållanden kommer dock olika former av kvicksilver och metylkvicksilver med oorganiskt svavel (sulfider och polysulfider) också att vara kvantitativt viktiga¹⁷ ¹⁸.

Den starka bindningen till organiskt material gör att kvicksilver och metylkvicksilver ackumuleras i det översta organiska lagret i skogsjordar och att endast en liten andel transporteras vidare till vattendrag på kort sikt¹⁹. Den starka bindningen till organiskt material innebär också att kvicksilver och metylkvicksilver i hög grad kommer att transporteras tillsammans med löst eller partikulärt organiskt material genom landskapet, till exempel från mark till vattendrag eller i vattendrag.

2.2 Bildning av metylkvicksilver

Metylkvicksilver bildas från oorganiskt kvicksilver genom aktivitet av ett flertal olika grupper av bakterier som lever i syrefria miljöer. Metylering av kvicksilver är en biologisk process som sker inne i bakteriernas celler (Figur 2).

¹³ Skyllberg U., Bloom P.R., Qian J., Lin C.-M., Bleam W.F. 2006. Complexation of mercury(II) in soil organic matter: EXAFS evidence for linear two-coordination with reduced sulfur groups. *Environmental Science and Technology* 40:4174-4180.

¹⁴ Qian J., Skyllberg U., Frech W., Bleam W.F., Bloom P.R., Petit P.E. 2002. Bonding of methyl mercury to reduced sulfur groups in soil and stream organic matter as determined by x-ray absorption spectroscopy and binding affinity studies. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 66:3873-3885.

¹⁵ Skyllberg U., Qian J., Frech W., Xia K, 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* 64:53-76.

¹⁶ Karlsson T., Skyllberg U. 2003. Bonding of ppb levels of methyl mercury to reduced sulfur groups in soil organic matter. *Environmental Science and Technology* 37: 4912-4918.

¹⁷ Drott A., Lambertsson L., Björn E., Skyllberg U. 2007. Importance of dissolved neutral mercury sulfides for methyl mercury production in contaminated sediments. *Environmental Science and Technology* 41: 2270-2276.

¹⁸ Drott A., Lambertsson L., Björn E., Skyllberg U. 2008. Potential demethylation rate determinations in relations to concentrations of MeHg, Hg and pore water speciation of MeHg in contaminated sediments. *Marine Chemistry* 112:93-101.

¹⁹ Hintelmann H., Harris R., Heyes A., Hurley J.P., Kelly C.A., Krabbenhoft D.P., Lindberg S., Rudd J.W.M., m fl 2002. Reactivity and mobility of new and old mercury deposition in a boreal forest ecosystem during the first year of the METAALICUS study. *Environmental Science and Technology* 36: 5034-5040.

Sulfatreducerande bakterier²⁰, järnreducerande bakterier²¹ och metanogener^{22 23} är några av de grupper av bakterier som har förmåga att metylera kvicksilver.

Förutom en syrefri miljö kräver de bakterier som kan utföra metylering tillgång till energirikt organiskt material²⁴, och tillgång till sulfat, järn etc, beroende på bakteriegrupp, för att processen ska ske.

Hur snabbt bildning av metylkviksilver sker påverkas även av temperaturen (främst genom dess påverkan på bakteriell aktivitet), och av vilka former av kvicksilver som finns tillgängliga för bakterierna att ta upp och metylera^{25 26}.

Metelyering

Biologisk process

Syrefri miljö



Figur 2. Metylering är en biologisk process som utförs av en rad olika bakterier under syrefria förhållanden.

2.3 Nedbrytning av metylkviksilver

Nedbrytning (demetylering) av metylkviksilver sker genom både kemiska och biologiska processer (Figur 3).

Nedbrytning av metylkviksilver sker kemiskt i ytvatten med hjälp av solljus²⁷. Detta gör att sjöar som tar emot avrinnande vatten från våtmarker ofta bryter ned mer metylkviksilver än vad som produceras i sjön, dvs sjön är en ”sänka” för metylkviksilver.

Två mekanismer för biologisk demetylering finns beskrivna.

²⁰ Compeau G.C., Bartha R. 1985. Sulfate reducing bacteria: principal methylators of mercury in anoxic estuarine sediment. *Applied and Environmental Microbiology* 50:498-502.

²¹ Kerin E.J., Gilmour C.C., Roden E., Suzuki M.T., Coates J.D., Mason R.P. 2006. Mercury methylation by dissimilatory iron-reducing bacteria. *Applied and Environmental Microbiology* 72:498-7919-7921.

²² Hamelin S., Amyot M., Barkay T., Wang Y., Planas D. 2011. Methanogens: principal methylators of Hg in lake periphyton. *Environmental Science and Technology* 45:7693-7700.

²³ Gilmour C.C., Podar M., Bullock A.L., Graham A.M., Brown S.D., Somenahally A.C. m fl 2013. Mercury methylation by novel organisms from new environments. *Environmental Science and Technology* 47: 11810-11820.

²⁴ Bravo, A.G., Bouchet, S., Tolu, J., Björn, E., Mateos-Rivera, A., Bertilsson, S., 2017. Molecular composition of organic matter controls methylmercury formation in boreal lakes. *Nature Communications* 8: 14255.

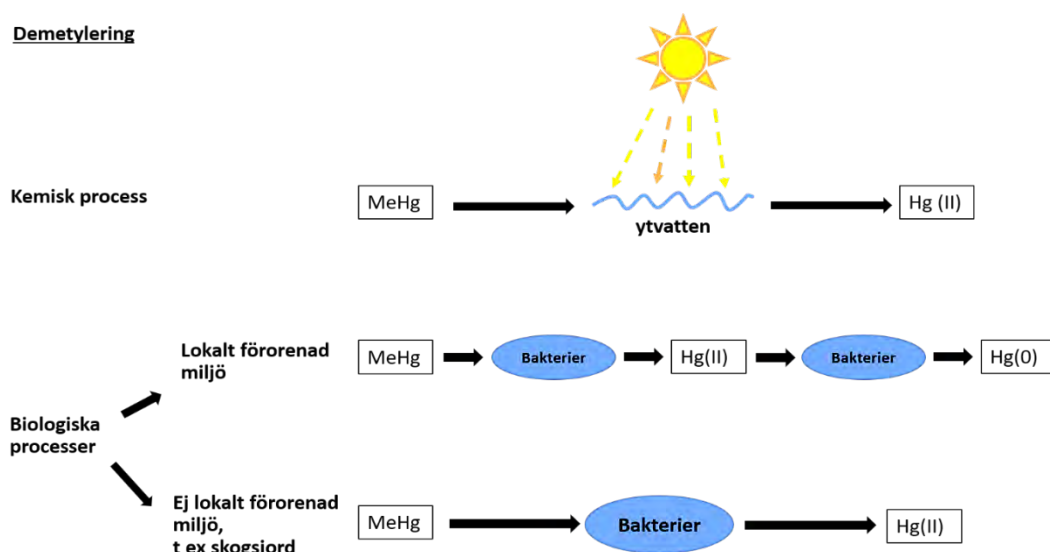
²⁵ Drott A., Lambertsson L., Björn E., Skyllberg U. 2007. Importance of dissolved neutral mercury sulfides for methyl mercury production in contaminated sediments. *Environmental Science and Technology* 41: 2270-2276.

²⁶ Schaefer, J.K. och Morel, F.M.M. 2009. High methylation rates of mercury bound to cysteine by *Geobacter sulfurreducens*. *Nature Geoscience* 2:123-126.

²⁷ Sellers P., Kelly C., Rudd J., MacHutchon A. 1996. Photodegradation of methylmercury in lakes. *Nature* 380: 694-697.

Den första mekanismen innebär att två olika enzym tillsammans omvandlar metylkvicksilver till Hg(0) och metan²⁸. Denna typ av demetylering dominerar i förorenade miljöer med höga halter av kvicksilver, men den är inte viktig i miljöer med låga halter av kvicksilver, såsom skogsjordar och sjöar utan någon lokal utsläppskälla till kvicksilver.

Den andra mekanismen för biologisk demetylering innebär att metylkvicksilver bryts ned till Hg(II) och metan eller koldioxid som en del av ämnesomsättningen hos sulfatreducerande bakterier och metanogener²⁹. Även järnreducerande bakterier kan utföra denna typ av demetylering³⁰. Eftersom denna typ av demetylering är en del av ämnesomsättningen hos bakterierna ökar hastigheten när aktiviteten ökar hos de bakterier som kan utföra denna process.



Figur 3. Nedbrytning av metylkvicksilver kan ske både kemiskt och biologiskt. Exempel på en lokalt förorenad miljö är gamla fibersediment utanför massa- och pappersindustrier.

Eftersom demetylering kan ske både kemiskt och biologiskt och förmågan att utföra biologisk demetylering är spridd mellan flera olika grupper av bakterier med olika krav på sin miljö, är det svårt att peka på några enstaka faktorer som styr hastigheten på demetylering.

2.4 Reduktion och gasavgång

Kvicksilver som reduceras till Hg(0) i mark, vatten eller sediment kan även avgå som gas till atmosfären. Reduktion från Hg(II) till Hg(0) är alltså en process som gör att kvicksilver försvinner från mark, vatten och sediment. Vid förnyad oxidation i atmosfären kommer dock kvicksilvret att falla ned på nytt (Figur 1).

²⁸ Barkay T., Miller S.M., Summers A.O. 2003. Bacterial mercury resistance from atoms to ecosystems. FEMS Microbiology Reviews 27: 355-384.

²⁹ Marvin-Dipasquale M.C., Oremland R.S. 1998. Bacterial methylmercury degradation in Florida Everglades peat sediment. Environmental Science and Technology 32: 2556-2563.

³⁰ Warner K.A., Roden E.E., Bonzongo J.C. 2003. Microbial mercury transformation in anoxic freshwater sediments under iron-reducing and other electron-accepting conditions. Environmental Science and Technology 37: 2159-2165.

Reduktion sker biologiskt, exempelvis vid den typ av demetylering som beskrivits ovan, där metylkvicksilver omvandlas till Hg(0) med hjälp av två olika enzym (Figur 3). Det är ett särskilt enzym som utför reduktionen från Hg(II) till Hg(0)³¹.

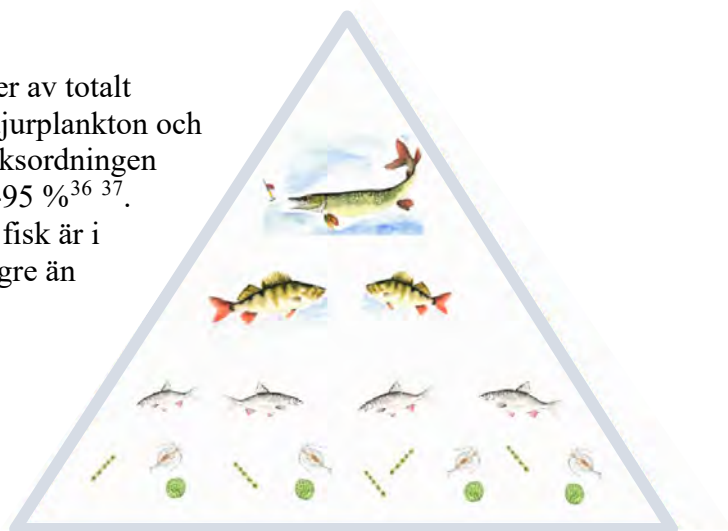
Reduktion kan även ske kemiskt med hjälp av solljus eller via reaktioner i mörker med organiskt och oorganiskt material^{32 33}. Energin som krävs för reduktion kan här antingen komma från solljus eller via elektronrika redox-aktiva grupper på organiskt material (bland annat fenol- eller kinongrupper) eller mineraler. Reduktion med hjälp av solljus är en snabbare process än den reduktion som sker i mörker³⁴.

2.5 Upplagring av metylkvicksilver i näringskedjor

Det kvicksilver som vi människor riskerar att få i oss när vi äter fisk, har fisken i sin tur fått i sig via födan. Det är nästan uteslutande metylkvicksilver som finns i fisk och orsaken är att metylkvicksilver lagras i näringskedjan (Figur 4). Detta innebär att koncentrationen av metylkvicksilver, och andelen metylkvicksilver av totalt kvicksilver, ökar för varje steg i näringskedjan. Detta kallas biomagnifikation³⁵.

Ungefärliga andelar av metylkvicksilver av totalt kvicksilver i sjövattnen, växtplankton, djurplankton och fisk har i ett flertal studier varit i storleksordningen 5 %, 15-25 %, 30-40 %, respektive 90-95 %^{36 37}. Koncentrationen av metylkvicksilver i fisk är i storleksordningen en miljon gånger högre än koncentrationen av metylkvicksilver i sjövattnen.

Figur 4. Metylkvicksilver anrikas uppåt i näringskedjan, från växt- till djurplankton och vidare upp till fisk.
Illustration: Anja Lomander



³¹ Barkay T., Miller S.M., Summers A.O. 2003. Bacterial mercury resistance from atoms to ecosystems. FEMS Microbiology Reviews 27: 355-384.

³² Denkenberg J.S., Driscoll C.T., Branfireun B.A., Eckley C.S., Cohen M., Slevendiran P.A. 2012. A synthesis of rates and control on elemental mercury evasion in the Great Lakes Basin. Environmental Pollution 161:291-298.

³³ Alberts J.J., Schindle J.E., Miller R.W., Nutter D.E. 1974. Elemental mercury evolution mediated by humic acid. Science 184: 895-896.

³⁴ Corbitt E.S., Jacob D.J., Holmes C.D., Streets D.G., Sunderland E.M. 2011. Global source-receptor relationships for mercury deposition under present-day and 2050 emissions scenarios. Environmental Science and Technology 45: 10477-10484.

³⁵ Downs S.G., Macleod C.L., Lester J.N. 1998. Mercury in precipitation and its relation to bioaccumulation in fish: a literature review. Water, Air and Soil Pollution 108: 149-187.

³⁶ Watras C.J. och Bloom N.S. 1992. Mercury and methylmercury in individual zooplankton: implications for bioaccumulation. Limnology and Oceanography 37:1313.

³⁷ Becker D.S., Bigham G.N. 1995. Distribution of mercury in the aquatic food web of Onondaga lake, New York. Water, Air and Soil Pollution 80: 563.

3 Kvicksilvers kretslopp i skogslandskapet

3.1 Fastmarker

Kvicksilvers starka bindning till organiskt material³⁸ gör att det kvicksilver som faller ner över skogsmark i hög utsträckning ackumuleras i skogsmarkens översta organiska lager. Endast en liten andel (mindre än en procent under en period av 3 år³⁹) av detta kvicksilver utlakas till vattendrag på kort sikt (Figur 5).



Figur 5. Kvicksilver ackumuleras i skogsmarkens översta lager. På kort sikt utlakas endast en liten andel av detta till vattendrag om marken inte störs. Foto: Anja Lomander.

Den starka bindningen till organiskt material betyder också att både oorganiskt kvicksilver och metylkvicksilver⁴⁰ i hög grad kommer att transporteras tillsammans med organiskt material. En ökad transport av organiskt material, till exempel från skogsmark till vattendrag, innebär därmed också en ökad transport av kvicksilver.

I syrefria miljöer där de bakterier^{41 42 43 44} som utför metylering har en hög aktivitet, omvandlas kvicksilvret till metylkvicksilver. En kombination av syrefri miljö och god tillgång på energirikt organiskt material ger upphov till hög metylering. Om tidigare väl-dränerad skogsmark vattenmättas bildas miljöer där

³⁸ Skyllberg U., Bloom P.R., Qian J., Lin C.-M., Bleam W.F. 2006. Complexation of mercury(II) in soil organic matter: EXAFS evidence for linear two-coordination with reduced sulfur groups. *Environmental Science and Technology* 40:4174-4180.

³⁹ Harris R.L. m fl 2007. Whole-ecosystem study shows rapid fish-mercury response to changes in mercury deposition. *PNAS* 42:16586-16591.

⁴⁰ Qian J., Skyllberg U., Frech W., Bleam W.F., Bloom P.R., Petit P.E. 2002. Bonding of methyl mercury to reduced sulfur groups in soil and stream organic matter as determined by x-ray absorption spectroscopy and binding affinity studies. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 66:3873-3885.

⁴¹ Compeau G.C., Bartha R. 1985. Sulfate reducing bacteria: principal methylators of mercury in anoxic estuarine sediment. *Applied and Environmental Microbiology* 50:498-502.

⁴² Kerin E.J., Gilmour C.C., Roden E., Suzuki M.T., Coates J.D., Mason R.P. 2006. Mercury methylation by dissimilatory iron-reducing bacteria. *Applied and Environmental Microbiology* 72:498-7919-7921.

⁴³ Hamelin S., Amyot M., Barkay T., Wang Y., Planas D. 2011. Methanogens: principal methylators of Hg in lake periphyton. *Environmental Science and Technology* 45:7693-7700.

⁴⁴ Gilmour C.C., Podar M., Bullock A.L., Graham A.M., Brown S.D., Somenahally A.C. m fl 2013. Mercury methylation by novel organisms from new environments. *Environmental Science and Technology* 47: 11810-11820.

metyleringen är hög⁴⁵. Sådana miljöer bildas till exempel på de delar av hyggen där grundvattenytan efter avverkning stiger så att den befinner sig just i markytan, och där färskt organiskt material tillförs i form av avverkningsrester och döda rötter och växtdelar. Demetylering varierar normalt sett mindre än metylering i fastmarker. Mängden metylkvicksilver som bildas avgörs därför främst av variationen i metylering⁴⁶.

3.2 Våtmarker

Våtmarker är generellt källor till metylkvicksilver i landskapet^{47 48}. Resultat från en studie av åtta boreala våtmarker i Sverige under åren 2007-2010 visade att sju av dessa var källor till metylkvicksilver⁴⁹. I våtmarker finns ofta en syrefri miljö, tillgång till sulfat och järn, och tillgång till energirikt organiskt material, vilket är avgörande faktorer för hög metylering. Vattnet i våtmarker står dessutom ofta i kontakt med vattnet i sjöar och vattendrag vilket gör att det metylkvicksilver som bildas i våtmarker lätt kan transporteras vidare dit.

Resultat från Sverige och Nordamerika har visat att de mest näringsfattiga våtmarkerna, mossar, är källor till metylkvicksilver (metylering är högre än demetylering), men att de största källorna är något mer näringsrika våtmarker: näringsfattiga/intermediärt näringsrika kärr (Figur 6). De kärr som varit de största källorna till metylkvicksilver i de studier som gjorts, domineras av säv- och starrarter och bredbladiga gräs i fältskiktet och av vitmossor i bottenskiktet, med ett pH-värde i storleksordningen 5,0-5,5 och en kol/kväve-kvot i torv på ca 20-25⁵⁰.

⁴⁵ Hall B. D., St Louis V. L., Rolffhus K. R., Bodaly R. A., Beaty K. G., Paterson M. J., Cherewyk K. A. 2005. Impacts of reservoir creation on the biogeochemical cycling of methyl mercury and total mercury in boreal upland forests. *Ecosystems* 8: 248-266.

⁴⁶ Kronberg R-M., Jiskra M., Wiederhold J., Björn E., Skyllberg U. 2016. Methyl mercury formation in hillslope soils of boreal forests: the role of forest harvest and anaerobic microbes. *Environmental Science and Technology* 50: 9177-9186.

⁴⁷ St Louis V.L., Rudd J.W.M., Kelly C.A., Beaty K.G., Bloom N.S., Flett R.J. 1994. Importance of wetlands as sources of methyl mercury to boreal forest ecosystems. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences* 1994: 1965-1076.

⁴⁸ Galloway M.E., Branfireun B.A. 2004. Mercury dynamics of a temperate forested wetland. *Science of the Total Environment* 325:239-254.

⁴⁹ Tjerngren I., Meili M., Björn E., 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 and Technology* 46:8052-8060.

⁵⁰ Tjerngren I., Karlsson T., Björn E., Skyllberg U. 2012. Potential Hg methylation and MeHg demethylation rates related to the nutrient status of different boreal wetlands. *Biogeochemistry* 108:335-350.



Figur 6. I klibbalkärr (översta bilden) är nedbrytning av metylkvicksilver större än bildning; klibbalkärr är "sänkor" för metylkvicksilver. I näringsfattiga/intermediärt näringsrika kärr, och i mossar, (understa bilderna) är däremot bildning av metylkvicksilver större än nedbrytning. Dessa våtmarker är källor till metylkvicksilver. Foton: Anja Lomander.

Ännu mer näringsrika kärr är inte lika stora källor till metylkvicksilver och i de mest näringsrika kärren har man observerat att demetylering är högre än metylering, så att det sker en nedbrytning av metylkvicksilver. Resultat från våtmarker i Florida, USA, har visat att både metylering och demetylering sjunker längs en gradient med ökande näringstillgång⁵¹. Resultat från nio klibbalkärr i södra Sverige har visat att dessa näringsrika kärr är "sänkor" för metylkvicksilver, dvs demetylering är högre än metylering så att det sker en nedbrytning av metylkvicksilver⁵² (Figur 6).

⁵¹ Gilmour C.C., Riedel G.S., Ederington M.C., Bell J.T., Benoit J.M., Gill G.A., Stordal M.C. 1998. Methylmercury concentration and production rates across a trophic gradient in the northern Everglades. *Biogeochemistry* 40:327-345.

⁵² Kronberg R-M., Tjerngren I., Drott A., Björn E., Skyllberg U. 2012. Net degradation of methyl mercury in alder swamps. *Environmental Science and Technology* 46:13144-13151.

Resultaten från klibbalkärren visar att ett högre pH-värde och mer näringsrika förhållanden gynnar demetylering mer än det gynnar metylering. Med de resultat som finns hittills går det dock inte att slå fast ifall det finns något samband mellan trädslaget klibbal och den höga demetylering som observerats i dessa miljöer. Det man kunnat konstatera är att demetylering i klibbalkärr sker dels kemiskt, dels biologiskt, genom aktivitet av metanogener. Den höga demetyleringen är alltså ett resultat av både kemiska och biologiska processer som sker i denna miljö⁵³.

Resultat från en studie där man med ny teknik kunnat mäta avgång av gasformigt Hg(0) från en våtmark (näringsfattigt kärr) i norra Sverige, har visat att avgången av kvicksilver som gas är större än nedfallet⁵⁴. Detta indikerar att återhämtning av kvicksilverhalter i våtmarker skulle kunna gå snabbare än man tidigare trott. Studien är den första i sitt slag och det är inte klarlagt i hur hög grad resultatet är giltigt för olika typer av våtmarker.

3.3 Sjöar

Halterna av kvicksilver i fisk i en sjö påverkas av egenskaper i sjöns avrinningsområde (till exempel andelen våtmarker), av metylering, demetylering och transport i sjöns vatten, och av metylering, demetylering och transport i sjöns sediment. Hur näringskedjorna i sjön är uppbyggda har också betydelse, eftersom detta påverkar upplagringen av metylkvicksilver i näringskedjan.

I ett flertal studier har ett positivt samband påvisats mellan hur brunt vattnet är i en sjö och hur hög halt av kvicksilver som återfinns i fisk^{55 56}. Detta är en generell tumregel, som har flera olika förklaringar.

En förklaring är att sjöar med en stor andel våtmarker i sitt avrinningsområde mottar en större mängd löst organiskt material och med detta följer metylkvicksilver som huvudsakligen transporteras bundet till det organiska materialet. Resultat från detaljerade studier av organiskt material och kvicksilver i sediment från 10 svenska sjöar längs en näringsgradient har visat att halten av metylkvicksilver i sediment är högre i näringsfattigare sjöar än i mer näringsrika sjöar (Figur 7). Bildningen av metylkvicksilver i sedimentet är lägre i näringsfattiga sjöar, men dessa sjöar tar emot mer metylkvicksilver, som transporteras till sjön från avrinningsområdet bundet till organiskt material⁵⁷.

⁵³ Kronberg R-M., Schaefer J.K., Björn E., Skyllberg U. 2018. Mechanisms of methyl mercury net degradation in alder swamps: the role of methanogens and abiotic processes. *Environmental Science and Technology Letters* 5:220-225.

⁵⁴ Osterwalder S., Bishop K., Alewell C., Fritsche J., Laudon H., Åkerblom S., Nilsson M.B. 2017. Mercury evasion from a boreal peatland shortens the timeline for recovery from legacy pollution. *Scientific Reports* 7:16022.

⁵⁵ Håkanson L., Nilsson Å., Andersson T. 1990. Mercury in the Swedish mor layer-linkages to mercury deposition and sources of emission. *Water, Air and Soil Pollution* 50:311.

⁵⁶ McMurtry M.J., Wales D.L., Scheider W.A., Beggs G.L., Dimond P.E. 1989. Relationship of mercury concentrations in lake trout (*Salvelinus namaycush*) and smallmouth bass (*Micropterus dolomieu*) to the physical and chemical characteristics of Ontario lakes. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences* 46:426.

⁵⁷ Garcia Bravo A., Bouchet S., Tolu J., Björn E., Mateos-Rivera A., Bertilsson S. 2017. Molecular composition of organic matter controls methylmercury formation in boreal lakes. *Nature Communications* 8:4255.



Figur 7. Sjöar i jordbrukslandskapet, som ofta är mer näringsrika och har en mindre andel torvmark i avrinningsområdet, har ofta lägre halter av metylkvicksilver i vatten och bottensediment än näringsfattiga humusrika sjöar i skogslandskapet. Foton: Skogsstyrelsens bildarkiv (vänster) och Anja Lomander (höger).

Ett ökat tillskott av organiskt material medför en förändring i näringskedjan, från dominans av växtplankton till dominans av bakterier. Detta leder till en flerfaldigt ökad upplagring av metylkvicksilver i näringskedjan och därmed ökad exponering av vattenlevande organismer för metylkvicksilver⁵⁸.

Nedbrytning av metylkvicksilver med hjälp av solljus i vattenmassan (Figur 3) gör att sjöar som tar emot avrinnande vatten från våtmarker ofta är sänkor för metylkvicksilver (nedbrytning är större än bildning). I sådana sjöar kan en stor andel av det metylkvicksilver som transporteras till sjön brytas ned^{59 60}. Ljusadsorberande funktionella grupper på organiskt material är viktiga för bildning av radikaler (atomer eller molekyler som lätt reagerar med andra ämnen), som är en avgörande faktor för att nedbrytning av metylkvicksilver i vattenmassan ska ske. Samtidigt gör högre halt av organiskt material att solljuset inte når ner i vattenmassan. I sjöar med en högre halt av organiskt material i vattnet är därför hastigheten på nedbrytning av metylkvicksilver lägre än i sjöar med en lägre organisk halt i vattnet⁶¹.

⁵⁸ Jonsson S., Andersson A., Nilsson M.B., Skyllberg U., Lundberg E., Schaefer J.K., Åkerblom S., Björn E. 2017. Terrestrial discharges mediate trophic shifts and enhance methylmercury accumulation in estuarine biota. *Science Advances* 3:e1601239.

⁵⁹ Sellers P., Kelley C.A., Rudd J.W.M. 2001. Fluxes of methylmercury to the water column of a drainage lake: The relative importance of internal and external sources. *Limnology and Oceanography* 46:623-631.

⁶⁰ Watras C.J., Morrison K.A., Kent A., Price N., Regnell O., Eckley C., Hintelmann H., Hubacher T. 2005. Sources of methylmercury to a wetland-dominated lake in northern Wisconsin. *Environmental Science and Technology* 39: 4747-4758.

⁶¹ Fernández-Gómez C., Drott A., Björn E., Díez S., Bayona J.M., Tesfalidet S., Lindfors A., Skyllberg U. 2013. Towards universal wavelength-specific photodegradation rate constants for methyl mercury in humic waters, exemplified by a boreal lake-wetland gradient. *Environmental Science and Technology* 47:6279-6287.

Resultat från mätningar i kustnära miljöer i Bottenhavet har visat att metylkvicksilver som tillförs vattensystem tillsammans med organiskt material från avrinningsområdet tas upp av organismer med en hastighet som är ca 5-30 gånger högre än metylkvicksilver som produceras i sediment på botten⁶². Detta tyder på att förändringar i tillförsel av metylkvicksilver från avrinningsområdet snabbt kan påverka halten i organismer. Detta innebär att skogsbruksåtgärder har stor möjlighet att påverka halter av kvicksilver i organismer, eftersom skogsbruksåtgärder påverkar tillförseln av kvicksilver och metylkvicksilver från avrinningsområdet. Studien är den första där man kunnat visa på den här typen av effekter och fler studier krävs därför för att bekräfta resultatet.

⁶² Jonsson S., Skyllberg U., Nilsson M.B., Lundberg E., Andersson A., Björn E. 2014. Differentiated availability of geochemical mercury pools controls methylmercury levels in estuarine sediment and biota. *Nature Communications* 5: 4624.

4 Effekter av skogsbruksåtgärder på kvicksilvers transport och omvandling

4.1 Effekter av föryngringsavverkning

4.1.1 Föryngringsavverkning leder ofta till ökade halter av kvicksilver i fisk

Föryngringsavverkning leder ofta till högre halter av kvicksilver i fisk och andra vattenlevande organismer, i de sjöar och vattendrag som vattnet från det avverkade området avrinner till. Biomassan och artsammansättningen av vattenlevande organismer kan också förändras efter avverkning, vilket kan påverka halten av kvicksilver i olika organismgrupper.

Det finns några studier av effekten av föryngringsavverkning på halter av kvicksilver i fisk och andra vattenlevande organismer^{63 64 65 66 67 68}.

De flesta av dessa visar att avverkning leder till ökade halter av kvicksilver i organismer (Figur 8).



Figur 8. Studier visar att föryngringsavverkning ofta ökar halten av metylkvicksilver i vattenlevande organismer. Foto: Anja Lomander

⁶³ Rask M., Nyberg K., Markkanen S.L., Ojala A. 1998. Forestry in catchments: Effects on water quality, plankton, zoobenthos and fish in small lakes. *Boreal Environment Research* 3: 75-86.

⁶⁴ Garcia E., 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* 56:339-345.

⁶⁵ Garcia E., 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* 57:129-135.

⁶⁶ Garcia E., 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* 24:685-693.

⁶⁷ Desrosiers M., Planas D., 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* 63:1734-1735.

⁶⁸ Wu P., Bishop K., von Brömssen C., Eklöf K., Futter M., Hultberg H., Martin J., Åkerblom S. 2018. Does forest harvest increase the mercury concentrations in fish? Evidence from Swedish lakes. *Science of the Total Environment* 622-623:1353-1362.

I Sverige gjordes en studie av koncentrationer av kvicksilver i abborre av olika storlek, från 5 olika sjöar vars avrinningsområden avverkats, och 19 oavverkade referenssjöar. I studien mättes koncentrationer från 2 år före och fram till 3 år efter avverkning. Resultaten visade på en betydande variation mellan olika år. Trots variationen observerades en statistiskt säkerställd ökning av halten kvicksilver i abborre från sjöar vars avrinningsområden avverkats (6-40 % av avrinningsområdena avverkades)⁶⁹.

I Quebec, Canada, har flera studier visat att skogsbruk har effekter på halter av kvicksilver i fisk och andra vattenlevande organismer. I dessa studier jämförde man halter av kvicksilver i ett antal olika fiskarter (bland annat gädda), i djurplankton och alger, från sjöar vars avrinningsområden avverkats (9 sjöar, 9-72 % av avrinningsområdet avverkat) eller inte avverkats (20 sjöar). Jordarna i området var moräner och skogen boreal barrskog eller barrblandskog, dominerad av svartgran och Jack pine (*Pinus divaricata*). Resultaten visade entydigt på högre halter av kvicksilver i fisk och andra organismer från sjöar vars avrinningsområden avverkats, än i organismer från sjöar vars avrinningsområden inte avverkats, 1-3 år efter avverkning^{70 71 72 73}. Ökad uttransport av löst organiskt material, till vilket metylkvicksilver och kvicksilver binder, lyftes fram som den viktigaste faktorn för att förklara resultaten⁷⁴.

I en finsk studie gjordes mätningar av vattenkemi, biologi och halter av kvicksilver i gädda, ett år före och tre år efter avverkning. Runt 3 sjöar avverkades 15-33 % av avrinningsområdet, medan en fjärde sjö användes som oavverkad referens. Resultaten visade bland annat att biomassan av djurplankton och bottendjur ökat och att artsammansättningen förändrats i flera av de sjöar där avverkning gjorts i avrinningsområdet. Någon statistiskt säkerställd ökning av halten av kvicksilver i gädda observerades inte efter avverkning. Möjliga förklaringar till detta var enligt författarna att förändrad biomassa och artsammansättning av djurplankton och bottendjur även påverkar fiskens födoval, samt att man lämnat en 20-50 m bred kantzon längs sjöarna⁷⁵.

⁶⁹ Wu P., Bishop K., von Brömssen C., Eklöf K., Futter M., Hultberg H., Martin J., Åkerblom S. 2018. Does forest harvest increase the mercury concentrations in fish? Evidence from Swedish lakes. *Science of the Total Environment* 622-623:1353-1362.

⁷⁰ Garcia E., 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* 56:339-345.

⁷¹ Garcia E., 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* 57:129-135.

⁷² Garcia E., 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* 24:685-693.

⁷³ Desrosiers M., Planas D., 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* 63:1734-1735.

⁷⁴ Garcia E., 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* 24:685-693.

⁷⁵ Rask M., Nyberg K., Markkanen S.L., Ojala A. 1998. Forestry in catchments: Effects on water quality, plankton, zoobenthos and fish in small lakes. *Boreal Environment Research* 3: 75-86.

4.1.2 Föryngringsavverkning leder ofta till ökad uttransport av metylkvicksilver och kvicksilver

Föryngringsavverkning leder ofta till ökad uttransport av metylkvicksilver och kvicksilver från skogsmark till sjöar och vattendrag. Detta beror på att uttransporten av organiskt material nästan alltid ökar efter avverkning och metylkvicksilver och kvicksilver binder till det organiska materialet.

Föryngringsavverkning innebär att träden med deras dränerande förmåga tas bort. Detta leder till att grundvattenytan i marken stiger och att avrinningen från det avverkade området ökar. Vid avverkning där samtliga träd tas bort ökar avrinningen med mellan 50 och 100 % (dvs upp till en fördubbling), jämfört med avrinningen före avverkning⁷⁶. Denna ökning har bekräftats av ett flertal svenska studier i boreal skog^{77 78 79 80}. Hur mycket och hur snabbt avrinningen ökar efter avverkning på eller i anslutning till en specifik plats varierar dock med topografi, jordart och beroende på vilka förråd av mark- och grundvatten som finns. Exempelvis visade en ettårig mätserie i boreal skog i flacka landskap under högsta kustlinjen, 2 år efter avverkning, inte på någon skillnad i avrinning mellan avverkade områden och närliggande kontroller med grandominerad äldre skog. Detta beror sannolikt på att skillnaden i avrinning inte slår igenom lika snabbt och tydligt i ett flackt landskap med en större hydrologisk buffert i form av våtmarker, mark- och grundvatten⁸¹.



Figur 9. När träden tas bort stiger grundvattennivån och avrinningen ökar. Detta medför även att utströmningsområdenas storlek ökar och att svackorna blir blötare än före avverkning. Foto: Anja Lomander.

⁷⁶ Bosch J.M., Hewlett J.D. 1982. A review of catchment experiments to determine the effect of vegetation changes on water yield and evapotranspiration. *Journal of Hydrology* 55:3.23.

⁷⁷ Rosén K., Aronson J., Eriksson H. 1996. Effects of clear-cutting on streamwater quality in forest catchments in central Sweden. *Forest Ecology and Management* 83:237-244.

⁷⁸ Eklöf K., Schelker J., Sörensen R., Meili M., Laudon H., von Brömssen C., Bishop K. 2014. Impact of forestry on total and methyl-mercury in surface waters: distinguishing effects of logging and site preparation. *Environmental Science and Technology* 48:4690-4698.

⁷⁹ Kronberg R-M., Drott A., Jiskra M., Wiederhold J.G., Björn E., Skyllberg U. 2016. Forest harvest contribution to boreal freshwater methyl mercury load. *Global Biogeochemical Cycles* 30:825-843.

⁸⁰ Sörensen R., Meili M., Lambertsson L., von Brömssen C., Bishop K. 2009. 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* 38:364-372.

⁸¹ Kronberg R-M., Drott A., Jiskra M., Wiederhold J.G., Björn E., Skyllberg U. 2016. Forest harvest contribution to boreal freshwater methyl mercury load. *Global Biogeochemical Cycles* 30:825-843.

Ökad avrinning medför nästan alltid en ökad uttransport av löst organiskt material. När grundvattenytan stiger i marken kommer den att i högre grad nå upp till markhorisonter som domineras av organiskt material, vilket bidrar till detta. Resultat från flera svenska studier i boreal skog har visat att uttransporten av löst organiskt material efter avverkning ökar med ca 50-80 % ,vid avverkning av ca 60-70 % av avrinningsområdet, jämfört med uttransporten före avverkning^{82 83 84}. I flera av dessa studier har dock inte *halten* av löst organiskt material i avrinnande vatten ökat efter avverkning. Det är den totala mängden av organiskt material som transporteras med vattnet som ökar eftersom den avrinnande mängden vatten ökar. På grund av att både metylkvicksilver och kvicksilver binder starkt till organiskt material, innebär en ökad uttransport av organiskt material också en ökad uttransport av metylkvicksilver och kvicksilver.

Det finns ett flertal rapporter från Sverige, Finland, Norge och Nordamerika där effekten av skogsavverkning på koncentrationer och mängder av metylkvicksilver i avrinnande vatten (Tabell 1) studerats^{85 86 87 88 89 90 91 92 93 94}. Nästan alla av dessa visar på en ökad uttransport av metylkvicksilver efter avverkning, men det

⁸² Schelker J., Eklöf K., Bishop K., Laudon H. 2012. Effects of forestry operations on dissolved organic carbon concentrations and export in boreal first order streams. *Journal of Geophysical Research* 117m G01011.

⁸³ Eklöf K., Schelker J., Sörensen R., Meili M., Laudon H., von Brömssen C., Bishop K. 2014. Impact of forestry on total and methyl-mercury in surface waters: distinguishing effects of logging and site preparation. *Environmental Science and Technology* 48:4690-4698.

⁸⁴ Kronberg R.-M., Drott A., Jiskra M., Wiederhold J.G., Björn E., Skyllberg U. 2016. Forest harvest contribution to boreal freshwater methyl mercury load. *Global Biogeochemical Cycles* 30:825-843.

⁸⁵ Porvari P., Verta M., Munthe J., Haapanen M. 2003. Forestry practices increase mercury and methyl mercury output from boreal forest catchments. *Environmental Science and Technology* 37:2389-2393.

⁸⁶ Sörensen R., Meili M., Lambertsson L., von Brömssen C., Bishop K. 2009. 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* 38:364-372.

⁸⁷ Skyllberg U., Björkman Westin M., Meili M., Björn E. 2009. Elevated concentrations of methyl mercury in streams after forest clear-cut: a consequence of mobilization or new methylation? *Environmental Science and Technology* 43:8535-8541.

⁸⁸ Allan C.J., Heyes A., Mackereth R.J. 2009. Changes to groundwater and surface water Hg transport following clearcut logging: a Canadian case study. I Does forestry contribute to mercury in Swedish fish? *KSLA rapport* 148: 50-54.

⁸⁹ Eklöf K., Kraus A., Weyhenmeyer G. A., Meili M., 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: 1308-1320.

⁹⁰ Eklöf K., Schelker J., Sörensen R., Meili M., Laudon H., von Brömssen C., Bishop K. 2014. Impact of forestry on total and methyl-mercury in surface waters: distinguishing effects of logging and site preparation. *Environmental Science and Technology* 48:4690-4698.

⁹¹ De Wit H.A., Granhus A., Lindholm M., Kainz M.J., Lin Y., Veiteberg Braaten H. F., Blaszczyk J. 2014. Forest harvest effects on mercury in streams and biota in Norwegian boreal catchments. *Forest Ecology and Management* 324: 52-63.

⁹² Kronberg R.-M., Drott A., Jiskra M., Wiederhold J.G., Björn E., Skyllberg U. 2016. Forest harvest contribution to boreal freshwater methyl mercury load. *Global Biogeochemical Cycles* 30:825-843.

⁹³ Ukonmaanaho L., Starr M., Kantola M., Laurén A., Piispanen J., Pietilä H., Perämäki P., Merilä P., Fritze H., Tuomivirta T., Heikkinen J., Mäkinen J., Nieminen T.M. 2016. Impacts of forest harvesting on mobilization of Hg and MeHg in drained peatland forests on black schist or felsic bedrock. *Environmental Monitoring and Assessment* 188-228.

⁹⁴ Eckley C.S., Eagles-Smith C., Tate M.T., Kowalski B., Danehy R., Johnson S.L., Krabbenhoft D.P. 2018. Stream mercury export in response to contemporary timber harvesting methods (Pacific coastal mountains, Oregon, USA). *Environmental Science and Technology* 52:1971-1980.

finns en betydande variation i storleken på effekten mellan studier. Det finns en studie från torvmark i Finland där man inte uppmätt någon ökad uttransport av MeHg efter avverkning⁹⁵, och det finns en studie från tempererad barrskog i Oregon USA, där man inte detekterat något metylkvicksilver alls (halterna var alltså låga)⁹⁶. Uttryckt som procent av uttransport från kontrolltytor som inte avverkats (i de studier som gjorts innebär kontrolltytorna antingen att samma områden följts även före avverkning, att man haft närliggande oavverkade kontrolltytor att jämföra med, eller både och) varierar ökningen i resterande studier mellan 12 och 1500 %. En ökning med 100 % innebär en fördubbling av den uttransporterade mängden metylkvicksilver. I de flesta studier visar resultaten att uttransporten ökar med mellan 60 och 400 %, dvs med en faktor 0,6-4. Endast i en del av de studier som rapporterats visar resultaten på en ökning av *halten* av metylkvicksilver i avrinnande vatten (jmf organiskt material ovan), men i och med att avrinningen ökar efter avverkning kommer mängden uttransporterat metylkvicksilver att öka även om halten inte gör det. De studier som rapporterats sträcker sig 0-4 år efter avverkning.

För oorganiskt kvicksilver är resultaten likartade som för metylkvicksilver. I de flesta fall är effekten av skogsavverkning större för metylkvicksilver än för oorganiskt kvicksilver, men i något fall är förhållandet det omvända. Det oorganiska kvicksilver som transporteras från skogsmark till sjöar och vattendrag kan metyleras där, och därefter tas upp i näringskedjan. Uttransport av oorganiskt kvicksilver bidrar därför också till kvicksilverbelastningen i sjöar och vattendrag.

⁹⁵ Ukonmaanaho L., Starr M., Kantola M., Laurén A., Piispanen J., Pietilä H., Perämäki P., Merilä P., Fritze H., Tuomivirta T., Heikkinen J., Mäkinen J., Nieminen T.M. 2016. Impacts of forest harvesting on mobilization of Hg and MeHg in drained peatland forests on black schist or felsic bedrock. *Environmental Monitoring and Assessment* 188-228.

⁹⁶ Eckley C.S., Eagles-Smith C., Tate M.T., Kowalski B., Danehy R., Johnson S.L., Krabbenhoft D.P. 2018. Stream mercury export in response to contemporary timber harvesting methods (Pacific coastal mountains, Oregon, USA). *Environmental Science and Technology* 52:1971-1980.

Tabell 1. Publicerade rapporter där inverkan av föryngringsavverkning på uttransport av metylkvicksilver (MeHg) och koncentration av metylkvicksilver i avrinnande vatten studerats.

Publikation	Mätperiod och material	Region	Ökad uttransport av MeHg efter avverkning?	Ökad koncentration av MeHg i avrinnande vatten?	Kommentar
Eckley m fl 2018	2012-2014 3 hyggen, 1 kontroll	Tempererad barrskog, Oregon, USA	MeHg under detektionsgränsen	MeHg under detektionsgränsen	MeHg detekterades inte, däremot ökad uttransport av Hg(II) efter avverkning
Kronberg m fl 2016	Maj 2011-maj 2012 10 hyggen, 10 kontroller	Boreal skog, nordöstra Sverige	Hyggen över HK ¹ 2,56 mg/ha, år (+380 % ²) Kontroller över HK 0,68 mg/ha, år	Ej signifikant	Ökad uttransport av MeHg 2-3 år efter avverkning, över HK
Ukonmaanaho m fl 2016	2008-2012 6 hyggen, 2 kontroller	Boreal skog på dikad torvmark, Finland	Nej	Signifikant ökning på ett av hyggerna, svagare ökning på övriga	Ökad koncentration av MeHg 0-2 år efter avverkning
De Wit m fl 2014	Juni 2008-december 2012 1 hygge, 1 kontroll	Boreal skog, sydöstra Norge	Hygge 0,103 µg/m ² , år (+100 %) Kontroller 0,019-0,041 µg/m ² , år	Ej signifikant	Ökad uttransport av MeHg 0-3 år efter avverkning
Eklöf m fl 2014	2005-2011 2 hyggen, 1 kontroll	Boreal skog, nordöstra Sverige	Hyggen ca 0,31 ng/m ² , dag (+20-70 %) Kontroll 0,19 ng/m ² , dag	Ej signifikant	Ökad uttransport av MeHg 0-2 år efter avverkning

Eklöf m fl 2012	September 2009 Juni 2010 21 hyggen, 18 kontroller	Boreal och boreo-nemoral skog, Sverige	Ej mätt	Hyggen +22-76 % jämfört med kontroller, i södra, mellersta, respektive norra Sverige	Ökad koncentration av MeHg 0-2 år efter avverkning
Allan m fl 2009	2003-2005 1 hygge, 1 kontroll	Boreo-nemoral skog, Ontario, Canada	+ 81 %	Ej signifikant	Ökad uttransport av MeHg 0-2 år efter avverkning
Skyllberg m fl 2009	Augusti 2007 47 hyggen, 10 kontroller	Boreal skog, nordöstra Sverige	Ej mätt	Hyggen 0-4 år 0,56 ng/l Kontroller 0,16 ng/l	Ökad koncentration av MeHg 0-4 år efter avverkning
Sörensen m fl 2009	2004-april 2008 2 hyggen, 1 kontroll	Boreal skog, nordöstra Sverige	Hyggen 0,15-0,19 mg/ha, år (+12-60 %) Kontroller 0,11-0,14 mg/ha, år	Ej signifikant	Ökad uttransport av MeHg 0-2 år efter avverkning
Porvari m fl 2003	1994-2001 1 hygge, 1 kontroll	Boreal skog, södra Finland	Hygge 110-160 mg/km ² , år (+300-1500 %) Kontroll 11-36 mg/km ² , år	Hygge 0,35 ng/l Kontroll 0,15 ng/l	Ökad koncentration och uttransport av MeHg 0-3 år efter avverkning

¹Högsta kustlinjen

²Angivna procentsiffror i tabellen avser ökning av uttransport efter avverkning, jämfört med uttransport från kontroll som inte avverkats. En ökning med 100 % innebär en fördubbling av uttransporten.

4.1.3 Bildning av metylkvicksilver ökar efter förnygringsavverkning

Förnygringsavverkning leder till ökad bildning av metylkvicksilver. Bildning av metylkvicksilver är en biologisk process som sker i syrefri miljö. Efter avverkning stiger grundvattenytan i marken vilket gör att nya syrefria miljöer bildas. God tillgång på energirikt organiskt material och gynnsam temperatur efter avverkning bidrar också till ökad bildning av metylkvicksilver.

I några studier har man kunnat separera effekten av en ökad uttransport av metylkvicksilver, på grund av ökad avrinning och uttransport av organiskt material, från effekten av en ökad bildning av metylkvicksilver. Det har då konstaterats att bildning av metylkvicksilver ökar efter förnygringsavverkning. Den ökade uttransport av metylkvicksilver som observerats efter avverkning är därmed som regel ett resultat av både ökad uttransport och ökad bildning av metylkvicksilver. Att det skett en ökad bildning av metylkvicksilver har man kunnat konstatera genom att totalhalten av metylkvicksilver i jorden ökat, att hastigheten på metylering (mätt med stabila isotoper av metylkvicksilver) i jorden ökat, eller genom att mängden metylkvicksilver per organiskt material (kvoten MeHg/DOC, dvs MeHg per löst organiskt kol) ökat. I studierna har flera av dessa mått använts och gett en samstämmig bild av ökad metylering på hyggen. Man har också kunnat visa var på hyggena metyleringen är högst.

När grundvattenytan stiger efter en avverkning bildas syrefria miljöer i jordar som före avverkning varit relativt väl-dränerade (markfuktighetsklassen har varit frisk eller fuktig). Hyggesfasen medför på flera sätt förhållanden som gynnar metyleringsprocessen; syrefria miljöer med god tillgång till energirikt organiskt material (från färsk avverkningsrester etc), samt fukt- och temperaturförhållanden som är gynnsamma för bakteriell aktivitet (Figur 9 och 10).



Figur 10. Syrefria förhållanden och tillgång till energirikt organiskt material samt ökad temperatur till följd av ökad solinstrålning leder till ökad bildning av metylkvicksilver efter avverkning. Foto: Anja Lomander.

Resultat från en studie av koncentrationer av metylkvicksilver, oorganiskt kvicksilver och organiskt material i avrinnande vatten från 20 st 0-4-åriga hyggen och 10 st kontroller med grandominerad skog i nordöstra Sverige visade att kvoten MeHg/DOC var förhöjd i avrinnande vatten från hyggen jämfört med kontroller och att kvoten MeHg/DOC ökat mer jämfört med kvoten Hg(II)/DOC. Storleken på ökningen av kvoten MeHg/DOC visade att 1/6 av den ökade uttransport av metylkvicksilver som observerades från hyggen kunde förklaras av ökad metylering, medan 5/6 berodde på ökad uttransport av organiskt material, och därmed av metylkvicksilver bundet till detta⁹⁷.

Resultat från 10 hyggen och 10 kontroller med grandominerad skog i nordöstra Sverige visade att totalmängden (gram/hektar) metylkvicksilver i jord var ca 7 gånger högre på hyggen än på kontroller. Kvoten MeHg/DOC i avrinnande vatten var dubbelt så hög på hyggen jämfört med kontroller, i mer kuperat landskap över högsta kustlinjen. I det flackare landskapet nedanför högsta kustlinjen var kvoten MeHg/DOC däremot lika hög på hyggen som på kontroller. En möjlig förklaring till skillnaderna är sannolikt att andelen våtmarker är högre i det flackare landskapet nedanför högsta kustlinjen, vilket gör att effekten av avverkningen inte slår igenom lika tydligt där⁹⁸.

Jämförelser gjordes också av halter av metylkvicksilver i jord, % metylkvicksilver av totalt kvicksilver i jord, metyleringshastigheter, samt grundvattennivå och andra miljöparametrar längs ca 40 m långa transekter vinkelrätt mot avrinnande vattendrag. Resultaten visar var på hyggen som produktionen av metylkvicksilver är högst. Högst produktion av metylkvicksilver, och därmed högst halt av metylkvicksilver i jord och högst andel metylkvicksilver av totalt kvicksilver i jord, återfinns i lokala utströmningsområden ca 20 m från vattendraget. Detta är områden som före avverkning inte var vattenmättade, men som blivit det efter att hygget tagits upp. I den bäcknära zonen är effekten av avverkning på bildning av metylkvicksilver inte lika stor. De områden där vattenhalten är förhöjd på hygget jämfört med i skog sammanfaller med de områden där metyleringen är högst. Sannolikt finns i dessa tidigare mer väl-dränerade områden en god tillgång på energirik organiskt material som kan användas av metylerande bakterier som energikälla. Samtidigt skapas en syrefri miljö när hygget tas upp och marken vattenmättas. Detta är sannolikt de viktigaste förklaringarna till att man observerar högst metylering i just dessa områden⁹⁹.

⁹⁷ Skyllberg U., Björkman Westin M., Meili M., Björn E. 2009. Elevated concentrations of methyl mercury in streams after forest clear-cut: a consequence of mobilization or new methylation? *Environmental Science and Technology* 43:8535-8541.

⁹⁸ Kronberg R.-M., Drott A., Jiskra M., Wiederhold J.G., Björn E., Skyllberg U. 2016. Forest harvest contribution to boreal freshwater methyl mercury load. *Global Biogeochemical Cycles* 30:825-843.

⁹⁹ Kronberg R.-M., Jiskra M., Wiederhold J., Björn E., Skyllberg U. 2016. Methyl mercury formation in hillslope soils of boreal forests: the role of forest harvest and anaerobic microbes. *Environmental Science and Technology* 50: 9177-9186.

4.2 Effekter av körskador

Körskador kan bidra till ökad uttransport av metylkvicksilver och kvicksilver efter avverkning. Vissa körskador orsakar även ökad bildning av metylkvicksilver.

Markskador orsakade av skogsbruk (Figur 11) har visat sig kunna bidra både till ökad uttransport och bildning av metylkvicksilver. I de studier som rapporterats har markskador utgjorts dels av körskador^{100 101 102}, dels av vattenfyllda hål orsakade av stubbskörd. Vi återkommer senare till effekter av stubbskörd.



Figur 11. Körning på skogsmark kan leda till skador på marken i form av kompaktering, spårbildning och omblandning. Sådana skador kan leda till att bildning och läckage av metylkvicksilver ökar. Foto: Anja Lomander.

Skogsstyrelsen har tillsammans med skogsbruket identifierat ett antal typer av körskador, som kan uppstå vid körning i samband med skogsbruksåtgärder och som ses som extra problematiska ur miljösynpunkt. Detta är sådana skador som man är överens om att skogsbruket ska förhindra¹⁰³. De olika typer av körskador

¹⁰⁰ Munthe J., Hultberg H. 2004. Mercury and methylmercury in runoff from a forested catchment – concentrations, fluxes, and their response to manipulations. *Water, Air and Soil Pollution* 4: 607-618.

¹⁰¹ Braaten H.F.V., De Wit H.A. 2016. Effects of disturbance and vegetation type on total and methylmercury in boreal peatland and forest soils. *Environmental Pollution* 218:140-149.

¹⁰² Eklöf K., Bishop K., Bertilsson S., Björn E., Buck M., Skyllberg U., Osman O. A., Kronberg R-M., Garcia Bravo A. 2018. Formation of mercury methylation hotspots as a consequence of forestry operations. *Science of the Total Environment* 613614:1096-1078.

¹⁰³ Skogsstyrelsen 2016. Nya och reviderade målbilder för god miljöhänsyn vid skogsbruksåtgärder. Rapport 12:2016.

som man identifierat som allvarliga finns även preciserade i föreskrifter och allmänna råd till skogsvårdslagen¹⁰⁴.

Effekten av en körskada på kvicksilver skiljer sig åt beroende på vilken typ av körskada det rör sig om. Det finns idag inte studier av hur stora effekter alla olika typer av körskador kan medföra på olika ståndorter. Däremot finns resultat från några studier, som kan illustrera vilka effekter körskador kan medföra.

Vid körning i anslutning till ett långliggande barrskogsförsök i sydvästra Sverige, hade en skogsmaskin korsat ett mindre vattendrag, vilket orsakat spårbildning och dämning av vattendraget. Detta medförde ökad uttransport av metylkvicksilver. Under de första 3 åren motsvarade ökningen i årlig uttransport av metylkvicksilver 300 % (dvs en tredubbling) av uttransporten under åren före skadan¹⁰⁵. Effekten av markskadorna avtog delvis efter 3-4 år men en viss höjning av halterna metylkvicksilver i avrinningsvattnet kunde observeras åtminstone 6-7 år efter skadan, både som något ökande koncentrationer vid normalflöden och som enstaka toppar med kraftigt förhöjda halter under kortare tid¹⁰⁶.

I detta fall hade den körskada som uppstått sannolikt orsakat ökad metylering pga dämning av vattendraget, samt ökad uttransport av metylkvicksilver.

I ett mindre avrinningsområde i södra Norge gjordes mätningar av metylkvicksilver efter avverkning, i och utanför körspår. Resultaten visade att koncentrationen av metylkvicksilver i markens översta 5 cm var ca 10 gånger högre i körspår än utanför¹⁰⁷. I totalt åtta avrinningsområden från tre regioner i Sverige gjordes mätningar av metylkvicksilver efter avverkning, respektive efter avverkning och stubbskörd. Höga halter av metylkvicksilver observerades i håligheter efter stubbskörd, och i vattenfyllda körspår; dessa var så kallade ”hotspots” för bildning av metylkvicksilver¹⁰⁸.

De körskador som orsakar uttransport av slam (organiskt material) till vattendrag, försumpning invid eller dämning i vattendrag, som ändrar ett vattendrags sträckning, eller som skadar torvmark i anslutning till sjöar och vattendrag, kan förstärka effekten av en skogsavverkning vad gäller uttransport av metylkvicksilver. En ökad uttransport av organiskt material innebär även en ökad uttransport av metylkvicksilver och kvicksilver, pga den starka bindningen till organiskt material. Körning som orsakar uttransport av slam till diken, som ansluter till vattendrag nedströms, kan också medföra ökad uttransport av metylkvicksilver och kvicksilver.

Körskador som orsakar försumpning invid eller dämning i vattendrag, eller som ändrar ett vattendrags sträckning, kan medföra ökad metylering, eftersom nya syrefria miljöer skapas där tillgången på energirikt organiskt material är god och

¹⁰⁴ SKSFS 2011:7.

¹⁰⁵ Munthe J., Hultberg H. 2004. Mercury and methylmercury in runoff from a forested catchment – concentrations, fluxes, and their response to manipulations. *Water, Air and Soil Pollution* 4: 607-618.

¹⁰⁶ Munthe J., pers. komm. 2019-12-05.

¹⁰⁷ Braaten H.F.V., De Wit H.A. 2016. Effects of disturbance and vegetation type on total and methylmercury in boreal peatland and forest soils. *Environmental Pollution* 218:140-149.

¹⁰⁸ Eklöf K., Bishop K., Bertilsson S., Björn E., Buck M., Skyllberg U., Osman O. A., Kronberg R-M., Garcia Bravo A. 2018. Formation of mercury methylation hotspots as a consequence of forestry operations. *Science of the Total Environment* 613614:1096-1078.

temperaturen dagtid hög. Detta innebär gynnsamma betingelser för metylerande bakterier.

En annan risk som har lyfts fram är körspår som leder vatten från områden med hög metylering på hyggen, via ytavrinning direkt till vattendrag^{109 110}. Detta är alltså körspår som skapar snabba flödesvägar från områden med hög metylering direkt till vattendrag. Ofta är det körspår som uppstått i samband med korsande av vattendragen som kan utgöra en sådan risk.

4.3 Effekter av markberedning

Det vetenskapliga underlaget när det gäller effekter av markberedning på kvicksilver är förhållandevis begränsat. Resultaten visar att markberedning kan bidra till ökad uttransport av metylkvicksilver och kvicksilver efter avverkning.

Det finns tre studier där effekten av markberedning (Figur 12) på kvicksilver studerats. Ofta görs markberedning de första åren efter avverkning och mätperioden med effekt av endast avverkning blir därför kort, vilket gör det svårt att statistiskt separera effekten av markberedningen.



Figur 12. Markberedning kan bidra till att förstärka effekten av avverkningen på bildning och läckage av metylkvicksilver. Foto: Skogsstyrelsens bildarkiv.

I den första studien ingick två hyggen och en oavverkad kontroll i boreal skog i nordöstra Sverige. Samtliga områden följdes under perioden 2005-2011.

¹⁰⁹ Kronberg R-M., Jiskra M., Wiederhold J., Björn E., Skyllberg U. 2016. Methyl mercury formation in hillslope soils of boreal forests: the role of forest harvest and anaerobic microbes. *Environmental Science and Technology* 50: 9177-9186.

¹¹⁰ Eklöf K., Lidskog R., Bishop K. 2016. Managing Swedish forestry's impact on mercury in fish: Defining the impact and mitigation measures. *Ambio* 45:S163-S174.

Avverkning gjordes på vintern 2006 och markberedning med harv i maj 2008. I denna studie gjordes alltså mätningar under två år efter avverkning, innan markberedning genomfördes. Resultaten visade att avverkning ökat uttransporten av metylkvicksilver och kvicksilver med 20-70 %, men koncentrationen av metylkvicksilver i avrinnande vatten hade inte ökat. Efter avverkning och markberedning hade koncentrationen av metylkvicksilver i avrinnande vatten ökat med 30-50 % och uttransporten hade ökat med 35-80 %, jämfört med situationen före avverkning. Resultaten visar alltså att markberedningen förstärkt effekten av avverkning på metylkvicksilver och därmed ökat uttransporten. Alla skogsbruksåtgärder utfördes enligt god praxis vilket bland annat innebar att markberedning inte utfördes i skyddszoner mot vattendrag¹¹¹.

I den andra studien gjordes mätningar i vattendrag från 54 avrinningsområden i olika delar av Sverige, där avverkning, samt markberedning, stubbskörd, eller både markberedning och stubbskörd, genomförts. Mätningar gjordes 2009 och 2010, som längst tre år efter att markberedning eller stubbskörd genomförts. Resultaten visade inte på någon skillnad i halter av metylkvicksilver och kvicksilver i vattendrag mellan markberedning och stubbskörd. Författarnas slutsats var att effekten av markberedning var i samma storleksordning som effekten av stubbskörd¹¹².

I den tredje studien gjordes mätningar av metylkvicksilver och kvicksilver i vattendrag i tre avrinningsområden i Mellansverige. Mätningar gjordes under ett år (2007) efter avverkning men före markberedning (eller stubbskörd), samt två år (2008-2009) efter markberedning (eller stubbskörd). Resultaten visade inte på någon signifikant skillnad mellan avverkat område, och avverkat och markberett område. Slutsatsen var att avverkningen i sig utgjort den största påverkan på kvicksilvret i denna studie¹¹³.

Sammantaget visar resultaten från dessa studier att markberedning kan förstärka effekten av avverkning på metylkvicksilver. Orsaken kan bland annat vara att den omblandning som en markberedning medför bidrar till ökad metylering. Markberedning leder även till ökad uttransport av organiskt material, och därmed av metylkvicksilver bundet till detta.

4.4 Betydelsen av att lämna kantzoner mot vattendrag

I praktiskt skogsbruk har kantzoner en viktig betydelse som markörer i terrängen för bland annat körning, markberedning och stubbskörd.

Det vetenskapliga underlaget när det gäller effekter av själva kantzonen på kvicksilver är dock begränsat.

¹¹¹ Eklöf K., Schelker J., Sörensen R., Meili M., Laudon H., von Brömssen C., Bishop K. 2014. Impact of forestry on total and methyl-mercury in surface waters: distinguishing effects of logging and site preparation. *Environmental Science and Technology* 48:4690-4698.

¹¹² Eklöf K., Kraus A., Weyhenmeyer G. A., Meili M., 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: 1308-1320.

¹¹³ Eklöf K., Meili M., Åkerblom S., von Brömssen C., Bishop K. 2013. Impact of stump harvest on run-off concentrations of total mercury and methylmercury. *Forest Ecology and Management* 290:83-94.

Vid avverkning som gränsar mot vattendrag ska normalt sett en trädbevuxen kantzon lämnas närmast vattnet, i enlighet med föreskrifter och allmänna råd till skogsvårdslagen¹¹⁴ och sektorsgemensamma målbilder för god miljöhänsyn¹¹⁵. Bredden på kantzonen varierar beroende på vad som finns längs vattendraget. Bredare kantzoner lämnas bland annat där det finns utströmningsområden för vatten.

Det finns två studier av avverkning och kvicksilver^{116 117} som inkluderat avverkade områden både med och utan kantzoner. Det rör sig dock om så få områden att det är svårt att dra någon säker slutsats om kantzonens effekt. Det vetenskapliga underlaget för att påvisa den kvantitativa effekten av kantzoner längs vattendrag för kvicksilver, är alltså begränsat.

En lämnad kantzon kan bidra till längre flödesväg för det vatten som rinner från områden på hygget med hög metylering till vattendraget, vilket kan minska den hydrologiska kopplingen mellan områden med hög metylering och vattendrag. Organiskt material, metylkvicksilver och kvicksilver kan även fastläggas längs avrinningsvägen. Dessutom kan en viss demetylering ske innan vattnet når vattendraget¹¹⁸. Det bör alltså finnas effekter av att lämna kantzoner som kan bidra till minskad uttransport av metylkvicksilver och kvicksilver. Det finns inga resultat som indikerar att kantzoner skulle bidra till ökad bildning av metylkvicksilver eller ökad uttransport av metylkvicksilver och kvicksilver.

I praktiskt skogsbruk har kantzoner betydelse som markörer i terrängen för körning, markberedning och stubbskörd, åtgärder som i sin tur påverkar bildning av metylkvicksilver, och uttransport av metylkvicksilver och kvicksilver.

4.5 Påverkan vid dikesrensning och hänsynsåtgärder vid rensning

När diken rensas medför detta ökad uttransport av organiskt material och med detta följer metylkvicksilver och kvicksilver. Studier saknas av vilka effekter slamgropar, sedimentationsbassänger och översilningsområden har på kvicksilver.

Rensning av diken medför ökad slamtransport i samband med åtgärden. Om diken har förbindelse med nedströms liggande vattendrag kommer slamtransporten till dessa att öka. Det slam som transporteras är en blandning av organiskt material och mineralpartiklar. Både metylkvicksilver och kvicksilver binder starkt till organiskt material vilket gör att en ökad transport av organiskt material även medför en ökad transport av metylkvicksilver och kvicksilver (Figur 13).

¹¹⁴ SKSFS 2011:7.

¹¹⁵ Skogsstyrelsen m fl 2014. Målbilder för god miljöhänsyn. Hänsyn till vatten.

¹¹⁶ Eklöf K., Schelker J., Sörensen R., Meili M., Laudon H., von Brömssen C., Bishop K. 2014. Impact of forestry on total and methyl-mercury in surface waters: distinguishing effects of logging and site preparation. *Environmental Science and Technology* 48:4690-4698.

¹¹⁷ Eckley C.S., Eagles-Smith C., Tate M.T., Kowalski B., Danehy R., Johnson S.L., Krabbenhoft D.P. 2018. Stream mercury export in response to contemporary timber harvesting methods (Pacific coastal mountains, Oregon, USA). *Environmental Science and Technology* 52:1971-1980.

¹¹⁸ Eklöf K., Lidskog R., Bishop K. 2016. Managing Swedish forestry's impact on mercury in fish: Defining the impact and mitigation measures. *Ambio* 45:S163-S174.

Endast en studie av dikesrensningens effekt på kvicksilver har rapporterats. Resultat från en lokal i norra och en i södra Sverige, visade på kraftigt ökad uttransport av metylkvicksilver och kvicksilver efter dikesrensning på den sydliga lokalen, men oförändrad transport på den nordliga. Trots att den ökade uttransporten på den sydliga lokalen klingade av efter några dagar, bidrog den till ca 15 % av den årliga uttransporten från diket, för både metylkvicksilver och kvicksilver¹¹⁹. Resultatet visar att om en ökad uttransport av organiskt material sker i samband med rensning, kan detta medföra betydligt ökad uttransport av kvicksilver.



Figur 13. Dikesrensning medför ökad transport av slam som bland annat innehåller organiskt material. Eftersom metylkvicksilver och kvicksilver binder starkt till organiskt material, medför dikesrensning även en ökad transport av dessa ämnen. Foto: Anja Lomander.

För att minska slamtransport vid dikesrensning och fånga upp det slam som bildats bör rensning göras vid lågvatten och under torra perioder på året. Dessutom rekommenderas olika former av hänsynsåtgärder, tex slamgropar, sedimentationsbassänger och översilningsområden^{120 121} (Figur 14). Att fånga upp bildat slam är mer eller mindre svårt beroende på markens textur. Ett grovkornigt material med stora partiklar fångas upp relativt lätt (partiklarna sedimenterar snabbt) medan ett finkornigt material (till exempel en höghumifierad torv) kan transporteras mycket långt innan det sedimenterar (och vissa molekyler sedimenterar inte alls). För ett finkornigt material kommer också slamtransporten efter en rensning att hålla i sig betydligt längre än för ett grovkornigt¹²².

¹¹⁹ Hansen K., Kronnäs V., Zetterberg T., Setterberg M., Moldan F., Pettersson P., Munthe J. 2013. DiVa – Dikesrensningens effekter på vattenföring, vattenkemi och bottenfauna i skogsekosystem. IVL rapport B2017.

¹²⁰ Joensuu, S., Ahti, E., Vuollekoski, M. 1999. The effects of peatland forest ditch maintenance on suspended solids in runoff. *Boreal Environment Research* 4:343–355.

¹²¹ SKSFS 2011:7.

¹²² Joensuu, S., Ahti, E., Vuollekoski, M. 1999. The effects of peatland forest ditch maintenance on suspended solids in runoff. *Boreal Environment Research* 4:343–355.



Figur 14. Det saknas studier av vilka effekter sedimentationsbassänger, slamgropar och översilningsområden har på kvicksilver. Foto: Anja Lomander.

Det saknas idag studier av vilka effekter slamgropar, sedimentationsbassänger och översilningsområden har på kvicksilver. Om dessa åtgärder minskar uttransporten av organiskt material kommer de även att minska uttransporten av metylkvicksilver och kvicksilver. Samtidigt finns en risk att hänsynsåtgärderna i sig kan leda till ökad metylering, framför allt om nya vattenmättade miljöer bildas, där tillgången på energirikt organiskt material är god. Det finns också frågetecken kring långsiktigheten i hänsynsåtgärderna. Exempelvis finns det risk att det slam som fångats upp i slamgropar och sedimentationsbassänger frigörs i samband med högflöden ¹²³.

Ett problem som har lyfts fram i tidigare sammanställningar om effekter av skogsbruk på kvicksilver är att diken bidrar till att ansluta områden med hög metylering till sjöar och vattendrag och på så sätt öka på uttransporten av

¹²³ 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., Sörensen R., Zetterberg T., Åkerblom S. 2009. The effects of forestry on Hg bioaccumulation in Nemoral/Boreal waters and recommendation for good silvicultural practice. *Ambio* 38: 373-380.

metylkvikksilver. Om sådana diken rensas under hyggesfasen kommer uttransporten av metylkvicksilver att öka ytterligare. En motsvarande risk finns med skydds diken som dras genom miljöer med hög metylering och direkt mot vattendrag ¹²⁴. För att minska sådana effekter är det en fördel om dikesrensning kan utföras i gallringsskog i stället för under hyggesfasen.

4.6 Effekter av stubbskörd

Jämfört med konventionell föryngringsavverkning medför stubbskörd en ökad bildning av metylkvicksilver, som kan hålla i sig upp till 20-30 år. Stubbskörd medför dock inte alltid ökad uttransport av metylkvicksilver och kvicksilver, jämfört med konventionell avverkning.

Stubbskörd resulterar i en större störning av markstrukturen jämfört med skörd av endast stamved (Figur 15). Stubbskörd innebär dessutom ökad körning. När markstrukturen störs kan detta leda till ökad uttransport av organiskt material och därmed ökad uttransport av metylkvicksilver och kvicksilver. Den markkompaktering och omblandning av organiskt material som också kan bli följden, kan även leda till ökad metylering. Ett antal studier av effekten av stubbskörd på bildning och uttransport av metylkvicksilver har rapporterats.



Figur 15. Stubbskörd leder till ökad bildning av metylkvicksilver, jämfört med konventionell föryngringsavverkning. Foto: Anja Lomander.

¹²⁴ Kronberg R-M., Jiskra M., Wiederhold J., Björn E., Skyllberg U. 2016. Methyl mercury formation in hillslope soils of boreal forests: the role of forest harvest and anaerobic microbes. *Environmental Science and Technology* 50: 9177-9186.

Resultat från 54 avrinningsområden i olika delar av Sverige visade att stubbskörd gav en effekt på koncentrationer av metylkvicksilver och kvicksilver, som var i samma storleksordning som effekten av markberedning. Avrinningsområdena provtogs vid 2 tillfällen, 2009-2010¹²⁵.

Resultat från tre avrinningsområden i Mellansverige visade inte på någon skillnad i koncentrationer av metylkvicksilver och kvicksilver i avrinnande vatten mellan avverkat område, avverkat och markberett område, samt avverkat och stubbskördat område. Slutsatsen var att avverkningen i sig utgjort den största påverkan på kvicksilvret och att framför allt organiskt material är en viktig faktor för att förklara hur stor uttransporten av kvicksilver blir¹²⁶.

Resultat från mätningar av ytligt grundvatten längs bäckar på 18 stubbskördade och 22 konventionellt avverkade ytor i norra Uppland, 20-30 år efter avverkning eller stubbskörd, visade att koncentrationen av metylkvicksilver, samt kvoten metylkvicksilver/organiskt material i grundvattnet, var högre på stubbskördade än på konventionellt avverkade områden. Man observerade ingen skillnad i generell vattenkemi i bäckar, eller i metylkvicksilverhalt i bäckarnas bottensediment mellan stubbskörd och konventionell avverkning¹²⁷. Resultaten indikerar att stubbskörd kan ha effekter på bildning av metylkvicksilver, vilket kan påverka halter i grundvatten även lång tid efter åtgärden.

I åtta avrinningsområden som antingen avverkats, avverkats och stubbskördats eller lämnats oavverkade, studerades åtgärdernas påverkan på bildning av metylkvicksilver. Resultaten visade att störst förekomst av miljöer med hög bildning av metylkvicksilver fanns i vattenfyllda hål, som orsakats antingen av stubbskörd eller av körning. I dessa miljöer återfanns både de högsta halterna av metylkvicksilver och den högsta förekomsten av bakterier som metylerar kvicksilver¹²⁸. Resultaten visar alltså att stubbskörd kan skapa miljöer där mycket metylkvicksilver bildas. Trots detta har flera av studierna inte visat på någon ökning av halten metylkvicksilver i avrinnande vatten jämfört med områden som avverkats men där inte någon stubbskörd bedrivits. En orsak till detta kan vara att de markskador som stubbskörden gett upphov till har varit relativt hydrologiskt isolerade från vattendragen i dessa studier.

¹²⁵ Eklöf K., Kraus A., Weyhenmeyer G. A., Meili M., 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: 1308-1320.

¹²⁶ Eklöf K., Meili M., Åkerblom S., von Brömssen C., Bishop K. 2013. Impact of stump harvest on run-off concentrations of total mercury and methylmercury. *Forest Ecology and Management* 290:83-94.

¹²⁷ Magnusson T.P.T., 2017. Long-term effects of stump harvest on mercury and general chemistry in discharge water. *Scandinavian Journal of Forest Research* 32:230-238.

¹²⁸ Eklöf K., Bishop K., Bertilsson S., Björn E., Buck M., Skyllberg U., Osman O. A., Kronberg R-M., Garcia Bravo A. 2018. Formation of mercury methylation hotspots as a consequence of forestry operations. *Science of the Total Environment* 613614:1096-1078.

5 Effekter av våtmarksrestaurering

Dämning som resulterar i att en stor areal med tidigare fastmark vattenmättas, har visat sig leda till kraftigt ökad bildning av metylkvicksilver. Dämning som resulterar i fluktuerande grundvattenyta leder också till ökad bildning av metylkvicksilver.

Restaurering av våtmarker, där höjningen av grundvattenytan är mindre än 0,5 m och där endast areal som tidigare varit våtmark vattenmättas, har i de studier som gjorts inte resulterat i ökad bildning av metylkvicksilver.

Vilken effekt återskapande av en våtmark (Figur 16) får på bildning och uttransport av metylkvicksilver beror på vilken typ av våtmark som återskapas, hur mycket grundvattenytan höjs och hur stort område med fastmark som påverkas. Den enda svenska studie som gjorts av effekter av våtmarksrestaurering på produktion av metylkvicksilver omfattar åtta boreala våtmarker i Sverige, som studerats under åren 2007–2010¹²⁹.



Figur 16. Restaurering av våtmarker som innebär att områden med tidigare fastmark vattenmättas, kan leda till kraftigt ökad bildning av metylkvicksilver. Om höjningen i grundvattenyta är mindre än 0,5 m och bara sådana områden som tidigare varit våtmark vattenmättas, förväntas dock inte någon ökad bildning av metylkvicksilver. Foto: Anja Lomander.

¹²⁹ Tjerngren I., Meili M., Björn E., 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 and Technology* 46:8052-8060.

Två av våtmarkerna hade redan i samband med studiens början restaurerats genom dämning, vilket höjt grundvattenytan med ca 1 m (våtmarkerna var 3-6 ha stora efter restaurering). Produktionen av metylkvicksilver i dessa våtmarker var högst år 1 och 2 av studien, för att sedan sjunka¹³⁰. Liknande mönster över tiden har observerats efter dämning i Ontario, Canada (ca 15 ha stora områden med våtmark och 0,5-1 ha stora områden med tidigare fastmark skapades och grundvattenytan höjdes med mer än 1 m). Produktionen av metylkvicksilver ökade där kraftigt under de första åren efter dämning, för att därefter sjunka. Mängden och kvaliteten av organiskt material var den viktigaste faktorn för hur stor produktionen av metylkvicksilver blev efter dämning. Vid ett högre innehåll av organiskt material i den mark som dämades ökade produktionen av metylkvicksilver mer efter dämning. Ökningen uttryckt per kolatom organiskt material var betydligt högre när områden med tidigare fastmark dämades, än när områden med tidigare torvmark dämades. Detta visar att mer lättnedbrytbart, energirik organiskt material, som i fastmarkerna, är en bättre energikälla för metylerande bakterier^{131 132}.

I den svenska studien dämades och dränerades en av våtmarkerna (8,5 ha stor efter restaurering) i 6-månaders-cykler under 2008-2010, dvs 6 månader dämning, följts av 6 månader där dämet togs bort. Detta ledde till fluktuation i grundvattenytans läge på ca 1 m över året. Produktionen av metylkvicksilver i denna våtmark ökade med 600-800 % under 2008-2010, jämfört med 2007. Samtidigt ökade uttransporten av sulfat i motsvarande storleksordning. Detta resultat styrker tidigare studier, som visat att kontinuerliga cykler av oxidation-reduktion av svavel ökar aktiviteten hos sulfatreducerande bakterier, som metylerar kvicksilver. Orsaken är sannolikt att detta ger kontinuerligt god tillgång på sulfat¹³³.

Resterande fyra våtmarker i studien dämades 2008-2010, så att grundvattenytan steg med mindre än 0,5 m och endast den del av våtmarken som tidigare varit våtmark blev vattenmättad (dessa våtmarker var 2-26 ha stora efter restaurering). Här visade resultaten inte på någon betydande ökning av produktionen av metylkvicksilver efter restaurering. Den normala variationen mellan olika år var större än effekten av restaurering.

Resultatet styrker betydelsen av organiskt material för hur stor effekten på metylkvicksilver blir. På fastmark finns en större tillgång till energirik organiskt material för metylerande bakterier, jämfört med i en våtmark. Detta gör att när en fastmark vattenmättas och syrefria förhållanden skapas där blir metyleringen hög.

¹³⁰ Tjerngren I., Meili M., Björn E., Skjällberg 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 and Technology* 46:8052-8060.

¹³¹ St Louis V. L., Rudd J. W. M., Kelly C. A., Bodaly R. A., Paterson M. J., Beaty K. G., Hesslein R. H., Heyes A., Majewski A. R. 2004. The rise and fall of mercury methylation in an experimental reservoir. *Environmental Science and Technology* 38: 1348-1358.

¹³² Hall B. D., St Louis V. L., Rolfhus K. R., Bodaly R. A., Beaty K. G., Paterson M. J., Cherewyk K. A. 2005. Impacts of reservoir creation on the biogeochemical cycling of methyl mercury and total mercury in boreal upland forests. *Ecosystems* 8: 248-266.

¹³³ Tjerngren I., Meili M., Björn E., Skjällberg 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 and Technology* 46:8052-8060.

Om däremot endast areal som tidigare varit våtmark vattenmättas, blir effekten liten¹³⁴.

När nya permanenta vattenspeglar skapas vid restaurering, kommer nedbrytning av metylkvicksilver med hjälp av solljus att ske i vattenmassan, vilket också har betydelse för effekten av restaureringen på metylkvicksilver. Hastigheten på denna typ av nedbrytning av metylkvicksilver är högre i vatten med lägre halt av organiskt material, där solljuset når ner bättre¹³⁵.

¹³⁴ Tjerngren I., Meili M., Björn E., 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 and Technology* 46:8052-8060.

¹³⁵ Fernández-Gómez C., Drott A., Björn E., Díez S., Bayona J.M., Tesfalidet S., Lindfors A., Skyllberg U. 2013. Towards universal wavelength-specific photodegradation rate constants for methyl mercury in humic waters, exemplified by a boreal lake-wetland gradient. *Environmental Science and Technology* 47:6279-6287.

6 Beräkningar av effekten av skogsbruk jämfört med andra källor i landskapet

Beräkningar visar att av det metylkvicksilver som transporteras från landmiljön till sjöar och vattendrag kommer ungefär 60 % från skogsmark och 40 % från våtmarker.

Beräkningarna visar också att föryngringsavverkning med dagens intensitet har gjort att uttransporten av metylkvicksilver från skogsmark till sjöar och vattendrag ökat med 6-30 %, jämfört med om inga avverkningar hade gjorts.

Skogsbrukets bidrag till metylkvicksilverbelastningen i sjöar och vattendrag har beräknats i två olika studier.

Bishop m fl (2009)¹³⁶ gjorde en schematisk beräkning av metylkvicksilverbelastning från skogsmark. I beräkningen antogs att 1 % av skogsmarken föryngringsavverkades varje år och att effekten av en avverkning fanns kvar upp till 10 år efter åtgärden, dvs 10 % av landskapet var påverkat av en avverknings effekt vid varje givet tillfälle. Uttransporten av metylkvicksilver antogs öka 2-4 ggr efter avverkning, jämfört med i oavverkad skog (antagandena baserades på de studier som gjorts fram till 2009, se Tabell 1). Uttransporten från skog där mer än 10 år gått sedan avverkning gavs ett värde av 1. Eftersom 90 % av skogen inte var påverkad av avverkning var uttransporten därifrån $0,9 * 1 = 0,9$. Uttransporten från de 10 % av skogen som vid varje givet tillfälle var påverkade av avverkning var antingen $0,1 * 2 = 0,2$ (uttransporten ökar med en faktor 2) eller $0,1 * 4 = 0,4$ (uttransporten ökar med en faktor 4). Total uttransport från hela skogslandskapet blev då $0,9 + 0,2 = 1,1$, eller $0,9 + 0,4 = 1,3$. Jämfört med ett landskap utan avverkning, där det totala värdet var 1, beräknades alltså uttransporten av metylkvicksilver ha ökat med en faktor 0,1-0,3, eller 10-30 %¹³⁷.

Kronberg m fl (2016)¹³⁸ gjorde beräkningar av metylkvicksilverbelastning från skogsmark och våtmarker i Sverige. Beräkningarna byggde på data från 20 hyggen och 20 oavverkade referenser som de studerat, samt på arealdata från Riksskogstaxeringen och Våtmarksinventeringen. För våtmarker användes även

¹³⁶ 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., Sörensen R., Zetterberg T., Åkerblom S. 2009. The effects of forestry on Hg bioaccumulation in Nemoral/Boreal waters and recommendation for good silvicultural practice. *Ambio* 38: 373-380.

¹³⁷ 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., Sörensen R., Zetterberg T., Åkerblom S. 2009. The effects of forestry on Hg bioaccumulation in Nemoral/Boreal waters and recommendation for good silvicultural practice. *Ambio* 38: 373-380.

¹³⁸ Kronberg R.-M., Drott A., Jiskra M., Wiederhold J.G., Björn E., Skyllberg U. 2016. Forest harvest contribution to boreal freshwater methyl mercury load. *Global Biogeochemical Cycles* 30:825-843.

data från Tjerngren m fl 2012¹³⁹. I Kronberg m fl:s beräkning ingick dels effekten av en ökad metylering på hyggen, dels effekten av ökad uttransport av organiskt material från hyggen. En känslighetsanalys gjordes, där uttransport av organiskt material efter avverkning, i enlighet med tidigare studier antogs öka med 50 eller 100 %, och där effekten av en avverkning antogs hålla i sig i 5 eller 10 år. Därför redovisades resultatet som ett intervall. Beräkningen visade att uttransport av metylkvicksilver från skogsmark till sjöar och vattendrag ökat med 6-20 % på grund av avverkning.

Baserat på beräkningarna från Bishop m fl och Kronberg m fl har alltså föryngringsavverkning med dagens intensitet gjort att uttransporten av metylkvicksilver från skogsmark till sjöar och vattendrag ökat med 6-30 %.

Kronberg m fl beräknade även hur mycket av det metylkvicksilver som transporteras från landmiljön till sjöar och vattendrag som kommer från skogsmark och hur mycket som kommer från våtmarker. Dessa beräkningar visade att ungefär 60 % av det metylkvicksilvret som transporteras till sjöar och vattendrag kommer från skogsmark, och ungefär 40 % kommer från våtmarker¹⁴⁰.

Båda beräkningarna (Bishop m fl, 2009; Kronberg m fl 2016) visar att föryngringsavverkning av skog är en faktor som har betydelse för hur mycket metylkvicksilver som transporteras från skogsmark till sjöar och vattendrag. Det finns alltså möjlighet att minska kvicksilverbelastningen i sjöar och vattendrag genom ett anpassat skogsbruk. Resultaten varierar en del mellan studier (Tabell 1) och beräkningar av den här typen bör ses som ett genomsnitt¹⁴¹.

Beräkningarna tar inte hänsyn till intern produktion och nedbrytning av metylkvicksilver i sjöar och vattendrag. De tar inte heller hänsyn till att vattenlevande organismer har olika upptag av metylkvicksilver beroende på om det transporterats från land eller bildats i sjön eller vattendraget.

¹³⁹ Tjerngren I., Meili M., Björn E., 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 and Technology* 46:8052-8060.

¹⁴⁰ Kronberg R.-M., Drott A., Jiskra M., Wiederhold J.G., Björn E., Skyllberg U. 2016. Forest harvest contribution to boreal freshwater methyl mercury load. *Global Biogeochemical Cycles* 30:825-843.

¹⁴¹ Eklöf K., Lidskog R., Bishop K. 2016. Managing Swedish forestry's impact on mercury in fish: Defining the impact and mitigation measures. *Ambio* 45:S163-S174.

7 Rekommendationer för skogsbruk med syfte att minska halter av kvicksilver i fisk

Det finns idag ett antal rekommendationer för hur skogsbruk bör anpassas för att minska bildning av metylkviksilver och uttransport av metylkviksilver och kvicksilver till sjöar och vattendrag. En del av rekommendationerna ingår i föreskrifter och allmänna råd till skogsvårdslagen, eller i de målbilder för god miljöhänsyn som tagits fram av Skogsstyrelsen och skogsbruket gemensamt. Andra finns nämnda i tidigare kunskapssammanställningar om skogsbruk och kvicksilver.

Nedan har vi samlat de rekommendationer som vi bedömer har stöd i aktuell forskning. Vi förklarar också kortfattat vilka effekter rekommendationerna har. Vi har också tagit med ett par generella rekommendationer ur vattenvårdssynpunkt som ofta nämns men som ännu inte studerats avseende kvicksilver.

Rekommendationer som har stöd i aktuell forskning:

- Motverka höjning av grundvattenytan vid föryngringsavverkning, genom att inte skapa större sammanhängande avverkade områden, eller genom att lämna en högskärm med träd vid avverkning. Detta är särskilt viktigt i miljöer där avverkning resulterar i att en stor areal med nya utströmningsområden bildas. Vid avverkning i slutningar bildas till exempel ofta nya utströmningsområden i nedre delen av slutningen.

Om större sammanhängande avverkade områden skapas, gör detta att grundvattenytan i marken stiger mer än om de avverkade områdena är mindre. Detta gör att grundvattnet i högre utsträckning kommer att befinna sig i markhorisonter som domineras av organiskt material, vilket bidrar till ökad uttransport av organiskt material och med detta metylkviksilver och kvicksilver. Avrinningsvägarna från områden med hög metylering till vattendrag, blir också kortare när grundvattenytan stiger. Högre stående grundvattenyta gör att marken mätas med vatten, vilket skapar en syrefri miljö där metylkviksilver kan bildas. Dessutom bidrar högre stående grundvattenyta till att risken för körskador ökar.

- Förhindra körskador. Undvik körning nära sjöar och vattendrag, i blöta områden och i utströmningsområden. Förlägg avverkning till de tider på året då marken är frusen.

Effekten av en körskada skiljer sig åt beroende på vilken typ av körskada det rör sig om. De körskador som orsakar uttransport av slam (organiskt material) till vattendrag, försumpning invid eller dämning i vattendrag, som ändrar ett vattendrags sträckning, eller som skadar torvmark i anslutning till sjöar och vattendrag, kan alla förstärka effekten av en skogsavverkning vad gäller uttransport av metylkviksilver och kvicksilver. Körskador som orsakar försumpning invid eller dämning i vattendrag, eller som ändrar ett vattendrags sträckning, kan även medföra ökad bildning av metylkviksilver.

- Planera körning så att vattendrag korsas så få gånger som möjligt.

Körspår som leder vatten direkt från områden med hög metylering till vattendrag kommer att bidra till en hög uttransport av metylkvicksilver. Sådana körspår riskerar att bildas vid korsande av vattendrag.

- Lämna ekologiskt funktionella kantzoner med träd och buskar längs sjöar och vattendrag. Anpassa kantzonernas bredd efter förekomst av utströmningsområden och hänsynskrävande biotoper.

En lämnad kantzon med träd och buskar är en markör i terrängen inom vilken körning, markberedning och stubbskörd inte bör ske. Kantzonen kan förlänga vattnets uppehållstid innan det når vattendraget. Organiskt material och kvicksilver kan fastläggas längs vägen. Dessutom kan en viss nedbrytning av metylkvicksilver ske.

- Markbered inte i kantzoner. Markberedning ska inte leda till ökad slamtransport till sjöar och vattendrag.

Markberedning kan göra att uttransport av organiskt material, metylkvicksilver och kvicksilver ökar. Denna effekt blir mindre om markberedning inte utförs nära vatten.

- Utför inte stubbskörd i kantzoner, på blöt eller fuktig mark, eller vid kraftig marklutning. Undvik stubbskörd på finkorniga jordar.

Stubbskörd kan göra att uttransport av organiskt material, metylkvicksilver och kvicksilver ökar. Dessutom bildas vattenfyllda hål där bildning av metylkvicksilver är dokumenterat hög. Effekterna bedöms bli mindre om stubbskörd inte utförs nära vatten, på blöt eller fuktig mark, vid kraftig lutning eller på finkorniga jordar.

- Gräv inte skydds diken och rensa inte diken som leder vatten från områden med hög metylering direkt till vattendrag.

Lokala utströmningsområden på hyggen är områden där bildning av metylkvicksilver är dokumenterat hög. Diken som leder vatten direkt från sådana områden till vattendrag kommer att bidra till en hög uttransport av metylkvicksilver.

- Utför dikesrensning vid torra årstider och lågt vattenstånd. Rensa diken i gallringsskog i stället för under hyggesfasen.

Rensning vid torra årstider och lågt vattenstånd minskar uttransporten av organiskt material och med detta metylkvicksilver och kvicksilver. Dikesrensning i gallringsskog minskar risken för att rensningen ska leda vatten direkt från områden med hög metylering till vattendrag.

- Bibehåll och återskapa zoner med klibbalkärr i anslutning till ytvatten.

Klibbalkärr är miljöer där nedbrytning av metylkvicksilver är dokumenterat hög. Klibbalkärr i anslutning till sjöar och vattendrag kan bryta ned metylkvicksilver som transporterats dit från uppströms liggande källor.

Generella rekommendationer ur vattenvårdssynpunkt som ofta nämns men som ännu inte studerats avseende kvicksilver:

- Anlägg slamgropar, sedimentationsdammar och översilningsområden för att förhindra skadlig slamtransport från diken till sjöar och vattendrag.

Slamgropar, sedimentationsbassänger och översilningsområden kan ha positiva effekter på vattenkvalitet genom att skadlig slamtransport förhindras. Detta kan minska uttransport av metylkvicksilver och kvicksilver. Det finns samtidigt en risk att man skapar miljöer där bildning av metylkvicksilver gynnas, pga att man får vattenmättad jord i kombination med god tillgång på energirikt organiskt material. Det saknas forskning på effekten av dessa åtgärder på kvicksilver.

- Avsluta skydds diken och rensning av diken innan de når sjöar och vattendrag.

Dikesrensning och skydds dikning leder till ökad transport av organiskt material, metylkvicksilver och kvicksilver till sjöar och vattendrag i samband med att åtgärderna utförs. Effekten blir mindre om diken avslutas innan de når sjöar och vattendrag. Samtidigt kan det finnas en risk att man skapar miljöer där metylkvicksilver kan bildas, i de områden där vattnet får översila. Det saknas forskning på effekten av detta på kvicksilver.

8 Kvarvarande kunskapsluckor

Nedan har vi listat ett antal kvarvarande kunskapsluckor. Vi har begränsat oss till sådana kunskapsluckor som vi anser är viktiga för att förstå effekter av skogsbruk på kvicksilver i landskapet. Vi har alltså inte tagit med kunskapsluckor inom andra områden av kvicksilverforskningen, till exempel mer grundläggande kunskap om metyleringsprocesser.

- Fler studier av bildning och uttransport av metylkvicksilver i olika typer av våtmarker behövs för att ytterligare klargöra bilden av vilka våtmarker som är källor och vilka som är sänkor för metylkvicksilver. Fler studier krävs också av effekter av restaurering av olika typer av våtmarker.
- Studier av kvicksilverbalans inklusive nedfall och avgång som gas, krävs från fler våtmarker för att utröna om kvicksilver generellt förloras från våtmarker genom gasavgång. Hittills finns endast en studie som pekar på detta.
- Fler studier krävs av effekter av markberedning, körning, kantzoner och dikningsåtgärder på bildning och uttransport av metylkvicksilver. Idag finns ett fåtal studier och för att göra bilden mer klar av hur stora effekterna är och hur de kan motverkas, krävs ytterligare forskning.
- Det behövs kunskap om vilka effekter slamgropar, sedimentationsdammar och översilningsområden som anläggs i dikessystem, har på kvicksilver. Sådan kunskap saknas helt idag.
- Ytterligare kunskap behövs om hur många år efter en avverkning som effekter på kvicksilver, främst metylkvicksilver, är märkbara i vatten och organismer. Mer kunskap behövs också om hur långt nedströms effekterna sträcker sig. De flesta studier om skogsbruk och kvicksilver har gjorts i källvattendrag, och kunskapen om hur denna störning kan påverka fisken i nedströms liggande vattensystem är bristfällig.
- Det behövs mer kunskap om hur näringsvävar i sjöar och vattendrag påverkas av avverkning och hur detta i sin tur påverkar biomagnifikation av kvicksilver.
- Det behövs bättre kunskap om hur hyggesfria metoder påverkar kvicksilvers omvandling och transport.

AV SKOGSSTYRELSEN PUBLICERADE RAPPORTER:

- 2012:1 Kommunikationsstrategi för Renbruksplan
- 2012:2 Förstudierapport, dialog och samverkan mellan skogsbruk och rennäring
- 2012:3 Hänsyn till kulturmiljöer – resultat från P3 2008–2011
- 2012:4 Kalibrering för samsyn över myndighetsgränserna avseende olika former av dikningsåtgärder i skogsmark
- 2012:5 Skogsbrukets frivilliga avsättningar
- 2012:6 Långsiktiga effekter på vattenkemi, öringsbestånd och bottenfauna efter ask- och kalkbehandling i hela avrinningsområdena i brukad skogsmark – utvärdering 13 år efter åtgärder mot försurning
- 2012:7 Nationella skogliga produktionsmål – Uppföljning av 2005 års sektorsmål
- 2012:8 Kommunikationsstrategi för Renbruksplan – Är det en fungerande modell för samebyarna vid samråd?
- 2012:9 Ökade risker för skador på skog och åtgärder för att minska riskerna
- 2012:10 Hänsynsuppföljning – grunder
- 2012:11 Virkesproduktion och inväxning i skiktad skog efter höggallring
- 2012:12 Tillståndet för skogsgenetiska resurser i Sverige. Rapport till FAO
- 2013:1 Återväxtstöd efter stormen Gudrun
- 2013:2 Förändringar i återväxtkvalitet, val av förnygring-smetoder och trädslagsanvändning mellan 1999 och 2012
- 2013:3 Hänsyn till forn- och kulturlämningar – Resultat från Kulturpolytaxen 2012
- 2013:4 Hänsynsuppföljning – underlag inför detaljerad kravspecifikation, En dellerans från Dialog om miljöhänsyn
- 2013:5 Målbilder för god miljöhänsyn – En dellerans från Dialog om miljöhänsyn
- 2014:1 Effekter av kvävegödsling på skogsmark – Kunskapssammanställning utförd av SLU på begäran av Skogsstyrelsen
- 2014:2 Renbruksplan – från tanke till verklighet
- 2014:3 Användning och betydelsen av RenGIS i samrådsprocessen med andra markanvändare
- 2014:4 Hänsynen till forn- och kulturlämningar – Resultat från Hänsynsuppföljning Kulturmiljöer 2013
- 2014:5 Förstudie – systemtillsyn och systemdialog
- 2014:6 Renbruksplankoncept – ett redskap för samhällsplanering
- 2014:7 Förstudie – Artskydd i skogen – Slutrapport
- 2015:1 Miljöövervakning på Obsytorna 1984–2013 – Beskrivning, resultat, utvärdering och framtid
- 2015:2 Skogsmarksgödsling med kväve – Kunskapssammanställning inför Skogsstyrelsens översyn av föreskrifter och allmänna råd om kvävegödsling
- 2015:3 Vegetativt förökad skogsodlingsmaterial
- 2015:4 Global framtida efterfrågan på och möjligt utbud av virkesråvara
- 2015:5 Satellitbildskartering av lämnad miljöhänsyn i skogsbruket – en landskapsansats
- 2015:6 Lägsta ålder för förnygringsavverkning (LÅF) – en analys av följder av att sänka åldrarna i norra Sverige till samma nivå som i södra Sverige
- 2015:7 Hänsynen till forn- och kulturlämningar – Resultat från Hänsynsuppföljning Kulturmiljöer 2014
- 2015:8 Uppföljning av skogliga åtgärder längs vattendrag för att gynna lövträd och lövträdetablering.
- 2015:9 Ångermanälvsprojektet – förslag till miljöförbättrande åtgärder i mellersta Ångermanälven och nedre Fjällsjälven
- 2015:10 Skogliga konsekvensanalyser 2015–SKA 15
- 2015:11 Analys av miljöförhållanden – SKA 15
- 2015:12 Effekter av ett förrändrat klimat–SKA 15
- 2015:13 Uppföljning av skogliga åtgärder längs vattendrag för att gynna lövträd och lövträdetablering
- 2016:1 Uppföljning av biologisk mångfald i skog med höga naturvärden – Metodik och genomförande
- 2016:2 Effekter av klimatförändringar på skogen och behov av anpassning i skogsbruket
- 2016:3 Kunskapssammanställning skogsbruk på torvmark
- 2016:4 Alternativa skogsskötselmetoder i Vildmarksriket – ett pilotprojekt
- 2016:5 Hänsyn till forn- och kulturlämningar – Resultat från Hänsynsuppföljning Kulturmiljöer 2015
- 2016:6 METOD för uppföljning av miljöhänsyn och hänsyn till rennäringen vid stubbskörd
- 2016:7 Nulägesbeskrivning om nyckelbiotoper
- 2016:8 Möjligheter att minska stabilitetsrisker i raviner och slänter vid skogsbruk och exploatering – Genomgång av ansvar vid utförande av skogliga förändringar, ansvar för tillsyn samt ansvar vid inträffad skada
- 2016:9 Möjligheter att minska stabilitetsrisker i raviner och slänter vid skogsbruk och exploatering – Exempelsamling
- 2016:10 Möjligheter att minska stabilitetsrisker i raviner och slänter vid skogsbruk och exploatering – Metodik för identifiering av slänter och raviner känsliga för vegetationsförändringar till följd av skogsbruk eller exploatering
- 2016:11 Möjligheter att minska stabilitetsrisker i raviner och slänter vid skogsbruk och exploatering – Slutrapport
- 2016:12 Nya och reviderade målbilder för god miljöhänsyn – Skogssektors gemensamma målbilder för god miljöhänsyn vid skogsbruksåtgärder
- 2016:13 Målanpassad ungskogsskötsel
- 2016:14 Översyn av Skogsstyrelsens beräkningsmodell för bruttoavverkning
- 2017:2 Alternativa skötselmetoder i Råndalen – Ett projekt i Härjedalen
- 2017:4 Biologisk mångfald i nyckelbiotoper – Resultat från inventeringen – ”Uppföljning biologisk mångfald” 2009–2015
- 2017:5 Utredning av skogsvårdslagens 6 §
- 2017:6 Skogsstyrelsens återväxtuppföljning – Resultatet från 1999–2016
- 2017:7 Skogsträdens genetiska mångfald: status och åtgärdesbehov
- 2017:8 Skogsstyrelsens arbete för ökad klimatanpassning inom skogssektorn – Handlingsplan
- 2017:9 Implementering av målbilder för god miljöhänsyn – Regeringsuppdrag

- 2017:10 Bioenergi på rätt sätt – Om hållbar bioenergi i Sverige och andra länder – En översikt initierad av Miljömålsrådet
- 2017:12 Projekt Mera tall! – 2010–2016
- 2017:13 Skogens ekosystemtjänster – status och påverkan
- 2018:1 Produktionshöjande åtgärder – Rapport från samverkansprocess skogsproduktion
- 2018:2 Effektiv skogsskötsel – Delrapport inom Samverkan för ökad skogsproduktion
- 2018:3 Infrastruktur i skogsbruket med betydelse för skogsproduktionen: Nuläge och åtgärdsförslag – Rapport från arbetsgrupp 2 inom projekt Samverkansprocess skogsproduktion
- 2018:4 Åtgärder för att minska skador på skog – Rapport från samverkansprocess skogsproduktion
- 2018:5 Samlad tillsynsplan 2018
- 2018:6 Uppföljning av askåterföring efter spridning
- 2018:7 En analys av styrmedel för skogens sociala värden – Regeringsuppdrag
- 2018:8 Tillvarata jobbpotentialen i de gröna näringarna – Naturnära jobb – Delredovisning av regeringsuppdrag
- 2018:9 Slutrapport – Gemensam inlämningsfunktion för skogsägare – Regeringsuppdrag
- 2018:10 Nulägesbeskrivning av nordvästra Sverige
- 2018:11 Vetenskapligt kunskapsunderlag för nyckelbiotopsinventeringen i nordvästra Sverige
- 2018:12 Statistik om skogsägande/Strukturstatistik
- 2018:13 Föreskrifter för anläggning av skog – Regeringsuppdrag
- 2018:14 Tillvarata jobbpotentialen i de gröna näringarna – Naturnära jobb – Delredovisning av regeringsuppdrag
- 2018:15 Förslag till åtgärder för att kompensera drabbade i skogsbruket för skador med anledning av skogsbränderna sommaren 2018 – Regeringsuppdrag
- 2019:1 Indikatorer för miljö kvalitetsmålet Levande skogar
- 2019:2 Fördjupad utvärdering av Levande skogar 2019
- 2019:3 Den skogliga genbanken – från storhetstid till framtid
- 2019:4 Åtgärder för en jämnställd skogssektor
- 2019:5 Slutrapport Tillvarata jobbpotentialen i de gröna näringarna – Naturnära jobb
- 2019:6 Nya målbilder för god miljöhänsyn vid dikesrensning och skyddsdikning
- 2019:7 Återkolonisering av hjortdjur inom brandområdet i Västmanland
- 2019:8 Samverkan Tiveden
- 2019:9 Samlad tillsynsplan 2019
- 2019:10 Förslag till åtgärder på kort och lång sikt för att mildra problem i områden med multiskadad ungskog i Västerbottens- och Norrbottens län
- 2019:11 Förebyringsarbetet efter skogsbranden i Västmanland 2014
- 2019:12 Utveckling av metod för nyckelbiotopsinventering i nordvästra Sverige
- 2019:13 Regler och rekommendationer för skogsbränsleuttag och kompensationsåtgärder – Kunskapsunderlag
- 2019:14 Regler och rekommendationer för skogsbränsleuttag och kompensationsåtgärder – Vägledning
- 2019:15 Underlag för genomförande av direktivet om främjande av användningen av energi från förnybara energikällor
- 2019:16 Skogsbrukets kostnader för viltskador
- 2019:17 Omvärldsanalys svensk skogsnäring
- 2019:18 Statistik om formellt skyddad skogsmark, frivilliga avsättningar, hänsynsytor samt improduktiv skogsmark – Redovisning av regeringsuppdrag
- 2019:19 Attityder till nyckelbiotoper – Nulägesbeskrivning 2018
- 2019:20 Kulturmiljöer – en självklar del i skogslandskapet
- 2019:21 Skogssektorns gemensamma målbilder för god miljöhänsyn – nya och reviderade målbilder. Målbilder för kulturmiljöer/övriga kulturhistoriska lämningar
- 2019:22 Samlad tillsynsplan 2019
- 2019:23 Klimatanpassning av skogen – mål och förslag på åtgärder
- 2020:1 Inverkan av skogsbruksåtgärder på kvicksilvers transport, omvandling och upptag i vattenlevande organismer

AV SKOGSSTYRELSEN PUBLICERADE MEDDELANDEN

Under 2017 slogs Skogsstyrelsens publikationer Rapport och Meddelande ihop till en med namnet Rapport.

2012:1	Förslag på regelförenklingar i skogsvårdslagstiftningen	2015:4	Renskogsavtal och lägesbeskrivning i frågor om skogsbruk – rennäring
2012:2	Uppdrag om nationella bestämmelser som kompletterar EU:s timmerförordning	2015:6	Utvärdering av ekonomiska stöd
2012:3	Beredskap vid skador på skog	2016:1	Kunskapsplattform för skogsproduktion – Tillståndet i skogen, problem och tänkbara insatser och åtgärder
2013:1	Dialog och samverkan mellan skogsbruk och rennäring	2016:2	Analys av hur Skogsstyrelsen verkar för att miljömålen ska nås
2013:2	Uppdrag om förslag till ny lagstiftning om virkesmätning	2016:3	Delrapport – Främja anställning av nyanlända i de gröna näringarna och naturvärden
2013:3	Adaptiv skogsskötsel	2016:4	Skogliga skattningar från laserdata
2013:4	Ask och askskottsjukan i Sverige	2016:5	Kulturarv i skogen
2013:5	Förstudie om ett nationellt skogsprogram för Sverige – Förslag och ställningstaganden	2016:6	Sektorsdialog 2014 och 2015
2013:6	Förstudie om ett nationellt skogsprogram för Sverige – omvärldsanalys	2016:7	Adaptiv skogsskötsel 2013–2015
2013:7	Ökad jämställdhet bland skogsägare	2016:8	Agenda 2030 – underlag för genomförande – Ett regeringsuppdrag
2013:8	Naturvårdsavtal för områden med sociala värden	2016:9	Implementering av målbilder för god miljöhänsyn
2013:9	Skogens sociala värden – en kunskapssammanställning	2016:10	Gemensam inlämningsfunktion för skogsägare
2014:1	Översyn av föreskrifter och allmänna råd till 30 § SvL – Del 2	2016:11	Samlad tillsynsplan 2017
2014:2	Skogslandskapets vatten – en lägesbeskrivning av arbetet med styrmedel och åtgärder	2017:1	Skogens sociala värden i Skogsstyrelsens rådgivning och information
2015:1	Förenkling i skogsvårdslagstiftningen – Redovisning av regeringsuppdrag	2017:2	Främja nyanländas väg till anställning i de gröna näringarna och naturvärden
2015:2	Redovisning av arbete med skogens sociala värde	2017:3	Regeringsuppdrag om jämställdhet i skogsbruket
2015:3	Rundvirkes- och skogsbränslebalanser för år 2013 – SKA 15	2017:4	Avrapportering av regeringsuppdrag om frivilliga avsättningar

PUBLICERING OCH BESTÄLLNING AV SKOGSSTYRELSENS RAPPORTER

Skogsstyrelsens rapporter publiceras som pdf-filer på vår webbplats: www.skogsstyrelsen.se/om-oss/publikationer/

Äldre publikationer kan beställas eller laddas ned i webbutiken: shop.skogsstyrelsen.se/sv/publikationer/

Skogsstyrelsen publicerar dessutom foldrar, broschyrer, böcker med mera inom skilda skogliga ämnesområden. Skogsstyrelsen är också utgivare av tidningen Skogseko.

Beställning av publikationer och trycksaker:
Skogsstyrelsen,
Böcker och broschyrer
551 83 JÖNKÖPING

Telefon: 036-35 93 40, 036-35 93 00 (vx)
e-post: bocker@skogsstyrelsen.se
webbutik: shop.skogsstyrelsen.se/sv/

I den här rapporten redovisar Skogsstyrelsen aktuell kunskap om hur skogsbruksåtgärder påverkar kvicksilvers omvandling, transport och upptag i vattenlevande organismer. Ett antal rekommendationer ges också för hur skogsbruk kan anpassas för att minska halter av kvicksilver i fisk. Rapporten är ett resultat av en åtgärd som riktas till Skogsstyrelsen inom vattenförvaltningen.