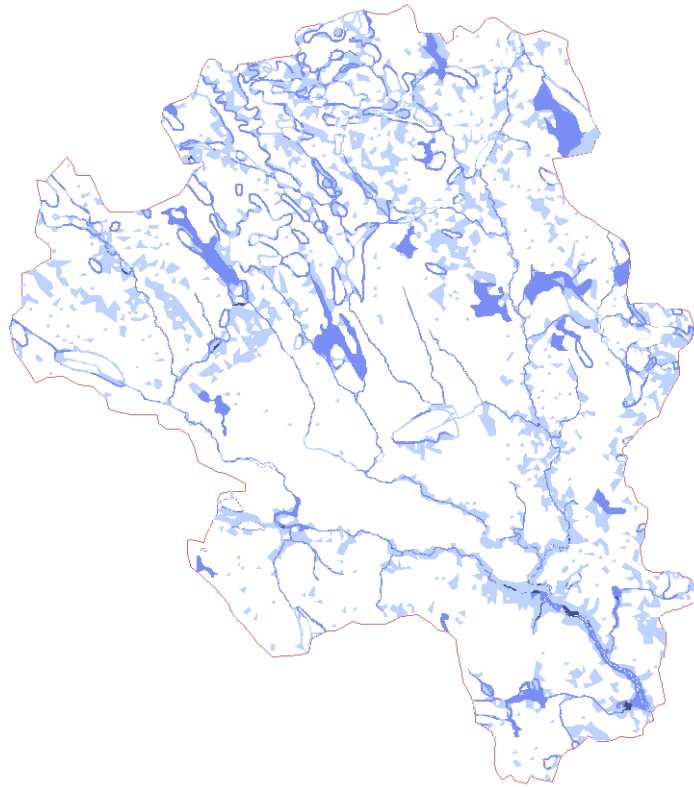




Sveriges
lantbruksuniversitet

Kvicksilver i skogsmark

Torbjörn Ingemarsson och Linda Isaksson



Självständigt arbete 15 högskolepoäng

Fakulteten för Skogsvetenskap

2010
Umeå

SLU, Sveriges lantbruksuniversitet

Enhet	Fakulteten för Skogsvetenskap
Författare	Torbjörn Ingemarsson och Linda Isaksson
Titel	Kvicksilver i skogsmark
Nyckelord	Kvicksilver, vattenkvalitet, skogsbruk, utlakning, topografiskt index, buffertzona
Handledare	Jakob Schelker och Anneli Ågren institutionen för Skogens ekologi och skötsel
Examinator	Anders Alanärrä, fakulteten för skogsvetenskap
Kurstitel	Kandidatarbete i skogsvetenskap
Kurskod	EX0592
Program	Jägmästarprogrammet
Omfattning på arbetet	15 hp
Nivå och fördjupning på arbetet	G2E
Utgivningsort	Umeå
Utgivningsår	2010

Sammanfattning

I mer än hälften av Sveriges sjöar innehåller gädda en kvicksilverhalt som övergår Food and Agriculture Organization's (FAO) rekommendationer. Det kvicksilver som finns lagrat i svensk skogsmark är ett resultat av antropogent nedfall. Studier visar att kvicksilver utlakas vid skogsbruksåtgärder på hela skogsmarken som en följd av förhöjd rörlighet av dissolved organic carbon (DOC). En ökad metylering av kvicksilver sker vid vattenmättade, syrefattiga förhållanden där det finns tillgång till organiskt material. Syftet med den här rapporten var att identifiera områden känsliga för kvicksilverutlakning. Samt undersöka hur slutavverkning kan genomföras för att minimera utlakningen av kvicksilver. Studierna har gjorts utifrån området Krycklan i Västerbottens län och resultaten har tagits fram med hjälp av Geografiska informationssystem. Utifrån dagens kunskapsläge har "hotspots" för metylering vid torvmark, sumpskog, bäcknära zoner och sjökanter samt högt flöde tagits fram som känsliga områden. Resultaten visar på hur olika känslighetstyper är fragmenterade över landskapet. 27 % av området Krycklan har visat sig känsligt för kvicksilverutlakning utifrån antaganden. Vid planering av skogsbruksåtgärder bör det tas extra hänsyn i dessa områden för att undvika körskador och ingen slutavverkning bör förekomma. Vid avsättning och anpassade åtgärder minskar nuvärdet för Krycklan med 0,5 % och volymuttaget med 9,7 %. Det är svårt att veta om det går att dra några generella slutsatser av resultaten eftersom det finns få studier på området som kan jämföras med våra resultat.

Abstract

Pike in more than half of Sweden's lakes contains a mercury content above Food and Agriculture Organization's (FAO) recommendations. The mercury that is stored in the Swedish forest soils is the result of anthropogenic deposition. Studies indicate that mercury is leached out due to forestry measures throughout the forest soils as a result of increased mobility of dissolved organic carbon (DOC). Increased methylation of mercury occurs in watersaturated, anaerobic conditions where organic matter is available. The purpose of this report was to identify areas sensitive to mercury leaching. Also to examine how final felling can be implemented to minimize the leaching of mercury. These studies have been based on the area Krycklan in Västerbotten County and the results have been retrieved through Geographic information systems. Based on current knowledge, "hot spots" for methylation in the peat soil, swamp, stream and lake near zones and high flow have been defined as sensitive areas. The results show how different sensitivity types are fragmented across the landscape. 27% of the area Krycklan has proved sensitive to mercury leaching according to made assumptions. In planning of forestry measures these additional areas should be taken into account to avoid soil damage caused by vehicles and no final felling should occur. Excluded areas and responsive action reduces the present value of Krycklan by 0.5% and harvested tree volume decreases by 9.7%. It is difficult to know whether it is possible to draw any general conclusions from the results because there are few studies on the topic that can be compared with our results.

Innehållsförteckning

Sammanfattning	2
Abstract	2
Inledning	4
Kvicksilver – ett problem	5
Kvicksilvrets kemi.....	7
Skogsbrukets påverkan på kvicksilver	8
Material och metod	10
Områdesbeskrivning.....	10
Arbetsgång	11
Resultat	14
Diskussion.....	22
Tillkännagivanden.....	25
Referenser	26

Inledning

Enligt EU:s ramdirektiv för vatten från år 2000 ska alla vatten inom EU uppnå god ekologisk och kemisk status innan år 2015. Direktivet är uppdelat i två delar, en som behandlar hur grundvatten ska uppnå en viss status och en som behandlar prioriterade skadliga ämnen, bl.a. kvicksilver, vars förekomst i vattensystem ska minskas eller fasas ut. Ramdirektivet anger ramar, mål och tidsgräns. Hur direktivet ska genomföras styrs på nationell nivå genom lagar och regler (Naturvårdsverket 2007). I Sverige har landet delats in i fem vattendistrikt från norr till söder för vilka olika vattenmyndigheter ansvarar. Vattenmyndigheternas uppgift är att fastställa riktvärden för miljö kvalitet i påverkade vatten. Dessa åtgärdsprogram var färdigutarbetade år 2009. Utsläpp från både punktkällor och diffusa källor skall regleras för att uppnå målen vilket inkluderar skogsbrukets påverkan (Ring m.fl. 2008).

Åtgärdsprogrammen bygger på Naturvårdsverkets föreskrifter (NFS 2008:1) och allmänna råd om klassificering och miljö kvalitetsnormer avseende ytvatten samt i förordningen 2004:660 om förvaltning av kvaliteten på vattenmiljön. De bygger alla på EU:s ramdirektiv för vatten och syftar till att implementera detta i svensk lag. Även Naturvårdsverket och SGU (Sveriges geologiska undersökning) är bemyndigade att meddela föreskrifter (Naturvårdsverket 2007).

Ring m.fl. (2008) skriver att varje vattenmyndighet kan ställa krav på åtgärder om en verksamhet leder till en vattenkvalitet som anses avvika alltför mycket från referensförhållandena. Det finns utrymme i direktivet för vattenmyndigheterna att ta hänsyn till existerande markanvändning eftersom det alltid ska göras en värdering av vilken vattenkvalitet som kan uppnås utan orimliga kostnader. Vattnets användningsområde väger in i värderingen t.ex. dricksvatten värderas högt medan vatten till pappersmassa inte kräver samma goda status. Andra områden som påverkas av vattenstatusen är energiutvinning, biologisk mångfald, bindning av kol/kväve, jakt, fiske, bär/svamp och friluftsliv. Exempel på värdefulla vatten är sötvattensmiljöer som är viktiga för natur, kultur och fisk. Mindre vattendrag är känsligare för störningar än större (Ring m.fl. 2008).

Skogsekosystemets vattenstatus påverkas i hög grad av människans aktiviteter. Flödesvägar, flödesdynamik, temperatur, grumlighet, näringsstatus, surhetsnivå, samt vandringvägar och ståndplatser för fisk påverkas. Detta genom t.ex. kantzoner längs vatten, igenläggning av diken, konstruktion av sedimentationsdammar, askåterföring, kalkning på försurade marker och skärmställningar på kväverika marker. Skogsbruksåtgärder ger störst effekt lokalt (Ring m.fl. 2008).

Enligt Ring m.fl. (2008) beror skogsbrukets påverkan på:

- Vilken åtgärd som utförs, vilket innebär olika mycket störningar i marken, olika grundvattenförändringar mm.
- Hur åtgärden utförs i det enskilda fallet, t.ex. i vilken grad körskador uppstår och drivningen anpassas till platsen.
- Hur stor andel av avrinningsområdet och vattendragets längd som påverkas.
- Avrinningsområdets storlek, vilket ger olika stora koncentrationsförändringar i avrinningsvattnet.
- Var i avrinningsområdet åtgärden utförs, vilket påverkar vattenförhållanden olika.

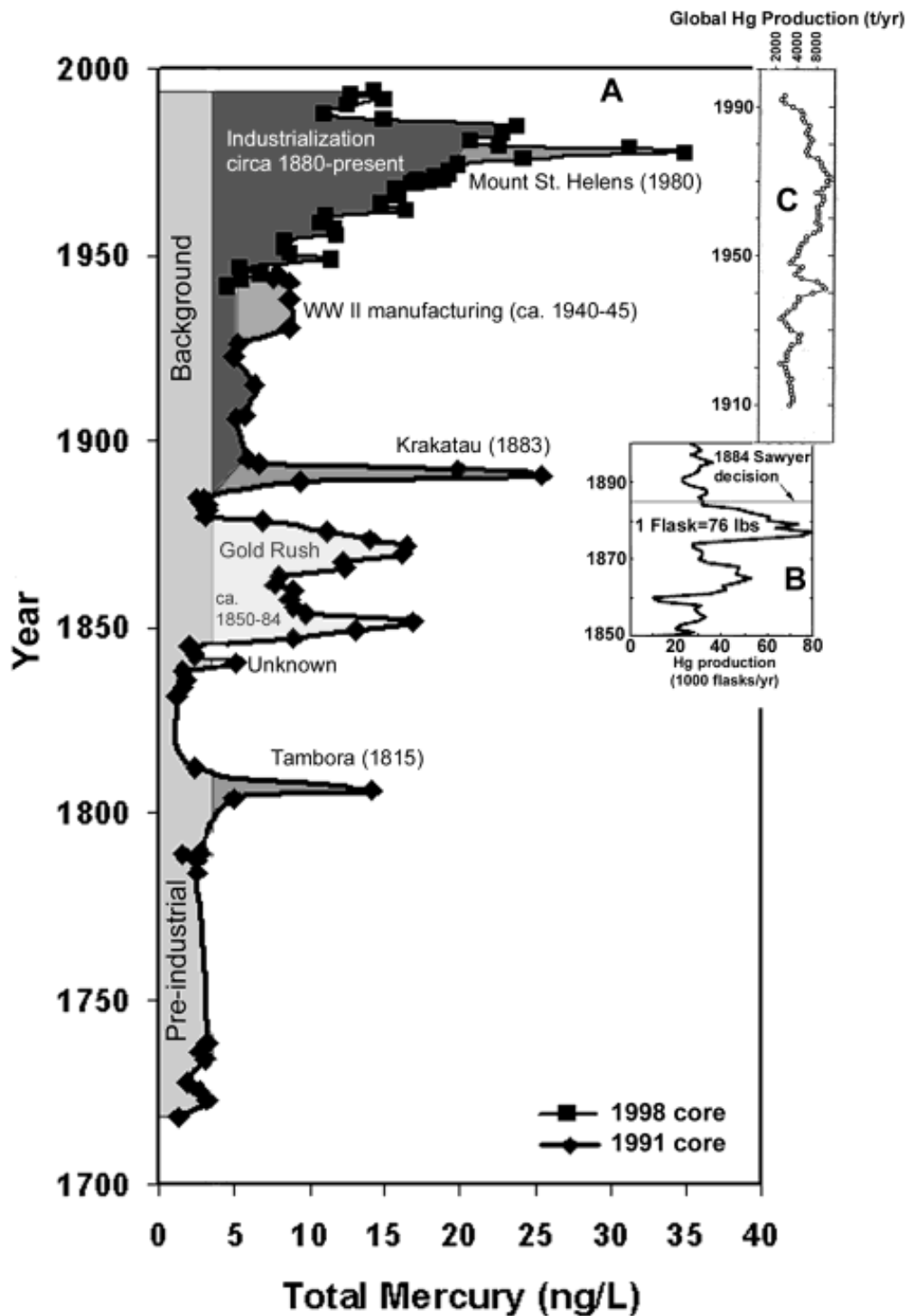
- När under året åtgärden utförs, detta inverkar på hur lätt körskador uppkommer och kräver olika försiktighetsåtgärder.
- Artsammansättningen i vattnet.
- Jordart och topografi, vilket inverkar på vattnets rörelser och risken för erosion.
- Geografiskt läge, vilket ger ståndorten olika egenskaper bl.a. i form av temperatur och nederbörds mängd.

Kvicksilver – ett problem

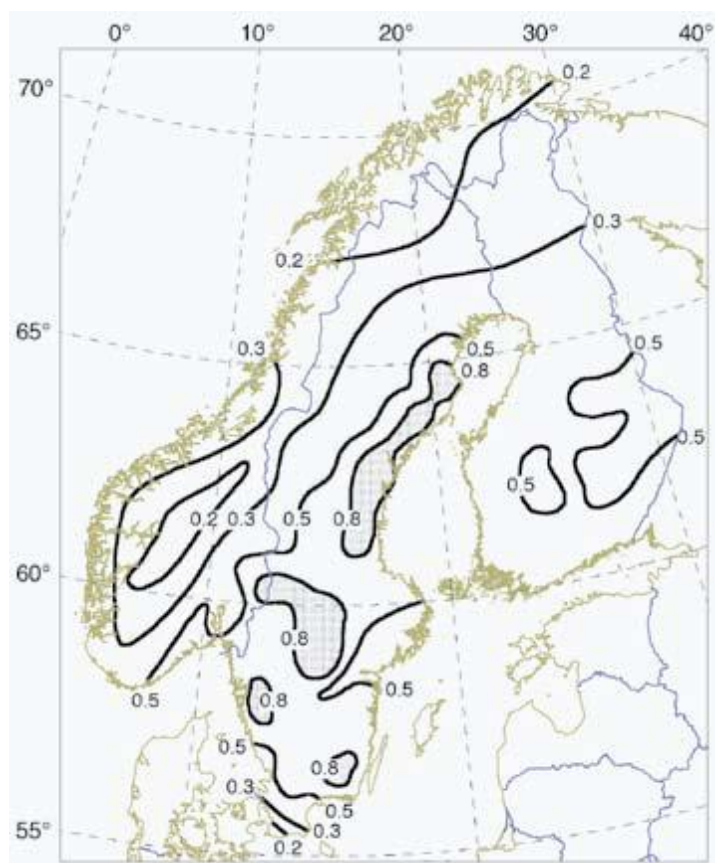
Kvicksilverhalten i fisk anses överstiga FAO:s rekommendationer på 0,5 mg Hg/kg för matfisk i ungefär hälften av Sveriges sjöar (figur 2; Bishop m.fl. 2009). Uppskattningsvis är 9-23 % av kvicksilvret i den fisk som lever i vattendrag och sjöar i det svenska produktiva skogslandskapet ett resultat av ökad kvicksilverutlakning associerad med slutavverkning. Denna skattning bygger på att 1 % av arealen avverkas årligen. Om gallring, som har liknande effekter på utlakning av kvicksilver, också räknas med ökar andelen brukad skog till 20 % per år och då skulle 17-35 % av kvicksilvret ackumulerat i fisk vara en effekt av skogsbruket (Bishop m.fl. 2009).

Det finns olika kemiska former av kvicksilver (Hg). I vattnekosystem finns det framförallt två former som är intressanta, en oorganisk form som gärna binder till svavel och en metylerad organisk form, metylkvicksilver (MeHg). Kvicksilver binder hårt till svavelgrupper i enzymer vilket leder till att livsviktiga processer i cellerna blockeras. Den metylerade formen av kvicksilver är fettlöslig och anrikas lättare än kvicksilver i näringskedjan (Skjellberg 2003).

Den största bidragande faktorn till kvicksilverkontaminering från regional till global nivå är den atmosfäriska depositionen av kvicksilver som har sitt ursprung i luftföroreningar orsakade av människan (Schuster, m.fl. 2002; Sørensen m.fl. 2009; Johansson m.fl. 1991). Mycket av detta kvicksilver har ackumulerats i skogsmark (Sørensen m.fl. 2009). Deponerat kvicksilver från atmosfären kan bindas effektivt till det översta mårslagret i skogsmarken. Mårslagret kan därför fungera som ett filter för det atmosfäriska kvicksilvret och lagra in stora mängder av ämnet. Koncentrationen och den totala mängden kvicksilver i mårslagret påverkas av det antropogena nedfallet över en lång tidsperiod, främst under 1900-talet (figur 1; Johansson m.fl. 1991; Schuster m.fl. 2002).



Figur 1: (A) Historisk profil av Hg i den övre "Fremont" glaciären. En koncentration på 4ng/L uppskattades som förindustriell input (ljusgrå färg, preindustrial) som extrapolerades till 1993 som en bakgrundskoncentration. Prediktioner på 10 år gjordes med 90 % konfidensnivå, konfidensintervall 2-3år. (B) Hg produktion under guldrushen i Kalifornien (C) Hg-produktion i världen i ton/år under det senaste seklet (Schuster m.fl. 2002).



Figur 2. Hg i mg/kg gädda, koncentrationerna överstiger FAO:s riktlinjer med 0,5mg/kg i ca hälften av Sveriges 100000 sjöar (Bishop m.fl. 2009).

Nuvarande fördelning av det antropogena kvicksilvret i Sverige med minst i sydväst och mest i nordöst antyder att depositionen över Sverige har sitt ursprung främst från andra länder i Europa (figur 2; Bishop m.fl. 2009; Johansson m.fl. 1991).

Kvicksilvret kan pga. skogsbruket utlakas i vattendrag och sjöar (Sørensen m.fl. 2009). Skogsmarken i Sverige dräneras av ca 290 000 km vattendrag och 50 % av sjöarna återfinns i skoglandskapet (Ring m.fl. 2008)

Kvicksilvrets kemi

Oorganiska sulfider, polysulfider och tioler bidrar till lösligheten av Hg och MeHg. Dessa former av svavel förekommer framför allt vid syrefattiga förhållanden då redoxpotentialen är låg (Bishop m.fl. 2009; Skyllberg m.fl. 2009). Alla processer som ökar lösligheten av DOM, tioler och sulfider bidrar till lösligheten av Hg och MeHg och därmed också till ökad transport av totalt (alla former av) kvicksilver (Hg_{tot}) genom avrinningsområdet. Hg transporteras in i cellerna på svavelreducerande bakterier där metyleringen sker (Bishop m.fl. 2009).

Försök visar att andelen MeHg av Hg_{tot} är högre nära vattendrag, Skyllberg m.fl. (2003) menar att detta kan vara en indikation på att metylering sker främst i den strandnära zonen och att det är här som källan till MeHg i vattendragen finns. Beräkningar har gjorts på hur stor del av metylkvicksilvret som kommer av mobilisering dvs. transporten av ämnen från terrestra till akvatiska system, och hur stor del som är en konsekvens av ökad metylering efter

avverkning (Skyllberg m.fl. 2009). Resultatet av beräkningen visar att 1/6 av koncentrationsökningen av metylkvicksilver som mobiliseras från mark ut till vattendrag är en konsekvens av ökad mobilisering. Resterande 5/6 är resultatet av en ökad metylering. Den ökade metyleringen efter avverkning tros vara orsakad av en ökad tillgång på elektronodonatorer i form av organiskt material för metyleringsbakterierna, detta som konsekvens av en högre nedbrytning och ökad tillgång på kol i form av hyggesavfall (Skyllberg m.fl. 2009). Hg i marklösning är mer tillgängligt för metylering än Hg som är bundet till markens utbyteskomplex (Skyllberg m.fl. 2003).

Våtmarker räknas som ”hotspots” för metyleringsprocessen i det terrestra ekosystemet, dvs. här råder förhållanden som gynnar metylering. Våtmarker och speciellt strandnära zoner med mycket organiskt material har mycket mer utlakning av metylkvicksilver per ytenhet än väldränerade skogsmarker (Bishop m.fl. 2009). En undersökning (Mitchell m.fl. 2008) visar på att metyleringsprocesserna är som mest koncentrerade till utkanten av myrarna. Den största metyleringen sker enligt samma undersökning i området tio meter utanför myren och tjugo meter in på myren.

Bishop m.fl. (2009) menar att atmosfäriskt kvicksilver binds i skogsmarken och skyddar således akvatiska ekosystem. Kvicksilvret i marken är potentiellt ett hot mot marklevande organismer, men vid en förflyttning till vatten är kvicksilvret definitivt ett hot mot fisk och annan akvatisk fauna. Bishop m.fl. (2009) menar vidare att växande skog i högre grad än obrukad skog kan fungera som en sänka för antropogent Hg_{tot} . Detta genom att mårslaget blir tjockare och att grundvattennivån sänks medan skogen växer.

Skogsbrukets påverkan på kvicksilver

Bishop m.fl. (2009) menar att slutavverkning och gallring påverkar mobiliseringen av Hg och MeHg samt produktionen av MeHg. Detta genom processer som höjning av grundvattenytans nivå vilket gynnar metylkvicksilverproduktionen genom ökad tillförsel av lättnedbrytbara växtrester, ökad DOM-koncentration i mark och avrinning samt ökade oorganiska sulfidkoncentrationer i marken (Bishop m.fl. 2009).

Vid slutavverkning och markberedning av ett bestånd i Finland (Erickson 2003) blev det en signifikant ökning av kvicksilver och metylkvicksilver i avrinningsvattnet. Resultaten pekar på att slutavverkning och markberedning signifikant ökar mobiliteten av kvicksilver och metylkvicksilver som ackumulerats i skogsmark. Dessa blir därför viktiga faktorer för kvicksilverutlakning till boreala vattenecosystem (Erickson 2003). Enligt Porvari m.fl. (2009) kan kvicksilver i ytvattnet och bioackumuleringen öka till en nivå där 10-25% av kvicksilvret ackumulerat i fisk förklaras av den ökade kvicksilverutlakningen till följd av slutavverkning. Som tidigare nämnts har även Bishop m.fl. (2009) visat på liknande resultat.

I ett försök där avrinningsvattnet samlades upp i uppsamlingsbassänger för analys ökade kvicksilver- och metylkvicksilverkoncentrationerna i vattnet signifikant efter slutavverkning och markberedning av ett granskogsbestånd (Porvari m.fl. 2009). Hg_{tot} var positivt korrelerat med koncentrationen total organic carbon (TOC) men det var inte MeHg. Ökningen av TOC i avrinningsvattnet kan därför förklara ökningen av Hg_{tot} men inte ökningen av MeHg. Efter ett par år minskade koncentrationen av TOC i avrinningsvattnet men koncentrationerna av MeHg var fortsatt höga. Detta är enligt Porvari m.fl. (2009) en indikation på att metyleringen var fortsatt hög i avrinningsområdet. Antingen är MeHg mer mobil i markvattnet eller så sker mer metylering pga. ändrade förutsättningar (Porvari m.fl. 2009). Hyggesupptagning kan genom ökad avrinning bidra till större utflöde av humus, kvicksilver och metylkvicksilver till närliggande sjöar, med ökade halter av MeHg i zooplankton och fisk som följd (Garcia m.fl., 2000; Garcia 2009). En studie från Sverige av Munthe och Hultberg (2003) visar på hur koncentrationen MeHg ökar i avrinningsvattnet då marken störs även om inga träd faller.

Detta beror enligt dem antingen på ökad mobilisering för att vattnet tar nya vägar, eller på mer metylering. Skogsbruksåtgärder påverkar halten humus i avrinnande vatten, körskador leder till tillfälligt ökad halt humus, kvicksilver och metylkvicksilver i avrinningsvattnet (Skjällberg 2003). Drivning på ej tjälade marker innebär en stor risk för utsläpp av kvicksilver (Bishop m.fl. 2009).

Bishop menar vidare att dikning bidrar till minskade metyleringsprocesser på grund av sänkt grundvattenyta och ythorisonter med stor metyleringspotential syresätts och metyleringen uteblir. Till en början ökar rörligheten av DOM och kvicksilverutlakningen ökar men på lång sikt minskar denna och på så vis minskar uttransporten av Hg och MeHg (Bishop m.fl. 2009). Skjällberg (2003) menar att dikning av vissa marktyper skulle kunna leda till minskad uttransport av humus till vattendrag, genom att grundvattenytan sänks till markhorisonter med lägre halt av tillgängligt humus. Kalkning av våtmarker och utströmningsområden bidrar till ökad humushalt i avrinningsvattnet (Skjällberg 2003).

Vid skogsbruksåtgärder så som gallring och slutavverkning minskar evapotranspirationen från lokalen och grundvattenytan höjs (Bishop m.fl. 2009). Då grundvattenytan höjs kommer mer kolrika lager vara under vatten mer frekvent och mobiliseringen av DOM kommer öka. I jordhorisonter med mycket organiskt material leds vatten lättare och den laterala transporten ökar när vattnet stiger. Då ökar även uttransporten av DOM och därmed även Hg och MeHg (Bishop m.fl. 2009).

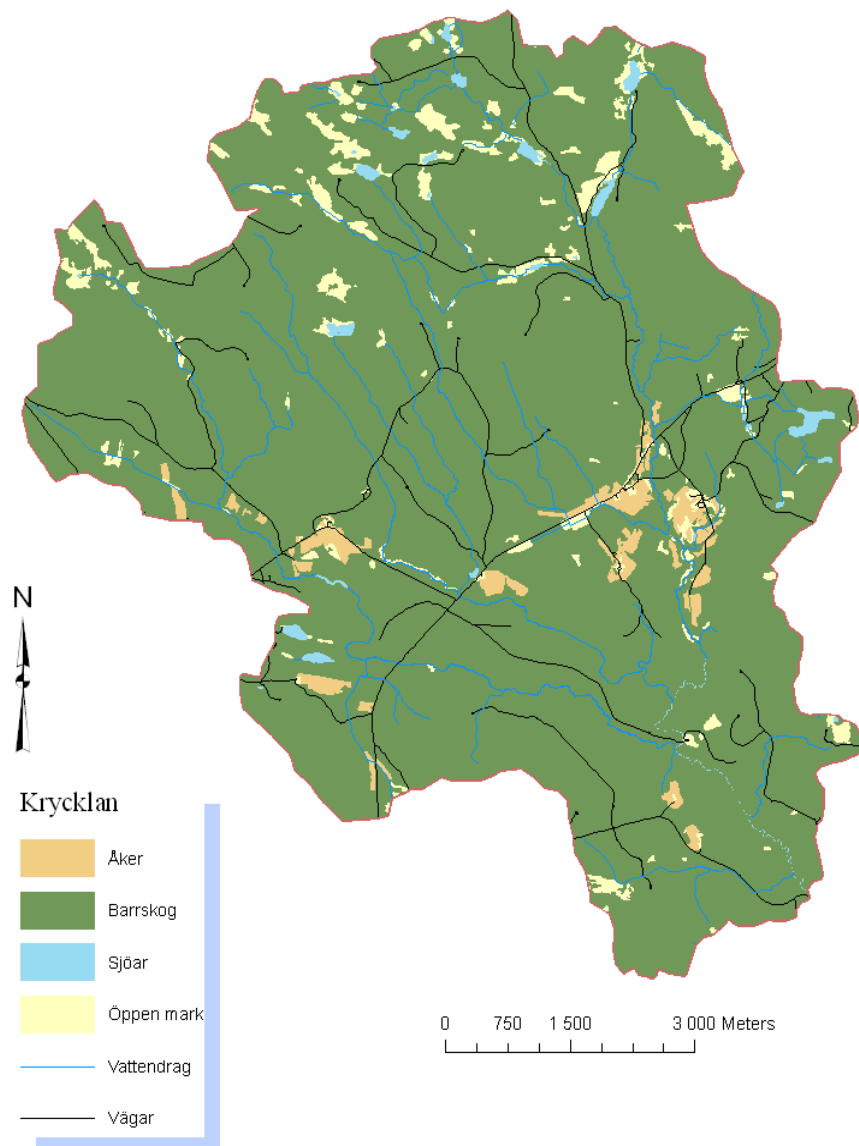
En studie från Balsjö i Västerbotten (Sørensen m.fl. 2009) visar på hur avrinningen från avverkade områden är högre än avrinningen från ej avverkade kontrolltytor. Ökningen var störst under växtsäsongen då ökningen var mellan 58-99% jämfört med resten av året då ökningen var 30-43%. Den ökade avrinningen under tillväxtsäsongen var överrensstämmande med skillnaden i transpiration mellan avverkade och icke-avverkade områden. Räknet över hela året ändrades inte avrinningen så mycket men förändringar under torra perioder kan ha stor betydelse för rörligheten av DOC (Sørensen m.fl. 2009). Avverkning i gränsen mellan två avrinningsområden har också visat sig kunna öka avrinningen (Desrosiers m.fl. 2006). En kanadensisk studie som var utformad för att undersöka slutavverkningens påverkan på grundvattenytan i den bäcknära zonen visade på en signifikant ökad utlakning av Hg_{tot} i sluttningar samt en signifikant minskning av MeHg i våtmark. Övergripande fanns dock ingen signifikant förändring av koncentrationen MeHg eller Hg efter avverkning. Detta förklaras med att det finns mindre mängder ackumulerat Hg och MeHg i markerna i Nordamerika, på grund av mindre antropogent nedfall i jämförelse med de europeiska länder där studier också har gjorts (Allan m.fl. 2009).

Skötselåtgärder kan påverka metyleringsprocesserna främst genom att grundvattenytans läge i terrängen påverkas (Bishop m.fl. 2009). Mer kunskap behövs om vad grundvattenytans nivå får för effekter på metyleringsprocesserna (Skjällberg 2003). Skjällberg (2003) menar att innan kemin under syrefria förhållanden är känd och relevant beskriven kan man inte särskåda processer som transport och biotillgänglighet av kvicksilver och därmed kan inte risker värderas. Anpassad skötsel skulle kunna möjliggöra sänkt kvicksilverutlakning. Detta genom att lämna skyddszoner vid vattendrag, använda broar över vattendrag och undvika körning i våtmarker (Bishop m.fl. 2009).

Utifrån gällande kunskapsläge syftar den här uppsatsen till att identifiera områden som är extra känsliga för kvicksilverutlakning samt att undersöka hur slutavverkning kan genomföras för att minimera utlakningen av kvicksilver.

Material och metod

Områdesbeskrivning



Figur 3: Området Krycklan med ägoslagsfördelning. © Lantmäteriet, ärende nr I 2010/0345.

Området Krycklan (figur 3) är 6700 ha stort varav 6098 ha är produktiv skogsmark. Det är beläget i mitten av boreala vegetationszonen utanför Vindeln i Västerbottens län ca 30 km från Östersjön och 60 km nordväst om Umeå. Tall- (*Pinus sylvestris*) och granskog (*Picea abies*) samt våtmarker är dominerande i regionen. Av Krycklans avrinningsområde är 88 % beskogad mark. Våtmarker som domineras av *Sphagnum* spp. utgör ungefär 8 % av avrinningsområdet. Dominerande jordarter är morän och torv. I skogen är välutvecklade podsoljordar vanliga, i strandzoner är organiska jordar vanligast. Årsmedeltemperaturen är 1,3° C (1980-1998) och den årliga perioden med snötäcke är 171 dagar. Årsmedelnederbörden är ca 600 mm (1981-1998), varav 35 % faller som snö. Krycklans

avrinningsområde sträcker sig från 369 meter över havet i nordväst till 130 meter över havet vid utloppet i sydost. 44 % av avrinningsområdet ligger över högsta kustlinjen beläget i de nordvästra delarna av Krycklan, 56 % är under högsta kustlinjen och beläget i det södra avrinningsområdet. Studieområdet omfattar ett borealt strömnätverk av 15 vattendrag. Den genomsnittliga årliga avrinningen är ca 325 mm och en tredjedel av avrinningen sker under vårfloden i april-maj. Områdesbeskrivningen är baserad på information från Björkvald m.fl (2008).

Arbetsgång

Det gjordes en litteratursammanställning om kunskapsläget kring kvicksilver i skogsmark. Utifrån kunskapsöversikten gjordes ett antal antaganden för var i skogslandskapet utlakningen och metyleringen av kvicksilver är som störst. Med hjälp av ArcMap v9.3 kunde känsliga delar av området Krycklan pekats ut. Dessa områden sattes sedan in i en planeringssituation med frågeställningen hur en planering kan göras med målet att minimera kvicksilverutlakning och metylering av kvicksilver.

Kartor och geografiska data som använts i arbetet med GIS innefattar Skogsstyrelsens data över sumpskog i Västerbotten, jordartsmodell från Sveriges Geologiska Undersökning (SGU), digital elevation model (DEM) från Sveriges Lantbruksuniversitet (SLU) i samarbete med European Space Agency (ESA), Lantmäteriets fastighetskarta och ”key nearest neighbour”-data (kNN) från kNN-Sverige, Institutionen för skoglig resurshushållning SLU.

Antaganden:

- Metyleringsprocesserna är som mest koncentrerade till utkanten av myrarna således blir gränsen vid våtmarker en hotspot för metylering av kvicksilver och ska undantas drivning och avverkning. En buffertzona som sträcker sig tio meter utanför myren och tjugo meter in på myren anses extra känslig
- Områden som av skogsstyrelsen klassats som sumpskog antogs ha en större risk för att få vattenmättade jordar efter avverkning då grundvattenytan redan från början står högt i dessa områden. Skogsstyrelsens data över sumpskog i Västerbotten användes för att identifiera var dessa fanns.
- Bäcknära zoner och strandkanter vid sjöar är extra känsliga för framför allt körskador men även för avverkning då grundvattnet ofta står närmare markytan i dessa partier. Det är också visat i litteraturen att dessa områden har en hög metyleringsgrad.
- Områden med högt topografiskt index (TI; se förklaring nedan) är känsligare för kvicksilverutlakning då de höga flöden som högre TI indikerar innebär en större risk för att grundvattnet når upp i mårslagret vid t.ex. snösmältning, avverkning och körskador.

För att identifiera vad som klassats som torvmark användes en jordartsmodell från SGU.

Områden som klassats som torvmark klipptes ur och lades till ett nytt lager. På samma sätt skapades lager för sumpskog utifrån Skogsstyrelsens karta samt för vattendrag och sjöar från fastighetskartan. Verktöget som användes var ”clip”.

Buffertzoner (hotspots) runt torvmarker skapades 10 m utanför och 20 m in på torvmarken. För vattendragen och sjöarna skapades buffertzoner på 10 m utifrån Skogsstyrelsens allmänna rekommendationer (Skogsstyrelsen 2004). De områden som utgjordes av buffertzona gjordes till egna lager för torvmarker respektive vattendrag och sjöar.

Topografiskt index (TI) är ett mått på hur mycket vatten som flödar genom en punkt med hänsyn till lutningen i terrängen och beräknas med följande formel (Grabs m.fl. 2009):

$$TI_i = \ln\left(\frac{\text{Flowaccumulation}(a_i)}{\text{Slope}(s_i)}\right) \quad \text{formel 1}$$

Där a_i är ett raster som visar hur vatten ackumuleras i en cell beroende på hur vattnet flödar i cellerna runt omkring, det vill säga arean som dräneras till en viss punkt. s_i är lutningen i terrängen. Ett raster över TI togs fram med hjälp av höjdfördelningsrastret, DEM. Först användes verktyget "slope" för att få fram lutning i området (s_i). Utifrån detta lager gjordes ett raster med verktyget "flow direction" för att få ut riktningen på flödet för olika punkter, detta lager användes sedan som input för att få fram flödesackumuleringen med verktyget "flow accumulation". För att få fram ett raster över TI användes raster calculator där ovanstående formel användes.

Det nya lagret gjordes om med 10 gånger lägre upplösning med verktyget "aggregate" och klassificerades sedan om till tre klasser som visas i tabell 1. Klassindelningen gjordes utifrån lagrets fördelningsdiagram som visade antalet värden för varje TI-värde. Ca 10 % av de högsta värdena klassades som högt flöde. Till lågt flöde räknades de ca 50 % lägsta värdena och medelflödesklassen kom således att bli en klass med de resterande ca 40 %. Rastret gjordes om till polygoner och delades upp i tre lager för olika flödesklasser.

Tabell 1: Klassindelning över topografiskt index, klasserna står för låg, medelhög och hög avrinning.

Klass	Intervall TI
Lågt	-2,66 - 1,59
Medel	1,59 - 4,99
Högt	4,99 - 19,04

Nu fanns fyra lager med olika känslighetstyper, "hotspots" för metylering vid torvmark, sumpskog, bäcknära zoner och sjökanter samt tre klasser av TI. Eftersom de fyra olika känslighetstyperna sällan överlappar varandra men däremot alltid sammanfaller med någon flödesklass, identifierades tre olika känslighetsklasser genom att kombinera känslighetstyp med TI-klass:

- Klass A, ett kombinerat lager av alla de områden som identifierats som känsliga i någon form samt de med högst flöde (TI). Detta genom att använda "intersect" för alla känslighetstyper inklusive områden med högt flöde (TI = 4,99 - 19,04).
- Klass B, en känsligare klass där områden med ett medelhögt flöde (TI = 1,59 - 4,99) sammanföll med lagret för klass A. Lagret gjordes genom att klippa ut de områden från klass A som dessutom hade medelhögt flöde (TI).
- Klass C dvs. det lagret med känsligast områden, togs fram genom att identifiera områden som hade både högt flöde (TI = 4,99 - 19,04) samt någon annan form av känslighetstyp.

Lagren klipptes sedan mot det som på fastighetskartan identifieras som skogsmark. Den sammanlagda arean för de olika klasserna togs fram med verktyget "calculate areas" och attributtabellerna exporterades för att sedan öppnas i Microsoft Excel 2007. Detsamma

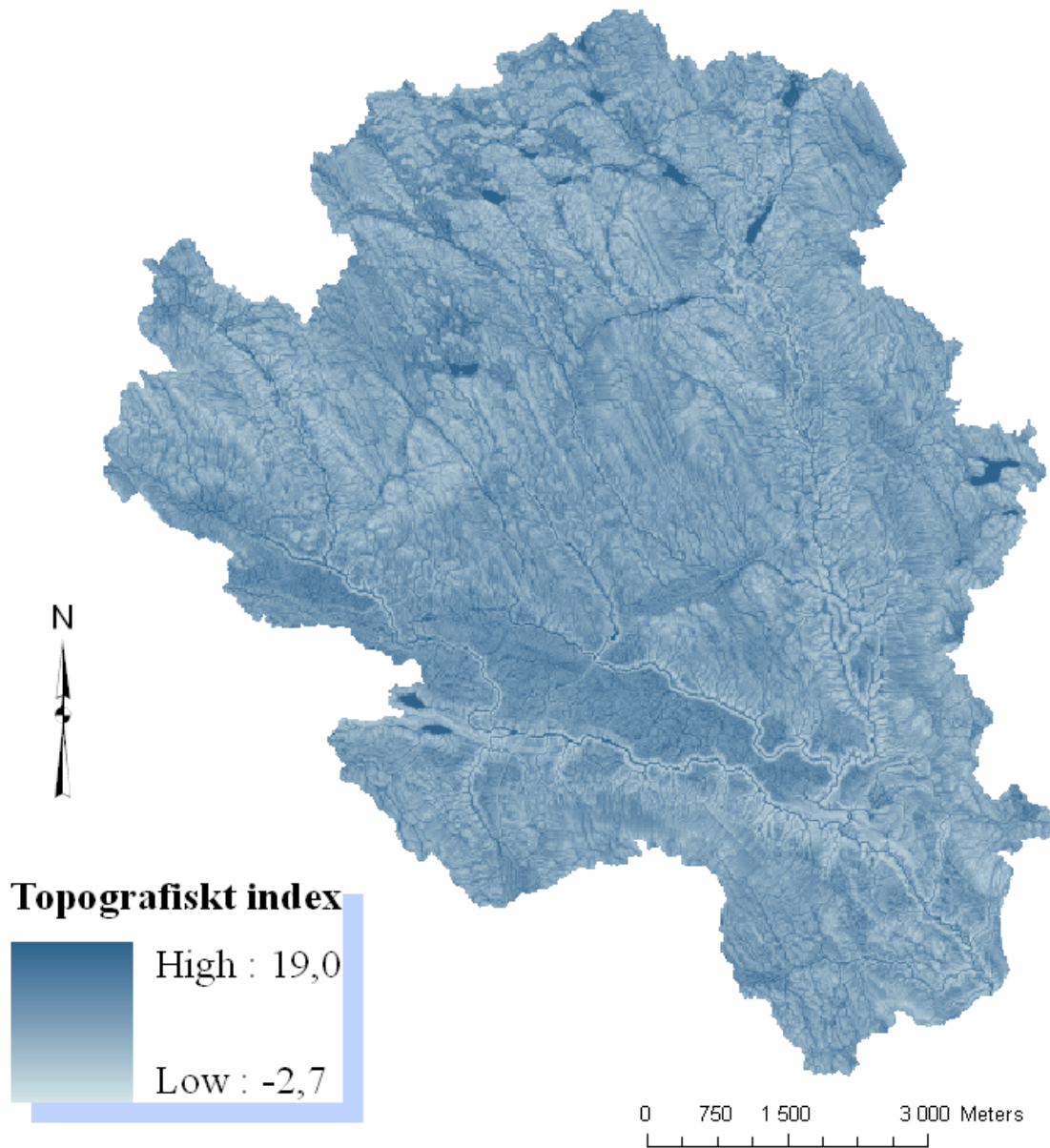
gjordes för fastighetskartans skogsmark inom gränserna för Krycklan. Med hjälp av Excel beräknades klassernas samt skogsmarkens sammanlagda areor. Andelen skogsmark som de olika klasserna utgör togs fram.

Heureka användes för att göra analyser över hela Krycklanområdet. Analysens syfte var att ta fram data för beräkning av minskade uttagsvolym och minskade inkomster som kommer av hänsynstagande till kvicksilver. För att kunna analysera i Heureka skulle varje helt bestånd identifieras i en skötselklass, eller en andel som ska undantas helt. Eftersom Heureka inte kan arbeta med flera hänsynsklasser samtidigt för ett bestånd antogs för klass A, att om mer än 50 % av beståndet bestod av känslighetsklassen får skogsbruk bedrivs men undantas från kalavverkning och endast skonsam markberedning genomförs. Gränsen på 50 % sattes utifrån att ett bestånd då till största delen innehåller känslig mark. För klass B antogs att om ett bestånd bestod av mer än 30 % av känslighetsklassen, skall hela beståndet klassas och får inte kalavverkas eller markberedas. Eftersom denna klass är känsligare än klass A sattes en lägre gräns för att hela beståndet ska klassas som klass B. Om ett bestånd innehöll flera känslighetsklasser så prioriterades klass B före klass A i analysen. Klass C skall undantas helt från skötsel och kunde beräknas som andelar av bestånd i Heureka. Analyserna i Heureka gjordes på 50 år med 5-års perioder.

Subjektivt valdes ett slutavverkningsmoget bestånd ut för planering av en avverkning. Bestånd 528 valdes utifrån att det innehöll flera av de egenskaper som definierats som känsliga, buffertzoner för vattendrag och torvmark samt sumpskog. Det hade en medelålder på 86 år, vilket ansågs vara en rimlig avverkningsålder, och en volym på 185 m³sk/ha. En bild över beståndet togs fram i GIS och planeringen gjordes utifrån kunskap i skogsskötsel i kombination med hänsyn till känsliga områden.

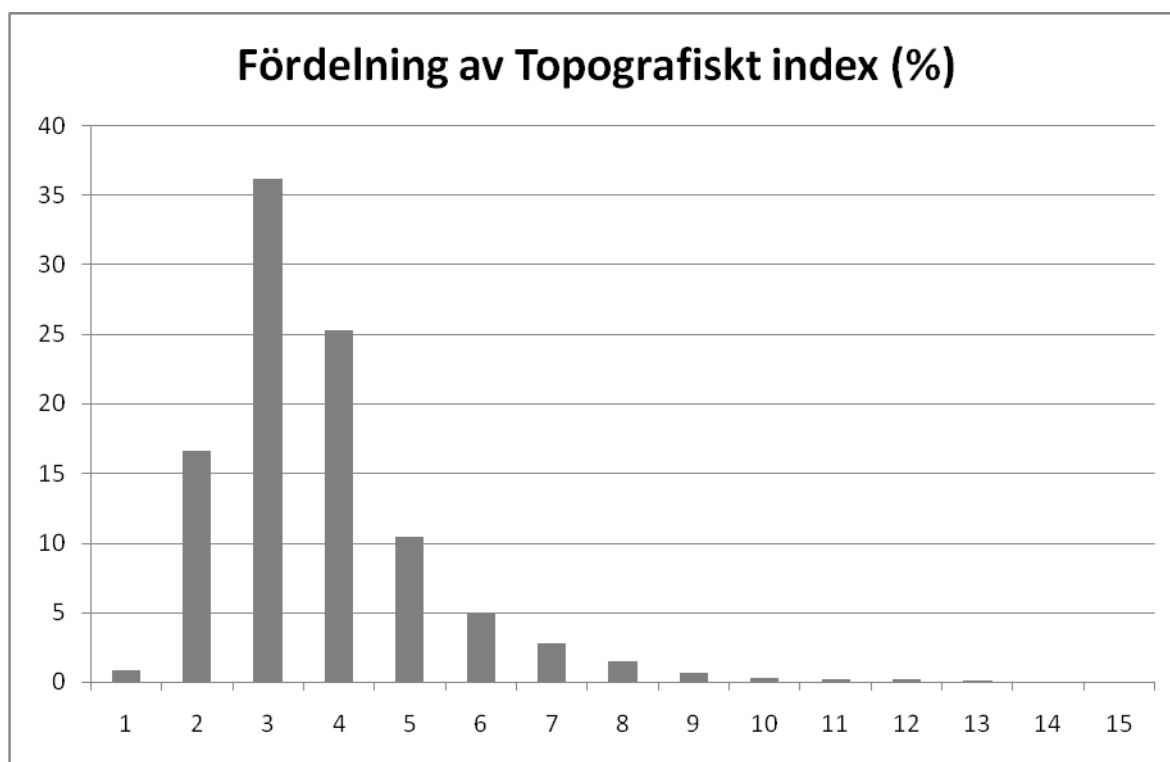
Resultat

Topografiskt index (TI) fördelas över Krycklan enligt figur 4 och 6. I figur 4 visas en gradvis fördelning av flödesmängden i form av TI med index från -2,7 till 19,0.



Figur 4: Fördelningen av topografiskt index över Krycklan. Fördelningen anges gradvis från låga till höga flöden.

Fördelningen av värdena på TI visas i figur 5, gränsvärdena redovisas i tabell 2. Fördelningen visade och verifierade att den överensstämde med andra liknande uträkningar av TI.



Figur 5: Fördelning av värden på TI utifrån gränsvärden i tabell 2.

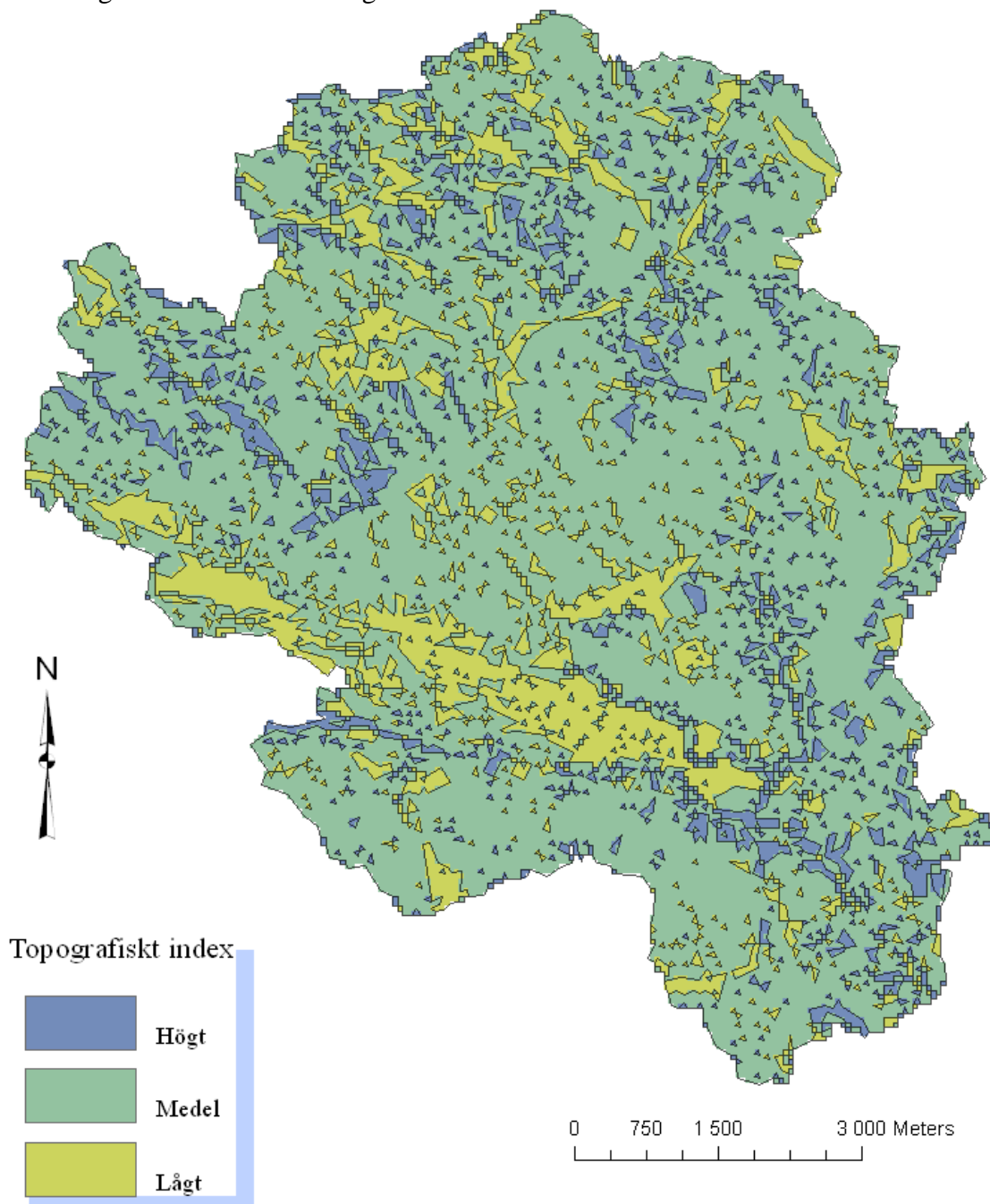
Tabell 2: Gränsvärden för TI vid en indelning på 15 klasser.

Klass	Värdeintervall	
1	-2,66 - -0,37	Lågt flöde
2	-0,37 - 0,48	
3	0,48 - 1,25	
4	1,25 - 2,10	Medelhögt flöde
5	2,10 - 2,95	
6	2,95 - 3,89	
7	3,89 - 4,91	
8	4,91 - 5,93	Högt flöde
9	5,93 - 7,04	
10	7,04 - 8,14	
11	8,14 - 9,42	
12	9,42 - 10,87	
13	10,87 - 12,49	
14	12,49 - 14,27	
15	14,27 - 19,04	

Tabell 1

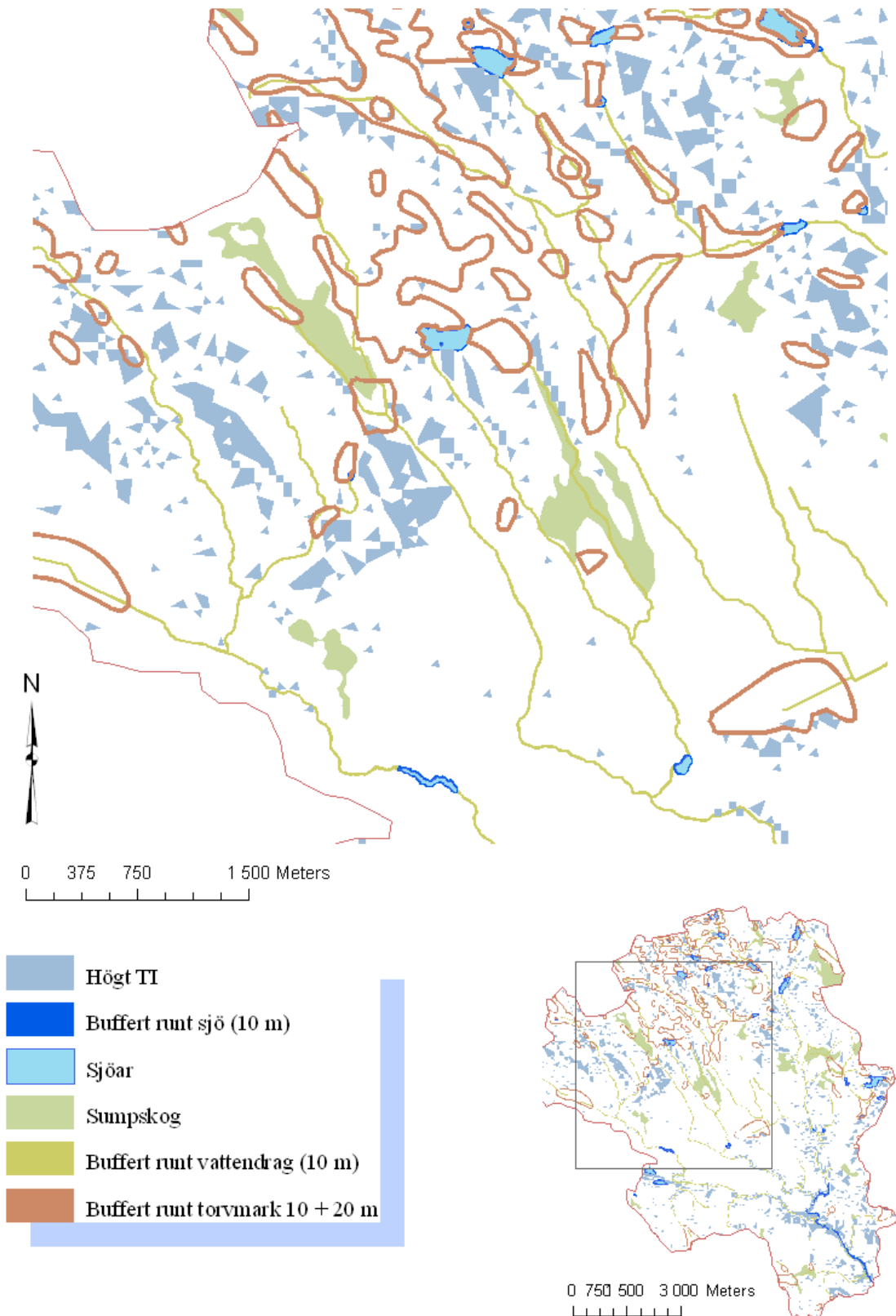
Klass	Intervall TI
Lågt	-2,66 - 1,59
Medel	1,59 - 4,99
Högt	4,99 - 19,04

Figur 6 visar en aggregerad bild av TI, ca 10 % av området hade högt flöde, ca 40 % medelhögt flöde och ca 50 % lågt flöde.



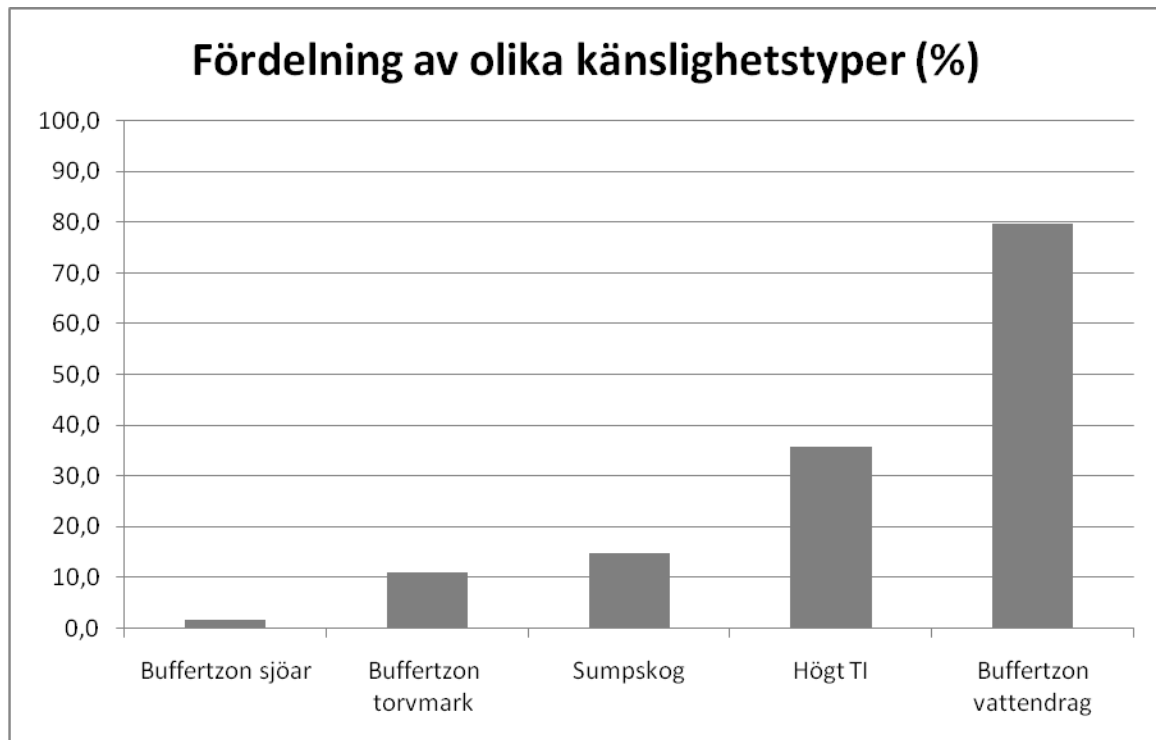
Figur 6: Resultat efter generalisering av TI till mer sammanhängande områden av högt, medelhögt och lågt flöde. Ca 10 % av de högsta värdena klassades som högt flöde. Till lågt flöde räknades de ca 50 % lägsta värdena och medelflödesklassen kom således att bli en klass med de resterande ca 40 %.

Områden som anses extra känsliga för kvicksilverutlakning har identifierats som områden med "hotspots" för metylering, sumpskog samt buffertzoner runt vattendrag och sjöar. Spridningen och fragmenteringen av de olika typerna av känslighet visas i figur 7.

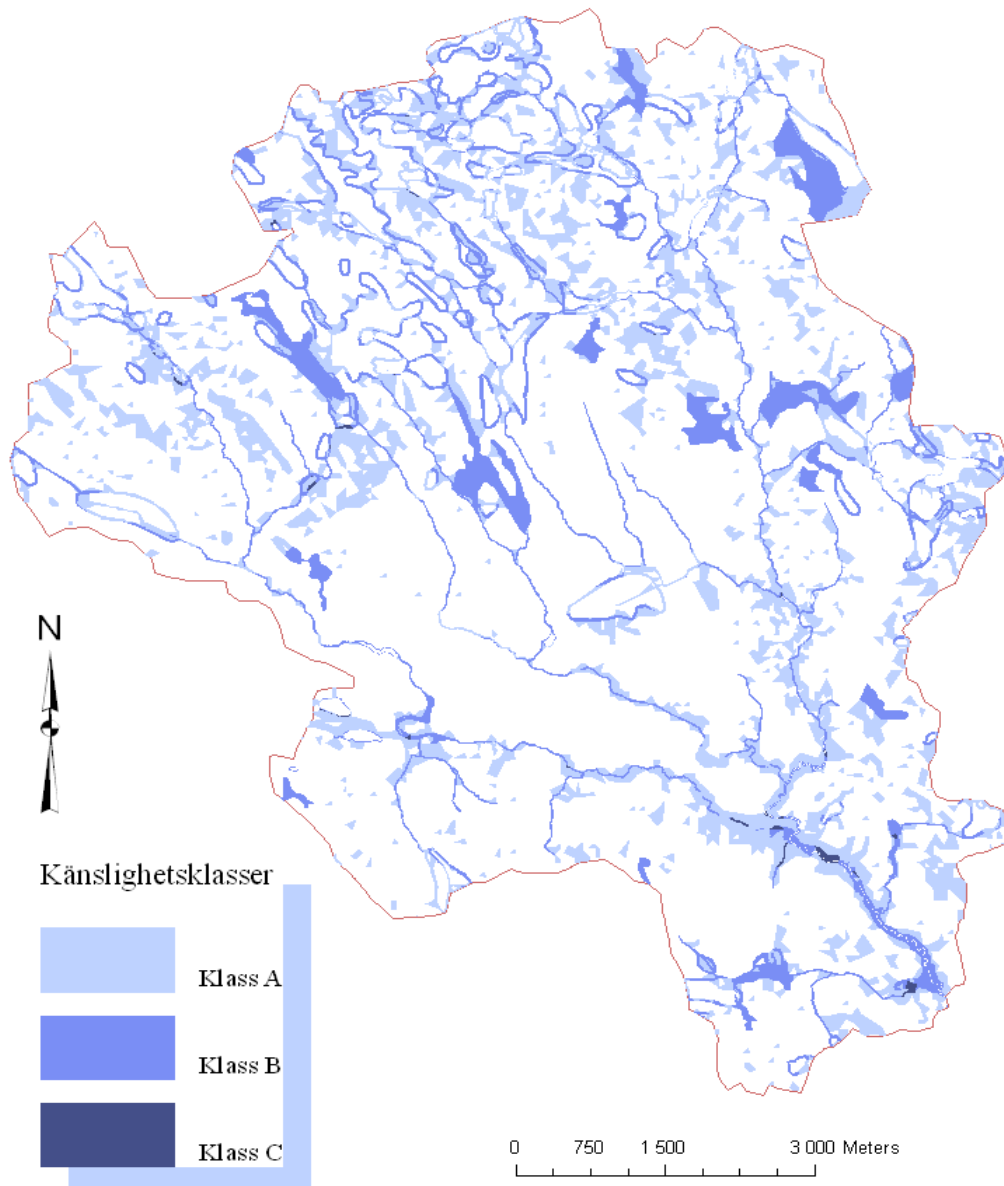


Figur 7: Fördelning av områden med olika känslighetstyper samt högt TI inom nordvästra delen av Krycklan. Här visas även sjöar.

I figur 8 visas hur stora andelar de olika typerna av känslighet utgjorde av den totala arean känsliga områden. Buffertzonen för vattendrag hade den största arean följt av högt TI. Den totala arean känsliga områden uppgick till över 100 % eftersom en del känslighetstyper överlappade varandra. Det är framför allt högt TI som överlappar andra känslighetstyper.



Figur 8: Fördelning av de olika känslighetstyperna samt högt TI, totala arean blir över 100 % eftersom olika typer kan överlappa varandra.

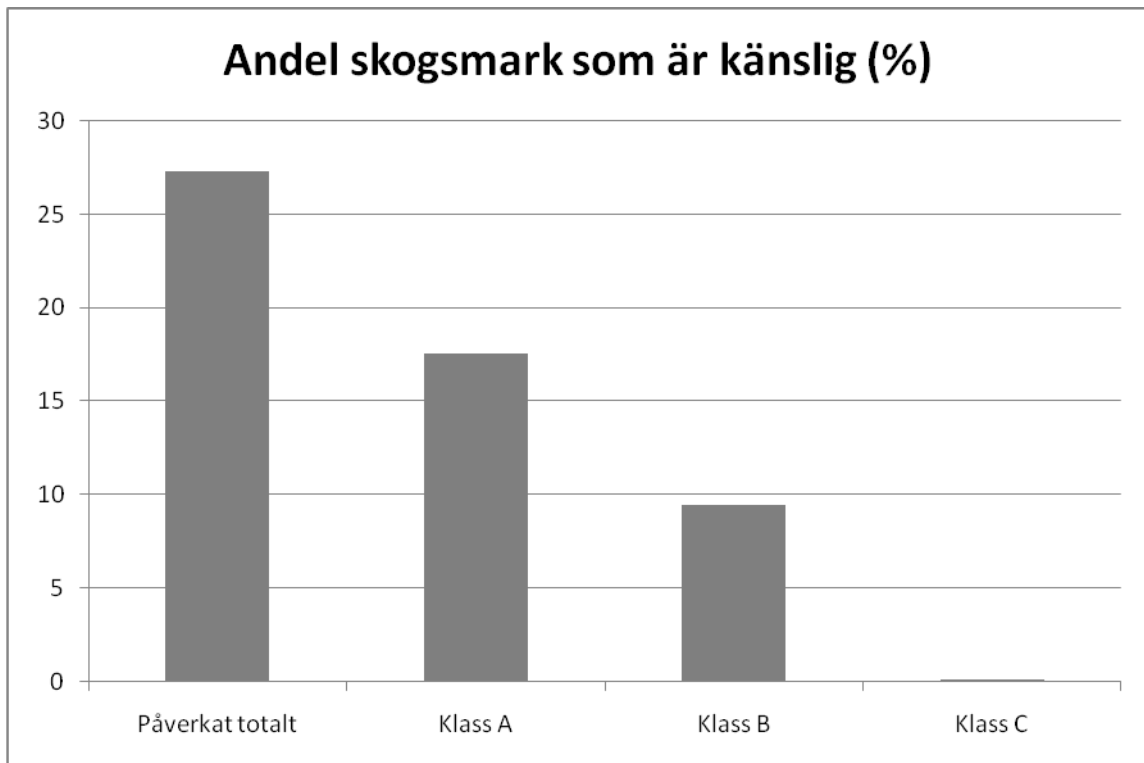


Figur 9: Fördelningen av områden av olika känslighetsgrad i området Krycklan, där klass C är de mest känsliga områdena. De övriga, vita områdena innehåller ingen identifierad känslighetstyp.

Olika känslighetsklasser fördelades över området Krycklan så som visas i figur 9.

- Klass A definieras som känsliga områden, där visst skogsbruk kan bedrivas men inte åtgärderna kalavverkning eller markberedning.
- Klass B är områden som har ett medelhögt flöde i kombination med en annan av de identifierade känsliga egenskaperna och bör undantas från all typ av skogsbruk som kan bidra till markskador.
- Klass C är områden med höga markflöden kombinerat med någon annan av de identifierade känsliga egenskaperna. Dessa områden är som mest känsliga för markstörningar i avseende på kvicksilver och ingen verksamhet som har en störande inverkan på marken bör förekomma.

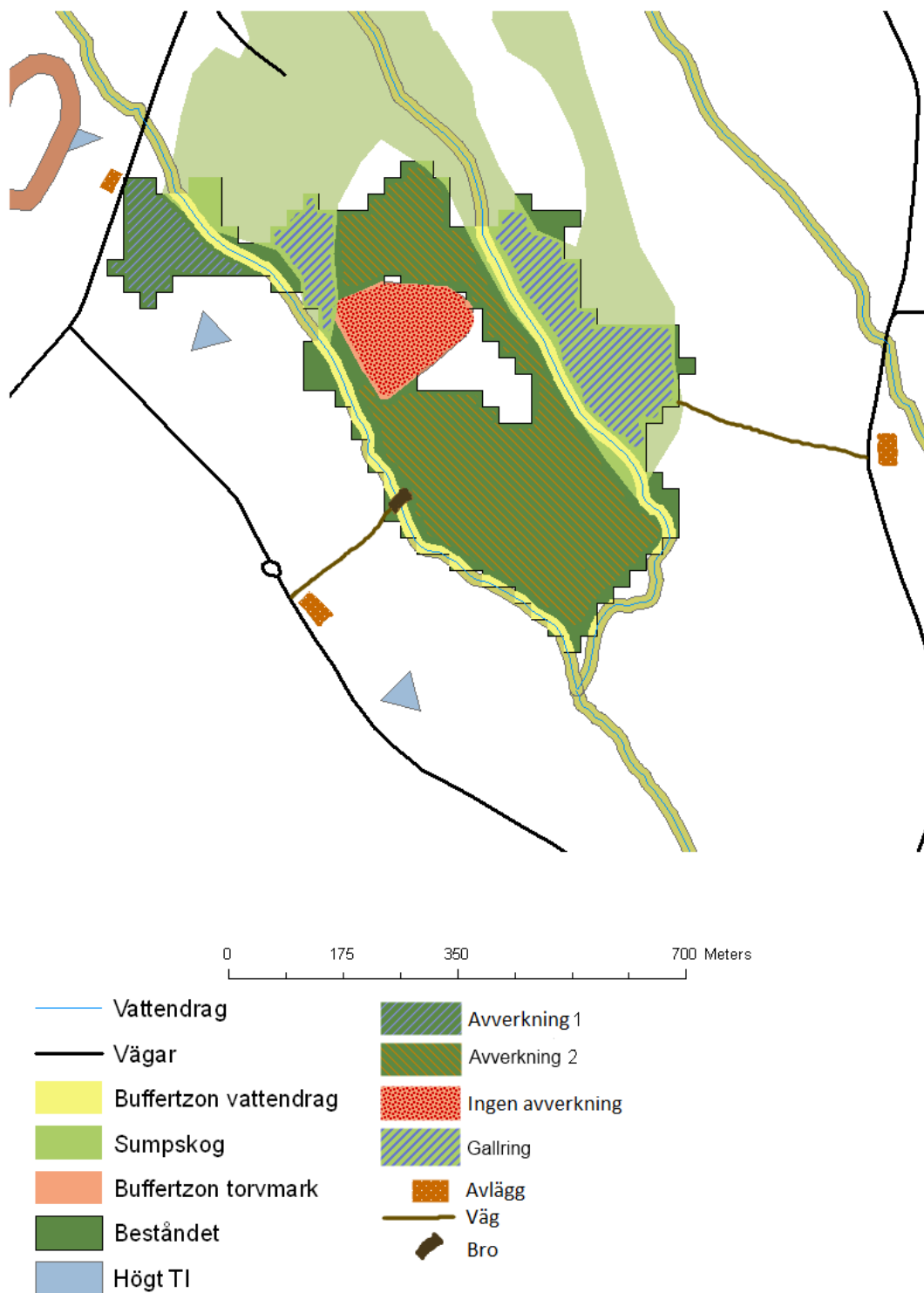
1519 ha eller ca 27 % av totala arealen har enligt vår undersökning klassats som känslig för kvicksilverutlakning. Dessa 27 % är fördelade i tre hänsynsklasser (figur 9 och 10).



Figur 10: Hur stor andel av skogsmarken som klassificerats som känslig, totalt och fördelat över klasser där klass A är minst känslig. Angivelser ges i procent av den totala arealen skogsmark i området Krycklan.

Krycklan är indelat i 904 bestånd, 78 % av dem innehöll delområden att ta hänsyn till. 20 % av de 904 bestånden innehöll mer än 50 % känsliga områden av klass A eller 30 % av klass B.

Att utöver vinstmaximering även ha som mål att minska utlakningen av kvicksilver från brukad skog i Krycklan innebar ett minskat volymuttag på 9,7 % och ett minskat nuvärde på 0,5 % utifrån analysen i Heureka.



Figur 11: Förslag på avverkningsplan utifrån hänsynstagande till kvicksilver i bestånd 528 i Krycklan.

I figur 11 visas ett förslag på avverkningsplanering i bestånd 528 i Krycklan. Detta bestånd innehöll flera känslighetstyper som krävde extra hänsyn vid avverkningsplaneringen utifrån målet att minimera kvicksilverutlakning. Medelåldern i beståndet var 86 år och volymen 185 m³sk/ha. Totala arean var 27,6 ha vilket här innebar en total volym på 5 110,6 m³sk. Beståndet var indelat i flera avverkningsområden (1 och 2) för att i möjligaste mån undvika körning vid vattendrag. Sumpskogen hölls hyggesfri och gallrades endast. En bro planerades

in vid transport över vattendrag in till den största avverkningen. De nydragna vägarna var mellan 200 och 300 m.

Diskussion

EU:s ramdirektiv för vatten (Naturvårdsverket 2007) och det hot som kvicksilver utgör för akvatiska system (Garcia 2009; Desrosiers 2006) pekar på hur viktigt det är att sträva efter att minimera kvicksilverutlakningen vid skogsbruksåtgärder. Det finns relativt lite forskning kring hur skogsbruksåtgärder kan anpassas i relation till kvicksilverutlakning vilket gör det svårt att dra slutsatser.

Vår undersökning har identifierat ett antal känslighetstyper, ”hotspots” för metylering i samband med torvmark, områden med sumpskog, buffertzoner runt vattendrag och sjöar samt områden med högt TI. Dessa är områden där det antagits att en störning kan påverka kvicksilverutlakningen i högre grad än i övriga områden. Det är däremot svårt att säga något om dess inbördes ordning, alltså vilken typ av område som är mest respektive minst känsligt. De olika känslighetstyperna samt högt TI fördelade sig utspritt över landskapet som visas i figur 7, detta antas försvåra skötselplaneringen om ett av målen är minskad utlakning av Hg. Torvmark har inte tagits med som en känslig parameter i sig, vilket räknas som en felkälla, endast en zon som sträckte sig 20 m utanför och 10 m in på torvmarken har räknats med. Hänsyn har inte heller tagits till högsta kustlinjen (Skyllberg m.fl. 2009) eller jordart vilka också kan tänkas ha betydelse för utlakning och metylering av kvicksilver.

Topografiskt index (TI) är enligt Grabs m.fl. (2009) ett bra riktmärke när det gäller att identifiera områden med höga flöden. De menar vidare att i dessa områden kan det antas att det är en större risk för att grundvattenytan ska nå de övre marklagren än i områden med låga flöden. Eftersom kvicksilver är associerat med organiskt material (Skyllberg m.fl. 2003) kan vi anta att risken för att kvicksilver utlakas i vattendrag är högre i områden med höga flöden dvs. högt TI, därför att grundvattenytan når de organiska jordlagren mer frekvent vid dessa förhållanden (Grabs m.fl. 2009). Som framgår av figur 4 så var resultatet efter att ha räknat ut TI väldigt högupplöst och svårhanterat, därför gjordes kartan om med lägre, mer lätthanterlig upplösning genom att generalisera och aggregera områdena till tre klasser för högt, medelhögt och lågt flöde (figur 6). Nackdelen med att generalisera och aggregera var att resultatet inte blev lika exakt, det var dock en övervägning som valdes för att göra det fortsatta arbetet i GIS effektivare och få ett resultat som möjliggjorde en områdesindelning över flödesintensitet. Gränsvärdena för högt-, medelhögt- och lågt flöde uppskattades relativt vad som fanns i området och inte utifrån en objektiv bild över vad som kan räknas som höga respektive låga flöden. Grabs m.fl. (2009) visar på hur högt TI sammanfaller med branta partier. Vid en jämförelse mellan höjddata, DEM, och vår indelning av TI-klasser syns en koppling som tyder på att vårt resultat var rimligt. Även vid jämförelse av vårt fördelningsdiagram (figur 5) över TI med andra fördelningsdiagram (t.ex. Sleepers River Watershed, Vermont, USA (Wolock, D.M. 1993)) tycktes resultatet visa på en rimlig fördelning för ett område som Krycklan på 6700 ha.

Arbetet med TI kan tyckas vara en oproportionerligt stor del i analysen. I relation till känslighetstyperna krävde arbetet med TI en komplicerad arbetsgång, detta utifrån liten erfarenhet av att arbeta med denna parameter. Bedömningen var ändå att det var en så pass viktig faktor att det var värt arbetet. Det finns andra metoder att identifiera var grundvattenytans nivå ligger nära markytan, t.ex. genom att titta på markfuktighetsdata. Valet

att räkna med TI baserades på att det fanns lättillgängligt data för att kunna göra de beräkningarna och att det är baserat på topografi, vilket inte förändras vid avverkning eller byte av trädslag.

Val av känslighetstyper baserades på antaganden kring vilka marker som skulle ha störst utlakning av Hg vid ett aktivt skogsbruk, framförallt slutavverkning och markberedning. Antagandena är baserade på den kunskap som finns kring metylering och Hg:s koppling till rörligheten av DOC (Skyllberg m.fl. 2003; Allan m.fl. 2009). Metylering sker i syrefattiga miljöer där det finns tillgång till organiskt material (Skyllberg m.fl. 2009). Bishop m.fl. (2009) menar även att en högre initial grundvattenyta ökar risken för att de organiska jordlagren ska hamna under vatten efter en avverkning p.g.a. minskad transpiration. Det i kombination med en ökad omrörning i jorden som följd av markberedning och körspår ökar risken för en högre mobilisering av kvicksilver ytterligare (Bishop m.fl. 2009). Områden med höga och medelhöga flöden samt andra marker som redan initialt har hög grundvattenyta, så som sumpskogar antogs därför vara känsligare än andra marker. I gränzonen runt våtmarker har Mitchell m.fl. (2008) visat på hur metyleringen är hög vilket lett till antagandet att dessa områden är extra känsliga för markskador. Skylberg m.fl. (2003) visar hur andelen MeHg av Hg_{tot} är högre i strandnära zoner, vidare visar Skylberg m.fl. (2009) hur metyleringen ökar efter avverkning som en följd av ökad tillgång på elektrondonatorer. Med grund i detta antogs att den strandnära zonen skulle vara extra känslig för kvicksilverutlakning vid avverkning. Det krävs fler studier som visar på hur kvicksilverutlakning från de områden som här antagits vara extra känsliga skiljer sig från andra områden som i tidigare studier inte visat sig vara ”hotspots” för metylering eller mobilisering av kvicksilver. Detta för att kunna styrka relevansen i val av känslighetstyper. Det skulle t.ex. kunna göras genom att jämföra utlakningen från områden som definierats som extra känsliga med övriga områden. Att ta hänsyn i sumpskogsområdena främjar andra intressen genom att gynna den biologiska mångfalden (Naturvårdsverket 2009). Avsättning av buffertzoner kring vattendrag och våtmarker har även en betydelse i relation till utlakning av DOC som även har en stark inverkan på pH (Laudon & Buffam 2008).

Vid första anblicken på kartan över de olika känslighetstyperna kan det tyckas att sumpskog skulle vara till ytan den största känsliga delen. Tabellen i figur 8 visar dock att det är buffertzoner kring vattendrag som höll den största arean. Detta förklaras av att även om sumpskogen är mer sammanhängande så var det till antalet få områden, medan vattendrag och således buffertzoner kring dem finns över hela Krycklanområdet. Fördelningen av olika känslighetstyper som visas i figur 8 visar att de känsliga områdena var utspridda och fragmenterade. Att en del parametrar så som sumpskogspartier var mer sammanhängande områden jämfört med t.ex. buffertzoner runt vattendrag som var mer utspridda över området gör att det kan tänkas bli olika svårt att identifiera olika typer av känsliga områden vid planeringssituationen. Det kan tänkas att fragmenteringen leder till ett större krav på kunskap vid planering av skogsbruksåtgärder. Resultaten visar även att det krävs hänsynstaganden i många olika bestånd.

Analysen av hur stora arealer som anses vara känsliga (figur 9) visade att strax över 27 % av området Krycklan definierats som känsligt utifrån de antaganden som gjorts dvs. över en fjärdedel. De känsliga områdena delades in utifrån var känslighetstyperna överlappar områden med högt, medelhögt respektive lågt flöde. 27 % är en relativt stor andel vilken klassades som känslig men eftersom alla de undersökningar som gjorts visar på ökad mobilisering av kvicksilver vid avverkning, oberoende av marktyp (Allan m.fl. 2009; Bishop

m.fl. 2008; Desrosiers m.fl. 2006; Ericksson 2003; m.fl.) så kan det ifrågasättas om det ens går att känslighetsklassa.

Det krävs även mer studier för att veta om de områden där olika känslighetstyper överlappar varandra är känsligare än de som bara klassas in i en känslighetstyp. Vid indelningen av känslighetsklasser var ändå utgångspunkten att en känslighetstyp i kombination med medelhögt eller högt flöde var känsligare än andra. Detta utifrån att det var de tre flödesklasserna som i rimlig utsträckning överlappade andra känslighetstyper. Känslighetsklasserna överlappade däremot mycket sällan varandra, och där det inträffade var det på mycket små ytor.

Resultaten från analysen i Heureka visar på att hänsyn till kvicksilver i Krycklan skulle innebära ett minskat nuvärde på 0,5 % och ett minskat volymuttag på 9,8 % med de klassificeringar som gjorts. Skillnaden i nuvärde kan påverkas av att stora delar av de undantagna områdena ändå undantas i standardfallet i Heureka, så som buffertzoner kring vattendrag etc. Det kan också bero på att det inom en del av de känsliga områdena inte innehöll speciellt stora volymer, av slumpen eller för att det troligen var mindre produktiva marker. Att jämföra nuvärdet säger inte heller allt om de ökade kostnader som hänsyn till kvicksilver skulle leda till, t.ex. ökade kostnader för en mer anpassad drivning.

De siffror som kom av analysen visar på att hänsyn till kvicksilver skulle ha en inverkan på skogsbrukets volymuttag och ekonomi. Dessa resultat är osäkra och kan mest ses som en fingervisning p.g.a. att programmet Heureka är begränsat så till vida att endast beståndsgränser kan utgöra gränser för hänsyn om det inte handlar om att avsätta områden helt och hållet. Beräkningarna i Heureka var därför på de bestånd som till vissa andelar var känsliga. Det var 78 % av Krycklans 904 bestånd som helt eller delvis krävde hänsyn. Det vill säga att vid avverkning i eller transport genom mer än tre fjärdedelar av bestånden krävs extra hänsynstaganden. Det visar även på att hänsyn till kvicksilver inte passade ihop med de beståndsgränser som finns. Vad gäller buffertzoner mot vattendrag är det mindre relevant, men vad gäller sumpskogar och torvmarker kunde bestånden vara bättre anpassade även vid strävandet efter andra måluppfyllelser.

Utifrån de höga halterna av Hg i fisk (Bishop m.fl. 2009) och det faktum att det antropogena nedfallet av Hg varit högt framför allt under 1900-talet (Schuster m.fl. 2002), så kan det antas att det finns mycket kvicksilver lagrat i svensk skogsmark.

Stora tunga maskiner som kan orsaka mycket körskador bör prioriteras bort för att istället använda lättare maskiner med tryckutjämnande band på hjulen som minskar risken för markskador. Användning av broar och avverkning vintertid då marken är tjälad är i alla områden att föredra eftersom tjälen bidrar till en ökad bärighet. Drivningen bör också anpassas för att undvika vägdragnings genom känsliga områden samt vidta samma åtgärder som vid avverkning för att minimera markskador. Det är även viktigt att utföra markberedningen så att det inte uppstår fåror som leder vattnet från skadad mark ner i vattendragen (Bishop & Eklöf 2010). Detta undviks genom att köra och framföra markberedningsaggregatet parallellt med vattendragen. En studie från Balsjö (Sørensen m.fl. 2009) indikerar på hur det vid slutavverkning framför allt är markberedningen som leder till stor utlakning av kvicksilver. Det behövs fler försök för att kunna styrka den slutsatsen. Vid hyggesupptagning kan grundvattenytans nivå ändras vilket kan gynna metyleringsprocessen om den höjs till de organiska jordlagren. Alternativa avverkningsformer som påverkar grundvattenytans nivå mindre än kalavverkning på grund av utelämnande av hyggesfasen (Erickson 2003) skulle kunna minska utlakningen av Hg t.ex. blädning där det är möjligt.

Alla skötselåtgärder som anpassas för att minimera kvicksilverutlakning påverkar primärt inte kvicksilvrets utlakningsrisk utan bidrar i första hand till att minska markskador och främja en stabil nivå för grundvattenytan, vilket i sin tur påverkar utlakningsrisken av kvicksilver (Bishop m.fl 2009).

I bestånd 528 gjordes ett förslag på avverkningsplan utifrån den kunskap som finns om hur det kan gå att minimera metylering och mobilisering av kvicksilver. I de delar av området som inte klassats som känsligt planerades en slutavverkning. I sumpskogsområdet planerades en gallring utifrån vad som lämpar sig i området, detta för att påverka grundvattenytans nivå mindre än vid kalavverkning. I buffertzonen till torvområdet och på torvmarken planerades ingen avverkning alls utan området avsattes helt från skogsbruk utifrån den kunskap som finns kring metylering i gränzonen mot torvmarker. Vilket överrensstämmer med generell hänsyn. Buffertzonen mot vattendrag undantogs helt från avverkning utifrån att studier visar hur dessa områden har en högre metyleringsaktivitet. Drivningen anpassades för att i så hög grad som möjligt inte köra i känsliga områden för att i större utsträckning undvika markstörningar där. Det ledde till tre avlägg vid olika platser längs vägnätet runt beståndet. Resultatet av planeringen skissas upp i figur 11. Det skulle vara intressant att titta mer på vad vår anpassade planering skulle ge för volymuttag och vad nettovinsten skulle vara i förhållande till att avverka endast med hänsyn till skogsvårdslagen. Eftersom vi saknade så detaljerat data och att det inte fanns tillfälle till fältbesök och inventering, har detta inte varit möjligt.

Enligt Bishop är traditionellt skogsbruk och minimal kvicksilverutlakning omöjligt att kombinera (Bishop & Eklöf 2010). Det är mycket svårt att kombinera ett skogsbruk med en minimering av kvicksilverutlakning då Bishop och Eklöf (2010) menar att det krävs mycket små markstörningar för att öka mobiliseringen av kvicksilver.

Med tanke på ovanstående åsikt och på alla de resultat som pekar på hur kvicksilverutlakningen ökar vid avverkning så är det svårt att säga något om, och i så fall till vilken grad, extra hänsynstaganden ger en minskad utlakning av Hg. Utifrån hur mycket kvicksilver som finns lagrat i svensk skogsmark är det för skogsbruket nödvändigt med mer kunskap för att Sverige ska kunna uppfylla EU:s ramdirektiv för vatten och säkra vattenkvaliteten.

Tillkännagivanden

Vi vill tacka våra handledare Jakob Schelker och Anneli Ågren som ställt upp och hjälpt till med tips, idéer och kunskap i det vetenskapliga skrivandet. Karin Öhman har varit till stor hjälp med analyser i Heureka, Mats Högström tackas för GIS-support. Skogsbibliotekets personal har varit till hjälp med litteratursökning.

Referenser

Allan, C.; Heyes, A.; Mackereth, R. (2009). Changes to groundwater and surface water Hg transport following clearcut logging: a Canadian case study *Ambio* 148 (1), 50-54.

Bishop, K.; Allan, C. J.; Bringmark, L.; Garcia, E.; Hellsten, S.; Högbom, L.; Johansson, K.; Lomander, A.; Meili, M.; Munthe, J.; Nilsson, M.; Porvari, P.; Skyllberg, U.; Sørensen, R.; Zetterberg, T.; Åkerblom, S. (2009). Forestry's contribution to Hg bioaccumulation in freshwaters: assessment of available evidence. *Roy. Swed. Acad. Agric. For.* 148 (1), 9–23.

Bishop, K.; Eklöf, K. (2010) Kvicksilver, metallernas transformer. Sveriges Radio P1, Vetandets värld. 2010-02-26 11:00.

Björkvald, L.; Buffam, I.; Laudon, H.; Mörth, CM. (2008). Hydrogeochemistry of Fe and Mn in small boreal catchments: The role of seasonality, landscape type and scale. *Geochimica et Cosmochimica Acta*,72, 2789-2804.

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 (8), 1734-1745

Erickson, B. (2003). Clear-cutting increases mercury in runoff. *Environ. Sci. Technol.* 37 (11), 200-201.

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.

Garcia, E. (2009). Forest harvesting and Hg accumulation in aquatic organisms from Canadian boreal shield lakes *Roy. Swed. Acad. Agric. For.* 148 (1), 27-33.

Grabs, T.; Seibert, J.; Bishop, K.; Laudon, H. (2009) Modeling spatial patterns of saturated areas: A comparison of the topographic wetness index and a dynamic distributed model. *Journal of Hydrology* 373, 15–23.

Johansson, K.; Aastrup, M.; Andersson, A.; Bringmark, L.; Iverfeldt, Å. (1991). Mercury in Swedish forest soils and waters – Assessment of critical load. *Water, Air, and Soil Pollution.* 56, 267-281.

Laudon H.; Buffam I. (2008) Impact of changing DOC concentrations on the potential distribution of acid sensitive biota in a boreal stream network. *Hydrology and Earth System Sciences* 12 (2), 425 -435

Mitchell C. P.J.; Branfireun B. A.; Kolka R. K. (2008) Spatial Characteristics of net methylmercury production hot spots in peatlands. *Environmental science and technology* 42 (4), 1010-1016.

Munthe J.; Hultberg H. (2003) Mercury and methyl mercury in run-off from a forested catchment – concentrations and fluxes, and the response to manipulations. *Water, Air, Soil Pollution Focus* 4, 607-618.

Naturvårdsverket (2007). Status, potential och kvalitetskrav för sjöar, vattendrag, kustvatten och vatten i övergångszon - en handbok om hur kvalitetskrav i ytvattenförekomster kan bestämmas och följas upp. (*Handbok/Naturvårdsverket*, 2007:4 utgåva 1). Bromma: Naturvårdsverket

Naturvårdsverket (2009) *Våtmarkstyper*. [Online] Tillgänglig: <http://www.naturvardsverket.se/sv/Arbete-med-naturvard/Skydd-och-skotsel-av-vardefull-natur/Vatmarker/Om-vatmarker/> [2009-10-26]

Porvari, P.; Verta, M.; Linjama, J.; Munthe, J. (2009). Forestry practices cause extreme mercury and methylmercury output from boreal forest catchments *Roy. Swed. Acad. Agric. For.* 148 (1), 34-37.

Porvari, P.; Verta, M.; Munthe, J.; Haapanen, M. (2003). Forestry Practices Increase Mercury and Methyl Mercury Output from Boreal Forest Catchments. *Environ. Sci. Technol.* 37, 2389-2393.

Ring, E.; Löfgren, S.; Sandin L.; Högbom, L.; Goedkoop, W. (2008). Skogsbruk och vatten: en kunskapsöversikt (Redogörelse 2008:3) Uppsala: Skogforsk

Schuster, P.; Krabbenhoft, D.; Naftz, D.; Dewayne, C.; Olson, M.; Dewild, J.; Susong, D.; Green, J.; Abbot, M. (2002). Atmospheric Mercury Deposition during the Last 270 Years: A Glacial Ice Core Record of Natural and Anthropogenic Sources. *Environ. Sci. Technol.* 36, 2303-2310.

Skogsstyrelsen (2004) *Kantzoner*. [Online] Tillgänglig: <http://www.skogsstyrelsen.se/episerver4/templates/SNormalPage.aspx?id=34498&epslanguage=SV> [2004-05]

Skyllberg, U.; Björkman, M.; Meili, M.; Björn, E. (2009). Elevated Concentrations of Methyl Mercury in Streams after Forest Clear-Cut: A consequence of Mobilization from Soil or New Methylation? *Environ. Sci. Technol.* 43, 8535–8541.

Skyllberg, U. (2003). Kvicksilver och metylkvicksilver i mark och vatten – bindning till humus avgörande för miljörisk. *Fakta skog* 11.

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.

Sørensen, 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.

Sørensen R.; Ring E.; Meili M.; Högbom L.; Sebert J.; Grabs T.; Laudon H.; Bishop K. (2009). Forest harvest increases runoff most during low flows in two boreal streams. *Ambio* 38, 357-363.

Wolock, D.M. (1993). Simulating the variable-source-area concept of watershed hydrology with TOPMODEL. *USGS Water-Resources Investigation Report 93-4124*, s33.