

Kvicksilverutlakning från växande, avverkad och stormskadad skog

Per Erik Karlsson Therese Zetterberg
Sofie Hellsten John Munthe
B 1767
December 2007

Rapporten godkänd:
2007-12-14



Peringe Grennfelt
Forskningsdirektör

Organisation IVL Svenska Miljöinstitutet AB	Rapportsammanfattning
Adress Box 5302 400 14 Göteborg	Projekttitel Kvicksilverutlakning från växande, avverkad och stormskadad skog
Telefonnr 031-725 62 00	Anslagsgivare för projektet Skogsstyrelsen
Rapportförfattare Per Erik Karlsson Therese Zetterberg Sofie Hellsten John Munthe	
Rapporttitel och undertitel Kvicksilverutlakning från växande, avverkad och stormskadad skog	
Sammanfattning I denna rapport redovisas resultaten från olika mätprogram gällande kvicksilverhalter i avrinningen från växande, slutavverkad och stormskadad skog. Den övergripande målsättningen har varit att besvara frågeställningen om skador orsakade av de senaste årens stormar har bidragit till att öka risken för förekomsten av höga halter av kvicksilver i insjöfisk i södra Sverige.	
Nyckelord samt ev. anknytning till geografiskt område eller näringsgren Kvicksilver, metylkvicksilver, skog, avverkning, stormen Gudrun	
Bibliografiska uppgifter IVL Rapport B1767	
Rapporten beställs via Hemsida: www.ivl.se , e-post: publicationservice@ivl.se , fax 08-598 563 90, eller via IVL, Box 21060, 100 31 Stockholm	

Förord

I denna rapport redovisas resultaten från olika mätprogram gällande kvicksilverhalter i avrinningen från växande, slutavverkad och stormskadad skog. Provtagningar och analyser har huvudsakligen finansierats av Skogsstyrelsen men även till viss del av FORMAS och Naturvårdsverket. Resultaten från provtagningar i IM-tytor (Integrerad Miljöövervakning, <http://info1.ma.slu.se/IM/>) har använts som jämförelse. Den övergripande målsättningen har varit att besvara frågeställningen om skador orsakade av de senaste årens stormar har bidragit till att öka risken för förekomsten av höga halter av kvicksilver i insjöfisk i södra Sverige. En del resultat har tidigare redovisats i Hellsten m. fl., 2006, Munthe m. fl., 2007.

Sammanfattning

- ◇ Information om halter av kvicksilver i avrinningen från växande, ej stormpåverkad skog finns endast från ett fåtal avrinningsområden, i synnerhet för metylkvicksilver där information för södra och mellersta Sverige endast finns från tre områden.
- ◇ Av de tre områden där information finns om halterna av metylkvicksilver från växande skog har ett område, Aneboda IM-område, halter som är nästan 10 ggr högre jämfört med de två övriga områdena.
- ◇ Det finns starka indikationer på att störningar av skogsmarken såsom körskador (orsakade av skogsmaskiner), slutavverkningar samt stormskador på ett betydande sätt ökar halterna av kvicksilver i avrinningen, både total- och metylkvicksilver.
- ◇ En kvantitativ bedömning av storleken på de ökande halterna av kvicksilver i avrinningen beror på tolkningen av de ”naturligt” höga halterna i avrinningen från växande skog i Aneboda IM-område; räknas Aneboda in bland data för växande skog blir de beräknade ökningarna av kvicksilver i avrinningen från skogsmark utsatt för avverkning/stormskador måttlig; räknas Aneboda inte in blir ökningen orsakad av avverkning/stormskador i storleksordningen en faktor 6, både för total- och metylkvicksilver
- ◇ För avrinningen från Aneboda IM-område finns ett starkt positivt samband mellan halterna av kvicksilver och organiska ämnen, både för total- och metylkvicksilver medan så inte är fallet för området Gårdsjön F1, vilket delvis kan förklaras med att organiska ämnen förekommer i olika koncentrationsområden.
- ◇ Det finns ett negativt samband mellan halterna av metylkvicksilver och flödes hastigheten hos avrinningen både för Gårdsjön F1 och Aneboda IM-område.
- ◇ Det finns så vitt vi känner till ännu inga bevis för att halterna av kvicksilver i fisk har ökat inom något område som ett resultat av stormen Gudruns verkningar. Vidare undersökningar behövs dock för att ge ett slutligt svar.

Utifrån nuvarande kunskapsläge gör vi bedömningen att kraftiga störningar av skogsmarken såsom vid slutavverkning eller betydande stormskador medför en ökad utlakning av kvicksilver till vattendragen. Förutsägelser om storleken på denna ökning beror på jämförelseobjekten, där det i vissa fall finns även opåverkade områden med växande skog med en hög utlakning av kvicksilver. Dessa områden karakteriseras av en stor andel våtmarker inom avrinningsområdet samt höga halter av organiska ämnen i avrinningen.

I alla områden där vi har konstaterat en påverkan på skogsmarken från körskador, slutavverkning eller stormskador har vi funnit höga halter i avrinningen framför allt av metylkvicksilver. Tyvärr har vi för flertalet av dessa områden ingen information om halterna av löst organiskt material i avrinningen för tiden före markstörningen.

Vi gör bedömningen att de typvärden för koncentrationerna av total- och metylkvicksilver som användes tillsammans med årliga värden för avrinning för en preliminär utvärdering av stormens effekter (Munthe m.fl. 2007) i stort varit rimliga. För framtida förfinade analyser är det möjligt att använda separata typvärden för kvicksilver-koncentrationer för sommar respektive vinterperioder. Vidare bör värdena användas med försiktighet för områden med ”naturligt” förekommande höga halter av organiska ämnen i avrinningen.

För att få ett slutligt svar på frågan om i vilken utsträckning slutavverkningar och stormskador leder till en ökad utlakning av kvicksilver från skogsmarken krävs framförallt mätningar från fler områden med växande, ej stormpåverkad skog för att fastställa nivån på utlakningen av kvicksilver från ”opåverkad” skog. Är halterna av kvicksilver alltid höga i avrinningen från områden med ”naturligt” höga halter av organiska ämnen? Det krävs vidare bättre kunskaper om vilka processer i marken, och hur de påverkas av framförallt hydrologin, som avgör storleksordningen på kvicksilverutlakningen. Dessutom får vi avvakta ytterligare analyser av kvicksilverhalter i fisk från de mest stormpåverkade områdena i södra Sverige. En viktig fråga där vi saknar kunskap är betydelsen av olika retentionsmekanismer som kan fördröja transporten av en eventuell ökad utlakning från de små vattendragen i skogsmarken ut till de större sjöarna.

Innehållsförteckning

Sammanfattning.....	2
1 Inledning.....	5
2 Syfte.....	5
3 Metodik.....	6
3.1 Utlakning från växande skog.....	6
3.2 Utlakning från föryngringsavverkad skog.....	7
3.3 Utlakning från stormpåverkad skog.....	9
3.4 Analysmetodik.....	10
4 Resultat.....	10
4.1 Tillvägagång och översikt.....	10
4.2 Utlakningen från växande skog.....	10
4.2.1 Inledande första analys.....	10
4.2.2 Djupgående analys.....	11
4.3 Utlakning från avverkad och stormpåverkad skog.....	15
4.3.1 Inledande första analys.....	15
4.3.2 Djupgående analys.....	15
4.4 Relation mellan halterna av kvicksilver och organiska ämnen i avrinningen samt med avrinningsvolymerna.....	21
4.5 Behöver typvärdena för kvicksilver i avrinningen från växande och avverkad/stormskadad skog revideras?.....	25
4.5.1 Skäl att revidera.....	25
4.5.2 Principer för nya typvärden.....	26
4.5.3 Nya typvärden för växande och stormskadad skog.....	27
4.5.4 Argument för och emot att utelämna data för Aneboda från beräkningarna för växande skog.....	29
4.6 Kvikksilverhalter i fisk före och efter stormen.....	30
5 Övergripande slutsatser.....	30
6 Tack.....	31
7 Referenser.....	32

1 Inledning

På senare år har skogsbrukets betydelse för utlakningen av kvicksilver till sjöar och vattendrag uppmärksammas i media efter rapporter om kraftiga ökningarna efter påverkan av skogsmaskiner (Munthe & Hultberg, 2004) och skogsavverkning/markberedning (Porvari m. fl., 2003). Studier i Kanada har även visat på ett samband mellan föryngringsavverkning och halter i fisk (Garcia & Carignan, 2000; Garcia & Carignan, 2005), zooplankton (Garcia & Carignan, 1999) och bottenfauna (Desrosiers m. fl., 2006).

En stor del av det kvicksilver som vi idag återfinner i miljön beror på det senaste århundradets nedfall av luftföroreningar. I skogsmarken har kvicksilvernedfallet till stor del ackumulerats i humuslagret. Det beror på att kvicksilver binder mycket hårt till markens organiska material. Skogsmarken kan därför betraktas som en buffert mot utlakning till omgivande ytvatten. Det finns emellertid en oro att olika störningar av skogsmarken t ex slutavverkning eller stormskador kan öka utlakningen av kvicksilver från skogsmarken (t. ex. Bishop & Åkerblom, 2006). En ökad utlakning kan vara en bidragande orsak till att vi idag har tusentals sjöar med kvicksilverhalter i fisk som överstiger Livsmedelverkets gränsvärden (0.5-1 mg/kg beroende på fiskart).

På uppdrag av Skogsstyrelsen har IVL Svenska Miljöinstitutet fått i uppdrag att göra en översiktlig kartläggning över vilka koncentrationer av kvicksilver som förekommer i avrinningsvattnet från föryngringsavverkad skog. Föryngringsfasen för skog (då huvuddelen av beståndet slutavverkas), är en kritisk period under en skogs generation som ofta medför ökad utlakning av flera miljö-påverkande ämnen såsom kväve och kvicksilver. Studien utfördes under 2005, samma år som stormen Gudrun drabbade stora delar av södra Sverige. De skador som Gudrun orsakade i form av fällda träd resulterade i att arealen kalavverkad skog ökade kraftigt på kort tid (Skogsstyrelsen, 2006). Studierna kompletterades därför med mätningar från stormskadad skog eftersom utlakningen från stormfällda ytor kan liknas vid den från hyggen.

2 Syfte

Syftet med projektet har varit att beskriva utlakningen av kvicksilver från växande, slutavverkad och stormfälld skog i södra Sverige.

Detta har uppnåtts genom att

- Sammanställa tillgängliga mätningar av kvicksilverhalterna i avrinningen från växande, slutavverkad och stormskadad skog
- Söka samband mellan halterna av kvicksilver och olika kemiska och fysikaliska egenskaper hos avrinningen
- Belysa de bevis som finns för att störningar av skogsmarken leder till en ökad utlakning av kvicksilver
- Granska och revidera befintliga typvärden för kvicksilverutlakning från växande, avverkad och stormskadad skog

3 Metodik

3.1 Utlakning från växande skog

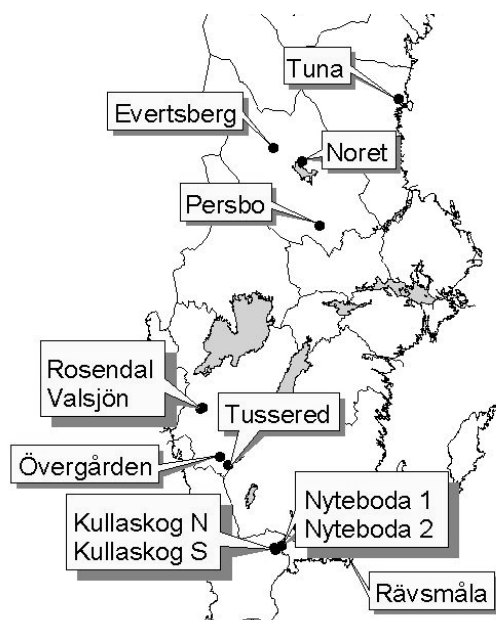
Uppgifterna om kvicksilverhalter (Total kvicksilver, TotHg och Metylkvicksilver, MeHg) i avrinningsvattnet från växande skog är få, i synnerhet för MeHg. Uppgifterna om TotHg och MeHg i avrinningen från växande skog bygger på data från olika perioder som i vissa fall sträcker sig tillbaka till 1987. De bäckar som ingår är Gårdsjön F1 (TotHg, MeHg), Aneboda IM-område (TotHg, MeHg), Kindlahöjden IM-område (TotHg, MeHg), Gammtratten IM-område (TotHg, MeHg), Pipbäcken (TotHg), Lommabäcken (TotHg), Ringsmobäcken (TotHg) och Sågebäcken (TotHg). Det geografiska läget för dessa mätplatser visas i Figur 1. Fyra av vattendragen (Gårdsjön F1, Aneboda, Kindlahöjden och Gammtratten) ingår i den integrerade miljöövervakningen medan resterande vattendrag är så kallade nationella referensvattendrag. Data finns tillgängligt på Institutionen för Miljöanalys hemsida (www.ma.slu.se).



Figur 1. Det geografiska läget för olika mätplatser där provtagning av kvicksilverhalter gjorts i avrinningen från växande och stormpåverkad skog.

3.2 Utlakning från föryngringsavverkad skog

Under våren 2005 genomfördes en kampanjmätning på tretton föryngringsavverkade skogsytor, fördelade i södra och mellersta Sverige (Figur 2). Mätningarna utfördes i samarbete med personal från Skogsstyrelsen och berörda markägare. Områdena skiljer sig åt bland annat med avseende på hyggesstorlek, trädslag, och andel våtmark inom avrinningsområdet (Tabell 1). Tidpunkten för slutavverkning varierar mellan ytorna men majoriteten av hyggerna avverkades under 2003. Vid själva provtagningstillfället var hyggerna således mellan 1-3 år gamla. Provtagning ägde rum i det avrinnande vattnet utom i ett fåtal fall där bäckar saknades (Valsjön). Uppgifter om kvikksilverhalter i avrinningen från slutavverkad skog har även hämtats från Gårdsjön området F2, vilket slutavverkades i maj 1999. Området F2 ligger alldeles intill Gårdsjön IM-område F1.



Figur 2. Mätningar av kvikksilverhalter i avrinningen utfördes på 13 hyggerna fördelade i södra och mellersta Sverige.

Tabell 1. Beskrivning av områden med slutavverkning där provtagning gjorts för halter av kvicksilver i avrinningen.

Lokal	Län	Avverkat	Trädslag	Storlek hygge (ha)	Markberett	Hyggets omfattning (%) [*]	Våtmark ^{**}	Flöde (l min ⁻¹) ^{***}	Provtagnings datum	Kommentar
Kullaskog S	M	2002/2003	gran	8	Kraftig harvning	90	ja	20	2005-01-04	
Kullaskog N	M	2002/2003	gran	1.5	nej	100	nej	1	2005-01-04	Nedan brant sluttning
Nyteboda 1	M	2003/2004	gran, blandskog	4	nej	100	nej	2	2005-01-04	Dike
Nyteboda 2	M	2003/2004	gran, blandskog	4	nej	100	nej	0.5	2005-01-04	Ytligt rinnande
Rävsmåla	K	2004/2005	gran, blandskog	16	sönderkört	100	delvis	<0.5	2005-01-04	Grönt prov, mikroalger?
Tussered	O	2003/2004	gran	3	ja	100	nej	1	2005-04-13	
Övergården	O	2003/2004	gran	12	sönderkört	100	fuktigt	<0.5	2005-04-13	Varit en fuktig granskog, mkt vitmossa kvar
Rosendal	O	2003/2004	gran	50	nej	50	ja	60	2005-04-19	Förvånande orörd mark
Valsjön	O	2003/2004	bland, barr	18	?	100	nej	sjö	2005-04-19	Prov från sjöns utlopp, relativt lågt flöde.
Persbo	W	2003-07	gran	61	nej	90	ja	1	2005-06-09	Normala körsador
Noret	W	2003-11	tall	5	nej	50	delvis	150	2005-06-13	Mindre blötare partier av vitmossa
Evertsberg	W	2004-04	gran	26	nej	100	ja	1200	2005-06-15	Lindriga körsador
Tuna	X	2003-10	gran	5.2	ja	?	?	0	2005-06-23	Inga körsador

*hur stor del av avrinningsområdet som omfattas av hygget

**om det finns en betydande våtmark inom avrinningsområdet

***uppskattat flöde

3.3 Utlakning från stormpåverkad skog

Efter stormen Gudruns framfart den 8-9 januari 2005 kompletterades pågående mätningar i tolv vattendrag med analys av TotHg och MeHg (Tabell 2). Områdena valdes ut med avseende på varierande grad av stormpåverkan. Försöksområdena ingår i en rad olika projekt och finns beskrivna i Larsson & Westling, 1997 (SKOKAL), Larsson m. fl., 2003 (NISSAN), Ugglå & Westling, 2003 (LIVG). Data för PMK- och IM-bäckarna återfinns på Institutionen för Miljöanalys hemsida (www.ma.slu.se). Den utökade provtagningen gjordes vid fyra tillfällen under 2005 och 2006. Den första provtagningen ägde rum i september 2005 och den sista i maj 2006.

Stormskadebedömningen grundar sig på bildanalyser, inventering i fält och muntliga uppgifter. Under 2005 genomförde Skogsstyrelsen en storminventering i SKOKAL- och NISSAN-området (Erlandsson & Anderson, 2005). Inventeringen utfördes under sommaren 2005. Stormskadorna beskrevs utifrån en fyrgradig skala: nedblåst (> 75 % av beståndet stormfällt), svårt sönderblåst (50-75 % av beståndet stormfällt), sönderblåst (25 % av beståndet stormfällt) och slutligen mindre skador (<25 % av beståndet stormskadat). Dokumentering av stormskadorna i Pipbäcken övre grundar sig på en bildanalys från Skogsstyrelsen medan stormskadorna i Aneboda, G3 och G30 baseras på muntliga uppgifter (Fredrik Zetterqvist, Asa Försökspark, SLU).

På grund av skillnader i metodik vid stormskadebedömningen har vi för enkelhetens skull reducerat antalet skadeklasser till tre: kraftig, måttlig respektive liten. Observera att det föreligger vissa problem i att bedöma graden av påverkan. Ska exempelvis en kraftig skada i en mindre del av avrinningsområdet betraktas som mer betydelsefull än en liten skada över en större del av avrinningsområdet? Troligtvis är även avståndet från vattendraget betydelsefullt. I denna rapport har graden av skada och arealen varit vägledande vid bedömningen.

Tabell 2. Beskrivning av tolv vattendrag från avrinningsområden i södra Sverige med olika grad av stormskador där provtagning skett för kvicksilverhalter i avrinningen.

Lokal	Projekt	Län	Koordinater	Area (ha)	Stormskada	Kommentar
G2R	SKOKAL	G	633750/143692	179	Måttlig	
Ni2	NISSAN	N		312	Måttlig	Ask + kalkbehandlad
Ni4	NISSAN	N	631301/133274	200	Måttlig, ej upparbetad vid mättillfällena	
Ni5	NISSAN	N	631178/133311	20	Måttlig	
Ni10	NISSAN	N	630924/133449	10	Kraftig	
Ni12	NISSAN	N	630960/133541	5	Liten	Delvis avverkad 1999
Ni13	NISSAN	N	630950/133370	20	Kraftig	Ask + kalkbehandlad
Ni14	NISSAN	N	630994/133415	14	Måttlig men kraftiga körsador	Ask + kalkbehandlad
G3	LIVG	G	633571/143919	449	Ringa	Buffertzon kring vattendrag
G30	LIVG	G	143940/633182	415	Ringa	
Pipbäcken övre	PMK	N	633070/131710	73	Liten, men stor skada närmast bäcken	
Aneboda	IM	G	633235/142395	18.9	Liten, 3.3 ha helt stormfällda bestånd, vissa grupper som ej utgör egna bestånd enstaka, viss del nära bäcken, allt kvar ingen upparbetning	Storminventering av Bo Thulin, Nässjö SKS. Uppgift från Stefan Lövgren

3.4 Analysmetodik

Bäckvattenproverna analyserades av IVL Svenska Miljöinstitutet AB med avseende på totalkvikksilver och metylkvikksilver. Analyserna utfördes på ofiltrerade prover.

4 Resultat

4.1 Tillvägagång och översikt

I ett första steg utvärderades typvärden för kvikksilverhalter i avrinningen från områden med växande, slutavverkad och stormskadad skog utifrån alla tillgängliga mätvärden från prover tagna året runt. I denna analys angavs median, max och min värden. Denna analys gjordes under en stor tidspress och framtagna medianvärden användes för yttäckande beräkningar av inverkan av stormfällan på avrinning av kvikksilver baserat på årliga värden för avrinningsvolymerna från storskaliga avrinningsområden (Hellsten m. fl., 2006, Munthe m. fl., 2007)

I ett andra steg utvärderades halterna av kvikksilver i avrinningen för vissa områden, med särskilt omfattande tidsserier och där både Tot- och MeHg analyserats, utifrån variationer mellan olika årstider etc. Utifrån dessa mer detaljerade analyser utvärderades om föreslagna typvärden för kvikksilverhalter i avrinningen från olika skogområden var i behov av revidering. Slutligen utvärderas resultaten i relation till rapporterade halter av kvikksilver i fisk i sjöar från Kronobergs län.

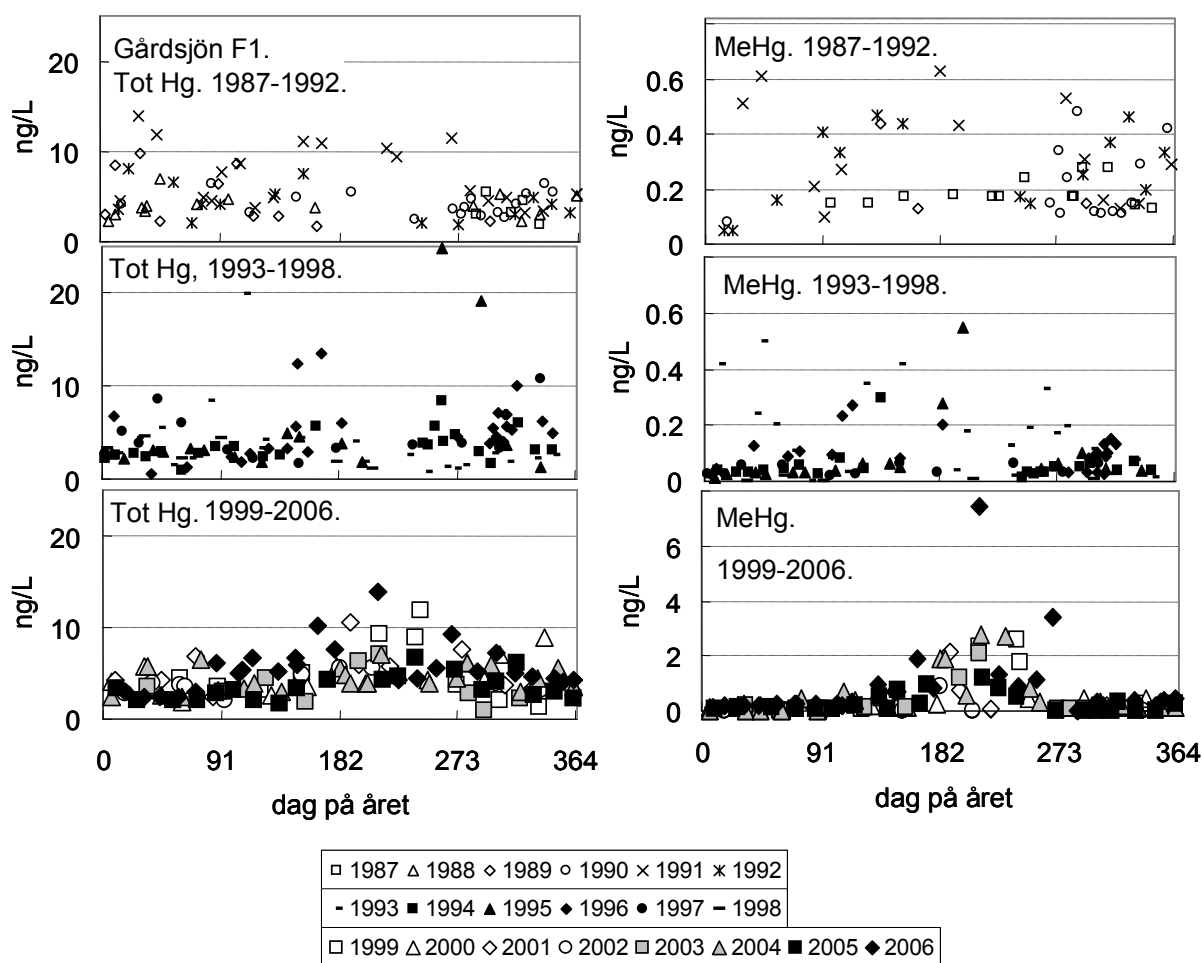
4.2 Utlakningen från växande skog

4.2.1 Inledande första analys

Den inledande analysen av kvikksilverhalter i avrinningen från växande skog byggde på uppgifter från åtta vattendrag i södra och mellersta Sverige, vilka beskrivs i sektion 3.1 ovan. Mätperioderna sträckte sig vid tiden för denna analys från 1987 fram till och med december 2004. Senare data fanns tillgängliga, men användes inte i sammanställningen på grund av osäkerheter kring vilken omfattning områdena hade drabbats av stormen Gudrun. Koncentrationen av TotHg varierade mellan 0.59-36.3 ng/L (median 4.1) och av MeHg mellan 0.002-6.15 (median 0.12). Observera att antalet mätvärden var högre för TotHg jämfört med MeHg vilket innebar att osäkerheten i medianvärdet var högre för MeHg.

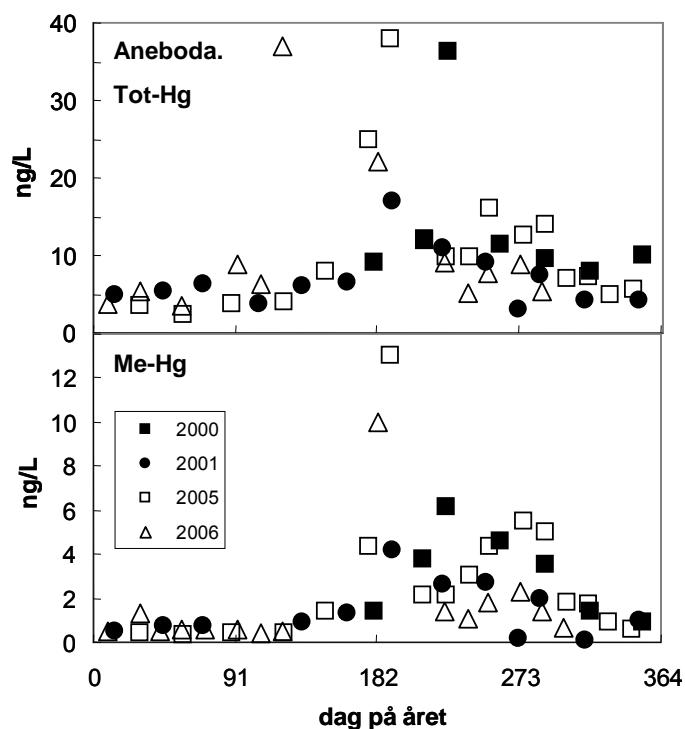
4.2.2 Djupgående analys

Halterna av både Tot- och MeHg i avrinningen från IM-området Gårdsjön F1 (Figur 3), öster om Stenungsund, förhöll sig relativt konstanta under 12-års perioden 1987-1998, med små variationer mellan olika årstider. Halterna av TotHg överskred sällan 10 ng/L och låg i de flesta fall runt eller under 5 ng/L. MeHg överskred aldrig 0.7 ng/L under perioden och låg i de flesta fall runt eller under 0.1-0.2 ng/L. Efter uppträdandet av körskador i området under våren 1999 ökade halterna av MeHg dramatiskt, vilket behandlas nedan. Halterna av TotHg påverkades i mindre utsträckning.



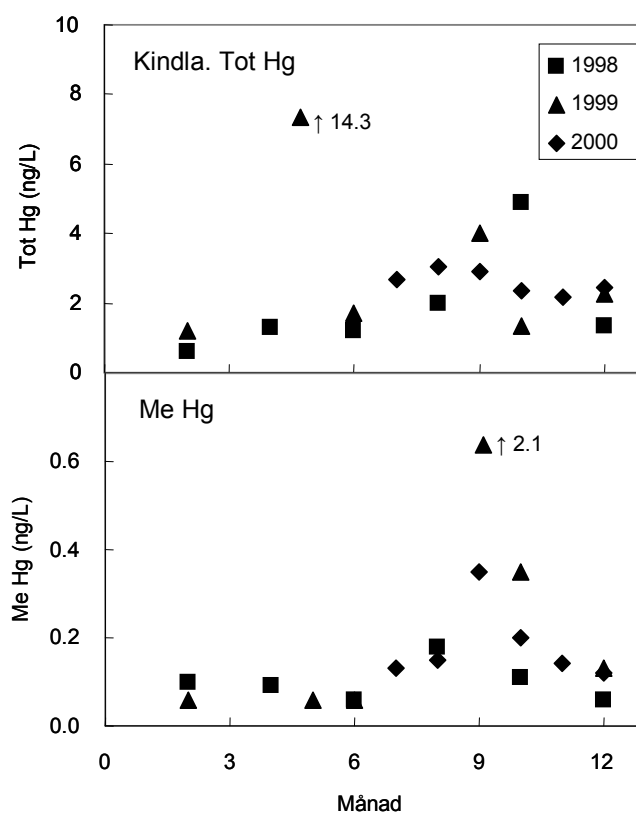
Figur 3. Halter av kvicksilver i avrinningen från IM-området Gårdsjön F1, 1987-2006, uppdelat på tre tidsperioder (1987-1992, 1993-1998 och 1999-2006). Analyser av ofiltrerade prover. Våren 1999 påverkades området av körskador från skogsmaskiner. Observera att y-axeln i MeHg-diagrammet för 1999-2006 har en annan skala.

Halterna av TotHg i avrinningen från Aneboda IM-yta, norr om Växjö (Figur 4), för åren 2000 och 2001, låg i samma storleksordning som för Gårdsjön F1, med undantag av ett enstaka värde från sensommaren 2000. Halterna av MeHg i avrinningen från Aneboda IM-yta låg däremot avsevärt högre jämfört med Gårdsjön F1. Detta begränsade sig dock endast till perioden juni tom oktober. Övriga delar av året var halterna av MeHg låga även för Aneboda IM-område.



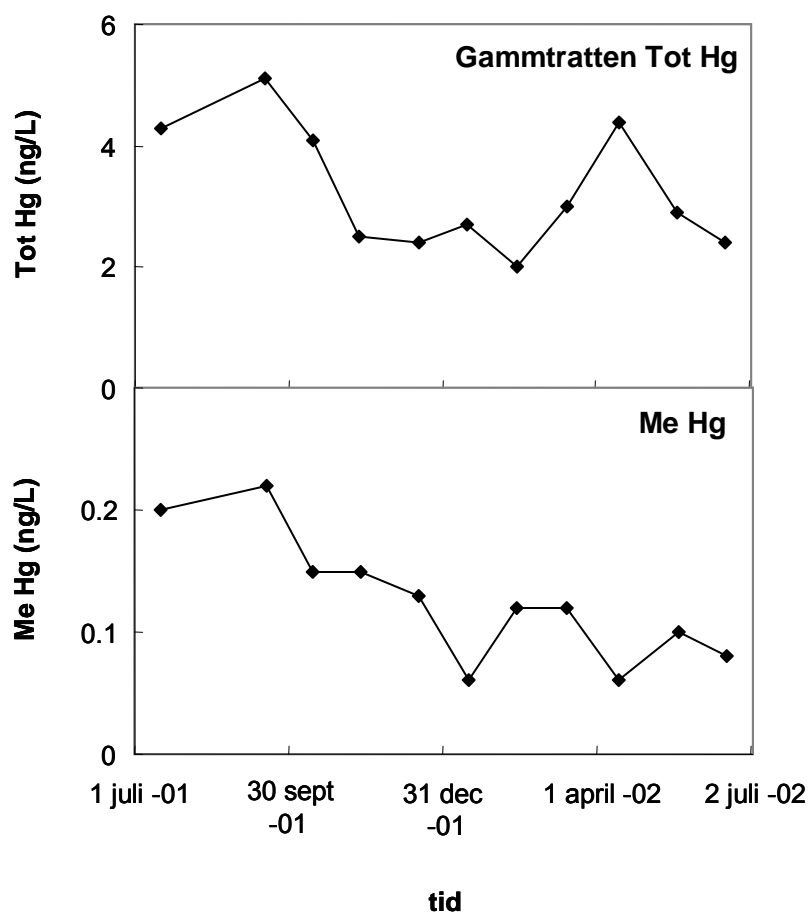
Figur 4. Halter av kvicksilver i avrinningen från IM-området Aneboda, 2000-2001 samt 2005-2006. Analyser av ofiltrerade prover. I januari 2005 påverkades området i begränsad omfattning av stormen Gudrun.

Halterna av TotHg i avrinningen från IM-området Kindlahöjden (Figur 5), norr om Örebro, för åren 1998-2000 låg med ett undantag betydligt lägre jämfört med Gårdsjön F1 och Aneboda IM-område. Halterna av MeHg i avrinningen från Kindlahöjden låg i samma storleksordning som Gårdsjön F1, perioden 1987-1998. Emellertid framträder något av samma mönster som för MeHg halterna från Aneboda IM-område, med höga halter under sensommaren och tidig höst, jämfört med övriga delar av året. Vad gäller Kindlahöjden förefaller perioden med höga MeHg halter ligga något senare, juli tom oktober, jämfört med Aneboda IM-område. Detta kan möjligen bero på att Kindlahöjden ligger avsevärt nordligare än Aneboda.



Figur 5. Halter av kvicksilver i avrinningen från IM-området Kindlahöjden, 1998-2000. Analyser av ofiltrerade prover.

För IM-området Gammtratten (Figur 6), som ligger väster om Umeå, finns värden för kvicksilverhalter i avrinningen endast för en period, juli 2001 tom juni 2002. Halterna av TotHg i avrinningen låg i samma storleksordning som Kindlahöjden och således betydligt lägre jämfört med Aneboda och Gårdsjön F1. Halterna av MeHg i avrinningen från Gammtratten låg runt 0.2 ng/L och under, således mycket låga värden. Men även vid Gammtratten antyds en variation över året, med högre halter under sensommaren och tidig höst, jämfört med vinter, vår och tidig sommar.



Figur 6. Halter av kvicksilver i avrinningen från IM-området Gammtratten, 2001-2002. Analyser av ofiltrerade prover.

Sammanfattningsvis låg halterna av TotHg i avrinningen från växande skog i södra Sverige i de flesta fall mellan 1 och 10 ng/L. Det finns ingen tydlig årstidsvariation i förekomsten. Halterna av MeHg från växande skog låg i södra Sverige under 0.6 ng/L. Aneboda IM-yta utgör dock ett undantag där halterna under sommarmånaderna var i storleksordningen 10 ggr högre. Det finns en tendens till en årstidsvariation, med högre halter under perioden maj-oktober jämfört med november – april. I mellersta och norra Sverige var halterna av MeHg i avrinningen från växande skog i de flesta fall inte över 0.2 ng/L.

4.3 Utlakning från avverkad och stormpåverkad skog

4.3.1 Inledande första analys

Den inledande analysen av kvicksilverhalter i avrinningen från avverkad och stormpåverkad skog byggde på värden från Gårdsjön F2 1999-2006 (området avverkades i maj 1999), från ett antal slutavverkade områden i södra och mellersta Sverige (Tabell 1) vilka provtogs vid enstaka tillfällen under vintern och sommaren 2005 samt från två olika områden från Nissadalen vilka provtogs vid två tillfällen under senhösten 2005 (sept och nov), varav det ena var kraftigt stormskadat (Ni 13) och det andra bestod till stor del av ett gammalt hygge (Ni 12). Denna analys resulterade i halter av TotHg i avrinningen mellan 2.8 och 19 ng/L, med ett medianvärde på 7.5 ng/L. Motsvarande värden för MeHg låg mellan 0.03 och 11 ng/L, med ett medianvärde på 0.51 ng/L. Medianvärdena användes för en yttäckande analys av utlakningen av kvicksilver från stormpåverkad skog (Hellsten m. fl., 2006, Munthe m. fl., 2007).

4.3.2 Djupgående analys

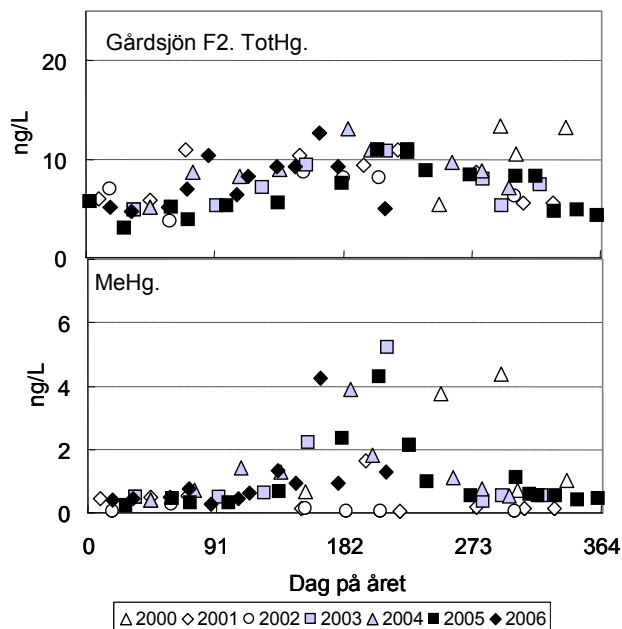
4.3.2.1 Avverkad skog och körskador i Gårdsjön

De tydligaste bevisen för att en kraftig störning av skogsmarken kan leda till en ökande utlakning av kvicksilver kommer från den långa tidsserien från Gårdsjön F1 (Figur 3). Under 12 år låg halterna av TotHg och MeHg relativt konstant. Efter sönderkörningen inom avrinningsområdet med skogsmaskiner under våren steg halterna av MeHg i avrinningen dramatiskt, med en faktor 10, medan halterna för TotHg påverkades i mindre utsträckning (Figur 3, Munthe & Hultberg, 2004). Halterna av MeHg håller sig fortfarande (2006) på en hög nivå. Området F1 var relativt opåverkat av stormen Gudrun, endast 30 träd föll inom avrinningsområdet. Denna långa tidserie av mätningar av kvicksilverhalter i avrinningen från Gårdsjön F1 ger starka bevis för att en kraftig störning av skogsmarken resulterar i kraftigt förhöjda halter av MeHg.

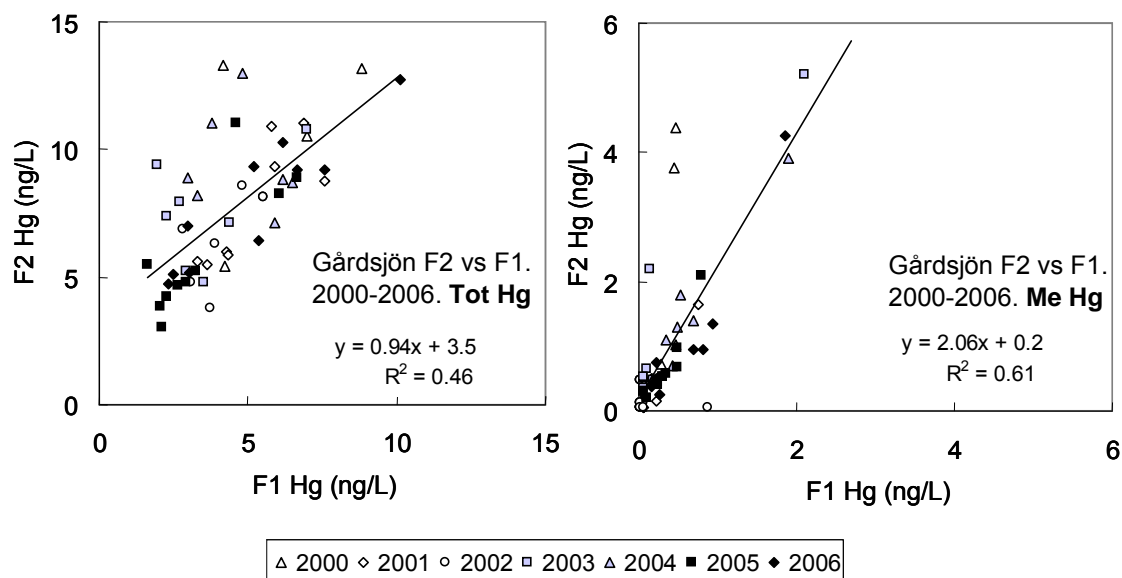
Området Gårdsjön F2, som ligger alldeles intill Gårdsjön F1, kalkades med dolomit 1984 och avverkades under senvåren 1999. Det finns inga mätningar av kvicksilver i avrinningen från F2 före 1999, men det finns ingen anledning att anta att halterna har skilt sig från de som uppmätts för F1. Kemin i avrinningen var före avverkningen lik den för F1 (Hans Hultberg, personlig kommunikation) och mätningar från andra områden ger inga indikationer på att kalkning skulle öka halterna av kvicksilver i avrinningen (Parkman och Munthe, 1998). Regelbundna mätningar av kvicksilverhalterna i avrinningen från området F2 startade under sommaren 2000 (en mätning 1999) och har pågått sedan dess (Figur 7).

Halterna av TotHg i avrinningen från F2 har varit något högre än värdena för motsvarande år från området F1. En regressionsanalys av värden för TotHg i avrinningen från F2 och F1 från gemensamma provtagningsdagar under åren 2000-2006 (Figur 8) visade att halterna för F2 var parallellförskjutna ca +3.5 ng/L, jämfört med F1. Störst förhöjning av TotHg från F2, jämfört med F1, verkar det vara ca 4-5 år efter avverkning, varefter det förfaller minska. En motsvarande analys för MeHg i avrinningen från Gårdsjön F2 och F1 (Figur 8) visade att halterna i avrinning under perioden 2000-2006 genomgående varit en faktor 2 högre för F2 jämfört med F1. Högre halter av kvicksilver i avrinningen från F2, jämfört med F1, förklaras sannolikt av att området F2 var mer sönderkört efter slutavverkningen (Hans Hultberg, personlig kommunikation). Mätningarna av

kvicksilver i avrinningen från Gårdsjön F2 ger starka indikationer om att en slutavverkning av mogen granskog resulterar i kraftigt förhöjda halter av MeHg under lång tid.



Figur 7. Halter av kvicksilver i avrinningen från området Gårdsjön F2, 2000-2006. Analyser av ofiltrerade prover. Området kalkades med dolomit 1984 och avverkades under sensvåren 1999.

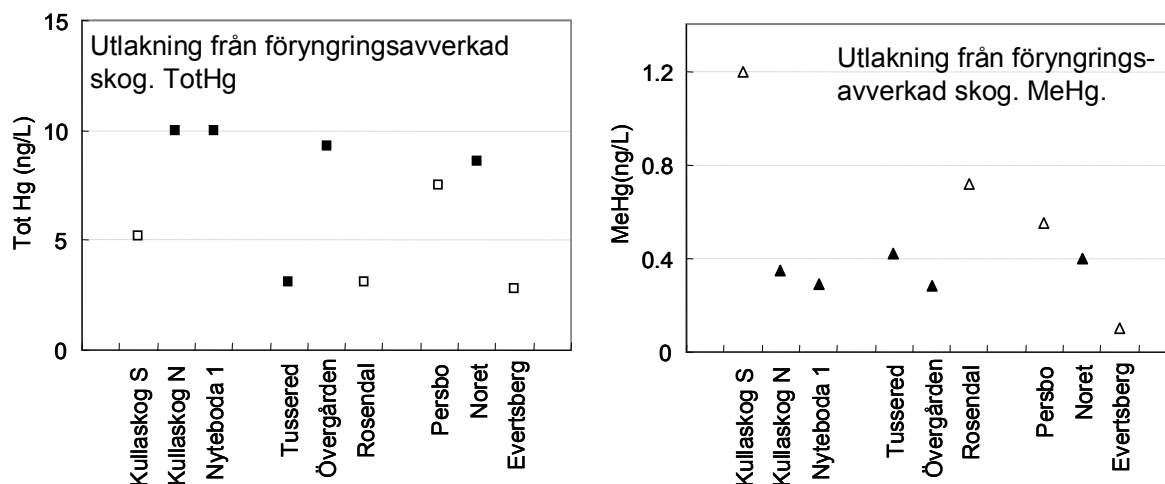


Figur 8. En jämförelse av kvicksilverhalter i avrinningen från områdena F2 och F1 i Gårdsjön 2000-2006. Ofiltrerade prov. Mätvärden har endast inkluderats för tillfällen då provtagning skett samma dag. Ett mättillfälle (aug 2006) har uteslutits från analysen. Våren 1999 slutavverkades området F2 medan området F1 samtidigt drabbades av kraftiga körskadorna.

4.3.2.2 Avverkad skog i andra delar av södra och mellersta Sverige

Under vintern, våren och sommaren 2005 genomfördes kampanjmätningar på 13 slutavverkade skogsytor, fördelade i Skåne, Västra Götaland samt mellersta Sverige (Tabell 1 och Figur 2). Provtagningarna ägde tyvärr rum vid olika tidpunkter för olika områden., för Skåne i januari, för Västra Götaland i april och för mellersta Sverige i juni. Halterna av TotHg och MeHg i avrinningen från respektive område visas i Figur 9. Provtagningsplatserna Rävsmåla, Nyteboda samt Tuna har uteslutits pga mkt lågt eller inget flöde. Valsjön har uteslutits pga att provet bestod av sjövatten. Ofyllda symboler indikerar områden där en betydande del av avrinningsområdet utgjorts av våtmark.

Halterna av TotHg i avrinningen låg mellan 3 och 10 ng/L (Figur 9) och det syntes inga tydliga skillnader mellan områden med och utan våtmark, mellan olika provtagningsstillfällen eller mellan olika delar av landet. Halterna av MeHg låg mellan 0.1 och 1.2 ng/L. De högsta värdena för MeHg från dessa hyggesprovtagningar låg lägre än de högsta värdena för Gårdsjöns områden F1 och F2, men detta förklaras sannolikt av att tidpunkterna för provtagningarna av hyggena låg utanför den period på året då de högsta halterna av MeHg observerades i Gårdsjön, men även i Aneboda, Asa och Nissan, se nedan. Halterna av MeHg var, när de jämförs inom respektive geografiska regioner, högre i avrinningen från de avverkade ytor som inkluderade en betydande andel våtmarker, med undantag av en lokal, Evertsberg (Figur 9).



Figur 9. Halter av kvicksilver i avrinningen från förnygringsavverkade områden i södra och mellersta Sverige, 2005. Analyser av ofiltrerade prover. Provtagningsplatserna Rävsmåla, Nyteboda samt Tuna har uteslutits pga mkt lågt eller inget flöde. Valsjön har uteslutits pga att provet bestod av sjövatten. Ofyllda symboler markerar avrinningsområden där en betydande andel våtmark ingår. Provtagningsplatserna beskrivs ingående i Tabell 1.

Sammanfattningsvis låg halterna av TotHg i avrinningen från slutavverkad skog i södra och mellersta Sverige i de flesta fall i samma storleksordning eller något högre jämfört med växande skog (undantaget Aneboda). Halterna låg i storleksordningen 3-13 ng/L. För det slutavverkade området Gårdsjön F2 fanns en relativt tydlig årstidsvariation, med högre halter på sommaren.

Den långa mätserien från området Gårdsjön F1 ger tydliga bevis för att en kraftig störning av skogsmarken även på en begränsad del av avrinningsområdet kan innebära drastiskt förhöjda halter av MeHg i avrinningen som består under lång tid. Halterna av MeHg i avrinningen från det närliggande, slutavverkade området Gårdsjön F2 var ungefär dubbelt så höga jämfört med området F1 och upp till ca 10 ggr högre jämfört med avrinningen ifrån växande skog i Gårdsjön F1 före 1999 samt från växande skog vid Kindlahöjden. Halterna av MeHg från slutavverkad skog låg således i storleksordningen 0.2-5 ng/L. Det fanns en tydlig årstidsvariation, med högre halter under perioden maj-oktober jämfört med november – april.

4.3.2.3 Stormskadad skog och körskador

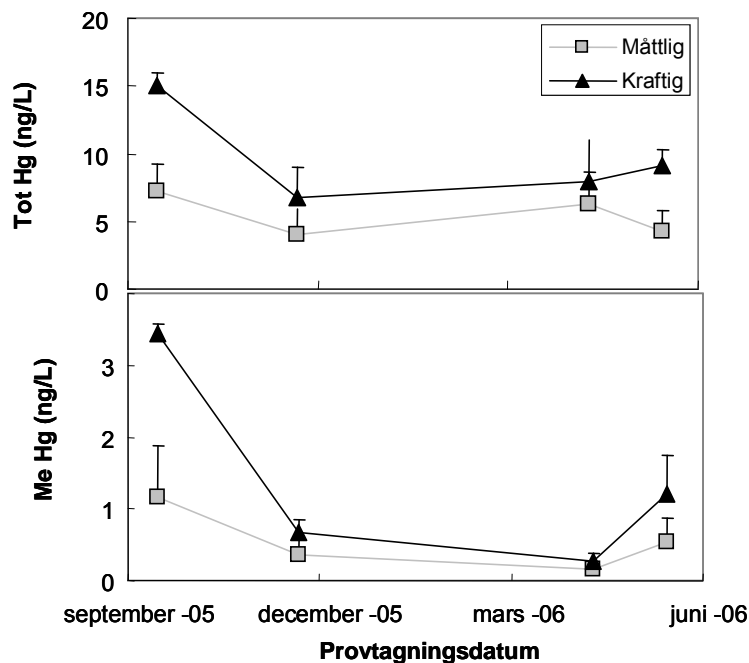
Provtagning av avrinningen från stormskadad skog, där det föreligger kvalitativa bedömningar av skadornas omfattning, har skett vid Aneboda IM-område, försöksområdet Nissadalen, Pipbäcken övre samt i tre områden vid Asa försökspark.

I Aneboda finns regelbundna provtagningar under två år, 2005 och 2006, efter stormen Gudrun och dessa mätningar kan jämföras med regelbundna provtagningar under två år före stormen, 2000 och 2001 (Figur 4). I storleksordningen 20-30% av området drabbades av stormen och påverkan var relativt liten i närheten av provtagningsbäcken (Löfgren, 2007). Tolkningen av mätvärden kompliceras av de ”naturligt” förekommande höga halterna av framförallt MeHg i avrinningen från området. Dessa höga naturliga halter har satts i samband med relativt stor andel våtmarker inom området (Löfgren, 2007). Det finns också en stark årstidsvariation där höga halter av MeHg inte förekommer under perioden december-maj, varken före eller efter stormen. Mycket höga halter av MeHg i avrinningen, 10-13 ng/L, har uppmätts för månaden juli både 2005 och 2006. Liknande höga halter förekom inte för åren 2000 och 2001. Under resterande delar av året syns ingen skillnad i MeHg halter mellan 2005/2006 och 2000/2001. Det är i dagsläget svårt att avgöra om stormfällena i Aneboda IM-område har påverkat halterna av MeHg i avrinningen (se även Löfgren, 2007). För att få svar får man avvakta kommande års analyser. Jämförelserna blir än mer otydliga vad gäller halterna av TotHg i avrinningen före och efter stormen.

I Nissadalen har provtagning gjorts vid fyra tillfällen under perioden september 2005 – juni 2006 i avrinningen från sju olika områden med varierande grad av påverkan från stormfällena. Ett område var relativt opåverkat av stormen, men slutavverkat 6 år tidigare (område Ni 12) och har därför inte inkluderats i den fördjupade utvärderingen.

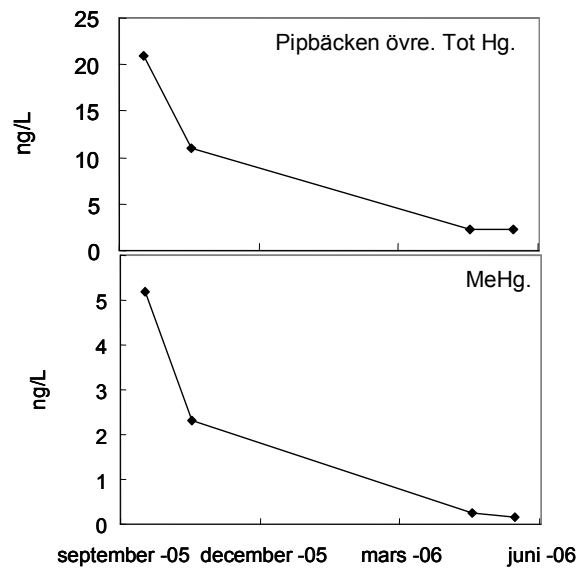
Den årstidsvariation som beskrivits ovan framträder även vad gäller halterna av MeHg i avrinningen främst från de områden som har bedömts vara mest påverkade av stormen Gudrun, med höga halter på sensommaren/hösten och låga halter under vinter, vår och försommar (Figur 10). De områden som bedömts vara kraftigt påverkade av stormen (n=3) hade likartade, höga halter av MeHg vid provtagningen september 2005, 3.3-3.6 ng/L. De områden som bedömts vara måttligt (n=3) påverkade hade vid detta tillfälle avsevärt lägre halter av MeHg i avrinningen, 0.5-1.9 ng/L. Vid provtagningarna i november 2005 och april 2006 var halterna låga för alla områden. Vad gäller provtagningen i maj 2006 fanns återigen en antydning till skillnad beroende på stormpåverkan, med halter 0.7-1.8 ng/L för de kraftigt påverkade områdena och halter 0.2-0.9 ng/L för de måttligt påverkade områdena. Vid provtagningarna i september 2005 och maj 2006 fanns en motsvarande skillnad relaterad till stormpåverkan även vad gällde TotHg, men den återfanns inte vad gällde provtagningarna november 2005 och april 2006, trots relativt höga halter även vid dessa tillfällen. Provtagningarna av kvicksilver från områden med olika stormpåverkan i Nissadalen stöder således

hypotesen att halterna av MeHg i avrinningen ökar med graden av stormpåverkan. Resultaten vad gäller TotHg var mindre tydliga.

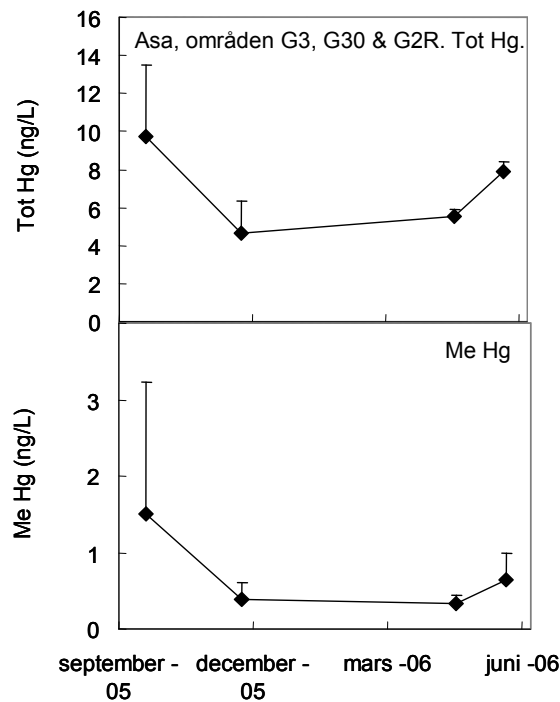


Figur 10. Halter av kvicksilver i avrinningen från områden med olika andelar stormskadad skog i Nissadalen, 2005-2006. Analyser av ofiltrerade prover. Bedömningen av andelen stormskadad skog beskrivs i sektion 3.3. och uttrycks som kraftig (n=3), måttlig (n=3) eller liten (n=1) påverkan.

Analyser av kvicksilver i avrinningen har gjorts vid ytterligare fyra områden, Pipbäcken (Figur 11) samt tre områden inom Asa försökspark (Figur 12). Provtagningarna har skett vid samma fyra tillfällen som redovisats för Nissadalen, mellan september 2005 och maj 2006. Återigen indikeras samma årstidsvariationer vad gäller halterna för MeHg, men även i viss mån för TotHg. Påverkan av stormskador bedömdes för samtliga områden som liten till måttlig och det fanns inte någon möjlighet att relatera halterna till graden av stormskada. I september uppmättes halten av MeHg i avrinningen i Pipbäcken till 5.2 och för områdena i Asa till 0.5 – 3.5 ng/L. Halterna sjönk därefter och var vad gäller Pipbäcken mycket låga i april och maj 2006. Vad gäller TotHg var halterna i Pipbäcken höga i september 2005, runt 20 ng/L, varefter de sjönk kraftigt fram till den sista provtagningen i maj 2006. För områdena i Asa var skillnaderna mindre och värdena för TotHg låg mellan 4 och 10 ng/L. Dessa analyser av kvicksilver i avrinningen från områden med lite till måttlig stormpåverkan visade att halterna av MeHg är höga på sensommaren och hösten men inte under vinter, vår och försommar. Tolkningen av dessa resultat begränsas dock av avsaknaden av jämförelser med graden av stormpåverkan.



Figur 11. Halter av kvicksilver i avrinningen från området Pipbäcken övre 2005-2006. Andelen stormskadad skog har bedömts som ringa, de träd som föll stod dock i fuktiga partier. Analyser av ofiltrerade prover.



Figur 12. Halter av kvicksilver i avrinningen från 3 områden, G3, G30 & G2R, runt Asa försökspark 2005-2006. Andelen stormskadad skog har bedömts som ringa till måttliga. Analyser av ofiltrerade prover. Staplarna anger standardavvikelser (n=3).

Sammanfattningsvis låg halterna av TotHg i avrinningen från stormskadad skog i södra Sverige i samma storleksordning eller något högre jämfört med växande skog (undantaget Aneboda). Halterna under sensommaren gick upp mot 20 ng/L (Aneboda upp mot 40 ng/L). Det fanns en antydning till samma årstidsvariation som beskrivits ovan för slutavverkad skog, med högre halter på sensommaren.

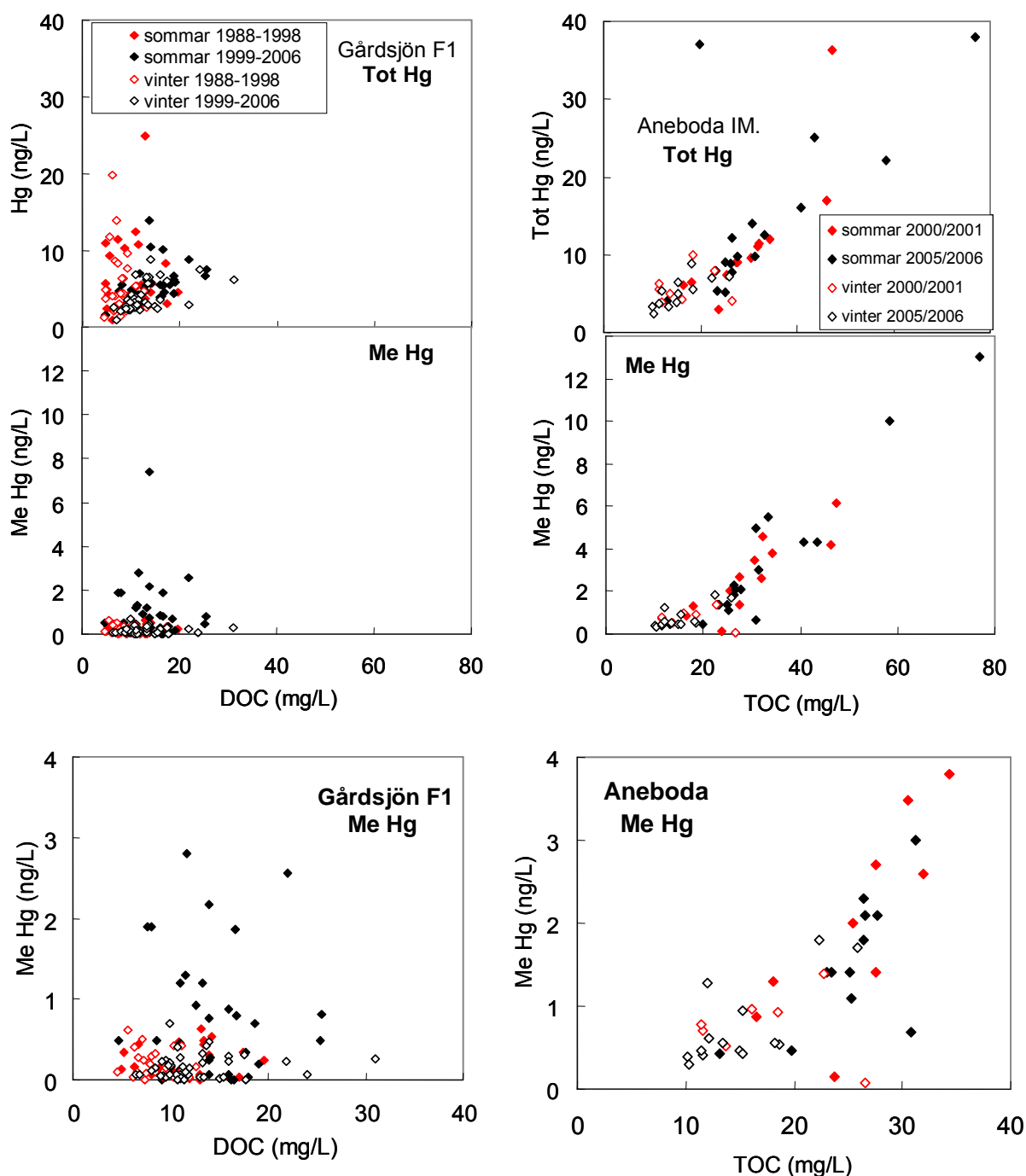
Mycket höga halter av MeHg, 10-12 ng/L, har uppmätts i avrinningen från Aneboda IM-område efter stormen Gudrun. Starkast bevis för ökade halter av MeHg i avrinningen kommer dock från områdena med olika grad av stormpåverkan i Nissadalen. Även de ringa till måttligt påverkade områdena runt Asa samt Pipbäcken visade höga halter av MeHg under sensommaren. Halterna av MeHg i avrinningen från stormpåverkad skog gick upp mot 3-5 ng/L.

4.4 Relation mellan halterna av kvicksilver och organiska ämnen i avrinningen samt med avrinningsvolymerna

Halterna av kvicksilver har antagits vara starkt knutet till de lösta organiska ämnena i avrinningen (Åkerblom, 2006, Bishop & Åkerblom, 2006). Vad gäller avrinningen från Gårdsjön F1 och från Aneboda IM-område finns omfattande mätserier även vad gäller koncentrationen av organiska ämnen (Gårdsjön, DOC, Aneboda, TOC). Detta ger en möjlighet att analysera sambanden mellan halterna av kvicksilver och organiska ämnen i avrinningen från dessa områden (Figur 13). Vid denna analys har alla gemensamma provtagningstillfällen (dagar) året runt inkluderats, uppdelat på sommar (maj tom oktober) och vinter (november tom april). För Gårdsjön delas värdena upp mellan perioderna före och efter uppkomsten av körskador våren 1999. För Aneboda delas värdena upp mellan perioderna före och efter stormen Gudrun januari 2005.

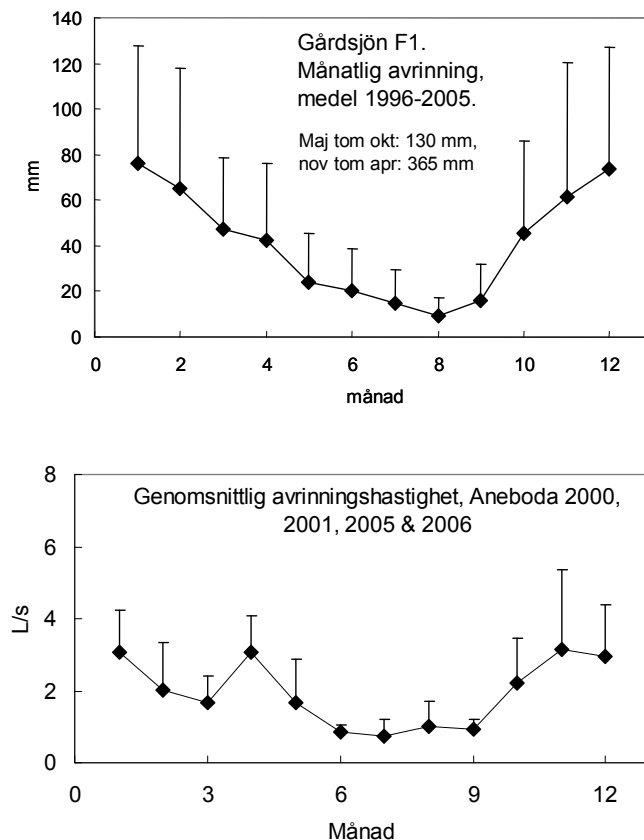
Halterna av organiska ämnen i avrinningen var generellt lägre i Gårdsjön jämfört med Aneboda. Halterna för Gårdsjön överskred sällan 20 µg/L medan de i Aneboda under sommartid frekvent gick över 20 µg/L. För Aneboda framträder starka samband mellan halterna av kvicksilver och halterna av organiska ämnen i avrinningen, både för Tot- och MeHg. Något förvånande ser man inte motsvarande samband för Gårdsjön, utom möjligen en antydning vad gäller TotHg för perioden efter 1999. De mycket höga värden för halter av MeHg som uppmättes i avrinningen från Aneboda IM-område under juli månad 2005 och 2006 var förknippade med höga halter organiska ämnen i avrinningen. Även de höga halter av MeHg som förekom under sommarmånaderna före stormen Gudrun sammanfaller med höga halter av organiska ämnen i avrinningen.

Avsaknaden av samband mellan halterna av metylkvicksilver och organiska ämnen i avrinningen från Gårdsjön F1 kan till viss del bero på att koncentrationerna av organiska ämnen förekommer inom ett lägre haltområde, jämfört med värdena för Aneboda IM-område (Figur 13).



Figur 13. Sambanden mellan halterna av kvicksilver och mängden organiska ämnen i avrinningen från Gårdsjön IM-område F1 (vänstra kolumnen, organiska ämnen mätt som DOC) samt från Aneboda IM-område (högra kolumnen, organiska ämnen mätt som TOC). Överst visas halterna av TotHg, därunder MeHg och underst MeHg med expanderad skala. För båda områdena är värdena uppdelade i en sommar (maj tom oktober) och vinter (nov tom april) period. För Gårdsjön är värdena även uppdelade före och efter det att körskador inträffade 1999. För Aneboda är värdena uppdelade före och efter stormen Gudrun januari 2005. Värdena är endast inkluderade från mätillfällen då mätningar av kvicksilver och organiska ämnen gjorts samma dag.

Som förväntat visar båda områdena Gårdsjön F1 och Aneboda IM-område låga värden för flödes hastigheten i avrinningen under sommarmånaderna juni-september (Figur 14). Det finns således en möjlighet att höga halter av kvicksilver i avrinningen under sensommaren skulle kunna vara ett resultat av en anrikning vid låga flödes hastigheter.



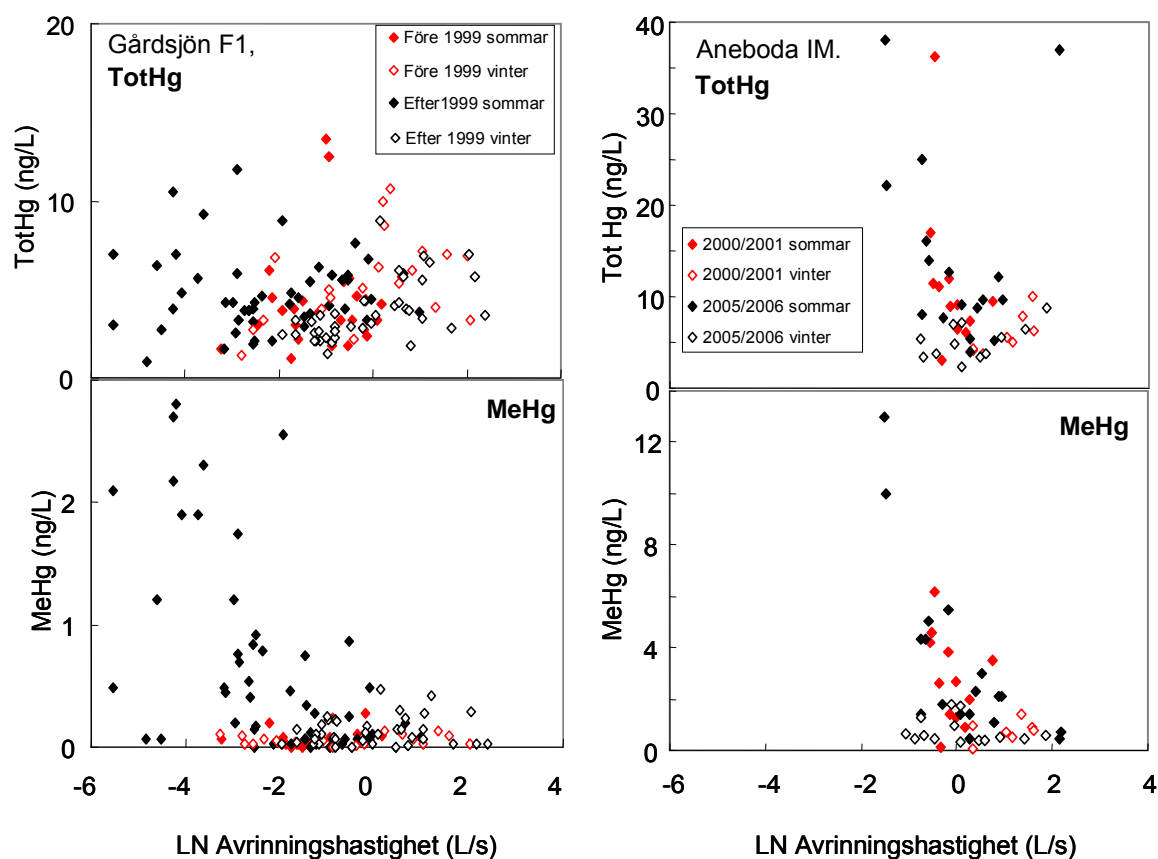
Figur 14. Månatliga, genomsnittliga flödes hastigheter för avrinningen från området Gårdsjön F1 1996-2005 (överst) och området Aneboda IM-område 2000, 2001, 2005 samt 2006 (underst). För Gårdsjön uttrycks avrinningen som summerat per månad i mm, för Aneboda uttrycks den som genomsnittlig avrinningshastighet i L/s. Staplarna anger standardavvikelse baserat på år.

Inom de långa tidsserierna för Gårdsjön F1 och Aneboda IM-område finns det tillgång till dygnsmedelvärden för avrinningshastighet. Därför gjordes en analys av sambanden mellan halterna av kvicksilver i avrinningen och dygnsmedelvärden för avrinningshastigheten (Figur 15). Analyserna separerades för sommar och vinter och för Gårdsjön före och efter uppkomsten av körskadorna våren 1999. För Aneboda separerades värdena för före och efter stormen Gudrun. Lägga märke till att avrinningshastigheterna är logaritmerade. Halterna av Tot Hg uppvisade inget samband med avrinningshastigheten, varken för Gårdsjön eller Aneboda. Halterna av MeHg däremot uppvisade sommartid ett starkt samband med avrinningshastigheten, i synnerhet för Aneboda. Men även för Gårdsjön fanns ett samband och höga halter av MeHg (>1 ng/L) uppträdde endast vid avrinningshastigheter under ca 0.2 L/s. Före 1999 förekom dock inga höga halter av MeHg (>0.3 ng/L) i Gårdsjön ens vid avrinningshastigheter ner till ca 0.05 L/s. Höga halter av MeHg uppträdde heller inte vintertid efter 1999 vid flöden ner till ca 0.13 L/s.

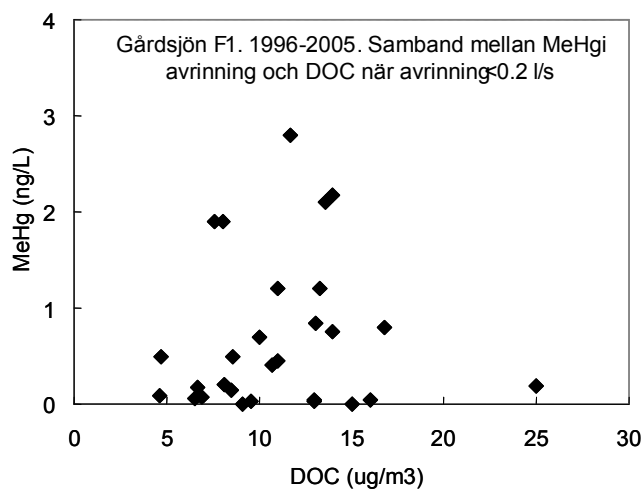
Det fanns för Aneboda ett starkt samband sommartid mellan halten av organiska ämnen och flödes hastigheten hos avrinningen, med höga halter vid låga flöden.

Förekomsten av höga halter av MeHg i avrinningen i Gårdsjön sommartid efter 1999, vid låga flöden, uppvisade dock fortfarande en stor spridning. Ett ytterligare försök till att förklara denna variation gjordes genom välja ut de dagar med låga avrinningsflöden, <math><0.2\text{ L/s}</math>, då det fanns parallella mätningar av halterna MeHg och DOC i avrinningen. Det fanns 29 sådana dagar under 1996-2005 året runt (Figur 14). Det fanns dock fortfarande inga samband mellan halterna av MeHg och DOC, sistnämnda med halter mellan 4 och 17 mg/L (Figur 16).

Det förefaller från analyserna ovan som att hydrologin, dvs vattnets väg genom avrinningsområdet, har stor betydelse för halterna av kvicksilver i avrinningen. Kunskaperna om detta är ännu ofullständiga.



Figur 15. Sambanden mellan halterna av kvicksilver och flödes hastigheten (dygnsmedelvärde, logaritmerat) i avrinningen från Gårdsjön IM-område F1 (1996-2006, vänstra kolumnen) samt från Aneboda IM-område (2000, 2001, 2005 samt 2006, högra kolumnen). Överst visas halterna av TotHg, underst MeHg. För båda områdena är värdena uppdelade i en sommar (maj tom oktober) och vinter (nov tom april) period. För Gårdsjön är värdena även uppdelade före och efter det att körskador inträffade 1999. För Aneboda är värdena uppdelade före och efter stormen Gudrun januari 2005.



Figur 16. Sambandet mellan halter av MeHg och organiska ämnen i avrinningen från området Gårdsjön F1 när flödes hastigheten från avrinningsområdet varit lägre än 0.2 L/s. Data från 1996-2005 året runt.

Sammanfattningsvis fanns för Aneboda IM-område ett starkt positivt samband sommartid mellan halterna av MeHg och organiska ämnen i avrinningen. Det fanns även ett negativt samband mellan halterna av MeHg och flödes hastigheten ut från avrinningsområdet, beroende delvis på att det fanns ett negativt samband även mellan halterna av organiska ämnen och flödes hastigheten. Det fanns för Aneboda sommartid även ett positivt samband mellan TotHg och organiska ämnen i avrinningen, men inget samband mellan TotHg och avrinnings hastigheten. Det var inga skillnader i dessa samband före och efter stormen Gudrun.

För området Gårdsjön F1 fanns inga samband mellan halterna av kvicksilver och organiska ämnen i avrinningen, förutom möjligtvis för TotHg vintertid efter uppkomsten av körskador 1999. Detta kan bero på att halterna organiska ämnen var låga. Det fanns ett visst negativt samband mellan halterna av MeHg och flödes hastigheten från området Gårdsjön F1 men inte för TotHg. Halter av MeHg >1 ng/L förekom endast vid flödes hastigheter under 0.2 L/s.

Hydrologin, dvs vattnets väg genom avrinningsområdet, har stor betydelse för halterna av kvicksilver i avrinningen. Kunskaperna om detta är ännu ofullständiga.

4.5 Behöver typvärdena för kvicksilver i avrinningen från växande och avverkad/stormskadad skog revideras?

4.5.1 Skäl att revidera

De typvärden som har föreslagits i den första analysen visas i Tabell 3. Det finns betydande bevis för att halterna av MeHg i avrinningen från avverkad eller stormpåverkan varierar avsevärt över året

med högsta halter under sommaren, maj tom oktober. Halterna under sommaren överstiger stundtals kraftigt det tidigare föreslagna typvärdet för halterna av MeHg i avrinningen från avverkad/stormpåverkad skog, 0.51 ng/L. Detta typvärde verkar dock vara representativt för halterna under vinterperioden.

En möjlighet förefaller vara att använda två olika typvärden för halterna av kvicksilver i avrinningen, för sommar- respektive vinterperiod.

Tabell 3. Utlakningskoefficienter (ng/L) för kvicksilver i skogsmark (växande skog och hygge), enligt den första analysen.

	Växande skog	Slutavverkad/Hygge
Totalkvicksilver	4.1	7.5
Metylkvicksilver	0.12	0.51

4.5.2 Principer för nya typvärden

Man bör överväga vad som utgör en lämplig grundenhet för den statistiska analysen av halldata för kvicksilver i avrinningen. I den första, inledande analysen används medianvärden baserat på alla provtagningar. Varje provtagningstillfälle värderades således lika. Detta medförde att mätvärden från områdena Gårdsjön F1 och F2 fick ett oproportionerligt stort inflytande på de föreslagna typvärdena på grund av det stora antalet mättillfällen för dess båda områden.

Målsättningen med innevarande studie har varit att föreslå typvärden för halter av kvicksilver i avrinningen från växande och stormpåverkad skog med avsikt att göra yttäckande analyser av risken för förhöjda kvicksilverhalter i avrinningen som en följd av stormen Gudrun. För att kunna bedöma osäkerheter i dessa analyser förefaller det lämpligt att analysera den rumsliga variationen i kvicksilverhalter i avrinningen. I den fördjupade analysen använder vi därför avrinningsområdet som grund för den statistiska analysen. I Nissadalen finns flera intilliggande likartade avrinningsområden och dessa har slagits samman till ett medelvärde (exklusive området Ni12 som bedömdes ha ringa påverkan från stormen). I den fördjupade analysen tar vi först fram medelvärden för kvicksilverhalter separat för växande skog och för områden med stormskador samt separat för sommar och vinter (Tabell 4 och 5). Utifrån dessa medelvärden för respektive område gör vi medelvärdesbildningar separat för TotHg och MeHg och separat för sommar och vinter. Dessa resultat visas i Tabellerna 6 och 7.

I denna fördjupade analys använder vi inte data från hyggesprovtagningarna i Skåne, Västra Götaland och Gävle-Dalarna pga att det endast finns ett enstaka provtagningstillfälle för dessa områden. Inte heller använder vi data för växande skog från Gammtratten eftersom detta område ligger långt norrut i förhållande till vår ambition att fastställa typvärden för södra och mellersta Sverige. Sedan den första analysen har det tillkommit data för tre områden i Asa, för fem områden i Nissadalen samt för ett område Pipbäcken (övre). För Gårdsjön F1 används data från åren 1987-1998 (fram till dess körskador uppstod) för att representera växande skog. För Aneboda IM-område används data från 1997, 1998, 2000 och 2001 för att representera växande skog. Data från 2005 och 2006 används inte eftersom det är tveksamt om Anaboda IM-område på något betydande sätt påverkats av stormen Gudrun (Löfgren, 2007).

4.5.3 Nya typvärden för växande och stormskada skog

Medelvärden för halter av TotHg och MeHg för respektive område visas i Tabell 4 för växande skog och i Tabell 5 för stormpåverkad skog. Medelvärdesbildningen är uppdelad på sommar och vinterperioder. Halter för TotHg i växande skog finns från sju olika områden. För alla områden är halterna högre på sommaren jämfört med vintern och som medelvärde för alla områden är halterna ca 50% högre på sommaren. Halter för MeHg i växande skog finns endast för tre olika områden. Halterna är högre på sommaren jämfört med vintern även om skillnaden är liten för Gårdsjön F1. Halterna av MeHg är som tidigare konstaterats betydligt högre för Aneboda jämfört med de båda andra områdena, framför allt på sommaren då skillnaden är i storleksordningen en faktor 10.

Tabell 4. Halter av kvicksilver i avrinningen (ng/L) för sommar och vinter för växande skog, enligt en utökad analys. Som sommar räknas perioden maj tom oktober. Antalet mätdata som ligger till grund för medelvärdesbildning för respektive område och årstid varierar för TotHg mellan 7 och 46 och för MeHg mellan 7 och 76. Flest data finns i bägge fallen för Gårdsjön F1.

	TotHg (ng/L)		MeHg (ng/L)	
	s *	v	s	v
Aneboda IM	12.1	7.6	2.91	0.49
Gårdsjön (F1)	4.8	4.5	0.16	0.13
Kindla bäck	3.7	1.6	0.34	0.10
Lommabäcken Nedre	4.7	3.7		
Pipbäcken Nedre	6.0	1.9		
Ringsmobäcken	4.9	3.3		
Sågebäcken	6.2	4.5		
Medelvärde	6.0	3.9	1.1	0.2
St avvikelse	2.8	2.0	1.5	0.2

* s, sommar (maj tom okt), v, vinter (nov tom april)

Halterna av TotHg i stormpåverkad skog finns för fyra områden och halterna är tydligt högre på sommaren jämfört med vintern. Som medelvärde för alla områden är halterna 50% högre på sommaren. Halterna av TotHg är tydligt högre i stormpåverkad skog, jämfört med växande skog, och medelvärdena är ca 50% högre i stormpåverkad skog både på sommaren och vintern. Halter av MeHg finns för samma fyra områden och halterna är kraftigt högre på sommaren jämfört med vintern. Som medelvärde rör det sig om en faktor 2.5. Halterna av MeHg tenderade till att vara högre i avrinningen från stormpåverkad jämfört med växande skog. Spridningen mellan områden är dock mycket stor. En avgörande faktor är tolkningen av de höga halterna av MeHg i avrinningen från växande skog i Aneboda, se nedan.

Tabell 5. Halter av kvicksilver i avrinningen (ng/L) för sommar och vinter för stormpåverkad/slutavverkad skog, enligt en utökad analys. Som sommar räknas perioden maj tom oktober. Inklusiva nya områden. Antalet mätdata som ligger till grund för medelvärdesbildning för respektive område och årstid varierar för TotHg mellan 2 (Pipbäcken) och 25 och för MeHg mellan 2 (Pipbäcken) och 27. Flest data finns för Gårdsjöns F2 område.

	TotHg (ng/L)		MeHg (ng/L)	
	s *	v	s	v
Asa	8.8	5.1	1.07	0.36
Gårdsjön F2	8.9	6.4	1.45	0.47
Nissadalen	8.9	6.2	1.59	0.37
Pipbäcken	11.6	6.6	2.69	1.27
Medelvärde	9.4	6.1	1.7	0.6
Stand avv	1.2	0.6	0.6	0.4

* s, sommar (maj tom okt), v, vinter (nov tom april)

En översikt av resultaten av de nya analyserna av halter av TotHg och MeHg i avrinningen från växande respektive stormpåverkad skog ges i Tabell 6, där även data från Aneboda räknas in för växande skog, och kan jämföras med de tidigare föreslagna värdena i Tabell 3. Halterna av TotHg verkar tydlig förhöjda i stormpåverkad skog både sommar och vinter och storleken på förhöjningen är ca 50%. Detta överensstämmer relativt väl med tidigare angivna värden på årsbasis (Tabell 3). Beträffande halterna av MeHg i stormpåverkad respektive växande skog är resultaten mer otydliga och beror framför allt på tolkningen av de höga halterna av MeHg i växande skog i Aneboda IM-område. I den första, inledande analysen användes medianvärdet från alla tillgängliga mätvärden och halterna från Aneboda fick därmed ett minimalt inflytande på de framtagna typvärdena. I den fördjupade analysen baserar vi statistiken på områden och Aneboda utgör då ett av endast tre områden där halter av MeHg finns tillgängliga från växande skog i södra och mellersta Sverige.

Finns det anledning att anta att halterna av MeHg i avrinningen från Aneboda området skiljer sig från det typiska värdet för växande skog i södra Sverige?

Om inte data från Aneboda IM-område inkluderas vid beräkningarna för växande skog ökar skillnaden mellan växande och stormpåverkad skog något vad gäller TotHg (Tabell 7). Vad gäller MeHg blir det nu en betydande skillnad mellan växande och stormpåverkad skog. Skillnaden blir i storleksordningen en faktor 6 både för sommar och vinterperiod. Detta är en större skillnad jämfört med de första föreslagna typvärdena för MeHg, där skillnaden tidigare var ca en faktor 4 mellan växande och stormpåverkad skog (Tabell 3).

Tabell 6. Årliga utlakningskoefficienter (ng l⁻¹) för kvicksilver i skogsmark (växande skog och hygge), enligt en fördjupad analys, inklusiva data från nya områden. Värdena för växande skog inkluderar data från Aneboda IM-område.

	Växande skog		Stormskadad skog	
	sommar	vinter	sommar	vinter
Totalkvicksilver	6,0	3,9	9,4	6,1
Metylkvicksilver	1,14	0,24	1,66	0,58

Tabell 7. Årliga utlakningskoefficienter (ng l⁻¹) för kvicksilver i skogsmark (växande skog och hygge), enligt en fördjupad analys, inklusiva data från nya områden. Värdena för växande skog exkluderar data från Aneboda IM-område.

	Växande skog		Stormskadad skog	
	sommar	vinter	sommar	vinter
Totalkvicksilver	5,0	3,3	9,4	6,1
Metylkvicksilver	0,25	0,11	1,66	0,58

4.5.4 Argument för och emot att utelämnas data för Aneboda från beräkningarna för växande skog.

Information om halterna av TotHg och MeHg i avrinningen från växande, icke stormpåverkad skog finns endast för tre områden i södra och mellersta Sverige. Ett av dessa områden har sommartid nästan 10 ggr högre halter av MeHg, jämfört med de två andra områdena. Hur skall detta behandlas?

Ett ytterligare område i norra Sverige (Gammtratten) har halter av MeHg i avrinningen i samma storleksordning som de två områdena i södra och mellersta Sverige med de lägre halterna. Detta skulle kunna stärka synen att de höga halterna i avrinningen från Aneboda IM-område är ovanliga. Emellertid har den historiska depositionen av kvicksilver till skogsmarken varit lägre i norr.

Det finns i området runt Aneboda inom ca 10 km radie, tre referens vatten som provtas regelbundet av Länsstyrelsen i Kronobergs län (Länsstyrelsen i Kronobergs län, 2007). Åkhultsbäcken är en parallell bäck till den bäck som avvattnar Aneboda IM-område. Sjön Fiolen som också är ett referensvatten, utgör knappt hälften av tillrinningsområdet i provpunkten, den andra hälften är kraftigt påverkad av myrområden. Halten av organiskt kol mellan 1996-2001 var flera år över 30 mg/L under sommaren, med lägre halter under vintern. Botten beskrivs som täckt av järn-humusutfällningar och fiskbeståndet är starkt försurningspåverkat. Under 1997-2000 års provfiske fångades endast 1 st gädda. Sjön Fiolen är däremot en klar och näringsfattig sjö. Organiskt kol ligger för det mesta under 10 mg/L, förmodligen beroende på att tillrinningsområdet är litet. Sjön har mycket goda fiskbestånd och kvicksilverhalten i fisk betecknad som medelhög, 0.11 mg/kg (aborre, åldern hos fiskarna dock okänd). Kvicksilverhalterna i fisk är dock höga med tanke på att sjön är klar, med höga alkalinitets- och pH värden.

Sjön Stora Skärsjön är kraftigt försurad med brunt vatten. Halterna av organiskt kol har under senare år frekvent varit över 20 mg/L. Kvicksilverhalterna i 1+ abborre var bland de högsta som har uppmätts i Kronobergs län. Det finns mätningar från fem olika år 1997-2006, Tabell 8. Även om höga halter av kvicksilver uppmätts 2005 och 2006, har de även varit höga innan stormen Gudrun, särskilt 1999 och 2003.

Tabell 8. Halter av kvicksilver i abborre, 1+, provfiskade i Stora Skärsjön, Kronobergs län.

ÅR	Hg-halt (mg /kg vs)
1997	0.17
1999	0.26
2003	0.23
2005	0.26
2006	0.26

Data från 2005 och 2006, personlig kommunikation, Andreas Hedrén, Länsstyrelsen i Kronobergs län.

Sammanfattningsvis finns det flera referensvatten runt om i Aneboda-området som uppvisar karaktärer liknande de i avrinningen från Aneboda IM-område, med avseende på höga halter av organiska ämnen. Halterna av kvicksilver i fisk är för ett av områdena bland de högsta som uppmätts i Kronobergs Län. Kvicksilverhalterna i storvuxen abborre och gädda i detta vatten ligger sannolikt över Livsmedelsverkets rekommendationer. De höga halterna av organiska ämnen och metylkvicksilver i avrinningen från Aneboda IM-område är därför sannolikt representativa för ett större område runt Aneboda.

4.6 Kvicksilverhalter i fisk före och efter stormen

Länsstyrelsen i Kronobergs län har under flera år provtagit aborre (1+, inne på sitt andra levnadsår) i referenssjöar för analys av kvicksilverinnehåll (Länsstyrelsen i Kronobergs län, 2007). Kronobergs län är ett av de län för vilket vi har beräknat störst ökning av läckaget av MeHg som en följd av stormen Gudrun (Munthe m. fl., 2007). Aborre provtogs i 15 olika sjöar under år 2005 och 2006 och analyserades för innehållet av total-kvicksilver, vilket för fisk vanligtvis kan jämföras med innehållet av metyl-kvicksilver. Vidare hade man tillgång till andelen stormfälld skog i avrinningsområdena till respektive sjö. Data har vi erhållit från Andreas Hedrén, Länsstyrelsen i Kronobergs län.

Kvicksilverhalterna var i medeltal för alla sjöarna ca 25% lägre 2006 jämfört med 2005, 0.10 och 0.14 mg/kg vv (våtvikt). Man undersökte om det fanns något samband för respektive sjö vad gäller förändringen i kvicksilverhalter mellan åren och andelen stormfälld skog i respektive sjös avrinningsområde. Något samband fann man inte.

Mätningarna av kvicksilverhalter i abborre från olika sjöar i Kronobergs län visade således inte på någon inverkan av stormen Gudrun. Skälen till detta kan vara flera. Möjligen hade stormen påverkat kvicksilverhalterna redan under 2005. Alternativt kan retentionsmekanismer på vägen från de små vattendragen till sjön göra att förhöjda halter av total- och/eller metylkvicksilver ännu inte nått ut till de större sjöarna. Vidare kan det ha stor betydelse var i avrinningsområdet som stormskador har uppstått och hur hydrologin ser ut. För att få ett definitivt svar får vi avvakta kvicksilverprovtagningar i fisk ytterligare några år.

5 Övergripande slutsatser

- ◇ Information om halter av kvicksilver i avrinningen från växande, ej stormpåverkad skog finns endast från ett fåtal avrinningsområden, i synnerhet för metylkvicksilver där information för södra och mellersta Sverige finns endast från tre områden.
- ◇ Av de tre områden där information finns om halterna av metylkvicksilver från växande skog har ett område, Aneboda IM-område, halter som är i storleksordningen 10 ggr högre jämfört med de två övriga områdena.
- ◇ Det finns starka indikationer på att störningar av skogsmarken såsom körskador (orsakade av skogsmaskiner), slutavverkningar samt stormskador på ett betydande sätt ökar halterna av kvicksilver i avrinningen, både total- och metylkvicksilver.
- ◇ En kvantitativ bedömning av storleken på de ökande halterna av kvicksilver i avrinningen beror av tolkningen av de ”naturligt” höga halterna i avrinningen från växande skog i Aneboda IM-område; räknas Aneboda in bland data för växande skog blir de beräknade ökningarna av kvicksilver i avrinningen från skogsmark utsatt för avverkning/stormskador måttlig; räknas Aneboda inte in blir ökningen orsakad av avverkning/stormskador i storleksordningen en faktor 6, både för total- och metylkvicksilver
- ◇ För avrinningen från Aneboda IM-område finns ett starkt positivt samband mellan halterna av kvicksilver och organiska ämnen, både för total- och metylkvicksilver medan så

inte är fallet för området Gårdsjön F1, vilket delvis kan förklaras med att organiska ämnen förekommer i olika koncentrationsområden.

- ◇ Det finns ett negativt samband mellan halterna av metylkvicksilver och flödes hastigheten hos avrinningen både för Gårdsjön F1 och Aneboda IM-område.
- ◇ Det finns så vitt vi känner till ännu inga bevis för att halterna av kvicksilver i fisk har ökat inom något område som ett resultat av stormen Gudruns verkningar.

Utifrån nuvarande kunskapsläge gör vi bedömningen att kraftiga störningar av skogsmarken såsom vid slutavverkning eller betydande stormskador medför en ökad utlakning av kvicksilver till vattendragen. Denna slutsats stöds av andra studier som nämnts inledningsvis, från Finland (Porvari m. fl., 2003) och Kanada (Garcia & Carignan, 2000; Garcia & Carignan, 2005).

Förutsägelser om storleken på ökningen av kvicksilver i avrinningen, som ett resultat av markstörningar, beror av jämförelseobjekten där det i vissa fall finns även opåverkade områden med växande skog med en hög utlakning av kvicksilver. Dessa områden karakteriseras av en stor andel våtmarker inom avrinningsområdet samt höga halter av organiska ämnen i avrinningen.

I alla områden där vi har konstaterat en påverkan av skogsmarken från körskador, slutavverkning eller stormskador har vi funnit höga halter i avrinningen framför allt av metylkvicksilver. Tyvärr har vi för flertalet av dessa områden ingen information om halterna av organiska ämnen i avrinningen för tiden före markstörningen.

Vi gör bedömningen att tidigare föreslagna typvärden för koncentrationerna av total- och metylkvicksilver, att användas tillsammans med årliga värden för avrinning, i stort varit rimliga. För framtida förfinade analyser är det möjligt att använda separata typvärden för kvicksilverkoncentrationer för sommar respektive vinterperioder. Vidare bör värdena användas med försiktighet för områden med ”naturligt” förekommande höga halter av organiska ämnen i avrinningen

För att få ett slutligt svar på frågan om i vilken utsträckning slutavverkningar och stormskador leder till en ökad utlakning av kvicksilver från skogsmarken krävs framförallt mätningar från fler områden med växande, ej stormpåverkad skog för att fastställa nivån på utlakningen av kvicksilver från ”opåverkad” skog. Är halterna av kvicksilver alltid höga i avrinningen från områden med ”naturligt” höga halter av organiska ämnen? Det krävs vidare bättre kunskaper om vilka processer i marken, framförallt hydrologin, som avgör storleksordningen på kvicksilverutlakningen. Dessutom får vi avvakta ytterligare analyser av kvicksilverhalter i fisk från de mest stormpåverkade områdena i södra Sverige. En viktig fråga där vi saknar kunskap är betydelsen av olika retentions-mekanismer som kan fördröja transporten av en eventuell ökad utlakning från de små vattendragen i skogsmarken ut till de större sjöarna.

6 Tack

Vi vill tacka Andreas Hedrén, Länsstyrelsen i Kronobergs län, för att vi fick tillgång till information om kvicksilverhalter i fisk från sjöar i Kronobergs län.

7 Referenser

- Bishop, K, Åkerblom, S. 2006. Skogsbruk och kvicksilverproblematik i mark och vatten: En översikt av kunskapsläget. Rapport för Skogsstyrelse. Inst. för Miljöanalys, Sveriges Lantbruksuniversitet. Rapport 2006:21.
- Desrosiers, M., Planas, D., Mucci, A. 2006. Short-term responses to watershed logging on biomass, mercury and methyl mercury accumulation by periphyton from boreal lakes. *Canadian Journal of Fisheries Aquatic Science*, **63**:1734-1745.
- Driscoll, C. T. 1984. A procedure for the fractioning of aqueous aluminium in dilute acidic waters. *International Journal of Environmental Analytical Chemistry*, **16**: 267-283.
- Erlandsson, Å., Andersson, S. 2005. Rapport från storminventering av stormdrabbade avrinningsområden inom Skogsstyrelsens effektuppföljningsprogram. Skogsstyrelsen, Halmstad. Intern arbetsrapport.
- 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 of Aquatic Sciences*, **57** (Suppl. 2): 129-135.
- Garcia, E., Carignan, R. 2005. Mercury concentration in fish from forest harvesting and fire-impacted Canadian boreal lakes compared using stable isotopes of nitrogen. *Environmental Toxicology and Chemistry*, **24**: 685-693.
- Garcia, E., Carignan, R. 1999. Impact of wildfire and clear-cutting in the boreal forest on methyl mercury in zooplankton. *Canadian Journal of Fisheries of Aquatic Sciences*, **56**: 339-345.
- Hellsten, S., Westling, O., Larsson, P.-E. 2006. Miljökonsekvenser för vattenkvalitet. Underlagsrapport inom projektet stormanalys. Skogsstyrelsen Rapport 10/2006.
- Larsson, P.-E., Westling, O. 1997. Ytvatten i kalkade avrinningsområden. Årsrapport 1996. Effektuppföljning av Skogsstyrelsens program för kalkning och vitaliseringsgödsling av skogsmark. IVL Rapport B1279. 65 sid.
- Larsson, P.-E., Westling, O., Abrahamsson, I. 2003. En integrerad strategi för kalk- och askspridning i avrinningsområden. Vattenkemiska effekter av markbehandlingar. IVL Rapport B1435. 33 sid.
- Länsstyrelsen i Kronobergs län, 2007. Referensvatten i Kronobergs län 1983-2003. Rapport från Miljövårdsenheten, Länsstyrelsen i Kronobergs län, meddelande 2005:03. ISSN 1103-8209.
- Löfgren, S. 2007. Integrerad övervakning av miljötillståndet i svensk skogsmark – IM. Årsrapport 2005. Institutionen för Miljöanalys, SLU. Rapport 2007:11.
- Munthe, J., Hultberg, H. 2004. Mercury and methylmercury in run-off from a forested catchment - concentrations, fluxes and their response to manipulations. *Water Air and Soil Pollution Focus* **4**:607-618.
- Munthe, J., Hellsten, S. and Zetterberg, T. 2007. Mobilisation of mercury and methylmercury from forest soils after a severe storm-fell event. *Ambio* **36**, 111-113.
- Parkman, H. and Munthe, J. 1998. Wood ash and dolomite treatment of catchment areas: Effects on mercury in run-off water. *Scandinavian Journal of Forest Research Suppl* **2**, 33-42, 1998.

- Porvari, P., Verta, M., Munthe, J., Haapanen, M. 2003. Forestry practices increase mercury and methyl mercury output from boreal forest catchments. *Environmental Sciences Technology*, **37**: 2389-2393.
- Skogsstyrelsen. 2006. Stormen 2005 – en skoglig analys. Meddelande 1-2006. Skogsstyrelsen, Jönköping. 199 sid.
- Uggla, E., Westling, O. Vattenkemiska effekter av buffertzoner med lövträd längs mindre skogsbäckar i brukad granskog. IVL Göteborg, intern arbetsrapport.
- Åkerblom, S. 2006. Antropogenic Heavy Metals in Organic Forest soils. Avhandling. Acta Universitatis Agriculturae Sueciae 2006: 67.