

FÖRORENINGAR I BENGTSBROHÖLJENS SEDIMENT – FÖREKOMST OCH SPRIDNINGSFÖRUTSÄTTNINGAR

Rapport nr EKA 2002:21

Bengtsfors kommun

2003-10-03

Författad av

Per Östlund, Studsvik RadWaste AB¹

¹ Uppdragsledare tjänst B, Hydrologi och sedimentologi

INNEHÅLLSFÖRTECKNING

INNEHÅLLSFÖRTECKNING	2
BILAGEFÖRTECKNING	2
BAKGRUND	3
MÅLSÄTTNING	3
GENOMFÖRANDE	3
RESULTAT	5
<i>SEDIMENTPÅBYGGNADSHASTIGHET</i>	<i>5</i>
<i>FÖRORENINGAR I PLAN OCH DJUP</i>	<i>6</i>
<i>Kvicksilver</i>	<i>6</i>
<i>Metylkvicksilver</i>	<i>7</i>
<i>Dioxiner och furaner</i>	<i>8</i>
<i>Dioxin-kongener i sediment och vatten</i>	<i>13</i>
<i>Skogsindustritypiska föroreningar</i>	<i>16</i>
<i>SPRIDNINGSFÖRUTSÄTTNINGAR</i>	<i>16</i>
DISKUSSION	17
<i>SEDIMENTPÅBYGGNAD</i>	<i>17</i>
<i>FÖRORENINGAR</i>	<i>17</i>
<i>Kvicksilver</i>	<i>17</i>
<i>Metylkvicksilver</i>	<i>17</i>
<i>Dioxiner och furaner</i>	<i>17</i>
<i>Dioxin-kongener i sediment och vatten</i>	<i>18</i>
<i>Skogsindustritypiska föroreningar</i>	<i>18</i>
<i>SPRIDNINGSFÖRUTSÄTTNINGAR</i>	<i>18</i>
SLUTSATSER	19
REFERENSER	20

BILAGEFÖRTECKNING

1. Kvicksilver i sediment från Bengtsbrohöljen – lakbarhet och porvatten. IVL Rapport A22204

BAKGRUND

Bengtsbrohöljen är omgiven av skogsklädda eller kala bergsryggar med ett tunt jordtäckte. Sjöytan är ca 1,2 km² med ett medeldjup av 12 m och ett största djup på ca 28 m. Medelvattentillflödet är ca 25 m³/s och den teoretiska utbytestiden 1 vecka. I norr gränsar sjön via en kanal samt ett kraftverksgenomsläpp till sjön Lelång. Lelång gränsar i norr, i sin tur, till nästa sjö uppströms, Foxen, även där via ett reglerat genomsläpp. I riktning söderut mynnar Bengtsbrohöljen via Dalslandskanal ut i Laxsjön.

I nordligaste delen av Bengtsbrohöljen är EKA-området beläget. På nordligaste delen av EKA-området drivs ett kraftverk, vilket uppfördes i slutet på 1800-talet. På området, strax söder om kraftverket, var en elektrokemisk kloralkalifabrik (EKA) i drift mellan 1897 och 1925. Till följd av kloralkaliproduktionen har stora mängder kvicksilver och dioxiner lagrats upp på området. Området är också belastat med klorerade lösningsmedel från en kemtvätt som var i drift i den gamla kloralkalifabriken mellan 1955 och 1976. Konstaterade förekomster av PAH och fenoler föreslår även att olika typer av träindustrier som bedrivit såg- och impregneringsverksamheter varit verksamma på området.

Tidigare undersökningar visar att en spridning av föroreningar har skett och sker från EKA-området ut till Bengtsbrohöljens vatten och sediment. Även föroreningskällor uppströms Bengtsbrohöljen bidrar till belastningen med avseende på både kvicksilver och dioxiner (EKA 2002:6).

MÅLSÄTTNING

Med syftet att komplettera resultaten från tidigare undersökningar har nya undersökningar initierats och genomförts. Målsättningen har varit att kartlägga förekomst, fördelning samt spridning av föroreningar till sedimenten i Bengtsbrohöljen, med tonvikten på EKAs närområde. Sedimenten har undersökts med avseende på påbyggnadshastighet, föroreningar i plan och djup samt spridningsförutsättningar vid förändrad kemisk miljö.

Med målsättningen att förklara förekomsten av dioxiner i närområdets sediment så har fördelningen av dioxinkongener i sedimenten jämförts med fördelningen i markmaterialet på EKA samt i det vatten som rinner in och ut från sjön Bengtsbrohöljen.

GENOMFÖRANDE

Multipla sedimentproppar inhämtades från, först, 11 stationer (B2101- B2111, nov-dec, -02) samt senare ytterligare 4 stationer (B2502, B2504, B2507, B2508, juni, -03) från EKAs närområde. Samtliga prov utom B2507, B2508 togs med Kajak gravitationsprovtagare, övriga två med kolvborrh (karta, Figur 1). Längden på tagna proppar varierade mellan ca 10 och 370 cm. Dessa sedimentproppar användes enligt följande:

Proppar från 2 stationer (B2102, B2106) skivades i 1 cm tjocka skikt och användes för bestämning av sedimentpåbyggnadshastighet ("datering" enligt Bly-210-metoden). Sedimentytan samt Cs-137

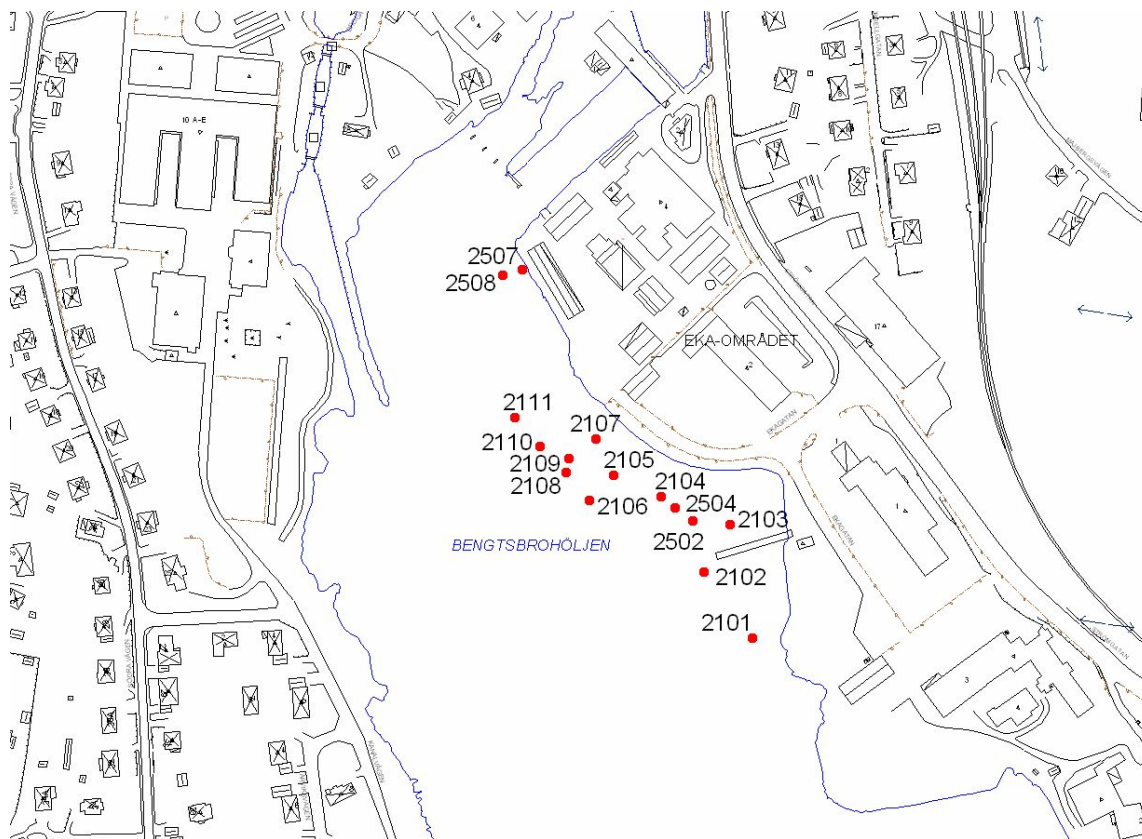
från Tjernobyli och "bomb-fallout" användes som referensnivå vid dateringarna. Analyserna gjordes av Helmar Kunzendorf vid Köpenhamns universitet.

Samtliga proppar analyserades med avseende på total-Hg och 6 proppar med avseende på metyl-Hg. Total-Hg analyserades av Analytica AB och metyl-Hg analyserades av IVL AB, Göteborg. Analyser gjordes på 2-6 nivåer per propp.

Fem proppar (B2102, B2104, B2106, B2108, B2110) analyserades med avseende på dioxiner och furaner (3-6 nivåer per propp, Analytica AB). Efter dessa analyser genomförts erbjud det anlitate labbet analyser med en känsligare metod varpå ytterligare 4 proppar (B2502, B2504, B2507, B2508) analyserades (2-4 nivåer per propp, Analytica AB).

På 2 proppar (B2102, B2106) gjordes GC-MS screening-analyser av semivolatila klororganiska föreningar av Analytica AB. Dessa komponenter var klorfenoler, klorcatekoler, klorgujakoler, klornaftalener och oktakorstyren (typiska skogsindustriella komponenter).

Material från 2 proppar (B2102, B2106) analyserades med avseende på kvicksilver efter lakning i reducerande respektive oxiderande miljö för att efterlikna förändrade kemiska miljöer. Porvattenanalyser gjordes för att beräkna diffusionsflöden. Undersökningen gjordes av IVL AB i Stockholm (Bilaga 1).

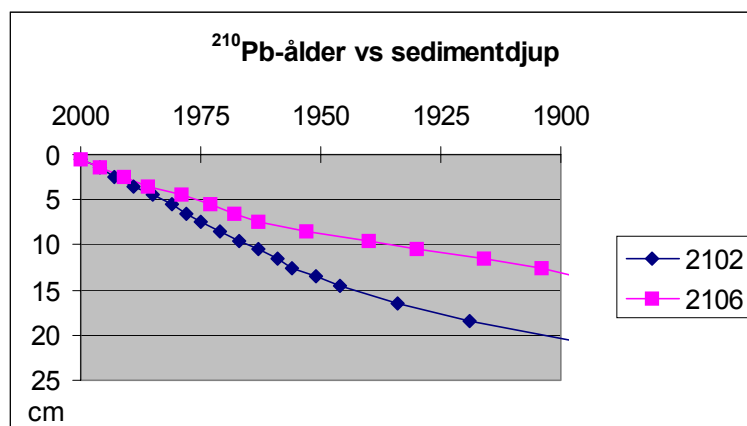


Figur 1: Karta över provtagningsstationerna i närområdet utanför EKA.

RESULTAT

SEDIMENTPÅBYGGNADSHASTIGHET

Sediment kan fungera som historiska arkiv. Förutsättningen är att sedimenten inte påverkats av omblandande processer såsom vågrörelser, eroderande strömmar eller bioturbation. Vissa sediment-dateringsmetoder visar om sedimenten blandas om samt med vilken hastighet nytt material överlagrar gammalt. Genom att undersöka föroreningsförekomst på olika sedimentdjup utanför EKA, samtidigt som sedimentpåbyggnadshastigheten är känd erhålls en bild av pågående och tidigare föroreningsspridning från markområdet till sedimenten, över tiden. Dateringen av sediment är därför central i undersökningen. I Figur 2 visas resultatet från dateringarna av två proppar (se Figur 1, karta). Kurvorna i Figur 2 är justerade men de okorrigerade resultaten visar att sedimenten inte påverkats nämnvärt av omblandning och föreslår därför att undersökningen fyller sitt syfte. Det kan dock inte uteslutas att andra proppar i närområdet kan se annorlunda ut. Det stöds av det faktum att sedimentmaktigheten längs stranden utanför EKA minskar i riktning norrut. Av figuren framgår att sedimenten på ca 12 respektive 20 cm avsattes vid tiden för EKA-fabrikens igångsättning. Dessa nivåer, och därmed åldrar, kommer i den fortsatta diskussionen att tjäna som referensnivåer.

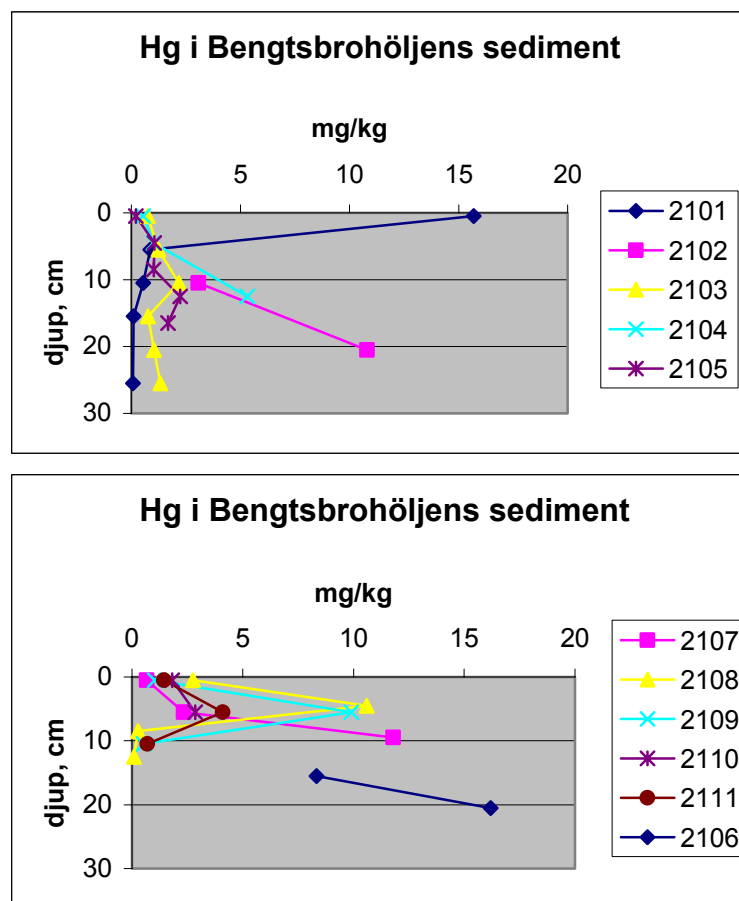


Figur 2: Uppskattade åldrar mot sedimentdjup i EKAs närområde.

FÖRORENINGAR I PLAN OCH DJUP

Kvicksilver

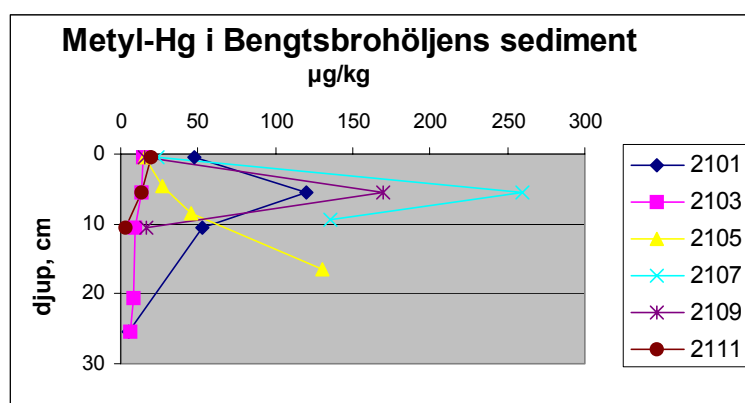
Kvicksilver har spridits i stor omfattning från EKA-fabrikens till omgivande markmaterial och är av stort intresse för undersökningen. Även andra principiella källor till Hg finns i området, t ex. atmosfäriskt nedfall. Det är dock inte sannolikt att bidraget från atmosfären varit av till närmelsevis liknande storleksordning som det från EKA eller varierat på samma sätt över tiden. Variationer med sedimentdjupet kan därför kopplas till spridning från EKA. I Figur 3a och b redovisas sedimentens Hg-innehåll i proppar från närområdet. Av figurerna framgår att halterna på stora djup är låga för att sedan öka, och därefter minska mot ytan. Fördelningen över djupen/tiden föreslår därför en minskande spridning till sedimenten under de senaste 25-50 åren. Orsaken till mot ytan ökande halter i propp B2101 kan inte ges. I propp 2102 samt 2106 räckte materialet inte för analyser av nivåer nära sedimentytan. De höga halterna i propp 2106 i nivåer motsvarande tiden före sekelskiftet (jmf. Figur 2) kan inte förklaras, i synnerhet då dateringen föreslår att proppen inte är mekaniskt omblandad.



Figur 3: Kvicksilver i sedimentproppar från EKAs närområde. Se text för kommentar till station 2106.

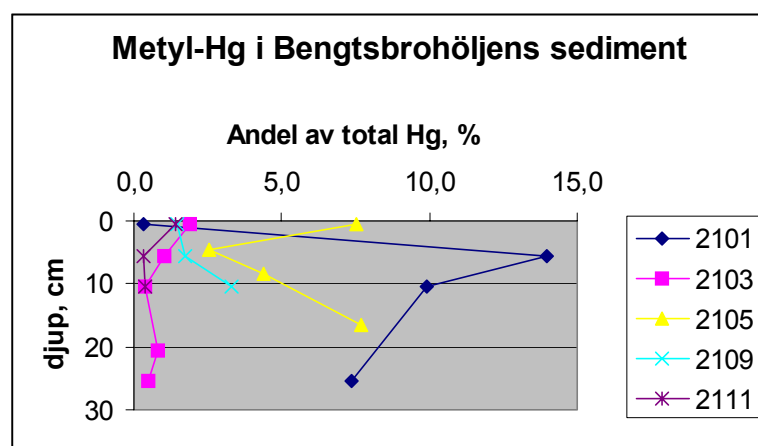
Metylkvicksilver

Kvicksilver kan omvandlas till metylkvicksilver (metyl-Hg) genom naturliga biologiska/kemiska processer. Metyl-Hg är mer toxiskt än icke metylerat Hg, vilket innebär att förekomsten är av intresse i ett miljöperspektiv. I Figur 4 redovisas förekomsten av metyl-Hg i sediment utanför EKA. Av figuren framkommer att halterna av metyl-Hg, liksom av icke metylerat Hg enligt Figur 3, i de flesta fall minskar mot ytan efter ett maxima en bit ner i sedimenten. De maximala halterna en bit ner i sedimenten är att betrakta som höga. I de stationer där halterna är konstanta eller t.o.m. ökar mot ytan är halterna generellt låga.



Figur 4: Metylkvicksilver i sedimentproppar från EKAs närområde.

Andelen metyl-Hg av total-Hg i naturen varierar betydligt. I atmosfäriskt nedfall är andelen någon eller ett par procent, medan andelen i fisk är nära 100 %. I sediment uppgår andelen vanligen till högst en eller ett par procent (t ex. Brack, 2000). I 11 av 19 analyserade prover har andelen beräknats till mindre än 2 % och i 14 av 19 till mindre än 5 % och i 18 av 19 till mindre än 10 %. De högsta andelarna har dessutom uppmätts i propp 2101, vilken har en total-Hg fördelning som enligt diskussionen ovan avviker från övriga proppar. Dessa andelar kan generellt betraktas som höga och antyder att metylering i betydande omfattning pågår i vissa delar av området.



Figur 5: Andelen metylkvicksilver av total-Hg i sedimentproppar från EKAs närområde.

Dioxiner och furaner

Dioxiner (och furaner) är grupper av klorerade persistenta och mycket toxiska organiska ämnen. Både dioxiner (CDD, klorerade dibenso-p-dioxiner) och furaner (CDF, klorerade dibensofuraner) förekommer i olika kemiska varianter med liknande och toxiska egenskaper, s k. kongener. Respektive kongen kan i sin tur förekomma i olika kemiska varianter, isomerer. Olikskheterna utgörs av placering och antal kloratomer påhängda två olika aromatiska tricykliska grundskelett, ett för dioxiner och ett för furaner. Teoretiskt kan man tänka sig 210 olika varianter, men i praktiken analyseras 7 dioxiner och 10 furaner. Den relativa sammansättningen av dessa ämnen med respektive kongen och dess isomerer är till delar källtypisk.

Kommersiellt använda kemikalier kan vara förorenade av dioxin. Oktaklordibensdioxin (OCDD) är en vanligt förekommande förorening i pentaklorfenol (PCP) (Rappe *et al.*, 1997), vilken har använts i betydande omfattning i Sverige som pesticid för impregnering av trä fram till 1978 då användningen förbjöds (Naturvårdsverket, 1999).

Bildning av dioxiner (och furaner) kan förväntas då klor använts som blekningskemikalie vid pappersmassatillverkning. Typiska kongener bildade vid klorblekning av massa är 2,3,7,8-tetra CDF och 2,3,7,8-tetra CDD (Rappe *et al.*, 1997).

Dioxiner och furaner är typiska föroreningar som bildas i samband med kloralkaliprocessen. Undersökningar i recipienter till kloralkaliindustrier visar på en anrikning av *tetra-* och *pentaklorerade* furaner relativt dioxiner, i jämförelse med andra naturliga eller antropogena källor (Andersson, Umeå universitet, pers. kom.).

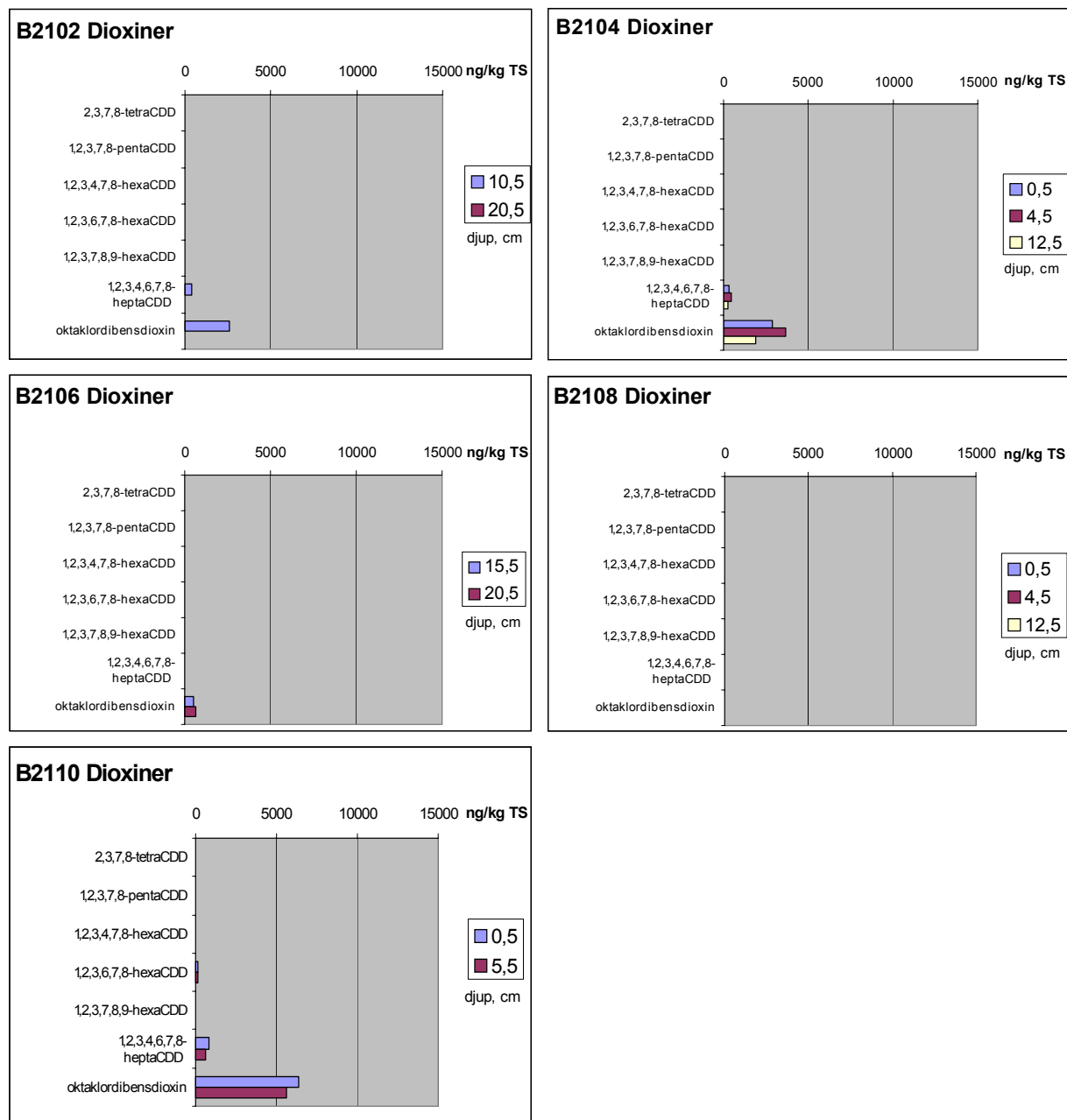
Fem proppar (B2102, B2104, B2106, B2108, B2110) analyserades med avseende på dioxiner och furaner (3-6 nivåer per propp). Ytterligare 4 proppar (B2502, B2504, B2507, B2508) analyserades senare med en känsligare metod (2-4 nivåer per propp).

Dioxiner

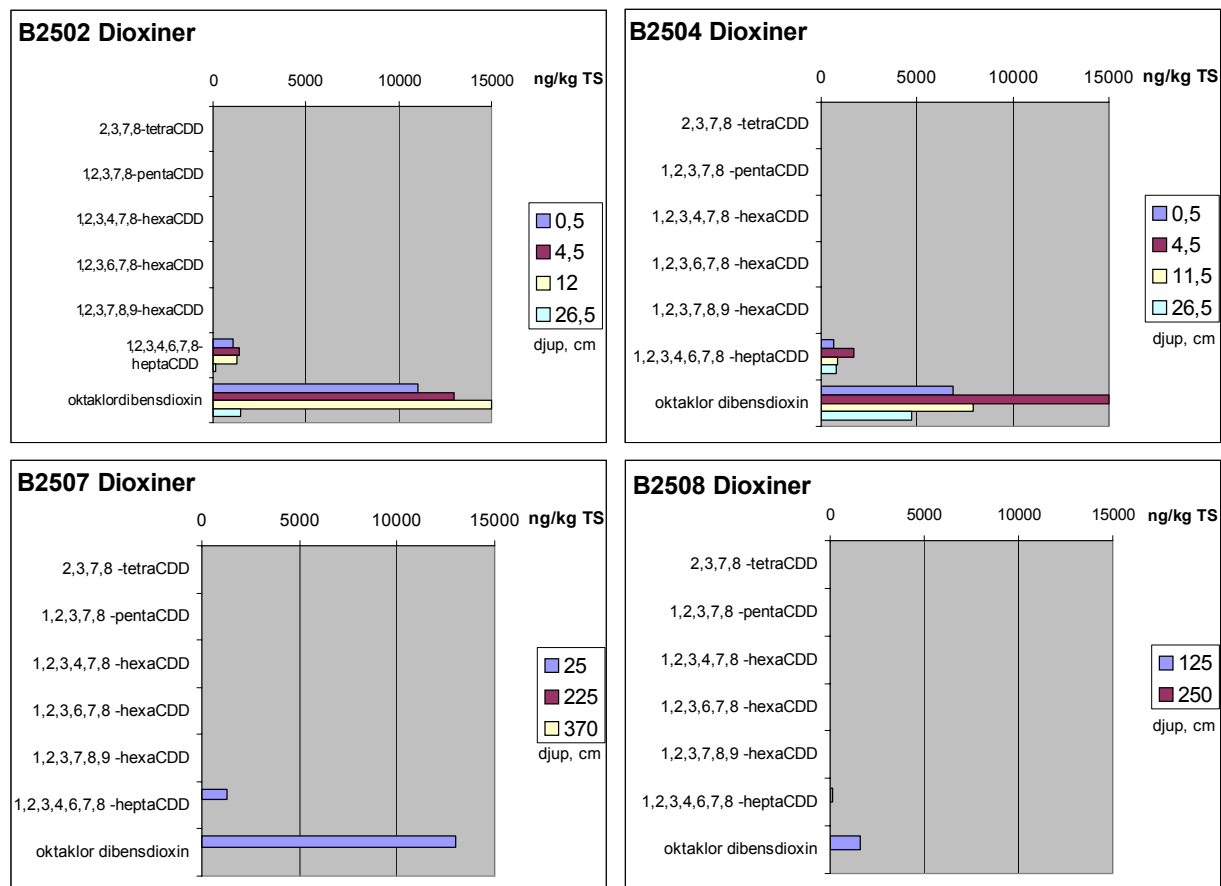
I Figur 6a och 6b redovisas uppmätta halter av 7 dioxinkongener på olika sedimentdjup. Skalan på koncentrationsaxeln är den samma i samtliga delfigurer. Notera att propparna från station B2102, B2104, B2106, B2108 samt B2110 redovisade i Figur 6a är analyserade med en metod som inte är lika känslig som den som använts för prover från station B2502, B2504, B2507 och B2508, redovisade i Figur 6b. En lägre känslighet medför att prover med låga halter ofta rapporteras som ”mindre än” (<) en viss halt. Mindre-än-värden har utelämnats i figuren. De maximala undersökta djupen vid station B2507 och B2508 är avsevärt mycket större än vid övriga stationer. Prov från djup större än ca 30 cm togs med annan metodik än den använd vid ytligare prover. Enligt Figur 6a-b har inga tetra- eller pentaklorerade dioxiner uppmätts utanför EKA och endast vid en station har hexaklorerade dioxiner uppmätts. Däremot så har hepta- och framför allt oktaklorerade dioxiner detekterats vid samtliga stationer utom en, vilket enligt resonemanget ovan föreslår en annan källa än kloralkalitillverkningen. Denna källa skulle kunna vara användning av pentaklorfenol i samband med sågeriverksamhet eller virkesimpregnering. Det går inte att avgöra om källan till dessa oktaklorerade dioxiner var/är belägen på EKA-området. Källstyrkan för dessa förefaller ha minskat över tiden.

Uppmätta halter varierar avsevärt mellan de olika stationerna, 0-15 000 ng/kg TS, vilket kan förklaras med en varierande föroreningsdeposition i plan och djup och därigenom branta vertikala gradienter, vilka till delar går förlorade genom det begränsade antalet analyserade nivåer.

Dioxiner har inte uppmätts på riktigt stora sedimentdjup (> 125 cm), vilket föreslår att transport ut från EKA-området inte sker eller har skett i djupare (grund-)vattenflöden.



Figur 6a: Uppmätta dioxiner i sediment från station B2102, B2104, B2106, B2108 samt B2110 på olika sedimentdjup, se karta, Figur 1.

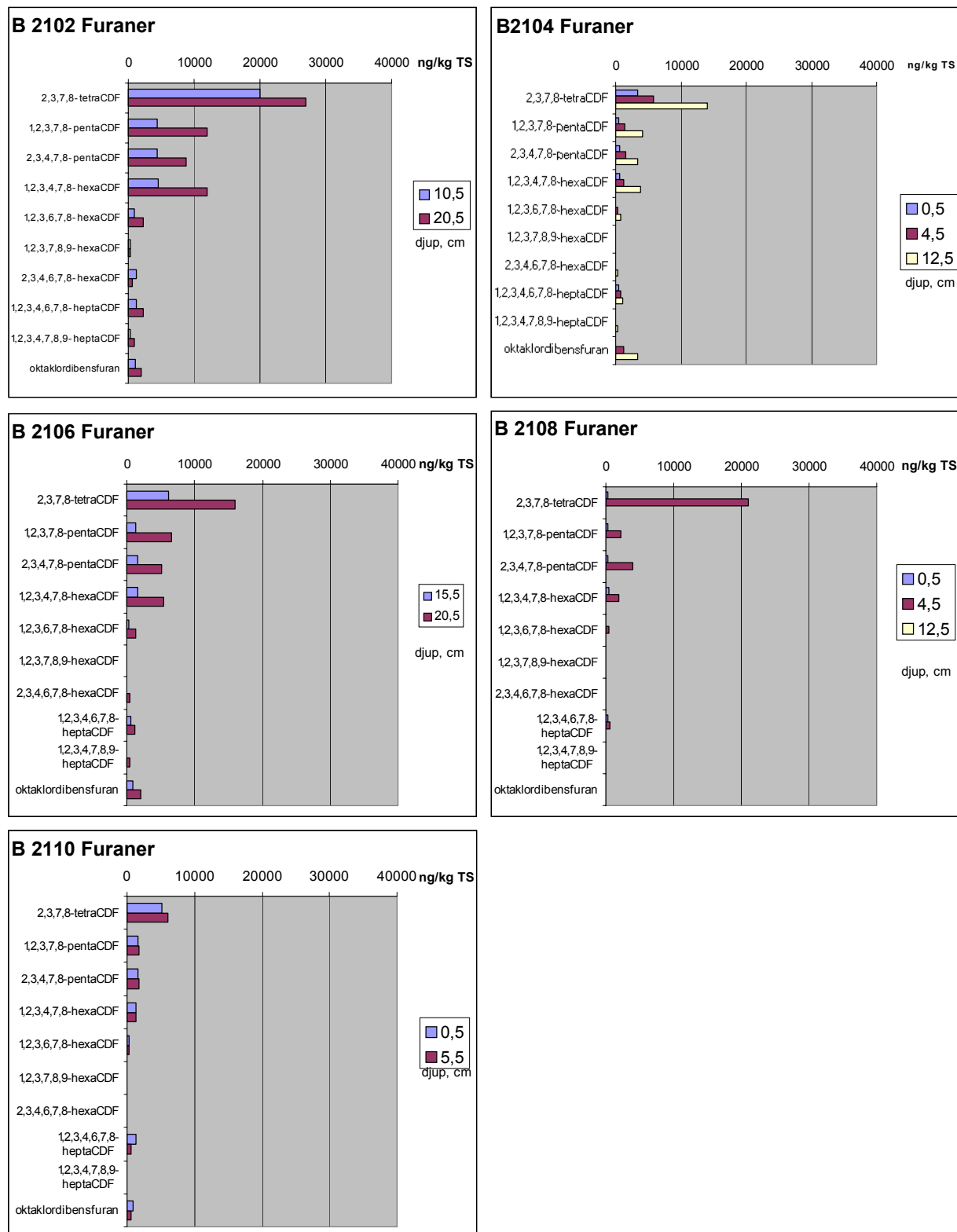


Figur 6b: Uppmätta dioxiner i sediment från station B2502, B2504, B2507 och B2508 på olika sedimentdjup, se karta, Figur 1.

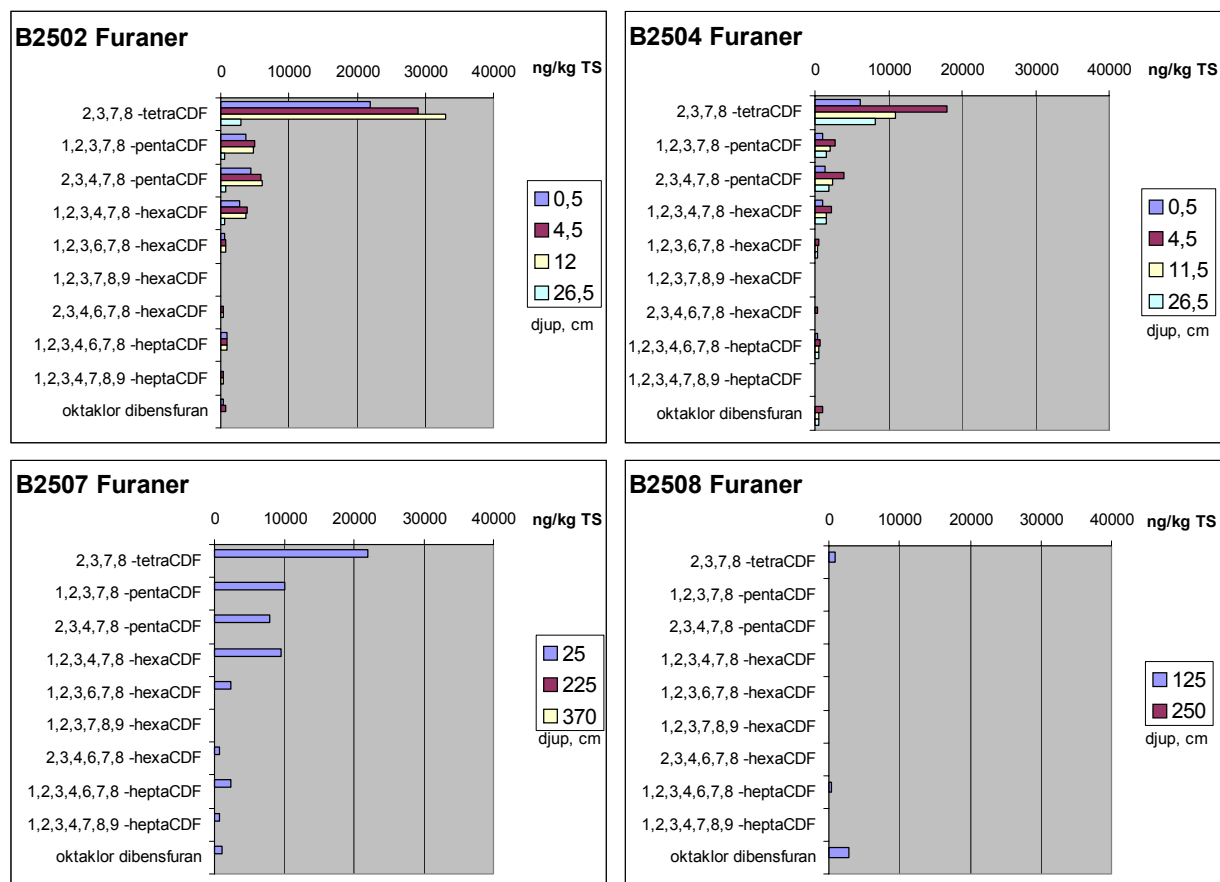
Furaner

I Figur 7a och 7b visas uppmätta halter av 10 furan-kongener på olika sedimentdjup. Skalan på koncentrationsaxeln är densamma i samtliga delfigurer. Notera att propparna från station B2102, B2104, B2106, B2108 samt B2110 redovisade i Figur 7a är analyserade med en metod som inte är lika känslig som den som använts för prover från station B2502, B2504, B2507 och B2508, redovisade i Figur 7b. En lägre känslighet medför att prover med låga halter ofta rapporteras som ”mindre än” (<) en viss halt. Mindre-än-värden har utelämnats i figuren.

Delfigurerna visar på förekomst av både låg- och hög-klorerade furaner i stationerna där ytliga prover tagits. Mängdmässigt dominerar dock de lågklorerade (tetra- och penta-). I samtliga av dessa stationer är halterna högst en bit ner i sedimenten, på djup som oftast sammanfaller med sedimentdjup motsvarande tiden för EKA-driften. Enligt resonemanget ovan avseende källor så förefaller sammansättningen av furan-kongener kunna relateras till kloralkaliproduktionen vid EKA.



Figur 7a. Uppmätta furaner i sediment från station B2102, B2104, B2106, B2108 samt B2110 på olika sedimentdjup, se karta, Figur 1.



Figur 7b. Uppmätta furaner i sediment från station B2502, B2504, B2507 och B2508 på olika sedimentdjup, se karta, Figur 1.

De uppmätta halter av furaner varierar mellan de olika stationerna, vilket kan förklaras med varierande förorenings- och sedimentdeposition i plan och över tiden, och därigenom branta vertikala gradienter, vilket till delar går förlorat genom det begränsade antalet analyserade nivåer.

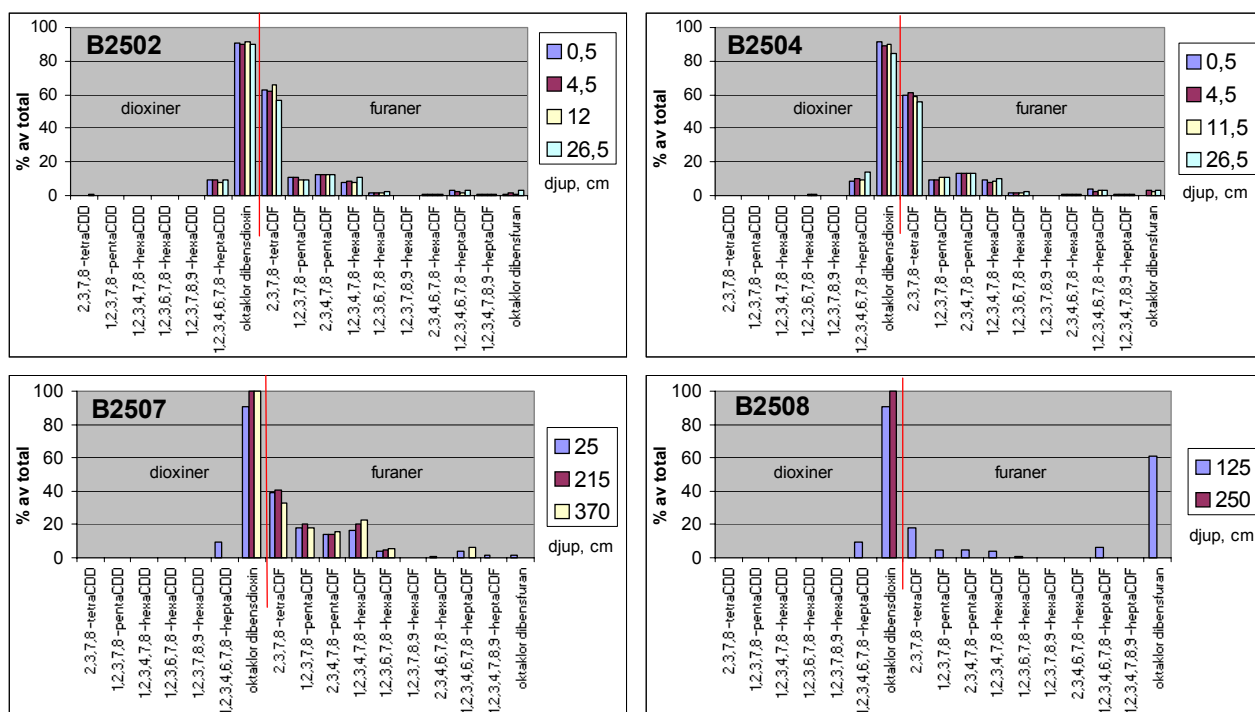
Till skillnad från dioxiner har furaner uppmätts på stora sedimentdjup (225 och 370 cm i station B2507 respektive 125 cm i station B2508), fast i mycket små mängder, vilket då föreslår att transport ut från EKA-området sker eller har skett i djupare (grund-)vattenflöden. Alternativt så kan dock proverna vid dessa djup förorenats vid provtagningen av yttligare lager.

Dioxinkongener i sediment och vatten

Enligt Figur 6 och 7 varierar de uppmätta halterna av dioxiner och furaner mellan stationer och sedimentdjup. Med syftet diskutera källor till dessa föroreningar så har halterna som uppmätts i de prover som analyserats med den känsligare metoden (punkt B2502, B2504, B2507, B2508) normaliserats och uttryckts som procent av summan av analyserade dioxin- respektive furan-kongener. Vid två av dessa stationer (B2502, B2504) har ytliga prover påverkade av ett normalt sedimentationsförlopp analyserats, medan vid de andra två (B2507, B2508) har djupare liggande prover analyserats. Orsaken till att djupare prover analyserats är, som tidigare beskrivits, den inom

EKA-projektet diskuterade möjligheten att en spridning pågår eller har pågått från markområdet ut till Bengtsbrohöljen via djupa grundvattenflöden. Resultat från en tidigare genomförd sedimentundersökning, där dioxinhalterna förefaller öka med stora djup, kan tolkas som en indikation på detta (Terratema, 1996). I Figur 8 redovisas jämförelser mellan normaliserade halter dioxiner och furaner, uttryckta som procentuella andelar av summa dioxiner respektive summa furaner.

Beträffande dioxiner är kongenfördelningen mycket lika i samtliga nivåer av B2502 och B2504 liksom den i nivå 25 cm i B2507 och nivå 125 cm i B2508 (Figur 8). På övriga djup i B2507 och B2508 utgörs dioxinerna till 100 % av oktakerad dioxin. Det går inte att med säkerhet avgöra om ett utflöde på större djup äger rum, om uppmätta halter beror på kontaminering från ytligare nivåer, eller om dioxinerna vid dessa stora djup är äldre än ytligare dioxiner. Är skillnaden åldersrelaterad finns även möjligheten att nedbrytning av mindre klorerade kongener ägt rum.



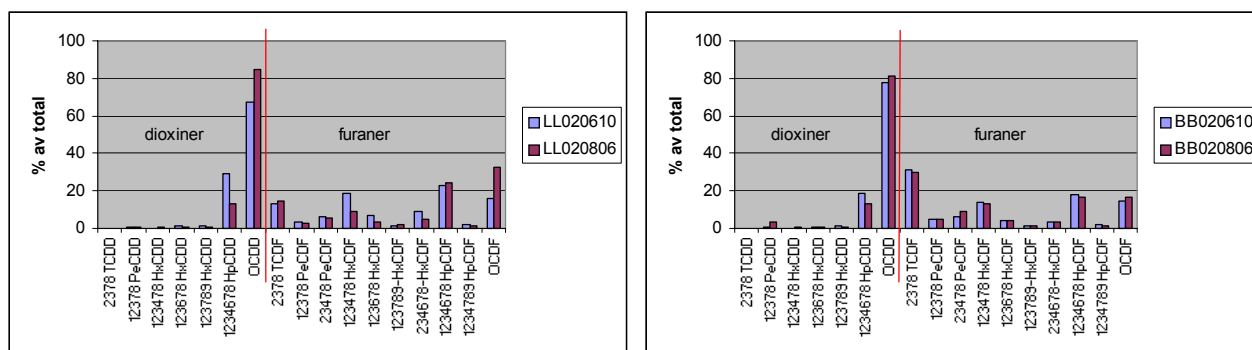
Figur 8: Procentuell fördelning av uppmätta dioxin- och furan-kongener i sediment från närområdet.

Beträffande furaner är sammansättningen nära identisk i station B2502 och B2504, medan den i B2507 och B2508 avviker med en relativt mindre andel lågklorerade furaner (Figur 8). Med hänsyn till att haltfördelningen i B2507 ser lika ut på samtliga djup, 25, 215 samt 370 cm är det sannolikt inte fråga om en större nedbrytning av lågklorerade furaner relativt högklorerade (vilket i ett teoretiskt perspektiv i så fall bör gälla även för dioxiner). Eftersom station B2502 och B2504 ligger långt ifrån station B2507 och B2508 förefaller det snarare vara så att olika källor eller en källa med varierande sammansättning bidragit med furaner.

Som tidigare visats så finns dioxinkällor uppströms EKA, i sjön Lelång (EKA 2002:6). Dioxiner och furaner mäts regelbundet i vatten på väg ut från Lelång, dvs., på väg in i Bengtsbrohöljen, samt

i utflödespunkten från Bengtsbrohöljen. En identifierad källa som bidrar till dessa dioxiner är den nedlagda sulfittmassafabriken där klorblekt massa tillverkades i Bengtsfors, i södra Lelång. Typiska produkter vid klorblekning av pappersmassa är, enligt Rappe *et al.*, (1997) både 2,3,7,8-TCDD och 2,3,7,8-TCDF, och enligt Kjeller *et al.* (1990) 2,3,7,8-TCDF. I Figur 9 visas förhållandet mellan dioxin- respektive furan-kongener i vatten på väg in till Bengtsbrohöljen vid två slumpvis valda provtagningstillfällen. Staplarna ”LL” i figuren visar att tydliga skillnader mellan mätillfällen föreligger samt att vattnet inte är anriktat med avseende på 2,3,7,8-TCDD och endast tveksamt anriktat med avseende på 2,3,7,8-TCDF. En annan källa än till dioxiner och furaner förefaller därför att dominera. Görs en jämförelse mellan vatten i inflödet och utflödet till Bengtsbrohöljen (LL respektive BB i figuren)) så förefaller en viss anrikning med avseende på 2,3,7,8-TCDF äga rum. Kloralkaliprocessen är även den typisk för bildning av 2,3,7,8-TCDF (Andersson, Umeå universitet, pers, kom.).

Vid en jämförelse av Figur 8 med Figur 9 förefaller det som om sedimenten utanför EKA påverkar sammansättningen i utflödande vatten. Med tanke på att punkten B2508 ligger mycket nära inflödet från Lelång till Bengtsbrohöljen så förefaller det heller inte omöjligt att inflödet till höljen påverkar sammansättningen i sedimenten vid denna punkt.



Figur 9: Procentuell fördelning av uppmätta dioxin- och furan-kongener i vatten på väg ut från Lelång (LL) samt på väg ut från Bengtsbrohöljen (BB) vid två tidpunkter (020610, 020806).

I rapport EKA 2002:2 visas den relativa sammansättningen av kongener i provgröpar och borrhål i markmaterial på EKA-området (Figur 4.30 samt 4.31 i rapporten). Resultaten från analyser av markmaterialet visar på en avsevärt mycket större variation mellan proverna än vad som framkommer i sediment- eller sjövattneproverna. Jämförelser och tolkningar skall därför göras försiktigt, trots att en vattenburen spridning från EKA sannolikt verkar integrerande och jämnar ut lokala skillnader beträffande förhållandet mellan olika kongener i närliggande prover.

Skogsindustri typiska föroreningar

I sedimentprov från två stationer, B2102 och B2106, har "screening-analyser" med avseende på klororganiska föreningar genomförts på olika sedimentdjup motsvarande "idag", 70-talet och 50-60-talet genomförts (se Figur 1 och 2). Syftet var att undersöka förekomsten av typiska skogsindustri typiska föroreningar som klorfenoler, klorcatekoler, klorgujakoler, klornaftalener och oktaklorstyren.

I inget fall har skogsindustri typiska föroreningar kunnat detekteras. Ett antal andra ämnen och ämnesgrupper kunde dock spåras. De tydligast identifierade ämnena var polycykliska aromatiska kolväten, speciellt då alkylfenantrener och carboxyfenantrener. Vidare har även ftalater, alkylerade aromater, terpenier och terpenoier identifierats i låga halter. Orsaken till förekomsten är oklar men ämnena förekommer typiskt i bränslen, oljor och plaster samt i viss mån naturligt (terpenier och terpenoier).

SPRIDNINGSFÖRUTSÄTTNINGAR

Inom ramen för projektet genomförde IVL en begränsad studie med syftet att undersöka sedimentens lakbarhet samt porvattenhalter med avseende på Hg (Bilaga 1). Utifrån porvattenhalterna uppskattades diffusionsflöden av total-Hg och metyl-Hg ut från sedimenten. Lakbarheten undersöktes under reducerande samt oxiderande betingelser, dvs. simulerande hur kvicksilvrets bindning till sedimentet påverkas om den kemiska miljön i sedimenten förändras. Reducerande betingelser simulerar en situation då syre förbrukas vilket medför att vissa mineral, i första hand Fe/Mn-oxider, går i lösning. Adsorberat Hg kan därmed komma att frisättas till vattenmassan. Oxiderande betingelser simulerar en situation då sedimenten blandas om och syresätts, t ex. vid en muddring. En ökad syresättning kan leda till en ökad nedbrytning av organiskt material. Det Hg som är bundet till det organiska materialet kan då komma att frisättas till vattenmassan.

Prover från två djup i två proppar (B2102, B2106) undersöktes. Totalhalterna av Hg liknade de i Figur 3, med avtagande halter mot ytan. Även Metyl-Hg visade på samma avtagande mot ytan, men totalhalterna var generellt större än de i Figur 4.

Den reducerbara fraktionen vid ytan utgör 1,2 respektive 4,1 % av total-Hg i de två stationerna, samt är betydligt lägre i de djupare nivåerna. Detta indikerar att Hg i viss omfattning är bundet till reducerbara oxiderade faser, samt att Hg i porvatten binds vid ytan genom adsorption till Fe/Mn-oxider. Även Metyl-Hg frisätts vid lakning i liknande andelar av totalhalter, 0,6 respektive 4,5 %, men utan avtagande med djupet. Detta indikerar i sin tur att lakningen utöver reducerbara faser påverkar även adsorberade eller utbytbara fraktioner.

Den oxiderbara fraktionen visar att de oxiderbara mängderna är låga för både total-Hg och metyl-Hg. Endast 0,03-0,13 % av total-Hg och 0,03-0,19 % av metyl-Hg frisättes genom oxidationen.

Porvattenhalterna av total-Hg och metyl-Hg i de båda propparna uppmättes i nivåerna 0-1 cm samt 1-2 cm. Svårigheter ledde dock till att halterna sannolikt överskattades i propp B2102 varpå diffusionsberäkningar endast kunde göras i propp B2106. Porvattenhalterna av total-Hg och metyl-Hg är generellt avsevärt högre än de i de tidigare uppmätta för bottenvattnet vilket i princip utgör en drivkraft för diffusion från sedimenten till bottenvattnet, förutsatt att adsorption inte sker i ytliga

lager. Beräkningar av flödet mellan nivåerna 0-1 cm och 1-2 cm visar att 240 ng/m²/dygn total-Hg är riktat nedåt i sedimentet. Motsvarande värde för metyl-Hg är 3,9 ng/m²/dygn med riktning uppåt ut från sedimentet. IVL påpekar att värdena skall betraktas som ungefärliga.

En kommentar med koppling till IVLs undersökning: Den fläckvisa förekomsten av höga halter av både total-Hg och metyl-Hg, visad i Figur 3 och 4 samt i IVLs två undersökta proppar, manar till stor försiktighet beträffande generaliseringen av framräknade diffusionsflöden. Högst sannolikt hade flera och kanske de flesta av de andra propparna med avsevärt lägre uppmätta totalhalter, och därmed antagligen även porvattenhalter, givit avsevärt lägre diffusionsflöden om de använts för en motsvarande beräkning. Resultaten bör dock kunna användas för en uppskattning av högsta möjliga flöden.

DISKUSSION

SEDIMENTPÅBYGGNAD

Sedimenten utanför EKAs närområde förefaller fungera som historiskt arkiv. De två stationer som undersökts visar att sedimenten inte är mekaniskt omblandade och att påbyggnadshastigheten varierar betydligt mellan två närliggande stationer. Djupet ner till nivån motsvarande perioden för EKA-fabrikens drift är ca 11-13 respektive 17-20 cm.

FÖRORENINGAR

Kvicksilver

Sedimenten utanför EKA är tydligt förorenade med avseende på kvicksilver, upp till 16 mg/kg TS med en medelhalt (n = 38) om 3,3 mg/kg TS. Som en jämförelse är medelhalten i Stockholm (innerstad, närområden samt småsjöar, n = 394) 3,2 mg/kg TS (Östlund *et al.*, 1998) och i Östersjöns ytsediment 0,1 mg/kg TS (Borg & Jonsson, 1996). De högsta halterna i respektive propp återfinns generellt på djup motsvarande perioden för EKA-fabrikens drift eller strax därefter. De ytligaste sedimentskikten (0-1 cm) är med ett undantag lägre än vid större djup (dvs. djupare än 1 cm), detta inkluderar dock inte propparna 2102 och 2106 där materialet inte räckte för Hg-analys.

Metylkvicksilver

Sedimenten utanför EKA innehåller betydande mängder metyl-Hg, upp till 260 µg/kg TS med en medelhalt (n = 22) om 52,3 µg/kg TS. Variationerna i plan och djup är dock mycket stora, vilket föreslår en varierande bildning. Max-halter vid respektive station återfinns på ca 5 cm djup. Ythalterna är med ett undantag (48 µg/kg TS) lägre än 24 µg/kg TS.

Dioxiner och furaner

Dioxinerna domineras fullständigt av okta- samt i viss mån heptaklorerade dioxiner, vilka inte rapporterats som typiska för kloralkaliindustrier. Halterna av dessa är generellt högst en bit ner i sedimenten. Halterna av oktaklorerad dioxin (OCDD) varierar mellan 9,5 och 15 000 ng/kg TS (n = 25). Som en jämförelse kan nämnas att halten i Lelång, uppströms Bengtsbrohöljen varierar mellan <400 och 3 900 ng/kg TS (n = 21, EKA 2002:6).

Furanerna visar på ett typiskt mönster för kloralkaliindustri dominerat av lågklorerade kongener, främst tetra- och penta-CDF. Halter upp till 33 000 ng /kg TS har mätts. De högsta halterna återfinns dock inte i ytsedimenten utan en bit ner vid djup motsvarande EKA-fabrikens drift.

Dioxinkongener i sediment och vatten

Enligt diskussionen ovan så varierar totalhalterna av dioxiner och furaner i sedimenten. Kongensammansättningen vid de olika stationerna liknar dock varandra, vilket förslår en gemensam källa. Sammansättningen är enligt litteraturen typisk för kloralkalifabriker när det gäller furaner, men inte för dioxiner, där sammansättningen är mer typisk för förbränningsprocesser eller användningen av pentaklorfenol för t ex. träimpregnering. Det begränsade antalet analyser manar dock till försiktighet beträffande spekulationer.

Kongensammansättningen i vattnet in och ut från Bengtsbrohöljen avviker från det i sediment, främst genom ett större inslag av högklorerade furaner. Detta föreslår att bidraget från EKA till Bengtsbrohöljens vatten är måttligt.

Skogsindustriypiska föroreningar

Eftersom inga skogsindustriypiska föroreningar detekterats förs ingen vidare diskussion om dessa.

SPRIDNINGSFÖRUTSÄTTNINGAR

I områden med förorenade sediment aktualiseras ofta frågan om sedimenten bör åtgärdas, t ex. tas om hand eller övertäckas. Avgörande frågor är då vilken typ och vilka mängder av föroreningar som är aktuella, vad eller vem som kan exponeras samt hur spridningsbenägna föroreningarna är, både om ingen åtgärd genomförs och under en eventuell åtgärd. Den kemiska miljön i sedimenten kan vara avgörande för hur föroreningar binds, eller omvänt, hur spridningsbenägna de är. I ett perspektiv av risken för förändrad kemisk miljö, t ex. till följd av åtgärder, har därför sedimentprover med avseende på Hg lakats i en reducerande respektive oxiderande miljö.

Lakningen visar att den reducerbara fraktionen vid ytan i två stationer utgör 1,2 respektive 4,1 % av total-Hg, samt är betydligt lägre i de djupare nivåerna. Även metyl-Hg frisätts vid denna lakning i liknande andelar av totalhalter, 0,6 respektive 4,5 %, men utan avtagande med djupet. Lakningen av den oxiderbara fraktionen visar att de oxiderbara mängderna är låga för både total-Hg och metyl-Hg. Endast 0,03-0,13 % av total-Hg och 0,03-0,19 % av metyl-Hg frisättes genom oxidationen. Sammantaget kan man därför säga att små mängder Hg riskerar att frisättas från sedimenten om miljön förändras.

Halterna av total-Hg och metyl-Hg är generellt avsevärt högre i porvattnet än i sjöns bottenvatten, vilket i princip utgör en drivkraft för diffusion från sedimenten till bottenvattnet. Beräkningar av flödet mellan nivåerna 0-1 cm och 1-2 cm visar dock att 240 ng/m²/dygn total-Hg är riktat nedåt i sedimentet eftersom koncentrationsgradienten sedd nerifrån ökar mot ytan. Jämförelser av total-Hg-halter i vatten på väg in i Bengtsbrohöljen från Lelång och halter i vatten på väg ut från Bengtsbrohöljen visar heller inte på ett tillskott från EKA eller sedimenten utanför (EKA 2002:19). Vid undersökningar av Hg i Bengtsbrohöljens vattenmassa har inga gradienter i horisontal- eller vertikalled indikerande en spridning kunnat påvisats (*ibid.*). Motsvarande diffusionsvärde för metyl-Hg är 3,9 ng/m²/dygn med riktning uppåt ut från sedimentet. Som en jämförelse kan nämnas att depositionen av metyl-Hg vid bakgrundsstationer i Sverige är ca. 0,2-0,6 ng/m²/dygn (EMEP,

www.ivl.se/miljo/projekt/emep). Resultaten från analyser av metyl-Hg i Bengtsbrohöljens vattenmassa visar inte att ett diffusionsflöde ut ifrån sedimenten pågår. Det finns dock en risk för att ett teoretiskt beräknat flöde kan pågå men inte detekteras till följd av den mycket stora utspädningen.

SLUTSATSER

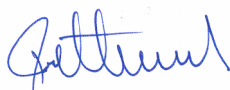
Följande slutsatser kan dras utifrån de genomförda undersökningarna:

- De undersökta sedimenten utanför EKA påverkas inte av omblandande processer samt överlagras genom nysedimentation.
- Sedimenten utanför EKA är avsevärt påverkade av både dioxiner och kvicksilver. Halterna minskar dock mot ytan vilket visar att spridningen från markmaterialet minskar med tiden.
- Källan till dioxiner i sedimenten är inte typisk för kloralkaliindustri men det kan inte uteslutas att källan är belägen på EKA-området.
- Källan till furaner i sedimenten är typisk för kloralkaliindustri och är sannolikt EKA.
- Sedimenten utanför EKA är inte påverkade av skogsindustri typiska föroreningar.
- Kviksilver förefaller inte vara benäget att spridas från EKA vid en förändrad kemisk miljö, t ex. till följd av åtgärder i sedimenten.
- Enligt diffusionsberäkningar läcker kvicksilver, analyserat som total-Hg, inte ut från sedimenten utanför EKA.
- Enligt diffusionsberäkningar läcker metyl-Hg ut från sedimenten utanför EKA

REFERENSER

- Borg H. & Jonsson P. 1996. Large-Scale Metal Distribution in Baltic Sea Sediments. Mar. Poll. Bull. 32, sid 8-21.
- Brack K. 2000. Metylkvikksilver och TBT i sediment från Göteborgs hamn. Geologi, Göteborgs universitet.
- EKA 2002:2. Föroreningssituationen i mark och grundvatten. Bengtsfors kommun.
- EKA 2002:6. Identifiering och kvantifiering av källor till kvicksilver och dioxiner i systemet Lelång – Bengtsbrohöljen. Bengtsfors kommun.
- EKA 2002:19. Transport av dioxiner och kvicksilver till, inom och från Bengtsbrohöljen. Bengtsfors kommun.
- EMEP, www.ivl.se/miljo/projekt/emep.
- Kjeller, L-O., Kulp, S-E., Bergek, S., Boström, M., Bergquist, P-A. och Rappe, C. 1990. Levels and possible sources of PCDD/PCDF in sediment and pike samples from Swedish lakes and rivers. *Chemosphere*, 20, 1489-1496
- Naturvårdsverket 1999. Vägledning för efterbehandling vid träskyddsanläggningar. Naturvårdsverket Rapport 4963.
- Rappe, C., Andersson, R., Bonner, M., Cooper, K., Fiedler, H., Howell, F., Kulp, S.E. och Lau, C. 1997. PCDDs and PCDFs in soil and river sediment samples from rural area in the United States of America. *Chemosphere*, 34, 1297-1314.
- Terratema. 1996. Föroreningssituationen i mark och sediment vid f.d. kloralkalifabriken i Bengtsfors. Terratema AB
- Östlund, P., Sternbeck, J. & Brorström-Lundén, E. 1998. Metaller, PAH, PCB och totalcolväten i sediment runt Stockholm - flöden och halter. IVL-B 1297.

Personlig kommunikation:
Andersson, Rolf. Umeå universitet.



Per Östlund

rapport

IVL Svenska Miljöinstitutet AB

Bengtsfors kommun

Kvikksilver i sediment från Bengtsbrohöljen – lakbarhet och porvatten

John Sternbeck

2003-01-08

A22204

IVL

Organisation/Organization IVL Svenska Miljöinstitutet AB IVL Swedish Environmental Research Institute Ltd.	RAPPORTSAMMANFATTNING Report Summary
Adress/address Box 21060 100 31 Stockholm	Projekttitel/Project title
Telefonnr/Telephone 08-598 563 00	Uppdragsgivare/Client Bengtsfors kommun
Rapportförfattare/author John Sternbeck	
Rapportens titel och undertitel/Title and subtitle of the report Kvicksilver i sediment från Bengtsbrohöljen –lakbarhet och porvatten	
Sammanfattning/Summary	
Nyckelord samt ev. anknytning till geografiskt område eller näringsgren/Keywords	
Bibliografiska uppgifter/Bibliographic data Arkivnr	

1 Sammanfattning

Sjön Bengtsbrohöljen har konstaterats förorenad med bl.a. kvicksilver. Denna studie syftar till att bedöma om det föreligger risk för att sedimenten läcker kvicksilver till vattenmassan. Sediment från två stationer har studerats avseende total-Hg och metyl-Hg i porvatten och i sediment på två nivåer. Sedimenten har dessutom lakats för att simulera den andel av total-Hg och metyl-Hg som skulle kunna frigöras vid övergång till mer reducerande förhållanden respektive vid en syresättning (t.ex. i samband med muddring).

Halterna av total-Hg och metyl-Hg är höga. Vid ytan föreligger total-Hg till några % i en fas som potentiellt kan frigöras vid reduktion. Denna fraktion återfinns inte vid den djupare sedimentnivån vilket stärker antagandet att total-Hg binds till ett oxiderat ytskikt. Även metyl-Hg föreligger till några % i denna fas, men både vid ytan och på den djupare nivån. Detta tyder på att metyl-Hg i denna fraktion snarare representerar en adsorberad fraktion och att ett oxiderat ytskikt innehållande Fe/Mn-oxider inte begränsar eventuellt läckage av metyl-Hg. Cirka 1 % av total-Hg och metyl-Hg frigjordes genom "oxidation". Sammanfattningsvis tyder lakningarna på att total-Hg och metyl-Hg är starkt bundna i sedimenten. Diffusionsberäkningar visar tillsammans med lakningarna att metyl-Hg kan läcka ut ur sedimenten genom diffusion.

2 Metodik

2.1 Provtagning

Sediment provtogs vid två stationer av Studsvik Ecosafe i november 2002. Sedimenten skiktades i fält och levererades inom ca fyra dagar till laboratoriet. För porvattenanalys fylldes provpurkar helt med sediment för att minimera eventuell påverkan från luftning. Porvatten separeras genom centrifugering. Proven från station 2 var mycket svårcentrifugerade men pga de mycket begränsade provmängderna kunde filtrering inte genomföras. Detta kan ha medfört att halterna i dessa porvatten är för höga pga av partiklar. Observera att provdjup för porvatten och fast sediment delvis skiljer sig, enligt uppdragsgivarens önskemål.

2.2 Lakningar

Förutom totalhalter lakades sedimenten i syfte att belysa hur labilt kvicksilver är i sedimenten:

Reducerbart. De mer reaktiva komponenterna i sediment bestämdes genom lakning av frystorkat sediment i 1M HCl + 0.05M NH₂OH, 2 h i rumstemperatur. Denna fraktion motsvarar dels vad som är adsorberat på mineralytor men även vad som är bundet till Fe/Mn-oxider. Eftersom Fe/Mn-oxider löses upp vid reducerande betingelser så ger lakningen alltså ett mått på den mängd Hg som skulle kunna frigöras vid övergång till mer reducerande betingelser. På grund av det låga pH-värdet kommer denna lakning snarast att överskatta den mängd Hg som kan mobiliseras naturligt genom reduktion.

Oxiderbart. Kvicksilver anses ofta vara starkt bundet till organiskt material i sediment. En ökad syresättning kan leda till nedbrytning av det organiska materialet och medför därför en risk att Hg mobiliseras. Ökad syresättning kan exempelvis ske till följd av bioturbation, resuspension eller muddring. För att simulera i vilken utsträckning detta skulle leda till mobilisering av Hg så skakades ca 5 g blött sediment med 30 ml NaAc/HAc vid pH 5.0 i 14 dygn vid lufttillträde och i rumstemperatur.

2.3 Analyser

Total-Hg i sediment och lakextrakt analyserades med cold vapor-AAS. Total-Hg och metyl-Hg i porvatten analyserades med CV-AFS. Detektionsgräns för Hg-tot och metyl-Hg med CV-AFS var 0.06 ng/l. Laboratoriet är ackrediterat hos SWEDAC för analyserna. Metyl-Hg i sediment analyserades enligt Lee m.fl. (1994), vilket i korthet innebär att metyl-Hg separerades genom destillation och upprening i GC. Därefter omvandlades metyl-Hg till Hg⁰ vilket detekterades med CV-AFS. Metyl-Hg analyserades även i ett referenssediment (IAEA-356) där 5.58 ng/g uppmättes, mot angivet värde om 5.46 ng/g.

3 Resultat och diskussion

3.1 Totalhalter

Resultaten presenteras i tabell 1. Total-Hg är tämligen lika vid de båda stationerna, med lägre halter vid ytan. Halterna av metyl-Hg är mycket höga, ökar med djupet, och utgör 2-8 % av total-Hg. Som jämförelse var medelkoncentrationen av metyl-Hg 20 ng/g i starkt Hg-förorenade sediment från Södertälje, och det högsta värdet 186 ng/g (Sternbeck et al., in prep.). Metyl-Hg utgjorde där 0.05-1 % av total-Hg, vilket är ett normalt intervall (t.ex. Brack, 2000).

Tabell 1. Koncentrationer i fast sediment.

Station	Djup	TS	Total-Hg (mg/kg ts)			Metyl-Hg (µg/kg ts)		
			totalt	reducerbart	oxiderbart	totalt	reducerbart	oxiderbart
	cm	%						
2	0-1	10.2	6.6	0.082	< 0.005	150	6.8	0.039
2	10-11	12.0	16	0.005	0.018	1300	13	0.46
6	0-1	9.6	7.8	0.32	0.010	210	6.9	0.39
6	10-11	14.2	20	0.006	0.007	790	5.1	0.089

3.2 Reducerbart

Vid båda stationerna föreligger en reducerbar fraktion vid ytan som dock endast utgör 1.2 % och 4.1 % av total-Hg, vid station 2 och 6 respektive. Särskilt vid station 6 var denna laklösning starkt järnfärgad, vilket stärker antagandet att fraktionen motsvarar järnoxider. På den djupare nivån var halterna av reducerbart total-Hg mycket låg. Det ska också betonas att denna lakning förutom reducerbart även extraherar Hg som är "lättlösligt", t.ex. adsorberat och utbytbart, pga det låga pH-värdet. Att den reducerbara fraktionen av total-Hg avtar med djupet vid båda stationerna indikerar att Fe/Mn-oxider reduceras och att det associerade kvicksilvret går i lösning i takt med att sedimenten begravs och blir reducerade. Det indikerar också att Hg i porvattnet binds vid ytan genom adsorption till Fe/Mn-oxider.

Av metyl-Hg erhålls 0.6- 4.5 % i den reducerbara fraktionen. Halten avtar dock inte med djupet, varför metyl-Hg i denna fraktion snarare torde representera en adsorberad eller utbytbart fraktion.

3.3 Oxiderbart

Muddring eller resuspension innebär att sedimenten exponeras för syre i vattenmassan, vilket kan initiera en ökad nedbrytning av organiskt material med åtföljande mobilisering av organiskt bundet Hg. Den simulering vi gjort av detta förlopp (den oxiderbara fraktionen) visar att de oxiderbara mängderna är låga för både total-Hg och metyl-Hg. Endast 0.03-0.13 % av total-Hg, och 0.03-0.19 % av metyl-Hg, kunde frigöras genom den oxidation som simulerades.

3.4 Porvatten

Halterna av total-Hg och metyl-Hg i porvatten presenteras i Tabell 2. Halterna i station 2 är mycket höga men kan vara överskattade (se kapitel 2.1). Därför kommer endast data från station 6 att diskuteras. Total-Hg vid station 6 är betydligt högre än vad som

tidigare uppmätts i vattenmassan (Arnér et al., 2001), vilket i princip utgör en drivkraft för diffusion från sedimenten till vattenmassan.

Tabell 2. Koncentrationer i porvatten (ng/l).

Station	Djup (cm)	Total-Hg	Metyl-Hg
2	0-1	1430 ^A	2.1 ^A
2	1-2	4750 ^A	0.79 ^A
6	0-1	220	0.25
6	1-2	160	0.74

A. Dessa data kan vara överskattade, se kapitel 2.1.

I syfte att uppskatta storleken på eventuellt läckage av kvicksilver från ytsediment till vattenmassan har porvattensdata använts för diffusionsberäkningar. Hastigheten (F , $\text{ng m}^{-2} \text{d}^{-1}$) på diffusion i porvattnet beräknas enligt:

$$F = -D_s \times \phi \times dC/dz,$$

där D_s är diffusionskoefficient för Hg^{2+} i sediment, korrigerad för temperatur och porositet, ϕ är porositet, C är koncentration av Hg^{2+} i porvattnet och z är sedimentdjupet. Den mest kritiska parametern är diffusionskoefficienten, vars storlek beror av i vilken form kvicksilver förekommer i porvatten.

Diffusionskoefficienten för Hg^{2+} har uppskattats och temperaturkorrigerats för 10°C enligt Li & Gregory (1974) till $5.1 \times 10^{-6} \text{ cm}^2 \text{ s}^{-1}$. För metyl-Hg har $10.3 \times 10^{-6} \text{ cm}^2 \text{ s}^{-1}$ använts (Gill et al., 1999). Vid beräkning av diffusion i sediment måste man dessutom korrigera diffusionskoefficienten för att diffusionssträckan inte är rak. Detta görs vanligen genom empiriska samband med porositeten, ϕ . Porositeten är beräknad utifrån vattenhalten och en uppskattad fastfasdensitet om 2.2 g cm^{-3} .

Flödet vid station 6 blir $240 \text{ ng/m}^2/\text{dygn}$ för total-Hg, riktad ned i sedimentet. För metyl-Hg är motsvarande värde, $3.9 \text{ ng/m}^2/\text{dygn}$, riktat upp ur sedimentet. Det förefaller inte som att total-Hg läcker ur sedimentet genom diffusion, vilket överensstämmer med tidigare studier (t.ex. Gill et al., 1999). Betydligt högre flöden av metyl-Hg har beräknats för estuarina sediment (Gill et al., 1999). Som jämförelse kan nämnas att deposition av metyl-Hg vid bakgrundsstationer i Sverige är ca $0.2\text{-}0.6 \text{ ng/m}^2/\text{dygn}$.

Beräkningarna avser flödet mellan nivåerna 0-1 cm och 1-2 cm. Det är inte självklart att flödet är lika högt mellan den översta nivån och bottenvattnet, eftersom metaller kan bindas till oxiderade ytsediment. Den reducerbara fraktionen, som avses motsvara vad som binds till oxider, tyder på att total-Hg men inte metyl-Hg binds vid ytsedimentet.

Sammanfattningsvis tyder porvattendata och lakningar på att metyl-Hg är mer benäget än total-Hg att läcka ut ur sedimenten genom diffusion. Värdet på diffusionsflödet måste betraktas som ungefärligt, eftersom förekomst av bottenlevande djur kan öka flödet, och eftersom det finns osäkerheter kring diffusionskoefficienter. Studien är baserad på mycket få prov. En djupare insikt i hur kvicksilver uppträder och transporteras i dessa sediment kan erhållas genom tätare provtagning i varje sedimentpropp samt analys av fler parametrar.

4 Referenser

- Arnér M., Nilsson Ö. och Näf C. (2001) Delrapport 1 – sediment och vattenundersökningar, dokumentation av kartering, provtagning och analys. J&W Energi och Miljö.
- Brack K. (2000) Metylkvicksilver och TBT i sediment från Göteborgs hamn. Geologi, Göteborgs Universitet.
- Gill G.A. et al. (1999) Sediment-water fluxes of mercury in Lavaca Bay, Texas. *Environ. Sci. Technol.* 33, 663-669.
- Lee Y.-H., Munthe J. och Iverfeldt Å. (1994) Experiences on analytical procedures for the determination of methylmercury in environmental samples. *Appl. Organomet. Chem.* 8, sid. 659-664.
- Li Y.-H. och Gregory S. (1974) *Geochim Cosmochim. Acta.* 38, 703-714.
- Sternbeck J., Viktor T. och Munthe J. (in prep.) Risk assessment of sedimentary mercury at Snäckviken, Södertälje channel. IVL B rapport.