

Kvicksilver i sediment och fisk från Stockholms skärgård



Magnus Karlsson, IVL Hannes Elving, Uppsala universitet

B1890
December 2009

Rapporten godkänd:
Januari 2010

Uwe Fortkamp
Avdelningschef

<p>Organisation IVL Svenska Miljöinstitutet AB</p>	<p>Rapportsammanfattning</p>
<p>Adress Box 21060 100 31 Stockholm</p>	<p>Projekttitel Kvicksilversituationen i Stockholms skärgård</p> <p>Anslagsgivare för projektet Regionplanekontoret Stockholms läns landsting, Teknisk-naturvetenskapliga fakulteten Uppsala universitet, IVL Svenska Miljöinstitutet AB</p>
<p>Telefonnr 08-598 563 00</p>	
<p>Rapportförfattare Magnus Karlsson, IVL & Hannes Elving, Uppsala universitet</p>	
<p>Rapporttitel och undertitel Kvicksilver i sediment och fisk från Stockholms skärgård</p>	
<p>Sammanfattning Relativt höga kvicksilverhalter har uppmätts i sediment och fisk i vattnen runt centrala Stockholm. På saltsjösidan överskrider i vissa fall de beräknade halterna i abborre och gädda av konsumtionsstorlek Livsmedelverkets riktvärden. I övriga delar av skärgården och östra Mälaren var emellertid kvicksilverhalterna betydligt lägre och på en nivå som kan anses naturlig för svenska vatten. Då kvicksilverflödet från Stockholm till den akvatiska miljön minskat avsevärt under senare tyder resultaten på att historiska utsläpp är bidragande till situationen. Det förelåg en signifikant korrelation mellan kvicksilverhalten i sediment och fiskmuskel i de undersökta kustområdena.</p>	
<p>Nyckelord samt ev. anknytning till geografiskt område eller näringsgren Kvicksilver, sediment, fisk, Stockholms skärgård</p>	
<p>Bibliografiska uppgifter IVL Rapport B1890</p>	
<p>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</p>	

Förord

Kunskapsläget när det gäller nuvarande halter av kvicksilver i kustfisk från Stockholms skärgård är generellt sett bristfällig. Under 1970 och 1980-talet var delar av Stockholms innerskärgård svartlistad, d.v.s. kvicksilverhalterna i konsumtionsfisk, t.ex. gädda och abborre, var så pass höga att folk avråddes från att äta fisken. Under senare år har, såvitt känt är, inga systematiska undersökningar av kvicksilversituationen i Stockholms skärgård genomförts. I några miljöutredningar som nyligen utförts har det emellertid framkommit att kvicksilverhalterna i sedimenten i delar av Stockholms innerskärgård är påtagligt höga. Detta var huvudanledningen till att IVL Svenska Miljöinstitutet AB tillsammans med Institutionen för tillämpad miljövetenskap (ITM) vid Stockholms universitet formulerade projektidén till "Kvicksilversituationen i Stockholms skärgård". Föreliggande rapport utgör populärvetenskaplig sammanfattning av studien som pågått sedan juni 2008. En fullständig redovisning av projektet har gjorts av Elving (2010).

Vid IVL har Magnus Karlsson varit projektledare och ansvarat för fältundersökningar, datainhämtning, utvärdering och rapportering. Mikael Malmaeus har medverkat vid fältarbetena. Tomas Viktor har svarat för preparering och åldersbestämning av fisk och Elsmari Lord har utfört kemiska analyser av sediment.

Vid ITM har docent Markus Meili ansvarat för kvicksilveranalyserna i fiskmuskel samt medverkat i datautvärderingen. Marcus Sundbom har medverkat vid planeringen inför analys av fiskprover som tillhandahållits av Tomas Hansson m. fl., medan provberedning och kvicksilveranalys har utförts av Ann-Marie Johansson och Pia Kärrhage.

Vid Uppsala universitet har inom ramen för projektet ett examensarbete utförts av Hannes Elving vid civilingenjörsprogrammet i Miljö- och vattenteknik vid Uppsala universitet. Magnus Karlsson och Dan Lindgren har handlett examensarbetet. Professor Lars Håkanson har varit ämnesgranskare och professor Allan Rodhe examinator.

Anders Jönsson, IVL har tillhandahållit empiriska data över kvicksilverhalter i sediment från Stockholms ström och Riddarfjärden emanerande från en studie av ombyggnad av trafikplatsen Slussen i centrala Stockholm som letts av Tyréns AB. Christer Lännergren, Stockholm Vatten har tillhandahållit empiriska data över kvicksilverhalter i sediment från Stockholms innerskärgård samt vattenkemiska data från Mälaren och Stockholms skärgård. Sveriges geologiska undersökning (SGU) har tillhandahållit empiriska data över kvicksilverhalter i sediment från Svealandskusten. Till samtliga riktas ett stort tack.

Projektet har finansierats av Regionplanekontoret, Stockholms läns landsting, IVL Svenska Miljöinstitutet AB och Teknisk- naturvetenskapliga fakulteten vid Uppsala universitet.

Stockholm i december 2009

Innehållsförteckning

Kvikksilver i sediment och fisk från Stockholms skärgård	1
1 Inledning.....	3
2 Bakgrund.....	3
3 Material och metoder.....	7
4 Resultat.....	9
4.1 Sediment	9
4.2 Fisk	10
4.3 Statistisk modellering.....	12
5 Sammanfattande diskussion	13
6 Referenser.....	15
Bilaga 1 Korrelationsmatris.....	17

1 Inledning

Kvicksilverkontaminering av fisk utgör alltså ett stort miljöproblem i Sverige, som begränsar användningen av insjöfisk inom betydande områden (KemI, 2009). När det gäller förekomsten av kvicksilver i kustfisk så anses problemet generellt sett vara av mindre omfattning (Sandström, 2000). Det finns dock klara indikationer på att kvicksilverhalten i stationär fisk inom vissa delar av Stockholms skärgård är tydligt förhöjda (Berglind et al., 2003; Sundbom et al., 2007). I t.ex. abborre från Stockholms innerskärgård har kvicksilverhalter uppmätts som tangerar Livsmedelsverkets riktvärde för konsumtion. Samtidigt har användningen av kvicksilver i teknosfären minskat väsentligt under senare år vilket också avspeglas i minskade kvicksilverflöden genom Stockholm under senare år (Bergbäck et al. 2001; Månsson & Bergbäck, 2007).

Syftet med föreliggande studie har varit att med retrospektiva analyser i kombination med nya datainsamlingar dels undersöka hur halten av kvicksilver i konsumtionsfisk (abborre) varierar i Stockholmsrecipienten i en gradient från Mälaren till ytterskärgården, och dels belysa vilka omgivningsfaktorer, exempelvis direktillförsel, sedimentförhållanden, hydrodynamik och vattenkemiska/fysikaliska betingelser, som är av betydelse för observerade kvicksilverhalter. En vidare målsättning har dessutom varit att utifrån eventuella funna empiriska samband mellan halter i fisk och omgivningsfaktorer i studerade områden utveckla en statistisk modell som kan användas som prognosverktyg för kvicksilverhalter i fisk i brackvattenmiljöer.

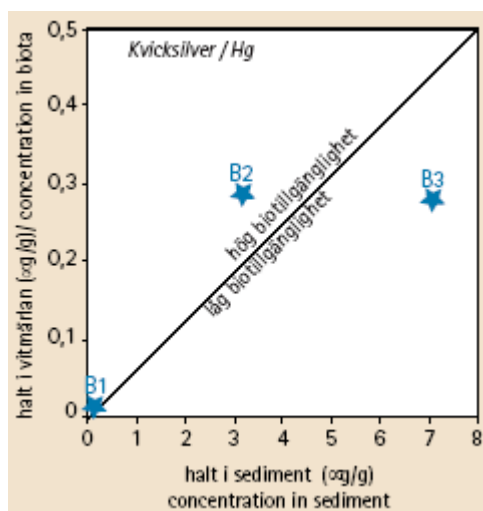
2 Bakgrund

Under 1970- och 1980-talen var kvicksilverhalterna i stationär konsumtionsfisk från Stockholms innerskärgård förhöjda och översteg frekvent 1 mg/kg vv (Grimås & Suárez, 1989), vilket kan jämföras med riktvärdet för saluföring på 0.5 mg/kg vv. Fiskeriverket (Sandström, 2000) genomförde under 1997 insamling och analyser av kvicksilverförekomsten i gös och abborre från 3 områden i Stockholms skärgård (Herräng, Galtfjärden och Ornö). Halterna var generellt sett låga och av storleksordningen 0,10-0,16 mg/kg vv i abborre (20-30 cm lång). Liknande halter erhöles vid undersökningar av abborre 1992 i kustvattnen runt Nacka (Nacka kommun, opubl. data). Vid undersökningar av abborre från Hårsfjärden år 2002 (Berglind et al., 2003) var emellertid kvicksilverhalterna i ”trehektos” abborre betydligt högre, i genomsnitt 0,5 mg/kg vv. Vid undersökningar av 1-3 hg abborre i Stockholms innerskärgård 2006 (Sundbom et al., 2007) varierade halterna i abborre mellan 0,1 och 0,65 mg/kg vv. Det är således en splittrad bild över kvicksilverhalterna i abborre som erhålles från senare års undersökningar, vilket kan bero av olika omgivningsfaktorer i de undersökta områdena.

Halterna av kvicksilver i sediment följer ett mönster av regional kontaminering som påvisats för andra metaller och PAH:er i Stockholms innerskärgård och östra Mälaren samt i mindre insjöar i stadens närhet (Blomqvist & Larsson, 1996; Östlund et al., 1998; Lindström et al., 2001). Kvicksilverdepositionen på ackumulationsbottnar i Stockholms innerskärgård (Lindström et al., 2001) överstiger vida de kvicksilverflöden som beräknats härröra från staden och uttransporten via Mälaren (Bergbäck et al., 2001). Tänkbara förklaringar till detta kan vare att det sker en intransport av suspenderat material från utanför liggande havsområden, vilket t.ex. påvisats för radioaktivt cesium med ursprung i Tjernobylyolyckan (Meili et al., 2000), att det sker en omfattande erosion och omlagring av historiska utsläpp som deponerats i stadens närhet eller att det finns hitills okända

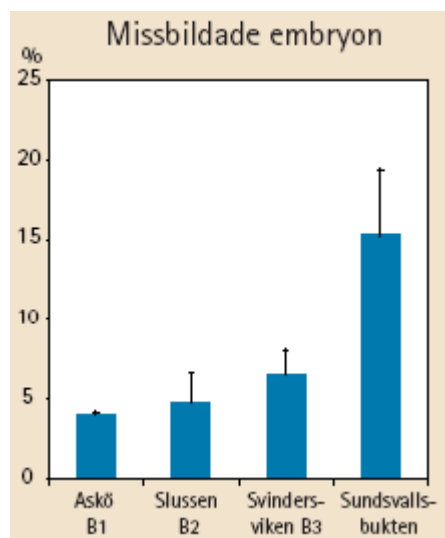
pågående utsläpp/läckage av kvicksilver. Potentiella historiska källor i Stockholms närhet är den tidigare gasproduktionen vid Värtaverket. Stadsgas framställdes ursprungligen genom pyrolys (torrdestillation) av stenkol och som biprodukter erhöles bl.a. koks och tjära. Dessa produkter innehåller också restmängder av metaller, bl. a. kvicksilver (se Elving, 2010). På Beckholmen intill Djurgården har varvsverksamhet bedrivits sedan 1600-talet, varvid beck och tjära använts i stor omfattning.

Generellt anses kvicksilver ha lägre biotillgänglighet i marina miljöer jämfört med i sötvattenssystem (WHO, 1989). Sundelin & Eriksson Wiklund (2003) har studerat upptaget av bl.a. kvicksilver i vitmärsla (*Monoporeia affinis*) som exponerats för sediment från inre delen av Stockholms skärgård (Slussen, stn B2 och Svindersviken, stn B3 (**Fig. 1**)). B1 utgör en referensstation från en av metall- och PAH-kontaminering opåverkad lokal vid Askö i Södermanlands skärgård. Av figur 1 framgår att halten i vitmärsla var högre när den exponerades mot sediment från Slussen trots att halten i sedimenten var lägre jämfört mot Svindersviken. En tänkbar förklaring skulle kunna vara att ytsedimenten vid Slussen till skillnad från vid Svindersviken var anoxiska, vilket anses gynna bildning av biotillgängligt metylkvicksilver.



Figur 1 Halten av kvicksilver i vitmärsla exponerad för sediment med varierande kvicksilverhalt från Askö (B1), Slussen (B2) och Svindersviken (B3). Från Sundelin & Eriksson Wiklund (2003).

Vitmärsla gräver gångar i sedimentet och äter av det organiska material som finns där. Vitmärslans ägg och embryon utgör ett känsligt instrument för att bestämma förekomst och utbredning av förorenade sediment och vitmärslans embryonalutveckling används därför ofta i miljöövervakningssammanhang. Sedimenten från inre delen av Stockholms skärgård visade sig ha en mycket låg giftverkan gentemot vitmärsla trots att halterna av flera metaller inklusive kvicksilver samt även PAH:er kan anses som mycket höga (**Fig. 2**). I figuren görs en jämförelse mot vitmärslor exponerade för förorenade sediment från Sundsvallsbukten.



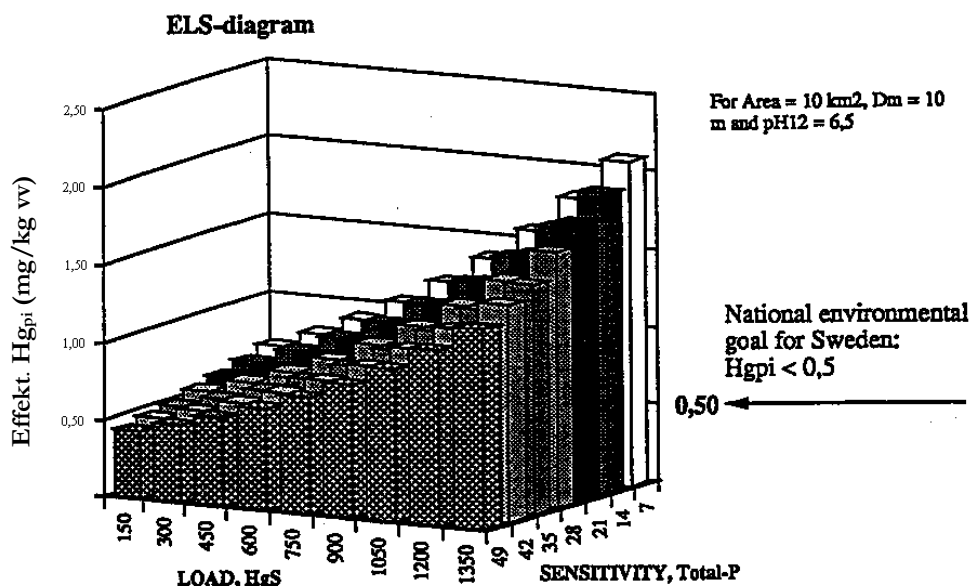
Figur 2 Frekvens av missbildade embryon från vitmärkla exponerad för sediment från olika lokaler. Från Sundelin & Eriksson Wiklund (2003).

En indikation på att omgivningsförhållandena i närområdet till Stockholmsområdet medför en relativt låg biotillgänglighet för kvicksilver framgår också av en studie som utförts av Lithner et al. (2003). Vandrarmussla (*Dreissena polymorpha*) placerades ut i korgar som sänktes ned till botten på ett antal platser i Saltsjön och Mälaren. Efter sex veckor analyserades kvicksilverhalten (liksom för övrigt ett stort antal andra metaller och organiska föreningar). Halten av kvicksilver i vandrarmussla utplacerad vid en station vid Valdemarsudde vid södra Djurgården uppmättes till ca 0,065 µg/g TS. Denna halt är av samma storleksordning som uppmätts i en opåverkad nordamerikansk sjö. I jämförelse med en starkt industrialiserad likaledes nordamerikansk sjö var halten av kvicksilver i vandrarmussla c 3 gånger lägre vid Valdemarsudde.

Fortlöpande undersökningar av bottenfauna i Stockholms skärgård (Stehn, 2005) indikerar att det under senare år skett en förbättring av bottenförhållandena då tätheten av bottenfauna ökat. En förklaring skulle kunna vara att en minskad organisk belastning på botten genom vidtagna reningsåtgärder börjat ge resultat i form av en förbättrad syrgassituation. Det är allmänt accepterat att oorganiskt kvicksilvers omvandling till mer biotillgänglig form genom metylering gynnas av förhållanden när redoxpotentialen längs botten pendlar mellan anoxiska och oxiska förhållanden men ej försiggår i samma omfattning under strikt anoxiska respektive väl oxiderade förhållanden. Att bottenfaunans biomassa ökat under senare år innebär dessutom att den biotillgängliga delen av kvicksilver som förekommer i sedimenten fördelas på en större mängd organismer och att kvicksilverupptaget per individ räknat torde bli lägre, så kallad biologisk utspädning. Det är ett välkänt samband att kvicksilverhalten i fisk generellt sett är högre i näringsfattiga sjöar jämfört med näringsrika (se t.ex. Håkanson, 1999).

Ytterligare en faktor som skulle kunna vara hämmande för upptaget av kvicksilver till organismer är det faktum att halten av zink är relativt hög i sedimenten i Stockholms innerskärgård. Det finns ett flertal observationer från svenska sjöar som visar att där zink förekommer i höga koncentrationer är kvicksilverhalten i fisk ofta låg (Lindeström & Grahn, 1982). Sammanfattningsvis kan det konstateras att det finns en rad faktorer utöver den direkta tillförseln som kan vara av betydelse för vilka kvicksilverhalter som uppmätts i fisk.

Håkanson (1999) har utvecklat en statistisk modell som kan användas för att förutsäga kvicksilverhalten i insjögädda. Modellen drivs av data på kvicksilverhalten i sediment, pH, näringsriktighet och ett par morfometriska variabler (medeldjup och dynamisk kvot). Modellen är en så kallad effekt-dos-känslighetsmodell (**Fig. 3**) baserad på empiriska data från ett fyrtiotal sjöar (Håkanson, 1999) som visat sig ge en förklaringsgrad på 85 % ($r^2 = 0,85$). Alla ingående drivvariabler har en logisk koppling gentemot kvicksilverhalten i fisk. Näringsriktigheten här angiven som totalfosforhalt har koppling till begreppet biologisk utspädning. En stor produktion av alger, plankton och fisk medför att mängden kvicksilver fördelas över en större biomassa varvid halten blir lägre. pH påverkar specieringen av kvicksilver i olika mer eller mindre biotillgängliga fraktioner. Ju lägre pH-värde desto större biotillgänglighet. Morfometrin påverkar exempelvis resuspensionen av kvicksilverhaltigt sediment från bottarna och indirekt även faktorer som t.ex. syrgashalt i bottenvattnet. Halten av kvicksilver i sedimenten utgör ett mått på hur mycket kvicksilver som flödar genom systemet ifråga.



Figur 3 Effekt-dos-känslighetsdiagram för kvicksilver i gädda. Från Håkanson (1999).

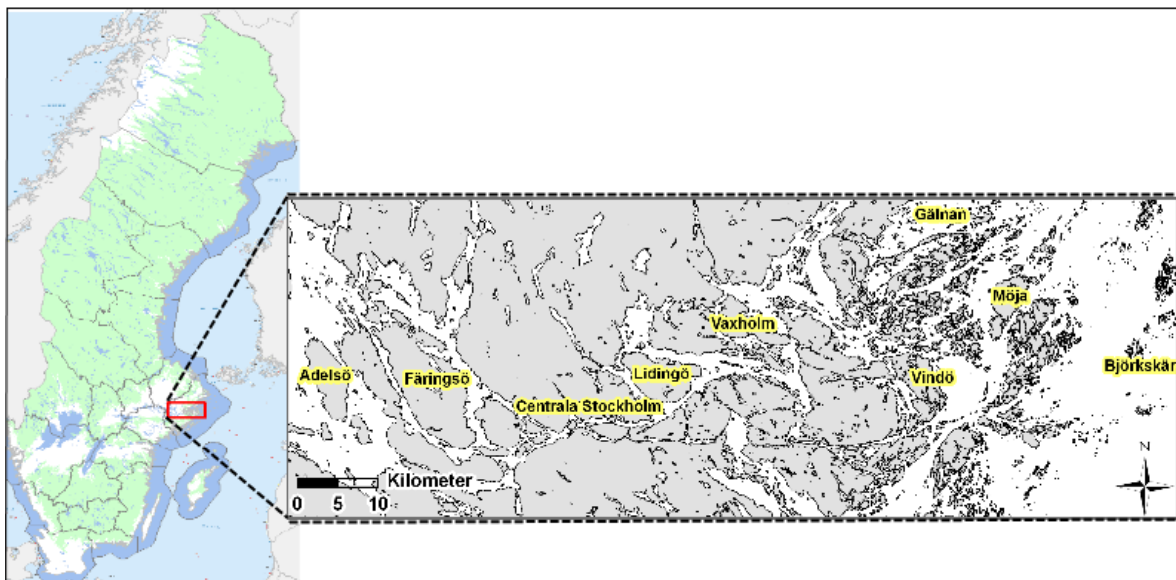
Lindström & Tröjbom (2006) har använt ett liknande angreppssätt för att utveckla en statistisk modell utifrån data från insjöar i Stockholms län. I deras modell prognostiseras kvicksilverhalten i abborre från en regression där höjden över havet, absorptionsen och pH ingår. Förklaringsgraden låg på 76 %.

I denna studie har avsikten förutom att skapa en bättre bild av kvicksilversituationen i konsumtionsfisk i Stockholms skärgård också varit att undersöka om det går att utveckla en liknande modell för att förutsäga kvicksilverhalten i abborre i brackvattenmiljö utifrån omgivningsfaktorer. Faktorer som kan tänkas påverka utfallet är exempelvis salinitet, vattenomsättning, kvicksilverhalter i sediment, redoxförhållanden längs bottnar, näringsriktighet, djupförhållanden m.m.

3 Material och metoder

Muskel från höstfångad abborre i storleksklassen 15-25 cm fanns att tillgå från tre olika insamlingstillfällen. Hansson et al. (2006) insamlade under åren 1999-2001 abborre i Stockholms skärgård för fysiologiska studier. Material från dessa undersökningar har bevarats frystorkat och har i samband med denna studie analyserats retrospektivt med avseende på kvicksilverinnehåll. Sundbom et al. (2007) analyserade kvicksilverinnehållet i abborre i ett tiotal områden i en gradient från östra Mälaren mot ytterskärgården. Fisken insamlades under 2006. Därutöver insamlades under 2008 fisk från tre referensområden Kallrigafjärden och Gudingefjärden i Norduppland (Malmaeus & Karlsson, 2009) samt Vålaröfjärden i Södermanlands skärgård.

Totalkvicksilverhalten på torrviktsbasis bestämdes med atomabsorptionsspektroskopi vid ITM. Konvertering av kvicksilverdata från torrsubstans till att motsvara mg Hg/kg färskvikt (vv) gjordes genom att dividera med faktorn 5, enligt vedertagna samband. Från varje område genomfördes individuella analyser på muskel från 10-20 individer. I **Figur 4** visas det huvudsakliga studieområdet varifrån fiskdata fanns att tillgå.



Figur 4 Det huvudsakliga studieområdet där fiskdata från 12 områden förelåg.

För att kunna jämföra halter av kvicksilver mellan fisk av olika storlek och olika art tillämpades ett förfarande utvecklat av Meili et al. (2005), så att alla mätvärden normerats till halten i enkilos gädda. I en överföringsfunktion ingår koefficienter som tar hänsyn till såväl artspecifika som storleksrelaterade faktorer som påverkar innehållet i fiskmuskel.

Data på kvicksilverhalten i sediment från Stockholms skärgård har sammanställts från ett antal litteraturkällor (**Tab. 1**). Därutöver genomfördes en kompletterande datainsamling under hösten 2008. Sedimentdata har företrädesvis hämtats från ackumulationsbottnar, dvs. djupare liggande mjukbottnar där det sker en kontinuerlig deposition av kohesivt finmaterial.

Tabell 1 Sammanställning över utnyttjade sedimentdatakällor.

Östlund et al. (1998)
Lindström et al. (2000)
Sternbeck et al. (2003)
Tyréns AB Slussenprojektet, Anders Jönsson, IVL, pers. komm.
Stockholm Vatten, Christer Lännergren, pers. komm.
Miljökemisk sedimentdatabas, Sveriges geologiska undersökning (SGU), I. Cato, pers. komm.

Vattenkemisk/fysikaliska data erhöles från Stockholm Vattens recipientkontrollprogram i Mälaren och Stockholms skärgård (Christer Lännergren, pers. komm.). För morfometriska avgränsningar och djup/volymbestämningar utnyttjades SMHIs (2003) kustavgränsningar i skärgården och Lindström et al. (2000) indelning av Mälarbassänger. Ett geografiskt informationssystem (GIS) i programvaran ArcGIS (©) användes för att koordinatsätta, interpolera och visualisera sammanställda data.

För statistisk bearbetning användes programvaran Statistica (©). Stegvis multipel regression användes för att undersöka om kvicksilverhalten i fisk (den beroende y-variabeln) kunde predikteras utifrån en eller flera oberoende x-variabler från områdena. Såväl x som y-variabler transformerades för att i möjligaste mån approximera en normalfördelning. Variabler och transformationer presenteras i **Tabell 2**.

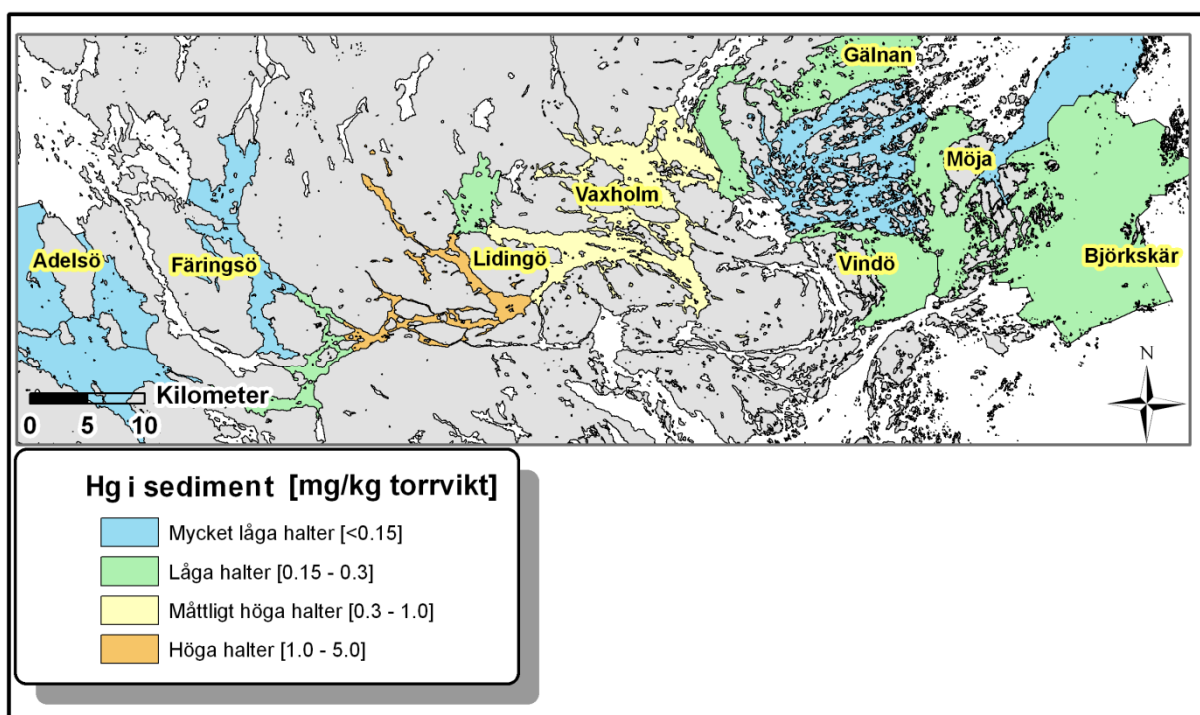
Tabell 2 Tillgängliga variabler samt genomförda transformationer för att erhålla approximativnormalfördelning.

Variabel	Enhet	Transformation
Hg-halt i fisk	mg/kg vv	Log
Hg-halt i sediment	mg/kg ts	Log
Vattenområdesarea	km ²	Log
Akkumulationsbottenarea	%	Kvadratrot
Medeldjup	M	Kvadratrot
Maxdjup	M	Ln
Volym	km ³	Exponent
Dynamisk kvot	Dimlös	Exponent
TOC	mg/l	Ln
pH-värde	Dimlös	-
Siktdjup	M	Log
Klorofyll-a	µg/l	Exponent
Salthalt	PSU	Ln
Syrehalt	mg/l	Log
Syremättnad	%	Exponent
Totalfosfor	µg/l	Exponent
Totalkväve	µg/l	Ln

4 Resultat

4.1 Sediment

I sedimenten förelåg en tydlig variation mellan områdena med de högsta halterna i närheten av centrala Stockholm, se **Figur 5**, och därefter avklingande halter både i riktning västerut mot centrala Mälaren och österut mot ytterskärgården. Det högsta enstaka uppmätta värdet var 38 mg Hg/kg ts (tidigare publicerat i Östlund et al (1998)) vilket är ett extremt högt värde (NV, 1999). Kvicksilverhalterna i sediment från respektive område, jämligt variabilitet (CV) och antal prov (n) per område redovisas även i **Tabell 3**.



Figur 5 Kvicksilverhalter i sediment från östra Mälaren och Stockholms skärgård, klassificering enligt NV (1999). Klassning av respektive område har gjorts genom interpolation av data från provtagningsstationer inom varje område.

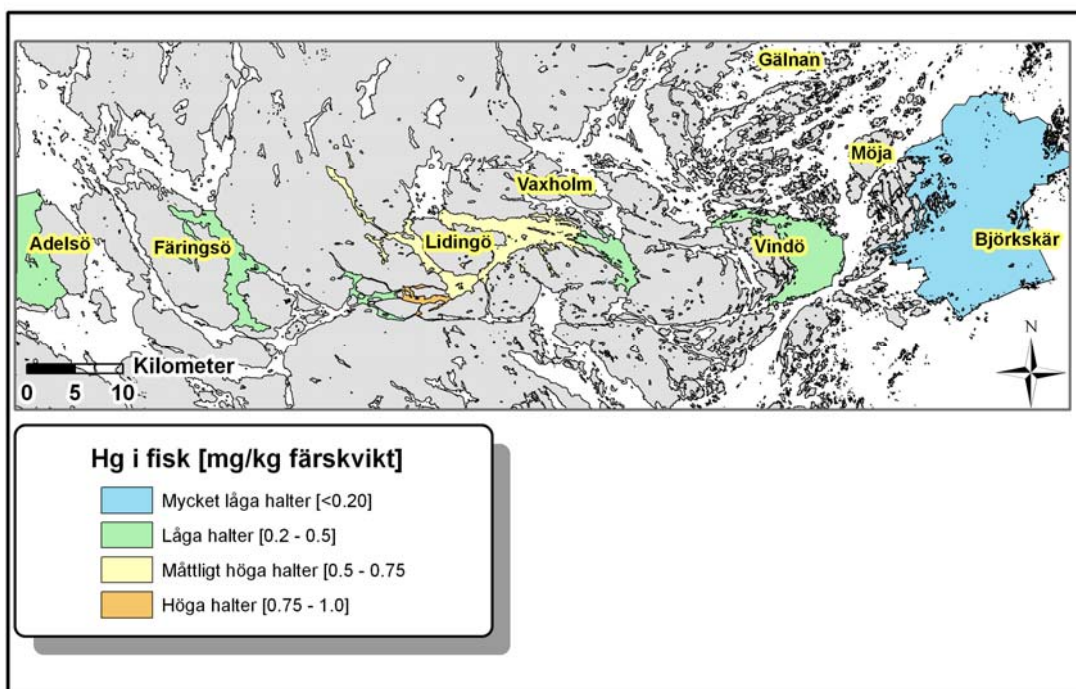
Tabell 3 Kvicksilverhalter i sediment från respektive område. MV = medelvärde mg/kg ts), Std = standardavvikelse, n = antal prov och CV = relativ standardavvikelse.

Område	MV±Std	n	CV
Adelsö	0.11	1	-
Södra Björkfjärden	0.14	1	-
Hovgårdsfjärden	0.12	1	-
Kyrkfjärden	0.15±0.02	7	0.12
Görveln/Näsfjärden	0.12	1	-
Lambarfjärden	0.10	1	-
Ekerö/Fiskarfjärden	0.27±0.05	7	0.18
Klubben/Smedslätten	1.11±1.69	23	1.53
Ulvsunda/Bällstaviken	1.75±1.42	35	0.81
Årstaviken	2.81±1.05	22	0.37
Riddarfjärden	1.64±1.44	41	0.88
Strömmen	4.21±5.64	53	1.34
Lilla Värtan	1.68±0.51	21	0.30
Tranholmenområdet	1.64±0.59	19	0.36
Stora Värtan	0.27±0.10	5	0.38
Askrikefjärden	0.91±0.24	28	0.27
Vaxholmsfjärden	0.87±0.10	6	0.11
Torsbyfjärden	0.44±0.22	8	0.50
Solöfjärden	0.38±0.13	8	0.36
Trälhavet	0.46±0.14	8	0.29
V Saxarfjärden	0.35±0.10	5	0.28
Ö Saxarfjärden	0.16	1	-
Träsköfjärden	0.14±0.06	3	0.48
Gälnan	0.08±0.01	3	0.15
Skagsfjärden	0.15	1	-
Vindö	0.18	1	-
Möja	0.16±0.04	2	0.25
Kallskärsfjärden	0.14±0.07	7	0.51
Björkskärsfjärden	0.17±0.05	2	0.26
Tvären (Nyköping)	0.04	1	-
Kallrigafjärden (Öregrund)	0.15±0.02	2	0.14

4.2 Fisk

Kvicksilverhalter normerade till ”enkilos” gädda, vilket också anses motsvara halter i ”trehekto” abborre redovisas i **Figur 6**. Halterna av kvicksilver var högst i fisk från centrala Stockholm och avtog en västlig respektive östlig gradient i ett likartat mönster som för sediment (**Fig. 4**). De individuella halterna varierade avsevärt inom provtagningslokalerna, vilket visar på nödvändigheten

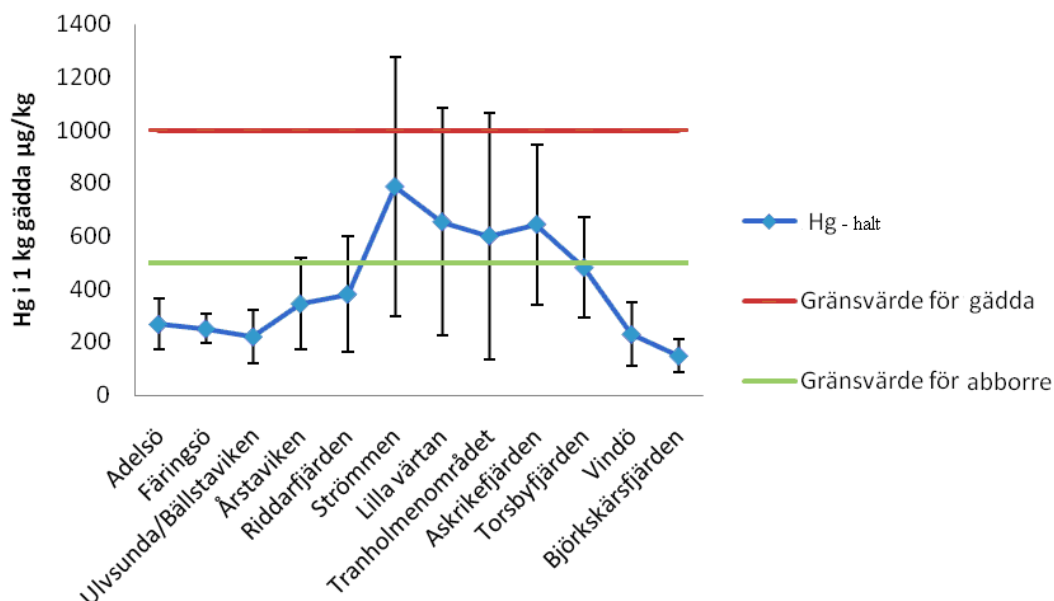
av att analysera ett relativt stort antal individer från varje lokal för att erhålla ett representativt värde. Exempelvis var spridningen vid provtagningsplatsen *Slussen* (området Strömmen) 229-1891 $\mu\text{g}/\text{kg}$ vv, där bägge extremvärdesfiskarna var ungefär lika stora. Enstaka exemplar över riktvärdet på 1000 μg Hg/kg vv fanns även vid *Kummelnäs* (Askrikefjärden) samt i Lilla Värtan. I **Tabell 4** visas bakomliggande data till **Figur 6**. En tredje redovisning av de normerade kvicksilverhalterna visas i **Figur 7**.



Figur 6 Uppmätta kvicksilverhalter i fiskmuskel normerade till "enkilos" gädda, klassificering enligt NV (1999).

Tabell 4 Kvicksilverhalter i fiskmuskel, normerade till "enkilos" gädda. Halterna redovisas som medelvärden från respektive område. CV=relativ standardavvikelse

Område	Normerad Hg-halt [$\mu\text{g}/\text{kg}$] \pm en standardavvikelse	CV-värde	Färgklassificering
Adelsö	268 \pm 97	0.36	■
Färingsö	251 \pm 54	0.22	■
Riddarfjärden	382 \pm 219	0.46	■
Årstaviken	345 \pm 173	0.50	■
Ulvsunda/Bällstaviken	221 \pm 101	0.57	■
Strömmen	784 \pm 489	0.62	■
Lilla Värtan	653 \pm 429	0.66	■
Tranholmenområdet	600 \pm 465	0.78	■
Askrikefjärden	644 \pm 303	0.47	■
Torsbyfjärden	481 \pm 190	0.40	■
Vindö	230 \pm 122	0.53	■
Björkskärsfjärden	149 \pm 61	0.41	■
Kallrigafjärden (Öregrund)	136 \pm 23	0.17	■
Gudinge (Öregrund)	304 \pm 139	0.46	■
Vålarö (Nyköping)	118 \pm 36	0.31	■



Figur 7 Medelkvicksilverhalt \pm 1 standardavvikelse i fiskmuskel (normerad till "enkilos" gädda ↔ "trehektos" abborre) i områden från östra Mälaren mot ytterskärgården.

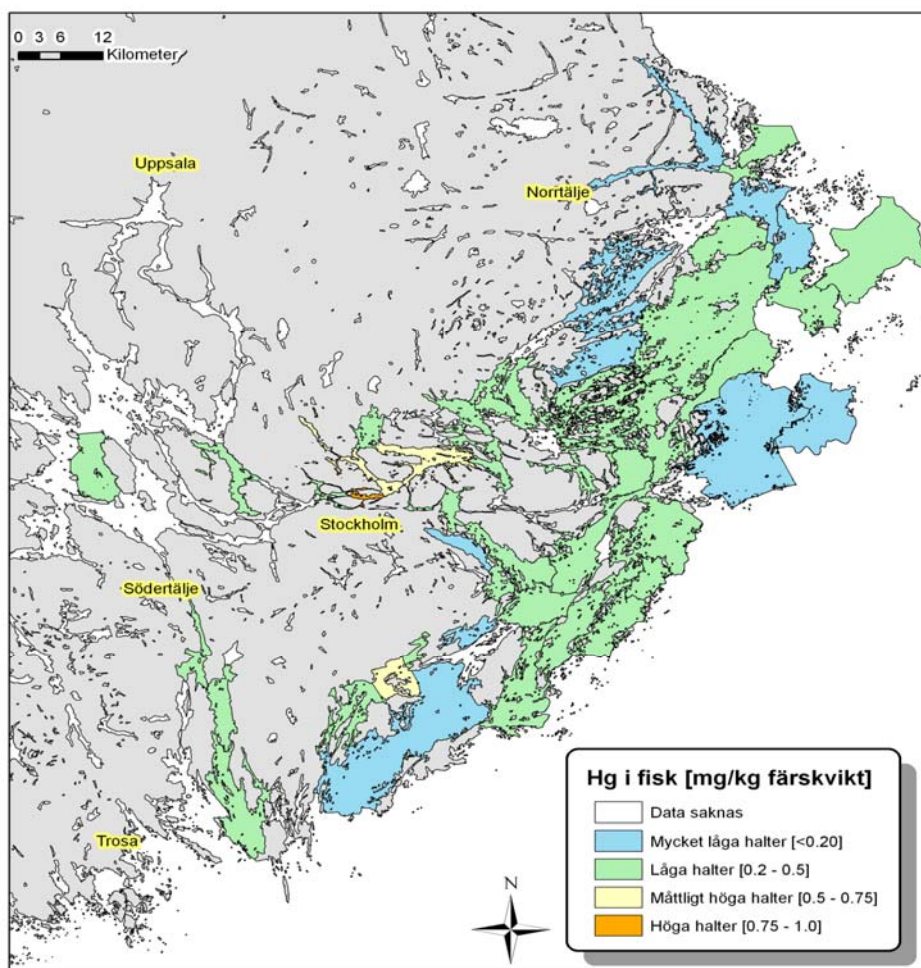
4.3 Statistisk modellering

En korrelationsmatris för samtliga undersökta variabler redovisas i Bilaga 1. Det visade sig med hjälp av stegvis multipel regression att kvicksilverhalten i fisk från kustområdena kunde predikteras utifrån sedimenthalten med drygt 80 % förklaringsgrad (ekv. 1). Någon ytterligare x-variabel kunde inte tillföras till regressionen med bibehållande av en acceptabel signifikansnivå.

$$\log(\text{Hg}_{\text{pi}}) = 2,70 + 0,44 \cdot \log(\text{Sed}) \quad (1)$$

$$r^2=0.81, n=10, F=4$$

Med utgångspunkt i ekvation 1 beräknades kvicksilverhalten i andra delar av Stockholms skärgård där sedimentdata förelåg (Fig. 8). Av figuren framgår att de beräknade kvicksilverhalterna i fisk i norra och södra skärgården generellt sett kan antas vara låga. Ett undantag utgörs av ett mindre område i anslutning till Musköbasen där höga kvicksilverhalter förekommer i sedimenten inom ett begränsat område där örlogsflottan tidigare hade en fotodetalj. Relativt höga halter av kvicksilver i abborre (0,5 mg/kg ts) har också påvisats empiriskt inom detta område (Berglind et al., 2003).



Figur 8 Beräknade kvicksilverhalter i fisk ("enkilos" gädda) utifrån uppmätta halter i sediment (data från Miljökemisk sedimentdatabas, Sveriges geologiska undersökning (SGU), I. Cato) och regression enligt ekv. 1.

5 Sammanfattande diskussion

Kviksilverhalterna i fisk från centrala Stockholm, framförallt från saltsjösidan, har utifrån denna begränsade studie befunnits vara relativt höga. Normerade kvicksilverhalter i gädda och abborre av konsumtionsstorlek har beräknats till att vara i nivå med eller i vissa fall överskrida Livsmedelsverkets gränsvärden för konsumtion. Kviksilverhalten i fisk från centrala Stockholm var högre än vad som, såvitt känt är, uppmätts någon annanstans i Stockholms län under senare år (Lindeström & Tröjbom, 2006; Sundbom et al., 2007). I yttre delarna av Stockholms skärgård liksom i undersökta områden i östra Mälaren väster om centrala Stockholm var däremot kvicksilverhalten i påfallande låg och på en nivå som kan anses naturlig för svenska vatten. Kviksilverhalten i fisk från olika delar av Mälaren har tidigare undersökts (Lindeström, 2001) och befunnits vara av samma storleksordning som redovisats i denna studie. Det bör dock påpekas att en stor del av fiskmaterialet som denna studie baseras på insamlades för tioåret sedan och inte nödvändigtvis speglar dagens kvicksilvernivåer i stationär fisk. Kviksilverflödena från teknosfären till den akvatiska miljön runt Stockholm har minskat väsentligt under senare år (Månsson &

Bergbäck, 2007), vilket på sikt också borde leda till minskande halter i fisken. En tendens till lägre halter i fisken som fångades år 2006 jämfört med år 2000 kunde skönjas i de områden där data från bägge insamlingstillfällena förelåg men det låg utanför denna studies omfattning att studera detta närmare.

Det förelåg en stark korrelation mellan halter av kvicksilver i sediment och fisk från skärgårdsområdena ($r^2 = 0,81$). Liknande samband har påvisats av Cato (2006) vid undersökningar längs den svenska västkusten. Exempelvis var korrelationen mellan kvicksilver i sediment och muskel från tånglake positiv ($r^2=0.80$, $n=10$, $p<0.01$). Det bör dock påpekas att det sannolikt inte föreligger något kausalt samband mellan kvicksilverhalter i ackumulations sediment och halter i fisk från vårt studieområde. Sedimentproven är i regel hämtade från de djupast liggande bottenarna inom respektive område emedan fisken och dess föda huvudsakligen uppehåller sig i littoralzonen. Kvicksilverhalten i ackumulations sedimenten är däremot sannolikt en representativ indikator på hur mycket kvicksilver som flödar inom och genom respektive område och speglar på så sätt kvicksilvernivåerna också i littoralzonen där man kan förmoda att det största bioupptaget sker.

Omfattande undersökningar av kolhalter i sediment från Stockholms skärgård (Jonsson et al., 2003) har visat på förbluffande likartade förhållanden mellan inner- och ytterskärgård. Det hade likväl varit intressant att normera uppmätta kvicksilverhalter i sediment med motsvarande organisk halt för att se om detta medfört en annan regression mot halten i fisk samt andra mönster i spridningsloberna för kvicksilver i sedimenten. För en betydande av del av det empiriska dataunderlaget fanns emellertid inte organisk halt i sedimenten tillhanda.

Den begränsade studie som nu genomförts har visat på att kvicksilverhalterna i sediment och fisk runt Stockholm varit relativt höga under det senaste decenniet. Det är enligt vår mening motiverat att följa upp de resultat som här redovisats med ytterligare undersökningar för att belysa dagens situation i framförallt innerskärgården där de högsta halterna påvisats. Den framtagna statistiska modellens prediktionskraft skulle vidare kunna höjas om man också inkluderade några fler ytterområden till regressionen. Det skulle också vara önskvärt att under en tid följa kvicksilverhalten i vattenmassan inom och utanför innerskärgården för att på sikt kunna upprätta en tillförlitlig massbalans för kvicksilver i Stockholmsrecipienten.

6 Referenser

- Bergbäck, B., Johansson, K. & Mohlander, U., 2001. Urban Metal Flows – A Case Study of Stockholm. *Water, Air and Soil Pollution: Focus* 1:3-24.
- Berglund, R., Larsson, R., Leffler, P., Ragnvaldsson, D., Sjöström, J. & Wingfors, H., 2003. Ekotoxikologisk utredning av exponeringsnivåer hos fisk och musslor samt toxiska effekter av sediment från Musköbasens akvatiska närområde. FOI, NBC-skydd Umeå. ISSN 1650-1942.
- Blomqvist, S. & Larsson, U., 1996. Metal levels of aquatic bottom sediments at Stockholm – state of the art and future research. Naturvårdsverket stencil.
- Cato, I., 2006. Miljö kvalitet och trender i sediment och biota utmed Bohuskusten 2000/2001 – en rapport från sju kontrollprogram SGU rapporter och meddelanden nr 122.
- Elving, H. 2010. Kvicksilversituationen i Stockholms skärgård. Examensarbete, Miljö- och vattenteknikprogrammet, Uppsala universitet, in press.
- Engqvist, A., 1999. Environmental quality criteria coasts and seas background report. Naturvårdsverket rapport 4910.
- Hansson, T., Schiedek, D., Lehtonen, K. K., Vuorinen, P. J., Liewenborg, B., Noaksson, E., Tjärnlund, U., Hanson, M. & Balk, L., 2006. Biochemical biomarkers in adult female perch (*Perca fluviatilis*) in a chronically polluted gradient in the Stockholm recipient (Sweden). *Marine Pollution Bulletin*, 53, 451-468.
- Håkanson, L., 1999. Water pollution - methods and criteria to rank, model and remediate chemical threats to aquatic ecosystems. Backhuys Publishers, Leiden, 299 p.
- Jonsson, P. (Red.), Persson, J. & Holmberg, P., 2003. Skärgårdens bottnar. Naturvårdsverket Rapport 5212, Stockholm, ISBN 91-620-5212-8, ISSN 0282-7298, 112 sid.
- KemI, 2009. www.kemi.se/templates/Page.aspx?id=3320
- Lindström, L., 2001. Målarfisk – Innehåll av metaller och stabila organiska ämnen 2001. Mälarens vattenvårdsförbund, Rapport från ÅF-Miljöforskargruppen F01/35:2.
- Lindström, L. & Grahn, O., 1982. Antagonistic effects to mercury in some drainage areas. *Ambio* 11: 359-361.
- Lindström, L. & Tröjbom, M., 2006. Kvicksilver i fisk – resultat från en inventering i Stockholms län 2004. Länsstyrelsen i Stockholms län, Stockholm, Rapport 2006:07.
- Lindström, M., Jonsson, A., Brolin, A. & Håkanson, L., 2001. Heavy metal sediment load from the City of Stockholm. *Water, Air, & Soil Pollution, Focus* 1: 103-118.
- Lithner, G., Holm, K. & Ekström, C., 2003. Metaller och organiska miljögifter i vattenlevande organismer och deras miljö i Stockholm 2001. ITM Rapport nr 108, 57 sid.
- Malmaeus, M. & Karlsson, M., 2009. Dioxinflöden i Kallrigafjärden. IVL Rapport B1836.
- Meili, M., Jonsson, P., Lindström, M. and Holmberg, P. (2000): Accumulation of Chernobyl Cs-137 in coastal archipelagos of the Baltic Sea. In: Nielsen, S.P., The radiological exposure of the population of the European Community to radioactivity in the Baltic Sea. Marina-Balt project. Proceedings of a seminar held at Hasseludden Conference Centre, Stockholm, 9 to 11 June 1998. EUR 19200 EN, ISBN 92-828-7864-3, p 415-420.

- Meili, M., de Vries, W., Schütze, G., Lofts, S., Tipping, E., Römkens, P.F.A.M. & Groenenberg, J.E., 2005. Calculation of critical loads for cadmium, lead and mercury. Alterra report 1104, Dutch Ministries of Agriculture, Nature and Food Quality and of Housing, Spatial Planning and Environment. ISSN 1566-7197.
- Månsson, N., & Bergbäck, B., 2007. Bly kadmium och kvicksilver – Flöden och lager i Stockholms teknofär. Stockholms stad Miljöförvaltningen, ISSN 1653-9168, 38 sid.
- NV, 1999. Bedömningsgrunder för sjöar och vattendrag. Naturvårdsverket rapport nr 5050.
- Sandström, O., Kviksilver i kustfisk. Fiskeriverket rapport 2000:2.
- SMHI, 2003, Djupdata för havsområden 2003. SMHI Oceanografi rapport nr 73, 2003.
- Stehn, A., 2005. Bottenfauna i Stockholms skärgård 2004. I Undersökningar I Stockholms skärgård 2004. Stockholm Vatten.
- Sternbeck, J., Brorström-Lundén, E., Remberger, M., Kaj, L., Palm, Anna., Junedahl, E., Cato, I., 2003. WFD Priority substances in sediments from Stockholm and the Svealand coastal region. IVL-rapport B1538.
- Sundbom, M., Meili, M., Johansson, A-M., 2007. Kviksilver i fisk 2006 – Kartering och miljöövervakning i Stockholm. Institutionen för tillämpad miljövetenskap, ITM Stockholms universitet. ISSN: 1653-9168.
- Sundelin, B. & Eriksson Wiklund, A-K, 2003. Stockholms förorenade bottnar - vad händer om de syresätts? I: Tidlund, A. (red), 2003. Miljötillståndet i egentliga Östersjön rapport 2003. Stockholms Marina Forskningscentrum, 60 sid.
- WHO, 1989. International Programme on Chemical Safety Environmental Health Criteria 1 Mercury- Environmental Aspects. World Health Organization, Geneva, 115 pp.
- Östlund, P., Sternbeck, J. & Brorström-Lundén, E., 1998. Metaller, PAH, PCB och totalcolväten i sediment runt Stockholm – flöden och halter. IVL-rapport B1297. ISBN 91-630-6738-2., 97 sid.

Bilaga 1 Korrelationsmatris

Variabel	Korrelationsmatris för de kustområdena, n= 10. Markerade korrelationer är signifikanta för p < 0,05.																		
	Hg _{pi}	Hg _{sed}	Area	A-Area	Dm	Dmax	Tillromr	Tillr	V	DR	TOC	pH	Syre	Sikt	Chl-a	Sal	O ₂ sat	P-tot	N-tot
Hg _{pi}	1																		
Hg _{sed}	0.9	1																	
Area	-0.41	-0.6	1																
A-Area	0.18	0.27	-0.35	1															
Dm	0.29	0.21	0.16	0.33	1														
Dmax	0.14	-0.02	0.59	0.28	0.82	1													
Tillromr	0.19	0.28	-0.36	-0.44	-0.44	-0.49	1												
Tillrinn.	0.24	0.34	-0.36	-0.39	-0.45	-0.47	0.99	1											
Volym	-0.16	-0.36	0.92	-0.18	0.53	0.84	-0.44	-0.44	1										
DR	-0.69	-0.74	0.57	-0.57	-0.68	-0.3	0.09	0.07	0.21	1									
TOC	-0.09	-0.1	0.05	-0.93	-0.47	-0.54	0.55	0.51	-0.13	0.47	1								
pH	0.58	0.52	-0.2	0.22	0.08	0.03	-0.28	-0.26	-0.13	-0.32	-0.16	1							
Syrehalt	-0.11	-0.16	0.11	-0.31	-0.71	-0.35	0.43	0.43	-0.14	0.56	0.26	-0.05	1						
Siktdjup	-0.18	-0.24	0.69	0.29	0.67	0.92	-0.55	-0.52	0.85	-0.07	-0.53	-0.2	-0.33	1					
Chl-a	0.89	0.89	-0.66	0.46	0.25	-0.01	0.06	0.1	-0.43	-0.81	-0.32	0.59	-0.16	-0.3	1				
Salinitet	-0.49	-0.41	0.33	0.58	0.47	0.57	-0.68	-0.69	0.41	-0.08	-0.74	-0.12	-0.32	0.73	-0.29	1			
O ₂ -sat	0.07	0	0.01	-0.2	-0.64	-0.32	0.38	0.39	-0.2	0.39	0.16	0.08	0.97	-0.4	0.06	-0.35	1		
P-tot	0.71	0.79	-0.74	0.63	0.11	-0.09	0.17	0.22	-0.56	-0.73	-0.41	0.53	-0.16	-0.3	0.81	-0.15	-0.03	1	
N-tot	0.83	0.93	-0.79	0.34	0	-0.25	0.38	0.43	-0.62	-0.68	-0.11	0.54	-0.02	-0.5	0.89	-0.45	0.13	0.91	1