



Vätternvårdsförbundet

Metaller i Vätterns avrinningsområde

**Metallbudget och källfördelning för Vättern,
utvärdering på landskapsnivå 2010-2012**

**Tröjbom, Grolander & Lindeström
Oktober 2015**

Rapport nr 123 från Vätternvårdsförbundet

Rapport nr 123 från Vätternvårdsförbundet

(Rapport 1-29 utgavs av Kommittén för Vätterns vattenvårds. Kommittén ombildades 1989 till Vätternvårdsförbundet som fortsätter rapportserien fr o m Rapport 30.)

Rapport	123
Framsida	Flygfoto över Jönköping och Vättern. Foto: Lars Wennerberg.
Utgivare	Måns Lindell, oktober 2015
Kontaktperson	Måns Lindell, 010-2236408, vatternvardsforbundet@lansstyrelsen.se
Webbplats	www.vattern.org
Författare	Mats Tröjbom, Mats Tröjbom Konsult AB Sara Grolander, Sara Grolander Miljökonsult AB Lennart Lindeström, Svensk MKB AB
Fotografier	Måns Lindell om inget annat anges
Kartmaterial	Länsstyrelsen i Jönköping
ISSN	1102-3791
Upplaga	150 ex.
Tryckeri	Länsstyrelsen, Jönköping. 2015
Miljö och återvinning	Rapporten är tryckt på miljömärkt papper

Förord

I början av 1990-talet gjordes det första försöket att göra en metallbudget för Vättern, dvs att beskriva vilka mängder av olika metaller som tillförs sjön, som fastläggs i sjön och som slutligen lämnar Vättern (Lindeström, 1993¹). Bedömningen utgick huvudsakligen från tillgängliga data från slutet av 1980-talet, vilka var bristfälliga i flera avseenden.

En uppdatering av metallbudgeten genomfördes därför några år senare baserat på data från 1993-95 (Lindeström, 1996²). Då fanns säkrare data att tillgå över exempelvis metalltillförseln till Vättern via tillrinnande vattendrag och metallutsläpp från punktkällor.

Under de två decennier som passerat har metallbudgeten från 1993-95 använts för diverse utredningar och bedömningar om Vätterns miljöförhållanden gällande metaller, och bl.a. utgjort beslutsunderlag i flera tillståndsprövningar enligt miljöbalken. Mycket har dock hänt under denna tidsperiod. Tillförseln från olika källor har förändrats, i vissa fall betydligt, samtidigt som mätunderlagen förbättrats genom bl.a. analyser av fler metaller än tidigare.

Vätternvårdsförbundet har därför önskat få en uppdaterad metallbudget för Vättern som bättre återspeglar de aktuella förhållandena. Uppdraget gick åter till Lennart Lindeström (Svensk MKB AB) som tagit hjälp av Mats Tröjbom och Sara Grolander (Mats Tröjbom Konsult AB och Sara Grolander Miljökonsult AB). För en separat delutredning om metallbidrag via dagvatten svarar Golder Associates AB. Den uppdaterade metallbudgeten för Vättern och några av randsjöarna som presenteras i denna rapport baseras i huvudsak på mätdata från perioden 2010-2012.

Flera typer av metallbudgetar har tagits fram som beskriver olika perspektiv och avgränsningar. Budgetar över enskilda sjöar, till exempel Vättern, ger en bild av de metallmängder som årligen tillförs, fastläggs eller lämnar sjön. Budgetar och källfördelningar över hela avrinningsområden ger istället en bild av den totala årliga tillförseln och fastläggningen i landskapet som helhet. Tillsammans ger dessa perspektiv en bred förståelse för vilka depåer och rörelser som olika metaller uppvisar inom avrinningsområdet jämfört med de mängder som slutligen når sjön, respektive passerar ut från Vättern. Med hjälp av en datormodell med hög detaljeringsgrad, Metallbalansmodellen, har det varit möjligt att ta fram budgetar över enskilda sjöar såväl som hela avrinningsområden eller enskilda delavrinningsområden. Med modellen går det också att få en uppfattning om metallflöden på platser där mätningar saknas, liksom generell kunskap om de processer som bestämmer hur metallerna fördelar sig i landskapet.

Vi hoppas att denna nya metallbudget för Vättern motsvarar de önskemål och krav som finns i samhället på att beskriva metallflöden från olika källor och deras öden, som i sin tur kan ligga till grund för utredningar och beslut om behov av eventuella åtgärder.

Jönköping och Fryksta 20015-10-01

Måns Lindell

Vätternvårdsförbundet

Lennart Lindeström

Svensk MKB AB
Projektledare

FINANSIÄRER - Nedanstående företag, myndigheter och organisationer har finansierat detta arbete. Finansiärerna är listade i alfabetisk ordning.

Askersunds kommun
FMV Provplats Karlsborg
Försvarmakten P4, F7 och K3
Habo kommun
Hjo kommun
Jönköpings Energi AB
Jönköpings kommun
Karlsborgs kommun
Motala kommun
Nammo Vanäsverken AB
Munksjö Aspa Bruk AB
Munksjö Paper AB
Skaraborgsvatten
Tasman Metals AB
Trafikverket
Vadstena kommun
Vätternvårdsförbundet
Zinkgruvan Mining AB
Ödeshögs kommun

Innehåll

1	Om rapporten – syfte, frågeställningar och innehåll.....	13
2	Vättern – en unik och skyddsvärd sjö	16
3	Fakta om Vättern och dess tillrinningsområde.....	18
3.1	Sjöar och tillrinnande vattendrag – delavrinningsområden	18
3.2	Hydrologi - nederbörd och avrinning.....	19
3.3	Berggrund och jordarter – högsta kustlinjen	20
3.4	Markanvändning	20
3.5	Vätterns djupförhållanden - bottentyper.....	22
4	Källor och sänkor för metaller i Vätterns avrinningsområde	23
4.1	Metallflöden i vattendrag.....	27
4.2	Metalltillförsel via nederbörd	29
4.3	Metalltillförsel från punktkällor	30
4.4	Tillförsel från vägar och trafik.....	32
4.5	Tillförsel med dagvatten.....	33
4.6	Tillförsel från försvarsrelaterade verksamheter (ammunition).....	34
4.7	Tillförsel från gruvavfall	36
4.8	Mängder i Vätterns vattenmassa och sediment.....	37
5	En modell för Vätterns avrinningsområde – mönster på landskapsnivå	39
5.1	Kortfattad beskrivning av Metallbalansmodellen	39
5.2	Jämförelser mellan modellens resultat och observationer.....	42
5.3	Metallernas fördelningsmönster på landskapsnivå.....	47
5.4	Hur kan Metallbalansmodellen resultat användas vidare?	52
6	Metallbudgetar för Vättern och utvalda delområden – tillförsel, fastläggning och utflöde	56
6.1	Metallbudget för Vätterns huvudbassäng	58
6.2	Metallbudget för Kärrafjärden	62
6.3	Metallbudget för sjön Alsen	65
6.4	Metallbudget för Bottensjön	67
6.5	Metallbudget för Munksjön.....	70
7	Förekomst, fördelning och budget för REE och uran	73
7.1	Sällsynta jordartsmetaller (REE).....	73
7.1.1	Halter av REE i morän och sjösediment	73
7.1.2	Halter av REE i vattendrag och i Vättern	74
7.1.3	Budgetar och fördelningsmönster för REE	75
7.2	Sammanfattande bedömning för uran, och torium, samt molybden	77
8	Risk för konsekvenser för Vätterns växt- och djurliv eller människan – vad bör man tänka på?.....	79
9	Referenser	81

Bilagor

Bilaga B1 – Halter och mängder i vattendrag och sjöar

- 1.1 Avrinning
- 1.2 Halter i vattendrag
- 1.3 Metalltransporter via vattendrag
- 1.4 Haltmätningar i sjöar
- 1.5 Haltförändringar och totala mängder i Vättern

Bilaga B2 – Tillförsel via nederbörd

- 1.1 Nederbörds mängder i Vätterns avrinningsområde
- 1.2 Halter i Nederbörd
- 1.3 Skattning av deposition via nederbörd

Bilaga B3 – Sedimentation i Vättern

- 1.1 Metallhalter i sedimenten
- 1.2 Skattning av sedimentationen i Vättern

Bilaga B4 – Tillförsel från trafik

Bilaga B5 – Dagvatten – utredning av metallbelastning

Bilaga B6 – Tillförsel till Vättern från ammunition

Bilaga B7 – Metallbalansmodell på landskapsnivå

- 1.1 Metallbalansmodellens uppbyggnad och implementering
- 1.2 Matematisk beskrivning av Metallbalansmodellen
- 1.3 Modellresultat – översikter för alla ämnen
- 1.4 Modellresultat - fastläggning och sedimentation
- 1.5 Modellresultat - per ämnen

Sammanfattning

Vättern är Sveriges näst största sjö. Den är 13,5 mil lång och i genomsnitt ungefär en tiondel så bred. Den kännetecknas av klart och näringsfattigt vatten och har en ovanligt lång omsättningstid på cirka 60 år. På grund av Vätterns särart och höga skyddsvärde är det viktigt att ha kunskap om vilka ämnen som tillförs sjön eftersom de kan ha negativa konsekvenser för sjöns växt- och djurliv och för människan. Vättern fungerar bland annat som vattentäkt för cirka 270 000 personer och sjön innehåller många unika arter, så kallade ishavsvrelikter.

Det huvudsakliga syftet med denna studie har varit att kvantifiera de största källorna för en lång rad metaller i Vätterns avrinningsområde och att ta reda på hur de tillförda metallerna transporteras och var i landskapet de slutligen hamnar. De metaller som undersöks förekommer naturligt i jord och berggrund, vilket betyder att en del av tillförseln av metaller är naturlig, medan en del är orsakad av mänskliga verksamheter.

Detta arbete utgör delvis en uppdatering av en tidigare budget och källfördelning för metaller till Vättern för perioden 1993-95 som togs fram i Vätternvårdsförbundets regi (VVF rapport 39). Denna tidigare sammanställning har utnyttjats i många sammanhang och även legat till grund för flera diskussioner och beslut om åtgärdsbehov inom Vätternregionen. Förhållandena har dock förändrats i flera avseenden under de senaste decennierna t.ex. när det gäller utsläpp till, och nedfall på sjön. Samtidigt har fortsatta och nya mätningar av olika källflöden till sjön genererat en mängd nya uppgifter, data som även innefattar "nya" metaller som tidigare inte analyserats.

Ett viktigt moment i arbetet har varit att skapa en modell som kopplar ihop all tillgänglig information i hela Vätterns avrinningsområde om metallhalter i nederbörd, vattendrag och sjöar, vattenflöden och nederbörds mängder, tillförsel från punktkällor såsom industrier och kommunala reningsverk, tillförsel från diffusa källor som dagvatten från trafik och tätort, samt landskapsinformation om hydrologiska nätverk och sjöars egenskaper. Den högupplösta så kallade Metallbalansmodellen har varit ett viktigt redskap vid upprättandet av källfördelningar som omfattar hela avrinningsområdet kring Vättern, liksom för de budgetar som summerar tillförsel och bortförsel av metaller i enskilda sjöar. Utöver Vättern har också sjöarna Kärrafjärden, Alsen, Bottensjön och Munksjön studerats separat.

I bildkollaget nedan visas exempel på källor och transportvägar för metaller som behandlas i den här studien. Tillförsel av metaller till Vätterns avrinningsområde sker via **nederbörden** i form av så kallad **deposition** (a). Dessa mängder hamnar både direkt på sjöns yta och på omgivande mark. Metaller frisätts också kontinuerligt genom **vittring** av mineral som i varierande grad finns naturligt i marken (b). Beroende på metallernas egenskaper och hur förutsättningarna i marken ser ut, kommer delar av, eller all metall som tillförs marken att åter fastläggas innan det når ett vattendrag eller en sjö. Diffus tillförsel av metaller från **tätorter** (d) och **trafik** (e) når vattendragen via naturliga flödesvägar (c) som grund- och/eller ytvatten, eller via anlagda diken eller dagvattenledningar (f). Det sker en varierande fastläggning av metallerna i mark, våtmarker och diken på vägen från dessa källor till de större vattendragen. Tillförseln av metaller från olika **punktkällor** (g, h, i) når de större vattendragen eller sjöarna direkt. De metallmängder som når en sjö fastläggs antingen permanent i bottenarna genom **sedimentation** av partiklar, eller lämnar sjön via **utflödet**.



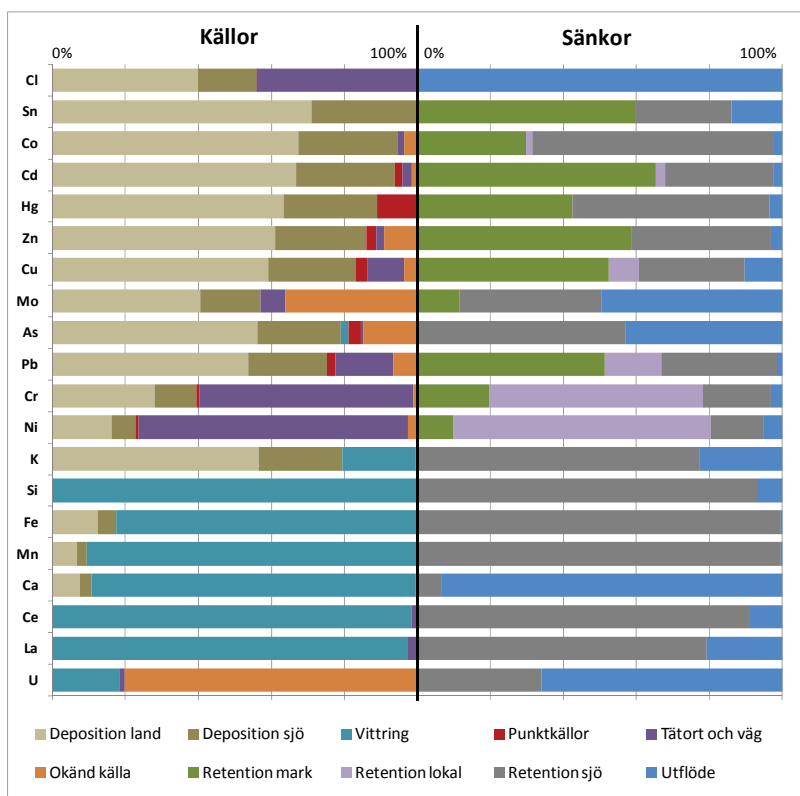
Metaller tillförs från diffusa källor som nederbörd (a), vittring av mineral i mark (b), tätorter (d), vägar och trafik (e) eller från punktkällor som industrier (g), ammunition (h) och gruvavfall (i). Metaller transporteras via naturliga vattendrag (c) och t ex. dagvattenledningar (f).

Ett av huvudresultaten från Metallbalansmodellen framgår av stapeldiagrammet nedan som visar olika källors och sänkors relativa betydelse för ett antal metaller i Vätterns avrinningsområde som helhet. Bilden visar hur olika metaller uppträder i landskapet utan hänsyn till deras eventuella miljöskadlighet eller totala mängder. Med ledning av figuren kan vi avgöra vilka **källor** som dominerar för olika metaller och var i landskapet metallerna slutligen hamnar (vilka **sänkors** som dominerar). Det blir också tydligt att olika metaller betar sig olika utifrån deras inneboende egenskaper och ursprung.

För många metaller är tillförseln via nederbörd den huvudsakliga källan i Vätterns avrinningsområde som helhet, till exempel för kvicksilver (Hg), kadmium (Cd), kobolt (Co), zink (Zn), koppar (Cu), bly (Pb), tenn (Sn) och arsenik (As). Dessa metaller har i regel sitt ursprung långt borta, ofta från förbränning av fossila bränslen. Andra metaller tillförs i huvudsak från vittring av lokalt förekommande mineral, till exempel kalcium (Ca), kisel (Si), järn (Fe), mangan (Mn) uran (U) och de sällsynta jordartsmetallerna lantan (La) och cerium (Ce). Sett till hela avrinningsområdet utgör metalltillförseln från punktkällor oftast endast en liten del av samtliga källor. Störst är andelen för kvicksilver och arsenik, följt av zink, koppar, bly och kadmium. De så kallade okända källorna representerar troligen i samtliga fall, förutom för uran, diffus tillförsel från historiskt gruvavfall.

En mycket stor del av tillförseln via depositionen på land fastläggs i marken och når aldrig vattendrag och sjöar. Detta innebär att det sker en gradvis ackumulation i markerna av till exempel bly, kadmium, kvicksilver, koppar, zink, tenn och kobolt. Metallerna fastläggs också i varierande grad i sjöar och sammantaget lämnar därför oftast endast en liten andel av den totala tillförseln avrinningsområdet via utflödet i Motala ström. Detta gäller exempelvis metallerna kobolt, kadmium, kvicksilver och zink, men även koppar och bly.

Också för kisel och de sällsynta jordartsmetallerna cerium och lantan, som främst tillförs genom vittring i jord och berggrund, fastläggs en relativt stor andel i sjöarna. Arsenik och molybden (Mo) förefaller vara mer rörliga i det limniska systemet eftersom en större andel jämfört med många andra metaller lämnar sjöarna via utloppet. För kalcium och klorid (Cl) är fastläggningen i sjöarna närmast obefintlig.



Den relativa fördelningen mellan källor och sänkor i Vätterns avrinningsområde. I den vänstra halvan av figuren visas fördelningen mellan de olika källkategorier deposition på land, deposition på sjö, vittring, punktkällor, tätort och väg, samt okända källor. I den högra halvan visas fördelningen mellan de olika sänkorna retention mark, retention lokal, retention sjö samt utflöde. Ämnena har sorterats efter likhet mellan källornas inbördes storlek. Den övre raden i förklaringen avser källorna och den undre sänkorna.

Om istället fokus läggs på sjöarna, visar de separata detaljerade metallbudgetarna över Vätterns huvudbassäng, sjöarna Alsen, Kärrafjärden, Bottensjön och Munksjön hur metaller tillförs sjön, hur mycket som fastläggs i sjön och hur mycket som lämnar sjön via utflödet.

För Vätterns huvudbassäng visar budgetberäkningarna i tabellen nedan att av den totala metalltillförseln till Vättern har bidraget via **vattendrag** störst betydelse för framför allt arsenik (ca 80 %) och nickel (ca 70 %). **Depositionen** på sjöytan svarar istället för den största andelen bly (ca 70 %), och i än högre grad kadmium (närmare 80 %). Även hälften eller mer av den totala tillförseln av zink, koppar, krom och kvicksilver till sjön kommer från luften via direkt

deposition på sjöns yta. Nedfallet på sjöytan får särskilt stort genomslag för Vätterns huvudbassäng eftersom tillrinningsområdet har en liten yta i förhållande till Vätterns egen vattenyta. För flertalet metaller är punktkällornas tillskott direkt till Vätterns huvudbassäng relativt begränsade. Huvuddelen av de tillförda metallmängderna fastläggs i Vättern före utflödet i Motala ström. Fastläggningsgraden har för de här aktuella metallerna beräknats vara lägst för arsenik (ca 50 %) och högst för bly (98 %). Av tillfört kadmium, krom, kvicksilver och zink till sjön fastläggs mellan 80 och 90 %, medan fastläggningsgraden för koppar uppskattas till ca 70 %. Jämfört med den tidigare metallbudget som gjordes av Lindeström 1996 är dagens bild likartad. Metalltillförseln via vattendragen ligger i samma storleksordning som vid mitten av 1990-talet, men det har skett en betydande minskning av tillförseln via deposition för flera metaller. Under de drygt 15 år som gått har exempelvis nedfallet över Vättern av bly, arsenik och kvicksilver minskat med 60-70 % enligt mätningar på Visingsö.

I metallbudgetarna för Kärrafjärden och Alsen norr om Vätterns huvudbassäng, framträder anmärkningsvärt stora restposter i budgetarna, vilka tolkas som att det finns stora okända tillflöden av metaller. Dessa tillflöden beror sannolikt på diffust läckage från historiskt gruvavfall. Av budgetarna framgår att drygt 8 ton zink och nästan 500 kg bly och per år beräknas tillföras Vättern från diffusa källor.

Metallbudget för Vätterns huvudbassäng baserat på uppmätta och beräknade data för perioden 2010-2012. Grundämnenas kemiska beteckningar förklaras i faktaruta 2.

Budget för Vätterns huvudbassäng	As	Cd	Co	Cr	Cu	Hg	Ni	Pb	Zn
Tillförsel via vattendrag (kg/år)	521	13	188	341	1871	3,7	1213	376	8508
varav Huskvarnaån	20%	17%	29%	27%	20%	21%	26%	28%	8%
Forsviksån	13%	11%	6%	11%	11%	7%	6%	10%	4%
Mjölnaån	6%	4%	5%	3%	4%	2%	4%	5%	1%
Munksjöns utlopp	6%	5%	11%	7%	7%	8%	7%	8%	6%
Hammarundet	21%	26%	5%	10%	16%	5%	9%	28%	58%
övriga vattendrag	33%	37%	46%	43%	42%	58%	48%	22%	24%
Tillförsel från punktkällor direkt till sjön (kg/år)	4,6	4,6	0	20,5	126	0,5	22	26	440
varav gruvinindustri	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
skogsindustri	34%	93%	0%	68%	27%	13%	33%	46%	64%
övrig industri	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
kommunala ARV	66%	7%	0%	32%	64%	87%	67%	16%	36%
ammunition	0%	0%	0%	0%	10%	0%	0%	39%	0%
Deposition på sjöytan (kg/år)	126	63,1	201	365	2242	3,6	539	1076	15649
SUMMA TILLFÖRSEL (kg/år)	653	81	390	727	4240	7,8	1774	1478	24600
varav vattendrag (%)	80%	16%	48%	47%	44%	47%	68%	25%	35%
punktkällor (%)	1%	6%	0%	3%	3%	7%	1%	2%	2%
deposition (%)	19%	78%	52%	50%	53%	46%	30%	73%	64%
Sedimentation sjö (kg/år)	-331	-71,9	-363	-595	-2973	-6,8	-1238	-1419	-22015
andel fastläggning av tillförseln	51%	89%	93%	82%	70%	87%	70%	96%	89%
Utflöde från Vättern (kg/år)	-268	-7,8	-19	-120	-1013	-0,5	-691	-86	-3092
SUMMA UTFLÖDE & SEDIMENTATION (kg/år)	-599	-80	-383	-715	-3986	-7,3	-1929	-1505	-25107
RESTPOST (kg/år)	-54	-1,2	-7	-11	-254	-0,5	154	27	508
restpostens andel av tillförseln	-8%	-1%	-2%	-2%	-6%	-6%	9%	2%	2%

Sammanfattningsvis tror vi att resultaten från den här studien ger en övergripande förståelse för hur olika metaller tillförs och transporteras inom Vätterns avrinningsområde. Denna information är viktigt för att skapa en korrekt bild av nuläget vid till exempel prioritering av åtgärder och bedömning av miljöstatus. Det framtagna underlaget och Metallbalansmodellen kan också utgöra en bas för fortsatta detaljerade studier, vilka legat utanför möjligheternas ram i det här arbetet.

1 Om rapporten – syfte, frågeställningar och innehåll

Genom Vätterns särart och höga skyddsvärde är det viktigt att ha grepp om vilka ämnen som tillförs sjön från olika källor, kopplat till vår kunskap om ämnenas konstaterade eller möjliga konsekvenser för sjöns växt- och djurliv och för människan. En grupp av sådana ämnen som kan ha både positiva och negativa konsekvenser är metallerna (hit har vi även räknat de s.k. halvmetallerna, såsom arsenik, tenn och antimon).

I Vätternvårdsförbundets (se faktaruta 1) regi har beräkningar tidigare gjorts av tillförsel och källfördelning av metaller till Vättern, den senaste för perioden 1993-95 (VVF rapport 39²). Denna tidigare metallbudget för Vättern har utnyttjats i många sammanhang och även legat till grund för flera diskussioner och beslut om åtgärdsbehov inom Vätternregionen. Förhållandena har dock förändrats i flera avseenden under de senaste decennierna t.ex. när det gäller utsläpp till, och nedfall på sjön. Samtidigt har fortsatta och nya mätningar av olika källflöden till sjön genererat en mängd nya uppgifter, data som även innefattar ”nya” metaller som tidigare inte analyserats.

Vätternvårdsförbundet har därför sett ett behov att uppdatera och utvidga tidigare metallbudget för Vättern och samtidigt förfina analysen genom att skapa en modell för metallers flöden inom Vätterns hela avrinningsområde. Den nya metallbudgeten för Vättern presenteras i denna rapport. I faktaruta 2 listas de grundämnen som ingår i denna rapport.

Faktaruta 1: Om Vätternvårdsförbundet

Under 1950-60 talen var Vättern utsatt för stora utsläpp av näringsämnen som bland annat hotade att leda till övergödning av sjön. Därför bildades Kommittén för Vätterns Vattenvård 1957 med syfte att bevara sjöns unika egenart och samordna åtgärder, övervakningsprogram och forskning i och omkring Vättern. Utsläppen inventerades och initiativ togs för en vetenskaplig beskrivning av sjöns ekosystem.

Den första vattenvårdsplanen antogs 1970 och kraftfulla insatser för att begränsa näringstillförseln inleddes. 1989 ombildades organisationen till Vätternvårdsförbundet, VVF, som driver övervakningsprogrammet vidare och bevakar olika intressen i och runt Vättern. Förbundets arbete finansieras av medlemmarna vilka utgörs av kommuner, landsting, länsstyrelser, företag mm runt Vättern.

Förbundet arbetar för Vättern genom att:

- påverka samhällsplanering för sjöns bästa,
- samordna och utvärdera undersökningar,
- initiera konkreta åtgärder, t ex driva projekt, och
- sprida information om Vättern, bland annat genom rapporter, leda konferenser mm.

Därigenom avses följande mål uppnås:

- Bevara sjön som näringsfattig klarvattenssjö.
- Bevara yrkes- och fritidsfiske samt friluftsliv.
- Säkerhetsställa vattentäktskvaliteten.

Se www.vattern.org för mer information om Vätternvårdsförbundets arbete

Exempel på frågeställningar som vi försöker att besvara i rapporten är:

- Vilka är de största källorna till Vätterns avrinningsområde för de mest undersökta metallerna som zink, koppar, kadmium, bly, nickel, arsenik m.fl?
 - Har t.ex. depositionen direkt på sjöns vattenyta någon större betydelse i förhållande till utsläppen från kringliggande industrier och kommunala reningsverk,
 - eller tillförseln med dagvatten från tätorterna,
 - eller tillförseln från E4:an som går längs större delen av den östra stranden?
- Kan vi uttala oss om motsvarande källor för de mer sällan undersökta metallerna såsom kobolt, molybden, uran och de sällsynta jordartsmetallerna, REE (exempelvis lantan och cerium)?
- Hur stor andel av metallerna fastläggs i landskapet utan att slutligen nå sjön, och var?
- Av de andelar som når Vättern – hur mycket fastläggs i sjön och hur mycket lämnar sjön via utflödet i Motala Ström?
- Ser bilden annorlunda ut jämfört med de metallbudgetar som gjordes för två decennier sedan?
- Hur tillförlitliga är beräkningarna - kan vi validera skattningarna och kvantifiera osäkerheterna?

Rapporten består av en huvudtext och ett antal fristående bilagor där underlag och resultat beskrivs mer utförligt. I huvudtexten presenteras också fördjupningar i ett antal faktarutor. Tanken med detta upplägg är att resultaten och slutsatserna ska vara så lättillgängliga som möjligt, samtidigt som all nödvändig bakgrundsinformation ska finnas att tillgå i bilagorna för den som vill ha en detaljerad bild av hur resultaten tagits fram. Bilagorna kommer inte att tryckas i sin helhet i pappersversionen av rapporten utan de finns endast med i den digitala versionen av rapporten.

Rapporten inleds med **kapitel 2** "Vättern en unik och skyddsvärd sjö", där det beskrivs varför Vättern är unik, följt av **kapitel 3** "Fakta om Vättern och dess tillrinningsområde" som summerar olika typer av information som är av relevans för frågeställningarna i den här rapporten. I **kapitel 4** "Källor och sänkor för metaller i Vätterns avrinningsområde" sammanfattas de dataunderlag som rapporten bygger på och beskriver kortfattat vilka källor och sänkor för metaller som finns i Vätterns avrinningsområde. Detaljerade beskrivningar av underlagen finns i de olika bilagorna.

I **kapitel 5** "Metallers fördelning i Vätterns avrinningsområde" beskrivs hur metaller sprids, ackumuleras och transporteras i Vätterns avrinningsområde som helhet. Fokus ligger alltså på förståelsen av metallernas fördelning i hela landskapet och inte enbart på källor och sänkor direkt kopplade till sjön Vättern. Men med hjälp av en modell som vi skapat, Metallbalansmodellen, kopplas information om metallkällor, halter i vattendrag och sjöar, vattenflöden och landskapets rumsliga egenskaper ihop.

I **kapitel 6** "Metallbudgetar för Vättern och utvalda delområden – tillförsel, fastläggning och utflöde" redovisas metallbudgetar som summerar källor och sänkor med enskilda vattenförekomster (sjöar) i fokus. Här beskrivs ingående budgetar för Vätterns huvudbassäng, samt sjöarna/fjärdarna Alsen, Kärrafjärden, Bottensjön och Munksjön. Dessa budgetar är jämförbara med tidigare metallbudgetar för Vättern.

I **kapitel 7** "Förekomst, fördelning och budget för REE och uran" sammanfattas resultat för ytterligare ett antal metaller där det inte varit möjligt att ställa upp tillförlitliga budgetar på grund av att dataunderlagen innehåller stora osäkerheter. Det gäller i första hand de sällsynta jordartsmetallerna, REE, men även metallerna uran och molybden.

I **kapitel 8** "Risk för konsekvenser för Vätterns växt- och djurliv eller människan – vad bör man tänka på?" diskuteras slutligen i generella termer riskerna för att metaller ska orsaka negativa konsekvenser i Vättern.

Till rapporten hör också **sju bilagor** som innehåller detaljerade beskrivningar och resultat. Bilagorna B1-B4, samt B6 och B7 har skrivits av författarna till huvudtexten, medan bilaga B5 som behandlar tillförsel via dagvatten utgör ett separat arbete utfört av Golder Associates AB:

B1 – Halter och mängder i vattendrag och sjöar

B2 – Tillförsel via nederbörd

B3 – Sedimentation i Vättern

B4 – Tillförsel från trafik

B5 – Tillförsel från tätort via dagvatten (Golder Associates AB)

B6 – Tillförsel via ammunition

B7 – Metallbalansmodellen (metod och detaljerade resultat per metall)

Faktaruta 2: Kemiska beteckningar för de ämnen som ingår i studien

Metaller och halvmetaller med möjliga miljöskadliga egenskaper

As	Arsenik	Cu	Koppar	Pb	Bly
Cd	Kadmium	Hg	Kvicksilver	Sn	Tenn
Co	Kobolt	Mo	Molybden	Zn	Zink
Cr	Krom	Ni	Nickel		

Övriga, mer eller mindre vanliga metaller och icke-metaller

Ca	Kalcium	Fe	Järn	Mn	Mangan
Cl	Klorid	K	Kalium		

Sällsynta jordartsmetaller (REE – Rare Earth Elements)

Ce	Cerium	La	Lantan	Sm	Samarium
Dy	Dysprosium	Lu	Lutetium	Tb	Terbium
Er	Erbium	Nd	Neodym	Tm	Tulium
Eu	Europium	Pm	Prometium (ej)	Y	Yttrium
Gd	Gadolinium	Pr	Praseodym	Yb	Ytterbium
Ho	Holmium	Sc	Skandium		

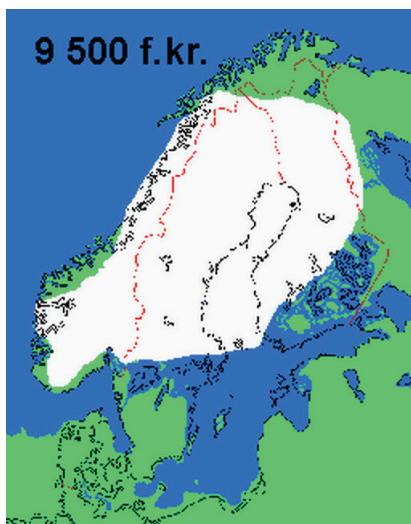
Aktinider (naturligt förekommande radioaktiva grundämnen)

U	Uran	Th	Torium
---	------	----	--------

2 Vättern – en unik och skyddsvärd sjö

Vättern är Sveriges näst största sjö. Den är 13,5 mil lång och i genomsnitt ungefär en tiondel så bred. Denna långsmala sjö bildades 400-500 miljoner år tillbaka i tiden som en gravsänka till följd av stora öst-västliga rörelser i jordskorpan (VVF^a rapport 119³). Förkastningen medförde bl.a. att berggrunden skiljer sig åt i sin sammansättning väster och öster om sjön, vilket beskrivs mer i detalj i ett senare avsnitt om geologin.

Under de senaste miljonerna åren har flera inlandsisar täckt sjön och dess omgivning. Efter att den senaste landisen dragit sig tillbaka var Vättern och dess omgivning till en början fortfarande nedtryckta till följd av landisens enorma tyngd. Vättern var då en mindre vik av Yoldiahavet, som i sin tur stod i direkt förbindelse med Västerhavet (Figur 1). Detta gjorde det möjligt för vissa saltvattensorganismer att vandra in i bl.a. Vättern. När landmassan höjdes övergick Vättern till att bli en sötvattenssjö, och de invandrade saltvattenorganismerna tvingades acklimatisera sig till den nya miljön för att överleva. Förekomsten av dessa s.k. glacialrelikter är en faktor som gör Vättern unik. Exempel på glacialrelikter i Vättern är ett antal kräftdjur (vit- och taggmärla, pungräka, sjösyrsa, ishavsgråsugga m.fl.), men den mest kända är Vätternrödingen (VVF rapport 115⁴).



Figur 1. Yoldiahavets ungefärliga utbredning för 11 500 år sedan (från Tacitus.nu).

Vätterns vattenyta täcker drygt 1 900 km² och sjön rymmer ungefär 74 000 miljoner m³ vatten (74 (km)³). Vätterns tillrinningsområde är endast drygt tre gånger större än sjöns yta, vilket är en annan faktor som gör sjön unik. Detta får till följd att vattnets utbytestid i Vättern är ovanligt lång, ca 60 år.

Genom att tillströmmande vatten stannar ovanligt länge i Vättern finns det gott om tid för vattnet att "självrenas". Dessutom tillförs sjön förhållandevis lite näringsämnen, eftersom markerna inom tillrinningsområdet huvudsakligen utgörs av näringsfattiga skogsområden. Vätterns vatten är därför ovanligt näringsfattigt (fosforfattigt) för sjöar i denna del av landet (3-5 µg totalfosfor/liter), och har en "klarhet" som är unik. Siktdjupet ligger idag på 12-14 meter i centrala sjön (VVF rapport 88³). Vattnets långa omsättningstid och näringsfattigdom gör samtidigt att Vättern är särskilt känslig för tillförsel av ämnen som kan vara giftiga för växter, djur och människor. Se vidare kapitel 8.

^a VVF står för Vätternvårdsförbundet.

Vätterns särart är utpekad i en rad lagar och EU-direktiv. Detta innebär skydd i olika bemärkelser som både allmänhet och myndigheter måste ta hänsyn till för att skydda sjöns särart för framtiden. Exempel på dessa skydd är:

- de berörda länsstyrelsernas regionala miljömål för Vättern,
- miljöbalkens beskrivning av Vättern som ett riskintresse för turism och friluftsliv, natur- och kulturvärden, yrkesfiske och försvar,
- förbudet att försämra Vätterns kemiska och ekologiska status enligt EU:s ramdirektiv för vatten,
- och utpekandet av Vättern som en del av EU:s nätverk Natura 2000, som har till syfte att bevara ett representativt urval av naturmiljöer i Europa.

Ytterligare en faktor som gör Vätterns vatten värt att skydda är att det används som dricksvattentäkt för cirka 270 000 människor som bor runt sjön⁵. De största tätorterna är Jönköping-Huskvarna i söder och Motala i öster. Vätterns vattenskyddsområde trädde i kraft i mars 2014 med syfte att långsiktigt skydda sjön som dricksvattentäkt.



Figur 2. Utsikt över Vättern (överst). Vy över Jönköping med Munksjöns utlopp till höger.

3 Fakta om Vättern och dess tillrinningsområde

I detta avsnitt presenteras kortfattat fakta om Vättern och dess tillrinningsområde som har relevans för att besvara frågeställningarna i rapporten.

3.1 Sjöar och tillrinnande vattendrag – delavrinningsområden

Sjöar inom Vätterns tillrinningsområde och tillrinnande vattendrag framgår av Figur 3. Större sjöar är Unden och Viken i väster och Tåkern i öster. Sjöar och fjärdar av särskilt intresse som behandlas i denna rapport är dock betydligt mindre till storlek, nämligen Kärrafjärden, Alsen och Bottensjön i norr och Munksjön i söder.

De största tillflödena till Vättern är Forsviksån i nordväst och Huskvarnaån i söder, följt av Mjölnaån, Tabergsån och Skyllbergsån. I Vätternvårdsförbundets regi undersöks fortlöpande vattenkemin i 15 tillrinnande vattendrag och i Vätterns utflöde, Motala Ström. Vätterns avrinningsområde har delats in i 308 delavrinningsområden i enlighet med SMHI:s indelning. Varje delavrinningsområde har särbehandlats i detta arbete. Det hydrologiska nätverket av huvudtillflöden och delavrinningsområden åskådliggörs i bilaga B7.



Faktaruta 3: Tillrinnings- och avrinningsområde

Med Vätterns **tillrinningsområde** avser vi all mark och vatten som ligger inom det område som rinner till sjön.

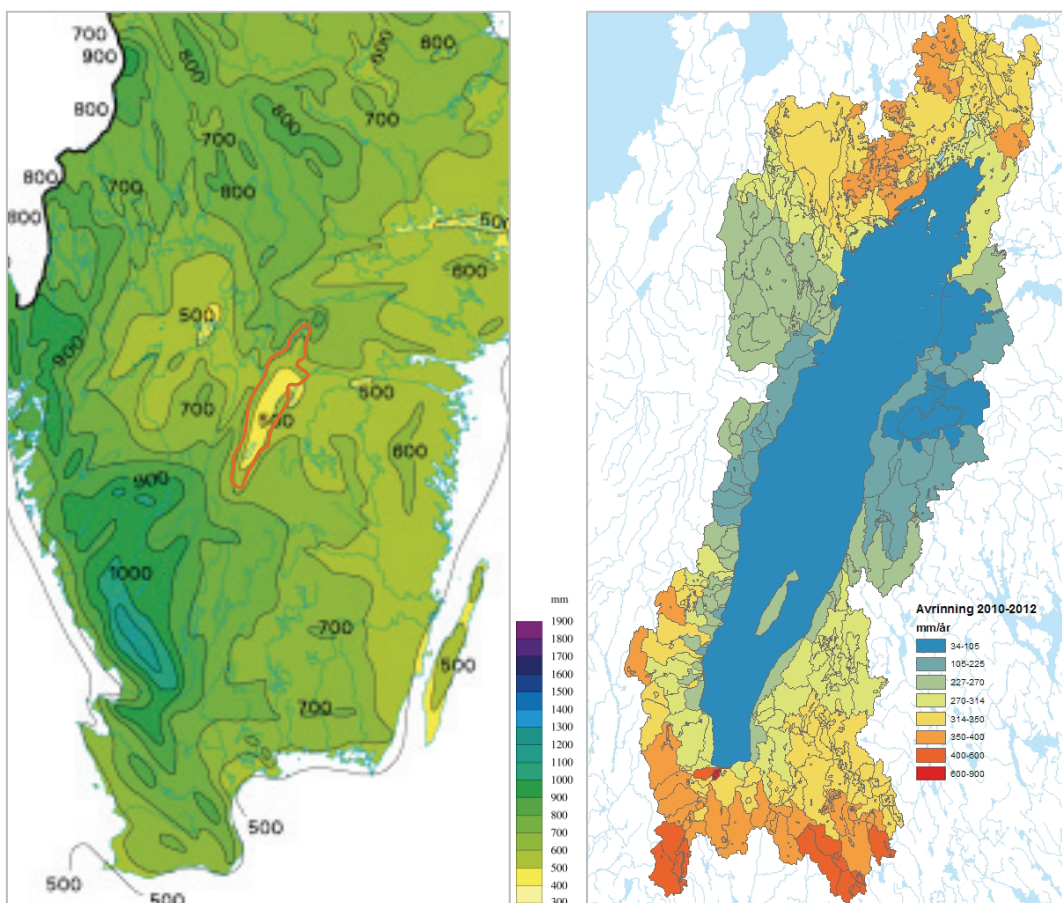
Med Vätterns **avrinningsområde** avser vi tillrinningsområdet plus Vätterns egen yta, dvs hela den yta som Vätterns utflöde avvattnar.

Figur 3. Vätterns huvudavrinningsområde och de 308 delavrinningsområdena (markerade med lila).

3.2 Hydrologi - nederbörd och avrinning

Nederbörden över Vätterns yta uppgår till ca 500 mm/år, medan avdunstningen är ca 400 mm/år. Nettotillförseln på sjöns yta blir därmed endast ca 100 mm/år. I Figur 4 nedan avviker Vätterns centrala vattenyta markant med sin låga nederbörd jämfört med övriga Sydsverige. Inom Vätterns tillrinningsområde ser bilden annorlunda ut och redan på kort avstånd från Vättern är nederbördsmängderna markant högre. Den genomsnittliga årsmedelnederbörden varierar mellan 500 och 1000 mm per år inom avrinningsområdet och de största mängderna faller norr om Vättern. Detaljerade uppgifter om nederbördssiffror för perioden 2010-2012 som används i den här rapporten återfinns i bilaga B2.

Nederbördsvariationerna över området i kombination med en varierande avdunstning leder till stora variationer i genomsnittlig avrinning från delavrinningsområdena. I den här rapporten baseras alla uppgifter om vattenföring på modellerade vattenföringsdata hämtade från SMHs Vattenweb⁶. I den högra kartan i Figur 4 visas den genomsnittliga vattenavrinning som bildas inom varje enskilt delavrinningsområde. Dessa siffror utgör alltså skillnaden mellan nederbörd och avdunstning^b. Av kartan framgår att avrinningen är mycket låg kring de centrala delarna av Vättern, och 3-4 gånger högre i områdena norr och söder om sjön (se vidare bilaga B1).

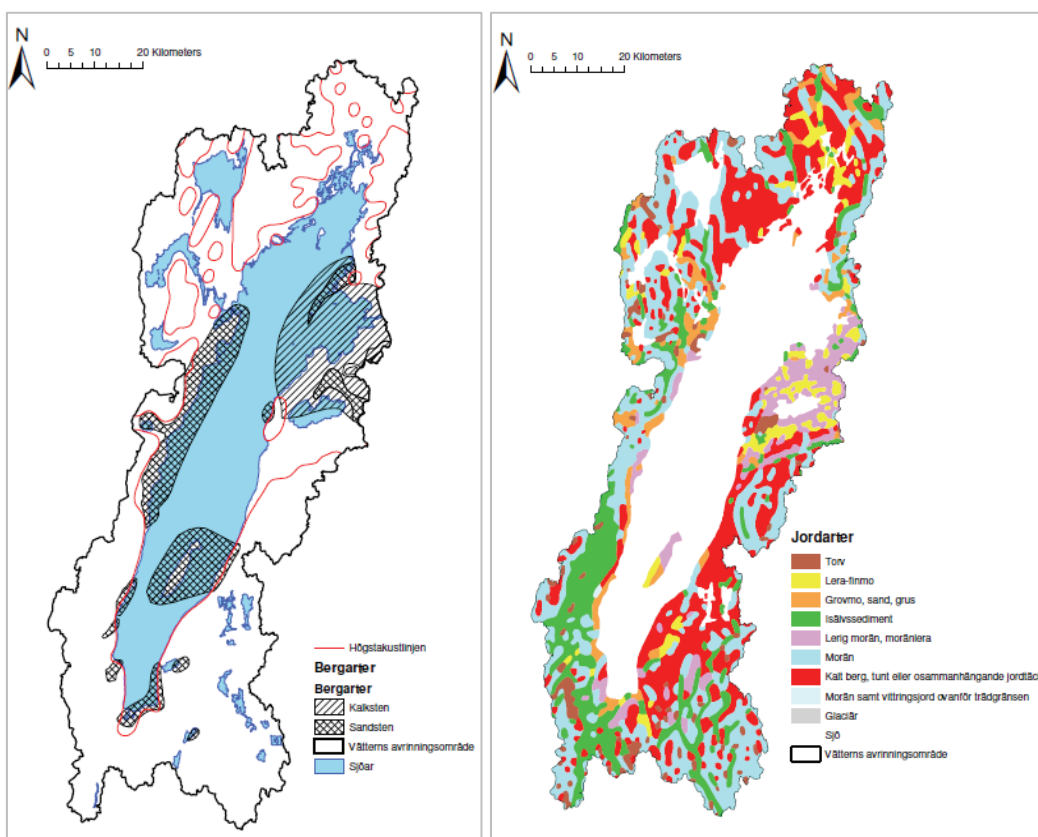


Figur 4. Den vänstra kartan visar genomsnittlig nederbörd under perioden 1961-1990⁷. Vätterns strandlinje är markerad i rött. Den högra kartan visar den genomsnittliga avrinningen från mark i varje enskilt delavrinningsområde under perioden 2010-2012.

^b Den genomsnittliga avrinningen per delavrinningsområde beräknades från flödena i delavrinningsområdenas utflödespunkter för perioden 1961-1990. Dessa siffror skalades sedan om så att utflödet från Vättern motsvarade det genomsnittliga utflödet under perioden 2010-2012.

3.3 Berggrund och jordarter – högsta kustlinjen

Berggrunden inom Vätterns avrinningsområde består huvudsakligen av urberg och på detta vilande yngre bergarter. En förenklad berggrundskarta som framför allt visar områden med kalk- respektive sandsten presenteras i den vänstra kartan i Figur 5. I samma karta är även högsta kustlinjen markerad. Denna visar den högsta nivå som havet någon gång nått upp till efter den senaste istiden. Detta har i sin tur stor betydelse för jordarternas sammansättning och fördelning inom tillrinningsområdet, vilket kan utläsas av den högra kartan i samma figur. Värt att notera är att inslaget av kalt berg med tunna eller osammanhängande jordtäckte är förhållandevis stort (röd färg), medan leriga jordar (gul färg) förekommer relativt sparsamt.



Figur 5. Vänster: Förenklad berggrundskarta med markering av högsta kustlinjen (röd streckad linje). Höger: Jordarter inom Vätterns tillrinningsområde. Från VVVF rapport 885.

3.4 Markanvändning

En bild över hur markerna inom Vätterns tillrinningsområde används ges i Figur 6. Inslaget av skogsmark är betydande, sammanlagt ca 60 % av ytan då hyggen inkluderas. Andelen åkermark inskränker sig till ca 20 % och merparten av jordbruksmarken återfinns i slättområdet öster om centrala Vättern. Ungefär 2 % av tillrinningsområdets yta klassas som bebyggelse^c, huvudsakligen koncentrerade till tätorterna Jönköping, Huskvarna och Motala. Avrinningsområdet genomkorsas av ett antal större och mindre vägar. Mest trafikerad är motorvägen E4, följt av riksvägarna 40, 47, 50 och 49, samt länsväg 195. Se bilaga B4 för en mer detaljerad beskrivning av underlagen som behandlar trafik och vägar.

^c Inkluderar sluten bebyggelse i stadskärnor, hög- och låghusbebyggelse, industriområden och fritidshusområden.



Figur 6. I kartan visas odlad mark i gul färg och övriga marker inklusive skogsmark i grön färg: Tätorter är markerade med lila färg och större vägar med grått. Den röda linjen markerar Vätterns avrinningsområde.

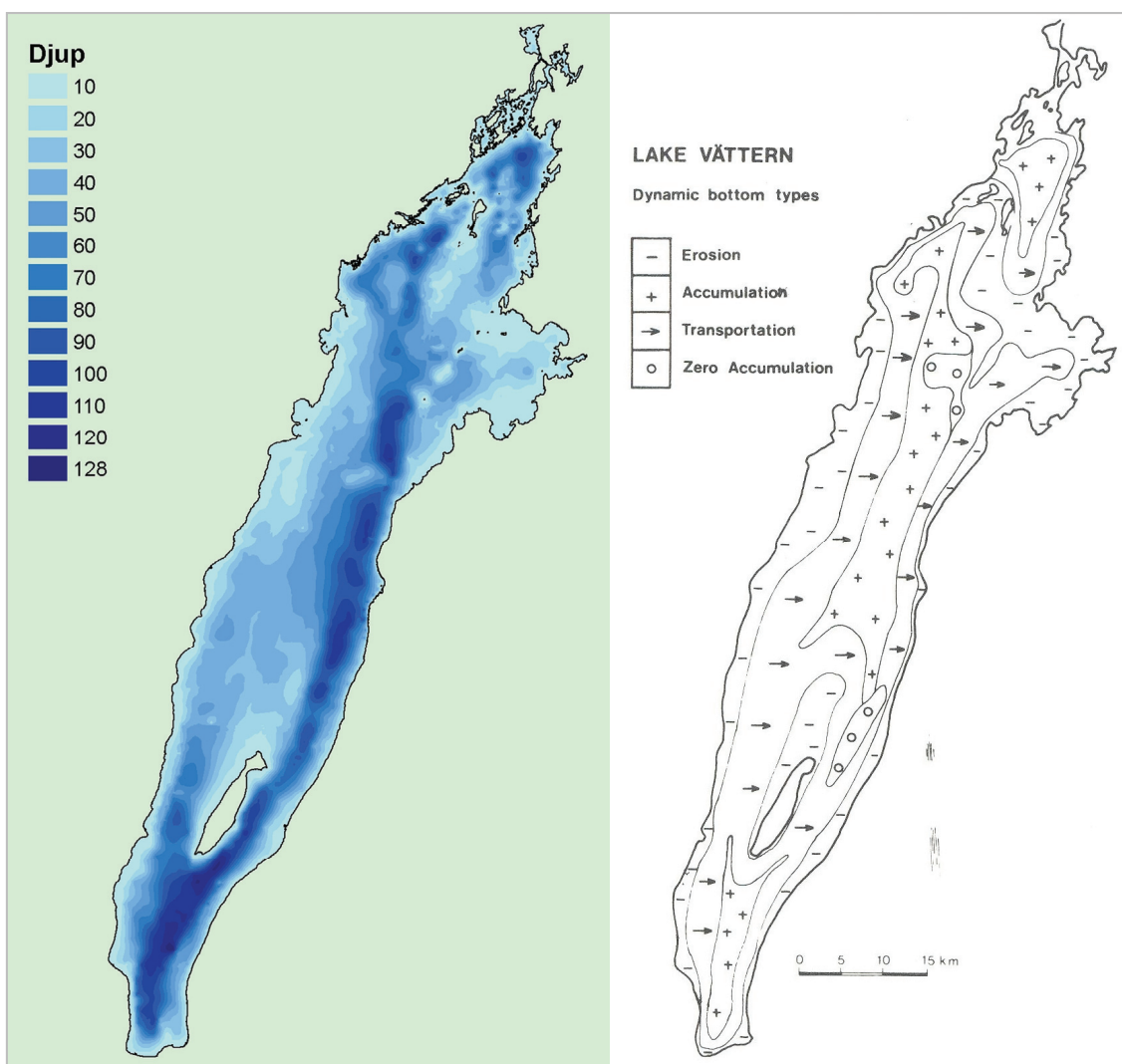
3.5 Vätterns djupförhållanden - bottentyper

Vätterns karaktär som förkastningssjö gör att den har ovanligt branta strandpartier. I sjöns södra och mellersta del är vattendjupet 30 meter eller mer på relativt kort avstånd från land (Figur 7). Mer långgrunda strandpartier finns framför allt i Vätterns norra del.

Vättern har ett medeldjup på knappt 40 meter och ett största vattendjup på 128 meter (strax söder om Visingsö).

En del av det här arbetet har bestått i att uppskatta vilka mängder av tillförda metaller till Vättern som slutligen sedimenterar i sjöns bottenar. Ett viktigt underlag för denna skattning är, förutom halter i sediment, arealen ackumulationsbotten där slutgiltig sedimentation sker. Den hittills största kartering som gjorts av Vätterns botten sediment genomfördes 1976, och får anses gälla än idag⁸. Karteringen visade att endast cirka 20% av Vätterns bottenareal utgörs av ackumulationsbotten fördelade över tre områden i norra, mellersta och södra delen. Resten av bottenytan består av erosions- och transportbottenar (Figur 7, till höger).

I bilaga B3 redovisas de underlag som på olika sätt behandlar sedimenten i Vättern.



Figur 7. Vänster: Djupkarta över Vättern⁵ (från VVF rapport 88). Höger: Utbredningen av ackumulationsbottenar och andra bottentyper (från Håkanson & Ahl⁸).

4 Källor och sänkor för metaller i Vätterns avrinningsområde

I det här avsnittet beskrivs översiktligt vilka källor och sänkor för metaller som finns i Vätterns avrinningsområde. I nästa avsnitt beskrivs hur de olika källorna kopplas ihop, hur de länkas till sänkorna, vilka processer som äger rum m.m., dvs. hur allt hänger ihop konceptuellt.

Det finns en rad olika källor för de metaller som tillförs Vättern. En del av tillförseln är naturlig, medan en del är orsakad, eller förstärkt, av mänsklig verksamhet, s.k. **antropogen** tillförsel. I Figur 8 visas exempel på några källor för metaller i landskapet.



Figur 8. Det finns en mängd olika källor för metaller i landskapet. De kan tillföras via nederbörd från källor långt borta (a, nederbördsmätare). Vittringsprocesser frisätter metaller som finns naturligt i mark (b). Olika former av mänskliga verksamheter släpper också ut metaller till luft och vatten, till exempel gruvverksamhet (i), andra industrier (g), spridning av ammunition (h), trafik (e) och tätorter (d). Metaller transporteras via naturliga vattendrag (c) och t ex. dagvattenledningar (f).

De metaller som undersöks i den här rapporten förekommer naturligt i jord och berggrund. Dessa kan **frisättas genom vittring** av mineral och kan transporteras vidare i löst eller fast form med vattenflöden, eller via luften som damm. De genom vittring frisatta metallerna kan också **fastläggas** på nytt på sin väg genom mark, våtmarker, vattendrag och sjöar. Vittring och fastläggning är naturliga processer, men mänsklig aktivitet kan påverka vittringshastigheten och fastläggningsgraden och därmed också påverka metallernas rörlighet i landskapet.

Metaller tillförs också Vätterns avrinningsområde via **nedfall från luften**. Metallerna har i detta fall ofta transporterats långväga, men kan även härröra från lokala källor. De kan ha både ett naturligt och antropogent ursprung, i det senare fallet från t.ex. förbränning av fossila bränslen i industrier och kraftverk eller fordon. Nedfallet kan ske på vattenytor, vilket direkt påverkar sjöns kemi, medan nedfall på omkringliggande mark i varierande grad fastläggs i marken. Endast en mindre del av metallnedfallet på mark når i regel slutligen något ytvatten (sjö eller vattendrag).

Det finns dessutom direkta antropogena utsläpp från industrier och andra pågående verksamheter, vilka i den här rapporten definieras som **punktkällor**. Vi skiljer på följande punktkällor:

- gruvindustri,
- pappersindustri,
- övrig industri t.ex. avfallsanläggningar,
- kommunala avloppsreningsverk, ARV.

Slutligen finns det källor av antropogent ursprung som avger metaller mer eller mindre diffust till omgivningen och inte från definierade punkter. Dessa utsläpp är i regel svåra att kvantifiera och är ibland okända. De **diffusa källorna** är ofta kopplade till olika former av verksamheter och vi har delat in dem i följande kategorier (se faktaruta 4 om diffusa källor):

- dagvatten från tätorter,
- försvarsmaktens verksamheter (spridning av ammunition),
- äldre avfall, deponier,
- förorenad mark,
- större vägar,
- jord- och skogsbruksmark, övrig mark.

Metallerna fastläggs inom avrinningsområdet genom huvudsakligen tre **sänkor** i Vättern och dess tillrinningsområde, och resterande mängd transporteras ut ur Vättern med Motala Ström:

- sedimentation i Vättern och andra sjöar,
- fastläggning i mark,
- fastläggning i diken och våtmarker (lokal retention).

Transport och omfördelning av metaller inom avrinningsområdet sker till stor del **via vattendrag**. Den sammanlagda effekten av alla uppströms källor och sänkor avgör tillförseln via vattendrag, det vill säga såväl vittring, fastläggning i mark och nedfall från luft som uppströms liggande punktkällor och diffusa källor påverkar tillförseln av metaller till Vättern via vattendrag. I metallbudgeten över en sjö som Vättern utgör därför skattningar av metalltillförseln via vattendrag viktiga tillförselposter (källor) sett ur sjöns perspektiv.

Faktaruta 4: Om diffusa källor

Utsläppen från flera diffusa källor sker inte direkt till vattendrag eller sjöar utan som läckage eller via luftdeposition (genom damning) till omgivande mark. Ofta fastläggs den frigjorda metallen i marken, varifrån en del på sikt åter lösgörs för att slutligen hamna i ett grundvatten eller angränsande ytvatten. Hur mycket av metallen som slutligen når ett ytvatten beror på metallens och markernas egenskaper och en rad processer som påverkar metallens rörlighet.

Av metallkällorna som listas ovan betraktar vi alla utom jord- och skogsbruksmark som helt antropogena, dvs tätorter, vägar, förorenade områden, deponier och spridning av ammunition. Metalltillförseln från jord- och skogsbruksmark kan vara förstärkt genom bearbetning och tillsatta kemikalier, men ett eventuellt antropogent tillskott från dessa marker har inte gått att kvantifiera. Tillförseln från övrig mark anser vi vara helt naturlig, men nedfallet av metaller på alla marktyper har förstås både ett naturligt och antropogent ursprung.

Vi har valt att räkna spridningen av ammunition som ett diffust utsläpp även om projektilerna hamnar direkt i Vättern. Anledningen är att metallen i projektilerna tillförs Vättern i fast form och att metallerna i egentlig mening inte når vattenmassan förrän de har lösgjorts från ammunitionen.

I det här kapitlet beskrivs kortfattat de olika källorna närmare, samt hur vi kvantifierat deras betydelse för flöden av olika metaller i avrinningsområdet. Dessa underlag utgör grunden för den modell över metallernas fördelning på landskapsnivå som beskrivs i kapitel 5, där även sänkorna för metaller i landskapet beskrivs närmare. För mer detaljerad information om underlag, antaganden och beräkningar hänvisar vi till sammanfattningen i faktaruta 5, samt de olika bilagorna. Är du i första hand intresserad av resultaten kan du gå direkt till kapitel 6 "Metallbudgetar för Vättern och utvalda delområden – tillförsel, fastläggning och utflöde".



Figur 9. De diffusa källorna har ibland sitt ursprung i våra vardagsaktiviteter, förr och nu.

Faktaruta 5: Källor och sänkor - vad vet vi och vad måste vi uppskatta?

Vi känner förhållandevis väl till en rad storheter som är viktiga för att beräkna de olika källornas och sänkornas inbördes betydelse:

- **Omgivningsförhållanden** som mark- och vattenytor, markanvändning, vattendjup har presenterats i tidigare avsnitt.
- **Vattenflöden** i vattendragen mäts av SMHI eller modelleras fram av SMHI (inklusive utflödet via Motala ström).
- Metallhalten i vatten i de **större vattendragen** mäts också fortlöpande inom den samordnade recipientkontrollen. Metalltillförseln via vattendragen beräknas genom att multiplicera halten med vattenflödet.
- Metalltillförsel från **punktkällor** såsom industrier och kommunala reningsverk mäts i de flesta fall fortlöpande inom ramen för verksamheternas utsläppskontroll.

Andra storheter måste vi på olika sätt skatta med hjälp av dataunderlag och vissa antaganden:

- Metalltillförseln via **mindre vattendrag** och från **omgivande mark** måste skattas på basis av mindre säkra mätunderlag och vissa antaganden.
- En särskild utredning har gjorts för att uppskatta tillförseln via **dagvatten** från tätorter.
- Tillförseln från **vägar** uppskattas på basis av schablonvärden, uppgifter om vägsträckor och statistik över trafikintensitet.
- Tillförseln av metaller från **spridning av ammunition** har uppskattats baserat på uppgifter om tillförd ammunition och antaganden om vittringshastighet.
- **Metalldepositionen** mäts på Visingsö, och med ledning av dessa mätningar tillsammans med uppgifter om nederbörden inom olika delar av avrinningsområdet har en uppskattning gjorts av metalldepositionen på sjöyta respektive mark.

Utöver dessa storheter finns metallflöden som vi inte kan skatta med hjälp av dataunderlag och antaganden. Dessa flöden har vi istället uppskattat med hjälp av landskapsmodellen (se kapitel 5 och bilaga B7 för en detaljerade beskrivning av landskapsmodellen). Dessa storheter är:

- Mängden av olika metaller som **sedimenterar** i sjöarna inom hela avrinningsområdet modelleras fram i landskapsmodellen baserat på sjöarnas storlek och deras påverkan på metallhalter. För Vättern görs en kompletterande oberoende skattning av sedimentationen baserad på halter i sediment, areal ackumulationsbotten och antaganden om sedimentationshastighet.
- **Fastläggning och vittring** i marker kan vi inte skatta utifrån mätningar, utan dessa storheter uppskattas i landskapsmodellen som skillnaden mellan tillförseln via nedfall och de mängder som återfinns i sjöar och vattendrag (se Metallbalansmodellen).
- Fastläggning i diken och våtmarker, här även kallad **lokal retention** skattas med landskapsmodellen för metaller med stor tillförsel från trafik som skillnaden mellan total emissioner och de mängder som återfinns i sjöar och vattendrag.

4.1 Metallflöden i vattendrag

Transporterade mängder i vattendragen har skattats med så hög noggrannhet som möjligt. Dessa uppgifter utgör viktiga underlag för både metallbudgetar och källfördelningar. Beroende på tillgången på data har olika metoder använts för att bestämma dessa mängder (se faktaruta 5). I Tabell 1 redovisas de årliga mängder som i genomsnitt transporterades via de större vattendragen inom Vätterns avrinningsområde under perioden 2010-2012. I bilaga B1 återfinns detaljerade beskrivningar av metodiken och underlagen bakom beräkningarna, till exempel uppgifter om vattenflöden och observerade halter i vattendragen. I bilagan finns även detaljerade skattningar av transporter för fler ämnen (Al, Ca, Cl, Fe, K, Mn och Si, se faktaruta 2 för kemiska beteckningar). För de stationer och metaller (Ce, La, Mo, Sn, och U) där tidsserierna inte medger interpolation av koncentrationerna ges i bilagan grövre skattningar baserade på medelhalt och medelvattenflöde (se faktaruta 6).

Tabell 1. Metallflöden i de vattendrag där det varit möjligt att göra en noggrann transportskattning (typ 1, se faktaruta 6) baserad på flödesdata med dygnsupplösning samt koncentrationer som interpolerats^d mot kumulativa vattenflöden. Mängderna i tabellen avser kg/år som genomsnitt under perioden 2010-2012. Vattenflödet q utgör också genomsnittsvärdet för samma period uttryckt i m^3/s .

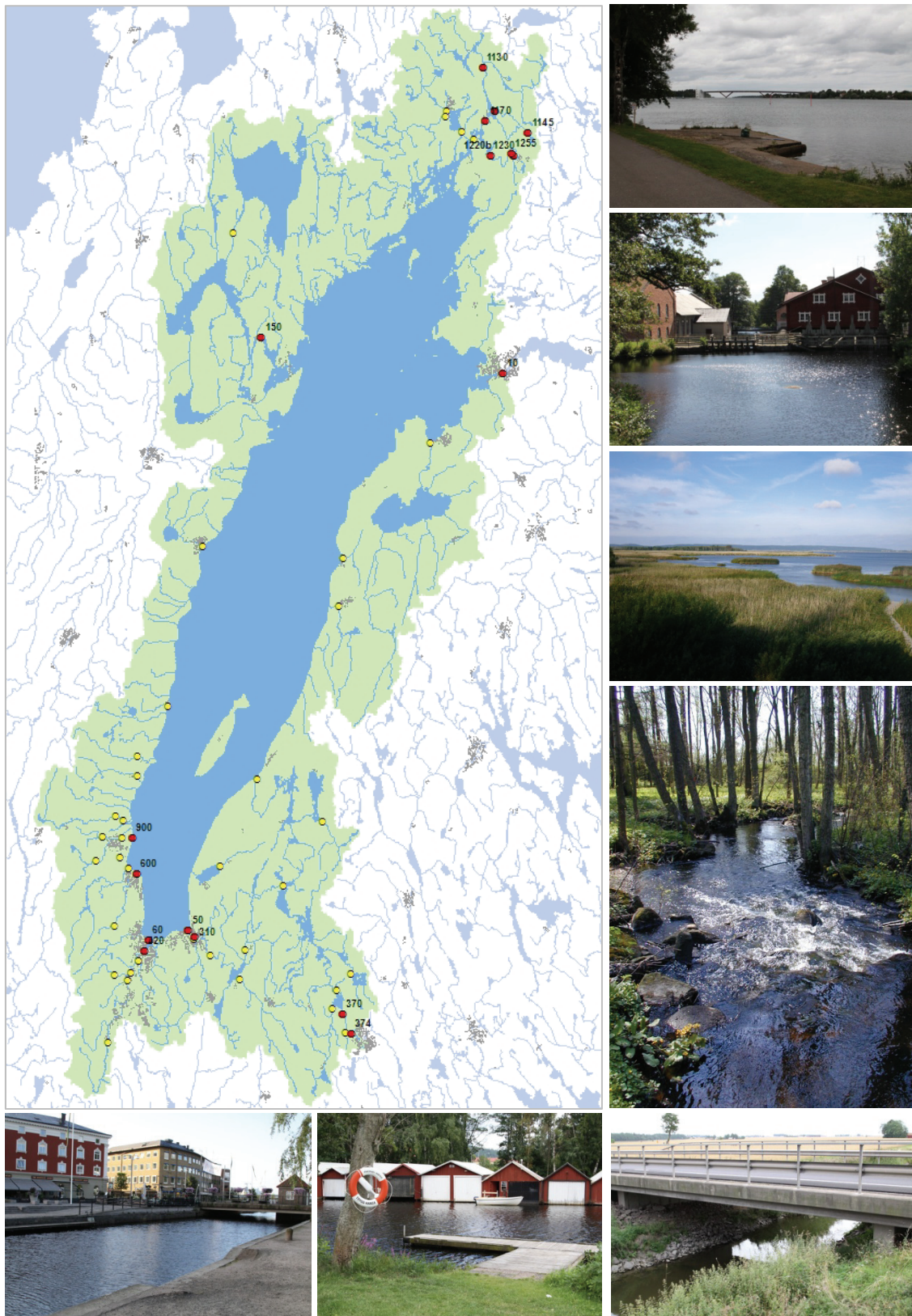
Station	Beskrivning	q m ³ /s	Antal obs.	As	Cd	Co	Cr	Cu	Hg	Ni	Pb	Zn
10	Motala ström	47	36	268	7,8	19	120	1013	0,53	691	86	3092
50	Huskvarnaån utlopp	7,9	36	105	2,3	54	92	377	0,00	313	106	700
60	Munksjön utlopp	3,0	36	31	0,7	20	22	126	0,28	81	30	475
150	Forsviksån	7,8	36	68	1,4	11	38	200	0,00	73	36	298
310	Huskvarnaån, uppstr. Kåvasjön	7,4	18	76	2,9	35	63	644	0,61	342	219	1083
370	Nässjöån	0,3	18	4,2	0,1	6,6	4,5	19	0,02	20	3,3	72
374	Runnerydssjön utlopp	0,3	18	5,0	0,1	1,2	3,2	20	0,02	25	4,7	74
420	Tabergsån inlopp i Munksjön	2,6	30	27	1,1	17	22	85	0,22	76	42	410
600	Lillån	0,4	18	3,8	0,1	3,5	3,1	25	0,03	25	3,1	61
900	Malmabäcken	0,1	18	1,4	0,0	0,7	1,7	13	0,01	13	1,2	45
1130	Skyllbergsån	1,3	12	22	0,4	8,6	11	67	0,10	28	13	164
1145	Orkaren	0,2	11	2,0	0,0	0,4	1,7	3,2	0,01	2,0	1,2	45
1149	Venaån	0,2	35	10	0,2	11	2,2	47	0,01	3,7	3,6	90
1170	Skyllbergsån	1,8	36	45	1,5	14	13	133	0,12	40	184	1138
1220b	Salaån	0,3	36	7,2	1,4	4,6	2,4	12	0,02	32	41	1567
1230	Dalbyån	0,3	10	3,6	0,2	0,6	1,7	11	0,03	4,3	8,0	775
1255	Ekershyttbäcken	0,3	12	13	1,3	10	1,9	9,3	0,03	72	71	1874

Faktaruta 6: Beräkningar av metalltransport i vattendragen

Beroende på tillgången på dataunderlag har vi använt oss av olika sätt att beräkna metalltransporten i tillrinnande vattendrag:

- Observerad** transport, typ 1 uppmätta halter interpolerade mot kumulativa vattenflöden
- Observerad** transport, typ 2 uppmätta medelhalter multiplicerat med medelvattenflöden
- Modellerad** transport modellerade medelhalter multiplicerat med medelvattenflöden

^d Att interpolera koncentrationerna mot det kumulativa vattenflödet istället för tiden gör att halterna vid flödestopparna ges större vikt, vilket anses bättre spegla de totala transportererna.



Figur 10. Stationer där vattenkemiska mätningar görs i rinnande vatten. De röda punkterna representerar stationerna i Tabell 1 där det har varit möjligt att göra en noggrann transportskattning baserad på interpolerade koncentrationer (typ 1). De gula punkterna representerar övriga stationer i vattendragen där transporterna bestäms med en förenklad metod (typ 2). Överst till höger: Motala Ström med Vättern i bakgrunden, dammen vid Forsviksån, sjön Tåkern och Ålebäcken. Nederst från vänster: Munksjöns utlopp, Huskvarnaån och Mjölnaån.

4.2 Metalltillförsel via nederbörd

Tillförseln av metaller från luften sker till stor del via nederbörden^e. Depositionen via nederbörd har beräknats genom att nederbördsmängdviktade koncentrationer från Visingsö har multiplicerats med lokala nederbördsmängder för varje delavrinningsområde. I Tabell 2 redovisas beräknad årlig deposition av metaller över Vätterns sjöyta, omkring liggande marker och den totala depositionen i hela avrinningsområdet.

Koncentrationen av metaller i nederbörden har mätts varje månad sedan 1993 på Visingsö. Vid beräkningen av depositionen har vi antagit att denna koncentration är representativ för hela området (det vill säga att halten är konstant över hela avrinningsområdet oberoende av nederbördsmängd).

Nederbörden mäts av SMHI vid 25 stationer inom Vätterns avrinningsområde, varav en ligger på Visingsö. Den lokala nederbördsmängden har skattats för varje enskilt delavrinningsområde för perioden 2010-2012 baserat på långtidsmedelvärden från den SMHI nederbördsstation som ligger närmast. Detta har gjorts genom att använda kvoten mellan de genomsnittliga nederbördsmängderna för perioden 1960-1990 för respektive station, och stationen på Visingsö, för att skala om den observerade medelnederbördsmängden för 2010-2012 uppmätt på Visingsö, till kringliggande stationer.

En analys av korrelationsmönster mellan metallerna, samt jämförelser med sammansättningen hos mineralpartiklar i Vätterns sediment visar att några ämnen i nederbördsproven huvudsakligen härrör från mineralpartiklar, sannolikt av lokalt ursprung, som tillförs proven genom damning. Bland metallerna i Tabell 2 är det enbart krom (Cr) som eventuellt kan påverkas av damning i någon nämnvärd utsträckning. För de mer sällan undersökta metallerna U, Ce och La, samt ämnena Si, Al, som alla ingår i landskapsmodellen, härrör merparten från lokala mineralpartiklar. Därför har depositionen för dessa ämnen antagits var noll eftersom det annars leder till orimliga modellresultat. Detta beskrivs närmare i bilaga B2 där också depositionen för övriga ämnen redovisas.

Tabell 2. Beräknad årlig deposition för perioden 2010-2012 över avrinningsområdets landyta, samtliga sjöytor, Vätterns sjöyta och totalt för hela Vätterns avrinningsområde (kg per år).

Deposition hela Vätterns avrinningsområde (kg/år)											
	As	Cd	Co	Cr	Cu	Hg	Mo*	Ni	Pb	Zn	Cl
deposition mark	423	211	673	1221	7500	12	207	1802	3600	52357	6038218
deposition sjö	172	86	274	496	3049	5	84	733	1463	21283	2454506
varav Vättern	126	63	201	365	2242	4	62	539	1076	15649	1804781
totalt	595	297	946	1717	10549	17	291	2535	5063	73640	8492724

* skattningen för dessa ämnen är mindre säker

^e Detta antagande utgör en förenkling eftersom depositionen utgörs både av våtdeposition via nederbörd och så kallad torrdeposition av partiklar vid sidan om nederbörden. Mätningarna fångar upp båda dessa fraktioner men det finns en osäkerhet i hur väl skattningarna verkligen representerar torrdepositionen. Studier har visat att denna typ av depositionsskattningar i regel utgör en underskattning av den totala tillförseln av metaller via nedfall.

4.3 Metalltillförsel från punktkällor

Det finns ett antal verksamheter inom Vätterns avrinningsområde som släpper ut metaller, antingen direkt i Vättern eller i uppströms liggande vattendrag eller sjöar. Verksamheterna mäter årligen sina utsläpp av metaller enligt särskilda kontrollprogram, till exempel avloppsreningsverk, skogsindustrier och gruvverksamheter (Tabell 3). Den slutliga inverkan av utsläppen på Vätterns vattenkvalitet beror på fastläggningsgraden mellan utsläppspunkten och sjön. Av Figur 11 framgår var i området dessa verksamheter ligger.



Figur 11. Punktkällornas lägen i Vätterns avrinningsområde. Vissa punktkällor leder sina utsläpp direkt till Vättern, andra till vattendrag och sjöar uppströms i Vätterns tillrinningsområde. De röda punkterna markerar gruvobjekt som ingår i länsstyrelsens EBH-databas. Dessa kan till exempel representera nedlagda gruvor eller deponier med gruvavfall. Till höger visas exempel på punktkällor som ingår i denna rapport: Zinkgruvans sandmagasin, följt av Aspa Bruk, Zinkgruvan Mining och utsikten från Munksjö AB över Jönköping.

Tabell 3. Utsläpp av metaller från kända punktkällor i kg per år. Siffran motsvarar ett medelvärde för åren 2010-2012. I de fall mätningarna hamnat under detektionsgränsen har utsläppen beräknats baserat på halva detektionsgränsen.

Anläggning		As	Cd	Cr	Cu	Hg	Ni	Pb	Zn
Övrig industri									
Avfallskraftvärmeverket Torsvik		0,023	0,006	0,21	0,12	0,0093	0,03	0,03	0,5
Karlsborgs avfallsupplag		0,018	0,0002	0,01	0,022	0,0002	0,02	0,02	0,2
Miljöhantering i Jönköping	b	0,070	0,001	0,11	0,28	–	0,93	0,04	0,9
Tuddarps avfallsanläggning	c	0,59	0,013	0,94	1,4	0,012	2,1	0,40	2,7
Husqvarna AB	d	–	–	0,19	1,7	–	0,21	–	2,1
Summa		0,70	0,020	1,5	3,5	0,022	3,3	0,49	6,2
andel av total		3%	0,3%	4%	1%	1%	5%	0,3%	0,3%
Pappersindustri									
Munksjö Aspa Bruk AB	e	1,6	4,3	14	34	0,07	7,2	12	282
Munksjö Paper AB	e	–	0	0	3	–	0	0	0
Summa			4,3	14	37	0,07	7,2	12	282
andel av total		–	68%	38%	13%	5%	10%	8%	14%
Avloppsreningsverk									
Askersunds avloppsreningsverk	a	–	0,038	0,93	5,8	0,037	0,68	0,45	8,3
Bankeryds avloppsreningsverk		0,36	0,030	1,99	7,7	0,040	4,2	0,33	12
Gränna avloppsreningsverk		0,46	0,050	1,6	19	0,050	3,4	0,75	51
Habo avloppsreningsverk	a	1,1	0,12	2,1	26	0,17	4,7	1,4	45
Hammars avloppsreningsverk		–	0,052	0,47	3,7	0,034	1,4	2,0	45
Hjo Avloppsreningsverk	a	1,1	0,11	2,0	25	0,16	4,5	1,4	43
Huskvarna avloppsreningsverk		2,8	0,30	6,0	64	0,17	26	2,5	122
Karlsborgs avloppsreningsverk	a	0,57	0,060	1,1	13	0,09	2,4	0,74	23
Simsholmens avloppsreningsverk		5,6	0,59	11	132	0,88	24	7,3	229
Vadstena avloppsreningsverk	a	0,64	0,067	1,2	15	0,10	2,7	0,83	26
Ödeshög avloppsreningsverk	a	0,90	0,094	1,7	21	0,14	3,8	1,2	37
Summa		11	1,1	21	246	1,4	59	12	438
andel av total		44%	18%	57%	84%	94%	85%	9%	22%
Gruvverksamhet									
Zinkgruvan Mining AB		13	0,83	0,34	5,2	0,0	0,0	119	1290
andel av total		53%	13%	1%	2%	0%	0%	83%	64%
SUMMA alla punktkällor		24	6,2	36	291	1,5	70	144	2016

a: PE proportionaliserad mot Simsholmens ARV

b: Data endast tillgängligt för 2010

c: Data endast tillgängligt för 2011

d: Data endast tillgängligt för 2011-2012

e: Nettotilskott där metallmängderna i ingående råvatten subtraherats från utgående mängd

De större avloppsreningsverk som ingår i beräkningarna finns i Askersund, Bankeryd, Gränna, Habo, Hammar, Hjo, Huskvarna, Jönköping, Karlsborg, Vadstena och Ödeshög. Uppgifter om metallförekomsten i utgående vatten finns för sex av dessa verk. För övriga fem har metallutsläppen uppskattats genom proportionalisering mot antalet PE^f och utsläppsdata för

^f PE – uppgifter om antal personekvivalenter för avloppsreningsverken år 2013.

Simsholmens ARV (Tabell 3). Utöver dessa anläggningar finns det i området ytterligare några mindre avloppsreningsverk (motsvarande <500 PE) som bedöms ha marginell påverkan och därmed inte ingår i underlaget.

I nord östra delen av avrinningsområdet ligger Zinkgruvan, med en pågående gruvverksamhet där utsläpp sker i Kärrafjärden via Salaån. Årliga utsläppsdata av As, Cd, Cu, Pb och Zn finns tillgängliga för perioden 2010-2012, och medelvärdena för denna period redovisas i Tabell 3.

Utsläppsdata för metaller finns tillgängliga för ytterligare sju industriella verksamheter som kan påverka vattenrecipienterna genom utsläpp inom Vätterns avrinningsområde, varav fyra avfallsanläggningar, en verkstadsindustri, och två skogsindustrier (Tabell 3). Tillgången på data varierar mellan anläggningarna, vilket innebär att det för vissa anläggningar finns data för alla tre åren 2010-2012, medan det för andra endast finns uppgifter för något år.

De samlade utsläppen från punktkällor inom Vätterns avrinningsområde är således (bland här redovisade metaller) störst för zink, drygt 2000 kg/år, följt av koppar, cirka 300 kg/år. För metallerna kadmium och kvicksilver uppgår de samlade utsläppen till drygt 6 kg/år, respektive 1,5 kg/år.

4.4 Tillförsel från vägar och trafik

Emissioner av metaller från trafiken sker främst genom slitage av vägbanor, bromsar och däck, samt genom spridning av vägsalt. Det finns några större vägar inom Vätterns avrinningsområde. E4 går nära stranden längs den östra kusten, och riksvägarna 40, 47, 49 och 50, samt länsväg 195 passerar på varierande avstånd från sjön (Figur 12).



Figur 12. De större vägarna inom Vätterns avrinningsområde som ingår i skattningen av emissionerna av metaller från trafik: E4 nära stranden längs den östra kusten, riksvägarna 40, 47, 49 och 50, samt länsväg 195. Bilden till höger visar trafik på E4 vid Vätterns strand.

Tillförseln genom olika former av slitage har uppskattats genom att schablonvärden^g över mängder per km och år kombinerats med uppgifter om väglängd^g och trafikintensitet^h. Metalltillförseln via spridning av vägsalt har uppskattats utifrån uppgifter om tillförda mängder vägsalt per delavrinningsområdeⁱ och koncentrationen av respektive metall i bergsalt¹⁰. Den totala spridningen av metaller från vägtrafik inom Vätterns hela avrinningsområde redovisas i Tabell 4. För detaljerad beskrivning av beräkningen hänvisas till bilaga B4.

Tabell 4. Tillförsel av metaller från slitage av bromsar, däck och vägbana, samt spridning av vägsalt på motorvägen E4, riksvägarna 40, 47, 49 och 50, samt länsväg 195 (kg per år).

Källa	Tillförsel från trafik (emissioner från slitage och vägsalt), kg/år									
	As	Cd	Co	Cr	Cu	Hg	Mo	Ni	Pb	Zn
Vägsalt	–	7	0	7	22	–	–	44	44	11
<i>andel</i>		100%	0%	0%	2%		0%	1%	4%	1%
Slitage	–	–	10	2518	1221	–	29	8185	1006	1153
<i>andel</i>		0%	100%		98%		100%	99%	96%	99%
Totalt	–	7	10	2526	1243	–	29	8229	1050	1164

4.5 Tillförsel med dagvatten

Golder Associates AB ("Golder") har på uppdrag av Vätternvårdsförbundet (VVF) undersökt halterna av metaller och anjoner^j i dagvatten vid sex provpunkter inom Vätterns tillrinningsområde. Platserna valdes ut för att representera olika typer av bebyggelse, samt för en punkt, motorvägen E4^k. Med utgångspunkt i dessa mätningar, terrängkartans tätortsarealer samt antaganden om årlig ytavrinning, beräknades de tillförseln via dagvatten från de olika tätortskategorierna för samtliga delavrinningsområden. I Tabell 5 framgår de totala mängderna som tillförs från tätort per år för hela Vätterns avrinningsområde. Metoder, detaljerade resultat och slutsatser beskrivs utförligt i bilaga B5.

Tabell 5. Årlig tillförsel av metaller via dagvatten från tätorter (kg per år).

Kommun	As	Cd	Co	Cr	Cu	Hg	Ni	Pb	Zn	Ce	La	Mo	Th	U
Askersund	0,3	0,1	0,3	0,9	2,0	0,004	1,2	1,0	31	1,2	0,8	0,3	0,1	0,3
Gullspång	0,003	0,0002	0,004	0,01	0,03	0,0001	0,02	0,005	0,2	0,02	0,01	0,002	0,002	0,003
Habo	0,2	0,04	0,2	0,7	1,5	0,003	1,1	0,6	20	1,0	0,6	0,2	0,1	0,2
Hjo	0,2	0,05	0,3	0,7	1,6	0,003	1,0	0,8	25	1,0	0,6	0,2	0,1	0,2
Jönköping	2,4	0,6	3,1	7,7	18	0,03	11	9,7	316	11	7,1	2,5	1,2	2,9
Karlsborg	0,1	0,02	0,2	0,6	1,1	0,003	0,8	0,4	11	0,7	0,4	0,1	0,1	0,2
Mjölby	0,1	0,02	0,1	0,1	0,3	0,001	0,2	0,2	7,9	0,2	0,1	0,1	0,03	0,1
Motala	0,7	0,2	0,9	1,6	13	0,01	1,9	3,2	135	3,8	2,3	1,3	0,4	4,3
Nässjö	0,4	0,1	0,5	1,2	2,9	0,01	1,6	1,6	52	1,7	1,1	0,4	0,2	0,5
Tibro	0,01	0,001	0,02	0,1	0,1	0,0003	0,1	0,03	0,8	0,1	0,05	0,01	0,01	0,02
Vadstena	0,3	0,1	0,4	0,7	5,8	0,002	0,8	1,4	58	1,7	1,0	0,5	0,2	1,9
Ödeshög	0,1	0,0	0,1	0,4	0,8	0,002	0,5	0,4	12	0,5	0,3	0,1	0,1	0,1
TOTALT	4,8	1,2	6,2	15	47	0,062	20	19	670	23	14	5,6	2,5	11

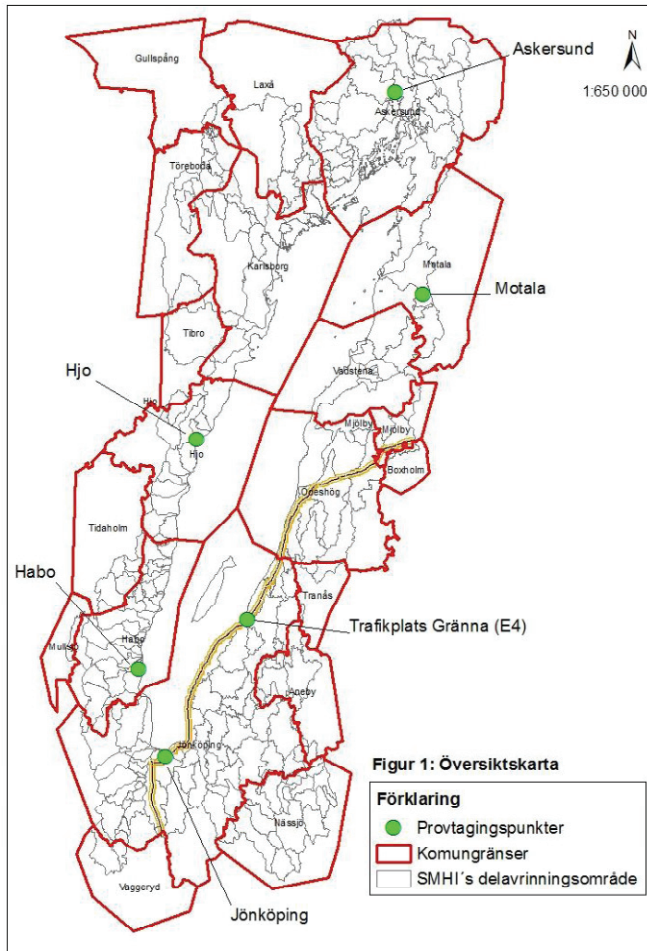
^g Vägsträckan av respektive huvudväg inom varje SMHI delavrinningsområde.

^h Baserad på statistik avseende cirka år 2000. Uppgifter från VVF rapport 65 och Vägverket, se bilaga B4.

ⁱ Mängderna vägsalt som tillförs avrinningsområdet har uppskattats i kloridmassbalansen baserat på restposten mellan deposition och utflöde.

^j Benämning på negativa joner, tex klorid, sulfat mm.

^k Halterna i dagvatten från E4 vid detta enstaka tillfälle jämförs i bilaga B4 med de schablonvärden för emissioner från trafik som används för skattningen av tillförsel från vägar och trafik.



Figur 13. De sex provpunkterna för dagvatten i Golders utredning. Den övre, högra bilden visar provpunkten i Askersund och den nedre i Hjo.

4.6 Tillförsel från försvarsrelaterade verksamheter (ammunition)

Metaller tillförs Vättern från olika försvarsrelaterade verksamheter via skjutning av ammunition. Av den tillförda mängden solid metall, som hamnar direkt i Vättern, övergår endast en mindre del på sikt i löst form. Den frigjorda metallen kommer i sin tur antingen att transporteras vidare med vatten, eller fastläggas i angränsande bottensediment. De metallmängder som hamnar på land, till exempel i skjutvallar, förutsätts i beräkningen inte nå vattendragen på grund av den i regel mycket låga rörligheten för metaller i skjutvallar och liknande miljöer¹¹.



Figur 14. Exempel på kopparmantlade projektiler som innehåller bly.

Skjutverksamhet bedrivs i anslutning till Vättern av Försvarsmakten (P4, F7 och K3), Försvarets Materiel Verk (FMV) Provpplats Karlsborg, samt Nammo Vanäsverken AB. Dessa utövare provskjuter/övningsskjuter inom avgränsade provskjutningsområden i norra Vättern enligt Figur 15. I faktaruta 7 bredvid redovisas de antaganden som gjorts för respektive område.

De aktuella projektilerna innehåller bly, koppar, zink, och järn, samt i vissa fall antimon^l. Sammanlagt beräknas idag totalt ca 160 kg bly, 200 kg koppar och drygt 20 kg zink per år hamna i Vättern via ammunitionen (se bilaga B6 för en beskrivning av samtliga underlag och beräkningar). Eftersom upplösningshastigheten för dessa metaller är låg, når i praktiken endast en liten del av den tillförda mängden solid metall Vätterns vattenmassa i löst form varje år. Genom att beräkna hur mycket bly som frigjorts från muskötkulor på Regalskeppet Vasa under de 333 år som fartyget legat under vatten (se Figur 16), har den genomsnittliga vittringshastigheten hos bly i ammunition som ligger i vatten uppskattats till i storleksordningen 0,05 % per år¹². Av de 160 kg bly som varje år hamnar i Vättern kan därmed inledningsvis 80 g antas frigöras^m varje år tills metallen är helt upplöstⁿ.



Faktaruta 7: Underlag för uppskattningar av mängden metall som årligen når Vättern med ammunition

- Skjutfälten Nytorp och Kråk: Skattningar baserade på uppgifter om antal skott, mängd metall i projektil samt antagandet att 5 % av projektilerna hamnar i Vättern.
- Flygskjutmålet Hammarsudde: Skattningar baserade på uppgifter om antal skott, mängd metall i projektil samt antagandet att 100 % av projektilerna hamnar i Vättern.
- Hammarnäset: Uppgifter från FMV baserad på statistik över mängd metall som hamnar i Vättern.
- Nammo Vanäsverken AB: Uppgifter från företaget baserade på en materialrestberäkning över mängd metall som hamnar i Vättern i egen skjutsektor.

Figur 15. Karta över provskjutningsområden och skyddsområden.

^l Blyfri ammunition används i allt större utsträckning.

^m Om man förutsätter att korrosionen sker linjärt, vilket emellertid inte är fallet eftersom mängden metall successivt förbrukas. Vidare är det troligt att endast en mindre del av denna frigjorda mängd hamnar i vattenmassan eftersom det förmodligen sker en återfastläggning i angränsande sediment.

ⁿ Skattningen av hur mycket metall som verkligen frigörs är osäker eftersom det är oklart hur jämförbar dagens ammunition är med muskötkulor. Idag är projektilerna i regel mantlade och det är osäkert om de splittras vid nedslaget, vilket påverkar metallytan som kommer i kontakt med vattnet.



Figur 16. Muskötkulorna, som tillverkades på Regalskeppet Vasa, var 18-19 mm i diameter och vägde i genomsnitt 36,5 gram (före år 1700). Kulorna förvarades i kaggar som var placerade i hålskeppet och som därför kan förmodas ha legat relativt fritt i vattnet. Under de 333 år som kulorna legat på detta sätt i vattnet har de minskat i vikt i genomsnitt 5 gram (ca 0,04 %/år). Foton från Vasamuseets webbplats, www.vasamuseet.se.

En simulering visar att cirka 6 % av den årligen tillförda blymängden frisätts varje år efter 60 år med konstant årlig tillförsel av ammunition (se bilaga B6). Det innebär att om dagens tillförselnivå varit rådande under 60 år, så frisätts idag cirka 10 kg bly per år på grund av den sammanlagda, kumulativa frisättningen till följd av historiska utsläpp. Det finns dock indikationer på att tillförseln av ammunition varit betydligt större under tidigare decennier, vilket innebär att denna siffra sannolikt underskattar mängderna som idag når vattenmassan i löst form. För beräkningarna i denna rapport antas att siffran 10 kg bly per år utgör en rimlig skattning av de långsiktiga effekterna av dagens tillförselnivå, och att tillförsel utöver denna nivå till följd av historiska utsläpp får ingå i restposterna i metallbudgetarna^o. Om motsvarande beräkning görs för koppar och zink blir siffrorna för dessa metaller 12 kg respektive 1 kg per år.

I den tidigare studien uppskattades frisättningen av bly till 50 kg/år och koppar till 7 kg/år, baserat på det grova antagandet att 1 % av den tillförda solida metallen frisätts varje år och att det inte sker någon ytterligare tillförsel från föregående års utsläpp.

4.7 Tillförsel från gruvavfall

Gruvverksamhet har bedrivits inom avrinningsområdet norr om Vättern sedan hundratals år tillbaka. Rester från denna verksamhet finns kvar i markerna i form av större och mindre deponier. Delar av avfallet, förmodligen betydande kvantiteter, användes fram till senare delen av 1900-talet även som konstruktionsmaterial i vägar, järnvägsbankar, husgrunder m.m. Detta gruvavfallsmaterial, som i varierande grad är förhållandevis rikt på metaller, finns således spritt inom stora delar av det norra avrinningsområdet. Genom framför allt luftens och regnets inverkan avger det svavelhaltiga materialet (genom vittring) metaller till vattendragen. Metallerna når senare Vättern, främst via Salaån, Skyllbergsån och Alsens utlopp.

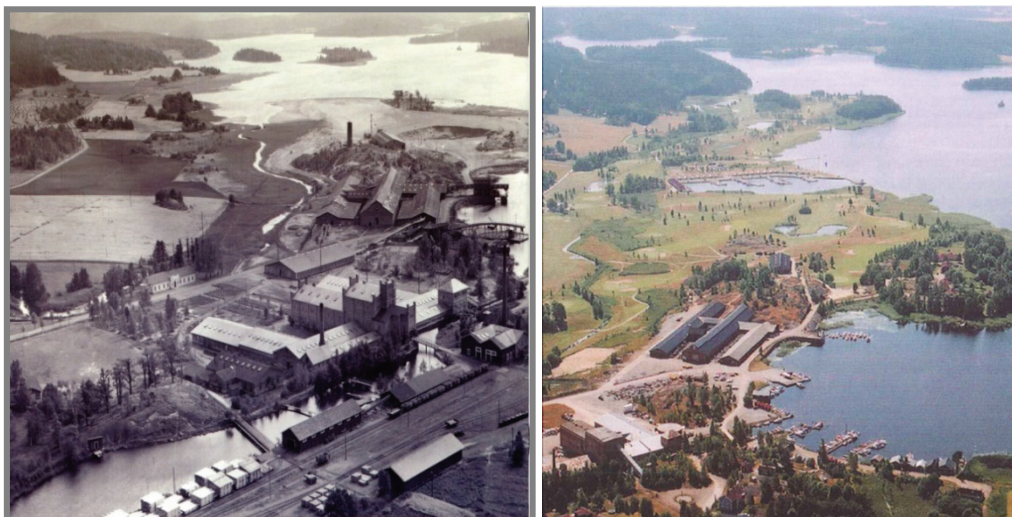
Dessutom innehåller morän och ytliga jordarter naturligt förhöjda metallhalter inom detta mineraliserade norra delavrinningsområde, vilket också bidrar till att de naturliga metallhalterna i delar av ytvattnen är högre än normalt. Det har dock i detta arbete inte gått att särskilja de historiska gruvavfallens metalltillskott från det naturligt förhöjda metalltillskottet från de mineraliserade markerna.

^o Alltså på samma sätt som diffus tillförsel från äldre gruvavfall hanteras i budgetarna.

Det största enskilda gruvavfallsobjektet är resterna från tidiga anrikningsprocesser, som finns i området omedelbart norr om Kärrafjärden och även i själva fjärdens botten. Hit till Åmmeberg transporterades under 1800-talet och början av 1900-talet malm från Zinkgruvan för anrikning och rostning. Låghaltig malm krossades och anrikades genom en enkel form av tvättning i "vaskverk". "Vaskmullen" från denna tvättning utgör en del av den avfallssand som idag återfinns på Kärrafjärdens botten och på vilken större delen av golfbanan är uppbyggd (huvudparten anrikningssand producerades dock efter det att modern anrikningsteknik genom flotation infördes kring 1930).

Höghaltig "styckemalm" utsorterades för hand och rostades^p istället för att krossas och tvättas. Rostningen skedde i speciella ugnar i Rosthyttan, en byggnad som fortfarande finns bevarad vid hamnen (se Figur 17). Avfallet från rostningen, som innehöll såväl metalloxider som metallsulfider, deponerades huvudsakligen i Rosthyttans närhet. Utredningar pågår i Zinkgruvans regi för att kartlägga avfallens innehåll och utbredning, samt för att fastställa behov och möjlighet att sanera området.

Den mängd metall som idag frigörs från Åmmebergsområdets historiska gruvavfall har beräknats med hjälp av en separat metallbudget för Kärrafjärden, som presenteras i avsnitt 6.2. För att budgeten ska gå ihop hänförs en restpost för flertalet metaller till en "övrig källa", som antas utgöra gruvavfallen i och kring Kärrafjärden, och som för exempelvis zink och bly beräknas uppgå till ca 6,5 ton/år respektive 220 kg/år.



Figur 17. Fotografi från mitten av 1930-talet över Åmmebergs industriområde (vänster) och samma område som är golfbana idag. Öarna i bildens övre del syns idag som upphöjningar i golfbanan.

4.8 Mängder i Vätterns vattenmassa och sediment

Hittills i det här kapitlet har tillförseln från en rad olika källor för metaller beskrivits och kvantifierats. Dessa uppskattningar representerar de flöden av metaller som varje år tillförs från källor eller transporteras via vattendrag. På sin väg från källa till sänka i landskapet passerar metallerna olika så kallade pooler där de antingen stannar upp tillfälligt eller fastläggs permanent. Dessa pooler representerar tillsammans de totala mängder metall som vid en viss tidpunkt finns i olika delar av landskapet, till exempel i mark, växtlighet, sjöarnas vattenmassor

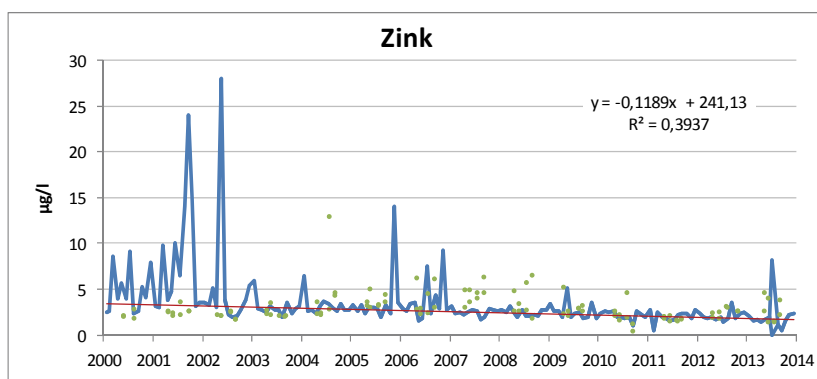
^p Rostning innebär att malmen upphettades, varvid det till zinken bundna svavlet "brändes bort" och ersattes med syre.

eller i sjösedimenten. I det här avsnittet beskrivs de totala mängder metall som finns upplagrade i Vätterns vattenmassa och i de ytliga sedimenten i Vätterns ackumulationsbottnar^q. Eftersom beräkningarna i rapporten baseras på de genomsnittliga förhållandena under tre år (2010-2012), kan poolernas förändring över tid också vara viktig information vid tolkningen av resultaten. Därför redovisas här också hur halterna i Vätterns vattenmassa förändrats över tid. I bilaga B1 finns utförligare information och skattningar för ytterligare ett antal metaller.

Det totala mängderna i Vätterns vattenmassa och i de ytliga sedimenten på sjöns ackumulationsbottnar redovisas i Tabell 6. Båda skattningarna bygger på relativt grova antaganden^r. Skattningen av den långsiktiga förändringen av metallmängden i Vätterns vattenmassa baseras på en regressionsanalys som beskrivs närmare i bilaga B1. De flesta förändringarna över perioden 2000-2014 förklaras troligen främst av olika former av analysartefakter, förutom för zink och koppar som tydligt minskar, respektive nickel som gradvis ökar (i Figur 18 visas halttenden för zink, se bilaga B1 för övriga metaller).

Tabell 6. Medelhalt och transporterad mängd i utflödet Motala Ström 2010-2012. Den totala mängden metall i Vätterns vattenmassa har skattats genom att medelhalten i utflödet multiplicerats med vattenvolymen. Den genomsnittliga mängdförändringen per år baserad på regressionsanalys av halterna i Vättern 2000-2014, uttryckt som % av total mängd i vattenmassan, redovisas endast för de metaller som uppvisar trovärdiga trender (se bilaga B1). Skattad mängd i Vätterns ytliga sediment (0-6 cm) motsvarande 60 års sedimentation (se bilaga B3).

	enhet	Arsenik As	Kadmium Cd	Kobolt Co	Krom Cr	Koppar Cu	Kvicksilver Hg	Nickel Ni	Bly Pb	Zink Zn
Utflödet vid Motala Ström										
Medelhalt 2010-2012	µg/l	0,18	0,0051	0,012	0,079	0,64	0,0003	0,45	0,043	2,0
Mängd per år 2010-2012	kg/år	268	8	19	120	1013	0,53	691	86	3092
Vätterns vattenmassa										
Total mängd	kg	13258	381	876	5828	47376	23	32978	3157	146583
Mängdförändring per år	% av total					-3		2		-6
Vätterns sediment (motsv.60 år)										
Total mängd	kg	42377	3302	64438	351469	153593	333	124589	246996	1273576
Mängd sediment/vattenmassa	%	31	12	1	2	31	7	26	1	12



Figur 18. Zinkhalt i Vättern under perioden 2000-2014. Den blå linjen representerar halten i utflödet vid Motala ström, och de gröna punkterna ytvattnet i Vättern vid två stationer.

^q För en fullständig bild skulle samtliga pooler i landskapet ha kunnat kvantifieras, dvs för olika jordlager, grundvatten, växtlighet etc. Underlag saknas dock i stort sett för detta och fokus i arbetet ligger på Vättern.

^r Det antas att halterna i utflödet är representativa för hela vattenvolymen, samt att de fåtaliga sedimentmätningarna är representativa för hela Vätterns ackumulationsbotten. Det senare också i kombination med osäkra antaganden om årlig sedimenttillväxt.

5 En modell för Vätterns avrinningsområde – mönster på landskapsnivå

I föregående kapitel beskrevs och kvantifierades olika metallkällor i Vätterns avrinningsområde. Det här kapitlet fokuserar istället på var i landskapet dessa källor och sänkor finns och hur de påverkar halterna i vattendrag och sjöar i samverkan med naturliga vattenflöden och landskapets rumsliga egenskaper. En konceptuell bild presenteras som på ett principiellt sätt beskriver hur metaller sprids, ackumuleras och transporteras i Vätterns avrinningsområde som helhet.

Den konceptuella bilden utgör grunden för den metallbalansmodell på landskapsnivå som skapats för Vätterns avrinningsområde. Denna datormodell är ett kraftfullt verktyg som systematiskt sammanväger all tillgänglig information om avrinningsområdet, som till exempel haltmätningar i sjöar och vattendrag, kända metallutsläpp och landskapets egenskaper och hydrologi. En mängd olika resultat genereras med hjälp av modellen: När observerade data saknas till metallbudgetarna som beskrivs i kapitel 6, skattas dessa metallflöden med hjälp av modellen. Modellen genererar också information om metallernas fördelning mellan olika källor och sänkor på landskapsnivå i form av bruttokällfördelningar för hela avrinningsområden, vilka kompletterar metallbudgetarna över enskilda objekt. Modellen bidrar vidare med generell information om fastläggning av metaller i olika miljöer, samt skattningar av sedimentationen i specifika sjöar. Modellens höga geografiska upplösning medger också resultat på hög detaljnivå. Till exempel kan de fall då modellens förutsägelser avviker från observerade förhållanden indikera och kvantifiera okända källor.

I följande avsnitt beskrivs först den konceptuella bilden av hur metallerna fördelas i landskapet, följt av en sammanfattande beskrivning av Metallbalansmodellen och de grundantaganden den bygger på. Vidare följer en redogörelse över hur modellens resultat överensstämmer med verkligheten och slutligen en tolkning och diskussion av de resultat som Metallbalansmodellen har genererat. En detaljerad beskrivning av modellens uppbyggnad och detaljerade resultat per metall ges i bilaga B7.

5.1 Kortfattad beskrivning av Metallbalansmodellen

Den konceptuella modellen över metallernas fördelning i landskapet är en bild som på ett principiellt plan beskriver de viktigaste transportvägarna och processerna som påverkar metallerna på sin väg från källa till sänka. Beroende på metallernas inneboende egenskaper och ursprung kan olika delar i den konceptuella modellen ha olika stor betydelse för en enskild metall i den generella modell som ställts upp.

Av Figur 19 framgår den konceptuella modellen för ett hypotetiskt avrinningsområde. Metaller förekommer naturligt i landskapet i tre pooler: mark, vatten och sediment (markerade som bruna och blå lådor). Metaller tillförs utifrån från ett antal olika källor (markerade som röda ellipser), och inom poolerna påverkar olika processer de ingående metallerna (markerade som streckade cirklar). Pilar representerar olika former av metallflöden mellan källor, pooler och sänkor.

Tillförsel av metaller sker via **nederbörden** i form av **deposition**. Den deponerade mängden metall hamnar både direkt på sjöns yta och på omgivande mark. Metaller som deponeras på sjöns yta tillförs vattensystemet direkt, medan deposition på mark kan fastläggas och

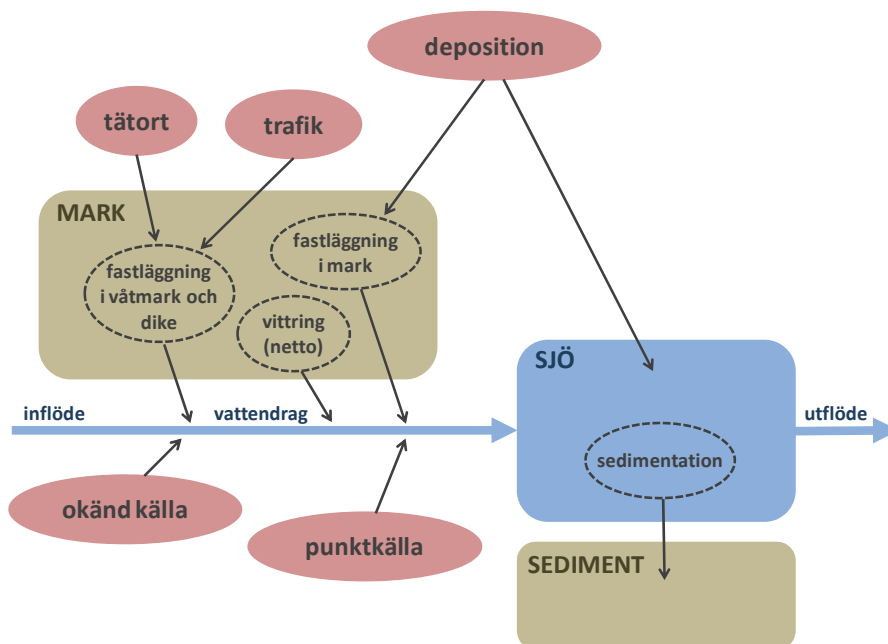
ackumuleras i det terrestra systemet, men de kan också förbli rörliga och transporteras ner mot närmaste vattendrag via grund- och/eller ytvattenflöden.

Metaller frisätts kontinuerligt genom **vittring** av mineral som i varierande grad finns naturligt i marken. Beroende på metallernas egenskaper och hur förutsättningarna i marken ser ut, kommer delar av eller all frisatt metall att åter fastläggas innan det når ett ytvatten. Nettomängden av vittring och fastläggning tillförs vattendragen via grund- och/eller ytvatten och når slutligen sjön.

Diffusa emissioner av metaller från **tätorter** och **trafik** når vattendragen via naturliga flödesvägar som grund- och/eller ytvatten, eller via anlagda dagvattenledningar. Det sker en varierande fastläggning av metallerna i mark, våtmarker och diken på vägen från dessa källor till de större vattendragen.

Tillförseln av metaller från **punktkällor** och diffusa **okända källor** antas nå de större vattendragen direkt utan fastläggning. De kan också tillföras sjön direkt då utsläppspunkten ligger i sjön.

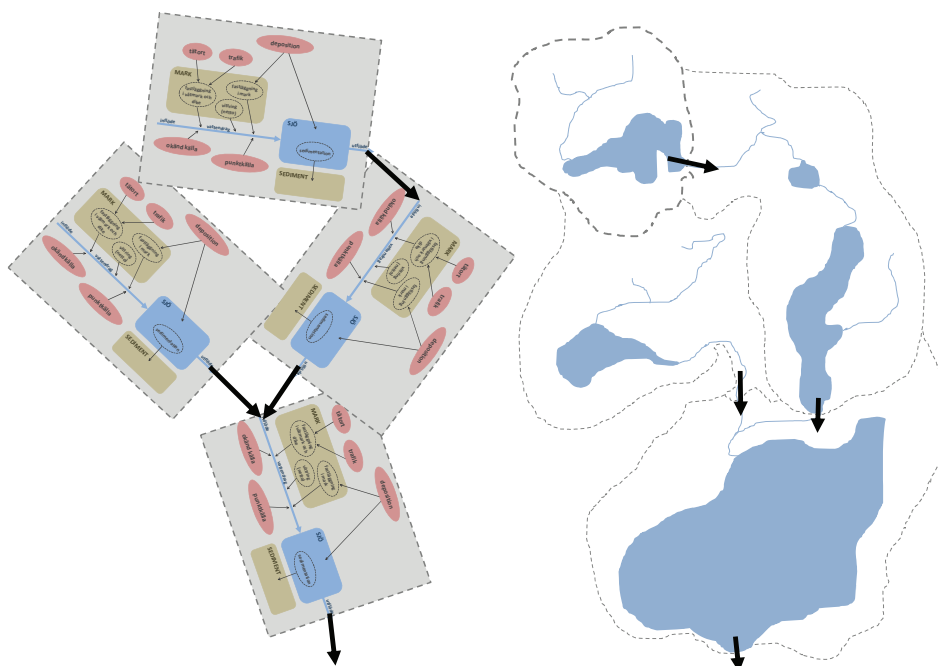
Metaller som når sjön via vattendragen fastläggs antingen permanent i bottensedimenten genom **sedimentation** av partiklar, eller lämnar sjön via **utflödet**.



Figur 19. Konceptuell bild som beskriver de viktigaste transportvägarna och processerna som påverkar metallerna på sin väg från källa till sänka för ett hypotetiskt avrinningsområde. Metaller upplagras naturligt i landskapet i tre pooler: mark, vatten och sediment (markerade som bruna och blå lådor). Metaller tillförs utifrån från ett antal olika källor (markerade som röda ellipser), och inom poolerna påverkar olika processer metallerna (markerade som streckade cirklar). Utöver källorna markerade i figuren kan det ske ett inflöde av metaller från uppströms områden. Metallerna lämnar avrinningsområdet via utflödet eller fastläggs permanent i bottensedimenten genom sedimentationen.

Metallbalansmodellen som beskriver metallernas fördelning över hela Vätterns avrinningsområde bygger på den konceptuella bilden som minsta enhet. Vätterns avrinningsområde har delats in i 308 mindre delavrinningsområden där vart och ett representeras av en submodell motsvarande den konceptuella bilden i Figur 19. Dessa

submodeller kopplas ihop enligt det faktiska hydrologiska nätverket, vilket innebär att uppströms liggande delavrinningsområden har kopplats ihop med de områden som ligger nedströms enligt Figur 20.



Figur 20. Metallbalansmodellen består av 308 mindre delavrinningsområden som vart och ett representeras av den konceptuella bilden i föregående figur. I den vänstra delen visas hur submodellerna som representerar varje delavrinningsområde kopplas ihop enligt det hydrologiska nätverk som visas för fyra hypotetiska delavrinningsområden i den högra figuren. De streckade linjerna representerar vattendelarna mellan delavrinningsområdena. Sjöar och vattendrag och representeras av blå färg. De svarta pilarna visar flödesriktningen mellan delavrinningsområdena.

Metallbalansmodellen består av en hydrologisk del där vattenbalansen^s för varje delavrinningsområde modelleras. Alla källor hänförs till det delavrinningsområde där tillförseln sker; depositionen fördelas över land och sjöyta inom varje delavrinningsområde, punktkällor liksom diffusa källor som vägar och tätort fördelas baserat på utsläppskoordinat, vägsträckning och tätortsareal.

Fastläggning av metaller i landskapet simuleras med hjälp av tre separata retentionsmodeller: en för fastläggning i mark av de metaller som tillförs via deposition, en för fastläggning i diken och våtmark i samband med utsläpp från vägar och tätorter, samt en retentionsmodell som uppskattar den fastläggning som sker genom sedimentation i sjöar. Retentionsmodellerna baseras på konstanter som är gemensamma för hela avrinningsområdet. För varje enskilt delavrinningsområde subtraheras de mängder som fastläggs enligt de tre retentionsmodellerna från de totalt tillförda mängderna från olika källor.

De totala nettomängderna tillförd metall och vatten summeras sedan nedströms det hydrologiska nätverket i Metallbalansmodellen. När de sammanlagda mängderna metall som transporteras via vattendragen under en period^t fördelas på den sammanlagda vattenvolym som rinner genom vattendraget under samma period motsvarar det en genomsnittlig

^s Nederbörd, avdunstning och avrinning.

^t Här treårsperioden 2010-2012.

koncentration. Dessa koncentrationer kan jämföras med de genomsnittliga koncentrationer som observeras i vattendrag och sjöar och vid kalibreringen av modellen justeras de generella retentionskonstanterna så att avvikelsen mellan dessa koncentrationer blir så liten som möjligt. Om den kalibrerade modellen på ett tillfredställande sätt kan reproducera de haltvariationer som observeras i avrinningsområdet som helhet är modellen användbar för att till exempel simulera koncentrationer där haltmätningar saknas.

Sammanfattningsvis kan sägas att Metallbalansmodellen hanterar utspädningseffekter till följd av de olika källornas geografiska lägen och varierande hydrologi över Vätterns avrinningsområde, lokalt betingade förutsättningar för fastläggning av metaller i mark, diken och våtmarker, samt sedimentation i sjöar. I bilaga B7 återfinns en mer teknisk beskrivning av Metallbalansmodellens uppbyggnad samt detaljerade resultat per metall.

5.2 Jämförelser mellan modellens resultat och observationer

Som beskrivs kortfattat ovan kalibreras Metallbalansmodellen så att observerade halter så väl som möjligt överensstämmer med modellerade halter. När modellen på ett tillfredställande sätt beskriver haltvariationen i landskapet, dvs när vi kan förutsäga haltvariationerna, innebär det att vi sannolikt förstår de viktigaste underliggande faktorerna som styr tillförsel, fastläggning och transport av metallerna.

Ett sätt att undersöka hur väl en modell beskriver verkligheten är att jämföra modellens prediktioner med oberoende observationer, s.k. validering. I Figur 21 visas ett diagram för zink där modellerade halter (på x-axeln) jämförs med observerade halter (på y-axeln) i vattendrag (röda, respektive blå punkter), samt sjöar (grå punkter). De olika kategorierna av observerade data representerar olika bra de modellerade halterna: de flödesviktade koncentrationerna (röda punkter) bygger på störst dataunderlag (tidsserier) och representerar relativt väl geografiskt de modellerade utflödespunkterna för delavrinningsområdena. De blå punkterna representerar också delavrinningsområdenas utflödespunkter, men utgör aritmetiska medelvärden baserade på ett mindre antal datapunkter. Slutligen representerar de grå punkterna medelvärdet för samtliga sjöar inom delavrinningsområdet och dessa data kan vara i varierande grad representativa för de modellerade utflödespunkterna beroende på hur sjöarna ligger inom delavrinningsområdet.

Vid kalibreringen av modellen har för de flesta metaller endast observationspunkterna med flödesvägda halter använts^u (röda punkter i Figur 21), vilket innebär att övriga vattendrag kan användas för validering av modellen (blå punkter). För zink kan det konstateras att överensstämmelsen är lika god för valideringspunkterna som kalibreringspunkterna^v. Även observationerna för sjöarna kan ses som en form av validering, men eftersom osäkerheten är större över hur jämförbara dessa observationer är med modellresultaten, är slutsatserna av dessa jämförelser mindre värdefulla.

Om Figur 21 studeras närmare framgår det att överensstämmelsen är god eftersom många av punkterna radat upp sig längs den blå 1:1-linjen^w. Punkter vid tre olika haltintervall har markerats med streckade områden och det kan konstateras att spridningen kring 1:1-linjen

^u För några av de mindre väl undersökta metallerna där dataunderlagen är sämre har samtliga observationer från vattendragen använts vid kalibreringen, vilket framgår av underlagen i bilagan.

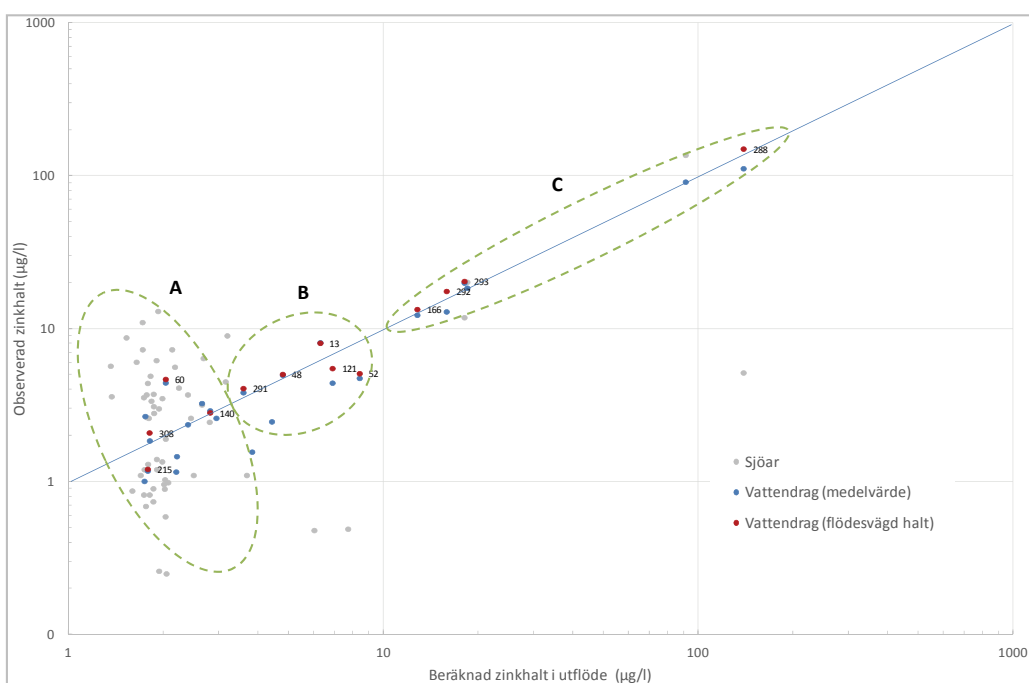
^v Både röda och blå punkter följer den blå 1:1-linjen, för vilken modellerade och observerade halter är lika stora.

^w Modellerade och observerade halter är identiska för punkter som faller på denna linje.

inom haltintervall A är betydligt större än för haltintervall B och betydligt större än för C. Spridningen inom det lägsta haltintervallet A (med modellerade halter mellan 1,5-2,5 µg/l och motsvarande observerade halter i intervallet 0,2-10 µg/l) speglar variationen i bakgrundshalt^x. Att ellipsen är högre än den är bred betyder att modellens prediktioner är relativt osäkra i detta haltintervall, vilket också är att förvänta eftersom till exempel bergrundens varierande zinkinnehåll inte inkluderats i modellen. Den största delen av variationen står också sjöarna för (grå punkter) där osäkerheten för deras representativitet för de modellerade halterna också är störst. Karteringar från SGU^y (Figur 22) visar också att zinkhalten i morän varierar stort mellan olika delar av Vätterns tillrinningsområde.

Inom haltintervallen B (3-10 µg/l) och i synnerhet C (10-100 µg/l) är den vertikala spridningen kring 1:1-linjen betydligt mindre vilket innebär att modellen predikterar variationen i dessa haltintervall bättre. Observationer inom haltintervall B representerar delavrinningsområden som är påverkade av olika former av diffusa källor och punktkällor, medan haltintervall C representerar områden med påverkan från pågående och historisk gruvverksamhet.

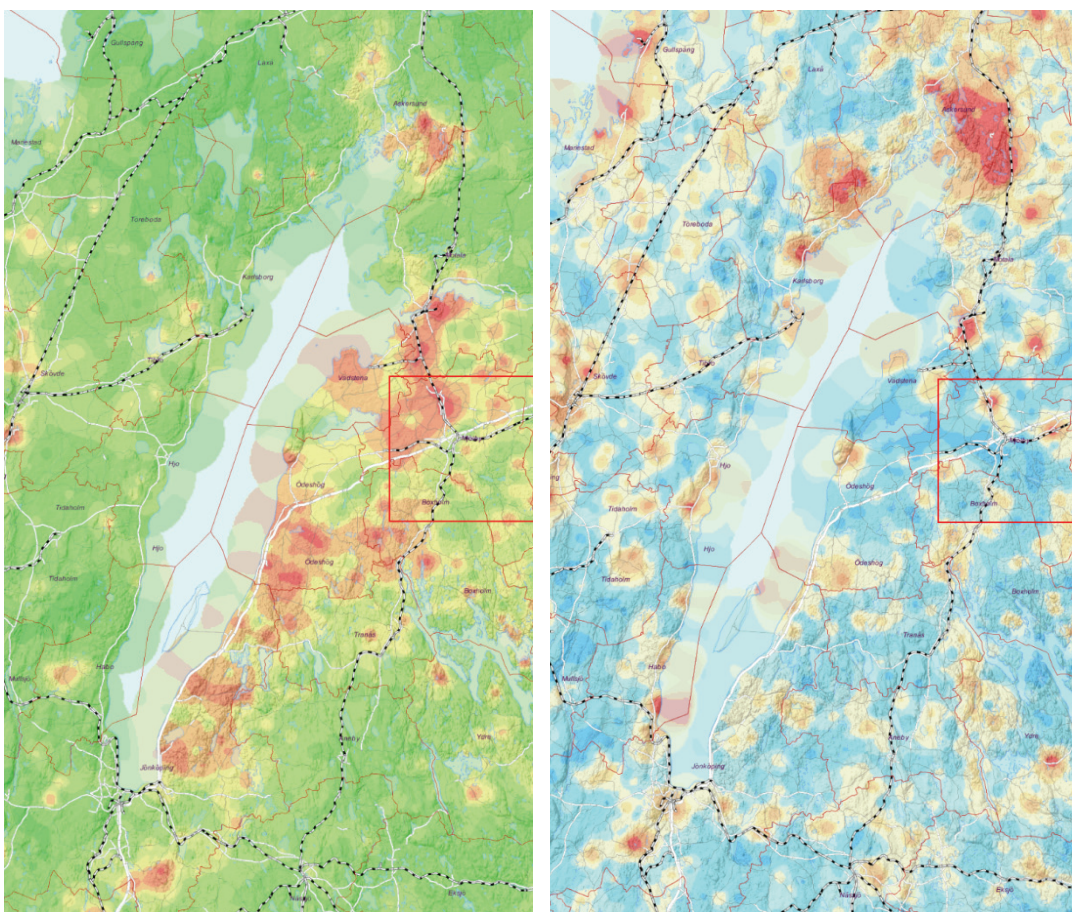
I bilaga B7 återfinns motsvarande kalibreringsfigurer för samtliga modellerade metaller och från dessa figurer kan det konstateras att modellens förmåga att reproducera variationen inom Vätterns tillrinningsområde varierar stort mellan olika metaller.



Figur 21. Jämförelse mellan modellerade zinkhalter (x-axeln) och tre olika kategorier av observerade halter (y-axeln). Röda punkter representerar observationer i vattendrag med hög representativitet, blå punkter osäkrare data för vattendrag och grå punkter medelvärden för sjöar med varierande representativitet för delavrinningsområdets utflödespunkt. Siffrorna representerar delavrinningsområdets löpnummer, se bilaga B7 och den blå linjen 1:1-linjen där modellerade och observerade data överensstämmer perfekt. De tre inringade områdena A, B, och C representerar olika haltintervall (se text). Observera at skalorna på axlarna är logaritmiska för att den stora spännvidden i halter skall bli lättare att tolka.

^x Dvs variationen i den naturliga zinkhalten som beror på lokala förutsättningar som halt i jord och berggrund.

^y SGU står för Sveriges geologiska undersökning.



Figur 22. Kartor från SGU^z över zinkhalt i morän (vänster) och zinkhalt i rötter hos vattenlevande växter (höger). Haltvariationerna i dessa kartor avspeglar variationer i naturlig bakgrund inom området (rött - höga halter, grönt respektive blått - låga halter).

Slutligen kan man konstatera att även de fall när observerade och modellerade halter inte stämmer överens kan utgöra viktig information. När modellens förutsägelser inte stämmer med den observerade verkligheten i enskilda punkter kan det vara en indikation på att det förekommer en för oss okänd källa eller sänka i ett delavrinningsområde. En okänd källa kan t.ex. vara ett förorenat markområde, en historisk deponi av gruvavfall eller slagg, eller andra liknande objekt (se avsnitt 5.4). Brist på överensstämmelse kan även bero på att modellen inte inkluderar viktiga faktorer bakom haltvariationerna i landskapet, och systematiken bakom dessa avvikelser kan ge ledtrådar till dessa faktorer.

Även andra oberoende underlag har använts för att validera modellen. Massbalansen för det konservativa^å ämnet klorid innehåller en modellskattning av tillförseln av klorid till landskapet från vägsalt. När denna skattning jämförs med statistik över faktisk vägsaltanvändning är överensstämmelsen mycket god (se faktaruta 8).

I modellen skattas sedimentationen av metaller i Vättern baserat på en generell retentionsmodell. När dessa uppgifter jämförs med en oberoende skattning baserad på haltmätningar i Vätterns sediment är överensstämmelsen god för många metaller (se faktaruta 9).

^z © Sveriges geologiska undersökning

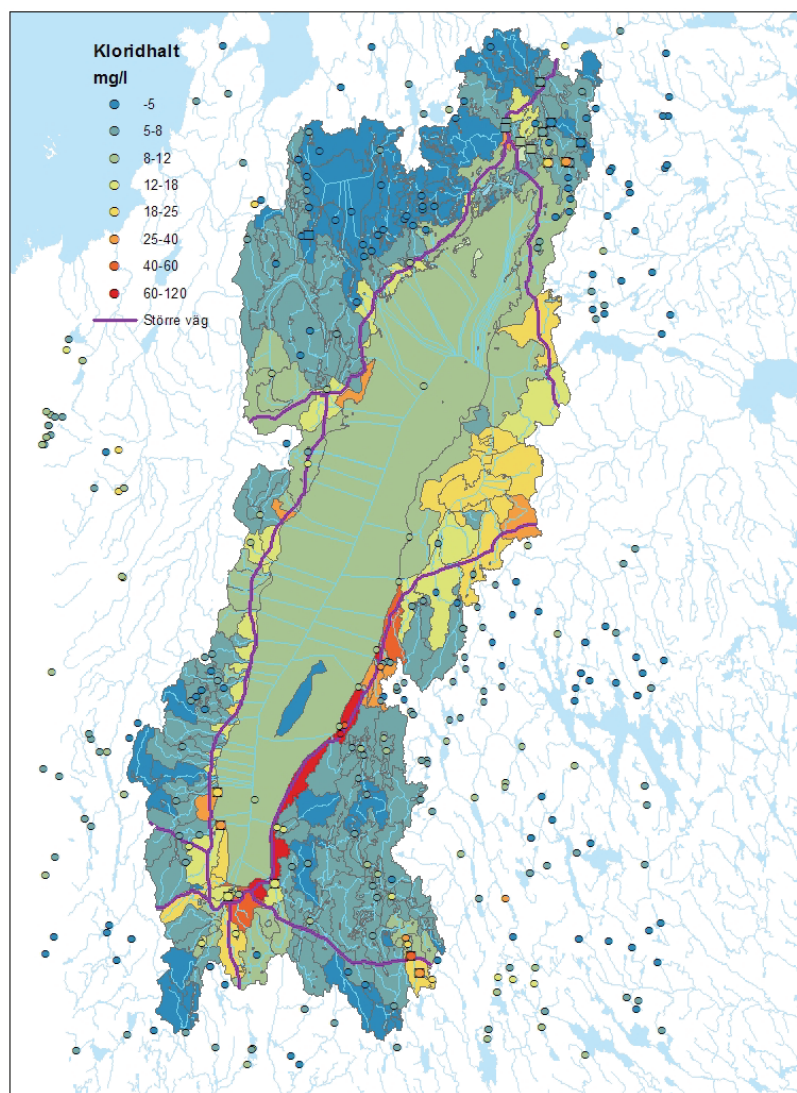
^å Med **konservativ** menas i detta fall att ämnet är beständigt och inte nämnvärt fastläggs i mark och sediment.

Faktaruta 8: Jämförelse mellan modelluppskattad mängd vägsalt och uppgifter om faktisk vägsaltanvändning.

Massbalansen för det konservativa ämnet klorid (kloridmodellen) utgör en möjlighet att undersöka hur väl modellen fungerar för ett ämne, som till skillnad från de flesta metallerna, inte påverkas av olika former av retentionsprocesser. Det betyder att all klorid som tillförs i en eller annan form till slut lämnar avrinningsområdet via Motala Ström.

Vid kalibreringen av kloridmodellen stod det tidigt klart att det finns betydande källor för klorid utöver depositionen av klorid av marint ursprung, till exempel användning av vägsalt. Baserat på uppgifter om vägsträckor, trafikintensiteter och en generell konstant som beskriver vägsaltanvändningen per km, år och trafikmängd, skattades den totala tillförseln av vägsalt per delavrinningsområde som krävs för att massbalansen ska gå ihop. När den sammanlagda mängden på 6700 ton/år från kategorierna vägar och tätort jämförs med den totala mängd som spreds inom Vätterns avrinningsområde under 2010-2012 enligt statistik från Trafikverket på 6600 ton/år, är överensstämmelsen slående.

I figuren nedan framgår de modellerade kloridhalterna i utflödespunkten av respektive delavrinningsområde som färgade fält. Dessa halter kan jämföras med observerade halter i vattendrag och sjöar som punkter färgade i samma skala. Den kalibrerade kloridmodellen används för att skatta mängderna metall som tillförs via spridningen av vägsalt. I figuren syns tydligt de större vägarnas påverkan, till exempel E4 vid Vätterns sydöstra strand.



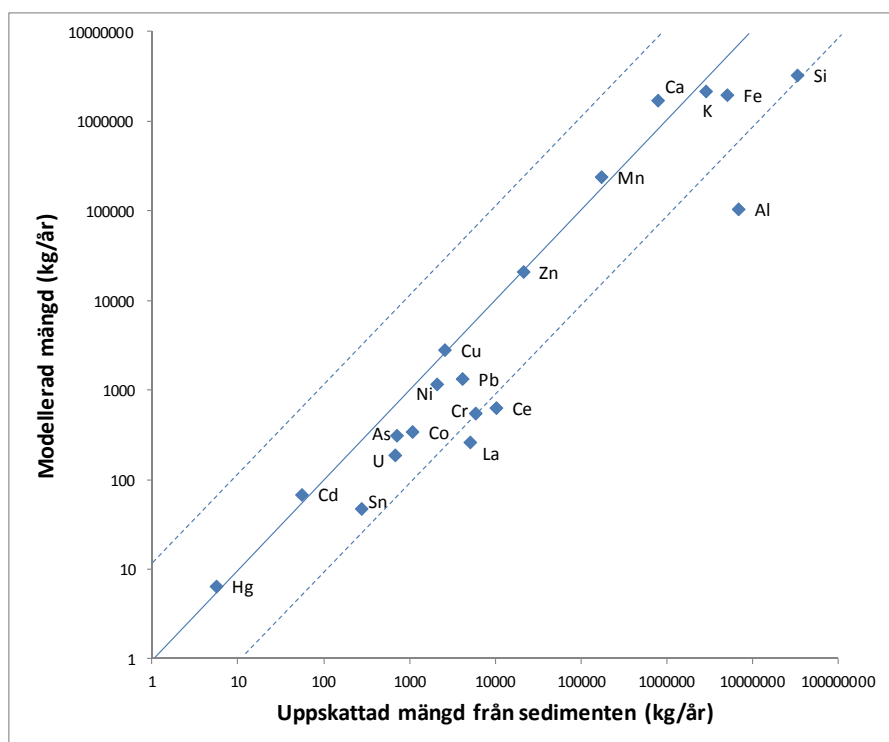
Faktaruta 9: Jämförelse av den årliga sedimentationen av metaller i Vättern beräknad med två olika metoder

I landskapsmodellen skattas fastläggningen i sjöarna med hjälp av en empirisk retentionsmodell som baseras på sjöns omsättningstid och en framkalibrerad generell konstant som beskriver sjunkhastigheten för de partiklar som metallerna är associerade till. Det innebär att fastläggningen i varje enskild sjö, inklusive Vättern, beräknas baserat på dess specifika geometriska och hydrauliska egenskaper samt en generell konstant specifik för varje metall (värdet på denna konstant varierar mellan olika metaller på grund av deras varierande egenskaper).

För Vättern har det också varit möjligt att göra en alternativ, oberoende skattning av fastläggningen av metaller baserat på totalhaltmätningar i sedimenten och uppgifter om areal ackumulationsbotten samt antaganden om genomsnittlig årlig sedimenttillväxt. Dessa uppgifter innehåller stora osäkerheter: endast tre aktuella haltmätningar finns tillgängliga representerande de ytliga sedimenten för de tre största ackumulationsbottarna, arealerna ackumulationsbotten är relativt grovt skattade och den exakta årliga sedimenttillväxten är dåligt känd.

Trots de stora osäkerheterna i flera av de underliggande parametrarna medger relativa jämförelser mellan dessa båda sedimentationsskattningar att det går att dra en mängd intressanta slutsatser. I figuren nedan jämförs den totala fastläggningen i Vättern för en rad metaller skattade med de två oberoende metoderna. För flera metaller är överensstämmelsen mycket god mellan modellerade och observerade mängder som fastläggs i Vättern varje år: Hg, Cd, Ni, Cu, Zn, Mn, Ca och K. För övriga metaller är den observerade mängden större än den modellerade, i flera fall upp till 10 gånger större, till exempel för Si, (Fe), (U), Al, Ce, La och Cr. Dessa ämnen ingår allmänt i bergartsbildande mineral och en trolig förklaring till diskrepansen mellan skattningarna är att dessa ämnen omfördelas internt i sjön till följd av erosionsprocesser. Intressanta är också avvikelserna för bly (Pb) och tenn (Sn): för bly utgör skillnaden mellan skattningarna cirka 3 ton per år, vilket teoretiskt skulle kunna förklaras av en omfördelning internt i sjön av bly från historiska utsläpp. För tenn skulle skillnaden på cirka 200 kg/år kanske kunna förklaras av en intern källa i sjön, exempelvis båtbottnfärger. Höga halter av tennorganiska föreningar har också uppmätts i flera hamnar runt sjön (Måns Lindell, pers. kom.).

Sammantaget visar jämförelsen att de båda oberoende sedimentationsskattningarna överensstämmer väl, vilket styrker den modellberäknade fastläggningen i sjöarna som ingår i metallbudgetarna i nästa kapitel. Se vidare bilaga B7, avsnitt 7.4.



5.3 Metallernas fördelningsmönster på landskapsnivå

I det här avsnittet sammanfattas de viktigaste resultaten från Metallbalansmodellen. Fokus ligger på att beskriva de stora mönstren för olika grupper av metaller avseende källor och sänkor i Vätterns avrinningsområde som helhet. Skillnaderna mellan metallerna avspeglar deras olika egenskaper, användning och ursprung. Ingen hänsyn har i denna beskrivning tagits till metallernas respektive "miljöfarlighet", utan så många metaller som möjligt har tagits med som stödande information.

Den mest kondenserade beskrivningen av resultaten från Metallbalansmodellen är den relativa fördelningen av källor och sänkor i Vätterns avrinningsområde som visas i Figur 23. Denna figur tydliggör de relativa skillnaderna mellan metallerna med avseende på några olika kategorier källor och sänkor oberoende av de totala metallmängderna som är i omlopp.

I den vänstra halvan av figuren visas fördelningen mellan de olika källkategorierna punktkällor, deposition på land, deposition på sjö, tätort och väg, vittring, samt okända källor (se föregående kapitel för detaljerade beskrivningar av dessa källor). **Punktkällorna** omfattar kända utsläpp från avloppsreningsverk, deponier, gruvverksamhet, industrier och skjutning av ammunition (Vättern) direkt till vattenrecipienterna. **Depositionen** via nederbörden fördelas mellan land och sjö i relation till land- respektive sjöareal. Kategorin **tätort och väg** representerar den diffusa tillförseln av metaller från trafik och tätorter. Kategorin **vittring** representerar nettotillförseln av metaller från vittring av naturligt förekommande mineral i mark. Den sista kategorin **okända källor** representerar de källor som lagts till manuellt för de delavrinningsområden där metallbalanserna inte går ihop^ä.

I den högra halvan visas fördelningen mellan de olika sänkorna retention mark, retention lokal, retention sjö och utflöde. **Retention mark** representerar fastläggningen i det terrestra systemet, dvs. upptag i växtlighet och fastläggning i markprofilen på land, av mängderna som tillförs via depositionen på mark. De **lokala retentionen** representerar fastläggningen i diken och våtmarker av de mängder som tillförs från källkategorier vägar och tätort^ö. **Retention sjö** representerar fastläggningen i sjösedimenten av de totala mängder som når sjön från samtliga källkategorier. **Utflödet** representerar uttransporten från Vättern via Motala Ström.

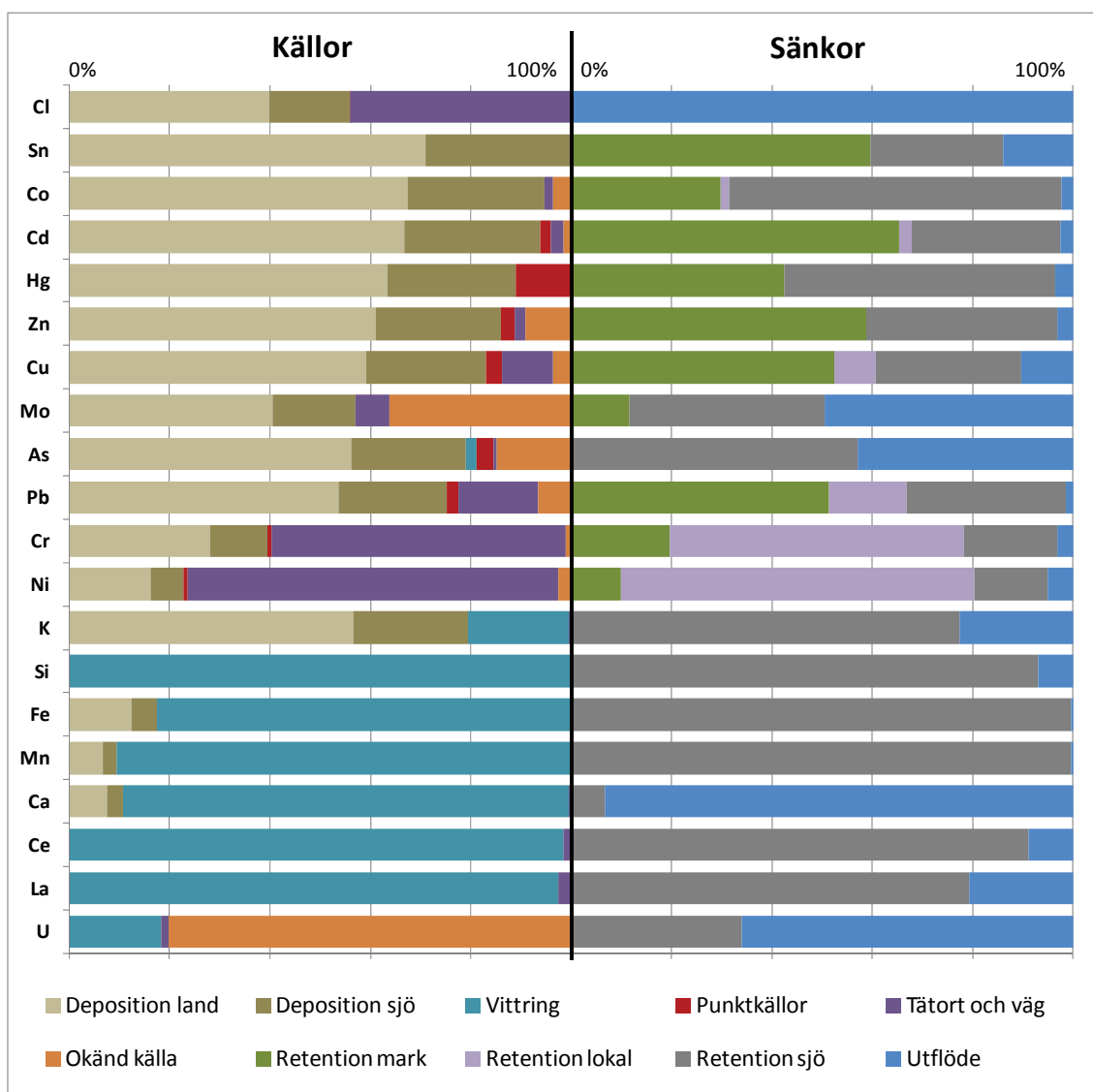
Metallerna i figuren har sorterats för att tydliggöra likheter i fördelningsmönster mellan olika metaller. När figuren tolkas kan det vara bra att hålla i minnet att till följd av Metallbalansmodellens uppbyggnad balanseras källan *deposition mark* (ljus beige) i varierande grad av sänkan *retention mark* (grön). Källan *tätort och väg* balanseras av sänkan *retention lokal*. Övriga källor och sänkor är oberoende av varandra i modellen.

I punktlistan nedan diskuteras de övergripande mönster som kan utläsas från Figur 24. Det bör påpekas att osäkerheterna i figuren varierar mycket mellan olika metaller beroende på att dataunderlagen varierar i omfattning och att vissa metaller till sin natur är svårare att

^ä Vid kalibreringen av modellen jämförs modellerade mot observerade halter i delavrinningsområdenas utströmningspunkter. När stora avvikelser syns för ett delavrinningsområde kan det vara en indikation på en okänd källa inom eller uppströms området. Om avvikelserna fortplantas nedströms via vattensystemet styrker det slutsatsen om okänd källa. Okända källor har lagts till i de fall där det inte finns någon annan rimlig förklaring till avvikelserna. Se bilaga B7 för överväganden i varje enskilt fall.

^ö Metaller som tillförs via deposition till markerna och som fastläggs i liknande miljöer, dvs. mindre bäckar och naturliga våtmarker, hänförs per definition till kategorin fastläggning mark eftersom det inte går att särskilja de olika retentionsprocesserna.

kvantifiera korrekt. Minst osäker är bilden för de vanligen undersökta metallerna zink (Zn), bly (Pb), koppar (Cu) och kadmium (Cd), samt grundämnet klorid (Cl). Störst är osäkerheterna för de sällsynta jordartsmetallerna cerium (Ce) och lantan (La), följt av molybden (Mo) och tenn (Sn).



Figur 23. Den relativa fördelningen mellan källor och sänkor i Vätterns avrinningsområde. I den vänstra halvan av figuren visas fördelningen mellan de olika källkategorier deposition på land, deposition på sjö, vittring, punktkällor, tätort och väg, samt okända källor. I den högra halvan visas fördelningen mellan de olika sänkorna retention mark, retention lokal, retention sjö, samt utflöde. Ämnena har sorterats efter likhet mellan källornas inbördes storlek. Den övre raden i förklaringen avser källorna och den under sänkorna.

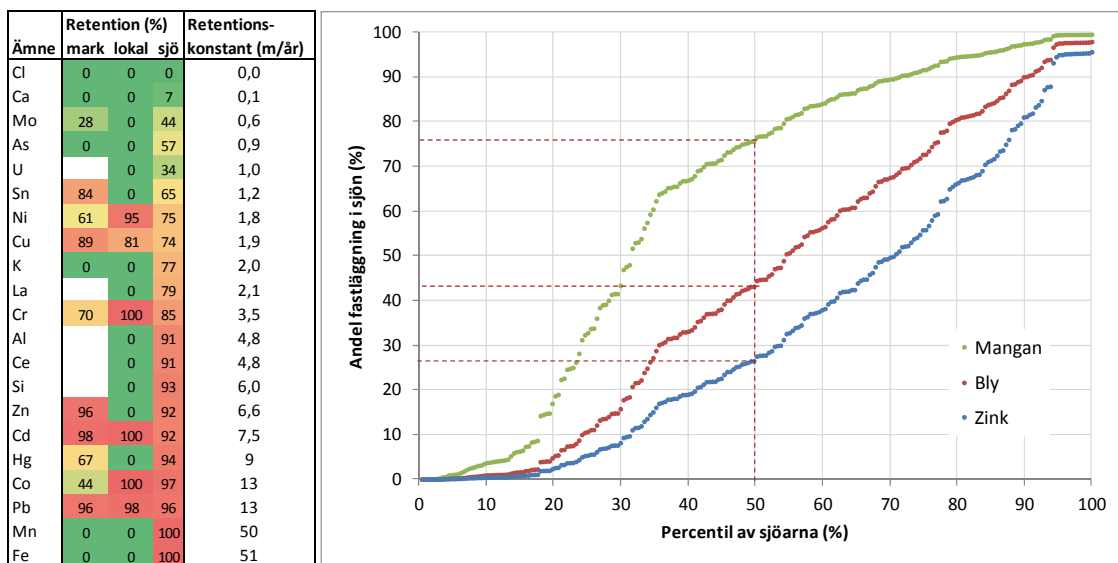
- För många metaller är depositionen via nederbörd den huvudsakliga källan i avrinningsområdet som helhet, till exempel för kvicksilver (Hg), kadmium (Cd), kobolt (Co), zink (Zn), koppar (Cu), bly (Pb), tenn (Sn) och arsenik (As). Dessa metaller har i regel sitt ursprung långt borta, ofta från förbränning av fossila bränslen. Några ämnen uppvisar, kanske missvisande, en stor andel tillförsel via deposition, trots att de sannolikt främst borde härröra från vittring i mark, som exempelvis kalcium (Ca) (jfr bilaga B2).

- Andra metaller har sitt främsta ursprung i vittring^{aa} där metallerna frisätts från lokalt förekommande mineral, till exempel kalcium (Ca), kisel (Si), järn (Fe), mangan (Mn), lantan (La), cerium (Ce). De okända källorna för uran (U) och molybden (Mo) representerar den extra tillförseln från vittring av sedimentära bergarter öster om Vättern (alunskiffer).
- Några ämnen som tillförs via deposition har marint ursprung, dvs de har sitt ursprung i salt från havet. Exempel på sådana ämnen är klorid (Cl) och kalium (K). K tillförs även från vittring av exempelvis mineral som fältspat (den tillförda mängden K via deposition räcker inte för att förklara de mängder som uppkommer i vattendragen). Fastläggningen för K är betydande i det limniska systemet (K är ett essentiellt näringsämne som tas upp av växter), medan Cl inte fastläggs alls utan lämnar systemet via utflödet.
- Sett till hela avrinningsområdet utgör metalltillförseln från punktkällor endast en liten del av samtliga källor. Störst är andelen för kvicksilver (Hg) och arsenik (As), följt av zink (Zn), koppar (Cu), bly (Pb) och kadmium (Cd). Om fokus istället läggs på de mängder som verkligen når vattenrecipienterna blir punktkällornas andel större, men de är i samtliga fall betydligt mindre än tillförseln via depositionen på sjöytan. Högst är denna andel för Hg där utsläppen från punktkällor uppgår till cirka 25% av depositionen på sjöytorna.
- De okända källorna representerar för de flesta metallerna främst diffus tillförsel från historiskt gruvavfall i området kring sjön Alsen, Kärrafjärden och Zinkgruvan, strax norr om Vättern. Tillförseln från dessa historiska källor är betydligt större än dagens utsläpp från punktkällor (däribland Zinkgruvan). Detta utreds närmare i avsnitten som beskriver detaljerade metallbudgetar för dessa områden.
- Metaller tillförs landskapet från vägtrafik, genom framför allt slitage av vägbeläggning, däck och bromsar, och från tätorter via dagvatten från olika hårdgjorda ytor. Den relativa betydelsen av emissionerna från dessa källor är störst för nickel (Ni), följt av krom (Cr), molybden (Mo), bly (Pb), koppar (Cu), kadmium (Cd) och zink (Zn). Flera av dessa metaller verkar dock nästan fullständigt fastläggas lokalt i diken och våtmarker, vilket innebär att de inte når vattendragen (stapeln för den lokala retentionen är i många fall nästan lika stor som stapeln för tätort och väg). Exempel på sådana metaller är krom (Cr) och nickel (Ni), och i mindre grad koppar (Cu) och bly (Pb).
- En mycket stor del av tillförseln via depositionen på land fastläggs i marken och når aldrig vattendrag och sjöar (stapeln för retention mark är nästan lika stor som stapeln för deposition mark). Detta innebär att det sker en gradvis ackumulation i markerna av till exempel bly (Pb), kadmium (Cd), kvicksilver (Hg), koppar (Cu), zink (Zn), tenn (Sn) och kobolt (Co). Denna ackumulation har fortgått under industrialiserad tid utan att i någon nämnvärd grad påverka ytvattens kvaliteten. Den dag en jämvikt eventuellt uppnås mellan tillförsel och utförsel från mark kan betydelsen av depositionen på mark förväntas öka för metallhalter i ytvatten.

^{aa} I landskapsmodellen skattas nettotillskottet från vittring som skillnaden mellan de mängder som återfinns i vattendragen och tillförseln via deposition. I verkligheten kan det dock vara så att det sker en samtidig vittring och tillförsel via deposition, men det går i modellen inte att separera dessa båda processer. Detta kan tolkas som att det sker omfördelningar inom det terrestra systemet vilket leder till att både vittringen och fastläggningen i mark underskattas i modellen.

- Metallerna fastläggs i varierande grad i det limniska systemet^{bb} och en mycket varierande andel lämnar därför avrinningsområdet. För t ämnena järn (Fe), mangan (Mn) och kisel (Si) gäller att i princip allt som tillförs sjöarna via vattendragen fastläggs i sjösedimenten. Metallerna kobolt (Co), kadmium (Cd), kvicksilver (Hg), koppar (Cu), zink (Zn), bly (Pb), krom (Cr) och nickel (Ni) fastläggs till största delen i sjösedimenten genom olika processer^{cc} i sjön. Även för uran (U) och de sällsynta jordartsmetallerna cerium (Ce) och lantan (La) fastläggs en relativt stor andel i sjöarna. Arsenik (As) och molybden (Mo) förefaller vara mer rörliga i det limniska systemet och en relativt sett större andel av dessa metaller lämnar sjöarna via utloppet. För kalcium (Ca) och klorid (Cl) är fastläggningen i sjöarna obefintlig.

I Metallbalansmodellen skattas fastläggningen av metaller i tre olika miljöer: mark, diken och våtmarker (lokal retention), samt sjöar. Dessa skattningar är väsentliga för modellens prediktionsförmåga och bidrar dessutom med generell information om hur metallerna beter sig i landskapet. I den infällda tabellen i Figur 24 framgår den procentuella fastläggningen i dessa olika miljöer, samt den generella retentionskonstanten som styr fastläggningen i sjöarna. Diagrammet i samma figur visar statistik över den procentuella fastläggningen i samtliga sjöar. I punktlistan nedan diskuteras dessa resultat för de tre miljöerna.



Figur 24. I den infällda tabellen redovisas den procentuella fastläggningen i mark, diken och våtmarker (lokal) samt sjöar för Vätterns avrinningsområde som helhet. Se punktlistan nedan för en beskrivning av vad siffrorna representerar. Retentionskonstanten som kalibrerats fram för retentionsmodellen för varje metall beskriver sjunkhastigheten i m/år för en hypotetisk partikel som respektive metall är associerad till. Ett högt värde på konstanten leder till att metallen i fråga snabbt "faller" ur sjöns vattenmassa. Diagrammet till höger beskriver statistik över andelen fastläggning för alla sjöar i Vätterns avrinningsområde för tre metaller, zink, bly och mangan. De streckade linjerna illustrerar fastläggningsgraden för 50-percentilen (medianen), vilket till exempel innebär att en vanlig sjö i området normalt har en fastläggningsgrad på 75% för mangan och cirka 25% för zink.

^{bb} Sjöars och vattendrags ekosystem.

^{cc} Vissa metaller som är starkt associerade till partiklar och organiskt material faller till botten och sedimenterar om uppehållstiden är tillräckligt lång, exempelvis Pb. En del metaller är essentiella näringsämnen som tas upp vid primärproduktion, exempelvis Zn. Andra ämnen liknar de essentiella ämnena och tas upp felaktigt, till exempel Cd.

- I mark är fastläggningsgraden mycket hög för flertalet metaller. I dessa fall krävs i modellen en fastläggning i det terrestra systemet för att förklara skillnaden mellan tillförda mängder via deposition och de mängder som återfinns i sjöar och vattendrag. I verkligheten kan det vara så att fastläggningsgraden egentligen är ännu högre om det samtidigt sker en intern tillförsel av metallen i fråga via vittring. För bly (Pb), kadmium (Cd) och zink (Zn) fastläggs i princip all metall som tillförs via nederbörden. Klorid uppvisar som väntat en låg fastläggningsgrad^{dd}.
- Den lokala retentionen i diken och våtmarker representerar den fastläggning som sker mellan vägbana, respektive dagvattenrör och första större vattendrag för metallemissioner från trafik och tätort. Om de generella emissionsciffrorna från litteraturen används i modellen utan reduktion via denna lokala retention leder det till orimligt höga metallhalter i vattendragen (se bilaga B4). Resultaten från modellen antyder att fastläggningen i dessa miljöer är betydande för metallemissioner från trafik och tätort. Osäkerheten är stor för dessa siffror, men resultaten tyder på att i storleksordningen 80-100% av de tillförda metallmängderna fastläggs i diken, vägrenar och våtmarker, innan de når de större vattenrecipienterna.
- Fastläggningen i sjöar sker genom att partiklar faller till botten och sedimenterar. På dessa partiklar, som kan vara av mineraliskt eller organiskt ursprung eller utgöras av organismer, sitter många metaller associerade och följer på så sätt partiklarna till botten. I Metallbalansmodellen kalibreras för varje metall en generell retentionskonstant^{ee} fram som beskriver fallhastigheten för dessa hypotetiska partiklar. Ett högt värde på konstanten leder till att partiklarna snabbt "faller" ut ur sjöns vattenmassa (till exempel mangan (Mn), järn (Fe), kobolt (Co) och bly (Pb), medan ett lågt värde betyder att de håller sig svävande länge^{ff} (till exempel arsenik (As) och molybden (Mo). Den sammanlagda fastläggningsgraden i sjöarna inom Vätterns hela avrinningsområde är betydande för många metaller. För Mn, Fe, Co och Pb fastläggs så mycket som 96-99% av de metallmängder som tillförs ytvattnen^{gg}. I en enskild sjö är dock fastläggningsgraden ibland betydligt lägre beroende på förutsättningarna för retention i den specifika sjön^{hh}. I diagrammet i Figur 24 visas den genomsnittliga fastläggningsgraden för alla enskilda sjöar inom Vätterns delavrinningsområde. I 50% av sjöarna är till exempel fastläggningsgraden för zink mellan 0-27% enligt den streckade linjen. För mangan är motsvarande siffra istället 0-76%. Orsaken till att den sammanlagda retentionen blir så stor sett till hela avrinningsområdet är att det sker retention i flera steg när vattenflödet successivt passerar flera sjöar, men framförallt för att fastläggningsgraden är hög i Vättern (88% för zink).

^{dd} Fastläggningsgraden borde egentligen vara noll för klorid om systemet är i jämvikt. En stor mängd klor finns inlagrad i växtlighet och jord så rent teoretiskt kan det ske en fastläggning av klorid men troligare är att avvikelser speglar osäkerheterna i de olika källskattningarna.

^{ee} Skillnaderna i konstanternas värden speglar sannolikt hur starkt associerad metallen i fråga är till partiklarna och vilken storlek de faktiska partiklarna har. Järn (Fe) och mangan (Mn) bildar partiklar i form av oxy-hydroxider som faller till botten. Bly (Pb) och kobolt (Co) binder starkt till organiskt material medan till exempel zink och koppar uppvisar svagare association. Molybden är i regel relativt lättlösligt på grund av dessa förmåga att bilda anjoner.

^{ff} Eller att metallen i fråga inte är särskilt starkt bunden till partiklar utan snarare löst.

^{gg} Här är alltså fastläggningen på land först borträknad

^{hh} Om till exempel omsättningstiden är kort hinner inte lika många partiklar sedimentera.

5.4 Hur kan Metallbalansmodellen resultat användas vidare?

För den som normalt inte jobbar med, eller tar del av, modelleringsarbeten, är det inte uppenbart vad en modell egentligen kan användas till, eller ens vara bra för (se faktaruta 10 nedan). Som framgått av redovisningen ovan har Metallbalansmodellen över Vätterns avrinningsområde i hög grad tillfört information på flera olika nivåer. Modellen har bidragit till:

- att ge en övergripande bild över vilka källor som bidrar med metaller till Vättern och dess avrinningsområde,
- att ge en allmän förståelse av hur metallerna beter sig på landskapsnivå, vilka som fastläggs och hur mycket, och vilka metaller som mer eller mindre passerar igenom vattensystemet,
- att skatta metalltillförseln till Vättern via vattendrag där vi saknar mätningar,
- att få fram så bra underlag som möjligt för att göra det möjligt att räkna fram metallbudgetar för Vättern och ytterligare fyra delområden (se nästa avsnitt),
- och att identifiera ”okända källor”.

Faktaruta 10: Metallbalansmodellen kan liknas vid ett ofullständigt pussel.

Metallbalansmodellen kan ses som ett pussel där en mängd olika typer av information överförs till pusselbitar som har förutsättningar att passa ihop. Med tillräckligt många bitar på plats framträder bilden trots att pusslet inte är komplett. I det ofullständiga pusslet går det också att få en uppfattning om hur bilden ser ut där bitar saknas baserat på informationen hos kringliggande bitar.

Utöver resultaten och tolkningarna som redovisas i denna rapport genererar landskapsmodellen en mängd information med hög detaljnivå som kan användas för vidare analyser. Nedan visas exempel på information som kan analyseras vidare för att ge en mer detaljerad bild av metallflöden i området eller för att besvara specifika frågeställningar.

Vid kalibreringen av landskapsmodellen kvantifieras ”okända källor” där det är troligt att skillnaden mellan observerade och modellerade halter orsakas av en okänd källa i delavrinningsområdet. I Tabell 7 redovisas samtliga okända källor som kvantifierats i modellerna och dessa mängder utgör således skattningar av den årliga tillförseln från dessa källor. I regel representerar de diffust läckage från olika former av historiskt gruvavfall, till exempel nedlagda gruvor, varphögar eller industrirester. Genom att införa eller intensifiera mätningar inom dessa utpekade delområden skulle man kunna verifiera och bättre kvantifiera, eller förkasta, de indikationer som hittills kommit fram.

- Merparten av de ”okända källorna” är lokaliserade till området kring Alsen och Kärrafjärden norr om Vättern (AROnr 262, 265, 288, 291, 292, 293, se figur 2 i bilaga B7 för delavrinningsområdenas lägen). Flera av dessa objekt diskuteras vidare i nästa kapitel som behandlar de detaljerade metallbudgetarna för Alsen och Kärrafjärden.
- Avrinningsområde 60 ligger strax uppströms Husqvarna (Lillån) och område 140 representerar Huskvarnaån. Det är oklart vilka verksamheter som kan ligga bakom källorna i detta område.
- Källorna för uran (U) som ligger i anslutning till området med sedimentär berggrund öster om Vättern (AROnr, 113, 175, 141, 208) representerar den naturliga tillförseln på grund av den förhöjda bakgrundshalten i detta område (bl.a. uranhaltig alunskiffer).
- Avrinningsområde 215 utgörs av sjön Viken som avvattnas via Bottensjön. Oklart vad källorna representerar, se budget för Bottensjön i kapitel 6.

Tabell 7. Sammanställning av de okända källor som kvantifierats i modellen (kg/år).

AROnr	AROIDSMHI	Beskrivning	As	Cd	Co	Cr	Cu	Ni	Pb	U	Zn
60	640777-141007	Huskvarnaån ovan Lillån	14	0,5		18	150	180	140		
113	646476-143305	Ålebäckens utlopp i Vättern								145	
175	645231-143106	Ornäsåns utlopp i Vättern								22	
140	640810-140863	Huskvarnaåns utlopp till Vättern	22		26	20					
141	642960-141850	Röttleåns utlopp i Vättern				12	130	70		73	
208	647974-144486	Mjölåns utlopp i Vättern	10						13	336	
215	649851-141764	Forsviksåns utlopp i Bottensjön	10						18		
262	652760-144905	Sjön Alsen och närområde	13	0,3			44		35		1080
265	652467-145300	Sjön Kärrafjärden och närområde	17	2,0			45		47		5180
288	652110-145570	Salaåns utlopp i Kärrafjärden		0,7				25			524
291	653478-145354	Skyllbergsåns utlopp i Åmmelången	7	0,1			27		8		60
292	652852-145656	Venaåns utlopp i Åmmelången	8	0,2	10		43		3		80
293	652671-145557	Sjön Åmmelången och närområde	10	0,9	1		12		170		880
Summa			111	4,7	37	50	451	275	434	576	7804

De detaljerade modellresultaten kan också redovisas per metall i olika former av kartor. I Figur 25 visas till exempel modellerade och observerade halter med färgskalor för vart och ett av de 308 delavrinningsområdena. De färgade områdena representerar de modellerade halterna i delavrinningsområdenas utflödespunkter. Dessa halter kan i sin tur jämföras med samtliga observerade halter i vattendrag och sjöar redovisade som punkterⁱⁱ. Informationen i kartorna kan till exempel stödja tolkningen av observerade data på detaljnivå. Avvikelser mellan modell och verklighet kan bero på att modellen inte beskriver bakgrundsvariationen korrekt^{jj}, eller att det faktiskt finns okända källor uppströms som inte inkluderats i modellen.

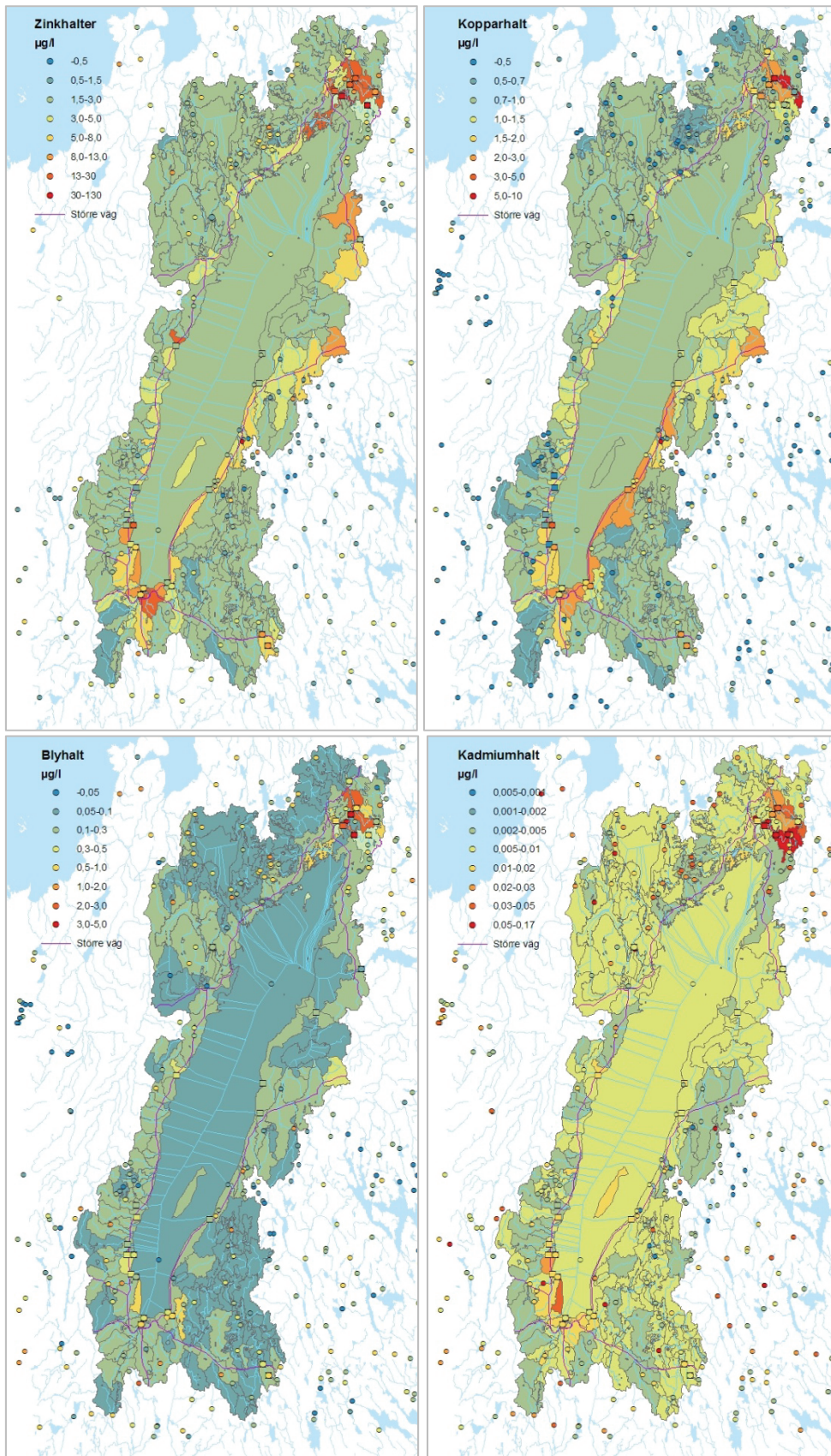
I Tabell 8 ges en alternativ redovisning av resultaten med fokus på hur de observerade halterna i sjöarna inom delavrinningsområdet^{kk} förhåller sig till de modellerade halterna i delavrinningsområdenas utflödespunkter. Denna jämförelse utnyttjar de geografiskt tätare haltmätningarna i sjöarna för att identifiera delavrinningsområden där det finns skillnader mellan observerade och modellerade halter. Det bör dock poängteras att jämförelsen innehåller osäkerheter eftersom vissa sjöar ligger långt från utflödespunkten högt upp i delavrinningsområdet, och därmed kan vara mindre jämförbara med utflödet. Eftersom de okända källorna i Tabell 7 ingår i de modellerade halterna representerar kvoterna i Tabell 8 avvikelserna från dessa "förhöjda" nivåer. I punktlistan nedan kommenteras några av de tydligaste mönstren och avvikelserna mellan modellerade halter i utflödespunkter och observerade halter i sjöar:

- I område 288 (i vilket Zinkgruvan ligger beläget) representerar sjöarna i tabellen opåverkade vatten med betydligt lägre halter än vattendraget som de jämförs med.
- Område 174, som här representeras av mätpunkten i den lilla Gyllingesjön är opåverkad av E4 nedströms, men utflödespunkten tillförs metaller från E4 i modellen.
- Blyhalterna i många sjöar är i regel markant högre än de halter som predikteras för vattendragen i modellen. Diskrepansen är särskilt stor i området kring Fagertjärn, vilket kan tyda på högre rörlighet för bly i dessa miljöer, t.ex. på grund av humus.

ⁱⁱ I kartorna är punkterna som representerar vattendragen mest jämförbara med de modellerade halterna. Observationerna i sjöarna är i varierande grad jämförbara eftersom de i ibland inte representerar utflödespunkten i delavrinningsområdet särskilt väl.

^{jj} Icke representativa mätdata kan förstås också leda till avvikelser, till exempel på grund av mätfel, få observationstillfällen etc.

^{kk} Det aritmetiska medelvärdet för samtliga sjöar inom delavrinningsområdet.



Figur 25. Exempel för zink (ö.v.), koppar (ö.h.), bly (u.v.) och kadmium (u.h) på kartor där modellerade halter (färgade delavrinningsområden) kan jämföras med uppmätta halter i vattendragen (stora cirklar och kvadrater), samt sjöar från några olika inverteringar (mindre punkter). Se de ämnesvisa redovisningarna i bilaga B7 för större versioner av dessa kartor.

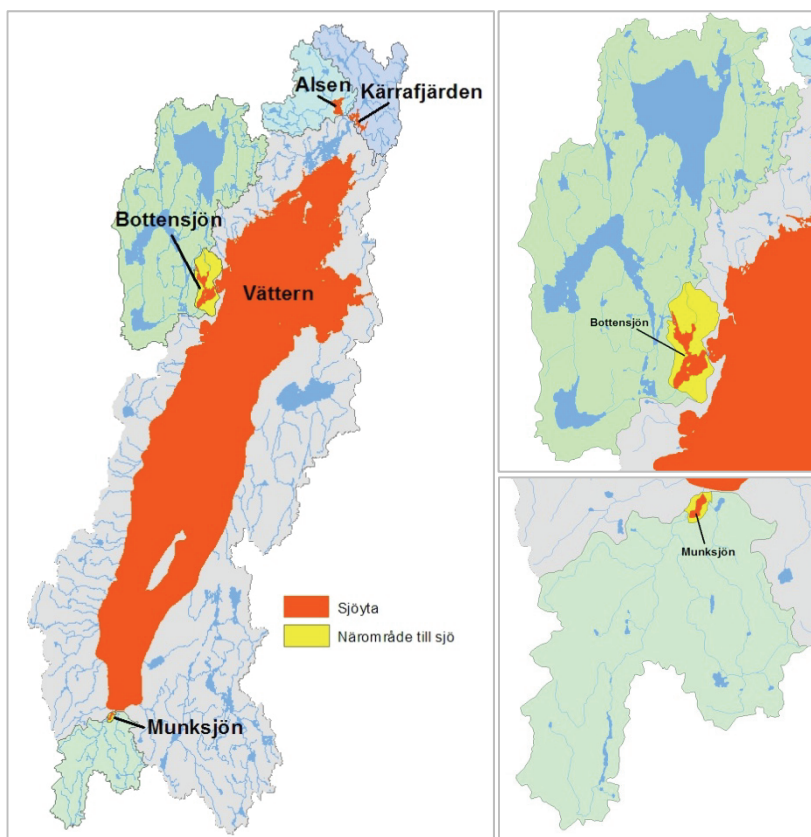
Tabell 8. Avvikelse mellan observerade halter i sjöar och modellerade halter i delavrinningsområdenas utflödespunkter. Röd färg betyder att observerade halter är högre än modellerade, blå det motsatta. Siffrorna representerar 10-logaritmen av kvoten mellan observerad och modellerad halt, vilket innebär att siffran 0,5 betyder att den observerade halten är cirka 3 gånger högre än den modellerade, 1 att skillnaden är 10 gånger. Siffrorna -0,5 och -1 betyder istället att den observerade halten är cirka 1/3, respektive 1/10 av den modellerade. Områdena är sorterade från norr till söder, nedåt i tabellen. Se figur 2 i bilaga B7 för en beskrivning av områdenas geografiska lägen (AROnr), samt de ämnesspecifika kartorna i samma bilaga för halter i enstaka sjöar (jfr Figur 25).

AROnr	AROIDSMHI	Beskrivning	As	Cd	Co	Cr	Cu	Ni	Pb	Zn
307	654022-144657	Inloppet i Östersjön	0.2	0.7	0.6	0.0	-0.2	0.3	0.7	0.3
298	653256-144414	Mynnar i Vättern	0.3	0.7	0.8	0.2	-0.2	0.2	0.9	0.5
304	653220-145660	Utloppet av Multen	0.1	0.6	0.5	0.1	-0.4	-0.1	0.8	0.4
294	653024-145038	Rinner till Vättern - Alsen	-0.1	0.1	0.9	0.0	-0.7	-0.4	0.6	0.4
262	652760-144905	Rinner till Vättern - Duvfjärden	x	0.7	x	x	x	x	-0.1	0.0
293	652671-145557	Utloppet av Åmmelången	x	0.3	x	x	x	x	0.0	-0.2
286	652489-145437	Rinner till Vättern - Kärrfjärden	0.4	0.0	0.7	0.1	-0.1	0.1	0.2	0.8
265	652467-145300	Rinner till Vättern - Duvfjärden	x	0.4	x	x	x	x	0.2	0.2
280	652344-141446	Utloppet av Abborrtjärnen	0.2	0.7	0.9	0.7	-0.4	0.1	1.2	0.2
288	652110-145570	Mynnar i Vättern	-0.5	-1.0	0.2	0.1	-0.3	-0.6	-1.3	-1.4
269	652053-142929	Inloppet i Unden	0.0	0.7	0.3	0.2	0.0	-0.2	0.6	0.3
236	652000-142183	Utloppet av Unden	0.3	0.8	1.1	0.5	-0.3	0.2	0.8	0.3
273	651948-143301	Utloppet av Bosjön	0.4	0.8	-0.4	0.5	-0.4	-0.3	1.3	0.8
238	651671-141446	Utloppet av Sänningen	0.0	0.7	0.3	0.4	-0.7	-0.4	0.9	-0.2
244	651599-143411	Ovan 651764-143632	0.1	0.8	0.7	0.2	-0.1	0.0	1.0	0.6
240	651597-143552	Utloppet av Fagertårn	-0.1	0.6	-0.1	0.0	-0.1	-0.1	x	0.4
266	651522-143158	Inloppet i Bosjön	0.1	0.9	0.4	0.3	-0.3	-0.1	0.9	0.8
148	651152-143744	Rinner till Rinner till 648861-144785	0.1	0.7	0.5	0.2	-0.4	-0.3	0.7	0.2
268	651059-142636	Mynnar i Unden	0.0	0.5	0.1	0.3	-0.2	-0.1	0.6	0.2
158	650990-145259	Rinner till Rinner till 648861-144785	0.2	0.6	0.5	0.2	0.0	-0.1	0.5	0.2
147	650951-143318	Mynnar i Vättern	-0.1	0.9	0.3	0.0	-0.4	-0.2	0.6	0.5
144	650846-143024	Mynnar i Vättern	-0.1	0.6	-0.2	0.0	-0.3	-0.4	0.4	-0.2
219	650843-141558	Inloppet i Viken	0.3	0.4	0.9	0.6	0.1	0.2	1.1	0.2
150	650543-142592	Mynnar i Vättern	0.4	1.0	0.9	0.5	0.0	0.2	1.2	0.6
223	650282-142271	Utloppet av Björklången	0.0	0.7	-0.1	0.2	0.1	-0.2	-0.1	-0.2
215	649851-141764	Utloppet av Viken	0.3	0.7	0.8	0.4	0.0	0.1	0.7	0.4
205	648813-141720	Utloppet av Kyrksjön	0.1	-0.4	-0.2	-0.7	-0.3	-0.3	-0.3	-0.9
214	648534-141065	Utloppet av Örlen	0.1	-0.4	-0.1	-0.2	-0.1	-0.3	-0.4	-0.9
136	647590-141573	Rinner till Rinner till 648861-144785	0.0	0.7	-0.3	0.0	-0.3	-0.4	0.4	-0.1
192	646864-140698	Utloppet av Mullsjön	0.1	0.2	0.1	0.0	0.0	0.0	0.6	-0.3
207	646588-142403	Rinner till Utloppet av Vättern	-0.1	0.1	0.1	0.0	0.0	0.2	0.0	0.3
134	646127-140694	Mynnar i Vättern	0.0	0.5	-0.3	-0.1	-0.7	-0.5	x	0.0
105	645157-143904	Utloppet av Bonderydssjön	-0.5	-0.3	-0.6	-0.7	-0.6	-0.6	0.0	-0.3
102	645011-143376	Utloppet av Visjön	0.0	-0.3	-0.4	-0.6	0.1	0.2	0.0	-0.3
160	644343-140566	Mynnar i Vättern	-0.3	0.3	-0.8	-0.5	-0.8	-0.9	0.1	-0.3
174	644283-142762	Mynnar i Vättern	0.1	0.3	-0.3	-0.3	-0.2	-0.6	-0.3	-1.1
100	644194-139923	Utloppet av Alvasjön	0.0	0.2	0.0	-0.2	-0.5	-0.2	0.5	-0.3
114	643998-140238	Mynnar i Vättern	0.1	-0.3	-1.2	-1.0	-0.7	-0.9	-0.4	-0.1
93	643577-139711	Mynnar i Svedån	-0.1	0.2	-0.4	-0.5	-0.7	-0.6	0.3	-0.4
94	643426-140043	Vid mätstation Sved	0.4	-0.3	-0.7	-0.4	-0.1	-0.2	0.5	-0.2
123	642861-139819	Mynnar i Vättern	0.0	0.4	-0.2	-0.1	-0.6	-0.3	1.0	0.2
83	642273-139660	Mynnar i Hökesån	0.2	0.6	0.1	0.1	0.0	0.0	0.9	0.2
78	641710-141213	Utloppet av Landsjön	0.3	0.6	0.3	-0.3	0.2	0.5	0.0	-0.4
180	641621-139683	Mynnar i Vättern	0.3	1.1	-0.1	0.1	-0.3	0.0	0.9	0.1
72	641561-142193	Mynnar i Motala Ström	0.2	0.1	0.1	0.0	0.2	0.3	0.8	-0.1
76	641235-139357	Utloppet av Domneådammen	0.3	0.5	0.1	0.1	-0.5	-0.3	0.9	0.2
63	641145-142701	Utloppet av Stora Nätaren	0.1	0.0	0.2	0.0	-0.1	0.1	0.3	-0.3
60	640777-141007	Ovan Lillån	0.0	0.9	0.5	0.1	0.1	0.2	-0.6	0.0
64	640531-142432	Mynnar i Stora Nätaren	0.2	-0.1	-0.2	-0.2	-0.1	0.0	0.6	-0.4
38	640503-141568	Mynnar i Motala Ström	0.1	0.7	0.3	0.1	0.0	0.5	0.8	0.6
43	639921-142446	Ovan 640315-142511	0.1	1.0	0.0	0.3	-0.1	0.2	0.6	0.4
46	639914-140156	Mynnar i Tabergsåån	-0.3	0.1	-0.5	-1.1	-0.6	-0.7	-0.4	-1.2
18	639900-143025	Utloppet av Ryssbysjön	0.2	0.6	0.4	0.6	0.2	0.4	0.9	0.4
16	639879-139771	Mynnar i Tabergsåån	0.1	0.2	-0.6	-0.6	-0.3	0.0	0.1	-0.5
15	639472-140502	Namn saknas	0.0	-0.2	-0.8	-0.6	-1.0	-1.1	1.0	-0.4
9	639402-142215	Mynnar i Stensjöån	0.3	0.5	-0.8	0.0	-0.4	-0.7	1.0	0.3
3	639027-142475	Utloppet av Kansjön	0.2	0.3	0.1	0.4	0.0	0.2	0.3	-0.3
8	638668-142826	Utloppet av Fredriksdalasjön	0.3	-0.4	-0.1	0.2	-0.2	0.1	0.3	-0.5

6 Metallbudgetar för Vättern och utvalda delområden – tillförsel, fastläggning och utflöde

Metallbudgetar, eller med ett annat ord metallbalanser, kan göras på många olika sätt. En budget kan avse ett helt avrinningsområde, dvs. både mark, vatten, tätort m.m., eller den kan avse skillnaden mellan tillförsel och utförsel för ett enskilt objekt, till exempel en sjö. I det här avsnittet redovisas **budgetar med fokus på enskilda sjöar** kompletterade med **bruttokällfördelningar för hela avrinningsområdet** uppströms respektive sjö för att ge en helhetsbild av alla källor och sänkor inom avrinningsområdet som påverkar sjön.

Metallbudgetar redovisas här för Vätterns huvudbassäng och för några sidobassänger/sjöar (se Figur 26). Vi har valt att beräkna metallbudgetar baserat på uppskattad deposition på sjöytorna, uppmätta utsläpp enligt tillgänglig utsläppskontroll, uppmätta eller skattade metalltransporter med vattendrag, och för de fall mätdata saknas, modellberäknad tillförsel och fastläggning. De indata som använts framgår mer i detalj av faktaruta 11 nedan. Observera bl.a. att alla punktutsläpp som inte sker direkt till Vätterns huvudbassäng utgör en del av metalltransporten med respektive tillrinnande vattendrag. För att få en uppfattning om dessa punktkällors bidrag måste man "gå vidare" till bruttokällfördelningen för avrinningsområdet^{II}. För två delområden, Munksjön och Bottensjön, ingår landområden i det aktuella objektet och dessa benämns "närområde" i budgetarna (närområdena är gulmarkerade i Figur 26).



Figur 26. Översiktsskarta som visar delavrinningsområdena för de utvalda sjöobjekten. Sjöytan i objektet är markerad i rött och i de fall ett närområde definierats är det markerat i gult.

^{II} Punktutsläpp som mynnar i till exempelvis Munksjön redovisas inte som punktutsläpp till Vätterns huvudbassäng, utan ingår i posten "tillförsel via vattendrag" i budgeten över Vättern.

I det här kapitlet redovisas budgetar för de metaller där dataunderlagen bedöms vara tillräckliga för att det skall vara meningsfullt att göra detaljerad budgetar: arsenik, kadmium, kobolt, krom, koppar, kvicksilver, nickel, bly och zink. Övriga ämnen där underlagen av olika skäl bedöms vara mindre säkra behandlas separat i kapitel 7, exempelvis molybden, lantan, uran, torium, mfl.

Följande specifika frågeställningar har vi försökt besvara med metallbudgetarna:

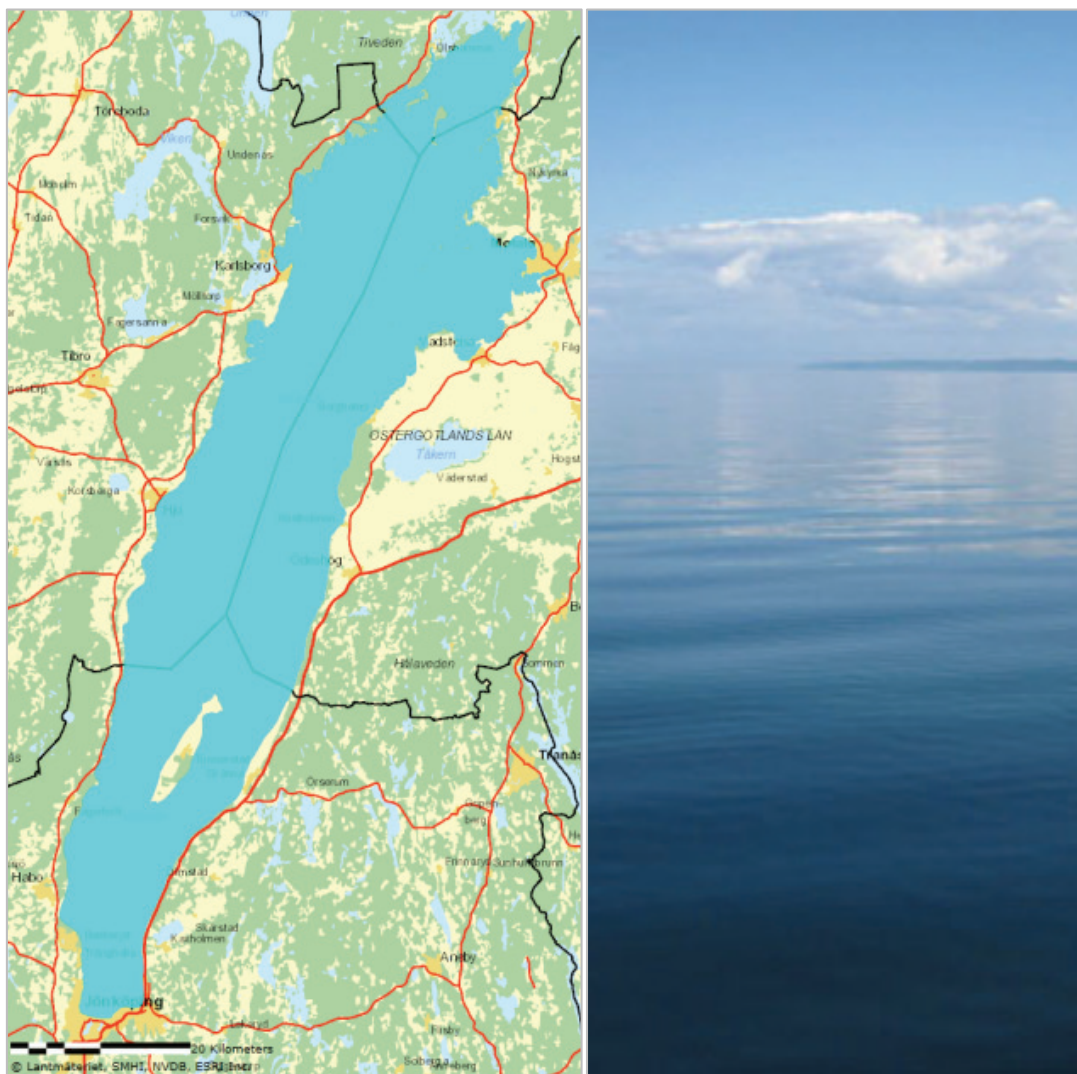
- Vilka källor dominerar och hur mycket fastläggs i sjön?
- Är budgetarna rimliga för alla metaller och går det att förklara att vissa metaller avviker?
- Kan vi förstå vad restposten representerar? Finns det andra skattningar eller uppgifter som stödjer storleken på denna i de fall den utgör okända källor?
- Om vi ser till hela avrinningsområdet, vilka källor dominerar då och vad händer med metallerna i det perspektivet?
- Hur ser den uppdaterade budgeten ut jämfört med tidigare rapporter? Kan skillnader förklaras av olika sätt att räkna, av nya data, eller av förändringar över tid?

Faktaruta 11: Indata som använts i metallbudgeterna för enskilda sjöar

- Tillförsel via vattendrag
 - Observerade transporter för vattendrag där vi har haltmätningar.
 - Modellerade transporter för vattendrag där haltmätningar saknas i utflödespunkterna till sjön.
 - Som jämförelse anges i de färgkodade fälten i tabellen de större vattendragens andelar av den totala tillförseln via vattendrag.
- Nettotillförsel från närområdet till sjön (Endast för Munksjön och Bottensjön – för övriga områden ingår denna tillförsel i posten "tillförsel via vattendrag").
 - Modellerad tillförsel som inkluderar källorna deposition på mark, vittring, vägar och trafik, dagvatten från de landområden som ingår i sjöns närområde (delavrinningsområdet kring sjön kan inkludera öar och kringliggande landområden).
 - Modellerad fastläggning i mark och/eller dike/våtmark (lokal retention).
 - Nettotillförseln från "deposition mark" beräknas som "deposition på mark" – "retention mark".
 - Nettotillförseln från vägar och tätort beräknas genom "dagvatten tätort" + "emissioner frånvägar och trafik" – "lokal retention".
 - I de färgkodade fälten i tabellen redovisas källornas andel av den sammanlagda nettotillförseln.
- Deposition på sjöytan
- Punktkällor med utsläpp direkt i sjön
 - I de fall en punktkälla ligger uppströms tillflödena till sjön ingår de i posten "tillförsel via vattendrag".
 - I de färgkodade fälten i tabellen anges hur stor andel av tillförseln som varje kategori punktkällor utgör av den totala tillförseln från punktkällor direkt till objektet.
- Fastläggning i sjöns bottensediment baserat på modellerad sedimentation från Metallbalansmodellen
 - För Vättern jämförs dessa siffror med en alternativ skattning som bygger på haltmätningar i sedimenten samt skattningar av arealen ackumulationsbotten, samt sedimentationshastighet (se faktaruta 9, samt bilaga B7).
 - Andelen fastläggning av summa tillförsel anges i det grå fältet i tabellen.
- Utlödet från avrinningsområdet baserat på antingen:
 - observerad transport när haltmätningar finns tillgängliga,
 - eller modellerad transport när mätningar saknas för utflödespunkten från objektet.
- Differensen mellan tillförsel och bortförsel för sjön samlas i en restpost, som utöver osäkerheter i underlagen kan ha en konkret innebörd som en okänd källa eller sänka.

6.1 Metallbudget för Vätterns huvudbassäng

Vätterns huvudbassäng avgränsas i denna metallbudget genom sin strandlinje och de större tillflödenas utflödespunkt i sjön (se Figur 27). Således inkluderas inte angränsande områden som exempelvis Aspfjärden, Lövsundsfjärden, Duvfjärden, Kärrafjärden, Alsen, Bottensjön eller Munksjön. För de fyra sista presenteras istället separata metallbudgetar i kommande avsnitt.



Figur 27. Utbredningsområde för Vätterns huvudbassäng, Storvättern (blåstrerad yta). Karta hämtad från VISS, Vatteninformationssystem Sverige. Vättern har vattenförekomstbeteckningen SE646703-142522.

I Tabell 10 redovisas metallbudgeten för Vätterns huvudbassäng för perioden 2010-2012. I Figur 28 åskådliggörs samma information istället som relativa andelar för att underlätta jämförelser mellan olika metaller. Dessa siffror kan vidare jämföras med bruttokälfördelningen för Vätterns hela avrinningsområde i Tabell 11 som summerar de totala mängder som tillförs och fastläggs i Vätterns hela avrinningsområde under samma tid.

Sammanlagt tillförs Vättern årligen närmare 25 ton zink (Zn), 4 ton koppar (Cu), och 1,5-2 ton av vardera nickel (Ni) och bly (Pb). Tillförseln av kadmium (Cd) uppgår till ca 80 kg/år, medan kvicksilvertillförseln (Hg) är mindre än 10 kg/år. Krom (Cr), kobolt, (Co) och arsenik (As) tillförs i mängder kring 400-700 kg/år.

Jämfört med mängder som redan finns i Vätterns vattenmassa och i de ytliga sedimenten utgör tillskotten per år olika stora andelar av de befintliga poolerna (Tabell 9). För arsenik (As), nickel (Ni), koppar (Cu) och krom (Cr) utgör tillförseln per år i storleksordningen 5-10 % av mängden i vattenmassan och några procent av mängden i de ytliga sedimenten (0,2 – 2,8 %). För kadmium (Cd) och zink (Zn) utgör tillförseln cirka 20 % av mängden i vattenmassan och 2 % av mängden i de ytliga sedimenten. För kvicksilver (Hg), kobolt (Co) och bly (Pb) utgör istället den tillförda mängden per år närmare hälften av mängden i vattenmassan och i regel mindre än en procent i de ytliga sedimenten. De stora skillnaderna mellan metallerna avspeglar deras olika egenskaper, dvs. om de framförallt förekommer i löst form eller om de är associerade till olika former av partiklar som sjunker till botten. Arsenik är ett exempel på det förre, och bly det senare. Bly är en metall som är starkt kopplad till partikulärt material i vattnet och därför snabbare transporteras till bottensedimenten än arsenik.

Tabell 9. Den årliga metalltillförseln till Vättern jämfört med den stående mängderna i vattenmassan och de ytliga sedimenten (se avsnitt 4.7 samt bilaga B2). Mängderna i sedimenten motsvarar metallinnehållet i de översta 6 cm, vilket i sin tur motsvarar cirka 60 års sedimentation.

Tillförselns andel av mängden i	As	Cd	Co	Cr	Cu	Hg	Ni	Pb	Zn
Vätterns vattenmassa (%)	5	21	45	12	9	34	5	47	17
Vätterns ytsediment (%)	1,5	2,4	0,6	0,2	2,8	2,4	1,4	0,6	1,9

Av den totala metalltillförseln till Vättern (Tabell 10) har bidraget via vattendrag betydelse för framför allt arsenik (ca 80 %) och nickel (ca 70 %). Tillförseln av bly denna väg utgör endast ca 25 % av den totala tillförseln. Depositionen på sjöytan svarar istället för den största andelen bly (ca 70 %), och i än högre grad kadmium (närmare 80 %). Även hälften eller mer av den totala tillförseln av zink, koppar, krom och kvicksilver kommer till sjön via luften från källor långt bort. Att metalltillförseln via deposition på sjöns yta är så betydande för flertalet metaller beror till stor del på att tillrinningsområdet har en liten yta i förhållande till Vätterns egen vattenyta. Nedfallet direkt på sjöytan får därmed stort genomslag jämfört med många andra sjöar. Samtidigt är punktkällornas bidrag relativt begränsat.

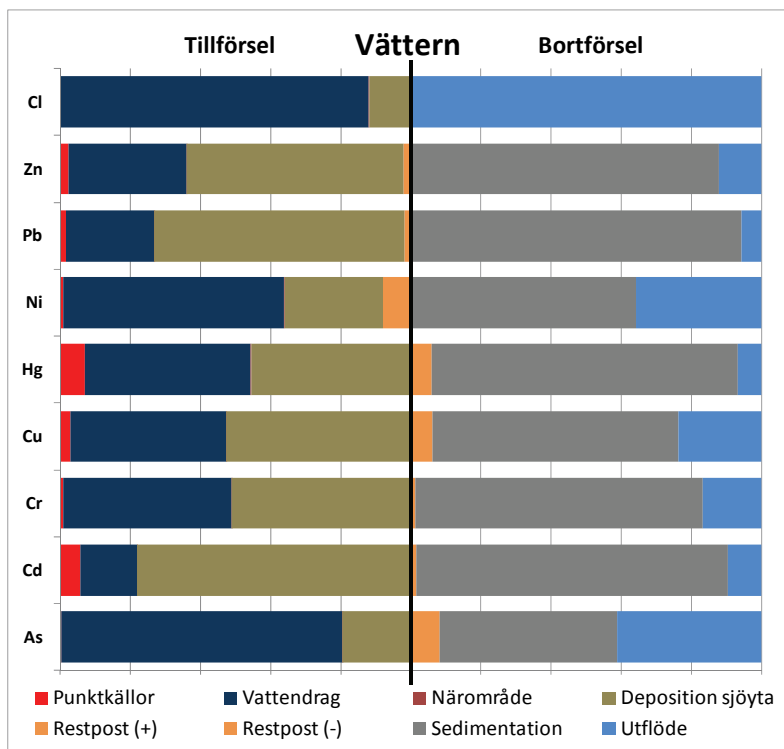
Tillförseln från punktkällor med direktutsläpp är således förhållandevis liten, och störst för kadmium (5 %). Det bör dock betonas att uppgifter i flera fall saknas om utsläppsmängder för flera av metallerna i den rapporterade utsläppskontrollen. Den låga tillförseln beror också på att flera av de stora punktkällorna, till exempel avloppsreningsverken i Jönköping, hänförs till andra bassänger än Vätterns vattenmassa och därmed istället ingår i tillförseln via vattendrag.

Av Tabell 10 kan vidare utläsas att huvuddelen av den tillförda metallmängden fastläggs i Vättern före utflödet i Motala ström. Fastläggningsgraden har för de här aktuella metallerna beräknats vara lägst för arsenik (ca 50 %) och högst för bly (98 %). Av tillfört kadmium, krom, kvicksilver och zink till sjön fastläggs mellan 80 och 90 %, medan fastläggningsgraden för koppar uppskattas till ca 70 %.

Sista raderna i Tabell 10 visar de restposter som uppstår i budgeten efter att uppmätt utflöde och beräknad sedimentation av metallerna subtraherats från tillförseln. Dessa restposter är mindre än 5 % för kadmium, kobolt, krom, bly, och zink, 6% för koppar, 8% för arsenik, samt 9% för nickel .

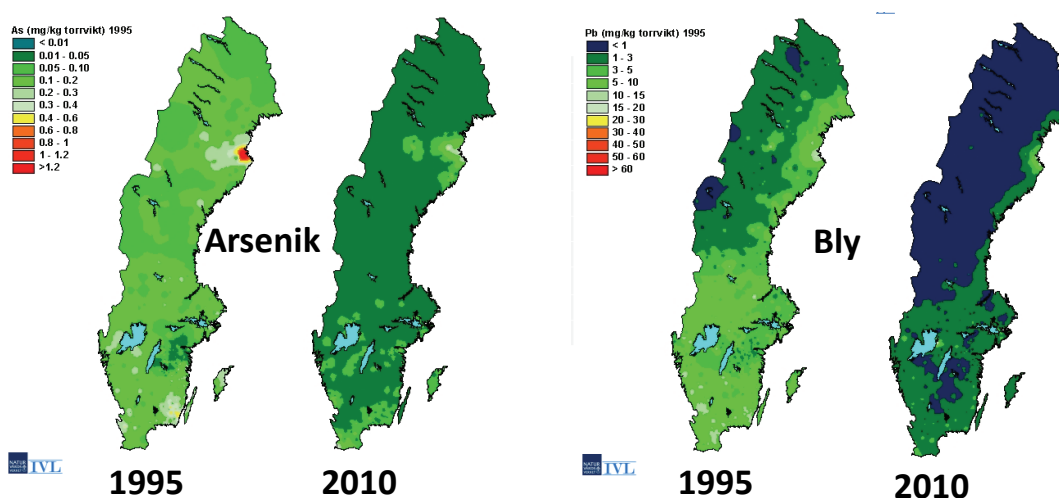
Tabell 10. Metallbudget för Vätterns huvudbassäng baserat på uppmätta och beräknade data för perioden 2010-2012. Grundämnenas kemiska beteckningar förklaras i faktaruta 2.

Budget för Vätterns huvudbassäng	As	Cd	Co	Cr	Cu	Hg	Ni	Pb	Zn
Tillförsel via vattendrag (kg/år)	521	13	188	341	1871	3,7	1213	376	8508
varav Huskvarnaån	20%	17%	29%	27%	20%	21%	26%	28%	8%
Forsviksån	13%	11%	6%	11%	11%	7%	6%	10%	4%
Mjölnaån	6%	4%	5%	3%	4%	2%	4%	5%	1%
Munksjöns utlopp	6%	5%	11%	7%	7%	8%	7%	8%	6%
Hammarsundet	21%	26%	5%	10%	16%	5%	9%	28%	58%
övriga vattendrag	33%	37%	46%	43%	42%	58%	48%	22%	24%
Tillförsel från punktkällor direkt till sjön (kg/år)	4,6	4,6	0	20,5	126	0,5	22	26	440
varav gruvindustri	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
skogsindustri	34%	93%	0%	68%	27%	13%	33%	46%	64%
övrig industri	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
kommunala ARV	66%	7%	0%	32%	64%	87%	67%	16%	36%
ammunition	0%	0%	0%	0%	10%	0%	0%	39%	0%
Deposition på sjöytan (kg/år)	126	63,1	201	365	2242	3,6	539	1076	15649
SUMMA TILLFÖRSEL (kg/år)	653	81	390	727	4240	7,8	1774	1478	24600
varav vattendrag (%)	80%	16%	48%	47%	44%	47%	68%	25%	35%
punktkällor (%)	1%	6%	0%	3%	3%	7%	1%	2%	2%
deposition (%)	19%	78%	52%	50%	53%	46%	30%	73%	64%
Sedimentation sjö (kg/år)	-331	-71,9	-363	-595	-2973	-6,8	-1238	-1419	-22015
andel fastläggning av tillförseln	51%	89%	93%	82%	70%	87%	70%	96%	89%
Utflöde från Vättern (kg/år)	-268	-7,8	-19	-120	-1013	-0,5	-691	-86	-3092
SUMMA UTFLODE & SEDIMENTATION (kg/år)	-599	-80	-383	-715	-3986	-7,3	-1929	-1505	-25107
RESTPOST (kg/år)	-54	-1,2	-7	-11	-254	-0,5	154	27	508
restpostens andel av tillförseln	-8%	-1%	-2%	-2%	-6%	-6%	9%	2%	2%



Figur 28. De olika källornas och sänkornas relativa andelar i metallbudgeten för Vätterns huvudbassäng. Restposten (orange) uppstår i budgeten som skillnaden mellan tillflöde, utflöde och sedimentation. Med restposten inräknad är därför summa tillförsel = summa bortförsel. Denna figur kompletterar Tabell 10 där de totala mängderna framgår.

Jämfört med motsvarande metallbudget som gjordes av Lindeström 1996² uppvisar denna uppdaterade budget en likartad bild. Metalltillförseln via vattendrag ligger i samma storleksordning som vid mitten av 1990-talet, men mängderna verkar ändå ha minskat något för flertalet metaller. Minskningen har förmodligen samband med både minskade utsläpp från punktkällor längs vattensystemen och minskat metallnedfall över tillrinningsområdet^{mm}. En betydande minskning uppvisar nämligen tillförseln via deposition för flera metaller. Under de drygt 15 år som gått har nedfallet över Vättern av bly, arsenik och kvicksilver minskat med 60-70 % enligt mätningar på Visingsö. Reduktionen ligger strax under 40 % för kadmium, medan skillnaden för övriga metaller kan anses, i detta sammanhang, ligga inom felmarginalen (+/- 20 %). Detta överensstämmer med den bild som de nationella mätningarna av metallnedfall genom mossanalys uppvisar (IVL¹³, Figur 29). Under samma period har också halterna i Vätterns vattenmassa minskat tydligt för zink och koppar, medan de faktiska haltförändringarna för övriga metaller är mindre entydiga (se avsnitt 4.7, samt bilaga B1).



Figur 29. Nedfall över Sverige av arsenik och bly år 1995 och 2010 enligt mossanalyser (IVL¹³).

Den övergripande metallbudget över Vätterns avrinningsområde, som vi benämner **bruttokällfördelning för hela avrinningsområdetⁿⁿ**, presenteras i Tabell 11 (se bilaga B7 för mängder). Av tabellen framgår att depositionen svarar för den helt dominerande tillförseln till avrinningsområdet av flertalet metaller. För de "vanliga" metallerna zink, bly, koppar och kadmium tillsammans med arsenik och kvicksilver utgör depositionen 75-95 % av den totala tillförseln. Av den sammanlagda depositionen är det dock nästan endast den som sker direkt på sjöytan som verkligen når Vättern, medan depositionen på land huvudsakligen fastläggs i markerna (retention i mark).

^{mm} Eftersom avgränsningarna för budgetarna definierats lite olika i denna och föregående studie från 1996 är inte de summerade siffrorna direkt jämförbara för punktkällorna. Jämförs specifika punktkällor i Tabell 3 mellan studierna finns det exempel både på ökade och minskade utsläpp. Utsläppen från ARV verkar dock generellt ha minskat.

ⁿⁿ Budgetberäkningarna per sjö kompletteras av en ytterligare typ av metallbudget, som vi valt att kalla **bruttokällfördelning för avrinningsområdet**, som har tagits fram för såväl hela Vätterns avrinningsområde som för de specialstuderade sjöarnas avrinningsområden. Denna sammanställning visar den totala fördelningen mellan källor respektive sänkor relativt avrinningsområdets utflödespunkt och ger till exempel svar på vilka typer av källor som ligger bakom de mängder som når sjön via vattendragen. Här tas alltså inte hänsyn till hur stor del av tillförseln uppströms som faktiskt når den aktuella sjön, utan det är bruttosiffrorna för samtliga källor och sänkor inom avrinningsområdet som redovisas. Till skillnad från budgetarna bygger källfördelningarna endast på modellerade data. I bilaga B7 redovisas de faktiska mängderna i motsvarande tabeller.

Tabell 11. Bruttokällfördelning för Vätterns hela avrinningsområde. Andelar av summa källor respektive summa sänkor för samtliga kategorier i hela avrinningsområdet inklusive Vättern.

Källfördelning Vätterns ARO		As	Cd	Co	Cr	Cu	Hg	Ni	Pb	Zn
Källor (% av källor)	gruvindustri	2	0	0	0	0	0	0	2	2
	skogsindustri	0	1	0	0	0	1	0	0	1
	övrig industri	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	kommunala ARV	2	0	0	1	3	10	1	0	1
	ammunition	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	vägar och trafik	0	2	1	58	10	0	74	16	1
	dagvatten, tätort	1	0	1	0	0	0	0	0	1
	okända källor	15	1	4	1	4	0	2	6	9
	vittring, netto	2	0	0	0	0	0	0	0	0
	deposition mark	56	67	67	28	59	63	16	54	61
deposition sjö	23	27	27	11	24	26	7	22	25	
Sänkor (% av sänkor)	retention i mark	0	65	30	20	52	42	10	51	59
	lokal retention	0	2	2	59	8	0	70	16	0
	retention i sjö	57	30	66	19	29	54	15	32	38
	utflöde	43	2	2	3	10	3	5	1	3

För nickel och krom är trafiken och vägarna den dominerande källan, men även dessa metaller fastläggs nästan helt innan de når sjön genom lokal fastläggning i diken och våtmarker (lokal retention).

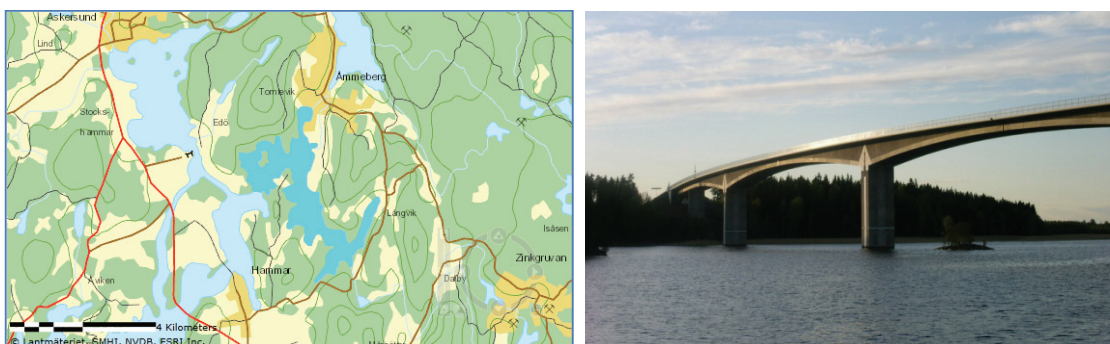
Arsenik avviker från övriga metaller i Tabell 11 genom att inte uppvisa någon fastläggning i mark enligt Metallbalansmodellen. Förklaringen är att arsenik också tillförs systemet genom vittring av arsenikhaltiga mineral i markerna utöver de mängder som tillförs via deposition. Modellen kan inte särskilja dessa båda processer, utan beräknar endast nettobidraget från markerna under antagandet att fastläggningen först blir noll innan någon nettovittring äger rum. I praktiken kan det vara så att samtidigt som den deponerade arseniken fastläggs i markerna, frigörs annan arsenik genom vittring, samt att det sker en intern omflyttning av arsenik inom det terrestra systemet.

I ”utflödet” visas slutligen vilka andelar av metallerna som passerar igenom systemet. För flertalet av de här presenterade metallerna når endast 5 % eller mindre utflödet Motala Ström. Koppar uppvisar en något större rörlighet, 8 %, medan arsenik avviker genom att över 40 % av tillförseln beräknas passera sjön.

Värt att notera är att nästan 500 kg bly och drygt 8 ton zink per år beräknas tillföras Vättern från källor som vi idag inte känner till eller åtminstone inte kan direkt kvantifiera (se Tabell 7). Dessa har i tabellen betecknats som ”okända källor”. Huvudparten av dessa har identifierats i metallbudgetar för enskilda delavrinningsområden i den fortsatta beskrivningen nedan.

6.2 Metallbudget för Kärrafjärden

På motsvarande sätt som för Vätterns huvudbassäng presenteras i Tabell 12 en metallbudget för Kärrafjärden, en angränsande fjärd norr om Vätterns huvudbassäng. Fjärden står i direkt förbindelse med Vättern via Hammarsundet och begränsas i övrigt av utflödena från Skyllbergsån och Salaån och mellanliggande strandpartier. Fjärdens utbredningsområde framgår av Figur 30.



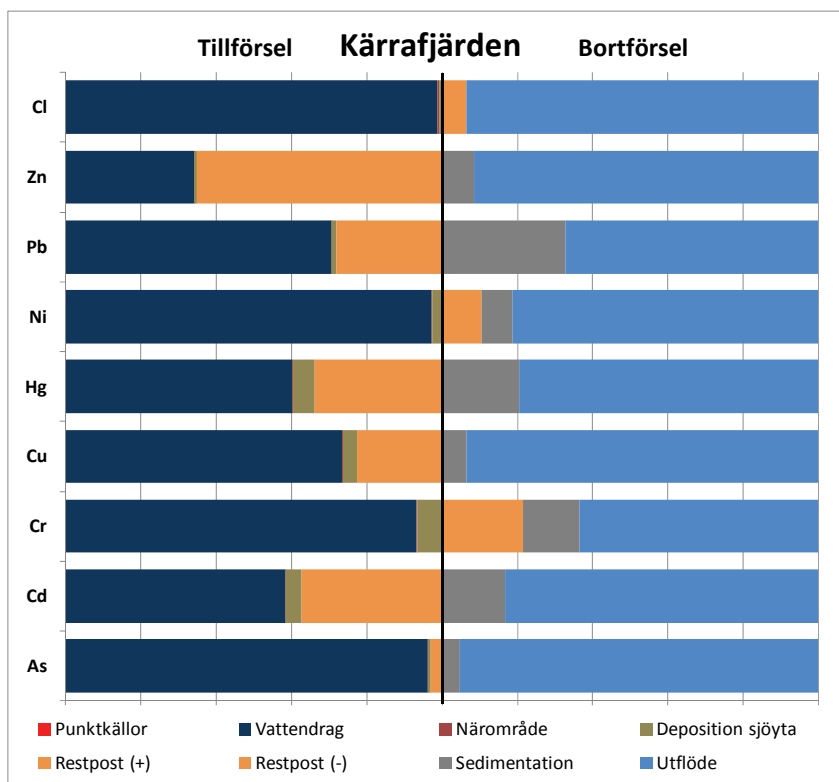
Figur 30. Kärrarfjärdens utbredningsområde (blå yta). Karta hämtad från VISS, Vatteninformationssystem Sverige. Fotot visar bron över Hammarsundet som avgränsar fjärden mot Vätterns huvudbassäng. Kärrarfjärden har vattenförekomstbeteckningen SE652418-145311.

Tabell 12. Metallbudget för Kärrarfjärden baserat på mätdata och modelldata för perioden 2010-2012. Grundämnenas kemiska beteckningar förklaras i faktaruta 2.

Budget för Kärrarfjärden	As	Cd	Co	Cr	Cu	Hg	Ni	Pb	Zn
Tillförsel via vattendrag (kg/år)	54	3,0	19	18	148	0,13	71	224	2712
varav Skyllbergsån	84%	52%	74%	82%	90%	78%	53%	82%	42%
Salaån	13%	47%	24%	13%	8%	18%	45%	18%	58%
övriga vattendrag	2%	1%	2%	4%	2%	4%	3%	0%	0%
Tillförsel från punktkällor direkt till sjön (kg/år)	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,00	0,0	0,0	0,0
Deposition på sjöytan (kg/år)	0,5	0,2	0,7	1,3	8,0	0,01	1,9	3,8	56
SUMMA TILLFÖRSEL (kg/år)	54	3,3	20,0	20	157	0,15	73	228	2768
varav vattendrag	99%	93%	96%	93%	95%	91%	97%	98%	98%
punktkällor	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
deposition	1%	7%	4%	7%	5%	9%	3%	2%	2%
Sedimentation sjö (kg/år)	-2,6	-0,9	-6,8	-3,0	-13	-0,04	-6,0	-104	-676
andel fastläggning av tillförseln	5%	27%	34%	15%	8%	31%	8%	46%	24%
Utflöde från fjärden (kg/år)	-53	-4,3	-6	-12	-189	-0,17	-59	-213	-7251
SUMMA UTFLÖDE & SEDIMENTATION (kg/år)	-56	-5,2	-12,4	-15	-202	-0,22	-65	-316	-7927
RESTPOST (kg/år)	1,7	1,9	-7,6	-4,2	45	0,07	-7,6	89	5159
restpostens andel av tillförseln	3%	60%	-38%	-21%	29%	51%	-10%	39%	186%

Beroende på att Kärrarfjärdens vattenyta är liten i förhållande till dess tillrinningsområde får depositionen på sjöytan liten betydelse för den samlade metalltillförseln (Tabell 12 och Figur 31). Istället är det tillförseln via vattendragen som är den helt dominerande källan för Kärrarfjärden. Till följd av ett större avrinningsområde och därmed ett högre vattenflöde är metalltransporten generellt sett större med Skyllbergsån än Salaån. För kadmium (Cd) och nickel (Ni) är dock skillnaden liten, och för zink (Zn) är transporten större med Salaån än Skyllbergsån, vilket i sin tur beror på att koncentrationen av dessa metaller är högre i Salaån. Förklaringen till de högre koncentrationerna i Salaån är en kombination av metallbidrag från pågående gruvverksamhet, historiska gruvavfall inom tillrinningsområdet, och den naturliga mineraliseringen av delar av området.

Metallbudgeten för Kärrarfjärden resulterar i en anmärkningsvärt stor restpost för flera metaller. När metallutflödet genom Hammarsundet jämförs med tillförseln och den uppskattade sedimentationen i fjärden "fattas" ungefär 2 kg kadmium, 45 kg koppar, 90 kg bly (Pb) och 5 ton zink (se Tabell 9 och Figur 21). Omräknat i procent av den kända samlade tillförseln motsvarar detta ca 60, 30, 40 respektive 180 %. Sannolikt är det de historiska gruvavfallen i och i nära anslutning till Kärrarfjärden som utgör denna diffusa metallkälla.



Figur 31. De olika källornas och sänkornas relativa andelar i metallbudgeten för Kärrafjärden. Restposten (orange) uppstår i budgeten som skillnaden mellan tillflöde, utflöde och sedimentation. Med restposten inräknad är därför summa tillförsel = summa bortförsel. Denna figur kompletterar Tabell 12 där de totala mängderna framgår.

För Kärrafjärden gjordes 1996 en förenklad metallbudget som omfattade kadmium, bly och zink (Lindeström2). Jämfört med den har den samlade tillförseln till fjärden minskat av framför allt zink, och i mindre grad kadmium.

En orsak till denna minskning är att budgeten 1996 för Kärrafjärden även innehöll utflödet från sjön Alsen, medan vi i den föreliggande budgeten valt att särredovisa Alsen och Kärrafjärden. Samtidigt verkar det ha skett en reell minskning av den diffusa metalltillförseln till fjärden. För zink uppskattades den diffusa källan 1996 till ca 14 ton/år, medan den nu aktuella budgeten pekar på storleksordningen 5 ton/år, dvs en minskning med över 60 %. Kadmium uppvisar en ännu större reduktion, medan blytillförseln från denna källa endast har halverats.

Även med utgångspunkt från en bruttokällfördelning för Kärrafjärdens hela avrinningsområde enligt Tabell 13 utgör restposten den största enskilda källan för zink ("okända källor" i tabellen). Den diffusa zinktillförseln från de historiska gruvavfallen är således större än den samlade depositionen på mark och vatten inom avrinningsområdet. För alla övriga metaller är dock den totala metalltillförseln via deposition större enligt vår modellberäkning.

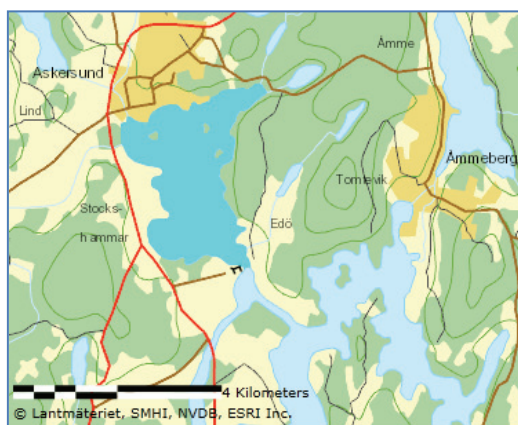
I övrigt kan kommenteras att metallbidraget från den pågående gruvverksamheten vid Zinkgruvan utgör 10-20 % av det totala tillskottet till avrinningsområdet av arsenik, kadmium, bly och zink (Tabell 13). I likhet med Vätterns huvudbassäng svarar vägar och trafik för ett betydande tillskott av nickel och krom. Slutligen finns skäl att än en gång påpeka att metallbudget och källfördelning i viss mån är ofullständig beroende på att data saknas för flera metaller och källor. Budgeten för krom bedöms exempelvis vara relativt osäker.

Tabell 13. Bruttokällfördelning för Kärrafjärdens hela avrinningsområde. Andelar av summa källor respektive summa sänkor för samtliga kategorier i hela avrinningsområdet inklusive fjärden.

Källfördelning Kärrafjärdens ARO		As	Cd	Co	Cr	Cu	Hg	Ni	Pb	Zn
Källor (% av källor)	gruvinindustri	15	4	0	0	1	0	0	20	11
	skogsindustri	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	övrig industri	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	kommunala ARV	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	ammunition	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	vägar och trafik	0	0	0	29	3	0	43	2	0
	dagvatten, tätort	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	okända källor	50	20	19	0	19	0	10	38	58
	vittring, netto	1	0	0	0	0	0	0	0	0
	deposition mark	31	69	74	65	71	92	44	37	28
deposition sjö	3	6	6	5	6	8	4	3	2	
Sänkor (% av sänkor)	retention i mark	0	68	33	46	63	62	27	36	27
	lokal retention	0	1	0	29	2	0	41	2	0
	retention i sjö	8	9	48	11	6	26	7	27	10
	utflöde	92	23	19	15	29	13	26	35	63

6.3 Metallbudget för sjön Alsen

Alsen utgör på samma sätt som Kärrafjärden en angränsande fjärd norr om huvudbassängen som står i direkt förbindelse med Vättern via Hammarsundet och begränsas i övrigt av utflödena från Dohnaforsån och Bronlaån och mellanliggande strandpartier. Fjärdens utbredningsområde framgår av Figur 32.

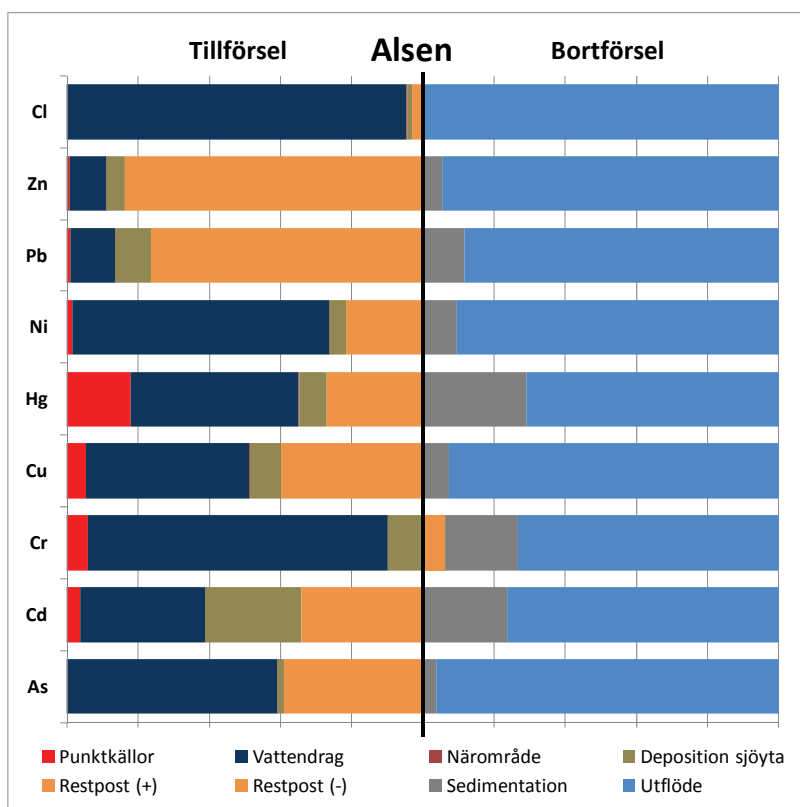


Figur 32. Sjön Alsens utbredningsområde (blå yta). Karta hämtad från VISS, Vatteninformationssystem. Fotot visar en vy över centrala Alsen. Alsen har vattenförekomstbeteckningen SE652745-144911. Foto: Länsstyrelsen i Örebro.

Av den kända metalltillförseln till Alsen svarar tillförseln via vattendrag för det största bidraget, minst 50 % (Figur 33). Men även direktdepositionen på sjöytan uppgår till 40-45 % för vissa metaller, såsom kadmium (Cd) och bly (Pb). Inga punktkällor har andelsmässigt någon betydelse som metallkälla, förutom för kvicksilver (Hg) från kommunens avloppsreningsverk. I absoluta mängder uppgår kvicksilverutsläppet från denna punktkälla dock endast till ca 0,03 kg/år.

Tabell 14. Metallbudget för sjön Alsen baserat på mät- och beräkningsdata för perioden 2010-2012. Grundämnenas kemiska beteckningar förklaras i faktaruta 2.

Budget för sjön Alsen	As	Cd	Co	Cr	Cu	Hg	Ni	Pb	Zn
Tillförsel via vattendrag (kg/år)	19	0,4	7	14	51	0,10	35	5,8	134
varav Dohnaforsån	44%	41%	48%	45%	41%	47%	38%	42%	37%
Bronaån	40%	41%	38%	40%	39%	38%	37%	39%	38%
övriga vattendrag	15%	18%	14%	15%	20%	15%	25%	18%	25%
Punktkällor till objekt (kg/år)	0,0	0,04	0,0	0,9	5,8	0,04	0,7	0,5	8,3
Deposition sjöyta (kg/år)	0,5	0,3	0,9	1,6	10	0,02	2,3	4,7	68
SUMMA TILLFÖRSEL (kg/år)	20	0,7	7,9	16	66	0,15	38	11	210
varav vattendrag	97%	53%	89%	84%	76%	65%	92%	53%	64%
punktkällor	0%	6%	0%	6%	9%	25%	2%	4%	4%
deposition	3%	41%	11%	10%	15%	10%	6%	43%	32%
Sedimentation sjö (kg/år)	-1,2	-0,2	-3,9	-3,3	-8	-0,06	-4,6	-5,4	-69
andel fastläggning av tillförseln	6%	36%	49%	20%	12%	40%	12%	49%	33%
Utflöde (kg/år)	-31	-0,8	-5	-12	-102	-0,14	-44	-41	-1217
SUMMA UTFLODE & SEDIMENTATION (kg/år)	-33	-1,0	-8,7	-15	-110	-0,20	-49	-46	-1286
RESTPOST (kg/år)	13	0,3	0,7	-1,0	44	0,056	10,4	35	1076
restpostens andel av tillförseln	64%	52%	9%	-6%	66%	37%	27%	323%	512%



Figur 33. De olika källornas och sänkornas relativa andelar i metallbudgeten för Alsen. Restposten (orange) uppstår i budgeten som skillnaden mellan tillflöde, utflöde och sedimentation. Med restposten inräknad är därför summa tillförsel = summa bortförsel. Denna figur kompletterar Tabell 14 där de totala mängderna framgår.

Värt att påpeka är att metallbudgeten för Alsen, liksom är fallet för Kärrafjärden, resulterar i en anmärkningsvärt stor restpost. Exempelvis "fattas" ca 1 ton zink (Zn) per år för att budgeten ska gå ihop. Detta innebär att det finns en eller flera okända källor som tillsammans svarar för över 500 % av den kända tillförseln av zink till sjön. För bly uppgår den okända källans andel till ca 320 % och för kadmium, koppar (Cu) och arsenik (As) 50-65 %. Källan mynnar antingen direkt till sjön, eller till något av de mindre vattendragen som inte provtas och analyseras. Metallerna ifråga är alla mer eller mindre vanliga i sulfidhaltiga mineral. Det ligger därför nära till hands att källan utgörs av något slags restmaterial från historisk gruvverksamhet. Kända, idag nedlagda, gruvor inom Alsens tillrinningsområde är bl.a. Londoriagruvan, Storgruvan och Läggestagruvan¹⁴. Dessa ligger ca 3 km norr om Askersund i höjd med Läggesta (se kända gruvobjekt i Figur 11).

Bruttokällfördelningen för Alsens hela avrinningsområde enligt Tabell 15 visar, liksom för övriga delavrinningsområden, att depositionen på mark och vatten dominerar som källa i ett totalperspektiv. Endast för nickel (Ni) utgör vägar och trafik en större totalkälla för avrinningsområdet än depositionen. Den "okända" källan svarar för runt 80 % av den totala tillförseln av zink och bly till delavrinningsområdet.

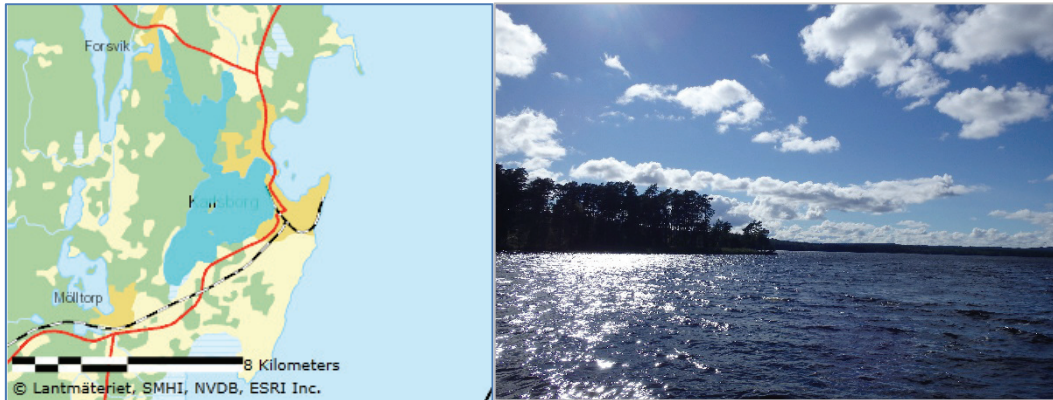
Tabell 15. Bruttokällfördelning för Alsens hela avrinningsområde. Andelar av summa källor respektive summa sänkor för samtliga kategorier i hela avrinningsområdet inklusive sjön.

Källfördelning Alsens ARO		As	Cd	Co	Cr	Cu	Hg	Ni	Pb	Zn
Källor (% av källor)	gruvinindustri	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	skogsindustri	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	övrig industri	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	kommunala ARV	0	0	0	1	1	6	0	0	0
	ammunition	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	vägar och trafik	0	1	0	41	5	0	60	8	1
	dagvatten, tätort	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	okända källor	37	3	0	0	10	0	0	15	28
	vittring, netto	2	0	0	0	0	0	0	0	0
	deposition mark	56	88	91	53	77	86	36	71	65
	deposition sjö	5	8	8	5	7	8	3	6	6
	Sänkor (% av sänkor)	retention i mark	0	86	40	37	68	58	22	68
lokal retention		0	1	1	41	4	0	58	8	0
retention i sjö		11	6	47	10	5	28	6	7	6
utflöde		89	6	12	12	22	14	14	17	32

6.4 Metallbudget för Bottensjön

Bottensjön är en fjärd som ligger i direkt anslutning till Vätterns huvudbassäng i närheten av Karlsborg. Göta kanal passerar genom sjön på väg mot den stora sjön Viken via slussarna vid Forsvik. Forsviksån är det största tillflödet till Bottensjön. Landområdet närmast sjön räknas in i objektet varför tillförseln från detta särredovisas som "tillförsel från närområde" (se förstoring i Figur 26). Sjöns utbredningsområde och omgivningar framgår av Figur 34.

Metallbudgeten för Bottensjön är förhållandevis okomplicerad. Tillförseln via vattendrag (i praktiken Forsviksån) svarar för minst 60 % av den totala metalltillförseln till sjön, för flera metaller 80 % eller mer (Tabell 14 och Figur 35). Bland övriga källor svarar den direkta depositionen på vattenytan för ca 30 % av tillförseln av zink (Zn) och kadmium (Cd).

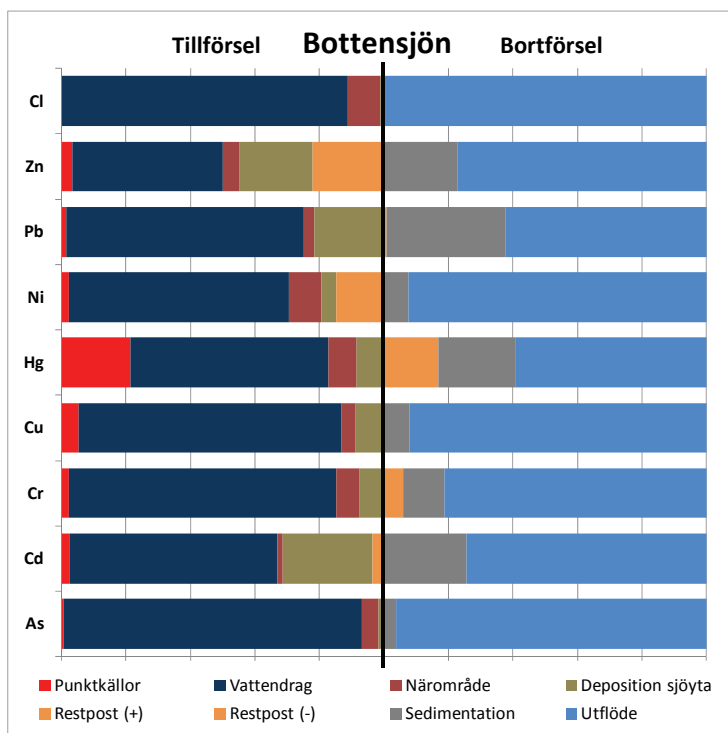


Figur 34. Bottensjöns utbredningsområde (blåstrerad yta). Karta hämtad från VISS, Vatteninformationssystem Sverige. Bottensjön har vattenförekomstbeteckningen SE649169-142433.

Tabell 16. Metallbudget för Bottensjön baserat på mät- och beräkningsdata för perioden 2010-2012. Grundämnenas kemiska beteckningar förklaras i faktaruta 2.

Budget för Bottensjön	As	Cd	Co	Cr	Cu	Hg	Ni	Pb	Zn
Tillförsel via vattendrag (kg/år)	70	1,4	11	39	205	0,3	77	36	316
varav Forsviksåån	98%	98%	95%	98%	98%	97%	95%	98%	94%
övriga vattendrag	2%	2%	5%	2%	2%	3%	5%	2%	6%
Tillförsel från närområde (kg/år)	4,0	0,0	3	3,3	11	0,04	11	1,6	35
varav deposition mark	95%	100%	100%	100%	72%	97%	56%	80%	48%
vittring	4%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
vägar & tätort	1%	0%	0%	0%	28%	3%	44%	20%	52%
Punktkällor till objekt (kg/år)	0,6	0,1	0,00	1,1	13,5	0,09	2,5	0,8	23,6
Deposition sjöyta (kg/år)	1,3	0,6	2	3,6	22	0,04	5,3	11	155
SUMMA TILLFÖRSEL (kg/år)	75	2,2	17	47	251	0,42	96	49	530
varav vattendrag	92%	67%	68%	83%	82%	61%	80%	74%	60%
närområde	5%	2%	20%	7%	4%	9%	12%	3%	7%
punktkällor	1%	3%	0%	2%	5%	21%	3%	2%	4%
deposition	2%	29%	12%	8%	9%	8%	6%	22%	29%
Sedimentation sjö (kg/år)	-2,9	-0,6	-6	-6,0	-20	-0,10	-8,7	-18	-156
andel fastläggning av tillförseln	4%	26%	37%	13%	8%	24%	9%	37%	29%
Utflöde (kg/år)	-72	-1,7	-11	-38	-232	-0,2	-104	-31	-524
SUMMA UTFLÖDE & SEDIMENTATION (kg/år)	-75	-2,2	-17	-44	-251	-0,35	-113	-49	-680
RESTPOST (kg/år)	-0,1	0,1	0	-2,8	0,1	-0,1	17	0	150
restpostens andel av tillförseln	0%	4%	1%	-6%	0%	-17%	17%	-1%	28%

En trolig förklaring till restpostens storlek och variation för olika metaller är att metallutflödet ur Bottensjön inte mäts utan baseras på modellerade data. Det gör att osäkerheter från uppströms liggande områden fortplantas och hamnar i budgeten för Bottensjön. På grund av de stora sjöarna uppströms Forsviksåån blir den modellerade uttransporten ur Bottensjön osäker eftersom endast små skillnader i retention i de stora sjöarna uppströms får stor inverkan. Det gäller bly (Pb) och kvicksilver (Hg) där det enligt tabellen förefaller finnas en okänd sänka. Sannolikt underskattas istället retentionen i de stora sjöarna uppströms Bottensjön, vilket slår igenom i budgeten för Bottensjön. För zink (Zn) och nickel (Ni) kan det antingen finnas okända källor uppströms som inte inkluderas i modellen, eller så överskattas retentionen av dessa ämnen i modeller i de uppströms liggande stora sjöarna. Eftersom det saknas observerade metallhalter i Bottensjön är det inte möjligt att säkert uttala sig om orsakerna till dessa avvikelser.



Figur 35. De olika källornas och sänkornas relativa andelar i metallbudgeten för Bottensjön. Restposten (orange) uppstår i budgeten som skillnaden mellan tillflöde, utflöde och sedimentation. Med restposten inräknad är därför summa tillförsel = summa bortförsel. Denna figur kompletterar Tabell 16 där de totala mängderna framgår.

Bruttokällfördelningen för Bottensjöns hela avrinningsområde visar, i likhet med övriga delavrinningsområden, att depositionen utgör den största källan sett till den totala metalltillförseln (Tabell 17). Vägar och trafik har betydelse för framför allt nickel och i mindre grad krom (Cr). Den detaljbudget för Bottensjön som gjordes 1996 (baserat på uppgifter från 1994-1995) visade på en metalltillförsel i samma storleksordning som 2010-2012.

Tabell 17. Bruttokällfördelning för Bottensjöns hela avrinningsområde. Andelar av summa källor respektive summa sänkor för samtliga kategorier i hela avrinningsområdet inklusive sjön.

Källfördelning Bottensjöns ARO		As	Cd	Co	Cr	Cu	Hg	Ni	Pb	Zn
Källor (% av källor)	gruvidustri	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	skogsindustri	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	övrig industri	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	kommunala ARV	1	0	0	0	1	3	0	0	0
	ammunition	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	vägar och trafik	0	0	0	24	2	0	41	4	0
	dagvatten, tätort	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	okända källor	9	0	0	0	0	0	0	2	0
	vittring, netto	3	0	0	0	0	0	0	0	0
	deposition mark	69	79	79	60	76	76	46	74	79
	deposition sjö	18	21	21	16	20	20	12	20	21
Sänkor (% av sänkor)	retention i mark	0	77	35	42	68	51	28	71	76
	lokal retention	0	1	0	24	2	0	39	4	0
	retention i sjö	32	19	58	23	17	40	17	21	20
	utflöde	68	4	7	11	13	9	15	4	4

6.5 Metallbudget för Munksjön

Munksjön är en relativt liten sjö med stor vattenomsättning belägen i centrala Jönköping. Det som skiljer Munksjön från övriga delavrinningsområden som här detaljstuderas är att punktkällor med direktutsläpp till sjön svarar för förhållandevis stora andelar av den totala metalltillförseln. Landområdet närmast sjön räknas in i objektet varför tillförseln från detta särredovisas som "tillförsel från närområde" (se förstoring i Figur 26). Sjöns utbredningsområde och omgivning framgår av Figur 36.



Figur 36. Munksjöns utbredningsområde (blå yta). Karta hämtad från VISS, Vatteninformationssystem Sverige. Munksjön har vattenförekomstbeteckningen SE640746-140268. Till höger vy över Munksjön med Vättern i bakgrunden. Foto Lars Wennerberg.

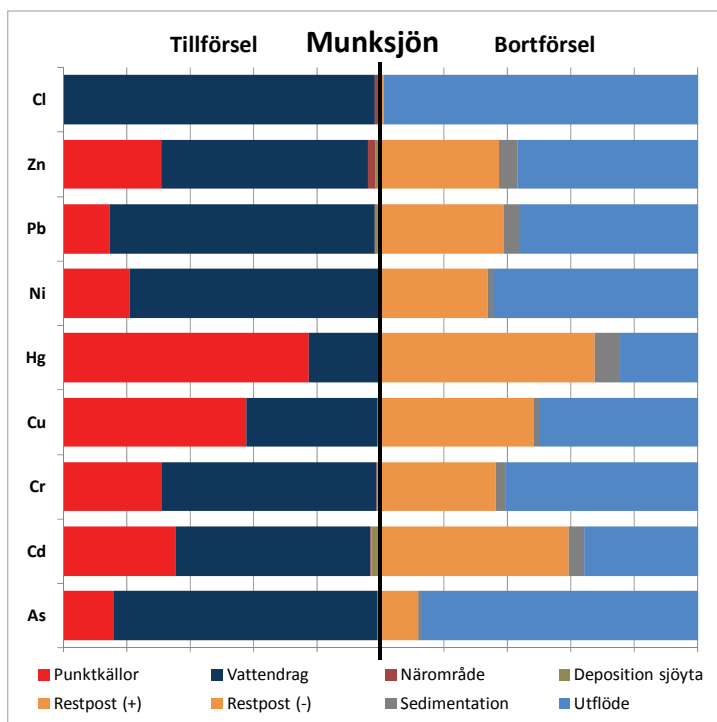
För koppar (Cu) och kvicksilver (Hg) svarar punktkällorna för 60 % av tillförseln eller mer. Enligt tillgängliga miljörapporter är det kommunala reningsverket den största punktkällan. Depositionen direkt på sjöytan har för Munksjön väldigt liten betydelse, relativt sett (Tabell 18 och Figur 37).

En annan sak som skiljer Munksjön från övriga delavrinningsområden är att budgeten resulterar i negativa restposter för nästa alla metaller. Möjliga men mindre troliga förklaringar till detta är att metallutsläppet från reningsverket överskattats och/eller att uttransporten till Vättern underskattats. En mer sannolik förklaring är att fastläggningen av metaller i Munksjön är större än den fastläggning som skattats med Metallbalansmodellen⁰⁰. Anledningen till detta är att Munksjöns undre vattenmassa, från ca 6 meters djup ned till botten på 21 meter, i det närmaste saknar syrgas under delar av året. I denna reducerande miljö tenderar flertalet metaller att bilda stabila föreningar med svavel, vilket talar för att metallretentionen är större i Munksjön än vad som är normalt. Enligt den riskbedömning för Munksjön¹⁵ som gjorts av Golder Associates AB visar deras massbalanser att fastläggningen är betydande i Munksjön för flertalet metaller och de konstaterar att orsaken är att de reducerande förhållandena i bottenvattnet troligen binder metallerna permanent som sulfider. Detta stödjer slutsatsen ovan att obalansen i vår budget för Munksjön sannolikt främst förklaras av att retentionen är större i Munksjön grund av de speciella förhållandena där, jämfört med vad som predikteras med den generella Metallbalansmodellen (se bilaga B7 för en närmare beskrivning av hur retentionen i sjöarna hanteras i Metallbalansmodellen).

⁰⁰ I Metallbalansmodellen skattas sedimentationen baserat på metallernas genomsnittliga retentionsegenskaper för samtliga sjöar i Vätterns avrinningsområde, men med hänsyn tagen till den aktuella sjöns omsättningstid.

Tabell 18. Metallbudget för Munksjön baserat på mät- och beräkningsdata för perioden 2010-2012. Grundämnenas kemiska beteckningar förklaras i faktaruta 2.

Budget för Munksjön	As	Cd	Co	Cr	Cu	Hg	Ni	Pb	Zn
Tillförsel via vattendrag (kg/år)	30	1,1	19	25	104	0,25	99	44	543
varav <i>Rocksjöån</i>	10%	8%	8%	9%	18%	11%	23%	5%	24%
<i>Tabergså</i>	90%	92%	92%	91%	82%	89%	77%	95%	76%
övriga vattendrag	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
Tillförsel från närområde (kg/år)	0,2	0,0	0,1	0,1	0,4	0,00	0,2	0,1	20
varav <i>deposition mark</i>	54%	97%	100%	100%	56%	52%	92%	76%	3%
<i>vittring</i>	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
<i>vägar & tätort</i>	46%	3%	0%	0%	44%	48%	8%	24%	97%
Punktkällor till objekt (kg/år)	5,6	0,6	0,0	11	135	0,88	24	7,3	229
Deposition sjöyta (kg/år)	0,1	0,1	0,2	0,3	2,0	0,00	0,5	1,0	14
SUMMA TILLFÖRSEL (kg/år)	36	1,8	18,8	36	242	1,1	123	53	807
varav <i>vattendrag</i>	83%	64%	98%	69%	43%	22%	80%	84%	67%
<i>närområde</i>	1%	0%	1%	0%	0%	0%	0%	0%	2%
<i>punktkällor</i>	16%	33%	0%	30%	56%	77%	19%	14%	28%
<i>deposition</i>	0%	3%	1%	1%	1%	0%	0%	2%	2%
Sedimentation sjö (kg/år)	-0,3	-0,1	-2,0	-1,1	-4,1	-0,09	-2,1	-2,7	-45
<i>andel fastläggning av tillförseln</i>	1%	5%	11%	3%	2%	8%	2%	5%	6%
Utflyde från sjön (kg/år)	-31	-0,7	-20	-22	-126	-0,3	-81	-30	-475
SUMMA UTFLÖDE & SEDIMENTATION (kg/år)	-31	-0,8	-22,2	-23	-130	-0,37	-83	-33	-520
RESTPOST (kg/år)	-4,3	-1,0	3,4	-13	-112	-0,76	-40	-20	-286
<i>restpostens andel av tillförseln</i>	-12%	-58%	18%	-35%	-46%	-67%	-33%	-38%	-36%



Figur 37. De olika källornas och sänkornas relativa andelar i metallbudgeten för Munksjön. Restposten (orange) uppstår i budgeten som skillnaden mellan tillflöde, utflöde och sedimentation. Med restposten inräknad är därför summa tillförsel = summa bortförsel. Denna figur kompletterar Tabell 18 där de totala mängderna framgår.

Bruttokällfördelningen för Munksjöns hela avrinningsområde (Tabell 19) visar, liksom för övriga studerade områden, att depositionen är den största källan inom avrinningsområdet. Vägar och trafik har dock en påtaglig stor betydelse för nickel (Ni) och krom (Cr), och för detta område även bly (Pb). Det kommunala reningsverket tycks vara den största kvicksilverkällan. Jämfört med motsvarande budget som togs fram för perioden 1994-1995 (Lindström, 1996²) verkar tillförseln till Munksjön ha minskat något för flertalet metaller. En förklaring är att metallutsläppet från pappersindustrin var större vid mitten av 1990-talet än idag.

Tabell 19. Bruttokällfördelning för Munksjöns hela avrinningsområde. Andelar av summa källor respektive summa sänkor för samtliga kategorier i hela delavrinningsområdet inklusive sjön.

Källfördelning Munksjöns ARO		As	Cd	Co	Cr	Cu	Hg	Ni	Pb	Zn
Källor (% av källor)	gruvinindustri	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	skogsindustri	0	0	0	0	2	0	0	0	1
	övrig industri	0	0	0	0	0	1	0	0	0
	kommunala ARV	15	4	0	2	16	51	2	2	6
	ammunition	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	vägar och trafik	0	5	3	78	20	0	88	36	4
	dagvatten, tätort	4	3	4	1	1	1	0	2	5
	okända källor	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	vittring, netto	2	0	0	0	0	0	0	0	0
	deposition mark	75	83	89	18	58	45	9	58	81
	deposition sjö	4	4	4	1	3	2	0	3	4
	Sänkor (% av sänkor)	retention i mark	0	82	40	12	51	30	6	55
lokal retention		0	8	6	79	17	0	84	37	0
retention i sjö		3	2	19	1	1	9	1	2	4
utflöde		97	8	35	8	30	61	10	6	18

7 Förekomst, fördelning och budget för REE och uran

I det här kapitlet samlas information om ett antal ämnen för vilka det inte bedömts vara meningsfullt att göra fullständiga budgetar på grund av att dataunderlagen antingen är ofullständiga eller av olika skäl mer osäkra. I det första avsnittet beskrivs gruppen sällsynta jordartsmetaller (REE) för vilka det finns ett särskilt intresse i Vätternområdet på grund av att gruvbrytning planeras. Det andra avsnittet behandlar ämnena uran, torium och molybden, där framförallt uran har uppmärksammats på grund av att halterna i grundvatten ibland överskrider dricksvattenkriterierna¹⁶.

7.1 Sällsynta jordartsmetaller (REE)

REE utgör en homogen ämnesgrupp med mycket likartade kemiska egenskaper, vilket gör att ämnena uppträder mycket likartat i miljön. I naturen förekommer de alltid i blandning med varandra och under lång tid uppfattade man inte att ämnesgruppen bestod av separata grundämnen. Många REE har på senare tid fått kraftigt ökad teknisk användning i till exempel magneter (neodym), kontrastvätska (gadolinium) och bildskärmar (europium).

I naturliga vatten bildar REE olika former av komplex som i sin tur främst är bundna till olika typer av partiklar i vattnet. Det får som följd att REE uppvisar låg rörlighet i vattensystemen och att de i hög grad sedimenterar ur vattenmassan. I många vatten är halterna av REE så låga att mätningarna faller under detektionsgränserna för åtminstone de mest sällsynta ämnena i gruppen.

7.1.1 Halter av REE i morän och sjösediment

De sällsynta jordartsmetallerna^{pp} (REE) förekommer allmänt i berggrunden, men i relativt låga halter jämfört med de vanligaste mineralens huvudbeståndsdelar som kalcium (Ca), kalium (K), natrium (Na) och kisel (Si).

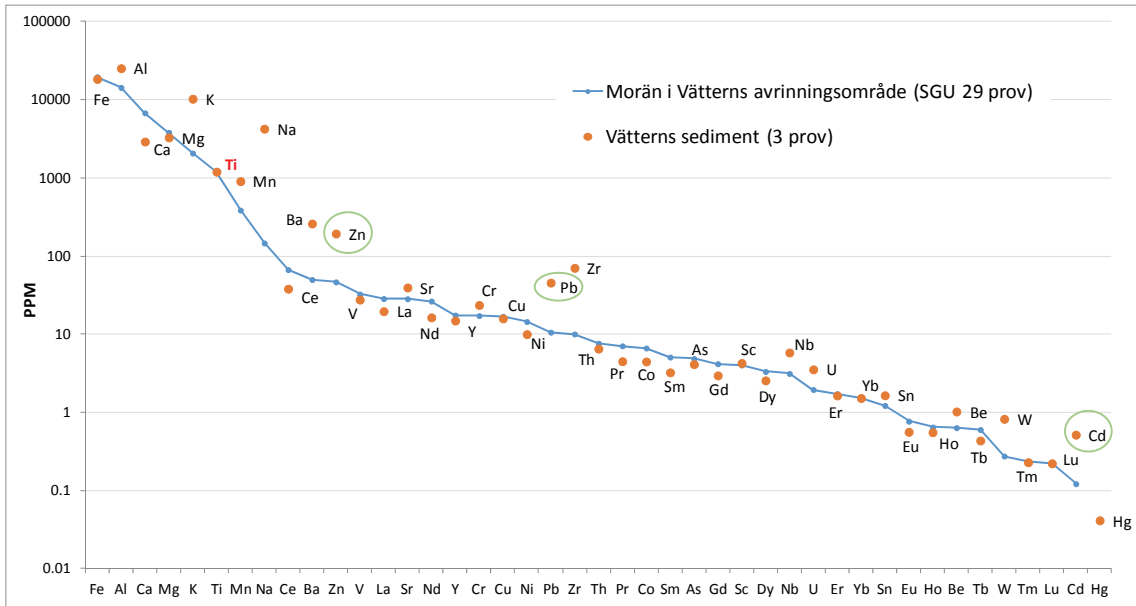
Enligt Figur 38, som visar grundämneshalten i moränprov från Vätterns avrinningsområde och sedimentprov från Vätterns ackumulationsbotten^{qq}, förekommer den sällsynta jordartsmetallen cerium (Ce) i cirka 100 gånger högre halter än lutetium (Lu). Halterna för de tekniskt viktiga metallerna krom (Cr), koppar (Cu), nickel (Ni), bly (Pb), kobolt (Co) och tenn (Sn) är i genomsnitt lägre än halterna i morän för flera REE, till exempel cerium (Ce), lantan (La) och neodym (Nd).

Av figuren kan utläsas att halterna i sjösediment för några ämnen avviker från halterna i morän i avrinningsområdet. Metallerna zink (Zn), bly (Pb) och kadmium (Cd) uppvisar en tydlig anrikning i sjösedimenten vilket kan förklaras av att de tillförs sjön från olika antropogena verksamheter, i enlighet med tidigare redovisade metallbudgetar för sjön. Den förhöjda halten av zirkonium (Zr) är svår förklarad, men eftersom ämnet ingår i projektiler som skjuts ut i Vättern skulle tillförsel från denna verksamhet kunna vara en förklaring^{rr}.

^{pp} De sällsynta jordartsmetallerna, REE, utgörs av lantaniderna Ce, Dy, Er, Eu, Gd, Ho, La, Lu, Nd, Pm, Pr, Sm, Tb, Tm och Yb, samt grundämnena Sc och Y.

^{qq} Halterna i de delvis organiska sjösedimenten har normerats mot Ti (rödmarkerad) för att framhäva skillnaderna mellan morän och sediment.

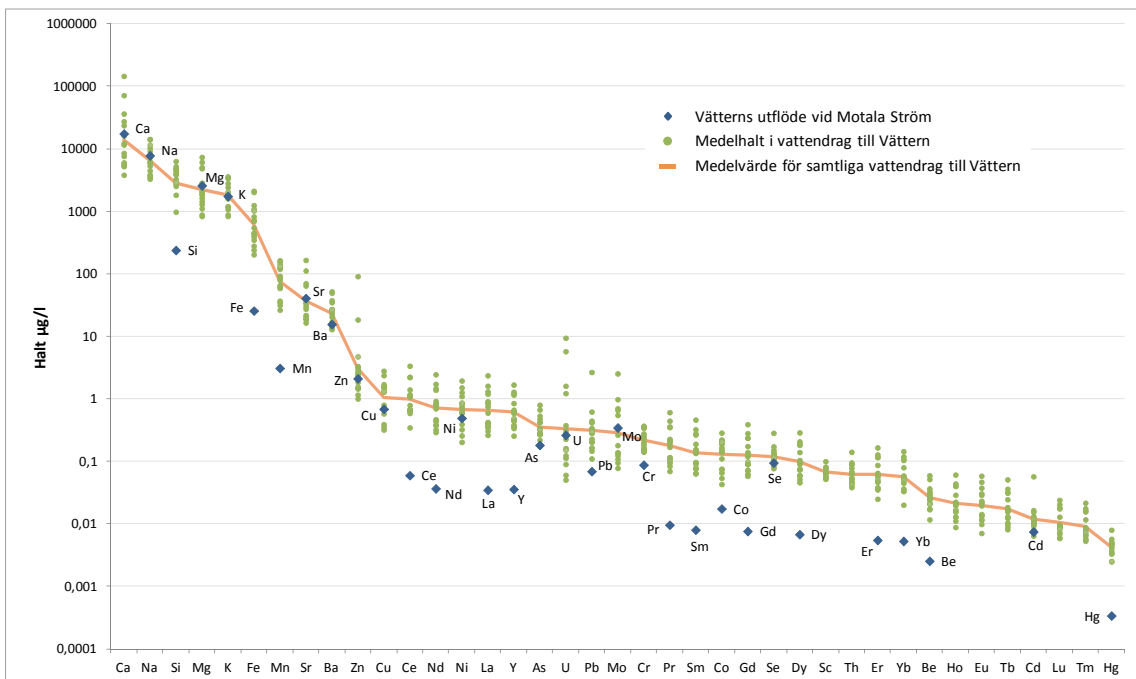
^{rr} Det skulle också kunna bero på analysfel. Det är också oklart varför kalium (K) och natrium (Na) avviker.



Figur 38. Grundämneshalten uttryckt i PPM av torrsvikt i moränprov från Vätterns avrinningsområde (blå linje), samt sedimentprov från Vätterns ackumulationsbottnar (orange punkt). Ämnena har sorterats från vänster till höger i fallande ordning efter medelhalten i morän i Vätterns avrinningsområde.

7.1.2 Halter av REE i vattendrag och i Vättern

På samma sätt som för morän och sjösediment ovan redovisas Figur 39 halterna i vatten för en lång rad grundämnen samt REE i. I figuren visas medelhalterna för samtliga större vattendrag som rinner till Vättern, samt medelhalten i Vätterns utflöde vid Motala Ström. Enskilda halter kan urskiljas i kartorna för lantan (La) och cerium (Ce) i bilaga B7.



Figur 39. Halter i vatten i Vätterns utflöde vid Motala Ström (blå romber), medelhalter i de större tillrinnande vattendragen till Vättern (gröna punkter). Den orangea linjen representerar det geometriska medelvärdet för halterna vattendragen. Halterna representerar ofiltrerade prover.

Av figuren kan man konstatera att flertalet ämnen uppvisar en variation i medelhalt mellan vattendragen på i storleksordningen 5-10 gånger. Några ämnen har markant högre spridning vilket förklaras av särskilda förutsättningar i avrinningsområdet: de avvikande punkterna för uran (U), kalcium (Ca) och molybden (Mo) speglar den avvikande kemien i områden med sedimentär berggrund, medan de förhöjda halterna av zink (Zn) och bly (Pb) framförallt avspeglar de förhöjda halterna i Kärrafjärdens och Alsens utlopp.

De sällsynta jordartsmetallerna, REE, varierar ungefär i samma grad som övriga metaller^{ss}. Den inbördes ordningen mellan dem avseende totalhalt beror av deras naturliga förekomst i berggrund och morän (det är ett snarligt mönstret för morän och sjösediment ovan). Högst är halterna för cerium (Ce), neodym (Nd) och lantan (La), och lägst för ytterbium (Yb) och erbium (Er). Några REE har utelämnats i figuren på grund av att halterna faller under rapporteringsgränserna, exempelvis lutetium (Lu).

När halterna i Vätterns utflöde jämförs med halterna i vattendragen syns en markant skillnad för ett antal ämnen. Bland de "vanliga" metallerna skiljer bly (Pb), krom (Cr), kobolt (Co) och kvicksilver (Hg) ut sig genom markant lägre halt i Vätterns utflöde, vilket är en följd av den stora retentionen för dessa ämnen i Vätterns vattenmassa. Skillnaden är särskilt stor för REE, vilket antyder på att retentionen är stor för denna grupp ämnen. Skillnaden i halt är cirka 10 gånger mellan medelhalten i vattendragen och Vätterns utflöde.

7.1.3 Budgetar och fördelningsmönster för REE

Eftersom dataunderlagen för REE är förknippade med större osäkerheter än de vanligen mätta metallerna redovisas inte dessa budgetar i kapitel 6. Istället redovisas här den tillgängliga informationen samlad tillsammans med kommentarer om de olika osäkerheterna.

I Metallbalansmodellen i kapitel 5 (jfr Figur 23) ingår två REE, lantan (La) och cerium (Ce). På landskapsnivå utgör frisättning från berggrund och morän via vittringsprocesser den helt dominerande källan för dessa ämnen. Den samlade kategorin "tätort och väg" utgör några procent av tillförseln, vilket kan hänföras till mätningarna i dagvatten från tätort (se bilaga B5). Det betyder troligen inte att REE tillförs i högre grad från tätortsmiljöer, utan dessa mängder avspeglar förmodligen den naturliga tillförseln från vittring.

Metallbalansmodellen indikerar även att runt 80-90% av det lantan och cerium som hamnar i vattendragen senare fastläggs i sjöarna. Fördelningsmönstret för REE på landskapsnivå är snarligt det för kisel (Si), vilket är att förvänta eftersom detta ämne tillförs via vittring av vanliga bergarter, det uppträder i partikulära former och uppvisar hög fastläggningsgrad.

Det finns inga indikationer på att REE skulle tillföras från någon punktkälla i området. De fåtaliga mätningar som finns visar istället att halterna i utgående vatten från avloppsreningsverk, pappersindustri och Zinkgruvan är betydligt lägre än halterna i vattendragen^{tt}. Antropogena tillskott av REE, till exempel från kontrastvätska som används vid

^{ss} Eftersom dataunderlaget utgörs av tre provtillfällen i vattendragen är det inte möjligt att säkert uttala sig om haltvariationen på ca 10ggr speglar den geografiska variationen mellan mätpunkterna eller om det främst är en effekt av stor variation i tidserierna inom samtliga stationer. Eftersom REE är starkt bundet till partiklar är det sannolikt att variationerna i REE-halt framförallt bestäms av faktorer som påverkar halten partikulärt material.

^{tt} Ceriumhalten i utgående vatten från avloppsreningsverken i Askersund och Hjo, samt Munksjö Aspa Bruk AB är cirka 0,01 µg/l. I recipienten nedströms Zinkgruvan uppmäts halter i storleksordning 0,1 µg/l. I vattendragen ligger halterna normalt kring 1 µg/l.

magnetrontgenundersökningar, skulle i så fall möjligen kunna detekteras i det slam som produceras vid avloppsreningsverken.

De fåtaliga haltmätningar av REE i nederbörd från Visingsö är troligen inte representativa för de mängder som normalt tillförs långväga via atmosfären. Mycket tyder på att dessa prov är kontaminerade och att de observerade halterna av REE i första hand representerar lokalt mineraliskt damm (se vidare bilaga B2). Av detta skäl sattes tillförseln av REE via nederbörd till noll i Massbalansmodellen eftersom denna post endast speglar interna omfördelningar.

Då en budget ställs upp för Vätterns huvudbassäng med tillgängliga data för lantan i Tabell 20 syns tydligt att all tillförsel sker via vattendragen och att en stor andel sedimenterar i Vättern. Skillnaden mellan denna skattning av fastläggningen i Vättern (47%), och den högre siffran (80-90%) som avser hela landskapet i Metallbalansmodellen belyser de stora osäkerheterna i dessa skattningar. Bilden av stora osäkerheter för gruppen REE förstärks om man jämför de oberoende skattningarna av sedimentationen baserat på Metallbalansmodellen och mätningar i Vätterns sediment (se vidare faktaruta 9, samt bilaga B7, avsnitt 7.4). Denna jämförelse visar att den faktiska sedimentationen baserad på halterna i sjösedimenten är cirka 10 gånger högre än den modellerade som baseras på skillnaden mellan halterna i vattendragen och utflödet. Sammantaget visar detta att det finns stora osäkerheter i dataunderlagen till budgeten, vilket skulle kunna förklaras av svårigheterna att korrekt bestämma halterna av REE i dessa naturliga vatten. Även tillförseln via grundvattenutströmning direkt till Vättern skulle potentiellt kunna bidra till osäkerheterna.

Tabell 20. Budget för Vätterns huvudbassäng för den sällsynta jordartsmetallen lantan (La), samt molybden (Mo) och uran (U). Budgetarna för dessa ämnen uppvisar större osäkerheter jämfört med budgetarna för de vanliga metallerna i kapitel 6 på grund av att dataunderlagen är mindre tillförlitliga.

Budget för Vätterns huvudbassäng	La	Mo	U
Tillförsel via vattendrag (kg/år)	591	1066	736
varav Huskvarnaån	24%	66%	7%
Forsviksån	35%	28%	4%
Mjölnaån	4%	6%	47%
Munksjöns utlopp	6%	45%	2%
Hammarsundet	7%	2%	2%
övriga vattendrag	24%	-46%	38%
Tillförsel från punktkällor direkt till sjön (kg/år)	0	0	0
varav gruvindustri	0%	0%	0%
skogsindustri	0%	0%	0%
övrig industri	0%	0%	0%
kommunala ARV	0%	0%	0%
ammunition	0%	0%	0%
Deposition på sjöytan (kg/år)	0	62	0
SUMMA TILLFÖRSEL (kg/år)	592	1128	736
varav vattendrag (%)	100%	94%	100%
punktkällor (%)	0%	0%	0%
deposition (%)	0%	5%	0%
Sedimentation sjö (kg/år)	-279	-107	-218
andel fastläggning av tillförseln	47%	9%	30%
Utflöde från Vättern (kg/år)	-121	-3092	-473
SUMMA UTFLODE & SEDIMENTATION (kg/år)	-400	-3199	-692
RESTPOST (kg/år)	-192	2071	-44
restpostens andel av tillförseln	-32%	184%	-6%

7.2 Sammanfattande bedömning för uran, och torium, samt molybden

I et här avsnittet sammanfattas resultaten för aktiniderna uran (U) och torium (Th), samt metallen molybden (Mo). Gemensamt för dessa ämnen är att budgetarna liksom för REE uppvisar större osäkerheter än övriga metaller.

Uran och torium är naturligt förekommande radioaktiva ämnen. De har markant olika kemiska egenskaper, vilket medför att de uppträder på olika sätt i miljön. Uran och torium förekommer allmänt i moränen runt Vättern i ungefär samma genomsnittliga halter som till exempel kobolt (Co) och arsenik (As). I områden med sedimentär berggrund som innehåller karbonater, uppvisar Uran stor rörlighet i miljön, vilket delvis förklarar de förhöjda halter som observeras i området öster om Vättern (jfr Figur 5, samt kartan för uran i bilaga B7). Torium uppvisar tvärtom oftast låg rörlighet i miljön och är ofta starkt associerad till partikulärt material. Av det skälet uppträder torium ofta i mycket låga halter i vatten, vilket gör ämnet svåranalyserat. Många haltmätningar för torium ligger följaktligen under rapporteringsgränsen och det är också skälet till att inga budgetar kan redovisas för torium. Intresset för uran hänger främst samman med att halter i grundvatten ibland överskrider dricksvattenkriterierna¹⁶ med avseende på toxicitet. Uran är även utpekad som ett SFÄ, särskilda förorenande ämnen, i Havs- och Vattenmyndighetens föreskrift om klassificering av ytvatten^{uu}. För torium finns inga motsvarande dricksvattenkriterier.

Enligt Metallbalansmodellen i Figur 23 utgör vittring den största källan för uran och en relativt stor andel av det uran som når vattendragen lämnar Vätterns avrinningsområde via utloppet vid Motala Ström. Tillförseln av uran via nederbörd är försumbar. Den okända källan representerar den tillkommande mängd som tillförs via vittring i områden med sedimentär berggrund (gula/orangea/röda nyanser i Figur 40). Tillförseln från dessa områden motsvarar 80 % av den totala tillförseln, trots att de endast utgör en liten del av Vätterns avrinningsområde. I budgeten över Vättern i Tabell 20 syns också att Mjölnaån som avvattnar ett område med sedimentär berggrund är det vattendrag som står för den största tillförseln. Sammantaget kan vi konstatera att kunskapsläget för uran i Vätterns avrinningsområde är relativt begränsat, vilket leder till stora osäkerheter i modeller och budgetar. I en eventuell vidareutveckling av Metallbalansmodellen bör till exempel uppgifter om sedimentär berggrund / morän byggas in i modellen. Tillförsel av uran via grundvattenutströmning direkt till Vättern skulle också kunna vara en potentiell källa som inte tas hänsyn till i detta arbete.

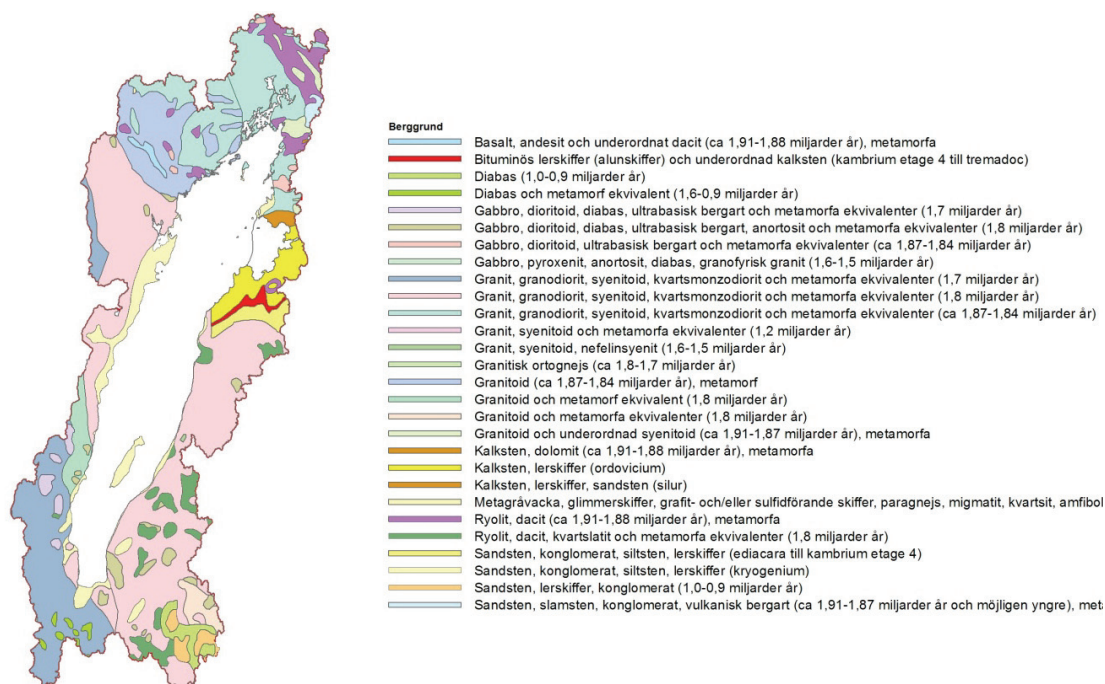
Molybden (Mo) förekommer i förhöjda halter i alunskiffer tillsammans med metaller som uran, nickel och vanadin (rött område i Figur 40). Molybden delar vissa kemiska egenskaper med uran (U), vilket bland annat gör att denna metall uppvisar ökad rörlighet i områden med förhöjda karbonathalter, till exempel i områden med sedimentär berggrund. Molybden används industriellt bland annat som legeringsmetall och släpps därför ut i miljön från olika antropogena källor. Molybden är ett nödvändigt näringsämne för nästan allt liv (jfr diskussionen i kapitel 9). Eftersom dataunderlagen inte är fullständiga för molybden då den i regel inte ingår i de rutinmässiga mätningarna, innehåller budgetarna för denna metall stora osäkerheter. Enligt Metallbalansmodellen utgör tillförseln av molybden via nederbörd den dominerande källan på landskapsnivå, då 57 % av tillförseln kommer långväga ifrån via atmosfärisk deposition. Resterande mängd tillförs enligt modellen från kategorierna ”okända

^{uu} HVMFS 2015:4

källor" (36%) och "tätort och väg" (sammanlagt 7 %), enligt Figur 23 och Tabell 21. Endast drygt hälften av molybdenet fastläggs i mark och sjö, vilket är något mindre jämfört med övriga studerade metaller som huvudsakligen tillförs via deposition. Budgeten i Tabell 20 indikerar att merparten av tillförseln till Vättern sker via vattendragen. Merparten av denna tillförsel härrör ursprungligen från deposition i avrinningsområdet, samt från de "okända källorna" enligt bruttokällfördelningen för hela Vätterns avrinningsområde i Tabell 21. De "okända källorna" för molybden motsvarande cirka 185 kg/år, skulle, analogt med uran, kunna utgöras av tillförsel från områden med sedimentär berggrund som innehåller alunskifferar. Förhöjda molybdenhalter i området med sedimentär berggrund öster om Vättern tyder på det. Detta betyder i sin tur att vittringen av alunskifferar troligen utgör den näst största källan för molybden till Vättern, efter långväga deposition.

Tabell 21. Bruttokällfördelning för Vätterns hela avrinningsområde. Andelar av summa källor respektive summa sänkor för samtliga kategorier i hela avrinningsområdet inklusive Vättern.

Källfördelning Vätterns ARO		La	Mo	U
Källor (% av källor)	gruvinindustri	0	0	0
	skogsindustri	0	0	0
	övrig industri	0	0	0
	kommunala ARV	0	0	0
	ammunition	0	0	0
	vägar och trafik	0	9	0
	dagvatten, tätort	2	2	1
	okända källor	0	0	80
	vittring, netto	98	0	18
	deposition mark	0	63	0
deposition sjö	0	26	0	
Sänkor (% av sänkor)	retention i mark	0	16	0
	lokal retention	0	0	0
	retention i sjö	79	43	34
	utflöde	21	41	66



Figur 40. Dominerande berggrundstyper i Vätterns avrinningsområde.

8 Risk för konsekvenser för Vätterns växt- och djurliv eller människan – vad bör man tänka på?

I uppdraget ingår inte att göra någon riskbedömning av metallförekomsten i Vättern och dess tillrinnande vattendrag. I detta avslutande avsnitt görs endast några generella kommentarer om skillnaden mellan olika metaller och risken för att de ska orsaka negativa konsekvenser i Vättern.

Först och främst finns anledning att skilja på nyttiga och skadliga metaller. Flera metaller behöver alla levande varelser tillgång till för att fungera på ett tillfredsställande sätt, och i förlängningen för att överleva^{vv}. De kallas essentiella metaller till skillnad från icke-essentiella. De senare metallerna har veterligen ingen känd funktion hos levande varelser (se faktaruta nedan).

Faktaruta 12: Om metallers skada och nytta

Essentiella metaller – både nyttiga och skadliga

Alla levande varelser behöver tillgång till vissa s.k. essentiella metaller för att kunna existera. Metallerna ingår som viktiga byggnadsstenar i vävnader, enzymer och fortplantningsorgan. Brister på en essentiell metall kan leda till funktionsnedsättning eller annan skada, och i värsta fall död. Men samtidigt kan ett överskott av samma metall störa funktionen där en annan metall är verksam, och därmed orsaka funktionsnedsättning eller annan skada, eller i värsta fall död. Exempel på essentiella metaller är zink, koppar och krom.

Vissa essentiella metaller medför normalt inga negativa konsekvenser ens i relativt höga koncentrationer. De har ändå tagits med i studien som stödande information. Exempel på sådana metaller är kalcium, magnesium, järn m.fl.

Icke-essentiella metaller – endast skadliga

Andra metaller kan, enligt vad man känner till, aldrig vara nyttiga utan endast skadliga i förhöjda koncentrationer. Exempel på sådana metaller som vi i möjligaste mån ska undvika att släppa ut i miljön är kvicksilver, bly och kadmium. Viss exponering för dessa metaller klarar organismen att ta hand om utan att påverkas.

Den skada som vållas av icke-essentiella metaller orsakas oftast av att metallen ersätter en essentiell metall i exempelvis ett enzym. Därmed fungerar enzymet felaktigt eller inte alls. Skadan kan lindras eller förhindras om den icke-essentiella metallen inte förekommer i alltför stort överskott i förhållande till den essentiella metallen. Det sker nämligen en tävlan mellan metallerna om bindningsstället i enzymet (liksom om andra bindningsställen). Därför är det viktigt att ha klart för sig vilka metaller som är essentiella och inte, och vilka som kan ersätta varandra i olika vävnader.

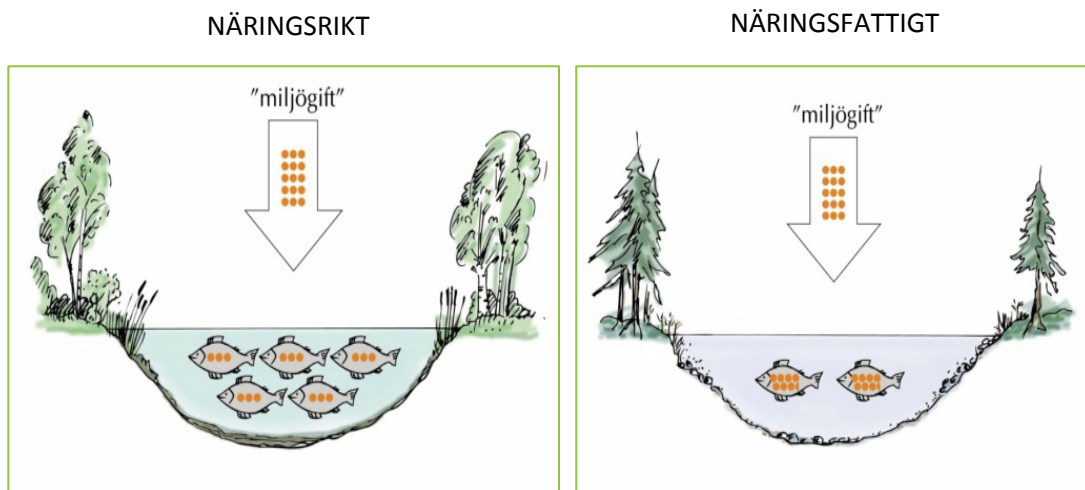
Exempelvis kan den icke-essentiella metallen kadmium orsaka skada genom att konkurrera med den essentiella metallen zink. Att då lägga stora ansträngningar på att reducera tillförseln

^{vv} Det är anmärkningsvärt att det är vanligt, inte minst hos myndigheter, att i allmänna termer kalla metaller som är livsnödvändiga för levande varelser för "miljögifter" bara för att de kan orsaka skada i höga koncentrationer. Det är likaså anmärkningsvärt att tillförseln till en sjö av en essentiell metall, även den naturliga tillförseln, i allmänna termer brukar benämnas "belastning" på sjön. I svenska språket är ordet belastning synonymt med "påfrestning" i bemärkelsen att det kan leda till negativa konsekvenser för individen ifråga. Att i generella termer kalla en tillförsel av ett livsnödvändigt ämne för en belastning av ett miljögift är direkt felaktigt. Detta språkbruk måste rimligen ändras snarast!

av zink till exempelvis Vättern innan kadmiumtillförseln reducerats i motsvarande grad kan vara direkt olämpligt och leda till förhöjda koncentrationer av kadmium i växter och djur.

Motsvarande resonemang verkar kunna föras även mellan zink och de icke-essentiella metallerna bly och kvicksilver. Exempelvis har undersökningar visat att kvicksilverhalten i fisk är tydligt lägre i Kärrafjärden än i övriga delar av Vättern. Som framgått av metallbudgeten är zinkförekomsten särskilt stor i Kärrafjärden.

På liknande sätt kan ett vattenområdes näringsförhållande få betydelse för vilka konsekvenser en förhöjd metalltillförsel leder till. Principen åskådliggörs i Figur 41. Ur budgeten för Storvättern ovan kan utläsas att nästan 65 kg kadmium årligen faller ner på Vätterns yta. Som beskrivits i de inledande avsnitten är Storvättern mycket fattigt på fosfor, det näringsämne som är styrande för bioproduktionen i sjön. Därför är Vättern även fattig på djur och växter, såväl frilevande som fastsittande. Detta får till följd att exempelvis fisken i Vättern innehåller förhållandevis höga halter av flera s.k. miljögifter, däribland kadmium.



Figur 41. I den vänstra figuren når en bestämd mängd "miljögift", låt oss säga kadmium, en näringsrik sjö med förhållandevis låga kadmiumhalter i varje individ som resultat. I den högra figuren når samma kadmiummängd en näringsfattig sjö som har ett ekosystem med ett fåtal växter och djur. Genom minskad "bioutspädning" riskerar varje individ att få en högre halt kadmium än i det näringsrika systemet.

Skulle Vättern tillföras mer fosfor så kan man förvänta att bioproduktionen ökar, vilket sannolikt även får till följd att koncentrationen av flera miljögifter minskar i fisken. Skulle det omvända hända, dvs att åtgärder sätts in för att ytterligare minska fosfortillförseln till sjön, är det mycket som talar för att koncentrationen av exempelvis kadmium och kvicksilver istället ökar i Vätterns fiskar, så vida man inte samtidigt lyckas att reducera tillförseln av dessa metaller.

Som framgår av diskussionen ovan så pågår ett ständigt samspel mellan olika ämnen i Vättern, ett samspel som avgör vilka miljökonsekvenser den pågående metalltillförseln orsakar, eller riskerar att orsaka. Om den förbättrade kunskap om metallers ursprung och öden i Vättern som vi förhoppningsvis lyckats åstadkomma med detta uppdrag, leder till diskussioner och förslag om eventuella åtgärder för att förbättra miljöförhållandena i Vättern, anser vi att samspelen mellan ämnen måste beaktas.

9 Referenser

- ¹ Lindeström, L. (1993). Metaller i Vättern. Bedömning av tillförsel, tillstånd och möjliga konsekvenser. Vätternvårdsförbundet rapport 32.
- ² Lindeström, L. (1996). Metaller i Vättern, tillförsel och källfördelning 1993-95. Vätternvårdsförbundet rapport 39.
- ³ Vätternvårdsförbundet (2014). Årsskrift 2014. Rapport 119.
- ⁴ Kinsten, B. m.fl. (2012). Glacialrelikter och makrozooplankton i Väneren och Vättern 2011. Vätternvårdsförbundet rapport 115.
- ⁵ Vätternvårdsförbundet (2005). Avstämning av vattenvårdsplanerna Vättern 90 och Vättern 96. Rapport 88.
- ⁶ <http://vattenwebb.smhi.se/>. Accessed 2014-05-01.
- ⁷ <http://www.smhi.se/klimatdata/meteorologi/nederbord/normal-uppmatt-arsnederbord-medelvarde-1961-1990-1.4160>, Accessed 2015-04-03.
- ⁸ Håkanson, L. & Ahl, T. (1976) Vättern – recenta sediment och sedimentkemi. Naturvårdsverket PM 740.
- ⁹ Blank, H., Hein, M. & Lindell, M. Trafikens miljöbelastning på Vättern. Vätternvårdsförbundet rapport 65.
- ¹⁰ Bjelkås, J. och Lindmark, P. (1994) Förorening av mark och vägdragvatten på grund av trafik. Statens geotekniska institut.
- ¹¹ NV rapport 5624
- ¹² Qvarfort, U. (2015). Preliminära resultat från en pågående undersökning av muskotkulor från Regalskeppet Vasa. FOI CBRN Umeå.
- ¹³ IVL Svenska miljöinstitutet. Datavärd för luftkvalitet, metaller i mossa. www.ivl.se.
- ¹⁴ Johansson, J. (2004). Kommunrapport Askersund. Redovisning av resultaten av projektet MIFO-inventering av förorenade områden i Örebro län. Rapport från Länsstyrelsen Örebro, 2004:31.
- ¹⁵ Golder Associates AB 2014. Riskbedömning Munksjön Jönköping. Rapport framställd på uppdrag av Jönköpings Kommun, Länsstyrelsen i Jönköping och Munksjö Paper AB.
- ¹⁶ <http://www.livsmedelsverket.se/livsmedel-och-innehall/oonskade-amnen/metaller1/uran/>
- ¹⁷ <http://www.slu.se/vatten-miljo>
- ¹⁸ Vätternvårdsförbundet (2013). Årsskrift 2013. Rapport 117.
- ¹⁹ Håkansson L, 1977. Sediments as Indicators of Contamination – Investigations in the Four Largest Swedish Lakes. SNV PM 839, NLU Rapport 92.
- ²⁰ Vätternvårdsförbundet (2001). Trafikens miljöbelastning på Vättern. Rapport 65.

²¹ <http://vtf.trafikverket.se/SeTrafikinformation>

²² IVL 2010, Sjödoi Å, Ferm M, Björk A, Rahmberg M, Gudmundsson A, Swietlicki E, Johansson C, Gustafsson M, Blomquist G, 2010. Wear particles from road traffic – a field, laboratory and modeling study. IVL report B1830

²³ Bjelkås, J. och Lindmark, P. (1994) Förorening av mark och vägdagvatten på grund av trafik. Statens geotekniska institut.

²⁴ Musckack W 1990, Pollution of street run-off by traffic and local conditions, Science of the total environment vol.93 pp 419-431

²⁵ Försvarsmakten

http://www.fmv.se/Global/Bilder/Verksamhet/Riskomr%C3%A5de%20V%C3%A4ttern/vattern_karta.jpg

²⁶ Qvarfort och Waleij (2004). Bly-Förekomst och miljöeffekter till följd av militära och andra vapenrelaterade aktiviteter.” Totalförsvarets Forskningsinstitut, FOI-R-1178-SE.

Bilaga B1

Halter och mängder i vattendrag och sjöar

Innehåll

Bilaga B1 – Halter och mängder i vattendrag och sjöar	2
1.1 Avrinning	2
1.2 Halter i vattendrag	2
1.3 Metalltransporter via vattendrag.....	5
1.3.1 Beräknade transporter och flödesvägda medelhalter	5
1.3.2 Skattade transporter för ovanliga metaller.....	6
1.4 Haltmätningar i sjöar	8
1.5 Haltförändringar och totala mängder i Vättern.....	10
1.5.1 Haltförändring över tid i Vätterns vattenmassa.....	10
1.5.2 Total mängd och årlig förändring i Vätterns vattenmassa	14

Bilagan finns att läsa i sin helhet i PDF-versionen av rapporten som finns att hämta på www.vattern.org

Bilaga B2

Tillförsel via nederbörd

Innehåll

Bilaga B2 - Tillförsel via nederbörd	2
2.1 Nederbördsmängder i Vätterns avrinningsområde.....	2
2.2 Halter i Nederbörd	3
2.3 Skattning av deposition via nederbörd.....	8

Bilagan finns att läsa i sin helhet i PDF-versionen av rapporten som finns att hämta på www.vattnern.org

Bilaga B3

Sedimentation i Vättern

Innehåll

Bilaga B3 – Sedimentation i Vättern	2
3.1 Metallhalter i sedimenten	2
3.2 Skattning av sedimentationen i Vättern	4

Bilagan finns att läsa i sin helhet i PDF-versionen av rapporten som finns att hämta på www.vattnet.org

Bilaga B4

Tillförsel från trafik

Innehåll

Bilaga B4 - Tillförsel från trafik	2
---	----------

Bilagan finns att läsa i sin helhet i PDF-versionen av rapporten som finns att hämta på www.vattn.org

Bilaga B5

VÄTTERN DAGVATTEN – utredning av metallbelastning

Golder Associates AB

Innehåll

- 1 INLEDNING
- 2 OMRÅDESBESKRIVNING
- 3 DAGVATTENPROVTAGNING
- 4 RESULTAT
- 5 DISKUSSION
- 6 SLUTSATS OCH REKOMMENDATIONER
- 7 REFERENSER

Bilagan som utgör en separat rapport till detta arbete finns att läsa i sin helhet i PDF-versionen av rapporten som finns att hämta på www.vattern.org. En detaljerad innehållsförteckning från rapporten återges nedan.



VÄTTERN DAGVATTEN

Utredning av metallbelastning

Framställd för:
Vätternvårdsförbundet
c/o Länsstyrelsen i Jönköpings län
551 86 Jönköping

RAPPORT



Uppdragsnummer: 13512450543





Innehållsförteckning

1.0	INLEDNING	1
1.1	Undersökningens syfte	1
1.2	Undersökningens omfattning	1
2.0	OMRÅDESBESKRIVNING	2
2.1	Vätterns tillrinningsområde	2
2.1.1	Geologi inom Vätterns tillrinningsområde	2
2.2	Bebyggelse och tätorter runt Vättern	3
3.0	DAGVATTENPROVTAGNING	4
3.1	Strategi	4
3.2	Dagvattenprovtagning	5
4.0	RESULTAT	7
4.1	Anjoner	8
4.2	Huvudelement, katjoner	9
4.3	Tungmetaller	9
4.4	Sällsynta jordartsmetaller	10
4.5	Torium och uran	11
4.6	Övriga analysparametrar	11
5.0	DISKUSSION	12
5.1	Koncentrationer av analysparametrar	12
5.1.1	Anjoner	12
5.1.2	Huvudelement, katjoner	12
5.1.3	Tungmetaller	12
5.1.4	Sällsynta Jordartsmetaller	13
5.1.5	Thorium och Uran	13
5.1.6	Övriga parametrar	13
5.2	Nuvarande belastning av metaller och anjoner	14
5.3	Jämförelse mellan år 1995 och 2014 m.a.p. metallbelastning	14
5.4	Möjlig maximibelastning m.a.p. metaller	15



5.5	Dagvattenpåverkan i kommuner med ett kombinerat dagvatten- och spillvattensystem.....	15
6.0	SLUTSATS OCH REKOMMENDATIONER	16
7.0	REFERENSER.....	17

TABELLFÖRTECKNING

Tabell 1:	Typ av bebyggelse: dagvattenkategorier.....	3
Tabell 2:	Typ av bebyggelse, klassificering av dagvattenkategorier för enskild provpunkt.....	5
Tabell 3:	Avrinningskoefficienterna från olika källor samt egna framtagna avrinningskoefficienter.....	8
Tabell 4:	Metallbelastning till Vättern via dagvatten	15
Tabell 5:	Analysresultat, ofiltrerat och filtrerat dagvatten med andel lösta parametrar i procent	20
Tabell 6:	Statistiska parametrar, ofiltrerade dagvattenprover	21
Tabell 7:	Statistiska parametrar, filtrerade dagvattenprover	22
Tabell 8:	Metallbelastning av Vättern i kg/år, totalt (ofiltrerad) samt andelen av löster halter (filtrerad).	23
Tabell 9:	Metallbelastning av Vättern i kg/år per m ² , totalt (ofiltrerad) samt andelen av lösta halter (filtrerad).	24

FIGURFÖRTECKNING

Figur 1	Översiktskarta	26
Figur 2	förenklad bergundsgeologi.....	27
Figur 3:	totalhalt krom över totalhalt järn	28
Figur 4:	Totalhalt kobolt över totalhalt järn	28
Figur 5:	totalhalt vanadin över totalhalt järn.....	29
Figur 6:	totalhalt koppar över totalhalt järn	29
Figur 7:	totalhalt nickel över totalhalt järn	30
Figur 8:	totalhalt zink över totalhalt järn.....	30
Figur 9:	totalhalt lantan över produkten av totalt järn, kalcium och aluminium samt COD	31
Figur 10:	totalhalt samarium över produkten av totalt kalcium, järn och aluminium samt COD	31
Figur 11:	totalhalt ytterbium över totalhalt kalcium, järn och aluminium samt COD.....	32
Figur 12:	totalhalter av lantanider normaliserade mot <i>the North American Shale Composite (NASC)</i>	32
Figur 13:	lösta halter av lantanider normaliserade mot <i>the North American Shale Composite (NASC)</i>	33
Figur 14:	löst lantan över löst järn x COD.....	33
Figur 15:	löst ytterbium över löst järn x COD.....	34
Figur 16:	totalhalt uran över alkalinitet.....	34
Figur 17:	totalhalt torium över totalhalt lantan	35

BILAGOR



BILAGA A

Stora Tabeller

BILAGA B

Figurer

BILAGA C

Provpunkter med tillhörande avrinningsområden

BILAGA D

Fältanteckningar och foton

BILAGA E

ALS Scandinavia, provtagningsförfarande

BILAGA F

Analysresultat och chain-of-custody dokumentation

Bilaga B6

Tillförel till Vättern från ammunition

Innehåll

Bilaga B6 - Tillförel till Vättern från ammunition.....	2
--	----------

Bilagan finns att läsa i sin helhet i PDF-versionen av rapporten som finns att hämta på www.vattern.org

Bilaga B7

Metallbalansmodell på landskapsnivå

Innehåll

Bilaga B7 – Metallbalansmodell på landskapsnivå	2
7.1 Metallbalansmodellens uppbyggnad och implementering	2
7.2 Matematisk beskrivning av Metallbalansmodellen	3
7.3 Modellresultat – översikter för alla ämnen	5
7.4 Modellresultat - fastläggning och sedimentation	11
7.5 Modellresultat - per ämne	13
7.5.1 Modellresultat för zink	13
7.5.2 Modellresultat för bly	15
7.5.3 Modellresultat för koppar	17
7.5.4 Modellresultat för kadmium.....	19
7.5.5 Modellresultat för nickel	21
7.5.6 Modellresultat för krom	23
7.5.7 Modellresultat för arsenik	25
7.5.8 Modellresultat för kvicksilver	27
7.5.9 Modellresultat för kobolt	29
7.5.10 Modellresultat för klorid	31
7.5.11 Modellresultat för uran	33
7.5.12 Modellresultat för lantan och cerium.....	35
7.5.13 Modellresultat för kisel, aluminium, kalium, kalcium, mangan, järn, molybden och tenn.	37

Bilagan finns att läsa i sin helhet i PDF-versionen av rapporten som finns att hämta på www.vattern.org



Rapport 123