

# Markgeokemiska kartan

Markgeokemi i västra Svealand,  
tätortsgeokemi i Karlstad  
*Geochemical maps of western Svealand,  
urban geochemistry in Karlstad*

Madelen Andersson





# **Markgeokemiska kartan**

**Markgeokemi i västra Svealand,  
tätortsgeokemi i Karlstad**  
*Geochemical maps of western Svealand,  
urban geochemistry in Karlstad*

Madelen Andersson

ISSN 1652-8336

ISBN 978-91-7403-307-6

Omslagsbild: Moränlokal i trakten av Arvika. Foto: Madelen Andersson.

*Cover: Sample site of till in the vicinity of Arvika. Photo: Madelen Andersson.*

Layout: Johan Sporrang

## INNEHÅLL

<b>Geokemisk kartering vid SGU</b> .....	<b>5</b>
<b>Användning av de markgeokemiska kartorna</b> .....	<b>6</b>
<b>Provtypen morän</b> .....	<b>7</b>
<b>Metodik</b> .....	<b>8</b>
Provtagning .....	8
Provberedning .....	8
Randomisering .....	8
Analysering .....	8
Kvalitetskontroll .....	9
<b>Databehandling</b> .....	<b>9</b>
Percentilindelning .....	9
Kartor .....	12
<b>Elementens förekomst och rörlighet</b> .....	<b>12</b>
Geologiska förutsättningar .....	12
Markprocesser .....	14
Lakbarhet och associationer .....	15
<b>De kemiska elementen i näringskedjan</b> .....	<b>16</b>
<b>Miljögeokemi</b> .....	<b>17</b>
<b>Områdets geologi</b> .....	<b>17</b>
Berggrunden .....	17
Mineraliseringar .....	19
Kvartärgeologisk historia .....	19
<b>Geokemi i området – elementens förekomst och associationer</b> .....	<b>23</b>
<b>Tätortsgeokemi</b> .....	<b>24</b>
Karlstad .....	24
<b>Summary</b> .....	<b>25</b>
<b>Referenser</b> .....	<b>26</b>
<b>Bilaga 1. Regionala markgeokemiska kartor</b> <i>Regional geochemical maps of till and other sediments</i> .....	<b>29</b>
<b>Bilaga 2. Tätortsgeokemiska kartor</b> <i>Urban geochemical maps</i> .....	<b>68</b>
<b>Bilaga 3. Översiktlig elementbeskrivning</b> <i>General description of elements</i> .....	<b>86</b>



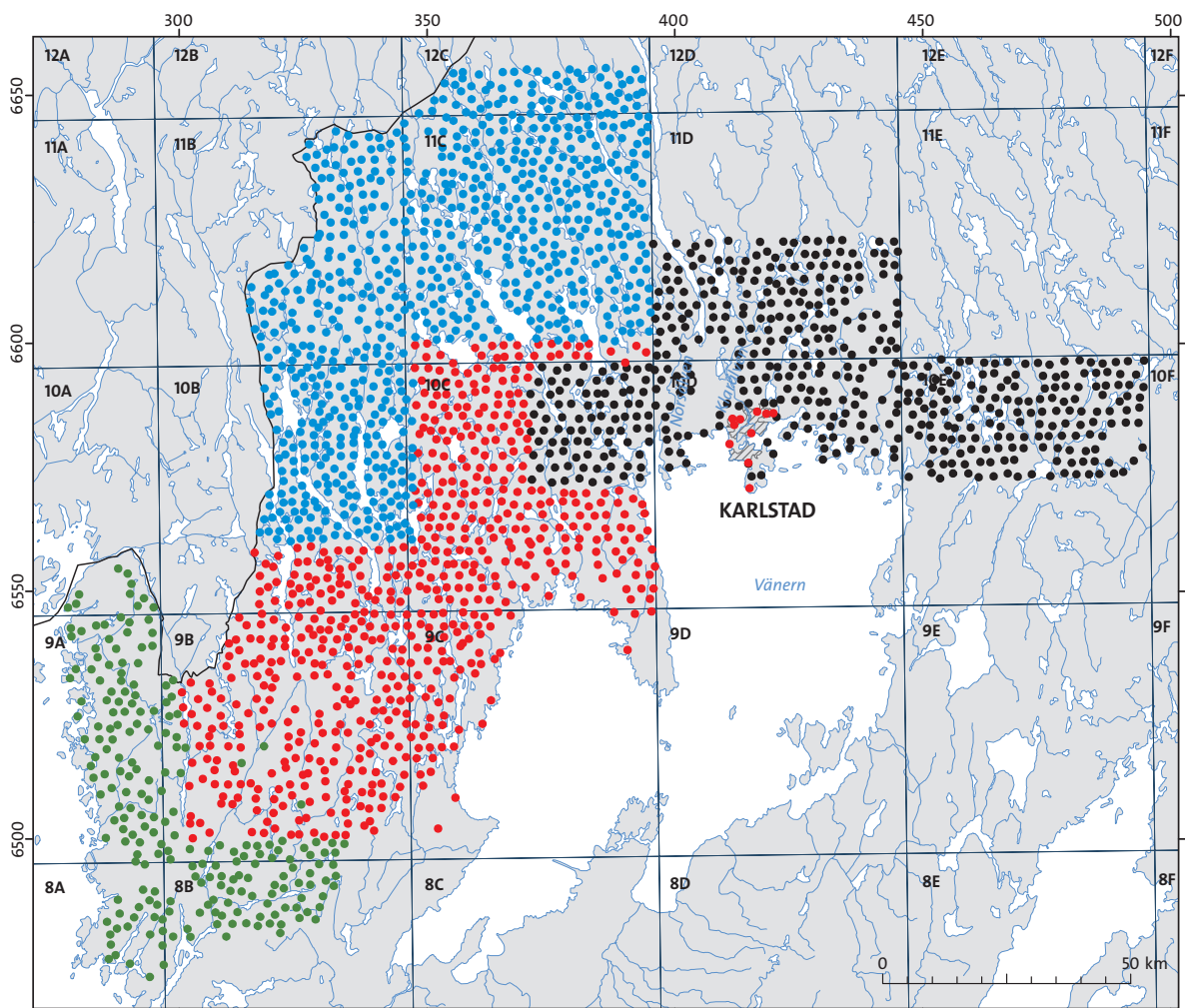
## GEOKEMISK KARTERING VID SGU

Geokemisk kartering vid SGU bedrivs huvudsakligen i syfte att visa den naturliga förekomsten av huvudämnen och spårämnen samt pH i mark och vatten. Med regional markgeokemisk kartering provtas och analyseras finfraktionen av morän och sediment (leror, silt och sand). Biogeokemisk kartering, som ägde rum 1982–2006, visar innehållet av grundämnena i bäckvattenväxter vilket indirekt avslöjar innehållet i det förbibrinnande vattnet.

Kartläggning av den aktuella regionen omfattar ett ca 15 700 km<sup>2</sup> stort område i delar av Värmland, Dalsland och Bohuslän. Rapporten kan ses som en fortsättning av de markgeokemiska undersökningar som tidigare publicerats i SGUs serier Rapporter och meddelanden, Gk samt K (se t.ex. Andersson 2004, Andersson 2006, Andersson m.fl. 2007).

Rapporten baseras på kemiska analyser av morän och sediment insamlade under fyra provtagningsår (2008–2011) och lika många analysår (fig. 1). Den markgeokemiska informationen har tagits fram som kartor och statistik med syftet att visa enskilda grundämnens regionala frekvens och distribution. De flesta analyserade element som uppfyller stipulerade krav på analyskvalitet redovisas.

Kartor över de kemiska parametrarna baseras på moränprov som normalt är tagna på ca 0,6–1,2 m djup och analyserade på finfraktionen (<0,063 mm) och sedimentprov från 1 m djup. För morän och



### Provtagningsår

- 2008
- 2009
- 2010
- 2011

Figur 1. Provtagningsår med morän (2 135 lokaler) och sediment (446 lokaler, ej med på karta). Kartblad enligt koordinatsystem RT90.

Years with sampling of till (2 135 sites) and sediments (446 sites, not shown on the map). Map sheet according to coordinate system RT90.

sediment har kartor framställt av Ag, Al, As, Ba, Be, Bi, Ca, Cd, Ce, Co, Cr, Cu, Fe, K, La, Li, Mg, Mn, Mo, Na, Ni, P, Pb, pH, Rb, Sc, Sn, Sr, Th, Ti, Tl, U, V, Y, Zn och Zr. För morän finns även kartor över Au, Sb, Ta och Te.

Ett särskilt avsnitt i rapporten beskriver tätortsgeokemisk undersökning i Karlstad. Utöver provtagning av morän och sediment enligt den regionala metoden har också den ovanliggande ytliga jorden provtagits på varje lokal, och från små vattendrag har vattenprov samt näckmossa i form av transplantat samlats in.

Rapporten har framställt av Madelen Andersson med hjälp av Magnus Ripa (berggrund, mineralisering) och Mikael Carlsson (kartframställning). Ansvarig för pH-mätningar har varit Birgitta Löwenhielm, för ICP-analyser Torsten Liljefors och Sten-Åke Ohlsson. För analyskvalitet svarar Anna Ladenberger och George Morris. Ett stort tack till Julio Gonzalez som har granskat rapporten och till Henrik Mikko som granskat avsnittet med kvartär historia.

År 2014 utkom ett par geokemiska publikationer som båda berör regionen. Den ena är Geokemisk atlas över Sverige (Andersson m.fl. 2014) som visar geokemiska elementmönster över hela landet, baserade på morän (2 578 prov), bäckvattenväxter (38 066 prov) och betesmark (179 prov). Provtätheten för den geokemiska atlasens moränprov är 1 prov per 150 km<sup>2</sup>, till skillnad från provtätheten i denna rapport som är 1 prov per 6–7 km<sup>2</sup>. Den andra publikationen är Chemistry in Europe's agricultural soils, som i två band behandlar geokemin i åkermark och betesmark (Reimann m.fl. 2014).

## ANVÄNDNING AV DE MARKGEOKEMISKA KARTORNA

Markgeokemiska data används bland annat inom mineralprospektering, miljöövervakning, markforskning, skogsbruk, kommunal planering och medicinsk forskning. Eftersom provtypen avspeglar den naturliga metallhalten i marken kan de markgeokemiska resultaten med fördel användas som bakgrundsinformation vid undersökning av förorenad mark och bedömning av vattenkvalitet. Med teman som malmetning, försurning, recipientskydd och förorenad mark kan kartor och information tas fram anpassade till relevanta verksamhetsområden.

Kartorna, som visar den naturliga förekomsten av grundämnen i marken, ger information om halter av huvudelement och spårämnen i miljön med avseende på det geologiska ursprunget. Antropogen påverkan, förutom i tätorter, bidrar ytterst sällan eller lite till de förekomster av metaller och andra element som uppmäts. I Sverige anses ett undantag från detta vara områden runt Falun, som förorenats av den långvariga gruvdriften vid Falu koppargruva (Ek m.fl. 2001). Endast om föroreningen är kraftig kan påverkan ses, och då i allmänhet bara i utsläppskällans omedelbara närhet. Sådana platser undviks i möjligaste mån vid provtagning.

Man kan däremot fråga sig hur omfattande spridningen till miljön varit och är av människans långvariga bruk av metaller. Redan för flera tusen år sedan bearbetades koppar och guld, t.ex. till smycken, och under hela den förindustriella epoken har keramik, glas, vapen, färgämnen och läkemedel tillverkats. Oavsiktlig och omfattande spridning av metaller har gjort att zink, tenn, bly, kobolt, kadmium, silver, arsenik, antimon m.fl. under mycket lång tid har cirkulerat i miljön. Det är främst i humus och ytlig jord man ibland kan spåra antropogent metalltillskott. I djupare jordlager kan man generellt anta att mängderna av dessa metaller är så låga att de inte kan särskiljas från naturliga halter. Ett undantag utgör antropogent tillfört svavel som på grund av sin höga mobilitet kan nå större markdjup.

Förekomst av element och deras spridningsmönster i opåverkad morän och andra sediment bildar olika naturliga geokemiska provinser, man kan säga att den geokemiska statusen varierar. Till exempel innebär hög förekomst av nyttiga, basiska ämnen i mineraljorden oftast att pH är relativt högt och att innehållet av vittringsbenägna mineral frigör tillräckligt med ämnen som växter och djur tillgodogör sig (gäller såväl huvudkomponenter som spårämnen och metaller). Den geokemiska statusen är därför god. Inom andra regioner kan i stället nyttiga ämnen förekomma i låga halter eller med låg lakbarhet, samtidigt som pH kan vara lågt. Den geokemiska statusen är därmed betydligt sämre.

Många av de nyttiga spårämnena kan samtidigt vara skadliga för hälsan om de förekommer med höga halter eller i olika associationer. Höga elementhalter kan i vissa fall indikera mineralisering,



vilket är av intresse vid malmprospektering, men kan också, speciellt i regioner med lågt pH, betyda att skadliga metaller riskerar att läcka ut till grundvattnet. Låga halter av ett essentiellt spårämne i marken indikerar en risk för att en bristsituation på det nyttiga ämnet kan uppstå eller redan råder.

## PROVTYPEN MORÄN

Jordarten morän förekommer över så gott som hela Sverige. Totalt anses ca 75 % av berggrunden vara täckt av morän (Sveriges Nationalatlas 1994). Moränen har generellt sett avsatts av flera inlandsisar, varav den senaste smälte för ca 14 000 år sedan i söder och ca 8 500 år sedan i norr. Isen eroderade berggrunden och transporterade iväg det nybrutna materialet tillsammans med varierande mängder äldre jordarter avlagrade före nedisningen.

Tre huvudtyper av morän förekommer: basalt deponerad morän, utsmältningmorän och flytmorän. Basalt deponerad morän avsätts under en aktiv glaciär genom att material i princip skrapas av mot underlaget. Resultatet blir ofta en hårt packad morän med relativt få strukturer. Den är ganska homogen vad avser utseende, textur och innehåll. Materialet i en morän av denna typ kan vara ganska korttransporterat och ger då i regel en bra spegling av den lokala berggrunden.

Utsmältningmorän bildas när materialet sakta smälter fram ur is som vanligen är stagnant. Denna process kan medföra att moränen på vissa ställen tvättas ur på finmaterial och tunga mineral som sedan kan anrikas t.ex. runt stenar. Moräntypen kan därför vara ganska inhomogen. Den kan dessutom ha sitt ursprung långt ifrån depositionsplatsen och därför ge en sämre spegling av den lokala berggrunden.

Flytmorän avsätts genom att vattenmättad morän skredar ut från t.ex. ett isberg. Den kan i detta sammanhang (geokemiska tolkningsmöjligheter) sägas ha samma egenskaper som utsmältningmorän. Såväl utsmältningmoräner som flytmoräner täcker ibland basalt deponerade moräner.

En basalt deponerad morän har vanligtvis en jämn eller regelbundet strömlinjeformad överyta. Utsmältningmoräner och flytmoräner bildar ett mer oregelbundet småkulligt landskap och kan innehålla olika strukturer med omväxlande grovt och finkornigt material. Om utsmältningprocessen sker långsamt blir dock resultatet en ganska massiv utsmältningmorän som kan vara svår att skilja från en basalt deponerad morän. Oavsett moräntyp finns ofta ett samband mellan andelen finkornigt material i moränen och metallinnehållet – ju större andel finkornigt material desto högre metallhalt, men det finns undantag från detta. Moränens sammansättning kan sammanfattningsvis sägas avspegla såväl modernmaterialet som de moränbildande processerna. För mer ingående diskussioner rörande olika moräntyper, strukturer och texturer se t.ex. Krüger (1979).

Transportlängden, som är en viktig parameter vid framför allt morängeokemisk malmprospektering, kan för moräner variera kraftigt. Det är här viktigt att skilja på transportlängder för olika kornstorleksfraktioner i moränerna. Allteftersom eroderade bergartsfragment nöts ner minskar t.ex. förekomsten av en bergart i blockfraktionen medan representationen i finare fraktioner ökar. Olika bergarter har också olika förmåga att motstå vittring och nötning. Sedimentära bergarter, t.ex. skifferar, nöts snabbt ner och finfraktioner kan därför påträffas ganska nära ursprungligt bergartsklyft. Magmatiska bergarter som graniter tål nötning bättre och de finaste fraktionerna kan ha transporterats betydligt längre.

Flera studier i Finland (Bouchard & Salonen 1990, Perttunen 1991, Sarala 2006) har visat att många moräner transporterats mindre än 20 km, och de flesta betydligt kortare. I Sverige visar undersökningar baserade på morängeokemi och blockspridning liknande resultat, med en transportlängd av ca 2–3 km i många områden (Sohlenius m.fl. 2009).

Trots att svårigheter vid tolkning ibland uppträder vad gäller komplexa bildningssätt för moräner, variationer i transportlängder etc. finns få alternativ till denna provtyp om avsikten är att få en bild av berggrundens generella sammansättning. Morän ses som kompositprov av moderbergarterna.

## **METODIK**

### **Provtagning**

För karteringsändamål insamlas moränproven med kriterierna att de ska vara representativa för regionen och om möjligt vara av normal typ (s.k. sandig morän). Provtagningen sker förutsättningslöst, dvs. ingen hänsyn tas till förekomst av malmer, mineraliseringar eller bergartstyper, men potentiellt förorenade områden ska undvikas.

Kartor, vanligen i skala 1:50 000, används för att lägga ut ett rutnät med tämligen jämn fördelning av proven och om möjligt vinkelrätt mot de isrörelseriktningar som finns dokumenterade. Avståndet mellan proven är normalt ca 2,5 km, vilket innebär att det samlas in ungefär 15 prov per kvadratmil. Vid provtagningen genomgrävs markprofilen för hand med spade och spett. Man får därigenom god möjlighet att upptäcka om provet av någon anledning är olämpligt att ta, på grund av svallning, växtrötter, djupt gående markprocesser, underliggande sediment etc. Om B-horisonten eller svallkappan är för mäktig för att grävas igenom, där håll påträffas nära markytan eller där materialet är för blött för att kunna provtas, flyttas provpunkten något. Provdjupet varierar efter förhållandena men är normalt 0,6–1,2 m. Provet, som uppgår till ca 0,8 kg, tas sedan ett stycke ner i C-horisonten genom att material slås loss på några ställen i gropens botten. Analyserna från dessa prov utgör därför en relativt homogen och jämförbar statistisk population, där förutsättningarna för grundämnenas haltvariation bygger på olikheter i ursprunglig kemisk sammansättning. Sedimentproven tas på 1 m djup men geografiskt har de ofta inte samma utbredning som moränprov. En skillnad mellan de båda provtyperna är att det är betydligt färre faktorer som påverkar moränens metallhalt än vad gäller sedimentens. Moränens C-horisont är så gott som uteslutande geologiskt relaterad och kan lättare kopplas till berggrunden. Lerorna och övriga finkorniga sediments elementhalter påverkas av fler faktorer. Sedimentationsprocessen i sig kan t.ex. medföra anrikning av mineral och därmed omfördelning av element.

### **Provberedning**

Proven vakuumtorkas och siktas på nylonsiktare med maskvidder på 2 mm och 0,063 mm. Anledning till att proven fraktioneras före analys är att den så kallade finfraktionen (<0,063 mm) så gott som uteslutande innehåller monomineralkorn. Grövre fraktioner har korn som består av flera olika mineral, vilket ökar haltvariationen vid upprepad provtagning och analys. Det är därmed svårare att ta representativa prov och att få reproducerbarhet i analyserna om grövre fraktioner analyseras. Finfraktionen behöver inte heller malas före analys, vilket annars kan ge oönskad kontaminering av proven.

I samband med siktningen testas samtliga prov med saltsyra (HCl) för att detektera eventuellt kalkinnehåll. Fraktionerna över 0,063 mm samt den mängd material <0,063 mm som inte behövs för analys arkiveras för eventuella framtida analyser.

### **Randomisering**

Före analys görs en slumpvis ny numrering av proven, som tillsammans med 5 % kontrollprov utgör populationen för analys. Randomiseringen görs för att undvika den systematiska variation i elementkoncentrationer som annars är vanlig vid ett laboratoriums analysering av provmaterial.

### **Analysering**

Omkring 55 grundämnen analyseras, men kan variera mellan åren. Analyserna görs av morän med kornstorlek <0,063 mm (i tätorter även <2 mm) och av sediment med kornstorlek <2 mm med hjälp av flera olika analysmetoder.

Analys av proven görs efter partiell lakning av 5 g prov med kungsvatten (aqua regia, A.R.) och av 2 g prov med salpetersyra (7M HNO<sub>3</sub>) med plasmateknik (ICP-MS) vid SGU. Moränproven (<0,063 mm) har även analyserats på totalhalter med röntgenfluorescens (XRF), men dessa analyser har varierande analytisk kvalitet och ingår inte i denna rapport.

Jordarternas surhetsgrad anges efter en pH-bestämning av proven efter uppslamning av 4 g prov i 20 ml avjoniserat vatten. Ytterligare en pH-mätning görs efter tillsats av utspädd svavelsyra (12,5 mM H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>). Med de båda mätningarna kan provets förmåga att motstå surt markvatten beräknas, dvs. dess buffertkapacitet eller försurningsresistens. Värt att notera är att pH ofta ligger 0,5–1 enhet lägre i fraktionen <0,063 mm jämfört med pH mätt i fraktionen <2,0 mm. Detta beror med all sannolikhet på att den finare fraktionen innehåller fler partiklar per gram torkat prov vilket ger större sammanlagd partikelyta. Det är vid markpartiklarna de vätejoner har adsorberats som man mäter i det uppslammade provet. Fler vätejoner medför alltså lägre pH-värde. Efter svavelsyratillsats finns en distinkt skillnad mellan fraktionerna: finmaterialet buffrar snabbare och pH sjunker alltså mer för grovfraktionen. Skillnaden är i genomsnitt –0,4 enheter. Eftersom pH-skalan är logaritmisk innebär varje sänkning med en pH-enhet att halten vätejoner i lösningen ökar tiofalt.

Det sammanlagda antalet element som analyseras uppgår till 57. Parametrar av fullgod eller tillfredsställande analytisk kvalitet som ingår i den geokemiska referenssamlingen är pH och pH1 (efter H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>). Analysresultat efter lakning med 7M salpetersyra omfattar 52 element: Ag, Al, As, B, Ba, Be, Bi, Ca, Cd, Ce, Co, Cr, Cu, Dy, Er, Eu, Fe, Gd, Ge, Ho, K, La, Li, Lu, Mg, Mn, Mo, Na, Nb, Nd, Ni, P, Pb, Pr, Rb, Sc, Se, Sm, Sn, Sr, Tb, Th, Ti, Tl, Tm, U, V, W, Y, Yb, Zn och Zr. Efter lakning med kungsvatten erhålls 13 element: Ag, As, Au, Bi, Cd, Cu, Mo, Rh, Sb, Sn, Ta, Te och U.

## Kvalitetskontroll

Vid all hantering av analyser är en omfattande kvalitetskontroll nödvändig. Mindre haltvariationer kan uppstå och uppstår i princip i varje enskilt skede vid en geokemisk kartering. Genom att undersöka dubbelprov (replik) tagna i fält undersöks den s.k. totalvariansen. I denna ingår skillnader som uppkommer på grund av småskalig inhomogenitet i moränens sammansättning, som normalt är relativt liten (undantaget guld som uppvisar en s.k. kluster- eller nuggeteffekt), samt varianser uppkomna vid torkning, siktning, uppvägning, lakning och analys. Även analysvariansen undersöks med hjälp av internt standardprov. Det bör påpekas att enbart kännedom om analysvariansen inte är tillräcklig för att bedöma resultatens användbarhet vid geokemisk kartering. Totalvariansen är en minst lika viktig och i vissa fall bättre bedömningsgrund.

Utifrån statistisk och visuell granskning kan fel upptäckas och åtgärdas, och endast grundämnen med god eller tillfredsställande kvalitet offentliggörs. För att få jämförbara resultat från år till år i det fortlöpande analysarbetet finns även kontrollprov inlagda. I dagsläget utgör ca 10 % av alla analyser någon form av kontrollprov. Kvalitetskontrollen påminner till stora delar om den som tillämpas vid Geologiska forskningscentralen i Finland (Salminen 1995). Randomiseringen av prov ökar ytterligare möjligheterna till kvalitetskontroll.

En svårighet vid kartframställning över stora områden är att hantera många års analyser. Även om de enskilda årens kvalitetskontroller har lämnat godkända analyser uppstår problem t.ex. med nivåskillnader i analysresultaten för en del element. Orsaken är oftast utvecklingen av analysinstrument som över åren ger allt säkrare analyser. En visuell kontroll av resultaten i kartform (där nya resultat jämförs med äldre) bör därför ske elementvis vid kartframställning. Med nivelleringsav analysvärden kan man skapa en homogen bild av elementens distribution. Ett antal prover från de ingående åren bör också analyseras om som hjälp för nivelleringsarbetet. I denna rapport har dock ingen nivelleringsav elementhalter gjorts mellan de fyra analysåren. Element som visar för stora nivåskillnader mellan analysåren och därför inte visas på karta är bor, germanium, niob, selen och wolfram.

## DATABEHANDLING

### Percentilindelning

Statistisk indelning efter percentiler görs för att ta fram elementens bakgrundshalter i en region, se tabell 1 och 2. I tabellerna används 10, 30, 50, 70, 90, 95 och 99:e percentilen, där 50:e percentilen utgör medianvärdet. 90:e percentilen innebär att 10 % av antalet analyser för ett specifikt element har halter som överstiger motsvarande analysvärde.

Tabell 1. Beräknade percentiler (p10–p99) för morän (<0,063 mm). Analysmetod: Lakning med salpetersyra eller kungsvatten (Au, Sb, Ta och Te) och analys med ICP-MS.

Calculated percentiles (p10–p99) for till (<0,063 mm). Analytic method: Extraction by nitric acid or aqua regia (Au, Sb, Ta and Te) and analyzed by ICP-MS.

n=2135	enhet	p10	p30	p50	p70	p90	p95	p99	max
Ag	mg/kg	0,018	0,024	0,031	0,041	0,063	0,079	0,137	1,03
Al	mg/kg	4 535	6 367	8 319	11 213	16 500	19 353	27 632	67 421
As	mg/kg	0,35	0,46	0,60	0,82	1,50	2,05	3,63	12
Au	µg/kg	<0,05	0,08	0,24	0,47	1,01	1,50	4,14	45
Ba	mg/kg	11	19	26	39	62	76	119	319
Be	mg/kg	0,19	0,26	0,34	0,45	0,66	0,78	1,20	5,5
Bi	mg/kg	0,06	0,08	0,09	0,12	0,18	0,23	0,51	15
Ca	mg/kg	1160	1748	2128	2457	2983	3251	4024	8643
Cd	mg/kg	0,027	0,037	0,046	0,057	0,080	0,099	0,168	1,9
Ce	mg/kg	29,0	38,7	47,0	58,0	87,1	108,9	164,8	317
Co	mg/kg	1,3	2,1	3,0	4,3	6,8	8,3	13,2	69
Cr	mg/kg	2,9	4,6	6,5	9,8	16,7	21,3	36,5	61
Cu	mg/kg	3,1	5,6	8,4	12,4	23,1	31,3	54,2	209
Dy	mg/kg	1,4	1,7	2,0	2,3	3,2	3,6	5,4	11
Er	mg/kg	0,8	0,9	1,1	1,3	1,7	2,0	2,9	7
Eu	mg/kg	0,31	0,39	0,45	0,53	0,70	0,81	1,17	2,6
Fe	mg/kg	4 063	6 087	8 069	11 011	16 256	18 813	26 981	73 569
Gd	mg/kg	2,1	2,6	3,0	3,5	4,8	5,6	8,5	18
Ho	mg/kg	0,26	0,33	0,38	0,45	0,60	0,68	1,03	2,16
K	mg/kg	321	551	821	1243	2160	2749	4192	10 810
La	mg/kg	13,4	16,8	19,7	23,4	31,5	37,2	54,6	203
Li	mg/kg	2,2	3,6	5,4	8,3	14,1	17,9	29,3	95
Lu	mg/kg	0,09	0,12	0,13	0,16	0,21	0,24	0,35	1,1
Mg	mg/kg	873	1543	2 227	3 449	5 505	6 412	9 945	38 204
Mn	mg/kg	68	103	138	195	314	397	603	1220
Mo	mg/kg	0,09	0,14	0,19	0,27	0,52	0,77	1,68	18
Na	mg/kg	83	113	131	152	193	222	356	3 891
Nd	mg/kg	11,1	13,9	16,6	19,6	25,8	30,2	44,1	117
Ni	mg/kg	2,0	3,1	4,5	7,1	11,9	15,1	25,0	146
P	mg/kg	298	526	645	751	914	1034	1281	2742
Pb	mg/kg	3,3	4,4	5,4	6,9	10,6	13,0	21,7	124
Pr	mg/kg	3,0	3,7	4,3	5,0	6,5	7,4	10,9	33
Rb	mg/kg	3,2	5,7	8,9	14,3	25,3	31,5	44,6	174
Sb	µg/kg	24	35	48	67	114	156	295	1210
Sc	mg/kg	1,3	1,6	2,0	2,4	3,2	3,7	5,0	14
Sm	mg/kg	2,0	2,5	2,9	3,5	4,7	5,4	8,1	16
Sn	mg/kg	0,14	0,21	0,26	0,32	0,43	0,50	0,70	1,3
Sr	mg/kg	5,4	7,3	8,9	10,9	14,8	17,1	22,0	42
Ta	µg/kg	2,9	5,1	10,1	20,0	42,0	54,9	89,5	162
Tb	mg/kg	0,26	0,32	0,38	0,44	0,60	0,69	1,02	2,2
Te	µg/kg	9,4	13,2	16,7	21,4	30,7	37,8	63,8	165
Th	mg/kg	4,7	6,3	7,5	9,3	12,5	14,3	19,5	47
Ti	mg/kg	454	627	771	935	1223	1373	1893	3597
Tl	mg/kg	0,03	0,05	0,07	0,10	0,17	0,21	0,31	1,9
Tm	mg/kg	0,10	0,12	0,14	0,17	0,23	0,26	0,37	1,1
U	mg/kg	0,8	1,1	1,3	1,7	2,6	3,4	7,3	56
V	mg/kg	9	12	16	20	30	35	48	148
Y	mg/kg	6,9	8,8	10,2	12,2	16,3	18,7	28,5	80
Yb	mg/kg	0,6	0,8	1,0	1,1	1,5	1,7	2,4	7,7
Zn	mg/kg	10	15	21	29	44	52	92	332
Zr	mg/kg	2,4	3,5	4,6	6,3	9,5	11,3	16,6	28
pH		4,8	5,0	5,1	5,3	5,5	5,7	6,3	7,4

Tabell 2. Beräknade percentiler (p10–p99) för sediment (<2 mm). Analytisk metod: Lakning med salpetersyra och analys med ICP-MS.  
*Calculated percentiles (p10–p99) for sediments (<2 mm). Analytic method: Extraction by nitric acid and analyzed by ICP-MS.*

n=446	enhet	p10	p30	p50	p70	p90	p95	p99	max
Ag	mg/kg	0,03	0,05	0,07	0,09	0,15	0,17	0,21	0,24
Al	mg/kg	4134	9116	13174	16299	20404	22240	26034	30165
As	mg/kg	0,48	1,15	1,85	2,67	4,71	5,62	7,89	12
Ba	mg/kg	19	46	73	95	120	145	197	239
Be	mg/kg	0,23	0,48	0,74	0,91	1,21	1,40	1,74	2,0
Bi	mg/kg	0,05	0,11	0,15	0,18	0,28	0,33	0,47	0,54
Ca	mg/kg	1208	2238	3229	3886	4798	5407	7089	100085
Cd	mg/kg	0,025	0,039	0,053	0,069	0,121	0,155	0,381	0,642
Ce	mg/kg	27	53	82	100	125	135	166	181
Co	mg/kg	2,1	4,9	7,1	9,4	12,0	13,1	15,8	18
Cr	mg/kg	5,6	12,0	17,5	22,6	29,9	34,5	41,4	59
Cu	mg/kg	3,2	8,1	11,9	15,4	21,4	24,5	31,8	35
Dy	mg/kg	1,2	2,6	3,8	4,6	5,6	5,9	7,3	7,8
Er	mg/kg	0,7	1,4	2,2	2,6	3,2	3,4	4,3	4,5
Eu	mg/kg	0,29	0,61	0,87	1,05	1,23	1,30	1,57	1,80
Fe	mg/kg	5915	14352	20539	25324	32322	35799	41954	50022
Gd	mg/kg	1,9	4,2	6,0	7,1	8,5	9,0	11,2	12,5
Ho	mg/kg	0,23	0,50	0,74	0,89	1,07	1,14	1,44	1,53
K	mg/kg	598	1643	2822	3699	4983	5755	6445	7032
La	mg/kg	13,7	25,8	39,0	48,8	60,8	66,7	78,8	91
Li	mg/kg	5,2	10,4	14,4	18,6	25,0	29,3	36,1	40,6
Lu	mg/kg	0,09	0,17	0,27	0,33	0,41	0,44	0,54	0,59
Mg	mg/kg	1761	3592	5613	7243	9042	10323	11584	12744
Mn	mg/kg	90	237	407	563	757	888	1368	2334
Mo	mg/kg	0,09	0,17	0,26	0,37	0,82	1,45	7,57	26
Na	mg/kg	66	144	235	326	480	583	760	1620
Nd	mg/kg	10,7	22,7	32,8	39,0	47,3	49,5	61,5	74
Ni	mg/kg	3,3	7,5	11,5	15,2	20,9	23,4	28,5	35
P	mg/kg	329	480	569	647	772	856	977	1204
Pb	mg/kg	3,4	7,1	9,3	11,8	17,3	20,0	26,2	31,5
Pr	mg/kg	2,9	5,5	8,1	9,5	12,3	13,5	17,0	20,6
Rb	mg/kg	7,1	20,6	33,0	43,2	54,4	61,6	72,5	77,7
Sc	mg/kg	1,2	2,7	3,9	4,8	6,0	6,6	7,9	9,2
Sm	mg/kg	1,9	4,1	6,0	7,1	8,5	8,9	11,0	12,8
Sn	mg/kg	0,07	0,15	0,21	0,28	0,36	0,38	0,45	0,84
Sr	mg/kg	6	15	22	28	36	39	48	470
Tb	mg/kg	0,23	0,50	0,73	0,87	1,05	1,12	1,39	1,49
Th	mg/kg	4,2	7,7	10,5	12,6	15,5	17,2	20,7	25,8
Ti	mg/kg	331	580	823	1030	1282	1464	1764	2043
Tl	mg/kg	0,06	0,14	0,21	0,27	0,33	0,36	0,45	0,49
Tm	mg/kg	0,09	0,18	0,28	0,34	0,41	0,44	0,55	0,59
U	mg/kg	0,8	1,5	2,0	2,8	4,3	5,1	7,9	13,7
V	mg/kg	11	24	34	41	51	55	66	70
Y	mg/kg	6,6	13,1	20,8	25,5	32,1	34,7	42,1	43,6
Yb	mg/kg	0,6	1,2	1,9	2,2	2,7	2,9	3,6	4,0
Zn	mg/kg	17	34	47	60	77	84	101	125
Zr	mg/kg	2,8	7,6	10,8	15,9	24,0	27,5	32,5	38,0
pH		5,4	6,3	6,8	7,0	7,4	7,6	8,1	8,8

## Kartor

I bilaga 1 redovisas element (och pH) som kartor. För element med för stora nivåskillnader saknas kartor (se ovan). Alla sällsynta jordartsmetaller återfinns inte heller som karta av orsaken att alla har ett enhetligt distributionsmönster. Kartor över cerium och lantan får representera den lätta gruppen av sällsynta jordartsmetaller. Yttrium representerar den tunga gruppen på grund av liknande kemiska egenskaper.

Färgkartorna är gjorda efter att de geografiskt oregelbundet placerade analysvärdena gjorts om till ett regelbundet punktnät (*grid*) med interpolerade värden. Den färgade ytan visar endast ett matematiskt beräknat värde, och ska därför behandlas med viss försiktighet. Metoden innebär också att den färgade ytan kommer att täcka områden mellan provtagningsplatserna. Observera också att ingen nivellering av elementhalter gjorts mellan de fyra analysåren vilket kan påverka elementmönstret på en karta.

Färgskalorna för markgeokemiska elementkartor är satta från grönt (låga halter för elementen, höga pH-värden) till rött (höga halter för elementen, låga pH-värden). Färgskalan är relativ och används för att kunna sätta olika geokemiska regioner i relation till varandra. Oberoende av färgskala är det viktigt att påpeka att höga halter eller andra värden inte automatiskt innebär att det t.ex. finns någon risk för negativ miljöpåverkan. Klassindelningen med percentiler på färgkartorna grundar sig på denna rapport's dataset för morän respektive sediment.

Bilaga 2 innehåller ett urval kartor över Karlstad. Kartorna har gjorts för att visa fördelningen av element i olika provmedia. Kartornas klassindelning med symboler i växande storlek har gjorts i Arc Map med klassificering Natural breaks.

## ELEMENTENS FÖREKOMST OCH RÖRLIGHET

### Geologiska förutsättningar

Berggrundens kemiska sammansättning varierar beroende på de ingående bergarternas sammansättning och proportioner. Halterna av många metaller är t.ex. jämförelsevis låga i de sura bergarter som dominerar den svenska berggrunden. I basiska bergarter finns däremot högre innehåll av bl.a. järn, magnesium, kobolt, koppar, krom och nickel. Om skifferinslag finns blir halterna ofta betydligt högre eller mycket höga för en del spårämnen, t.ex. uran. I tabell 3 visas huvudsaklig bergartstillhörighet för element i vanligt förekommande bergarter i Sverige.

Huvudskillnader mellan sura och basiska bergarter är generellt kiselhalterna, höga i sura bergarter och låga i basiska bergarter. Dessutom är magnesium- och järnhalterna höga i basiska bergarter och låga i sura bergarter vilket resulterar i att basiska bergarter i allmänhet är mörka och sura ljusa. I tabell 4 visas medelhalterna för element i olika vanligt förekommande bergarter i Finland (Koljonen 1992, Tauber 1988), vars bergarter är relativt lika jämfört med Sveriges.

Moräners innehåll av olika mineral beror till största delen på de ingående bergarternas varierande kemiska sammansättning. I tabell 5 visas det genomsnittliga innehållet i morän oavsett ingående bergarter. Tabellen baseras på markgeokemiska analyser av ca 25 000 moränprov från C-horisonten. Beträktar man viktsrelationen av grundämnena är det lätt att förstå varför man kallar en del huvudelement och andra spårämnen; en del förekommer helt enkelt i större mängd än andra. På det djupa moränproven insamlas är förekomsten av organiskt material mycket liten, men i vissa fall kan djupa tunna rottrådar eller rester av sådana medföra att kol förekommer. I ett tidigare test av kolinnehållet i ett tiotal moränprov från Norrbotten visade det sig att kolinnehållet varierade mellan 0,05 och 0,70 % (medianvärde 0,11 %).

Olika bergarter har olika mineralinnehåll som ofta avslöjas i form av distinkta geokemiska elementmönster i moränen. Genom att studera geokemiska mönster kan man få en uppfattning om mineralinnehållet. Exempelvis indikeras basiska bergarter och diabaser av förhöjda halter av kalcium, järn, magnesium, kobolt, koppar, krom, nickel, vanadin m.fl. i moränen. Granitiskt och pegmatitiskt bergartsmaterial ger sig till känna som förhöjda halter av bland annat bly, uran, tenn, wolfram och molybden.

Elementmönstren visar också påverkan från den kvartära historien. Moränen i ett område kan ha transporterats mer eller mindre långt och kan ha en något annorlunda sammansättning än den underliggande berggrunden. Tydligast syns detta där t.ex. ett granitiskt berggrundsområde har en

Tabell 3. Bergartstyper med associerade element.

*Rock types with associated elements.*

Bergarter	Förhöjda halter
Granit	Au, Ba, Be, Bi, Cl, K, La, Mo, Pb, Rb, Sn, Th, Tl, U, W, Y, Zr
Kiselrika vulkaniska bergarter (ryolit, andesit m.fl.)	Ag, As, Cd, Cu, Hg, Pb, Se, Zn
Kiselfattiga magmatiska bergarter (gabbro, basalt m.fl.)	Ca, Fe, Mg, Mn, P, Ag, Cd, Co, Cr, Cu, Ni, S, Sr, Ti, V, Zn
Skiffer	Al, Ag, As, Au, Ba, Bi, Cd, Cl, Co, Cu, La, Li, Mo, Ni, Pb, Rb, S, Sb, Sn, Se, Th, Tl, U, W, Y, Zn

Tabell 4. Medelhalter av element i olika bergarter (mg/kg).

*Average concentrations of elements in different rock types (mg/kg).*

Element	Ultramafiska bergarter <sup>1</sup>	Gabbro, basalt <sup>1</sup>	Skiffer <sup>1</sup>	Graniter, granodioriter <sup>1</sup>	Sandstenar <sup>1</sup>	Kalkstenar <sup>1</sup>	Kol <sup>2</sup>
Aluminium	20 000	83 000	91 000	73 000	37 000	4 000	21 000
Antimon	0,1	0,2	1	0,3	0,05	0,15	2
Arsenik	0,7	0,7	13	3	0,5	1,5	10
Barium	5	330	550	600	300	90	250
Beryllium	0,3	1	3	5	0,7	0,5	1
Bly	0,05	4	22	20	10	5	20
Fosfor	220	1200	800	750	30	350	150
Gallium	0,5			18	8	1	
Guld	0,0005			0,002	0,0005	0,0001	
Järn	94 000	86 000	55 000	20 000	10 000	5 000	10 000
Kadmium	0,05	0,2	0,25	0,1	<0,04	0,1	1
Kalcium	25 000	74 000	22 000	9 000	13 000	380 000	5 000
Kalium	5 000	8 000	27 000	33 000	11 000	3 000	3 500
Kisel	201 000	227 000	288 000	337 000	403 000	31 000	34 000
Klor	80			200	10	150	
Kobolt	110	45	20	4	0,3	0,1	10
Koppar	40	90	45	12	2	6	20
Krom	2 300	250	100	10	35	5	20
Kvicksilver	0,004	0,01	0,18	0,003	0,001	0,02	0,1
Lantan	1	6	40	50	20	6	10
Litium	2	10	60	30	10	5	30
Magnesium	208 000	64 000	16 000	5 000	7 000	4 000	2 600
Mangan	1200	1500	850	400	100	700	40
Molybden	0,3	1,2	2	1,5	0,3	0,3	3
Natrium	6 000	20 000	13 000	25 000	17 000	6 000	900
Nickel	2 000	130	70	5	2	5	20
Niob	1			18	10	0,1	
Rubidium	2	30	140	120	40	4	15
Selen	0,07	0,12	0,3	0,025	0,01	0,025	3
Silver	0,03	0,1	0,08	0,05	0,003	0,01	0,1
Strontium	10	400	250	220	100	500	150
Svavel	600	900	1100	100	200	500	20 000
Tallium	0,05	0,18	1	1,1	0,4	0,05	3
Tenn	0,3			3,6	0,6	0,3	
Titan	3 000	10 000	6 000	3 000	1 500	400	1 000
Torium	0,05	2,2	12	15	5	2	2
Uran	0,02	0,5	3,2	4	1,3	1	2
Vanadin	80	260	130	70	20	15	40
Vismut	0,01	0,05	0,25	0,2	0,05	0,1	-
Wolfram	0,3			1,5	1	0,5	
Yttrium	2	20	30	35	15	4	3
Zink	60	100	100	50	20	40	50
Zirkonium	30			200	250	20	

<sup>1</sup> Koljonen (1992)

<sup>2</sup> Tauber (1988)

Tabell 5. Innehåll av olika grundämnen i 1 kg svensk morän (C-horisont, fraktion <0,063 mm) i gram. Data från SGUs markgeokemiska databas.

*Concentrations of various elements in 1 kg swedish till (C-horizon, fraction <0.063 mm) in gram. Data: SGU's geochemical database.*

Syre	478,4	Lantan	0,013
Kisel	330,5	Koppar	0,012
Aluminium	72,5	Litium	0,011
Järn	25,4	Brom	<0,010
Kalium	24,2	Wolfram	<0,010
Natrium	16,8	Torium	0,007
Kalcium	15,2	Arsenik	0,006
Magnesium	7,7	Uran	0,003
Titan	4,5	Tenn	0,001
Fosfor	1,0	Beryllium	0,00041
Barium	0,52	Molybden	0,00039
Zirkonium	0,46	Selen	0,00023
Mangan	0,45	Antimon	0,00019
Strontium	0,17	Tallium	0,00018
Svavel	0,15	Silver	0,00015
Rubidium	0,086	Vismut	0,00011
Klor	0,073	Kadmium	0,00009
Vanadin	0,057	Guld	0,000001
Zink	0,052	Platina	<0,000001
Krom	0,049	Palladium	<0,000001
Bly	0,023	Övrigt (kol, väte, kväve, andra spårelement)	21,6
Kobolt	0,019	Summa	1000
Nickel	0,016		

ovanliggande morän med inslag av basiska bergarter. Moränen har då högre halter av t.ex. magnesium i en region som i övrigt har låg halt av magnesium. Det kan också finnas flera moränbäddar i en region och den man provtar på en lokal kanske inte är samma moränbädd som på en annan lokal. Detta, tillsammans med att isen fört med sig såväl gamla jordarter som nybrutet bergartsmaterial och avsatt det som morän, gör att de geokemiska mönstren ibland kan vara komplexa och svårtolkade. De geokemiska elementmönstren kompletterar ofta den isrörelseriktning som indikeras av isräfflor och kan också vid mer noggranna studier användas bl.a. som indikation på transportlängd av bergartsmaterial. Andra faktorer som kan påverka de geokemiska mönstren är tunna jordtäcken, deposition av svavel och andra luftburna havsaerosoler och föroreningar samt hög nederbörd (Andersson 2006).

## Markprocesser

Vertikalt i marken varierar den kemiska sammansättningen bl.a. på grund av jordmånsbildande markprocesser. Vilken typ av jordmån (markprofil) som bildas beror på ett flertal faktorer, bland annat jordart, mineralinnehåll, markanvändning, vegetation och klimat. Den vanligaste jordmånen i svensk skogsmark är podsol, som utvecklas i näringsfattiga marker (fig. 2). I dess översta mineraljordshorisont, blekjorden, har kemiska och biologiska processer lakat ur de flesta huvudämnen och metaller. Några av dessa, t.ex. järn och aluminium, har fällts ut i den underliggande, ofta rostfärgade B-horisonten. Den kemiska sammansättningen i dessa båda markskikt beror främst på innehållet av primära (bergartsbildande) mineral och på sekundära mineral och föreningar som bildats vid vittring och urlakning. En del ämnen kan dock tillföras via luft och nederbörd. Denna föroreningsfaktor tilltar i betydelse i befolkningstäta eller industriintensiva områden. Under B-horisonten, i C-horisonten, har markprocesserna ingen eller liten effekt på mineraljorden och grundämnena förekommer så gott som uteslutande i primära mineral. Undantag från detta är t.ex. vissa sulfidmineral som är instabila ovan grundvattenytan. Metaller som frigjorts när dessa mineral vittrat har istället fastlagts i andra former, exempelvis genom jonbytesprocesser (t.ex.  $\text{Cu}^{2+}$  för  $\text{K}^+$  i biotit).



## Lakbarhet och associationer

Ett mått på elementens rörlighet är deras lakbarhet, som varierar kraftigt beroende på vilka mineral de sitter bundna i. Hög lakbarhet för ett element anger att en procentuellt stor del av den totala tillgången på elementet blir lösligt vid en tillsats av syra, t.ex. salpetersyra eller kungsvatten. Detta anger elementets tillgänglighet på sikt för växterna och för markens neutralisationsförmåga. En låg lakbarhet anger däremot att elementet är hårt bundet i markmineralen och svåråtkomligt. En beräkning av lakbarheten har tidigare gjorts för upp till ca 23 000 moränprov insamlade i hela riket för den regionala karteringen (Holmberg 2006). Tabell 6 visar hur lakbarheten för vanliga element varierar från någon procent för natrium till närmare 90 % för fosfor och koppar.

Olika markmineral har i naturen olika benägenhet att vittra sönder, och det är genom vittring som elementen frigörs. Markmineralen kan därför grupperas efter sin vittringsbenägenhet i stigande grad från de nästan helt vittringsresistenta mineralen kvarts, rutil, titanit och zirkon < kalifältspat, muskovit, natriumrika plagioklaser < hornblände, biotit, klorit, vissa pyroxener < epidot, apatit, olivin, granat, pyroxener och kalciumrika plagioklaser och slutligen de mycket lättvittrade karbonaterna, t.ex. kalcit.

Ett och samma element kan uppträda i flera olika mineral och vara olika hårt bundet. Ett sådant element är kalcium som återfinns i de flesta nämnda mineralen, från den vittringsresistenta titaniten till den mycket lättvittrade kalciten. Kalium förekommer så gott som enbart i antingen de svårvittrade kalifältspaterna eller i mer lättvittrad biotit, medan magnesium främst finns i sådana mineral som vittrar tämligen lätt, dvs. i hornbländegruppen och uppåt. Variationer av lakbarheten för elementen i morän ger indirekt en uppfattning om provens mineralogiska sammansättning.

Tillgången av elementen beror alltså på mineralinnehållet i moränen och miljön som moränen befinner sig i, dvs. pH, oxiderande eller reducerande miljö etc. Förhållandet mellan olika element kan



Figur 2. Typisk provlokal i podsol från Värmland.  
*Typical sampling site in podzol from Värmland.*

Tabell 6. Lakbarhet (medianvärden) för några element. N = antal prov av morän (C-horisont, fraktion <0,063 mm), lakbarhet i % = (syralakad elementhalt/totalhalt) × 100. Data från SGUs markgeokemiska databas.

*Leachability (median values) for some elements. N = number of till samples (C-horizon, fraction <0.063 mm), leachability (%) = (acid leached element concentration/total concentration) × 100. Data: SGUs geochemical database.*

Element	N	lakbarhet, %	Element	N	lakbarhet, %
P	13 989	88	Co	23 283	25
Cu	23 283	87	Ca	23 283	19
Zn	23 283	69	Ti	23 283	18
Fe	23 283	61	Rb	7 287	16
Ni	23 283	60	Al	23 283	13
Mn	23 283	51	Ba	23 283	7
Mg	23 283	39	Sr	23 283	7
V	14 764	38	K	23 283	5
Pb	23 283	38	Na	23 283	1
Cr	14 764	29			

också avslöja något om mineralinnehållet i marken. Som exempel kan nämnas elementen kalcium och strontium som är starkt geokemiskt associerade genom sina närliggande jonradier. Det kemiska släktskapet gör att strontium kan ersätta kalcium i mineralens kristallgitter, och strontium förekommer därför i de flesta mineral som innehåller kalcium. I magmatiska bergarter varierar dock förhållandet, eller kvoten, mellan dem beroende på i vilket kristallisationsskede bergartens mineral bildats. I ett tidigt kristallisationsskede i en svalnande magma dominerar kalciumjonen över strontiumjonen. Detta innebär att andelen kalcium i förhållande till andelen strontium är högre i apatit och pyroxen, eftersom dessa mineral bildas först i den stelnde magman. I senare skeden bildas plagioklaser, och förhållandet mellan elementen ändras så att andelen kalcium minskar medan strontium ökar. Genom att studera mönstret för kvoten mellan dessa element (främst bör totalhalter av elementen användas i beräkningar), kan man därför också få en indikation på det mineralogiska innehållet i moränen, förutsatt att moränen inte består av en alltför komplex blandning av olika bergarter. I bilaga 3 ges en översiktlig beskrivning av elementens naturliga uppträdande.

## DE KEMISKA ELEMENTEN I NÄRINGSKEDJAN

De kemiska elementen som cirkulerar i miljön härstammar till stor del från marken. Markbundna mineral vittrar och frigör element som sedan kan tas upp av växter och djur. Allt levande är beroende av ett flertal olika grundämnen för att upprätthålla vitala biologiska funktioner. För att organismerna inte ska bli lidande krävs en god balans av tillskott; alltför låga halter kan ge upphov till bristrelaterade sjukdomar medan alltför höga halter å andra sidan kan ge toxiska effekter.

Bristrelaterade eller toxiska sjukdomar hos människor och djur som direkt kan relateras till markens innehåll av grundämnen har dokumenterats på många håll i världen. I Sverige är sådana samband inte vanliga, till stor del beroende på att den kost som människor konsumerar ofta härstammar från många olika håll varför den lokala markens påverkan inte blir så stark. Det bör betonas att vad gäller sambanden med hälsoeffekter är dessa komplexa och ibland svårutredda. Samband som trots allt har påpekats eller antagits i Sverige är bl.a. mellan markradon och lungcancer, selenbrist och hjärtsjukdomar och mellan kadmium i dricksvatten och barndiabetes. Hårt dricksvatten, dvs. vatten med mycket kalcium och magnesium, anses däremot ha en positiv effekt genom ett samband med lägre frekvens uppkomna hjärt- och kärlsjukdomar. Dyliga samband har konstaterats vara relativt vanliga internationellt (Karppanen 2002, Selinus m.fl. 2005). Även förekomst av uran i dricksvatten har identifierats som en riskfaktor (Kurttio m.fl. 2002, Rosborg m.fl. 2003), och källan till detta uran är berg- och jordartsrelaterad.

Av de karterade elementen har bl.a. följande dokumenterat skadliga effekter på levande organismer, om elementet förekommer i ”rätt” form och halterna är tillräckligt höga: arsenik, aluminium, antimon,

kadmium, koppar, molybden, nickel, krom, kobolt, mangan, tallium, zink, bly, vanadin och uran. Det bör påpekas att även om halter av potentiellt skadliga element i denna rapport klassas som höga, innebär detta inte automatiskt att det finns någon risk för negativ miljöpåverkan. Dels kan elementen vara relativt hårt bundna till mineral, dels kan förekomst av element med antagonistisk effekt (t.ex. kadmium–selen) påverka eventuella risker. För konkreta riskbedömningar krävs betydligt mer ingående undersökningar än vad som har gjorts här.

## MILJÖGEOKEMI

För miljögeokemisk bearbetning av analysresultat används de salpeterssyralakade elementhalterna samt kungsvattenlakade halter för guld, antimon och molybden. Naturvårdsverket har slagit fast gränsvärden i markfraktionen <2 mm för känslig markanvändning (KM) för flera metaller och metalloider: antimon 12 mg/kg, arsenik 10 mg/kg, barium 200 mg/kg, bly 50 mg/kg, kadmium 0,5 mg/kg, kobolt 15 mg/kg, krom 80 mg/kg, koppar 80 mg/kg, kvicksilver 0,25 mg/kg, molybden 40 mg/kg, nickel 40 mg/kg, vanadin 100 mg/kg och zink 250 mg/kg (Naturvårdsverket 2008). Naturvårdsverket har även fastlagt generella riktvärden för direkt kontakt med jordmaterial. Gränsvärdet för arsenik vid hudkontakt med jord och damm ligger på 33 mg/kg i fraktionen <2 mm. Omräknat till SGUs analyserade moränfraktion <0,063 mm är motsvarande arsenikhalt 47 mg/kg. Tidigare undersökta analyser av fraktioner <0,063 mm och <2 mm från samma moränprov resulterade i att en metallhalt i moränfraktionen <0,063 mm kan multipliceras med faktor 0,7 för att erhålla teoretisk metallhalt i fraktionen <2 mm som direkt kan jämföras med KM-värdet. Erfarenhetsmässigt vet man också att om en moränlokal har kraftigt förhöjd metallhalt är sannolikheten mycket stor för att finna ännu högre metallhalter i närområdet. Det är därför fullt möjligt att på de markgeokemiska kartorna använda KM-värden som jämförandevärden när man ska bedöma ett områdes metallbelastning. I stort innebär en analyserad moränfraktion <0,063 mm inget stort problem för jämförelse med KM-värden, då ett erhållet analysvärde som ligger nära eller över KM-värdet visar att moränen i området är en riskfaktor.

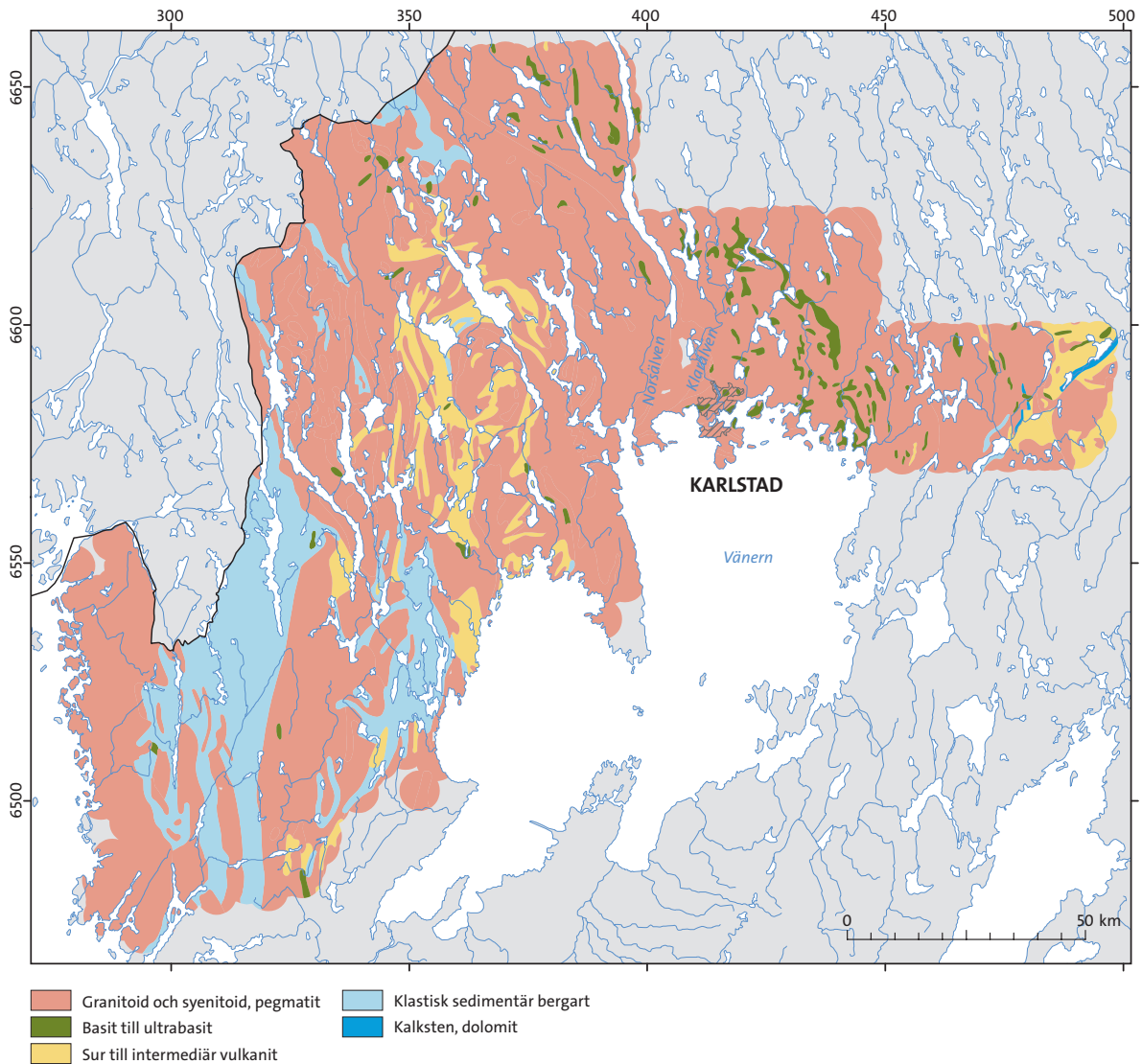
I moränområden med lågt pH är inslaget av lösliga kalciummineral mindre frekvent eller saknas. Det är välkänt att en del metaller har lätt för att frigöras vid sjunkande pH, liksom att andra element fastläggs. Kadmium, kobolt, mangan, nickel, tallium och zink är exempel på metaller som är lättlösliga i sur miljö. Generellt sett börjar de mobiliseras när markens pH understiger 6. I områden med höga metallhalter och låga pH-värden kan man därför befara att elementen kan ha börjat lösas ut och att de nått grundvattnet. Det kan ha till följd att dricksvattenkvaliteten i enskilda brunnar påverkas.

## OMRÅDETS GEOLOGI

### Berggrunden

En karta över undersökningsområdets berggrund visas i figur 3. Beskrivningen av berggrunden baseras på Lindström m.fl. (2000), Stephens m.fl. (2009) och Ripa m.fl. (2012). Berggrundens ålder och delvis karaktär varierar i öst–västlig riktning, och de i huvudsak nord–sydligt orienterade gränserna mellan olika bergdomäner är tektoniskt betingade. I grova drag är bergarterna yngre i väster än i öster. Ett viktigt inslag i berggrunden i områdets östra delar är ca 1900 miljoner år gamla vulkaniska bergarter. Längst i väster finns så kallad Bohusgranit som är ca 900 miljoner år gammal. Underordnat finns även ca 300–250 miljoner år gamla diabaser (karbon till perm) i Bohuslän. De bergarter i området som är äldre än ca 900 miljoner år är i allmänhet metamorfa, dvs. de har omvandlats genom att de utsatts för höga tryck och temperaturer.

Granitoid, syenitoid, pegmatit och vulkanit är tämligen kvartsrika bergarter. För övrigt består de av fältspater och oftast låga halter av mörka mineral som biotit och hornblände. Normalt sett är de alltså tämligen svårvittrade. Granitoider är bergarterna granit, granodiorit och tonalit. Den mineralogiska övergången från granit via granodiorit till tonalit innebär i huvudsak att halten röd fältspat (kalifältspat) sjunker medan halten vit fältspat (plagioklas) stiger i ungefär motsvarande grad. Tonalit och granodiorit har oftast också lägre kvartshalt och högre halt mörka mineral (hornblände och biotit) än



Figur 3. Berggrundskarta, modifierad. Källa: SGU's databas Berggrund 1:1 M.  
 Bedrock map modified. Source: SGU's database Berggrund 1:1 M.

granit. Syenitoider, t.ex. kvartsmonzonit och monzonit, domineras av fältspater, har lägre kvartshalt och högre halt mörka mineral än granitoider, vilket innebär en något högre vittringsbenägenhet än för de senare. Ett karaktäristiskt mineral i en del syenitoider är järnoxiden magnetit.

Längst i väster finns, som nämnts, den så kallade Bohusgraniten, en genomgående sur, kalirik bergart. Mineralogiskt finns förutom kvarts, fältspat och glimmer ofta även apatit, magnetit och titanit. Kännetecknande för Bohusgraniten är den kemiska sammansättningen med högt innehåll av uran och torium.

Basiter och ultrabasiter representerar kvartsfattiga eller helt kvartsfria bergarter, t.ex. diabas (mest så kallad hyperit), gabbro och diorit. Basiter domineras mineralogiskt av fältspaten plagioklas och av mörka mineral som pyroxen, hornblände och olivin, och de är mer vittringsbenägna än omgivande kvartsrikare bergarter. Ultrabasiter domineras av mörka mineral. Ovanliggande jordarter kan därför vara näringsrika och gynnsamma för skogsbruket.

De klastiska sedimentära bergarterna domineras av gråvackor. Dessa avsattes ursprungligen i ett hav i form av omväxlande skikt i ungefär decimeterskala av sand och lera. De lerdominerade skikten består efter metamorfos till stora delar av glimrar medan de sandiga skikten består av kvarts med

underordnad fältspat och glimmer. Ursprungligen lerdominerade delar är således mer vittringsbenägna än sanddominerade. En möjlig kemisk skillnad mellan lerstenar och deras metamorfa motsvarigheter kan vara olika halter av exotiska tungmetaller som ursprungligen var adsorberade på lermineralen. Övriga klastiska avlagringar är sandstenar, lerstenar och konglomerat.

Vissa karbonatstenar, kalksten och dolomit, är i varierande grad magnesiumanrikade och växlar i sammansättning mellan kalcitdominerade respektive dolomitdominerade. Underordnat finns också magnesithaltig karbonatsten. Förekomsten av karbonatsten ger ofta överliggande jordarter en buffertkapacitet mot försurning.

Associerade med vulkaniter och karbonatstenar finns många av de järn- och sulfidmineraliseringar (med bl.a. koppar, bly, zink, silver) som Bergslagsområdet är känt för.

För överskådlighetens skull har inga gångbergarter markerats på kartan. Genom nästan all ovan nämnd berggrund slår dock lokalt gångar av diabas och pegmatit.

## Mineraliseringar

Lokalt har det i berget genom speciella geologiska processer bildats anomala anrikningar av vissa mineral, så kallade mineraliseringar. I den mån de är någorlunda rikliga och innehåller vissa metaller, så att de kan brytas med ekonomisk vinning, kallas de malmer. Metallmineraliseringarna i området innehåller mest oxider av järn samt sulfider av koppar, zink och bly. Lokalt finns även guld och silver. Brytvärdt järn förekommer mest i oxidform som mineralen magnetit och underordnat hematit. Lokalt finns dock även järnsulfiderna pyrit och magnetkis. I de brytvärda mineralen och även som egna mineral i mineraliseringarna finns i många fall även andra grundämnen, som mangan, molybden, kobolt och arsenik. För den framtida gruvindustrin antas det metallogenetiska området Dalsland–Värmland ha potential för utvinning av huvudsakligen koppar, silver, guld, uran, järn och mangan (Hallberg m.fl. 2012). I tabell 7 listas en del av de totalt ca 800 kända mineraliseringar (metallfyndigheter och industrimineral) som finns i undersökningsområdet.

Ur morängeokemisk och miljöns synpunkt är det framför allt de mineraliseringar som innehåller järnsulfider (pyrit och magnetkis) som är intressanta. I kontakt med luftens syre och vatten samt i närvaro av i naturen närvarande bakterier av en viss typ reagerar nämligen dessa och bildar svavelsyra. Svavelsyran gör i sin tur så att övriga mineral bryts ner och att de ingående grundämnena, bl.a. metaller, kan frigöras och transporteras, t.ex. ut i grundvattnet. Alla sulfider kan oxideras och bilda svavelsyra, men närvaron av eventuella karbonatstenar i berggrunden intill en sulfidmineralisering kan dock motverka (buffra) den försurning som annars äger rum.

Sulfidmineraliseringar i projektområdet finns i dels Bergslagsområdet, dels i de västra delarna av Värmland och i Dalsland. I Bergslagen uppträder sulfidmineraliseringarna i huvudsak tillsammans med så kallat skarn vid kontakter mellan metavulkaniter och karbonatstenar. I Värmland och Dalsland är mineraliseringarna oftast knutna till kvartsläktasprickor och breccior. Generellt sett kan alltså sulfidmineraliseringarna av den senare typen ge lokalt större miljöpåverkan eftersom de inte är associerade med karbonatstenar.

## Kvartärgeologisk historia

Det är berggrundens ytformer som i huvudsak bestämmer topografin i undersökningsområdet. Kvartära avlagringar har avsatts i bergkullterrängen i norr, sprickdalslandskapet i sydväst och mellan dem på en relativt jämn berggrundsyta (peneplan). Höjdernas bergytor, som är belägna ovanför högsta kustlinjen, täcks oftast av morän. I sydväst är berggrunden sönderbruten, terrängen kraftigt kuperad och stora delar ligger under högsta kustlinjen (fig. 4). Terrängens högre partier täcks här av ett tunt jordtäckle eller är kal-spolad. I dalgångar finns sediment av såväl glacialt som postglacialt ursprung. De kan ofta vara mäktiga.

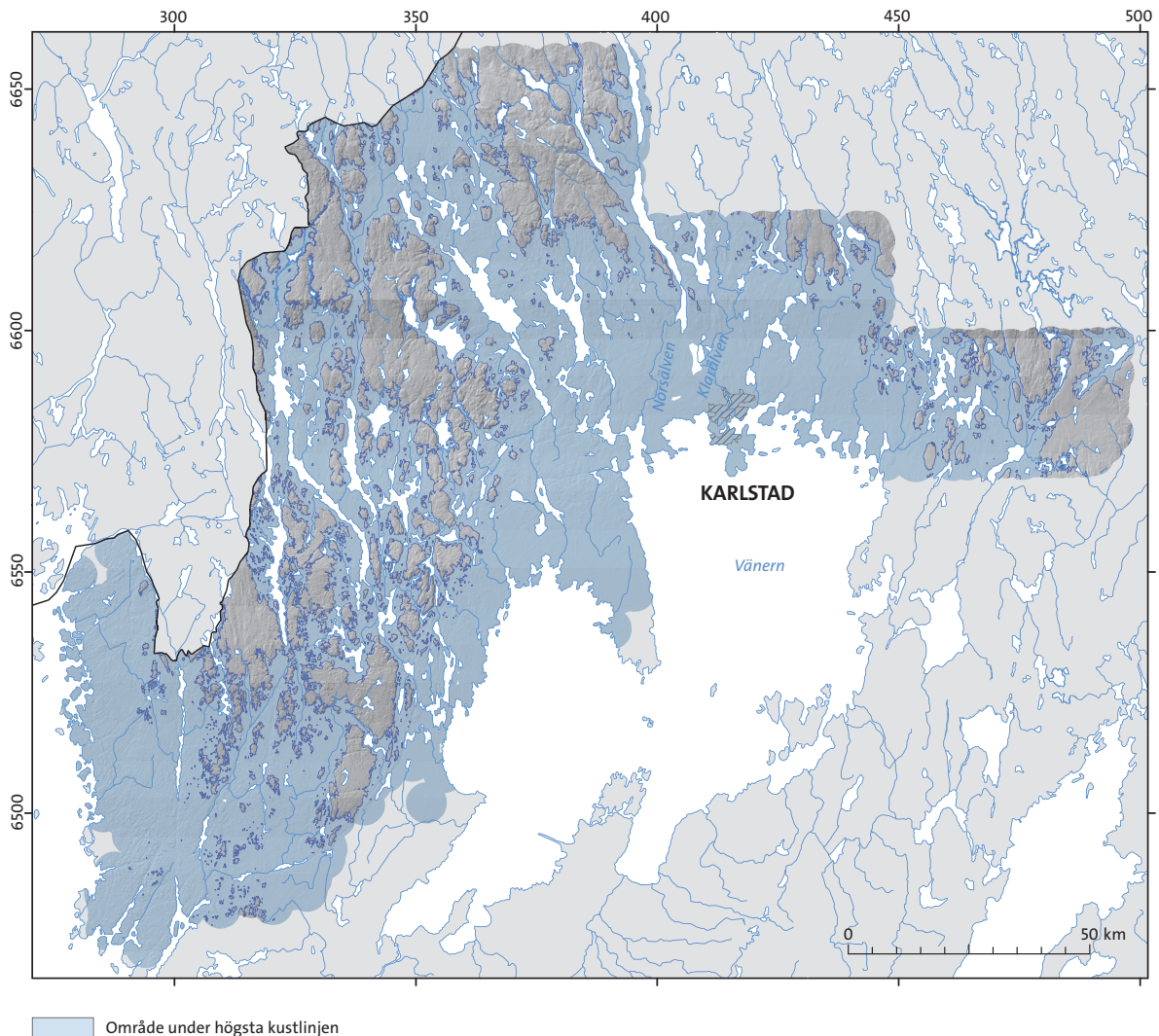
Området väster och norr om Väneren tillhör Vänerbäckenet och är beläget under högsta kustlinjen. Kalt berg eller tunn morän växlar med finkorniga sediment, särskilt väster om Väneren, och mer grovkorniga sediment i norr. Speciellt de finkorniga sedimenten kan nå stora jorddjup.

Tabell 7. Ett urval fyndigheter med dominerande mineraliseringstyp i undersökningsområdet. Kartblad enligt koordinatsystem RT90. Källa: SGUs mineraldatabas.

*Some metallic deposits with main metals in the investigated area. Map sheet according to coordinate system RT90.*

*Source: SGU's database of mineral resources.*

Kartblad (RT90)	Fyndighet	Mineraliseringstyp	Kartblad (RT90)	Fyndighet	Mineraliseringstyp
10B	Alma	Au, Cu, Pb	11C	Ängsgruvan	Cu, Zn
10B	Furuskogstjärnet	Mo, Cu	11C	Övre Ruds koppargruvor	Cu
10B	Gällsbyn	Cu, Ni	12C	Ahlbergsgruvan	Cu
10B	Harnäs	Au, Cu, Pb	12C	Kyrskogens gruvor	Cu
10B	Ingerud	Pb, Cu	12C	Bockgruvan	Cu
10B	Intakan	Cu, Ag, Au	12C	Ekåsgruvan	Pb, Fe-sulfider
10B	Kuvetjärn	Cu, Ni	12C	Fredros gruvor	Cu
10B	Lennartfors	Mo	12C	Gruvorpets koppargruva	Cu, Au
10B	Lidtjärn	Cu, Ni	9B	Anfastebyn	Cu, Ag
10B	Megsjön	Cu, Ni	9B	Asslebyn	Cu, Ag
10B	Rimtjärn	Pb, Mo	9B	Dingelvik	Cu, Ag
10B	Rörvikskasen	Pb, Cu	9B	Ekebol	Cu, Ag
10B	Silvergruvan	Pb, Zn, Cu, Ag, Au	9B	Gruvmon	Pb
10B	Töresbyn	Cu	9B	Gruvåsen	Au, Fe-sulfider
10B	Vårdalstjärnet	Cu, Ni	9B	Halängen 2	Cu, Ag
10C	Borgebols gruvor	Cu	9B	Henneviken	Cu, Ag
10C	Bottengruvan Södra	Cu, Pb, Zn, Au, Ag	9B	Skuggetorp	Cu
10C	Degerbynäs	Pb, Zn	9B	Skurvåsen	Cu
10C	Dösslinggruvan	Cu, Au, Ag	9C	Benebo	Cu
10C	Ekholmsgruvorna	Fe-sulfider, Cu	9C	Björby	Cu, Pb, Ag
10C	Gökbols gruva	Zn	9C	Björkön	Pb, Cu
10C	Klintgruvan	Cu	9C	Dammen	Cu
10C	Kyrkbols gruvor	Cu	9C	Elofsgruvan	Cu, Pb, Ag
10C	Nysäter	Cu, Au	9C	Fårekasen	Cu
10C	Strand	Cu	9C	Gottes hulfe in Not	Cu, Pb, Ag, Fe
10C	Stömne	Cu	9C	Hafsåsen	Cu, Ag, Pb, Mo
10C	Vegerbol	Pb, Zn, Ag	9C	Hansebotjärnet	Cu, Ag
10C	Övre Lofterud	Pb	9C	Hemmingsbol	Cu
10E	Dalkarlsbergfältet	Fe, W	9C	Hjördisgruvorna	Cu, Ag
10E	Garphytte silvergruva	Pb, Ag	9C	Hoppets gruva	Cu, Pb, Ag
10E	Nora och Viker	Fe, Cu	9C	Hult	Cu, Pb
10E	Norra Öknabergsgruvan	Fe, Mo	9C	Härserud	Cu, Ag, U
10E	Näsudden	Pb, Zn, Ag	9C	Ingridbyn	Pb, Fe-sulfider
10E	Sandviksgruvorna	Fe, Fe-sulfider, Cu	9C	Kesebol	Mn, Fe, Cu, Pb
10E	Älvhyttan	Pb, Ag, Zn	9C	Kettilsgruvan	Cu, Fe
10E	Silvergruvan	Pb, Ag, Zn	9C	Kingebolsgruvorna	Cu, Ag, Au
11B	Brattåsgruvan	Cu	9C	Knollegruvan	Cu, Pb, Ag, fluorite
11B	Koppartjärnsgruvan	Cu	9C	Knyttkärr	Cu, Ag
11B	Mjögesjön	Cu	9C	Linnerud	Cu, Pb
11B	noname	Cu, Au	9C	Långvattnet	Au, Fe, Te, U, W
11C	Abborrtjärnsgruvorna	Fe-sulfider, Cu	9C	Manhemsgruvan	Cu, Pb, Ag
11C	Edane silvergruva	Pb	9C	Salebolsgruvan	Cu, Pb, Ag
11C	Edbråtens gruva	Pb, Zn, Cu	9C	Skogsgården	Cu
11C	Glassnäs	Mn, Cu, Pb	9C	Slädekärr	Pb, Cu, Ag, Au
11C	Glava koppargruvor	Cu	9C	Stora Strand	Cu, Ag, Au
11C	Hults gruva	Ti	9C	Tottens gruva	Cu, Pb, Ag
11C	Mangens koppargruvor	Cu	9C	Vassviksgruvan	Cu, Pb, Ag
11C	Mellanängsgruvan	Cu, Fe-sulfider	9C	Viken	Au
11C	Norra Gärdsjö gruva	Cu	9C	Vingenäs 2	Cu, Au, Ag
11C	Näsgruvan	Pb, Zn	9C	Västra Korsbyn	Cu, Pb, Ag
11C	Styggdalsgruvan	Cu	9C	Änimskogsgruva	Cu, Ag, Au
11C	Södra Gärdsjö gruvor	Pb, Zn, Cu, Ag	9C	Åsnebo	Cu, Ag, U
11C	Tobols silvergruva	Pb, Zn, Ag	9C	Åskekärr	Cu, Pb, W
11C	Åmotfors koppargruva	Cu			

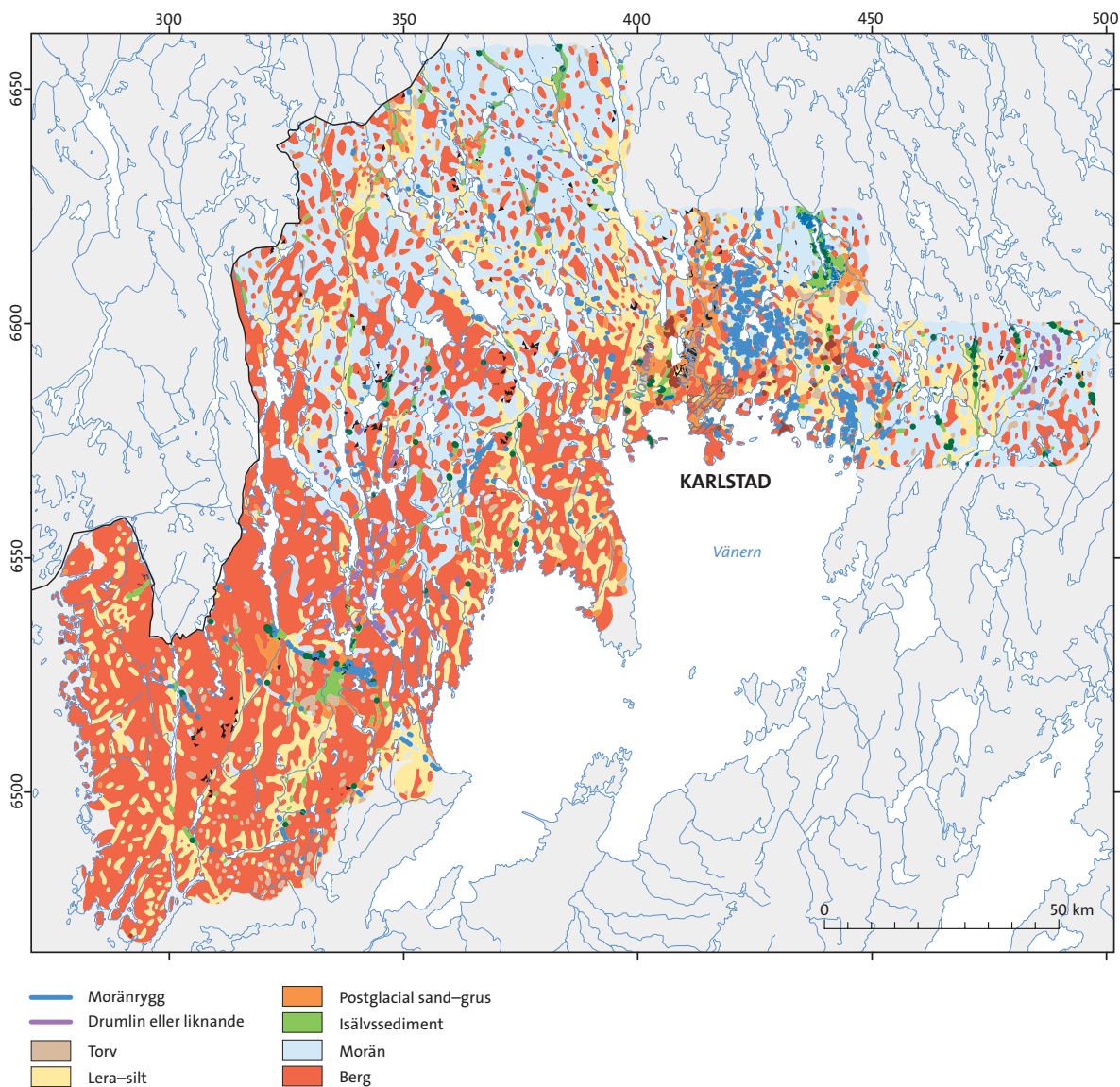


Figur 4. Topografisk karta med högsta kustlinjen (HK).  
 Topographic map including the highest coastline (HK).

Högsta kustlinjen ligger i nordväst ca 190 m över havets nivå och i sydväst ca 155 m över havsytan. Jordartskartan (fig. 5) domineras av den röda färgen som kännetecknar kalt berg men också mycket tunna jordtäcken. Lokalt finns dock mindre områden med morän som inte framkommer i den generaliserade kartbilden.

Det kvartära landskapet är mycket varierande och uppvisar former som har bildats under flera glaciala faser. Inlandsisen (-isarna) transporterade och deponerade morän och andra sediment. Olika morfologiska formationer bildades genom depositionen, av vattenströmning eller som effekter av isens erosion av underlaget. Det senare gav t.ex. upphov till drumliner, vilka är strömlinjeformade, långsträckta moränformer som är tydligt framträdande i landskapet, oftast ovanför högsta kustlinjen. Drumliner förekommer främst i ett stråk öster om Årjäng och söderut till Bengtsfors och Dals Långed, samt norr om Karlskoga. Mindre tydlig i terrängen är den glaciala lineation som avslöjas i den nya nationella höjddatabasen (NNH). Både drumlinerna och den glaciala lineationen är bildade subglacialt av en aktiv is och är parallella med isens rörelseriktning.

Isräfflor i berggrundsytan har uppkommit då block och stenar fastfrusna i isens basala delar skrapat mot underlaget. Även räfflorna anger rörelseriktningen hos en is, men de kan på en och samma bergyta påvisas med olika riktningar som inte är samtidigt. Isräfflor finns dokumenterade i hela undersökningsområdet, men är mer eller mindre frekventa. Generellt är räffelriktningen från norr i



Figur 5. Jordartskarta. Källa: SGU's databas Jordarter 1:1 M. Beteckningar moränrygg och drumlin är hämtade från SGU's databas Jordarter 1:25 K–1:100 K.

Soil map. Source: SGU's database Jordarter 1:1 M. The terms moränrygg (moraine ridge) and drumlin are from SGU's database Jordarter 1:25 K–1:100 K.

områdets norra del, men vrider allt mer mot sydväst längre söderut för att vid kusten visa isrörelser från ostnordost.

Avsmältningen av inlandsisen skedde i princip vinkelrätt mot isrörelsen. I undersökningsområdet började avsmältningen för ca 12 500 år sedan i sydväst, och den sista isen försvann i den norra delen för ca 10 000 år sedan. Den smältande isen skapade ett landskap av oregelbundet placerade höjder och sänkor och bland annat bildades moränbacklandskap. Sådana är vanligast ovanför högsta kustlinjen i norra delen av området. Moränbacklandskap finns även norr om Karlskoga och både ovanför och under högsta kustlinjen lokalt i centrala delen av området.

Under inlandsisens avsmältning från undersökningsområdet inträdde en kallperiod vilket orsakade ett stillestånd i isens tillbakadragande. Under ca 800 år stod iskanten mer eller mindre stilla. Perioden kallas yngre Dryas och under den perioden bildades det system av avlagringar som kan följas från Raerna i Norge, via den mellansvenska israndzonen till Salpausselkä i Finland. Landformerna kännetecknas av avlånga ryggar av morän (ändmoräner), isälvsavlagringar och deltan. Vid Dals Ed



finns t.ex. ett stort delta som markerar iskantens stillestånd. Ändmoräner återfinns vinkelrätt mot isens rörelseriktning och orsaken är dynamiken hos en is som gör att moränmaterial transporteras till isens yttre delar och avsätts längs isens front (Peterson & Smith 2013). I undersökningsområdet uppträder stråk med ändmoräner tillhörande den mellansvenska israndzonen från Gunnarsbyn vid norska gränsen, vid Dals Ed och vidare mot sydost ner över Hindens udde. Det finns också flera randbildningar som övertvårar undersökningsområdet i söder. De har namn som Levenemoränen, Trollhättemoränen och Berghemsmoränen, men trots benämningen morän ingår också glacifluvialt material och komplexa avlagringar. Andra typer av moränryggar finns t.ex. norr om Karlstad respektive Kristinehamn. De uppträder svärmvis i öst–västlig riktning och är ganska låga. De kallas De Geer-moräner och har bildats innanför iskanten i sprickor parallella med denna. Sprickbildningen skedde sannolikt i samband med jordbävningar.

Moränområden under högsta kustlinjen har varit utsatta för svallning av vågrörelser, och finmaterial har sköljts ur och avsatts som sediment. Det svallade ytskiktet är mer eller mindre kraftigt utbildat, men osvallad morän finns så gott som alltid på djupare nivåer om moränen är tillräckligt mäktig. Det är i den centrala delen av undersökningsområdet som effekten av svallning är störst, med djupa svallskikt som ofta möter bergytan.

Den sorterade jordarten morän består av både nybrutet bergartsmaterial och gamla jordlager som integrerats i moränen. Vid kusten och i den södra delen av Vänerbäckenet är 6 % av de provtagna moränerna leriga, vilket troligen orsakas av ett inslag av marina leror i jordarten. I brant terräng kan också jordflytningsprocesser ha omlagrat material, och lerinslaget kan ha ett postglacialt ursprung.

## **GEOKEMI I OMRÅDET – ELEMENTENS FÖREKOMST OCH ASSOCIATIONER**

I undersökningsområdet har prov samlats in från 2135 lokaler med morän och 446 med sediment. Moränens geokemi är påverkad av berggrunden, mineraliseringarna, karaktären hos isen som avsatt moränen och av skeenden och effekter under inlandsisens avsmältning. I elementmönstren avspeglas kvartsrika, sura bergarter som i stort sett saknar basiskt inslag med låga halter kalcium och lågt pH i moränen. Detta är tydligast i granitdomänerna i öster, nordväst och sydväst. Här har också moränen förhöjda halter av element som kan kopplas till granitiska bergarter, t.ex. Be, Rb, Th, U, och Y. Även förhöjda halter av Ba, Bi, K, La, Mo, Na, Nb, Pb, Sb, Sn, Tl och Zr kan förekomma.

Om inslag av basiska komponenter finns i bergarterna, kan moränen ha förhöjda halter av t.ex. Ag, Ca, Cd, Co, Cr, Cu, Fe, Mg, Mn, Ni, P, Sr, Ti, V och Zn. Spridda, små områden med basiska bergarter och de många mineraliseringarna försvårar dock en generell koppling mellan bergart och dess morän. I hyperitzonen norr om Väneren har moränen punktvis förhöjda halter av flera av elementen som kan kopplas till de basiska hyperiterna.

I morän återfinns anomalier av silver, zink och bly i anslutning till vulkaniter och associerade järn- och sulfidmineraliseringar. Anomalierna är starkast i öster, där influensen från Bergslagsområdets mineralrikedom syns tydligt i det istransporterade moränmaterialet. Elementmönstren av koppar och guld avviker något, men även dessa ansluter till kända mineraliseringar med metallerna. Till skillnad från silver, bly och zink framträder den nordvästra delen av projektområdet med förhöjda halter av koppar och guld. Även antimon, molybden, tantal och wolfram har förhöjda halter i anslutning till kända mineraliseringar.

Effekter av den kvartära historien indikeras i elementens spridningsmönster i den sydvästra delen av undersökningsområdet. Ett flertal element har förhöjda halter vilka inte direkt kan kopplas till berggrunden. Förhöjningarna återfinns i stället ungefär söder om gränsen för den mellansvenska israndzonen. Fram till dess inlandsisen efter sitt ca 800 år långa stillestånd åter började smälta av var landmassan täckt av hav (Nordsjön). Lera och silt deponerades ovanpå moränen i en marin miljö (Björck m.fl. 2002). När landet höjdes ur havet utsattes områdena för havsvågornas svallning. Denna process sköljde ur och omlagrade jordlagren och kan ha gett moränerna ett inslag av sorterade jordarter. Sannolikt är det marina, kalkrika sediment i morän som kan ses i kartbilderna för t.ex. pH och kalcium med lite högre värden vid den bohuslänska kusten.

## TÄTORTSGEOKEMI

Särskilda geokemiska undersökningar i tätorter görs eftersom förutsättningar för metallinnehåll i mark och vatten inte bara är geologiskt relaterade och styrda av markprocesser utan också påverkade av antropogen aktivitet. Tätorter har under lång tid varit utsatta för diffusa föroreningar vilket kan ha gett en metallbelastning som överstiger metallbelastningen i omgivande landsbygd (Naturvårdsverket 1997). Det är viktigt att komma ihåg att det sannolikt inte går – eller att det är extremt svårt – att ange en tätorts helt naturliga bakgrund av metaller (grundämnen), dvs. hur bakgrunds nivåerna var innan tätorten etablerades. Naturvårdsverket har definierat bakgrundshalt som den halt som idag råder i mark som inte har påverkats av lokala punktkällor, eller med andra ord summan av den naturliga halten och det diffusa antropogena tillskottet. Med naturlig halt avses den halt som skulle råda om ett område överhuvudtaget inte hade utsatts för antropogen påverkan.

Internationellt har man gjort geokemiska undersökningar i tätorter sedan 1990-talet. Utöver att påvisa hur olika metallassociationer i ytjord avspeglar teknosfären (Peltola & Åström 2003) har man också påvisat att underlagets belastning av ett flertal metaller kan ha en antropogen påverkan (Birke & Rauch 2000). Det har bland annat konstaterats att ytlig jord ofta har förhöjda nivåer av exempelvis Ag, As, Cr, Hg, Mo, Ni, Pb och Sb, och i underlaget eller alven har man påvisat högre innehåll av bland annat Cd, Cu, Hg, Pb, Sn och Zn. I urbana miljöer där metallrelaterade verksamheter bedrivits under lång tid kan alltså även de djupa jordproven vara påverkade av antropogena källor (Pasiczna 2003, Johnson m.fl. 2011). En tätorts industriella och kommersiella uppbyggnad med olika verksamheter och historik får på ett eller annat sätt metaller att cirkulera i miljön och dessutom är den geologiska miljön olika för våra tätorter. Varje tätort är därmed unik och har unika bakgrunds nivåer av metaller.

SGU har genomfört tätortsundersökningar i Göteborg, Västerås, Stockholm, Uppsala, Malmö, Lund, Helsingborg och Karlstad efter ett enhetligt provtagnings- och analyskoncept. Provberedning och analysmetodik är så gott som identiska för olika tätorter, medan provmedier kan skilja något beroende på förutsättningarna i respektive tätort.

Fokusering i tätorter görs vanligen på de metaller och metalloider som anses traditionella ur förorenings synpunkt och särskilt där gränsvärden finns för bedömning av tillstånd hos mark och vatten (Naturvårdsverket 1999, 2008).

### Karlstad

I den här rapporten redovisas delar av den aktuella metallstatusen i Karlstad–Skoghall genom att illustrera framför allt metallernas förekomst i olika provmedier. Syftet har inte varit att studera eventuell miljöpåverkan. De provmedier som använts är ytlig jord och underliggande jord (kallas djupprov på kartorna), transplanterat av näckmossa (*Fontinalis antipyretica*) samt vattenprov. Kartor över antimon, arsenik, bly, kadmium, kobolt, koppar, nickel, wolfram och zink har tagits fram för samtliga provmedier. Kartor finns i bilaga 2.

Den geologiska bakgrunden i tätorten är olikåldriga granitiska bergarter med inslag av hyperitdiabas i Karlstad och sydöstra Skoghall. Väster om Klarälven finns ett öst–västligt område med tonalit–granodiorit. Berggrunden täcks av morän, glacial lera, postglacial lera, silt och sand samt svämsediment och älvsediment.

Insamling har gjorts av nio moränprov från ett djup av 0,7–0,8 m och 32 sedimentprov från ett djup av 1 m. Från samma lokaler (samt en till) har 42 prov av ytlig jord samlats in på ett djup under markytan av ca 5–10 cm (provet tas under humus och rotfilt). Näckmossa har hämtats på en plats i Uppland, delats i 28 delar och lagts ut i rinnande vatten. Dessa transplanterat har legat ett antal veckor innan de plockats upp. Ett ofiltrerat vattenprov togs samtidigt med nedläggningen av näckmossan.

Provtagningsplatserna har valts med tanke på att undvika tydligt förorenade platser. Det kan däremot inte uteslutas att platserna kan vara diffust påverkade av antropogena källor, och ytlig jord och sediment kan vara omrörda.

Efter torkning lakades jordprov (fraktion <2 mm) och näckmossa med salpetersyra och med kungsvatten före analys. Alla prover analyserades på SGU med ICP-MS. Analyser av kvicksilver i näckmossa gjordes på Alcontrol lab i Linköping.

Grundprincipen vid bearbetning och tolkning av samtliga geokemiska data är att de djupare tagna proven (särskilt morän) visar naturliga geo-relaterade elementhalter. Ytligare tagna jordprov och näckmossa visar elementhalter med en mix från naturliga och antropogena källor.

Analysresultaten visar att arsenik, bly, kobolt, koppar och nickel har värden i näckmossa som klassas som höga (Naturvårdsverket 1999), liksom arsenik, bly och koppar i vatten. Endast ett ytligt jordprov har en blyhalt över riktvärdet för förorenad mark, känslig markanvändning (KM). Ett sedimentprov har ett koboltvärde som ligger på KM-gränsen.

## SUMMARY

For more than 30 years the main goal at SGU has been to provide high quality, consistently sampled and analysed geochemical data. The objective of the programme is to quantify regional geochemical variations in glacially drifted till in order to provide data for mineral exploration, the mining industry, planning purposes, environmental research, agriculture, forestry and veterinary and human medical research (medical geology). Two methods have been used for the purpose. The biogeochemical method uses plant roots and water mosses sampled in small streams. For the other method, soil geochemistry, till and to a minor extent fine sediments have been the sample medium. The sample density for both methods is 1 sample per 7 km<sup>2</sup>.

The samples are commonly collected from the C-horizon of hand-dug pits in till, usually at a depth of 0,7–1,0 m. Sediments are collected with a hand driven drill at 1,0 m depth. After vacuum-drying, the samples are sieved stepwise to <0.063 mm and analysed for trace, major and minor elements at the SGU laboratory. Partial leaching in Aqua Regia (a mixture of HCl and HNO<sub>3</sub>) and nitric acid (7M HNO<sub>3</sub>) combined with ICP-MS analysis is used. The <2 mm fraction of clay and other sediment samples are also analysed using the partial leach and ICP-MS technique. Acidity is determined in a suspended solution composed of a 4 g sample (<0.063 mm) and 20 ml distilled water. A quality control programme is used in order to monitor the sampling and analytical variances. Additional details regarding the geochemical mapping programmes, including biogeochemical mapping at SGU, are available from Lax & Selinus (2005).

The survey area for the present report covers approximately 15 700 km<sup>2</sup>. A total of 2135 samples of till and 446 samples of clay and fine sediments were collected for the current study in parts of Värmland, Dalsland and Bohuslän. A particular chapter presents the urban geochemistry of Karlstad town. Here, samples of till and sediment have been supplemented with superficial soil samples at each sampling site, and samples of water and water moss (transplants of *Antipyretica fontinalis*) have been collected from small streams.

The bedrock from east to south–west is composed of granites and gneisses, granitoids, metavolcanic rocks, greywacke and, at the coast, the Bohus granite with pegmatites.

The basement hosts a large variety of mineralisations of different origin, from iron ore deposits to base metal and precious metal deposits. There are around 181 known deposits of precious metals, sulphides and other oxides.

Sediments of glacial drift, like till, cover most of the area above the highest coastline in the east and north-west. In the south-west the areas are dominated by outcrops, thin till beds and clay sediments in valleys and depressions. Along the coast, variations in altitude of more than 100 m are common, and most of this area occurs below the highest shoreline. Thick till deposits are sparsely found and glacial as well as postglacial clay commonly dominate these areas. The clays may contain shells of marine molluscs. The basin of lake Vänern occurs below the highest shoreline, and this area is hilly with outcrops, clays and fine sediments.

During deglaciation, the ice sheet was more or less stagnant for c. 800 years. Dynamics in the ice created landforms like end moraines and large deltas (e.g. at Dals Ed) in the marginal zone of the ice

sheet, which can be found from Raerna in Norway to Salpausselkä in Finland. This period impacted the soil geochemistry, especially to the south of the marginal zone of the ice sheet. The composition of the soil was affected by the waves of the adjacent sea when the land mass started to elevate due to isostatic uplift. Clay and sediments were embedded in the till, and soils were washed by waves. In steep terrain, processes of solifluction have locally reworked the parent soil.

The movement of the ice sheet was mainly north–south in the northern part of the area, but swings to movement from the north–east further south in the area. The ice transport distances are interpreted to be rather short which is why the deglaciation history complicates the interpretation of the origin of geochemical signatures in the till. Topography together with influences from deglaciation processes have created disrupted geochemical anomalies.

Principal geochemical features of the till in the area are governed by the bedrock geology, with concentrations of elements typically found in acid rocks (e.g. Be, Rb, Th, U and Y). Where basic rocks occur, e.g. in the hyperite zone, elements like Ca, Co, Cr, Cu, Fe, Mg, Mn, Ni, Ti and V are elevated.

In the studied area, in the vicinity of some of the known mineralisation sites, concentrations of antimony, arsenic, barium, bismuth, cadmium, copper, gold, molybdenum, lead, silver, tantalum and tungsten are found in the tills.

Starting in 1999, urban geochemical mapping using the SGU method has been carried out in Gothenburg, Västerås, Stockholm, Uppsala, Malmö, Lund and Helsingborg. In Karlstad, 42 sites of topsoil were sampled together with underlying subsoil. From 28 small streams, water moss (transplants of *Fontinalis antipyretica*) and water were sampled.

The analytical results show that lead in one topsoil site exceeds the guideline value stated by the Swedish environmental protection agency (Naturvårdsverket 2008). There are some sites where arsenic, lead, cobalt, copper and nickel in water moss (*Fontinalis antipyretica*) and arsenic, lead and copper in stream water occur in high concentrations, class 4, when compared with current guideline values (Naturvårdsverket 1999).

## REFERENSER

- Andersson, M., 2004: Geokemiska kartan. Markgeokemi. Metaller i morän och andra sediment i Trestadsregionen. *Sveriges geologiska undersökning Gk 3*, 101 s.
- Andersson, M., 2006: Geokemiska kartan. Markgeokemi. Metaller i morän och andra sediment från Varberg till Lidköping. *Sveriges geologiska undersökning K 45*, 168 s.
- Andersson, M., Jelinek, C., Ohlsson, S.-Å. & Selinus, O., 2007: Geokemiska kartan. Markgeokemi. Metaller i morän och andra sediment i Östra Mälardalen med Stockholm. *Sveriges geologiska undersökning serie K 77*, 157 s.
- Andersson, M., Carlsson, M., Ladenberger, A., Morris, G., Sadeghi, M. & Uhlbäck, J., 2014: *Geokemisk atlas över Sverige*. Sveriges geologiska undersökning ISBN 978-91-7403-258-1.
- Björck, J., Andrén, T., Wastegård, S., Possnert, G. & Schoning, K., 2002: An event stratigraphy for the Last Glacial-Holocene transition in eastern middle Sweden: results from investigations of varved clay and terrestrial sequences. *Quaternary Science Reviews* 21, 1489–1501.
- Bouchard, M.A. & Salonen, V.-P., 1990: Boulder transport in shield areas. I R. Kujansuu, M. Saarnisto & A.A. Balkema: *Glacial Indicator Tracing*. Rotterdam, 87–107.
- Ek, A., Löfgren, S., Bergholm, J. & Qvarfort, U., 2001: Environmental effects of one thousand years of copper production at Falun, central Sweden. *Ambio* 30, 2, 96–103.
- Hallberg, A., Bergman, T., Gonzalez, J., Larsson, D., Morris, G.A., Perdahl, J.A., Ripa, M., Niiranen, T. & Eilu, P., 2012: Metallogenic areas in Sweden. *Geological Survey of Finland Special Paper 53*, 139–206.
- Holmberg, J., 2006: Geokemiska kartan. Markgeokemi. Metaller i morän och andra sediment i Örebro län. *Sveriges geologiska undersökning K 41*, 75 s.

- Karppanen, H., 2002: *Epidemiological studies on the relationship between magnesium intake and cardiovascular diseases*. The Magnesium Web Site, [www.mgwater.com/estudies.shtml](http://www.mgwater.com/estudies.shtml).
- Krüger, J., 1979: Structures and textures in till indicating subglacial deposition. *Boreas* 8, 323–340.
- Kurttila, P., Auvinen, A., Salonen, L., Saha, H., Pekkanen, J., Mäkeläinen, I., Väisänen, S.B., Penttilä, I.M. & Komulainen, H., 2002: Renal effects of uranium in drinking water. *Environmental Health Perspectives* 110, 4.
- Lax, K. & Selinus, O., 2005: Geochemical mapping at the Geological Survey of Sweden. *Geochemistry: Exploration, Environment, Analysis* 5, 337–346.
- Lindström, M., Lundqvist, J. & Lundqvist, T., 2000: *Sveriges geologi från urtid till nutid*. Studentlitteratur, Lund, 491 s.
- Naturvårdsverket, 2008: *Tabell över generella riktvärden för förorenad mark*. Ersätter tidigare utgivna. <<http://www.naturvardsverket.se>>. Publicerat 24 oktober 2008.
- Naturvårdsverket, 1999: Bedömningsgrunder för miljö kvalitet, Sjöar och vattendrag. *Naturvårdsverket, Rapport 4913*, 101 s.
- Perttunen, M., 1991: The transport of till in southern Finland. *Geological Survey of Finland Special Paper 9*, 79–86.
- Peterson, G. & Smith, C.A., 2013: Beskrivning av enheter i den geomorfologiska databasen över Sverige. *Sveriges geologiska undersökning SGU-rapport 2013:3*, 18 s.
- Reimann, C., Birke, M., Demetriades, A., Filzmoser, P. & O'Connor, P. (red.), 2014: Chemistry of Europe's agricultural soils – Part A: Methodology and interpretation of the GEMAS data set. *Geologisches Jahrbuch Reihe B102*, 528 s.
- Ripa, M., Mellqvist, M., Ahl, M., Andersson, D., Bastani, M., Delin, H., Kübler, L., Nysten, P., Persson, L. & Thelander, T., 2012: Beskrivning till berggrundskartan Västra delen av Dalarnas län. *Sveriges geologiska undersökning K 382*, 106 s.
- Rosborg, I., Nihlgård, B. & Gerhardsson, L., 2003: Mineralämnen och metaller i 20 kommunala dricksvatten i södra Sverige. *VA-Forsk Rapport 2003-17*, 64 s.
- Salminen, R., Chekushin, V., Tenhola, M., Bogatyrev, I., Glavatskikh, S.P., Fedotova, E., Gregorauskiene, V., Kashulina, G., Niskavaara, H., Polischuok, A., Rissanen K., Slenok, L., Tomilina, O. & Zhdanova, L., 2005: *Geochemical atlas of the Eastern Barents region*. Elsevier Verlag, 548 s.
- Sarala, P., 2006: Ribbed moraine stratigraphy and formation in southern Finnish Lapland. *Journal of Quaternary Science* 21, 387–398.
- Selinus, O., Alloway, B., Centeno, J.A., Finkelman, R.B., Fuge, R., Lindh, U. & Smedley, P. (red.), 2005: *Essentials of medical geology. Impacts of the natural environment on public health*. Elsevier Academic Press, 812 s.
- Sohlenius, G., Lax, K. & Ladenberger, A., 2009: Kan SGUs data användas för att uppskatta moränens transportlängd? *Sveriges geologiska undersökning SGU-rapport 2009:26*, 25 s.
- Stephens, M.B., Ripa, M., Lundström, I., Persson, L., Bergman, T., Ahl, M., Wahlgren, C.-H., Persson, P.-O. & Wickström, L., 2009: Synthesis of the bedrock geology in the Bergslagen region, Fennoscandian Shield, south-central Sweden. *Sveriges geologiska undersökning Ba 58*, 259 s.
- Sveriges Nationalatlas, 1994: *Berg och Jord*. SNA.
- Tauber, C., 1988: *Spruenelemente in Flugaschen*. Verlag TÜV Rheinland GmbH, Köln, Germany, 469 s.



## BILAGA 1

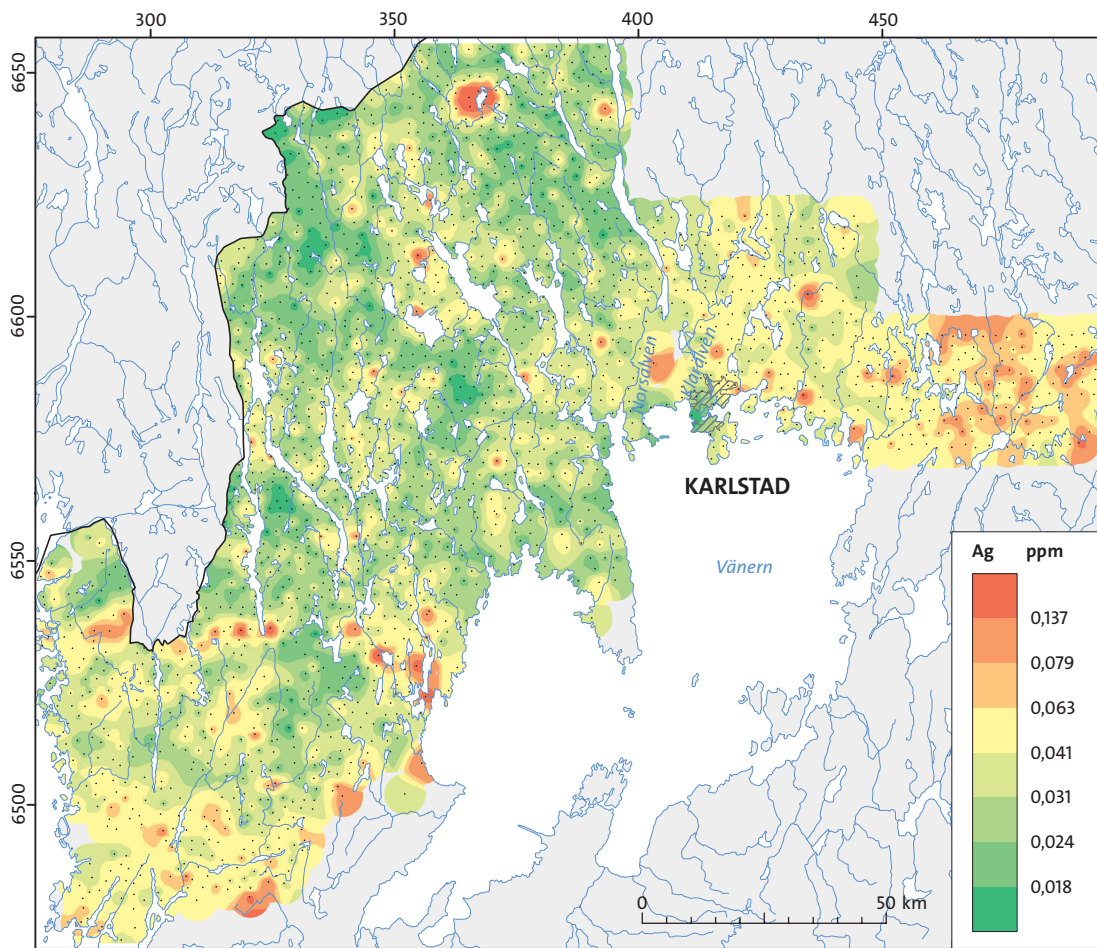
### Regionala markgeokemiska kartor

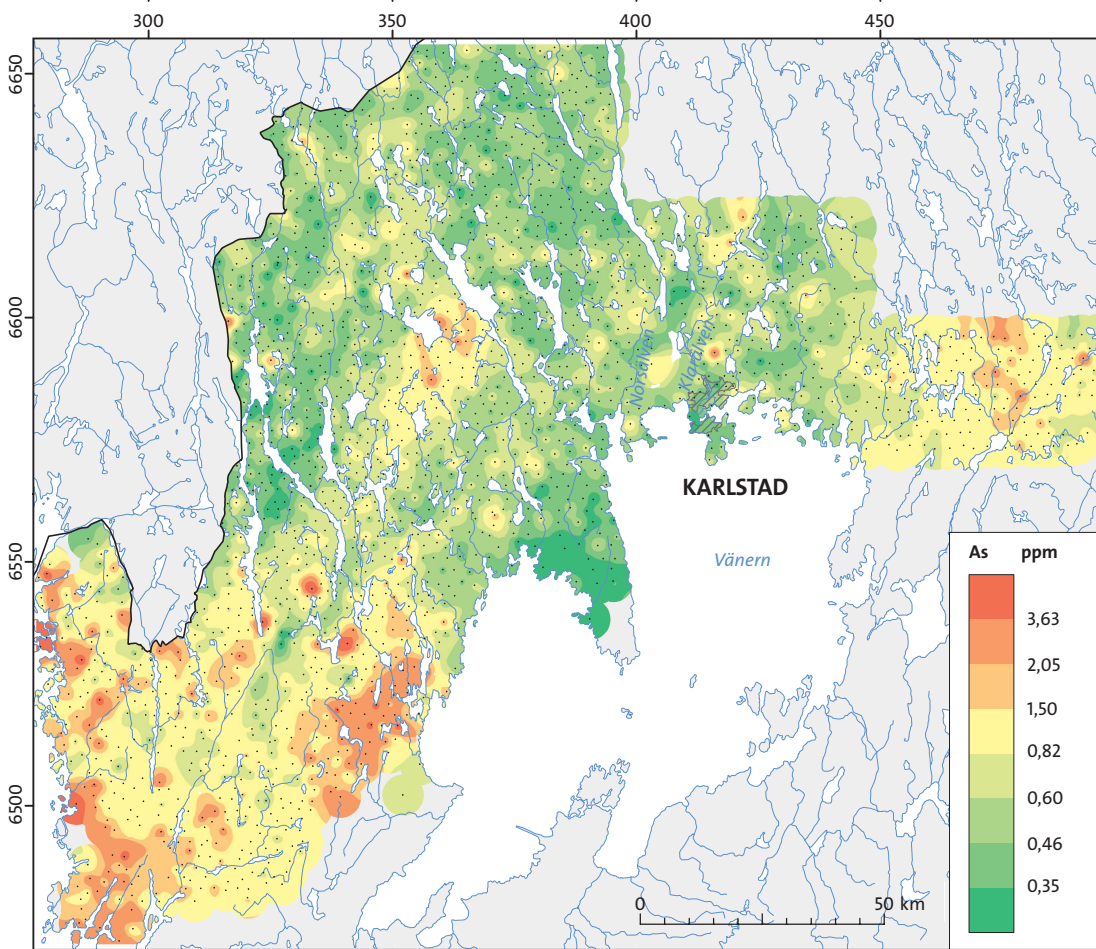
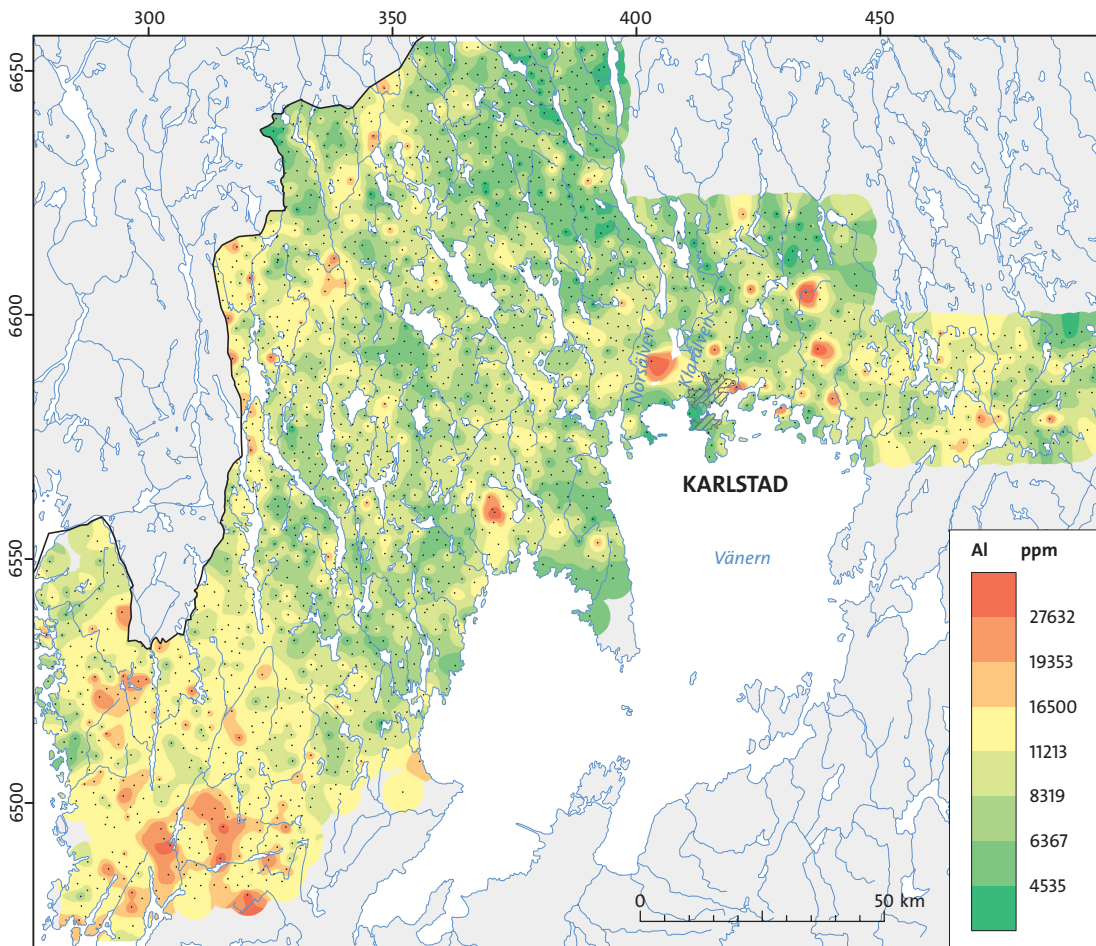
#### *Regional geochemical maps of till and other sediments*

Bilagan omfattar kartor över förekomst av huvud- och spårelement samt pH i morän (40 stycken) och sediment (36 st), provtagna enligt SGUs regionala markgeokemiska metod. De fyrtio första kartorna visar morändata som interpolerats över den provtagna ytan. Därefter följer sedimentkartorna som visar varje provtagen punkts analysvärde.

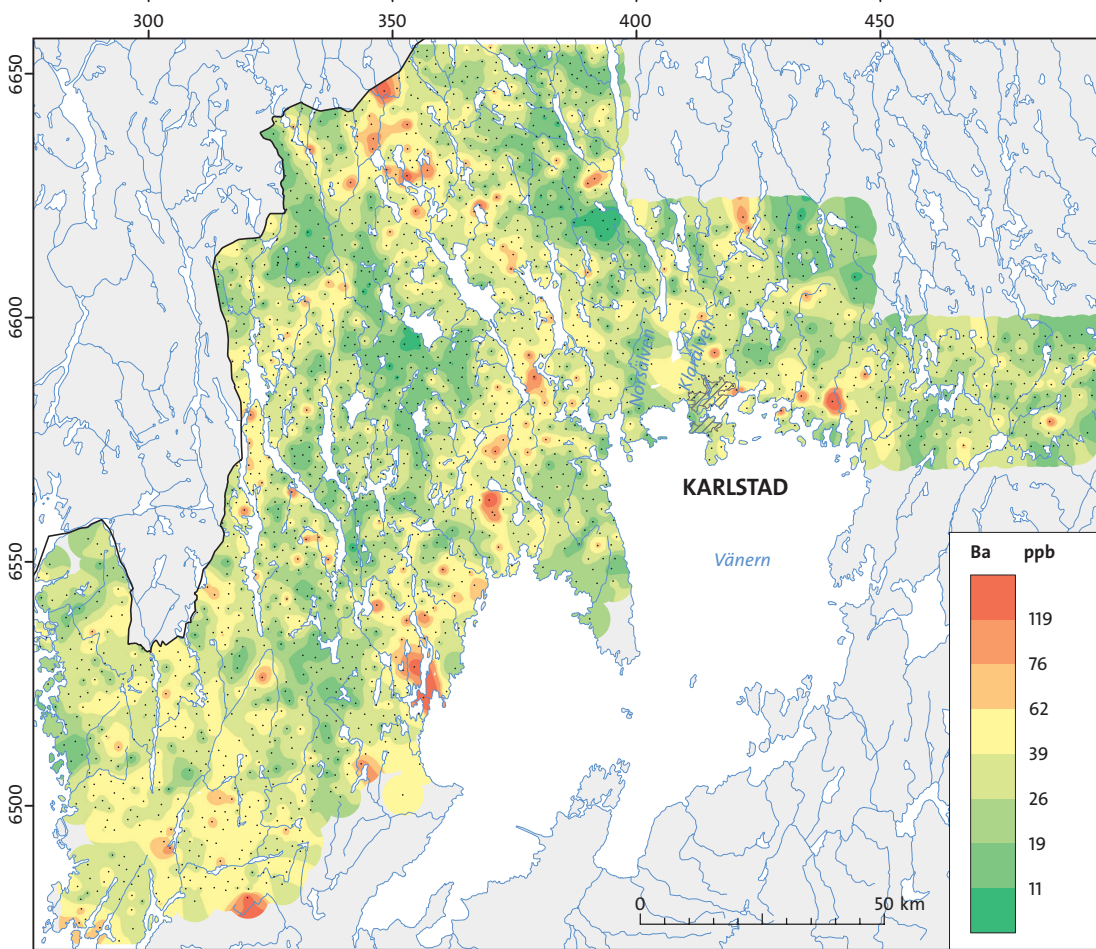
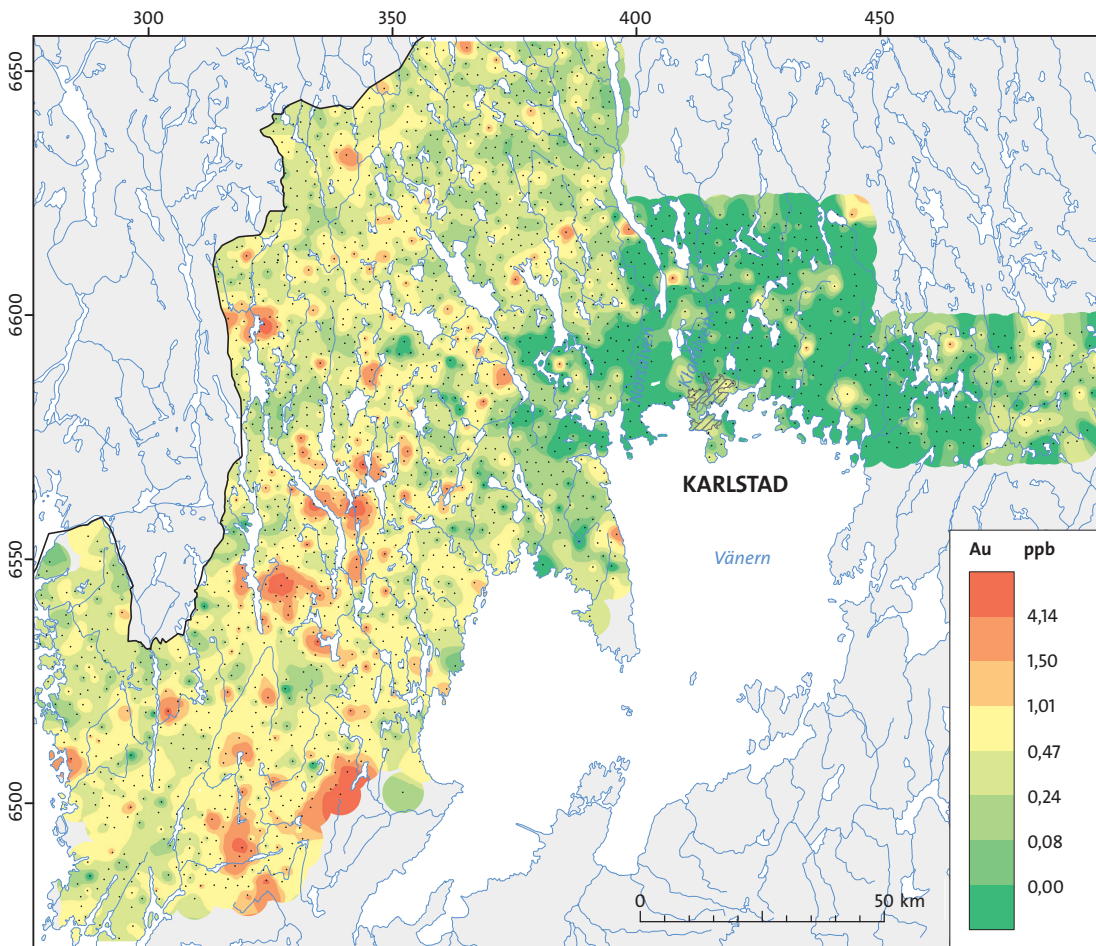
Baserade på analysresultatet för morän och sediment efter lakning med 7M salpetersyra, presenteras kartor över Ag, Al, As, Ba, Be, Bi, Ca, Cd, Ce, Co, Cr, Cu, Fe, K, La, Li, Mg, Mn, Mo, Na, Ni, P, Pb, Rb, Sc, Sn, Sr, Th, Ti, Tl, U, V, Y, Zn och Zr. Kartor över pH-mätningar i morän respektive sediment baseras på prov uppslammat i avjoniserat vatten. Moränproven lakas även med kungsvatten och kartor finns av Au, Sb, Ta och Te.

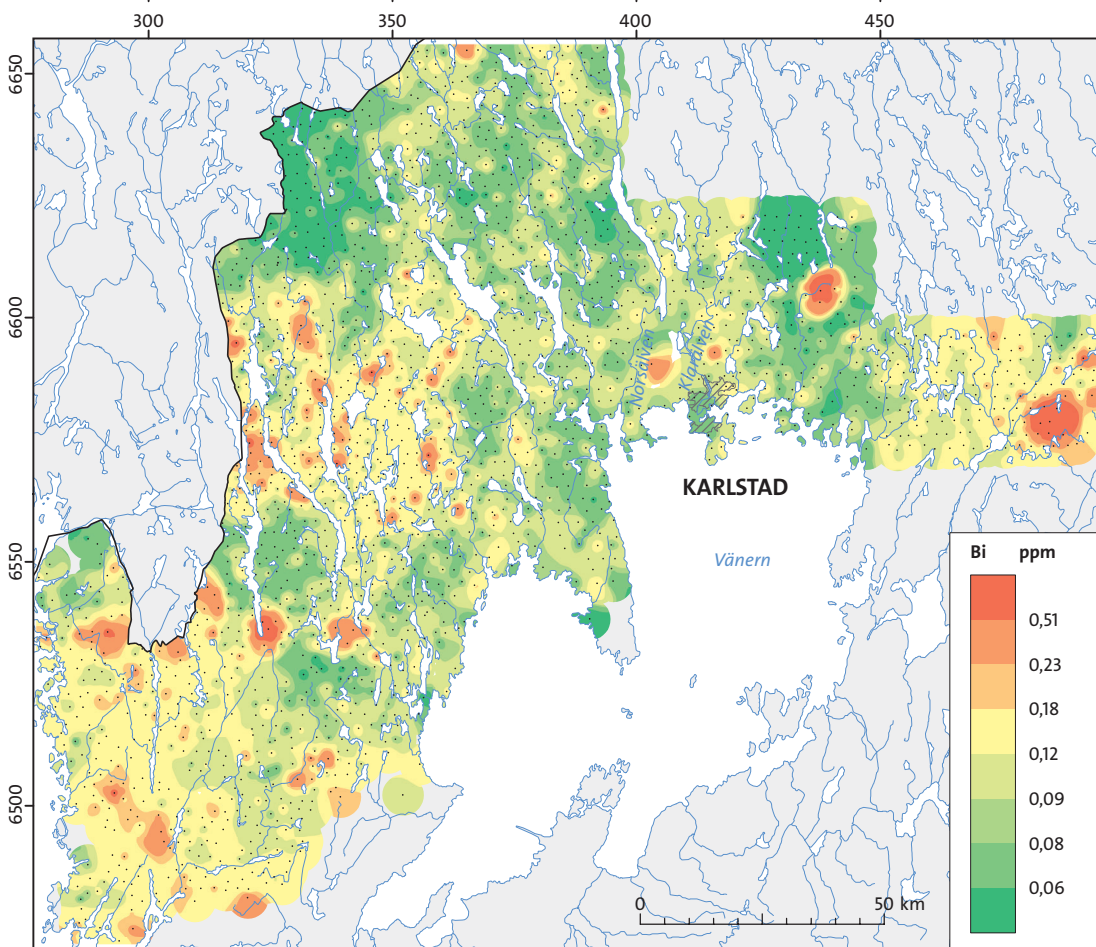
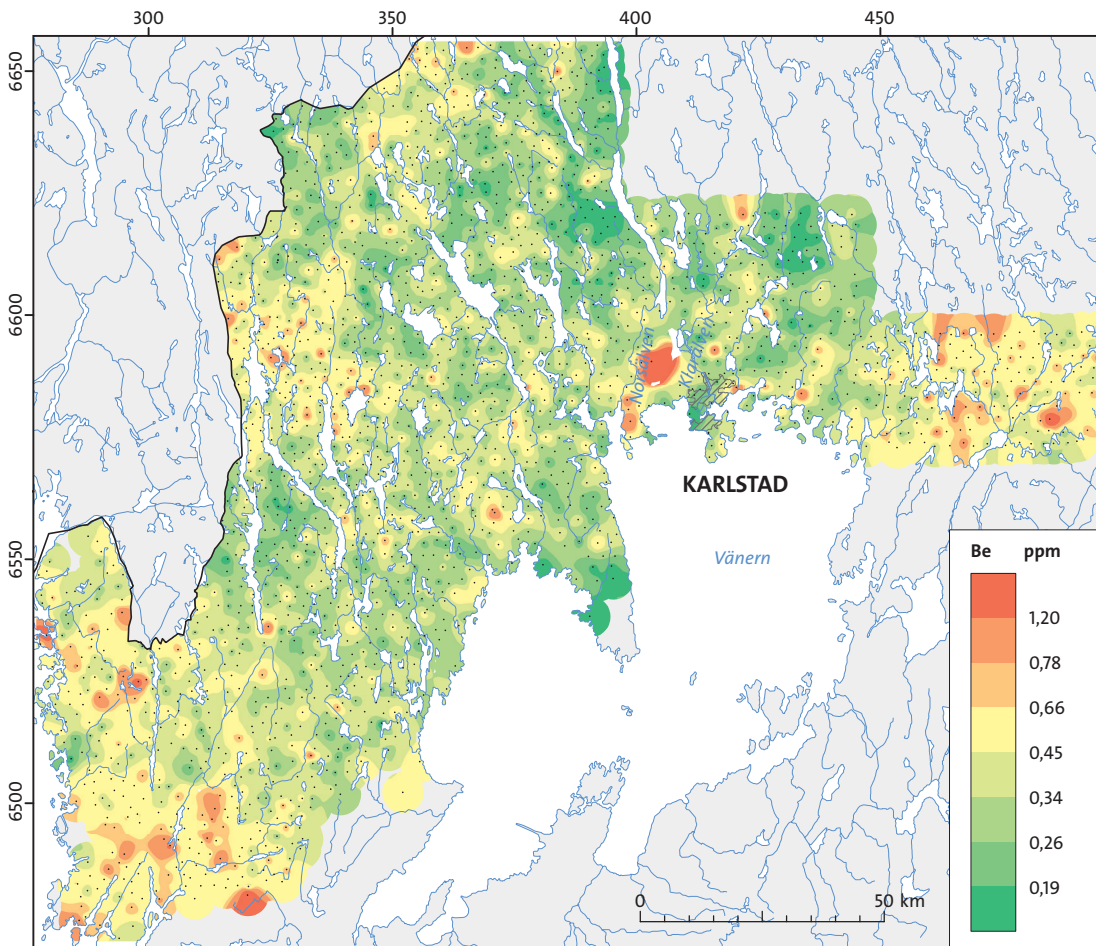
Distributionsmönstren på kartorna kan ibland visa nivåskillnader i elementkoncentration som härrör till analysår, se t.ex. kartan över guld i morän.

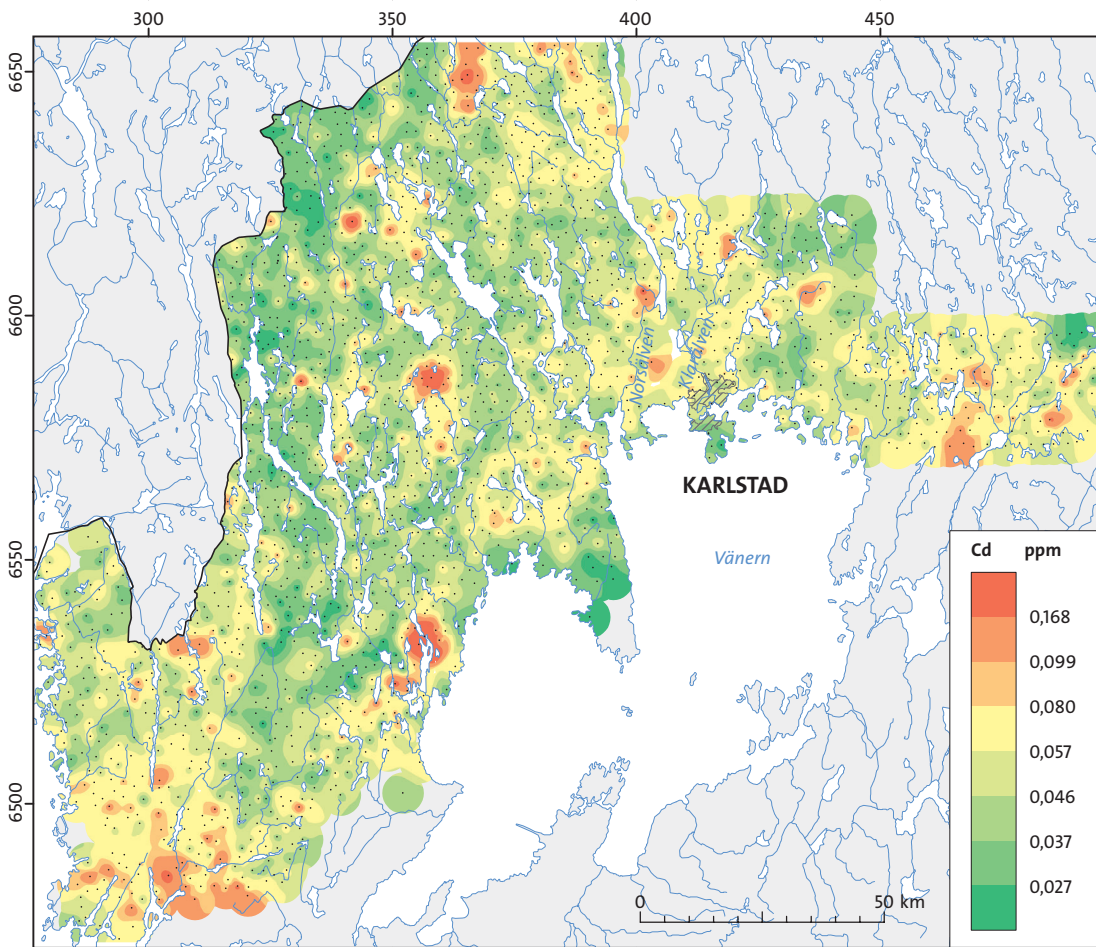
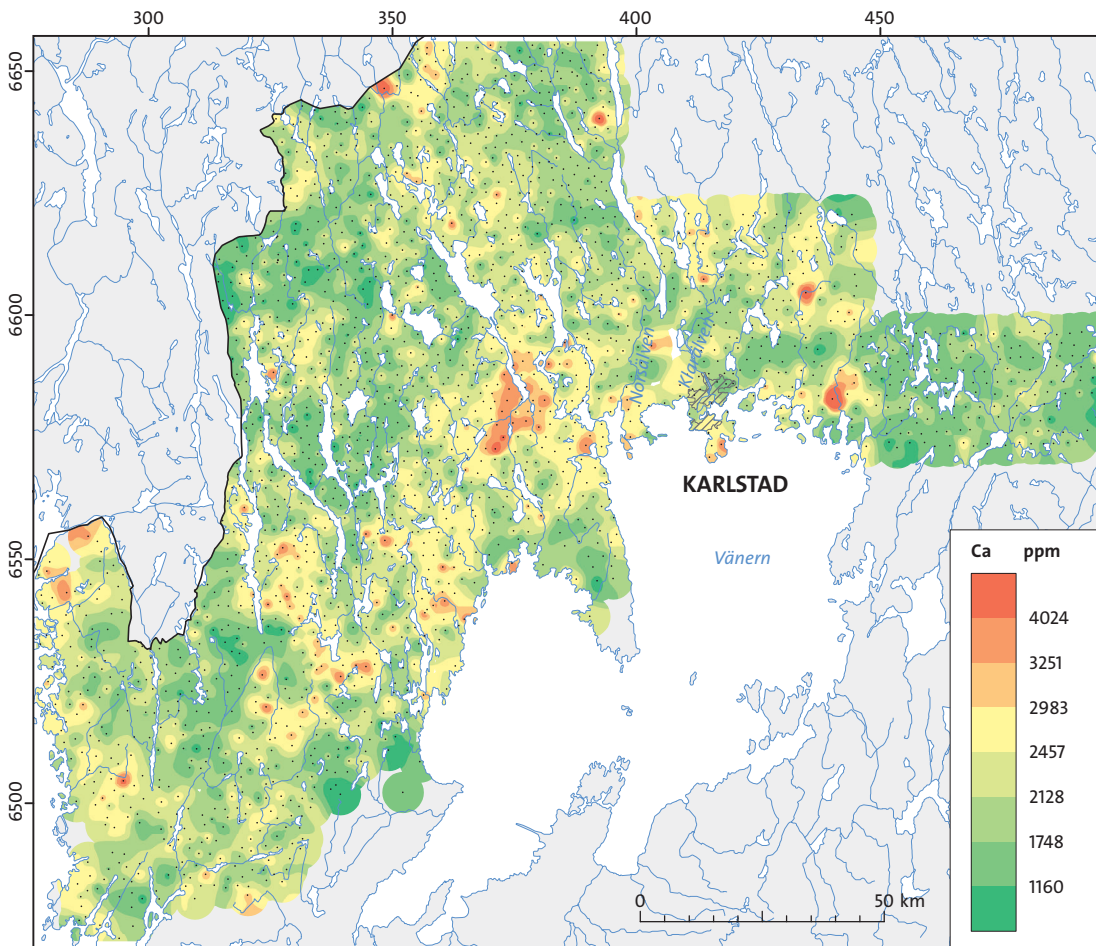


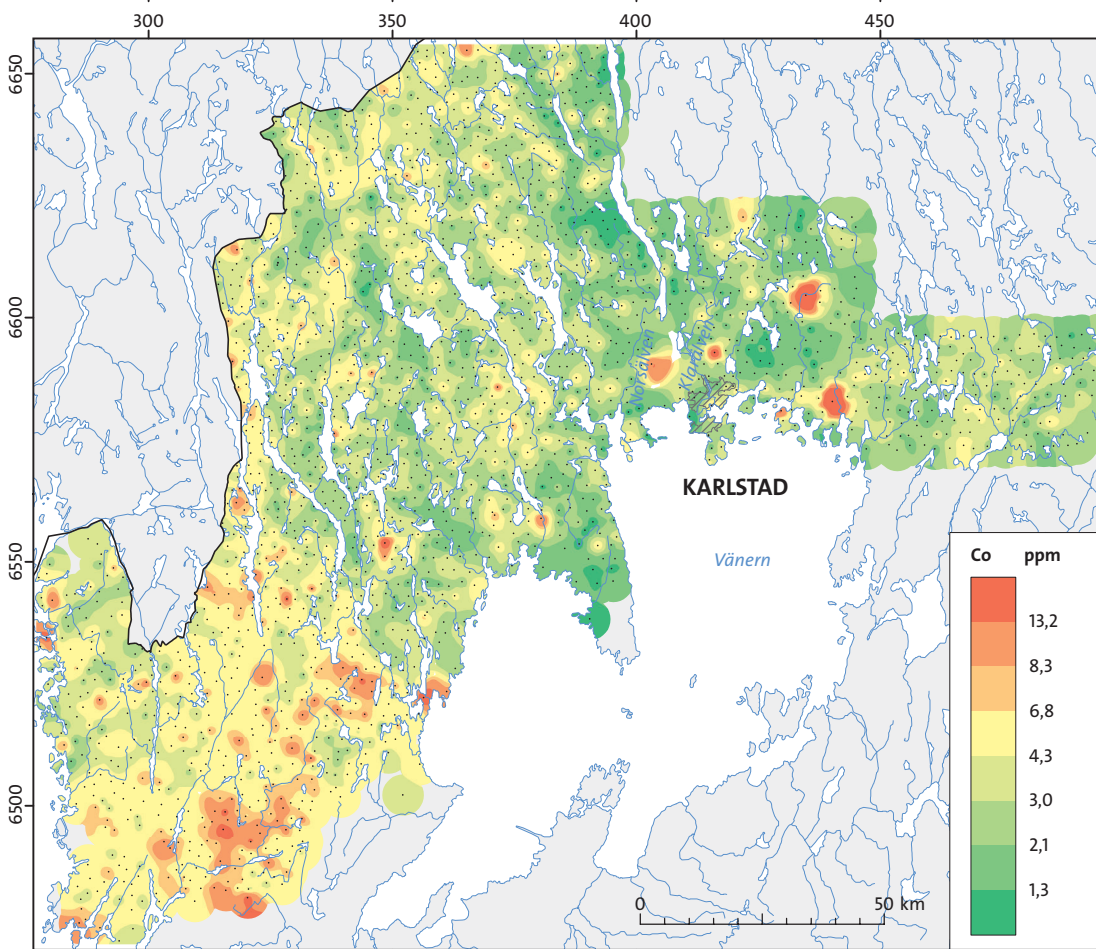
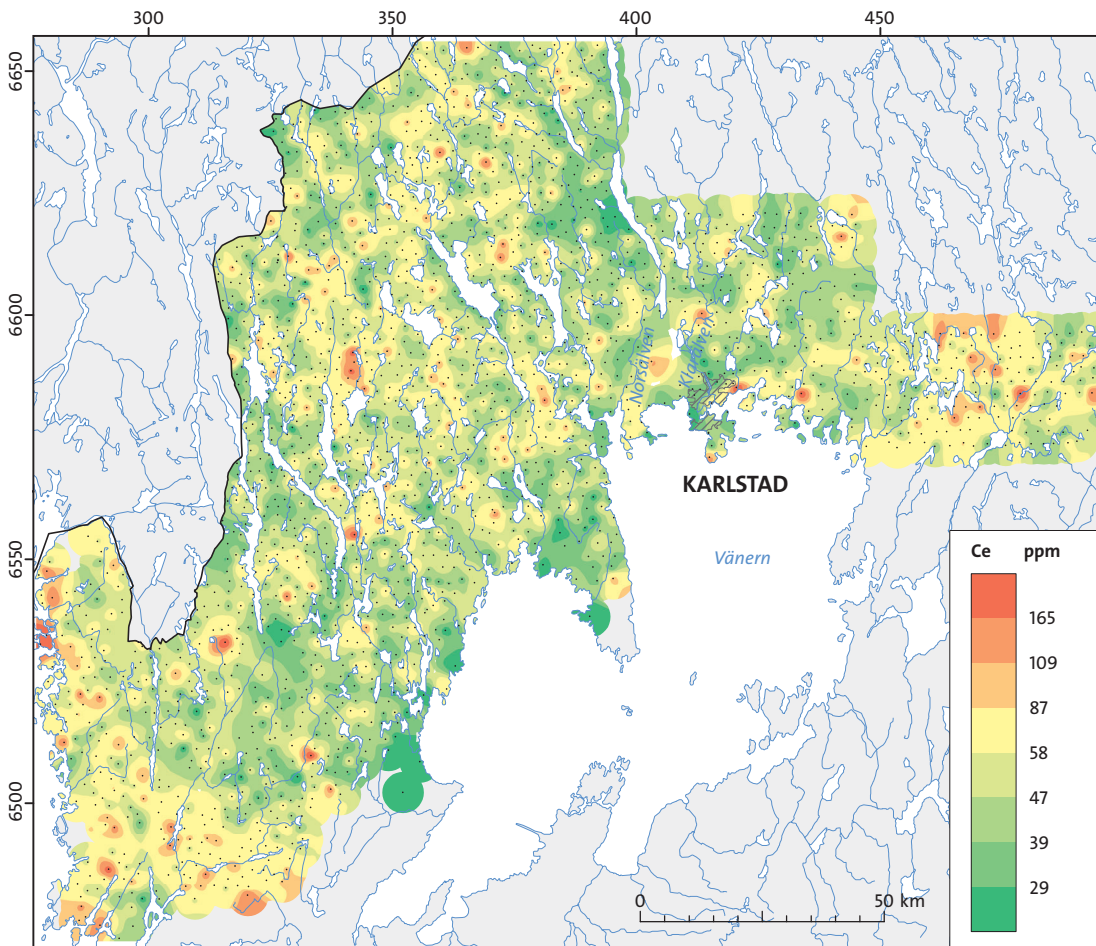


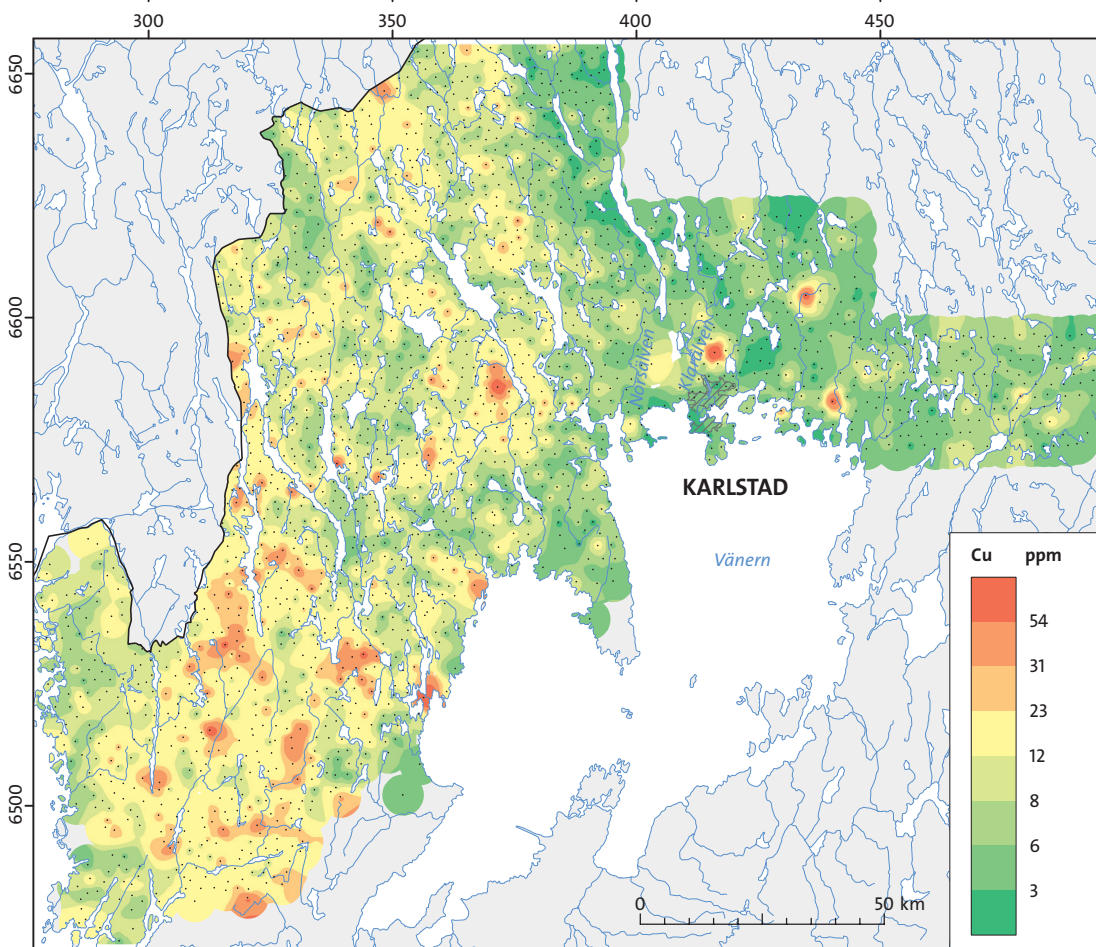
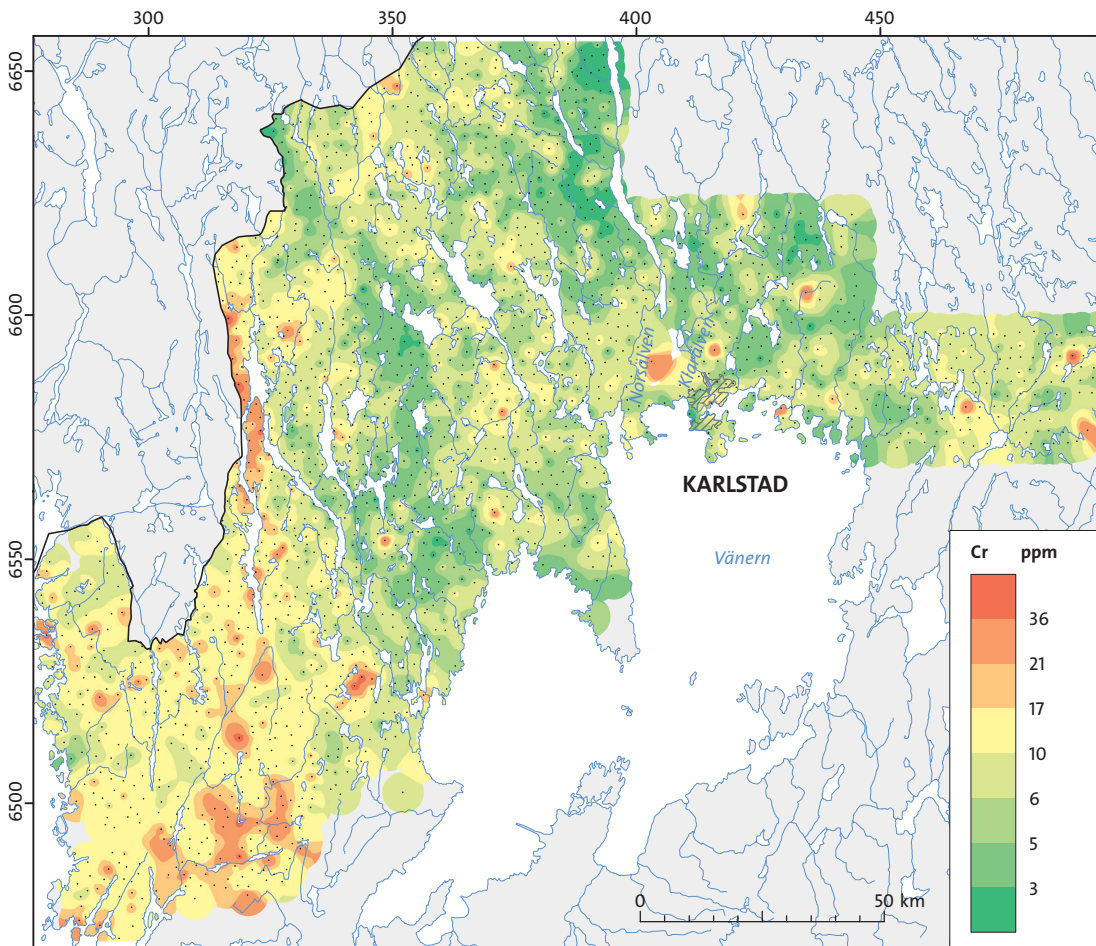


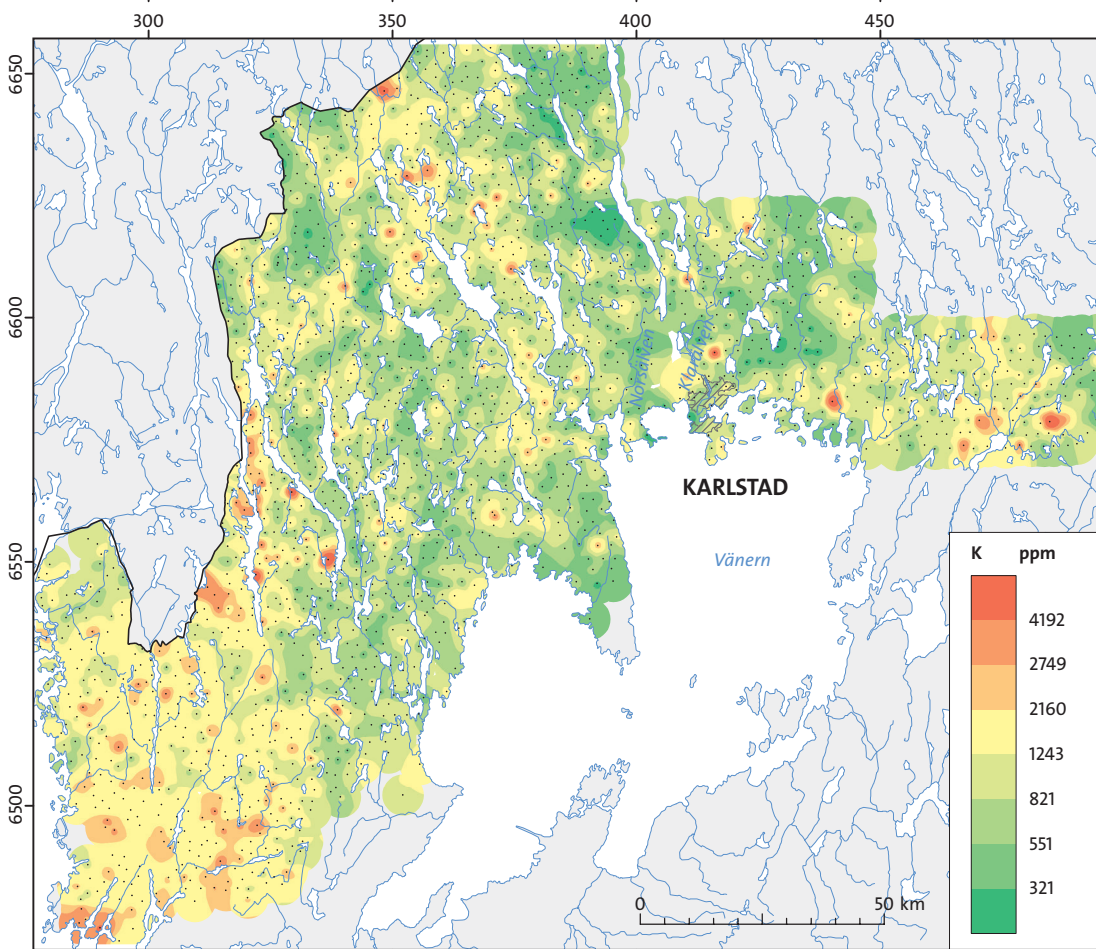
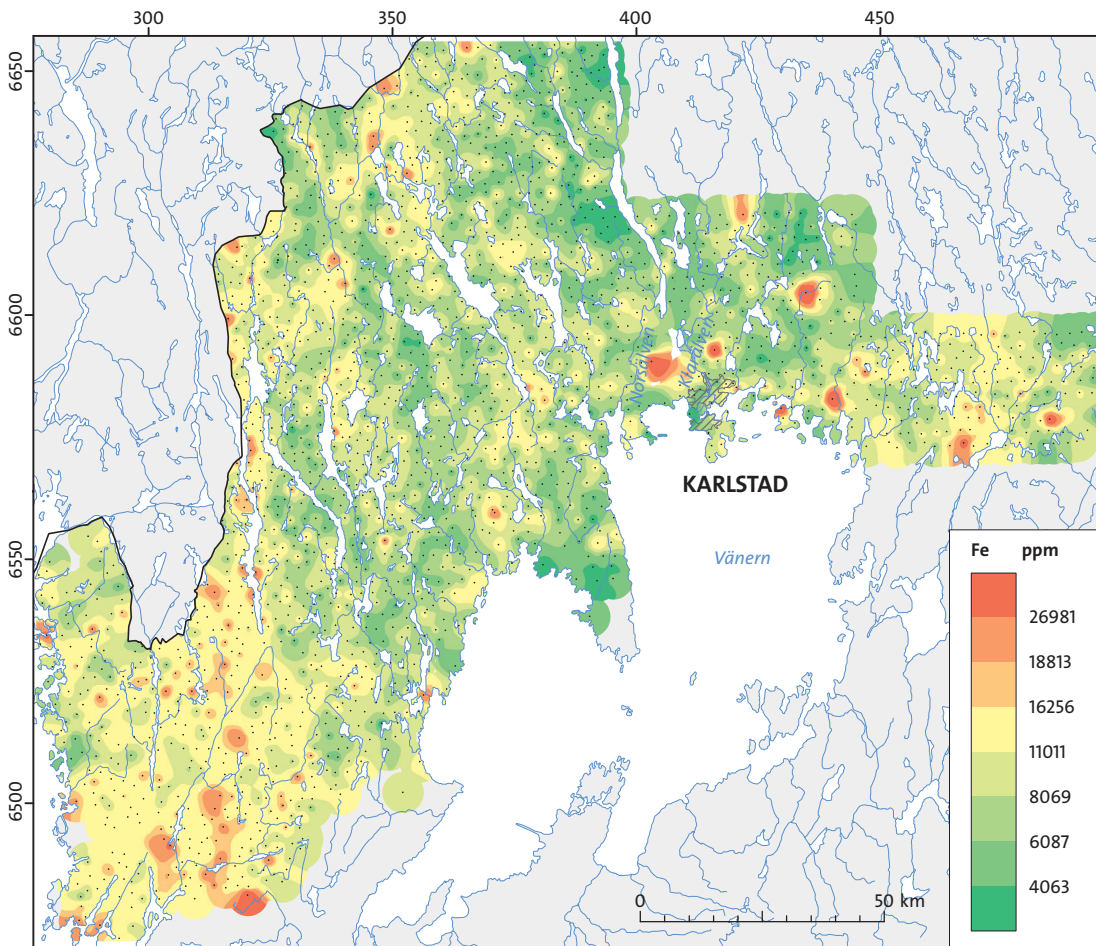


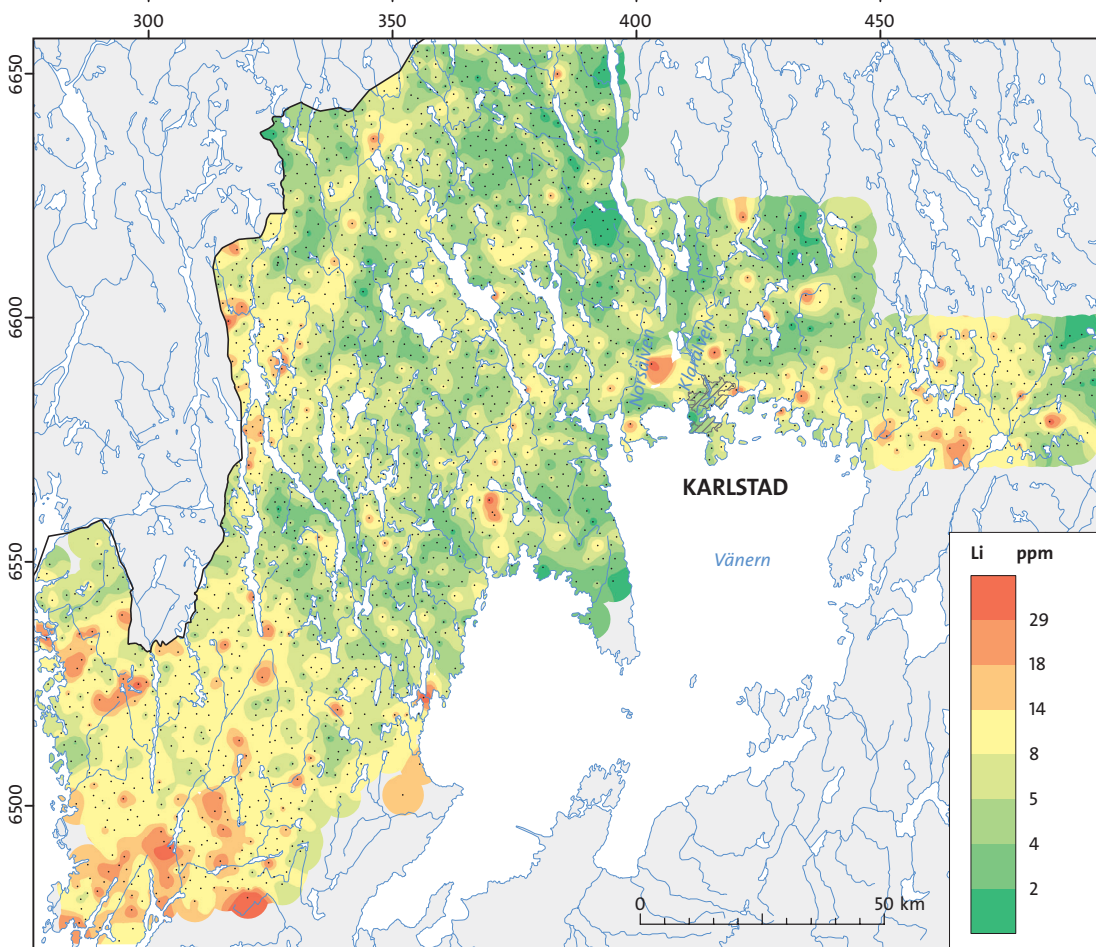
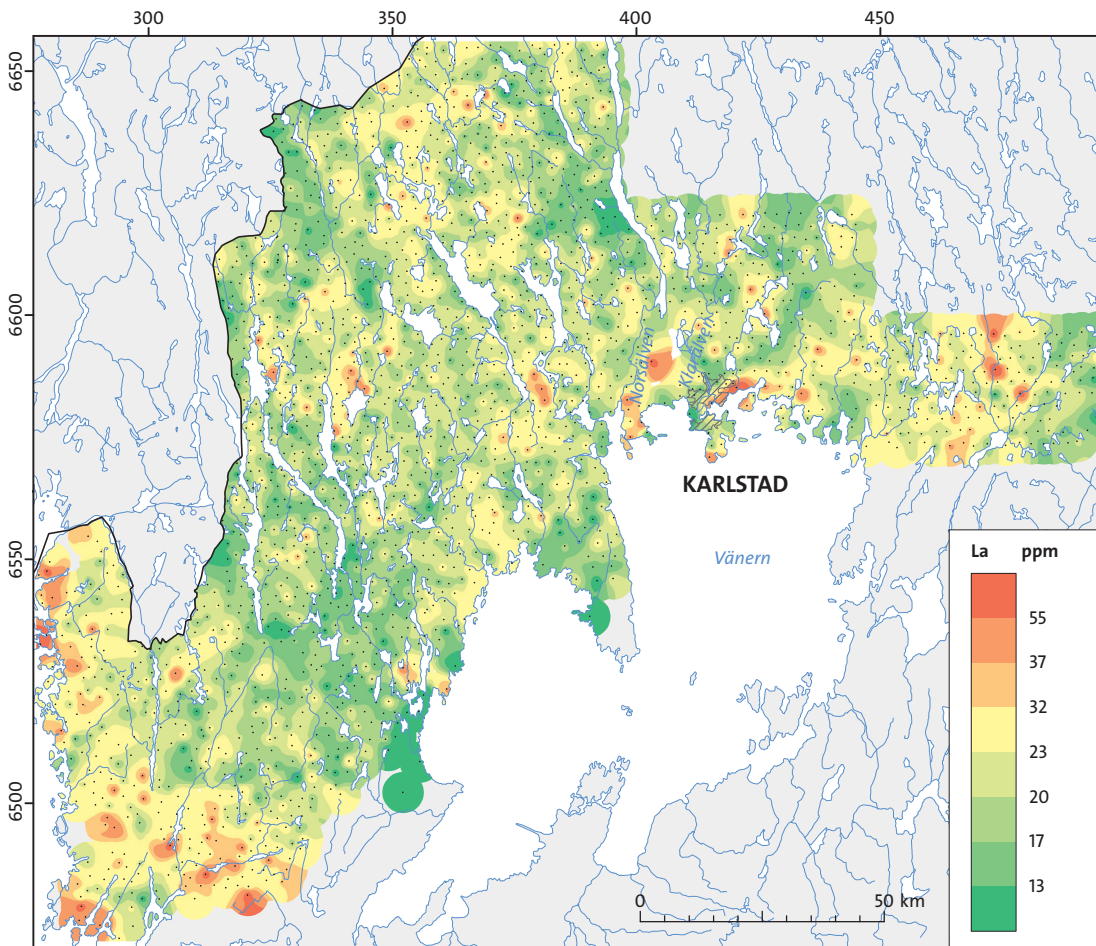


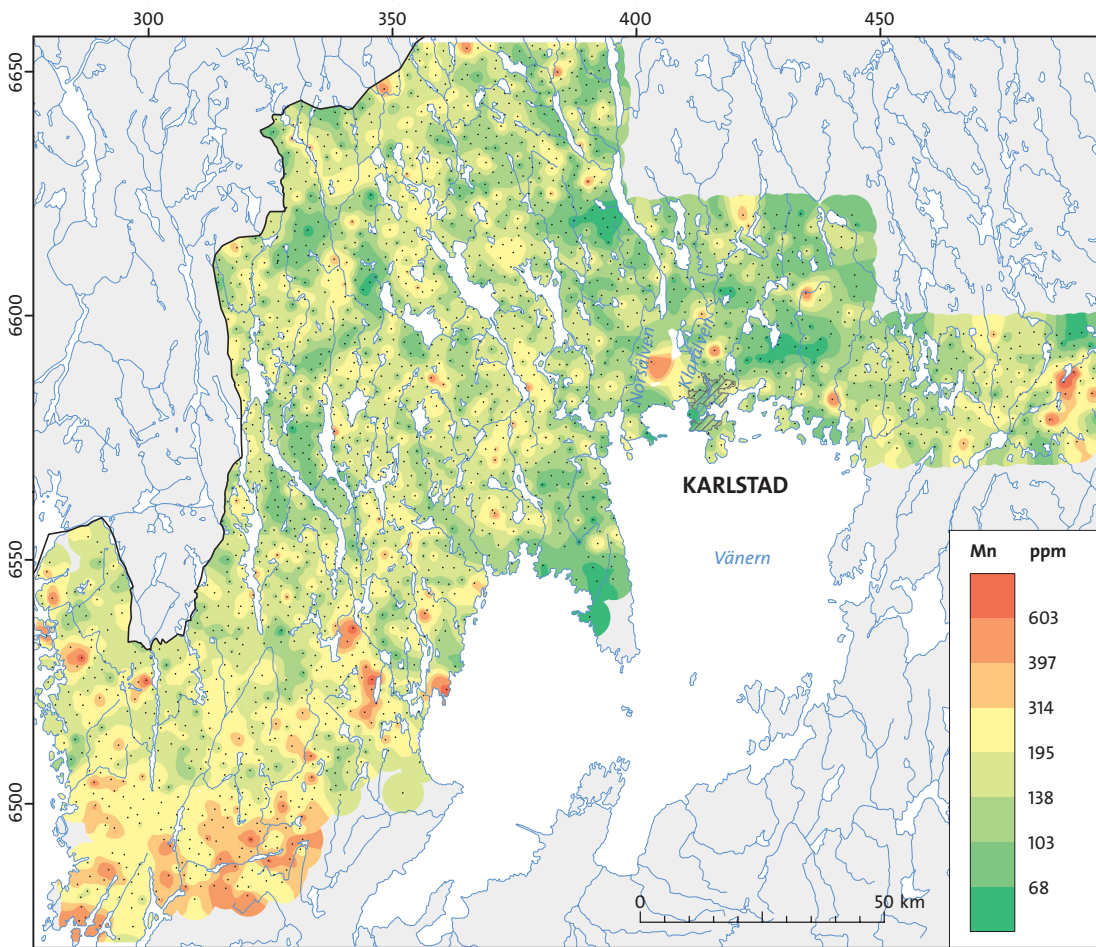
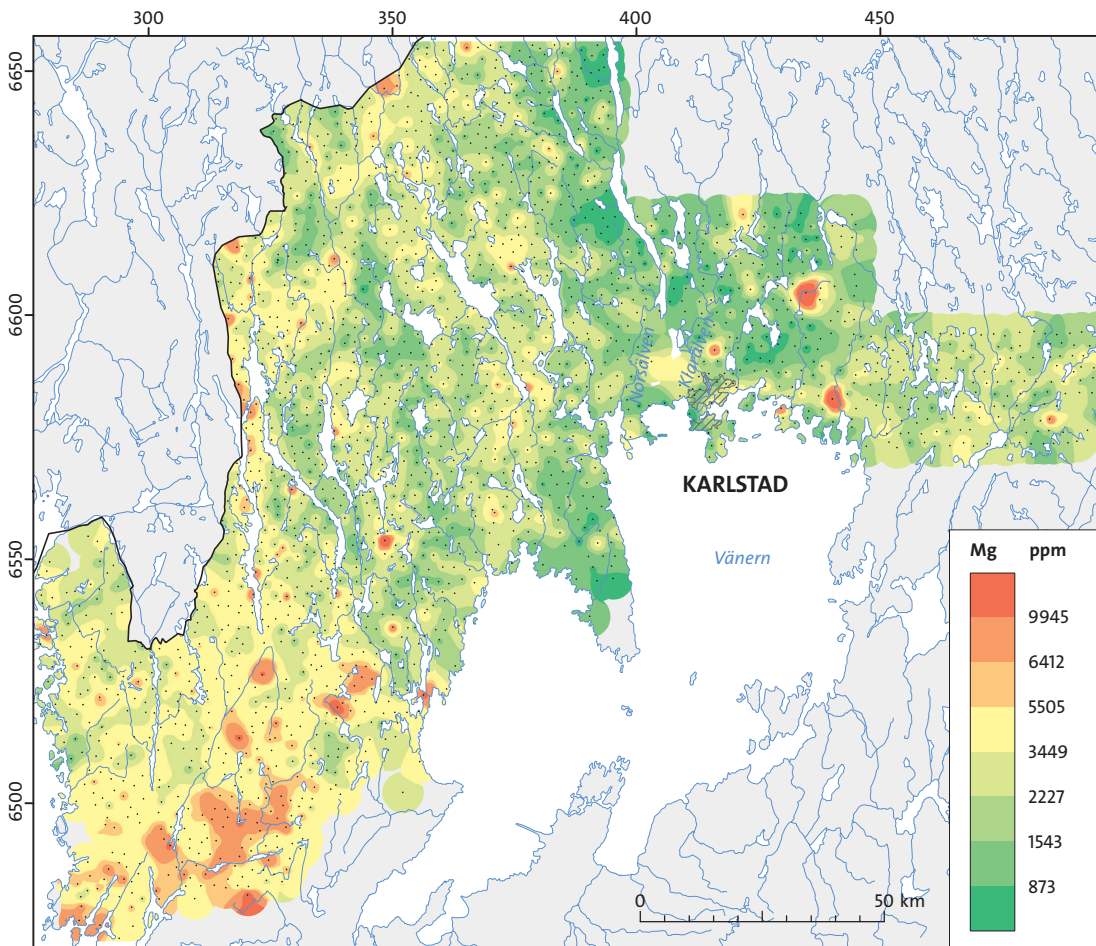




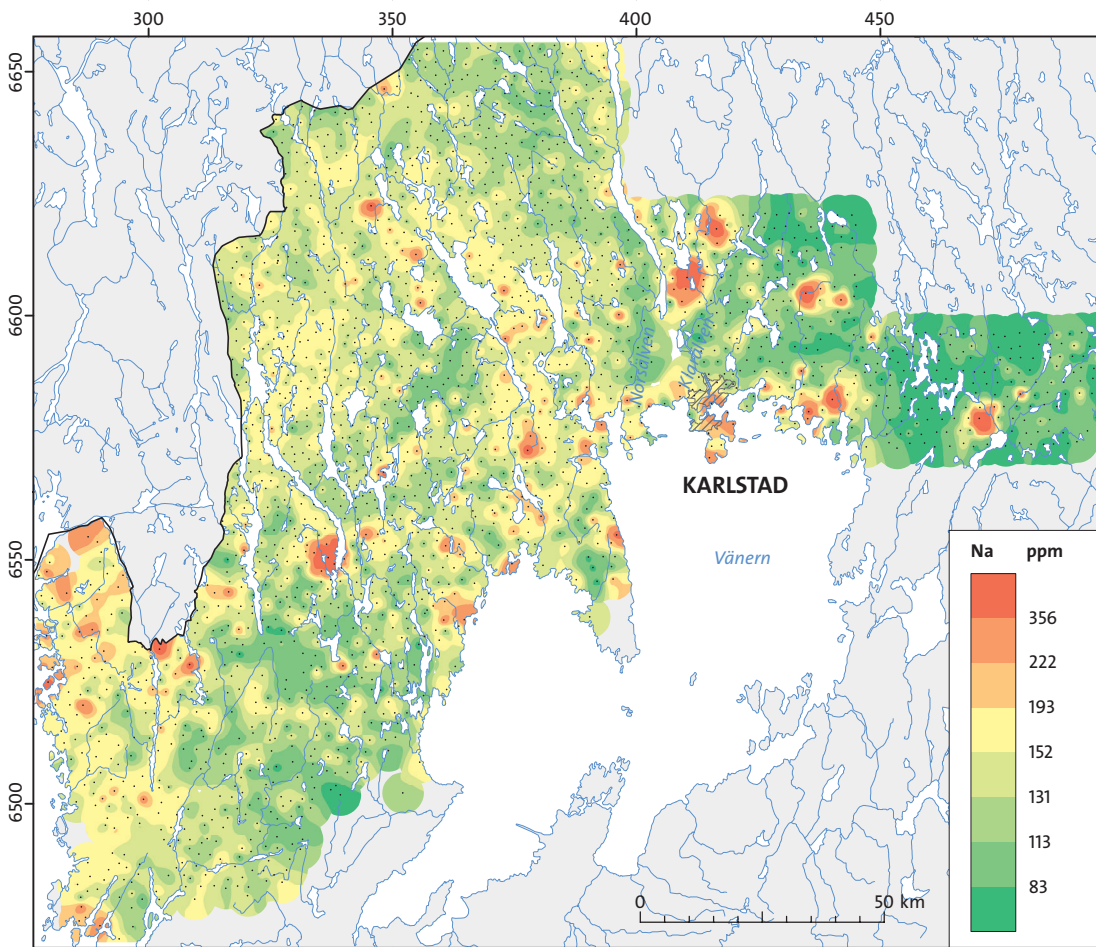
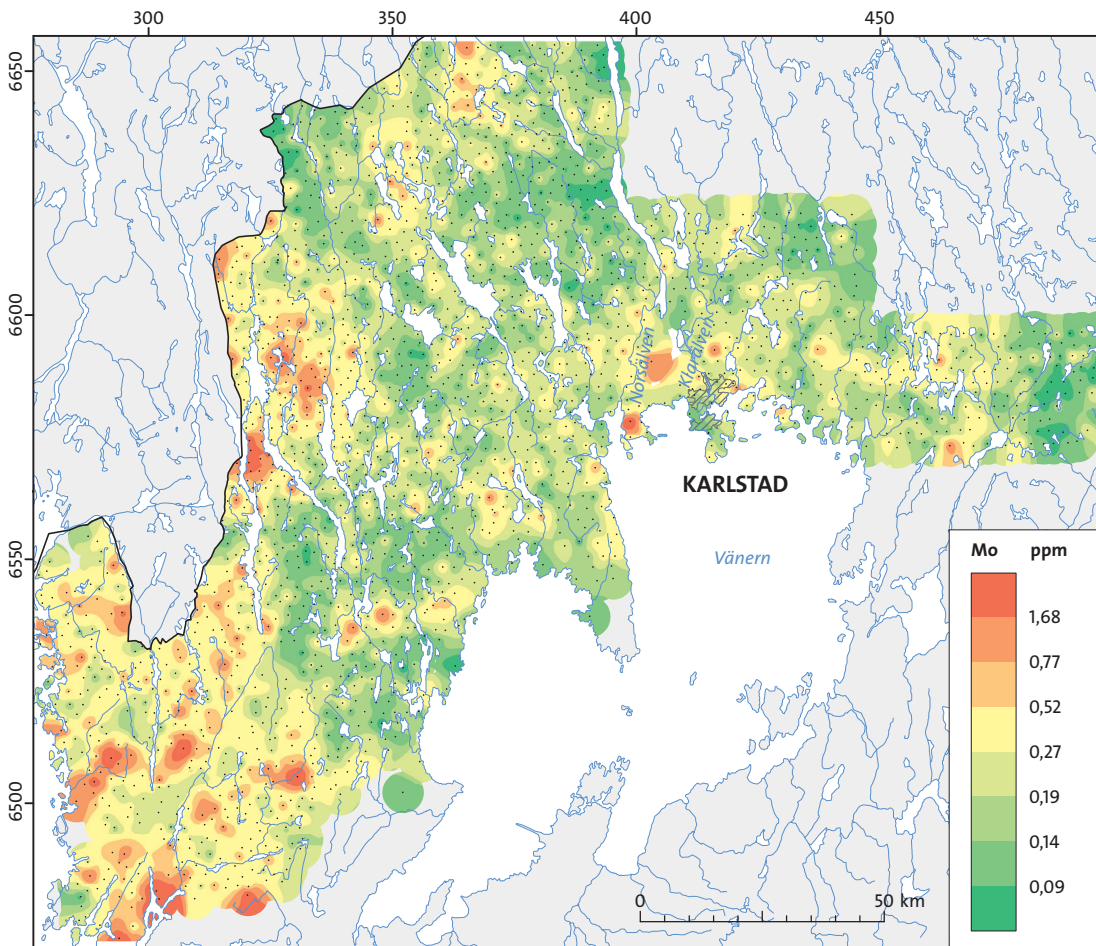


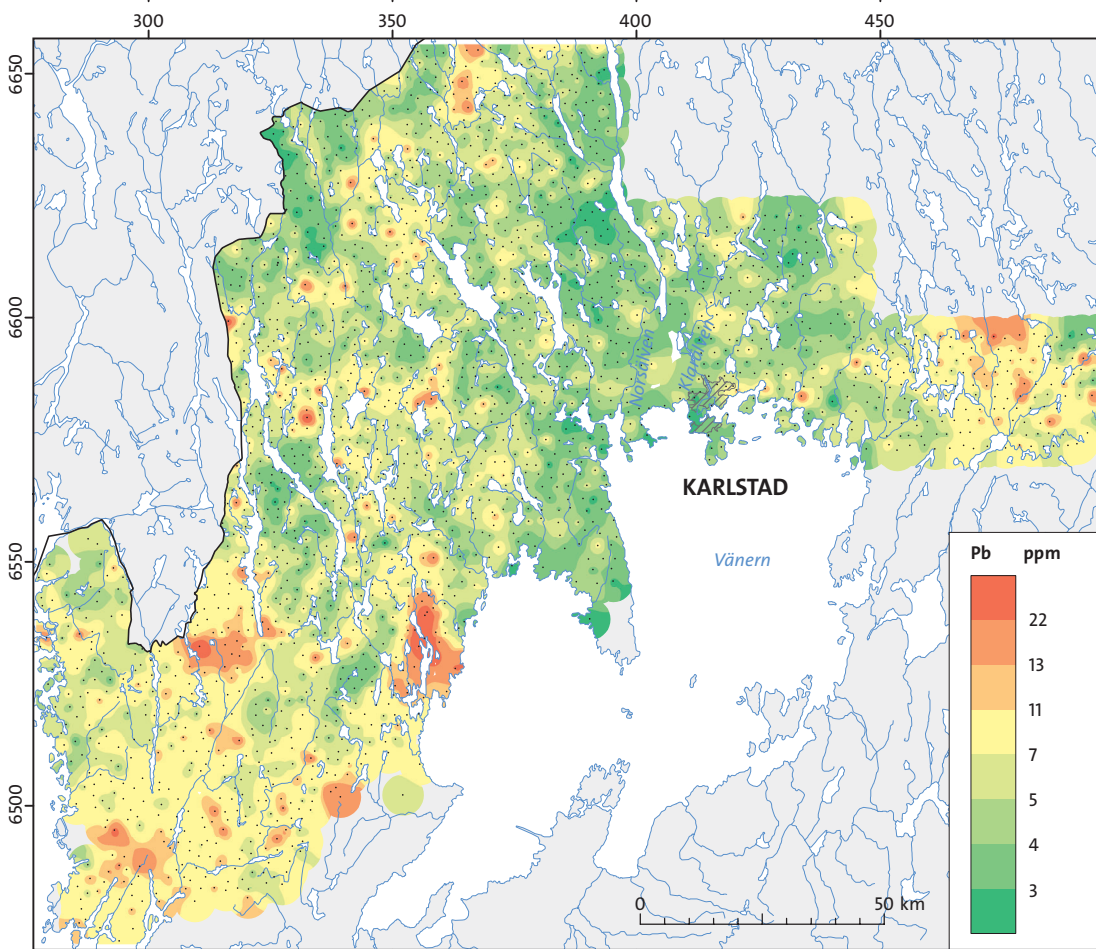
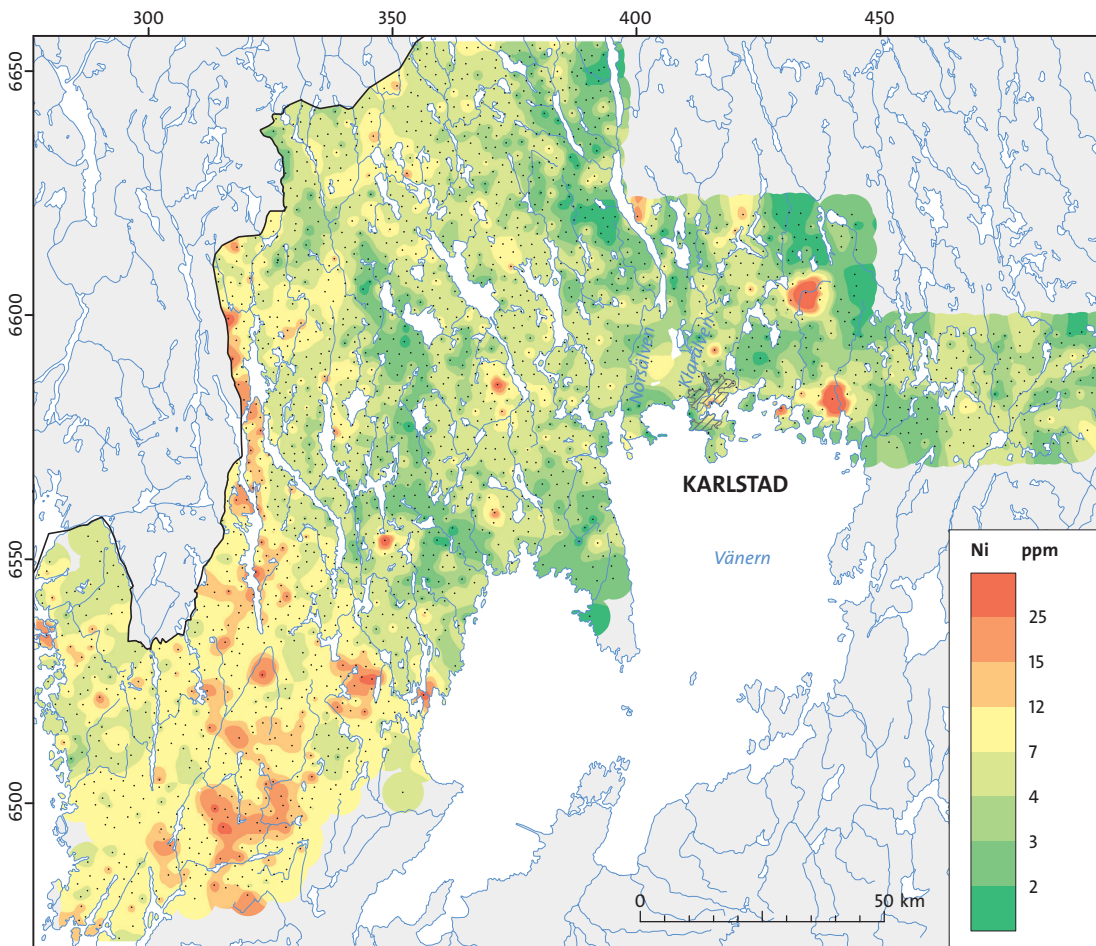


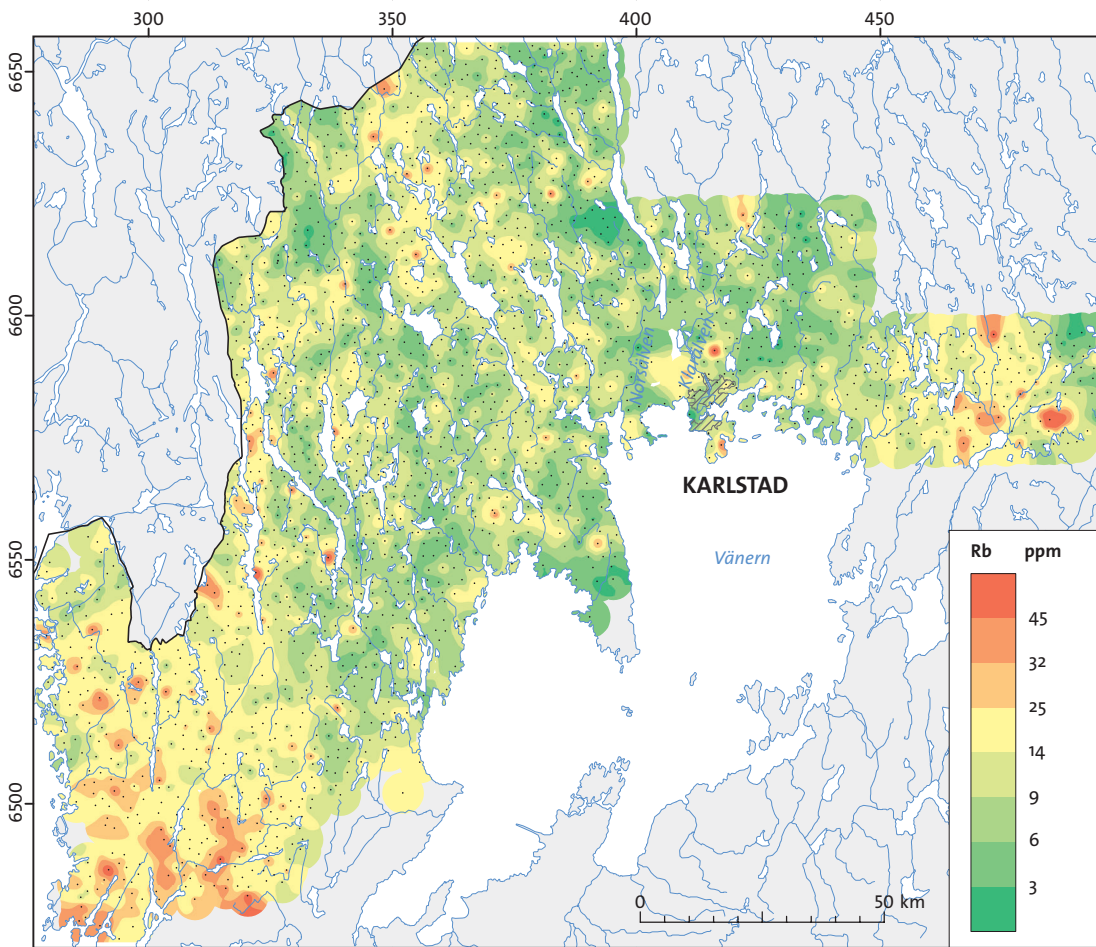
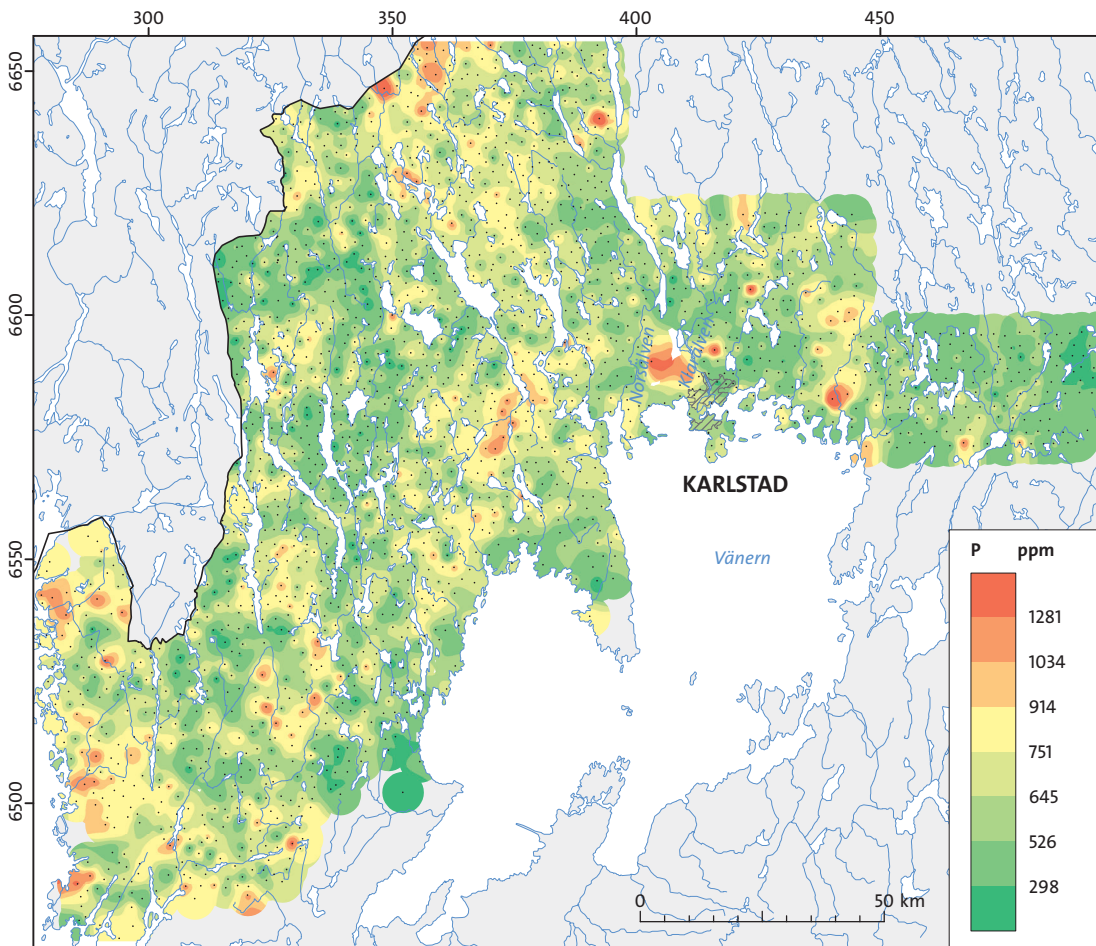


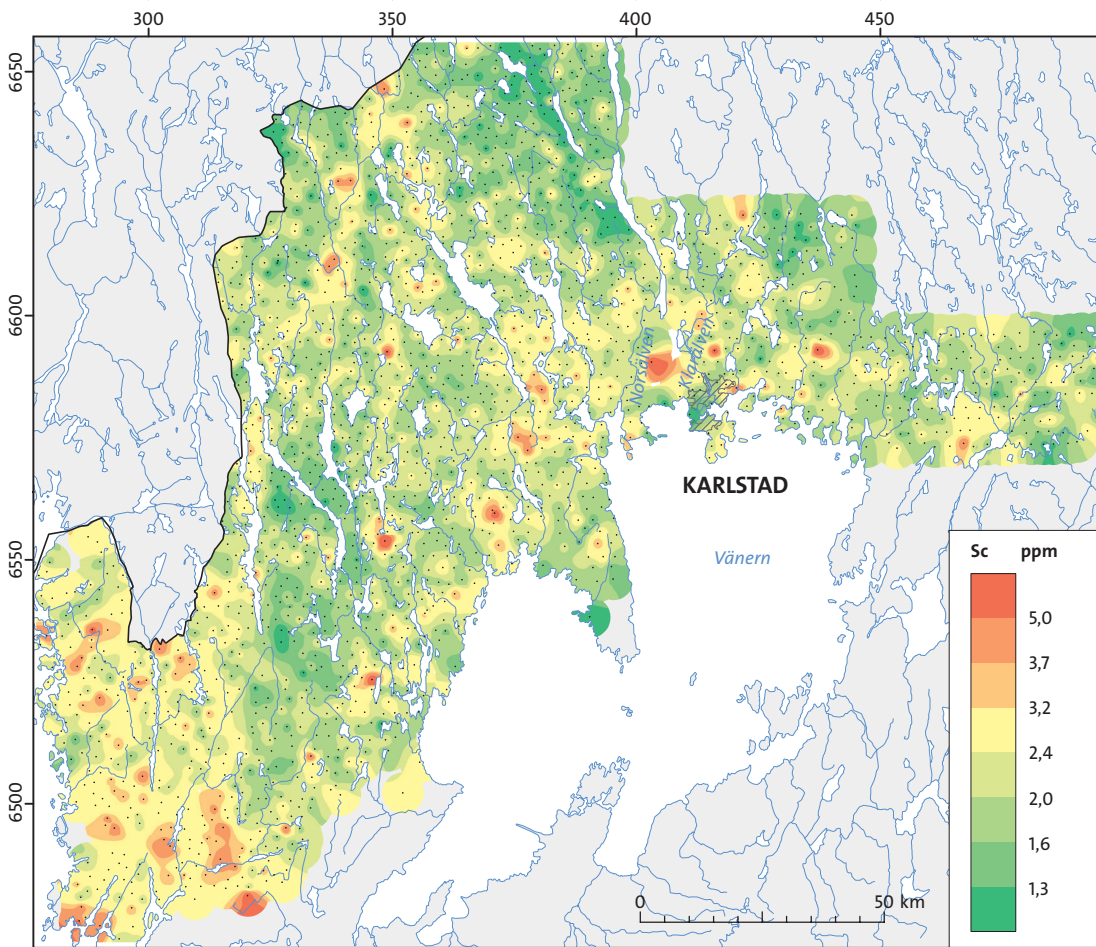
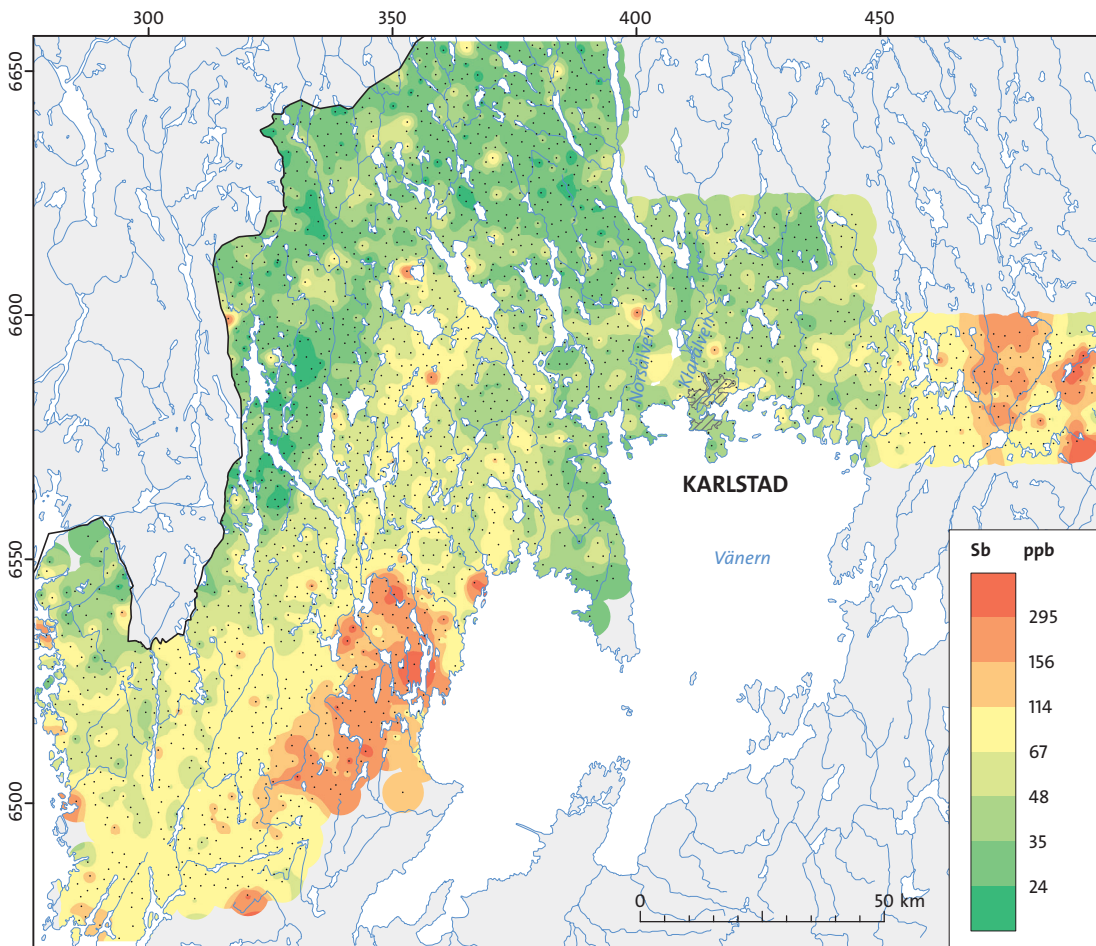


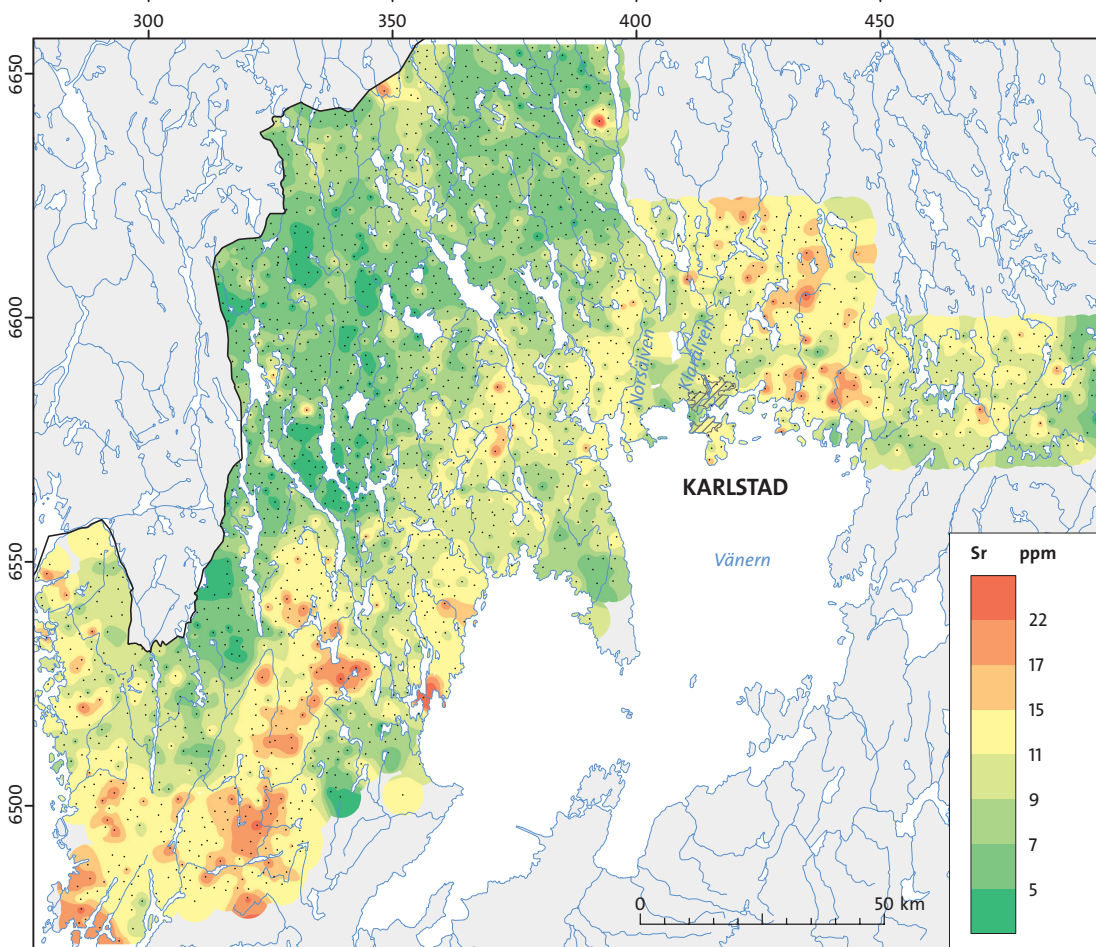
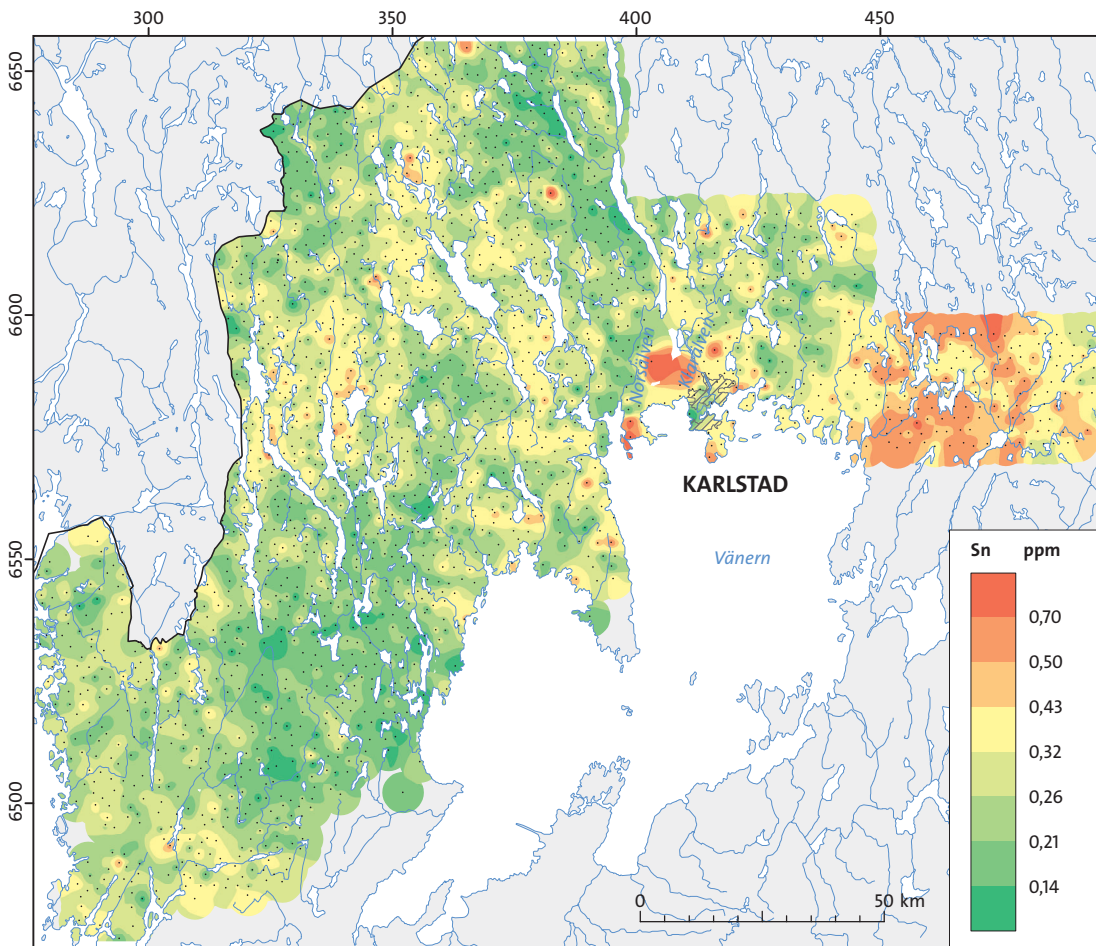


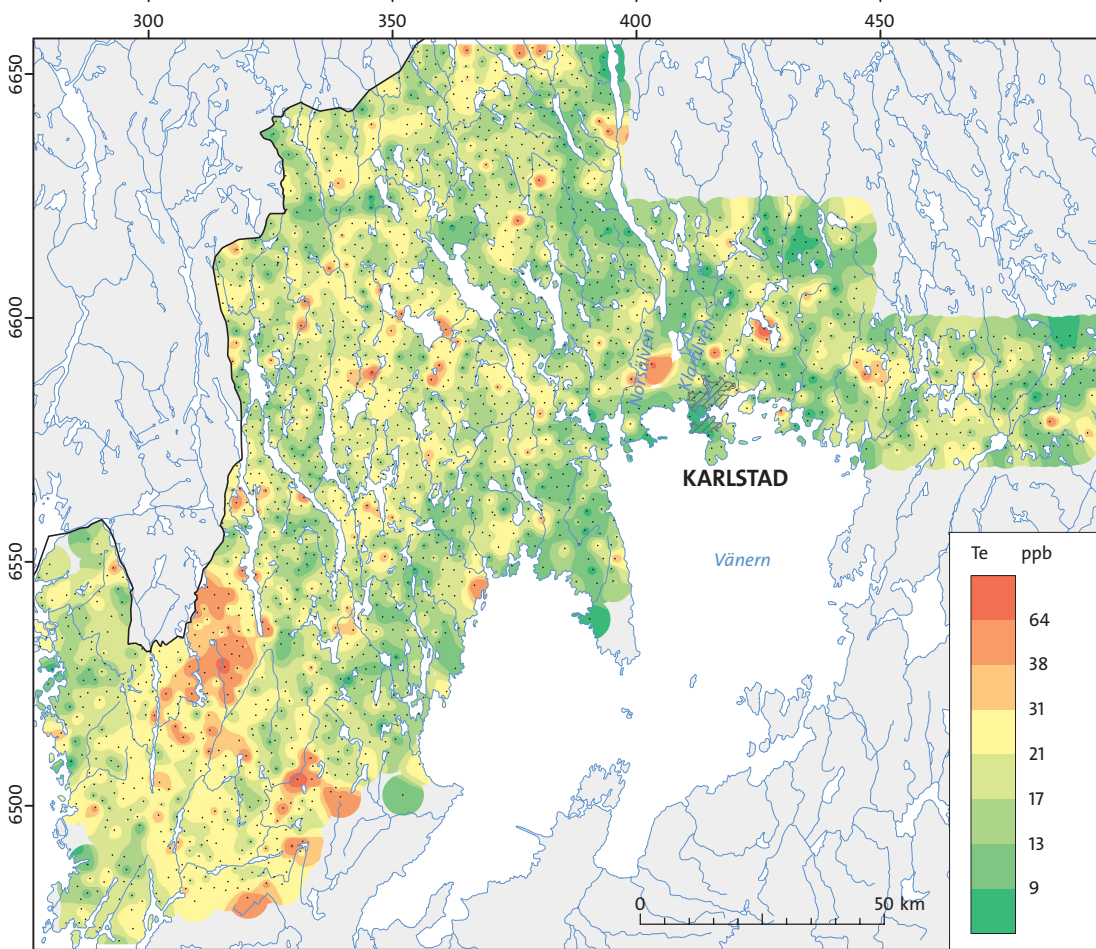
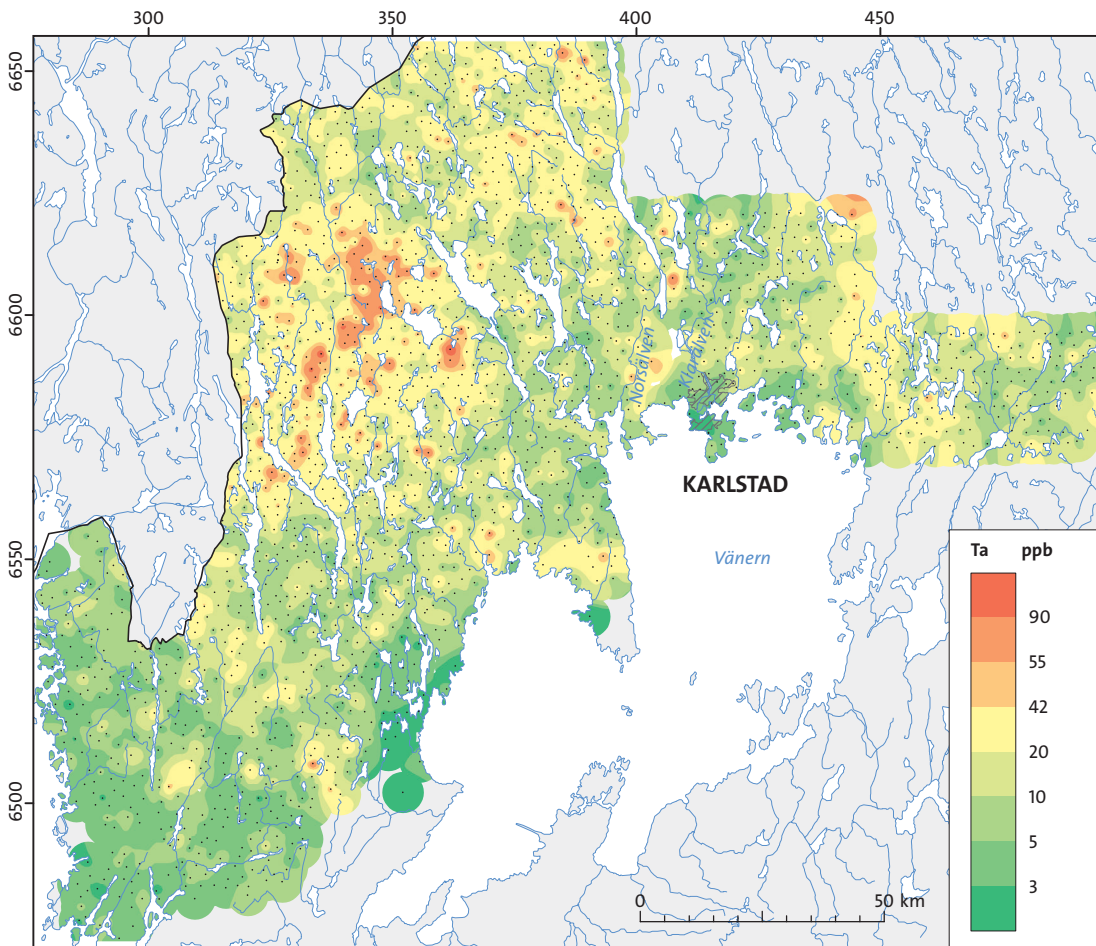


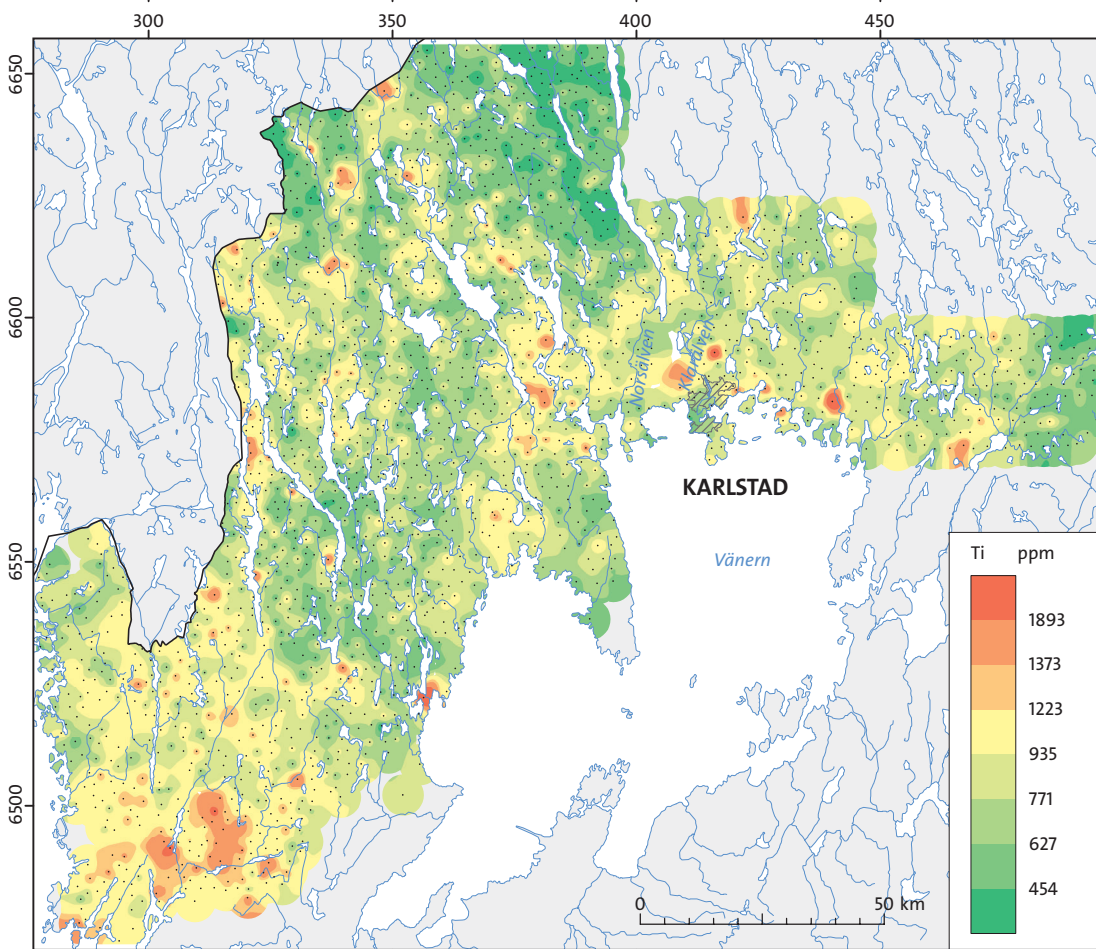
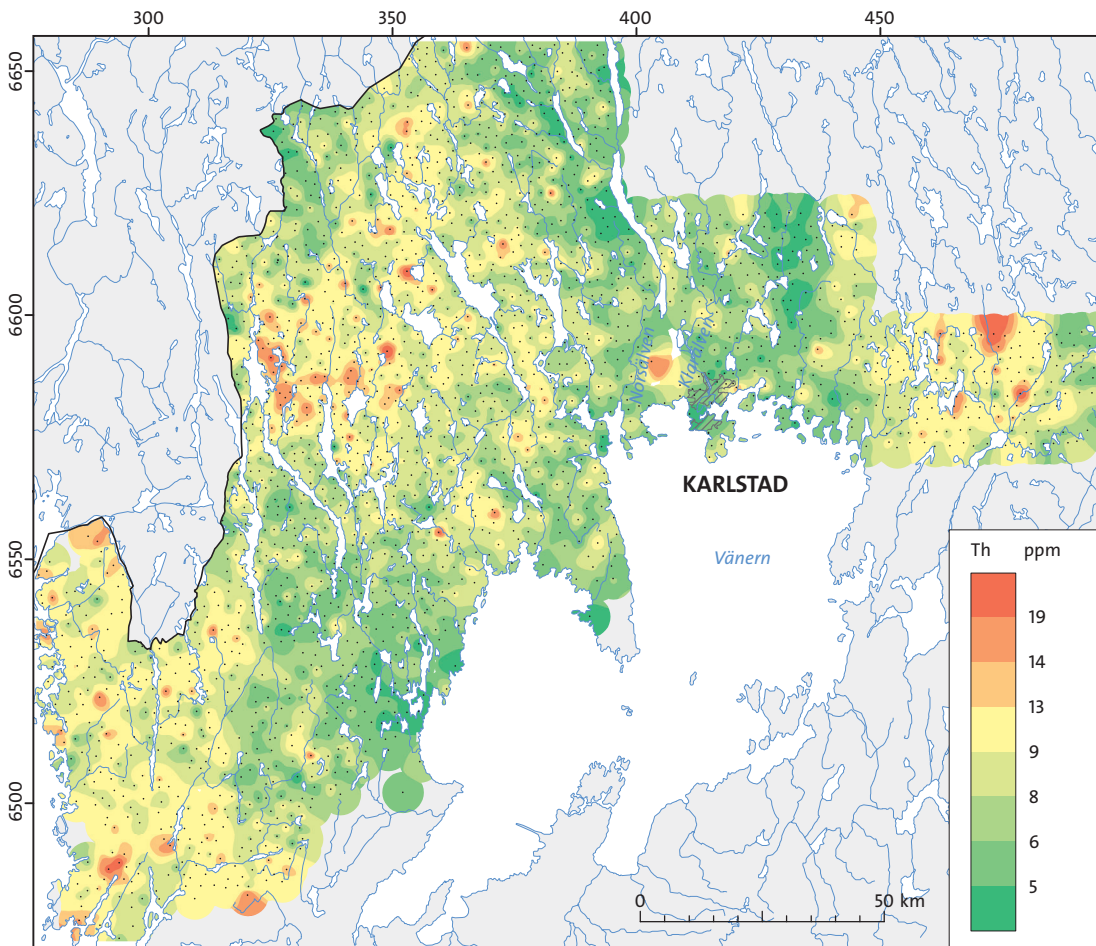


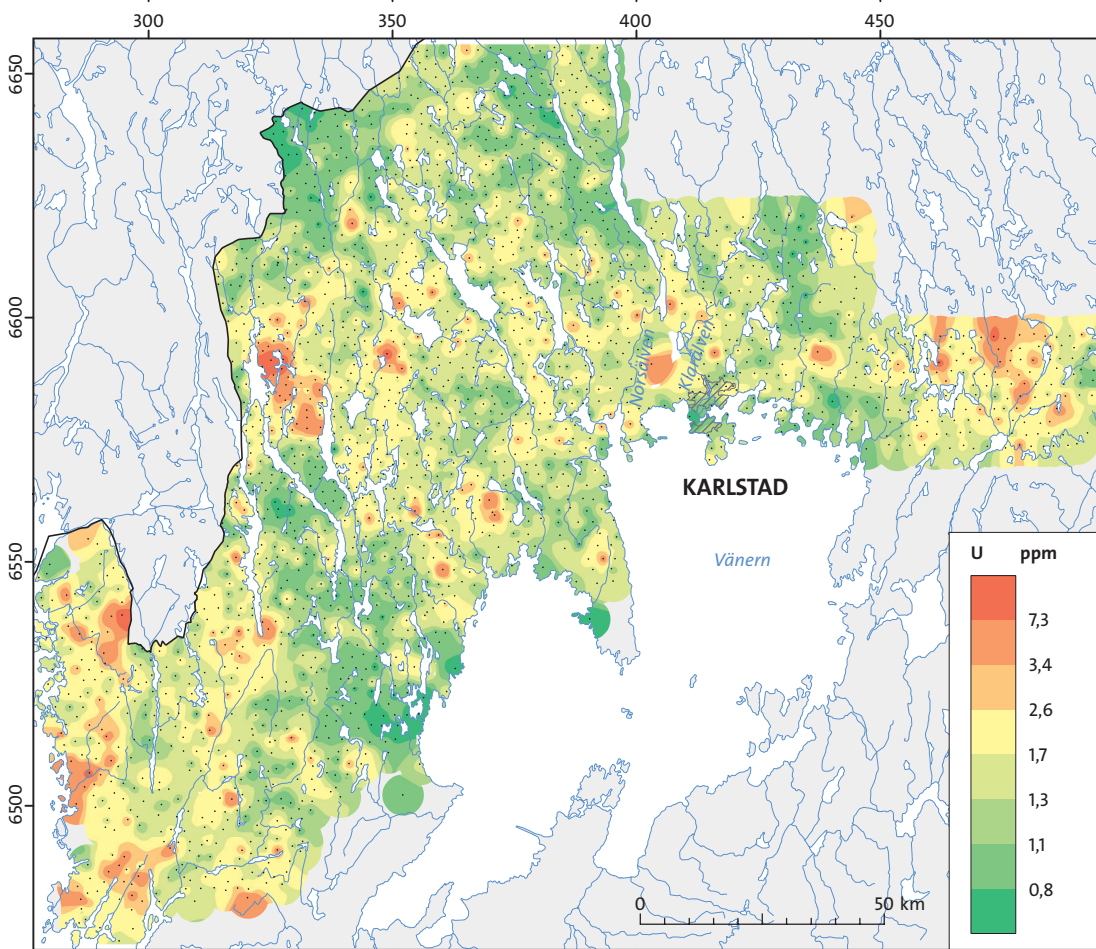
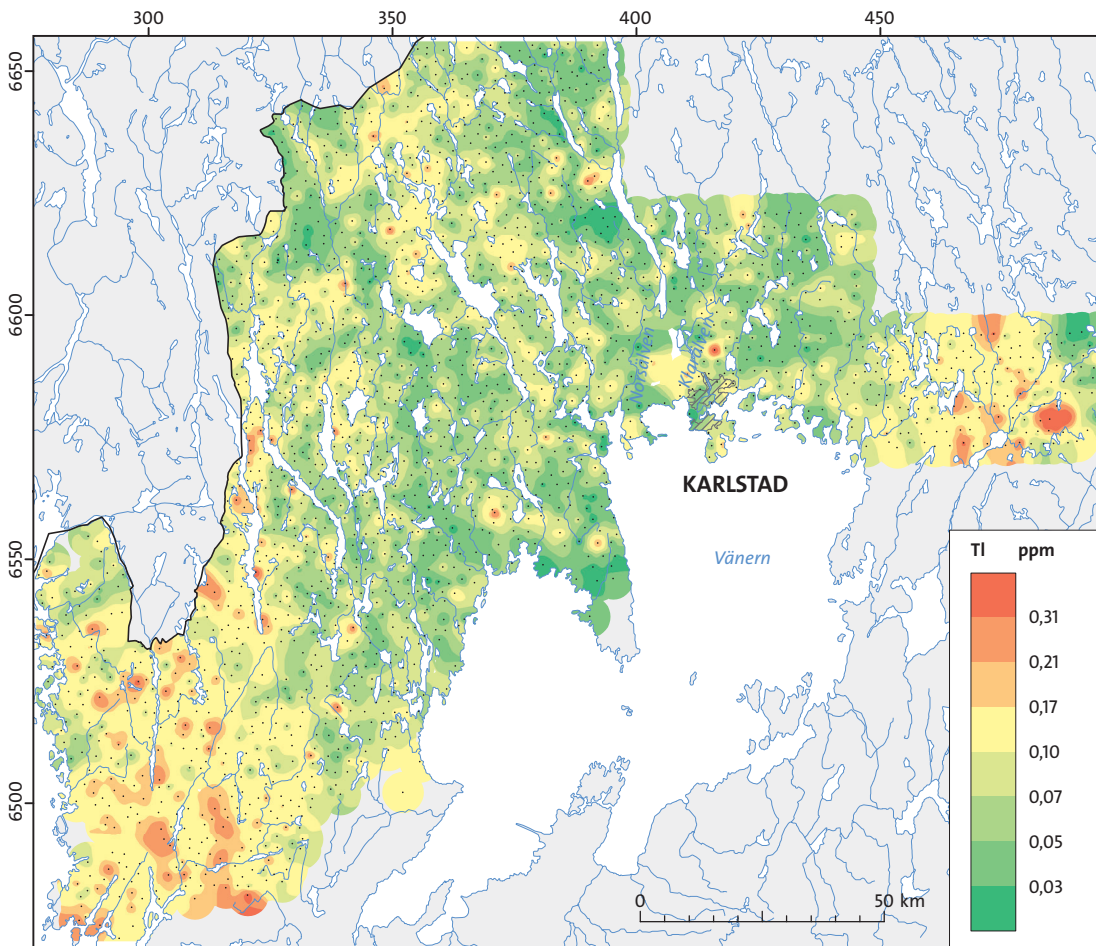




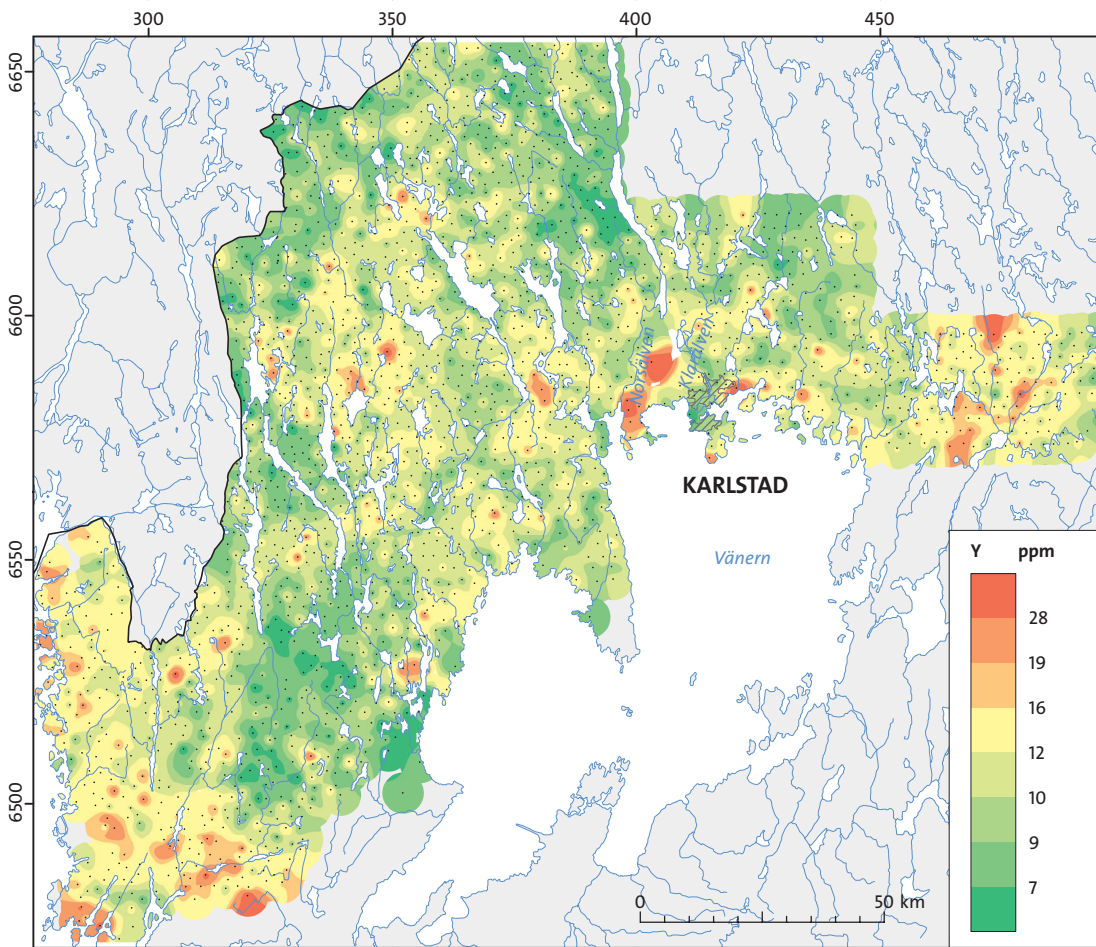
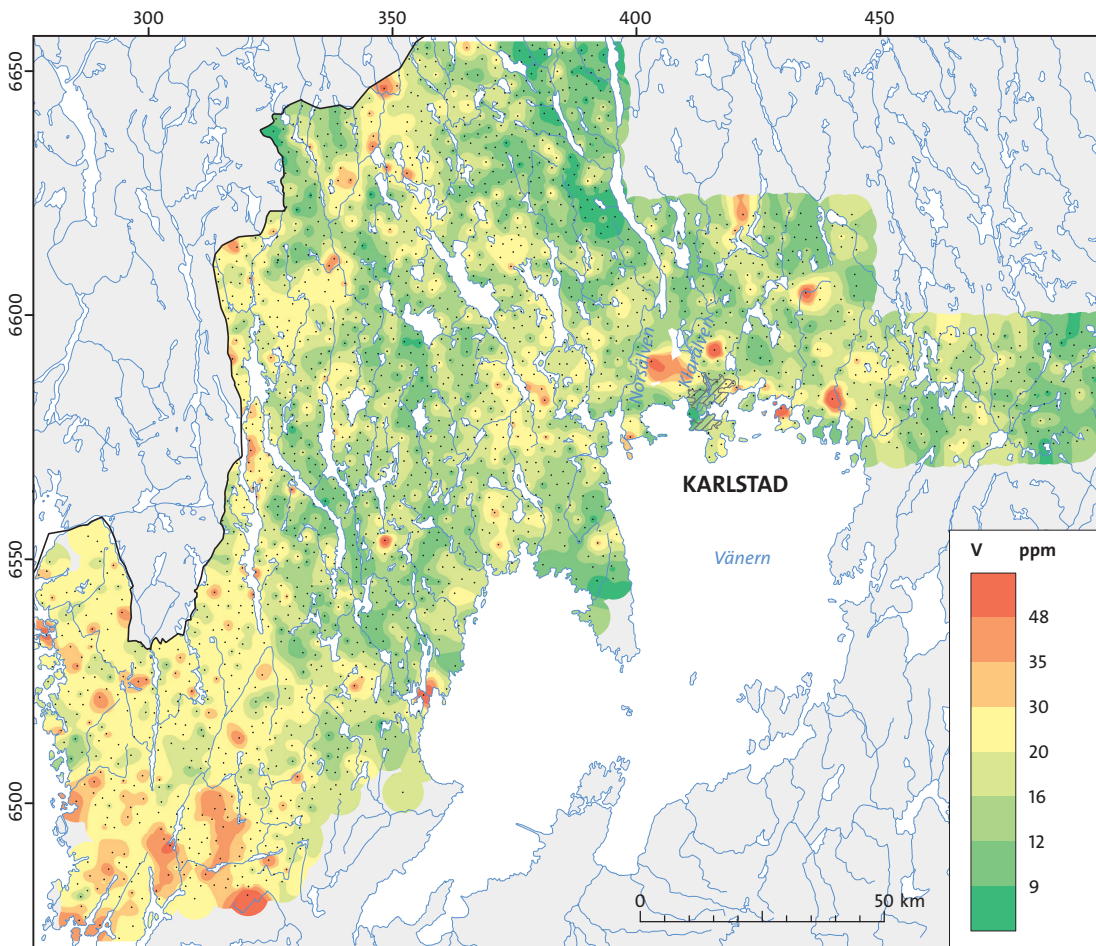


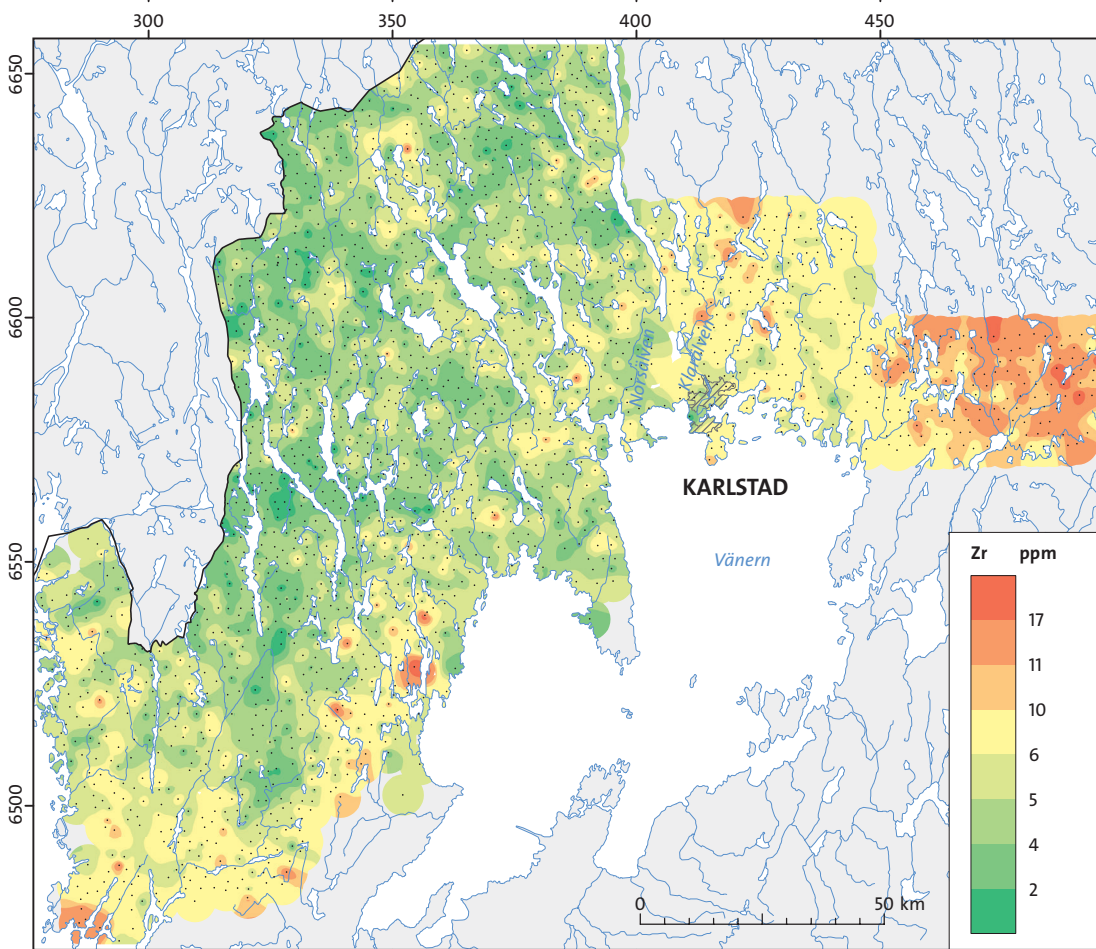
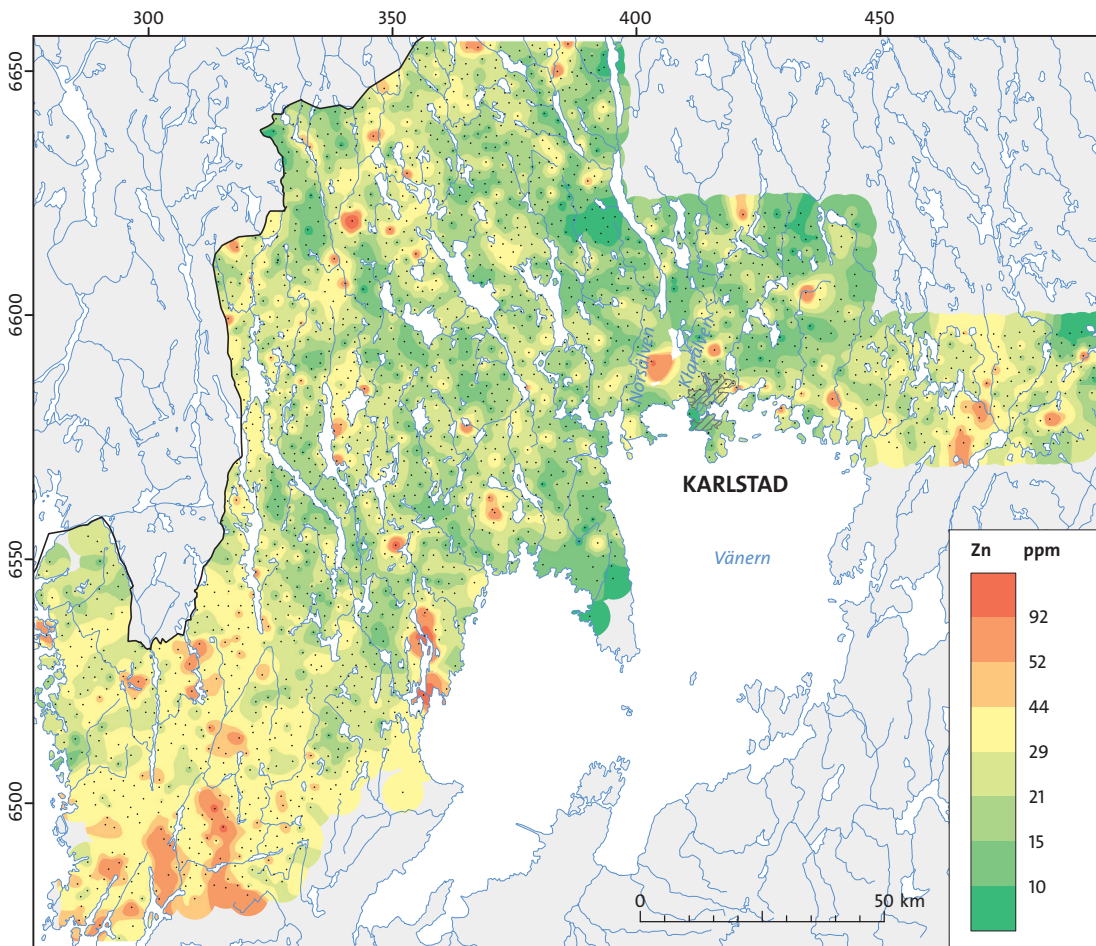


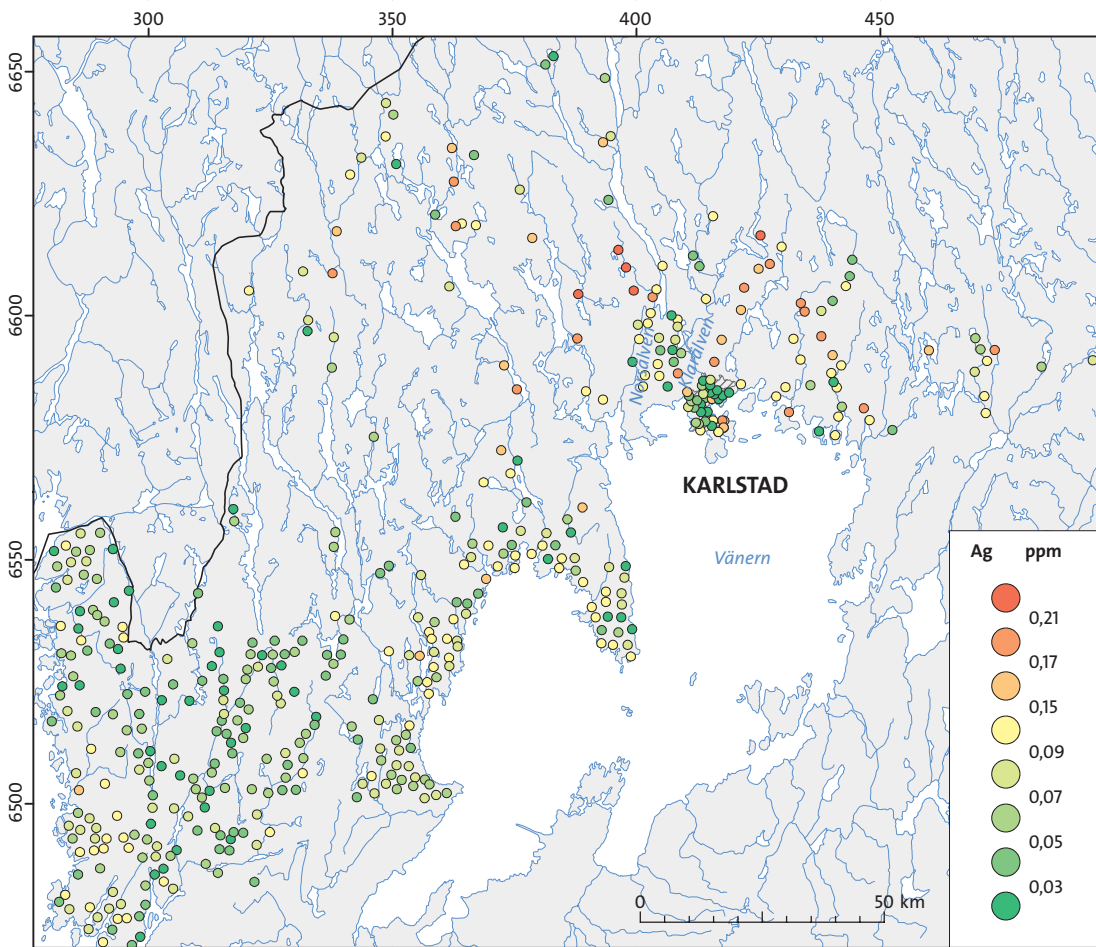
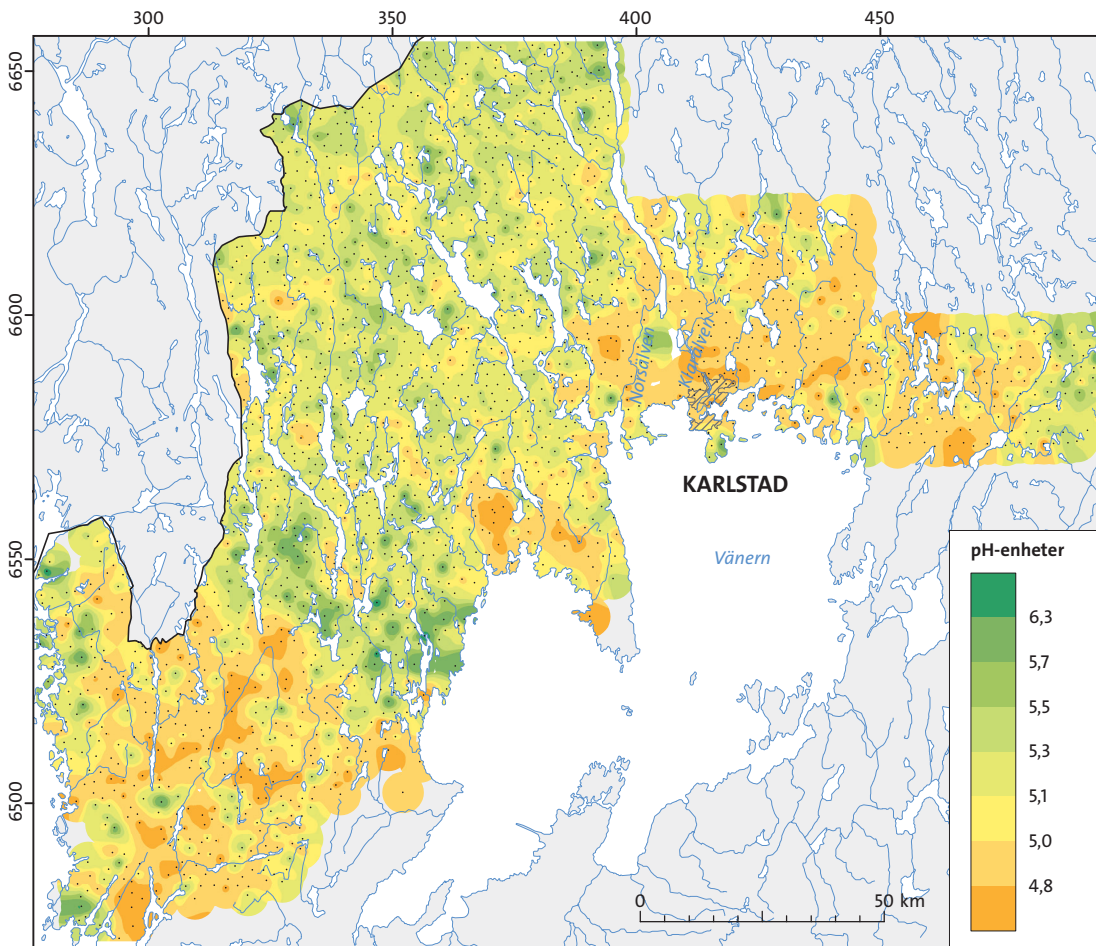


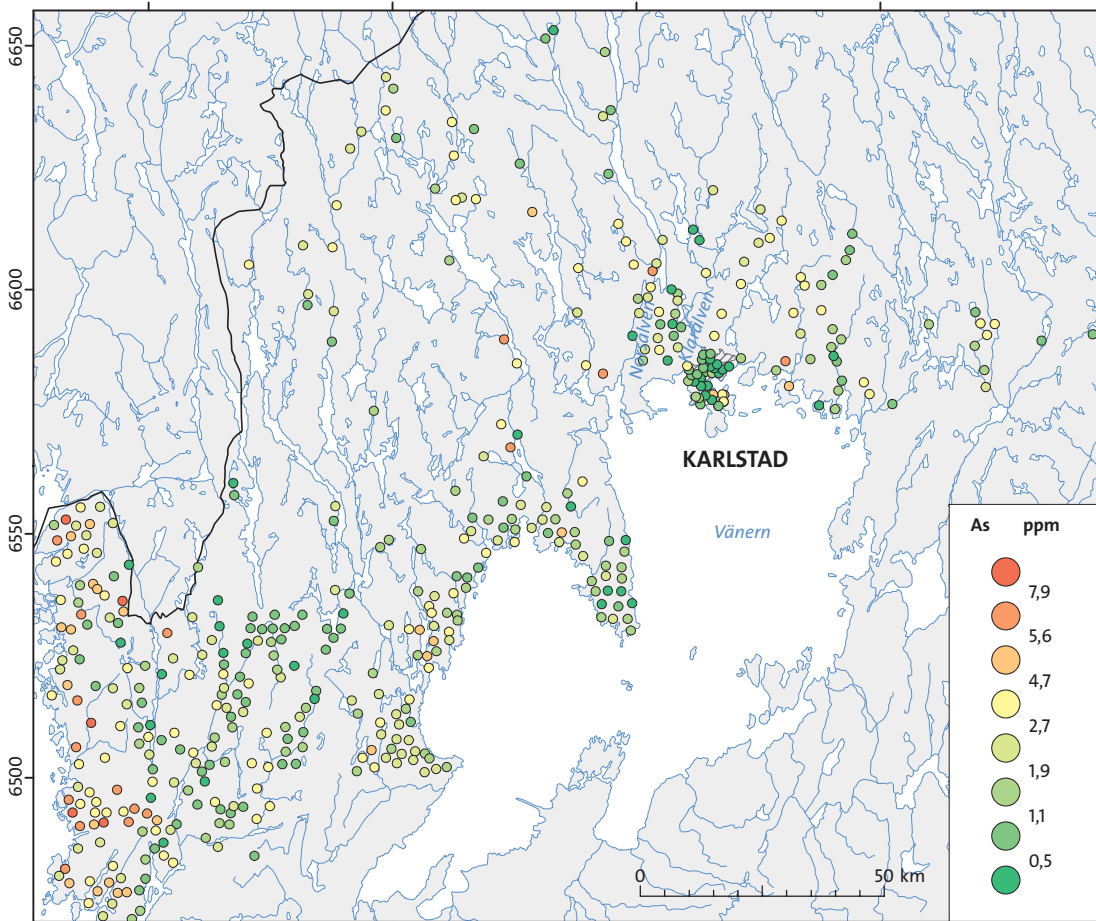
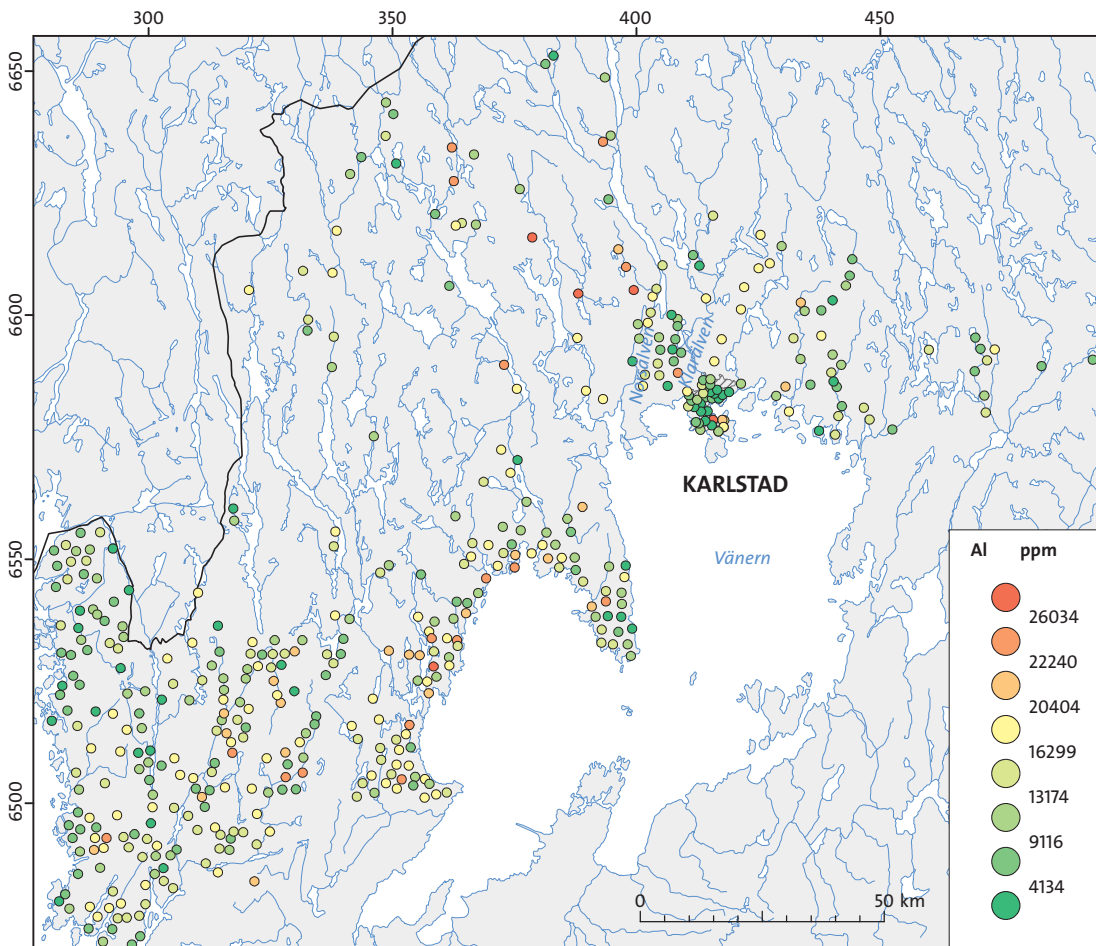


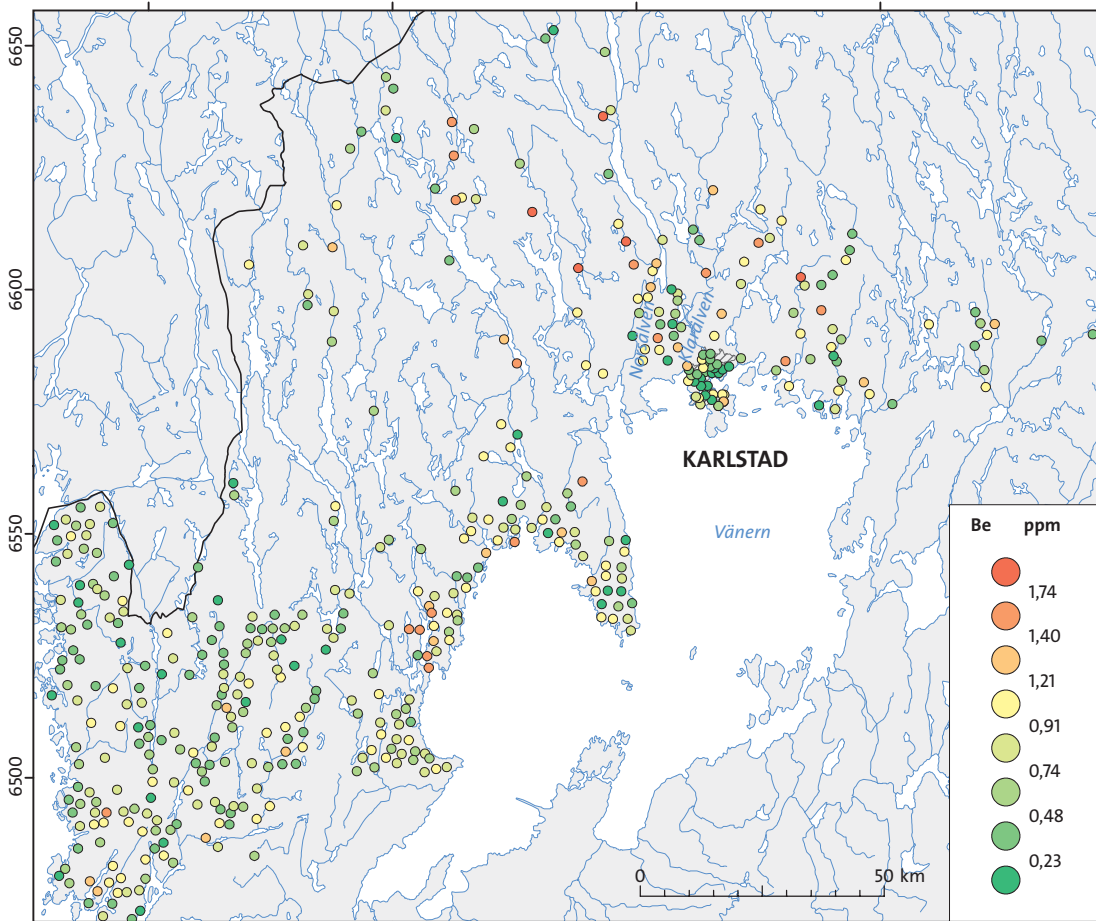
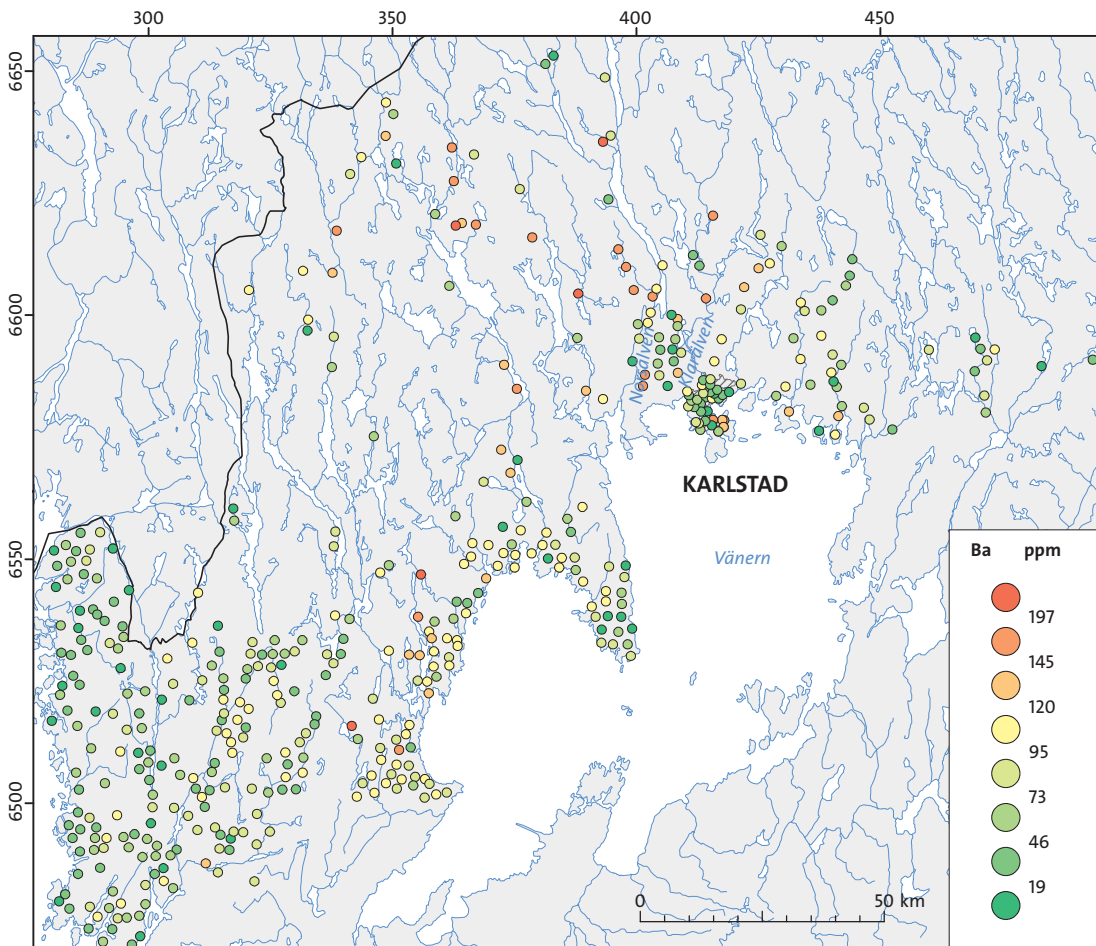


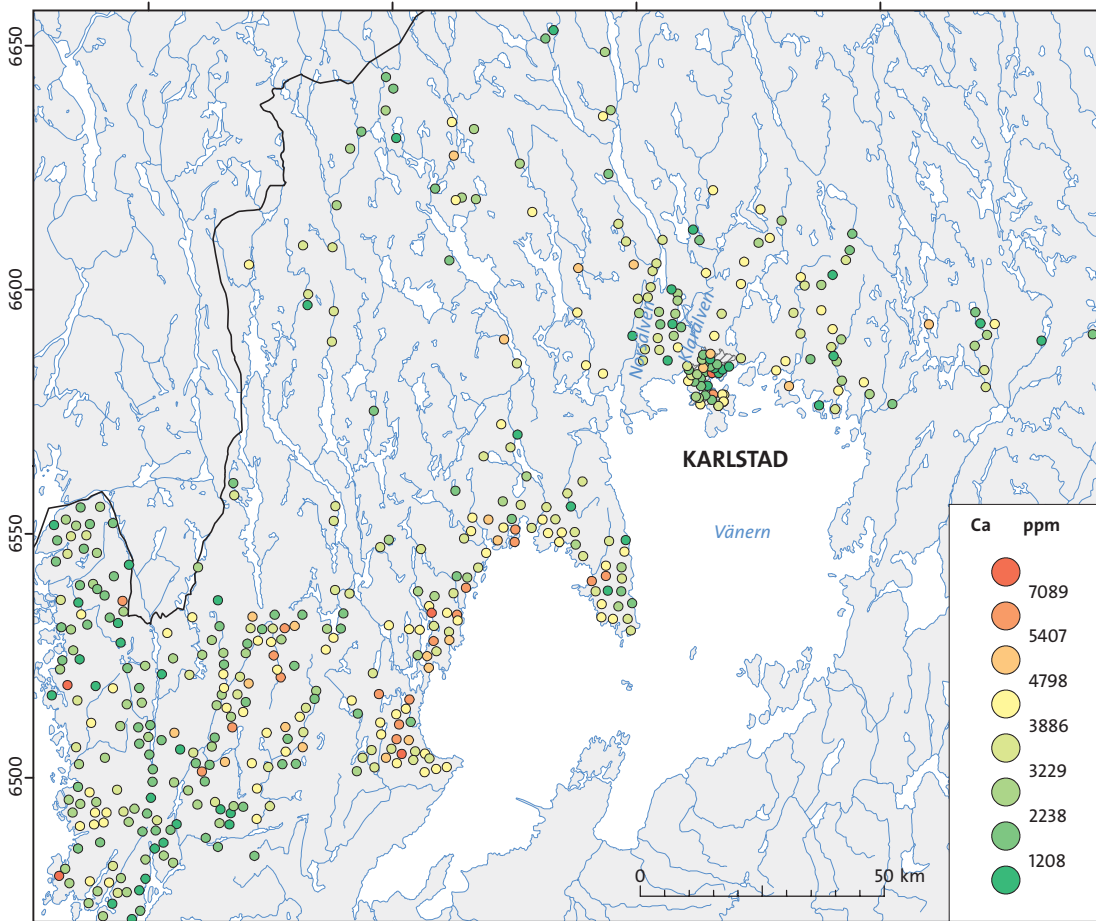
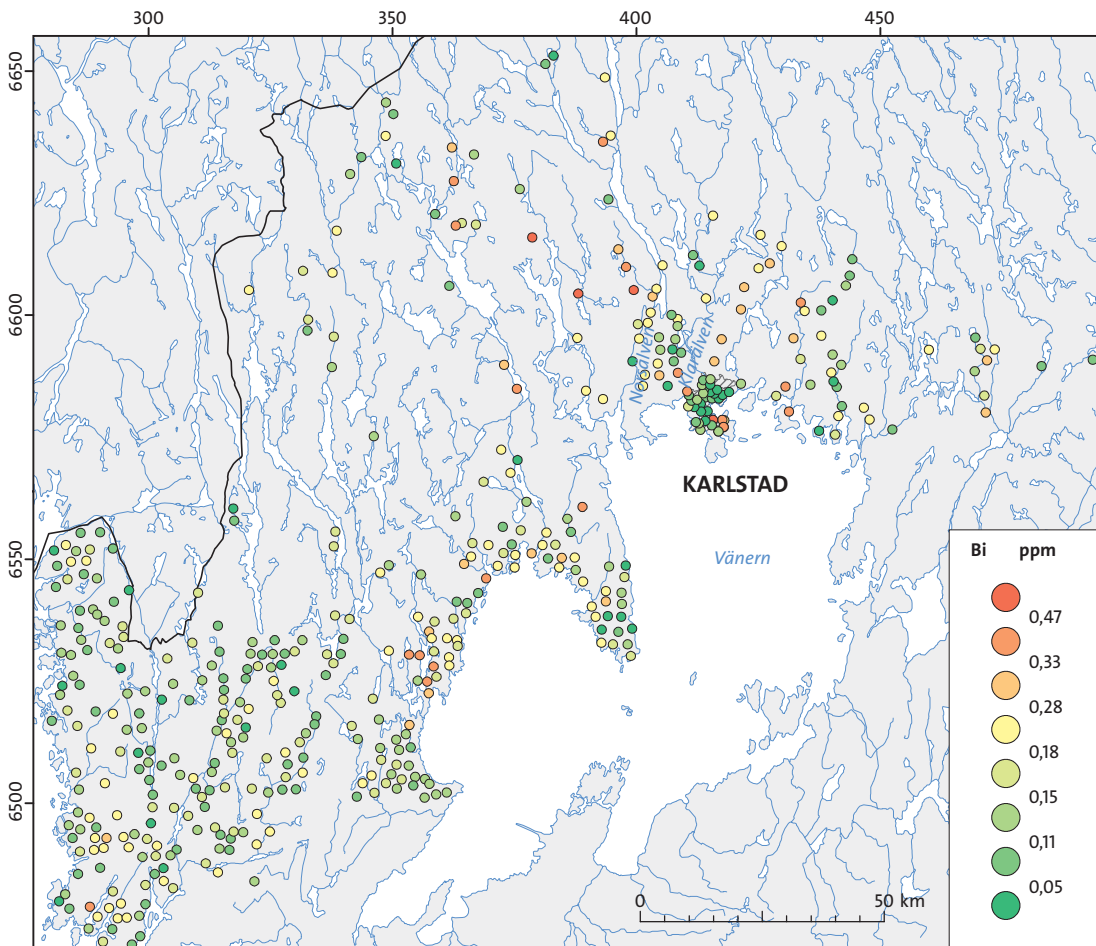


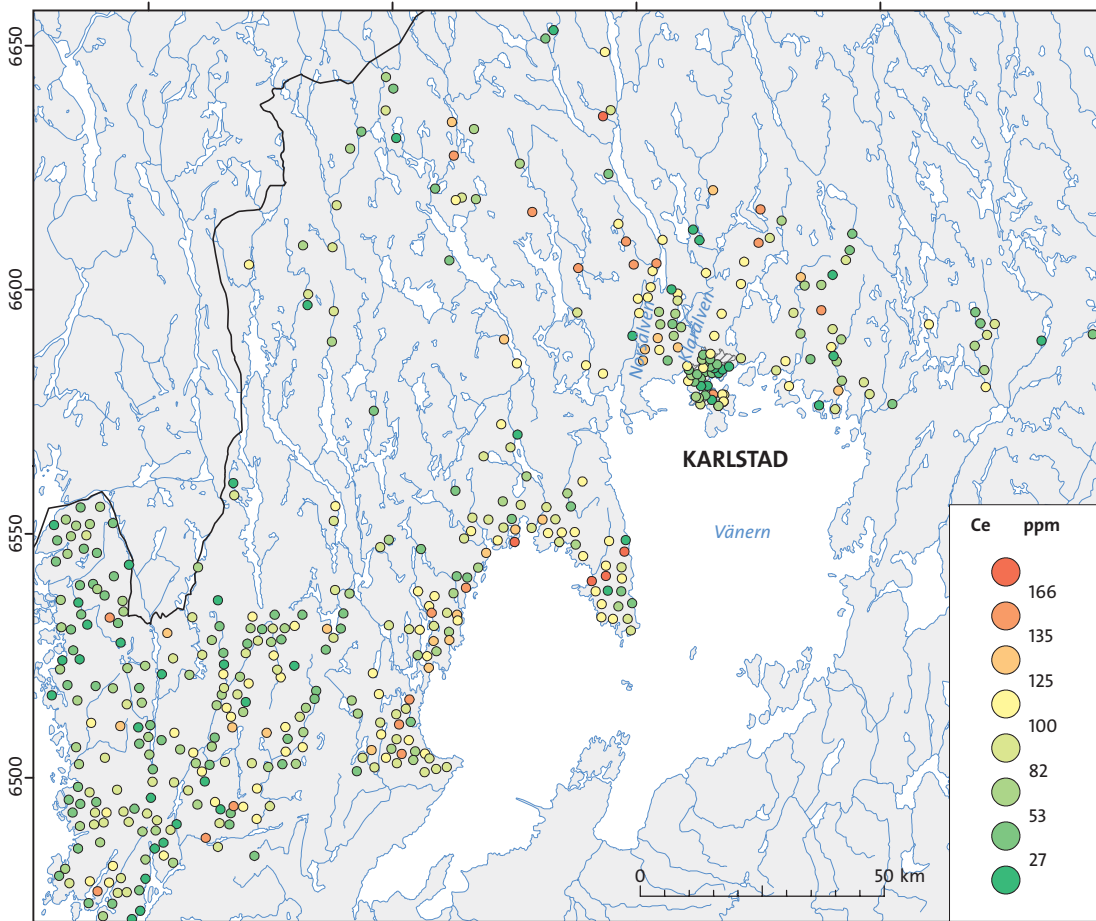
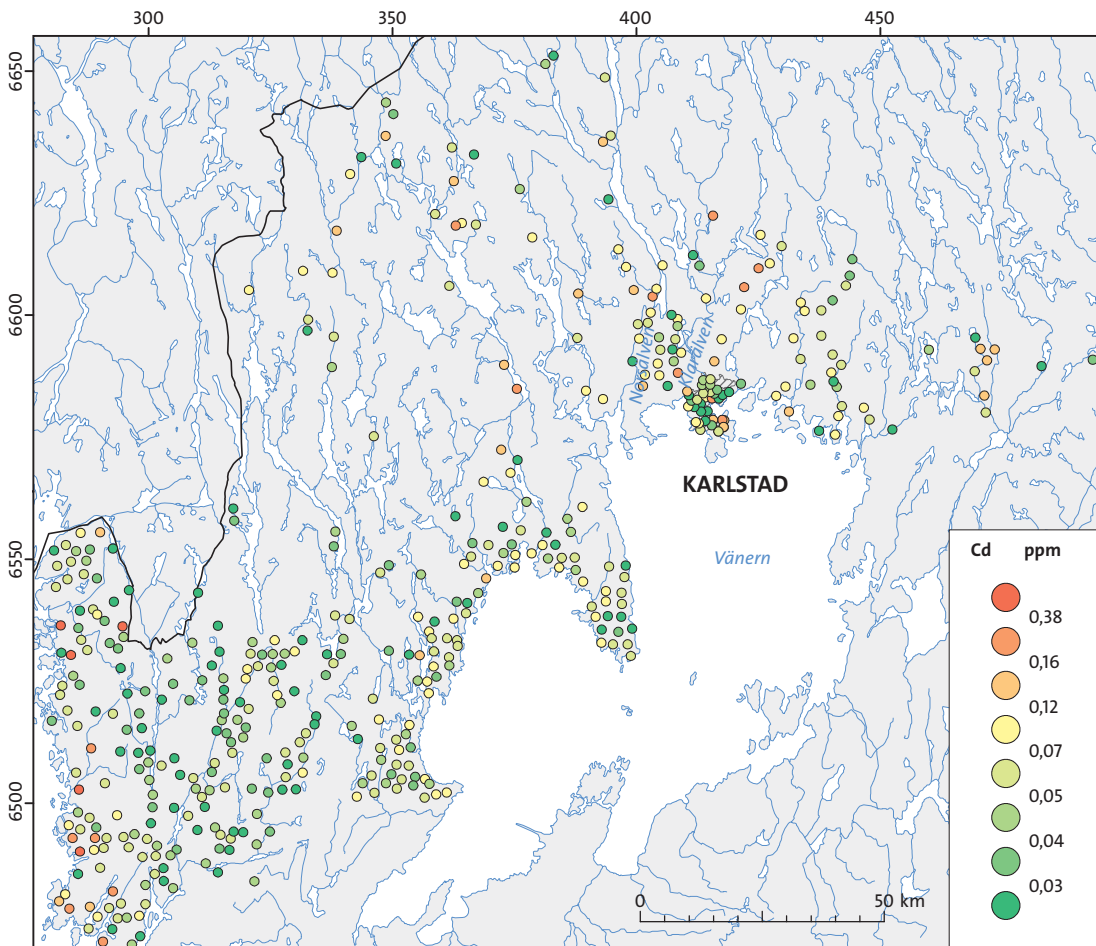


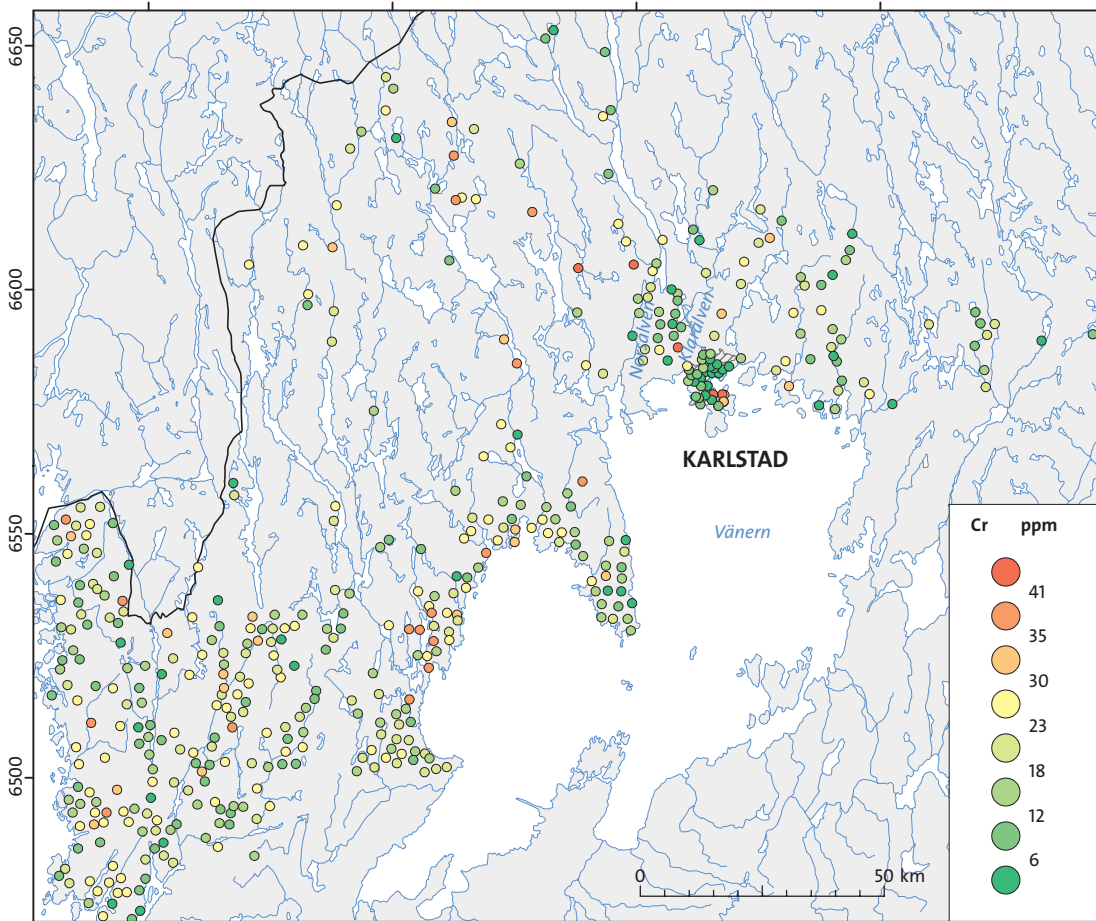
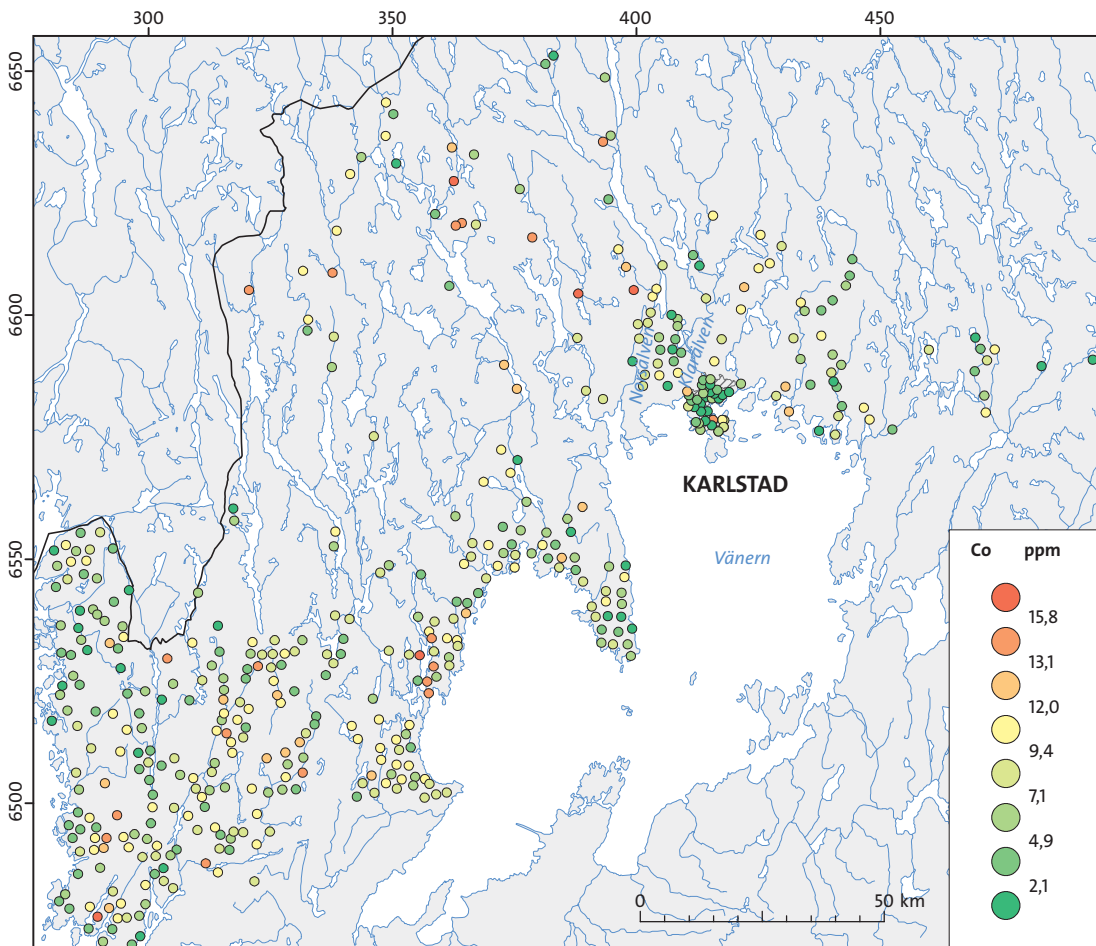




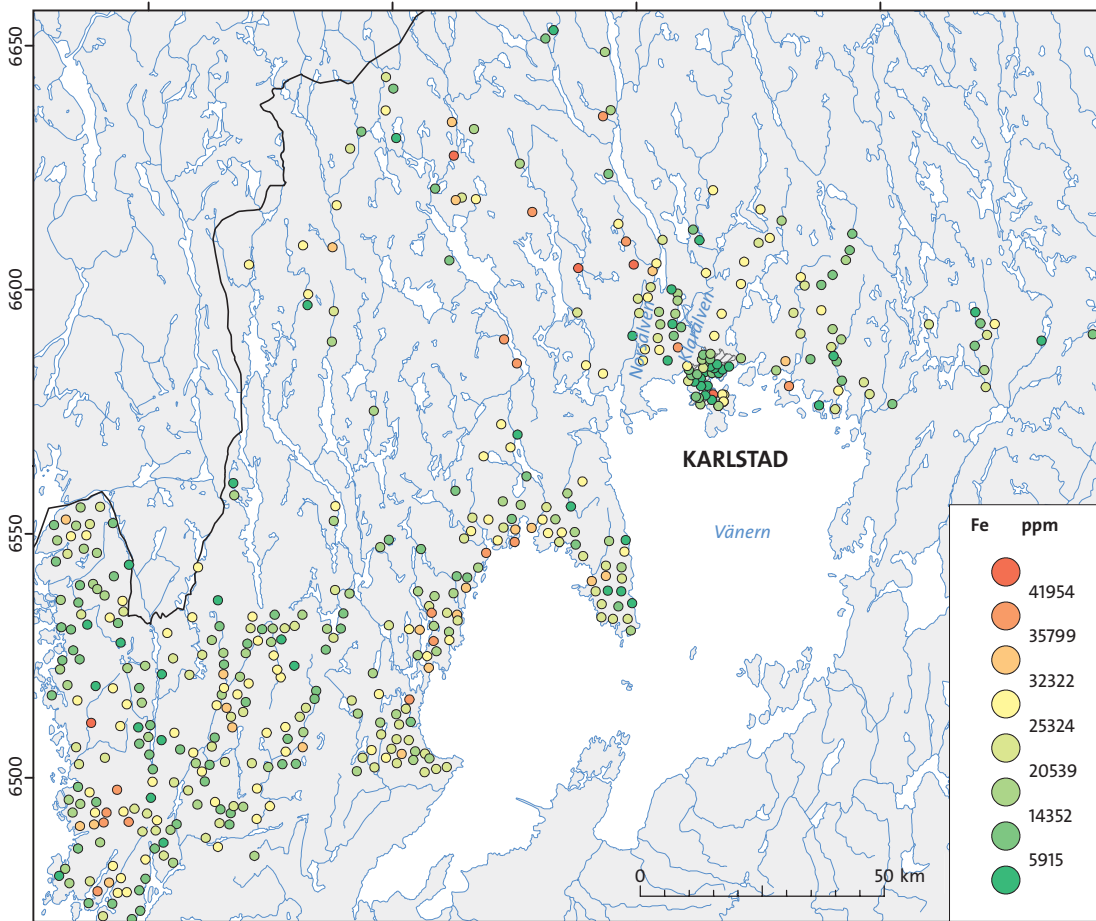
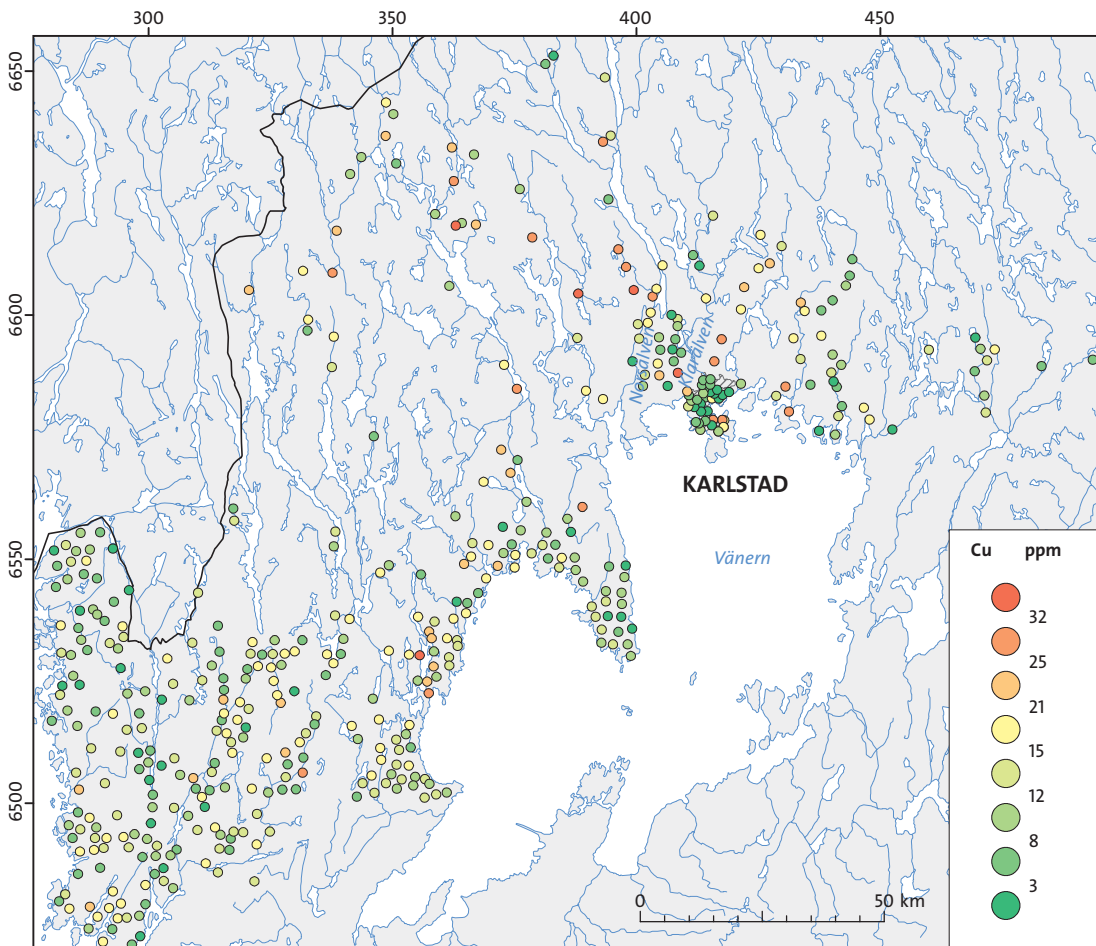


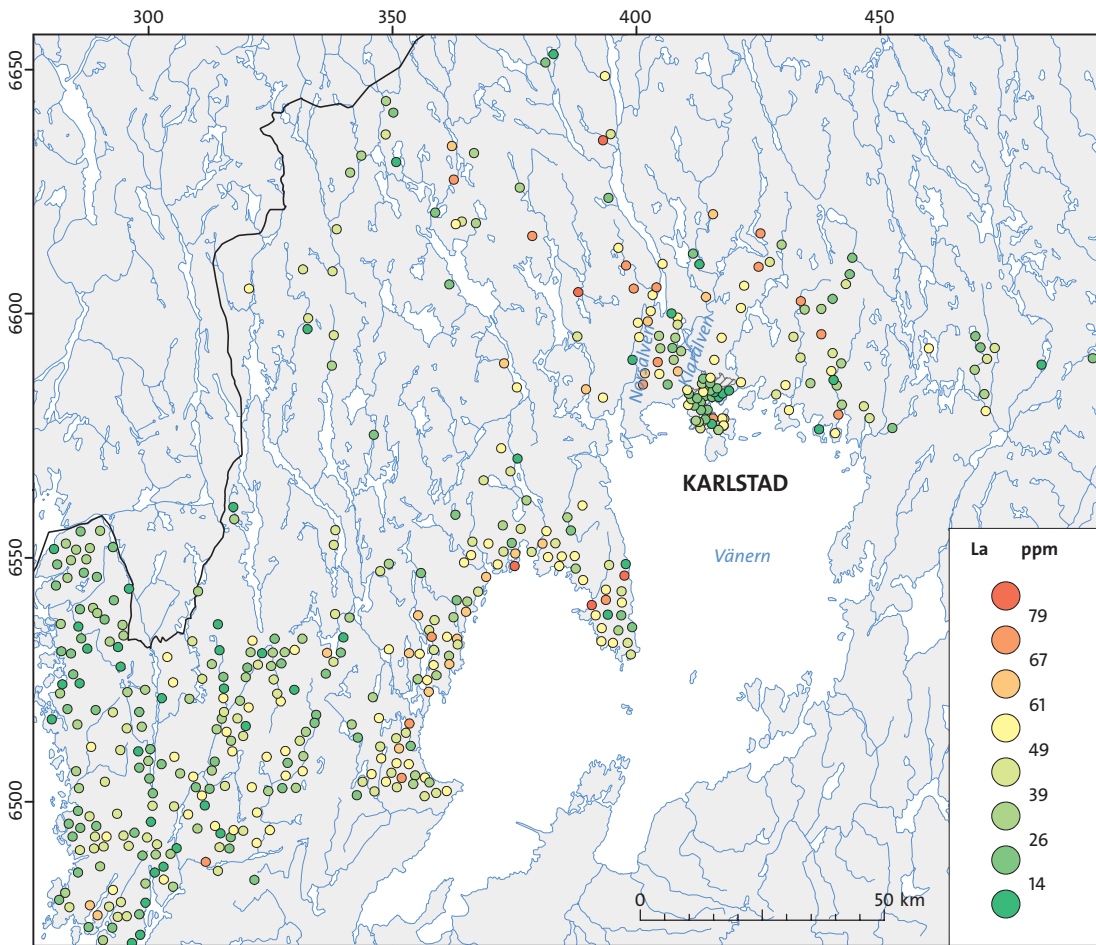
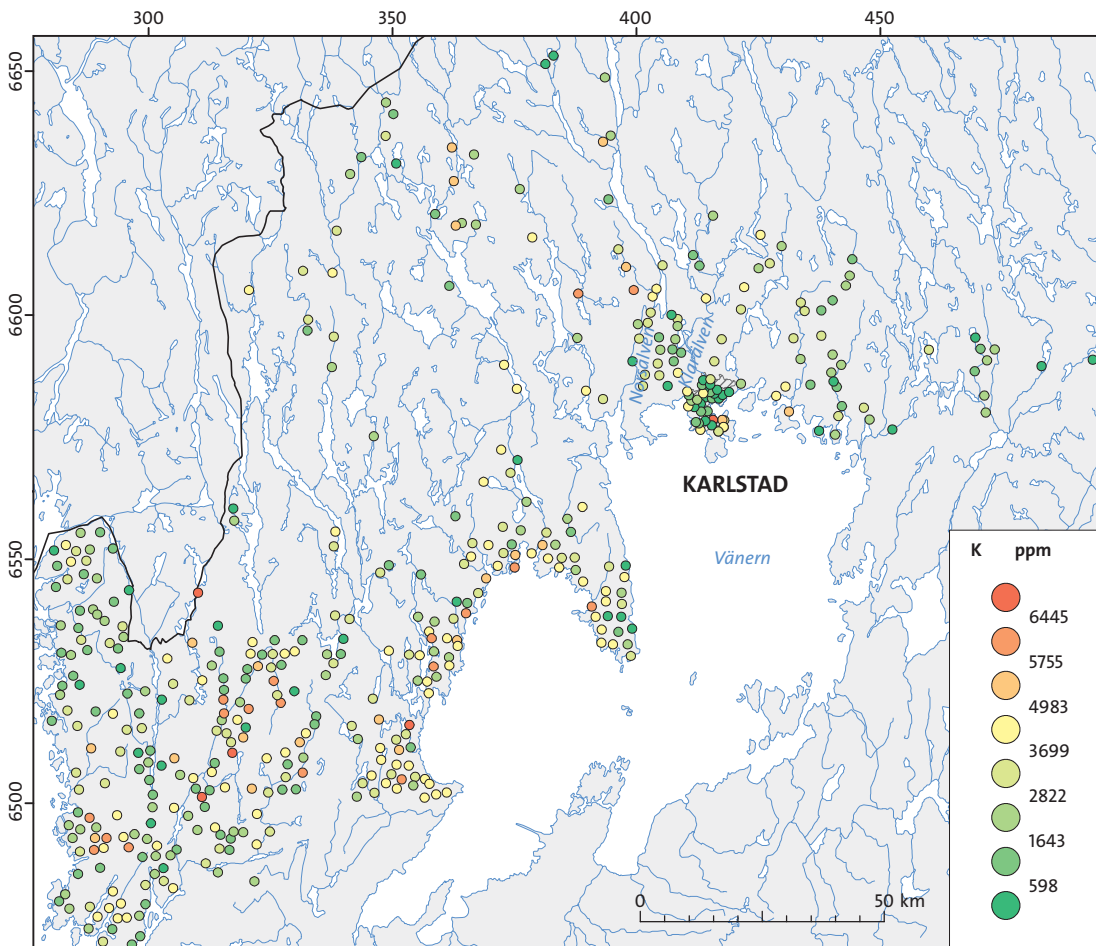


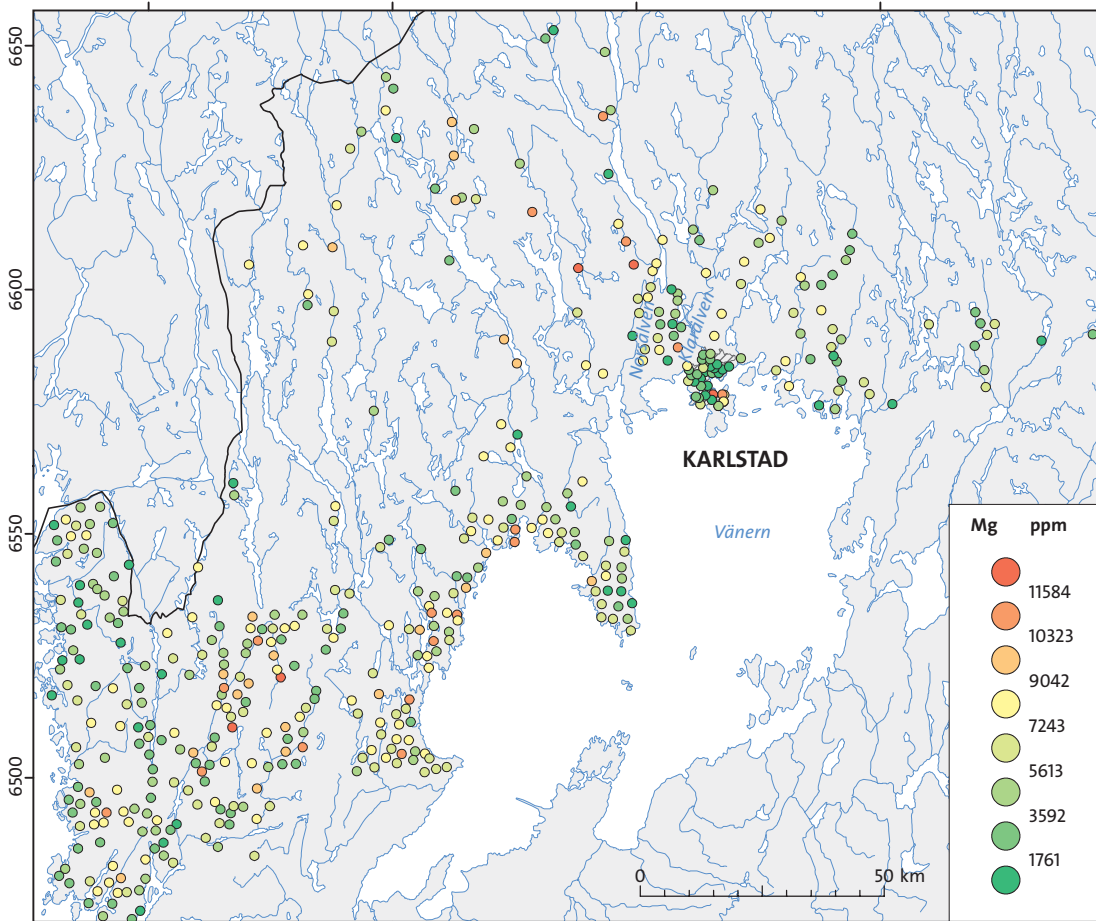
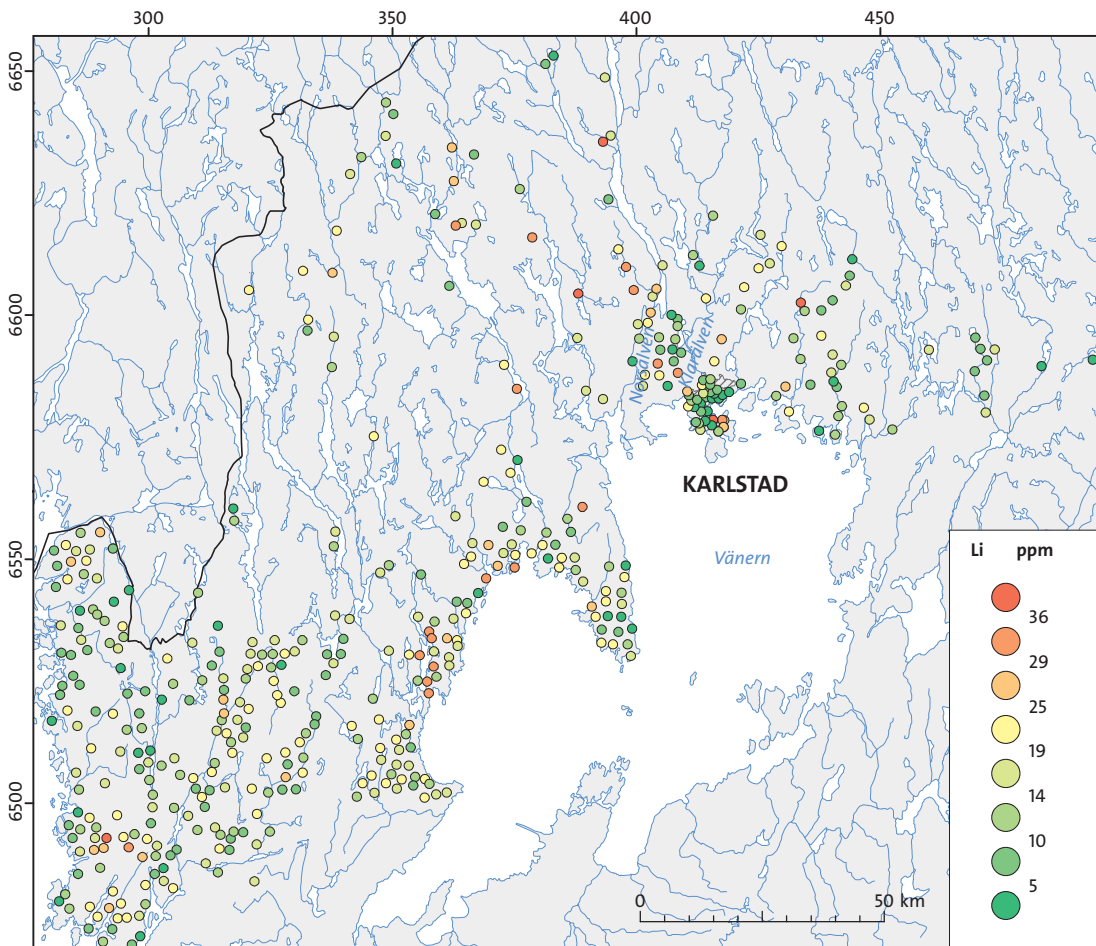


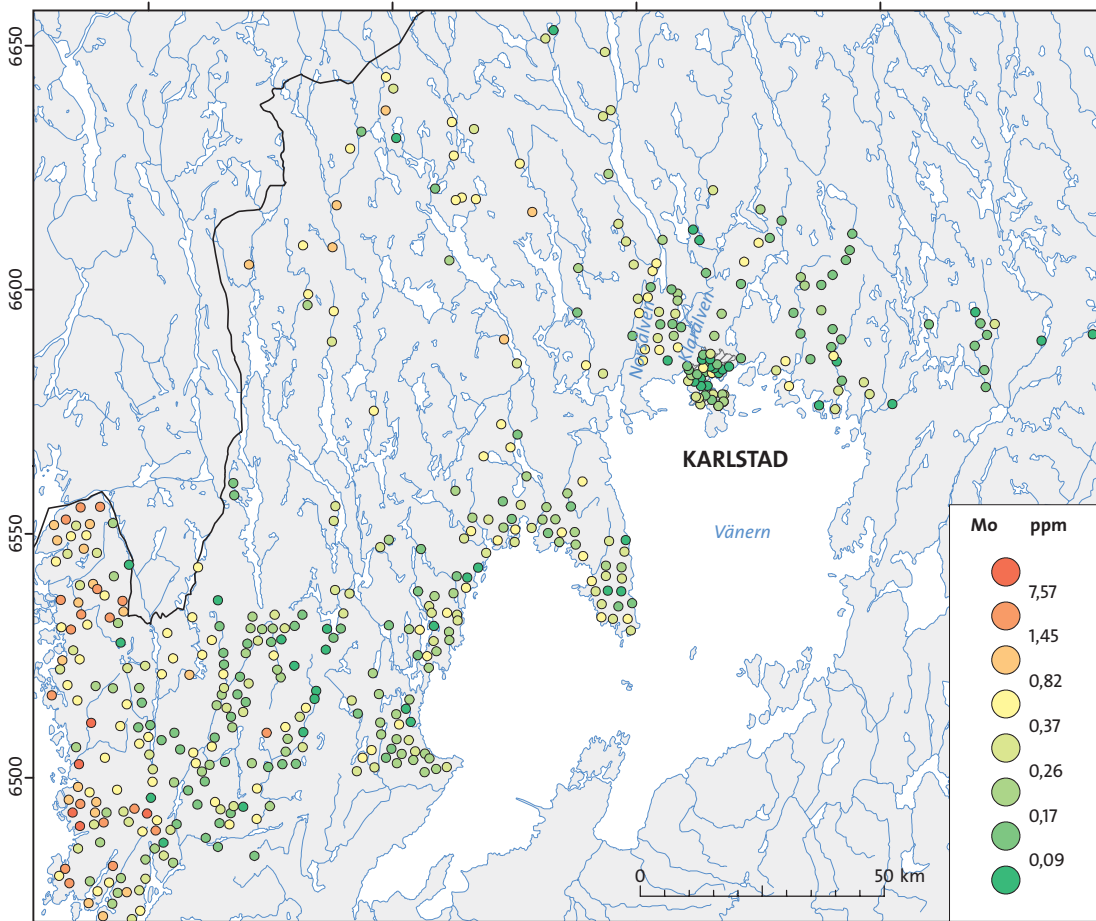
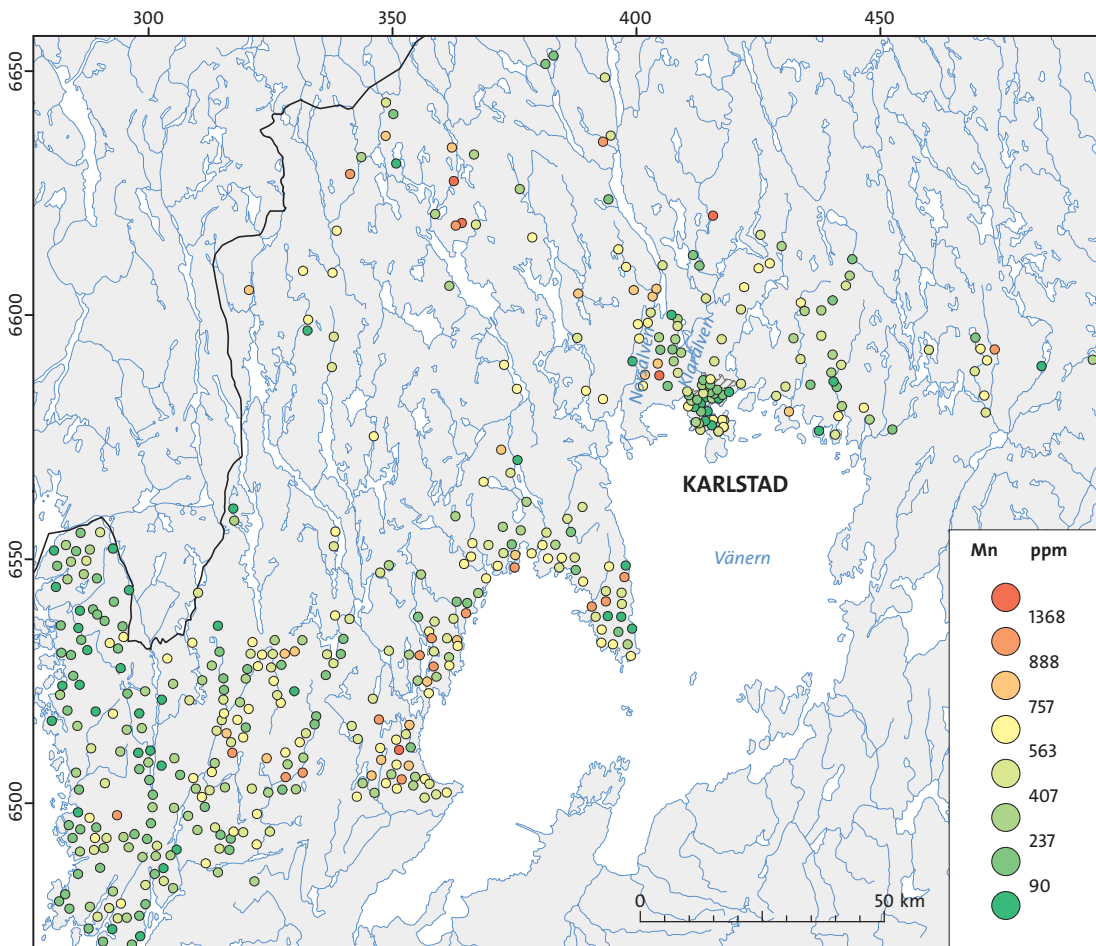


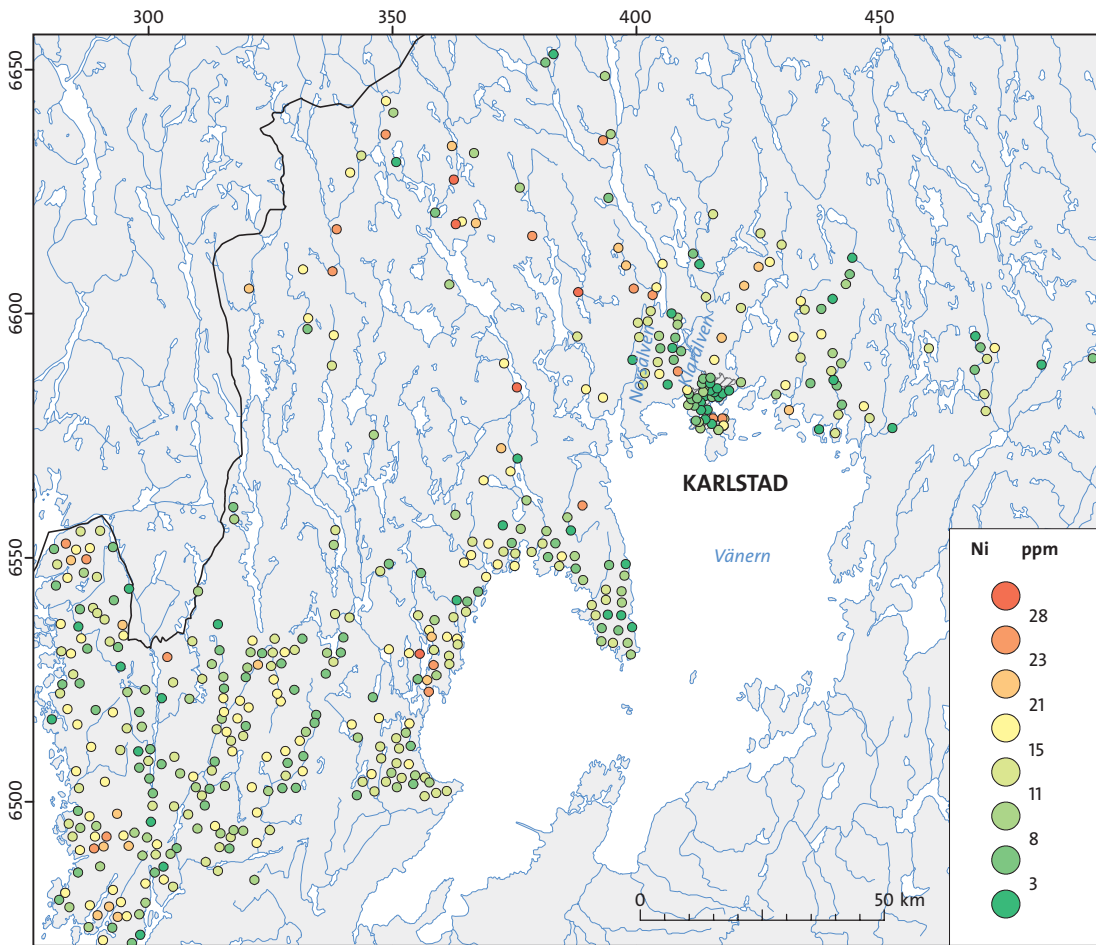
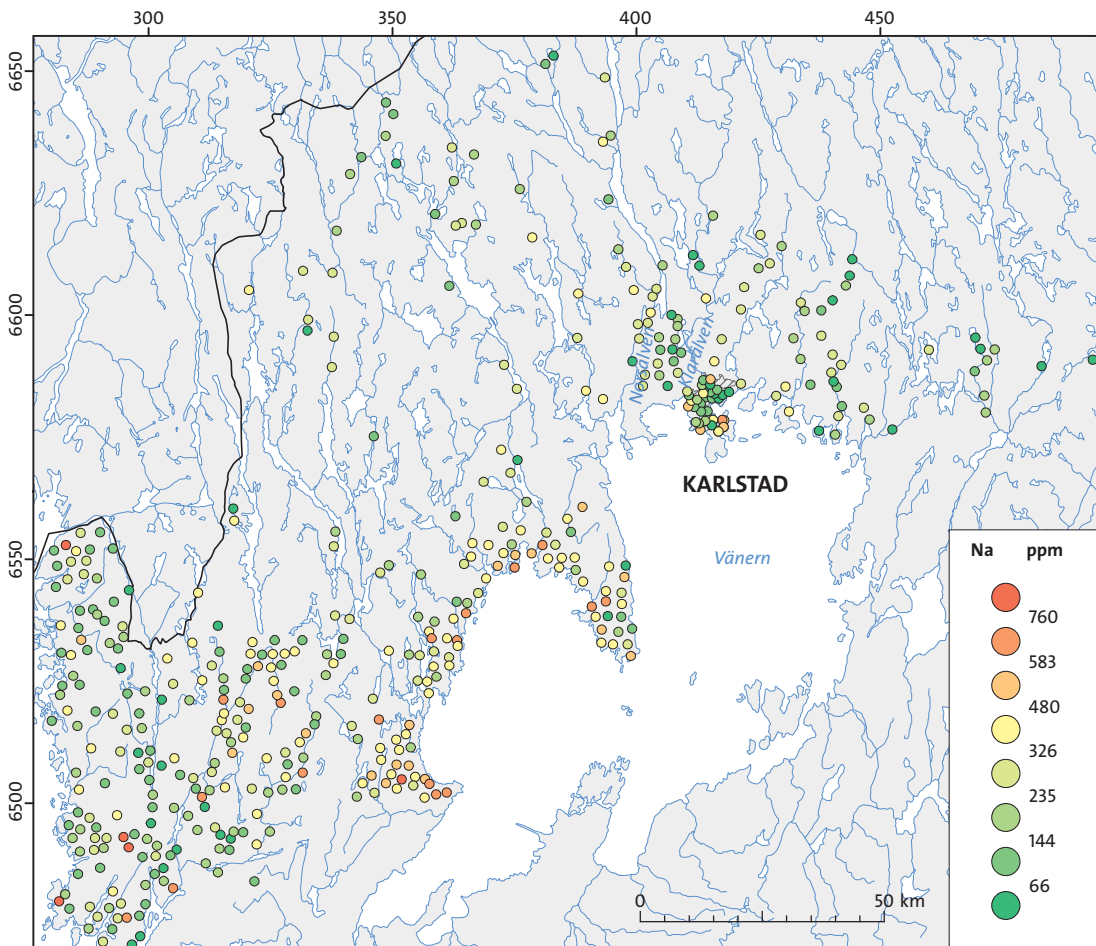


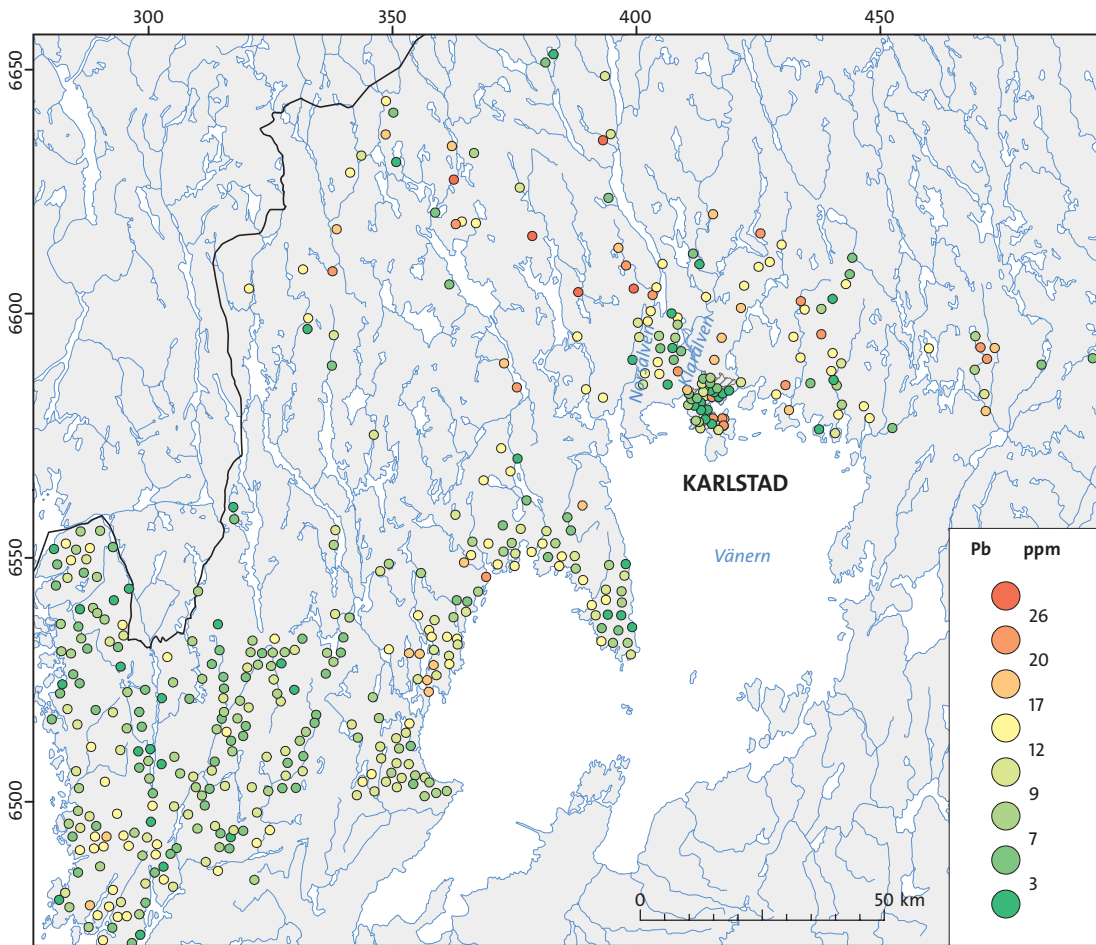
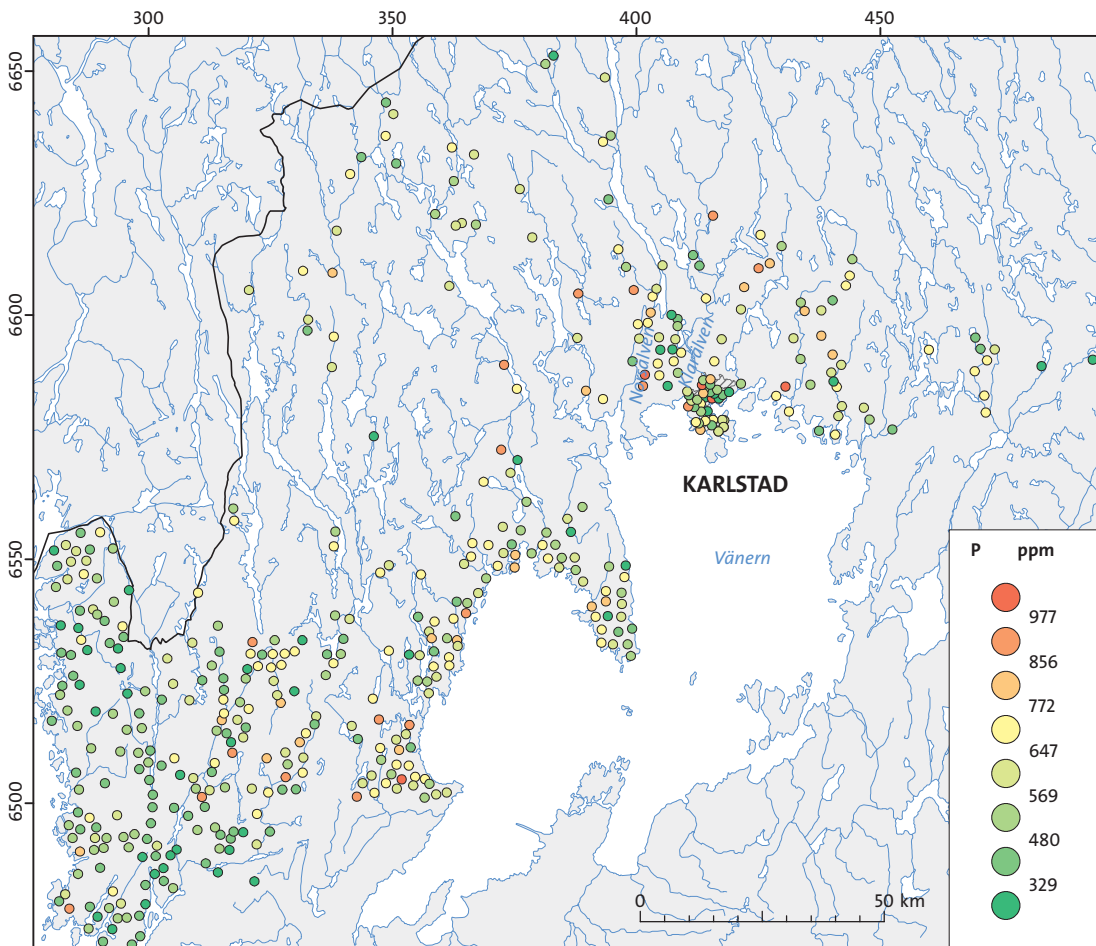


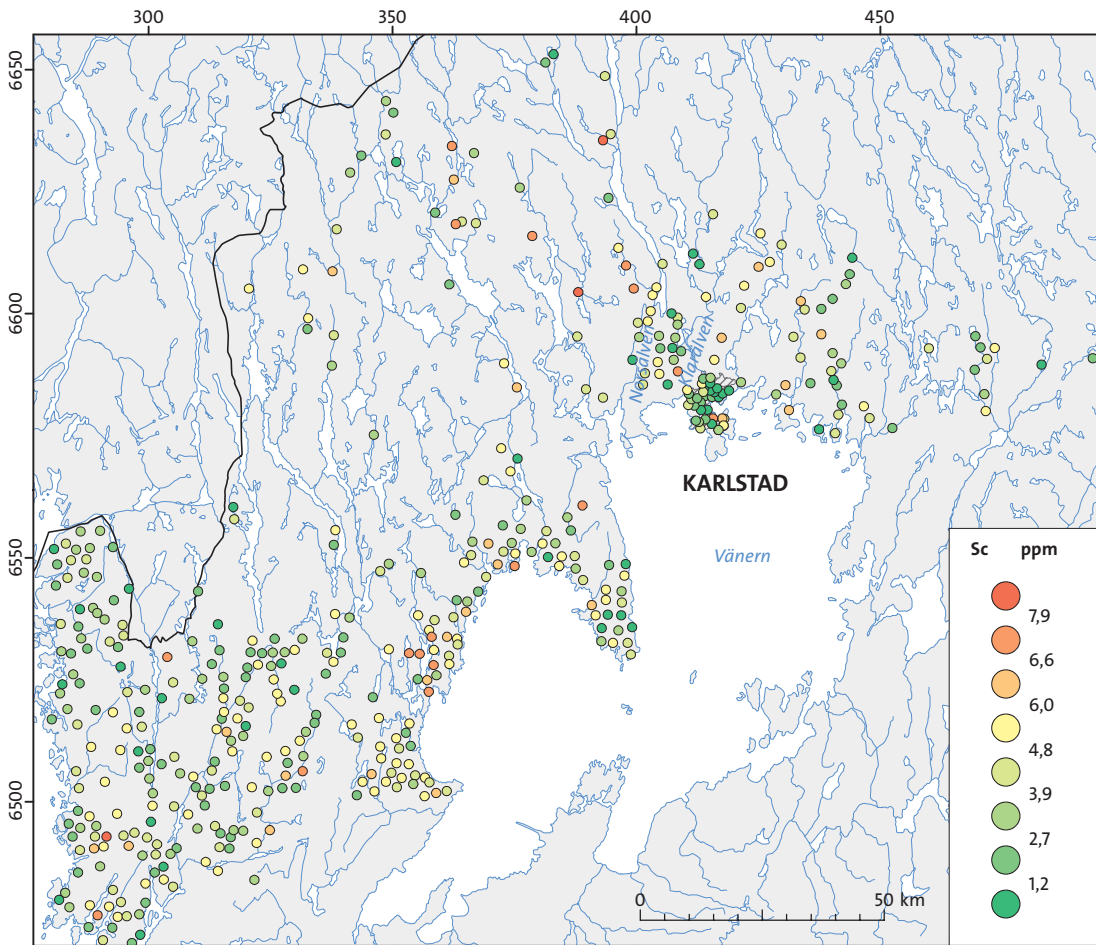
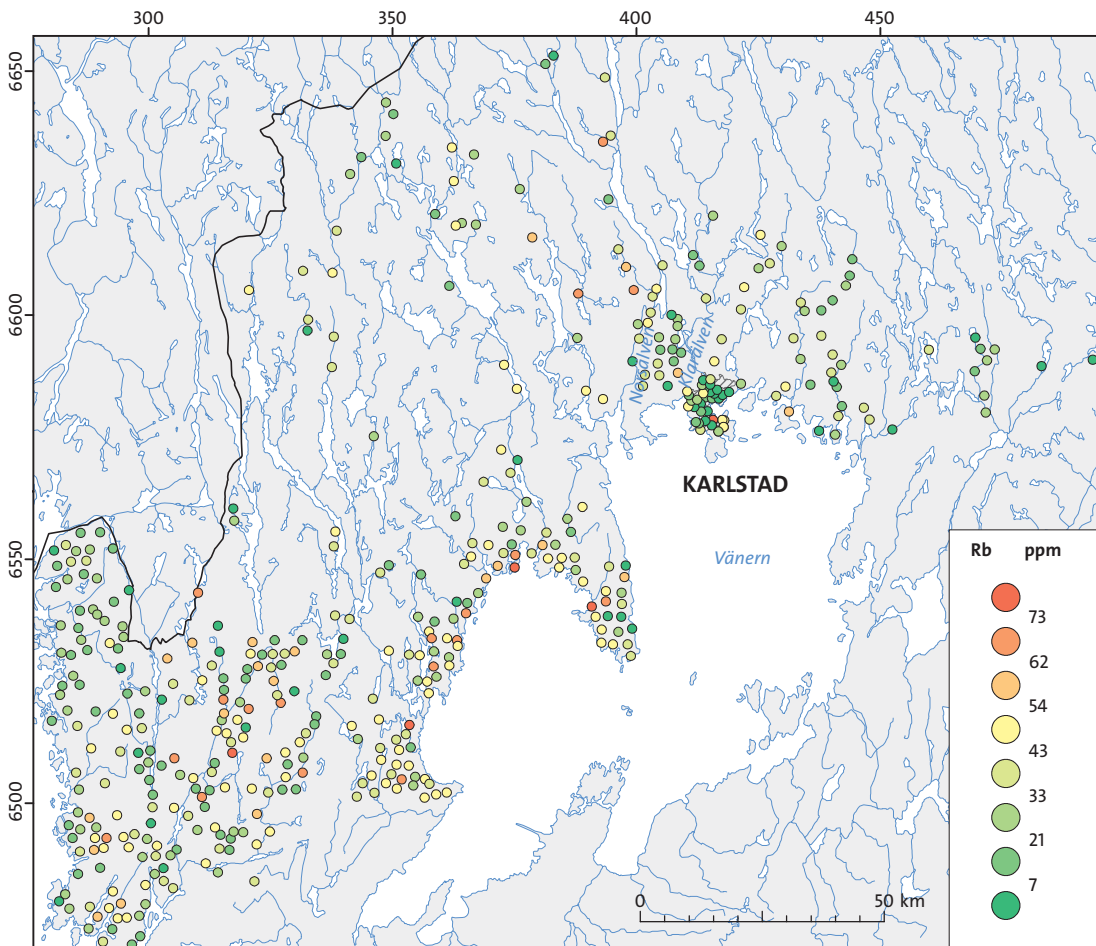


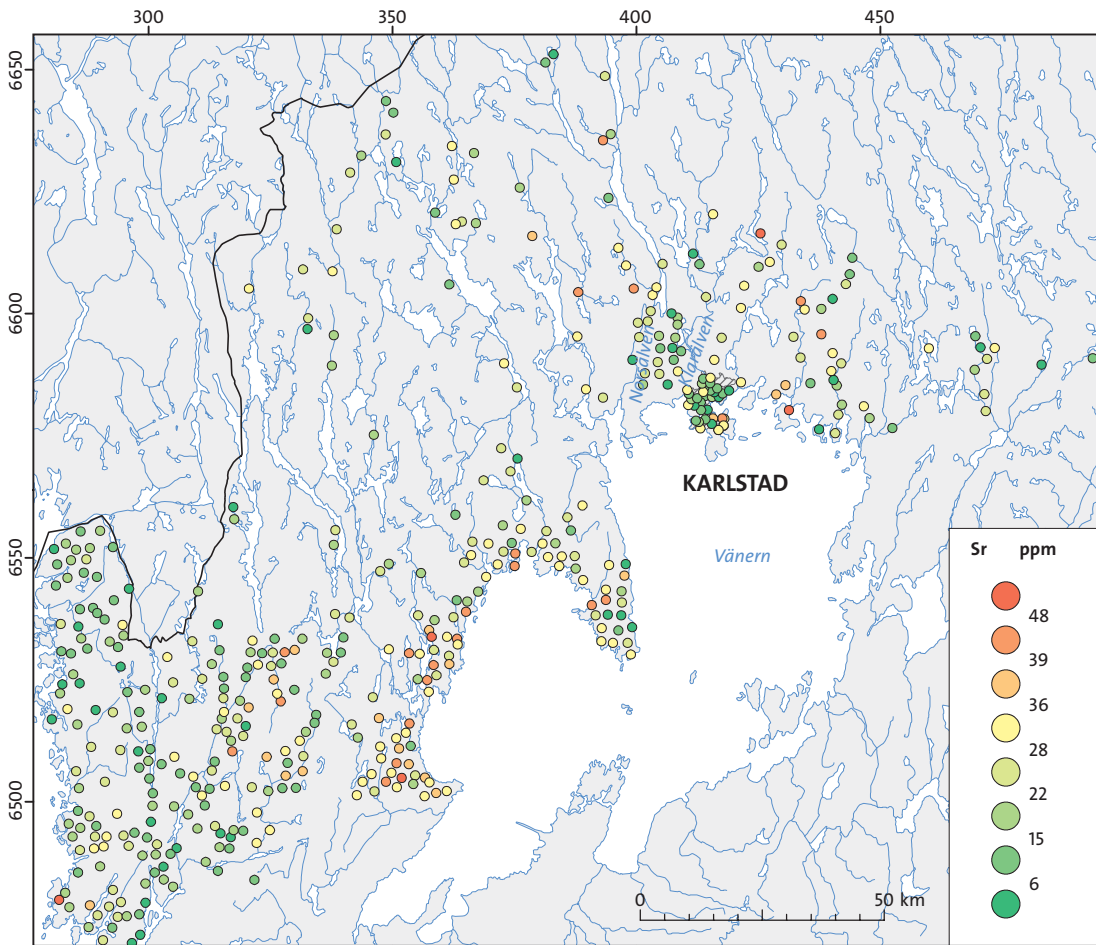
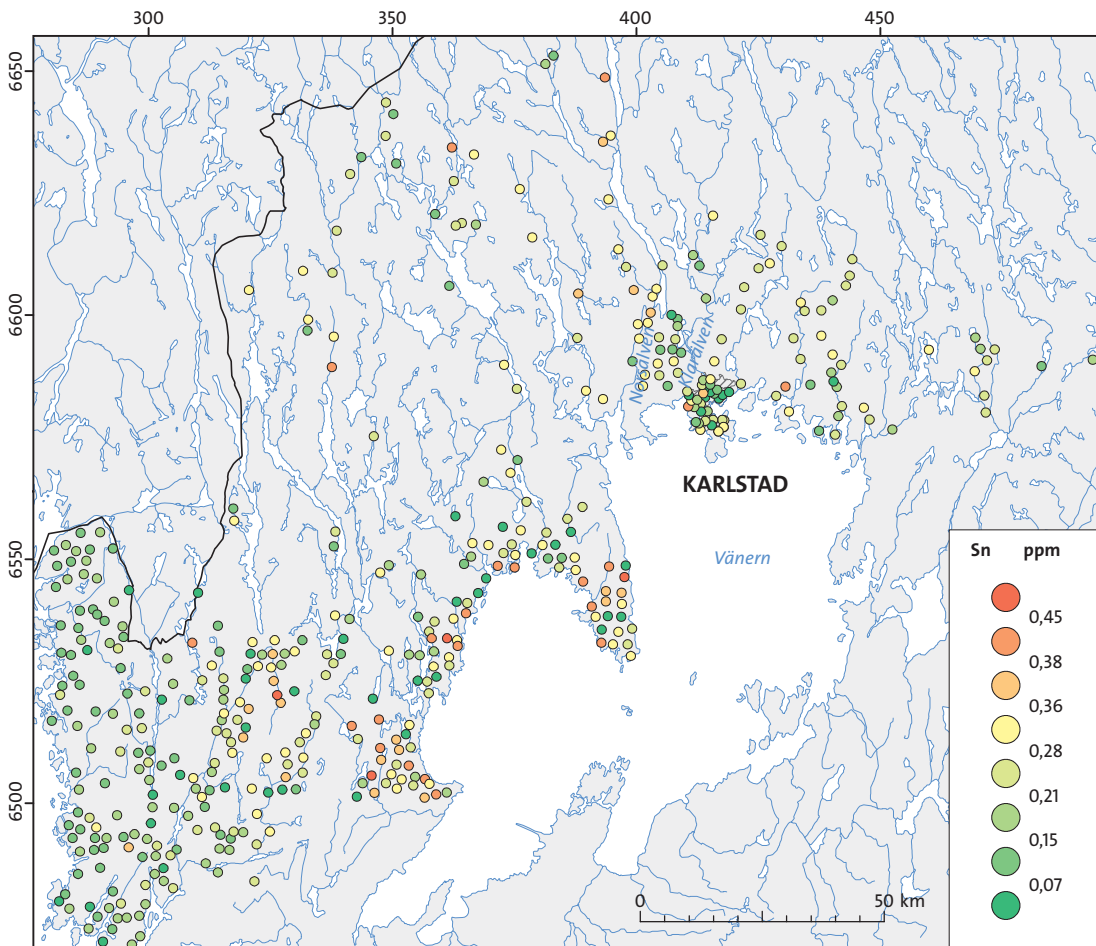




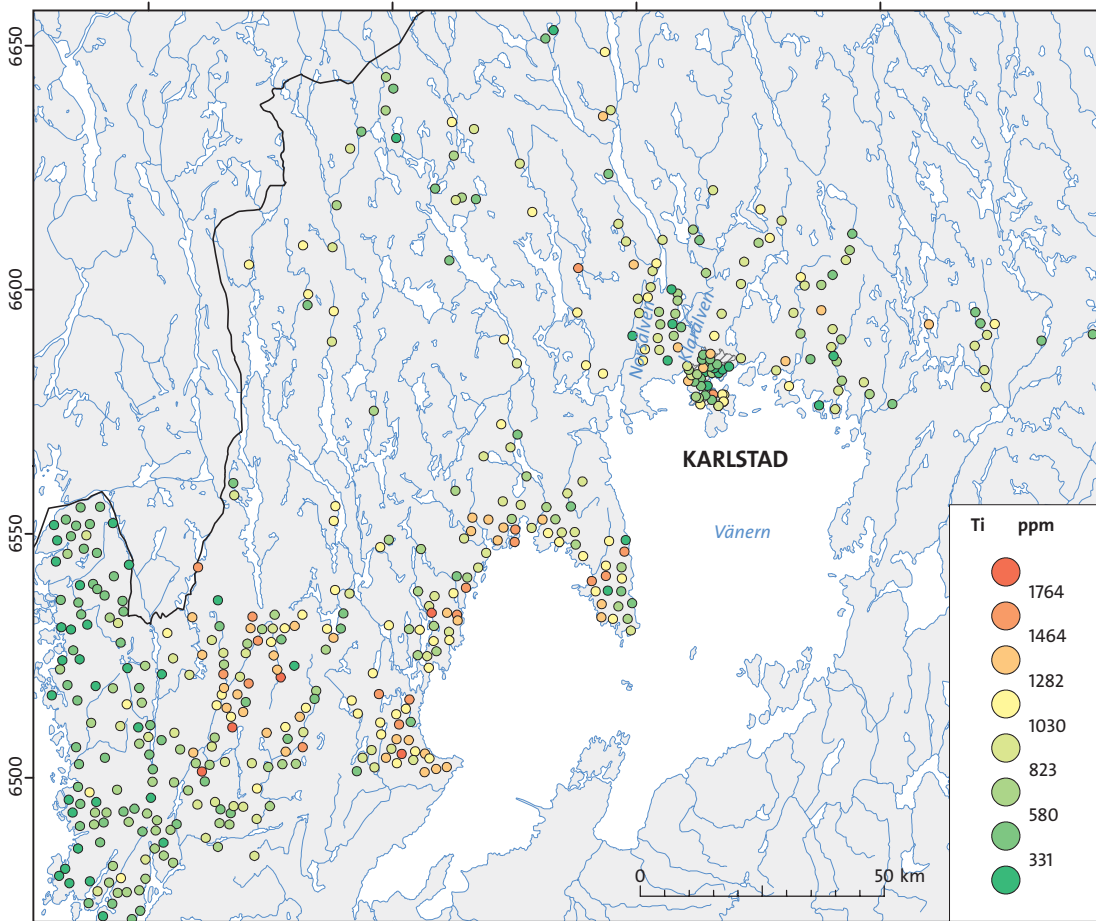
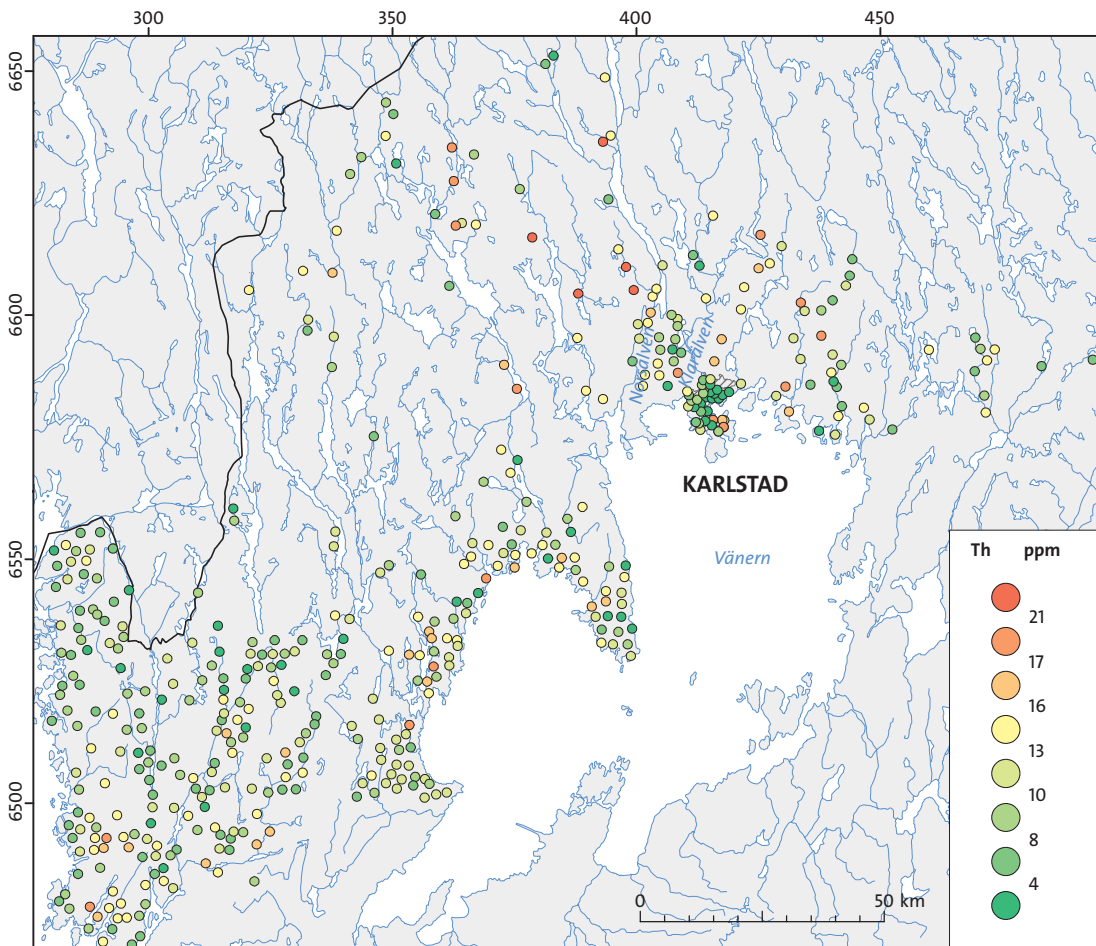


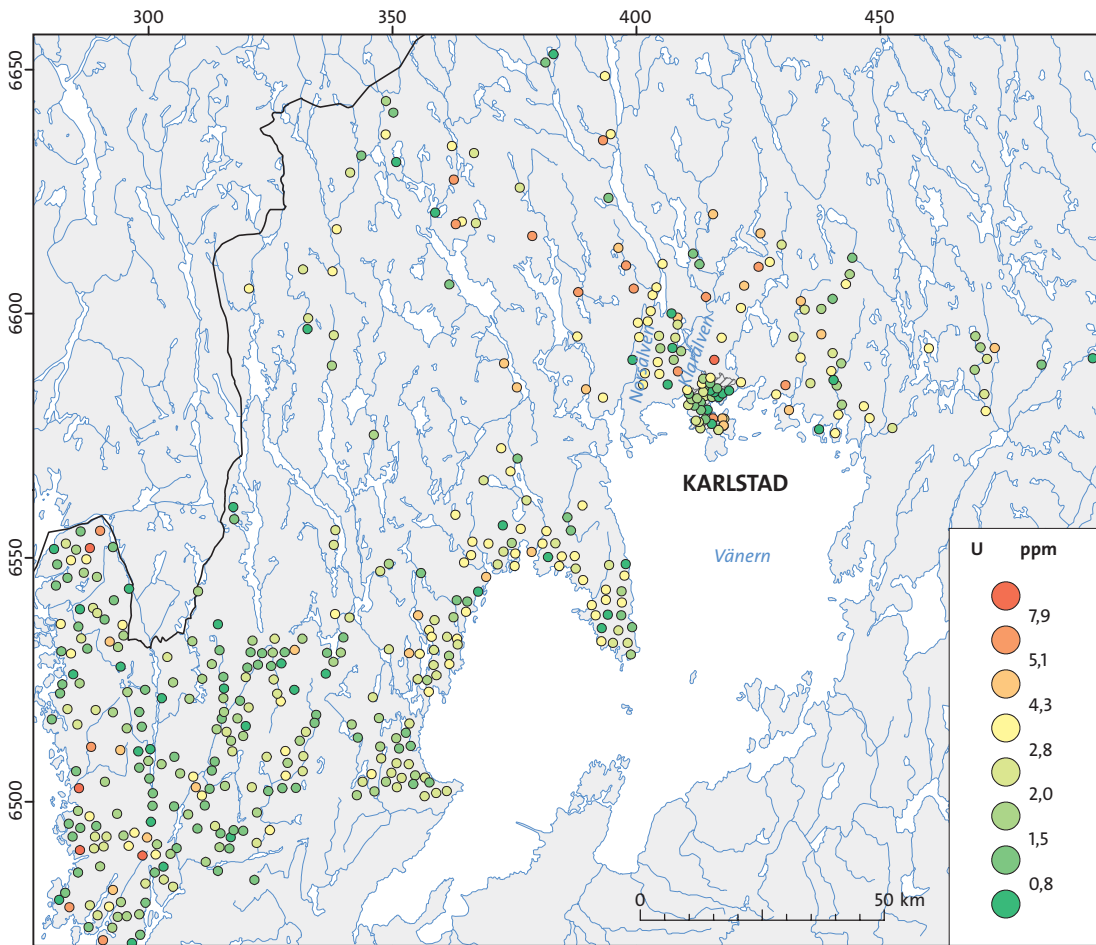
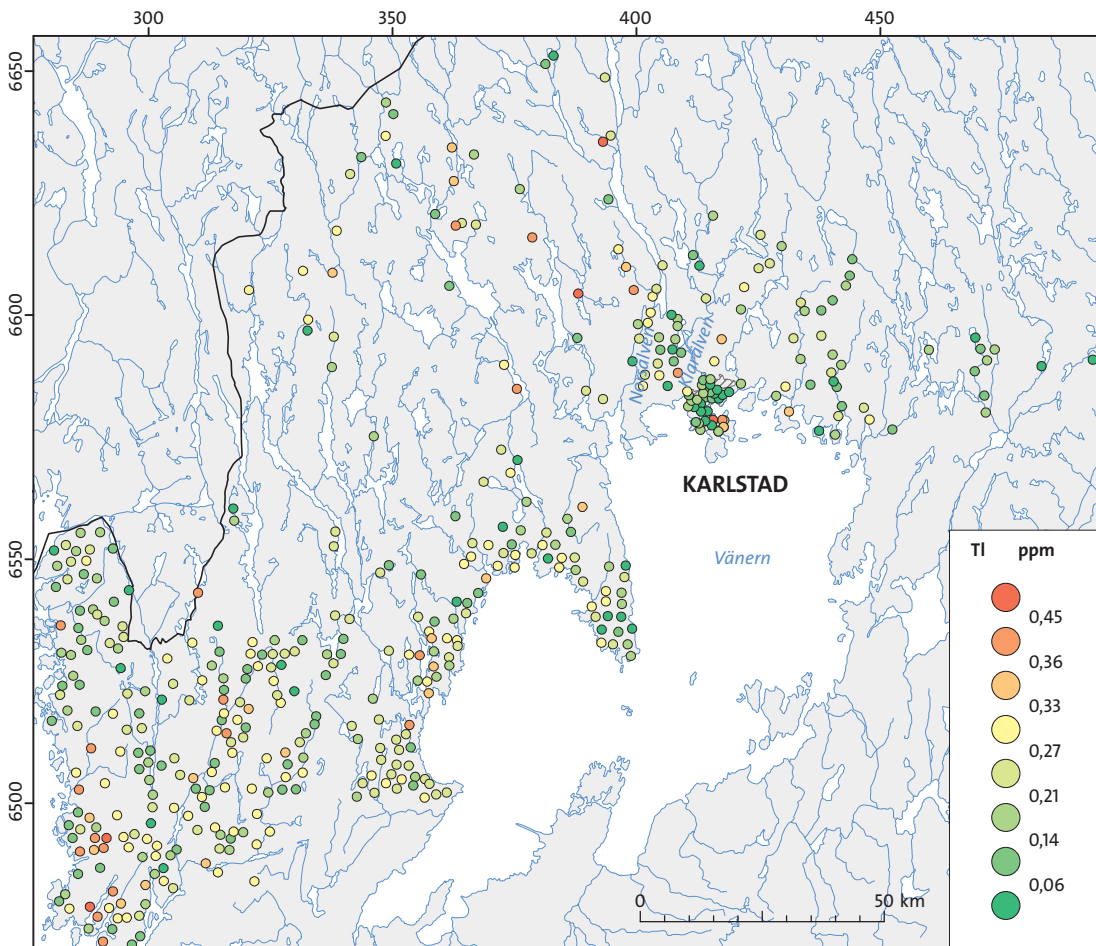


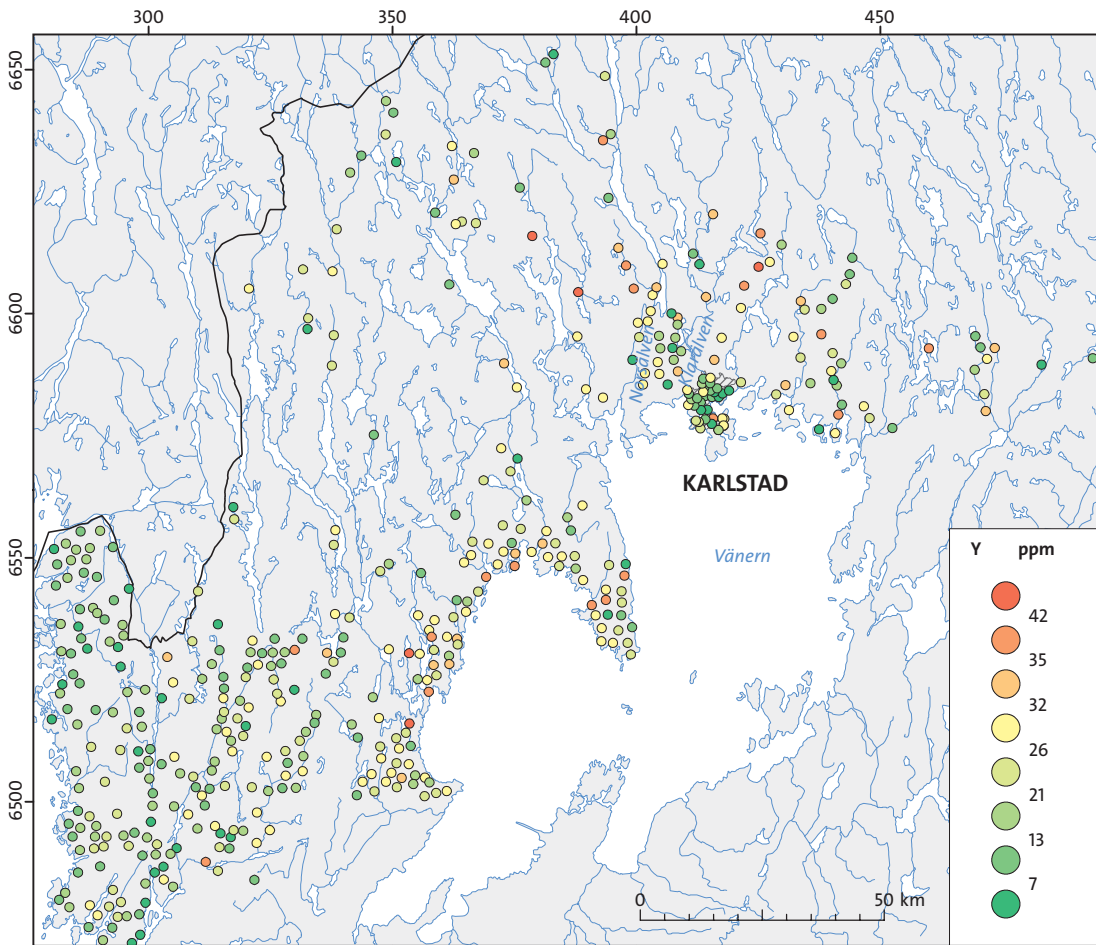
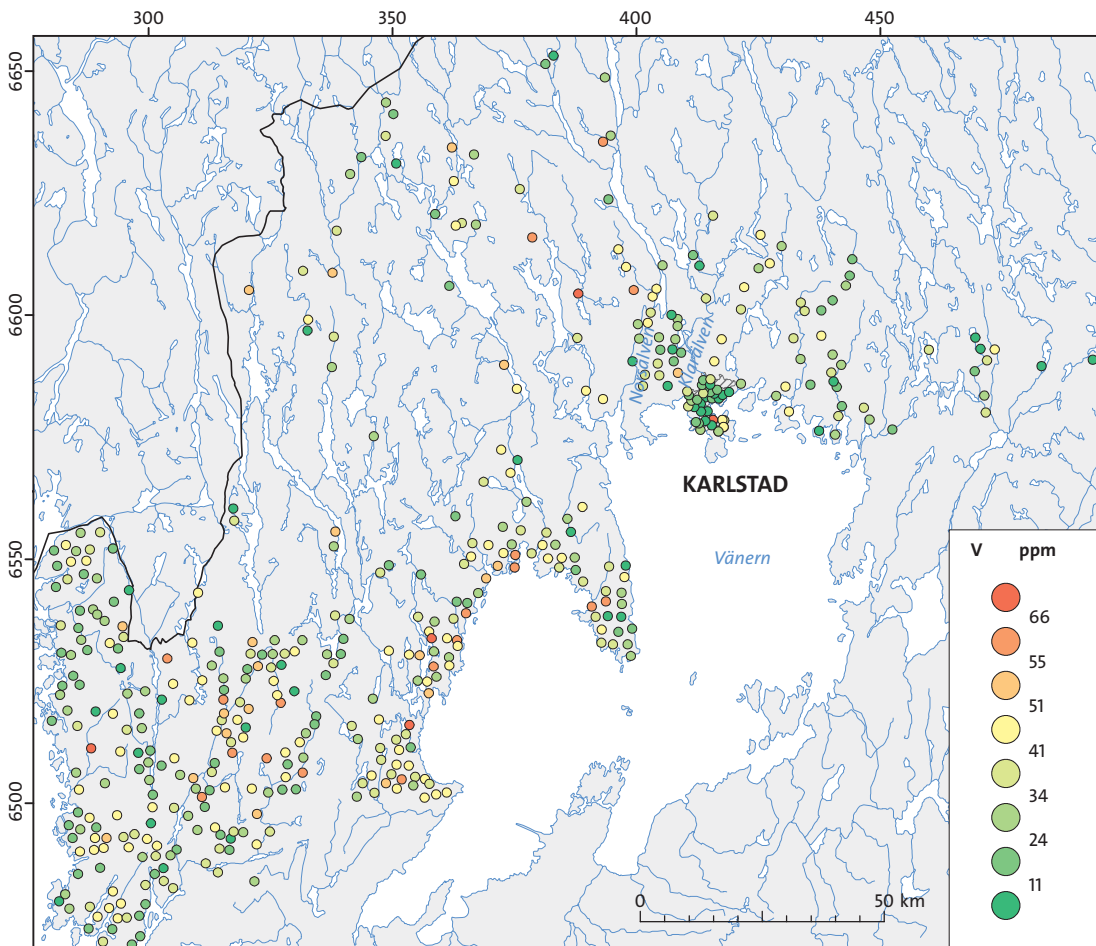


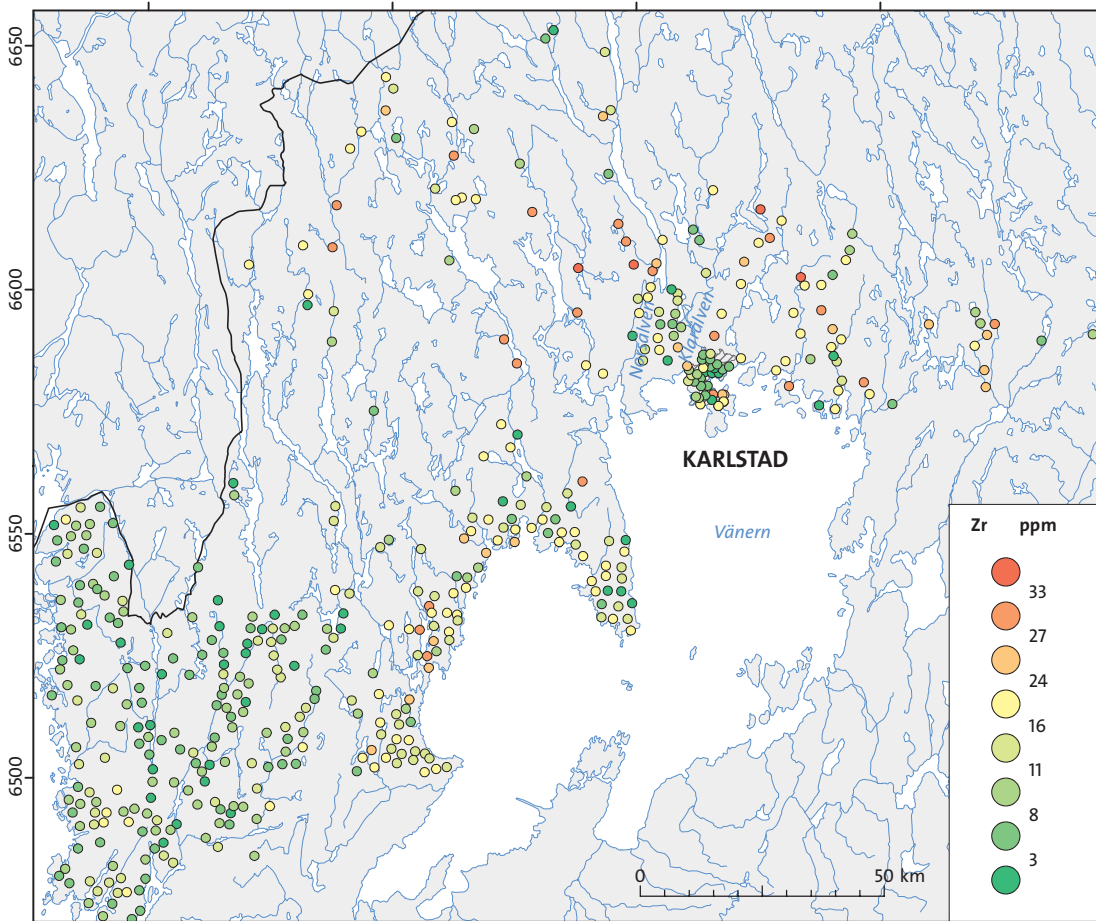
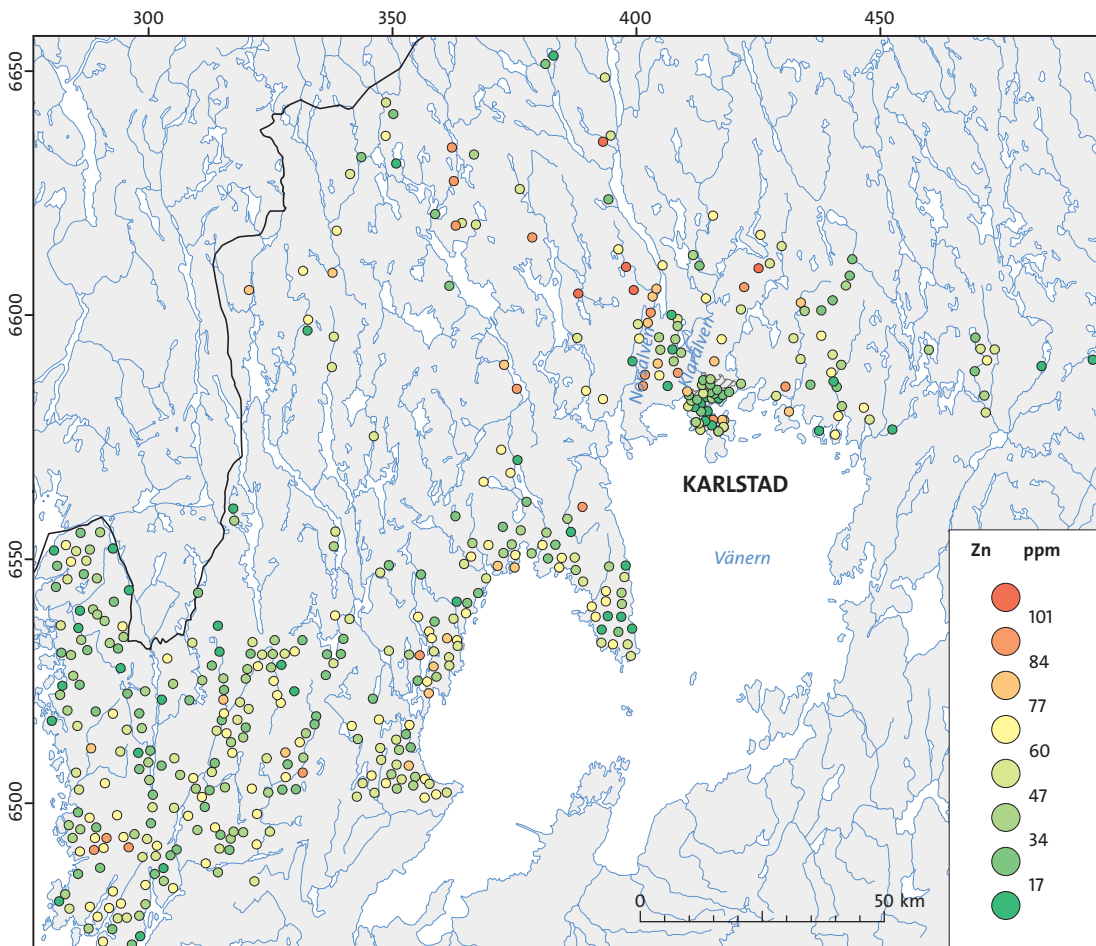


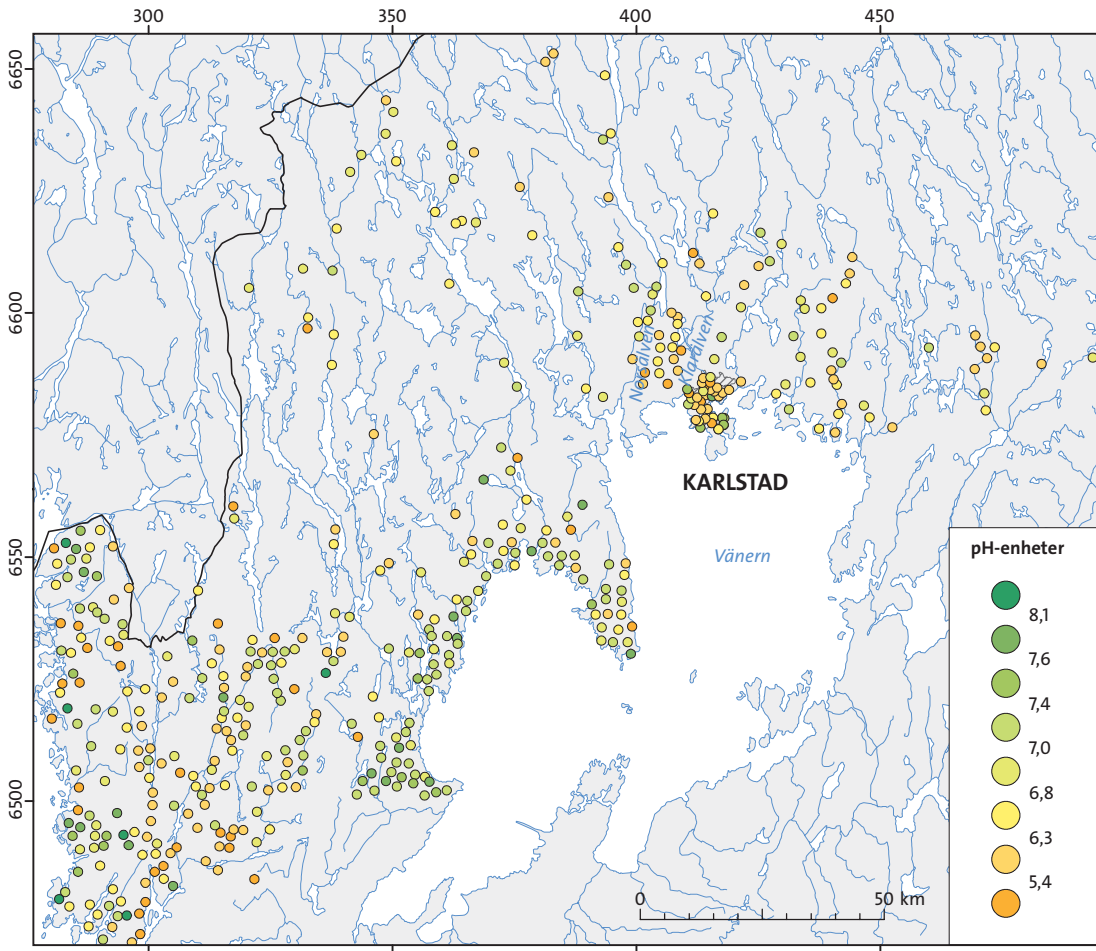












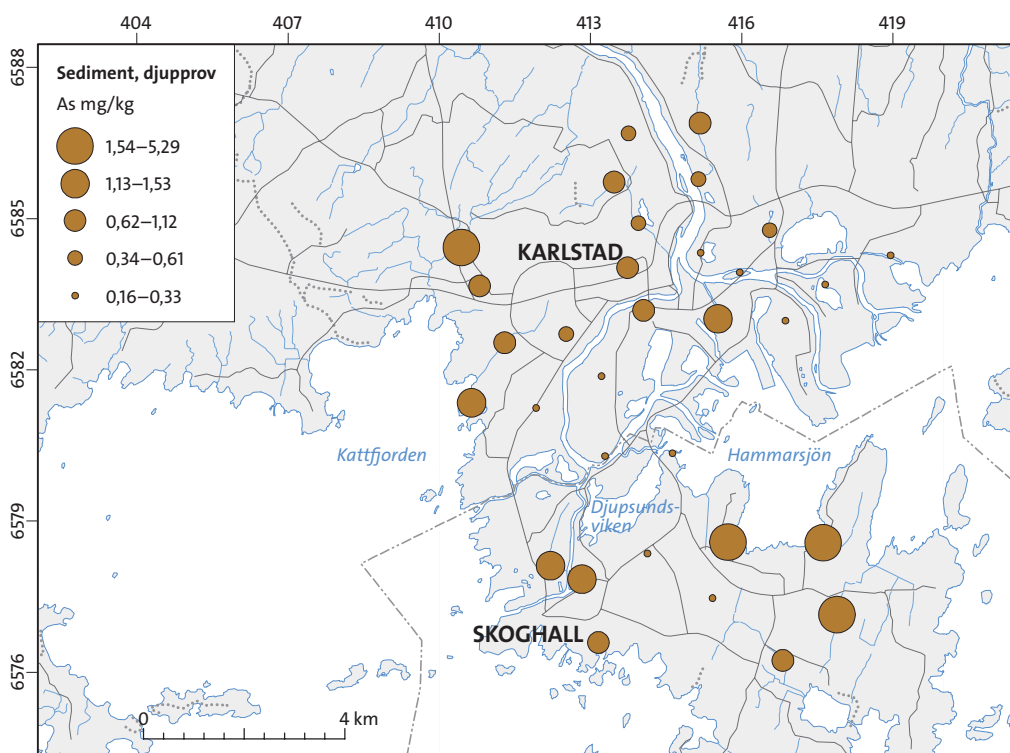
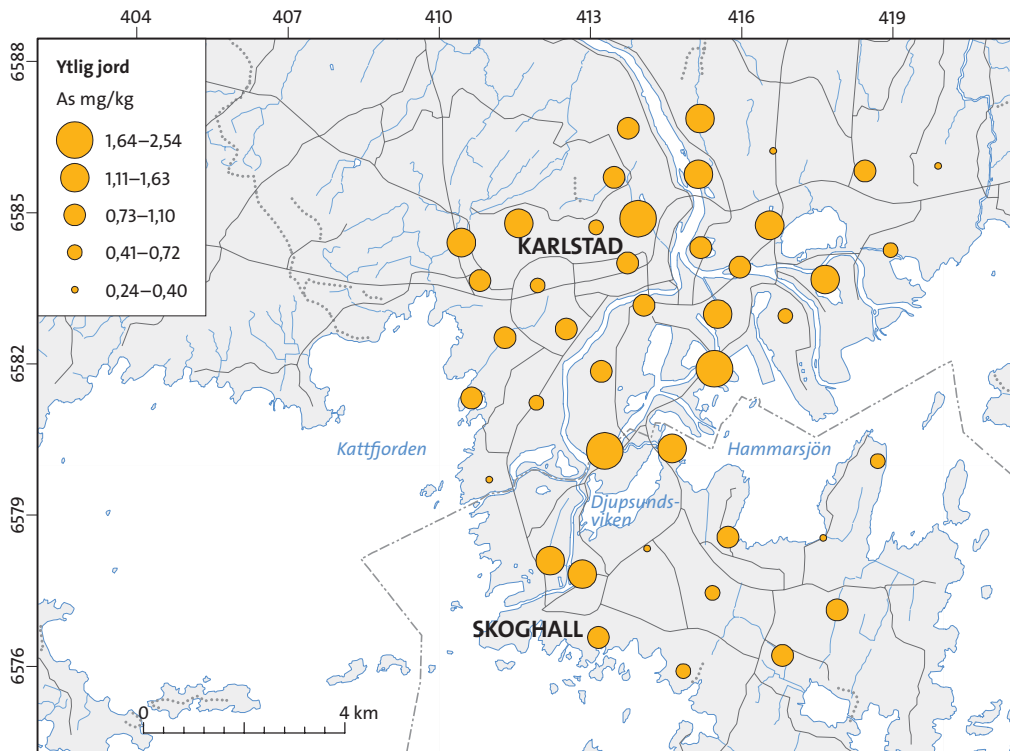
## BILAGA 2

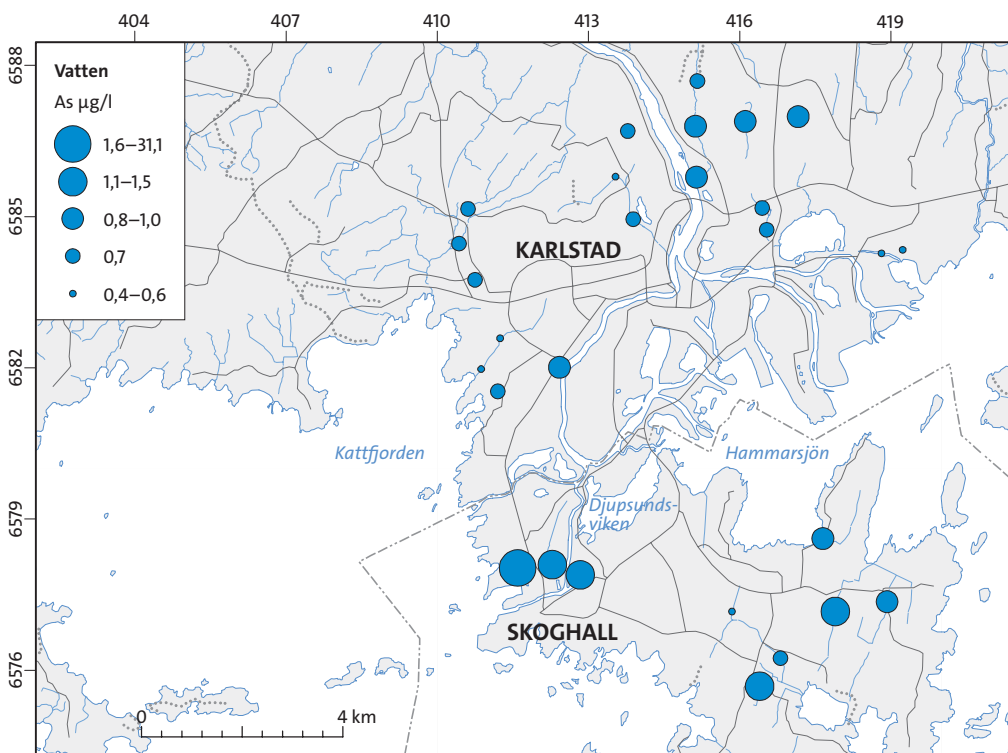
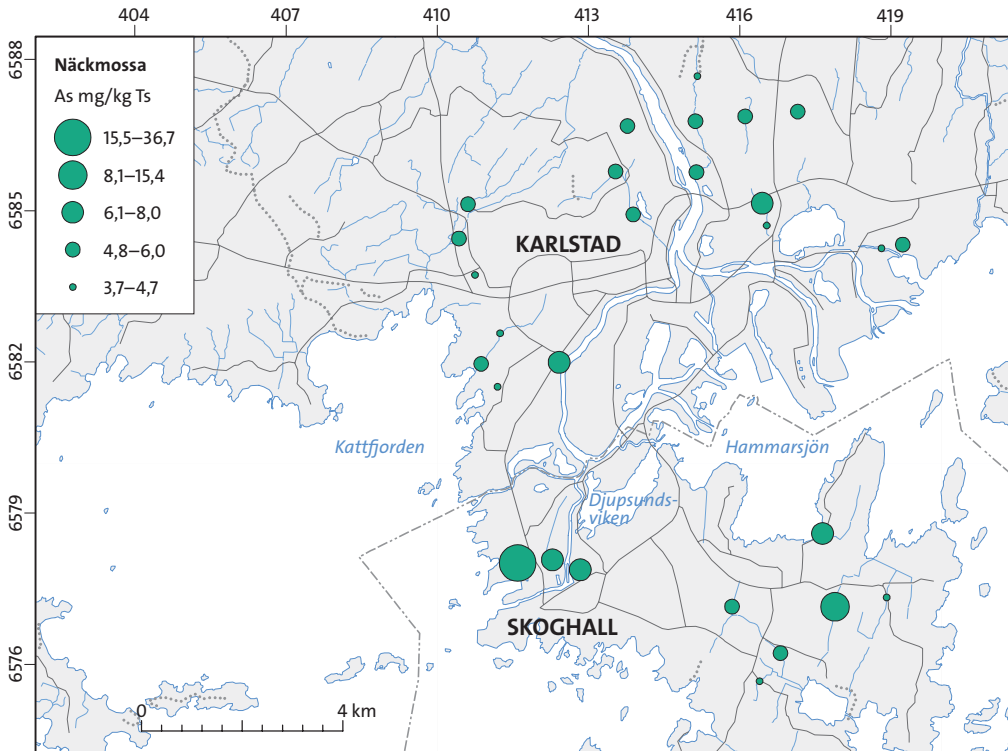
### Tätortsgeokemiska kartor

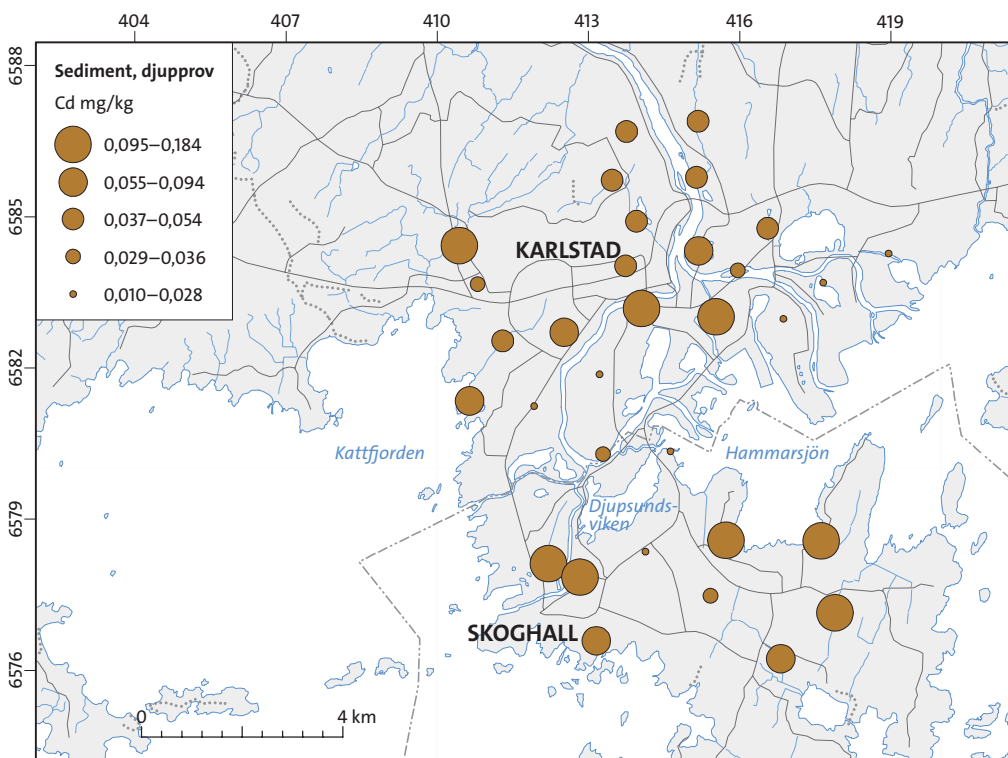
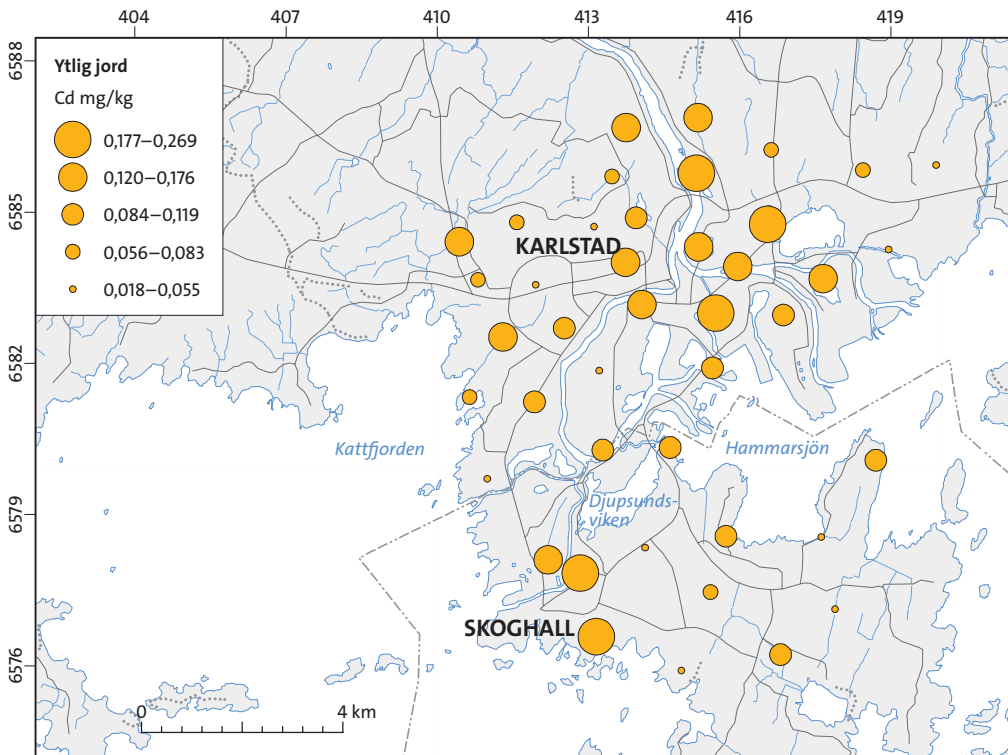
#### Urban geochemical maps

Bilagan omfattar kartor över antimon (Sb), arsenik (As), bly (Pb), kadmium (Cd), kobolt (Co), koppar (Cu), nickel (Ni), wolfram (W) och zink (Zn) i ytlig jord, sediment, näckmossa och vatten. Provmaterialerna är provtagna enligt SGUs tätortsgeokemiska metod.

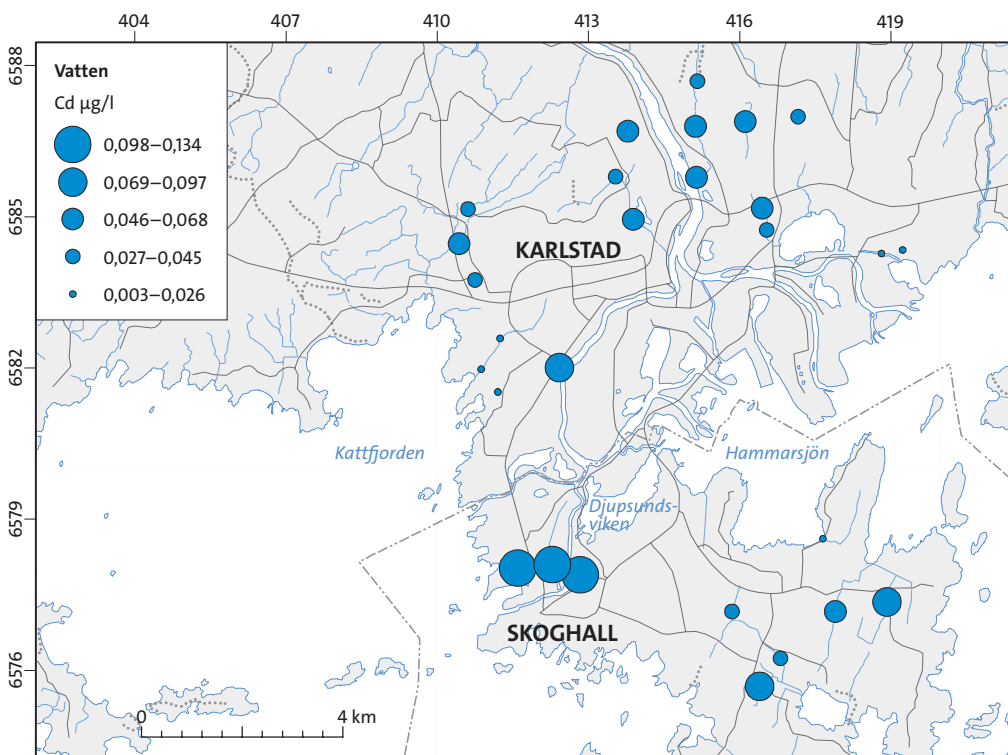
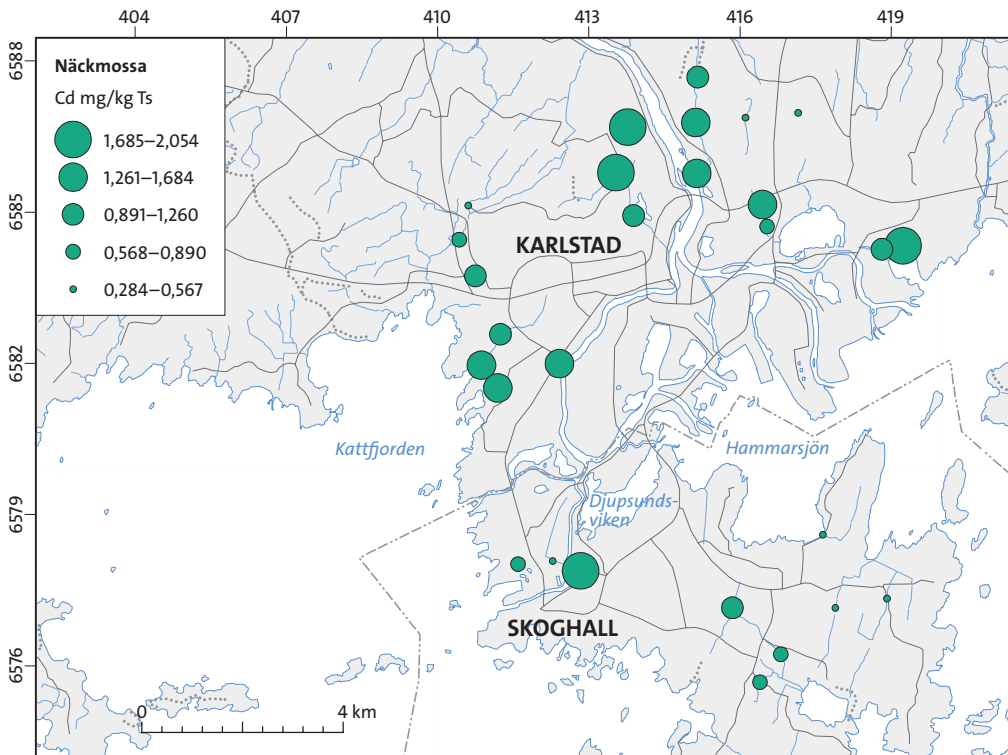
Kartorna baseras på analysresultatet av fraktionen <2 mm ytlig jord respektive sediment, efter lakning med 7M salpetersyra (As, Cd, Co, Cu, Ni, Pb, W, Zn) och kungsvatten (Sb). Kartor över näckmossa baseras på prover torkade och malda och analyserade efter lakning med 7M salpetersyra.

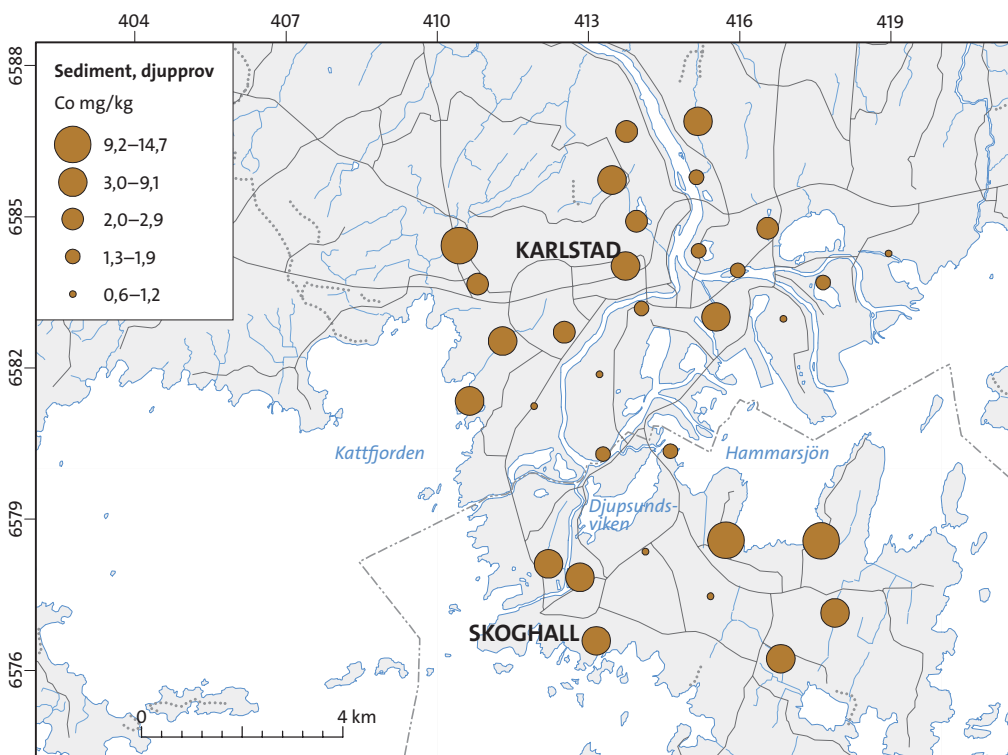
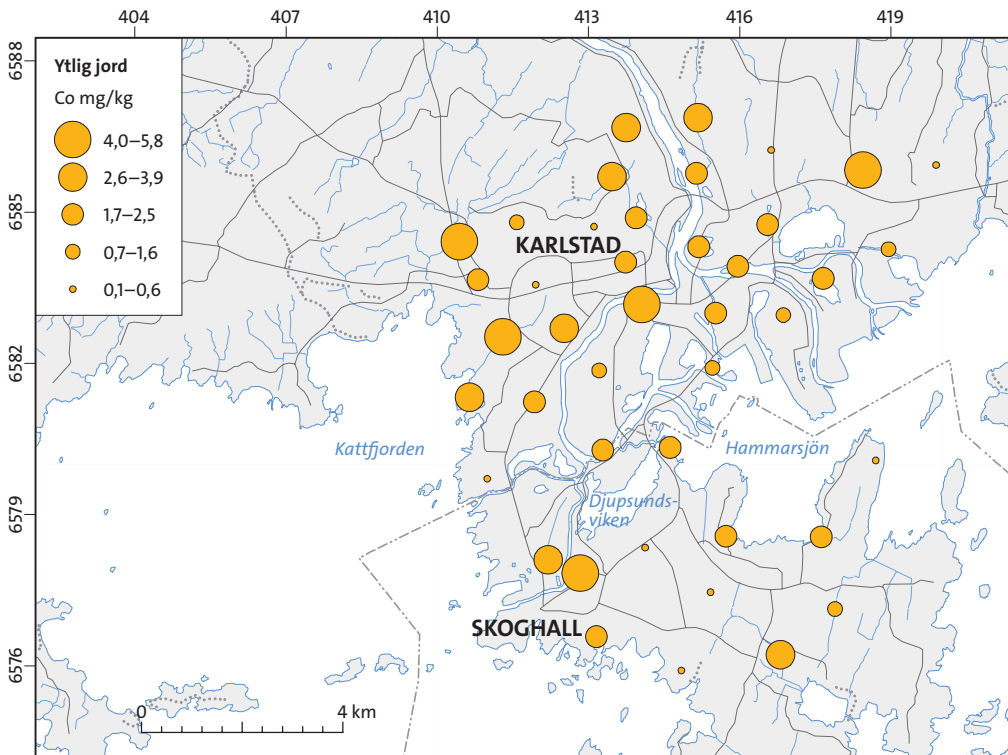


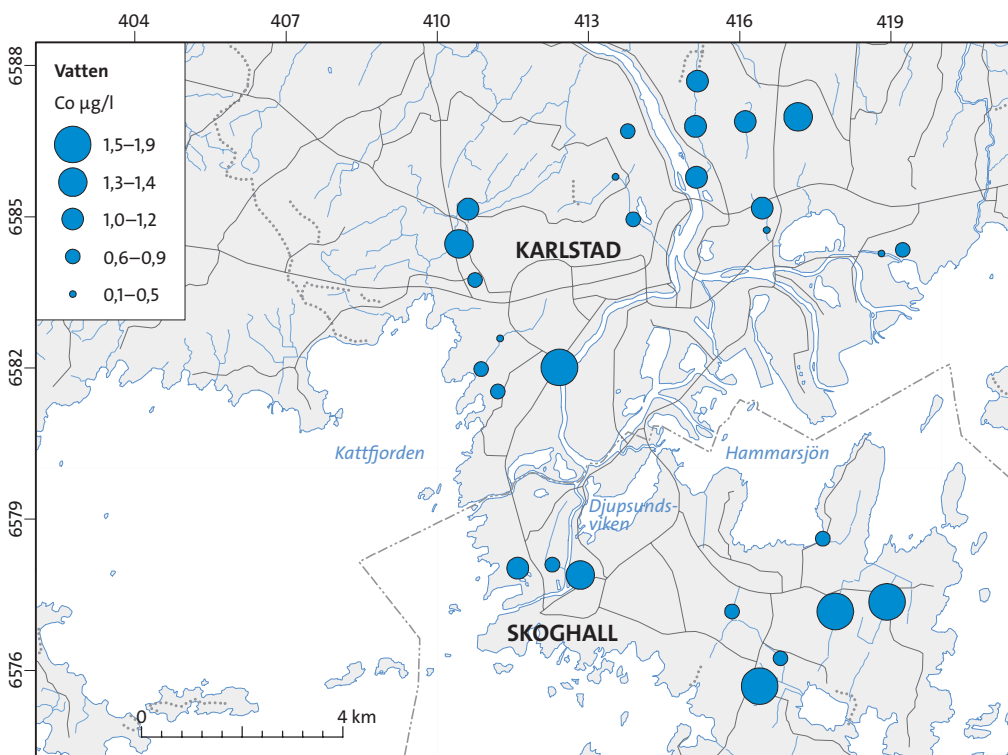
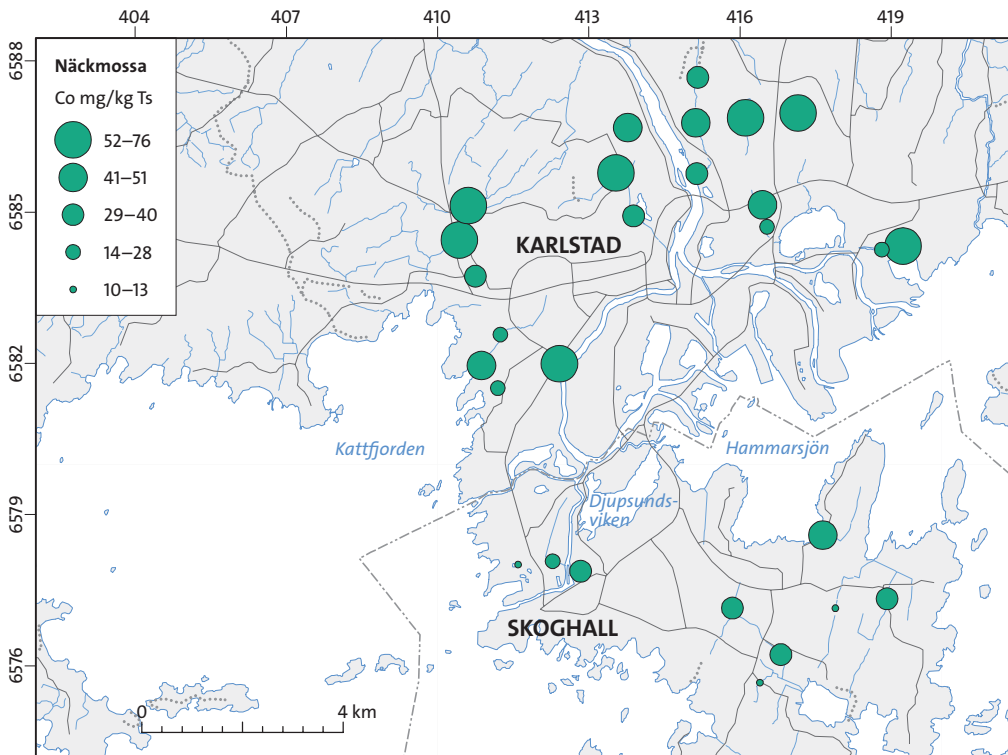


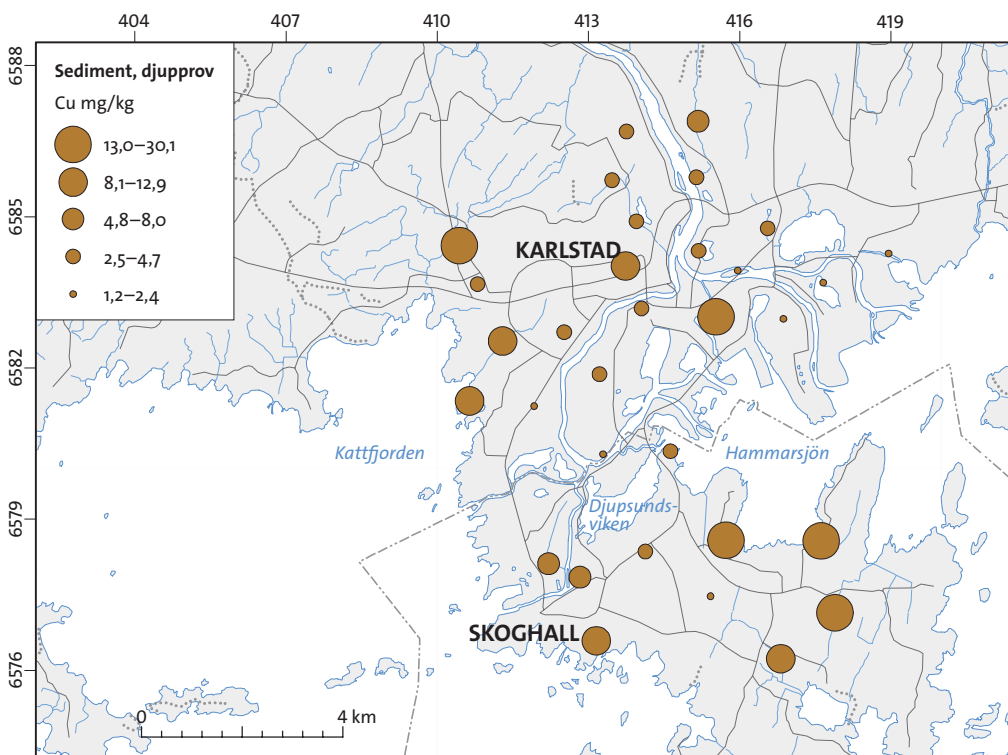
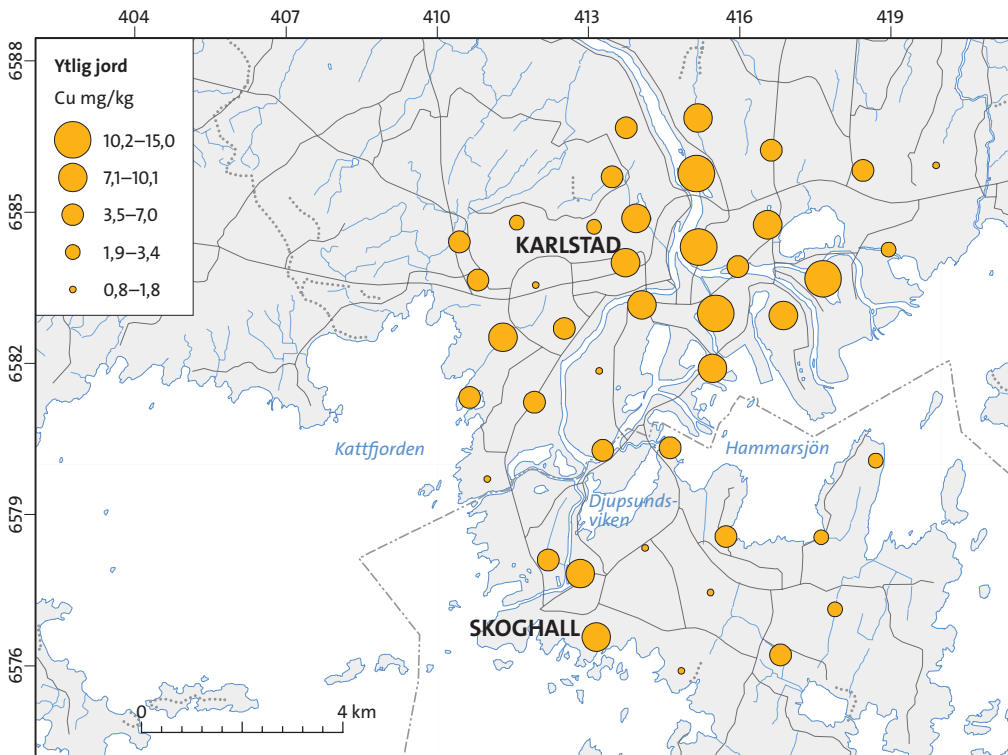


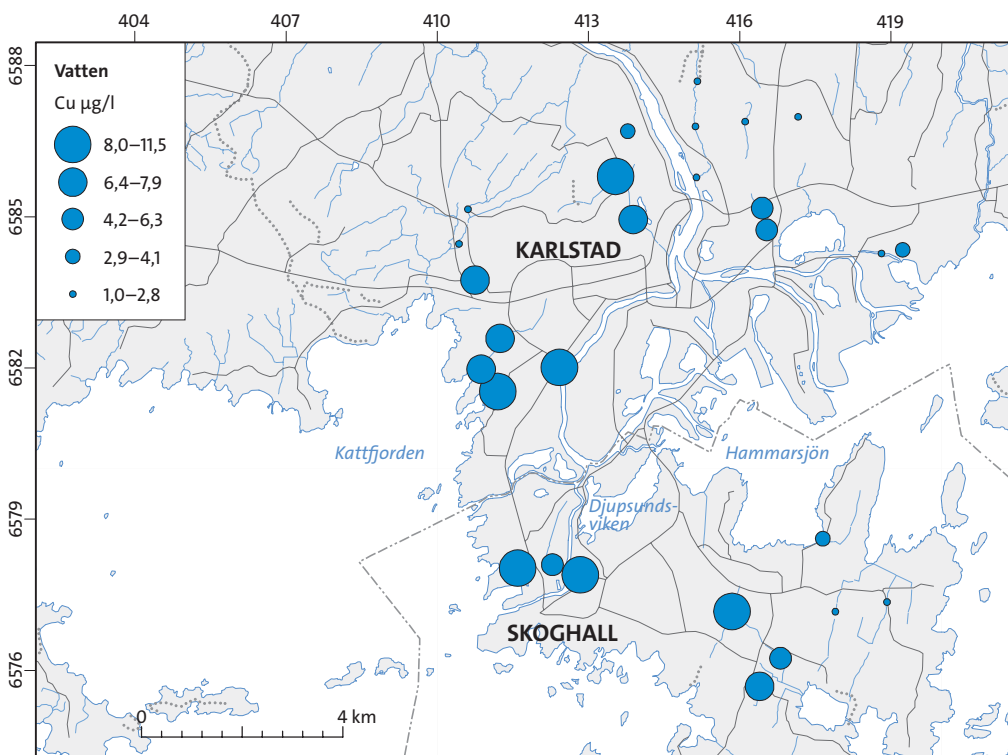
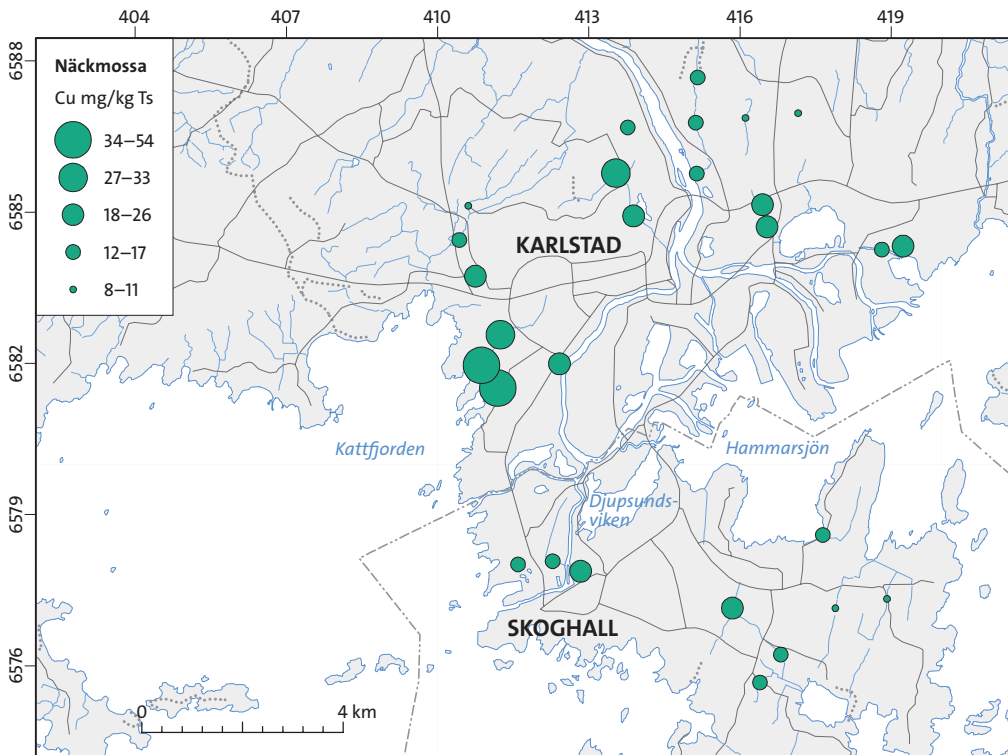


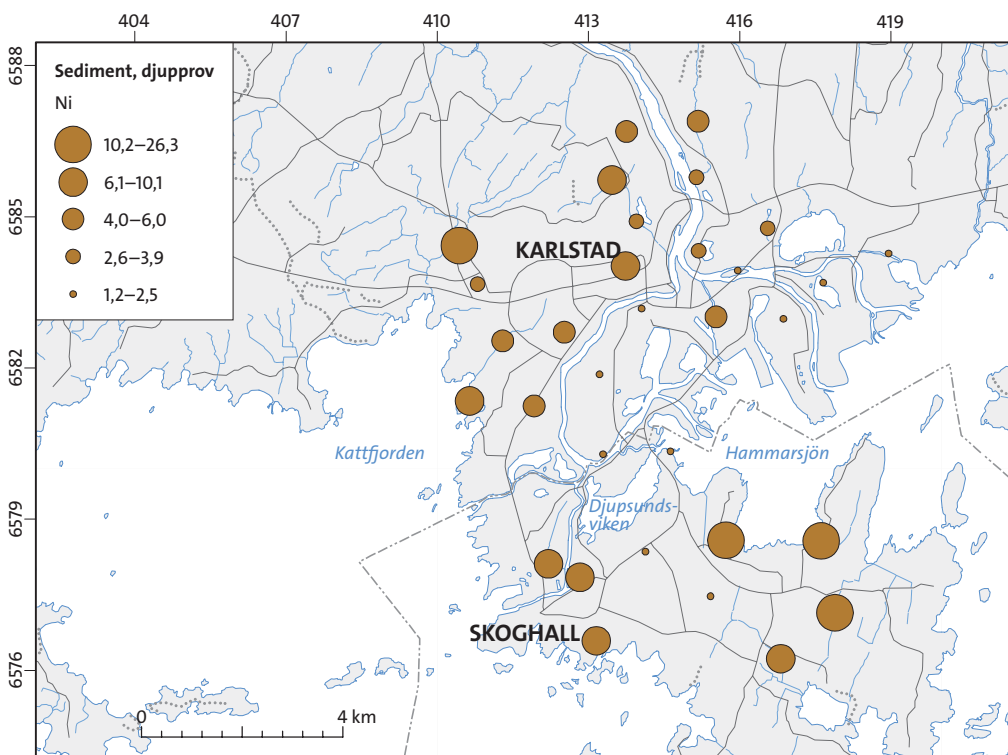
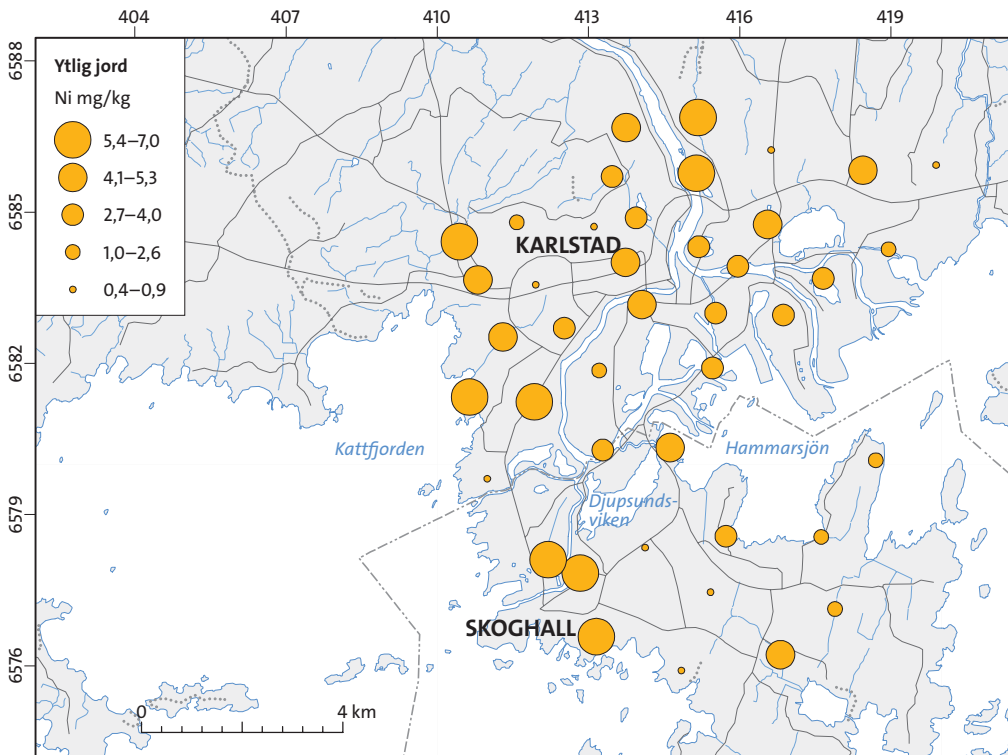


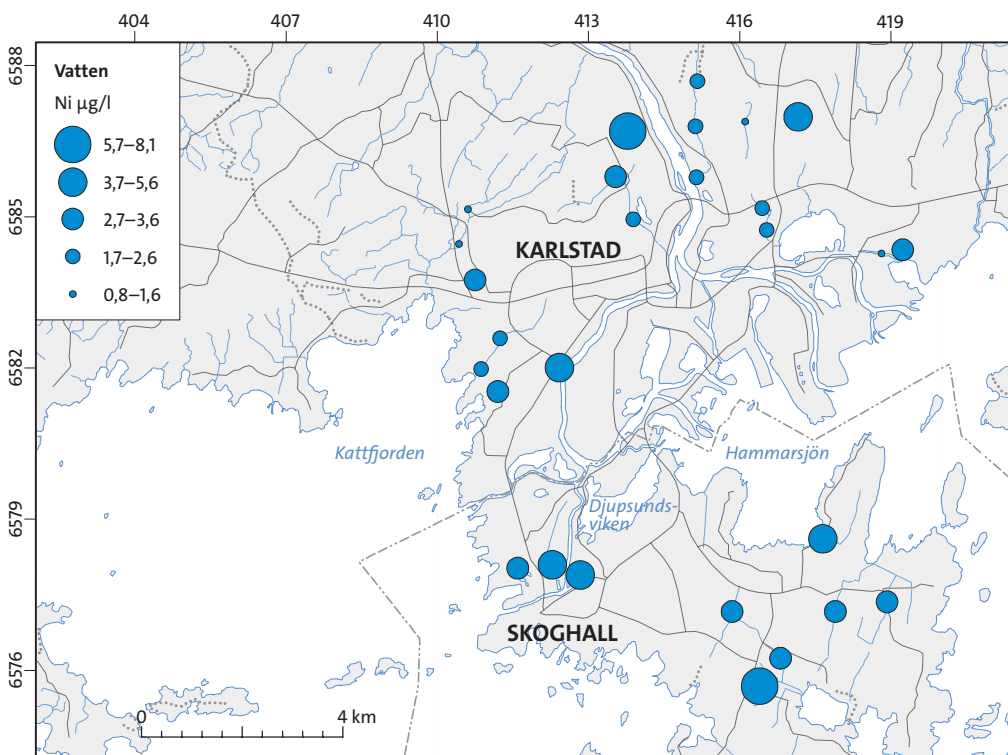
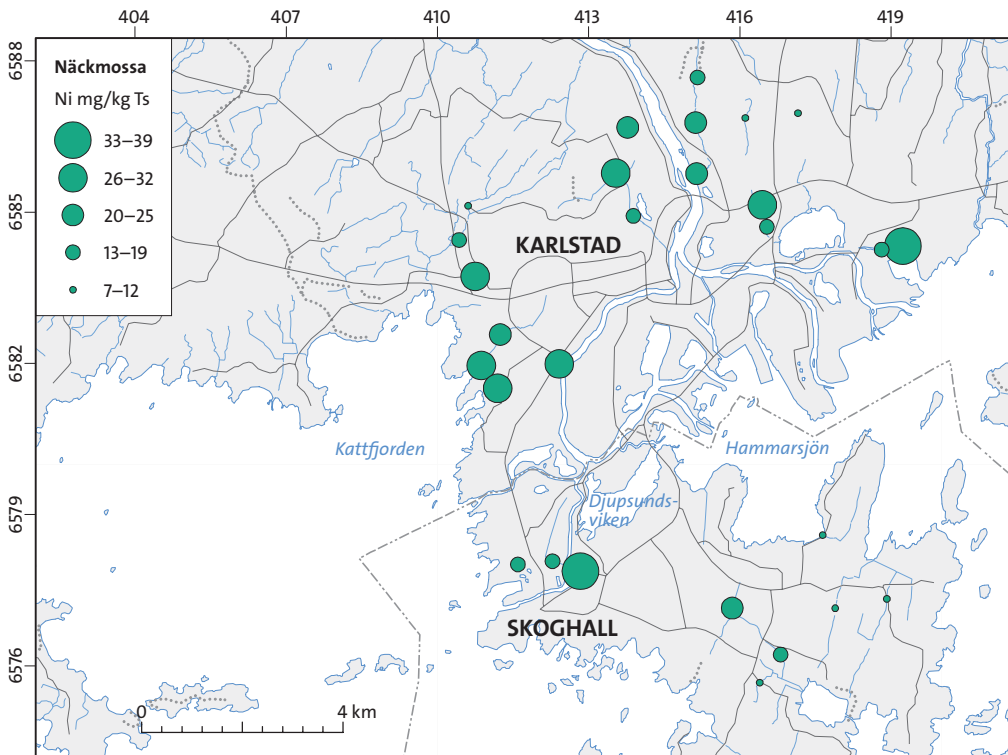


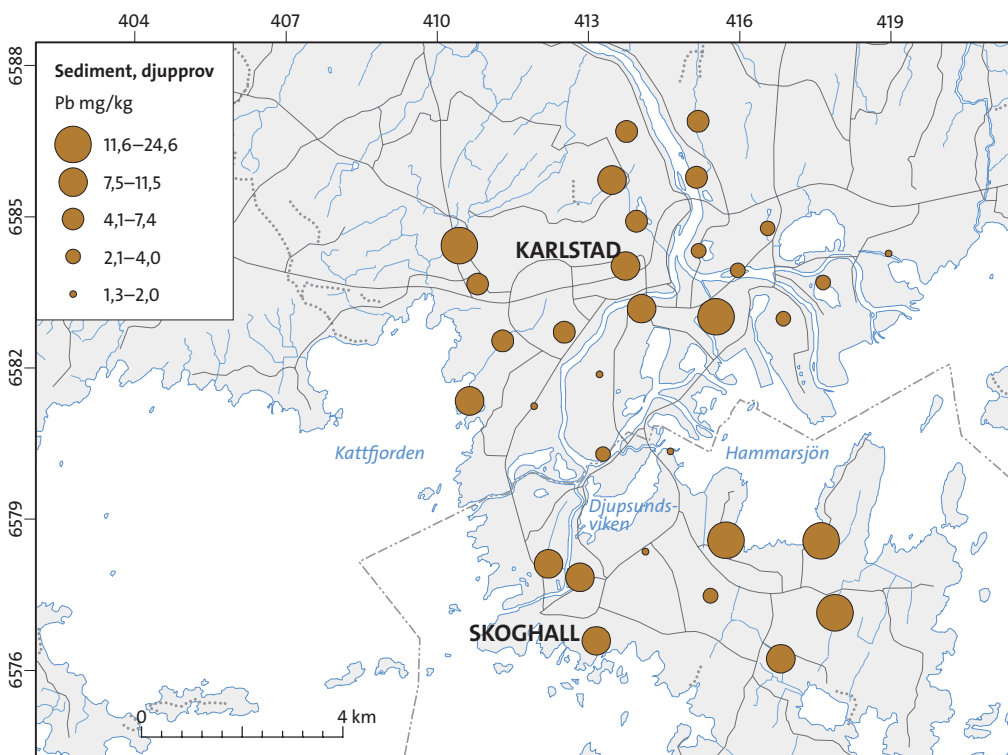
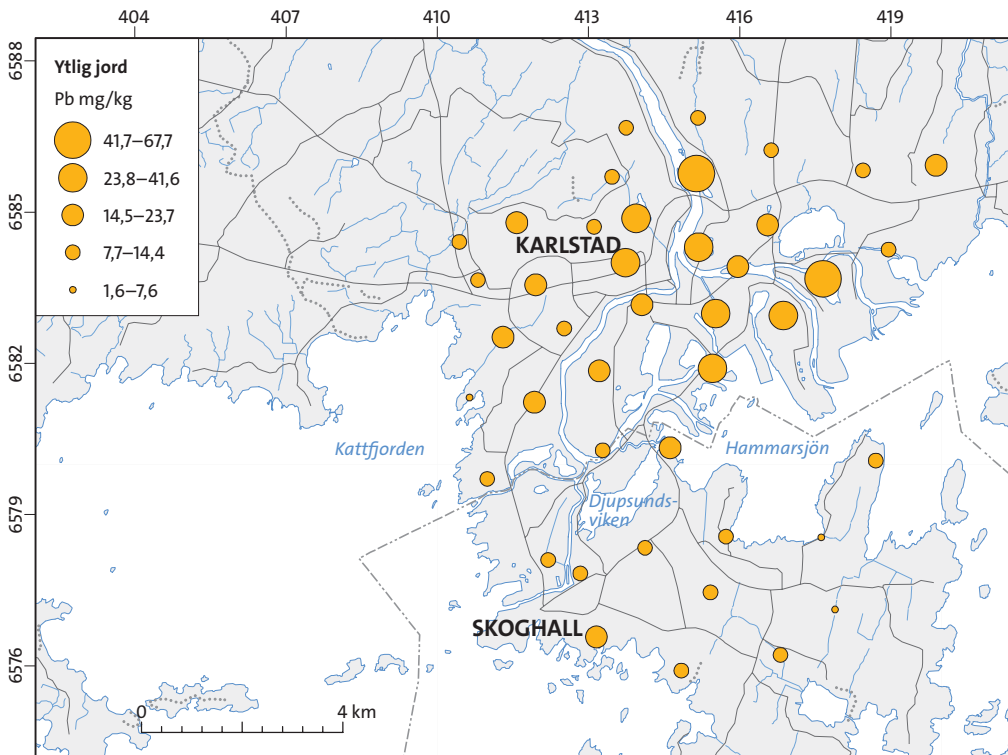




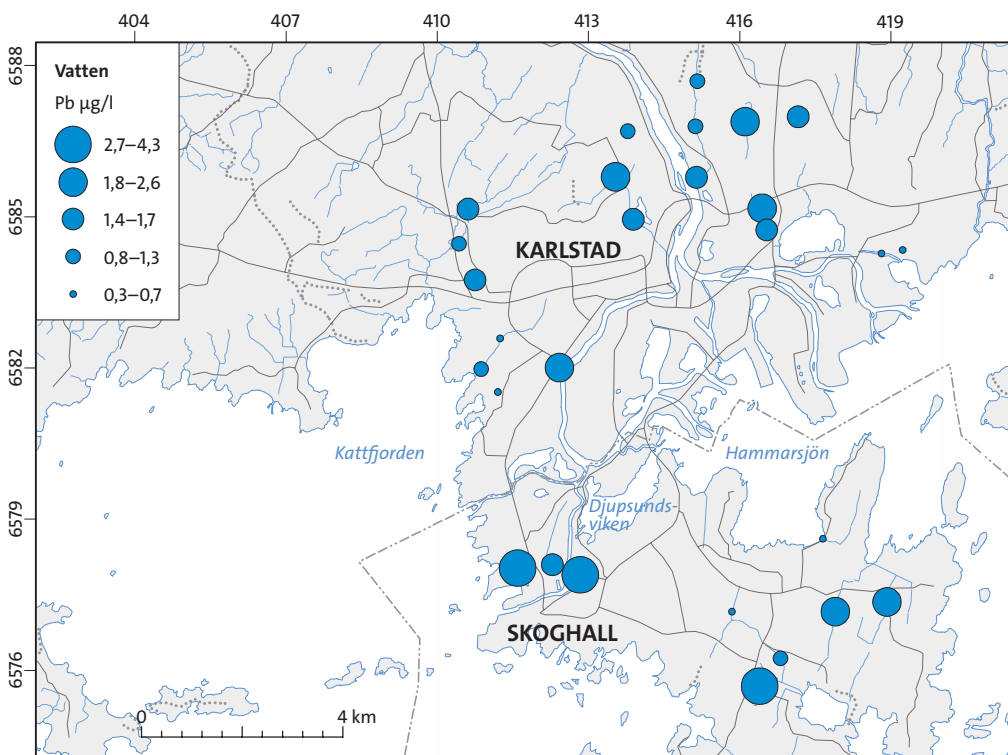
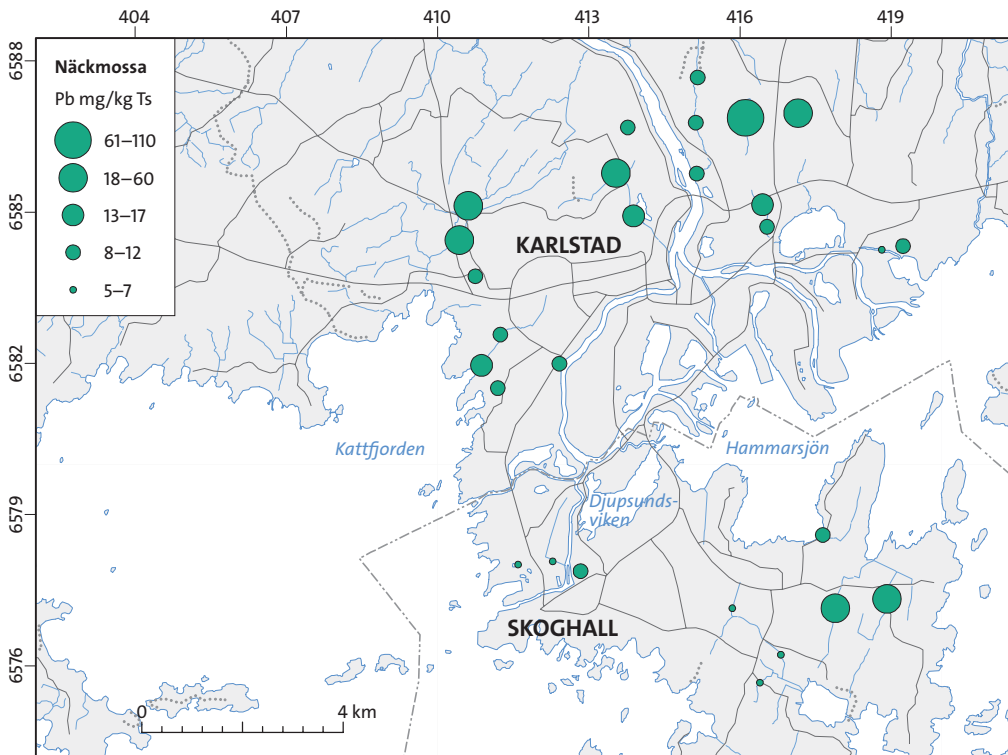


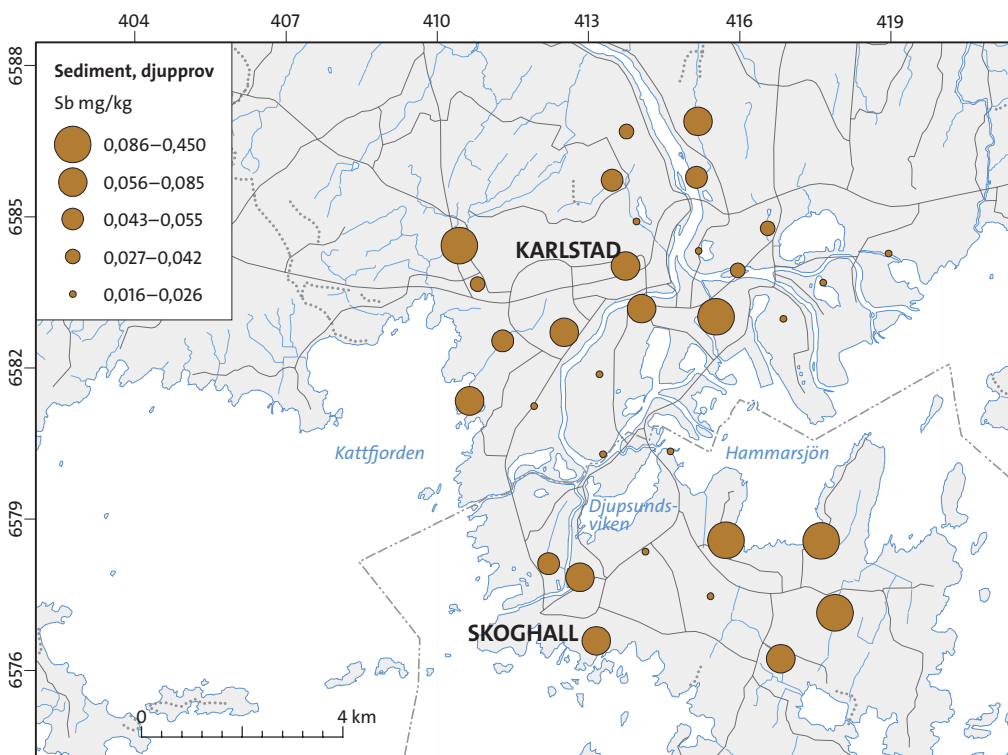
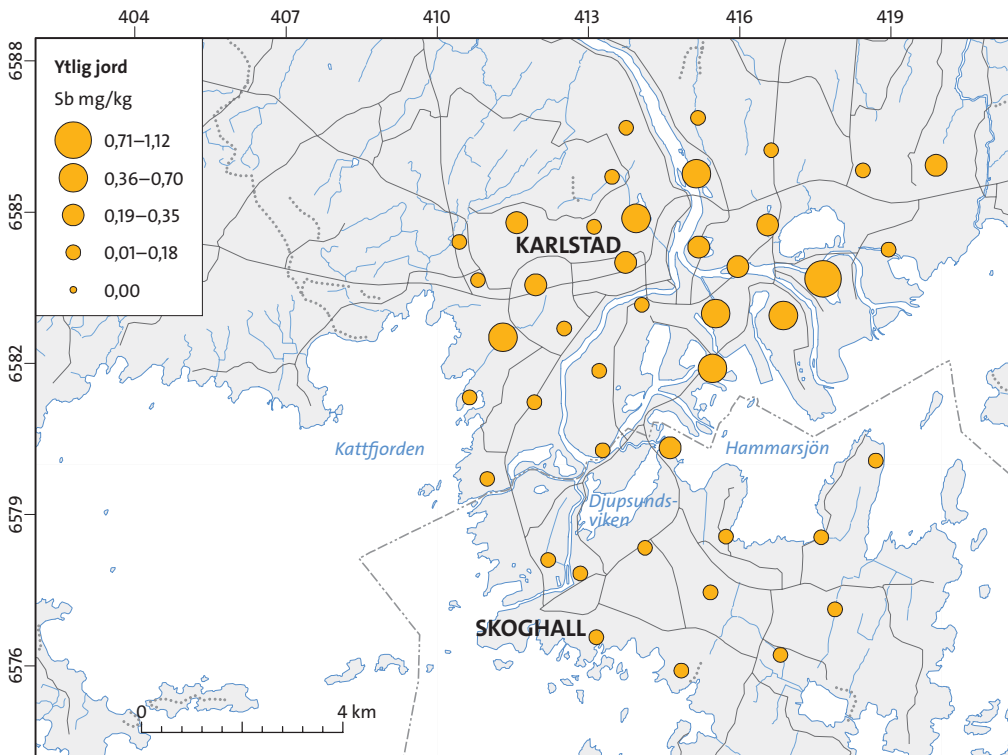


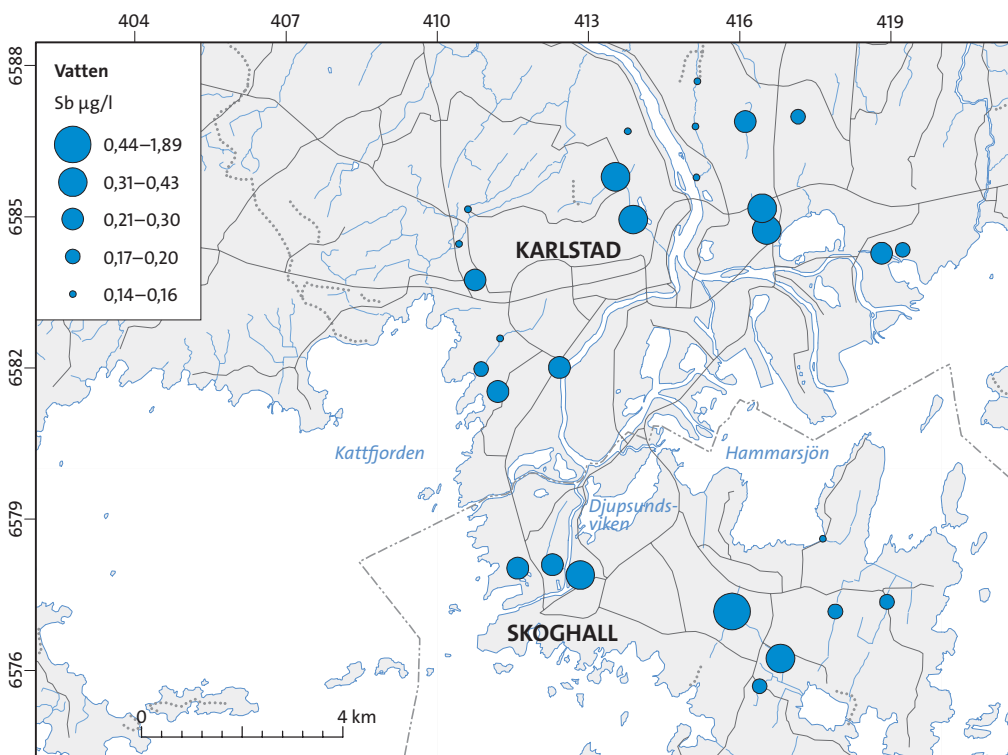
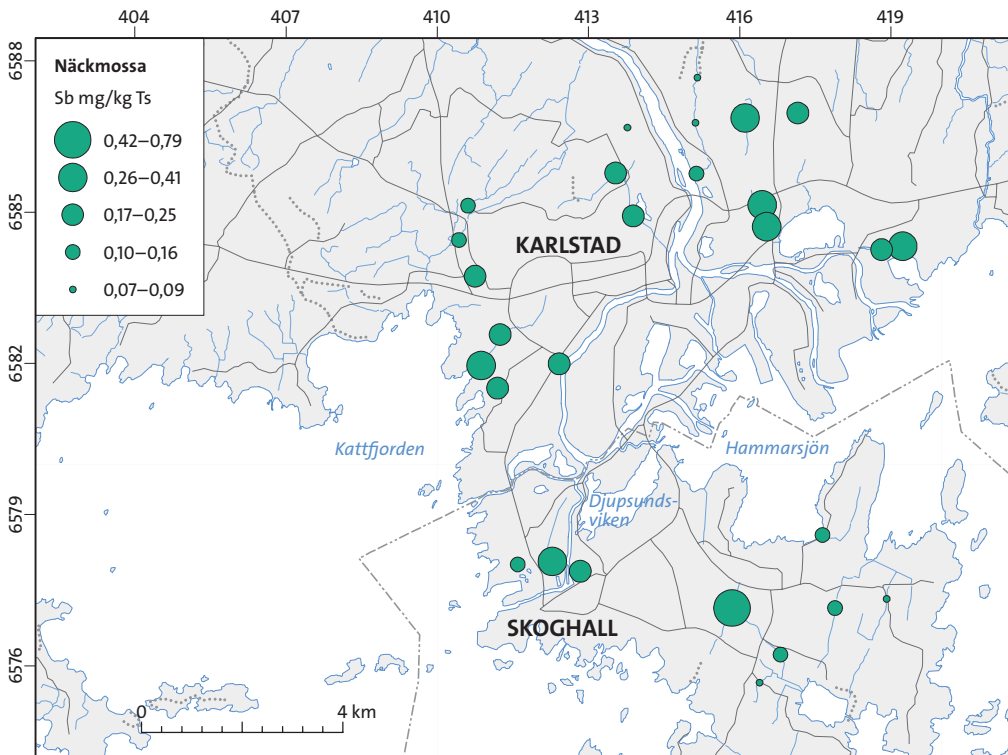


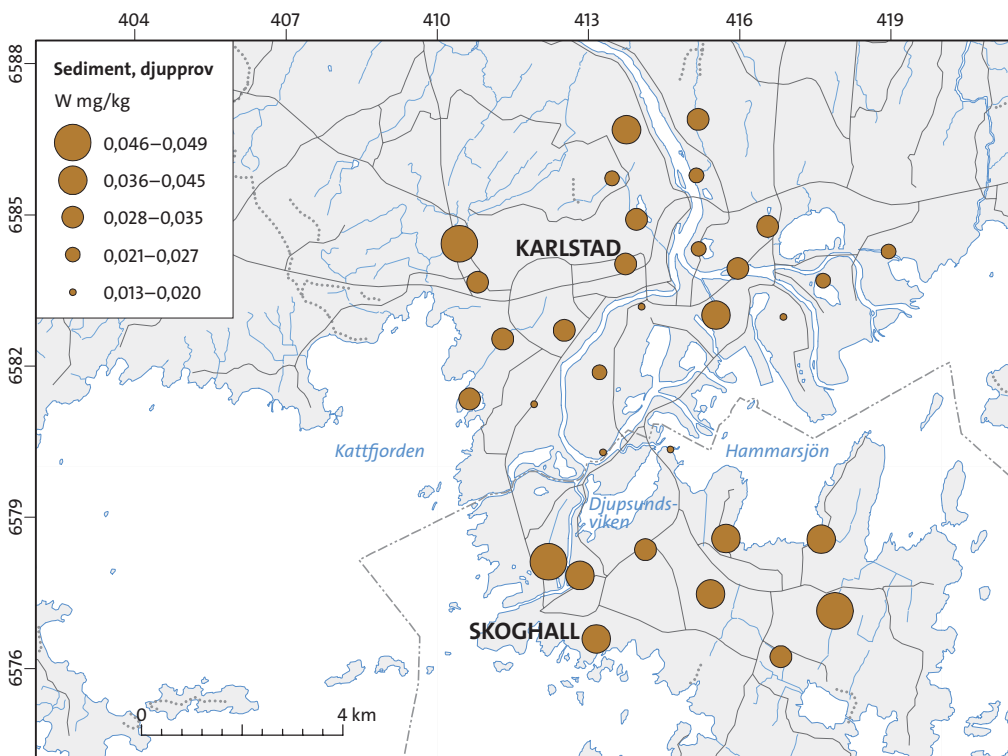
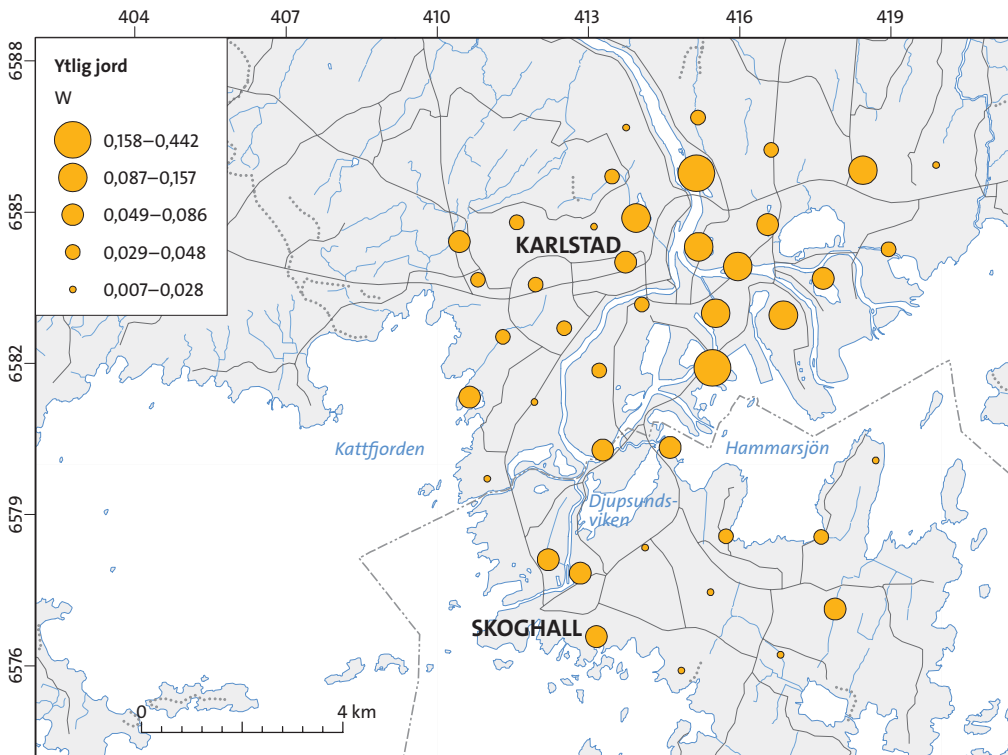


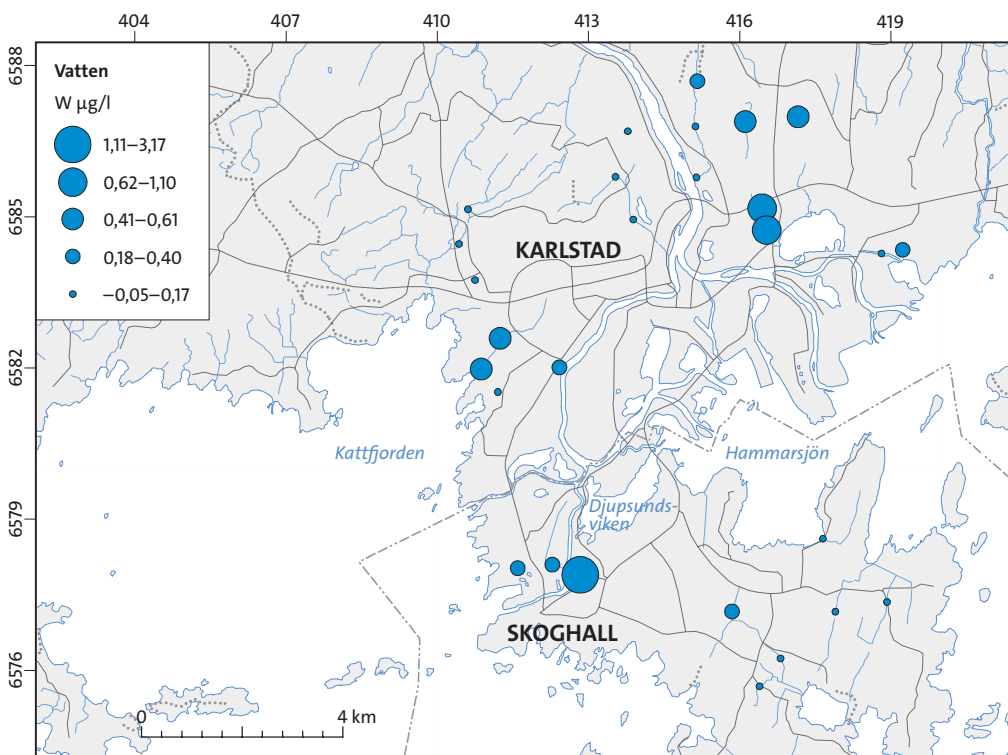
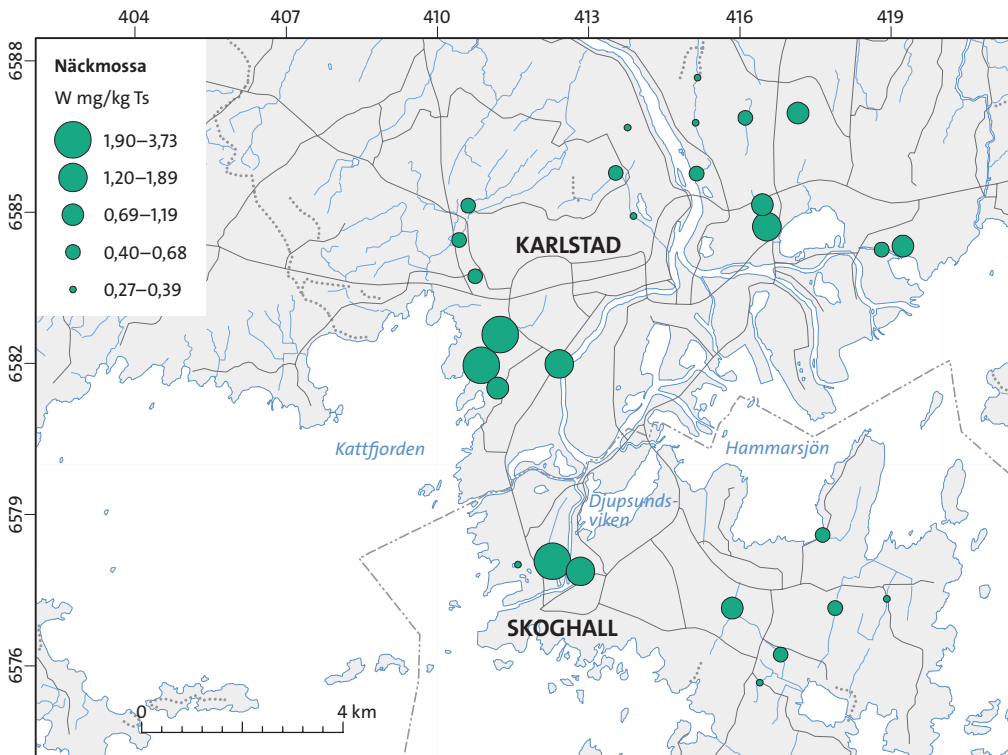


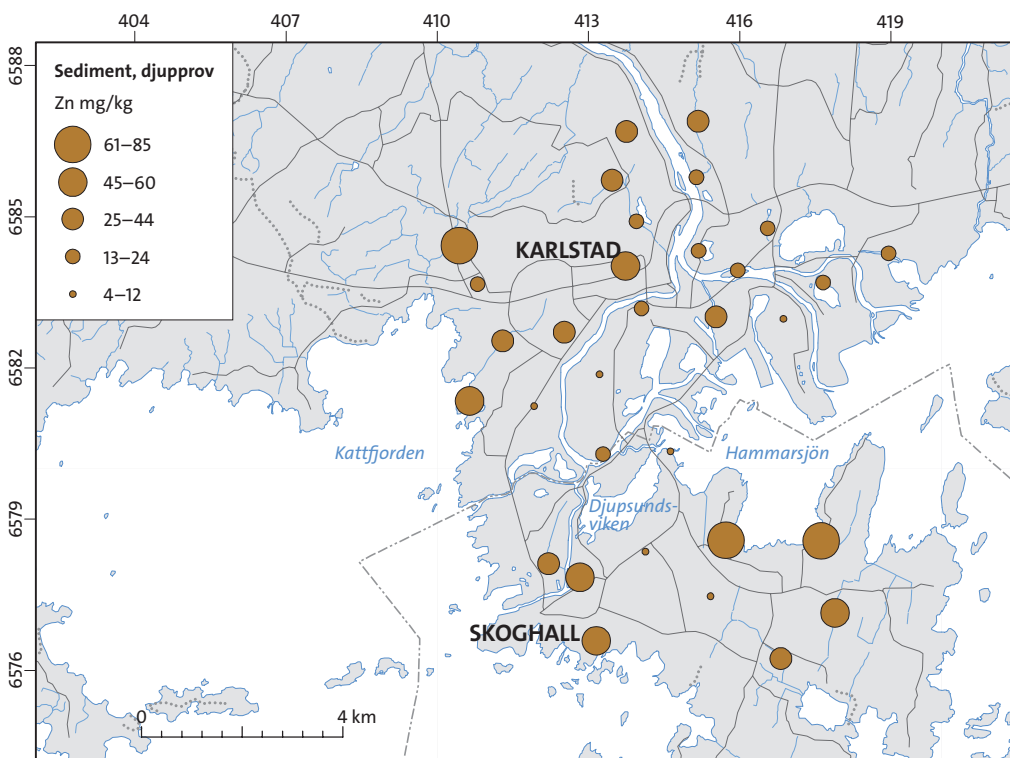
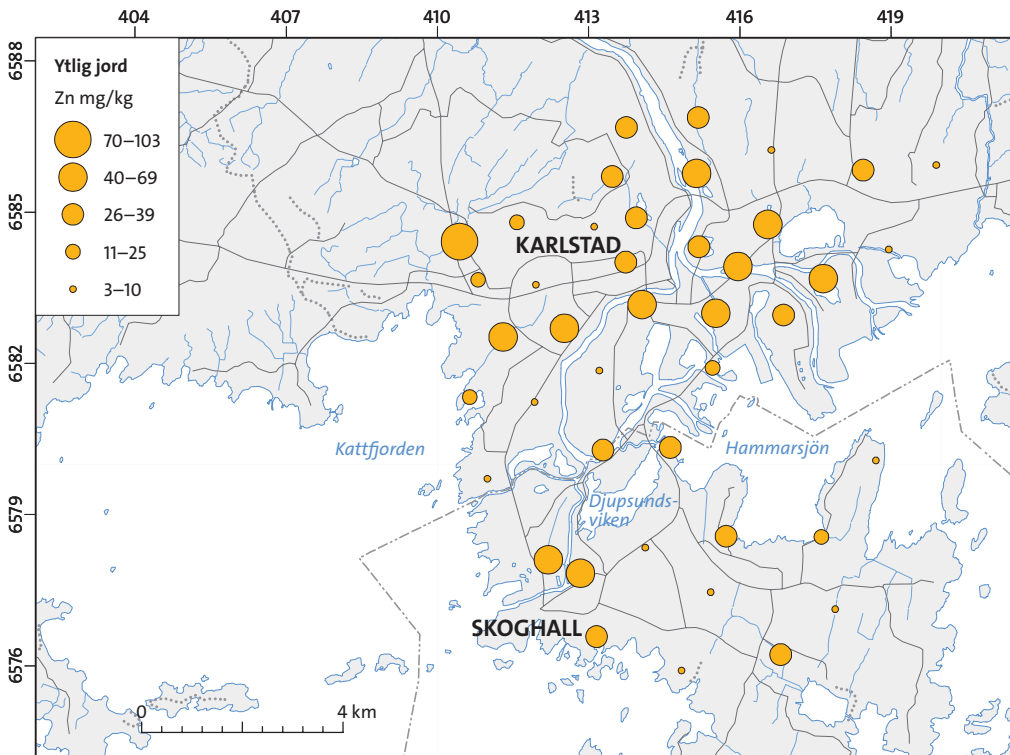


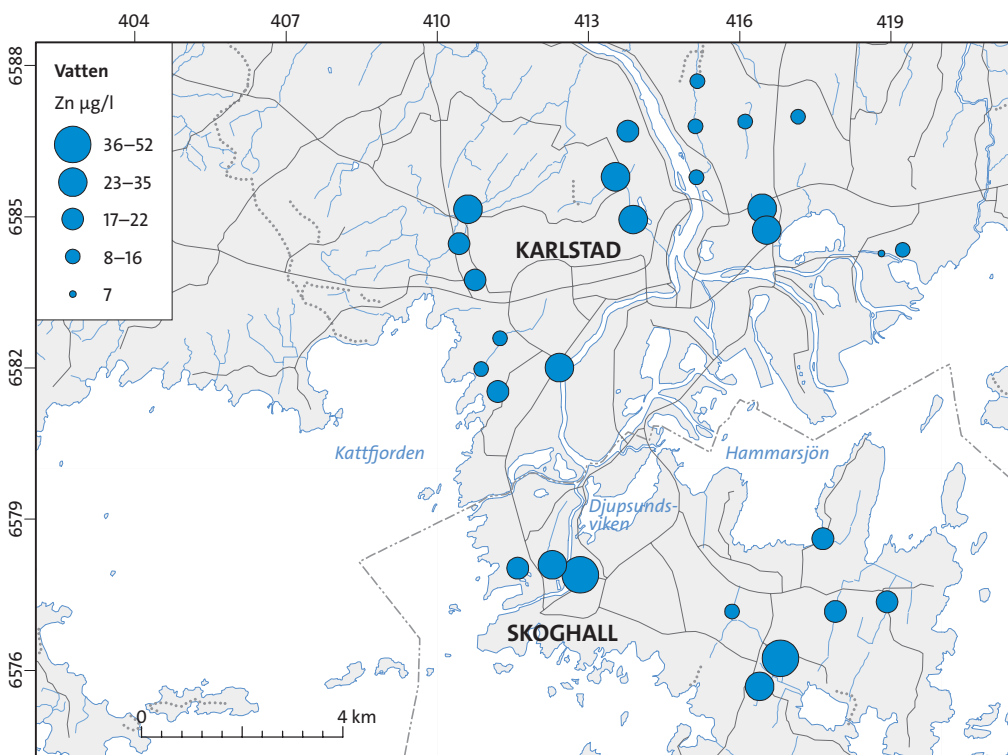
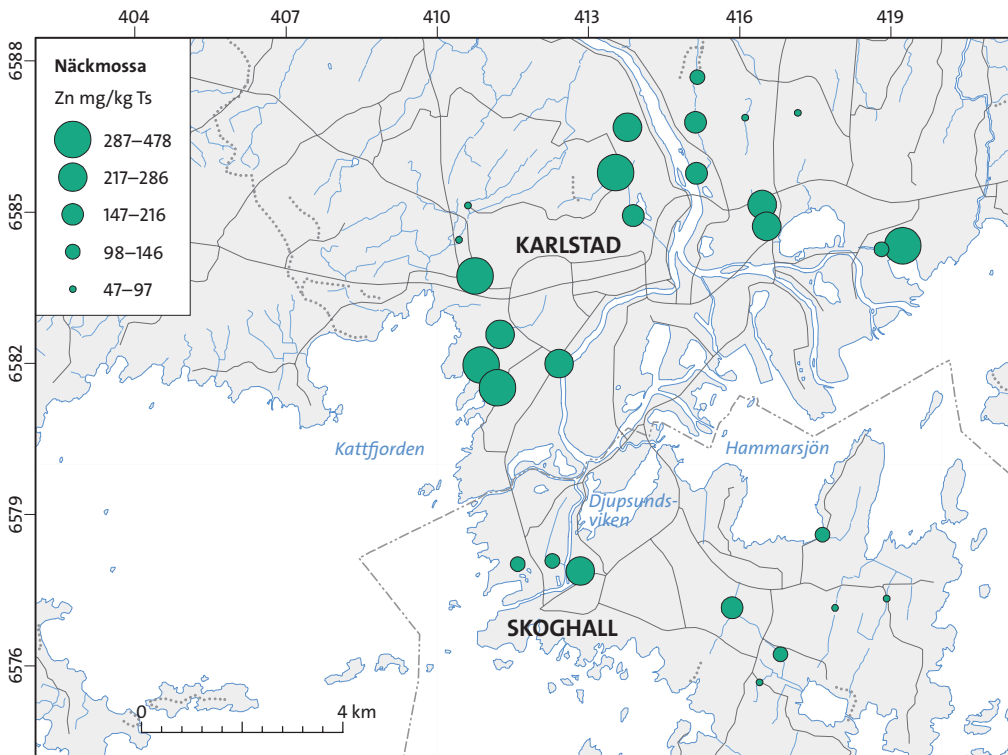












## BILAGA 3

### Översiktlig elementbeskrivning

#### *General description of elements*

Bilagan ger en kort beskrivning över ett antal elements huvudsakliga förekomstsätt och mobilitet. Texten är hämtad från Geokemisk atlas över Sverige (Andersson m.fl. 2014).

#### **Ag, silver**

Silver återfinns i ren form i naturen men är vanligast i sulfider och arsenider samt som spårelement i malmmineral som blyglans, kopparkis och zinkblände. Vulkaniska bergarter och vissa sedimentära bergarter (skiffer, sandsten) kan också ha höga silverhalter. Mobiliteten hos silver beror på redoxförhållande, pH och tillgången på halidjoner. I sura och oxiderande miljöer är silver mobilt. Metallen binder lätt till lerpartiklar och organiskt material samt faller ut tillsammans med järn- och manganhydroxider.

#### **Al, aluminium**

Aluminium är det tredje vanligaste grundämnet i jordskorpan. Det är ett huvudelement i många bergartsbildande mineral som fältspat, glimmer, amfibol och lermineral. Aluminium finns i både kristallina bergarter (granit, basalt), sedimentära bergarter (lerskiffer) och alkalina bergarter (syenit, anortosit). De senare visar vanligen de högsta aluminiumhalterna. Vittrade aluminosilikater (t.ex. kaolinit och illit) utgör huvudkomponenter i många jordar. Därför korrelerar höga aluminiumhalter med högt lerinnehåll. Sekundärt bildade aluminiumhydroxider (gibbsit, böhmit, diaspor) utgör de ekonomiskt viktigaste källorna till aluminium. Lösligheten är starkt pH-beroende. Vanligen är aluminium relativt icke-mobilt men blir lösligt i sura (pH<5,5) och mycket alkalina miljöer (pH>8).

#### **As, arsenik**

Arsenik visar hög affinitet till svavel och förekommer huvudsakligen i sulfidform, t.ex. som arsenikkis (FeAsS). I bergartsbildande mineral kan arsenik ersätta järn och aluminium. Därför förekommer spår av arsenik i vanliga silikater, exempelvis i fältspat. Många bergarter innehåller små mängder arsenik. Hydrotermala processer kan koncentrera arsenik, vilket kan leda till höga arsenikhalter i hydrotermalt omvandlade vulkaniska bergarter, lerskiffer, metamorfskiffer och i kol. Arsenik används som indikatorelement inom prospektering då det är ett grundämne som ofta förekommer tillsammans med epitermala och mesoterma malmfyndigheter, i synnerhet guld. Lösligheten för många arsenikföreningar är hög, medan mobiliteten i jord och sediment är begränsad på grund av den höga adsorptionen till lerpartiklar, järnoxhydroxider och organiskt material.

#### **Au, guld**

Guld förekommer i naturen i gedigen form men bildar även legeringar med silver och koppar (elektrum), tellurider (calaverit, sylvanit) och sällsynta kemiska föreningar med kvicksilver, koppar, antimon och vismut. Spår av guld och guldinklusioner kan hittas i vanliga sulfider som pyrit, zinkblände, blyglans och kopparkis samt i oxider som kromit och magnetit. Höga guldhalter återfinns huvudsakligen i basiska magmatiska bergarter som gabbro och diorit, i basiska till intermediära vulkaniska bergarter (basalt, andesit, trakyt) och i metasomatiska bergarter (t.ex. greisen). Guld förekommer i olika typer av hydrotermala och epitermala mineraliseringar associerade med kvartsrika sprickfyllnader och sulfidmineral, samt i vaskavlagringar och i finkorniga sediment. Guld är inte särskilt mobilt, det är icke-reaktivt och har låg aktivitet i lösning med undantag för när det bildar komplex med cyanidjoner,  $\text{Au}(\text{CN})_2$ . Höga guldhalter har observerats i växter och humusrika jordar som överlagrar guldmineraliseringar.

#### **B, bor**

Den huvudsakliga källan till bor är senmagmatiska bergarter, i synnerhet pegmatit. Bor bildar många mineral, det vanligaste är turmalin (som förekommer i pegmatit) och en grupp borater (t.ex. borax)



som är vanliga evaporitutfällningar i mycket torra miljöer. Man kan hitta spår av bor i vissa bergartsbildande mineral, t.ex. muskovit, fältspat och lermineral. Även om bor inte visar hög löslighet från magmatiska mineral (som turmalin) kan det vara lösligt i jord och adsorberas lätt till lermineral (t.ex. illit), organiskt material och järn-aluminiumoxider. Sekundär anrikning av bor kan hittas i leror och karbonater, där marin lera innehåller höga halter på grund av de höga koncentrationerna i havsvatten. Anrikning av bor sker även i jord som är rik på organiskt material, speciellt i miljöer med lågt pH.

### **Ba, barium**

Barium bildar egna mineral, det vanligaste är baryt. Barium förekommer även i små mängder i bergartsbildande silikater som fältspat och glimmer i vilka det substituerar kalcium. Sura och alkalina bergarter kan innehålla höga bariumkoncentrationer (upp till 2000 ppm). Även sedimentära bergarter som är rika på kalifältspat, t.ex. arkos, kan ha höga bariumhalter. Barium kan anrikas i områden som omvandlats hydrotermalt eller där det finns mineraliseringar av basmetaller, speciellt Pb-Zn-sulfidmineraliseringar i kalksten och dolomit. Mobiliteten hos barium är låg och det faller ofta ut som sulfat eller karbonat och anrikas i mangan- och fosforkonkretioner. Barium har en stark tendens att adsorberas till lera och järnoxider.

### **Be, beryllium**

Beryllium bildar sällsynta mineral som beryll och krysoberyll, som utgör ekonomiskt viktiga källor till beryllium. Dessa mineral finns huvudsakligen i senmagmatiska bergarter och i pegmatiter. Sekundär anrikning sker i finkorniga sediment rika på lermineral (lerskiffer) och kol. Beryllium är relativt mobilt vid lågt pH och har en stark tendens att adsorbera till lerpartiklar, organiskt material och järn-manganhydroxider.

### **Bi, vismut**

Vismut bildar sällan egna mineral (t.ex. bismut och bismutit) och förekommer oftast som ett spår-element i sulfider som blyglans, zinkblände och kopparkis. Vismut kan anrikas i sura magmatiska och vulkaniska bergarter. Sekundära koncentrationer av vismut finns i finkorniga sediment, leror och kol. Vismut uppträder tillsammans med Cu-, Zn-, Pb-, W-, Sn- och Au-mineraliseringar och används som indikatorelement vid guldprospektering. Vismut har låg mobilitet och tenderar att falla ut tillsammans med järn-manganhydroxider. Det bildar också olösliga salter och adsorberas till organiskt material.

### **Ca, kalcium**

Kalcium är det femte vanligaste grundämnet i jordskorpan. Det uppträder huvudsakligen som katjon i en mängd olika mineral, t.ex. karbonater (kalcit, dolomit), sulfater (gips, anhydrit), fosfater (apatit) och silikater (plagioklas, amfibol, pyroxen). Kalcium är också den viktigaste komponenten i kalksten, som till övervägande del består av kalcit. Mobiliteten är normalt hög, men är låg vid mycket högt pH.

### **Cd, kadmium**

Kadmium bildar sällsynta mineral som greenockit och kadmiumkarbonatet oktavit, men förekommer oftast i zinkblände och blyglans. Små mängder kadmium kan finnas i bergartsbildande mineral, t.ex. biotit och amfibol. De högsta kadmiumhalterna finns i sedimentära bergarter som lerskiffer och sandsten, samt i metamorf skiffer. Svartskiffer och kol kan innehålla mycket höga halter. Kadmium anrikas i organiskt material och i kol. Kadmium är mobilt vid oxiderande förhållanden och lakas från sulfider vid pH lägre än 8. Vid högt pH tenderar kadmium att falla ut med karbonater. Mobiliteten är dock begränsad på grund av att kadmium gärna adsorberar till lerpartiklar och organiskt material samt faller ut med järn-manganhydroxider. Den huvudsakliga källan till koncentrationer av kadmium i svensk morän är polymetalliska mineraliseringar (Zn, Pb, Cu, Ag) där kadmium förekommer i sulfider.

### **Ce, cerium**

Cerium är det näst lättaste men det vanligaste grundämnet bland de sällsynta jordartsmetallerna (rare earth elements, REE). Cerium bildar flera mineral, t.ex. monazit, xenotim, bastnäsit och cerit, och kan ersätta kalcium i fältspat. Mineral som innehåller cerium förknippas vanligtvis med granitoida bergarter, men höga koncentrationer av cerium kan också observeras i alkalina magmatiska bergarter. Cerium är inte särskilt mobilt men kan anrikas sekundärt i lerrika jordar eller adsorberas till järnoxider.

### **Co, kobolt**

Kobolt är en övergångsmetall med fysikaliska och kemiska egenskaper som liknar nickel. Kobolt bildar egna mineral, t.ex. koboltglans, och uppträder som spårelement i vanliga sulfider (t.ex. pyrit) och i bergartsbildande mineral som olivin, pyroxen och amfibol. De högsta kobolthalterna finns i ultrabasiska och basiska bergarter. Kobolt har hög mobilitet vid lågt pH och oxiderande förhållanden, samt låg mobilitet vid basiska och reducerande förhållanden. Mobilt kobolt koncentreras huvudsakligen i järn-manganoxider, leror och finkorniga sediment.

### **Cr, krom**

Krom är en vanlig övergångsmetall som förekommer i basiska och ultrabasiska bergarter. Krom bildar kromit och finns i små mängder i bergartsbildande mineral som amfibol, pyroxen, glimmer och granat. Vid vittring är mobiliteten hos krom vanligtvis låg, men i rörlig form koncentreras krom företrädesvis i leror.

### **Cu, koppar**

Koppar förekommer företrädesvis i sulfidform. Som spårelement kan det också finnas i glimmer, pyroxen och amfibol, och är därför vanligare i basiska bergarter som basalt och gabbro. Höga kopparhalter kan finnas i finkorniga sediment och metallen adsorberas lätt till lerpartiklar. Koppar är en basmetall som har stort ekonomiskt värde och det förekommer i många mineraliseringstyper, t.ex. porfyr-kopparmineraliseringar, vulkaniska sulfidmineraliseringar, polymetalliska gångförekomster och skarnmineraliseringar. Koppar är mobilt vid sura pH-förhållanden och faller ut tillsammans med zink- och järnhydroxider. I jordar som är rika på organiskt material sker utfällning av koppar främst genom mikrobiell aktivitet.

### **Fe, järn**

Järn är ett av de vanligast förekommande grundämnena i jordskorpan och uppträder i mineral som oxider, sulfider och karbonater och är en huvudkomponent i silikat hos bergartsbildande mineral (t.ex. olivin, amfibol, pyroxen och biotit). Järnhalten är hög i basiska och ultrabasiska bergarter jämfört med lägre halter i sura bergarter som granit. Även finkorniga sediment som lerskiffer kan ha högt järninnehåll. Lösligheten hos järn varierar med pH och Eh samt med mängden organiskt material. Lösligheten är låg vid oxiderande förhållanden och minskar med ökande pH. Järn har högre mobilitet vid reducerande förhållanden då järnet oftast är bundet i organiska komplex.

### **Ge, germanium**

Germanium bildar få egna mineral (t.ex. germanit) men är ett vanligt spårelement i Zn-, Pb- och Cu-sulfider och i bergartsbildande mineral som olivin, amfibol, fältspat och muskovit. Anrikning av germanium förekommer i senmagmatiska bergarter (pegmatit, greisen) och i hydrotermala mineraliseringar. Höga germaniumhalter återfinns i finkorniga sediment och i metamorfa motsvarigheter till dessa (skiffer, fyllit). Särskilt höga halter har observerats i kol och aska. Mobiliteten hos germanium är låg och ämnet adsorberas lätt till lermineral, järnoxider och organiskt material.

### **Hg, kvicksilver**

Kvicksilver förekommer huvudsakligen i sulfidform i hydrotermalt omvandlade vulkaniska och vulkanoklastiska bergarter. Gediget kvicksilver är sällsynt i naturen. Som spårelement kan det finnas i amfibol, fältspat, pyroxen, zinkblände och titanit. Sekundär anrikning sker i finkorniga sedimentära bergarter (svartskiffer) och kol. Inom mineralprospektering används kvicksilver ofta som indikatorelement vid prospektering efter Au-, Ag- och Sb-mineraliseringar. Kvicksilver har varierande mobilitet beroende på hur det förekommer i naturen. Det har en exceptionell tendens att bindas till organiskt material och i mindre skala till lermineral.

### **K, kalium**

Kalium är ett av de vanligaste grundämnena i jordskorpan. Kalium finns i en mängd olika mineral: bergartsbildande silikater (fältspat, glimmer), klorider (sylvit) och fyllosilikater (illit). Kalium anrikas i sura bergarter, inklusive alkalina och metamorfa bergarter, och i sandstenar och lerskiffer rika på fältspat. Vid vittring blir kalium lösligt och mobilt men har en hög tendens att adsorbera till lermineral. Extraherbarheten i kungsvatten är låg eftersom det mesta av kaliumet är bundet i vittringsbeständiga mineral som kalifältspat. Generellt är höga kaliumhalter vanliga i områden med granitiska och alkalina bergarter som är rika på kalifältspat och glimmer.

### **La, lantan**

Lantan tillhör de sällsynta jordartsmetallerna (rare earth elements, REE) och är det näst mest förekommande utav dessa. Lantan förekommer i accessoriska mineral som monazit, apatit och allanit och som ett spårelement i bergartsbildande mineral som biotit, pyroxen, fältspat och amfibol. Höga lantanhalter är typiska för magmatiska bergarter (granit, pegmatit) och alkalina bergarter. Sedimentära bergarter och sediment som innehåller tungmineral (t.ex. monazit) kan uppvisa mycket höga halter. Mobiliteten är låg hos lantan och adsorptionen till järnoxider, fosfater och lermineral är hög. Alla sällsynta jordartsmetaller har en tendens att ackumuleras i en basisk snarare än sur miljö och därför är lantankoncentrationen ofta hög i jord innehållande kalkhaltigt bergartsmaterial.

### **Li, litium**

Litium är en alkalimetall som återfinns i bergartsbildande mineral som biotit, fältspat och amfibol samt i lermineral. Litium bildar mineral som spodumen (pyroxen) och lepidolit (glimmer), vilka är karaktäristiska för senmagmatiska bergarter, t.ex. granit, aplit, pegmatit, greisen och kvartsådror. De högsta koncentrationerna av litium finns i alkalina till granitiska magmatiska bergarter, men lerskiffer, skiffer och finkorniga marina sediment kan också innehålla höga litiumhalter. I torra klimat faller litium ut tillsammans med evaporitmineral. Mobiliteten hos litium är låg förutom vid lågt pH och adsorption sker främst till järnoxider, lermineral och organiskt material.

### **Mg, magnesium**

Magnesium är ett av de vanligaste grundämnena i den kontinentala jordskorpan. Det finns många olika magnesiummineral, från silikater och fosfater till karbonater och borater. Magnesium är ett huvudelement i bergartsbildande järn-magnesiummineral som olivin, biotit, amfibol och pyroxen. De högsta magnesiumkoncentrationerna hittas i ultrabasiska och basiska bergarter. Vid vittring är magnesium lösligt och mycket mobilt och kan via jonbyten fixeras till lermineral. Magnesium kan ersätta kalcium och ackumuleras i kalkhaltiga avlagringar.

### **Mn, mangan**

Mangan bildar många egna mineral (oxider, hydroxider, karbonater, silikater) och förekommer som ett accessoriskt grundämne i många bergartsbildande mineral, t.ex. granat, pyroxen, amfibol och olivin. I jonform ( $Mn^{2+}$ ) ersätter mangan  $Fe^{2+}$  och  $Mg^{2+}$  i järn-magnesiummineral och därför är

mangan vanligt i basiska bergarter som basalt och gabbro. I sedimentära bergarter och sediment bildas sekundära manganoxider i form av mindre utfällningar på mineralkorn. Vid oxiderande förhållanden kan metallen anrikas i leravlagringar. Som  $Mn^{2+}$  är mangan mobilt vid lågt pH medan manganoxider och manganhydroxider generellt visar låg löslighet.

### **Mo, molybden**

Molybden förekommer huvudsakligen i sulfidform men bildar även andra föreningar (molybdat) med syre. Som ett spårelement finns molybden i pyrit, kopparkis, blyglans, zinkblände, volframit, scheelit, titanit och magnetit, samt i fältspat och biotit. Molybden anrikas i sura magmatiska bergarter, t.ex. i andesit, granit och pegmatit. Sekundär anrikning förekommer i vissa sedimentära bergarter, t.ex. i svartskiffer och i marina järn-mangannoduler. Molybden är mobilt vid alkalina förhållanden och lösligt i oxiderande miljöer. Vid alkalina förhållanden bildar molybden sekundära mineral och kan påträffas i finkorniga sediment. Molybden bildar lätt komplex med organiskt material (som vanligen också är sulfidrikt). Under sura förhållanden bryts molybdenmineral ned och kan koncentreras i finkorniga jordar och ler.

### **Na, natrium**

Natrium är ett av de vanligaste grundämnena i jordskorpan och det är en viktig komponent i många bergartsbildande mineral (fältspat, glimmer, amfibol). Natrium är också ett vanligt grundämne i evaporitavlagringar (t.ex. halit, mirabilit) och i leravlagringar. Natrium anrikas i sura, magmatiska bergarter, speciellt i alkalina bergarter (t.ex. syenit), och i sedimentära bergarter (som lerskiffer och sandsten). Den relativt låga mobiliteten hos natrium i morän och sediment beror på att det huvudsakliga värdmineralet albit är svårvittrat. Natrium som har lösts tenderar dock att hålla sig i lösning och kan adsorbera till lermineral med hög katjonbyteskapacitet.

### **Nb, niob**

Niob är ett sällsynt grundämne som vanligtvis förekommer i sura bergarter och i pegmatiter. Även alkalina bergarter kan innehålla höga niobhalter. Typiska mineral är pyroklor och columbit-tantalitserien. Små mängder av niob kan finnas i biotit, rutil, ilmenit, titanit, kassiterit och zirkon. Sekundära anrikningar förekommer i lerskiffer och i metamorf skiffer. Niob visar låg mobilitet och uppträder huvudsakligen i vittringsresistenta mineral. Den vanligaste källan till niob i morän är glimmer, där biotit utgör det mest lösliga Nb-mineralet. Niob tenderar att anrikas i finkorniga jordar och sediment som överlagrar granit och pegmatit, men adsorberas vanligen inte till lerpartiklar.

### **Ni, nickel**

Nickel är ett grundämne som bildar många sulfid- och arsenidmineral. Som ett spårelement finns det i bergartsbildande mineral som olivin, pyroxen, amfibol, glimmer och granat, och i många vanliga sulfider (t.ex. pyrit och kopparkis). Ultrabasiska bergarter uppvisar ofta hög anrikning av nickel. Sekundära Ni-halter förekommer i lateritiska och lerrika avlagringar som täcker ultrabasiska bergarter. Nickel är mobilt vid surt pH och oxiderande förhållanden, mobiliteten är begränsad av samutfällningen av Fe- och Mn-hydroxid samt adsorptionen till lermineral.

### **P, fosfor**

Fosfor bildar egna mineral, fosfater, varibland de huvudsakliga är apatit och monazit. Små mängder av fosfor finns i bergartsbildande mineral som olivin, pyroxen, amfibol, granat, glimmer och fältspat. Basiska och alkalina bergarter innehåller vanligen högre fosforhalter än sura bergarter. Bland sedimentära bergarter innehåller svartskiffer och fosforiter de högsta koncentrationerna. Extraherbarheten hos fosfor är hög i kungsvatten (ca 80 %). I naturen är fosfor lösligt vid neutralt pH (7), mobilt under lätt sura förhållanden, samt olösligt vid väldigt låga respektive väldigt höga pH-förhållanden. Fosfor adsorberas till lerpartiklar, Fe-oxider, Al-hydroxider och organiskt material.

### **Pb, bly**

Bly är ett starkt kalkofilt grundämne som oftast förekommer i sulfidform, t.ex. blyglans (PbS), men även som sulfat (anglesit) och karbonat (cerussit). I spårmängder uppträder det i bergartsbildande och accessoriska mineral som fältspat, glimmer, zirkon, magnetit och apatit. Bly är en viktig handelsvara och förekommer i polymetalliska sulfidmalmer, ofta med zink, koppar och silver. Bly binder lätt till organiskt material och därför kan lerskiffer och kol innehålla höga Pb-halter. Mobiliteten är låg på grund av den starka adsorptionen till lerpartiklar, Fe-Mn-hydroxider och organiskt material.

### **Rb, rubidium**

Rubidium är ett relativt vanligt förekommande grundämne som huvudsakligen substituerar kalium i bergartsbildande och accessoriska mineral samt i lermineral (t.ex. glimrar, K-fältspat, lepidolit, zinnwaldit, carnallit, pollucit, illit, montmorillonit). På grund av den stora jonradien och oxidations-tillståndet (+1) anrikas rubidium i sen-magmatiska bergarter, speciellt i utvecklade graniter och pegmatiter, i finkorniga sedimentära bergarter (t.ex. lerskiffer) och deras motsvarigheter (skiffer, paragnejs). Rubidium kan mobiliseras i hydrotermala miljöer, och höga koncentrationer påträffas ofta i närheten av hydrotermalt omvandlade magmatiska bergarter och i relation till porfyr-koppar-mineraliseringar. Rubidium har låg mobilitet i jord och sediment vilket är ett resultat av den höga adsorptionen till lerpartiklar.

### **Sb, antimon**

Antimon är ett starkt kalkofilt grundämne som sällan bildar egna mineral (t.ex. stibnit). Det förekommer vanligtvis som ett spårelement i sulfider (t.ex. blyglans, zinkblände och pyrit) men också i ilmenit och olivin (där antimon substituerar järn). Antimon används tillsammans med arsenik och vismut som indikatorelement för att finna guldmineraliseringar. Lerskiffer, slamsten och leriga bergarter kan innehålla höga antimonhalter. Antimon kan också anrikas i hydrotermalt omvandlade bergarter. Antimon är relativt lösligt och mobilt, speciellt under oxiderande förhållanden. Vid reducerande förhållanden minskar mobiliteten. Utfällning sker med Fe-hydroxider och organiskt material, och adsorptionsförmågan till lerpartiklar är hög.

### **Sc, skandium**

Skandium är en övergångsmetall som sällan bildar egna mineral (som thortveitit) och förekommer som ett spårelement i bergartsbildande mineral som amfibol, biotit, pyroxen, granat samt i accessoriska mineral som monazit. Basiska bergarter har vanligtvis högre skandiumhalter än sura bergarter. Alkalina bergarter (t.ex. karbonatit) kan också uppvisa högre skandiumhalter. Höga koncentrationer uppträder i finkorniga, sedimentära bergarter som lerskiffer och dess metamorfa motsvarighet skiffer. Hydrotermalt förändrade bergarter, skarn och relaterade mineraliseringar uppvisar ofta höga skandiumhalter. Sekundära anrikningar som har sitt ursprung i vittrade basiska bergarter hittas i laterit- och bauxit-avlagringar. Skandiums mobilitet i jord är låg, huvudsakligen på grund av den starka tendensen till att binda till lermineral och organiskt material.

### **Se, selen**

Selen bildar selenider, t.ex. claushtalit och crookesit, och förekommer i sulfider där det vanligen substituerar svavel (i pyrit, kopparkis och zinkblände). Selen är volatilt och vanligt i områden med vulkanisk aktivitet. Basiska bergarter och sulfidmineral utgör huvudsakliga källor till selen. Sedimentära bergarter rika på organiskt material (svartskiffer) och kol kan innehålla höga selenhalter. Mobiliteten hos selen är högre under oxiderande förhållanden men sjunker med sjunkande pH och är icke-mobilt i reducerande miljöer. Selenföreningar har en tendens att adsorberas till Fe-oxyhydroxider, lerpartiklar och organiskt material.

### **Sn, tenn**

Tenn bildar huvudsakligen mineralet kassiterit ( $\text{SnO}_2$ ), vilket uppträder i granit, pegmatit, skiffer, hydrotermala sprickfyllnader, metasomatiska bergarter (t.ex. greisen) och vaskavlagringar. Tenn finns som spårelement i många bergartsbildande och accessoriska mineral som glimmer, amfibol, titanit, ilmenit och magnetit. Höga tennkoncentrationer finns i sura magmatiska bergarter, metamorf skiffer, lerskiffer och kol. Tenn är relativt icke-mobilt och faller ut med Fe- och Al-hydroxider, samt adsorberar till lerpartiklar och bildar både lösliga och olösliga komplex med organiskt material. Mobiliteten är hög vid lågt pH.

### **Sr, strontium**

Strontium är ett relativt vanligt grundämne som substituerar kalcium, barium och kalium i bergartsbildande mineral som fältspat, plagioklas, gips, kalcit och dolomit. Strontium bildar egna mineral (strontianit och celestin) som förekommer i hydrotermalt omvandlade bergarter. Intermediära till basiska (speciellt alkalina) och hydrotermalt omvandlade bergarter tenderar att anrikas på strontium. Tillsammans med barium och magnesium utgör strontium ett vanligt grundämne i bergarter rika på kalciumkarbonat. Vid vittring är strontium mycket mobilt, särskilt under sura förhållanden, och adsorberar vanligtvis till lermineral och binds i organiskt material.

### **Ta, tantal**

Tantal är ett litofilt grundämne som huvudsakligen förekommer som oxid (tantalit). Tantal finns också som spårelement i bergartsbildande mineral (biotit, pyroxen, amfibol) och i accessoriska mineral som titanit, ilmenit, rutil och zirkon, där det ofta substituerar titan, yttrium och sällsynta jordartsmetaller. Tantal förekommer tillsammans med niob i granit, pegmatit och alkalina bergarter. Höga tantalhalter finns i greisen och i hydrotermala spricksystem som är rika på tenn. Tantalit och pyroklor är de huvudsakliga tantalmineralen i mineraliseringar. Mineral som innehåller tantal är ofta vittringsbeständiga och mobiliteten av grundämnet är relativt lågt. Sekundär anrikning av tantal återfinns i tungmineralavlagringar (vaskavlagringar) och i finkorniga sedimentära bergarter (lerskiffer). Vid vittring bildar tantal lösliga komplex med organiska föreningar.

### **Te, tellur**

Tellur är en halvmetall med egenskaper som liknar de hos selen och svavel. I naturen uppträder tellur i sin rena form eller som tellurider, telluriter och arsenosulfider. Tellur bildar mineral tillsammans med vismut, koppar och ädelmetaller som guld, silver och platina. Många vanliga sulfider innehåller spårmängder av tellur, t.ex. pyrit, kopparkis och pentlandit. Inom mineralprospektering används tellur för att hitta guldmineraliseringar. Basiska bergarter innehåller högre tellurhalter än sura bergarter och sekundära koncentrationer av tellur har observerats i kol och inom oxidationszoner nära malmfyndigheter. Tellur har låg mobilitet i supergena zoner och kan adsorberas till Fe- och Mn-oxyhydroxider samt organiskt material.

### **Th, torium**

Torium är ett inkompatibelt grundämne som koncentreras i sen-magmatiska bergarter (graniter och pegmatiter). Finkorniga sedimentära bergarter (lerskiffer) och deras metamorfa motsvarigheter (skiffer, paragnejs) kan innehålla höga toriumhalter. Medan torium kan bilda oxider (thorianit) och silikater (thorit) förekommer det oftare som ett spårelement (tillsammans med uran) i accessoriska mineral som monazit, allanit, epidot, titanit och zirkon. Kemiskt följer torium kalcium och kan finnas i höga koncentrationer i kalksten. Torium oxiderar vid vittring och kan anrikas i reducerande miljöer samt adsorberas lätt till lerpartiklar och i något mindre utsträckning till organiskt material.

## **Ti, titan**

Titan är ett vanligt grundämne som bildar ett flertal mineral (ilmenit, rutil, titanit) som alla är vittringsbeständiga. Titan substituerar magnesium och järn i bergartsbildande silikater som pyroxen, amfibol, granat och glimmer. Basiska och ultrabasiska bergarter innehåller vanligtvis höga titanhalter och anrikning i lerskiffer är vanlig. Lösligt titan kommer vanligen från vittrade Fe-Mg-silikater i basiska bergarter. Adsorptionsförmågan till lerpartiklar är hög och titan faller även ut med Fe-Mn-(hydro)oxider.

## **Tl, tallium**

Tallium förekommer vanligen i olika sulfider (blyglans, zinkblände, pyrit) och substituerar kalium i silikater (t.ex. fältspat, leucit, glimmer). De högsta talliumkoncentrationerna finns i granit, metamorf skiffer, lerskiffer och kol. Talliummineral uppträder i hydrotermala miljöer (t.ex. lorandit, crookesit). Tallium kan anrikas i pegmatiter och i polymetalliska (Zn-Pb) mineraliseringar, och metallen används ofta som ett indikatorelement inom guldprospektering. Tallium är lösligt och frigörs vid vittring. Den låga mobiliteten hos tallium beror på dess tendens att adsorberas till lerpartiklar och organiskt material, och dess utfällning med Fe-Mn-oxider och -hydroxider. Vissa växter kan ackumulera tallium istället för makronäringsämnet kalium.

## **U, uran**

Uran är ett radioaktivt grundämne som tillhör aktiniderna. Uraninit är det vanligaste uranmineralet, men uran förekommer oftast som ett spårelement i accessoriska mineral som apatit, zirkon och monazit. I vanliga magmatiska bergarter hittas de högsta uranhalterna i granit och pegmatit samt i sura vulkaniska bergarter. Även svartskiffer som är rik på organiskt material tenderar att ha höga uranhalter. De flesta mineral som innehåller uran är vittringsresistenta, och i de fall uran avges blir det mobilt och adsorberas till lermineral, organiskt material och järnoxider samt binder till fosfater. Under oxiderande, sura till alkalina förhållanden är uran lösligt, men mobiliteten minskar i reducerande miljöer.

## **V, vanadin**

Vanadin är ett vanligt grundämne som bildar egna mineral (vanadater) och förekommer i järnrika mineral (t.ex. magnetit) och i bergartsbildande mineral (pyroxen, amfibol, glimmer). De högsta vanadinhalterna uppträder i basiska till ultrabasiska bergarter men finkorniga sedimentära bergarter (skiffer), kol och bauxit kan också uppvisa högre koncentrationer. Vanadin är mobilt i oxiderande miljöer och mindre mobilt vid lågt pH, reducerande förhållanden och vid metamorfa processer. Vanadin adsorberas till Fe- och Mn-oxider och -hydroxider, lermineral och organiskt material.

## **W, wolfram**

Wolfram är ett ganska sällsynt grundämne som förekommer i magmatiska bergarter (granit, pegmatit), metasedimentära bergarter (t.ex. grafitiskiffer, fyllit) och finkorniga sedimentära bergarter (lerskiffer). Scheelit och wolframit utgör de ekonomiska källorna till wolfram och finns huvudsakligen i kvartsrika sprickzoner, pegmatiter och skarnmineraliseringar. De flesta wolframmineraliseringarna är ursprungligen av metasomatisk eller hydrotermal karaktär. Wolframmineral förekommer ofta i samband med kassiterit och fluorit. Små mängder wolfram finns i glimmer, magnetit och rutil. Wolfram används som indikatorelement inom prospektering för guld. De geokemiska egenskaperna hos wolfram liknar de hos molybden. Metallens löslighet är låg och wolframmineral är generellt olösliga vid sura pH-förhållanden. Frigjort wolfram är dock mobilt och adsorberas lätt till manganoxider och lerpartiklar. Höga wolframhalter i vissa svartskifferförekomster indikerar att det finns en tendens hos metallen att bindas till organiskt material.

## **Y, yttrium**

Yttrium är en övergångsmetall som traditionellt klassas som en av de sällsynta jordartsmetallerna, eftersom yttrium uppvisar många liknande kemiska egenskaper. Xenotim, monazit och gadolinit är vanliga mineral som innehåller yttrium. Som spårlement förekommer yttrium även i accessoriska mineral (zirkon, apatit, granat) och i bergartsbildande mineraler som bitot och pyroxen. Yttrium förekommer i senmagmatiska bergarter som granit och pegmatit, alkalina bergarter (syenit) och hydrotermalt omvandlade bergarter. Sekundära koncentrationer i sedimentära bergarter beror på förekomsten av tunga mineral (zirkon, monazit). Yttrium är relativt mobilt och har hög tendens att adsorberas till lermineral och Fe- och Mn-oxider och -hydroxider.

## **Zn, zink**

Zink är ett kalkofilt grundämne som bildar ekonomiskt viktiga malmer med malmmineralet zinkblände. Zinkblände uppträder vanligtvis tillsammans med blyglans och andra sulfider. Zink bildar också zinkkarbonater (t.ex. smithsonit) och zinkoxider (t.ex. zinkit, gahnit). Som spårlement förekommer zink i många mineral, t.ex. i magnetit, pyroxen, amfibol, biotit, granat och dolomit. Zink tenderar att ackumulera i basiska bergarter, metamorf skiffer och i lerskiffer. I sedimentära bergarter finns zink i lermineral (t.ex. kaolinit), karbonater och i vittrad magnetit. Fe-Mn-noduler kan också innehålla höga zinkhalter. Då zink frigörs via vittring faller det ut tillsammans med Fe-Mn-Al-oxhydroxider och adsorberas till lerpartiklar och organiskt material. Zink har hög löslighet och är mobilt under oxiderande och sura förhållanden. Mobiliteten minskar med reducerande (bildning av zinkblände) och alkalina (bildning av karbonater) miljöer.

## **Zr, zirkonium**

Zirkonium är ett typiskt spårlement som förekommer främst i form av mineralet zirkon i granitiska och alkalina bergarter. Zirkonium finns i bergartsbildande mineral som klinopyroxen, amfibol, granat och glimmer, samt substituerar för titan i ilmenit, titanit och rutil. Mängden zirkonium i sedimentära bergarter beror på tungmineralfraktionen vilken kan vara hög i vissa sandstenar (t.ex. gråvacka och arkos). Zirkonium har låg löslighet och mobilitet, och extraerbarheten i kungsvatten är mycket låg (ca 1 %). Zirkonium från vittrade mineral som biotit, pyroxen och amfibol kan adsorberas till lerpartiklar och i viss mån till organiskt material.







**Sveriges geologiska undersökning**

Box 670

751 28 Uppsala

Tel: 018-17 90 00

Fax: 018-17 93 70

[www.sgu.se](http://www.sgu.se)

Uppsala 2015  
ISSN 1652-8336  
ISBN 978-91-7403-307-6