

# Markgeokemi: morän- och sediment-geokemi på Öland och Gotland

Mikael Carlsson, Julio Gonzalez & Anna Ladenberger

oktober 2020

SGU-rapport 2020:28



Omslagsbild: Raukar i Langhammars raukområde på Fårö (stora bilden) och utsikt över Ölands norra udde (lilla bilden).

Fotografer: Magdalena Thorsbrink & Jonas Gierup

English title: Till and sediment geochemistry on Öland and Gotland

Författare: Mikael Carlsson, Julio Gonzalez & Anna Ladenberger

Ansvarig enhetschef: Ildikó Antal Lundin

Granskad av: Madelen Andersson, Stefan Bergman, Linda Wickström & Henrik Mikko

Redaktör: Lina Rönnåsen

Sveriges geologiska undersökning

Box 670, 751 28 Uppsala

tel: 018-17 90 00

e-post: [sgu@sgu.se](mailto:sgu@sgu.se)

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

## INNEHÅLL

Geokemisk kartering vid SGU.....	4
Användning av de markgeokemiska kartorna .....	5
Provtypen morän .....	6
Provtypen sediment.....	7
Metodik.....	7
Provtagning.....	7
Provberedning.....	8
Randomisering.....	8
Analys .....	8
Kvalitetskontroll.....	9
Databehandling.....	10
Percentilindelning.....	10
Kartor .....	10
Grundämnenas förekomst och rörlighet.....	13
Geologiska förutsättningar .....	13
Markprocesser .....	14
Lakbarhet och associationer.....	14
Grundämnen i näringskedjan .....	17
Miljögeokemi .....	18
Områdets geologi.....	19
Öland .....	19
Gotland .....	20
Industrimineral och täkter på Öland och Gotland .....	21
Kvartärgeologi.....	22
Öland .....	22
Gotland .....	22
Geokemi i områdena – Grundämnenas förekomst och associationer.....	24
Öland och Gotland .....	24
Summary .....	30
Referenser.....	32
Bilaga 1. Regionala markgeokemiska kartor .....	34
Förekomst av huvud- och spårelement samt pH i morän .....	34
Förekomst av huvud- och spårelement samt pH i sediment .....	63
Bilaga 2. Översiktlig elementbeskrivning .....	90
Bilaga 3. Generella riktvärden för förorenad mark .....	100

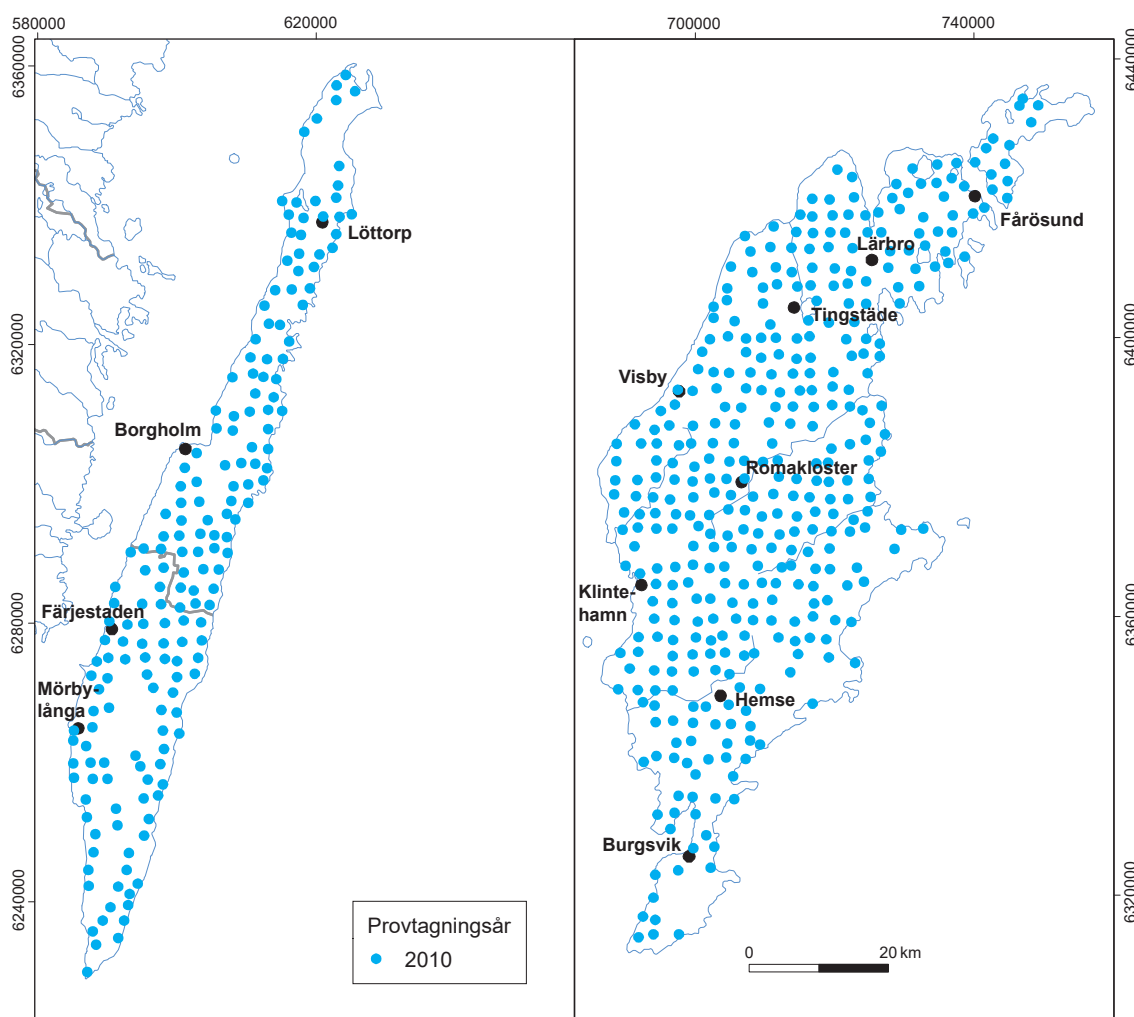
## GEOKEMISK KARTERING VID SGU

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.

Den aktuella kartläggningen berör Sveriges två största öar, Öland och Gotland. Området omfattar ca 4 450 km<sup>2</sup> och innefattar kommunerna Mörbylånga, Borgholm och Gotland.

Denna rapport 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, Carlsson m.fl. 2009).

Rapporten baseras på kemiska analyser av morän (552 lokaler) och sediment (126 lokaler) insamlade under provtagnings säsongen 2010 (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 grundämnena som uppfyller stipulerade krav på analyskvalitet redovisas.



**Figur 1.** Provtagningspunkter för morän (552 lokaler) på Öland och Gotland.

*Sampling sites of till (552 sites) on Öland and Gotland.*

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 analyserade på < 2 mm. För morän och sediment har kartor framställts av 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, pH, Pr, Rb, Sc, Se, Sm, Sn, Sr, Tb, Th, Ti, Tl, Tm, U, V, W, Y, Yb, Zn och Zr. För morän finns även kartor över Au, Sb, Ta och Te.

Rapporten har framställts av Mikael Carlsson med hjälp av Julio Gonzalez (berggrund) och Anna Ladenberger. Ansvarig för pH-mätningar har Birgitta Löwenhielm varit, för ICP-analyser Torsten Liljefors och Sten-Åke Ohlsson. För analyskvalitet svarar Anna Ladenberger och George Morris. Ett stort tack till Madelen Andersson som har granskat rapporten, till Stefan Bergman och Linda Wickström som granskat avsnitten med berggrunden 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 mönster för grundämnen över hela landet, baserade på morän, bäckvattenväxter och betesmark. 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 när man undersöker förorenad mark och bedömer vattenkvalitet. Med teman som malmletning, försurning, recipientskydd och förorenad mark kan kartorna och informationen anpassas till olika relevanta verksamhetsområden.

Kartorna, som visar den naturliga förekomsten av grundämnen i marken, ger information om halter av huvudkomponenter och spårämnen i miljön med avseende på det geologiska ursprunget. Antropogen påverkan bidrar ytterst sällan eller lite till de förekomster av metaller och andra grundämnen som uppmäts. I Sverige anses ett undantag från detta vara områden runt Falun, som förorenats av gruvdriften vid Falu koppargruva till den grad att C-horisonterna långt ifrån själva gruvan förorenats (Ek m.fl. 2001). Påverkan kan bara ses om föroreningen är kraftig 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 till smycken. Under hela den förindustriella epoken har keramik, glas, vapen, färgämnen och läkemedel tillverkats. Oavsiktlig och omfattande spridning av metaller har gjort att metaller som zink, tenn, bly, kobolt, kadmium, silver, arsenik och antimon 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 är antropogent tillfört svavel som på grund av sin höga mobilitet kan nå större markdjup.

Förekomst och spridningsmönster i moräners C-horisont bildar således 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 grundämneshalter 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 procent 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, utsmältningsmorän samt 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. Denna moräntyp kan vara ganska korttransporterad och ger då i regel en bra spegling av den lokala berggrunden.

Utsmältningsmorän 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 till exempel 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 till exempel ett isberg. Den kan i detta sammanhang (geokemiska tolkningsmöjligheter) sägas ha samma egenskaper som utsmältningsmorän. Såväl utsmältningsmoräner som flytmoräner täcker ibland basalt deponerade moräner.

En basalt deponerad morän har vanligtvis en jämn eller regelbundet strömlinjeformad överyta. Utsmältningsmoräner och flytmoräner bildar ett mer oregelbundet småkulligt landskap och kan innehålla olika strukturer med omväxlande grovt och finkornigt material. Om utsmältningsprocessen sker långsamt blir dock resultatet en ganska massiv utsmältningsmorän 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 modermaterialen som de moränbildande processerna. För mer ingående diskussioner rörande olika moräntyper, strukturer och texturer se till exempel Krüger (1979).

Transportlängden, som är en viktig parameter vid framför allt morängeokemisk malmprospektering, kan variera kraftigt för moräner. Här är det viktigt att skilja på transportlängder för olika kornstorleksfraktioner i moränerna. Allteftersom eroderade bergartsfragment nöts ner minskar 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, som till exempel skifferar, nöts snabbt ner. Därför kan finfraktioner påträffas ganska nära ursprunglig 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 kortare sträcka än 20 km. De flesta har transporterats betydligt kortare. I Sverige visar undersökningar baserade på morängeokemi och blockspridning liknande resultat, med en transportlängd av ca 2–3 km i de flesta områden (Sohlenius m.fl. 2009).

Trots att det ibland blir svårt att tolka komplexa bildningssätt för moräner och variationer i transportlängder, finns det få alternativ till denna provtyp om avsikten är att få en bild av berggrundens generella sammansättning. Morän ses som kompositprov av moderbergarterna.

## PROVTYPEN SEDIMENT

De typer av sediment som ibland provtas för markgeokemiska undersökningar är huvudsakligen väl sorterade leror och finsediment (silt). Glaciala sediment avsattes i samband med inlandsisens avsmältning medan postglaciala avsattes efter. Sedimentationsprocesser för de senare pågår också fortfarande i sjöar och rinnande vatten. Eftersom det är vatten som transporterat material som sedimenterat, är kopplingen till en specifik bergart svår att avgöra. Sedimentationsprocessen i sig kan medföra anrikning av tunga mineral och därmed omfördelning av element. Effekter av vittring, med omformning av lermineral, och den miljö sedimenten avsatts i är andra påverkansfaktorer. Den kemiska sammansättningen av leror och andra finkorniga sediment gör därför att elementhalternas ursprung är mer komplext än vad gäller för morän.

## METODIK

### Provtagning

För karteringsändamål insamlas moränproven med kriterierna att de ska vara representativa för regionen och om möjligt vara av normal typ (så kallad sandig morän). Provtagningen sker förutsättningslöst, vilket betyder att 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 med mera. 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 (fig. 2). 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 grundämneshalter påverkas av fler faktorer. Sedimentationsprocessen i sig kan till exempel medföra anrikning av mineral och därmed omfördelning av grundämnen.



**Figur 2.** Typisk provlokal i podsol. Provdjup ca 0,8 m. Foto: Mikael Carlsson.

*Typical sampling site in podzol. Sampling depth ca 0.8 m. Photo: Mikael Carlsson.*

## Provberedning

Proven vakuumtorkas och siktas på nylonsikt 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) nästan enbart 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 upptäcka eventuellt kalkinnehåll. Fraktionerna över 0,063 mm samt den mängd material < 0,063 mm som inte behövs för analyser arkiveras för eventuella framtida analyser.

## Randomisering

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

## Analys

552 moränprover och 126 sedimentprover analyserades för över 50 grundämnen (antal analyserade grundämnen varierar något mellan åren på grund av metodutveckling) och pH.



Analyserna görs av morän med kornstorlek < 0,063 mm och av sediment med kornstorlek < 2 mm med hjälp av tre 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.

Analysresultat efter lakning med 7M salpetersyra omfattar 52 grundämnen: 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 grundämnen: Ag, As, Au, Bi, Cd, Cu, Mo, Rh, Sb, Sn, Ta, Te och U varav Au, Ta, Te och Sb presenteras 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, det vill säga 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 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 grundämnen som presenteras i rapporten uppgår till 56. 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>).

## Kvalitetskontroll

Vid all hantering av analyser är det nödvändigt med en omfattande kvalitetskontroll. Mindre haltvariationer kan uppstå i princip i varje enskilt skede vid en geokemisk kartering. Genom att undersöka dubbelprov (replik) tagna i fält undersöks den så kallade totalvariansen. I denna ingår skillnader som uppkommer på grund av småskalig inhomogenitet i moräns sammansättning, som normalt är relativt liten (undantaget guld som uppvisar en så kallad kluster- eller nuggeteffekt), samt varianser uppkomna vid torkning, siktning, uppvägning, uppslutning och analys. Även analysvariansen undersöks med hjälp av internt standardprov. Det bör påpekas att enbart kännedom om analysvariansen inte är tillräckligt för att bedöma om resultaten kan användas 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 år från år i det fortlöpande analysarbetet finns även kontrollprov inlagda. I dagsläget utgör ca 10 procent av alla analyser någon form av kontrollprov (till exempel fältreplik, internt standardprov, internationella certifierade standardprov).

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 med nivåskillnader i analysresultaten för en del grundämnen. Orsaken är oftast utvecklingen av metodik och analysinstrument som över åren ger allt säkrare analyser. En visuell kontroll av resultaten i kartform (där nya resultat jämförs med äldre) bör därför ske grundämnesvis vid kartframställning. Med nivellering av analysvärden kan man skapa en homogen bild av grundämnenas distribution.

# DATABEHANDLING

## Percentilindelning

Statistisk indelning efter percentiler görs för att visa ett grundämnes halter i det undersökta området (tabell 1–2). I tabellen används 10:e, 30:e, 50:e, 70:e, 90:e, 95:e och 99:e percentilen, där 50:e percentilen utgör medianvärdet och 90:e percentilen innebär att 10 procent av antalet analyser för ett specifikt grundämne har halter som överstiger motsvarande analysvärde.

## Kartor

I rapporten redovisas ett antal grundämnen och pH i form av rasterkartor (bilaga 1). Kartskalan är 1:1 250 000. Kartorna 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 täcker även områden mellan provtagningsplatserna. Färgskalorna för markgeokemiska grundämneskartor är satta från grönt (låga halter för grundämnen, höga pH-värden) till rött (höga halter för grundämnen, 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 till exempel finns någon risk för negativ miljöpåverkan. Klassindelningen med percentiler på färgkartorna grundar sig på denna rapportens dataset. pH har fasta klassgränser.

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

*Calculated percentiles (p10–p99) for till (<0.063 mm) from Öland and Gotland. Analytical method: Extraction by nitric acid and aqua regia (Au, Sb, Ta and Te) analyzed by ICP-MS.*

n = 552	enhet	p10	p30	p50	p70	p90	p95	p99	max
Ag	mg/kg	0,031	0,043	0,055	0,070	0,097	0,115	0,190	0,871
Al	mg/kg	2 958	4 279	5 793	7 693	10 425	11 974	16 940	19 306
As	mg/kg	1,4	2,4	2,9	3,6	5,0	6,3	15,4	77,3
Au	µg/kg	0,26	0,46	0,66	0,90	1,38	1,78	3,49	10,10
B	mg/kg	1,5	2,0	2,6	3,2	4,5	5,6	8,2	12,2
Ba	mg/kg	17	28	42	58	97	133	219	667
Be	mg/kg	0,14	0,22	0,29	0,39	0,60	0,74	1,17	1,45
Bi	mg/kg	0,05	0,07	0,09	0,11	0,15	0,18	0,24	0,35
Ca	mg/kg	31 700	88 071	113 532	143 357	187 910	211 991	254 206	290 740
Cd	mg/kg	0,068	0,093	0,117	0,153	0,253	0,345	0,955	4,811
Ce	mg/kg	17	23	27	32	41	46	57	77
Co	mg/kg	2,0	3,1	4,1	5,3	7,0	8,4	11,3	19,6
Cr	mg/kg	5	7	10	13	17	20	27	66
Cu	mg/kg	3	5	7	9	12	14	30	68
Dy	mg/kg	1,3	1,6	1,8	2,1	2,9	3,6	5,1	8,7

**Tabell 1.** Fortsättning.

*Continuation.*

n = 552	enhet	p10	p30	p50	p70	p90	p95	p99	max
Er	mg/kg	0,7	0,8	0,9	1,1	1,5	1,8	2,6	4,7
Eu	mg/kg	0,36	0,45	0,52	0,60	0,81	0,92	1,42	2,10
Fe	mg/kg	6 485	8 498	10 815	13 708	18 894	21 922	29 354	46 343
Gd	mg/kg	2,1	2,6	2,9	3,4	4,6	5,4	7,6	11,1
Ge	mg/kg	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,10	0,16
Ho	mg/kg	0,25	0,30	0,34	0,39	0,53	0,66	0,96	1,72
K	mg/kg	464	650	867	1 164	1 649	1 977	2 514	5 370
La	mg/kg	8	11	12	15	19	22	27	41
Li	mg/kg	3,2	5,2	7,2	10,0	15,3	19,7	27,3	37,5
Lu	mg/kg	0,07	0,09	0,10	0,12	0,16	0,21	0,29	0,46
Mg	mg/kg	1 801	2 933	4 078	5 963	11 248	14 911	23 224	33 832
Mn	mg/kg	233	339	401	488	766	926	1 265	2 259
Mo	mg/kg	0,07	0,12	0,17	0,27	0,68	1,17	7,98	34,35
Na	mg/kg	52	65	75	86	105	118	180	463
Nb	mg/kg	0,04	0,07	0,11	0,17	0,34	0,46	1,00	1,92
Nd	mg/kg	9	12	14	16	21	24	32	43
Ni	mg/kg	8	10	12	14	18	21	40	113
P	mg/kg	177	257	321	449	758	1 030	2 057	4 306
Pb	mg/kg	5	8	10	13	19	22	34	52
Pr	mg/kg	2,2	2,9	3,4	4,0	5,1	5,8	7,8	8,9
Rb	mg/kg	5	7	9	12	17	21	28	65
Sb	µg/kg	64	86	110	141	267	325	670	5142
Sc	mg/kg	1,2	1,6	2,0	2,4	3,3	4,0	5,4	6,0
Se	mg/kg	0,12	0,16	0,19	0,22	0,32	0,36	0,52	0,86
Sm	mg/kg	1,9	2,5	2,9	3,4	4,5	5,1	7,1	9,8
Sn	mg/kg	0,02	0,04	0,06	0,08	0,13	0,17	0,32	1,67
Sr	mg/kg	28	72	101	125	168	190	244	335
Ta	µg/kg	1,5	1,9	2,4	3,0	4,6	5,5	8,0	12,0
Tb	mg/kg	0,27	0,33	0,37	0,43	0,58	0,69	1,00	1,54
Te	µg/kg	18	24	29	37	59	73	97	164
Th	mg/kg	2,5	3,3	4,0	4,9	6,6	7,6	10,3	15,0
Ti	mg/kg	29	71	114	163	267	331	526	1321
Tl	mg/kg	0,06	0,09	0,12	0,15	0,21	0,25	0,43	3,85
Tm	mg/kg	0,08	0,10	0,11	0,13	0,18	0,22	0,33	0,57
U	mg/kg	0,4	0,5	0,6	0,8	1,1	1,4	2,6	11,2
V	mg/kg	6	8	10	13	20	24	52	152
W	mg/kg	0,012	0,017	0,022	0,028	0,043	0,060	0,088	0,192
Y	mg/kg	7	9	10	11	14	18	25	41
Yb	mg/kg	0,49	0,63	0,72	0,83	1,13	1,41	2,00	3,34
Zn	mg/kg	17	23	29	37	59	81	136	259
Zr	mg/kg	3,6	5,0	7,0	9,5	14,0	15,8	20,6	28,5
Zr	mg/kg	9	12	13	16	21	23	29	43
pH		5,7	6,0	6,5	7,0	7,5	8,0	8,5	8,9

**Tabell 2.** Beräknade percentiler (p10–p99) för sediment (< 2 mm) från Öland och Gotland. Analysmetod: Lakning med salpetersyra och analys med ICP-MS.

*Calculated percentiles (p10–p99) for sediments (<2 mm) from Öland and Gotland. Analytical method: Extraction by nitric acid analyzed by ICP-MS.*

n = 126	enhet	p10	p30	p50	p70	p90	p95	p99	max
Ag	mg/kg	0,002	0,006	0,010	0,018	0,057	0,077	0,098	0,133
Al	mg/kg	457	992	1410	1877	6 854	9 517	12 368	13 806
As	mg/kg	0,1	0,2	0,5	1,0	2,5	2,7	4,3	4,7
B	mg/kg	0,2	0,4	0,6	1,0	2,9	4,1	5,3	6,7
Ba	mg/kg	2	4	7	14	42	72	124	292
Be	mg/kg	0,03	0,06	0,08	0,11	0,34	0,55	0,64	0,69
Bi	mg/kg	0,006	0,009	0,016	0,026	0,109	0,171	0,208	0,222
Ca	mg/kg	293	792	2 866	44 948	91 595	123 532	175 282	255 369
Cd	mg/kg	0,010	0,019	0,034	0,055	0,099	0,170	0,280	0,323
Ce	mg/kg	4	8	11	15	23	33	44	52
Co	mg/kg	0,3	0,5	0,8	1,3	5,3	8,0	11,1	11,8
Cr	mg/kg	0,2	0,8	1,5	2,9	10,9	17,3	23,0	27
Cu	mg/kg	0,3	0,6	1,1	2,2	8,0	9,9	11,3	24,3
Dy	mg/kg	0,3	0,4	0,7	0,9	1,6	1,9	2,4	4,5
Er	mg/kg	0,1	0,2	0,3	0,4	0,8	0,9	1,2	2,4
Eu	mg/kg	0,07	0,12	0,18	0,24	0,48	0,63	0,77	1,24
Fe	mg/kg	662	1383	2 295	3 251	12 540	20 873	24 173	24 944
Gd	mg/kg	0,4	0,8	1,2	1,5	2,7	3,6	4,1	7,0
Ge	mg/kg	0,010	0,016	0,021	0,028	0,046	0,061	0,074	0,112
Ho	mg/kg	0,05	0,08	0,13	0,16	0,28	0,32	0,43	0,86
K	mg/kg	58	99	171	295	1 048	1 529	2 833	3 063
La	mg/kg	2	4	5	7	11	15	20	26
Li	mg/kg	0,7	1,3	1,8	2,6	10,2	16,9	36,9	39,7
Lu	mg/kg	0,01	0,02	0,04	0,05	0,08	0,10	0,13	0,26
Mg	mg/kg	187	413	812	1 491	4 549	6 877	7 971	9 452
Mn	mg/kg	11	22	56	133	364	446	630	730
Mo	mg/kg	0,02	0,03	0,06	0,11	0,23	0,51	1,18	3,11
Na	mg/kg	20	30	43	54	93	118	220	2 050
Nb	mg/kg	0,04	0,07	0,09	0,12	0,18	0,24	0,52	0,57
Nd	mg/kg	2	4	5	7	12	15	20	35
Ni	mg/kg	0,5	1,1	2,5	4,5	13,2	17,3	21,0	26,7
P	mg/kg	66	115	155	220	339	424	737	996
Pb	mg/kg	0,6	1,0	1,8	2,9	9,2	12,4	17,3	18,0
Pr	mg/kg	0,6	1,0	1,4	1,8	3,0	3,8	5,2	7,3
Rb	mg/kg	0,9	1,3	1,9	2,8	10,2	17,1	25,1	26
Sc	mg/kg	0,1	0,3	0,5	0,8	2,1	2,9	3,5	4,1
Se	mg/kg	0,04	0,06	0,08	0,10	0,16	0,19	0,75	0,90
Sm	mg/kg	0,4	0,7	1,1	1,5	2,7	3,6	4,0	6,7
Sn	mg/kg	0,004	0,021	0,034	0,048	0,066	0,075	0,108	0,282
Sr	mg/kg	1	2	8	43	91	102	126	150
Tb	mg/kg	0,05	0,09	0,14	0,19	0,33	0,42	0,49	0,88
Th	mg/kg	0,7	1,1	1,6	2,3	4,2	6,2	7,4	9,0
Ti	mg/kg	24	52	83	105	153	191	295	302

**Tabell 2.** Fortsättning.*Continuation.*

n = 126	enhet	p10	p30	p50	p70	p90	p95	p99	max
Tl	mg/kg	0,007	0,014	0,023	0,034	0,099	0,154	0,192	0,223
Tm	mg/kg	0,02	0,03	0,04	0,05	0,09	0,11	0,14	0,28
U	mg/kg	0,1	0,2	0,3	0,4	0,8	1,1	1,6	2,2
V	mg/kg	1	2	3	4	10	17	25	26
W	mg/kg	0,010	0,013	0,016	0,019	0,024	0,030	0,038	0,041
Y	mg/kg	1	2	3	4	7	9	13	22
Yb	mg/kg	0,10	0,16	0,25	0,34	0,57	0,69	0,93	1,79
Zn	mg/kg	3	7	9	14	33	40	58	61
Zr	mg/kg	0,2	0,6	1,0	1,9	7,8	10,7	13,0	14,5
pH		5,7	6,0	6,5	7,0	7,5	8,0	8,5	9,0

## GRUNDÄMNE NAS FÖREKOMST OCH RÖRLIGHET

### Geologiska förutsättningar

Berggrundens kemiska sammansättning varierar beroende på de ingående bergarternas sammansättning och proportioner. Halterna av många metaller är till exempel jämförelsevis låga i de intrusiva kiselrika och felsiska (med övervägande ljusfärgade mineral) bergarter som dominerar den svenska berggrunden. I mafiska (med övervägande mörkfärgade mineral) och kiselfattiga magmatiska bergarter finns däremot högre innehåll av bland annat järn, magnesium, kobolt, koppar, krom och nickel. Om det finns skifferinslag blir halterna ofta betydligt högre eller mycket höga för en del spårämnen, till exempel uran. I tabell 3 visas huvudsaklig bergartstillhörighet för olika grundämnen i vanligt förekommande bergarter i Sverige.

I tabell 4 visas medelhalterna för grundämnen i olika vanligt förekommande bergarter i Finland (Koljonen 1992, Tauber 1988), där bergarterna är relativt lika jämfört med Sveriges bergarter.

Moräners innehåll av olika mineral beror till största delen på berggrundens varierande ursprungliga mineralogiska och 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. Betraktar 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 finns mycket lite organiskt material, 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 procent (medianvärde 0,11 procent).

Bergarter med olika mineralinnehåll avslöjar sig ofta i form av distinkta geokemiska grundämnesmönster i moränen. Genom att studera geokemiska mönster kan man få en uppfattning om mineralinnehållet. Exempelvis, indikeras mafiska bergarter av förhöjda halter av till exempel kalcium, järn, magnesium, kobolt, koppar, krom, nickel, vanadin med flera i moränen. Granitiskt och pegmatiskt bergartsmaterial ger sig till känna som förhöjda halter av bland annat kalium, bly, uran, tenn, volfram, molybden och sällsynta jordartsmetaller.

Mönstren för grundämnena 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 till exempel ett

**Tabell 3.** Bergarter 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

granitiskt berggrundsområde har en ovanliggande morän med inslag av mafiska intrusiva bergarter. Moränen har då högre halter av till exempel 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 mönstren för olika grundämnen beror också på den isrörelseriktning som indikeras av isräfflor och kan också vid mer noggranna studier användas bland annat som indikation på transportlängd av bergartsmaterial. Ytterligare faktorer som kan påverka de geokemiska mönstren är tunna jordtäcken, deposition av svavel och andra luftburna havsaerosoler och förorening samt hög nederbörd (Andersson 2006).

## Markprocesser

Vertikalt i marken varierar den kemiska sammansättningen bland annat på grund av jordmånsbildande markprocesser. Vilken typ av jordmån (markprofil) som bildas beror på ett flertal faktorer, till exempel 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 huvudämnena och metaller. Några av dessa, till exempel 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 vitt-ring 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 till exempel vissa sulfidmineral som är instabila ovan grundvattenytan. Metaller som frigjorts när dessa mineral vittrat har i stället fastlagts i andra former, exempelvis genom jonbytesprocesser (till exempel  $\text{Cu}^{2+}$  för  $\text{K}^+$  i biotit).

## Lakbarhet och associationer

Ett mått på grundämnens rörlighet är deras lakbarhet, som varierar kraftigt beroende på vilka mineral de sitter bundna i. Hög lakbarhet för ett grundämne anger att en procentuell stor del av den totala tillgången på grundämnet blir lösligt vid en tillsats av syra, exempelvis salpetersyra eller kungsvatten. Detta anger grundämnets tillgänglighet på sikt för växterna och för markens neutralisationsförmåga. En låg lakbarhet anger däremot att grundämnet är hårt bundet i markmineralen och svåråtkomligt. En beräkning av lakbarheten har tidigare

**Tabell 4.** Medelhalter av grundämnen (mg/kg) i olika vanligt förekommande bergarter i Fennoskandia.*Average concentrations (mg/kg) of elements in common rock types occurring in Fennoscandia.*

Element	Ultramafiska bergarter <sup>1</sup>	Gabbro, basalt <sup>1</sup>	Skiffrar <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	1 200	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	1 200	1 500	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	1 100	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 (i gram) av olika grundämnen i 1 kg svensk morän (C-horisont, fraktion <0,063 mm). Data från SGUs markgeokemiska databas.

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

Grundämne	gram/kg	Grundämne	gram/kg
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		
Nickel	0,016	Summa	1000

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 grundämnen varierar från någon procent för natrium till närmare 90 procent för fosfor och koppar.

Olika markmineral har i naturen olika benägenhet att vittra sönder, och det är genom vittring som grundämnen 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, som till exempel kalcit.

Ett och samma grundämne kan uppträda i flera olika mineral och vara olika hårt bundet. Ett sådant grundämne 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, till exempel hornblände. Variationer av lakbarheten för grundämnen i morän ger indirekt en uppfattning om provens mineralogiska sammansättning.

Tillgången av grundämnen beror alltså på mineralinnehållet i moränen och miljön som moränen befinner sig i definierad av pH och oxiderande eller reducerande miljö. Förhållandet mellan



**Tabell 6.** Lakbarhet (medianvärden) för några element. N = antal prov av morän (C-horisont, fraktion <0,063 mm), lakbarhet i procent = (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 from SGU's 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			

olika grundämnen kan också avslöja något om mineralinnehållet i marken. Som exempel kan nämnas grundämnena 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 stelmande magman. I senare skeden bildas plagioklaser, och förhållandet mellan grundämnena ändras så att andelen kalcium minskar medan strontium ökar. Genom att studera mönstret för kvoten mellan dessa grundämnen (främst bör totalhalter av grundämnena 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 2 (lista över alla grundämnen) ges en översiktlig beskrivning av grundämnenas naturliga uppträdande.

## GRUNDÄMNEN I NÄRINGSKEDJAN

De grundämnen som cirkulerar i miljön härstammar till stor del från marken. Markbundna mineral vittrar och frigör grundämnen 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. Detta beror till stor del på att den kost som människor konsumerar ofta härstammar från många olika håll. Då blir den lokala markens påverkan inte så stark. Det bör betonas att när det gäller sambanden med hälsoeffekter är dessa komplexa och ibland svårutredda. Några samband som trots allt har påpekats eller antagits i Sverige är bland annat mellan markradon och lungcancer, selenbrist och hjärtsjukdomar och kadmium i dricksvatten och barn-diabetes. Hårt dricksvatten (vatten med höga halter av kalcium och magnesium) anses däremot ha en positiv effekt genom ett samband med lägre frekvens uppkomna hjärt- och kärlsjukdomar.

Dylika samband har konstaterats vara relativt vanliga internationellt (Karppanen 2002, Selinus m.fl. 2005). Under senare tid har även förekomst av uran i dricksvatten identifierats som en riskfaktor (Kurttio m.fl. 2002, Rosborg 2014). Källan till detta uran är berg- och jordartsrelaterad.

De naturliga ekosystem som omger oss är i högre grad än människan starkt beroende av den lokala marken och dess innehåll av grundämnen. Oftast har ekosystemen anpassat sig till de förhållanden som råder, men snabba miljöförändringar kan innebära stora påfrestningar. Exempelvis om belastningar såsom kraftig förorening av metaller eller sura regn påverkar näringskedjan.

Av de karterade grundämnena har följande dokumenterat skadliga effekter på levande organismer, om grundämnet 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 grundämnen klassas som höga i den här rapporten, innebär detta inte automatiskt att det finns någon risk för negativ miljöpåverkan. Dels kan grundämnena vara relativt hårt bundna till mineral, dels kan förekomst av grundämne med antagonistisk effekt (till exempel kadmium–selen) påverka eventuella risker. För konkreta riskbedömningar krävs betydligt mer detaljerade undersökningar än i denna rapport.

## MILJÖGEOKEMI

Naturvårdsverket har fastslagit generella riktvärden för förorenad mark för att man ska kunna bedöma risker på miljön. Varje analyserad parameter (metaller, metalloider, organiska miljögifter) har två riktvärden, en för riskbedömning avseende mindre känslig markanvändning (MKM) och det andra, skarpare, avser känslig markanvändning (KM).

Riktvärdena baseras på analys av jord med en fraktion < 2 mm där metaller och metalloider är analyserade med salpetersyra eller kungsvatten (Naturvårdsverket 2009). Här är några exempel på KM-riktvärden: antimon 12 mg/kg, arsenik 10 mg/kg, barium 200 mg/kg, bly 50 mg/kg, kadmium 0,8 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 2016), se även bilaga 3. 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. Tidigare undersökta analyser av fraktionen < 0,063 mm och < 2 mm från samma moränprov gav som resultat att en metallhalt i moränfraktionen < 0,063 mm kan multipliceras med faktor 0,7 för att beräkna en teoretisk metallhalt för fraktionen < 2 mm vilken direkt kan jämföras med KM-värdet. Som exempel blir en arsenikhalt på 47 mg/kg i moränfraktion < 0,063 mm för ett SGU-prov omräknat till fraktion < 2 mm 33 mg/kg ( $47 \times 0,7$ ).

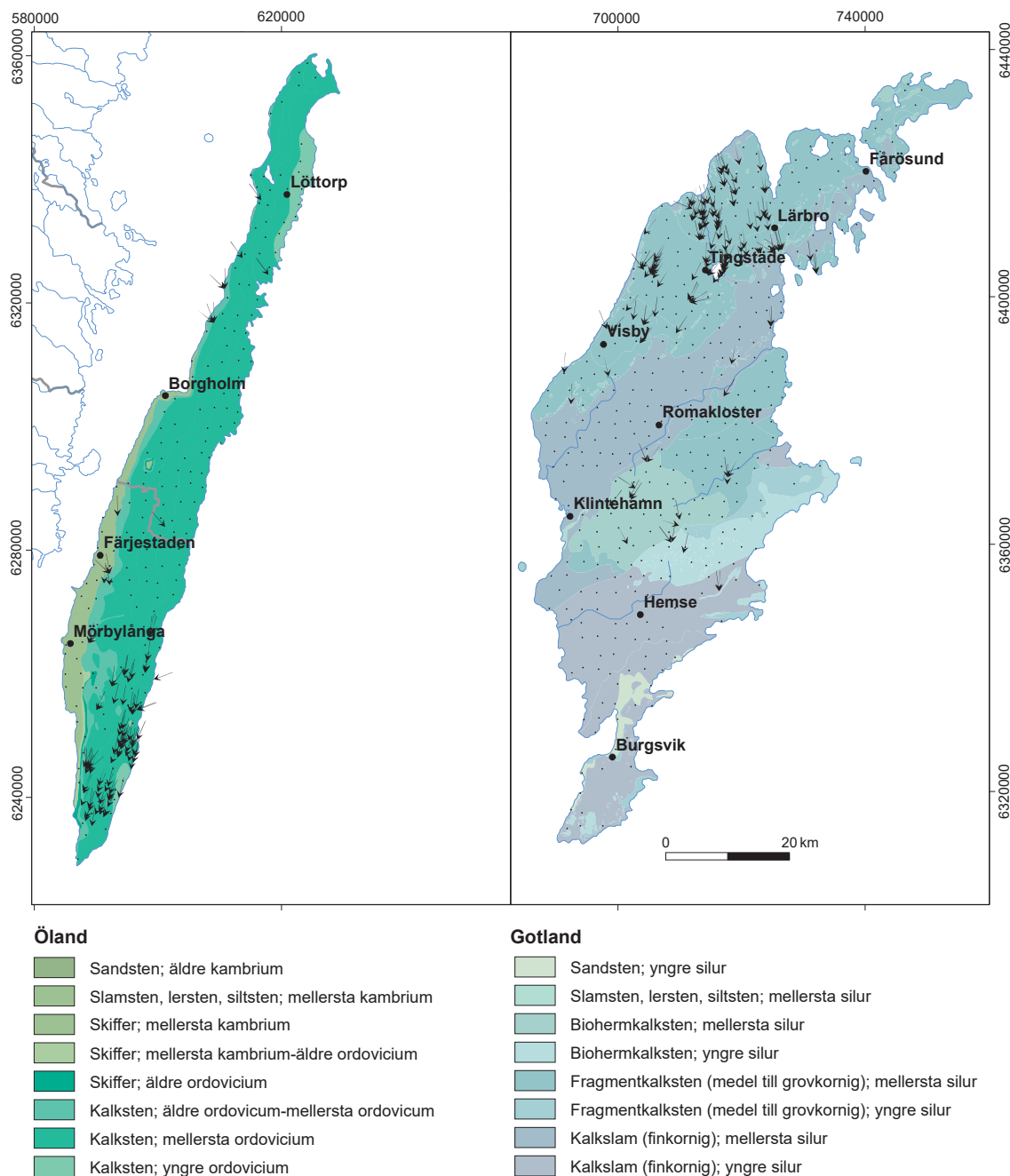
Erfarenhetsmässigt vet man också att om en moränlokal har kraftigt förhöjd metallhalt är sannolikheten mycket stor att finna ännu högre metallhalter i närområdet. Det är därför fullt möjligt att använda KM-värden på de markgeokemiska kartorna som jämförandevärden när man ska bedöma ett områdes metallbelastning. I stort innebär en analyserad moränfraktion < 0,063 mm inget stort problem för jämförelse med KM-värden, eftersom ett erhållet analysvärde som ligger nära eller över KM-värdet visar att moränen i området är en riskfaktor. Ingen bedömning av eventuella miljö- eller hälsoeffekter kan göras utan detaljerade undersökningar.

I moränområden med lågt pH är inslaget av lättlösliga kalciummineral mindre frekvent eller saknas och svavelhalterna kan vara höga. Det är välkänt att en del metaller har lätt för att frigöras vid sjunkande pH, liksom att andra grundämnen fastläggs. Kadmium, kobolt, mangan, nickel, tallium och zink är exempel på metaller som är lättrörliga 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 grundämnena kan ha börjat lösas ut och att de nått grundvattnet. Det kan ha till följd att dricksvattenkvaliteten i enskilda brunnar påverkas.

# OMRÅDETS GEOLOGI

## Öland

Den öländska berggrunden (fig. 3) består av sandsten, skiffer och kalksten som avsattes under kambrium och ordovicium (541–450 Ma). De är avsatta direkt på det vittrade kristallina urberget och lutar svagt mot sydost vilket innebär att de successivt blir yngre i den riktningen. Lagerföljden är som tjockast i den sydöstra delen (200 meter) och blir gradvis tunnare mot väster (Wik m.fl. 2005).



**Figur 3.** Berggrundskarta över Öland och Gotland med isrörelseriktning (Berggrund 1:50 000–1:250 000).  
*Bedrock map of Öland and Gotland with ice movement directions (Bedrock 1:50 000–1:250 000).*

Den äldre kambriska berggrunden utgörs till största delen av sandsten som växellagras med leriga lager som ibland är mycket rika på glaukonit. Glaukoniten är ett glimmermineral som är rikt på kalium, järn, magnesium och aluminium och ger lagren en grön färg. Den översta delen av sandstenen innehåller ett ca 20 cm tjockt fosforitlager. Sandstenssekvensen är mellan 78 och 109 m tjock. Lagerföljden ovanpå sandstenen utgörs av bergarter avsatta under kambriumserie 3 (tidigare även mellankambrium) och domineras av en 40 m tjock lerskiffer som övergår i växellagrad lerskiffer och siltiga kalkstenslager. Överst i denna sekvens finns ett fosforitförande konglomerat, det så kallade exporrecta-konglomeratet. Hela den kambriska lagerföljden representerar stigande havsnivåer under denna del av jordens historia. Kambriumserie 3 har en lagerföljd vars tjocklek varierar mellan 3,7 och 63 m.

Överst i den kambriska lagerföljden och den undre delen av ordovicium finns den så kallade Alunskifferformationen, en svart bituminös skiffer med mycket hög halt av organiskt material. I framför allt den övre delen av Alunskifferformationen finns det bankar med kalkstenslinser, så kallade orstenar. Alunskifferformationen är som tjockast på södra Öland och blir tunnare mot norr. Oljehalten i alunskiffern är tämligen låg (ca 2,5 procent), medan halten av vanadin är ganska hög, (0,18–0,26 procent), även om den ibland speciellt i den överkambriska delen av lagerföljden, är ganska låg (0,06 procent). Uranhalten varierar mellan 40 och 70 ppm.

Under ordovicium fortsatte havsnivåerna att stiga och kalksten började avsättas i ett grunt epikontinentalt hav. Kalkstenen på Öland är röd eller grå. Den består av bankar som är olika tjocka och mellanlagras av tunna lager med lera. Kalkstenen är rik på större fossil, till exempel bläckfiskar, trilobiter och kristalläpplen. Den öländska kalkstenen har en hög lerhalt och innehåller inte några revbildande organismer, vilket innebär att den får andra egenskaper och användningsområden än kalkstenen på Gotland. Tjockleken ökar gradvis i östlig riktning och varierar i de östligaste delarna av ön till mellan 20 och 40 m. Den undre delen av kalkstenssekvensen utgörs på vissa platser av mörka gröna leror och skifferar, och de allra understa delarna av kalkstenen är ibland glaukonitförande och varierar i färg och textur. Glaukonithalten är som störst i de nedersta delarna och i vissa lager påträffas järnooider. I den ordoviciska kalkstenen finns två särpräglade ledhorisonter som stenhuggarna har kallat ”blommiga bladet” och ”blodläget”. Blommiga bladet är flera närliggande erosionsytor som går att spåra över hela Baltica. Dessa skapades under en period med lägre havsnivåer och då havsbotten periodvis var ovanför havsytan. Under dessa perioder grävde olika organismer gropar som sedan fylldes med sediment och mineraliserades under diagenesen. Mineral som götit, hematit och glaukonit färgar dem gula, gröna, röda och till och med lila, vilket skapar ett färgsprakande band som är lätt att känna igen. Vissa skikt innehåller ytor beströdda med blodröda, hematitrika ”vårter” som anses vara rester av små stromatoliter. Stenhuggarna kallade denna horisont ”blodläget”.

## Gotland

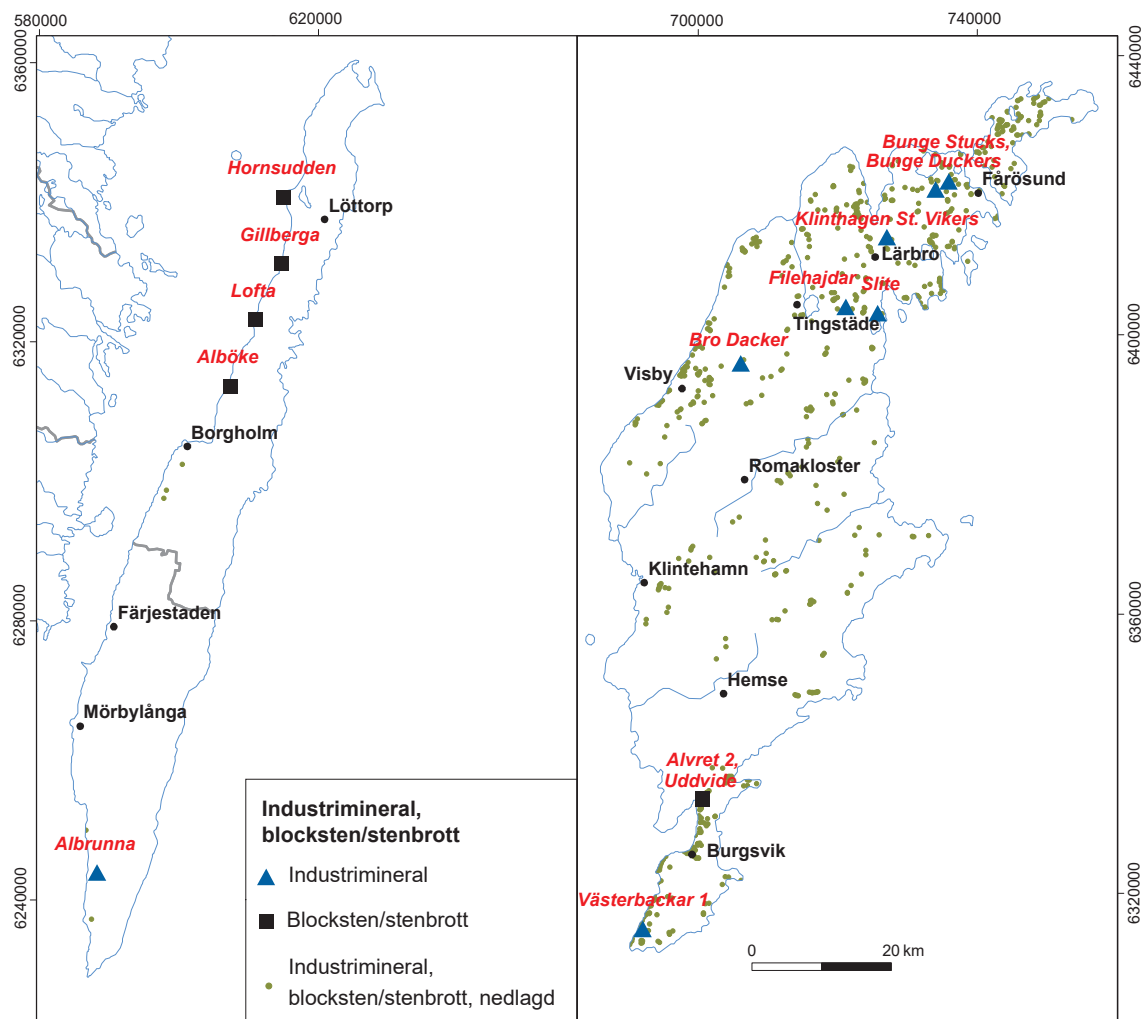
Berggrunden vid markytan på Gotland består av sedimentära bergarter från silur (yngre llandovery till pridoli) och bildades under ett tidsintervall på ca 10 miljoner år. Berggrunden har varit i fokus för geologiska undersökningar under lång tid, vilket innebär att Gotland har blivit ett viktigt studieområde för att förstå jordens utveckling under silur. Det är också det område i världen där en stor del av den siluriska lagerföljden finns bevarad och är lättillgänglig. Avsättningsmiljön har jämförts med områden idag där det är vanligt med stora korallrev, till exempel Stora Barriärrevet (Erlström m.fl. 2009).

Liksom på Öland lutar berggrundsytan svagt (0,2 grader) åt sydost, vilket innebär att berggrunden är äldst på norra delen av ön och yngst i söder. Hela den paleozoiska lagerföljden är ca 750 m mäktig och är avsatt på kaolinvittrad kristallin prekambrisk berggrund. Djupet till den kristallina berggrunden är ca 300 m i norr och nästan 800 m i söder. Genom de många borrhål som finns

från bland annat prospekteringen efter olja och gas finns det en relativt bra förståelse för hur berggrunden ser ut på djupet och hur mäktig lagerföljden är. Den dominerande bergarten på Gotland är kalksten som antingen består av revbyggande organismer och är relativt motståndskraftig mot vittring, eller så är den växellagrad med mörgel och är då känslig för erosion. Sandsten finns främst på södra Gotland (Burgsvikssandsten) samt i ett smalt stråk utmed kusten från Närsholmen till Hammaren på sydöstra Gotland (Ekeformationen). Det finns också en skillnad i avsättningsmiljö från väst till öst, där berggrunden på västra Gotland är avsatt på något djupare vatten än i öster. Berggrunden är indelad i olika litostratigrafiska enheter, men även topostratigrafiska enheter förekommer. För en översikt och sammanfattning av dessa se till exempel Erlström m.fl. 2009.

## Industrimineral och täkter på Öland och Gotland

Det finns flera täkter för industrimineral, blocksten samt stenbrott på Öland och Gotland (fig. 4). Det man bryter är kalksten för olika ändamål och kvalitet. Det har även gjorts försök att utvinna olja på Gotland på 1980- och 1990-talet, främst på norra Gotland.



**Figur 4.** Översiktskarta med förekomster av industrimineral och stenbrott (kalksten, sandsten) på Öland och Gotland (SGU databas, modifierad).

Overview map with quarries on Öland and Gotland (SGU database, modified).

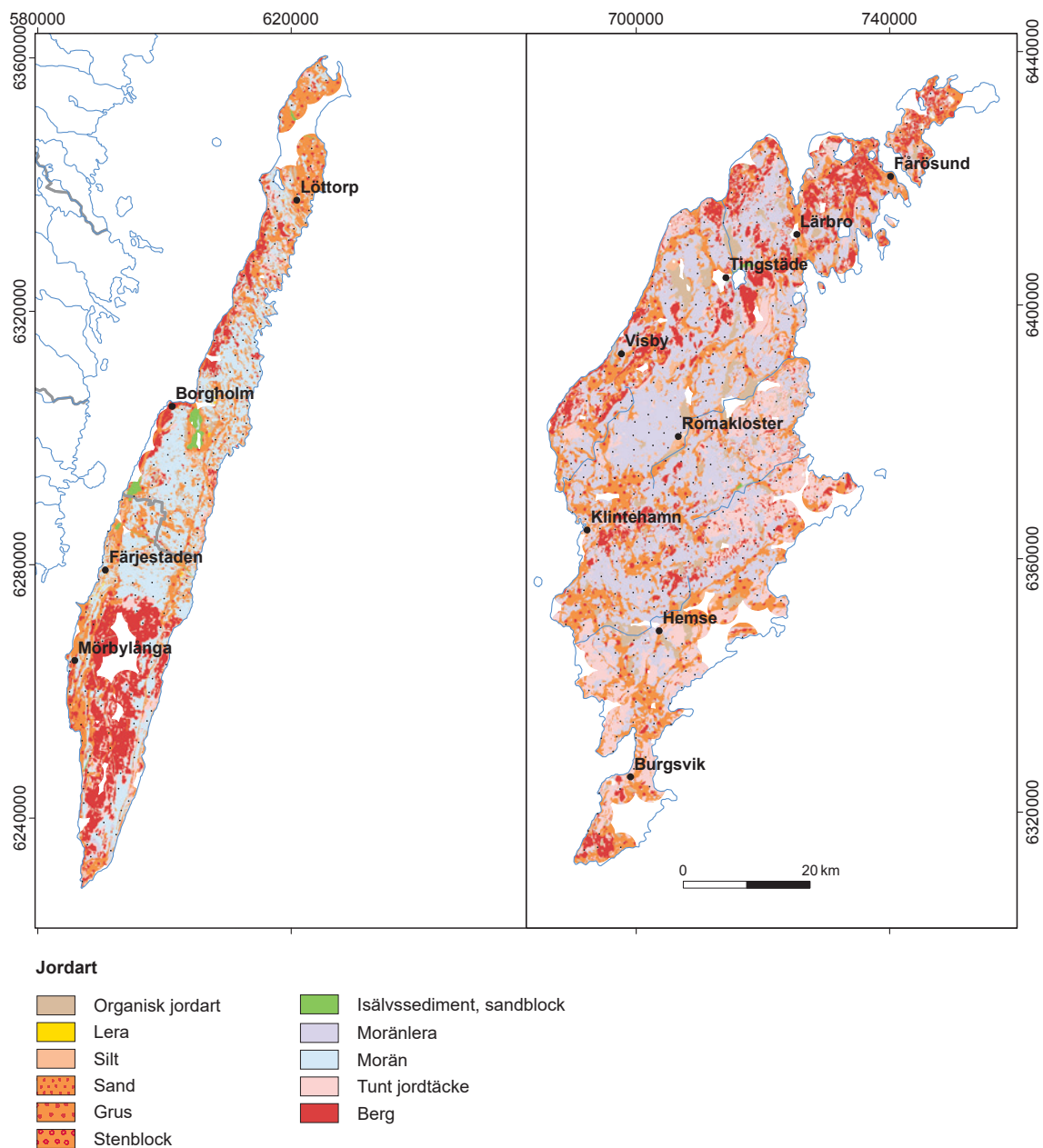
## KVARTÄRGEOLOGI

### Öland

Tunna vittringsjordar och morän är de vanligaste jordarna på Öland (fig. 5), på Stora Alvaret är dock jordtäcket mycket tunt eller så saknas det helt. På Öland återspeglas bergytans former i ytformen hos moränen. Morän kallas lokalt för ”jetter” eller ”lerjetter”. Moränen är mer sandig på den norra delen och mer lerig på den södra delen av ön. Urbergsinnehåll förekommer också, och på sina ställen även svartskiffer. Det finns enstaka ändmoräner på Öland samt en del drumliner, särskilt längs nordöstra kusten. Andra moränformer är oregelbundna kullar och ryggar. Korta små så kallade De Geer-moräner finns, exempelvis i området kring Borgholm. Hela Öland har legat under havet vilket gör att moränen är svallad. Det finns välutvecklade ryggar som inte är direkta moränryggar utan har fått sin grundläggande form från formen på den underliggande bergytan och då de har blivit omarbetade av vågor så är det i ordets bemärkelse inte riktiga moränryggar. Strandvallar förekommer på södra Öland upp till nivå med Borgholm. De härrör från Ancylussjön och Littorinahavet, och är de bäst bevarade kvartära lämningarna på Öland. De bildar en morfologisk väl synlig enhet, särskilt på den sydöstra delen av ön. Strandvallarna från Ancylussjön är från ca 8 000–9 000 år sedan och strandvallarna från Littorinahavet är från ca 5 000–7 000 år sedan. Svallat material täcker mer än 20 procent av ytan, med en mäktighet av ca 1–3 m. Det finns tre större sandfält med en relativt jämn yta. Strandskogsfältet (lite söder om Borgholm ner mot Färjestaden), Rällafältet (vid Borgholm) och Lindbyfältet (sydväst om Borgholm). En smal men ganska lång rullstensås, Övertorpsåsen, finns strax norr om södra Möckleby, en större isälvsavlagring strax sydöst om Borgholm samt en som sträcker sig från Böda mot Byxelkrok. Flygsand är vanligt på den norra delen av ön, företrädesvis i området norr om Böda. En stor förekomst finns vid Inges, ca 6–8 m hög och ca 700 m lång (Rudmark 1983). Flygsanden rör inte på sig lika mycket nu som tidigare på grund av att man har planterat växter som ska förhindra driften. Raukar finns exempelvis vid Byarum i nordväst, även om de förknippas mest med Gotland. Normalt är det sparsamt med isräfflor på ön men på ön Blå Jungfrun finns det många med riktning från norr och nordväst. Iskanten under den senaste istiden, Weichsel, stod vid Ölands södra udde för cirka 14 400 år sedan och det tog ungefär 300 år för isfronten att hamna norr om Öland.

### Gotland

Den vanligaste jordarten på Gotland är morän och kallas lokalt för ”pinnlair”. På många ställen är det tunt jordtäckte (vittringsjord) eller så är den sedimentära berggrunden blottad (fig. 5). Moränen finns även under en del andra yngre jordarter (sediment). Moränen, med dominerande moränlera, är inte jämnt fördelad över ön utan det finns något mer på den norra delen av ön. Moränen är i regel finkornig och har ett lerinnehåll på 5–15 procent. Kalkhalten ligger mellan 15–20 procent. Urbergsfragment finns också i moränen, och då främst i de nordostliga och södra delarna. Moränformer som drumliner finns exempelvis strax väst om Slite, samt mellan Klintehamn och Hemse. De primära isälvsavlagringar som finns är rullstensåsar eller rester av åsar. Gotland har mjuka ordoviciska bergarter vilka har fått en relativt flack yta av inlandsisens tryck och rörelser. Detta återspeglas också i moränens ytformer. De moräner som finns har även blivit utsatta för svallning av havet då både Öland och Gotland varit helt under vatten (under HK = högsta kustlinjen) och givit upphov till bland annat svallsediment. Förutom morän så förekommer isälvsediment, sand och grus. Lera och silt av såväl glacialt som postglacialt ursprung finns, men med relativt liten utbredning jämfört med fastlandet.



**Figur 5.** Jordartskarta över Öland och Gotland. (Förenklad jordartsindelning (JBAS)-Jordarter 1:25 000–1:100 000).  
*Soil map of Öland and Gotland (simplified soil class divisions (JBAS)-Soil Map 1:25 000–1:100 000).*

Bleke (kalkslam, kalkgyttja) är benämningen på en kemiskt bildad jordart som endast finns i kalkrika områden, huvudsakligen på Gotland (främst i en del träsk och före detta träsk) men bleke finns också i Jämtland, Västergötland, Skåne samt på Öland. På Fårö finns ett av landets största områden med flygsand. Raukar är också ett känt fenomen på Gotland. Raukar utgör rester av revkalksten (hård) som bättre har klarat erosionen än den lagrade kalkstenen, och som därför framträder som högresta landmärken i topografin. Relativt få isräfflor kan återfinnas främst beroende på de mjuka bergarterna som inlandsisen röde sig över. Inlandsisens avsmältning för Gotland följer i stort avsmältningen för Öland.

# GEOKEMI I OMRÅDENA – GRUNDÄMNE NAS FÖREKOMST OCH ASSOCIATIONER

## Öland och Gotland

På Öland och Gotland har prov samlats in från 552 lokaler med morän och 126 med sediment.

Ölands geologi består till största delen av kalksten och sandsten (slamsten, siltsten) i väster och i mindre utsträckning av lerskiffer och alunskiffer i sydväst. Gotland består till största delen av kalksten eller kalkhaltiga bergarter samt något sandsten i söder. Den kalkstensrika berggrunden har resulterat i ett pH mellan 7,5 och 8,5 för både Öland och Gotland. Det finns inga kända mineraliseringar på Öland och Gotland som skulle kunna resultera i några förhöjda grundämneshalter. Det finns dock små spridda sulfidmineraliseringar i kalksten, utan ekonomiskt värde, till exempel på norra Gotland. Exempelvis har den kalkstensrika berggrunden dock gett upphov till förhöjningar av B, Ca, Mg och Sr i morän och sediment. Alunskifferrik morän på Öland visar förhöjningar av Ag, As, Cd, Mo, Ni, Sb, Tl och U.

De kartor över sedimentprov som presenteras som bilaga i rapporten har inte någon mer detaljerad beskrivning i texten. Generellt så har sediment högre elementhalter i jämförelse med morän. Huvudanledningen till det är att sedimenten innehåller mer finkorniga partiklar (silt och lera) och ytterligare kan elementhalter ökas under sedimenttransport och genom vattenpåverkan. Då finkorniga sediment kan transporteras längre sträckor i en vattenrik miljö jämfört med morän så är det inte helt entydigt var sedimentets källa har varit, även om dess kemi kan ge viss vägledning om vilken bergart som var dess ursprung.

En del grundämnen i morän inom provtagningsområdet ligger efter omräkning över Naturvårdsverkets generella nivå för känslig markanvändning (KM). As, Ba, Cd och Ni finns på ett flertal lokaler med halt över KM medan Pb, Co, Cr, V och Zn uppvisar halter över KM på enstaka lokaler i morän. De flesta har sitt ursprung från alunskiffer eller sandsten (Pb, Cr och Zn). Flertalet av provlokaler med halter över KM finns på Öland (se avsnitt Miljögeokemi). På Öland söder om Mörbylånga finns det moränprov som har tydlig påverkan av den alunskiffer som finns där. En förhöjning av många olika grundämnen förekommer, de som är mest typiska för alunskiffer är Ag, Al, As, Cd, Co, Cu, Mo, Ni, Rb, Sb, Se, Sn, Th, Tl, U och Zn. Norr om Borgholm finns det förhöjningar av La, Pb, Sn, Y och Zn vilka har sitt ursprung i lokalt och transporterat alunskiffer och sandsten, vilka inlandsisen har plockat upp och deponerat på land med moränen.

Enstaka anomalier på Gotland och Öland kan ha antropogent ursprung och kan förklaras av historiska smältningsaktiviteter före vikingatiden. Kartor för en del metaller såsom guld, silver, bly och zink kan ha stor betydelse för arkeologiska undersökningar på öarna. På grund av väldigt tunt jordtäckte kan anrikning av grundämnen som arsenik, fosfor och sällsynta jordartsmetaller förklaras av lakning från jordbruk genom användning av gödsel, herbicider och pesticider.

Sammanfattningsvis ges en kort förklaring av geokemisk signatur i morän från Öland och Gotland för utvalda grundämnen (för mer om grundämnen se bilaga 2 och Andersson m.fl. 2014).

### *Ag, Silver*

På Öland uppträder tydliga anomalier i anslutning till alunskiffern vilken kan innehålla förhöjda halter av silver. Medianvärdet för Öland och Gotland (0,055 ppm) ligger över rikets median.

### *Al, Aluminium*

Det finns en förhöjning av aluminium på södra Öland som hör samman med alunskifferna. Medianvärdet är lägre både på Öland och Gotland jämfört med riket.



### **As, Arsenik**

Förhöjda arsenikhalter på Öland hör samman med förekomsten av alunskiffer. En del av anrikningen av arsenik i morän på Öland och Gotland kan komma från jordbruksmark och användning av pesticider och herbicider. Arsenikanomalin i Visby kan vara antropogen.

### **Au, Guld**

En förhöjning av guld på Gotland sammanfaller med strykningen på lagringen av Halla- och Fröjelformationerna. I Visby kan en lokal guldanomali förknippas med urban miljö och industrihistoria. På Öland finns det en guldförhöjning i syd, i anslutning till alunskiffer.

### **B, Bor**

Bor uppvisar högre halter på Öland och Gotland om man jämför med medianvärdet för övriga Sverige. Anrikning av bor på södra Gotland kan ha sitt ursprung i den underliggande sandstenen. Postglaciala marina sediment kan också vara en källa till bor. En antropogen källa till bor kan vara borater som finns i fosfatgödsel.

### **Ba, Barium**

Halterna av barium ligger över medianvärdet jämfört med riket på Öland och Gotland. Höga bariumhalter på Öland kan ha sitt ursprung i alunskiffern och från marin-påverkade jordarter.

### **Be, Beryllium**

Berylliumhalterna i morän på Öland och Gotland är lägre än rikets genomsnitt. Det finns inte primära källor av beryllium i kalkstenrika områden. På den södra delen av Öland finns ett par anomalier som kan ha sitt ursprung i alunskifferna. På Gotland kan förhöjda berylliumhalter kopplas både till jordbruk och till högre andel lerfraktion i de insamlade proverna.

### **Bi, Vismut**

Vismuthalterna är relativt låga på Öland och Gotland. På Öland sammanfaller de högsta halterna med de ställen där det finns alunskiffer. På Gotland kan förhöjda vismuthalter ha sitt ursprung i jordbruksaktiviteter, till exempel genom användning av avloppsslam som gödsel.

### **Ca, Kalcium**

Kalciumhalterna är naturligt höga på Öland och Gotland, eftersom öarna har berggrund dominerad av kalksten och mörgel.

### **Cd, Kadmium**

Kadmiumhalterna är höga på Öland och förhöjda på norra och södra Gotland. Medianvärdet (0,12 ppm) är två gånger högre än rikets median (0,06 ppm). Karbonatbergarter är vanligtvis kadmiumförande och kan vara förklaringen till de förhöjningar på Öland som syns på kartbilden. De högsta värdena av kadmium i morän på Öland finns emellertid i anslutning till alunskiffer. På Gotland finns två förhöjningar som skiljer sig från omgivningen, den ena på Fårösund och den andra söder om Burgsvik. Kartbilden för kadmium och zink för Öland är väldigt snarlika. Båda kan förekomma i sandsten och alunskiffer. Viss andel av kadmium i insamlade prover kan ha sitt ursprung i fosfatgödsel (det finns en stark korrelation mellan fosfor och kadmium i morän).

### ***Ce, Cerium***

Medianvärdena för cerium på Öland och Gotland (27 ppm) är lägre än medianvärdet jämfört med riket (44 ppm). Lokalt förhöjda halter förekommer i områden med svartskiffer och sandsten samt i morän rik på lera. På Gotland kan anomalier vidare förklaras av användning av fosfatgödsel.

### ***Co, Kobolt***

Kobolthalterna är något högre på Öland jämfört med Gotland. På Öland finns de högsta värdena på södra delen av ön. Sannolikt finns rester av alunskiffer i moränen, vilket kan vara en förklaring.

### ***Cr, Krom***

Mediankromhalterna är något lägre (10 ppm) än för riket (13,6 ppm). På Öland kan alunskifferrarna bidra med den mängd krom som återfinns i moränen. Förhöjda halter av krom på Gotland kan ha sitt ursprung i jordbruk där krom förekommer som spårelement i fastgödsel och slam.

### ***Cu, Koppar***

Medianvärdet för koppar är lägre (7 ppm) än rikets median på 11 ppm i samma metod (salpetersyralakning). På Öland syns återigen en koppling till alunskiffern som visar höga halter av flera grundämnen. Liknande geokemiskt mönster noteras för arsenik och kadmium, samt zink.

### ***Fe, Järn***

Förhöjd halt av järn i moränen på Öland finns i anslutning till alunskiffern. Förhöjda halter av järn i kalkområden på Gotland och på Öland kan förklaras av järnutfällningar i oxid och hydroxidform samt som ankerit-dolomit.

### ***Ge, Germanium***

På Öland finns förhöjda halter i morän i anslutning till alunskiffrar i syd samt sandsten i norr. På Gotland är germanium tydligast i moränen i de längst delarna i Slite- och Hemsegruppen.

### ***K, Kalium***

På Öland finns något förhöjda halter av kalium i söder, vilka till viss del sammanfaller med de platser där alunskifferrarna breder ut sig. På Gotland finns det bland annat förhöjda halter öster om Visby och på Färösund som kan förklaras både av förekomster av lera och som tillskott från jordbruk.

### ***La, Lantan***

Mönstret på Öland och Gotland liknar det för zirkonium och på Gotland verkar det också finnas en relation mellan höga lantanvärden och Slite- respektive Hemsegruppen.

### ***Li, Litium***

Förhöjda halter av litium vid Ölands sydvästra kust förklaras av alunskifferrarna. Högre andel lera i moränen kan bidra till förhöjda litiumhalter.

### ***Mg, Magnesium***

De högsta värdena av magnesium på Gotland kopplas till Hemsegruppen, Eke-, Hamra- och Burgviksformationerna. I dessa finns det karbonatbergarter med förhöjd magnesiumhalt (dolomit) som orsakar förhöjda värden i morän.

### ***Mn, Mangan***

Halterna av mangan på Öland och Gotland är högre än rikets median (ca 180 ppm). Mangan kan finnas i olika lokala bergarter, som alunskiffer, kalksten och sandsten, både på Öland och Gotland. Genom vittring kan översta lagret anrikas som mangan.

### ***Mo, Molybden***

På Öland kan molybdenanomalierna med säkerhet knytas till förekomsten av alunskifferar på Ölands södra del. I de övriga kalkstensdominerade delarna på Öland och Gotland så är medianhalten för molybden lägre än riksgenomsnittet i morän (ca 0,3 ppm).

### ***Na, Natrium***

Öland och Gotland har generellt låga natriumhalter jämfört med riket. Median för riket är ca 116 ppm och för Öland och Gotland ca 75 ppm. De högsta värdena återfinns på Gotlands södra del i ett område som domineras av Gotlands yngsta bergarter: Hemsegruppen, Eke-, Burgviks- och Hamraformationerna. På norra delen av Öland finns ett extremvärde som ligger på drygt 460 ppm natrium. Orsaken till denna anomali kan vara både naturlig och antropogen. Det finns en sandstenförekomst strax väster om provtagningsplatsen vilken kan innehålla förhöjda natriumhalter. Lokalt jordbruk kan också bidra till natriumutsläpp till jordlager genom att använda gödsel.

### ***Nb, Niob***

Öland och Gotland har låga niobhalter, lokala förhöjningar kan bero på sandförekomster.

### ***Ni, Nickel***

På Öland och Gotland ligger medianvärdet för nickel i morän (ca 12 ppm) något över rikets nivå (ca 8 ppm). De högsta värdena för Öland återfinns på den södra delen av ön, nickelhalten kommer från alunskiffern om man ser till isrörelseriktningen.

### ***P, Fosfor***

De högsta värdena på Öland återfinns på eller i närheten av områden som domineras av skifferar och alunskifferar. Höga halter uppträder också på andra delar av ön som domineras av kalksten. En andel av fosfor kan ha sitt ursprung i jordbruket. På Gotland återfinns de högsta värdena i området som domineras av Slitegruppen som innehåller fosforithorisonter. De översta delarna av Hemsegruppen har lokalt förhöjda fosforithalter vilket avspeglas i moränen.

### ***Pb, Bly***

Öland och Gotland har blyhalter i morän som ligger något över medianvärdet jämfört med riket (ca 6 ppm). På Öland återfinns de högsta värdena norr om Borgholm och kan möjligtvis förklaras av en större blyanomali på fastlandet och väst-östlig isriktning. På Gotland påträffas förhöjda blyhalter framför allt på den sydligaste delen av Gotland (söder om Burgsvik).

### ***Rb, Rubidium***

För Öland och Gotland ligger rubidiumhalterna under rikets median (ca 13 ppm). Kartbilden för rubidium och kalium uppvisar liknande spridningsmönster vilket tyder på ursprung i finkorniga leriga moräner och förekomster av skiffer.

### ***Sb, Antimon***

Medianvärdet för antimon i morän ligger för Öland och Gotland något över rikets nivå på 0,1 ppm. Antimonhalterna är högre på Öland än på Gotland och de högsta halterna återfinns i nära anslutning till alunskifferna.

### ***Sc, Scandium***

Medianhalten för scandium i morän på Öland och Gotland liknar rikets medianhalt på ca 2 ppm. På Öland förklaras förhöjda halter av förekomsten av skiffer och på Gotland av finkorniga moräner rika på lera.

### ***Se, Selen***

På södra Öland finns ett antal anomalier som kan ha sitt ursprung från skifferar och alunskifferar, vilka ofta har förhöjda halter av detta grundämne.

### ***Sn, Tenn***

Halterna för tenn på Öland och Gotland är väldigt låga jämfört med riksgenomsnittet på ca 0,3 ppm. Spridningsmönstret påminner ganska mycket om det för bly, vilket har att göra med att dessa grundämnens kemiska beteenden är snarlika. Förhöjda halter i södra Öland kan mycket väl härstamma från skifferar och alunskifferar.

### ***Sr, Strontium***

Strontiumhalten på Gotland ligger mycket högre än rikets medianhalt på ca 10 ppm, detsamma gäller för Öland men medianhalten är dock något lägre än på Gotland. De högre halterna förklaras med förekomsten av kalksten som innehåller grundämnet kalcium som ofta ersätts av strontium och har liknande kemiska egenskaper. Spridningsmönstret påminner om det för kalcium.

### ***Ta, Tantal***

Tantalhalterna är låga både på Öland och Gotland. På Öland finns lokala variationer som kan kopplas till alunskiffer i söder och sandsten i norr.

### ***Te, Tellur***

Medianhalten av tellur i morän är högre på Öland och Gotland jämfört med rikets på 0,02 ppm. Det finns lokalt högre halter på Öland i jämförelse med Gotland vilket kan associeras till litologiska skillnader som finns mellan öarna, främst alunskiffer som finns på Öland.

### ***Th, Torium***

Toriumhalterna på Öland och Gotland är låga i jämförelse med rikets median som ligger på ca 7 ppm. Förhöjda halter på vissa ställen kan förklaras av förekomsten av lerhaltig morän, sandsten och alunskiffer.

### ***Ti, Titan***

Halterna av titan i morän på Öland och Gotland ligger avsevärt under rikets medianhalter på ca 1 200 ppm, men kartbilden uppvisar lokala variationer. På Gotland finner man de högsta titanvärdena för morän i områden som domineras av Hemse- och Slitegruppen och i lerig morän. På Öland återfinns förhöjda titanhalter i områden med skiffer, lera och sand.

### ***Tl, Tallium***

Mönstret på kartbilden för tallium på Öland påminner till viss del om det för kalium. De förhöjda halterna på Öland associeras till skifferförekomster.

### ***U, Uran***

Halten av uran i morän på Öland och Gotland är långt under rikets genomsnitt på ca 1,5 ppm, lägst är de på Gotland. Öland uppvisar urananomalier i närhet till alunskiffer.

### ***V, Vanadin***

Generellt är halterna låga på Öland och Gotland jämfört med rikets på ca 21 ppm avseende vanadin i morän. På södra Öland är det alunskiffer som är orsak till de synliga anomalierna. På Gotland är vanadin anrikad i lerhaltig morän.

### ***W, Wolfram***

På Öland och Gotland är wolframhalterna i morän mycket lägre i jämförelse med medianvärdet för riket som ligger på ca 0,1 ppm. På Öland finns det förhöjda wolframhalter i områden med alunskiffer, till exempel på södra Öland.

### ***Zn, Zink***

På Öland och Gotland ligger också medianhalten för zink i morän över rikets median på ca 27 ppm. Förhöjda halter återfinns i närheten av alunskifferar, dock så påträffas de högsta zinkhalterna i morän på den norra delen av ön mellan Borgholm och Lötterp. Där finns det sandsten som kan innehålla zink och moränen skulle kunna ha transporterats från fastlandet där zinkmineraliseringar är vanliga. Liknande kartbildsmönster finns för kadmium och bly för den norra delen av Öland. På Gotland kan lokala zinkanomalier förklaras av små sulfidmineraliseringar i kalksten, till exempel på norra Gotland.

### ***Zr, Zirkonium***

På Gotland påträffas de högsta halterna av zirkonium i områden som motsvaras av Slitegruppen och Hemsegruppen. Inom Slitegruppen finns de högsta zirkoniumhalterna i de lägsta delarna av formationen som motsvarar gruppens sydvästra område (mellan Tångstade och Visby). På dessa ställen förekommer horisonter av mörksten. Höga zirkoniumhalter stämmer överens med lerhaltig morän.

### ***REE (sällsynta jordartsmetaller)***

Grundämnen som ingår i gruppen REE kan delas in i lätta LREE och tunga HREE. Till LREE hör Ce, Eu, La, Nd, Pr, Sc och Sm och till HREE hör Dy, Er, Gd, Ho, Lu, Tb, Tm, Y och Yb. Spridningsmönstret för de flesta grundämnena i REE-gruppen är tämligen lika på de flesta ställen. På Öland finns det förhöjda halter av REE i morän i anslutning till alunskifferar, vilket är tydligast i den södra delen av ön där bergarten uppträder. På Gotland är förhöjda REE-halter synbara i morän med högt lerinnehåll, i berggrund med de lägsta delarna i Slite- och Hemsegruppens formation. Förekomster av sandsten och flytsand främjar REE-anrikning i morän.

## SUMMARY

For more than 30 years, the main goal of the geochemical mapping programme at SGU has been to provide high quality, consistently sampled and analysed data. The objective of the programme is to quantify regional geochemical variations in glacial till, and to less extent in sediments and soil in order to provide data for mineral exploration, the mining industry, planning purposes, environmental monitoring, agriculture, forestry, veterinary and human medical research (medical geology).

Till samples are commonly collected from the C-horizon of hand-dug pits, at a depth of ca 0.7–1.0 m. The sample density is ca 1 sample per 7 km<sup>2</sup>. Sediments are collected with a hand driven drill at 1.0 m depth. After vacuum-drying, the samples are sieved stepwise to fraction <0.063 mm and analysed for major, minor and trace elements at the SGU laboratory. Samples undergo partial leaching in Aqua Regia (a mixture of HCl and HNO<sub>3</sub>) and nitric acid (7M HNO<sub>3</sub>) and followed by ICP-MS analysis. Acidity is determined in a suspended solution composed of a 4 g sample (<0.063 mm) and 20 ml distilled water. External quality control procedure is used in order to monitor the sampling and analytical variance. Additional details regarding the geochemical mapping programmes, including biogeochemical mapping at SGU, are available in Lax & Selinus (2005) and Andersson et al. (2014). Method details are described in detail in Morris et al. (2020).

The present report covers the two biggest Swedish islands: Öland and Gotland. A total of 552 samples of till and 126 clay and fine sediments were collected for this study on both islands.

The lithology of parent material is the main controlling factor of till and sediment chemical composition. On Öland, the bedrock consists entirely of sedimentary rocks of early Palaeozoic age deposited from lower Cambrian (younger than 542 million years) to middle Ordovician (older than 458 million years). The Cambrian stratigraphy consists of sandstone, clayey sandstone, conglomerate, shale, siltstone with clayey layers, siltstone, silty shale and anthraconite-rich alum shale (uranium content 40–70 ppm). Ordovician geology is dominated by red and grey limestone, usually occurring as horizontal platform, so called ‘alvaret’. Locally, limestone is rich in fossils, especially in orthoceratite and trilobite species. The thickness of the limestone varies from 20 to 40 m. Locally limestone is enriched in clay and glauconite.

The bedrock of Gotland consists of Palaeozoic sedimentary rocks of Silurian age formed during a time interval of about 10 million (433–423 million years ago). The stratigraphic order is as following: mudstone, limestone, marl, siltstone and limestone (northern part of the island) or alternating stratum of marl and limestone (southern part). The top of the stratigraphic level is composed of sandstone with varying clay content, marl and muddy limestone. While the limestone varieties dominate on the island, sandstone and siltstone occur in two areas: near Klintehamn in north-east and near Burgsvik in the south. The Burgsvik sandstone is up to 40 m and it has been quarried since medieval times as building stone.

Thin moraines and weathering soils are the most common soil types on Öland. On the “Stora Alvaret”, however, the soil cover is thin or missing entirely. The topography of the moraine largely follows the surface of the underlying bedrock. The moraine is more sandy in the northern part of the island and clayey in the southern part. Locally, some end moraines, drumlins and even De Geer moraines occur. Öland has been below sea level, which means that the moraine is wave-washed. Beach banks are found in southern Öland, derived from Ancylus lake and the Littorina sea (8 000–9 000 years ago and 5 000–7 000 years ago). Three major sand fields with a relatively smooth surface can be observed south-southwest of Borgholm on Öland. Eolian sand is common in the northern part of Öland and there are “Raukar” (Rauk is a stone column

created by natural erosion at the sea) in the northwestern part of the island. During the last glacial period, the Weichsel (about 14 400 years ago), the ice edge stood at the southern edge of Öland.

The most common soil type on Gotland is moraine and is usually fine-grained with a clay content of 5–15% and a lime content between 15–20%. "Bleke" is another soil type that occurs on Gotland, found in limestone-rich areas. Among glacial forms, drumlins occur on the island; for example, west of Slite. The primary glaciofluvial deposits are eskers and residual ridges. "Raukar" are the most known erosional formations on Gotland. One of Sweden's largest areas of eolian sand is at Fårö. Like Öland, deglaciation on Gotland occurred around 11 000 years ago. Both Öland and Gotland lies below the highest coastline (HK).

A large number of quarries for industrial minerals and stone blocks occurs on Gotland and Öland. On Öland limestone is quarried for building material and for lime mortar. On Gotland, limestone is quarried mainly for cement and lime production, and sandstone for building stone. Alum shale has been mined in southwestern part of Öland at Degerhamn from early 18th century. There have also been attempts to extract oil on Gotland in the 1980's and 1990's.

The till geochemistry on Öland reflects well underlying bedrock, dominated by limestone, with minor sandstone and shale (silty shale and anthraconite-rich alum shale) occurrences. In southern Öland, till geochemistry is strongly influenced by black shale and enrichment in the following elements can be observed: Ag, Al, As, Cd, Co, Cu, Mo, Ni, Rb, Sb, Sc, Sn, Th, Tl, U, Zn and REE. The shale fragments were likely deposited on land with moraine transported by inland ice sheets that originated from areas that are now covered by the sea. The most pronounced anomalies occur in the vicinity of the historical alum shale works at Degerhamn. In northern part of the island, north of Borgholm, enrichment in La, Pb, Sn, Y and Zn can be explained by till transported from the continent (following west-east ice transport directions).

Gotland's till geochemistry is controlled by the limestone-dominated bedrock and Quaternary glacial and postglacial history. The bedrock is covered in many places by thin soil and clayey moraine with clay content above 15%. The gravel fraction is variably composed of Precambrian rock fragments. Since the whole island is located under the highest coastline, the primary till composition was most likely modified by the seawater which resulted in leaching of chemical components, physical sorting and re-deposition.

The till's geochemical composition reflects well the bedrock lithology with high contents of B, Ca, Mg, Sr accompanied by alkaline pH (>8). Most of anomalies follow the diagonal trend-line from northwest to southeast which can be explained by the occurrence of thicker clay-rich moraine deposits. Somewhat this region overlaps with an area of intense karstification. Metal anomalies in the north (e.g. Zn, Cd, Pb) can be partly related to small sulphide mineralisations in limestone. Certain input from agriculture should be considered since clay-rich till areas on Gotland are commonly used for agriculture. This may be valid for Cu, P, Th, REE, which usually occur in mineral fertilisers and pesticides.

The environment on Gotland and Öland is sensitive to pollution and anthropogenic activity, especially in karst regions with very thin soil cover. The groundwater reservoirs are better protected from pollution by leaching in areas with thicker clayey moraines and less permeable marl and shale in the bedrock. The environmental status of till can be assessed by its relationship to the sensitive land use KM values provided by the Environmental Protection Agency (Naturvårdsverket 2008). In Öland and Gotland allowed KM guideline values are exceeded for As, Ba, Cd and Ni in several locations and high spots with Pb, Co, Cr, V and Zn which occur as point anomalies in till. These high element concentrations have more likely geogenic origin and to minor extent can be a result of black shale mining as in southwestern Öland.

## 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., Carlsson, M., Ladenberger, A., Morris, G., Sadeghi, M. & Uhlbäck, J., 2014: *Geokemisk atlas över Sverige*. Sveriges geologiska undersökning ISBN 978-91-7403-258-1.
- 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 K 77*, 157 s.
- 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.
- Carlsson, M., Lax K., Andersson M., 2009: Geokemiska kartan. Markgeokemi. Metaller i morän Regionen Heby - Enköping - Uppsala. *Sveriges geologiska undersökning K 224*, 78 s.
- Erlström M., Persson L., Sivhed U. och Wickström L., 2009: Beskrivning till regional berggrundskarta över Gotlands län. *Sveriges geologiska undersökning K221*, 66 s.
- 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)>. Åtkommen 23 september 2020.
- Koljonen, T. (red.), 1992: *The Geochemical Atlas of Finland, Part 2: Till*. Geological Survey of Finland, Espoo.
- Krüger, J., 1979: Structures and textures in till indicating subglacial deposition. *Boreas* 8, 323–340.
- Kurtio, 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, 337–342.
- Lax, K. & Selinus, O., 2005: Geochemical mapping at the Geological Survey of Sweden. *Geochemistry: Exploration, Environment, Analysis* 5, 337–346.
- Morris, G., Ladenberger, A., Snöälvs, J. & Larsson, N., 2020: Geokemisk analys av morän genom uppslutning med salpetersyra (HNO<sub>3</sub>). *SGU-rapport: 2020:15*, Sveriges geologiska undersökning, 12 s.
- Naturvårdsverket, 2008: *Tabell över generella riktvärden för förorenad mark*. Ersätter tidigare utgivna. <<http://www.naturvardsverket.se>>. Publicerat 24 oktober 2008.
- Perttunen, M., 1991: The transport of till in southern Finland. *Geological Survey of Finland Special Paper* 9, 79–86.
- 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.
- Rosborg, I., Nihlgård, B. & Gerhardsson, L., 2003: Mineralämnen och metaller i 20 kommunala dricksvatten i södra Sverige. *V4-Forsk Rapport 2003-17*, Svenskt Vatten AB, 64 s.
- Rudmark, L., 1983: Beskrivning till jordartskartan Borgholm NV/NO. *Sveriges geologiska undersökning Ae 55*, 73 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? *SGU-rapport 2009:26*, Sveriges geologiska undersökning, 25 s.
- Tauber, C., 1988: *Spruenelemente in Flugaschen*. Verlag TÜV Rheinland GmbH, Köln, Germany, 469 s.
- Wastenson, L. & Fredén, C. (red), 1994: *Sveriges Nationalatlas, Berg och Jord*. SNA, 208 s.
- Wik N.-G., Bergström U., Bruun Å., Claeson D., Jelinek C., Juhojuntti N., Kero L., Lundqvist L., Stephens M.B., Sukotjo S. & Wikman H. (2005) Beskrivning till regional berggrundskarta över Kalmar län. *Sveriges Geologiska undersökning Ba 66*, 54 s.

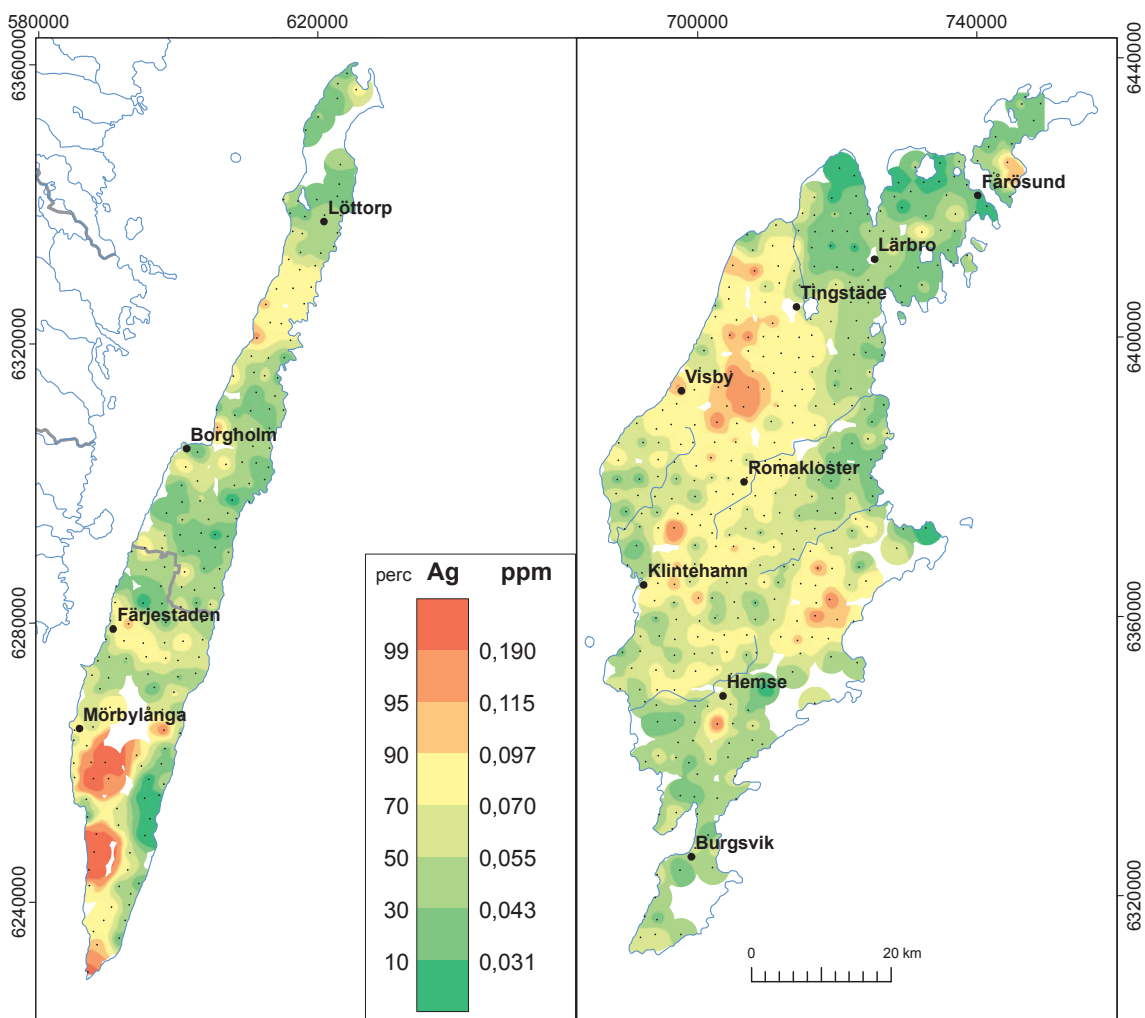
## BILAGA 1. REGIONALA MARKGEOKEMISKA KARTOR

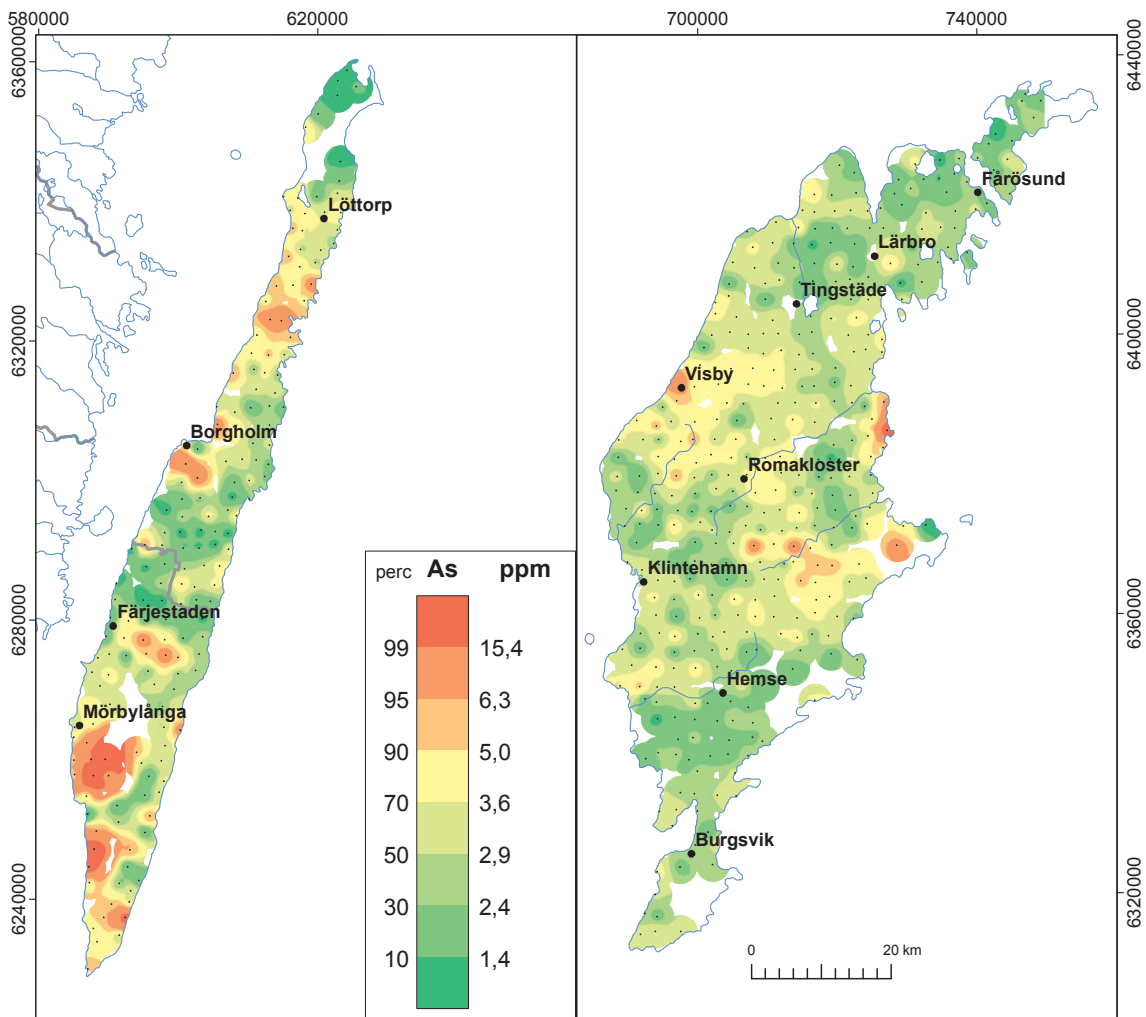
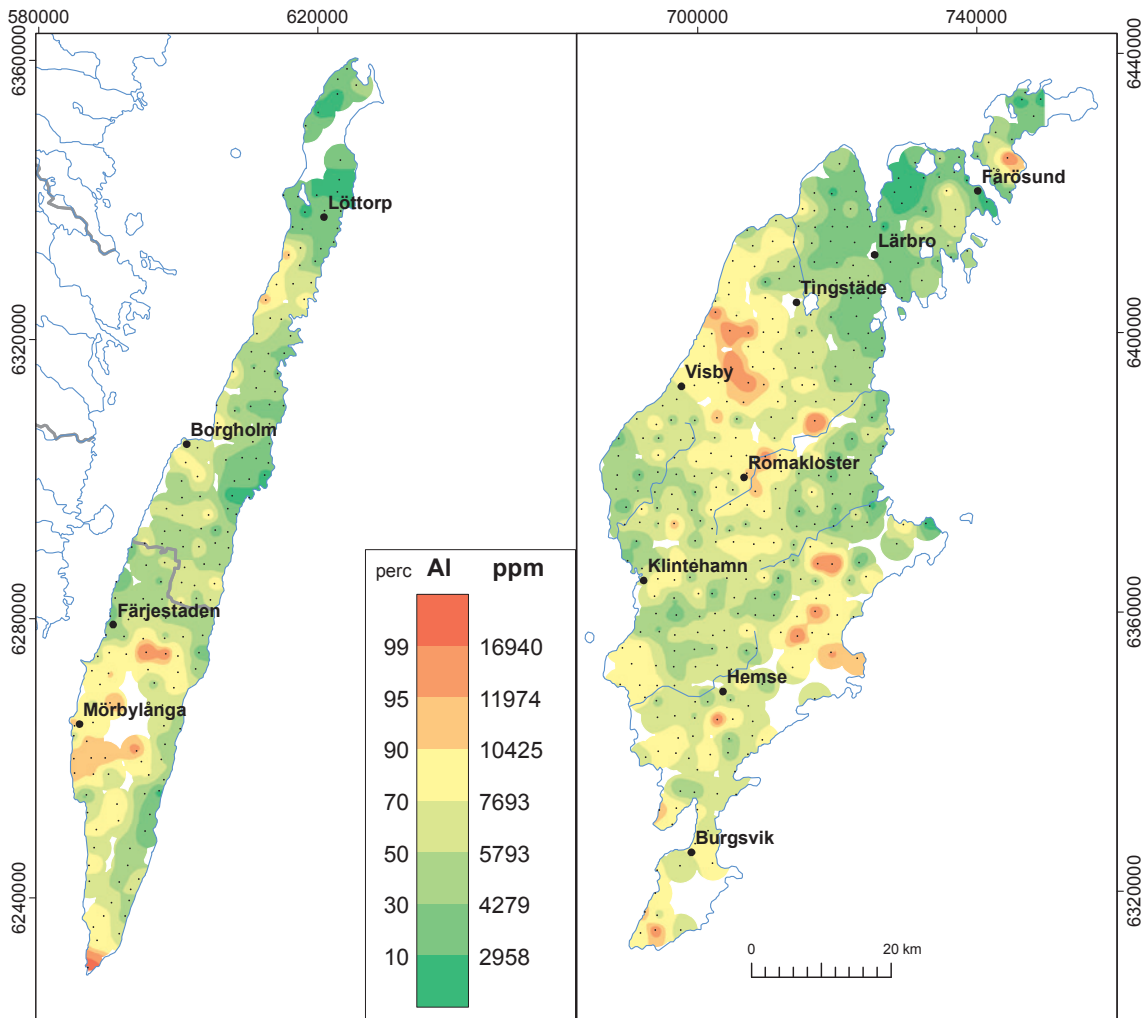
### *Regional geochemical maps of till and other sediments*

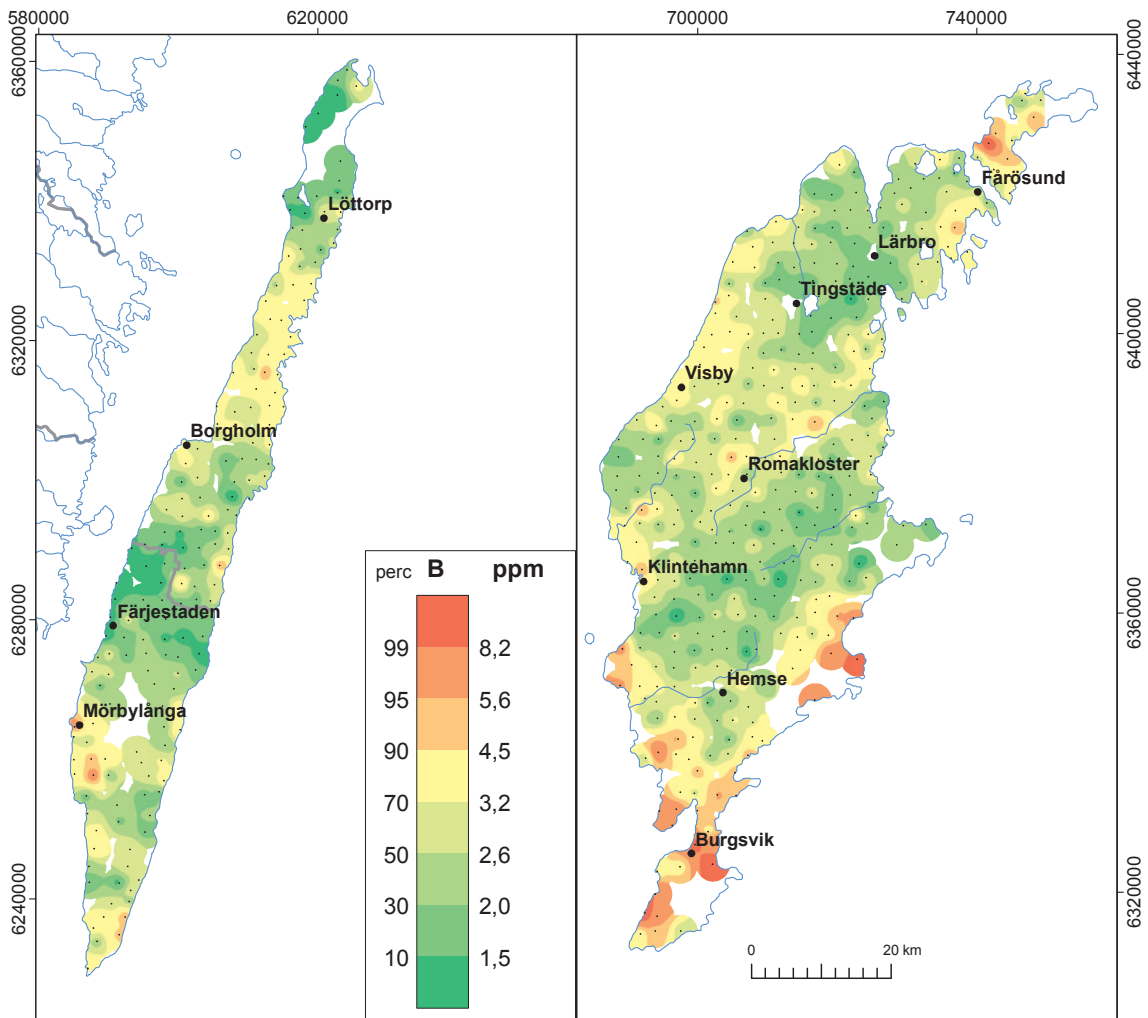
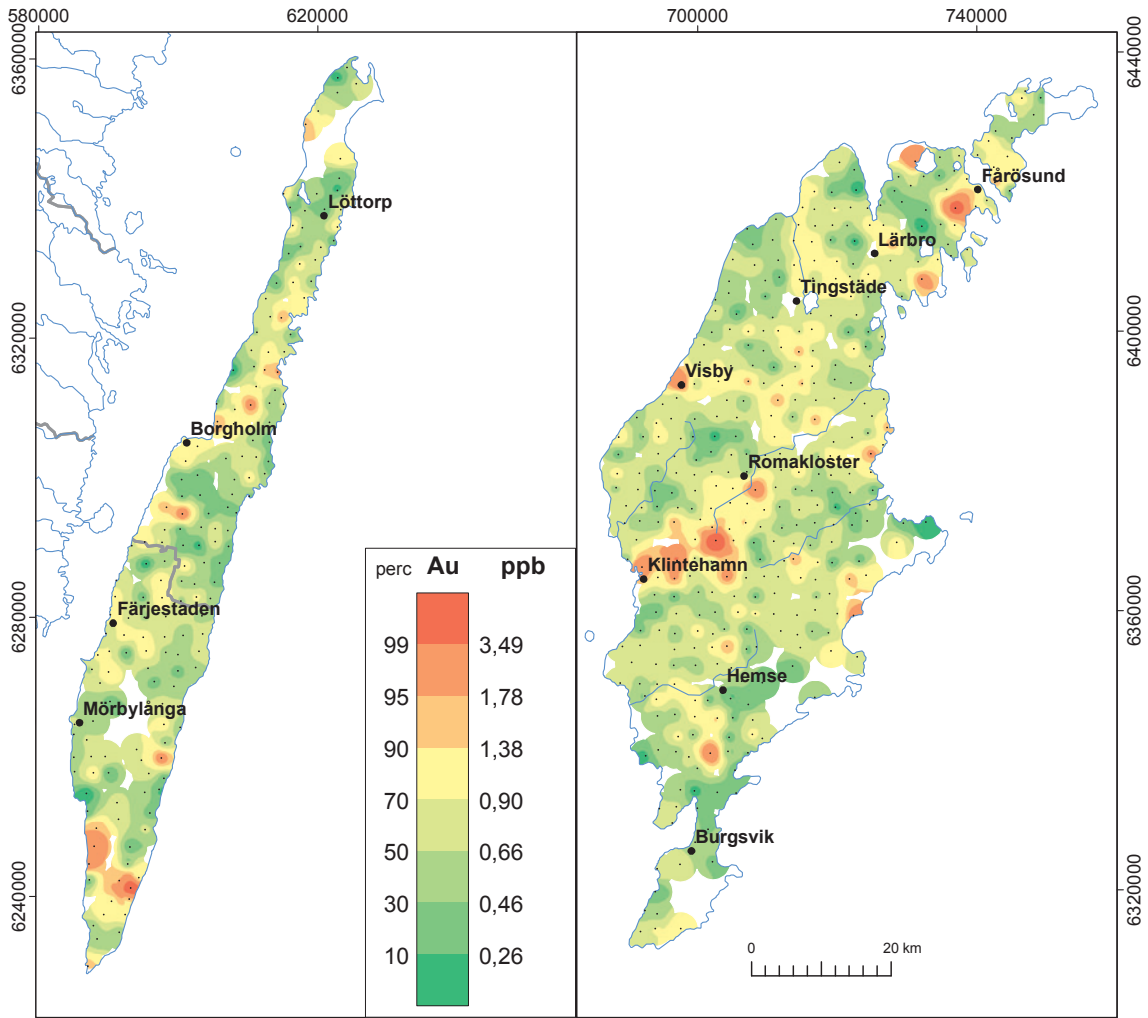
Bilagan omfattar kartor över förekomst av huvud- och spårelement samt pH i morän (57 st.) och sediment (53 st.), provtagna enligt SGUs regionala markgeokemiska metod. De femtiosju första kartorna visar morändata som interpolerats över den provtagna ytan. Därefter följer sedimentkartorna som visar varje provtagen punkts analysvärde.

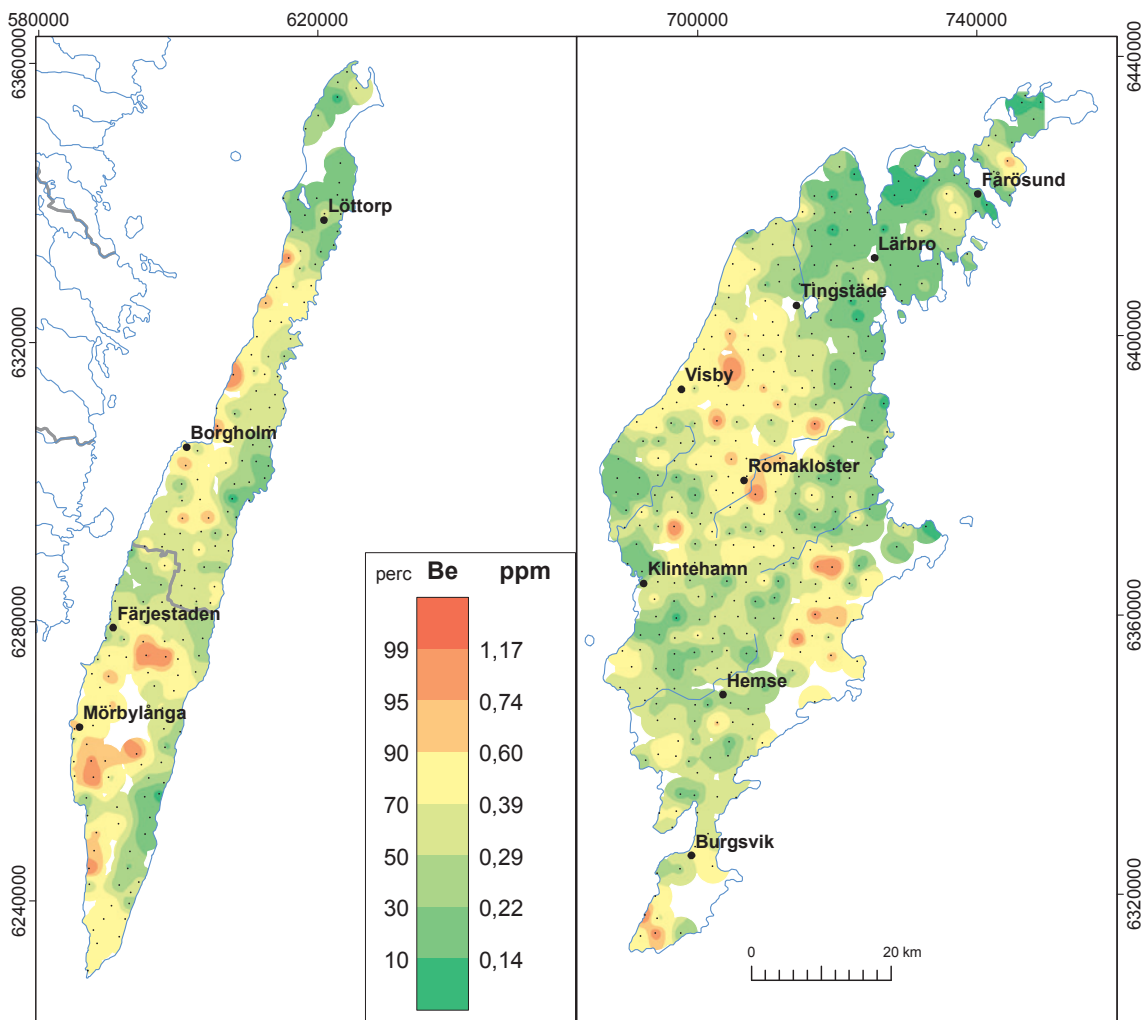
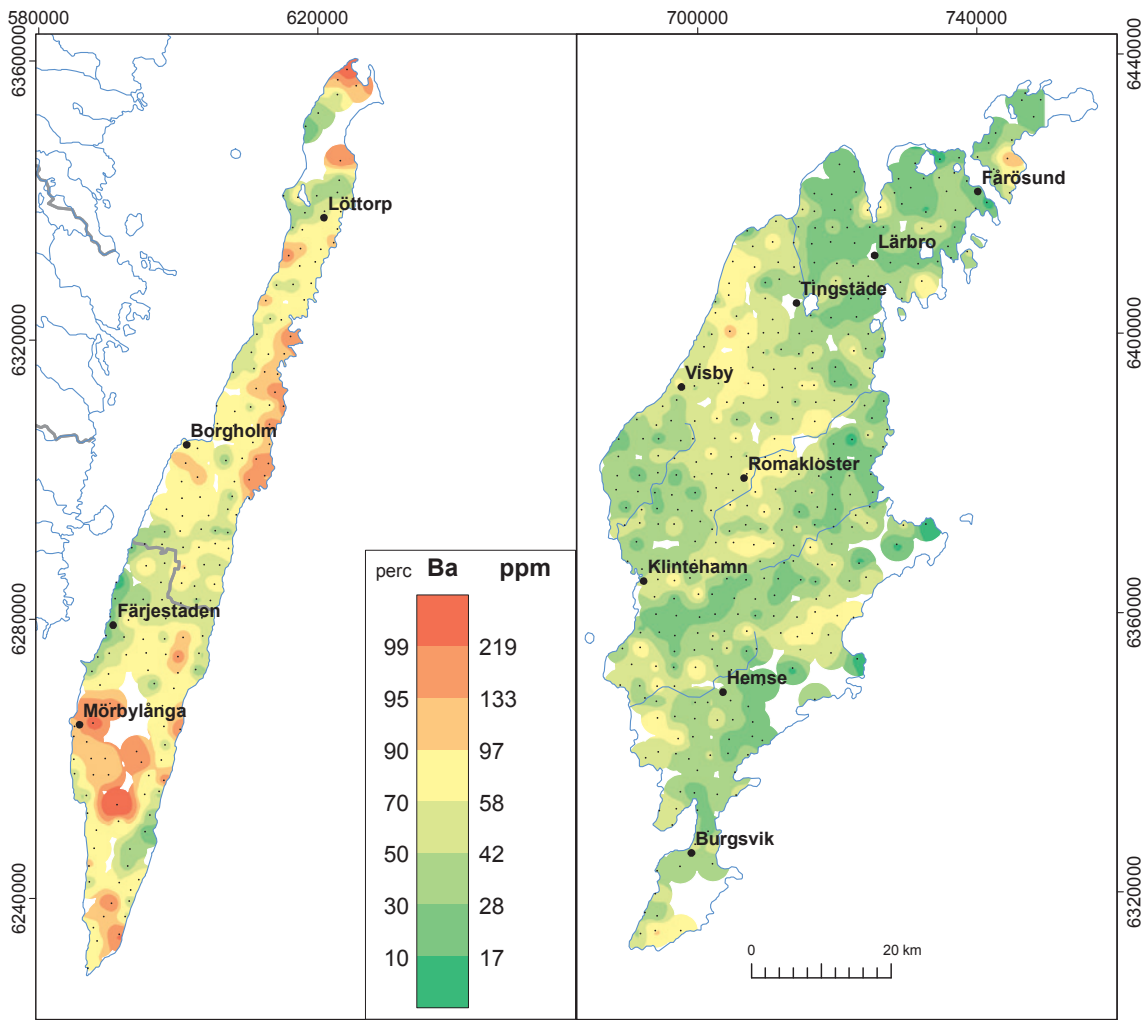
Baserade på analysresultatet för morän efter lakning med 7M salpetersyra, presenteras kartor över Ag, Al, As, B, Ba, Be, Bi, Ca, Cd, Ce, Co, Cr, Cu, Dy, Er, Eu, Fe, Gd, Ge, Ho, K, La, Li, Lu, Mg, Mn, Mo, Na, Nb, Nd, Ni, P, Pb, Pr, Rb, Sc, Se, Sm, Sn, Sr, Tb, Th, Ti, Tl, Tm, U, V, W, Y, Yb, Zn och Zr. Moränproven lakas även med kungsvatten och kartor finns av Au, Sb, Ta och Te. Baserade på analysresultatet för sediment efter lakning med 7M salpetersyra, presenteras kartor över 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. Kartor över pH-mätningar i morän respektive sediment baseras på prov uppplammat i avjoniserat vatten.

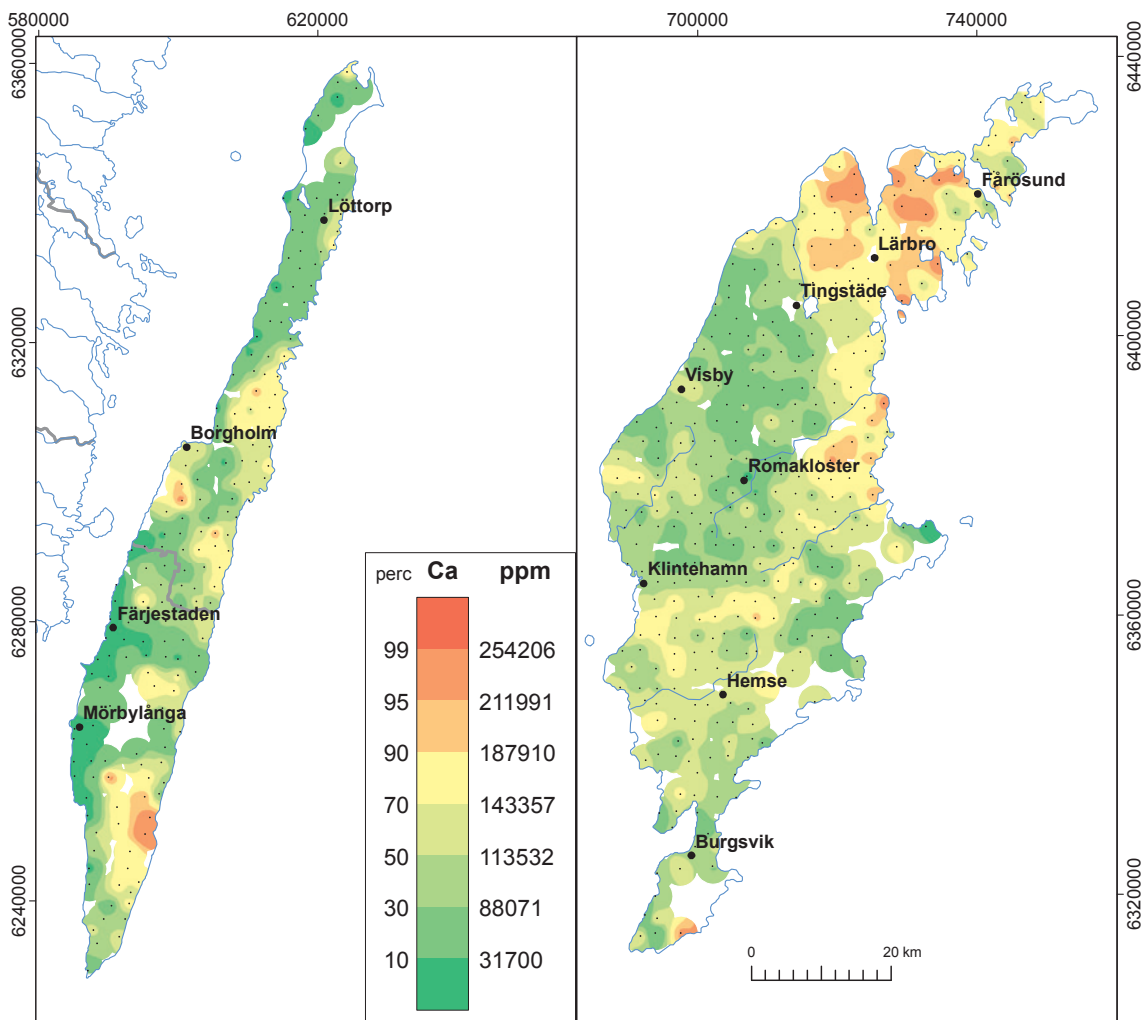
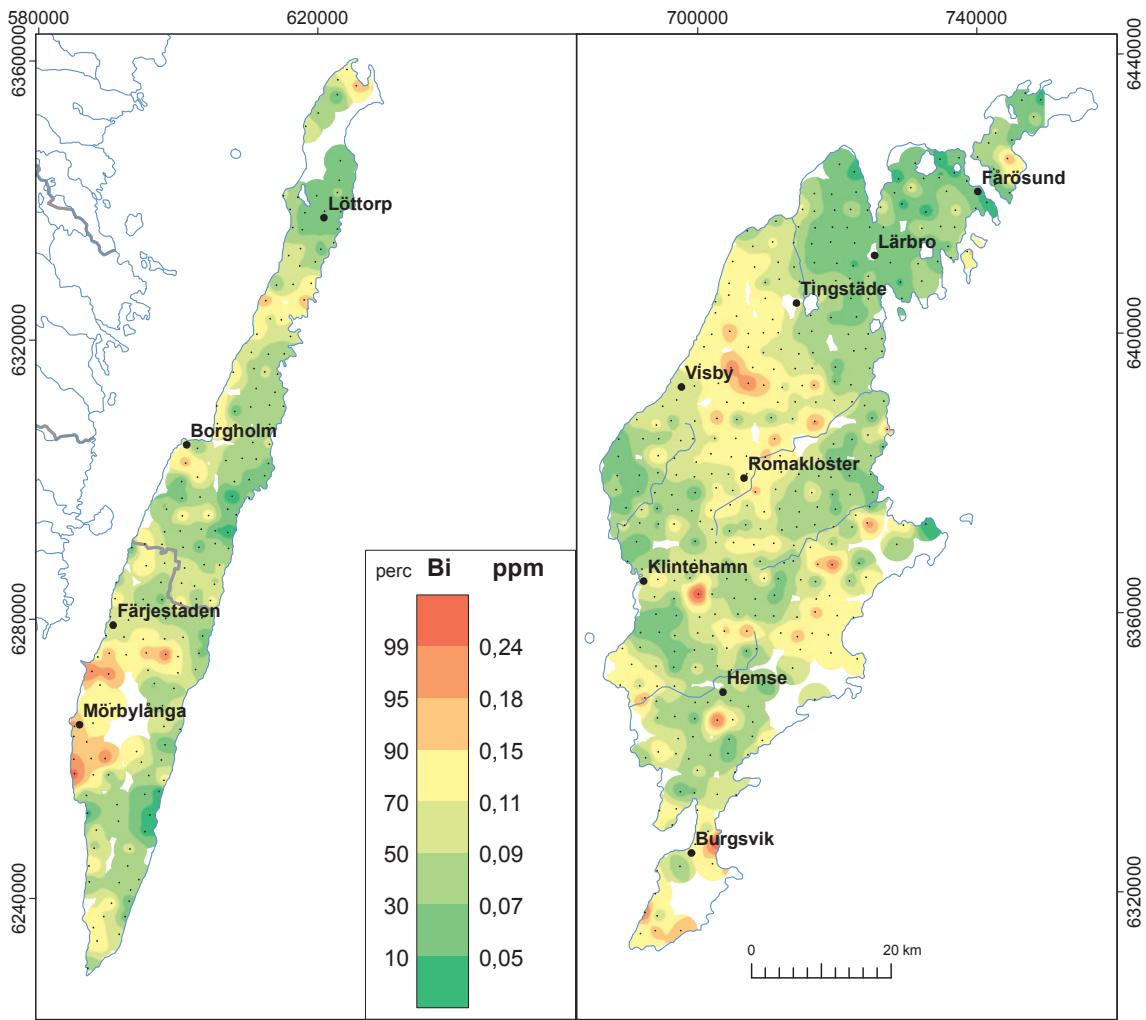
### Förekomst av huvud- och spårelement samt pH i morän

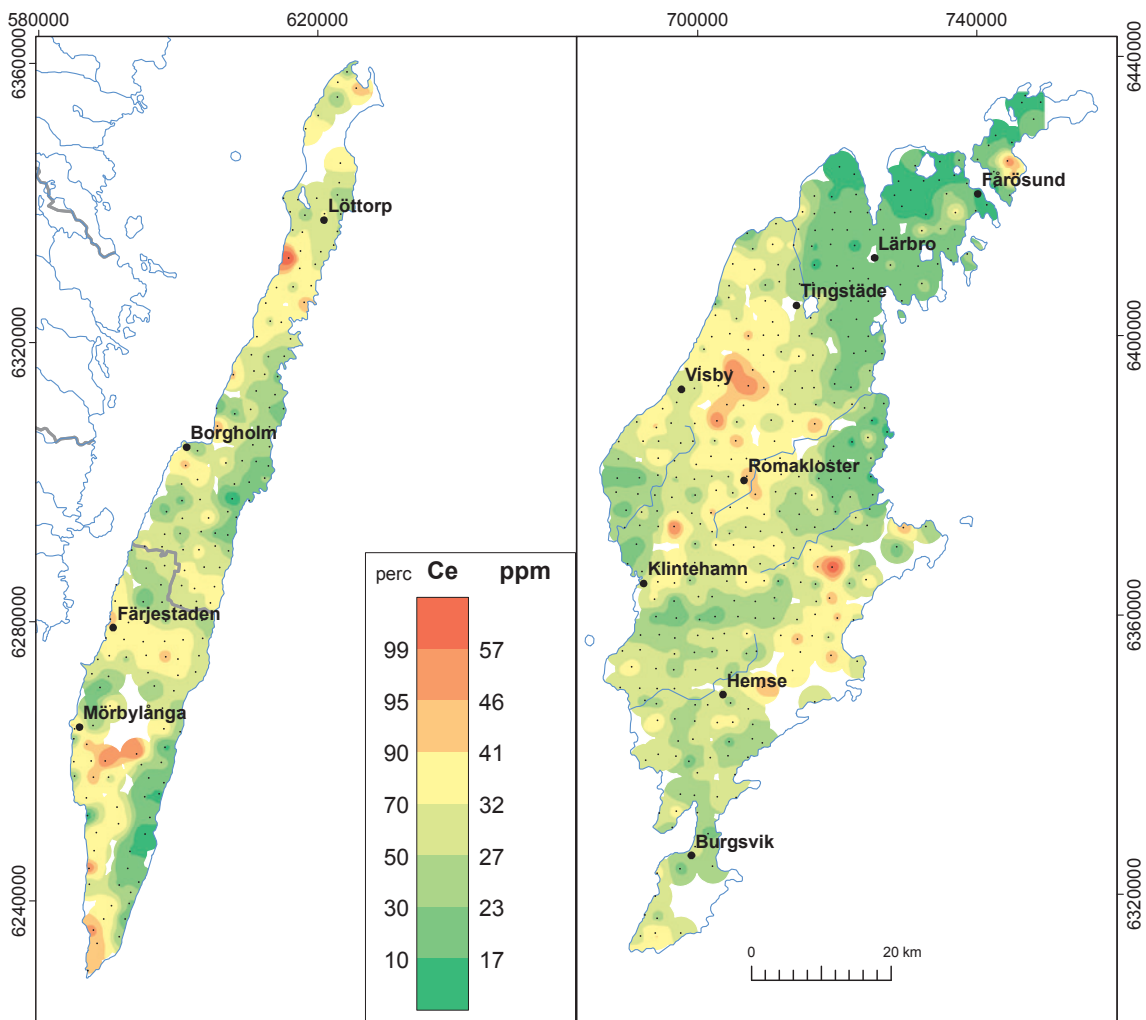
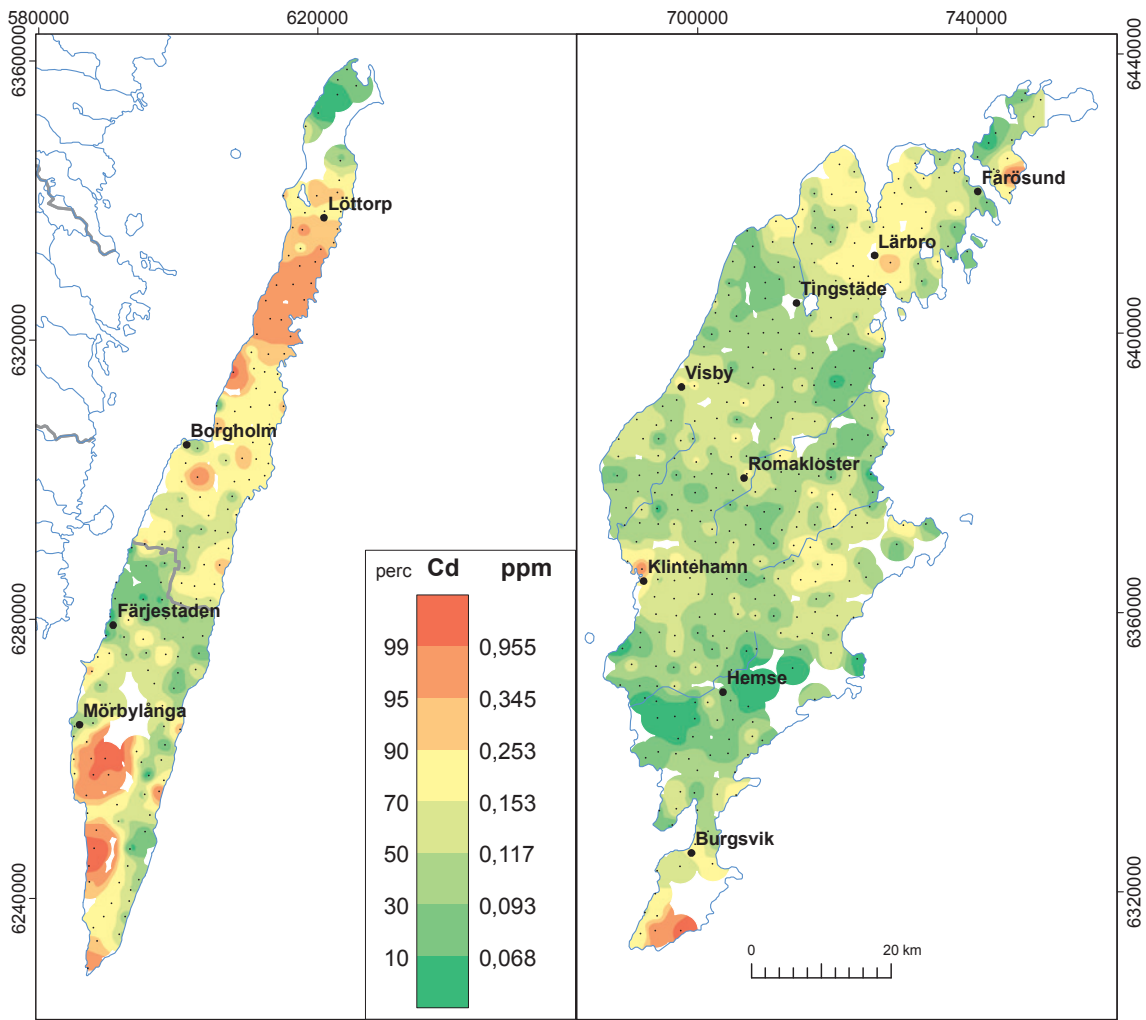


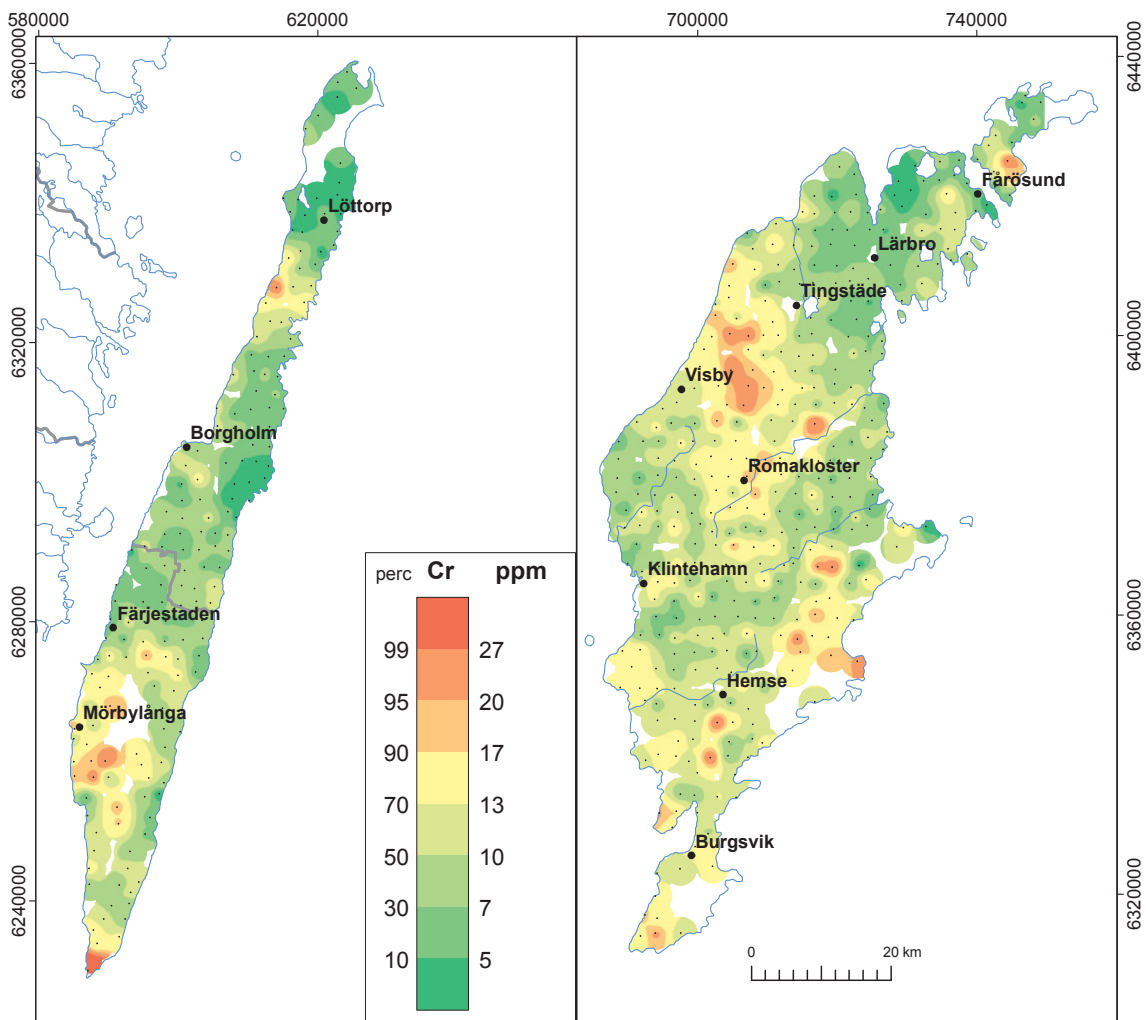
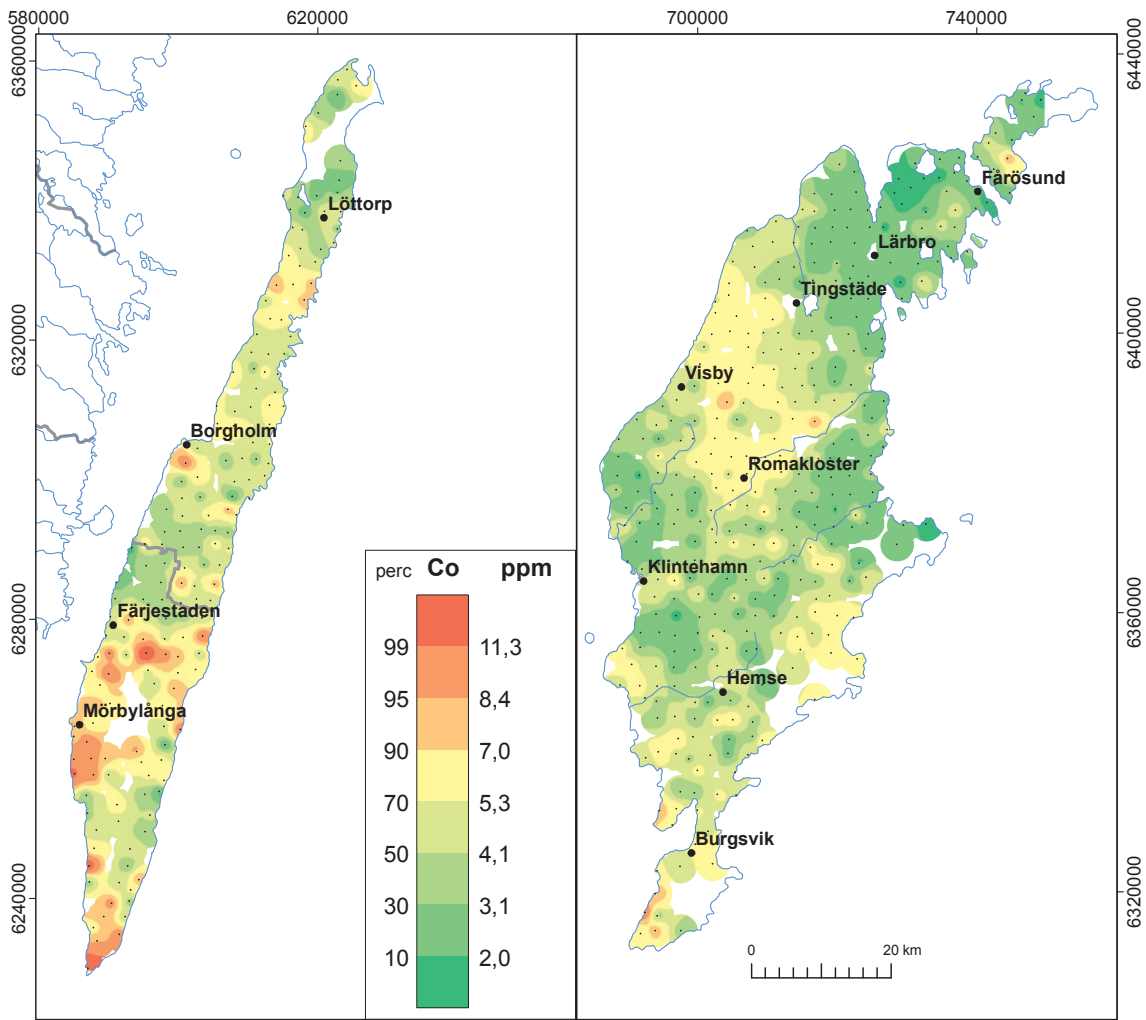




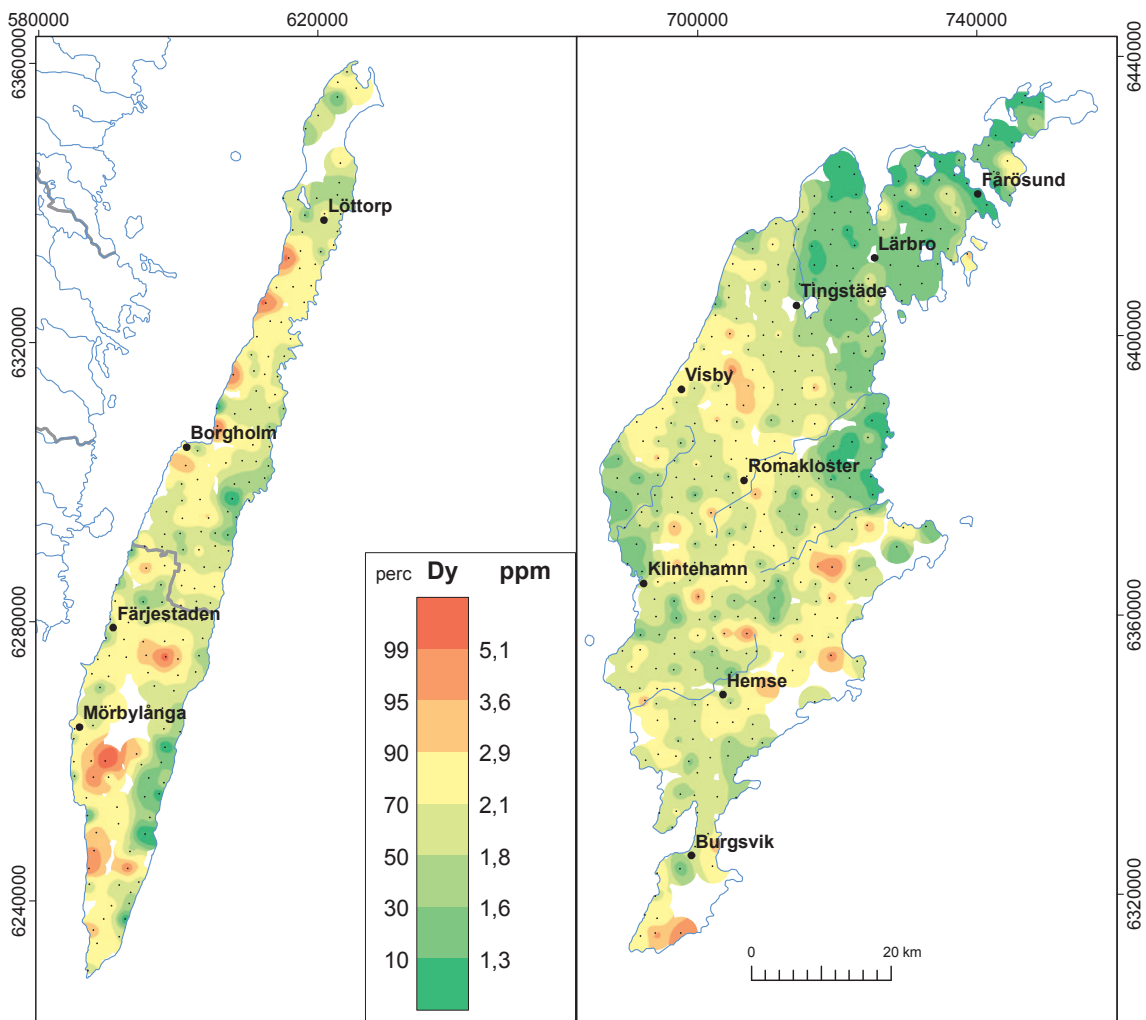
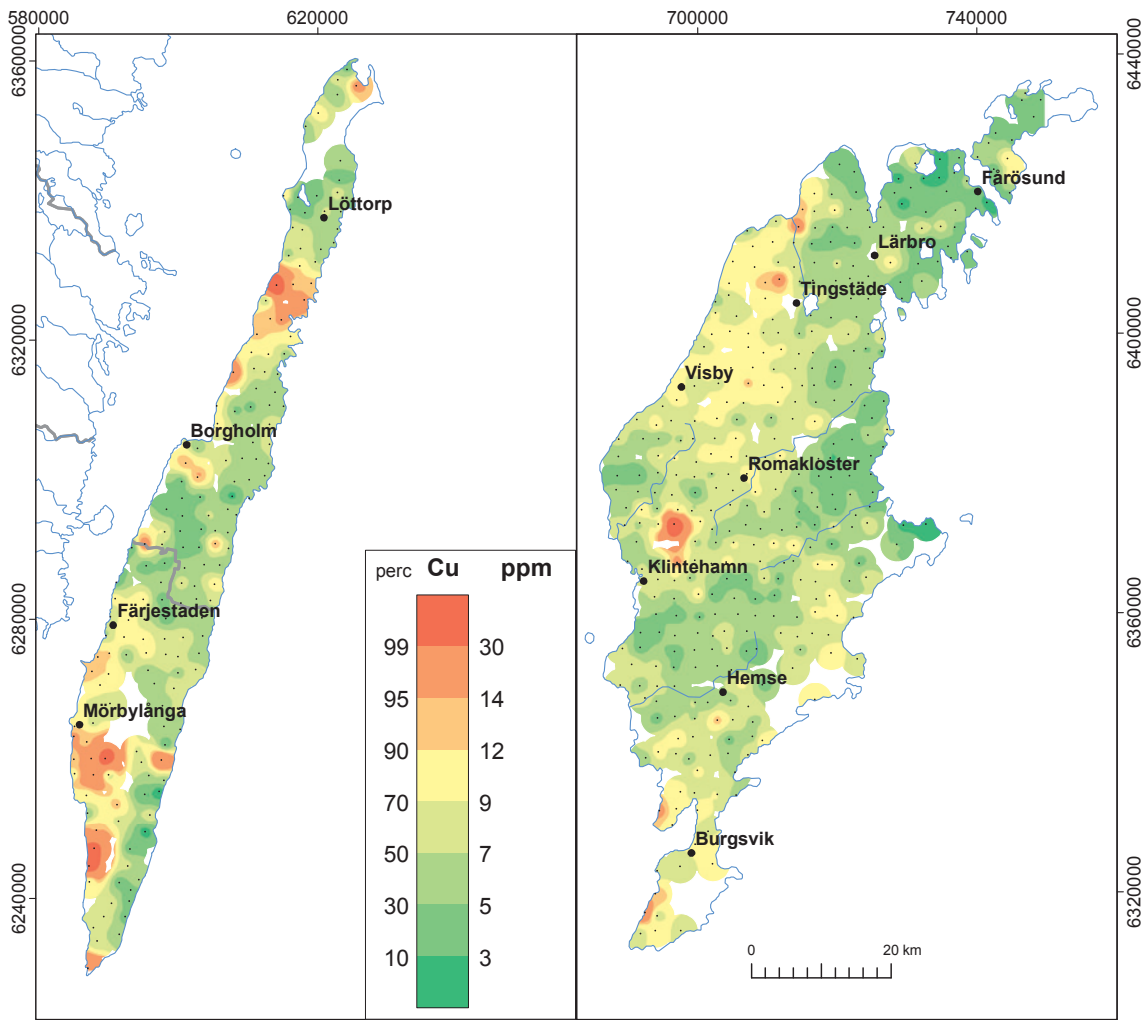


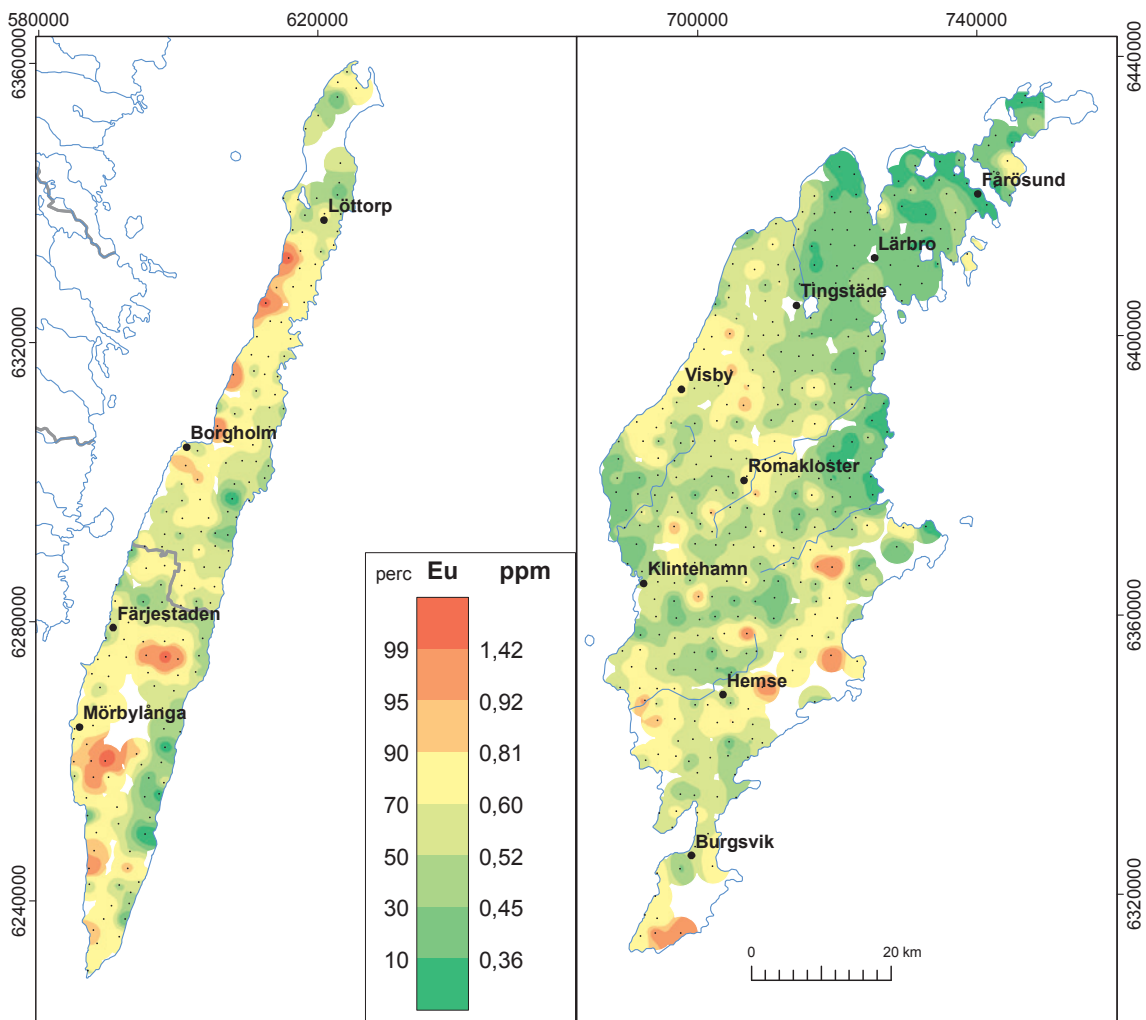
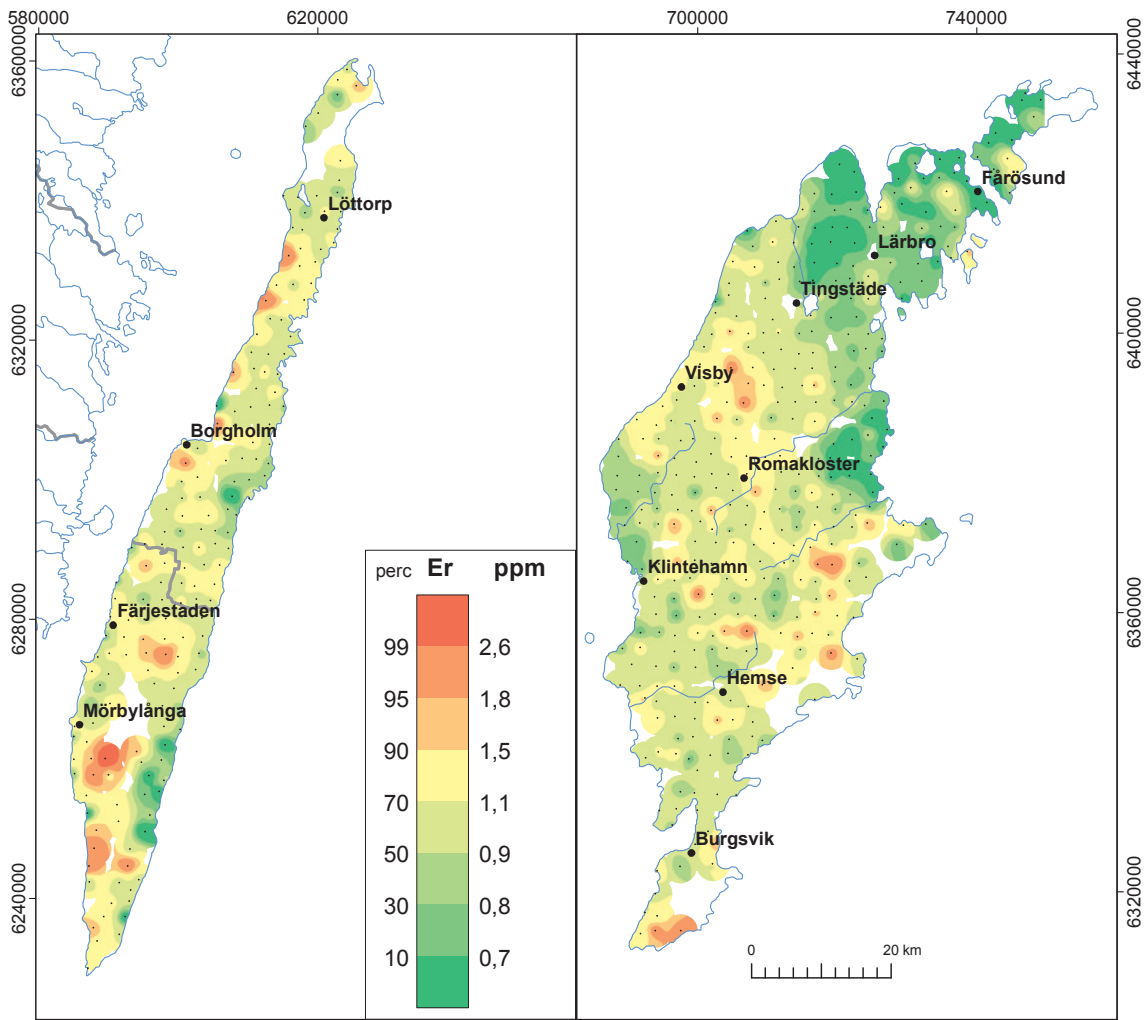


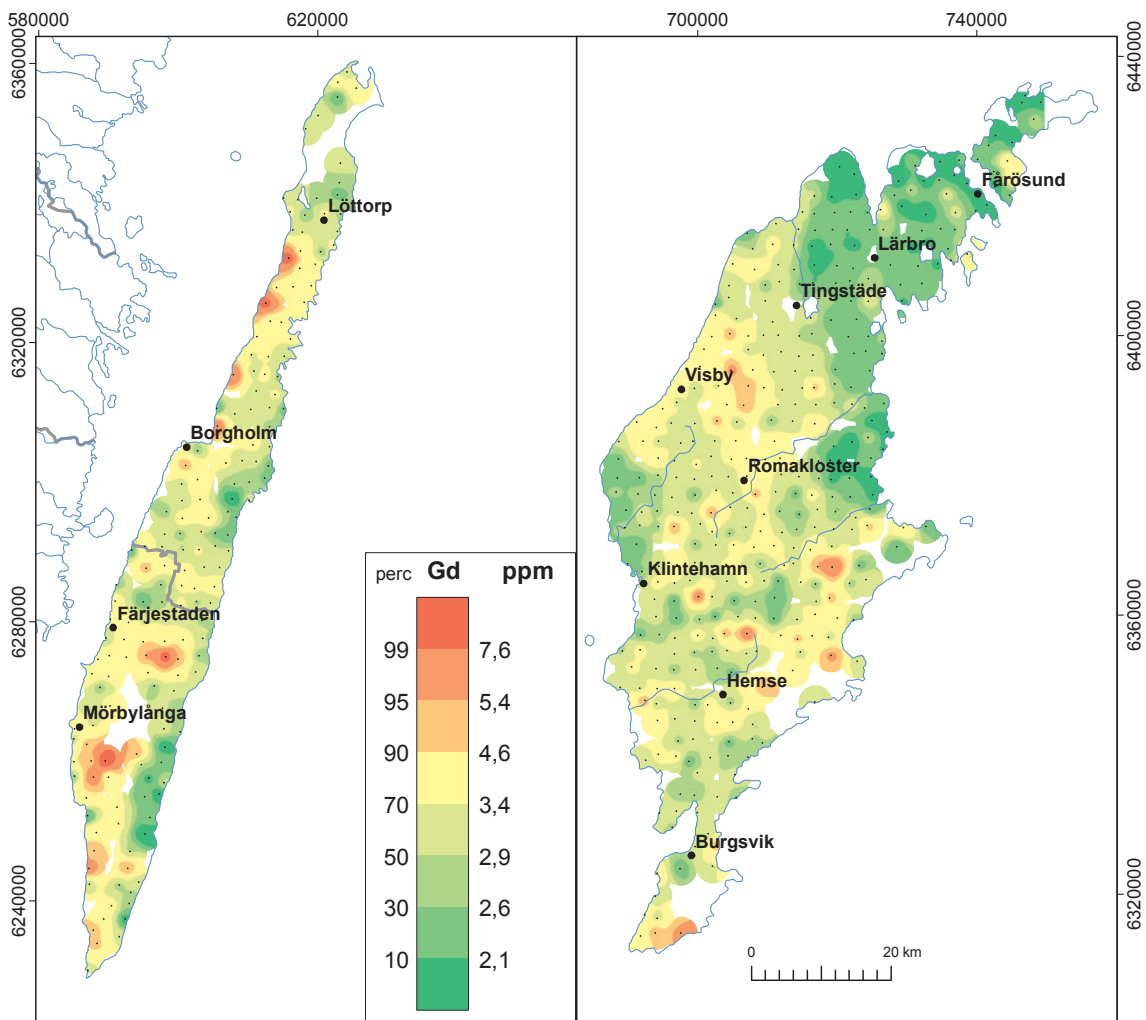
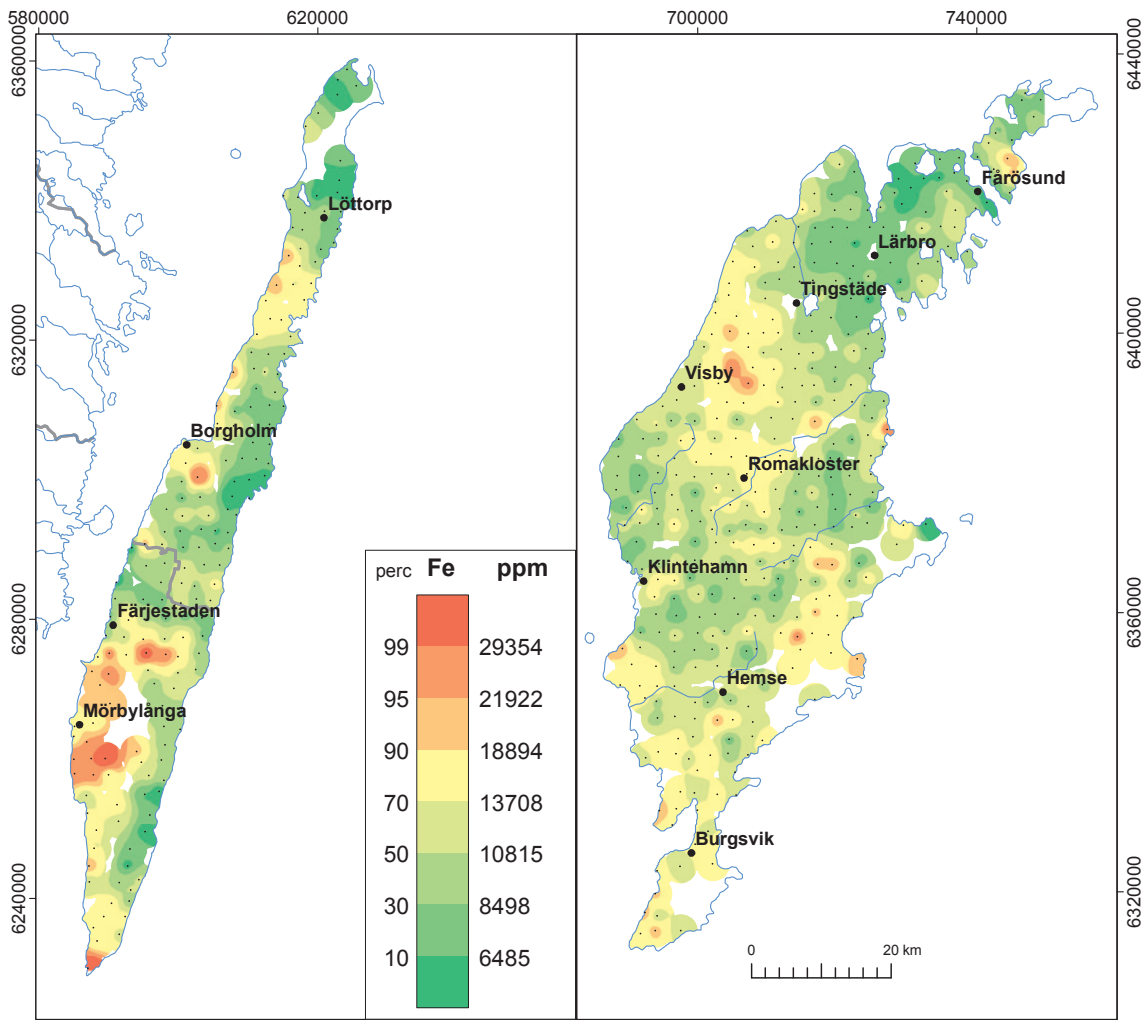


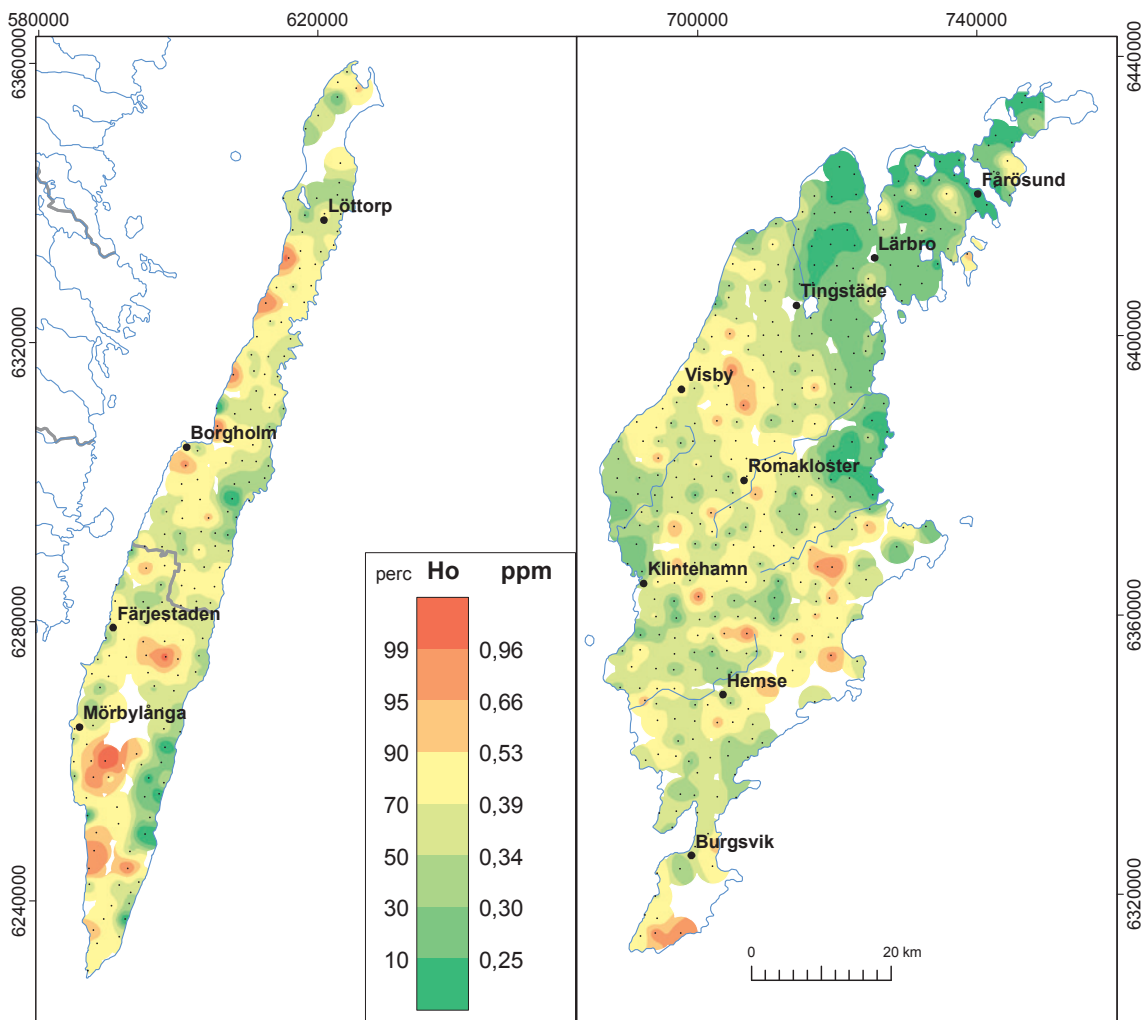
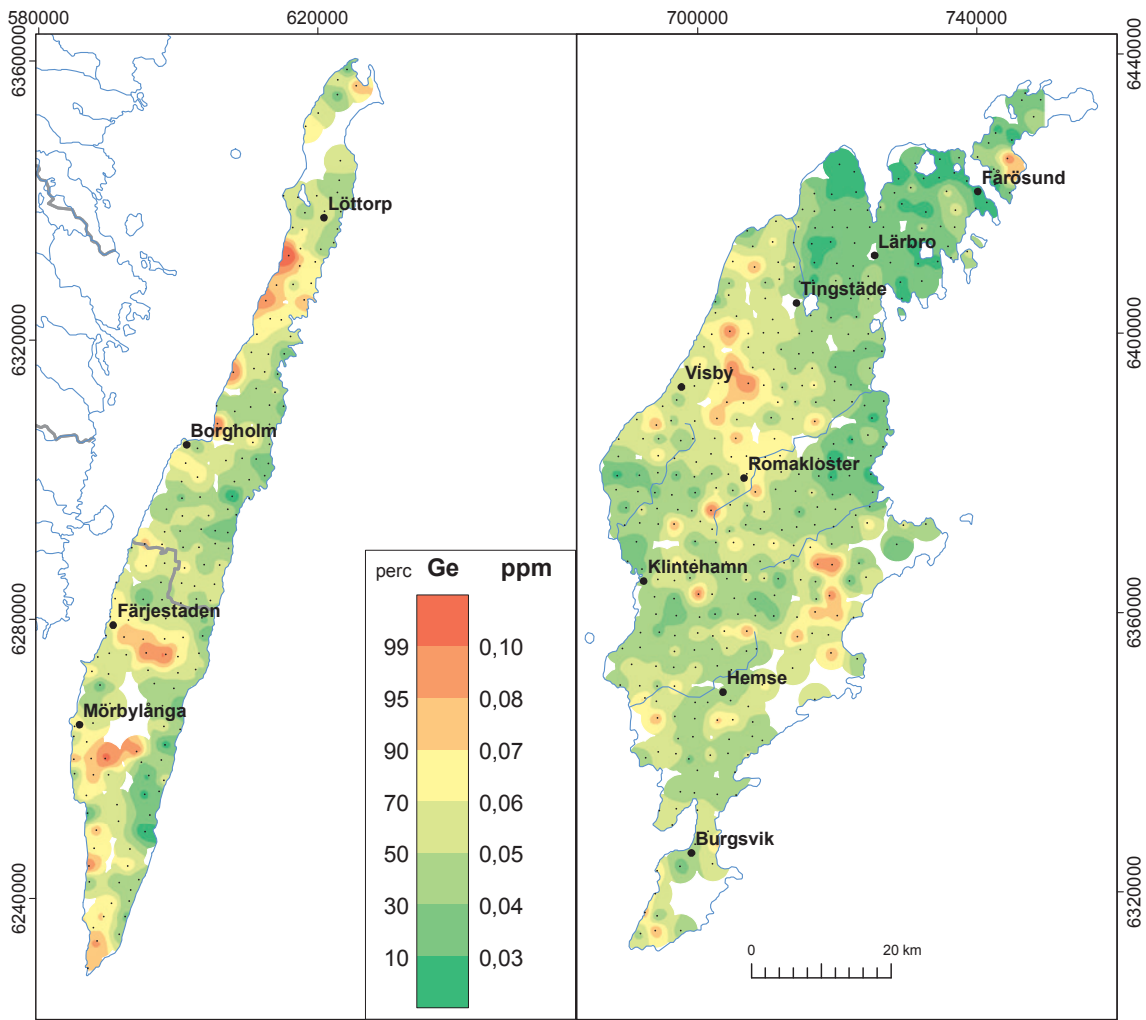


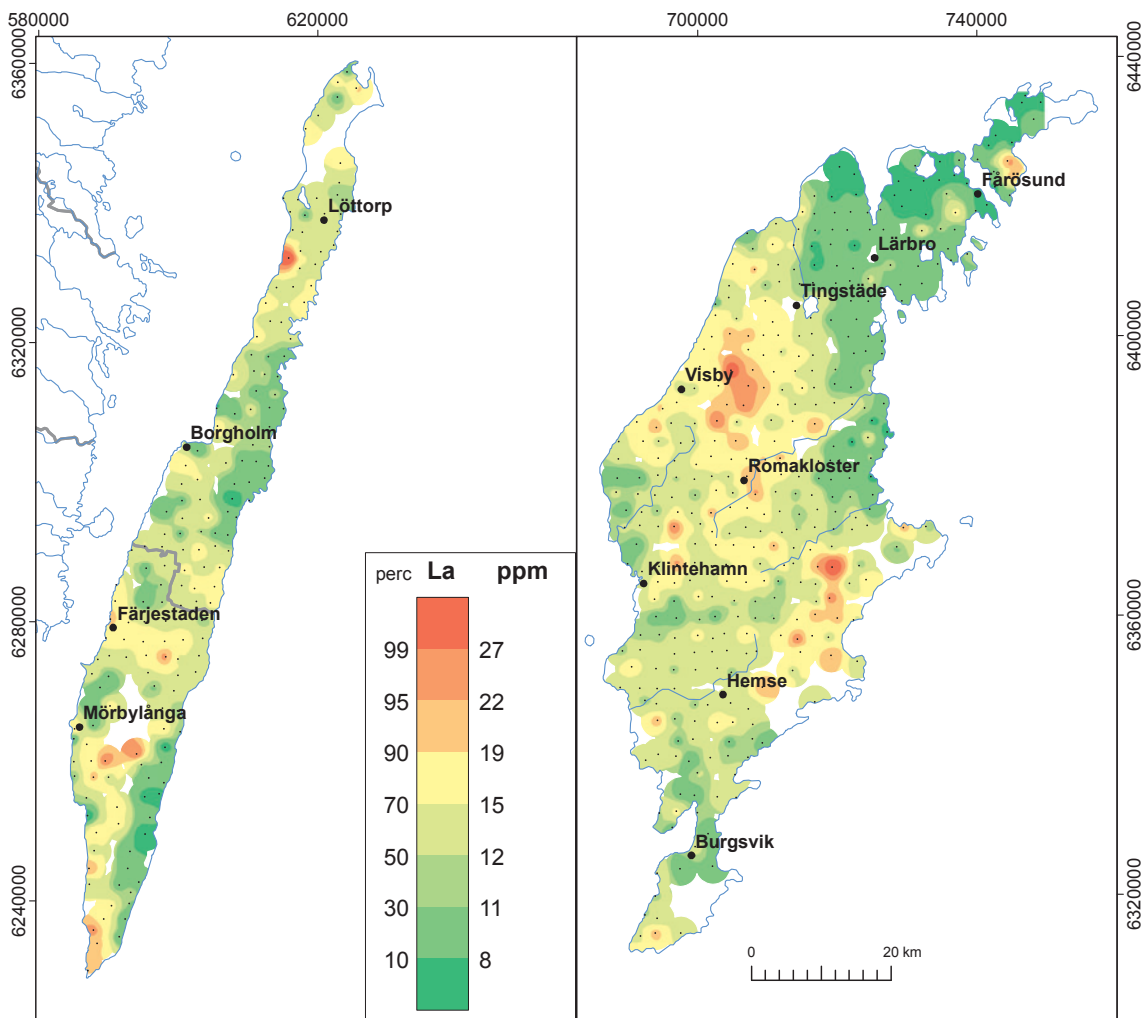
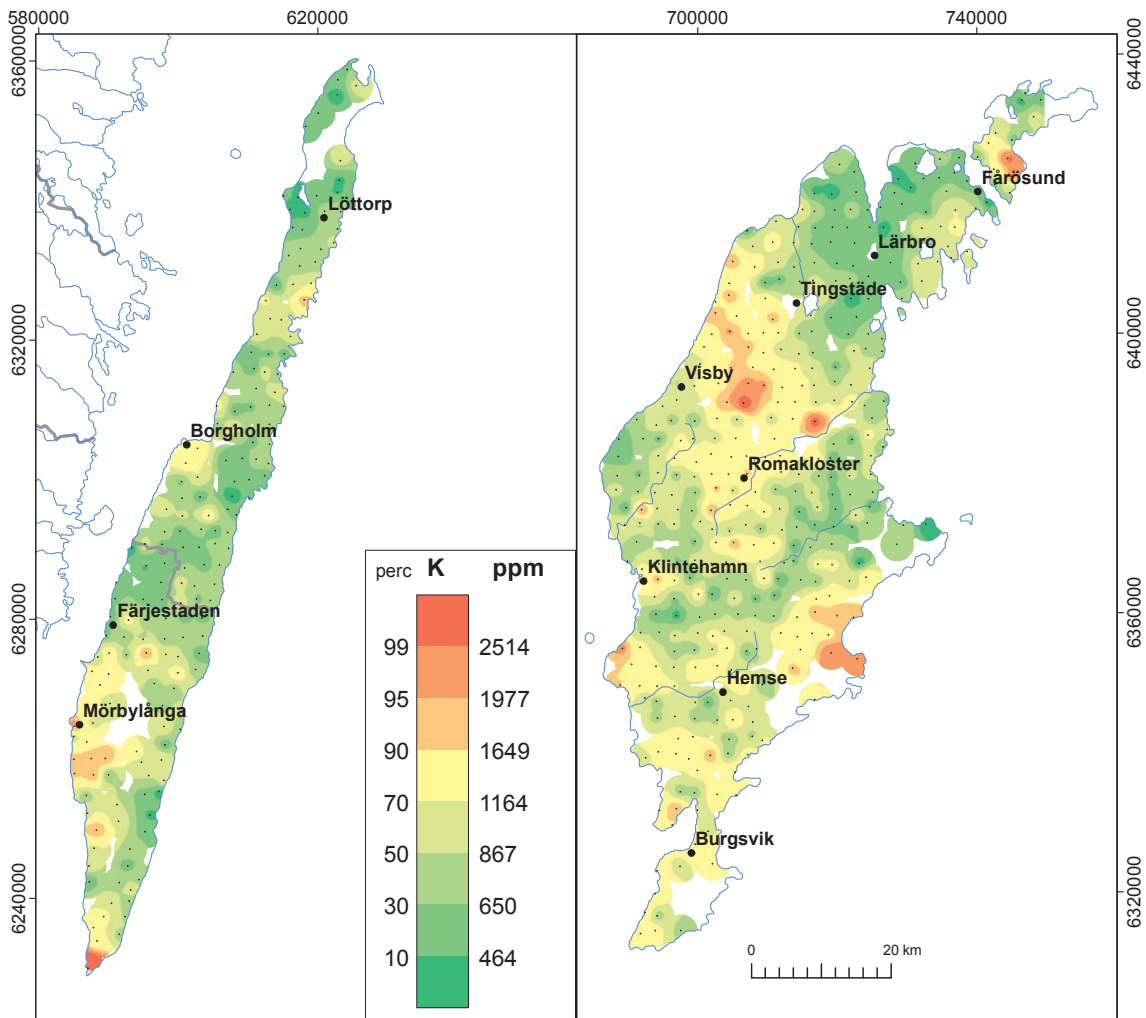


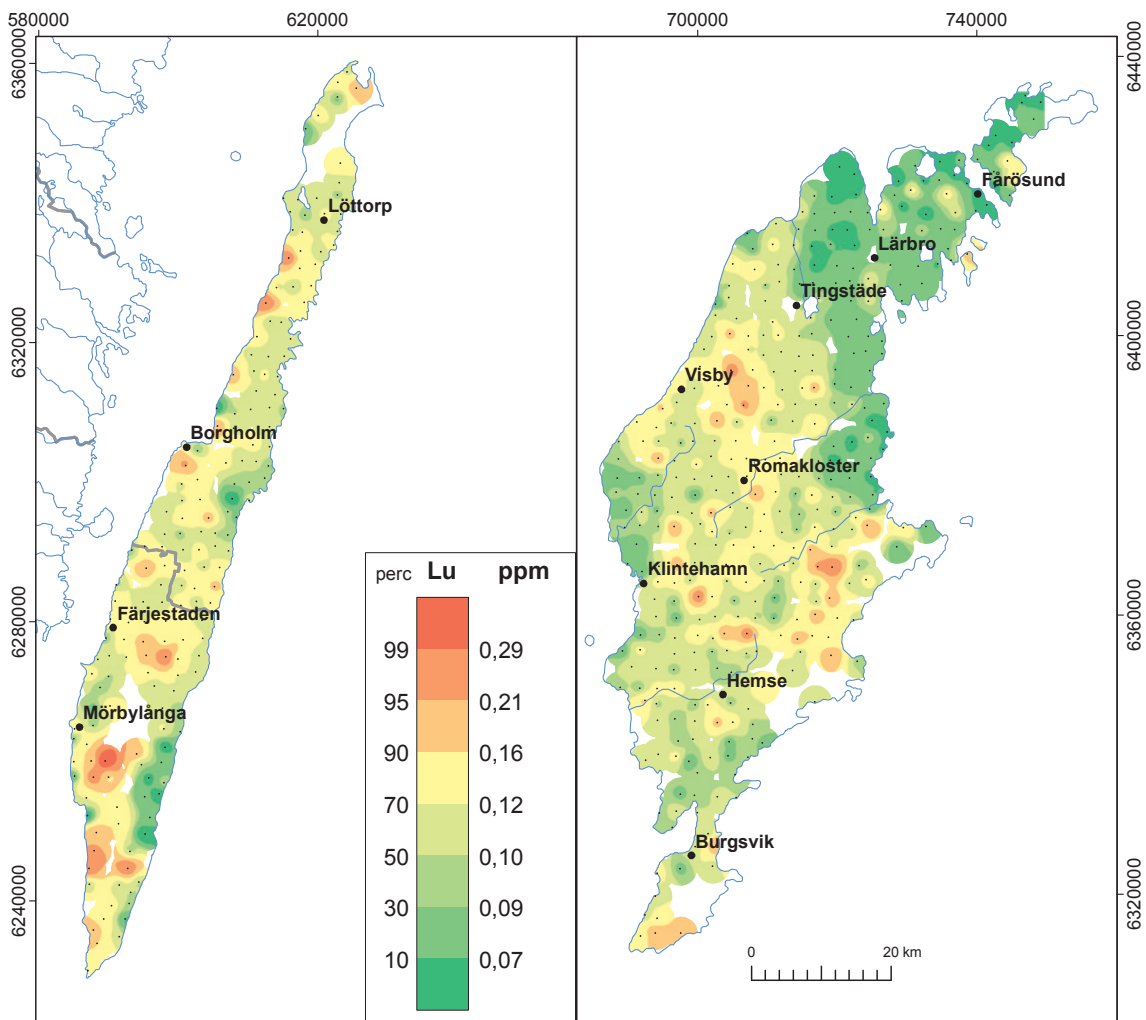
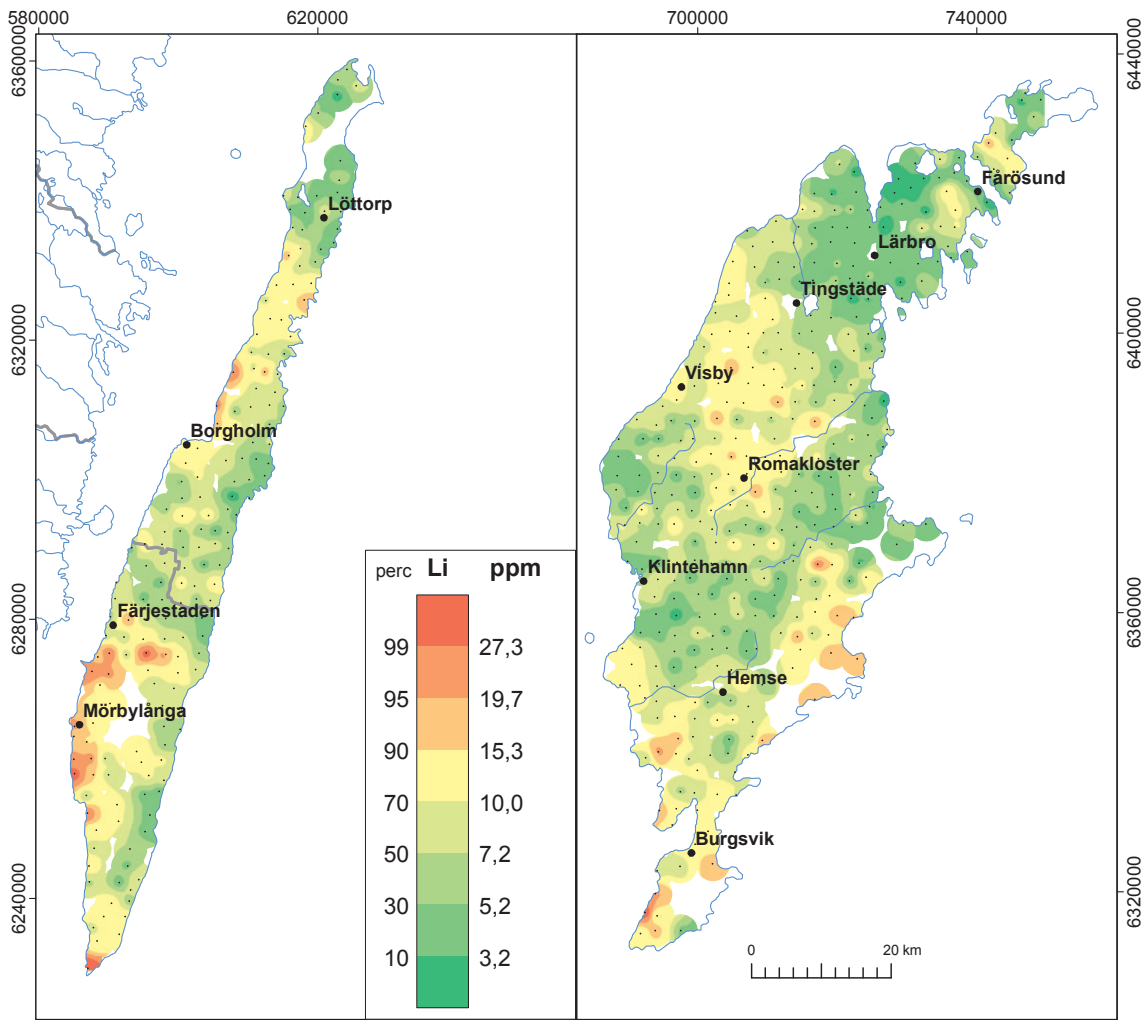


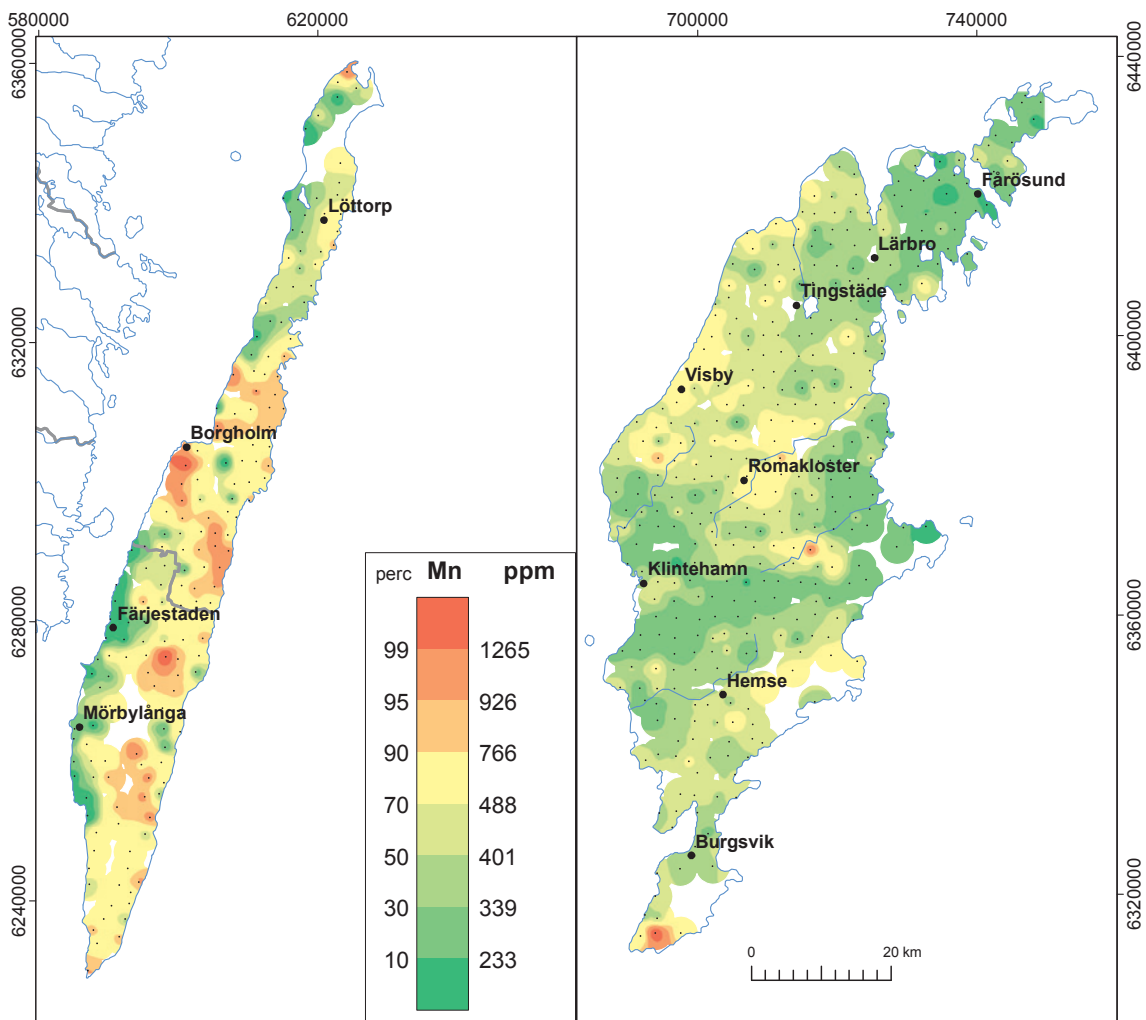
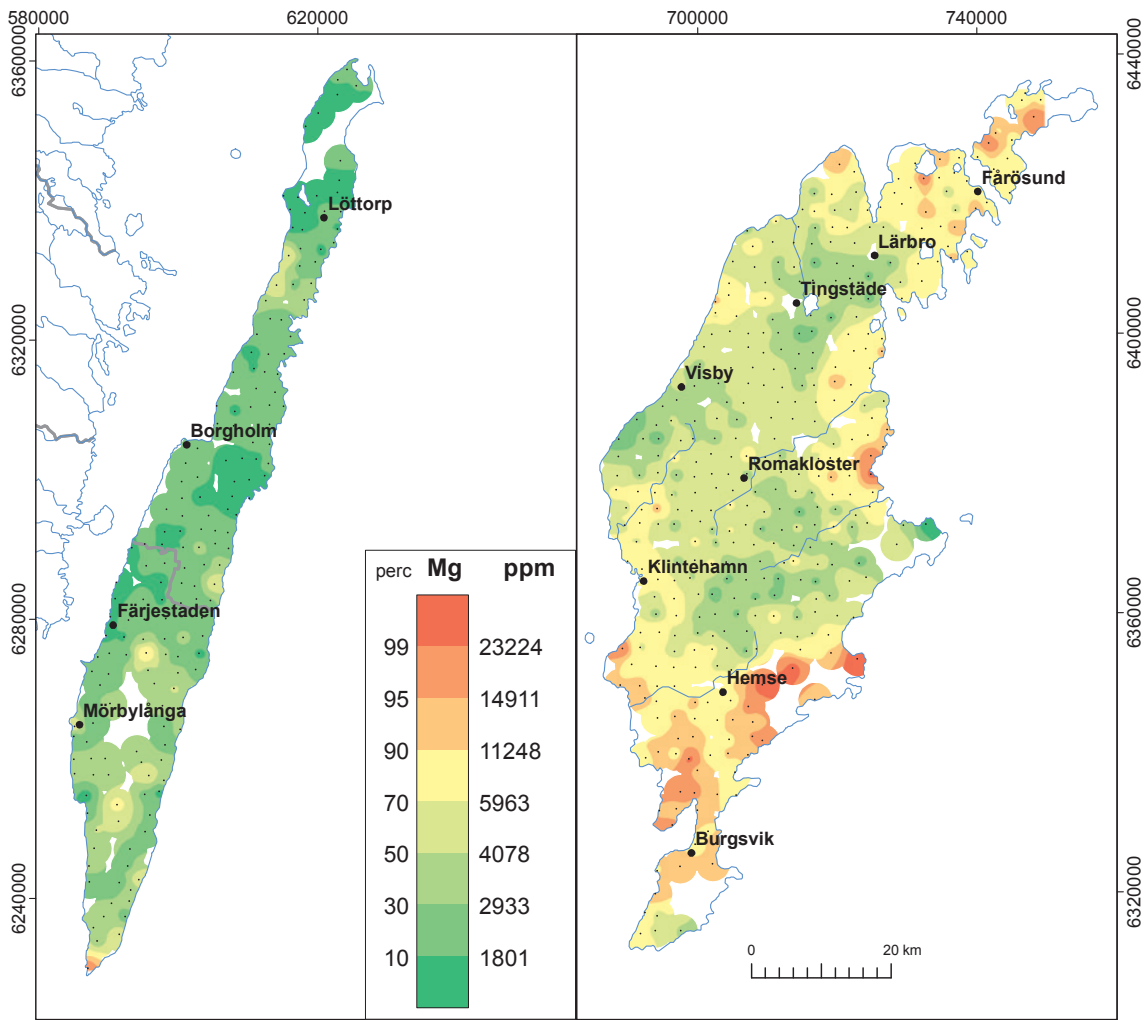


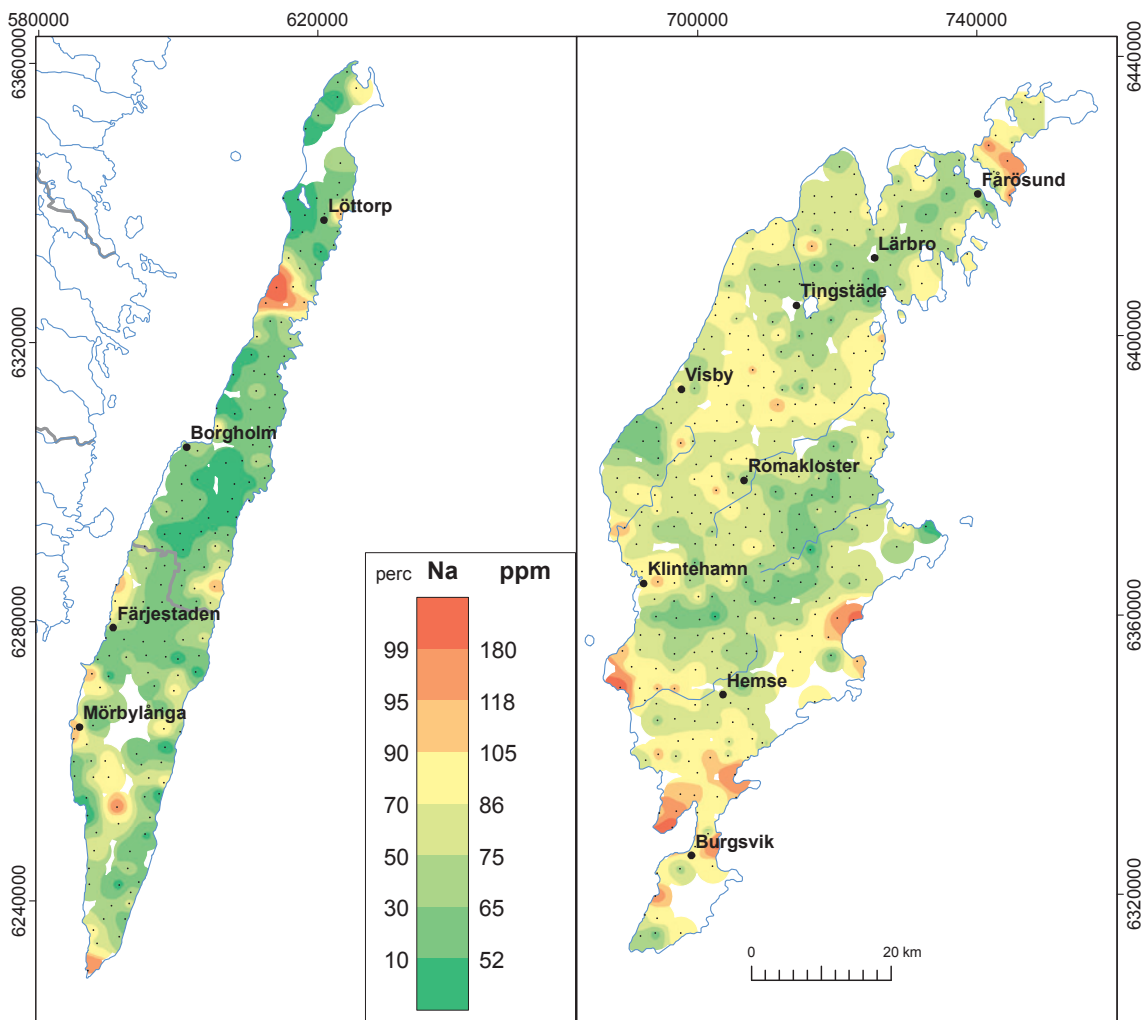
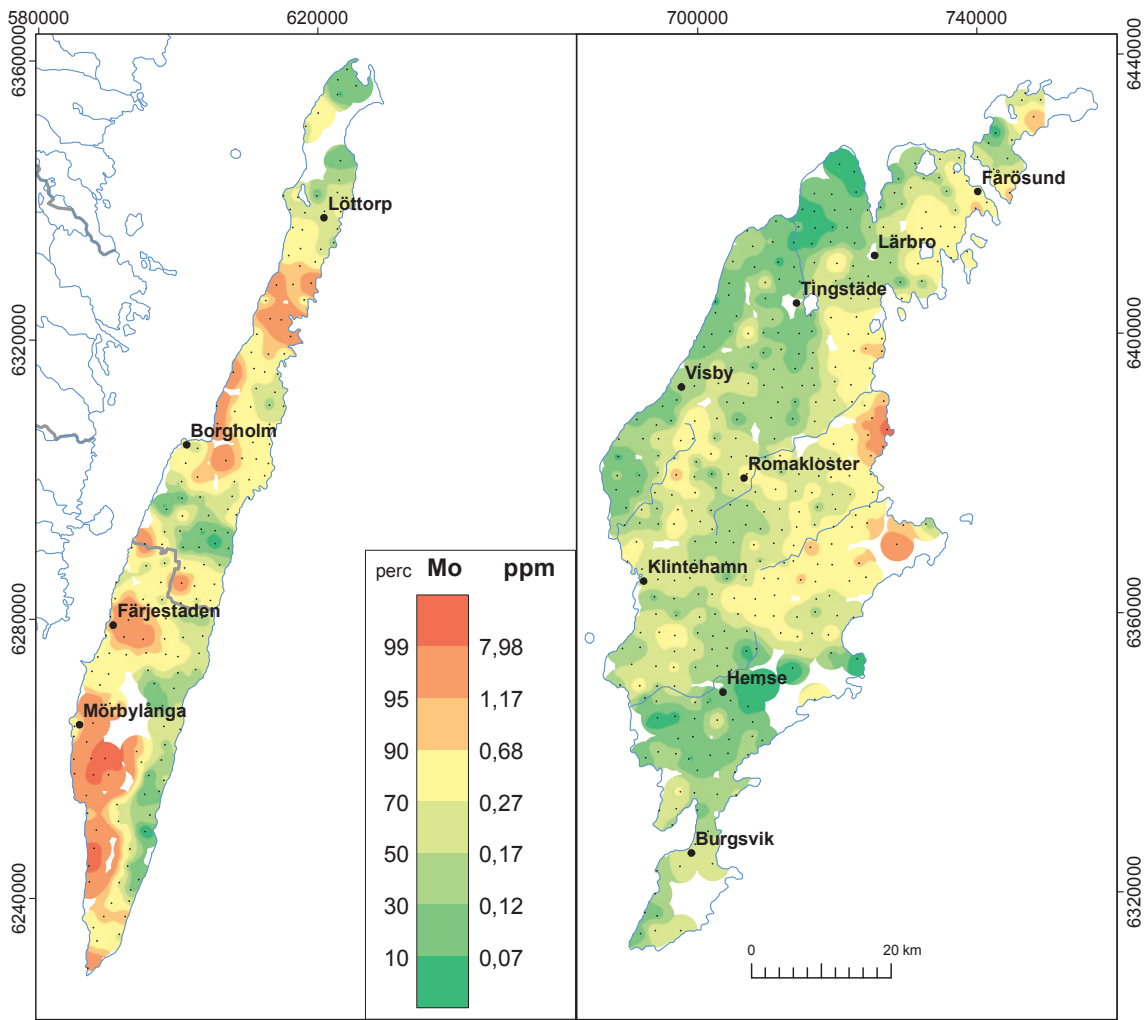




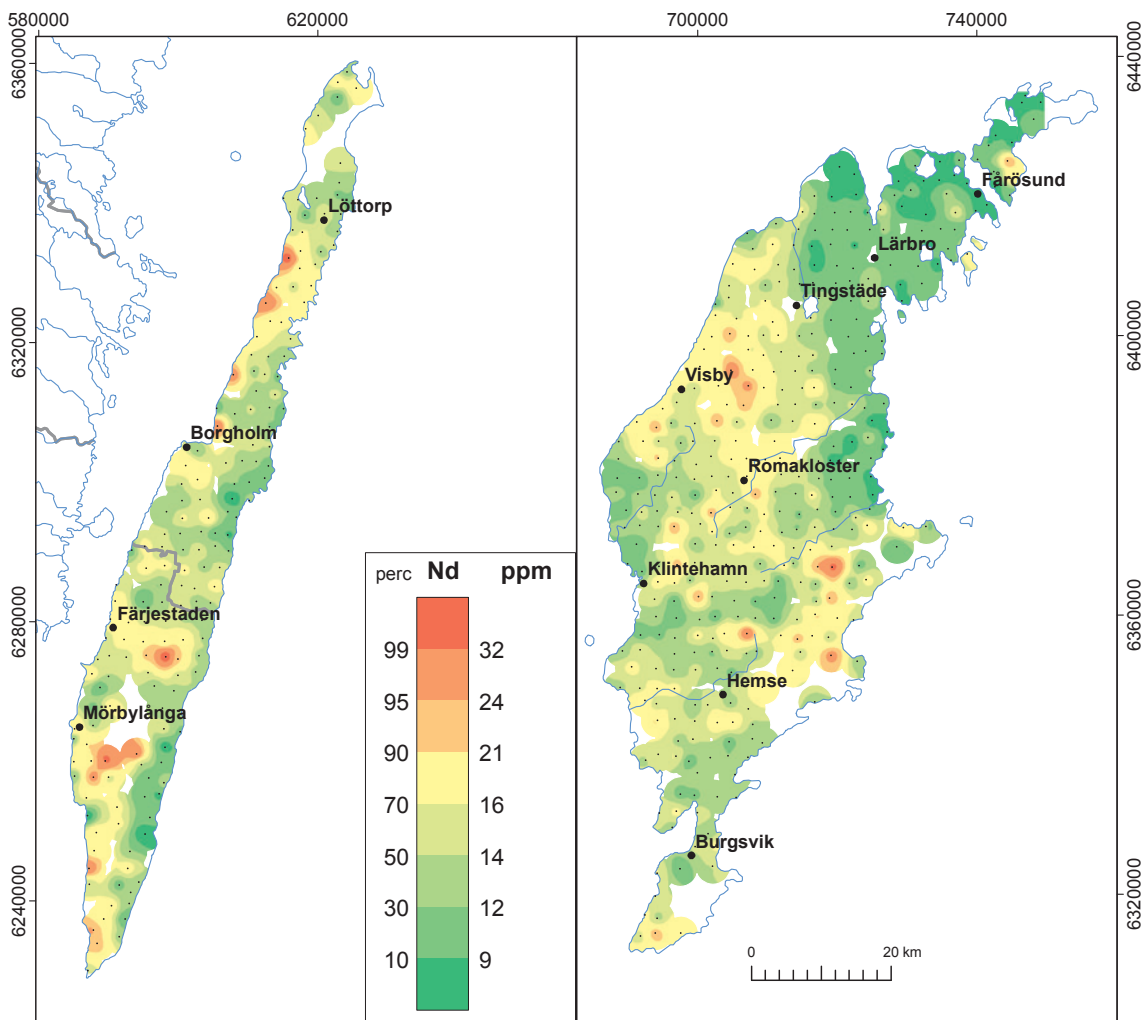
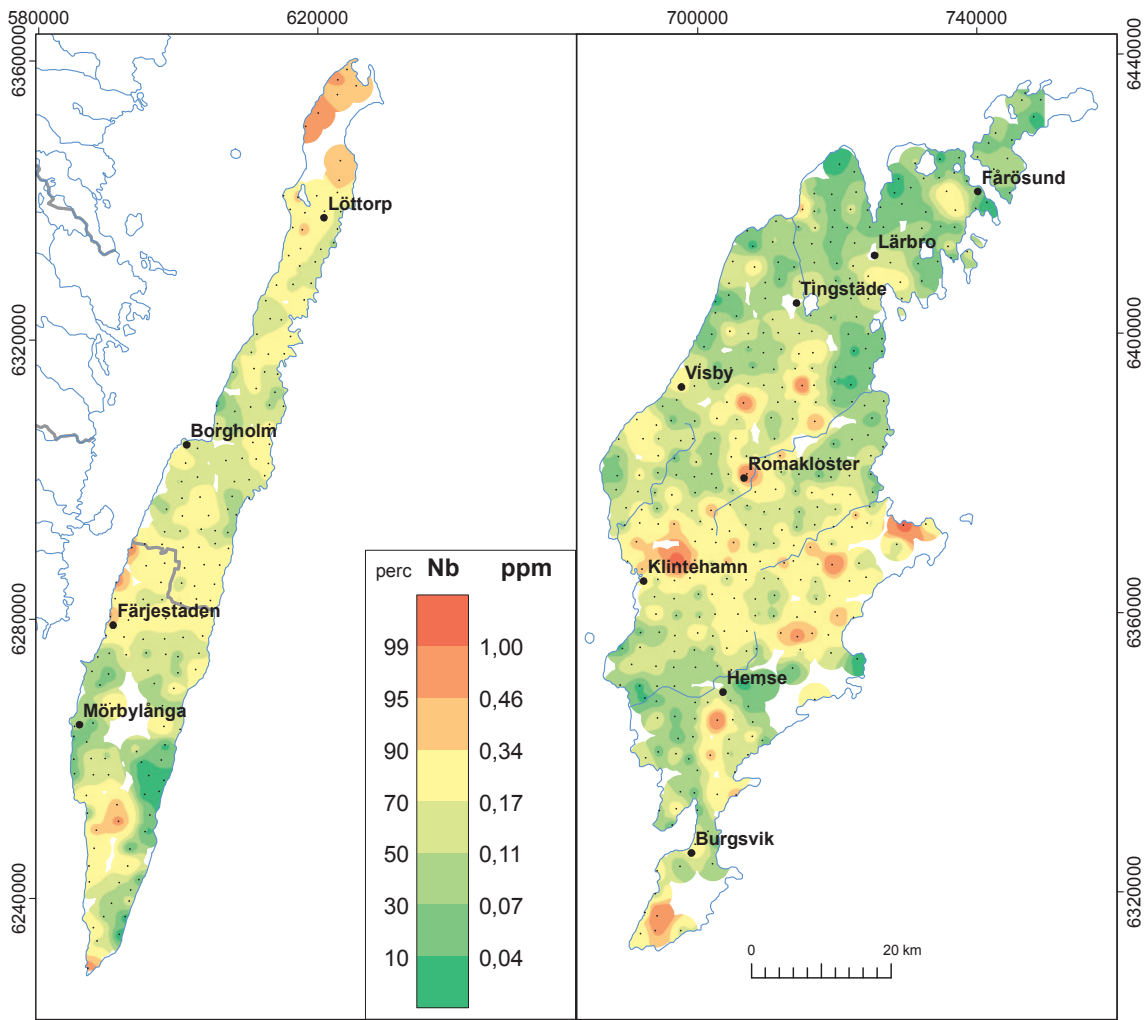


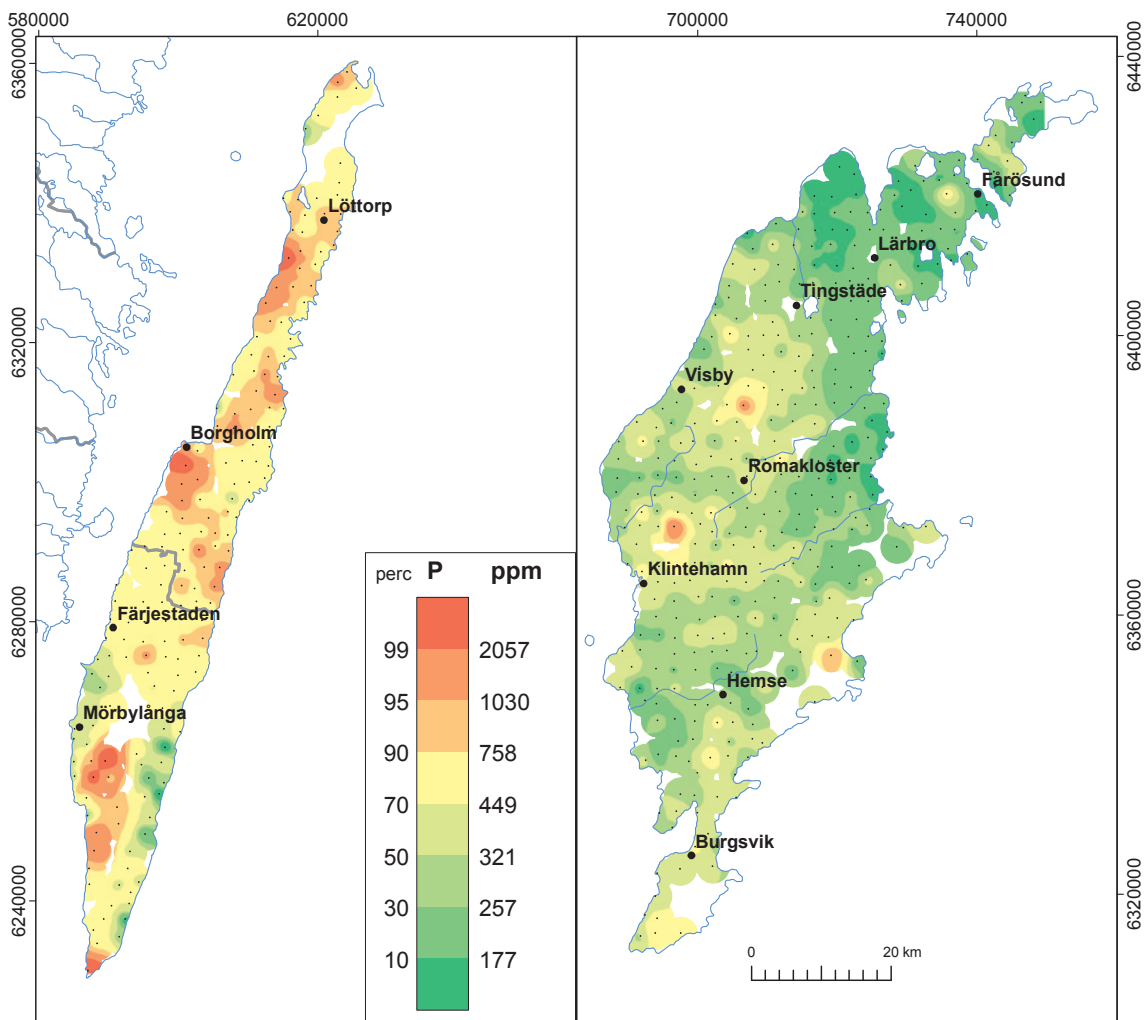
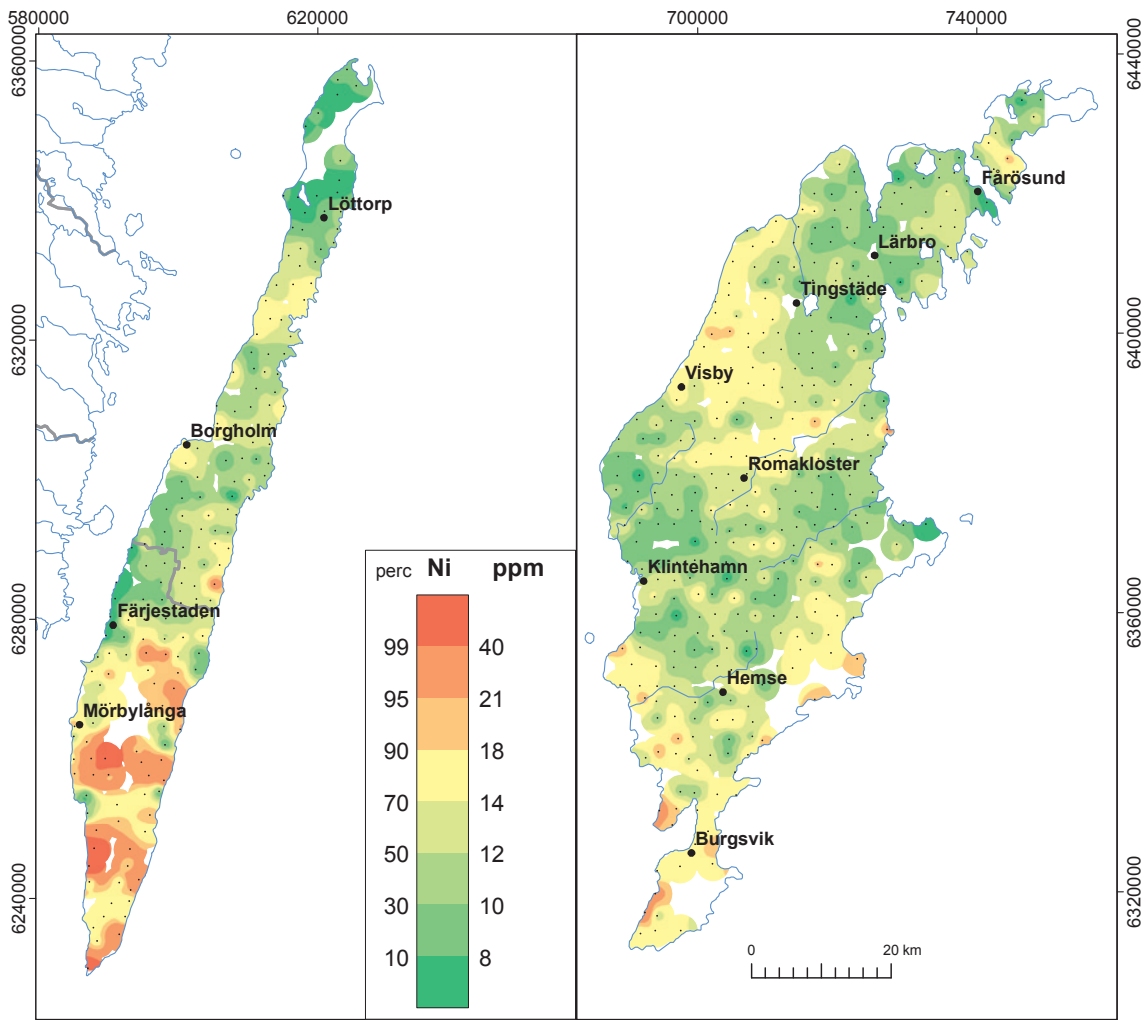


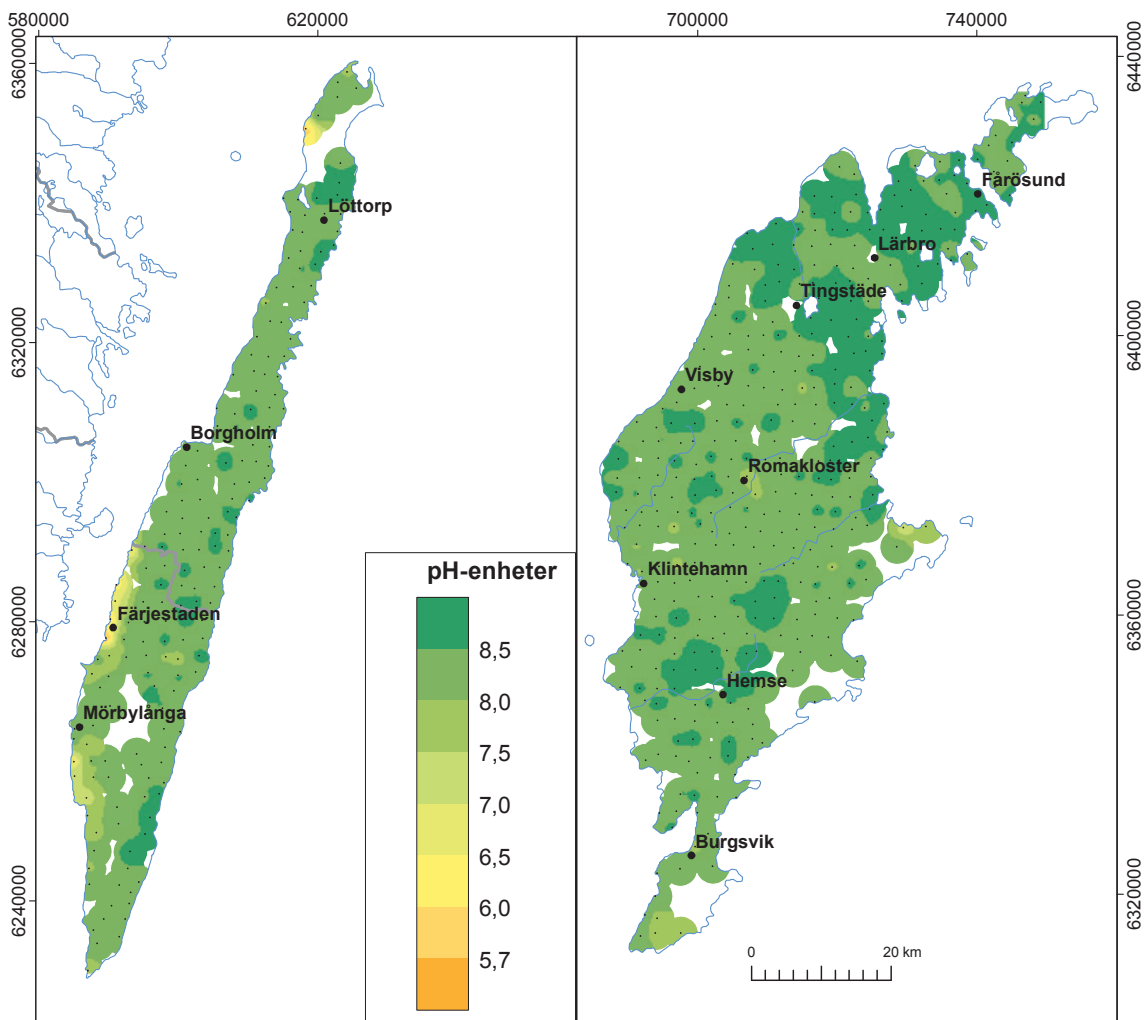
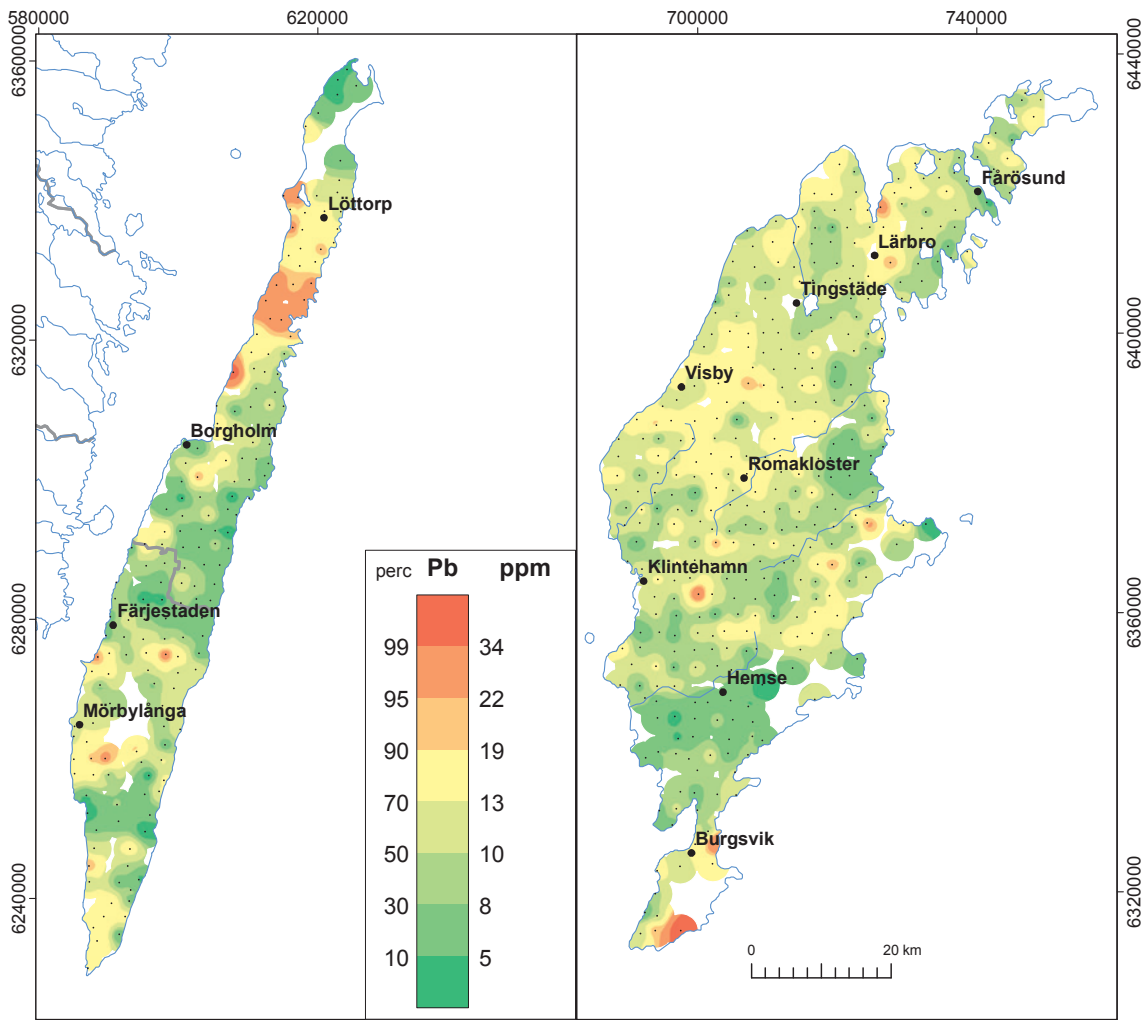


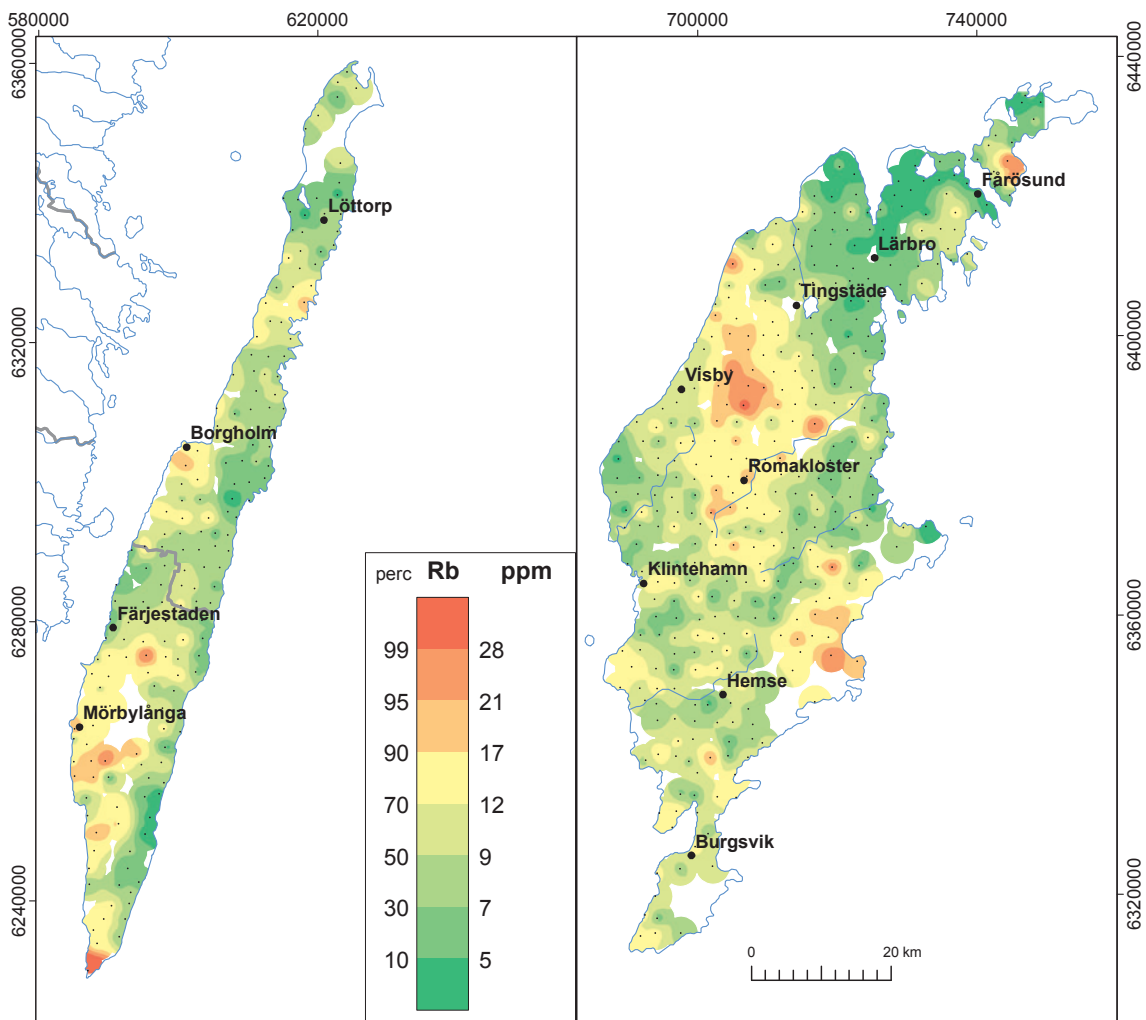
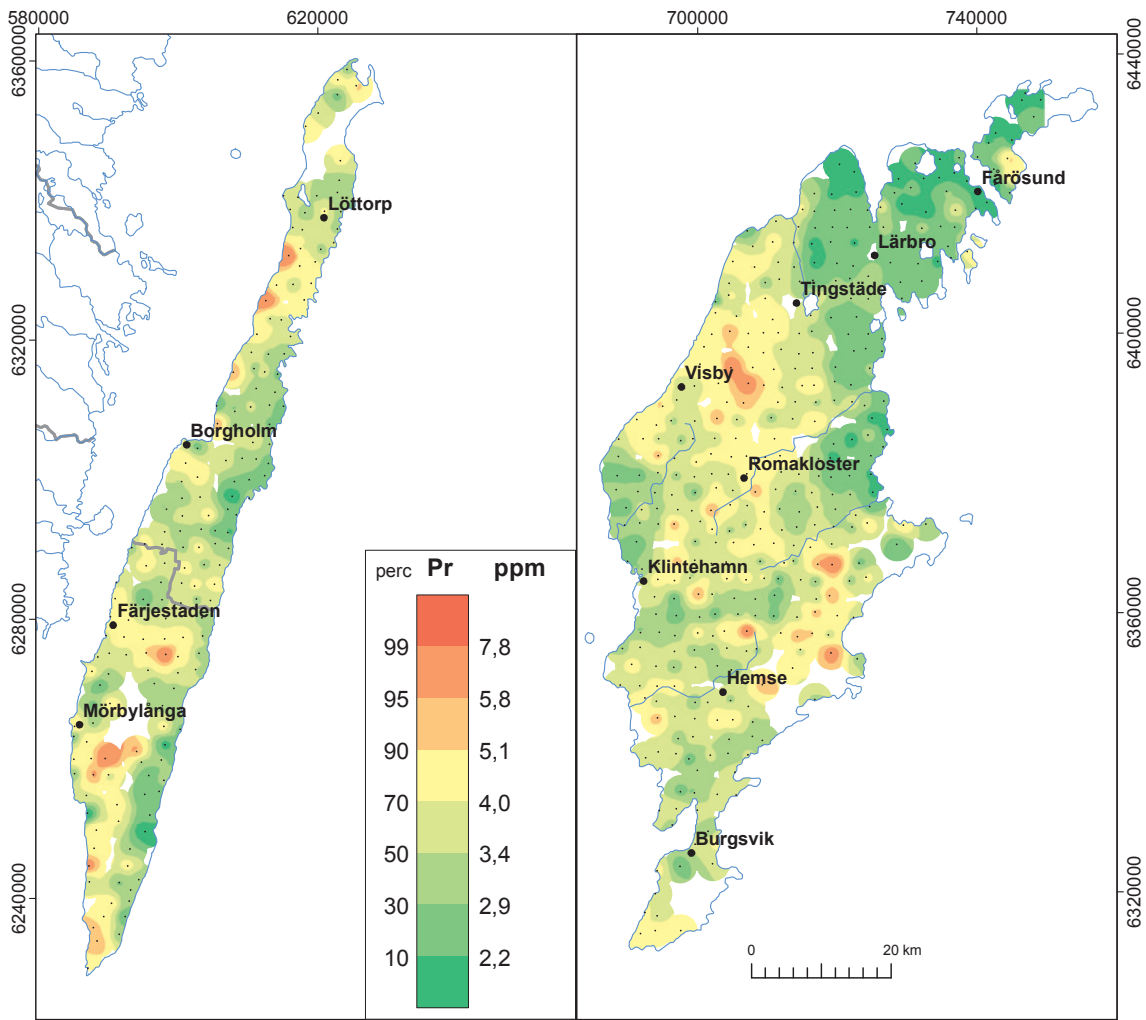


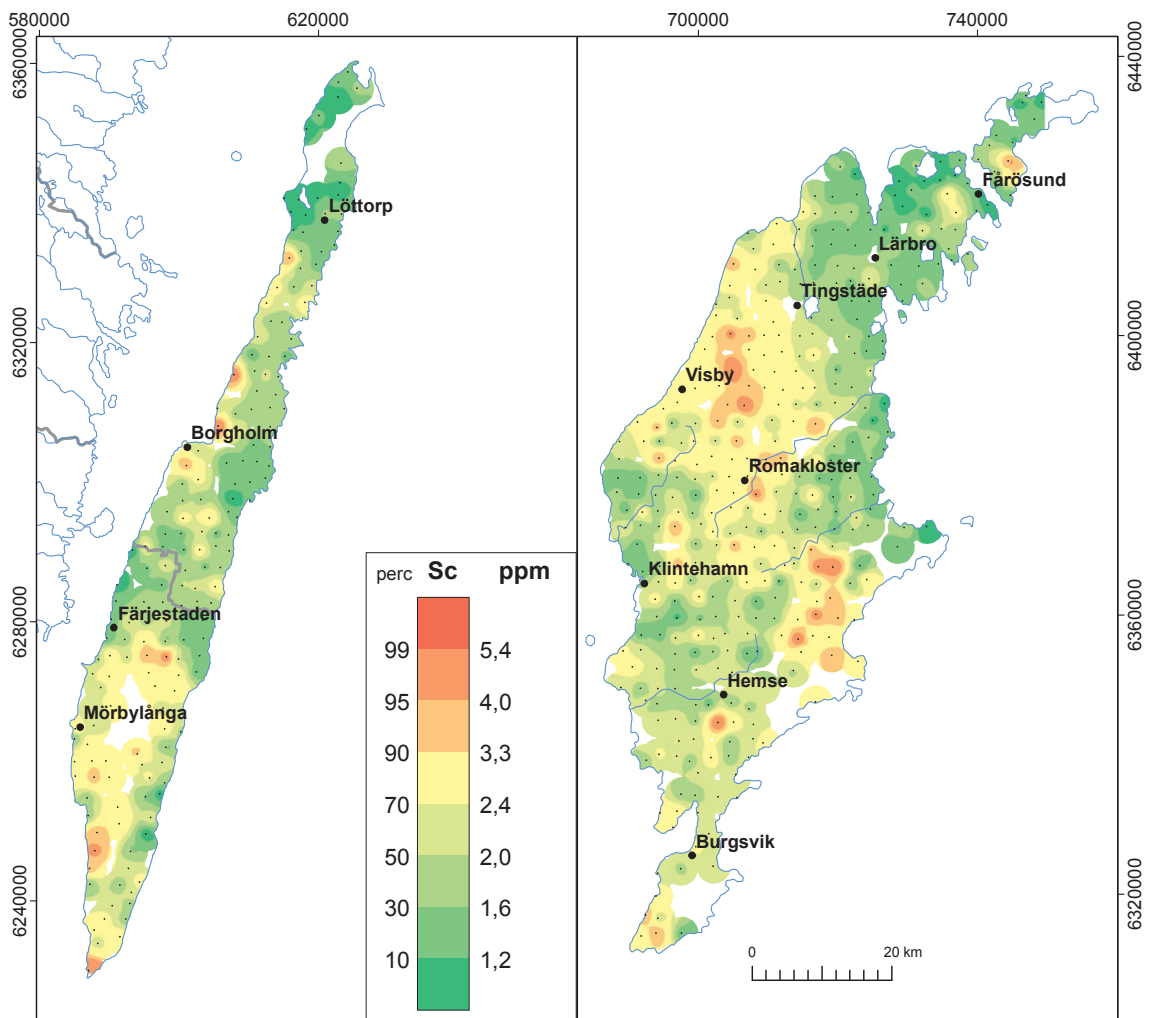
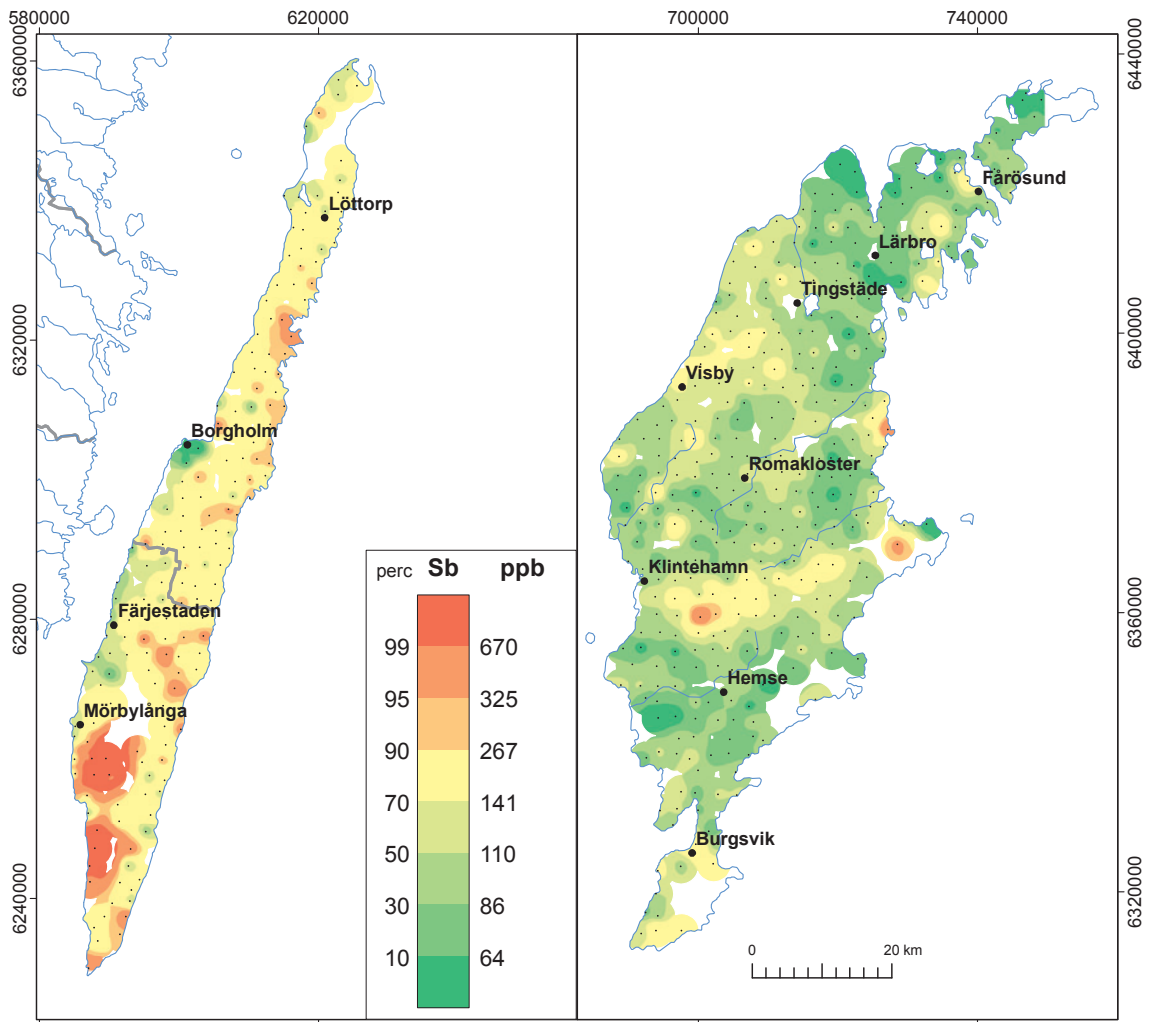


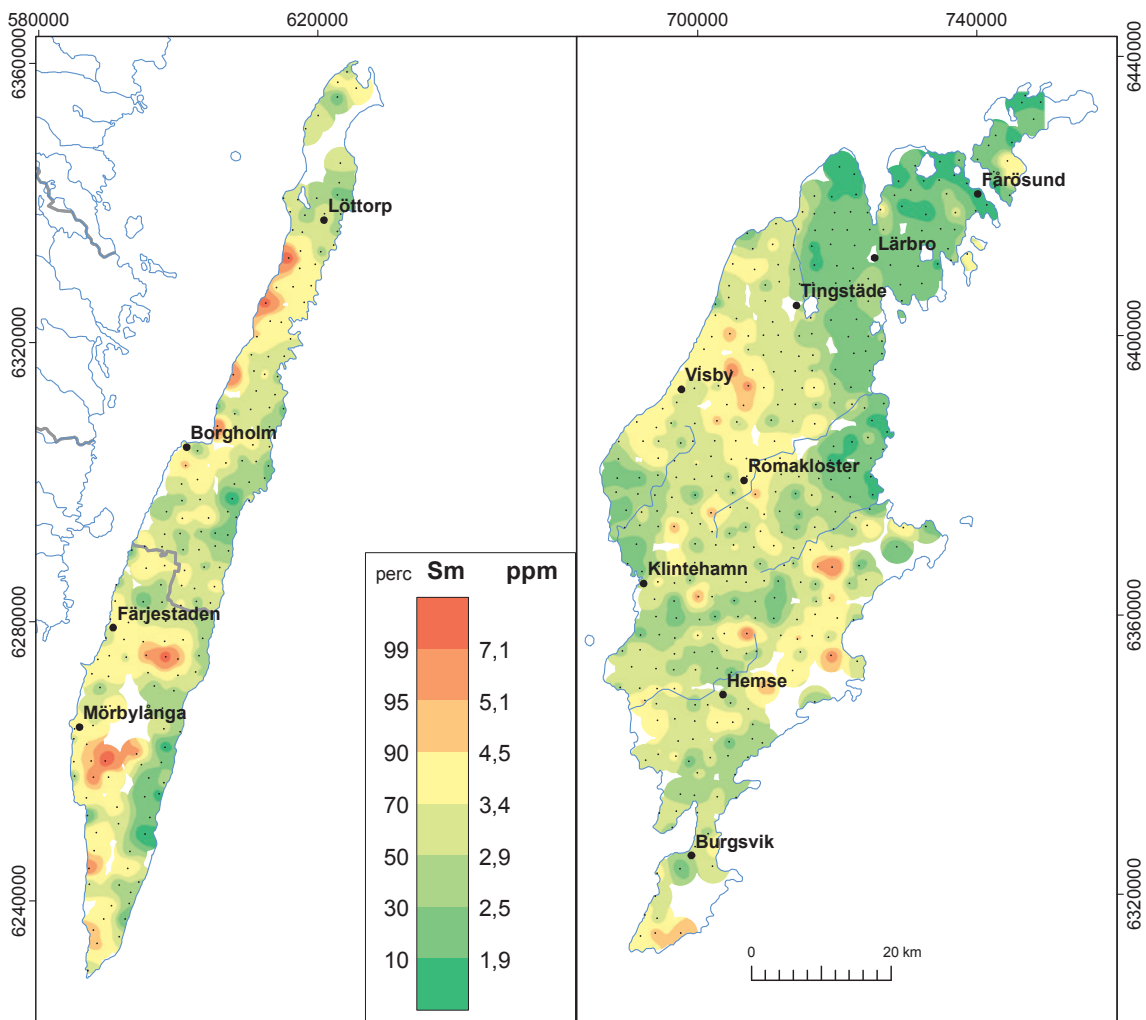
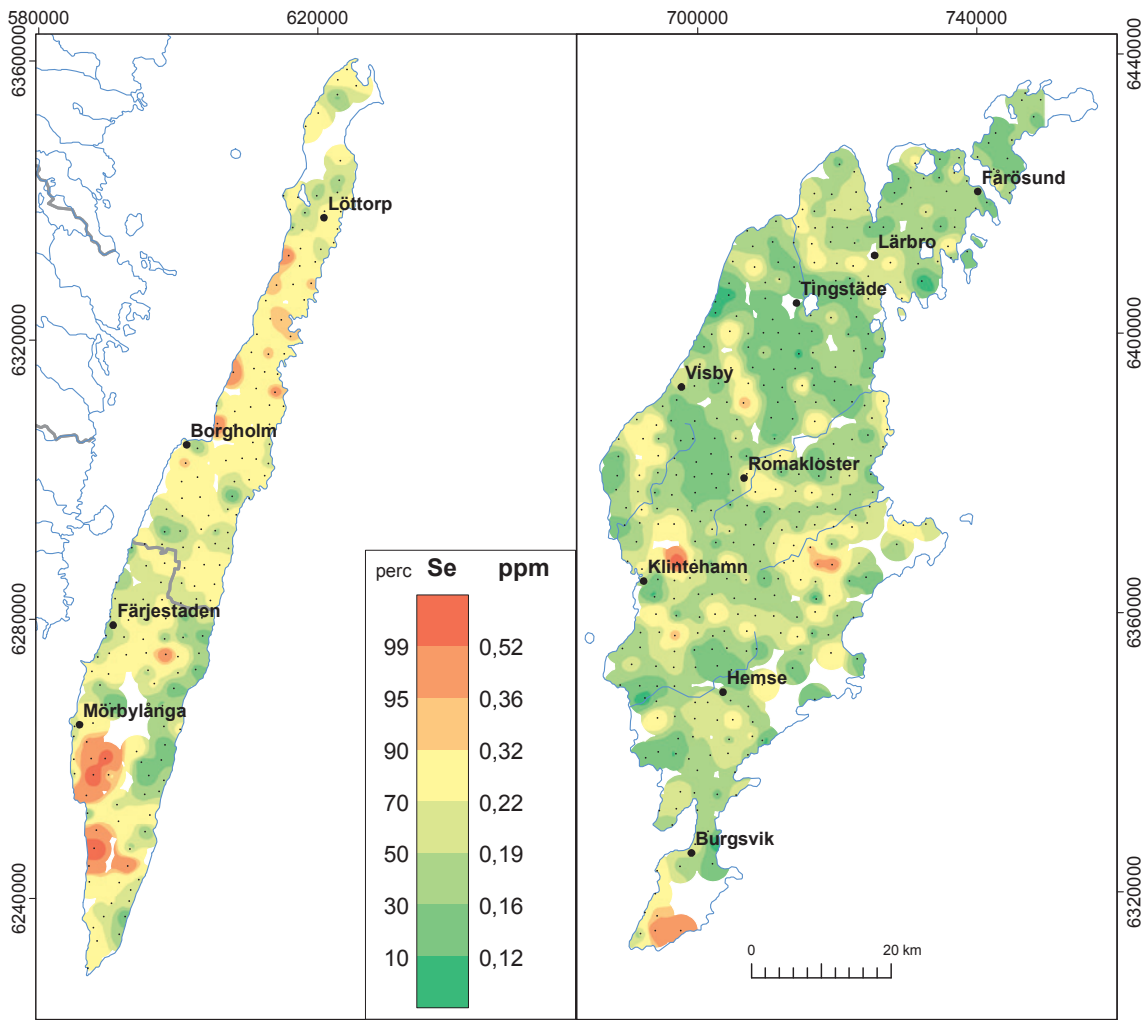


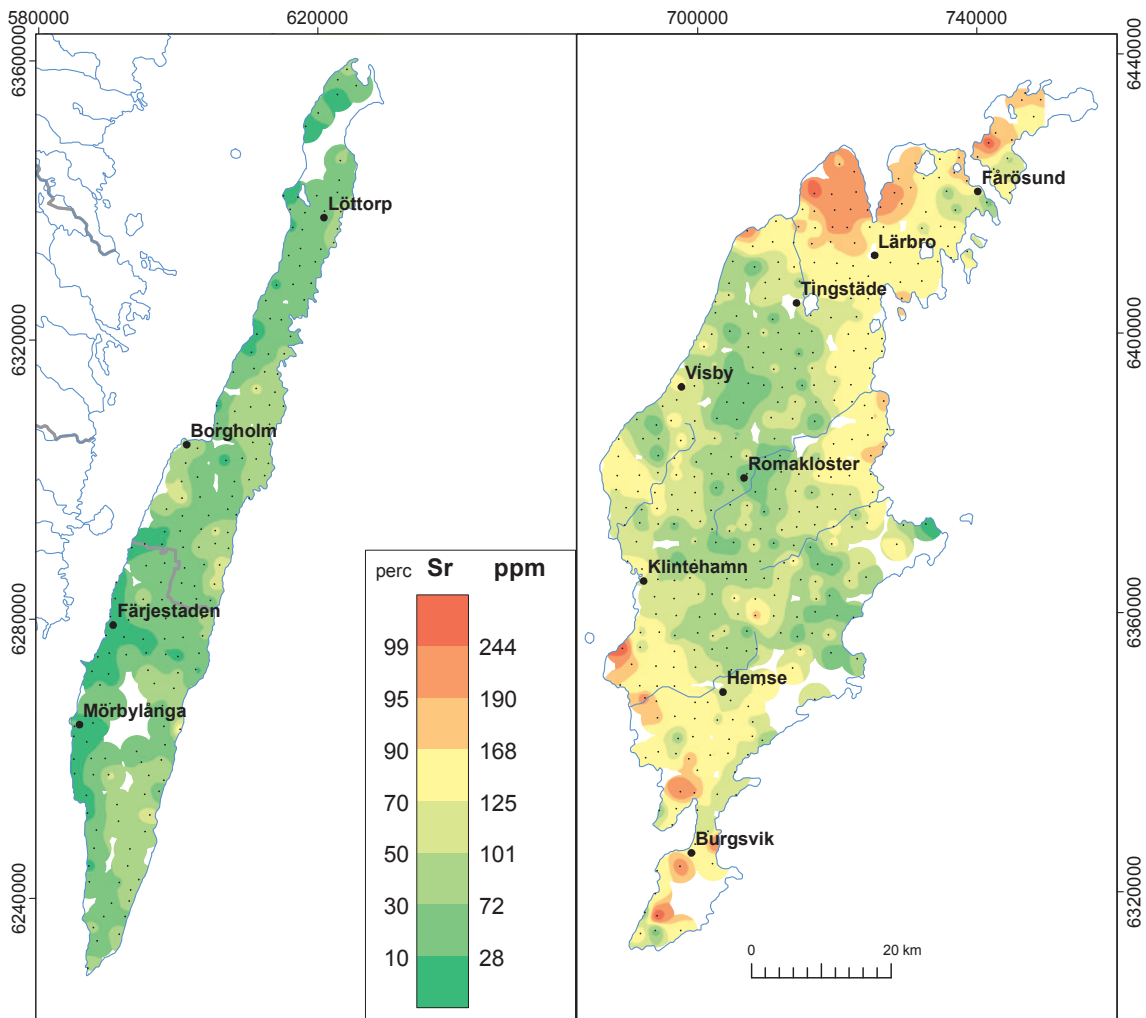
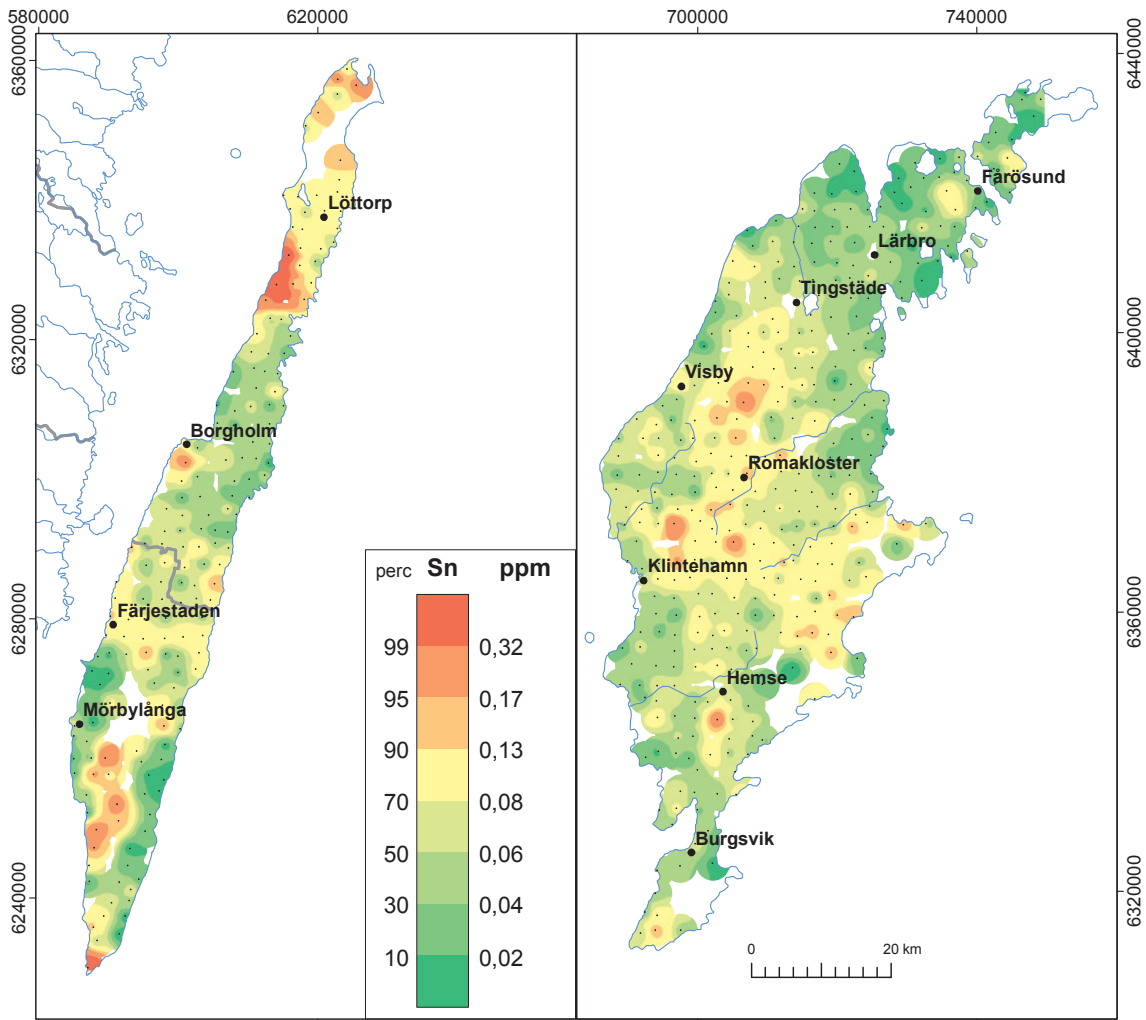


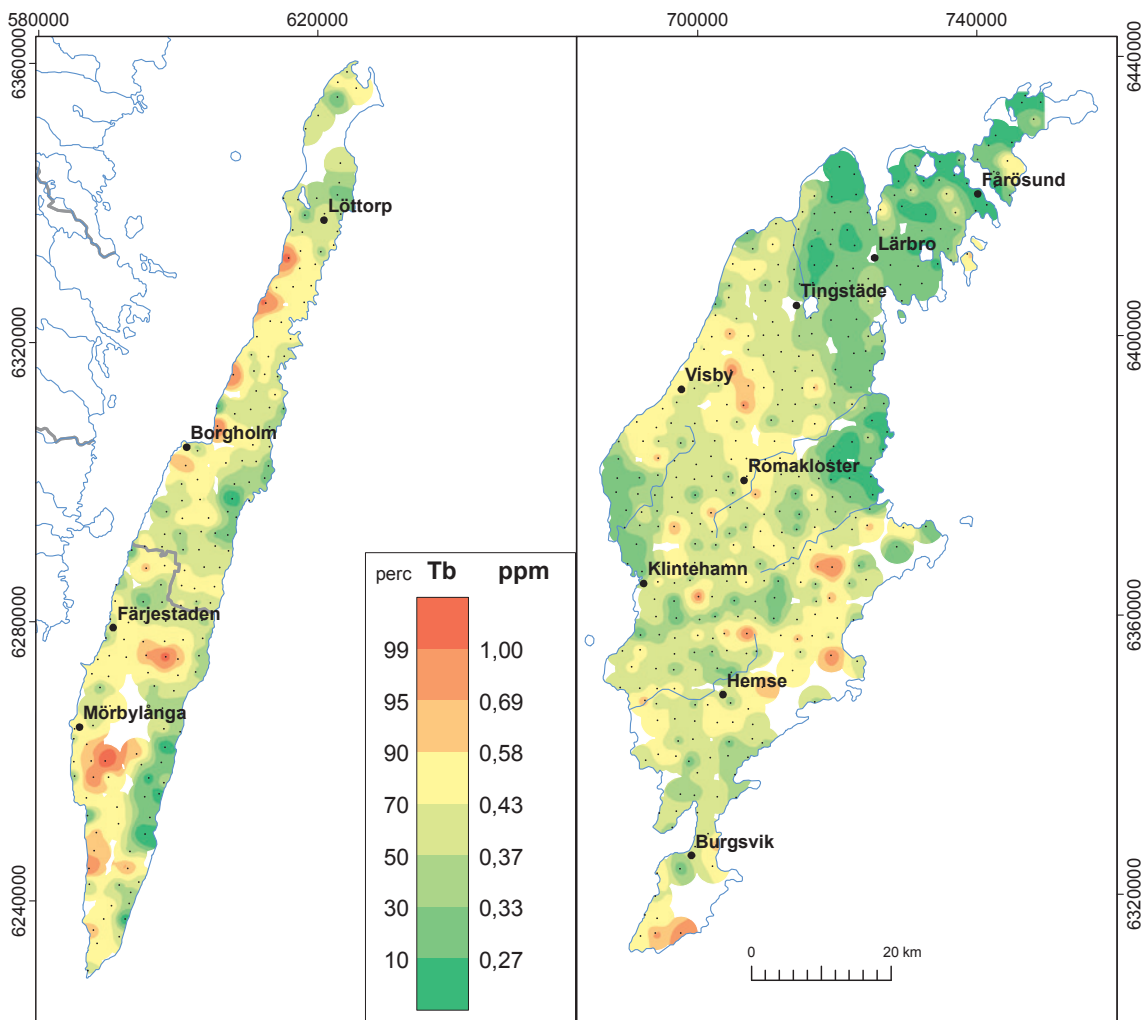
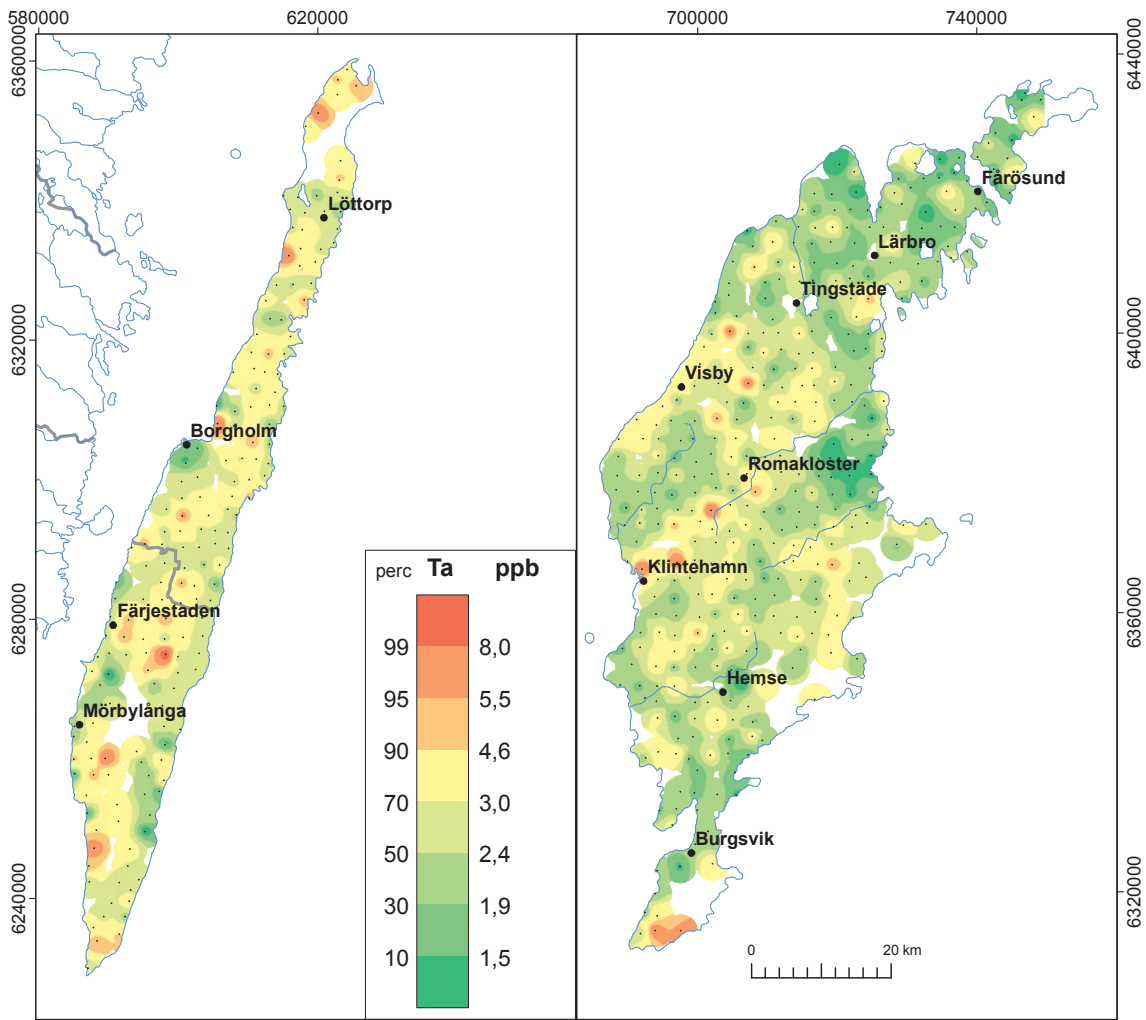




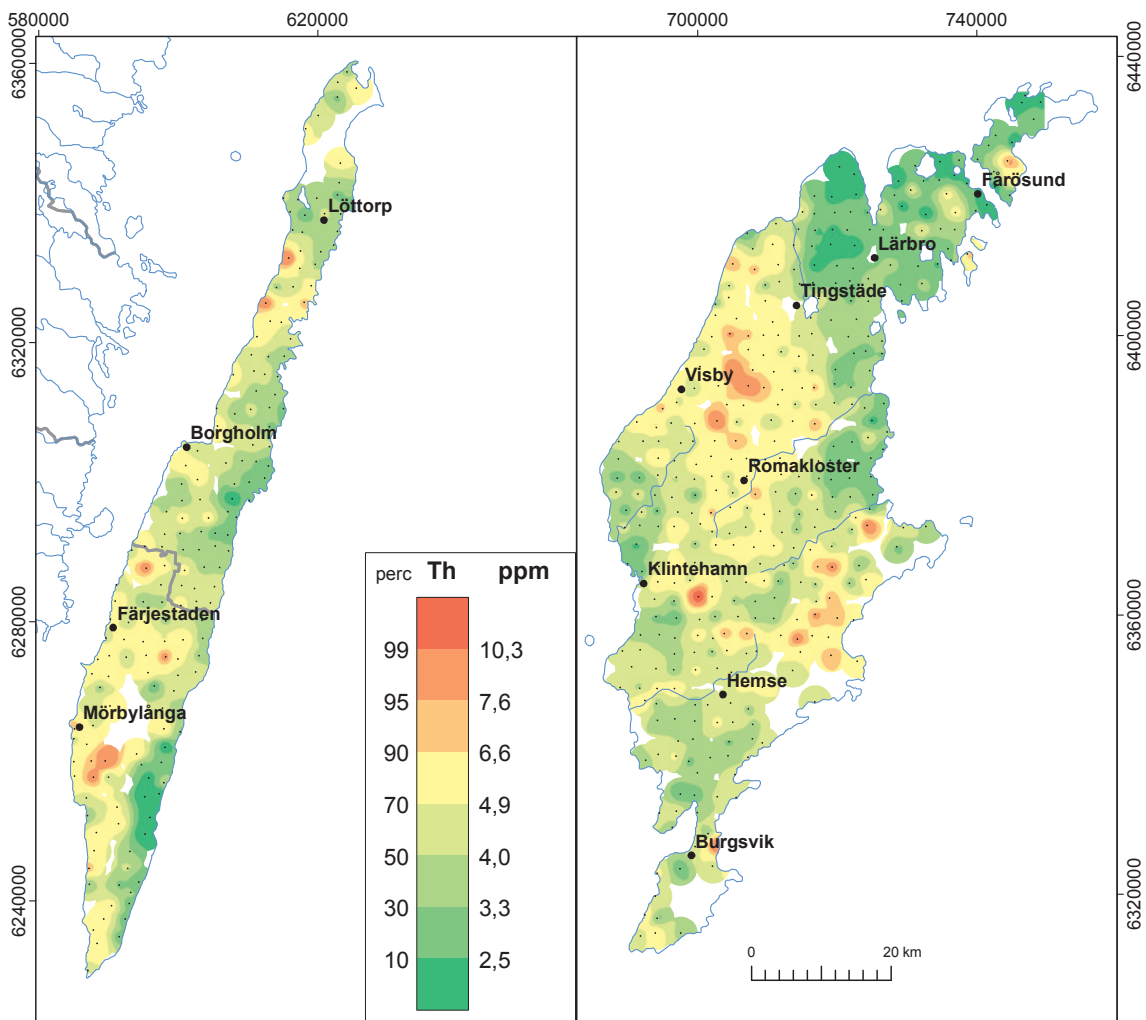
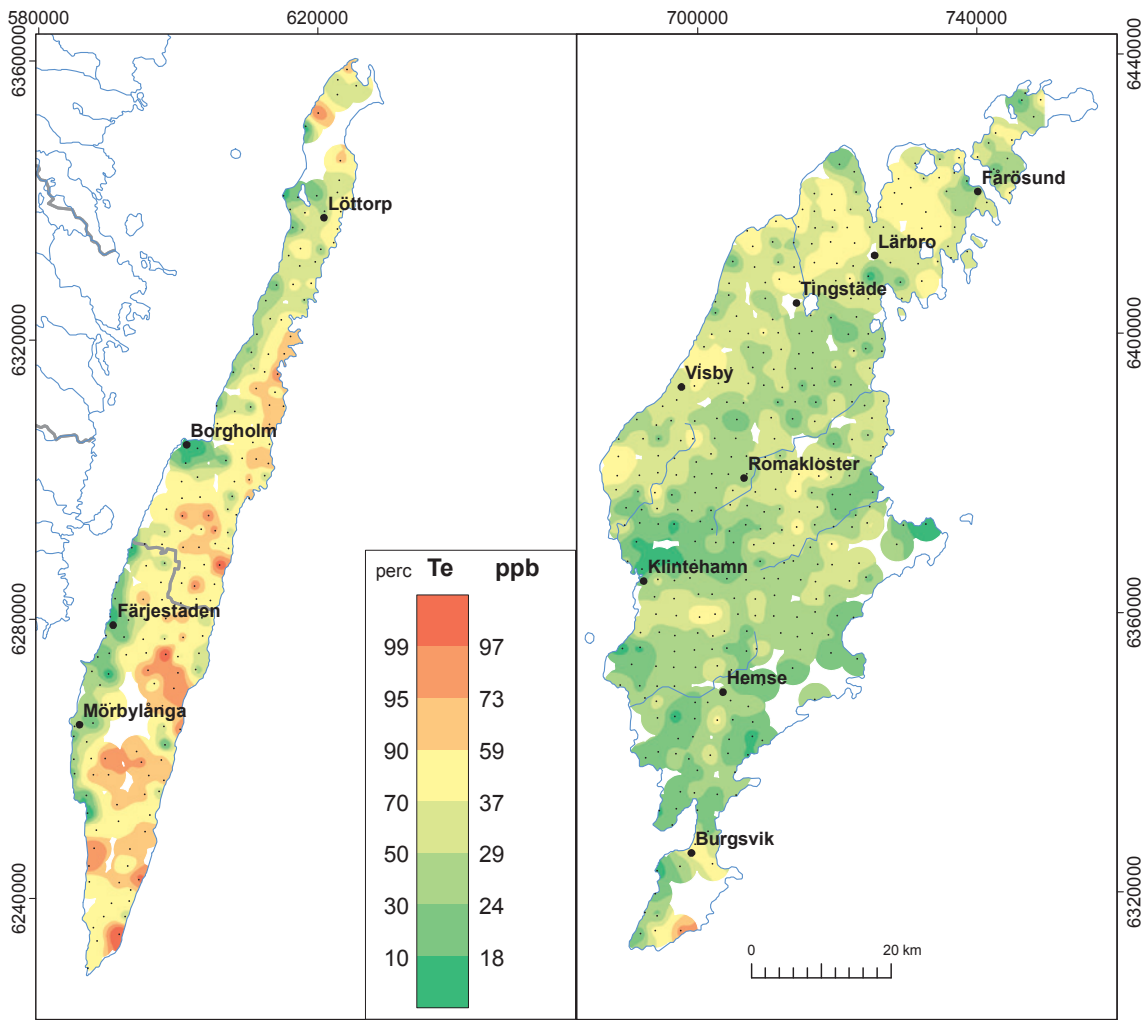


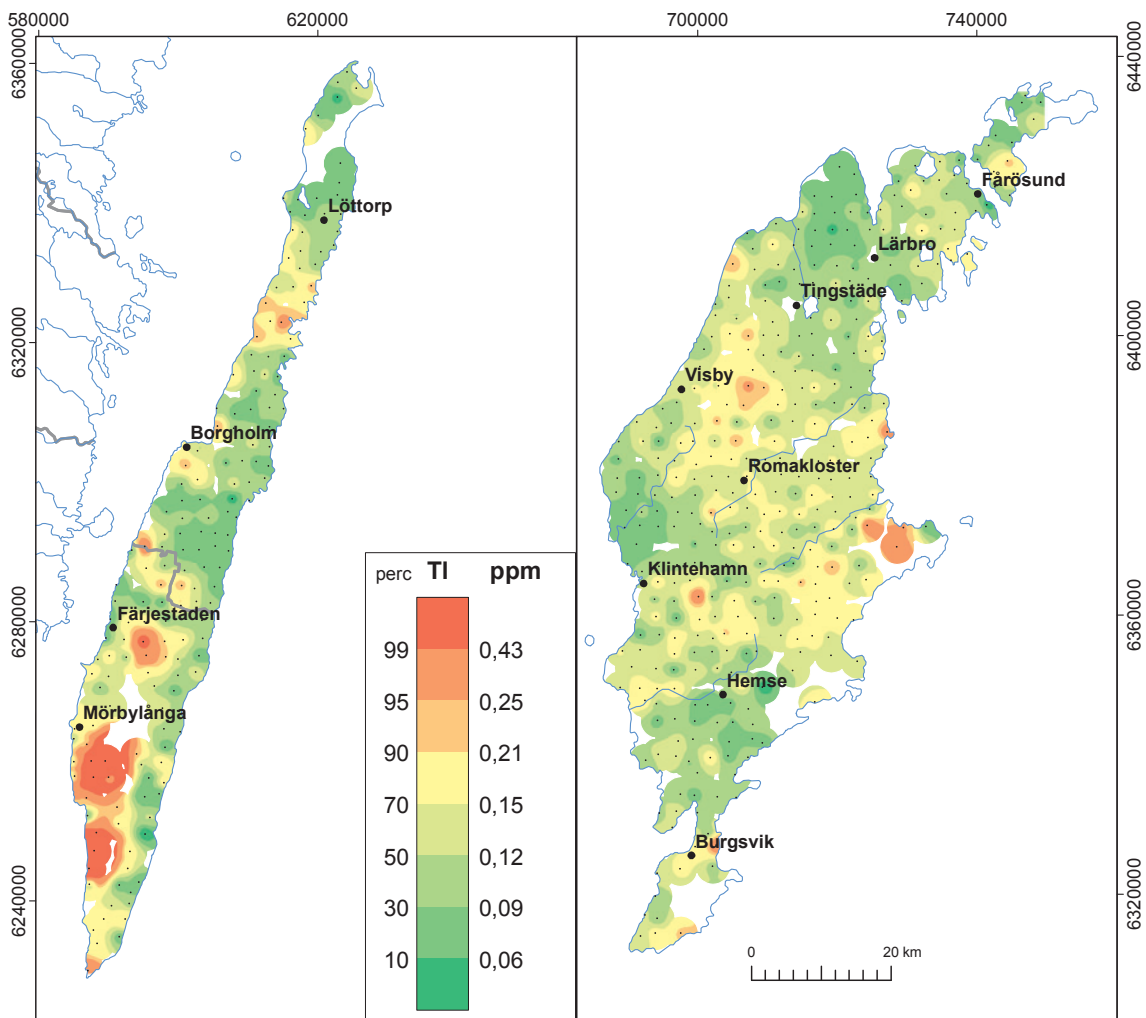
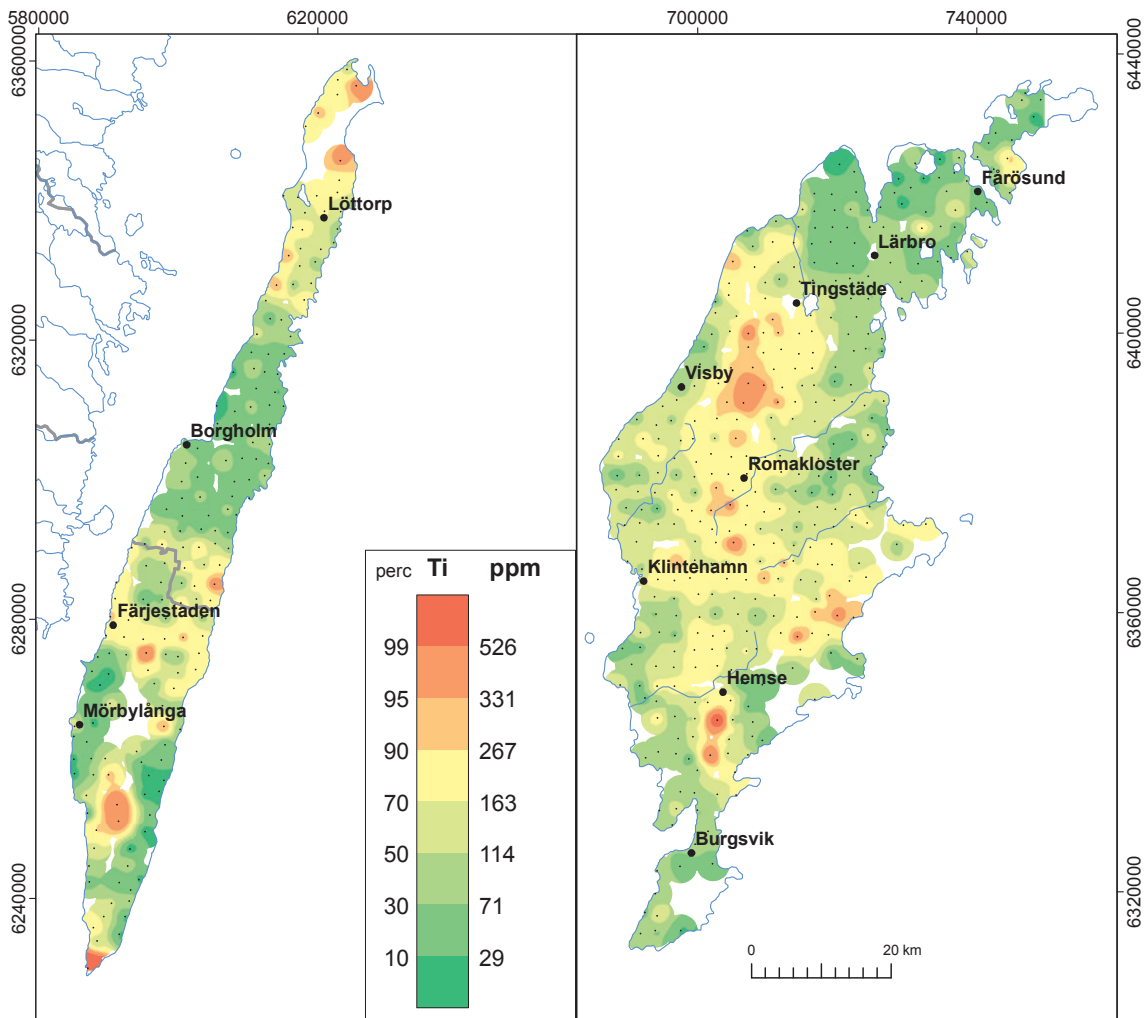


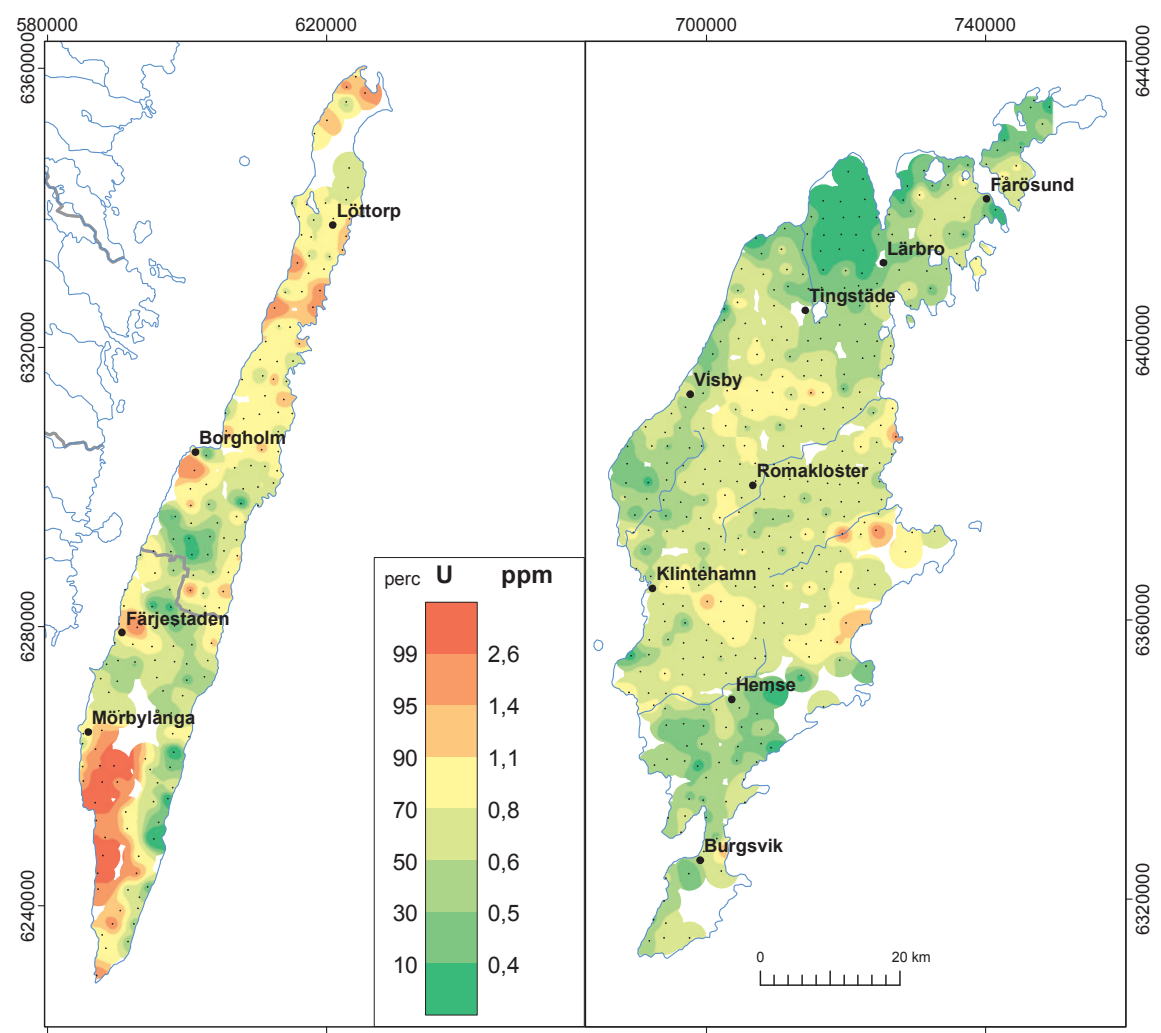
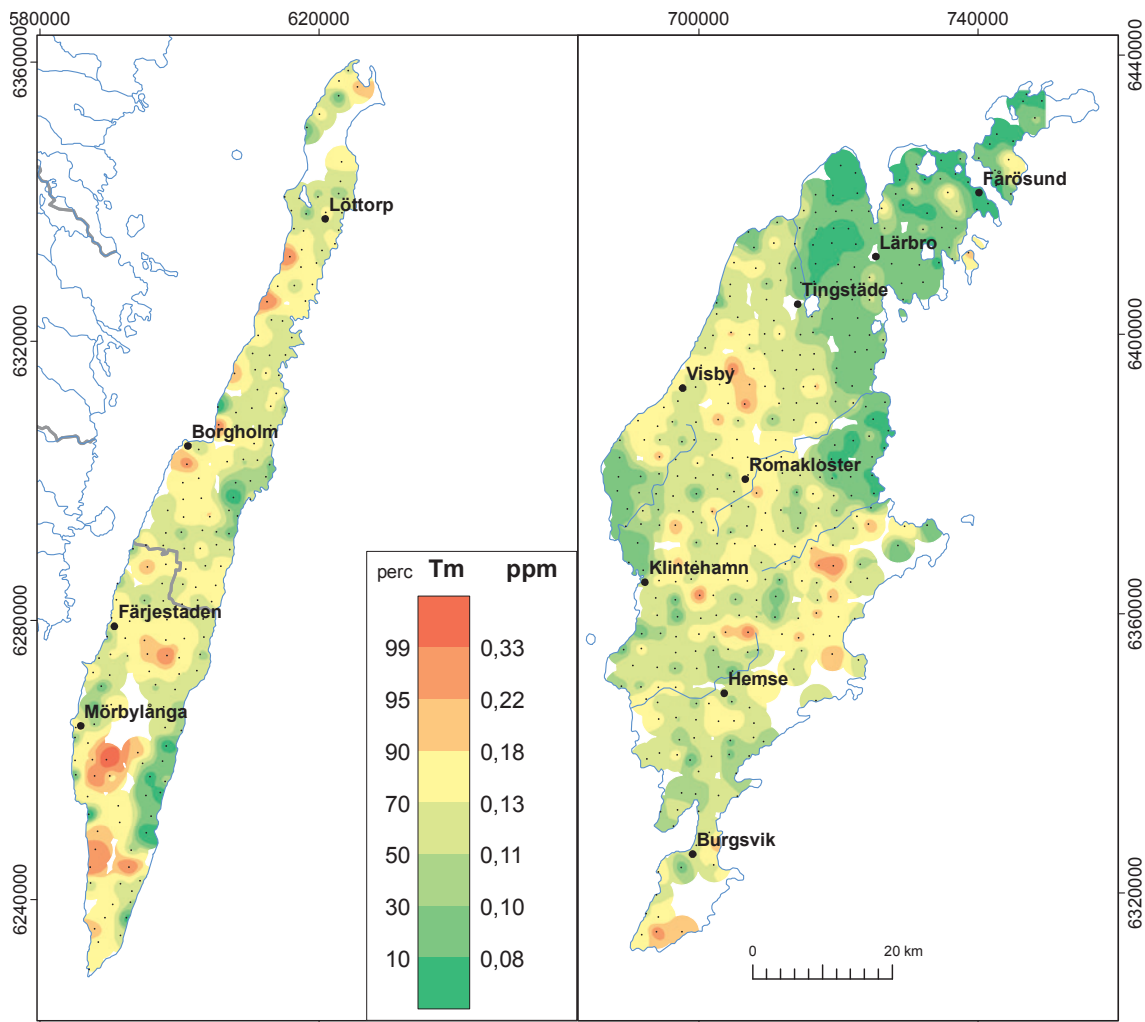


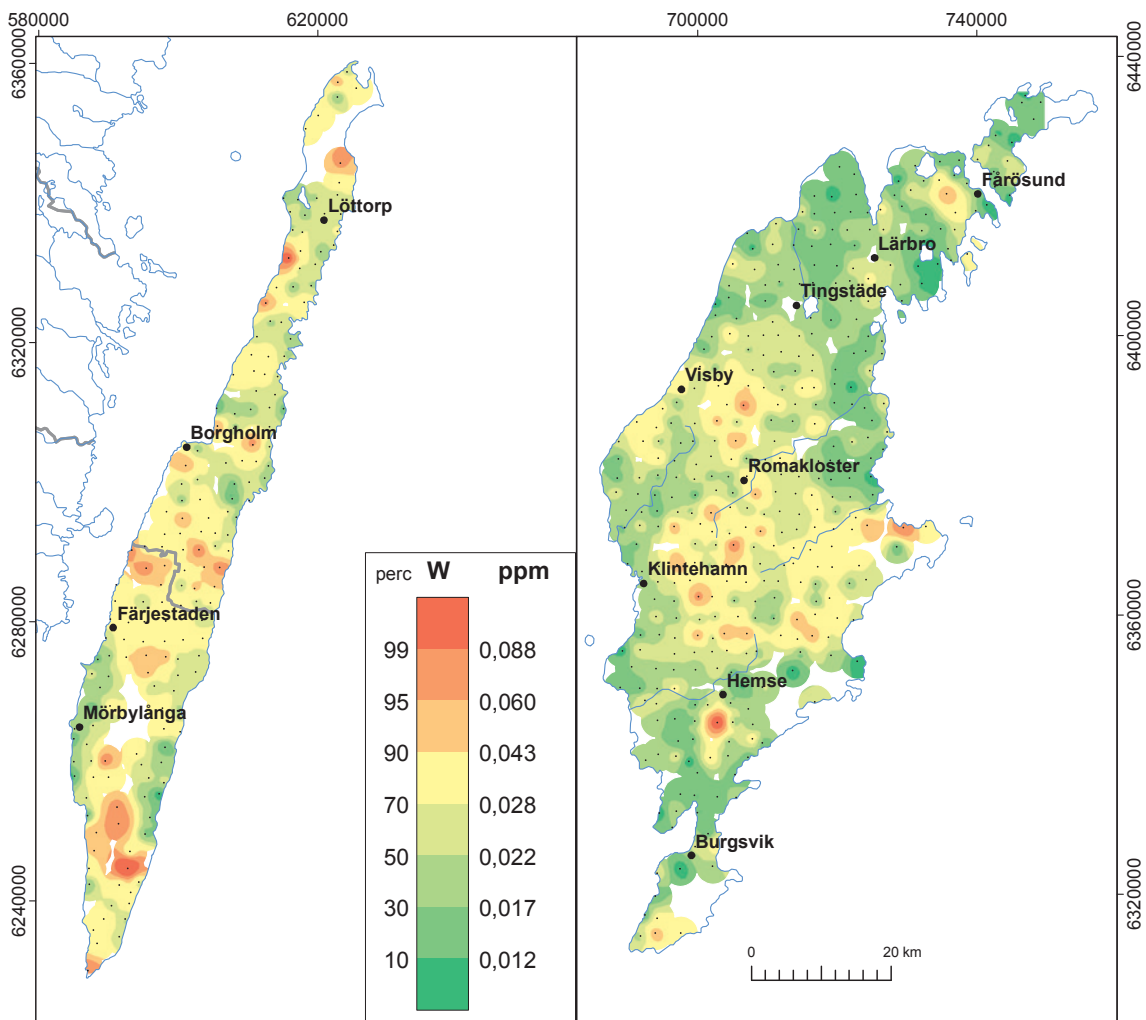
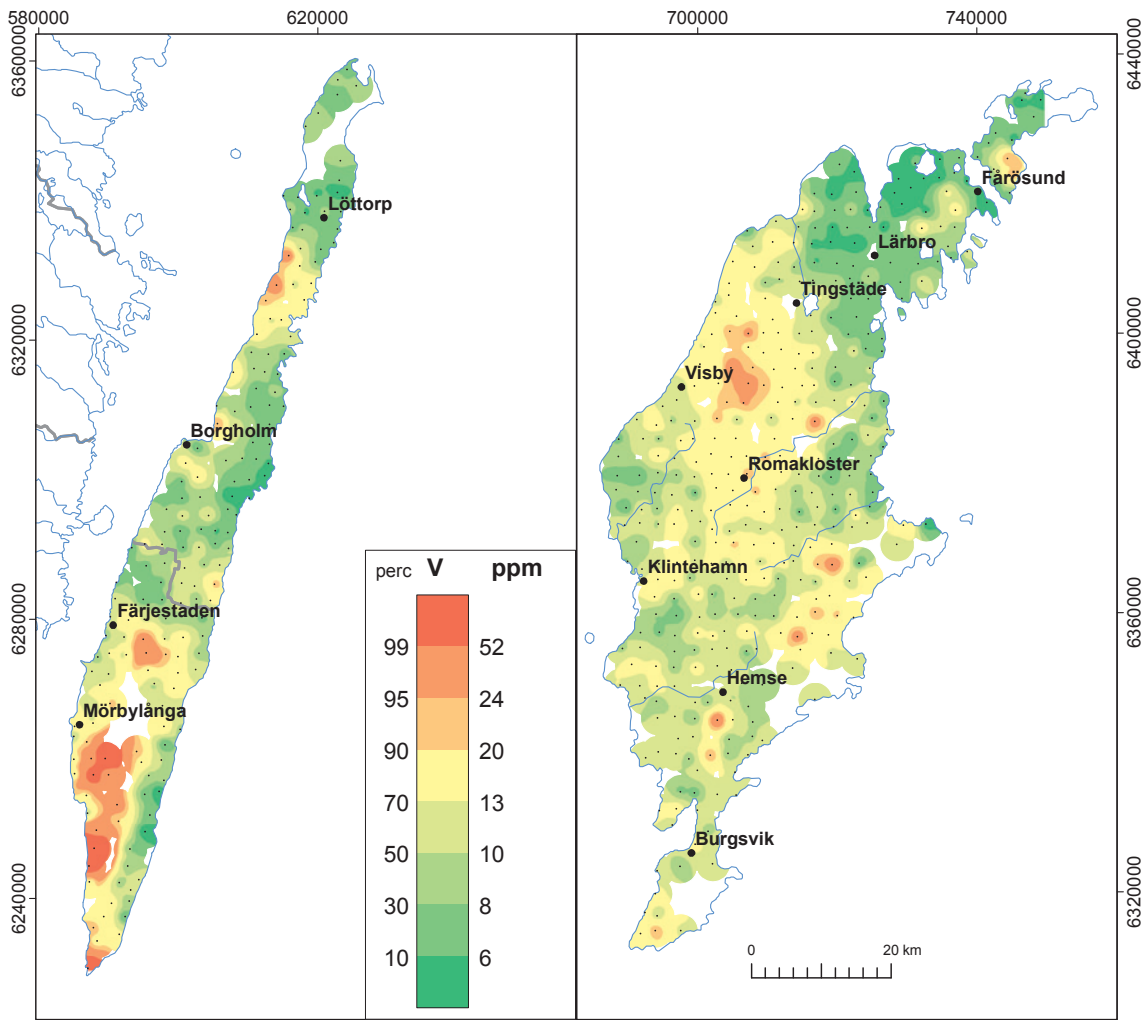


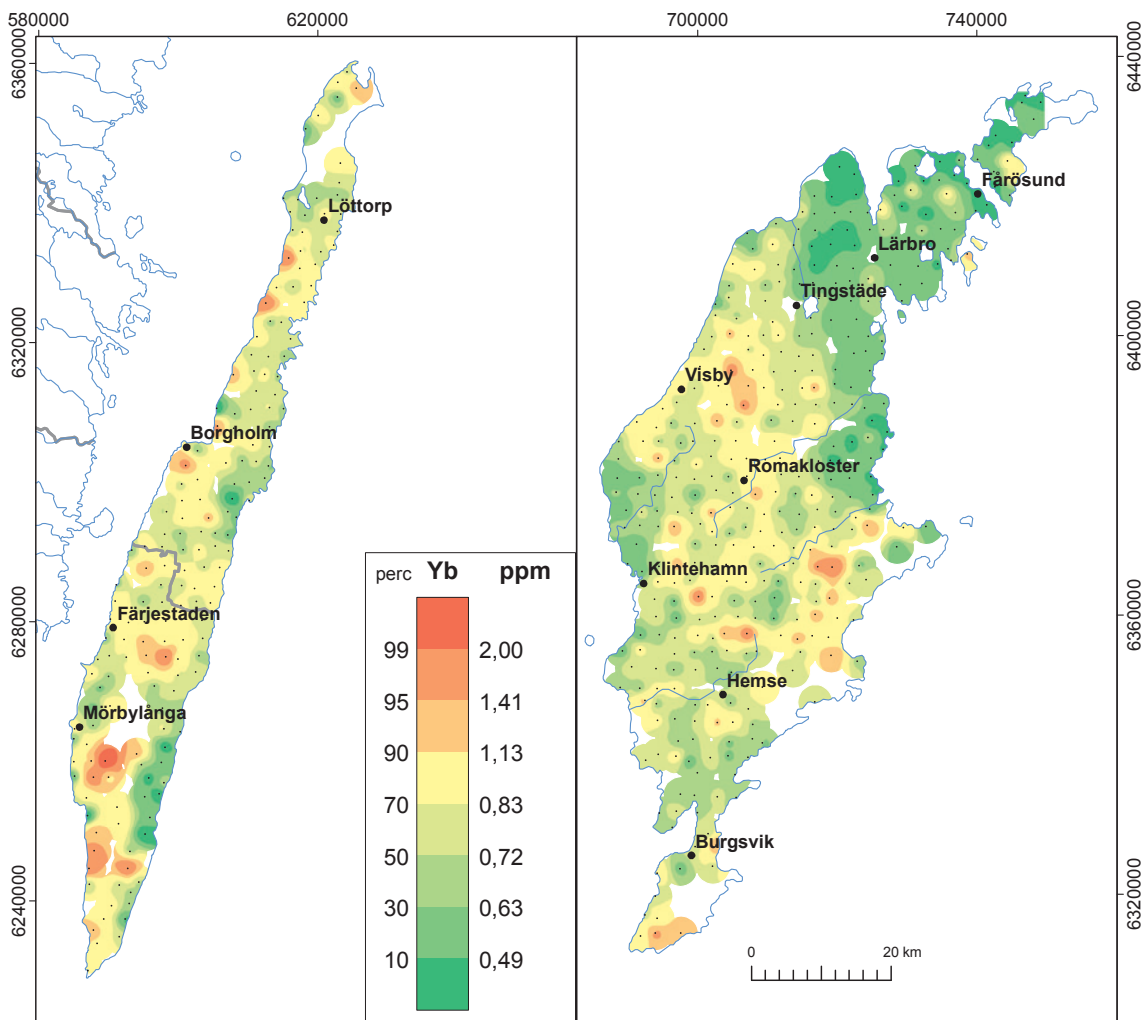
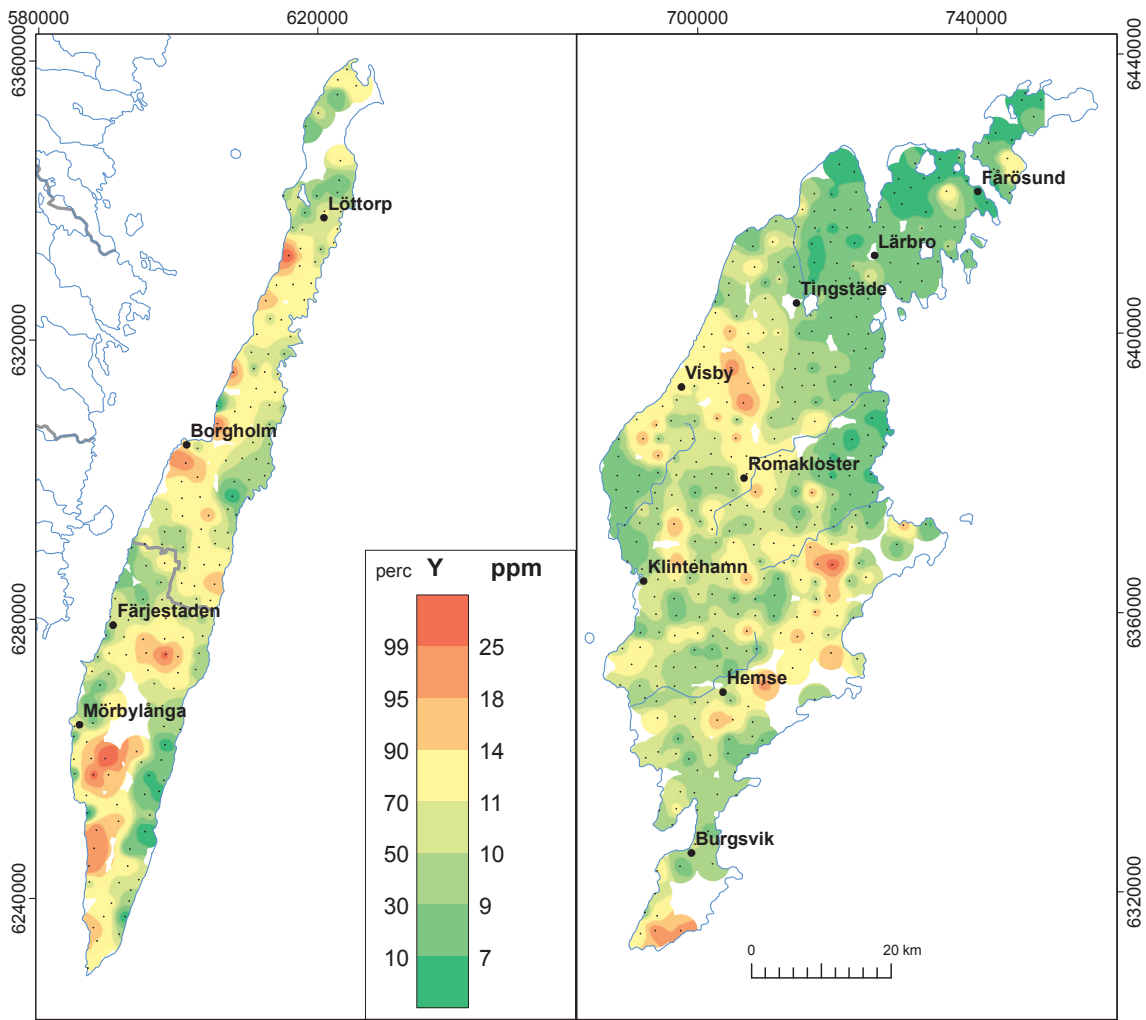


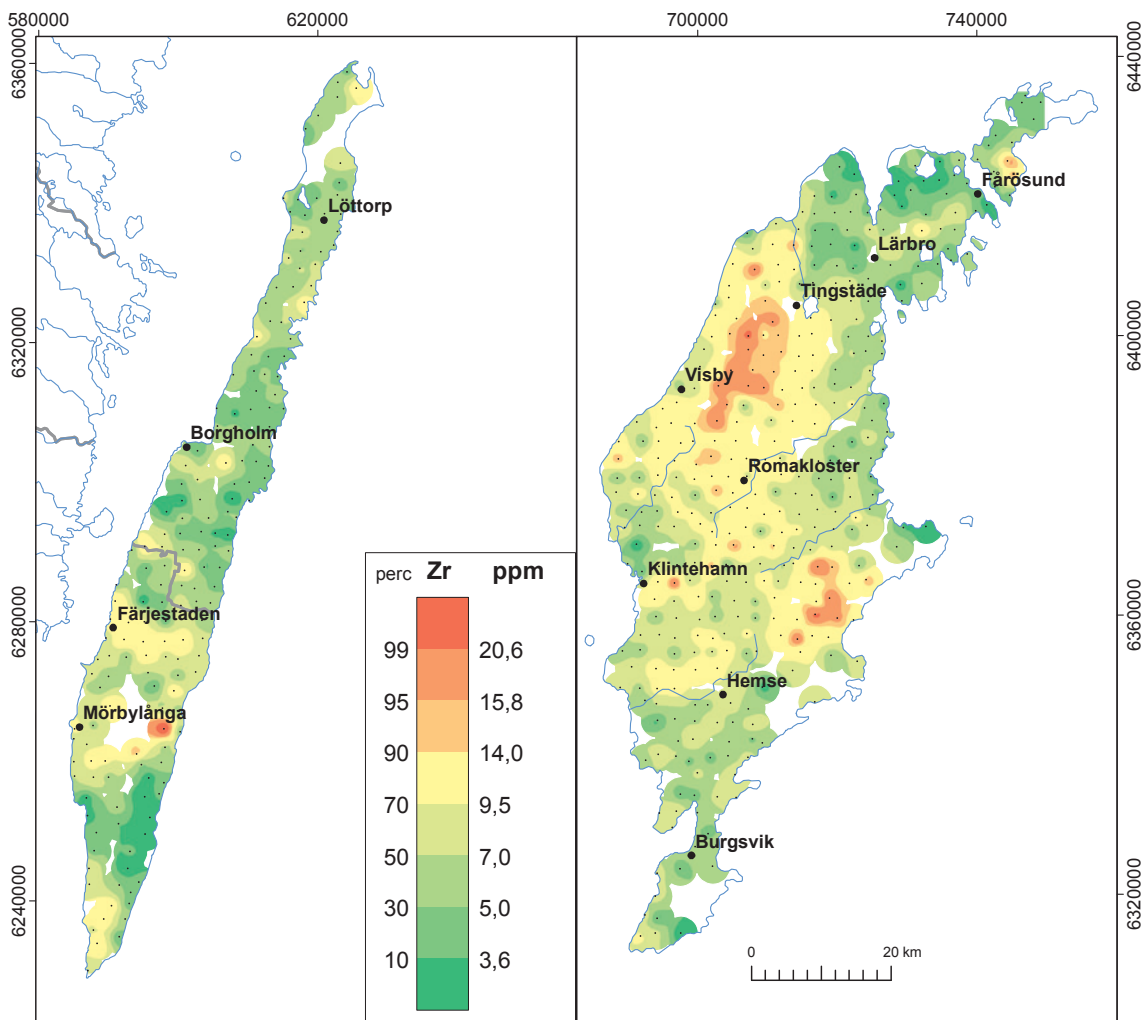
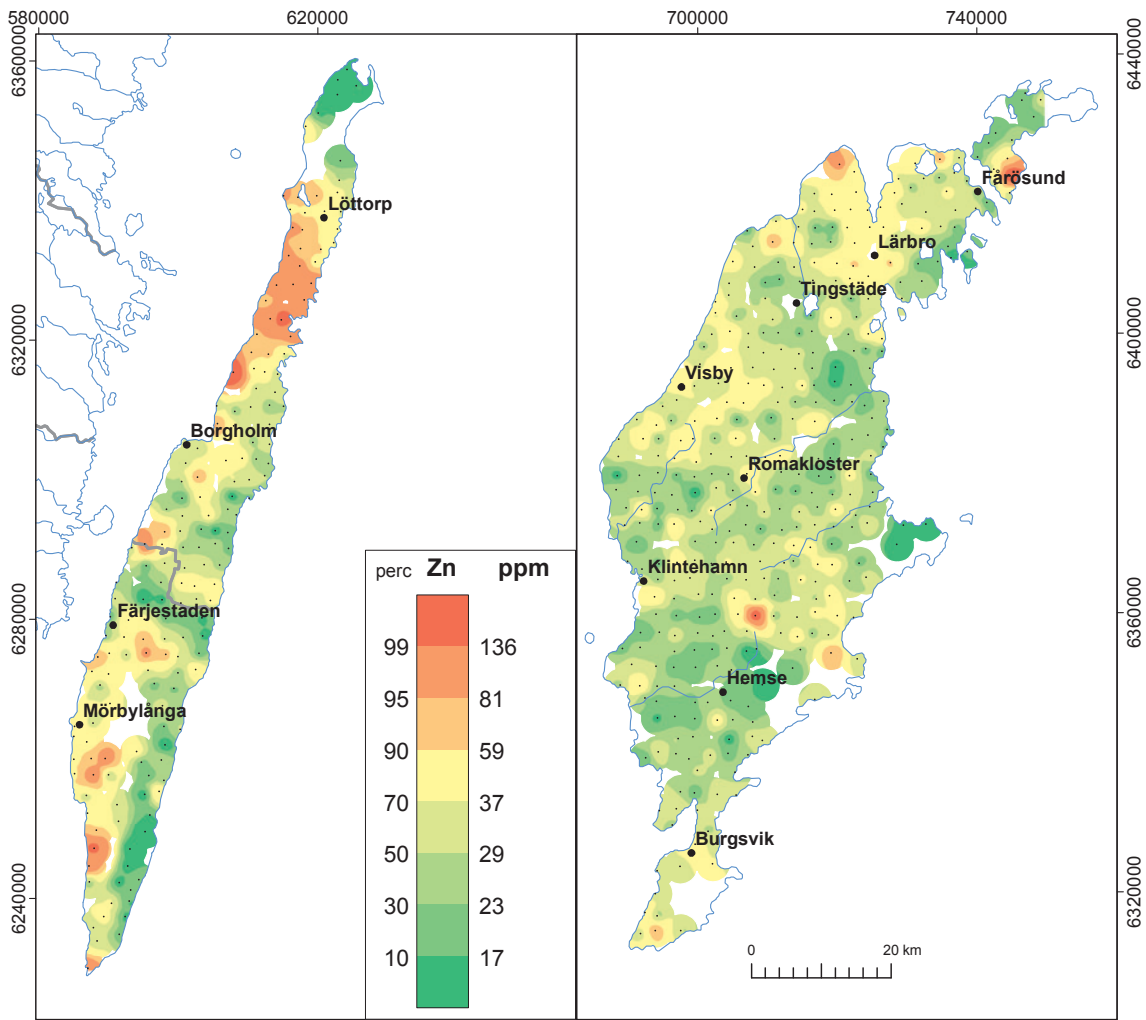




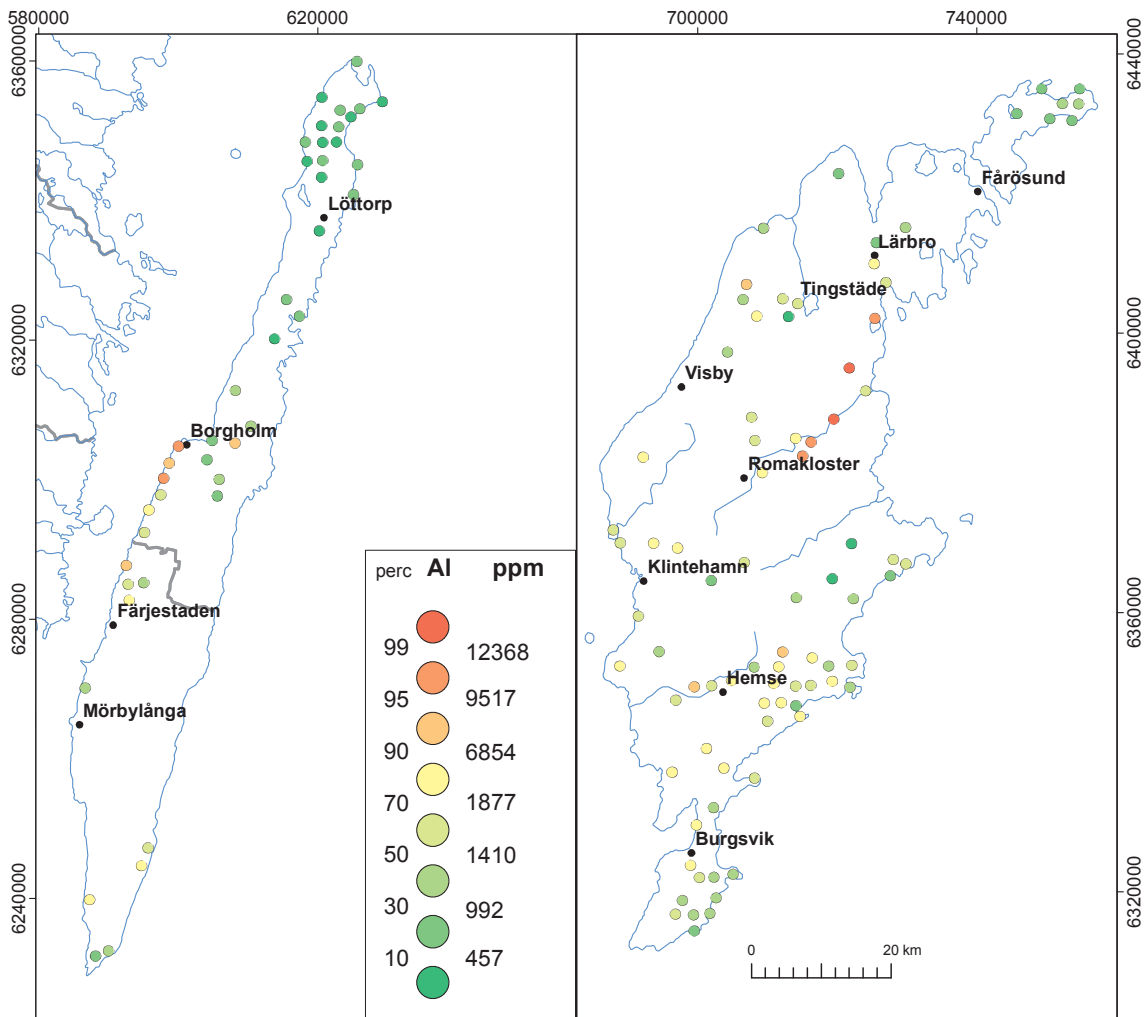
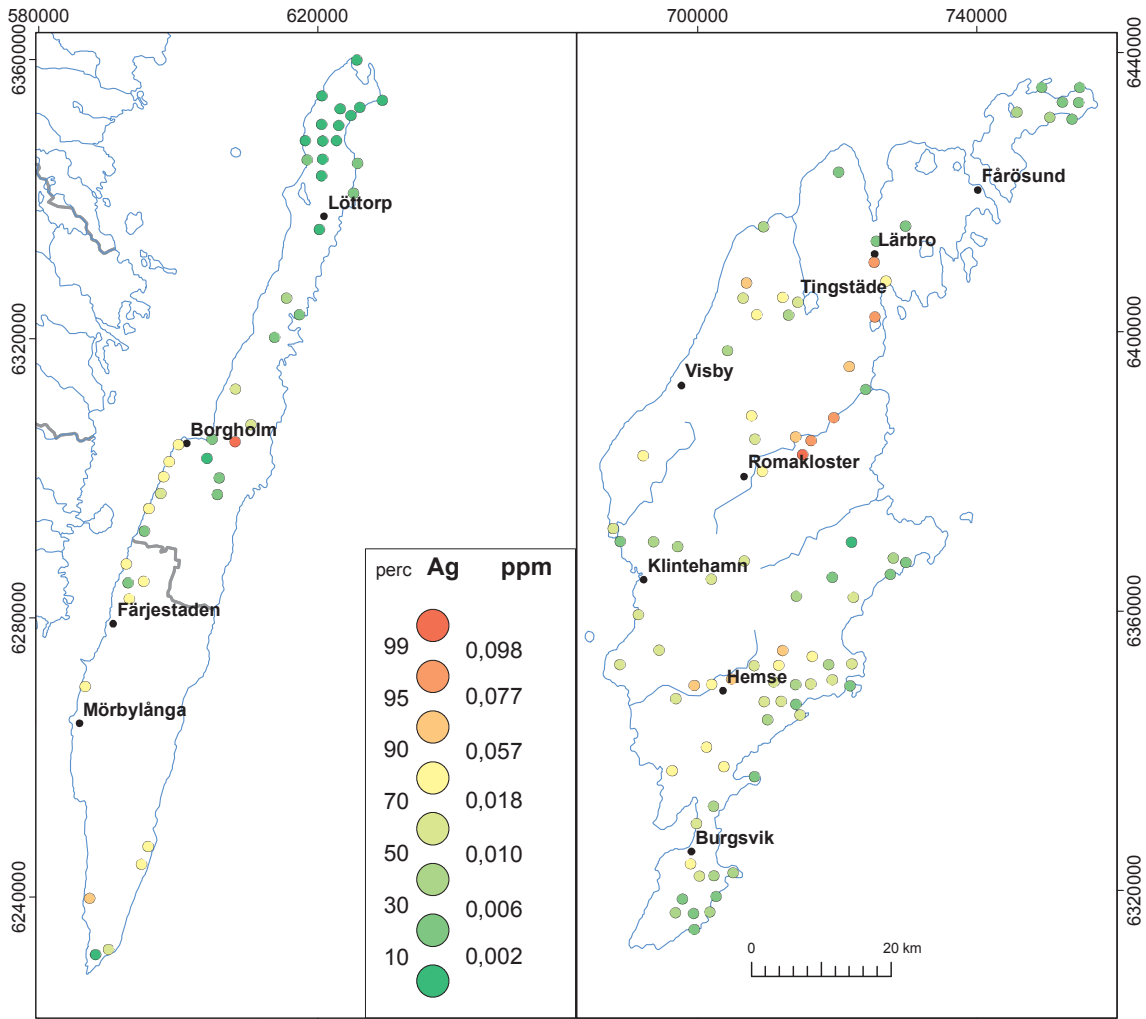


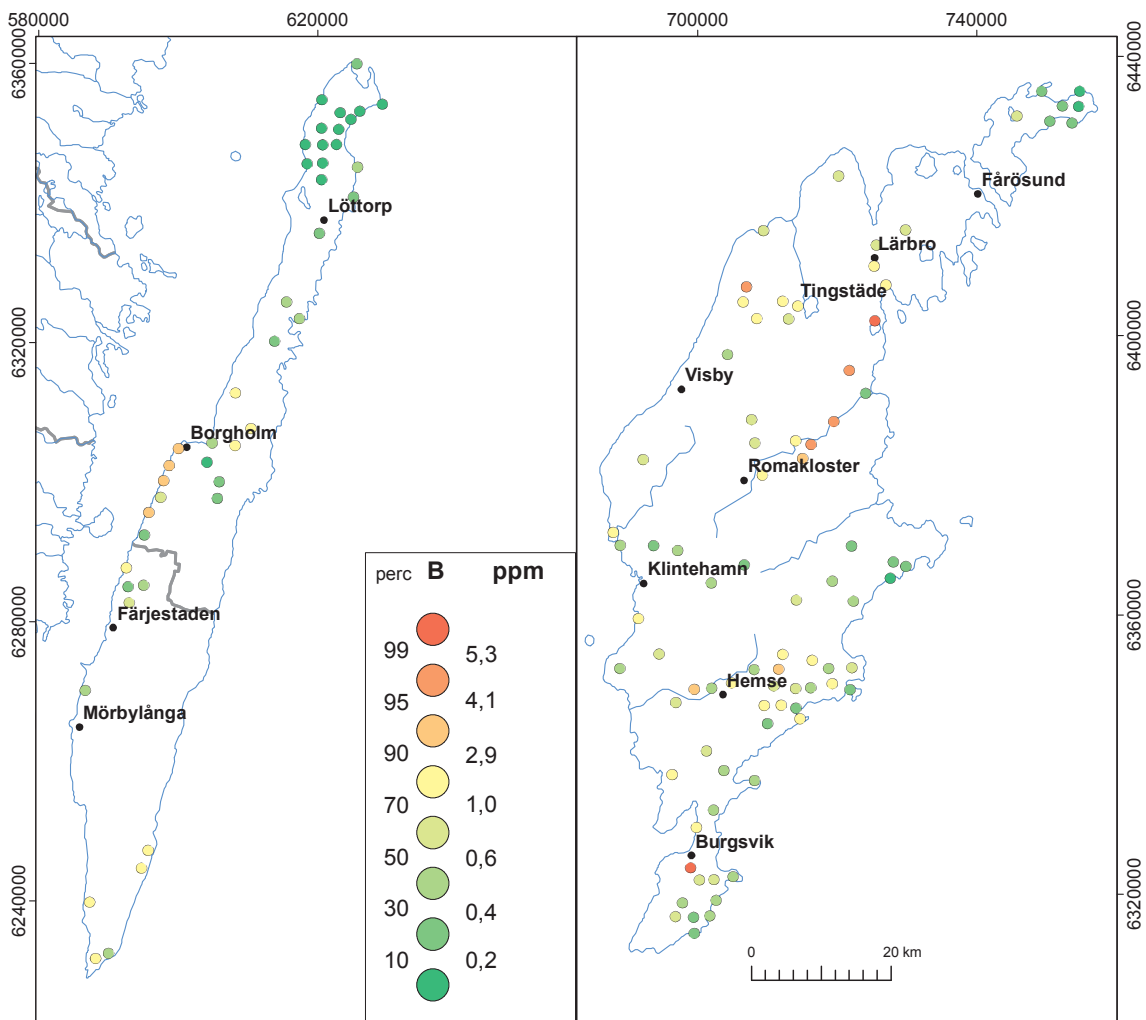
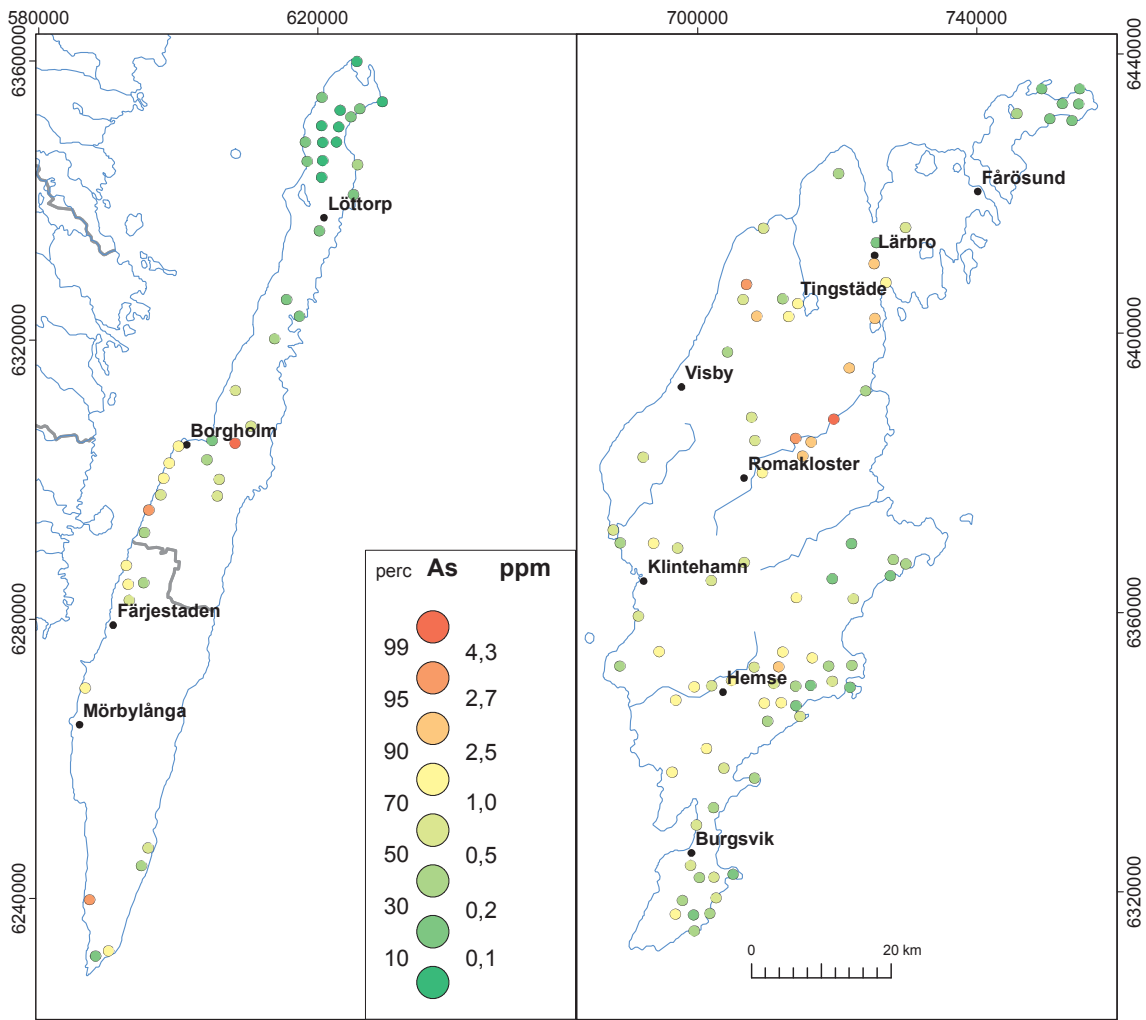




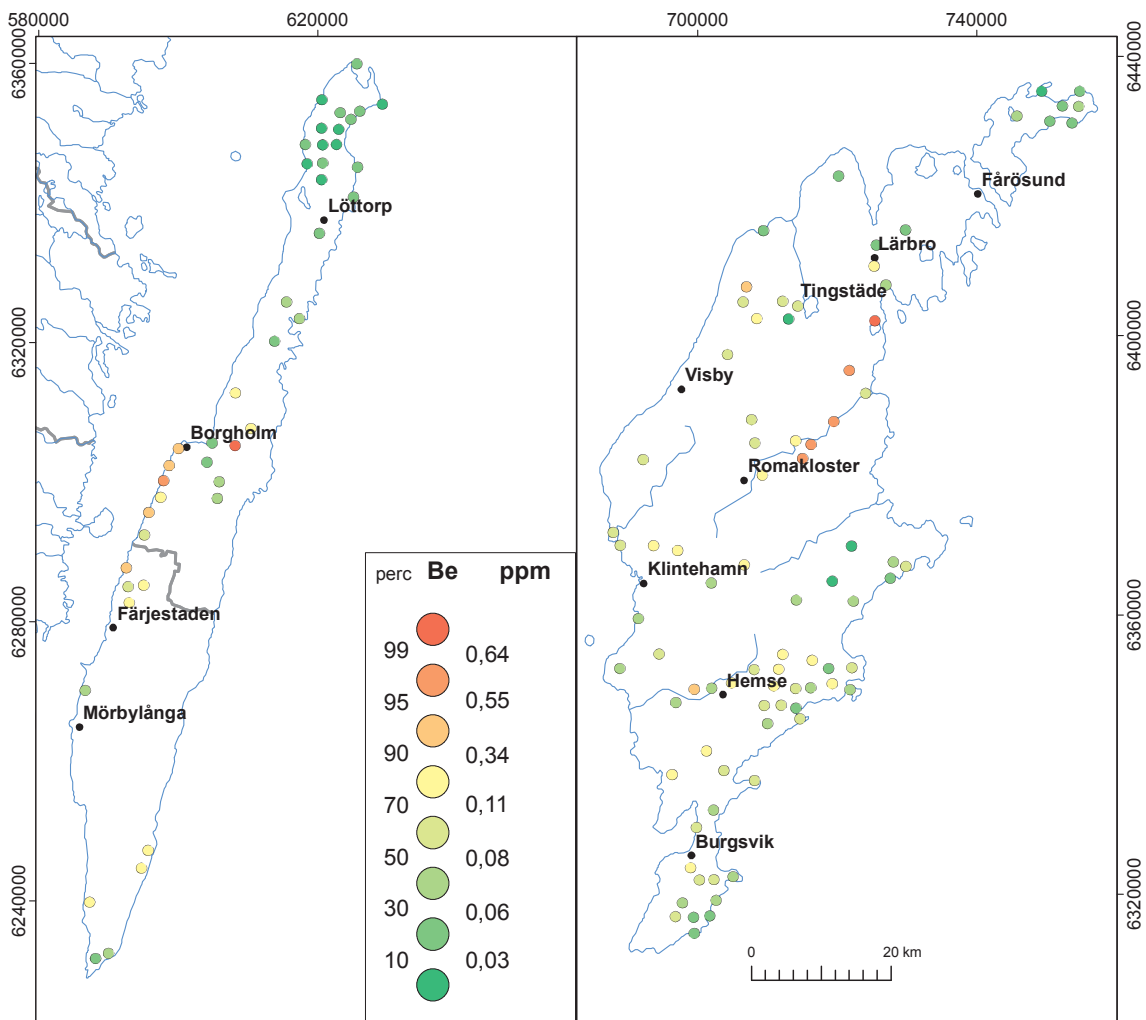
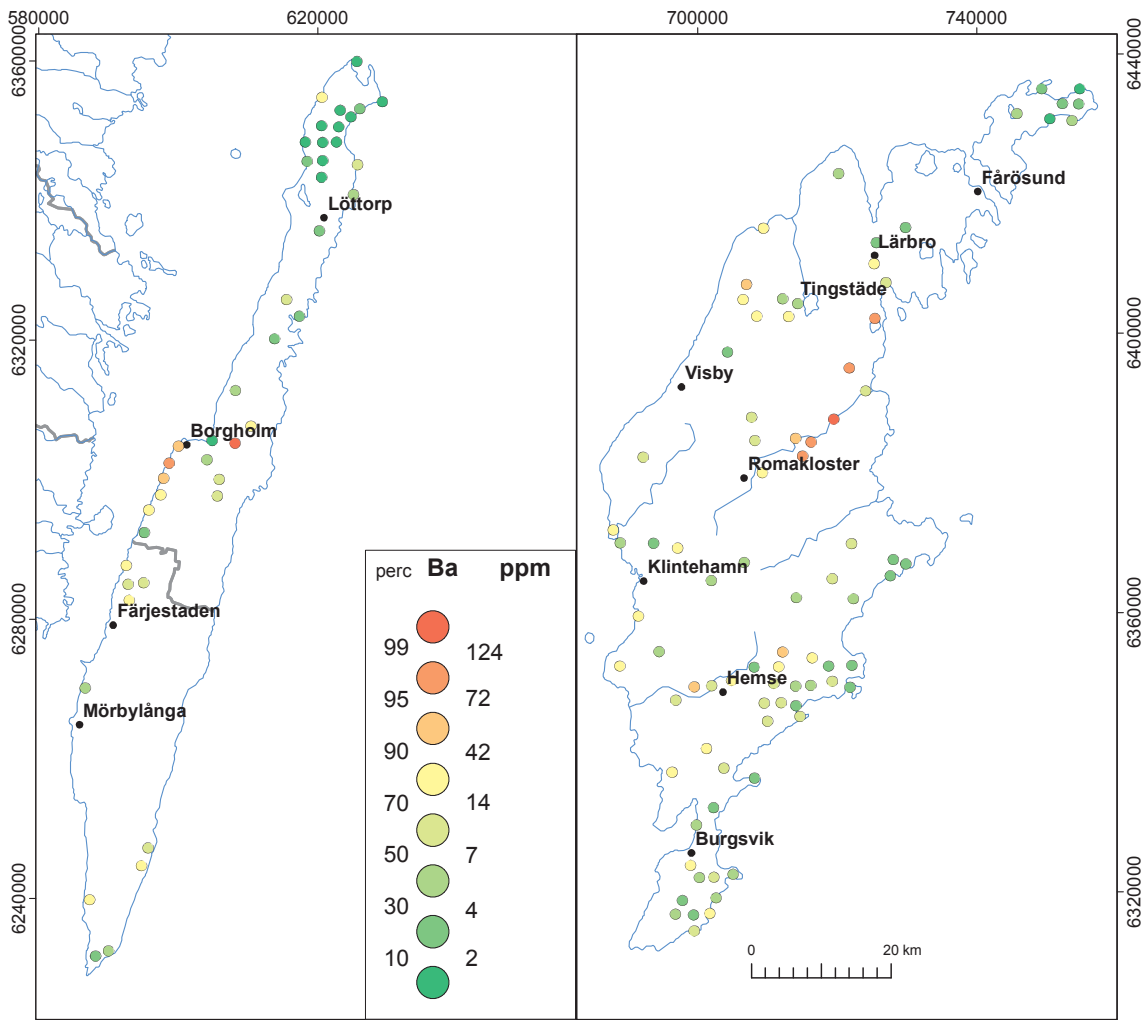


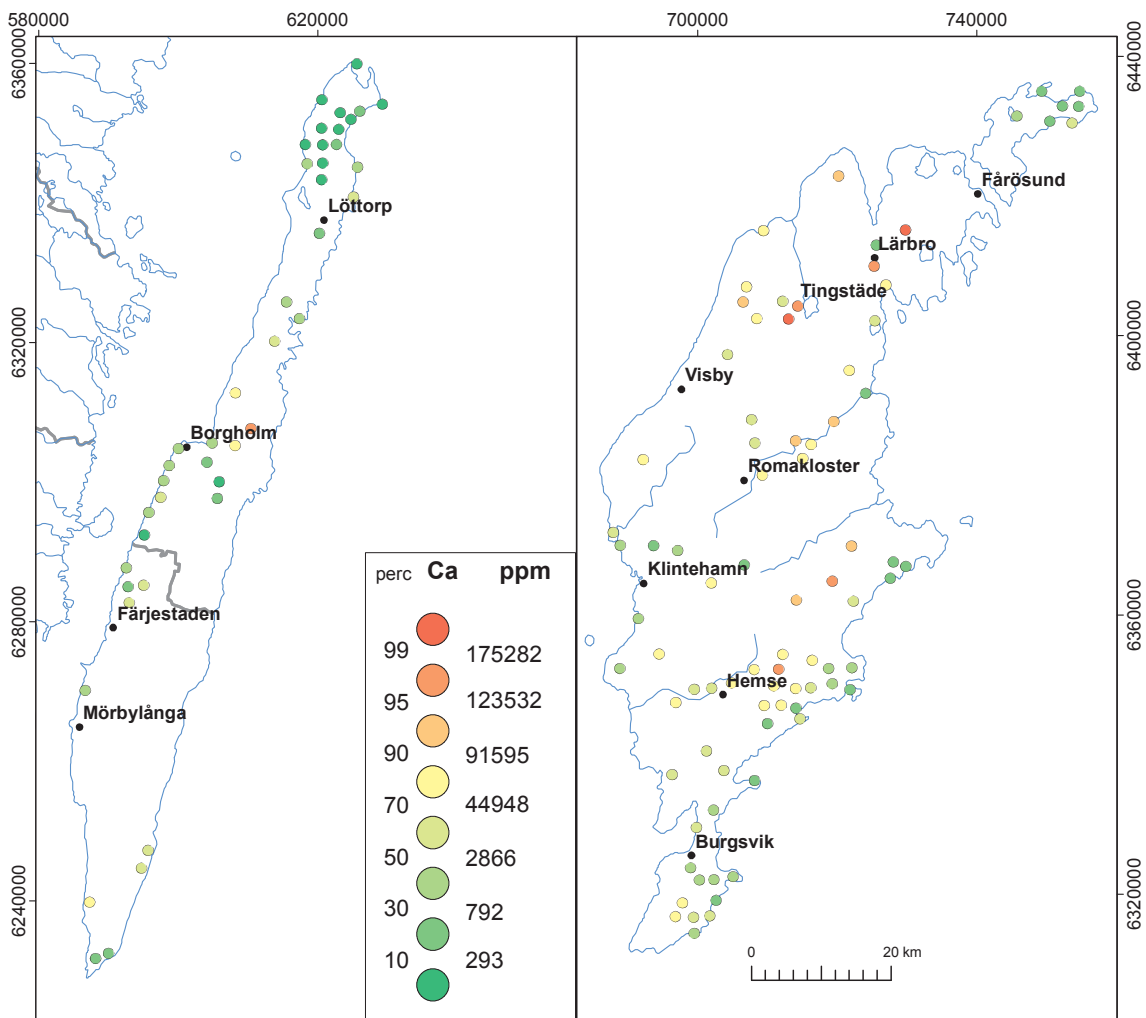
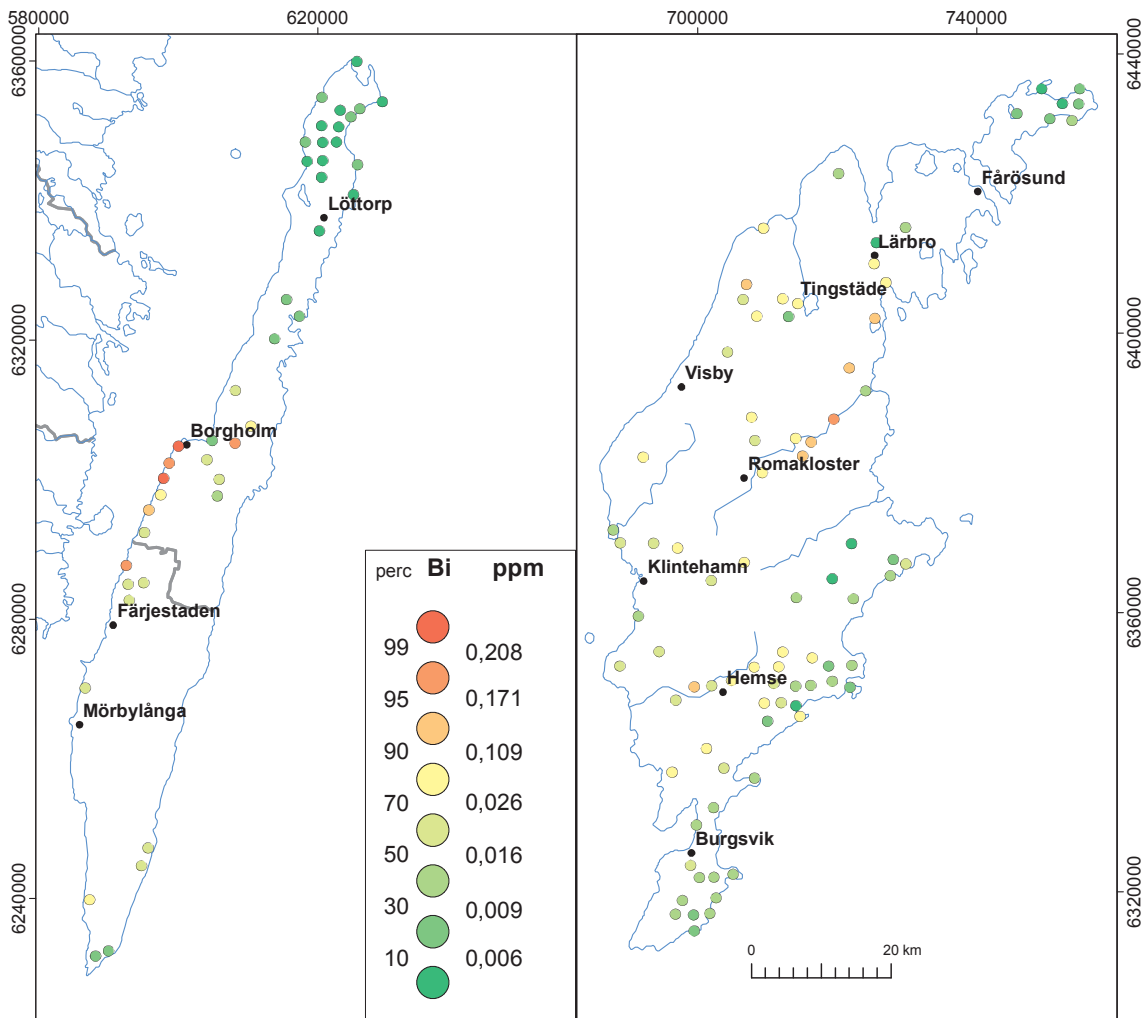
# Förekomst av huvud- och spårelement samt pH i sediment

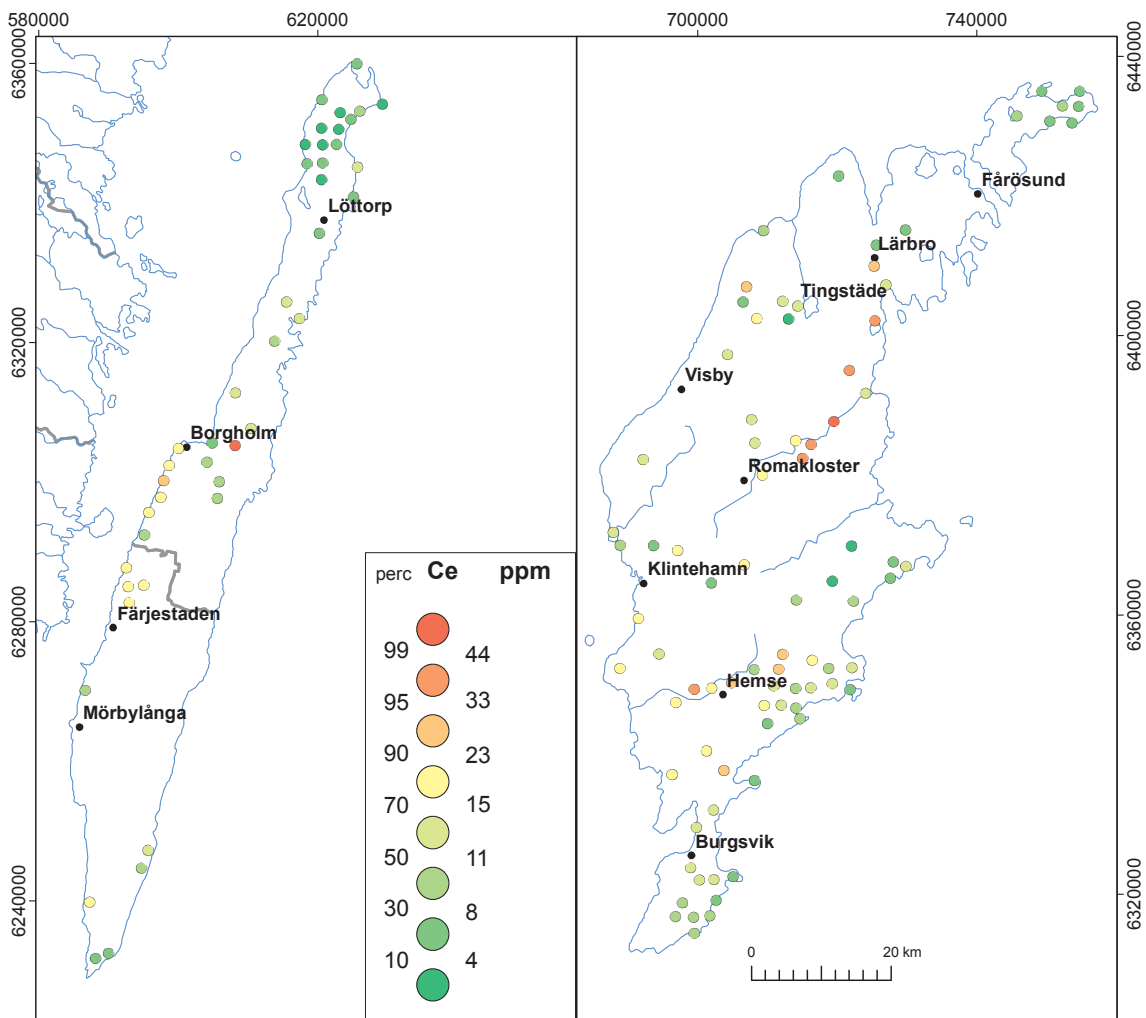
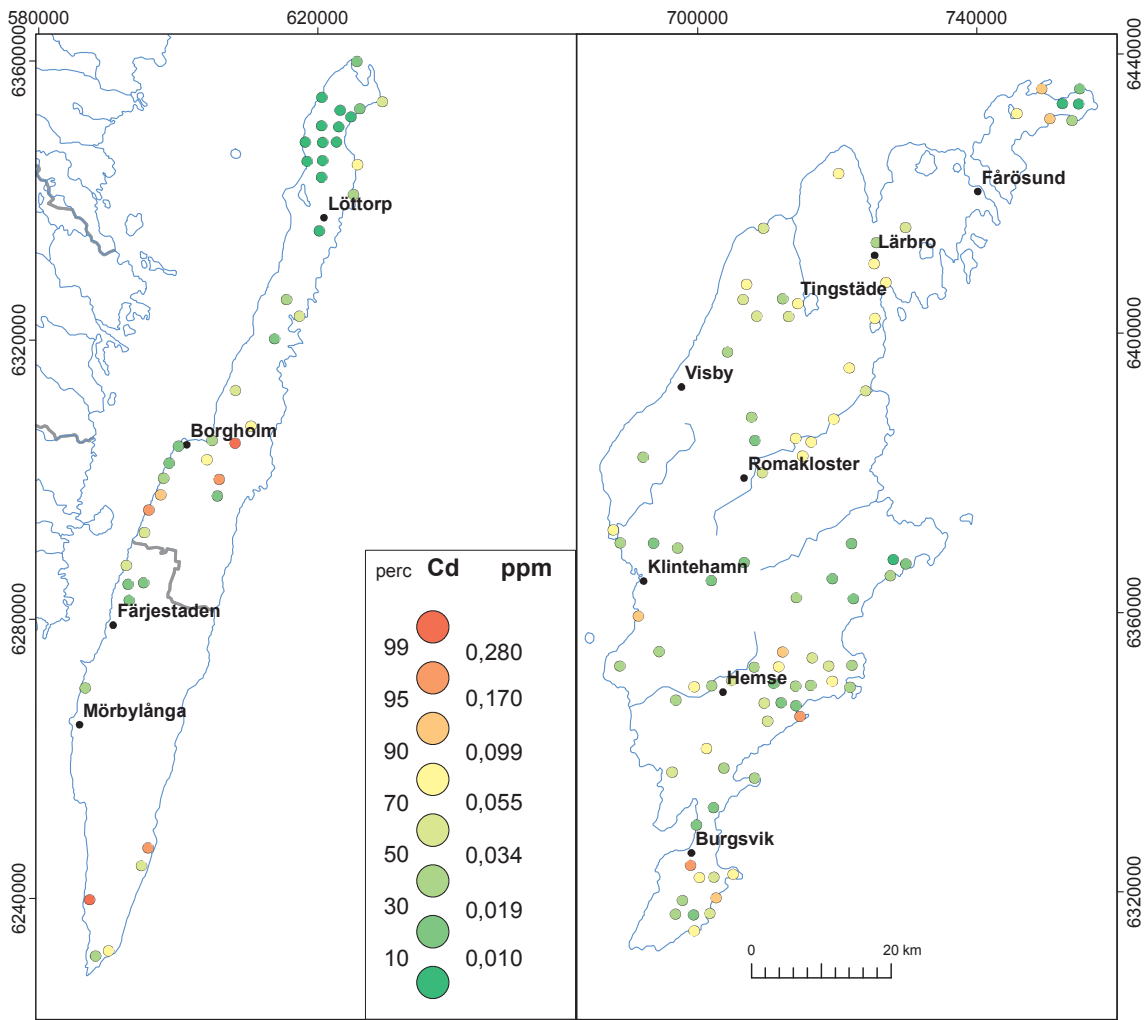


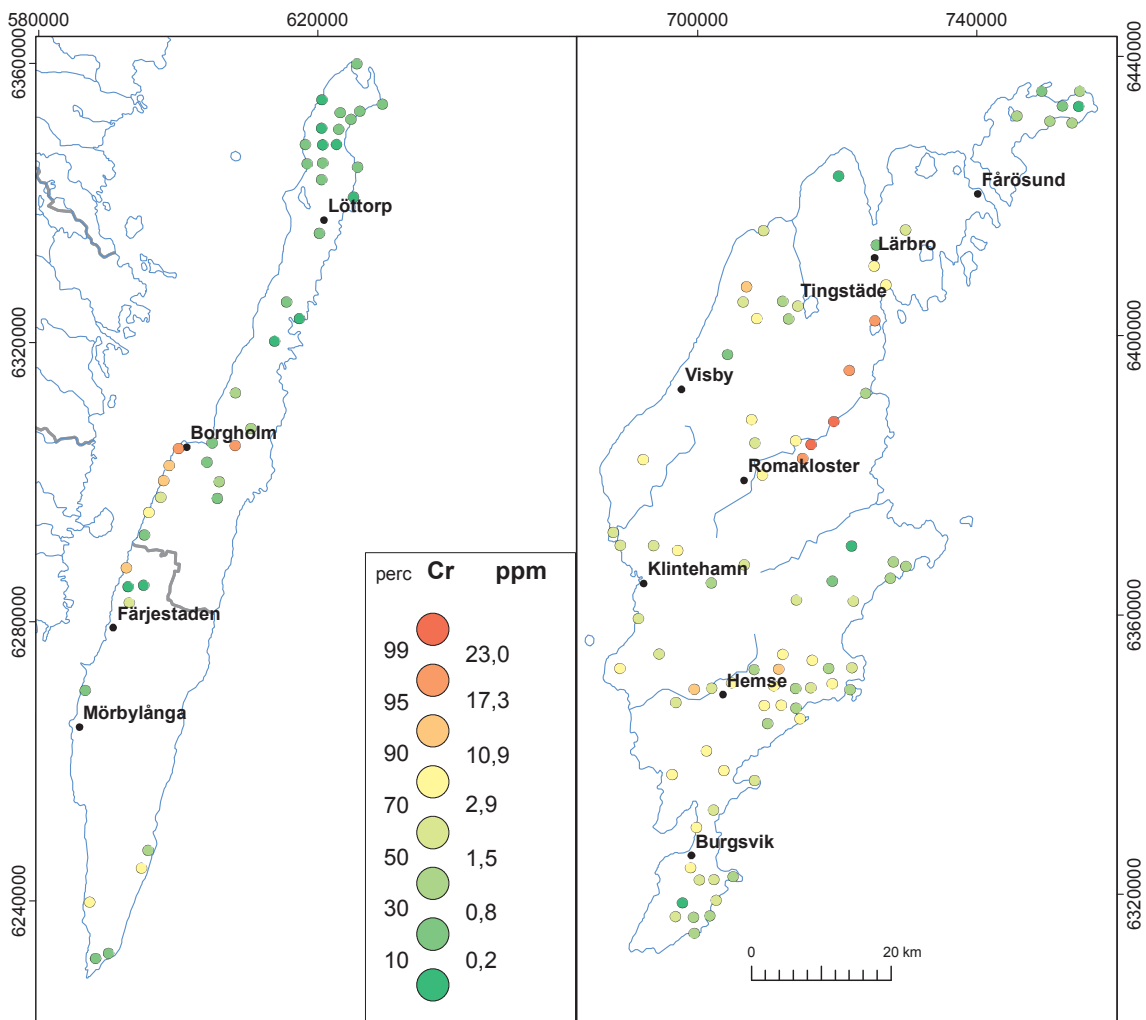
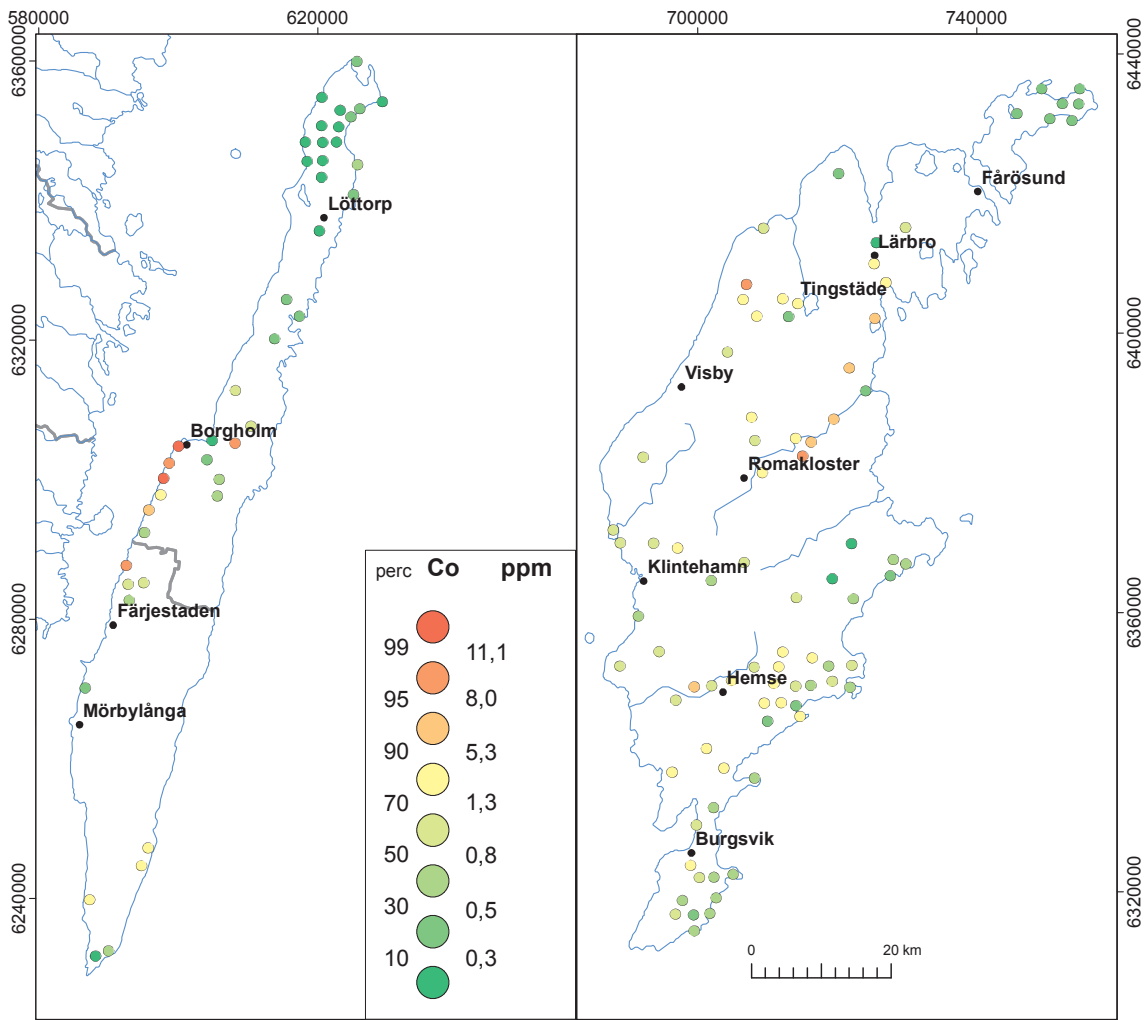


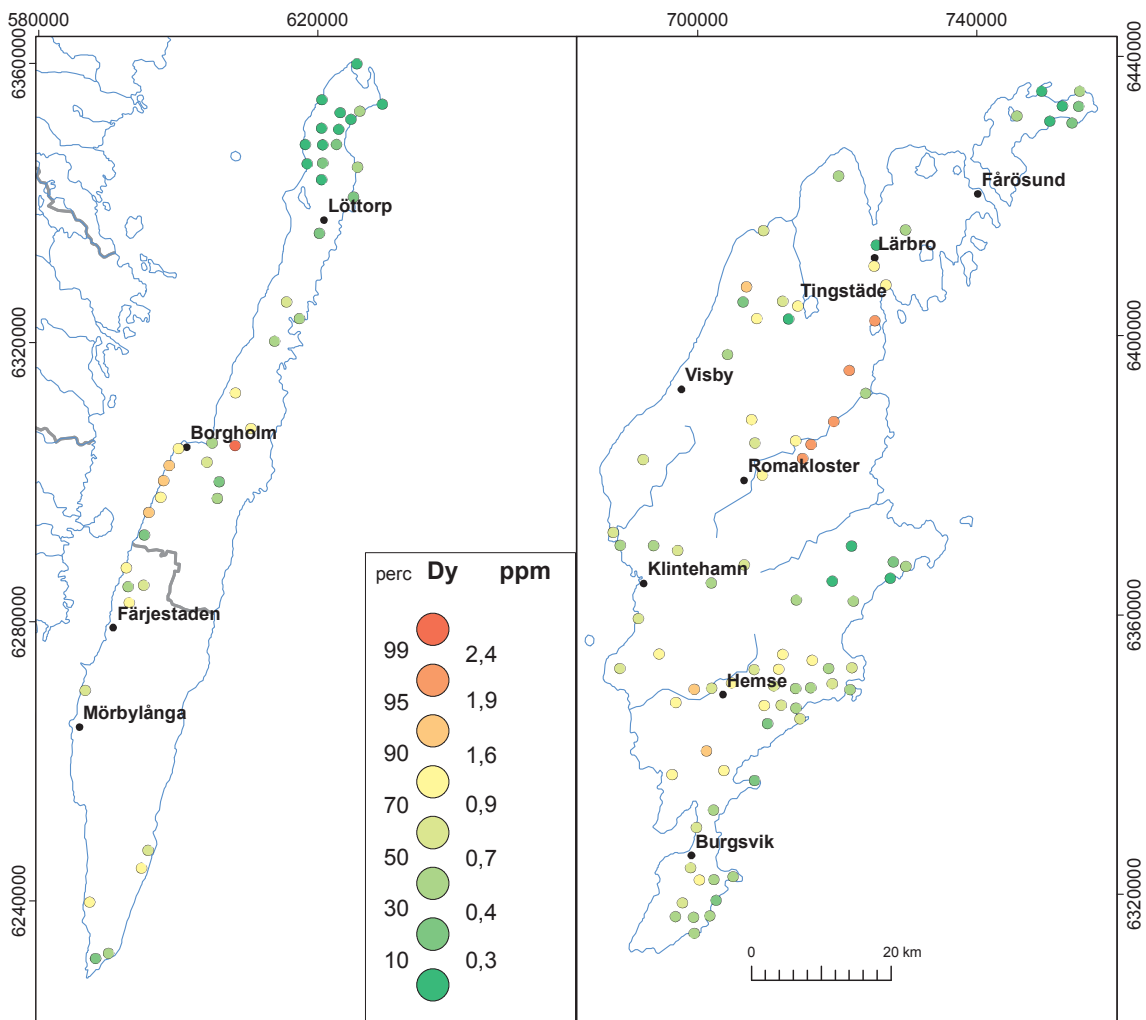
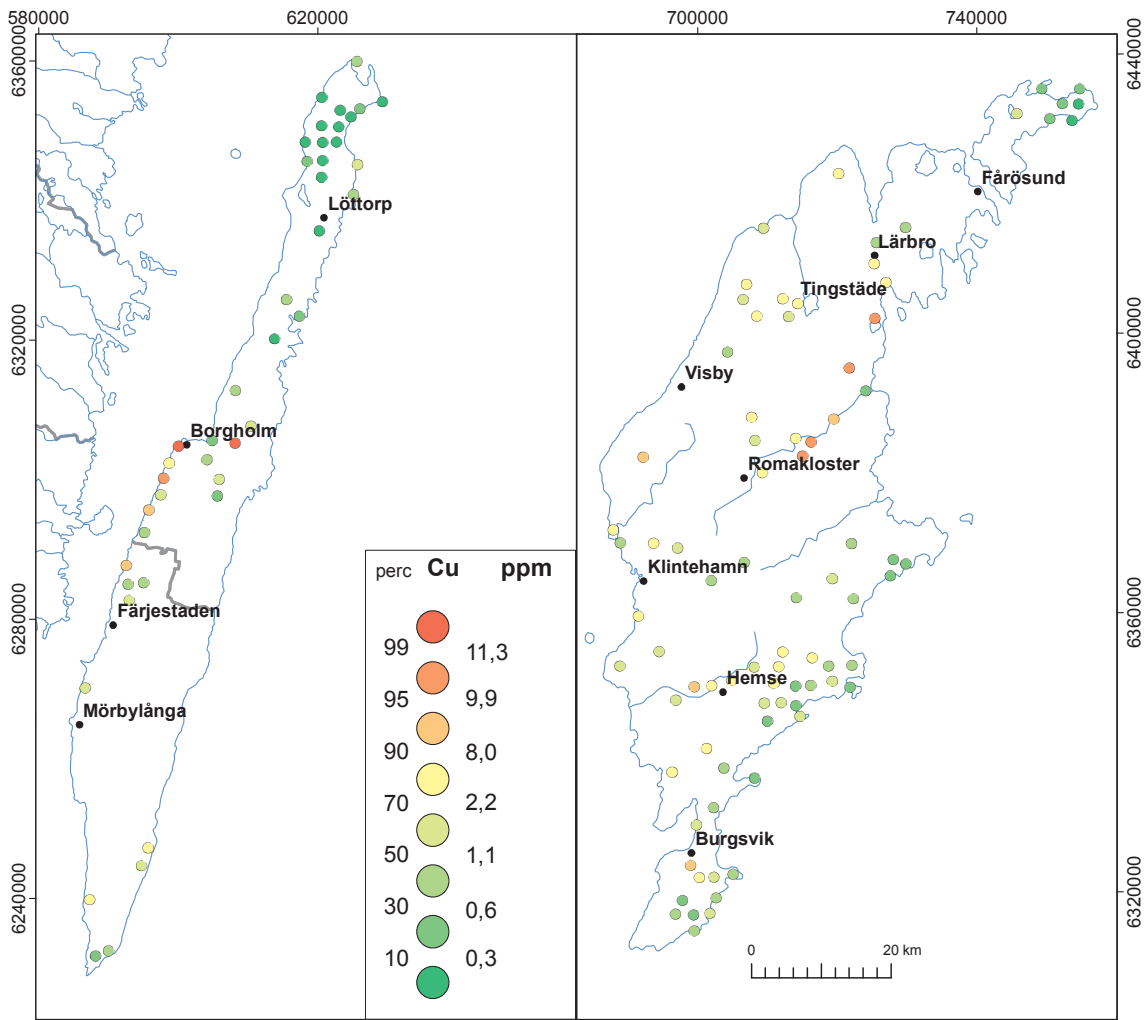


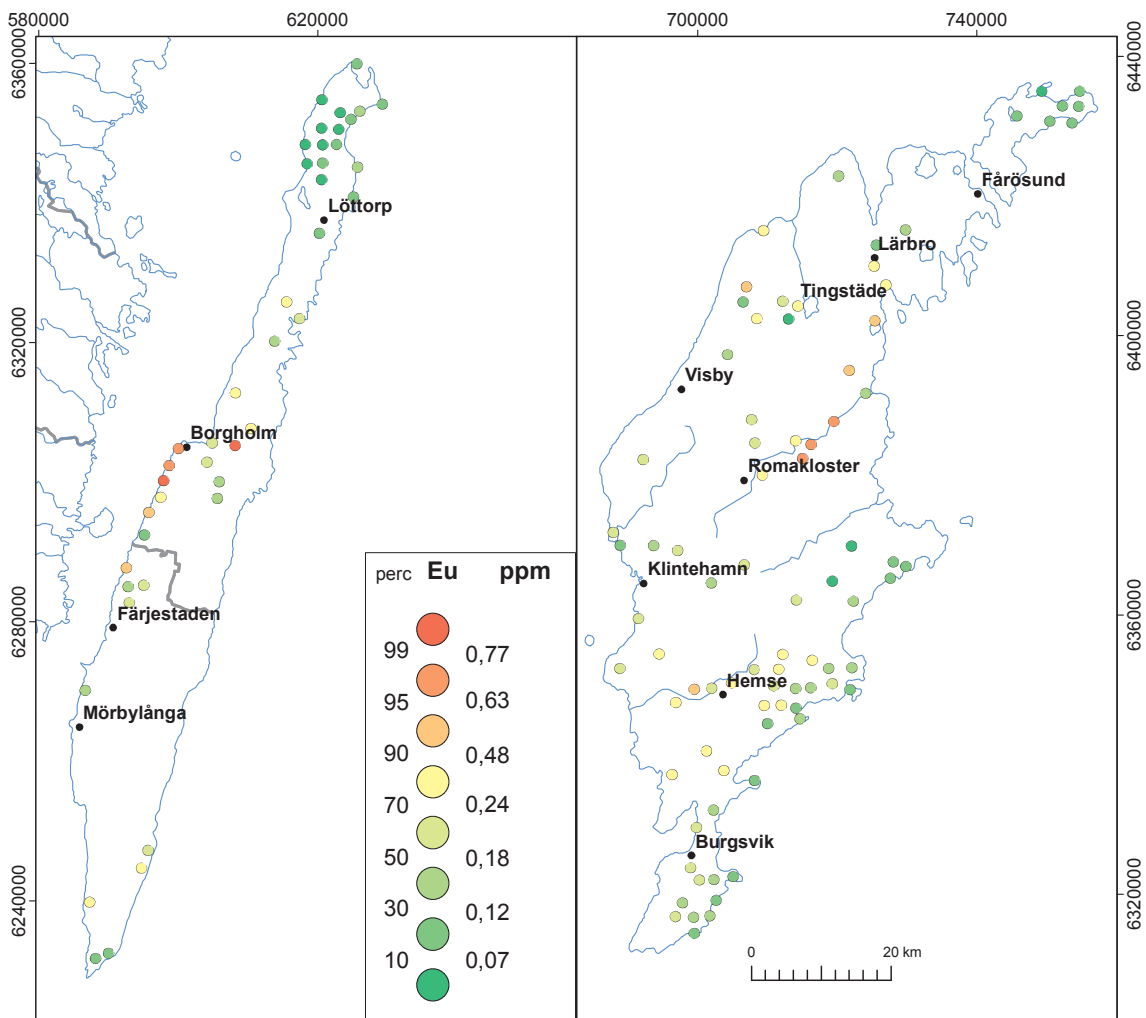
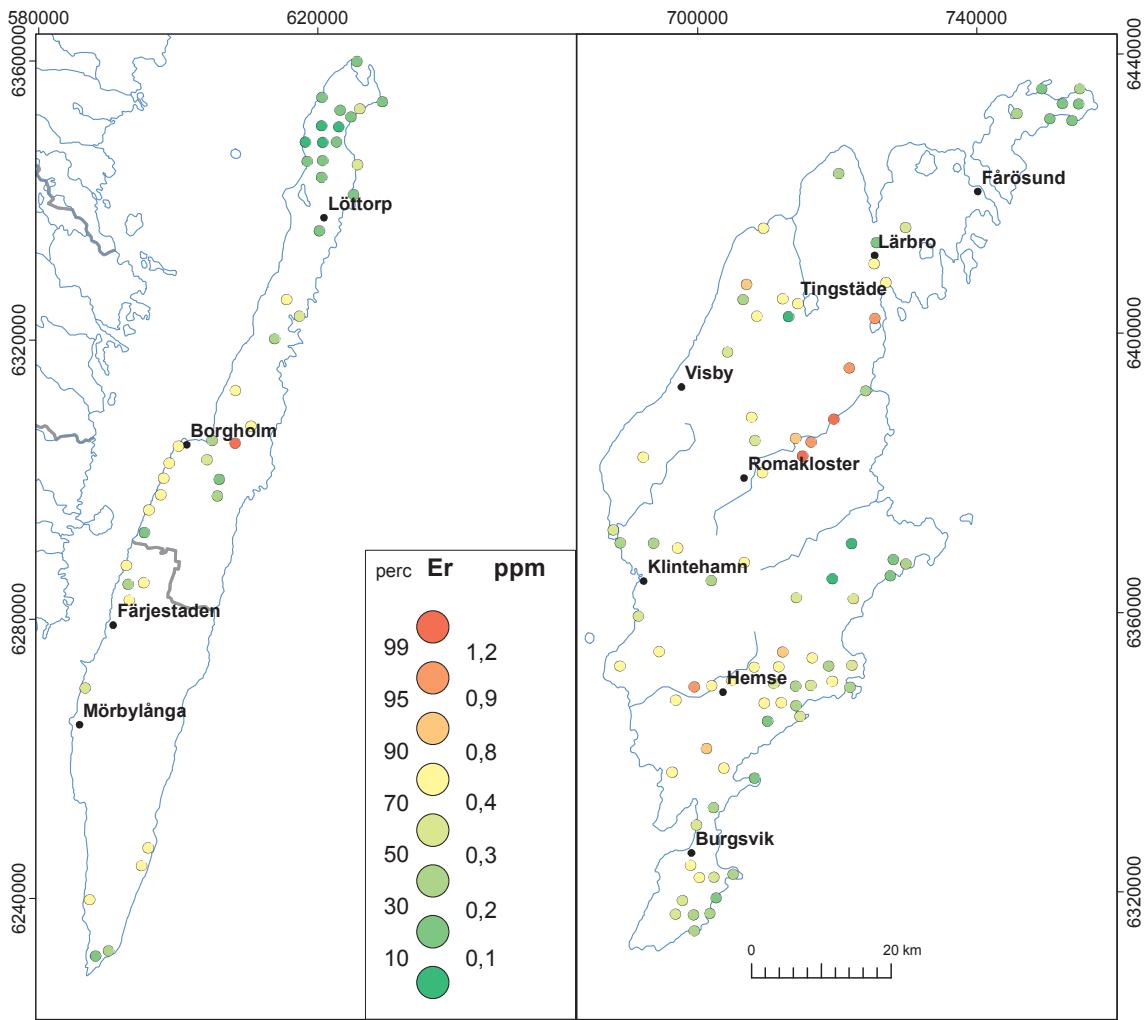


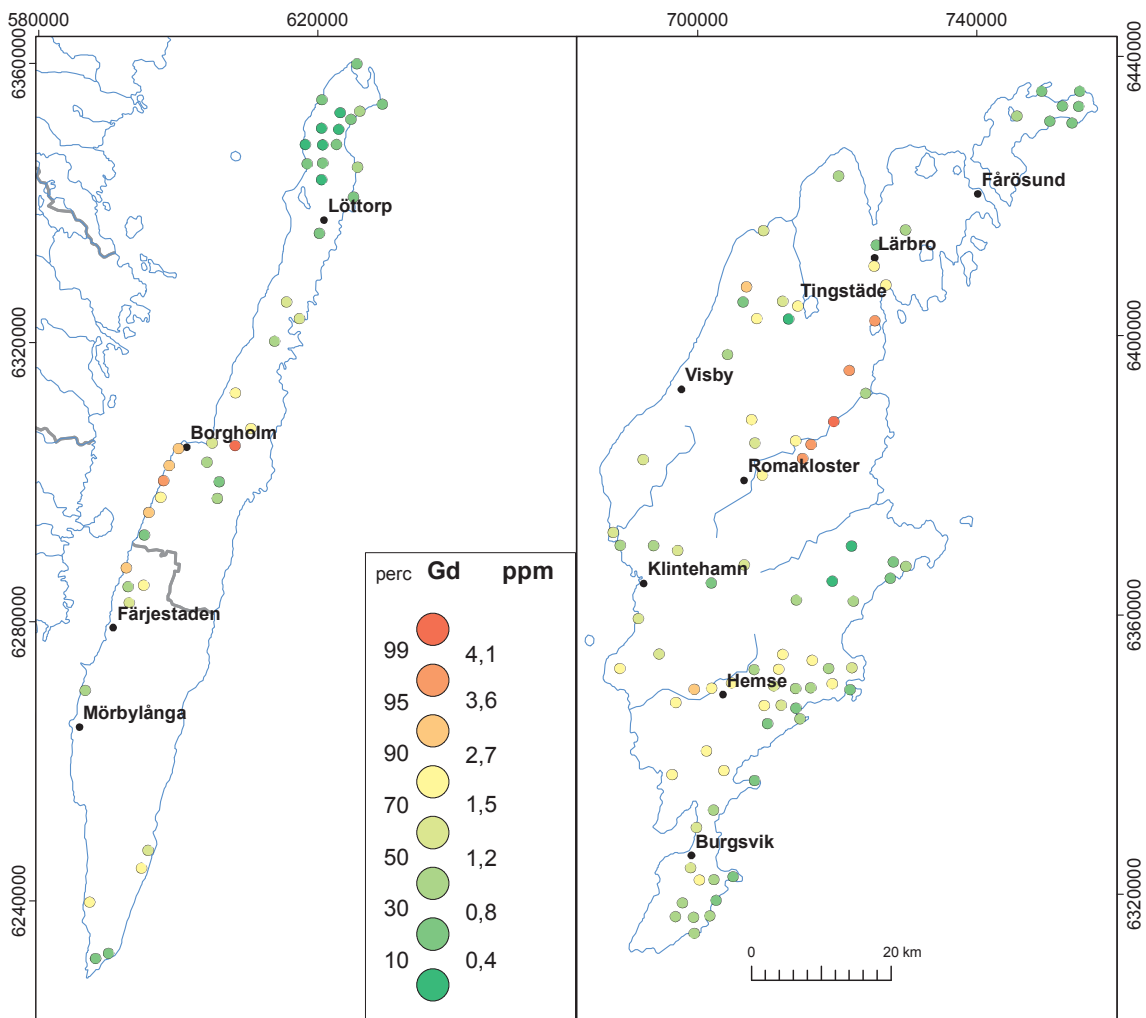
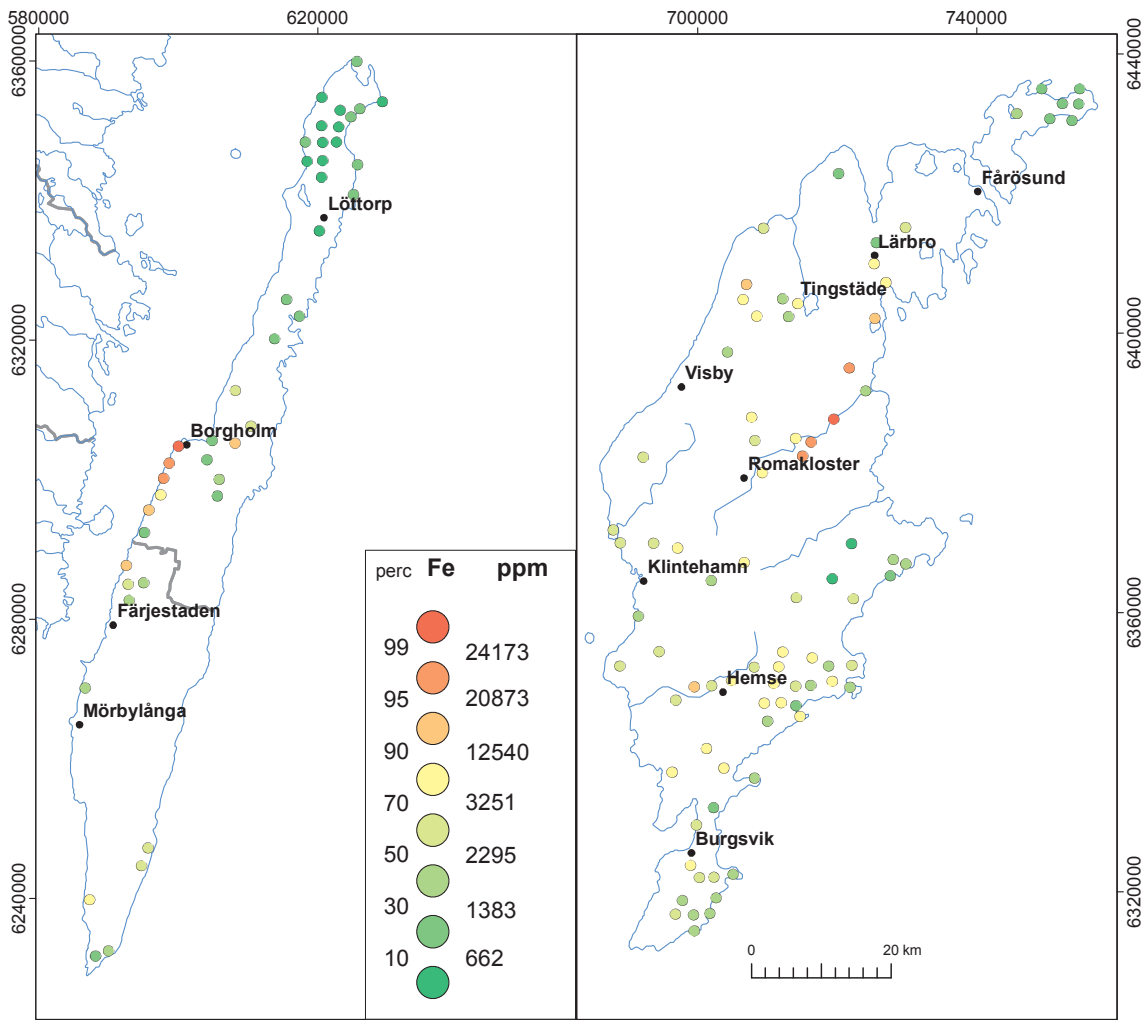


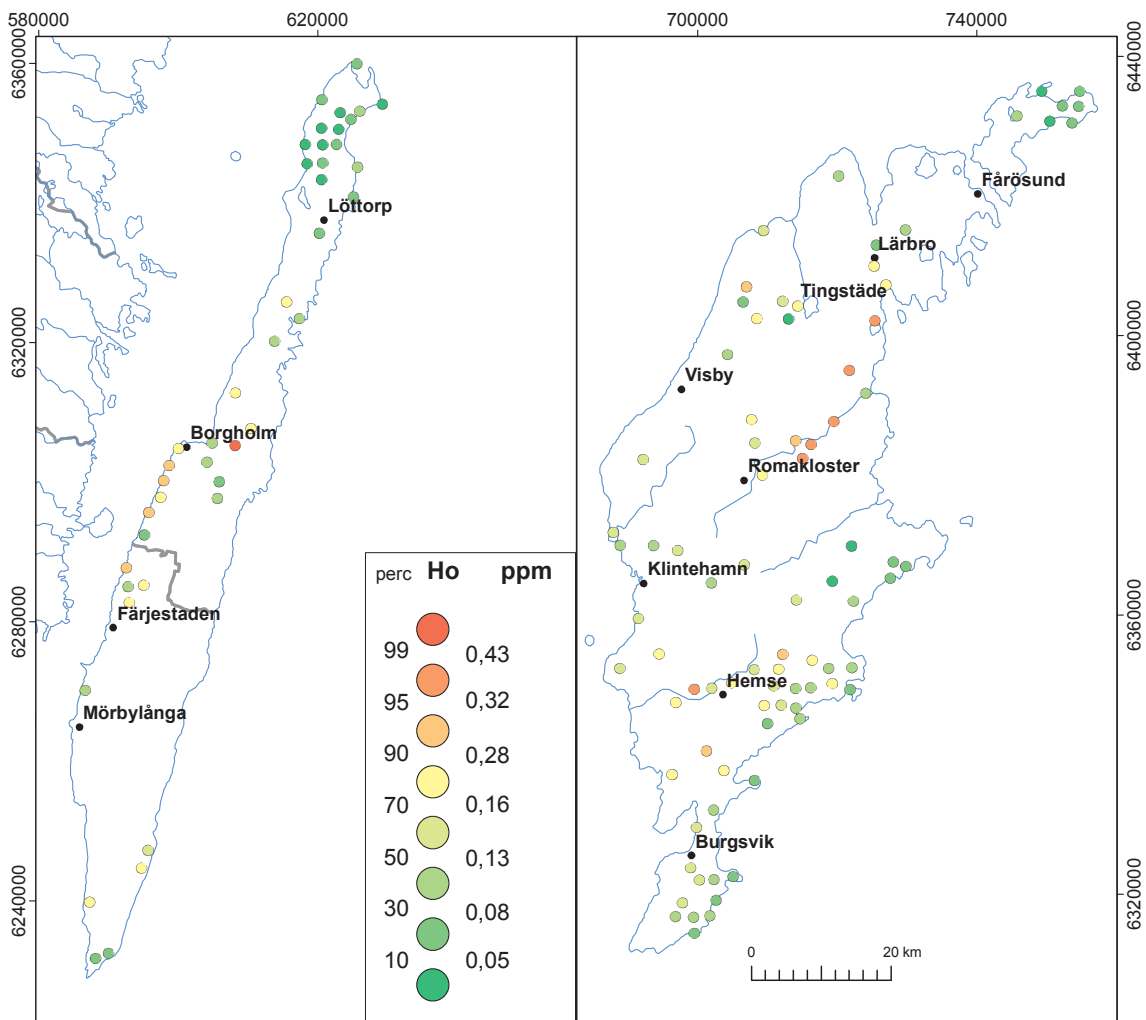
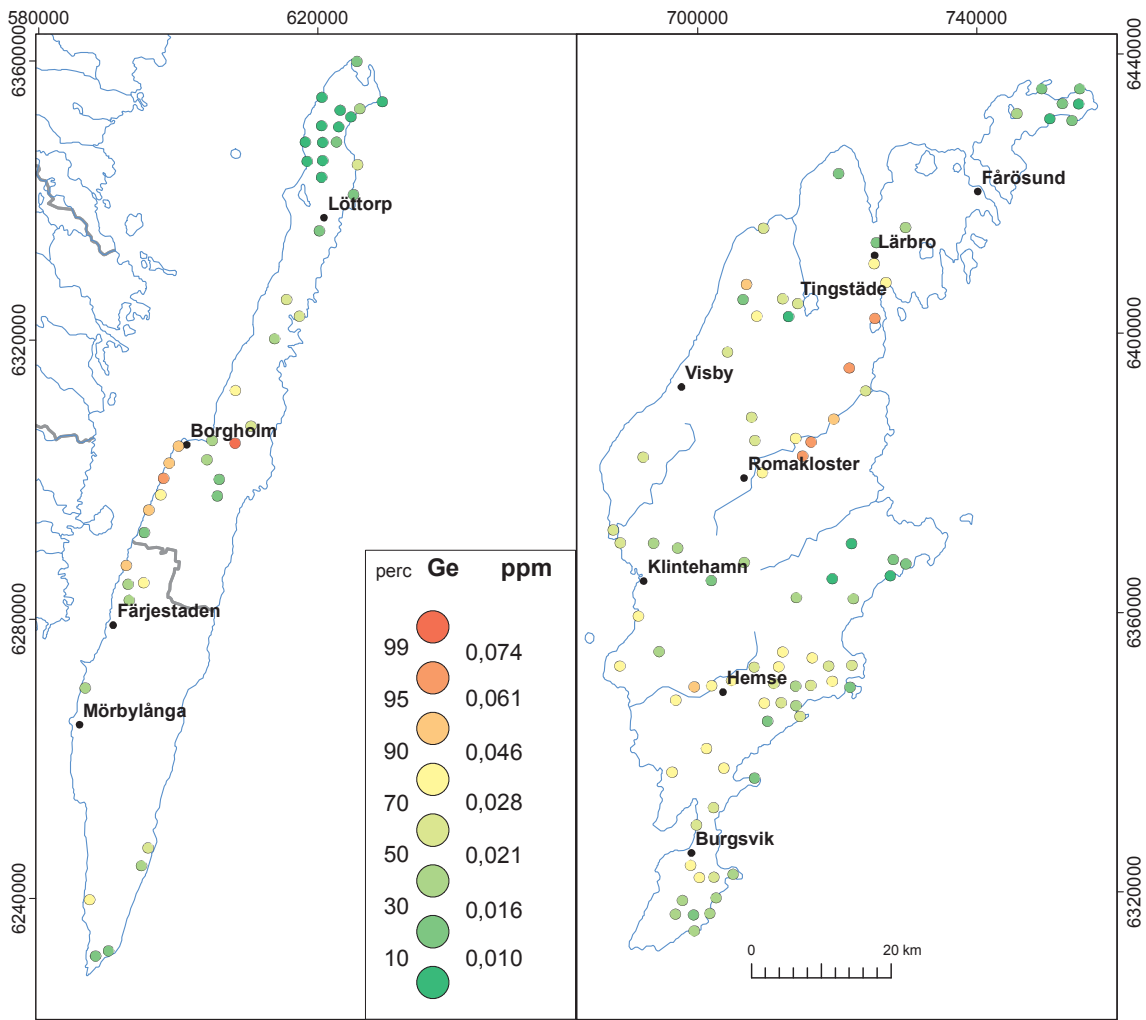




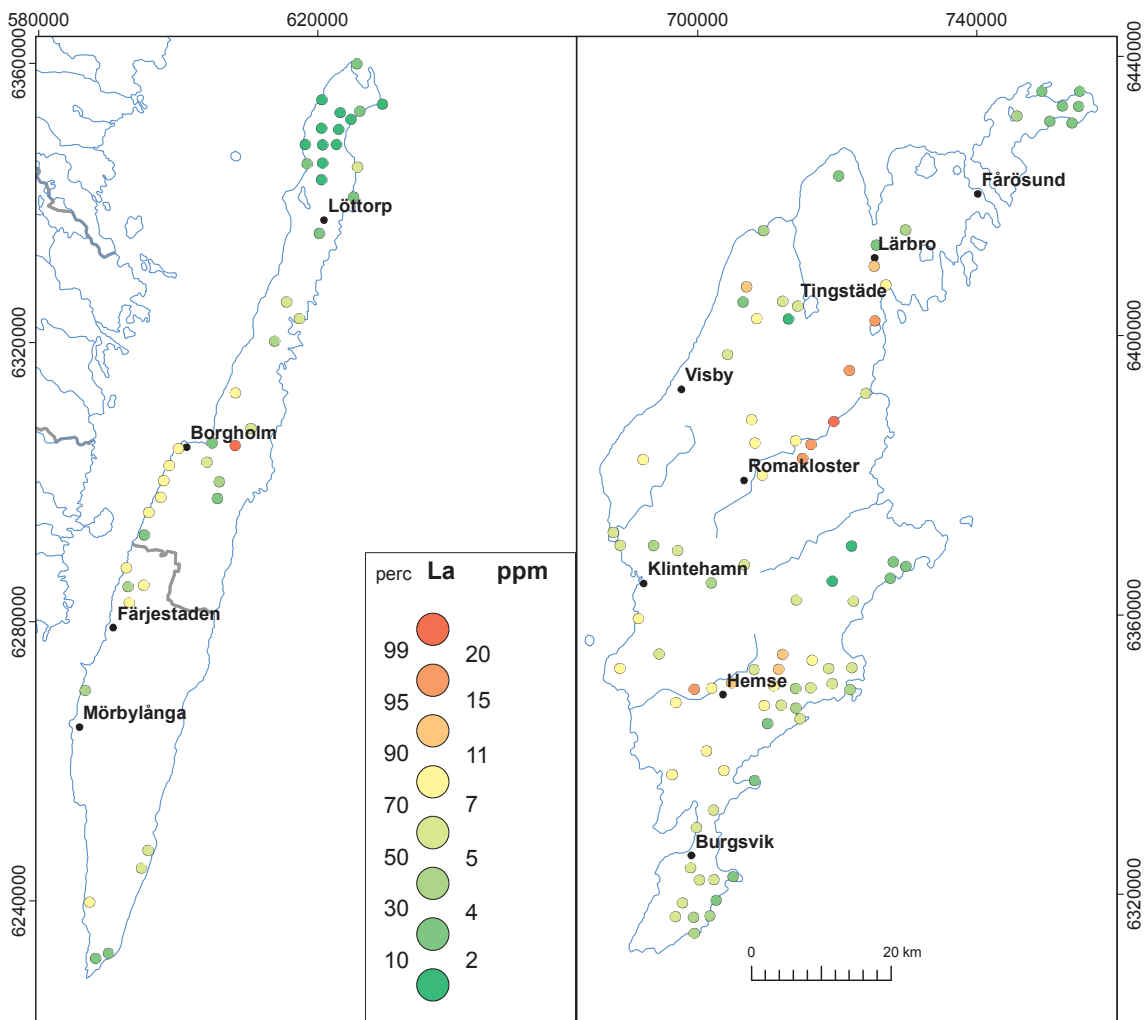
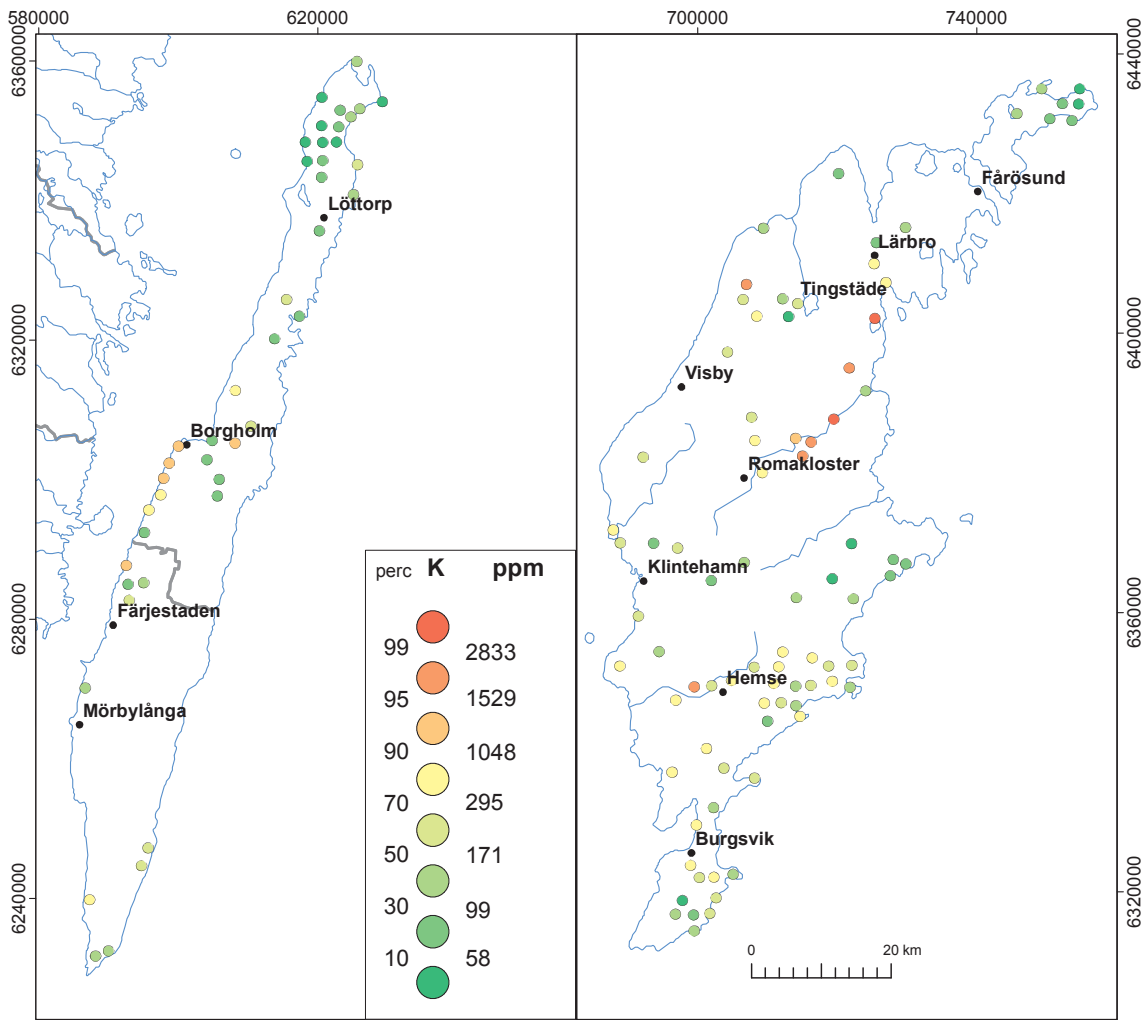


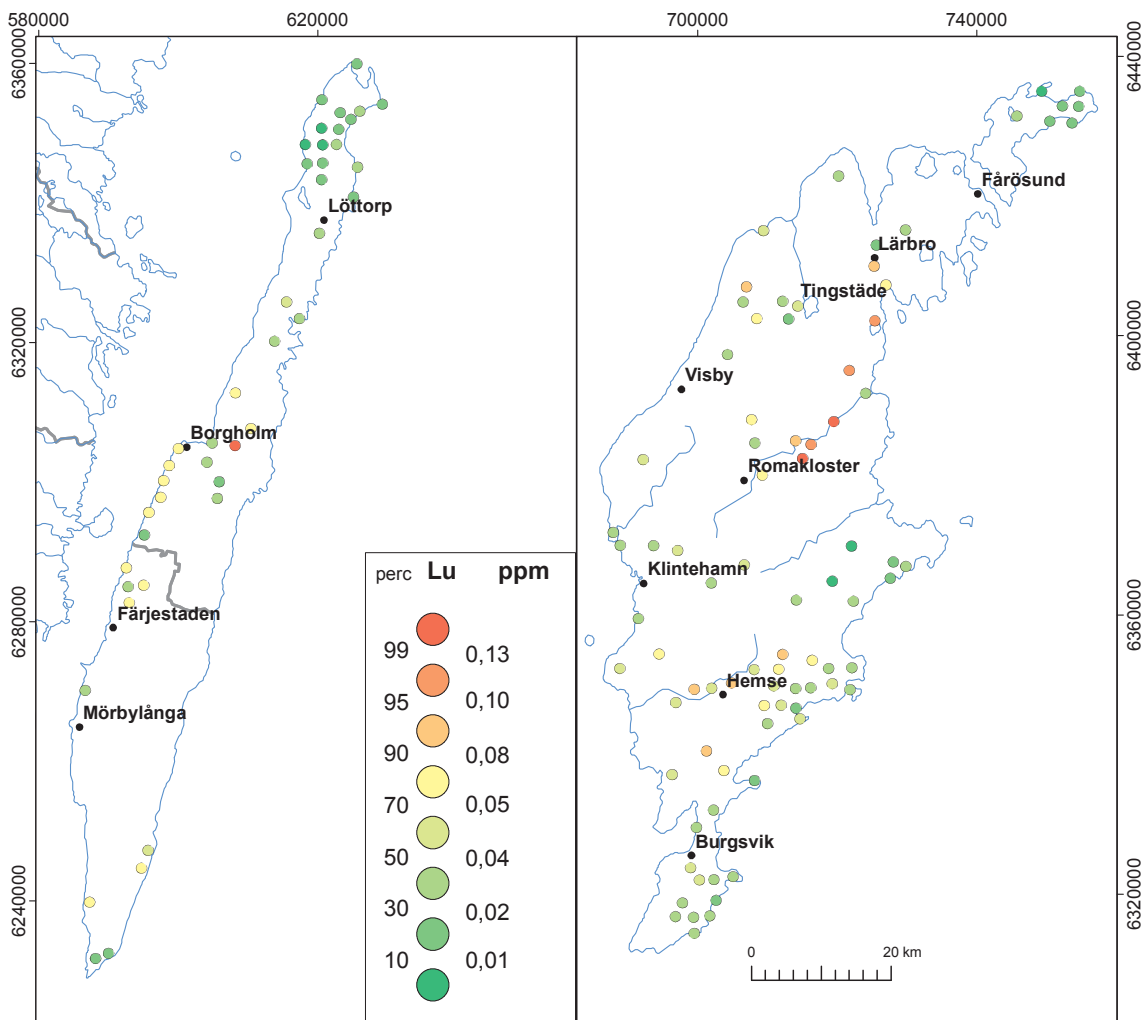
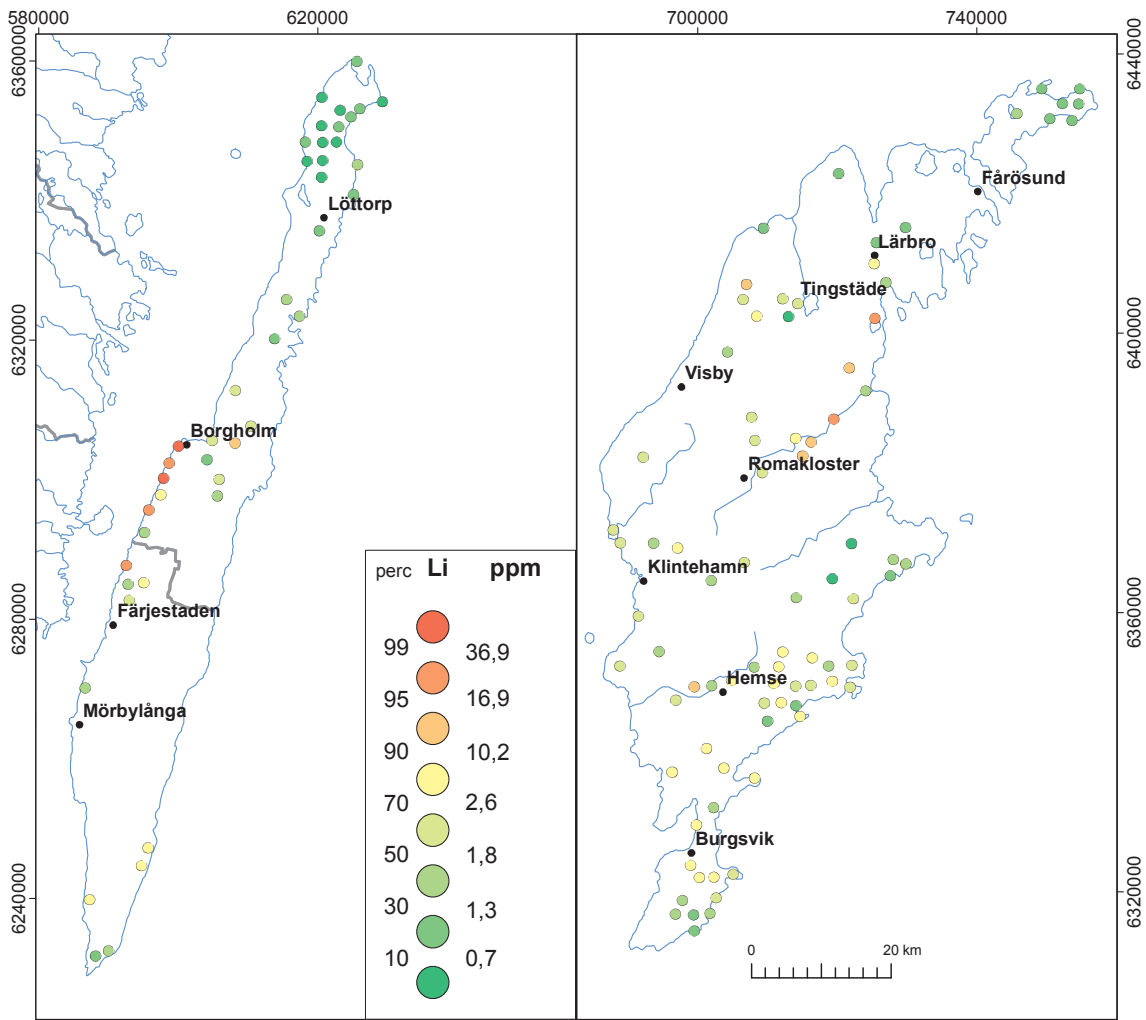


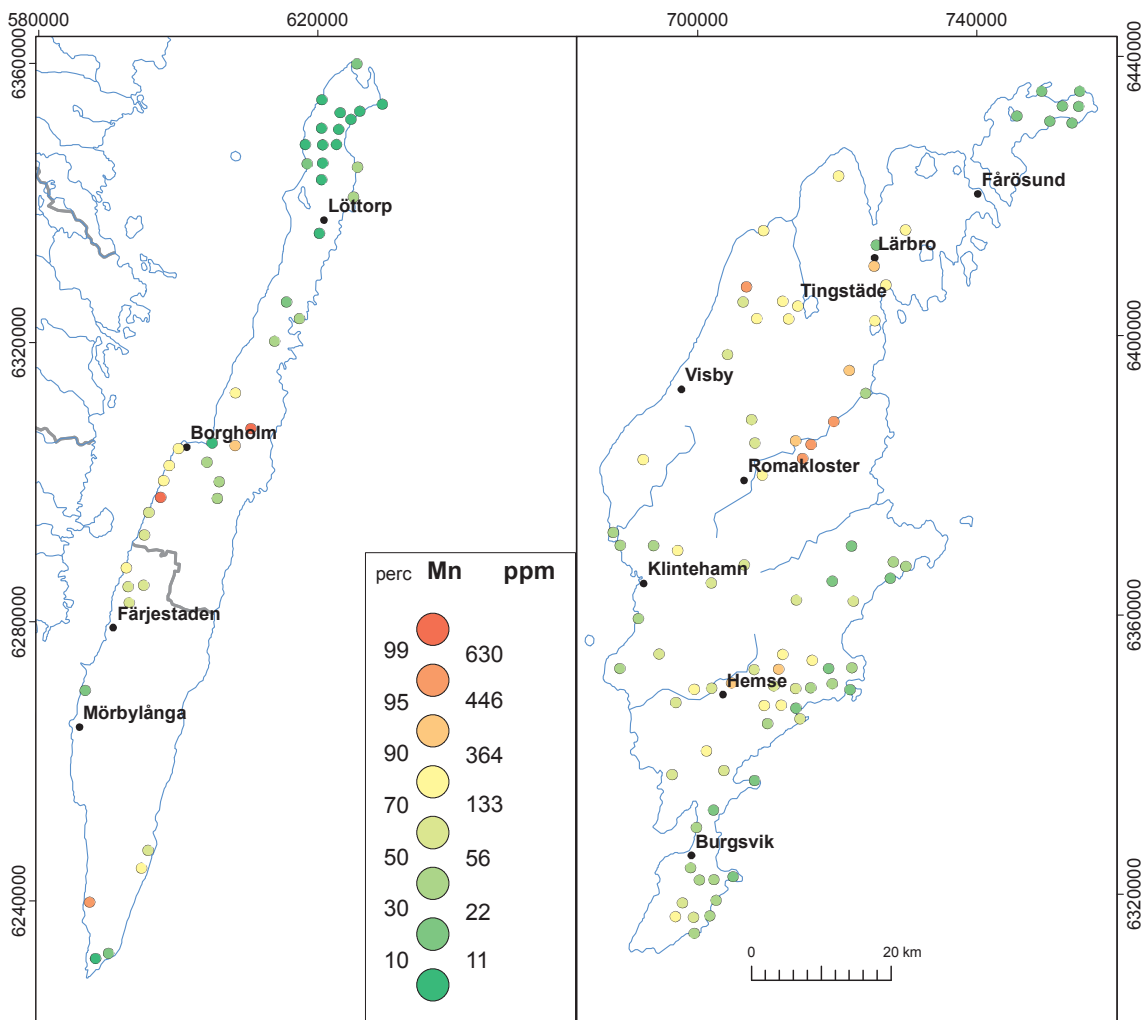
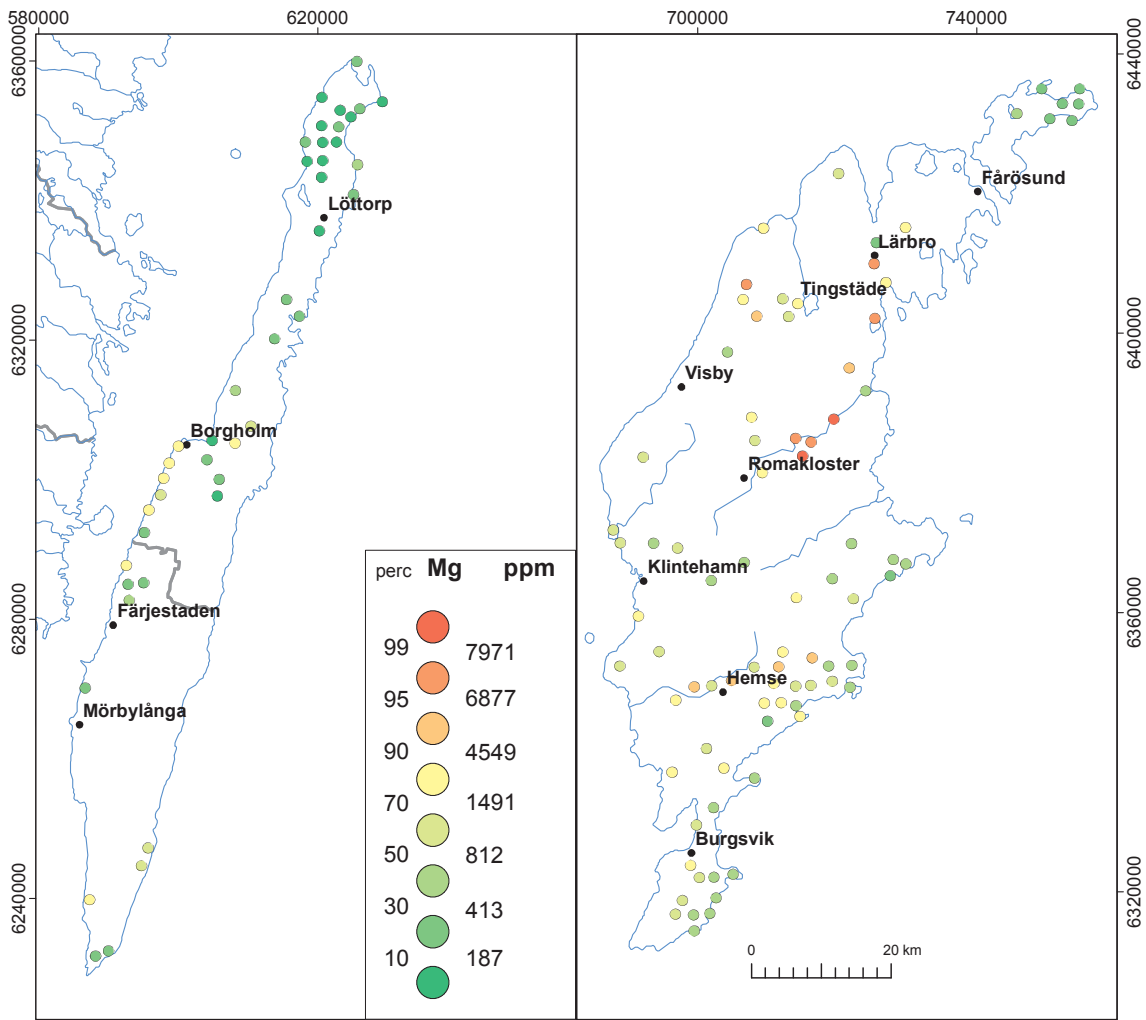


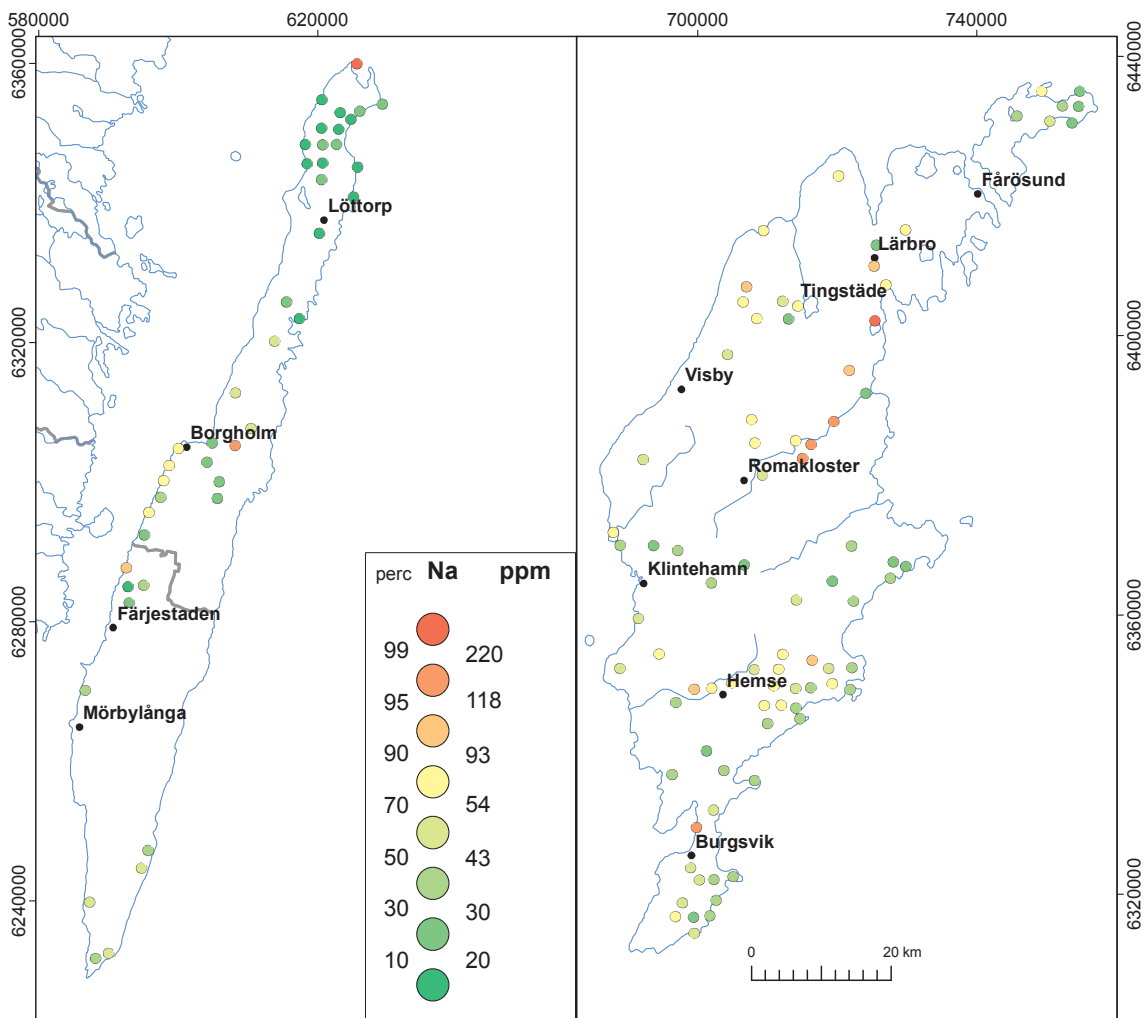
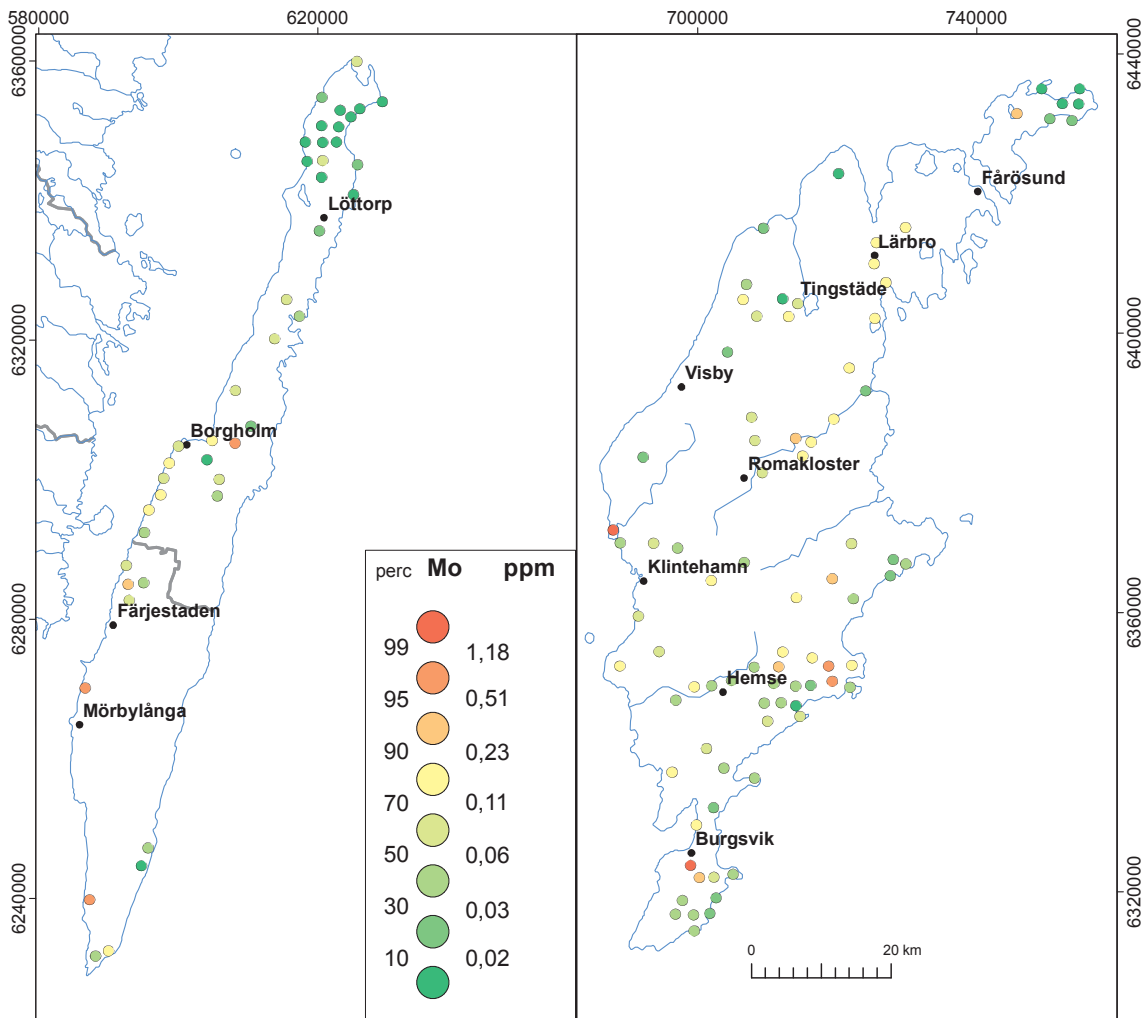


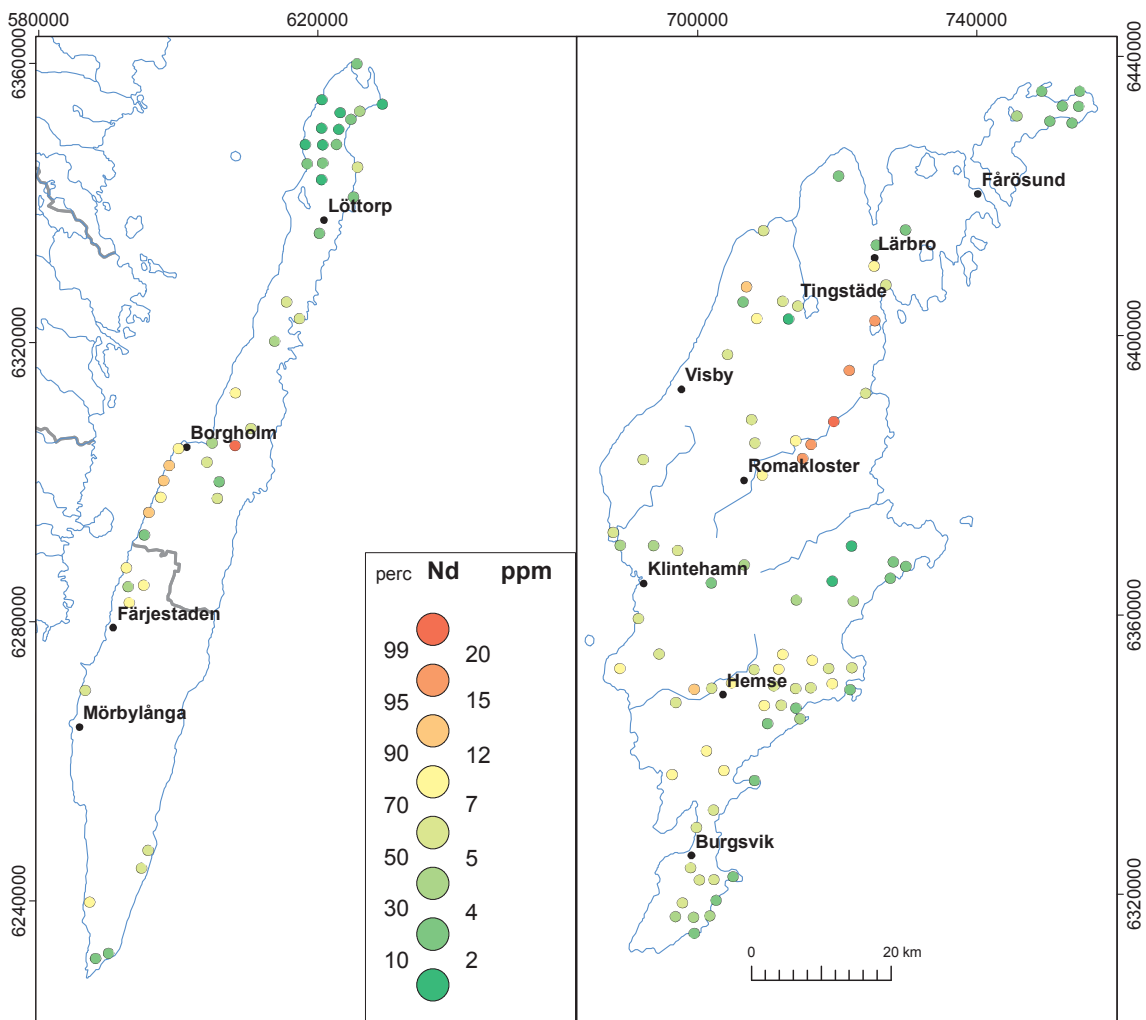
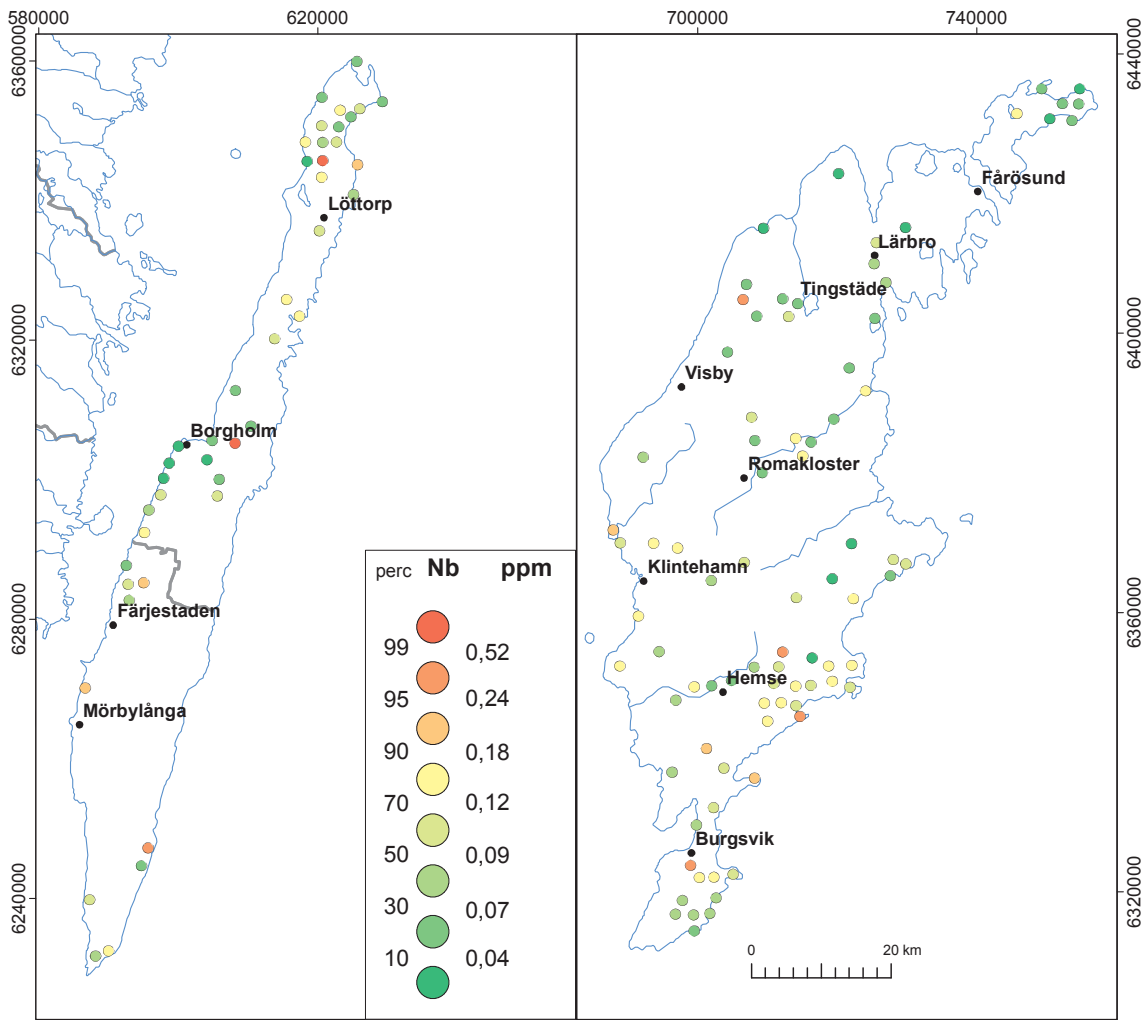


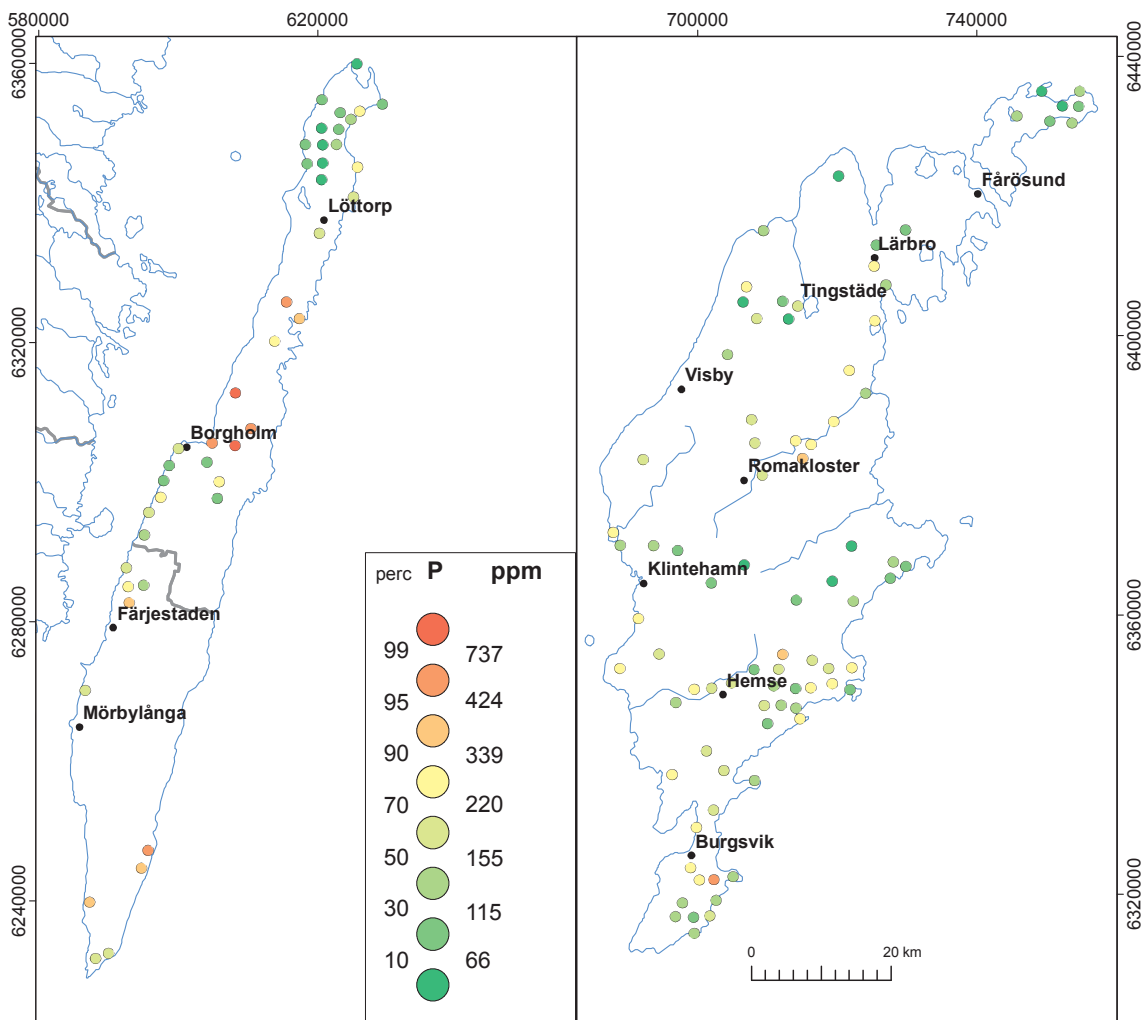
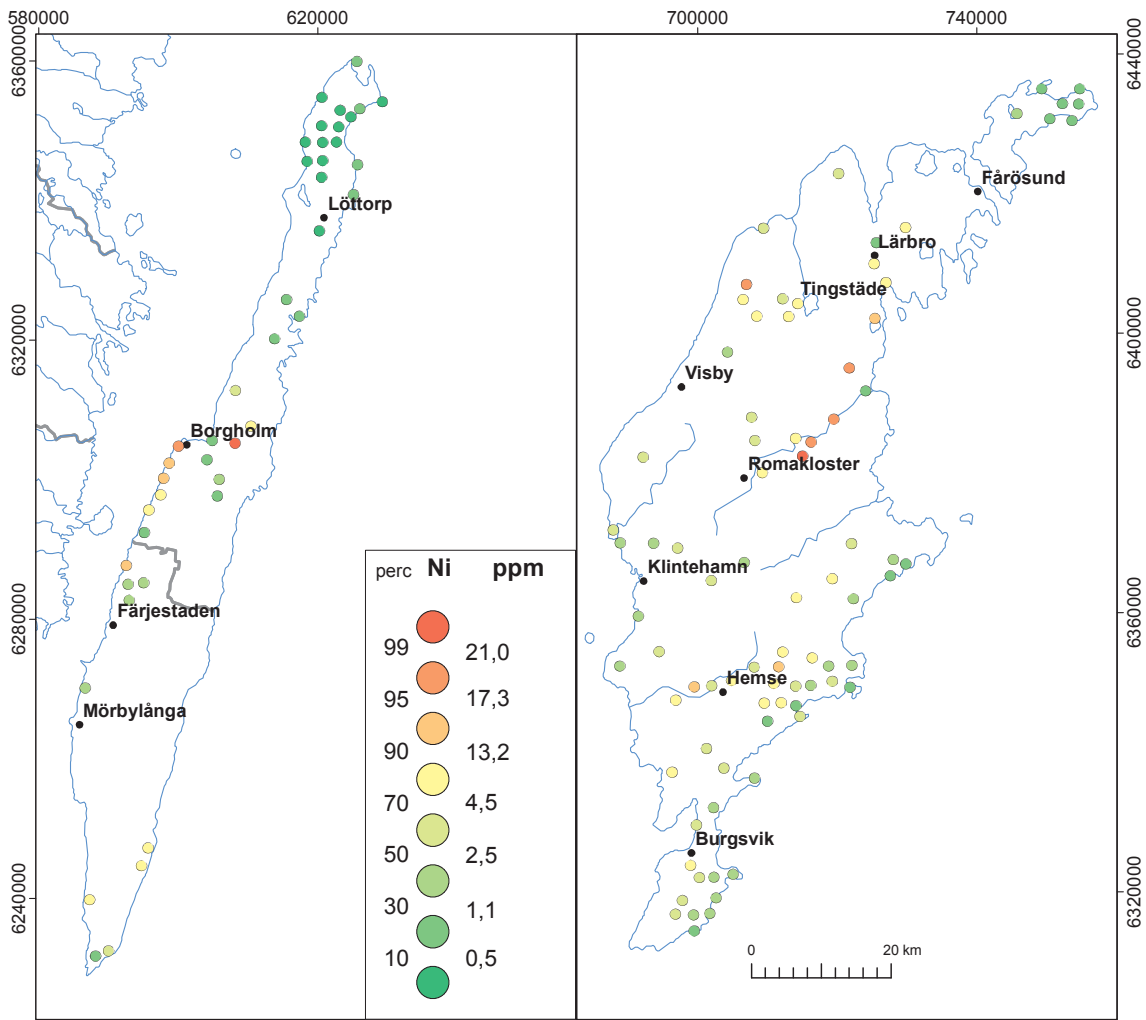


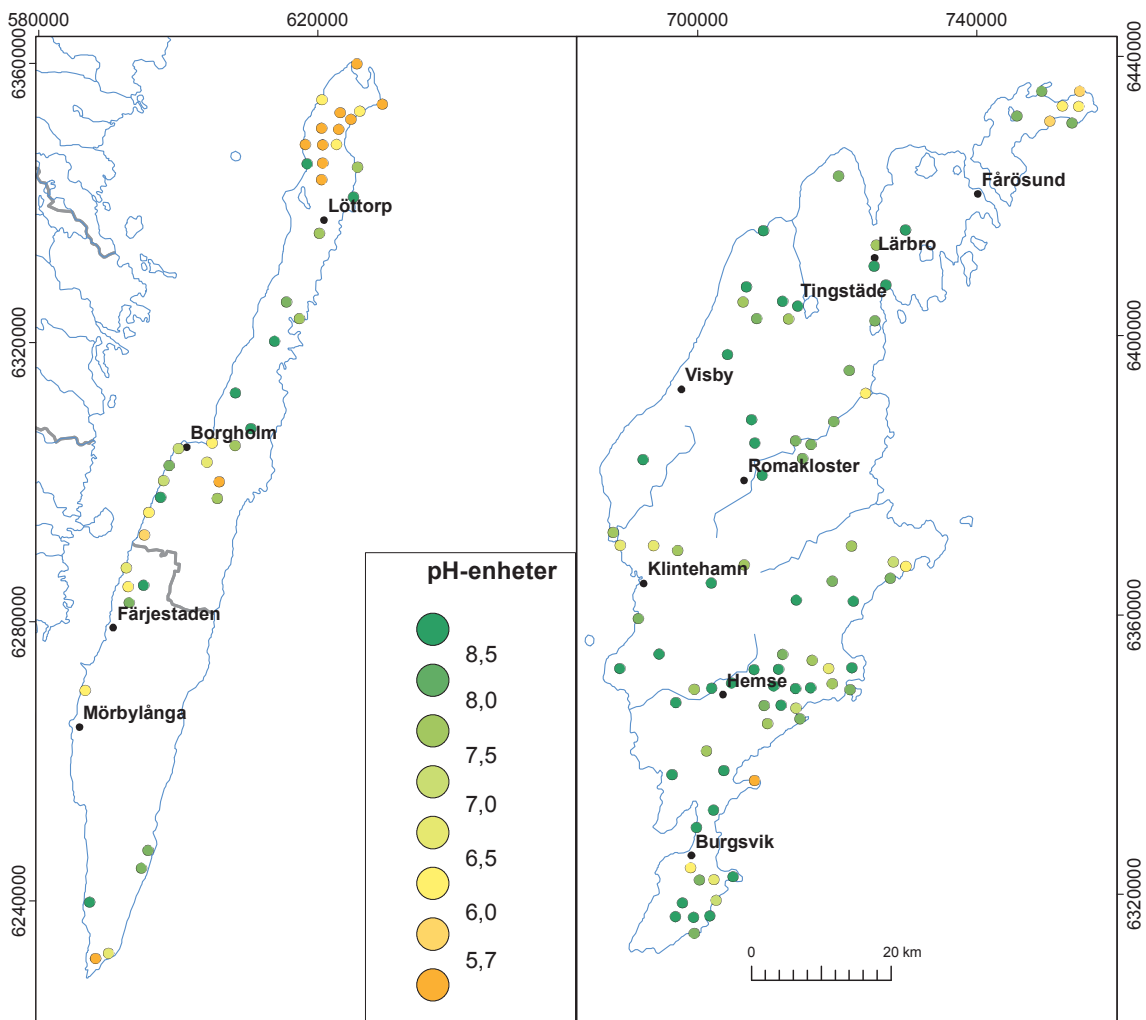
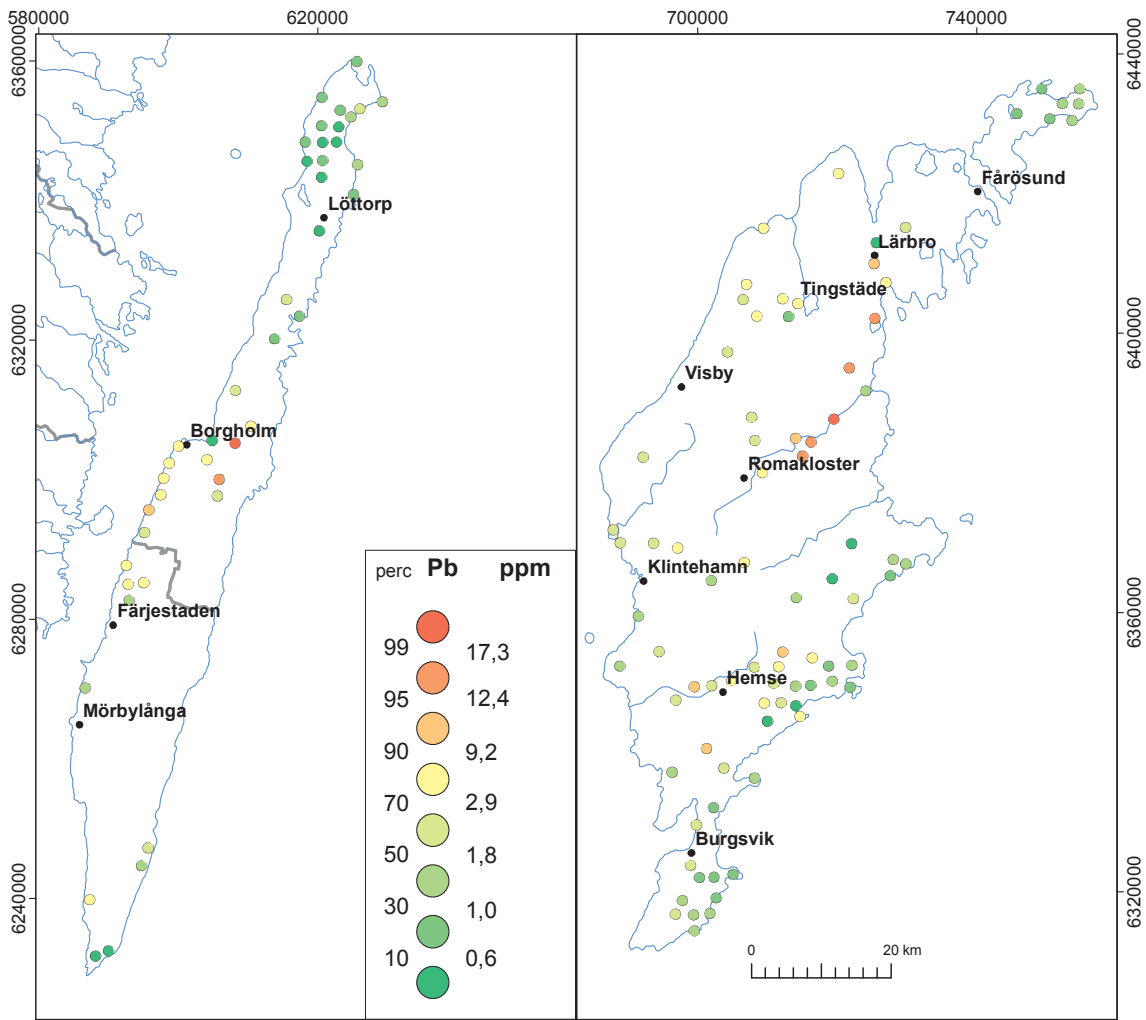


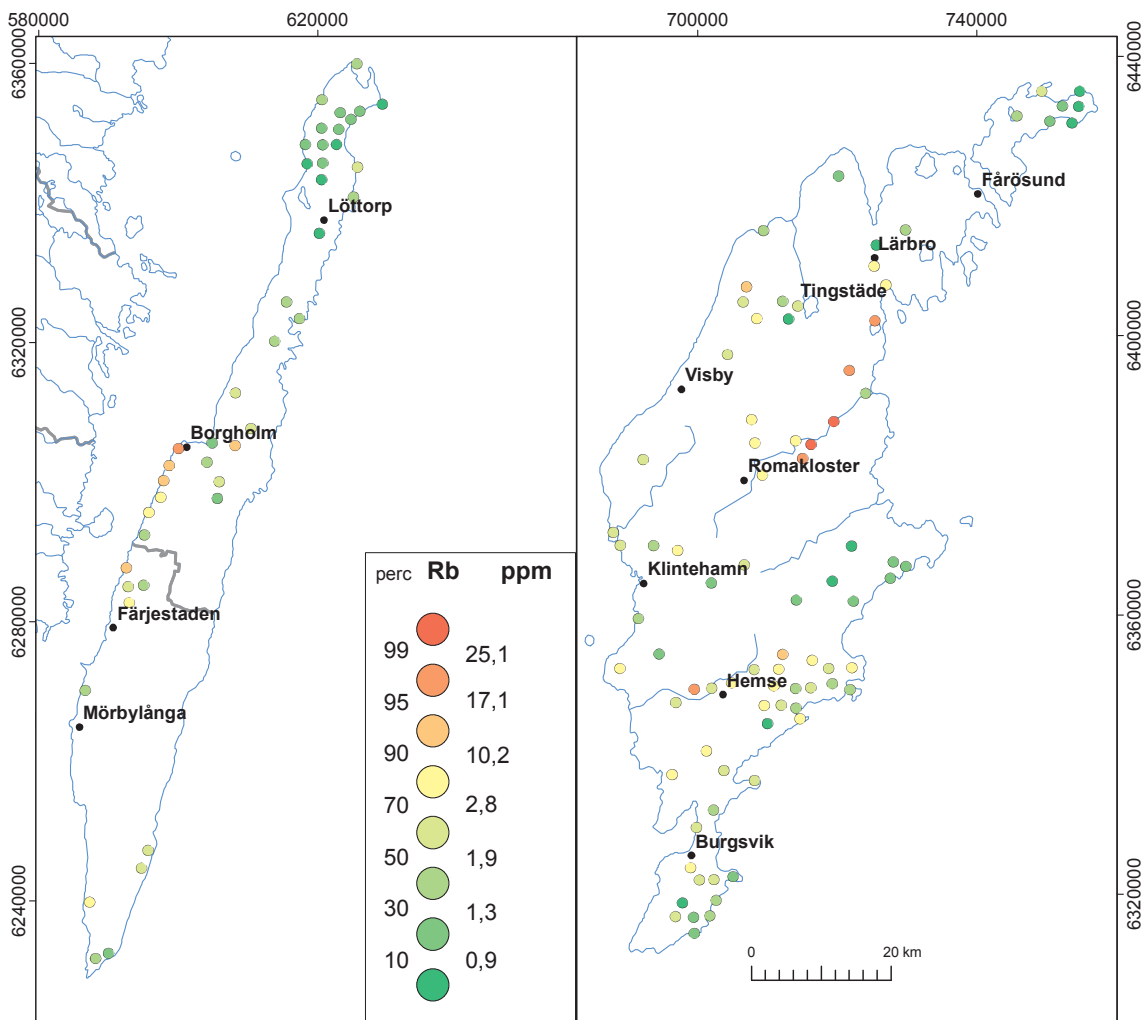
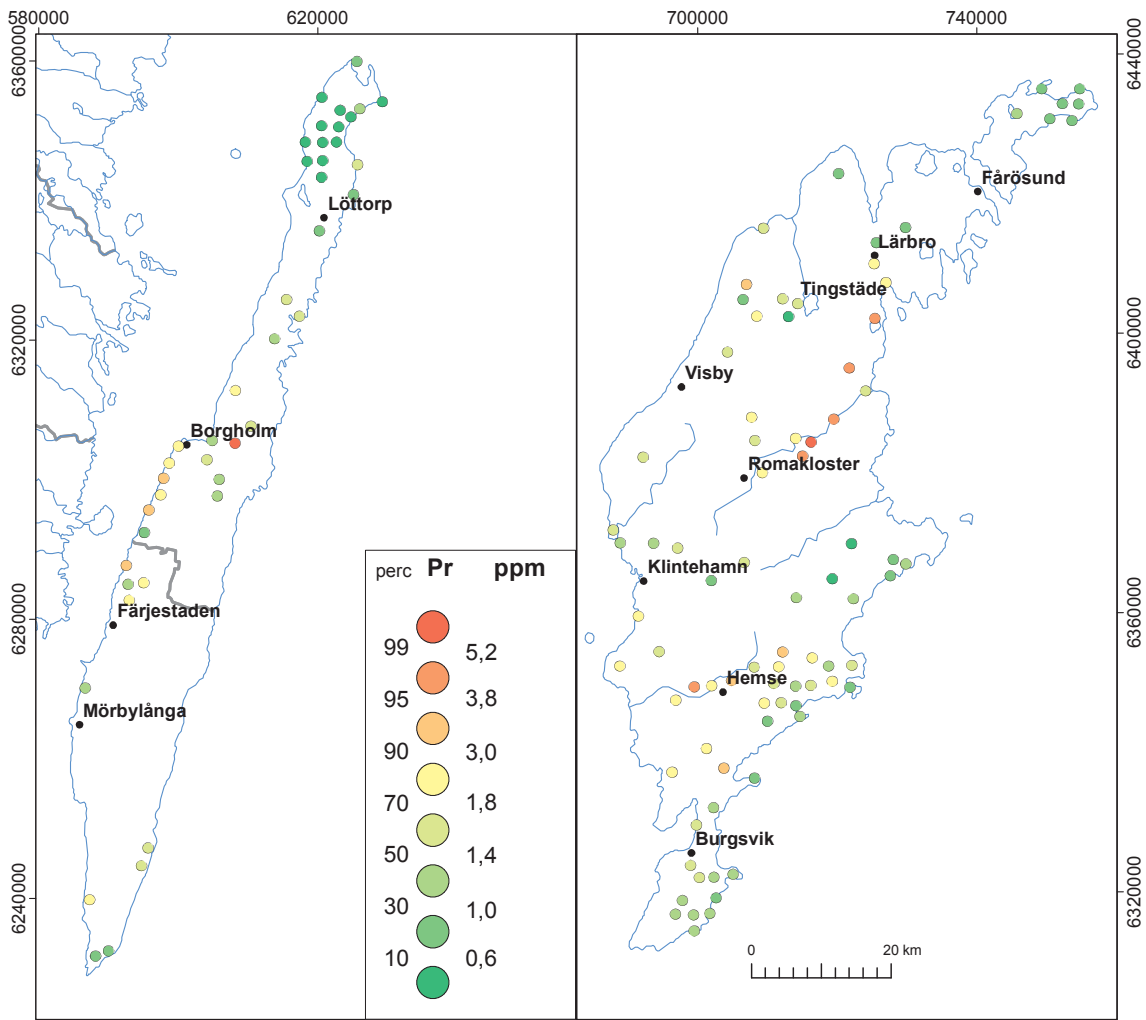




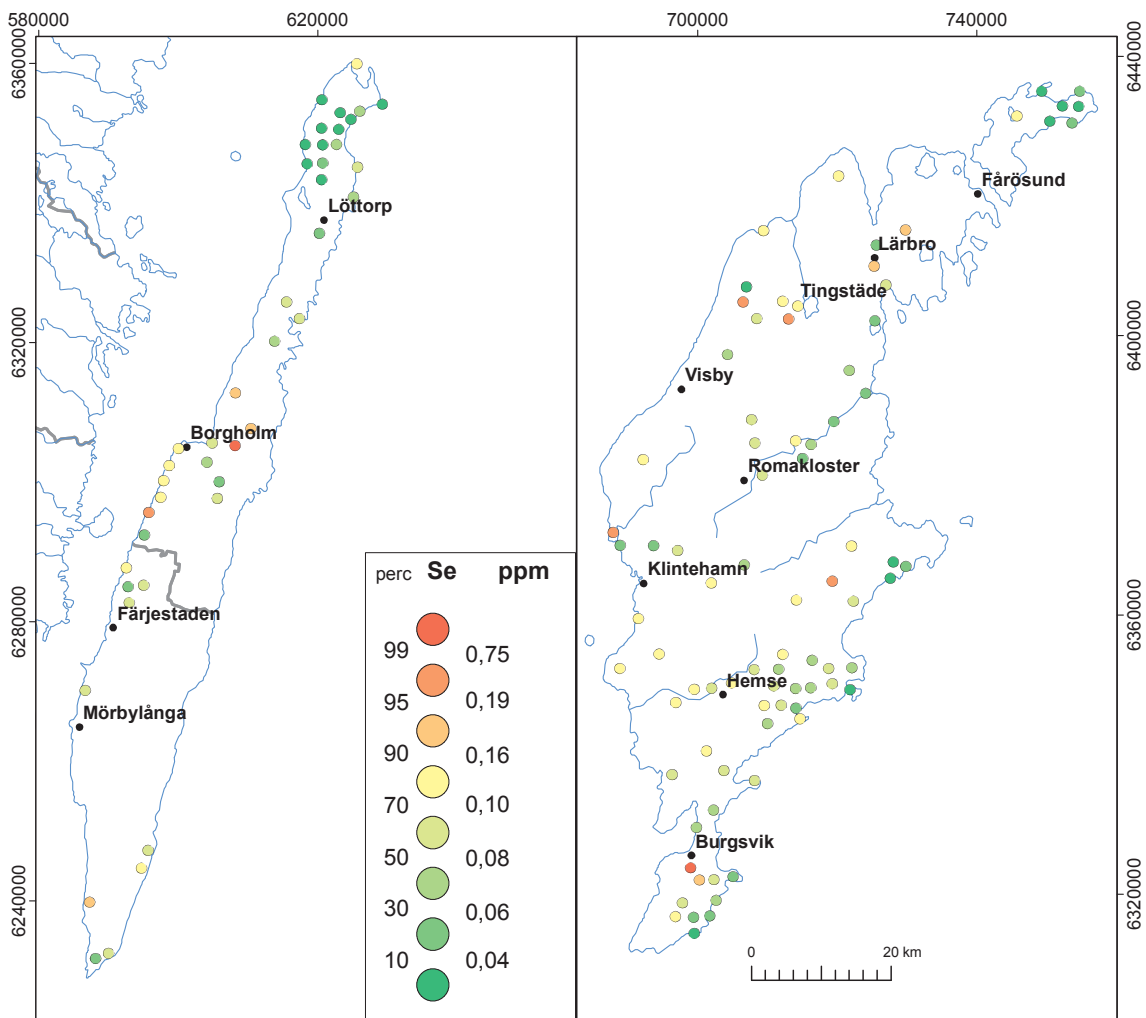
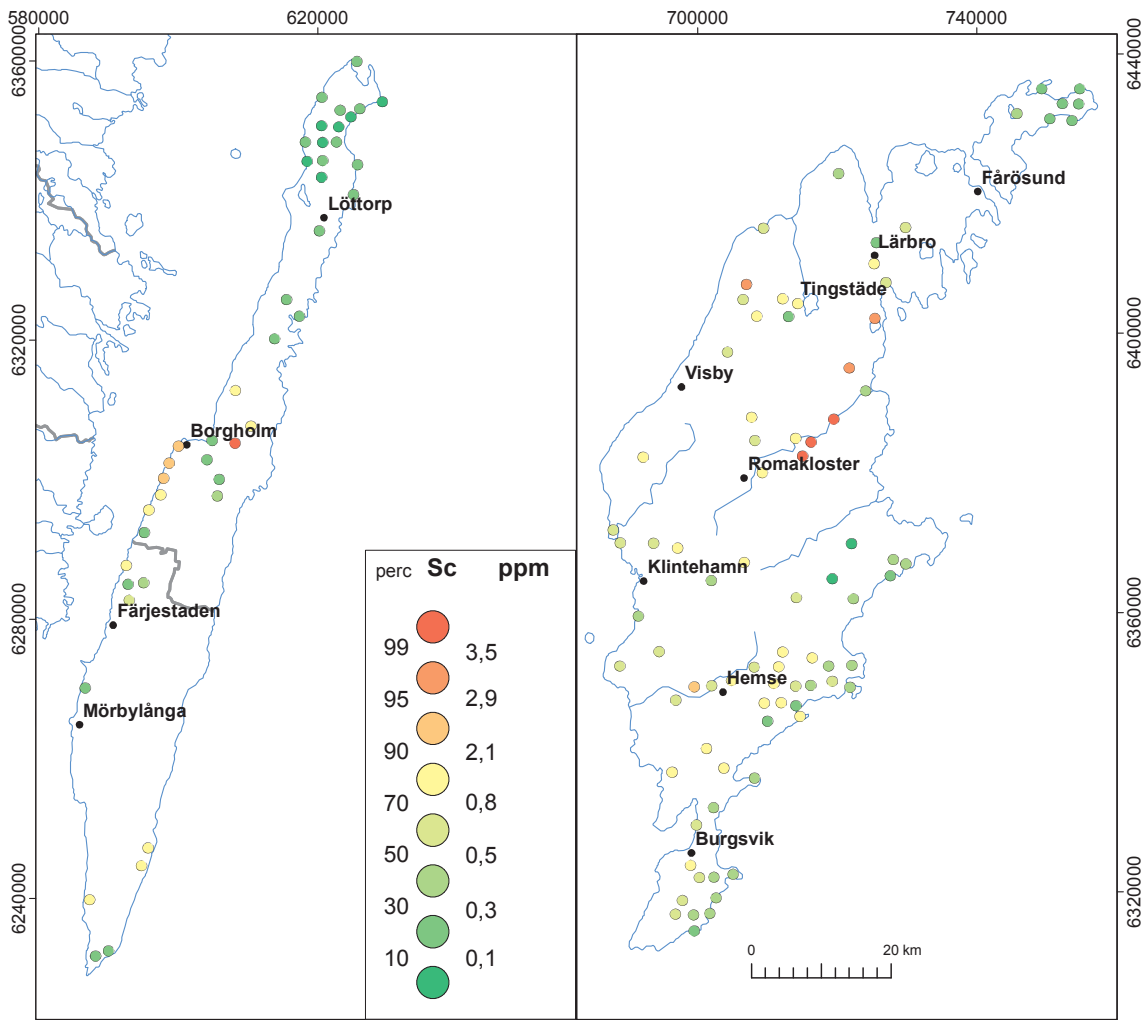


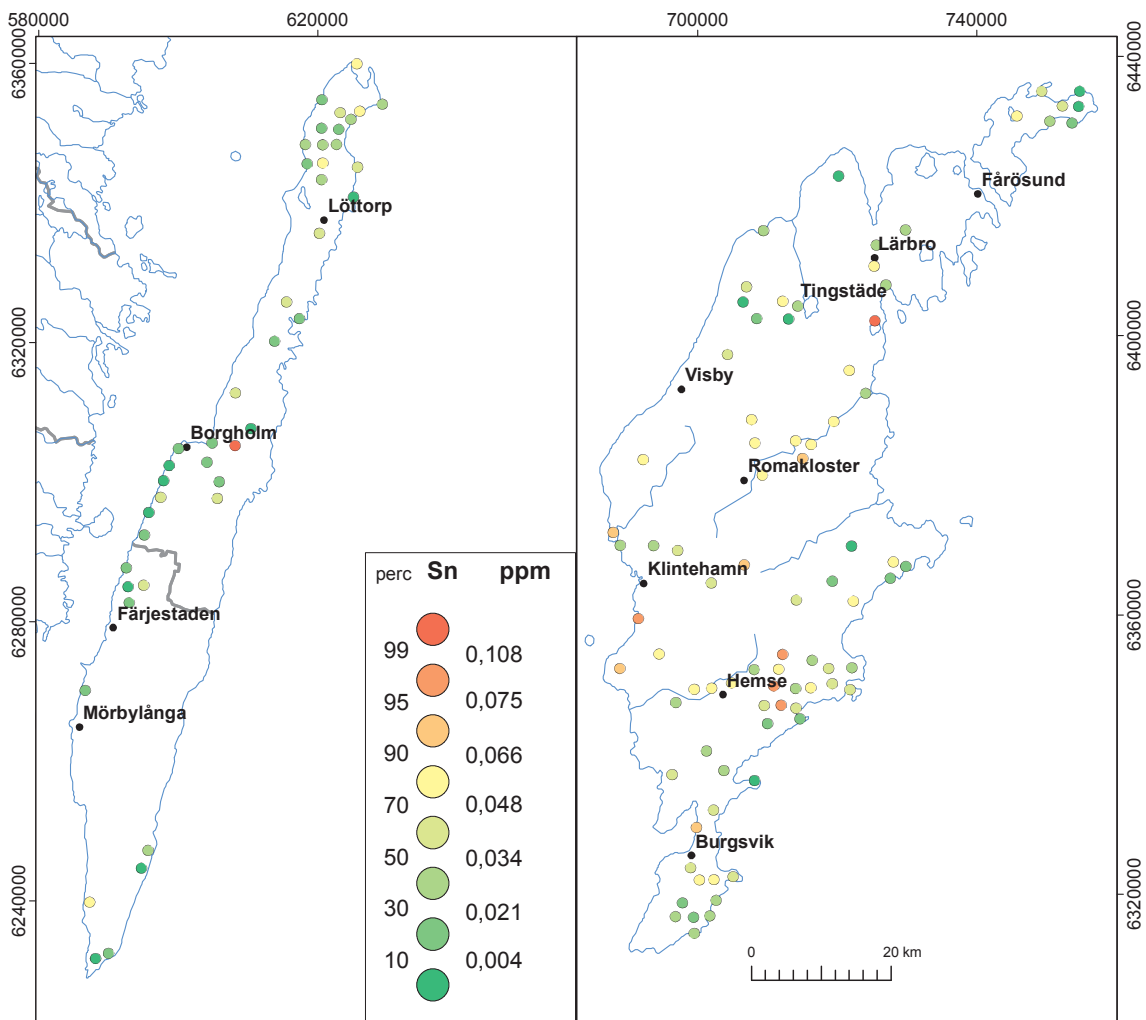
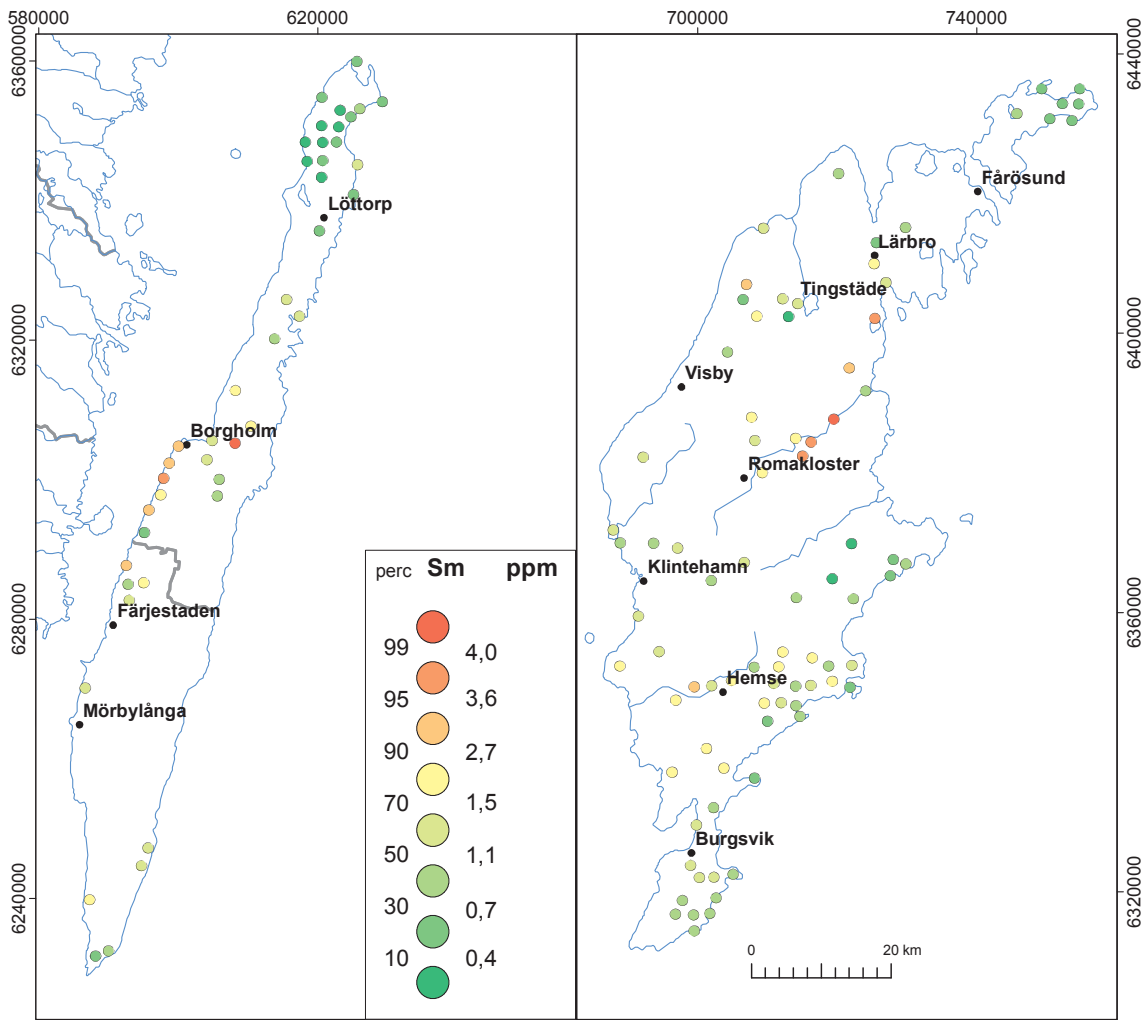


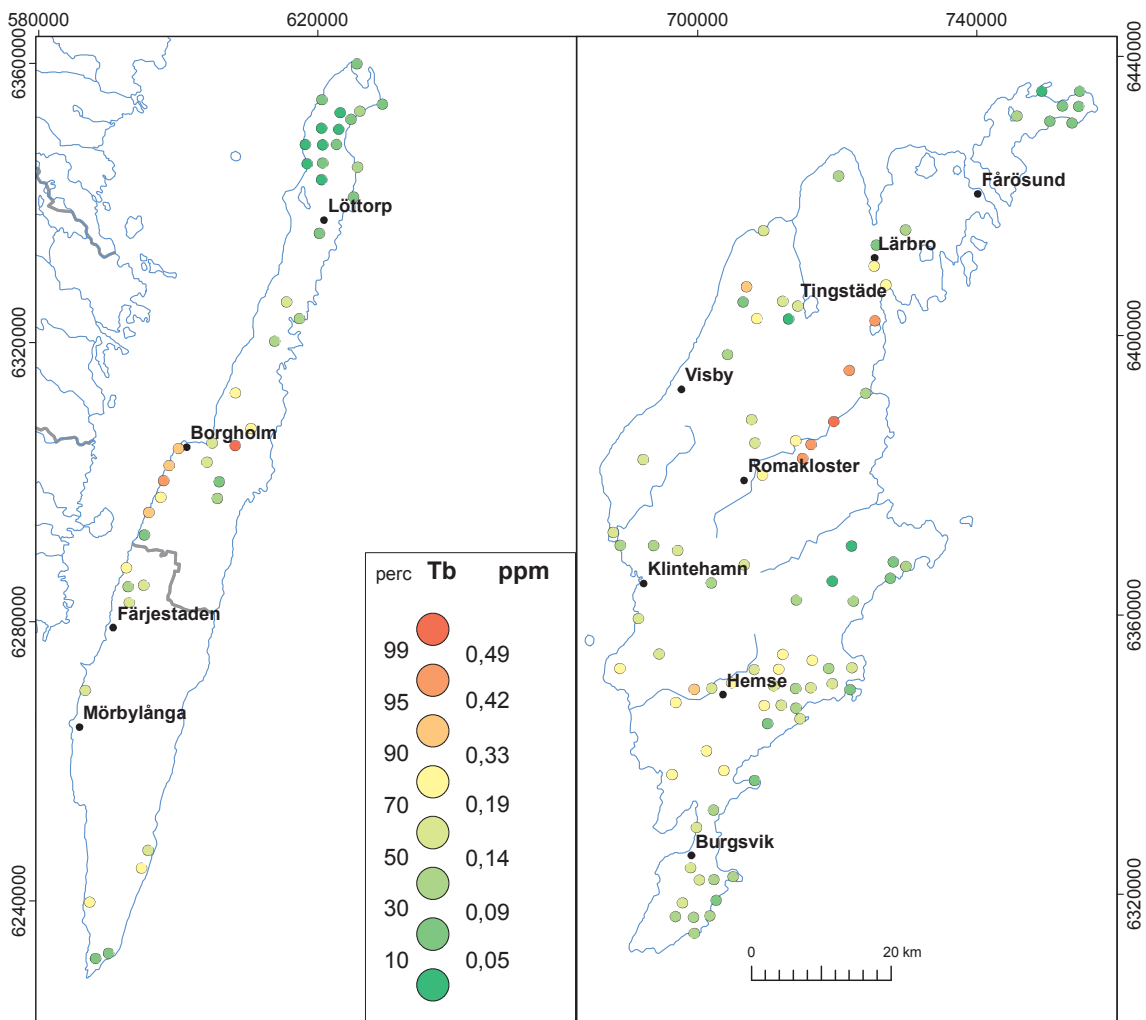
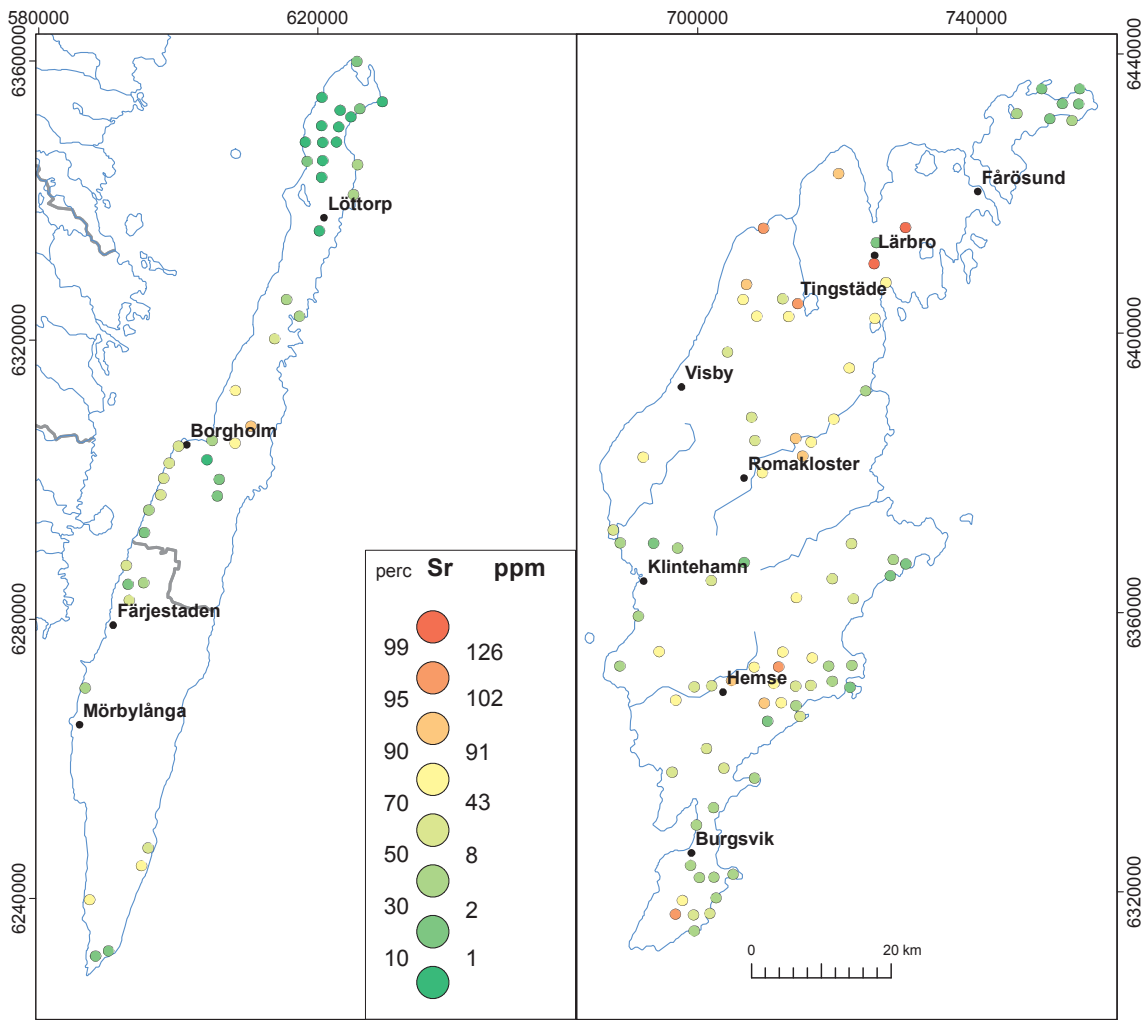


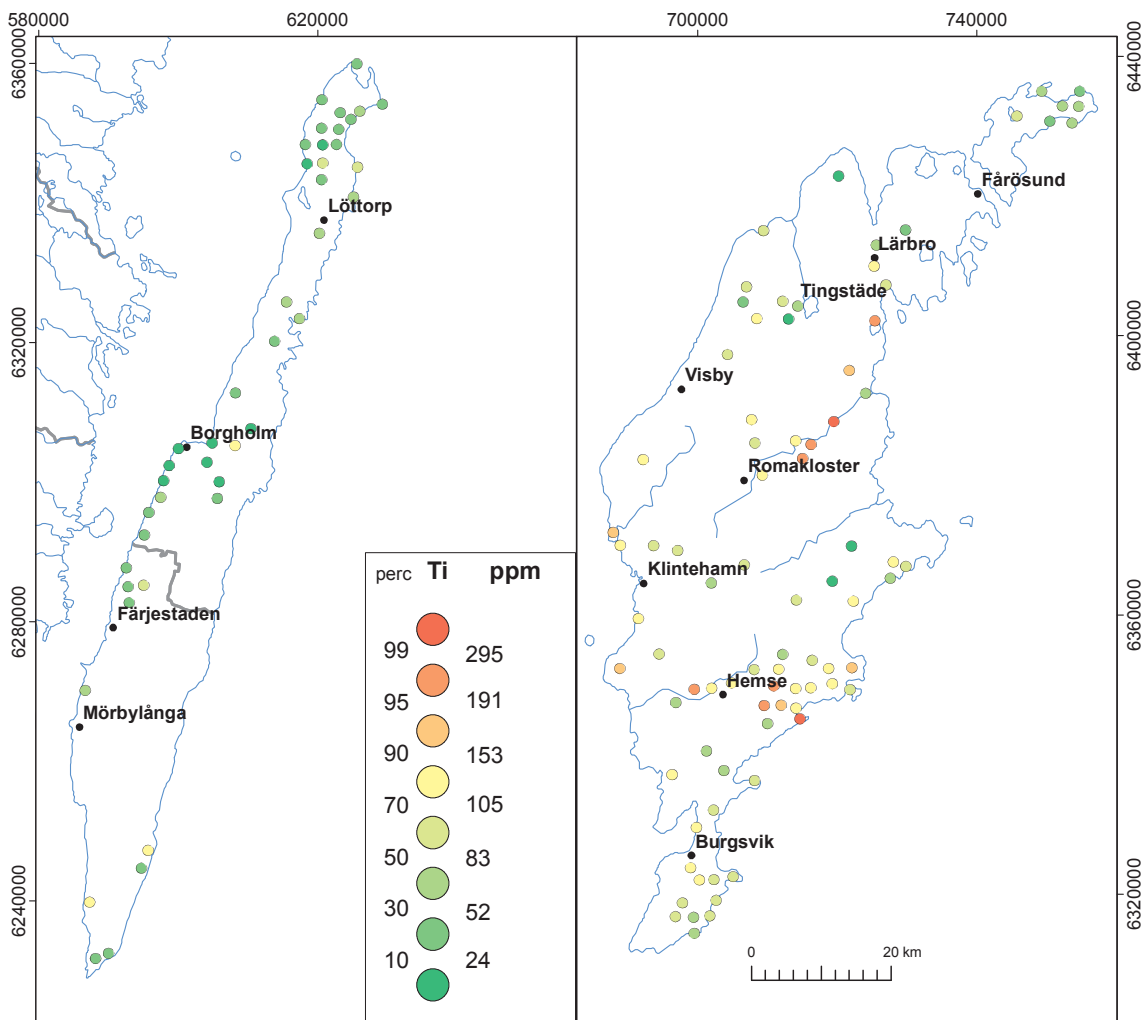
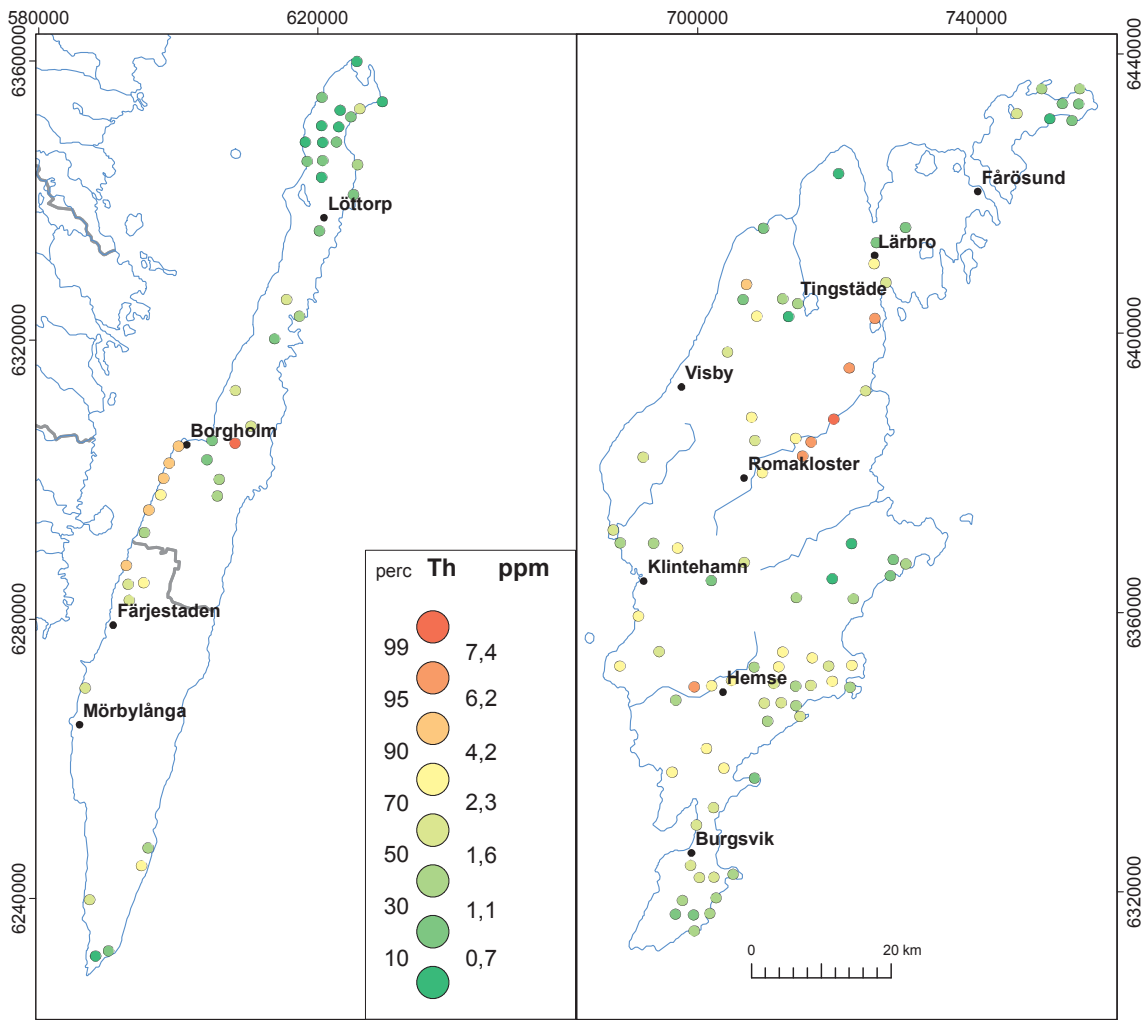


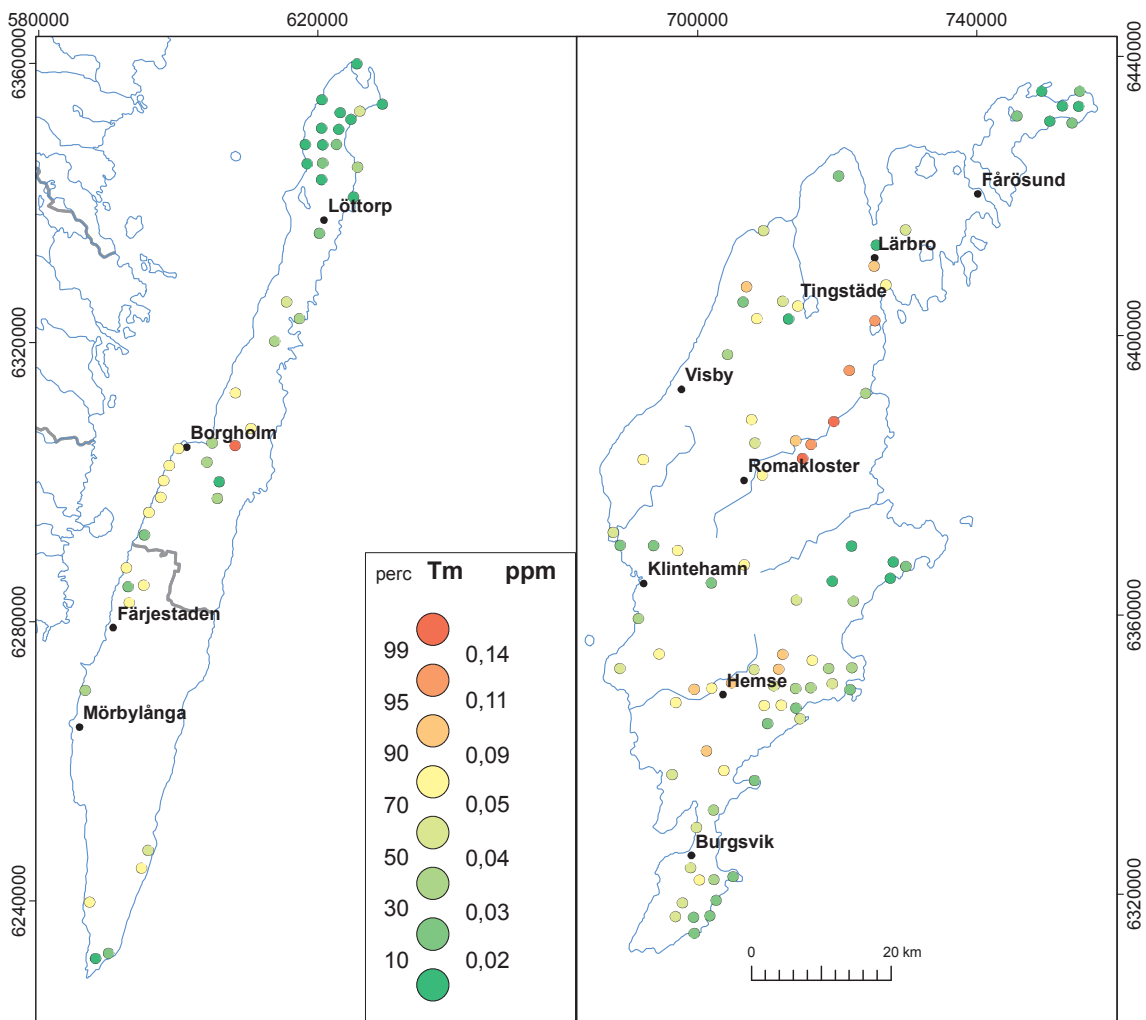
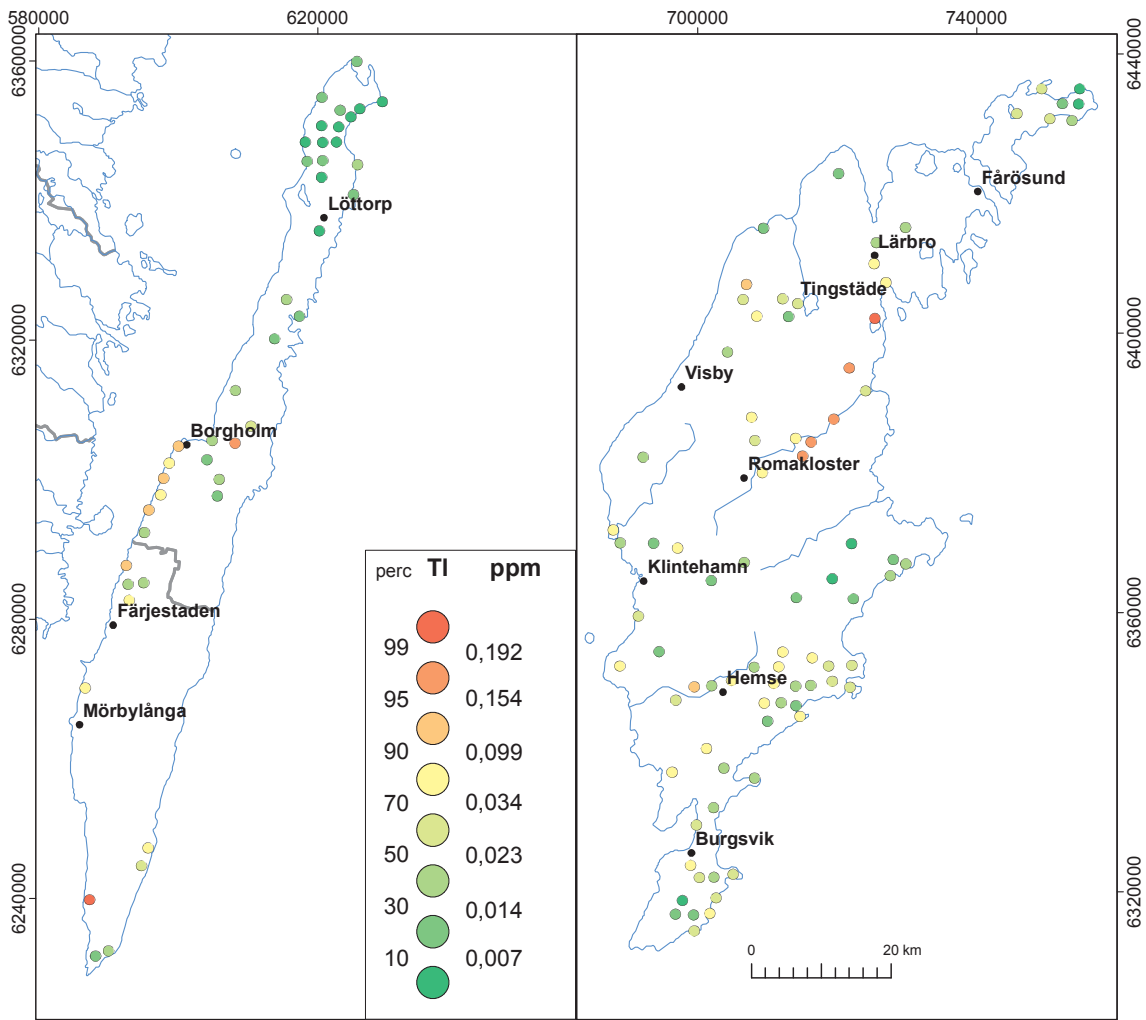


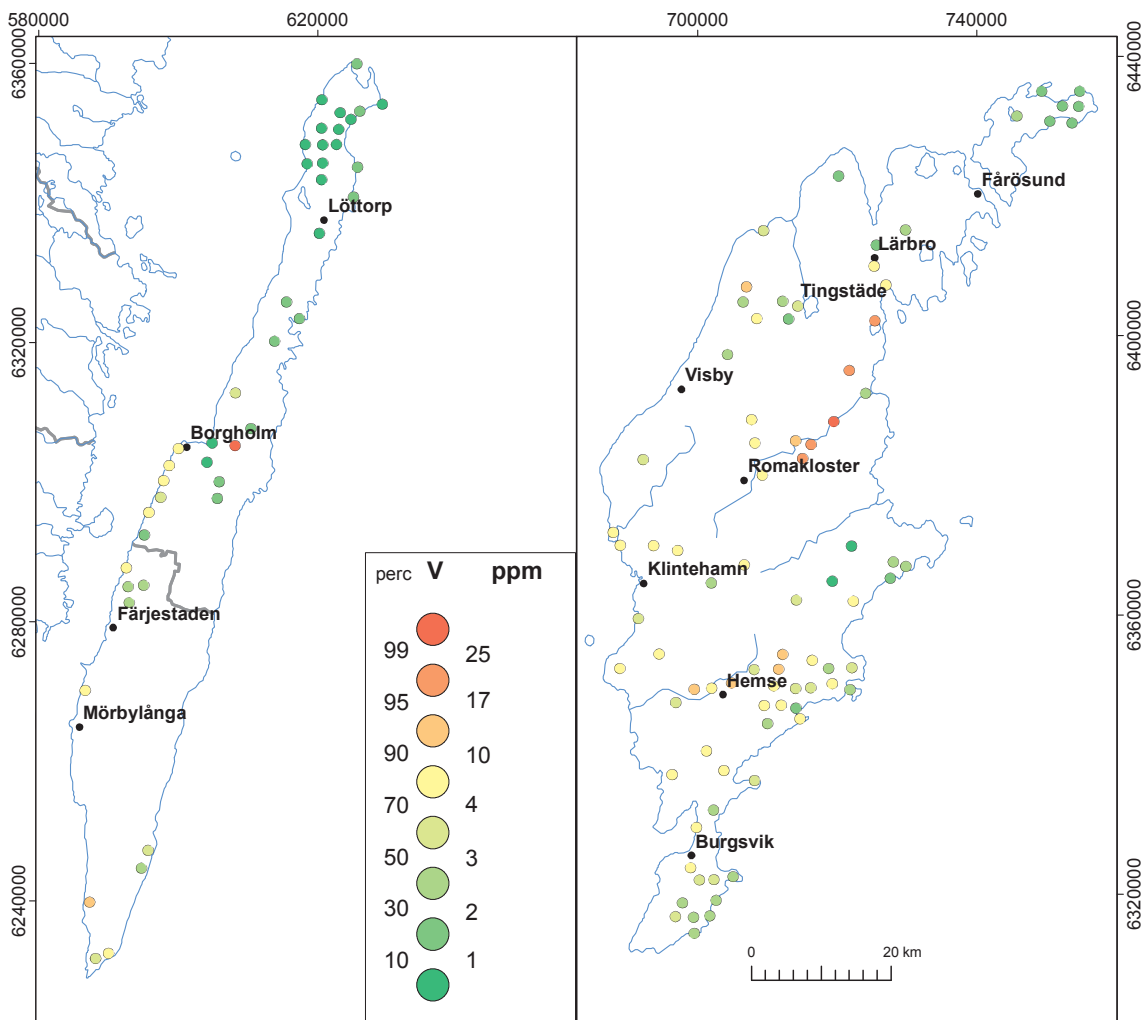
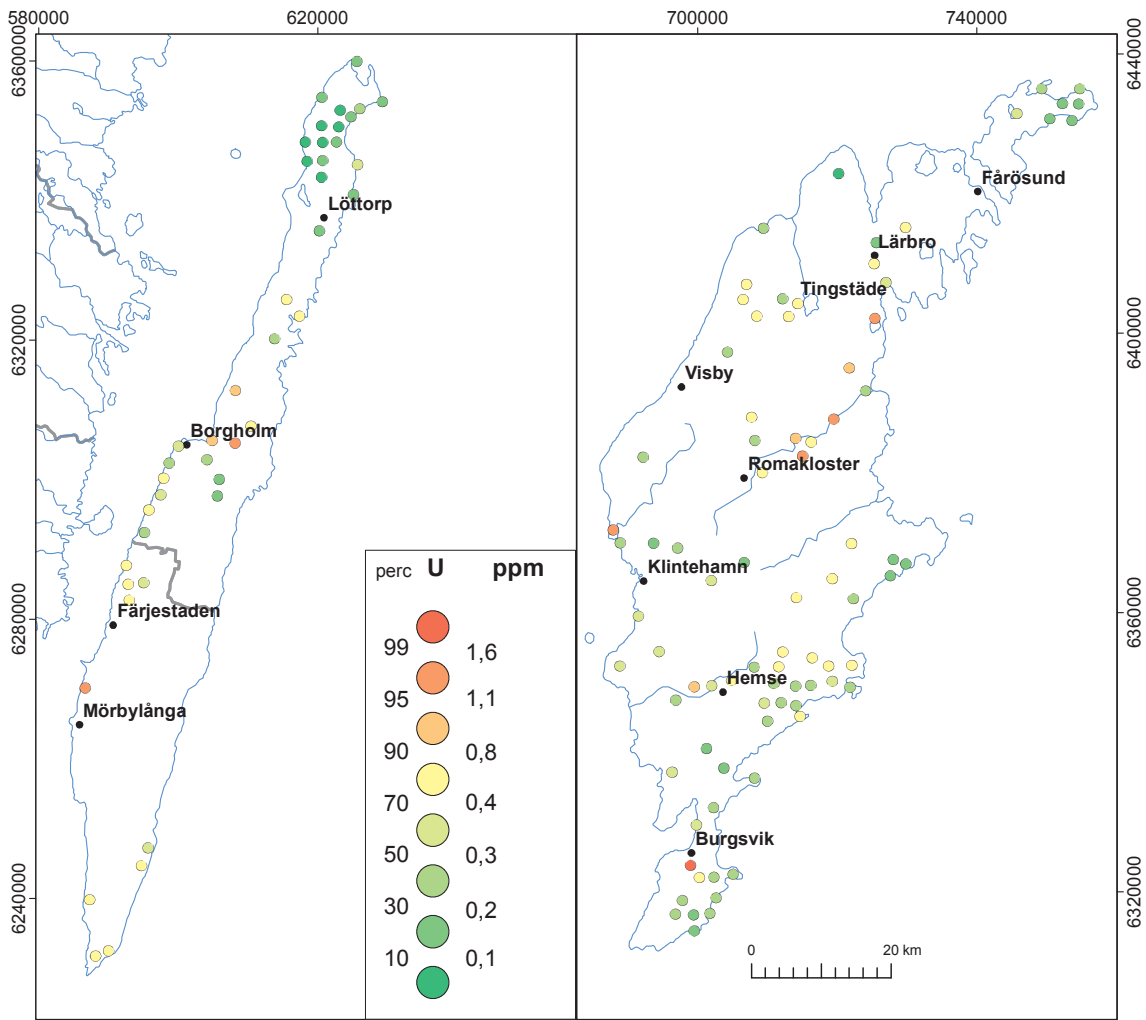


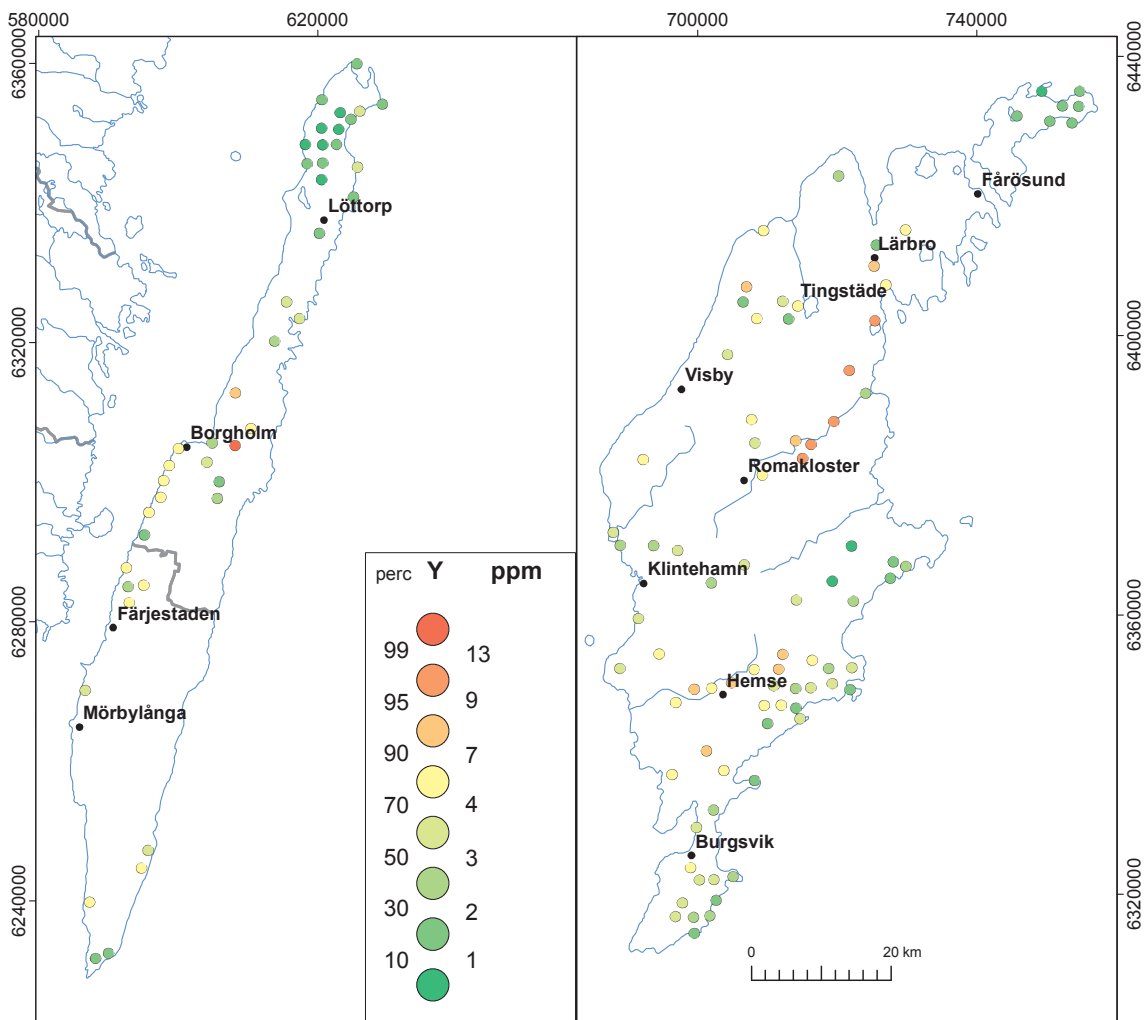
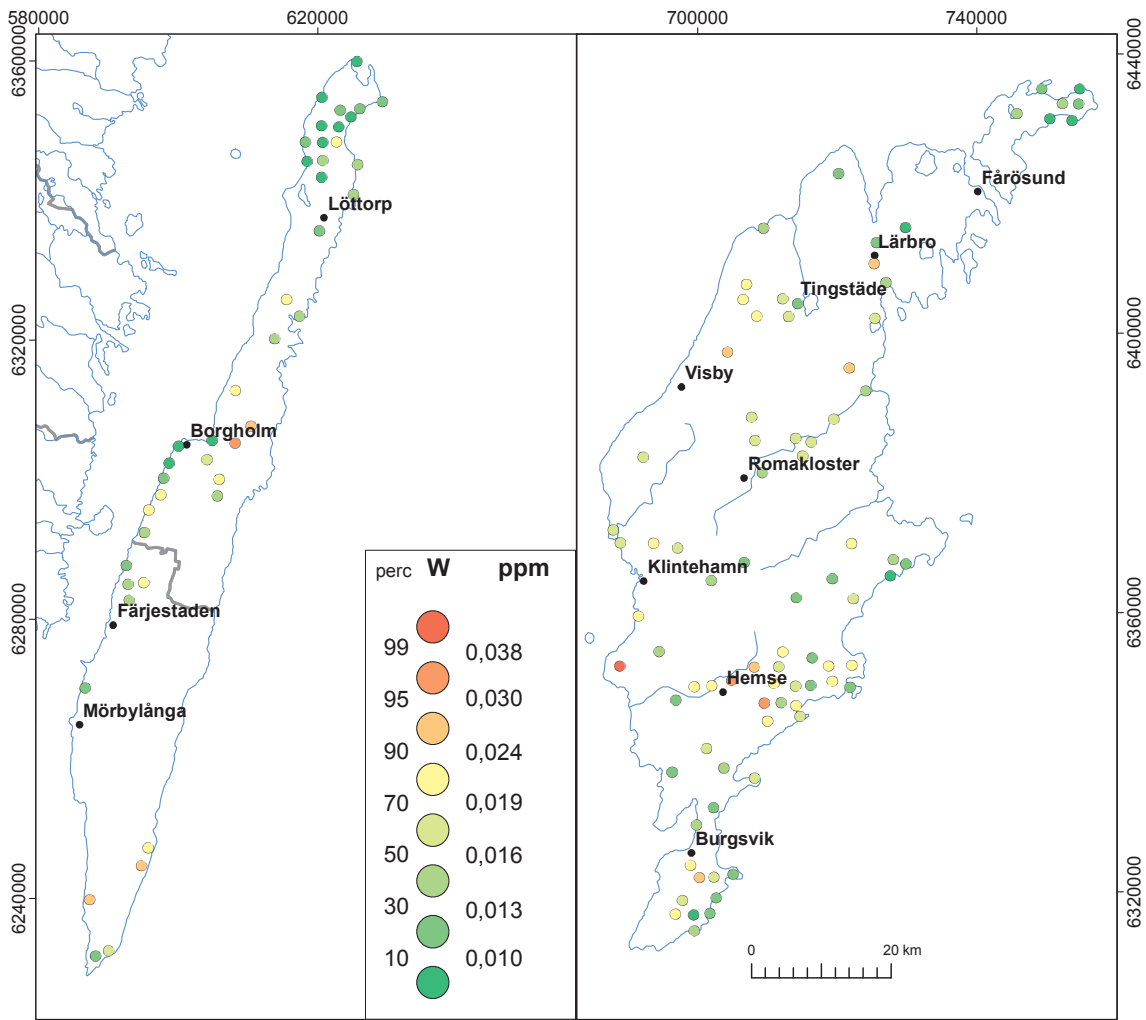


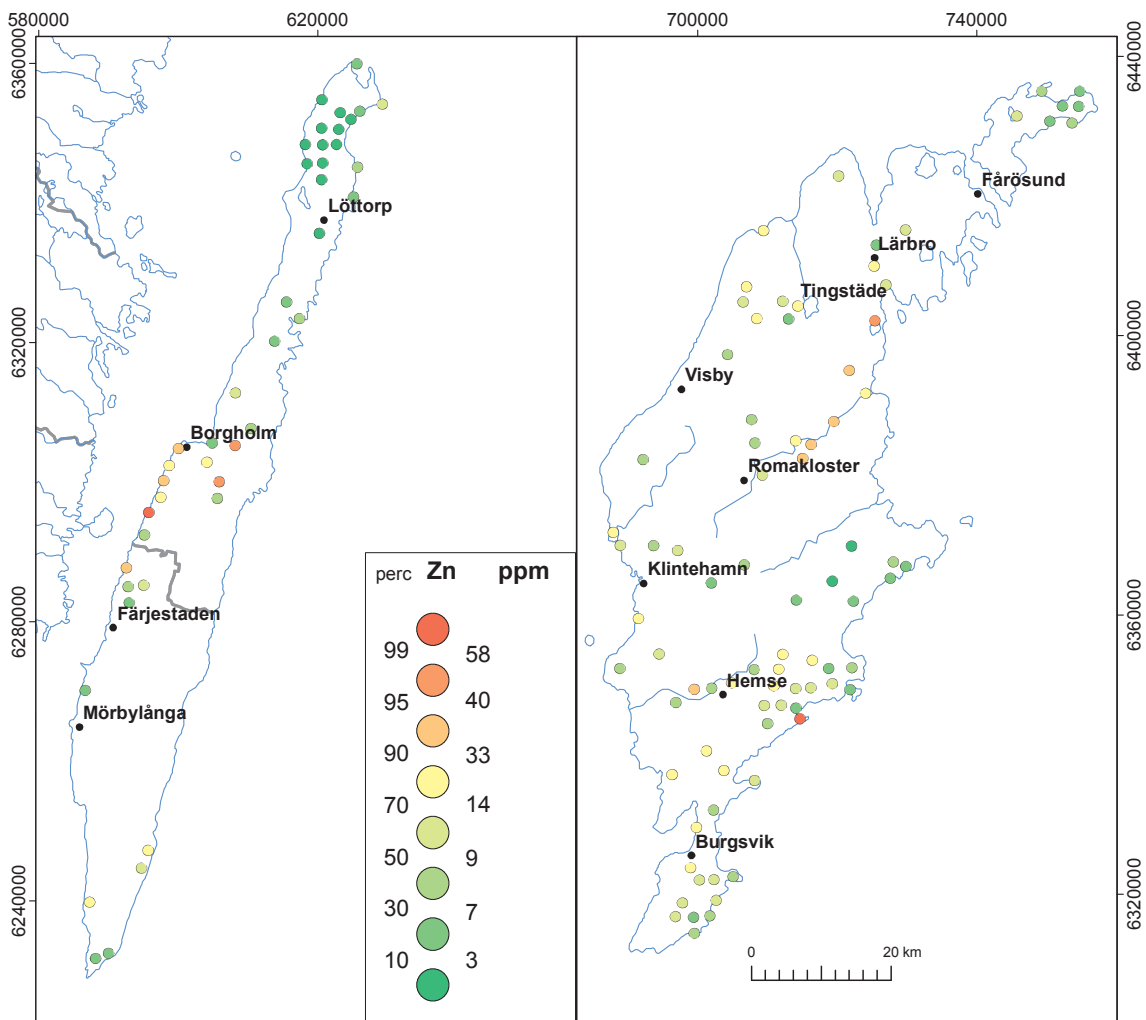
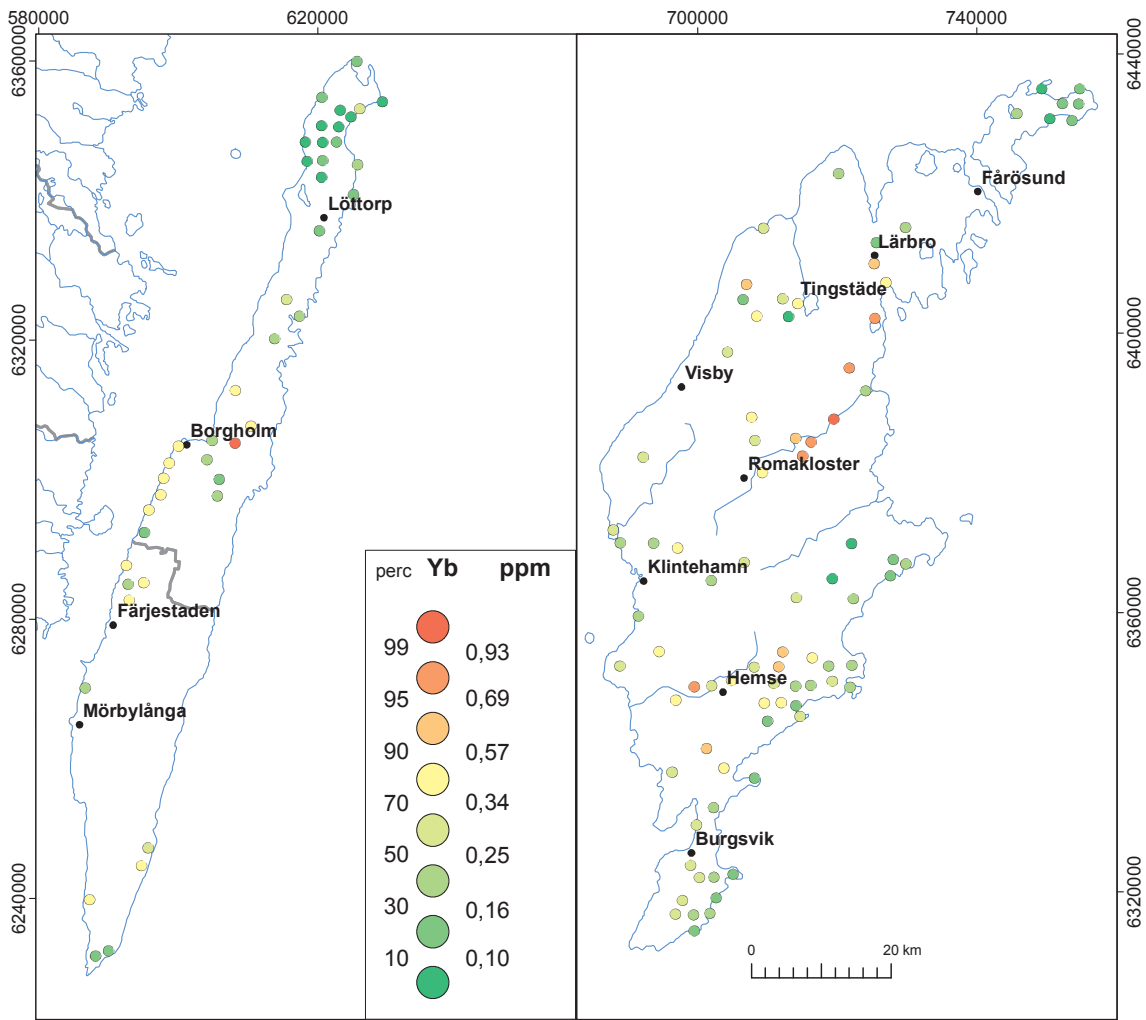




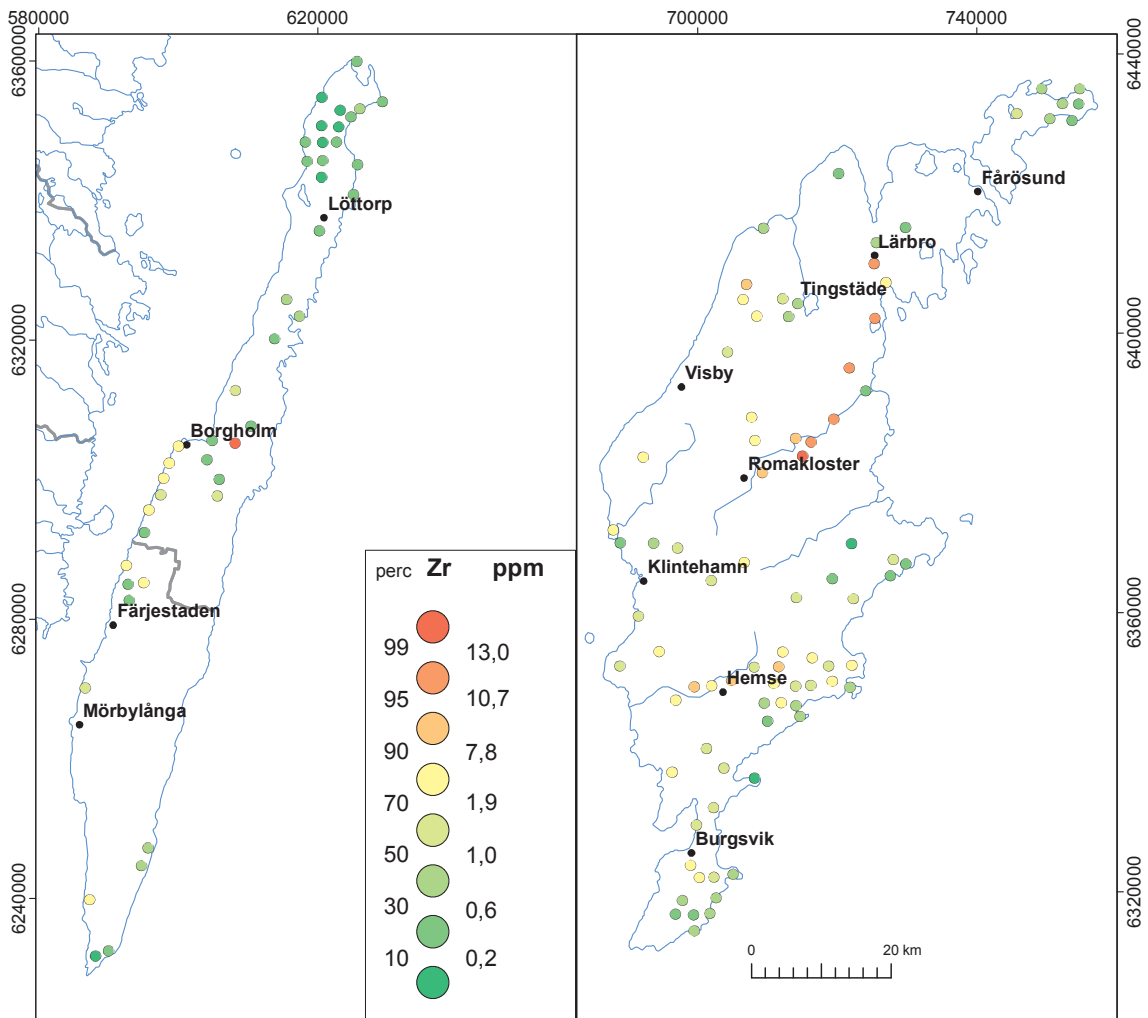












## BILAGA 2. ÖVERSIKTLIG ELEMENTBESKRIVNING

### *General description of elements*

Bilagan ger en kort beskrivning över elementens huvudsakliga förekomstssätt 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 spår-element 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, metamorf skiffer och i kol. Arsenik används som indikatorelement inom prospektering då det är ett grundämne som ofta förekommer tillsammans med epitermala och mesotermala 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, järnoxyhydroxider 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 spårelement 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 fälla 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 kalцит. 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 fälla 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-tantalit-serien. 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 oxidationstillståndet (+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. clausthalit 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 sprickssystem 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 mineral som bitot och pyroxen. Yttrium förekommer i senmagmatiska bergarter som granit och pegmatit, al-

kalina 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 spårelement 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-oxyhydroxider 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 spårelement 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 extraherbarheten 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.

## BILAGA 3. GENERELLA RIKTVÄRDEN FÖR FÖRORENAD MARK

### *General guideline values for contaminated soil*

Naturvårdsverkets generella riktvärden för förorenad mark (mg/kg TS). KM = känslig markanvändning och MKM = mindre känslig markanvändning (tabellen publicerad juni 2016).

Tabell över generella riktvärden för förorenad mark			
Ämne	KM	MKM	Kommentar
Antimon	12	30	
Arsenik	10	25	
Barium	200	300	
Bly	50	400	
Kadmium	0,8	12	
Kobolt	15	35	
Koppar	80	200	
Krom totalt	80	150	Om andelen krom (VI) är större än 1% av den totala kromhalten bör även krom (VI) riskbedömas
Krom (VI)	2	10	Anm 2
Kvicksilver	0,25	2,5	
Molybden	40	100	
Nickel	40	120	
Vanadin	100	200	
Zink	250	500	
Cyanid total	30	120	
Cyanid fri	0,4	1,5	Anm 2
Summa fenol och kresoler	1,5	5	Anm 2
Summa klorfenoler (mono - penta)	0,5	3	Anm 2
Summa mono- och diklorbensener	1	15	Anm 1, 2
Triklorbensener	1	10	
Summa tetra- och pentaklorbensener	0,5	2	
Hexaklorbensenen	0,035	0,1	
Diklormetan	0,08	0,25	Anm 1, 2
Dibromklormetan	0,5	2	Anm 1, 2
Bromdiklormetan	0,06	1	Anm 1, 2
Triklormetan	0,4	1,2	Anm 1, 2
Koltetraklorid (Tetraklormetan)	0,08	0,35	Anm 1, 2
1,2-dikloreten	0,02	0,06	Anm 1, 2
1,2-dibrometan	0,0015	0,025	Anm 1, 2
1,1,1-trikloreten	5	30	Anm 1, 2
Trikloreten	0,2	0,6	Anm 1, 2
Tetrakloreten	0,4	1,2	Anm 1, 2
Dinitrotoluen (2,4)	0,05	0,5	Anm 2
PCB-7	0,008	0,2	PCB-7 antas vara 20% av PCB-tot
Dioxin (TCDD-ekv WHO-TEQ)	0,00002	0,0002	Inkluderar även dioxinliknande PCB
PAH-L	3	15	PAH med låg molekylvikt
PAH-M	3,5	20	PAH med medelhög molekylvikt
PAH-H	1	10	PAH med hög molekylvikt
Bensen	0,012	0,04	Anm 1, 2
Toluen	10	40	Anm 1, 2
Etylbensen	10	50	Anm 1, 2
Xylen	10	50	Anm 1, 2
Alifat >C5-C8	25	150	Anm 1, 2
Alifat >C8-C10	25	120	Anm 1
Alifat >C10-C12	100	500	Anm 1
Alifat >C12-C16	100	500	
Alifat >C5-C16	100	500	Summa av alifatfraktioner ovan
Alifat >C16-C35	100	1000	
Aromat >C8-C10	10	50	
Aromat >C10-C16	3	15	
Aromat >C16-C35	10	30	
MTBE	0,2	0,6	Anm 1, 2
DDT, DDD, DDE	0,1	1	
Aldrin-Dieldrin	0,02	0,18	
Kvintozen-pentakloranilin	0,12	0,4	
Organiska tennföreningar	0,25	0,5	
Tributyltenn (TBT)	0,15	0,3	
Dibutyltenn (DBT)	1,5	5	
Monobutyltenn (MBT)	0,25	0,8	
Irgarol	0,004	0,015	
Diuron	0,025	0,08	

Anm 1 Ämnen som i stor utsträckning kan förekomma i porluft. Kompletterande analyser av markluft och inomhusluft rekommenderas.  
Anm 2 Ämnen som i stor utsträckning kan förekomma i grundvatten. Kompletterande analyser av grundvatten rekommenderas.